

УДК. 551.508.85
ККП
№ держ. реєстр. 0112 U 001572
Инв. №

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
(ОДЕКУ)

65016 м. Одеса, вул. Львівська, 15, тел. 35-73-71

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з НР

_____ Тучковенко Ю.С.
2014.12.31.

ЗВІТ

ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ

„Удосконалення методів і засобів отримання і обробки вимірювальної інформації
для цілей моніторингу навколишнього середовища”

Принципи побудови інформаційного поля радіолокаційної системи моніторингу
навколишнього середовища
(Заклучний)

Науковий керівник, к.т.н.

Б.В. Перелигін

Рукопис закінчено „31” грудня 2014 р.

СПИСОК АВТОРІВ

Науковий керівник		Перелигін Б.В.
К.т.н., доцент	2014.12.31	(Загальне керівництво, вступ, висновок)
Відповідальний виконавець		Вельміскін Д.І.
К.т.н., доцент	2014.12.31	(Збір та підготовка матеріалу, підрозділи 3.1, 4.1, 4.2, 5.1)
Д.ф.-м.н., професор	2014.12.31	Ковальчук В.В. (Підрозділ 2.3, 2.4, 2.5, 5.2)
К.т.н., професор	2014.12.31	Головань В.Г. (Розділ 3, підрозділи 3.1, 3.2)
К.т.н., доцент	2014.12.31	Лімонов О.С. (Розділ 5, підрозділи 1.1, 1.2, 4.3, 5.4)
К.т.н., доцент	2014.12.31	Лавріненко Ю.В. (Розділ 6, підрозділи 3.3, 3.4, 3.9, 5.6)
К.т.н., доцент	2014.12.31	Волков С.Л. (Підрозділи 3.5, 3.6)
К.т.н., доцент	2014.12.31	Великий В.І. (Підрозділи 5.3)
К.т.н., доцент	2014.12.31	Сергієнко А.В. (Підрозділи 6.1)
К.т.н., доцент	2014.12.31	Гор'єв С.А. (Підрозділи 6.2)
Старший викладач	2014.12.31	Пономаренко О.Л. (Підрозділи 2.1, 2.2, 6.3)

Асистент	<hr/>	Попов С.О. (Підрозділи 6.4)
	2014.12.31	
Асистент	<hr/>	Гордієнко В.І. (Підрозділи 1.5, 1.6)
	2014.12.31	
Асистент	<hr/>	Бучинська І.В. (Підрозділи 6.4)
	2014.12.31	
Асистент	<hr/>	Пустовіт Т.М. (Підрозділи 1.3, 1.4, 6.5)
	2014.12.31	
Асистент	<hr/>	Дяченко К.О. (Підрозділи 3.7, 3.8, 6.6. Оформлення проміжного звіту)
	2014.12.31	
Нормоконтролер	<hr/>	Малацковська С.В.
	2014.12.31	

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 184с., 36 рисунки, 10 табл., 36 джерел.

Метою даного заключного звіту є обґрунтування принципів побудови засобів отримання і обробки виміральної інформації для цілей моніторингу.

Запропоновано три етапи обробки радіолокаційної інформації при автоматизації радіолокаційних метеоспостережень, що можуть бути реалізовані як технічними, так і програмними засобами.

Показано, що отриману оперативну радіолокаційну інформацію на основі поляризаційних вимірів можна використовувати для рішення прогностичних задач.

Сформовано вимоги до точності вимірів і діапазонів вимірюваних величин розробленої апаратури й алгоритми первинної та вторинної обробки.

Пред'явлені вимоги до метеорологічних локаторів і запропоновано різні варіанти побудови поляризаційних локаторів.

Запропонована концепція розвитку та автоматизації систем моніторингу навколишнього середовища.

Проаналізовані різні системи (акустичні, радіоакустичні, оптичні) вітрове зондування.

Досліджені різні методи лідарного контролю повітряного басейну над промисловими та просторово-зосередженими об'єктами. Запропонована конфігурація комплексного газоаерозольного поляризаційного географічного лідара.

ЕТАП ОБРОБКИ, АВТОМАТИЗАЦІЯ, ІНФОРМАЦІЯ, ПЕРВИННА, ВТОРИННА ОБРОБКА, ТОЧНІСТЬ, ЯВИЩА ПОГОДИ, ЗОНДУВАННЯ, ЛІДАР, СОДАР.

Умови одержання звіту: за договором, 65016, м. Одеса, вул. Львівська, 15, ОДЕКУ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 ЦИФРОВА ОБРОБКА ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ	9
1.1 Екстраполяція дискретних сигналів з використанням фільтрів Калмана.....	9
1.2 Оптимальний рекурсивний фільтр Калмана.....	12
1.3 Скалярний екстраполятор Калмана.....	16
1.4 Векторний фільтр Калмана.....	20
1.5 Алгоритми векторного фільтра Калмана.....	24
1.6 Алгоритми векторного екстраполятора Калмана.....	26
2 ЛІНІЙНІ І НЕЛІНІЙНІ СИСТЕМИ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ.....	28
2.1 Вейвлет-аналіз в цифровій обробці сигналів.....	28
2.2 Матричні представлення.....	31
2.3 Зворотне вейвлет-перетворення.....	37
2.4 Матричні представлення H_v , A_v і D_v	39
2.5 Дискретні вейвлет-перетворення.....	43
3 СТВОРЕННЯ ЦИФРОВИХ КАРТ РЕЛЬЄФУ МІСЦЕВОСТІ ДЛЯ ЦІЛЕЙ МОНІТОРИНГУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА.....	47
3.1 Види рельєфу місцевості.....	48
3.2 Цифровий рельєф місцевості в географічних інформаційних системах.....	51
3.3 Метод створення цифрового рельєфу місцевості з використанням дистанційного зондування Землі.....	57
3.4 Метод створення цифрового рельєфу місцевості на основі топографічних карт.....	64
3.5 Оцінка можливості використання даних дистанційного зондування Землі для створення цифрового рельєфу місцевості.....	79

3.6	Оцінка можливості використання топографічних карт для створення цифрового рельєфу місцевості.....	85
3.7	Обґрунтування вибору топографічних карт для створення цифрового рельєфу місцевості.....	97
3.8	Процес розробки програмного забезпечення.....	100
3.9	Алгоритм розробки програмного продукту.....	102
3.10	Узагальнена функціональна схема одержання картографічної інформації.....	103
3.11	Функціональні підсистеми для побудови цифрового рельєфу місцевості.....	105
3.12	Технологія побудови цифрових моделей рельєфу по топографічних картах.....	106
4	ВИКОРИСТАННЯ ФІЛЬТРІВ ВІНЕРА І КАЛМАНА ДЛЯ ОБРОБКИ ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ.....	109
4.1	Реалізація фільтра Калмана для відновлення ізогіпс при побудові карт цифрового рельєфу.....	109
4.2	Аналіз фільтра Калмана стосовно до відновлення ізогіпс при побудові карт цифрового рельєфу.....	118
4.3	Оптимальна оцінка скалярних величин з використанням нерекурсивної і рекурсивної фільтрації Вінера.....	133
5	ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА З ВИКОРИСТАННЯМ СУЧАСНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ.....	140
5.1	Концепція автоматизації систем моніторингу навколишнього середовища.....	140
5.2	Сучасні інформаційні технології.....	142
5.3	Акустичні системи вітрового зондування, содари.....	144
5.4	Системи радіоакустичного зондування (RASS).....	148
5.5	Оптичні вітрові профайлери (лідари).....	149

5.6	Територіальна система екологічного моніторингу.....	155
6	ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ І ФУНКЦІОНУВАННЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ПОВІТРЯНОГО БАСЕЙНУ НАД ПРОСТОРОВО-ЗОСЕРЕДЖЕНИМИ ПРОМИСЛОВО-ГОСПОДАРСЬКИМИ ОБ'ЄКТАМИ.....	158
6.1	Постановка задачі.....	158
6.2	Лідарний газоаналіз атмосфери.....	160
6.3	Лідарний контроль стану атмосфери методом диференціального поглинання і диференціального розсіювання.....	162
6.4	Лідарний контроль стану атмосфери методом спонтанного комбінаційного розсіювання.....	168
6.5	Лідарний контроль за станом атмосферного аерозоля.....	170
6.6	Пристрій і принцип дії комплексного газоаерозольного поляризаційного голографічного лідара.....	173
	ВИСНОВКИ	179
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	181

ВСТУП

Представлення гідрометеорологічної інформації в цифровому вигляді, обробка її з використанням комп'ютерних інформаційних технологій потребує подальшого дослідження та розвитку способів цифрової обробки гідрометеорологічної інформації, таких як цифрова фільтрація, вейвлет аналіз цифрових сигналів, створення цифрових карт рельєфу місцевості для цілей моніторингу навколишнього середовища.

В даному звіті проводяться дослідження фільтрації Калмана для обробки гідрометеорологічної інформації, аналізується пряме і зворотне вейвлет-перетворення цифрової інформації. Особливу увагу приділено дослідженню можливостей створення цифрових карт рельєфу місцевості, використанню фільтрів Вінера і Калмана для вирішення проблемних питань.

Не менш важливою проблемою в даний час є питання радіозондування засновані на компютерних технологіях. Вони дозволяють використовувати різні системи (акустичні, радіоакустичні, оптичні) радіозондування.

Інша дуже важлива проблема є утворення системи моніторингу повітряного басейну над різними об'єктами. В звіті проаналізовані різні методи лідарного контролю складу атмосфери та запропонуємо прилад в вигляді комплексного газоаерозольного поляризаційного голографічного лідара.

Метою заключного звіту являється обґрунтування принципів використання комп'ютерних технологій для отримання вимірювальної метеоінформації для цілей моніторингу навколишнього середовища.

1 ЦИФРОВА ОБРОБКА ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

1.1 Екстраполяція дискретних сигналів з використанням фільтрів Калмана

Оцінюваний випадковий сигнал моделюється як рекурсивний процес білого шуму першого порядку з нульовим середнім значенням, змінний у часі відповідно до динамічного рівняння

$$\delta(\hat{e}) = a\delta(\hat{e}-1) + w(\hat{e}-1). \quad (1.1)$$

На рис.1.1 представлена модель формування такого випадкового сигналу (рис.1.1,а) і модель його вимірювання (рис.1.1,б).

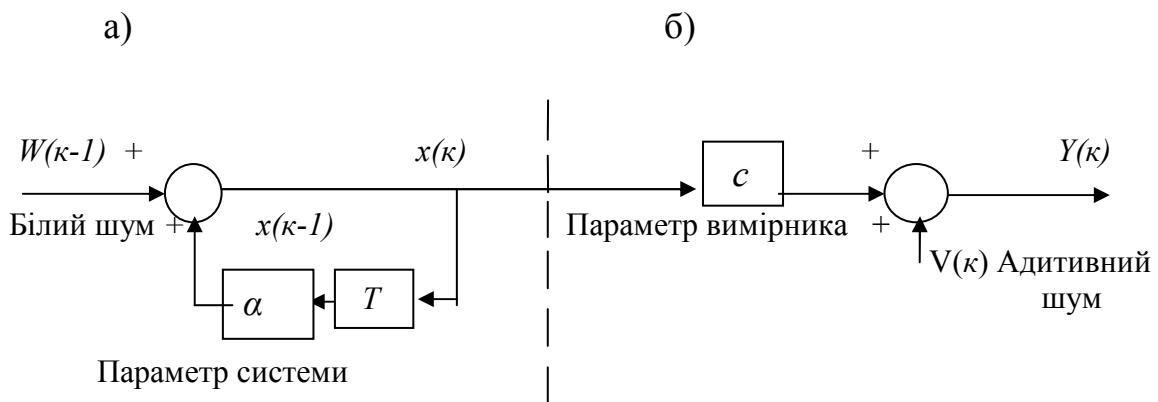


Рисунок 1.1 - Модель формування і вимірювання випадкового сигналу;
а) - формування випадкового сигналу; б) - вимірювання випадкового сигналу

У цій моделі $\delta(0) = 0$, тобто початкове значення вибірки сигналу дорівнює нулю – $\delta(\hat{e}) = 0$ і $w(\hat{e}) = 0$ при $\hat{e} \leq 0$.

Дисперсія і кореляційна функція визначаються як:

$$A[w(\hat{e})] = 0; \quad A[w(\hat{e})w(j)] = \begin{cases} 0, \hat{e} \neq j; \\ \sigma_w^2, \hat{e} = j. \end{cases} \quad (1.2)$$

При $\sigma_w^2 = 0$ процес білого шуму відсутній; для $a = 1$ при початкових умовах $\tilde{\delta}(0) = \tilde{\delta} \neq 0$ маємо $\tilde{\delta}(\hat{e}) = \tilde{\delta}(\hat{e} - 1)$ з постійним параметром сигналу $\tilde{\delta}$.

Випадковий процес (1.1) можна представити [1] процесом авторегресії першого порядку. Його статистичні параметри:

$$E[\tilde{\delta}(\hat{e})] = 0;$$

$$E[\tilde{\delta}^2(\hat{e})] = P_x(0) = \sigma_x^2 = \frac{\sigma_w^2}{1 - a^2}; \quad (1.3)$$

$$E[\tilde{\delta}(\hat{e}) \times V(\hat{e} + j)] = P_x(j) = a^{|j|} \times P_x(0), \quad (1.4)$$

де j - інтервал між вибірками;

$P_x(j)$ - автокореляційна функція випадкового процесу.

При $j = 0$

$$\begin{aligned} P_x(0) &= A[\tilde{\delta}^2(\hat{e})] = E[ax(\hat{e} - 1) + w(\hat{e} - 1)]^2 = \\ &= a^2 E[x^2(\hat{e} - 1)] + A[w^2(\hat{e} - 1)] + 2aA[\tilde{\delta}(\hat{e} - 1) \times w(\hat{e} - 1)], \end{aligned}$$

$$P_x(0) = a^2 P_x(0) + P_w(0).$$

При $P_x(0) = \sigma_{\tilde{\delta}}^2$, $P_w(0) = \sigma_{\tilde{\delta}}^2$, одержуємо рівняння (1.3). Результат відповідає стаціонарному стану фільтра протягом тривалого часу, коли

$$\mathring{A}[\tilde{\delta}^2(\hat{e})] = E[x^2(\hat{e}-1)].$$

Коли третій член попереднього рівняння дорівнює нулю, тоді

$$E[x(\hat{e}-1) \times w(\hat{e}-1)] = \mathring{A}\{[\dot{a}\tilde{\delta}(\hat{e}-2) \times w(\hat{e}-2)]w(\hat{e}-1)\} = 0. \quad (1.5)$$

Для $j=1$

$$\begin{aligned} P_x(1)E[x(\hat{e}) \times x(\hat{e}-1)] &= \mathring{A}\{\tilde{\delta}(\hat{e})[ax(\hat{e}) + w(\hat{e})]\} = \\ &= \dot{a}\mathring{A}[\tilde{\delta}^2(\hat{e})] + E[\tilde{\delta}(\hat{e}) \times w(\hat{e})] = aPx(0). \end{aligned}$$

Тут другий член дорівнює нулю відповідно до (1.5).

Для $j=2$

$$\begin{aligned} P_x(2)E[x(\hat{e}) \times x(\hat{e}+2)] &= \mathring{A}\{\tilde{\delta}(\hat{e})[ax(\hat{e}-1) + w(\hat{e}+1)]\} = \\ &= \dot{a}\mathring{A}[\tilde{\delta}(\hat{e}) \times x(\hat{e}+1)] + E[\tilde{\delta}(\hat{e}) \times w(\hat{e}+1)] = aPx(1) = \dot{a}^2 D\tilde{\delta}(0). \end{aligned}$$

І так далі для інших значень j . При негативних j результат аналогічний, і $P_x(j) \neq 0$ для будь-яких j воно зменшується, коли $|j|$ зростає, і коливається між позитивними і негативними величинами, коли a негативно.

Параметр a є постійною величиною часу процесу – чим ближче a прагне до 1, тим повільніше процес з великими інтервалами між вибірками.

Лінійний вимірник випадкового процесу, представлений на рис.1,б, описується рівнянням

$$y(\hat{e}) = \tilde{n}\tilde{\delta}(\hat{e}) + V(\hat{e}), \quad (1.6)$$

де $\tilde{\delta}(\hat{e})$ - сигнал, що міняється в часі;

\tilde{n} - параметр вимірника;

$V(\hat{e})$ - незалежний адитивний білий шум з нульовою середнім і дисперсією σ_v^2 .

1.2 Оптимальний рекурсивний фільтр Калмана

Алгоритм рекурсивного вимірника представляється у вигляді:

$$\hat{\delta}(\hat{e}) = a(\hat{e}) \times \hat{\delta}(\hat{e} - 1) + \hat{a}(\hat{e}) \times \acute{o}(\hat{e}). \quad (1.7)$$

Тут перший член - зважена попередня оцінка; другий член – зважена поточна інформація.

Величина $\hat{\delta}(\hat{e})$ - це оцінка параметра $\tilde{\delta}$ тільки для одного значення інформації в момент \hat{e} .

Використовуючи рівняння (1.7), необхідно визначити “кращу” оцінку з мінімальної середньої квадратичною помилкою.

При цьому з мінімуму середньої квадратичної помилки впливає що:

$$D(\hat{e}) = A \left[\hat{a}^2(\hat{e}) \right]; \quad e(\hat{e}) = \hat{\delta}(\hat{e}) - x(\hat{e}), \quad (1.8)$$

де $e(\hat{e})$ - помилка, визначаються $\hat{a}(\hat{e})$ і $\hat{a}(\hat{e})$ - вагові параметри.

Зробивши заміну $\hat{\delta}(\hat{e})$ в рівнянні (1.7), одержуємо

$$D(\hat{e}) = A \left[\hat{a}(\hat{e}) \times \hat{\delta}(\hat{e} - 1) + \hat{a}(\hat{e}) \times \acute{o}(\hat{e}) - \tilde{\delta}(\hat{e}) \right]^2. \quad (1.9)$$

Коли продиференціювати по $\hat{a}(\hat{e})$ і $\hat{a}(\hat{e})$, знайдемо:

$$\frac{dD(\hat{e})}{da(\hat{e})} = 2\hat{A}[\dot{a}(\hat{e}) \times \hat{\delta}(\hat{e}-1) + \hat{a}(\hat{e}) \times \acute{o}(\hat{e}) - \check{\delta}(\hat{e})] \hat{\delta}(\hat{e}-1) = 0; \quad (1.10)$$

$$\frac{dD(\hat{e})}{d\hat{a}(\hat{e})} = 2\hat{A}[\dot{a}(\hat{e}) \times \hat{\delta}(\hat{e}-1) + \hat{a}(\hat{e}) \times \acute{o}(\hat{e}) - \check{\delta}(\hat{e})] \acute{o}(\hat{e}) = 0; \quad (1.11)$$

або

$$\hat{A}[e(\hat{e}) \times \hat{\delta}(\hat{e}-1)] = 0; \quad (1.12)$$

$$\hat{A}[e(\hat{e}) \times y(\hat{e})] = 0. \quad (1.13)$$

Ці рівняння (1.12) і (1.13) є ортогональні при оцінці результатів вимірів, вона дозволяє визначити взаємну залежність між $\dot{a}(\hat{e})$ і $\hat{a}(\hat{e})$

$$\dot{a}(\hat{e}) = \dot{a}[1 - \hat{n}\hat{a}(\hat{e})]. \quad (1.14)$$

Підставивши (1.14) у (1.7), одержимо

$$\hat{x}(\hat{e}) = \dot{a}\hat{\delta}(\hat{e}-1) + \hat{a}(\hat{e})[\acute{o}(\hat{e}) - \hat{n}\hat{\delta}(\hat{e}-1)]. \quad (1.15)$$

Тут перший член рівняння – краща оцінка; $\hat{x}(\hat{e})$ без якої – або додаткової інформації – екстраполяція, основна на останньому вимірі. Другий член – виправлення, обумовлений різницею нового значення вибірки й оцінки виміру, з перемінним ваговим фактором. Це показано на рис. 1.2, де представлена модель оптимального рекурсивного фільтра Калмана.

Вагова функція $\hat{a}(\hat{e})$ представляється у вигляді:

$$\hat{a}(\hat{e}) = \frac{\hat{n}[\dot{a}^2 D(\hat{e}-1) + \sigma_w^2]}{\sigma_v^2 + c^2 \sigma_w^2 + c^2 \dot{a}^2 D(\hat{e}-1)}, \quad (1.16)$$

середня квадратична оцінка визначається як

$$D(\hat{e}) = \frac{1}{\tilde{n}} \sigma_v^2 \cdot \hat{a}(\hat{e}), \quad (1.17)$$

тоді $D(\hat{e})$ і $\hat{a}(\hat{e})$ мають пряму залежність.

При $\hat{a} = \tilde{n} = 1$, $\sigma_w^2 = 0$, одержуємо для нерекурсивного вимірювача

$$\frac{D(\hat{e}+1)}{D(\hat{e})} = \frac{1}{1 + D(\hat{e})/\sigma_v^2}. \quad (1.18)$$

На відміну від систем з нерекурсивною оцінкою $\hat{x}(1)$, заснованих на першому вимірі (як на рис.1,1а), одержуємо величину $\hat{x}(0)$ з мінімізацією:

$$P(0) = E[x(\hat{e}) - \hat{\delta}(0)]^2; \quad \frac{dP(0)}{d\hat{x}(0)} = -2A[\hat{\delta}(\hat{e}) - \hat{\delta}(0)] = 0,$$

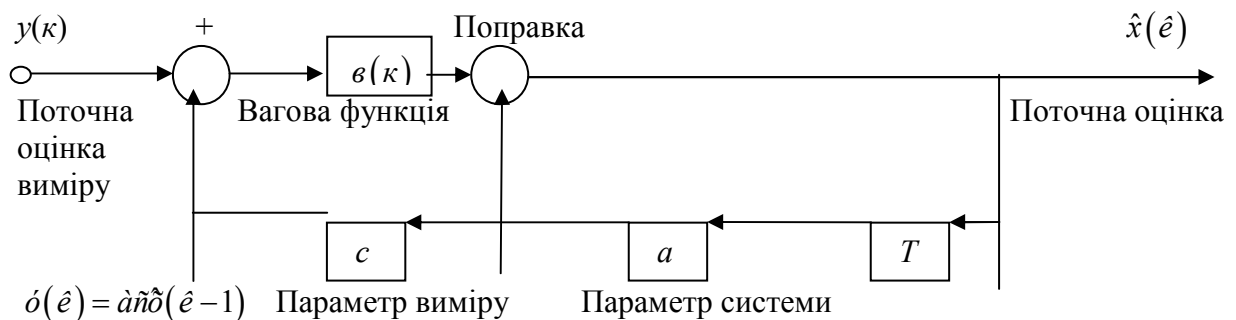


Рисунок 1.2 - Модель оптимального рекурсивного фільтра Калмана

При $\hat{\delta}(0) = E[x(\hat{e})]$, тобто краща оцінка $\hat{\delta}(0)$ - це середнє значення $x(\hat{e})$.

Для $\hat{\delta}(0) = 0$ і першої вибірки інформації $\hat{o}(1)$ з рівняння (1.5) маємо $\hat{\delta}(1) = \hat{a}(1) \cdot \hat{o}(1)$.

Тут, при $E\{[\tilde{o}(1) - \hat{\tilde{o}}(1)]\dot{o}(1)\} = 0$, де $\dot{o}(1) = \tilde{o}(1) + V(1)$ і $c = 1$,
 $\hat{a}(1) = \frac{\sigma_{\tilde{o}}^2}{\sigma_x^2 + \sigma_v^2}$. Для $\sigma_v^2 = \sigma_w^2$, $\dot{a}^2 = \frac{1}{2}$, з рівняння (1.3) маємо $\sigma_w^2 = 2\sigma_v^2$, і в
даному випадку $\hat{a}(1) = \frac{2}{3} = 0,67$.

Аналогічно при цих значеннях з рівняння (1.5) одержуємо:

$$D(1) = \frac{2}{3}\sigma_v^2; \quad \hat{a}(2) = \frac{\dot{a}^2 D(1) + \sigma_w^2}{\sigma_v^2 + \sigma_w^2 + \dot{a}^2 D(1)} = \frac{4}{7}.$$

При зростанні кількості кроків k , що $D(\hat{e}) \rightarrow D(\hat{e}-1) \rightarrow D = 0,56\sigma_v^2$
установилася величина процесу дорівнює 0,56.

Алгоритм обчислень:

- рекурсивна оцінка фільтра

$$\hat{x}(\hat{e}) = \dot{a}\hat{\tilde{o}}(\hat{e}-1) + \hat{a}(\hat{e})\left[\dot{o}(\hat{e}) - \dot{a}\hat{\tilde{o}}(\hat{e}-1)\right]; \quad (1.19)$$

- вагова функція фільтра

$$\hat{a}(\hat{e}) = \tilde{n}D_1(\hat{e})\left[\tilde{n}^2 D_1(\hat{e}) + \sigma_v^2\right]^{-1}, \quad (1.20)$$

де

$$P_1(\hat{e}) = \dot{a}^2 D(\hat{e}-1) + \sigma_w^2; \quad (1.21)$$

середня квадратична помилка

$$D(\hat{e}) = D_1(\hat{e}) - c\hat{a}(\hat{e})D_1(\hat{e}). \quad (1.22)$$

Отриманий набір рівнянь (1.19)-(1.22) описує одномірний скалярний
фільтр Калмана для моделі сигналу (1.1) і моделі вимірювача за рівнянням

(1.6), і є алгоритмом для оптимального рекурсивного фільтра Калмана.

1.3 Скалярний екстраполятор Калмана

У різних задачах виникає необхідність пророкування – екстраполяції наступного кроку. Можлива одноступенева, двохступенева або m – ступенева екстраполяція, чим далі в майбутнє ми можемо заглянути, тим більше буде помилка екстраполяції.

Для одноступеневої екстраполяції використовуємо алгоритми сигналу (1.1) і виміру з додаванням адитивного шуму (1.6).

Необхідна краща лінійна оцінка величини сигналу $\delta(\hat{e}+1)$ в момент $\hat{e}+1$, що даний інформацією й оцінкою в попередній момент \hat{e} . Позначимо оцінку одноступеневої екстраполяції $\hat{\delta}\left(\frac{\hat{e}+1}{\hat{e}}\right)$. “Кращої” є екстраполяція з мінімально середньою квадратичною помилкою

$$D\left(\frac{\hat{e}+1}{\hat{e}}\right) = A \left[a^2 \left(\frac{\hat{e}+1}{\hat{e}} \right) \right] = A \left[\delta(\hat{e}+1) - \hat{\delta}\left(\frac{\hat{e}+1}{\hat{e}}\right) \right]^2, \quad (1.23)$$

де $D(\hat{e}) = A \left[\delta(\hat{e}) - \hat{\delta}(\hat{e}) \right]^2$ - середня квадратична помилка фільтрації; точна оцінка фільтрації - $\hat{\delta}\left(\frac{\hat{e}}{\hat{e}}\right)$.

Рекурсивна форма для одноступеневого екстраполятора описується як

$$\hat{\delta}\left(\frac{\hat{e}+1}{\hat{e}}\right) = \alpha(\hat{e}) \cdot \hat{\delta}\left(\frac{\hat{e}}{\hat{e}-1}\right) + \beta(\hat{e}) \cdot \delta(\hat{e}). \quad (1.24)$$

Параметри $\alpha(\hat{e})$ і $\beta(\hat{e})$ обираються з умови мінімізації середньої квадратичної оцінки екстраполяції – рівняння (1.23).

Ортогональні рівняння мають вигляд:

$$A \left[\hat{a} \left(\frac{\hat{e}+1}{\hat{e}} \right) \cdot \hat{\delta} \left(\frac{\hat{e}}{\hat{e}-1} \right) \right] = 0; \quad (1.25)$$

$$A \left[\hat{a} \left(\frac{\hat{e}+1}{\hat{e}} \right) \cdot \hat{o}(\hat{e}) \right] = 0; \quad (1.26)$$

$$\alpha(\hat{e}) = \hat{a} - \hat{a} \cdot \beta(\hat{e}). \quad (1.27)$$

Співвідношення (1.27) визначається з рівняння (1.25). Підставивши результат (1.27) у рівняння екстраполяції (1.24), одержимо

$$\hat{\delta} \left(\frac{\hat{e}+1}{\hat{e}} \right) = \hat{a} \hat{\delta} \left(\frac{\hat{e}}{\hat{e}-1} \right) + \beta(\hat{e}) \cdot \left[\hat{o}(\hat{e}) - \hat{n} \hat{\delta} \left(\frac{\hat{e}}{\hat{e}-1} \right) \right]. \quad (1.28)$$

Параметр $\beta(\hat{e})$ визначається з рівнянь (1.24) і (1.27).

В результаті

$$D \left(\frac{\hat{e}+1}{\hat{e}} \right) = \frac{\hat{a}}{\hat{n}} \sigma_v^2 \cdot \beta(\hat{e}) + \sigma_w^2, \quad (1.29)$$

де

$$\beta(\hat{e}) = \frac{acD \left(\frac{\hat{e}}{\hat{e}-1} \right)}{c^2 D \left(\frac{\hat{e}}{\hat{e}-1} \right) + \sigma_v^2}. \quad (1.30)$$

За допомогою рівняння (1.30) визначається $\beta(\hat{e})$ з попередніх середніх квадратичних оцінок екстраполяції для $D \left(\frac{\hat{e}+1}{\hat{e}} \right)$.

При цьому оптимальний процесор перемножує попередню оцінку на \hat{a} і складає зважені виправлені величини, що містять точну різницю між новою

вибіркою інформації $\hat{o}(\hat{e})$ і попередньою оцінкою екстраполяції $\tilde{\hat{o}}\left(\frac{\hat{e}}{\hat{e}-1}\right)$, що впливає з алгоритму (1.24).

Виразовуючи з рівняння (1.21) випадкову величину $\sigma_w^2 = 0$, одержимо визначення вхідного сигналу у вигляді $x(\hat{e}) = a\hat{\delta}(\hat{e}-1)$, і для оцінки $\hat{\delta}(\hat{e})$ в момент \hat{e} - екстраполяцію оцінки в момент $\hat{e}+1$ у вигляді при відсутності іншої додаткової інформації.

$$\hat{\delta}\left(\frac{\hat{e}+1}{\hat{e}}\right) = \hat{\delta}(\hat{e}). \quad (1.31)$$

Така інтуїтивна форма оцінки придатна тільки для моделей із шумом $w(\hat{e}-1)$, що незалежний від усіх попередніх значень більш ранніх, чим \hat{e} .

Відповідно до (1.31) і (1.15) одержуємо рівняння екстраполяції, аналогічне з рівнянням (1.28):

$$\hat{\delta}(\hat{e}) = \hat{\delta}\left(\frac{\hat{e}+1}{\hat{e}}\right) = \hat{\delta}\left(\frac{\hat{e}}{\hat{e}-1}\right) + \hat{\beta}(\hat{e}) \left[\hat{o}(\hat{e}) - \tilde{\hat{o}}\left(\frac{\hat{e}}{\hat{e}-1}\right) \right], \quad (1.32)$$

де $\hat{\beta}(\hat{e}) = \hat{\beta}(\hat{e})$ - тут вагова функція екстраполяції і фільтрації залежні від параметра фільтра $\hat{\beta}$.

Середня квадратична помилка оцінки $D(\hat{e})$ і помилки екстраполяції $D\left(\frac{\hat{e}+1}{\hat{e}}\right)$ мають наступну залежність:

$$\begin{aligned} D\left(\frac{\hat{e}+1}{\hat{e}}\right) &= \hat{A} \left[\hat{\delta}(\hat{e}+1) - \hat{\delta}\left(\frac{\hat{e}+1}{\hat{e}}\right) \right]^2 = \hat{A} \left[\hat{\beta}(\hat{e}) \hat{\delta}(\hat{e}) + w(\hat{e}) - \hat{\beta}(\hat{e}) \hat{\delta}(\hat{e}) \right]^2 = \\ &= \hat{A} \left\{ \hat{\beta}(\hat{e}) \left[\hat{\delta}(\hat{e}) - \hat{\delta}(\hat{e}) \right] + w(\hat{e}) \right\}^2, \end{aligned}$$

відповідно до рівнянь (1.23) і (1.31).

Тому що шум $w(\hat{e})$ некорельований з величиною помилки $\delta(\hat{e}) - \hat{\delta}(\hat{e})$, тоді

$$D\left(\frac{\hat{e}+1}{\hat{e}}\right) = a^2 \delta + \sigma_w^2. \quad (1.33)$$

На рис. 1.3 приведена модель оптимального одноступеневого рекурсивного екстраполятора Калмана; на рис. 1.4 – модель одночасної фільтрації й екстраполяції.

Результат обчислень по алгоритму екстраполяції представляється у вигляді:

- рівняння екстраполяції

$$\hat{x}\left(\frac{\hat{e}+1}{\hat{e}}\right) = a\hat{\delta}\left(\frac{\hat{e}}{\hat{e}-1}\right) + \beta(\hat{e})\left[\hat{o}(\hat{e}) - \tilde{n}\hat{\delta}\left(\frac{\hat{e}}{\hat{e}-1}\right)\right]; \quad (1.34)$$

- вагова функція екстраполятора

$$\beta(\hat{e}) = ap\left(\frac{\hat{e}}{\hat{e}-1}\right) \cdot \left[\tilde{n}^2 p\left(\frac{\hat{e}}{\hat{e}-1}\right) + \sigma_v^2\right]^{-1}; \quad (1.35)$$

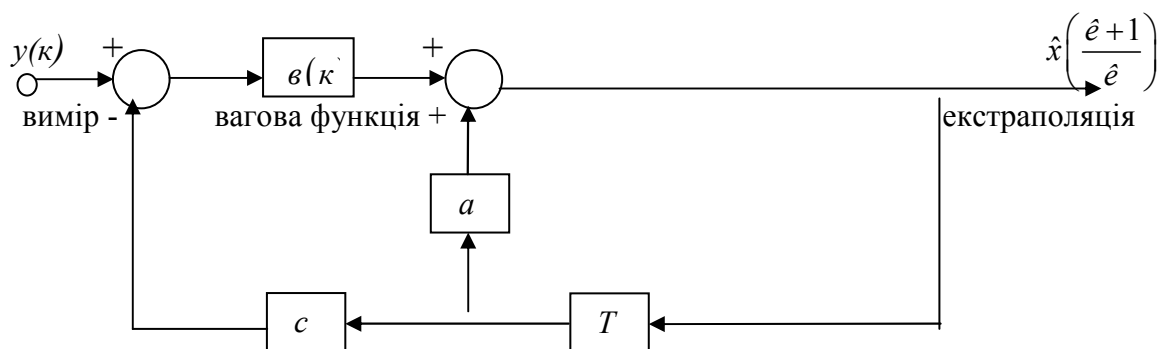


Рисунок 1.3 - Модель екстраполятора Калмана

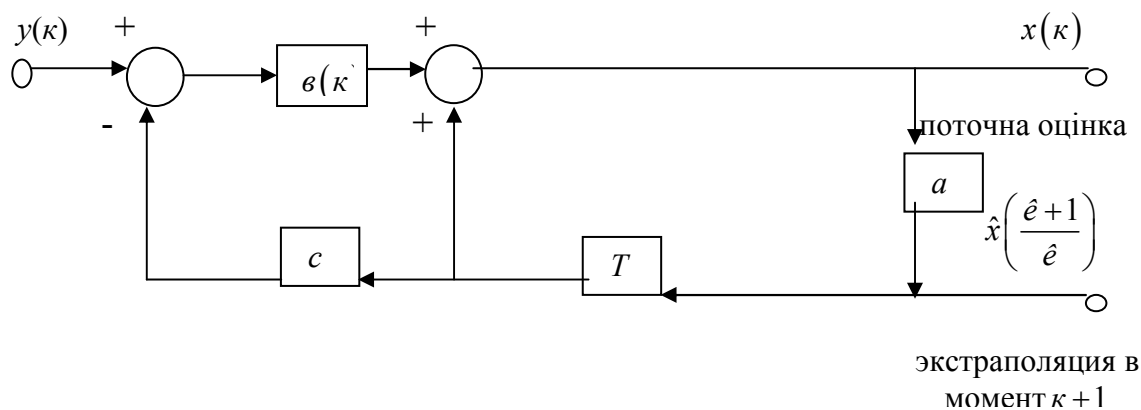


Рисунок 1.4 - Модель одночасної екстраполяції і фільтрації

- середня квадратична помилка екстраполяції

$$p\left(\frac{\hat{e}+1}{\hat{e}}\right) = a^2 p\left(\frac{\hat{e}}{\hat{e}+1}\right) - ac\beta(\hat{e}) \delta\left(\frac{\hat{e}}{\hat{e}-1}\right). \quad (1.36)$$

1.4 Векторний фільтр Калмана

При оцінці сигналу $\bar{d}(\hat{e})$ одночасно робиться r вимірів шуму в момент \hat{e} . Вимірювані вибірки $y_1(\hat{e}), y_2(\hat{e}), \dots, y_r(\hat{e})$ складають наступний набір інформації:

$$y_1(\hat{e}) = c_1 x_1(\hat{e}) + V_1(\hat{e});$$

$$y_2(\hat{e}) = c_2 x_2(\hat{e}) + V_2(\hat{e}); \quad (1.37)$$

$$y_r(\hat{e}) = c_r x_r(\hat{e}) + V_r(\hat{e});$$

де $V_j(\hat{e})$ - вибірки адитивного шуму;

c_1, \dots, c_r - параметри вимірника. Цей набір перетворюється у векторну форму з r компонентами векторів $\vec{y}(\hat{e})$ і $\vec{V}(\hat{e})$.

Для q -мірного векторного сигналу $\vec{x}(\hat{e})$ інформаційний вектор $\vec{y}(\hat{e})$ визначається як:

$$\vec{y}(\hat{e}) = C\vec{x}(\hat{e}) + \vec{V}(\hat{e}), \quad (1.38)$$

де $\vec{y}(\hat{e})$ і $\vec{V}(\hat{e})$ - це $(r \times 1)$ вектор – стовпці;

$\vec{x}(\hat{e})$ - $(q \times 1)$ вектор – рядок;

C - $(r \times q)$ - оглядова матриця, що представляється при $r < q$ у вигляді

$$C = \downarrow \begin{bmatrix} c_1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & c_2 & \dots & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & \cdot & \dots & \cdot & C_r & 0 \end{bmatrix}; \quad (1.39)$$

Відповідно векторне рівняння сигналу має вигляд:

$$\vec{x}(\hat{e}) = A\vec{x}(\hat{e}-1) + \vec{w}(\hat{e}-1), \quad (1.40)$$

де $\vec{x}(\hat{e}), \vec{x}(\hat{e}-1), \vec{w}(\hat{e}-1)$ - $(q \times 1)$ векторні стовпці,

A - $(q \times q)$ матриця.

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & a_2 & \dots & 0 \\ 0 & \cdot & \dots & a_q \end{bmatrix}. \quad (1.41)$$

Модель векторної форми формувача вимірника сигналу представлена на рис. 1.5 а, б.

Задача векторної фільтрації Калмана – одержати “кращу” лінійну оцінку $\hat{\delta}(\hat{e})$ для сигналу $\vec{\delta}(\hat{e})$ і потім сформувати $\hat{\delta}\left(\frac{\hat{e}}{\hat{e}-1}\right)$ - “кращу”

величину екстраполяції.

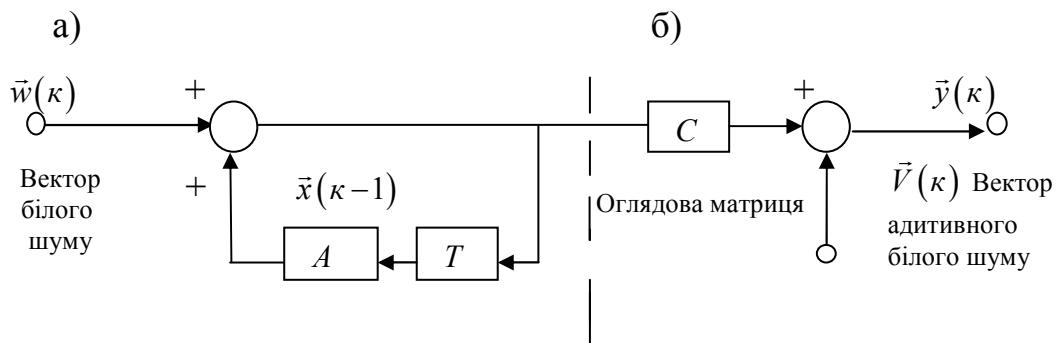


Рисунок 1.5 - Модель векторної форми формувача вимірника сигналу:
а) - модель формування сигналу; б) - модель вимірника сигналу

Під “кращою” розуміється оцінка, яка мінімізує середню квадратичну помилку кожного компоненту сигналу одночасно. В операції фільтрації, наприклад, мінімізується кожна середня квадратична помилка

$$A[\tilde{\delta}_\alpha(\hat{e}) - \tilde{\delta}_\alpha(\hat{e})]^2, \quad (1.42)$$

$$\alpha = 1, 2, \dots, q$$

Маючи рішення для скалярних випадків, можна поширити їх на векторну систему, використовуючи еквіваленти скалярів і матричні операції, приведені в таблиці 1.1 де знак T означає транспонування, (-1) - інвертування матриць [2].

У таблиці системний параметр \hat{a} перетвориться в системну матрицю \hat{A} ; відповідно параметр вимірника \hat{n} перетвориться у вимірювальну матрицю \hat{N} і так далі, за аналогією. Перетворення вибірок вимірюваного шуму в квадратичну матрицю записується як:

$$\sigma_V^2 = \sigma_{V_{1,1}}^2 = A[V_1^2(\hat{e})] \rightarrow R(\hat{e}) = A[V(\hat{e}) \cdot V^T(\hat{e})]. \quad (1.43)$$

Таблиця 1.1 – Перетворення скалярних величин у матрицю

Скаляр	Матриця
$\dot{a} + \hat{a}$	$\dot{A} + \hat{A}$
$\dot{a}\hat{a}$	$\dot{A}\hat{A}$
$\dot{a}^2\hat{a}$	$\dot{A}\hat{A}\dot{A}$
$\frac{1}{\dot{a} + \hat{a}}$	$(\dot{A} + \hat{A})^{-1}$

Відповідно до третього рядка таблиці 1, при $\hat{a}=1$. Наприклад, у випадку для двох сигналів

$$R(\hat{e}) = \begin{bmatrix} \dot{A}[V_1^2(\hat{e})] & \dot{A}[V_1(\hat{e}) \cdot V_2(\hat{e})] \\ \dot{A}[V_2(\hat{e}) \cdot V_1(\hat{e})] & \dot{A}[V_2^2(\hat{e})] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{V1.1}^2 & \sigma_{V1.2}^2 \\ \sigma_{V2.1}^2 & \sigma_{V2.2}^2 \end{bmatrix}.$$

Відповідно, для шуму фільтрації:

$$\sigma_w^2(\hat{e}) = \sigma_{w1.1}^2 = \sigma_{V1.1}^2 \dot{A}[W_1^2(\hat{e})] = Q(\hat{e}) = E[W(\hat{e}) \cdot W^T(\hat{e})], \quad (1.44)$$

де $Q(\hat{e})$ - коваріантна матриця шуму фільтрації, і

$$P(\hat{e}) = P_{1.1}(\hat{e}) = \dot{A}[\hat{a}_1^2(\hat{e})] \rightarrow P(\hat{e}) = [\hat{a}(\hat{e}) \cdot \hat{a}^T(\hat{e})]; \quad (1.45)$$

- коваріантна матриця помилок.

Для двох сигналів

$$D(\hat{e}) = \begin{bmatrix} \dot{A}[\hat{a}_1^2(\hat{e})] & \dot{A}[\hat{a}_1(\hat{e}) \cdot \hat{a}_2(\hat{e})] \\ \dot{A}[\hat{a}_2(\hat{e}) \cdot \hat{a}_1(\hat{e})] & \dot{A}[\hat{a}_2^2(\hat{e})] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{1.1}(\hat{e}) & D_{1.2}(\hat{e}) \\ D_{2.1}(\hat{e}) & D_{2.2}(\hat{e}) \end{bmatrix}. \quad (1.46)$$

У формулі (1.46) по діагоналі знаходяться значення середніх квадратичних помилок, що відповідають рівнянню (1.45).

1.5 Алгоритми векторного фільтра Калмана

Алгоритм має вигляд:

- оцінка рекурсивного векторного фільтра

$$\tilde{\sigma}(\hat{e}) = A\hat{\sigma}(\hat{e}-1) + \hat{E}(\hat{e}) \left[\tilde{\sigma}(\hat{e}) + \tilde{N}A\hat{\sigma}(\hat{e}-1) \right]; \quad (1.47)$$

- вагова функція фільтра

$$\hat{E}(\hat{e}) = D_1(\hat{e})\tilde{N}^{\hat{e}} \left[\tilde{N}D_1(\hat{e})\tilde{N}^{\hat{e}} + R(\hat{e}) \right]^{-2}, \quad (1.48)$$

де

$$D_1(\hat{e}) = A\hat{D}(\hat{e}-1) \cdot A^{\hat{e}} + Q(\hat{e}-1); \quad (1.49)$$

- коваріантна матриця помилок:

$$\hat{D}(\hat{e}) = D_1(\hat{e}) - \hat{E}(\hat{e}) \cdot \tilde{N}(\hat{e}) \cdot D_1(\hat{e}). \quad (1.50)$$

Отримано алгоритм векторного фільтра Калмана для моделі рис. 1.5, описуваної рівняннями (1.38) і (1.40).

Робота фільтра Калмана може бути представлена за допомогою обчислювальних кроків, (рис. 1.6).

На рис. 1.7 представлений процес обчислення для фільтра Калмана – матриці вагової функції K і коваріантної матриці помилок $P(\hat{e})$.

Рівняння (1.47)–(1.50) визначають алгоритм для рекурсивного розрахунку оптимальної матриці $K(\hat{e})$ фільтра. У той же час знаходяться

величини для $P_1(\hat{e})$ і $P(\hat{e})$, тобто варіанти складових для екстраполяції і помилок фільтрації відповідно [3].

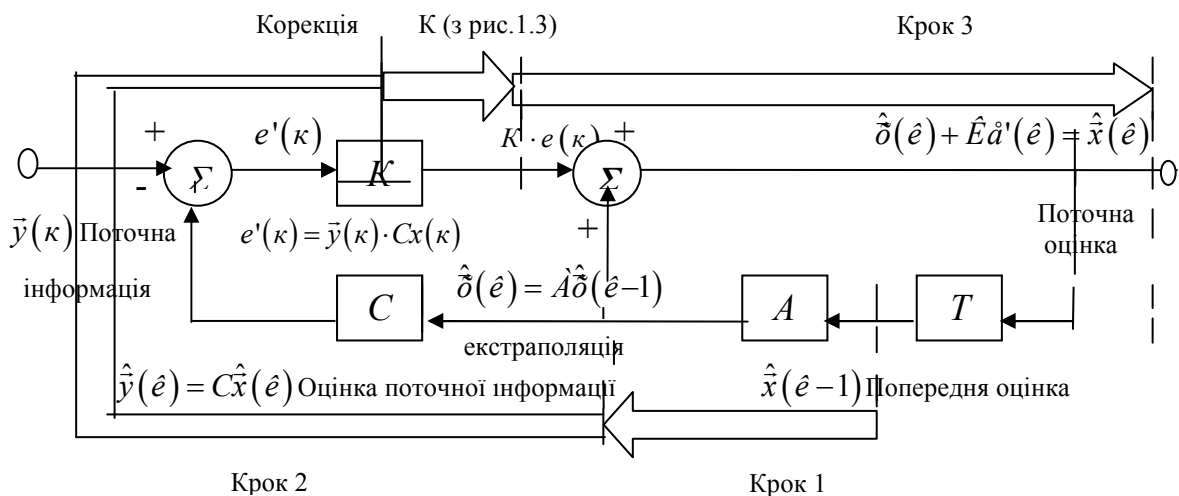


Рисунок 1.6 - Обчислювальні кроки у фільтрі Калмана

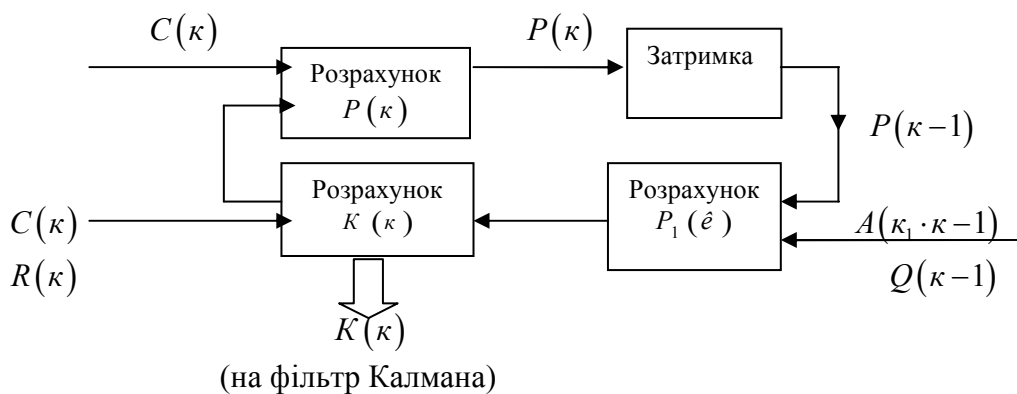


Рисунок 1.7 - Процес обчислень для фільтра Калмана

Для розрахунків зручно згрупувати результати для фільтра Калмана, рівняння (1.47) – (1.50), на дві частини:

- екстраполяція:

$$\hat{x}\left(\frac{\hat{e}}{\hat{e}-1}\right) = A\hat{\delta}(\hat{e}-1 \cdot \hat{e}-1);$$

$$D(\hat{e})\left(\frac{\hat{e}}{\hat{e}-1}\right) = A D\left(\frac{\hat{e}-1}{\hat{e}-1}\right) A^0 + Q(\hat{e}-1);$$

- корекція:

$$D\left(\frac{\hat{e}}{\hat{e}}\right) = D\left(\frac{\hat{e}}{\hat{e}-1}\right) - \hat{E}\tilde{N}D\left(\frac{\hat{e}}{\hat{e}-1}\right);$$

$$\hat{E} = D\left(\frac{\hat{e}}{\hat{e}-1}\right) \cdot \tilde{N}\hat{O}\left(\frac{\hat{e}}{\hat{e}-1}\right) \left[\tilde{N}D\left(\frac{\hat{e}}{\hat{e}-1}\right) \tilde{N}\hat{O} + R(\hat{e}) \right]^{-1}.$$

Основа першої частини – рівняння станів (1.37). Основа другої частини – рівняння вимірів (1.40). Обидві частини показані на рис. 1.8

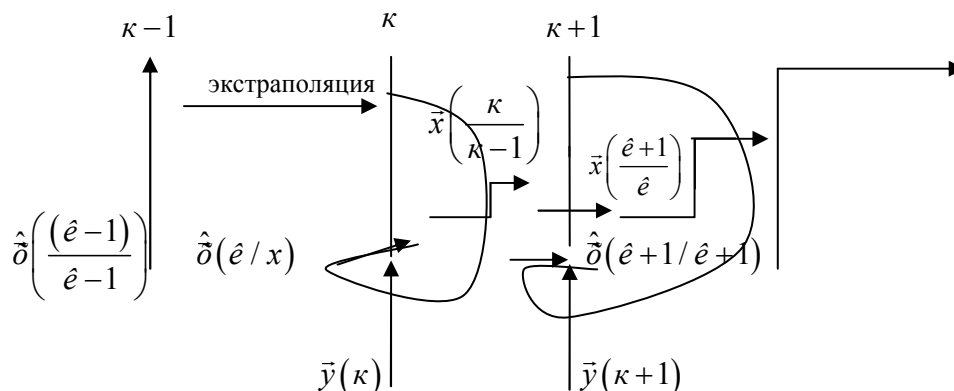


Рисунок 1.8 - Дві стадії розрахункового циклу векторного фільтра Калмана

1.6 Алгоритми векторного екстраполятора Калмана

Результат обчислень по алгоритму векторного екстраполятора:

- рівняння екстраполятора

$$\hat{\tilde{o}}\left(\frac{\hat{e}+1}{\hat{e}}\right) = A\hat{\tilde{o}}\left(\frac{\hat{e}}{\hat{e}-1}\right) + G(\hat{e}) \left[o(\hat{e}) - \tilde{N}\hat{\tilde{o}}\left(\frac{\hat{e}}{\hat{e}-1}\right) \right]; \quad (1.51)$$

- вагова функція екстраполятора

$$G(\hat{e}) = AP\left(\frac{\hat{e}}{\hat{e}-1}\right) \cdot C\hat{o} \left[\tilde{N}D\left(\frac{\hat{e}}{\hat{e}-1}\right) \cdot C\hat{o} + R(\hat{e}) \right]^{-1}; \quad (1.52)$$

- середня квадратична оцінка екстраполятора

$$D\left(\frac{\hat{e}+1}{\hat{e}}\right) = [A - G(\hat{e}) \cdot \tilde{N}] \cdot D\left(\frac{\hat{e}}{\hat{e}-1}\right) \cdot A^0 + Q(\hat{e}). \quad (1.53)$$

Модель цього екстраполятора описана рівняннями (1.2) і (1.4).

Екстрапольований векторний сигнал має вигляд:

$$\hat{\delta}\left(\frac{\hat{e}+1}{\hat{e}}\right) = A\hat{\delta}(\hat{e}), \quad (1.54)$$

тобто величина $\hat{\delta}(\hat{e})$ - це краща оцінка екстраполяції одного кроку, без шуму, де в оцінці працює динамічна матриця A .

Коваріантна матриця помилок екстраполяції рівняння (1.53) виходить після підстановки рівняння (1.49) у (1.4) і представленням $D_1(\hat{e})$ як $D\left(\frac{\hat{e}}{\hat{e}-1}\right)$.

Рівняння (1.54) дає простий зв'язок між фільтрацією й екстраполяцією, як показано на рис. 1.9.

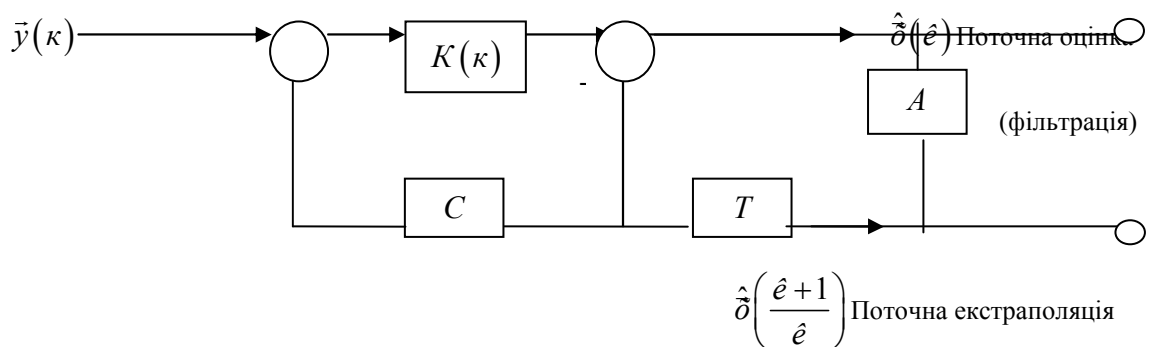


Рисунок 1.9 – Одночасна фільтрація й екстраполяція векторного сигналу

2 ЛІНІЙНІ І НЕЛІНІЙНІ СИСТЕМИ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

2.1 Вейвлет-анализ в цифровій обробці сигналів

Термін “вейвлет” (wavelet) означає “сплеск” чи “маленька хвиля”. Функції з графіком сплеску стали всі частіше застосовуватися для розкладання сигналів замість гармонійних хвиль. Теорія вейвлетів є могутнім доповненням Фур'є-аналізу і забезпечує більш гнучку техніку обробки сигналів. Головна перевага вейвлет-аналізу полягає в його можливості знайти сильно локалізовані зміни сигналів, тоді як дискретне перетворення Фур'є (ДПФ) цього не дає, тому що в коефіцієнтах ДПФ відбивається поведінка сигналу на всьому тимчасовому відрізку його спостереження. Особливо важлива принципова можливість вейвлетів представляти нестационарні сигнали, що складаються з різних компонентів, що діють на непересічних тимчасових інтервалах, модульовані сигнали і так далі.

Подібні сигнали є більш адекватними моделями процесів, що відбуваються в каналах зв'язку і пристроях цифрової обробки сигналів.

Вейвлет-спектри істотно інформативніше звичайних спектрограм, що робить їх незамінними при “тонкому” аналізі структури сигналів у різних прикладних задачах, наприклад при ідентифікації параметрів цифрових систем у біомедичній кібернетиці [4].

Розглянемо *N-точкову* послідовність відліків цифрового сигналу. Нехай число *N* є ступенем двійки. У цьому немає обмеження спільності, тому що наприкінці послідовності завжди можна додати нульові відліки, що збільшують *N* до найближчого ступеня двійки. Як приклад візьмемо 8-точкову послідовність

$$\{16,14,12,10,8,6,4,2\}.$$

Спочатку для кожної пари поруч стоячих відліків обчислимо чотири середні величини:

$$(16+14)/2=15; \quad (8+6)/2=7; \quad (12+10)/2=11; \quad (4+2)/2=3.$$

Цілком очевидно, що знання цих чотирьох напівсум недостатньо для зворотного відновлення всього сигналу. Тому можна подібним чином обчислити чотири на піврізниці

$$(16-14)/2=1; \quad (8-6)/2=1; \quad (12-10)/2=1; \quad (4-2)/2=1,$$

які називають коефіцієнтами деталей (деталіями). Середні величини представляють великомасштабний “зліпок” вихідного сигналу, а деталі необхідні для відновлення його “тонкої” структури. У випадку сильної корельованості відліків сигналу цілком достатньо великомасштабного аналізу, тому що деталі будуть малі.

Отриману послідовність, що складається з чотирьох напівсум і чотирьох піврізностей

$$\{15,11,7,3,1,1,1,1\},$$

легко використовувати для відновлення відліків вихідного сигналу. Повторимо описану процедуру стосовно до чотирьох першого (великим) елемента нової послідовності:

$$(15+11)/2=13; \quad (7+3)/2=5; \quad (15-11)/2=2; \quad (7-3)/2=2.$$

Вони перетворилися в два середніх і дві піврізниці. Інші елементи залишимо без зміни. Вийшла послідовність наступного вигляду:

$$\{13, 5, 2, 2, 1, 1, 1, 1\}.$$

Остання ітерація описуваного процесу перетворить перші два елементи в одну середню й одну напіврізницю:

$$(13+5)/2=9; (13-5)/2=4.$$

Можна відзначити, що остання сума є середнім значенням усіх восьми відліків вихідного цифрового сигналу. У підсумку вийшла перетворена 8-точкова послідовність яка є альтернативним представленням вихідного сигналу і складається з загального середнього і семи напіврізностей, що виражають різні рівні деталізації. Розглянута процедура являє собою *вейвлет-перетворення*, а результуюча послідовність є вейвлет-образом вихідного сигналу.

$$\{9, 4, 2, 2, 1, 1, 1, 1\},$$

Оцінімо порядок обчислювальної складності алгоритму вейвлет-перетворення, тобто число арифметичних операцій додавання, вирахування і розподіли як функцію кількості відліків N у сигналі. У проведених раніше обчисленнях потрібно виконати $8+4+2=14$ операцій, які можна представити у вигляді добутку: $14=2(8-1)$. Якщо в загальному випадку мається $N=2^v$ відліків сигналу, то на першому кроці буде потрібно 2^v операцій, на другому – 2^{v-1} операцій і так далі до останнього кроку, на якому буде 2^1 операції. Загальне число операцій знаходиться простим підсумовуванням членів геометричної прогресії:

$$\sum_{i=1}^v 2^i = 2(2^v - 1)/(2 - 1) = 2(N - 1).$$

Таким чином, для реалізації вейвлет-перетворення потрібно зробити $2(N-1)$ арифметичних операцій, тобто складність алгоритму має порядок

$O(N)$. На кожному із трьох кроків описаного процесу вихідний сигнал розглядається з різним ступенем деталізації. Тому зручно з кожною ітерацією процесу зв'язати величину, названу *роздільною здатністю*, що дорівнює числу, що залишилися середніх у кінці даного кроку. У проведеному аналізі дозвіл послідовності приймало значення $4 = 2^{\nu-1}$, $2 = 2^{\nu-2}$, $1 = 2^{\nu-3}$ для $\nu = 3$. Поняття дозволу є принципово важливим у дискретному вейвлет-аналізу.

2.2 Матричні представлення

Описаний у попередньому розділі процес усереднення і деталізації неважко представити за допомогою матричних перетворень. Для простоти викладу приймемо $N = 2^2 = 4$ і введемо наступні позначення. Вихідну 4-точкову послідовність відліків цифрового сигналу представимо у вигляді вектора-стовпця:

$$\bar{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} x(1) \\ x(2) \\ x(3) \\ x(4) \end{bmatrix}.$$

Тоді на першому етапі перетворення, що складається з обчислення двох напівсум і двох напіврізностей, можна записати в матричній формі

$$\mathbf{H}_2 \bar{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \bar{\mathbf{x}}.$$

Верхні два рядки матриці \mathbf{H}_2 усереднюють два сусідніх відліки

сигналу, а нижні дві – деталізують їх. Якщо кожен рядок (або кожен стовпець) матриці \mathbf{H}_2 вважати чотирьохмірним вектором, то можна помітити, що скалярний добуток будь-якої пари векторів, як сума добутків відповідних компонентів, дорівнює нулю, тобто вони утворюють ортогональну систему. Норма (довжина) кожного вектора дорівнює $1/\sqrt{2}$. Для зручності перетворень приведемо норми векторів до одиниці, помноживши усі компоненти на $\sqrt{2}$. У цьому випадку одержимо *ортогональну матрицю*.

$$\mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}.$$

При усередненні і деталізації за допомогою такої матриці буде відбуватися розподіл не на 2, а на $\sqrt{2}$, що не применшує спільності результатів [5].

На другому (і останньому) етапі необхідно зберегти напіврізниці і перетворити на дві напівсуми. Виходячи з аналогічних міркувань, можна затверджувати, що цій процедурі відповідає матриця

$$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Перший рядок цієї матриці усереднює відліки, друга – деталізує, третя і

четверта, утворити одиничну (тотожну) матрицю, зберігають попередні напіввізніці. Добуток матриць \mathbf{H}_1 і \mathbf{H}_2 дає шукане дискретне вейвлет-перетворення вектора $\bar{\mathbf{x}}$, тому що матриця \mathbf{H} задає відображення $R^4 \rightarrow R^4$:

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_1 \times \mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}. \quad (2.1)$$

Неважко помітити, що матриця \mathbf{H} також є ортогональною. Вираження (2.1) являє собою відоме перетворення Хаара, що у світлі уведених визначень є вейвлет-перетворення

$$\mathbf{H}\bar{\mathbf{x}} = \bar{\mathbf{w}}, \quad (2.2)$$

де елементи вектора-стовпця $\bar{\mathbf{w}}$ називають коефіцієнтами.

Якщо з кожним рядком перетворення Хаара співвіднести ступеневу функцію, задану на одиничному інтервалі, то перші чотири з них відповідно до (2.1) будуть мати вигляд, представлений на рис. 2.1.

У базисі цих функцій можливе розкладання безупинного в часі сигналу, заданого також на одиничному інтервалі. При збільшенні порядку матриці \mathbf{N} буде відбуватися стиск функцій у часі (масштабування), а самі вони стануть нагадувати короткі сплески, переміщені по осі абсцис.

Подібний процес складає сутність безупинного вейвлет-аналізу, заснованого на масштабуванні і зрушеннях. Обмежені по тривалості і переміщені в часі вейвлети (функції H^2 і H^3) у результаті згортки з відрізками сигналу дозволяють виявити їхні локальні особливості, чого не припускають інші методи аналізу. Дискретним аналогом описаного процесу є

вплив матриці (2.1) на вектор відліків вхідного сигналу \bar{x} . Якісна картина аналізу “тонкої” структури сигналу при цьому зберігається.

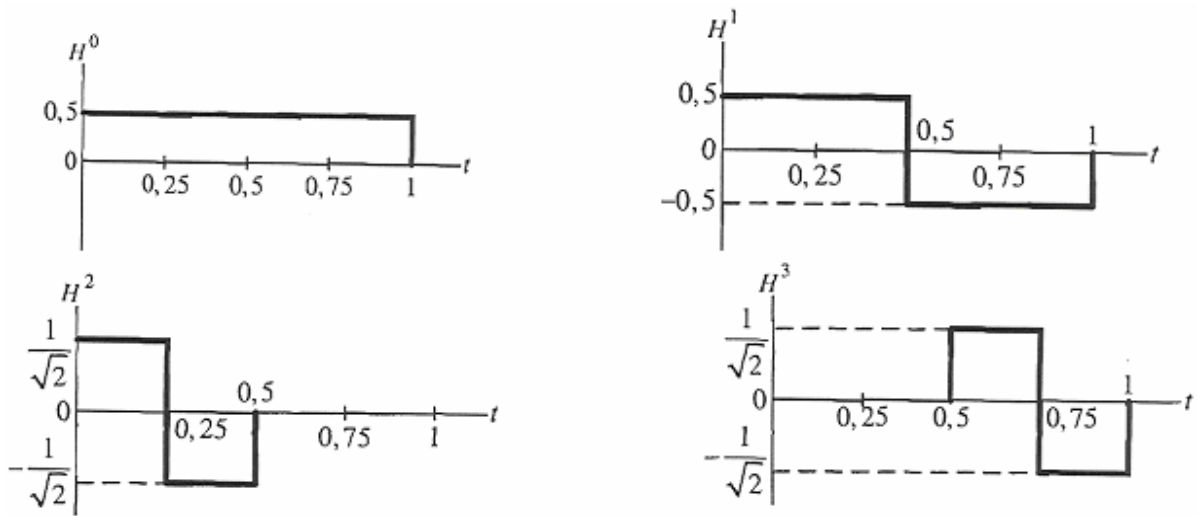


Рисунок 2.1 – Ступеневі функції Хаара

Узагальнимо матричний алгоритм усереднення і деталізації на довільну N -точкову послідовність, коли $N = 2^v$, при поетапному процесі перетворення, описаному спочатку. На першому кроці ортогональна матриця перетворення має вигляд:

$$\mathbf{H}^v = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & \cdot & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

Матриця – квадратна порядку $N = 2^\nu$. Визначимо дві нові матриці, що входять до складу \mathbf{H}_ν .

$$\mathbf{A}_\nu = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

і

$$\mathbf{D}_\nu = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}, \quad (2.5)$$

що дозволяє вважати \mathbf{H}_ν *блоковою матрицею*, що складається з двох під матриць \mathbf{A}_ν і \mathbf{D}_ν , розміром $2^{\nu-1} \times 2^\nu$ кожна, тобто записати \mathbf{H}_ν у вигляді

$$\mathbf{H}_\nu = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_\nu \\ \mathbf{D}_\nu \end{bmatrix}. \quad (2.6)$$

Під матриць \mathbf{A}_ν можна назвати перетворенням усереднення, а \mathbf{D}_ν – перетворенням деталізації. Уведемо вектори-стовпці результатів поетапного перетворення які містять $2^{\nu-1}$ елементів і відповідно є векторами коефіцієнтів усереднення і деталізації.

$$\bar{\mathbf{a}}_{v-1} = \begin{bmatrix} a_{v-1}^0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ a_{v-1}^{2^{v-1}-1} \end{bmatrix} \quad \text{і} \quad \bar{\mathbf{d}}_{v-1} = \begin{bmatrix} d_{v-1}^0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ d_{v-1}^{2^{v-1}-1} \end{bmatrix}, \quad (2.7)$$

З урахуванням прийнятих позначень перетворення (2.2) на першому етапі має вигляд:

$$\mathbf{H}_v \bar{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_v \\ \mathbf{D}_v \end{bmatrix} \bar{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{a}}_{v-1} \\ \bar{\mathbf{d}}_{v-1} \end{bmatrix}. \quad (2.8)$$

Матриця в правій частині (2.8) є також блоковою і складається з двох векторів-стовпців (2.7).

На кожному кроці вейвлет-перетворення зберігаються коефіцієнти, що d деталізують, і обробляються результати a усереднення. Черговий крок вейвлет-перетворення складається в застосуванні до вектора $\bar{\mathbf{a}}_{v-1}$ операцій усереднення і деталізації на наступному, більш низькому, рівні дозволу:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_{v-1} \\ \mathbf{D}_{v-1} \end{bmatrix} \bar{\mathbf{a}}_{v-1} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{a}}_{v-2} \\ \bar{\mathbf{d}}_{v-2} \end{bmatrix}. \quad (2.9)$$

Тут \mathbf{A}_{v-1} і \mathbf{D}_{v-1} – матриця вигляду (2.4) і (2.5) розміром $2^{v-2} \times 2^{v-1}$, а $\bar{\mathbf{a}}_{v-2}$ і $\bar{\mathbf{d}}_{v-2}$ – вектори-стовпці, що містять 2^{v-2} елементів. Щоб побудувати частину вейвлет-перетворення, вектор $\bar{\mathbf{d}}_{v-2}$ зберігається разом с. $\bar{\mathbf{d}}_{v-1}$. Цей процес продовжується до заключного кроку, на якому виходять скалярні величини a_0 і d_0 . Підсумковий результат вейвлет-перетворення можна представити вектором-стовпцем, що містить $N = 2^v$ елементів:

$$\bar{\mathbf{w}} = \begin{bmatrix} a_0 \\ d_0 \\ \bar{d}_1 \\ \bar{d}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \bar{d}_{v-1} \end{bmatrix}. \quad (2.10)$$

2.3 Зворотне вейвлет-перетворення

У практичних додатках висувається традиційна вимога оборотності вейвлет-перетворення, як і будь-якого іншого перетворення [6]. Тобто по зображенню (вектору) $\bar{\mathbf{w}}$ необхідно відновити оригінал (N -точкову послідовність $\bar{\mathbf{x}}$). Виходячи з вираження (2.2), вхідний вектор відліків може бути отриманий у результаті множення ліворуч обох частин цієї рівності на зворотну матрицю \mathbf{H}^{-1} :

$$\mathbf{H}^{-1}\mathbf{H}\bar{\mathbf{x}} = \mathbf{H}^{-1}\bar{\mathbf{w}},$$

звідки

$$\bar{\mathbf{x}} = \mathbf{H}^{-1}\bar{\mathbf{w}}, \quad (2.11)$$

тому що добуток $\mathbf{H}^{-1}\mathbf{H}$ утворить одиничну матрицю \mathbf{I} , що є тотожним перетворенням. Наслідком ортогональності матриці \mathbf{H} є простота її зворотності, що полягає в звичайному транспонуванні. Тому вираження (2.11) для зворотного вейвлет-перетворення приймає вигляд:

$$\bar{\mathbf{x}} = \mathbf{H}^T\bar{\mathbf{w}}. \quad (2.12)$$

якщо розглядати багатокроковий процес, то можна переконатися у

використанні на кожній ітерації ортогональної матриці Хаара \mathbf{H}_k відповідного порядку ($k=1,2,\dots,\nu$). Тому відновлення векторів коефіцієнтів усереднення $\bar{\mathbf{a}}_k$ на k -тому етапі буде відбуватися аналогічно (2.11) на підставі звертання матриці у вираженні (2.9):

$$\bar{\mathbf{a}}_k = \mathbf{H}_k^{-1} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{a}}_{k-1} \\ \bar{\mathbf{d}}_{k-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_k \\ \mathbf{D}_k \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{a}}_{k-1} \\ \bar{\mathbf{d}}_{k-1} \end{bmatrix}. \quad (2.13)$$

З урахуванням того, що

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_k \\ \mathbf{D}_k \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_k^T & | & \mathbf{D}_k^T \end{bmatrix},$$

вираження (2.13) можна переписати в наступному вигляді:

$$\bar{\mathbf{a}}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_k^T & | & \mathbf{D}_k^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{a}}_{k-1} \\ \bar{\mathbf{d}}_{k-1} \end{bmatrix} = \mathbf{A}_k^T \bar{\mathbf{a}}_{k-1} + \mathbf{D}_k^T \bar{\mathbf{d}}_{k-1}. \quad (2.14)$$

Співвідношення (2.14) дає практичну формулу для відновлення $\bar{\mathbf{a}}_k$ з $\bar{\mathbf{a}}_{k-1}$ і $\bar{\mathbf{d}}_{k-1}$. У скалярному випадку (2.14) приводить до пари рівностей

$$\begin{aligned} a_k^0 &= \frac{a_{k-1}^0 + d_{k-1}^0}{\sqrt{2}}; \\ a_k^1 &= \frac{a_{k-1}^0 - d_{k-1}^0}{\sqrt{2}}. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Розпишемо рівність (2.9) для довільного k -го етапу у вигляді пари матричних співвідношень

$$\mathbf{A}_k \bar{\mathbf{a}}_k = \bar{\mathbf{a}}_{k-1}; \quad \mathbf{D}_k \bar{\mathbf{a}}_k = \bar{\mathbf{d}}_{k-1}. \quad (2.16)$$

Підставивши (2.16) у (2.14), одержимо рівність

$$\bar{\mathbf{a}}_k = \mathbf{A}_k^T \mathbf{A}_k \bar{\mathbf{a}}_k + \mathbf{D}_k^T \mathbf{D}_k \bar{\mathbf{a}}_k, \quad (2.17)$$

з якого випливає, що

$$\mathbf{A}_k^T \mathbf{A}_k + \mathbf{D}_k^T \mathbf{D}_k = \mathbf{I}_k, \quad (2.18)$$

де \mathbf{I}_k – одинична матриця порядку 2^k . Отже, виконується пара співвідношень

$$\mathbf{A}_k \mathbf{A}_k^T = \mathbf{I}_{k-1}; \mathbf{D}_k \mathbf{D}_k^T = \mathbf{I}_{k-1}. \quad (2.19)$$

2.4 Матричні представлення \mathbf{H}_v , \mathbf{A}_v і \mathbf{D}_v

Перетворення Хаара дозволяють застосувати методи цифрової фільтрації в дискретному вейвлет-аналізу.

$$\mathbf{H}_v = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & \cdot & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}. \quad (2.20)$$

Оскільки множення матриці на вектор відбувається за правилом “рядок на стовпець”, те елементи будь-якого рядка матриці (2.20) можна розглядати як коефіцієнти СІХ-фільтра (фільтра зі скінченною імпульсною характеристикою) 1-го порядку, що є відліками його імпульсної характеристики. У результаті згортки (множення з нагромадженням) імпульсної характеристики і вхідного сигналу виходять вихідні відліки фільтра, що саме є коефіцієнтами усереднення і деталізації. Однак у будь-якому цифровому фільтрі після обчислення чергового вихідного відліку вхідний сигнал зрушується на одну тимчасову позицію [7].

$$\mathbf{A}_v = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}; \quad (2.21)$$

$$\mathbf{D}_v = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}. \quad (2.22)$$

Але елементи рядків матриці (2.20) зрушений один відносно другого відразу на двох позицій вправо. Це означає, що у вихідному сигналі фільтра в порівнянні з перетворенням (2.20) з'являється кожен другий “зайвий” відлік, якому необхідно забрати. Вилучення кожного другого відліку виконується за допомогою децимації з коефіцієнтом 2. Структурна схема СІХ-фільтра, що відповідає рядкам матриці (2.20), представлена на рис. 2.2.

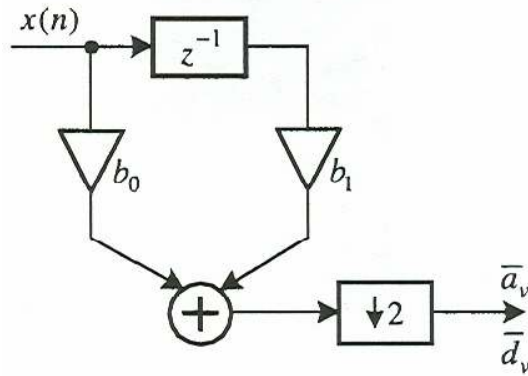


Рисунок 2.2 – СІХ-фільтр, що реалізує перетворення Хаара

Для підматриці (2.21) коефіцієнти фільтра повинні мати значення $b_0 = 1/\sqrt{2}$, $b_1 = 1/\sqrt{2}$. Для підматриці (2.22) $b_0 = 1/\sqrt{2}$, $b_1 = 1/\sqrt{2}$. Перестановка елементів рядків матриць для одержання коефіцієнтів фільтра обумовлена структурою вектора-стовпця відліків вхідного сигналу \bar{x} . У цій структурі більш пізні за часом відліки знаходяться нижче попередніх, що змушує змінювати місцями коефіцієнти фільтра заради збереження традиційних способів опису цифрових кіл.

Можна затверджувати, що перший фільтр є ФНЧ (фільтром нижніх частот), а другий – ФВЧ (фільтром високих частот). Їх ненормовані амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) зображені на рис. 2.3.

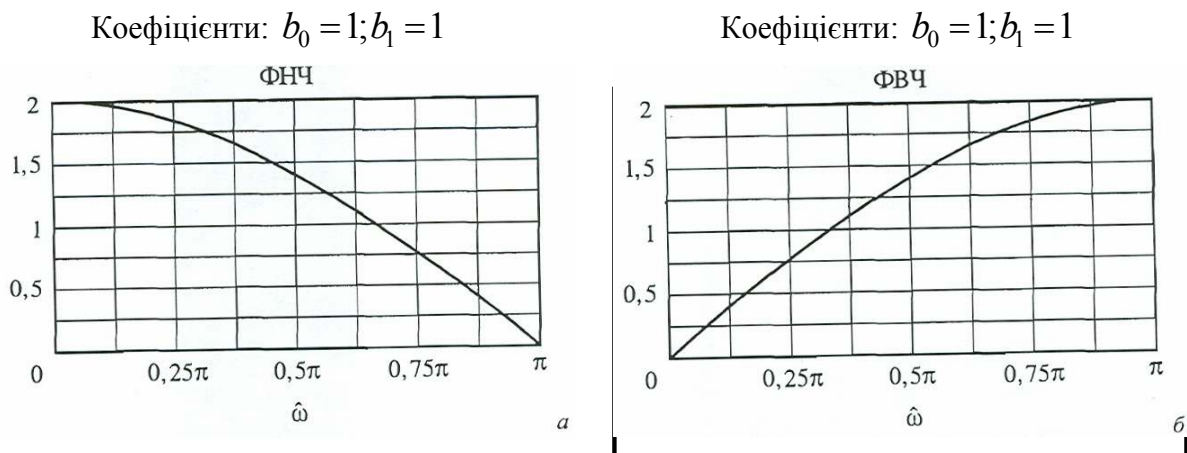


Рисунок 2.3 – АЧХ фільтрів для перетворення Хаара

Таким чином, багатокроковий процес вейвлет-перетворення Хаара можна зобразити у вигляді структурної схеми, приведеної на рис. 2.4 і використовуючи коло низькочастотних і високочастотних СІХ-фільтрів з системою децимації на виході кожного з них [8].

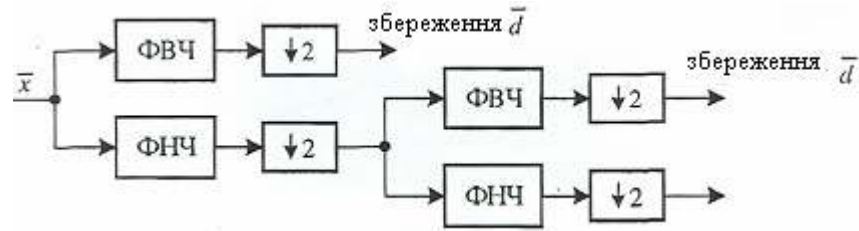


Рисунок 2.4 – Фільтрова реалізація вейвлет-перетворення.

Для вектора вхідного сигналу, що містить чотири відліки, операція цифрової фільтрації з урахуванням вигляду матриць буде мати наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \bar{x} &\rightarrow \langle \mathbf{D}_2 \rangle \rightarrow \mathbf{D}_2 \bar{x} \\ \downarrow &\rightarrow \langle \mathbf{A}_2 \rangle \rightarrow \mathbf{A}_2 \bar{x} \rightarrow \langle \mathbf{D}_1 \rangle \rightarrow \mathbf{D}_1 \mathbf{A}_2 \bar{x} \\ \downarrow &\rightarrow \langle \mathbf{A}_1 \rangle \rightarrow \mathbf{A}_1 \mathbf{A}_2 \bar{x}. \end{aligned}$$

Дана схема дає представлення про те, як за допомогою цифрових фільтрів можна відновити вихідний сигнал з його вейвлет-коефіцієнтів. Складемо схему зворотного вейвлет-перетворення, зв'язану з попередньою.

$$\mathbf{A}_1 \mathbf{A}_2 \bar{x} \rightarrow \langle \mathbf{A}_1^T \rangle \xrightarrow{\mathbf{A}_1^T \mathbf{A}_1 \mathbf{A}_2 \bar{x}} \oplus \xrightarrow{\mathbf{A}_2 \bar{x}} \langle \mathbf{A}_2^T \rangle \xrightarrow{\mathbf{A}_2^T \mathbf{A}_2 \bar{x}} \oplus \rightarrow \bar{x}$$

$$\mathbf{D}_1 \mathbf{A}_2 \bar{x} \rightarrow \langle \mathbf{D}_1^T \rangle \xrightarrow{\mathbf{D}_1^T \mathbf{D}_1 \mathbf{A}_2 \bar{x}} \uparrow \mathbf{D}_2 \bar{x} \rightarrow \langle \mathbf{D}_2^T \rangle \xrightarrow{\mathbf{D}_2^T \mathbf{D}_2 \bar{x}} \uparrow.$$

Операція \oplus позначає поелементне додавання компонентів-векторів. На обох етапах перетворення використовувалися співвідношення:

$$\mathbf{A}_1^T \mathbf{A}_1 \mathbf{A}_2 \bar{x} + \mathbf{D}_1^T \mathbf{D}_1 \mathbf{A}_2 \bar{x} = (\mathbf{A}_1^T \mathbf{A}_1 + \mathbf{D}_1^T \mathbf{D}_1) \mathbf{A}_2 \bar{x} = \mathbf{I}_1 \mathbf{A}_2 \bar{x} = \mathbf{A}_2 \bar{x}, \quad (2.23)$$

$$\mathbf{A}_2^T \mathbf{A}_2 \bar{x} + \mathbf{D}_2^T \mathbf{D}_2 \bar{x} = (\mathbf{A}_2^T \mathbf{A}_2 + \mathbf{D}_2^T \mathbf{D}_2) \cdot \bar{x} = \mathbf{I}_2 \bar{x} = \bar{x}. \quad (2.24)$$

Формули (2.23) і (2.24) дають ключ до фільтрового відновлення вихідного сигналу з вейвлет-коефіцієнтів: схема буде зворотною зображеною на рис. 2.4, тільки децимація замінюється інтерполяцією з коефіцієнтом 2, здійснюваною шляхом додавання нульових компонентів упереміж з наявними. Коефіцієнти НЧ- і ВЧ-фільтрів відновлення сигналу відповідають елементам рядків транспонованих матриць \mathbf{A}^T і \mathbf{D}^T . Структурна схема процесу відновлення вихідного сигналу по його вейвлет-коефіцієнтам показана на рис. 2.5.

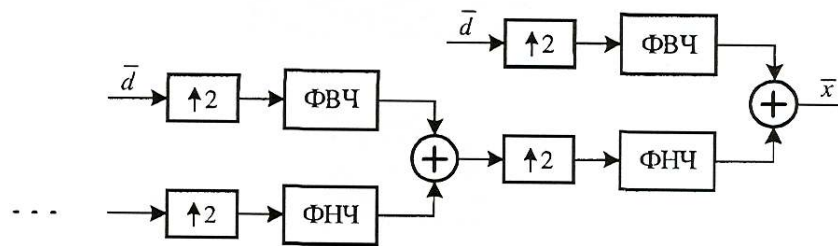


Рисунок 2.5 – Фільтрове відновлення цифрового сигналу

Перетворення Хаара, як найпростіший вейвлет, дозволяє перейти до узагальнень, що розкривають принципи конструювання більш складних структур.

2.5 Дискретні вейвлет-перетворення

Якість вейвлет-перетворення може сильно залежати від масштабування базисних функцій, тимчасових зрушень і від типу вейвлета. На практиці масштабуючі множники, що стискають базисні функції, приймаються рівними негативним ступенем двійки. Основний напрямок у дослідженні

типів вейвлетів складається в пошуках таких сімейств, що утворюють ортогональний базис (ортогональну матрицю перетворення). Серед цих вейвлетів перевага віддається тим, що ґрунтуються на СІХ-фільтрації, тобто мають компактний (кінцевий у часі) носій.

Найпростіший спосіб опису вейвлет-перетворення використовує добуток матриць. Ускладнення конструкції вейвлетів засновано на побудові зважених середніх.

$$c_0x(1) + c_1x(2) + \dots + c_{N-1}x(N)$$

і зважених різностей

$$c_1x(1) - c_0x(2) + c_3x(3) - c_2x(4) + \dots$$

для N - точкових послідовностей відліків вихідного сигналу ($N > 2$) і деякої безлічі коефіцієнтів $c_0, c_1, c_2, \dots, c_{N-1}$. Неважко помітити, що подібний вибір приводить до наступного властивості ортогональності векторів, що складаються з коефіцієнтів

$$c_0c_1 - c_0c_1 + c_2c_3 - c_2c_3 + \dots = 0.$$

По такому принципу побудований один із самих популярних вейвлетів, а саме вейвлет Добеши, що прийнято позначати D_4 , тому що він заснований на чотирьох коефіцієнтах c_0, c_1, c_2 і c_3 . Матриця цього перетворення має вигляд

Якщо цю матрицю помножити на вектор-стовпець відліків вхідного сигналу, то її перший рядок дає зважену суму перших чотирьох відліків.

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} c_0 & c_1 & c_2 & c_3 & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ c_3 & -c_2 & c_1 & -c_0 & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & c_0 & c_1 & c_2 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_3 & -c_2 & c_1 & -c_0 & 0 & 0 \\ 0 & \cdot & \cdot & 0 & c_0 & c_1 & c_2 & c_3 \\ 0 & \cdot & \cdot & 0 & c_3 & -c_2 & c_1 & -c_0 \\ c_2 & c_3 & 0 & \cdot & \cdot & 0 & c_0 & c_1 \\ c_1 & -c_0 & 0 & \cdot & \cdot & 0 & c_3 & -c_2 \end{bmatrix}. \quad (2.25)$$

Третій рядок визначить таку ж суму, але зрушену на дві тимчасові позиції. Усі рядки з непарними номерами зададуть аналогічні зважені суми (усереднення). У такий спосіб коефіцієнти c_3, c_2, c_1 і c_0 визначають КІХ-фільтр 3-го порядку, вихідний сигнал якого підлягає децимації з коефіцієнтом 2. Аналогічно парні рядки матриці (2.22) породжують зважені різниці (деталізації). При цьому задається інший КІХ-фільтр 3-го порядку з коефіцієнтами $-c_0, c_1, -c_2, c_3$ і децимацією вихідного сигналу.

Вимога ортогональності матриці (2.22) для її легкого звертання (транспонування) приводить до співвідношень

$$c_0^2 + c_1^2 + c_2^2 + c_3^2 = 1; \quad (2.26)$$

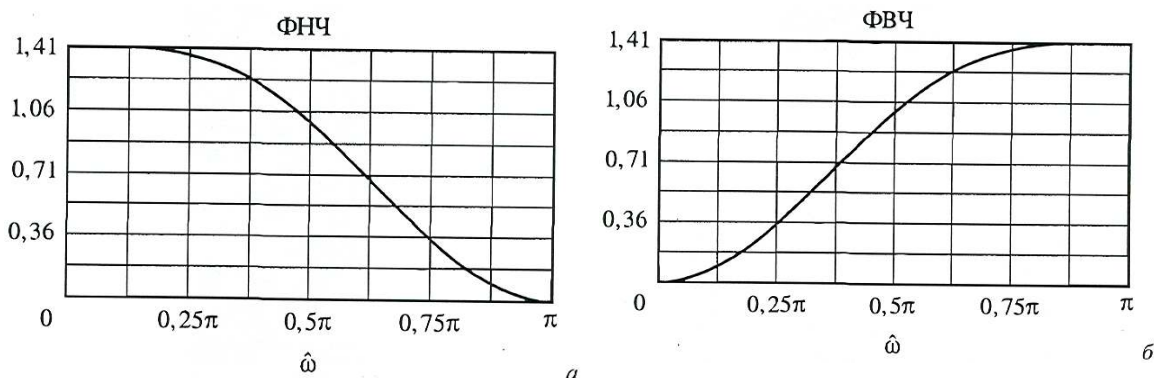
$$c_0 \cdot c_2 + c_1 \cdot c_3 = 0. \quad (2.27)$$

Одним з можливих рішень, що задовольняють рівнянням (2.26) і (2.24), є наступний набір коефіцієнтів

$$c_0 = \frac{1+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \approx 0,483; \quad c_1 = \frac{3+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \approx 0,837;$$

$$c_2 = \frac{3-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \approx 0,224; \quad c_3 = \frac{1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \approx -0,129.$$

Розрахунок АЧХ фільтрів для вейвлета $D4$ приводить до результатів, показаним на рис. 2.6.



Коефіцієнти:

$$b_0 = -0,13; \quad b_1 = 0,22; \quad b_2 = 0,84; \quad b_3 = 0,48$$

Коефіцієнти:

$$b_0 = -0,48; \quad b_1 = 0,84; \quad b_2 = -0,22; \quad b_3 = -0,13$$

Рисунок 2.6 – Ненормовані АЧХ фільтрів для вейвлета Добеши

З цих характеристик видно, що згладжуючи (усередненим) фільтром є ФНЧ, а що деталізує – ФВЧ.

Реалізація вейвлета у вигляді множення матриці \mathbf{W} на вхідний вектор \bar{x} дуже проста і наочна. Однак цей метод непрактичний, тому що матриця (2.25) повинна мати порядок, дорівнює розміру вектора відліків сигналу, що звичайно великий. Але можна помітити, що матриця \mathbf{W} має регулярну структуру і при алгоритмічній побудові вейвлет-перетворення досить зберігати тільки набір з чотирьох коефіцієнтів СІХ-фільтрів.

Зворотне вейвлет-перетворення виходить простим транспонуванням матриці (2.25) [9]

$$\mathbf{W}^{-1} = \mathbf{W}^T = \begin{bmatrix} c_0 & c_3 & 0 & \cdot & \cdot & 0 & c_2 & c_1 \\ c_1 & -c_2 & 0 & \cdot & \cdot & 0 & c_3 & -c_0 \\ c_2 & c_1 & c_0 & c_3 & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ c_3 & -c_0 & c_1 & -c_2 & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & c_2 & c_1 & c_0 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_3 & -c_0 & c_1 & -c_2 & 0 & 0 \\ 0 & \cdot & \cdot & 0 & c_2 & c_1 & c_0 & c_3 \\ 0 & \cdot & \cdot & 0 & c_3 & -c_0 & c_1 & -c_2 \end{bmatrix}. \quad (2.28)$$

3 СТВОРЕННЯ ЦИФРОВИХ КАРТ РЕЛЬЄФУ МІСЦЕВОСТІ ДЛЯ ЦІЛЕЙ МОНІТОРИНГУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Головним джерелом даних про земну поверхню і тепер і надалі залишаються карти. Однак в останнє десятиліття інтенсивно впроваджуються методи, зв'язані з цифровим представленням земної поверхні і динаміки її змін. Кінець 20 століття з його величезним по розмаху розвитком інформаційних технологій характеризується кардинальними змінами в інженерній науці і практиці. Тому закономірно, що сучасні методи комп'ютерної обробки інформації базуються на створенні цифрового рельєфу місцевості, що є основою для географічних інформаційних систем (ГІС) і є пріоритетним для рішення цілого ряду наукових і господарських задач. Наприклад, інтерактивні методи проектування інженерних споруджень, аналіз просторове даних, керування територіями, вимагають представлення інформації про місцевість у цифровій формі. У більшості задач власне цифровий рельєф місцевості є незамінною формою представлення інформації про чи Землю її частин.

Цифровий рельєф місцевості визначений як цифрове і математичне представлення рельєфу місцевості на основі дискретної сукупності вихідних точок, що дозволяють із заданою точністю відтворити реальну поверхню і її структуру. Дані для створення цифрового рельєфу місцевості одержують за допомогою фотограмметричних вимірів, наземної (геодезичної) зйомки, шляхом сканування горизонталей на картах з фіксацією результатів у цифровій формі, за матеріалами дистанційного чи зондування з використанням лазерних і інших систем, що дають просторові координати точок місцевості.

Самим доступним джерелом інформації в наш час для побудови цифрового рельєфу місцевості є топографічні карти.

При побудові цифрового рельєфу місцевості зважаються наступні

задачі:

- виділення ізогіпс на топографічній карті,
- зменшення надмірності даних після виділення ізогіпс,
- відновлення отриманих ізогіпс і формування матриці висот,
- побудова цифрового рельєфу місцевості за значеннями висот.

У результаті рішення поставлених задач виходить тривимірна модель рельєфу створена в результаті обробки топографічної карти.

3.1 Види рельєфу місцевості

У залежності від характеру рельєфу місцевість підрозділяється на рівнинну, горбкувату і гірську.

Рівнинна місцевість (рис.3.1) у межах видимого обрію представляється рівної або слабко горбистої. Для неї характерні незначна крутість схилів і відсутність різка виражених нерівностей поверхні.

Рівнинна місцевість може бути відкритої, якщо на ній немає місцевих предметів, що обмежують огляд і спостереження, чи закритої, якщо місцевість покрита лісом, чи чагарником на ній багато населених пунктів [10].

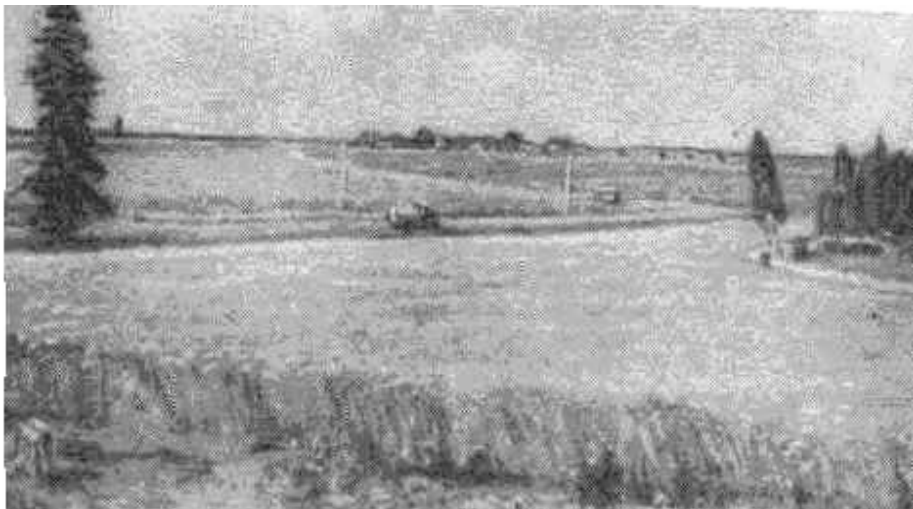


Рисунок 3.1 – Рівнинна місцевість

Рівнинна місцевість звичайно доступна для пересування, як по дорогах, так і поза дорогами, якщо цьому не перешкоджають стан ґрунту і наявність лісу.

При наявності великої кількості рік, озер і боліт рівнинна місцевість здобуває властивості пересіченої місцевості, що обмежує можливість пересування поза дорогами.

Покриваючі рівнину глинисті, суглинні, супіщані, торф'яні ґрунти допускають безперешкодний рух у суху погоду влітку й у морозний період узимку. У стані сильної зволоженості такі ґрунти утрудняють рух, а найчастіше місцевість стає практично непрохідною.

Горбкувата місцевість (рис.3.2) відрізняється від рівнинної місцевості наявністю височин і поглиблень, що мають у більшості випадків некруті підйоми і спуски, що допускають пересування по них.

Найбільш розповсюдженими формами рельєфу є пагорби (височини висотою до 200 м з некрутими схилами), лощини (витягнуті і знижуються в одному напрямку поглиблення), рідше яри (лощини з крутими стрімчастими схилами). У залежності від характеру цих форм рельєфу горбкувата місцевість може бути закритої чи напівзакритий, через пересіченість місцевості буде багато ділянок, що не переглядаються.



Рисунок 3.2 – Горбкувата місцевість

Гірська місцевість (рис.3.3) має різко виражені височини і поглиблення. Переважними формами рельєфу є гори, хребти, лощини, яри.



Рисунок 3.3 – Гірська місцевість

Гора – значна по розмірах височина, що має, як правило, куполоподібну або конічну форму. Верхня частина гори, називана вершиною, може мати вигляд купола (куполоподібна гора), плоскої рівної площадки плато, закінчуватися вістрям (пік). Нижня частина гори (підстава) називається підшоною, а схили від вершини до підшою – схилами.

Хребет – витягнута (лінійно) височина. Часто хребет є відгалуженням від гори. Лінія, що з'єднує найвищі точки уздовж хребта, і від який у протилежні сторони розходяться схили, називається чи вододілом топографічним гребенем.

Гірський хребет – ланцюг гір, що простираються в одному напрямку. Схили форм гірського хребта, як правило, круті, скелясті, що нерідко переходять в обриви. Гірські хребти звичайно розділені ущелинами і великими глибокими долинами.

Гірська місцевість відноситься до закритого і сильно пересічної місцевості. Поза дорогами рух частий важко. Різко пересічена гірська місцевість створює велику кількість ділянок, що не переглядаються.

Орієнтування в горах важко, тому що багато височин мають подібне

один з одним обрис, а при спостереженні гірських вершин зі зворотної сторони їхня конфігурація часто змінюється до невпізнанності.

Таким чином, різні види місцевості можуть істотно розрізнятися по характеру рельєфу, що позначається і на їхньому моделюванні.

3.2 Цифровий рельєф місцевості в географічних інформаційних системах

ГІС являє собою особливий клас інтегрованих інформаційних систем. Приставка „гео” визначає інтеграцію просторово-локалізованих даних на основі прив'язки до географічних координат, що визначають положення об'єкта в системі координат на поверхні Землі.

У процесі функціонування інтегрованої інформаційної системи все різноманіття різних вхідних даних перетвориться в єдину загальну модель (набір моделей), збережену в базі даних. Ця єдина модель, що містить весь набір вихідних і проміжних даних, називається інтегрованою інформаційною моделлю.

Інтегрована інформаційна модель не є простою сумою інформаційних моделей частин об'єкта. Вона, як правило, включає дані про зв'язки між частинами об'єкта, має більшу інформативність і більш широким спектром розв'язуваних задач, чим сукупність складових її моделей.

ГІС відрізняються широтою застосування і цільовим призначенням. В умовах розмаїтості застосування основним питанням стає створення універсальної інформаційно-математичної основи, безвідносно до її конкретного застосування для інтегрованих інформаційних моделей.

Однак, дослідник, що працює з ГІС у конкретній предметній області, деяким чином відстороняється від аналізу сутності процедур обраних їм обчислень. Тому ні сам дослідник, ні споживач інформації не знають, наскільки використані методи обробки різних кількісних характеристик відповідають вимогам предметної області. Така ситуація стає перешкодою на

шляху одержання більш точного всебічного географічного аналізу. Тому основним напрямком розвитку ГІС технологій як інструментальних засобів є включення змістовного аспекту при побудові інтегрованої інформаційної моделі системи.

Тому що основними задачами в ГІС є задачі сполученого аналізу різних просторово розподілених даних про територію, то в якості універсальної інформаційно-математичної основи повинна виступати цифрова модель місцевості (ЦММ).

Існує кілька визначень ЦММ, кожне з яких наголошує на якому або одному аспекті вивчення географічного простору. Цифрова модель місцевості – це:

- цифрове представлення просторових об'єктів, що відповідають об'єктовому складу топографічних карт і планів, використовуване для виробництва цифрових топографічних карт,
- безліч, елементами якого є топографо-геодезична інформація про місцевість і правила звертання з нею,
- цифрова форма представлення земної поверхні у вигляді мережі (матриці) чи висот списку тривимірних координат X , Y , Z .

Жодне з приведених визначень не дозволяє використовувати цифрову модель місцевості в якості універсальної інформаційно-математичної основи, тому що кожне з них спрямоване на однокомпонентну обробку даних без обліку особливостей інтеграції різних типів інформації і жодна з описуваних у такий спосіб моделей не має властивість інтелектуальності.

Для того щоб результати обчислювальних експериментів, проведених при рішенні цих задач, відповідали необхідної точності, цифрова модель місцевості повинна найбільшою мірою відповідати реальної земної поверхні. Тому переважніше таке формулювання:

- ЦММ – це сукупність безлічі метричної, атрибутивної, семантичної, параметричної інформації і класу операцій перетворення над цією безліччю.

Цифрова модель місцевості описується за допомогою завдання її логічної і фізичної структури.

Логічна структура ЦММ визначається як сукупність схем і логічних записів, що описують дану ЦММ. Логічна структура обумовлюється концепцією і методологією моделювання. Вона може включати схеми взаємозв'язку частин ЦММ у природі, у базі даних, схеми взаємозв'язку властивостей ЦММ і схеми побудови ЦММ. Вона містить логічні записи, що складають інформаційну основу і вносять змістовний аспект, до якого відносяться зміст, інтерпретація, значимість даних.

Фізична структура ЦММ визначається способом реалізації логічної ЦММ на конкретній технічній основі. Зокрема, вона задається форматом запису даних, збережених на носіях інформації. Елементом фізичної структури ЦММ є фізичний запис.

Логічна структура ЦММ описується об'єктною моделлю даних ГІС і виконується з урахуванням особливостей геоінформаційних властивостей об'єктів, що мають координати, кількісне, якісне вираження, геометричну форму, характеристики взаємно розміщення і взаємовпливу. Тому базовими є просторові атрибути географічних об'єктів, що є не що інше, як геометричний опис форми в деякому координатному просторі. Такі атрибути називають геометрією. З погляду геометричного моделювання (рис.3.4) усі моделі підрозділяються на точкові, лінійні і полігональні. Всі об'єкти створювані в системі, поза залежністю від їхнього типу й інформаційного наповнення належать до однієї з цих моделей.

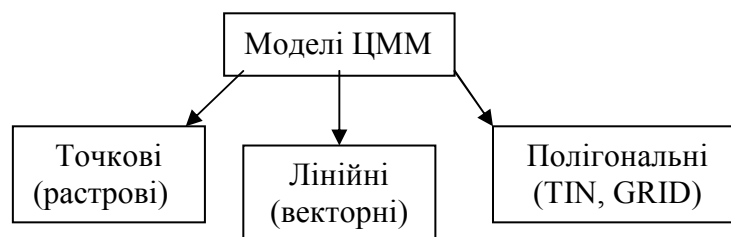


Рисунок 3.4 – Види моделей ЦММ із погляду геометричного моделювання

Цифрова модель місцевості – це, насамперед, просторовий каркас, що є основою для рішення ряду задач, а тому ЦММ повинна володіти:

- можливостями побудови і візуалізації аналітичної тривимірної топографічної поверхні,
- математичним апаратом моделювання процесів у тривимірному географічному просторі.

Виходячи з цього визначення, ЦММ містить цифрову модель рельєфу (ЦМР), як необхідну платформу для всієї іншої безлічі об'єктів.

Основою для представлення даних для ГІС і автоматизованої картографії є цифрові моделі. Під цифровою моделлю (ЦМ) географічного об'єкта розуміється визначена форма представлення вихідних даних і спосіб їхнього структурного опису, що дозволяє „вираховувати” (відновлювати) об'єкт шляхом інтерполяції, або апроксимації екстраполяції.

Під цифровою моделлю рельєфу (ЦМР) прийнято розуміти засіб цифрового представлення тривимірних просторових об'єктів (поверхонь, чи рельєфів) у вигляді тривимірних даних, що утворюють безліч висотних оцінок (оцінок глибин) і інших значень координати Z у вузлах регулярної або нерегулярної мережі сукупність записів горизонталей (ізогіпс, ізобат) чи інших ізоліній.

Цифрова модель є формою представлення зведень про рельєф і просторову мінливість різних характеристик. Відповідно, вона застосовується в задачах, де вимагаються детальні зведення про рельєф або інших особливостях місцевості. Цифрова модель місцевості призначена для автоматизації надання даних про рельєф у чисельних реалізаціях гідрологічних, метеорологічних, екологічних і інших моделей.

У проблематику створення ЦМР традиційно входять питання оцінки джерел даних про рельєф (у тому числі їхньої точності) і вибору моделей просторових даних.

На загально географічних картах суші рельєф представлений композицією трьох засобів картографічної виразності з різною просторовою

локалізацією елементів:

- системою ізоліній (горизонталей – ізогіпс),
- безліччю оцінок висот,
- сукупністю точкових не масштабних, лінійних і майданних знаків, що доповнюють зображення рельєфу горизонталями (знаки ярів і вимоїн, сухих ділянок рік, обривів, брівок, зсувів, осиплих ділянок, скель, карстових лійок, курганів, полоїв, льодовиків і т.д.).

Типи цифрових моделей рельєфу. Таким чином, первинні дані про рельєф існують чи приводяться до одного з відомих представлень поверхонь (полів) у ГІС – растровому, полігональному або векторний.

Растрова модель просторових даних – розбивка простору (зображення) на неподільні елементи (пікселі) – стосовно до ЦМР позначає матрицю висот: регулярну (звичайно квадратну) мережа висотних оцінок у її вузлах, відстань між який (крок) визначає її просторовий дозвіл. Так виглядають ЦМР, що створюються національними картографічними службами багатьох країн. Перевага такої моделі – у зручності її комп'ютерної обробки. Іноді регулярна мережа (решітка) стосовно до представлення рельєфу іменується „гридом”, а операція по перерахуванню нерегулярних даних у її вузли – „гридингом”.

Полігональна модель TIN (Triangular Irregular Network – нерегулярна триангуляційна мережа) – це поверхня, складена з трикутників різного розміру. Для побудови такої поверхні потрібний набір точок із трьома координатами, і могутні можливості по висновку на екран цієї побудови. Особливістю такої побудови об'єкта карти, як горизонталь рельєфу, є те, що в природі його не існує. Горизонталь – це спосіб відобразити інформацію, представлену у вигляді того, що часто називають полем. По суті, це не об'єкт, а модель, що саме в такому вигляді легко розуміти з папера. При перекладі цієї моделі відображення в поверхню TIN з'являється нова якість.

Полігональна модель GRID (Grid – мережа, ґрати). На відміну від моделі TIN вона складена не трикутниками, а квадратами (чи

прямокутниками), є регулярної і плоский. Як приклад можна представити шахівницю. Вона складається з кліток (осередків), колір яких може розглядатися як характеристика клітки, її атрибут. Природно, що таких атрибутів може бути багато. Якщо представити не шахівницю, а топографічну карту, то в кожного осередку може бути наявність зелених насаджень, наявність водойми, висота й ін.

Для того щоб побудувати рельєф у вигляді GRiDa, можна оцифрувати звичайні горизонталі, рознести по цих горизонталях точки, привласнивши для них значення висоти тієї горизонталі, на якій вони лежать, додати точки з відомими висотами від інших об'єктів (висотні оцінки, оцінки урізу води) побудувати по цих крапках модель TIN, а потім уже по моделі TIN побудувати модель GRID. Перехід від TIN до GRID дозволить одержати значення висот для осередків GRID, що знаходяться між горизонталями. Потім використовувати GRID у рішенні своїх задач. Модель GRID дуже схожа на растр.

Лінійна (векторна) модель. У векторній моделі об'єкти в кожному шарі, оброблені спеціальною процедурою побудови топології, що переглядає, як правило, всі об'єкти в шарі і створює опис їхнього розташування друг щодо друга. Для збереження опису розташування об'єктів один щодо одного процедура побудови топології створює ще одну або кілька спеціальних таблиць. У цих таблицях зберігаються не атрибутивні дані об'єктів, а список всіх об'єктів нашого шару з посиланнями один на одного. Для того, щоб описати розташування один щодо одного лінійних об'єктів буде потрібно ще скласти список усіх точок, що є кінцями для лінійних об'єктів.

Природно, у місцях перетинання, такі точки будуть загальними. Ці точки називаються вузлами. Тому при побудові, як говорять, лінійної топології, враховуються не тільки самі лінійні об'єкти, але і вузли. Список лінійних об'єктів зберігається в одній спеціальній таблиці, а список вузлів в іншій.

3.3 Метод створення цифрового рельєфу місцевості з використанням дистанційного зондування Землі

Перший спосіб створення цифрового рельєфу місцевості – це спосіб з використанням даних дистанційного зондування Землі.

У широкому змісті дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) це одержання будь-якими неконтактними методами інформації про поверхню Землі, об'єктах на ній або в її надрах. Термін „дистанційне зондування” звичайно включає реєстрацію (запис) електромагнітних випромінювань за допомогою різних камер, сканерів, мікрохвильових приймачів, радіолокаторів і інших приладів такого роду.

Дистанційне зондування використовується для збору і запису інформації про морський день, поверхню й атмосферу Землі, стані її надр, а також для одержання інформації про стан об'єктів під земною поверхнею. Воно здійснюється з застосуванням морських судів, літаків і вертольотів, космічних літальних апаратів, а також спеціального наземного устаткування.

Достоїнства методу ДЗЗ полягають у наступному:

- актуальність даних на момент зйомки,
- висока оперативність одержання даних,
- висока точність обробки даних за рахунок застосування GPS-технологій,
- висока інформативність,
- зміст більшої кількості інформації на знімках, чим на картах (за винятком семантичних даних назв вулиць і т.п.),
- застосування спектрональної, інфрачервоної, лазерної і радарної зйомки дозволяє побачити деталі, нерозрізнені на традиційних знімках,
- можливість у короткий термін одержувати інформацію про велику площу поверхні Землі,
- економічна доцільність,
- можливість одержання тривимірної моделі місцевості (матриці

рельєфу) при додатковій обробці в результаті використання режиму стереозйомки або лазерних методів.

Дистанційні методи характеризуються тим, що прилад, що реєструє, значно вилучений від досліджуваного об'єкта. При таких дослідженнях явищ і процесів на земній поверхні відстані до об'єктів можуть вимірятися від декількох одиниць до тисяч кілометрів. Ця обставина забезпечує необхідний огляд поверхні і дозволяє одержувати максимально узагальнені (генералізоване) зображення.

У системах такого типу мають три основних компоненти:

- пристрій для формування зображення,
- середовище для реєстрації даних,
- база для проведення зондування.

Прилади, використовувані для дистанційного зондування, розміщують на різних базах, у тому числі на землі, судах, літаках, повітряних кулях і космічних літальних апаратах. Спеціальні камери і телевізійні системи повсякденно використовуються для зйомки фізичних і біологічних об'єктів на землі, морі, в атмосфері і космосі. Камери уповільненої кінозйомки застосовуються для реєстрації таких змін земної поверхні, як ерозія морських берегів, рух льодовиків і еволюція рослинності [11].

При дистанційних дослідженнях можна одержувати інформацію про об'єкт у різних спектральних діапазонах електромагнітних хвиль: рентгенівському, ультрафіолетовому, видимому, інфрачервоному, а також при використанні ехолотів у різних діапазонах звукових хвиль.

Носії приладів дистанційного зондування можна розділити на наступні типи:

- космічні апарати,
- аероносії (літаки, вертольоти, парашлани, аеростати, радіокеровані авіамоделі),
- кораблі, судна й інші плавзасоби,
- наземні прилади (наземні лазерні сканери).

В даний час найбільш значимими, розповсюдженими і використовуваними даними ДЗЗ є дані, одержувані з космічних апаратів і аероносії.

Точність відновлення вертикальної складової при цифровій стереоскопічній обробці залежить практично тільки від просторової здатності радіолокатора, що дозволяє. Це обумовлено тим, що цифровий кореляційний аналіз знімків стереопари може бути зроблений з точністю до величини елемента дозволу. Хоча існують методи в середині піксельної обробки, що дозволяють одержати статистичну точність кореляції до половини елемента дозволу, при оцінці реальної здатності методу, що дозволяє, по висоті варто орієнтуватися на величину просторового дозволу, а просторова здатність сучасних космічних, що дозволяє, радіолокаторів із синтезованою апертурою (РСА) може складати одиниці метрів (наприклад, 8 м у РСА RadarSat).

Вхідною інформацією є зображення, представлене в цифровому вигляді на магнітних стрічках чи дисках. Оцифрування виробляється безпосередньо на борті літального апарата (наприклад, зображення із супутників серії чи Ресурс Landsat) і подальшого прийому на комп'ютер чи користувача за допомогою сканера чи відеокамери.

Після оцифрування і введення зображення в комп'ютер на етапі його попередньої обробки програмними засобами здійснюється усунення механічних перекручувань, що з'являються при скануванні. Потім впливає операція геометричної корекції, тобто трансформування зображення в прийнятну картографічну проекцію для наступного точного географічного ув'язування дані дешифрування з існуючими картографічними матеріалами.

При необхідності здійснюється монтаж декількох зображень у єдину полотнину для суцільного покриття території досліджень даними зондувань. Для монтажу варто використовувати зображення, що пройшли геометричну корекцію, для гірських районів, ортотрансформування.

Ярка корекція містить у собі серію процедур (поліпшення яскравості і

контрасту зображення, еквалізація і т.п.), призначених для одержання зображення, максимально придатного для дешифрування. Наприклад, еквалізація призначена для виявлення об'єктів, що розташовуються в межах світлих чи темних плям, а нормалізація так перетворить яскравості, що їхні значення розташовуються в інтервалі від 0 (чорне) до 255 (біле). Експертна „придатність” оцінюється дешифруванням, а результат залежить від його досвіду і кваліфікації.

В основу комп'ютерного дешифрування покладені виміри чотирьохвимірних (дві просторових координати, яскрава і тимчасова) розподілів радіаційних потоків, випромінюваних і відбиваних природними об'єктами.

Тематична обробка зображення містить у собі логічні й арифметичні операції, фільтрації, лініаментний аналіз, класифікації і серію методичних прийомів, розроблювальних у процесі дешифрування для виділення тих чи інших об'єктів. Сюди ж варто віднести візуальне дешифрування зображення на екрані комп'ютера, що здійснюється за допомогою „миші, що малює,”, використанням стереоефекту і всього арсеналу засобів комп'ютерної обробки і перетворення зображень. Візуальне дешифрування зображень на комп'ютері є найважливішим технологічним прийомом, оскільки з меншими трудовими затратами дозволяє використовувати традиційні методики дешифрування (у тому числі і стереоскопічного), давно випробувані різними фахівцями і гарними результатами.

Зображення виводиться на екран комп'ютера у вигляді матриці точок (піксель) визначеного розміру. Кожному пікселю відповідає своє значення яскравості, що багато в чому залежить від досліджуваної території (гірські породи, ґрунти, рослинність по-різному чи відбивають випускають електромагнітне випромінювання, фіксуюче на знімку). Атмосфера, розчленованість рельєфу, діяльність людини й ін. спотворюють яскраву картину. Обробка зображення орієнтована на усунення цих перекручувань і посилення яскравих відмінностей об'єктів дешифрування.

Існують чотири операції над зображеннями, що виконуються як звичайні арифметичні дії. Це додавання, вирахування, множення і розподіл двох зображень, отриманих у різних спектральних каналах, позитива і негатива, двох варіантів чи попередньої фільтрації зображення.

Ділянки зображення з яскравими, що перевищують установлений діапазон, офарблюються (наприклад, червоним). Завдяки цьому можливий візуальний контроль арифметичних операцій.

Логічних операцій, реалізованих на комплексах автоматизованої обробки зображень, звичайно сім. Це „кон'юнкція”, „диз'юнкція”, „еквівалентність”, „інверсія”, „заперечення Г”, „заперечення АБО”, що „виключає АБО”.

Фільтрації зображення застосовуються для поліпшення його якості, зняття шуму і виділення цікавлячих дослідника об'єктів [12].

Звичайно використовуються фільтри, що згладжують, і фільтри, що виявляють на зображенні перепади яскравості. Принцип дії цих фільтрів являє собою деяке перетворення значень яскравості кожної точки зображення на основі інформації про яскравість її сусідів у якій-небудь досить обмеженій околиці.

Як правило, зображення фільтрується матрицею визначеного розміру, коефіцієнти якої можуть бути задані довільно.

Згладжувальні фільтри (Average, Brown, Median, Lev, Nagao, Graham і ін.) дозволяють зняти шум і одержати однорідні ділянки зображення, придатні для подальшої обробки з метою виявлення тих чи інших структурно-речовинних комплексів.

Фільтри, що підкреслюють перепади яскравості, використовуються при пошуку на зображенні границь між різними об'єктами і при виявленні розривних порушень. До групи цих фільтрів відносяться Sobel, Sharp, Prewitt і ін.

Часто при автоматизованому дешифруванні використовується операція бінерізації відповідно до заданого значення порога. Під бінерізацією

розуміється перетворення сірого зображення в бінарне, причому всі точки вихідного зображення, яскравість яких вище заданого порога, стають білими, інші – чорними.

Поріг вибирається дослідником після вивчення розподілів яскравості по досліджуваних об'єктах. Варіювання порогом бінерізації дозволяє виділити майданні об'єкти на зображенні, а знання розподілу яскравості по структурно-речовинних комплексах – провести геологічну інтерпретацію виділених об'єктів.

Зображення можуть бути піддані морфологічним перетворенням, наприклад, при виділенні високометаморфозними і гранітизованих гірських порід.

Широкі можливості для дослідника відкривають автоматичні класифікації багатозональних зображень (з попереднім навчанням на еталонах з параметрами, що задаються.). Класифікації засновані на тім, що різні природні об'єкти мають у різних діапазонах електромагнітного спектра які відмінюються один від одного яскравістю. Аналіз яскравості об'єктів у різних зонах дозволяє ідентифікувати й оконтурити ландшафти, ґрунти, рослинність і конкретні геологічні тіла, а також оцінити ступінь їхнього забруднення.

На космічних знімках дешифрується значне число лінійних елементів, що представляють собою лінії виходу розривних структур (тріщин і систем тріщин, розламів і систем розламів) чи зон їх геодинамічного впливу. Їхнє вивчення в науковому і практичному аспектах важливо для пошуку родовищ корисних копалин, виявлення і моніторингу зон зсуву земної кори. Велике число виділюваних лінійних структур створює для інтерпретатора серйозні утруднення, як при їхньому дешифруванні, так і при кореляції систем лінеаментів різних простягань, розпізнаванні структурних закономірностей їхнього просторового розподілу і специфіки прояву.

Використання автоматизованого виділення й аналізу лінеаментів дозволяє усунути перераховані ускладнення, дає більш різноманітні

можливості і здійснюється швидше [13].

У зв'язку з тим, що дистанційні матеріали містять інформацію про всі параметри природного середовища: геологічних, географічних, сільськогосподарських, екологічних і т.п., комплексну інтерпретацію й експертну оцінку результатів дешифрування космічних зображень раціонально робити в геоінформаційних системах. Цим здійснюється перехід від складних, часто перевантажених карт, до серії взаємопов'язаних карт спеціалізованих об'єктів, що забезпечує високу структурованість інформації і дозволяє ефективно неї використовувати й аналізувати при інтерпретації результатів дешифрування.

Контури картографічних об'єктів можуть бути накладені на попередньо підготовлене і дешифроване космічне зображення. Порівняння результатів дешифрування з картографічними матеріалами дозволяє істотно уточнити і проінтерпретувати результати дешифрування. Уточнені дані зберігаються в ГІС у вигляді тематичних шарів.

Описувана технологія дає можливість створення в комп'ютерній формі моделі будівлі території. Дані дистанційного зондування використовуються для побудови моделі як одна з її невід'ємних складових частин. При цьому місце розташування кожної точки (пікселя) зображення визначається географічними координатами, за допомогою яких пікселі зв'язані з усіма наявними тематичними картами, геофізичними і геохімічними даними. За допомогою цих зв'язків яскравості космічних зображень зіставляються з геологічною будівлею (віком і складом геологічних тіл), геофізичними полями, геохімічними, а при необхідності й іншими, у тому числі табличними даними, що характеризують територію досліджень.

Зв'язок різномірної геологічної, геофізичної, геохімічної й іншої (наприклад, екологічної) інформації дозволяє найбільше повно проводити комплексну інтерпретацію дані дешифрування, шукати і виявляти неочевидні природні зв'язки між об'єктами картографування і дистанційним зображенням.

Природно, технологія дозволяє вирішувати і зворотну задачу – виявляти нові об'єкти й уточнювати картографічне зображення відомих об'єктів.

На рис. 3.5,*а* показаний знімок ділянки місцевості, отриманої РСА RadarSat, а на рис. 3.5,*б* показана цифрова модель рельєфу знятої ділянки місцевості.

Одночасно з розвитком інструментальних засобів радіолокаційного зондування удосконалюються і програмно-алгоритмічні засоби обробки даних. Розширення бази даних радіолокаційних знімків, що задовольняють вимогам стереоскопічної і інтерферометричної зйомки, робить актуальну розробку програмного забезпечення, що дозволяє виділяти з цих знімків закладену в них інформацію про рельєф.

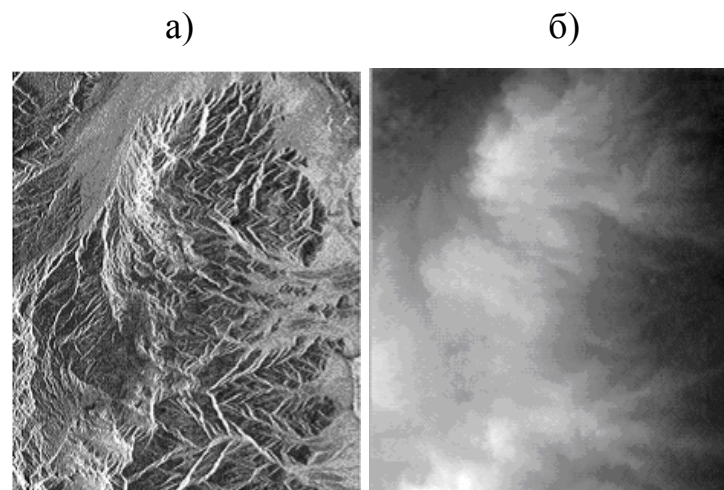


Рисунок 3.5 – Знімок і модель рельєфу, відтворена по знімку: а) ділянка місцевості, отриманої РСА RadarSat; б) показана цифрова модель рельєфу знятої ділянки місцевості.

3.4 Метод створення цифрового рельєфу місцевості на основі топографічних карт

Другий спосіб – побудова моделей рельєфу шляхом інтерполяції

оцифрованих ізоліній з топографічних карт. Цей підхід також не новий, має свої сильні і слабкі сторони. З недоліків можна назвати трудомісткість і часом недостатньо задовільну точність моделювання. Але, незважаючи на ці недоліки, можна затверджувати, що оцифровані топографічні матеріали ще багато років будуть безальтернативними джерелами даних для подібного моделювання [14].

Процес створення електронних карт (ЕК) включає наступні основні етапи:

- 1) автоматизоване перетворення вихідної картографічної інформації в цифрову форму,
- 2) символізація цифрової картографічної інформації й автоматизоване складання електронних карт,
- 3) розробка користувальницької системи керування базами даних для роботи з електронними картами.

На першому етапі зважується задача одержання на основі наявних вихідних картографічних матеріалів (аерокосмічних знімків, розчленованих оригіналів і кольорових тиражних відбитків карт) векторної цифрової моделі карти – основи електронної карти.

Ця задача зважується наступними основними методами:

- 1) методом оцифрування вихідних картографічних матеріалів на планшеті (оцифрування) шляхом відстеження контурів об'єктів, підготовки і введення семантики, структуризації цифрової інформації,
- 2) методом сканування вихідних картографічних матеріалів з наступної автоматичної чи інтерактивної векторізацією і розпізнаванням растрового зображення на екрані дисплея, уведення необхідної семантики і структуризації цифрової інформації.

Уведення даних – це процедура, зв'язане з кодуванням даних у форму з комп'ютером і їхнім записом у базу даних.

Виділяють три головних етапи введення даних:

- збір даних,

- редагування й очищення даних,
- географічне кодування даних.

Останні два етапи називаються також попередньою обробкою даних. У процесі такої обробки накопичується новий клас даних – метеодані.

Метеодані звичайно містять:

- дату одержання,
- точність позиції,
- точність класифікації,
- ступінь повноти,
- метод, використаний для одержання і кодування даних.

Способи введення даних. Перший спосіб – це введення інформації за допомогою клавіатури. Цей тип уведення, головним чином, використовується для атрибутивних даних. Звичайно введення з клавіатури сполучають з ручним оцифруванням. Другий спосіб уведення – ручне оцифрування за допомогою дигітайзера. Цей спосіб найбільше широко використовується для введення просторових даних із традиційних карт. Ефективність і якість оцифрування залежить від якості програмного забезпечення оцифрування й уміння оператора. Даний спосіб вимагає великих тимчасових витрат і допускає наявність помилок. Наступний спосіб уведення – сканування карт, що дозволяє одержувати їхнє цифрове зображення. Сучасні високо розширюючі сканери дозволяють сканувати карти з дозволом близько 20 мікрометрів (0,02 мм). Отриманий цифровий знімок має потребу в обробці і редагуванні для поліпшення якості. При цьому зображення перетворюють у векторний формат. Скановані зображення можуть безпосередньо використовуватися для виробництва карт. Крім того, є ще один спосіб уведення даних у ГІС – введення існуючих цифрових файлів. Справа в тім, що багато відомств і організації мають великі бази даних географічної інформації. Набори таких даних повинні бути доступні, а одержання даних повинне здійснюватися за допомогою сітьових технологій. Придбання і використання існуючих цифрових наборів даних є найбільш

ефективним способом заповнення даних.

Растрова модель є оптимальною для роботи з безупинними властивостями об'єктів.

Растрове зображення – це набір значень для окремих елементів (растрів, осередків, пікселей). Окремий растр характеризується координатами, глибиною кольору (у кольорових растрах), градацією сірого кольору (сіра шкала), чорний чи білий кольори (у чорно-білих зображеннях). У загальному випадку растрова картина – це звичайне фотозображення, що отримане сканування традиційно паперових карт чи аеро- і космічні фотографування ділянки земні поверхні. Растрове зображення можна охарактеризувати дозволом, вимірюваним в одиницях dpi (dot's per inch – точок на дюйм) і що вказує, скільки пікселей розташовується в одному дюймі зображення. Чим вище дозвіл, тим якісніше і інформативне зображення. Але не слід забувати, що зі збільшенням дозволу збільшується і файл растрового зображення. У ГІС звичайно використовуються растрові зображення, дозвіл яких лежить у діапазоні 200–600 dpi (виключенням можуть бути тільки аеро- і космічні знімки, дозвіл яких може досягати декількох тисяч dpi).

Як би точно не проводилося оцифрування і сканування традиційних карт, помилки неминучі. Рівень помилок у базі даних ГІС безпосередньо зв'язаний з рівнем помилок вихідних карт. Уся справа в тім, що карти не завжди адекватно відображають інформацію і не завжди точно передають дані про місце розташування об'єктів.

У процесі оцифрування можна виділити наступні помилки:

- розриви (два сегменти лінії не стикаються один з одним),
- посмикування (лінія має ділянки „пульсування”),
- петлі (лінія місцями закручується),
- перетинання (сегменти ліній накладаються один на одного).

Крім того, часто зустрічаються такі помилки як не доведення і переклад.

При цьому для автоматизації розпізнавання і векторизації растрового

зображення доцільно використовувати апарат картографічної експертної системи для настроювання і навчання програмного забезпечення на задані параметри розпізнаваних елементів і об'єктів місцевості і карти. Реалізовані в даний час сканерні технології автоматизованого одержання векторної цифрової інформації забезпечують автоматизацію розпізнавання порядку 90% по рельєфі, 50-60% по гідрографії і рослинному покриві при використанні видавничих оригіналів карт. Орієнтована продуктивність – 70-100 годин на один номенклатурний лист.

На другому етапі зважуються задачі:

- символізації векторної моделі,
- складання електронної карти по рівнях навантаження,
- контролю і редагування символізованих електронних карт,
- одержання архівної графічної символізованої копії електронної карти.

Сутність процесу символізації складається в присвоєнні кожному об'єкту коду (N) відповідного умовного знака з бібліотеки умовних знаків по класифікаційному коді, характеристикам об'єктів і їхніх значень. Цей процес виконується автоматично в залежності від масштабу і вигляду електронних карт. При цьому створюється уніфікована бібліотека умовних знаків і шрифтів. Кожен умовний знак має свій цифровий опис – векторне (i) чи растрове. Крім цього для наступної візуалізації готується масив послідовності висновку картографічного зображення.

Однієї з істотних характеристик ЕК є рівень навантаження. Вихідне зображення, наприклад, для електронної карти масштабу 1:50000 приймається за базове зображення. Далі кожному об'єкту в залежності від його значимості привласнюється один з рівнів навантаження (1,2,3,4). Такий підхід забезпечує читаність картографічного зображення на екрані дисплея практично при будь-якому його територіальному охопленні (вікні) у межах усього номенклатурного листа.

Складання електронної карти по рівнях навантаження реалізується на екрані дисплея в інтерактивному режимі по вікнах, починаючи від

найменшого вікна, у межах якого читаються всі об'єкти, з наступним збільшенням розмірів вікон по методу квадродерева. При цьому забезпечується узгодження навантаження і зведення об'єктів між вікнами як у межах одного номенклатурного листа, так і між сусідніми номенклатурними аркушами для кожного рівня навантаження. Для рішення цієї задачі доцільно використовувати апарат експертних систем для ухвалення рішення по оптимізації добору об'єктів по рівнях навантаження з урахуванням цілого ряду факторів. При цьому потрібно апарат установалення просторово-логічних зв'язків.

У процесі складання електронних карт по рівнях навантаження здійснюється програмний і візуальний контроль і редагування інформації, що, в основному, зводиться до розміщення підписів об'єктів. Процес створення електронних карт завершується одержанням символізованої графічної копії послідовно для кожного рівня навантаження, починаючи з першого (з найбільш значимими об'єктами).

Формування електронних карт здійснюється в універсальній структурі даних, що забезпечує можливість запису векторної інформації, як у послідовному, так і в коло-вузловому представленні, у растровому вигляді, довідковій інформації, а також формування сегментів даних користувачів. Технологія реалізується на комплексі автоматизованих робочих місць, об'єднаних у локальну обчислювальну сіть.

Інформаційне забезпечення технології створення системи електронних карт включає:

- систему класифікації і кодування картографічної інформації,
- правила цифрового опису картографічної інформації,
- систему (бібліотеки) умовних знаків електронних карт,
- формат даних електронних карт.

До основних методів створення електронних карт відносяться:

- методи автоматичного розпізнавання образів (растрових зображень, одержуваних при скануванні),

- методи картографічної генералізації з використанням теорії графів і логіко-процедурного підходу, апарата експертних систем,
- методи мультимедійного програмного забезпечення,
- методи експертних систем,
- методи встановлення просторово-логічних зв'язків.

Всі основні якості і переваги електронних карт виявляються при їхньому використанні. Тому поряд із власне електронними картами споживачу може видаватися система керування базами даних електронної карти, що реалізує наступні основні задачі:

- 1) створення і ведення бази даних електронної карти,
- 2) робота з картографічним зображенням:
 - відображення, масштабування, переміщення картографічного зображення в довільному напрямку,
 - керування динамічним вікном, рівнями навантаження візуалізованого зображення,
 - одержання довідок про об'єкти місцевості,
 - редагування зображення,
 - ведення класифікатора і бібліотеки умовних знаків,
 - формування, збереження, нанесення на електронних картах користувальницьких шарів і їхнє редагування,
 - ведення користувальницьких класифікаторів про бібліотеку умовних знаків (наприклад, бібліотеки спеціальних умовних знаків),
 - висновок картографічного зображення спільно зі спеціальним навантаженням на графобудівники й інші пристрої.
- 3) зв'язок зі стандартними базами даних;
- 4) користувальницький інтерфейс за рішенням прикладних інформаційних і розрахункових задач (розрахунок матриці висот рельєфу, побудова профілів місцевості, зон видимості, визначення координат і висот у точці, відстаней, азимутів).

Слід зазначити, що технологія створення електронної карти і

користувальницької системи керування базами даних реалізується на тих самих програмних модулях, що дозволяє уніфікувати програмне й інформаційне забезпечення в цілому.

Останнім часом з'явилася тенденція побудови ЦМР з обліком не тільки математичних методів апроксимації вже існуючих цифрових карт місцевості, але й обліком геологічних особливостей формованого цифрового рельєфу місцевості.

Створювана подібним чином цифрова модель місцевості виступає в якості універсальної інформаційно-математичної основи, що надає можливості структурування, сполученого аналізу різних даних і моделювання процесів у географічному просторі.

Фізико-математична модель рельєфу створюється в результаті інтеграції двох моделей:

- 1) векторного дискретно-континуального представлення поверхні рельєфу на основі методу „сферичної квадроангуляції”,
- 2) растрової фізичної моделі гравітаційного переносу.

Метод „сферичної квадроангуляції” дозволяє створювати математичний опис рельєфу найбільш наближене до реальної дійсності й ідентифікувати відомі типи поверхонь і структурних ліній. Базовою одиницею опису є математична модель елементарної поверхні, виділювана по геоморфологічним параметрах, що є безпосередніми геометричними характеристиками криволінійних об'єктів. У межах елементарних поверхонь у заданих інтервалах незмінними є крутість, експозиція, довжина, форма схилів, морфологічні характеристики, що обумовлюють процеси переміщення літогенної речовини, водяних, повітряних мас і перерозподіл кліматичних величин. Для виділення елементарних поверхонь використовуються чотири основних геоморфологічні параметри:

- абсолютна висота (глибина), розглянута у вигляді безупинної функції планових координат: $H=H(x,y)$,
- перша похідна від даної функції $H'(x,y)$, за екстремальним значенням

модуля яка терасуються лінії максимальних і мінімальних ухилів,

- нормальна кривизна земної поверхні, тобто $H''(x,y)$,
- горизонтальна кривизна земної поверхні.

Перераховані параметри застосовуються для опису математичної моделі рельєфу і створення елементарного геометричного об'єкта, використовуюваного при побудові моделі земної поверхні в тривимірному просторі. Границі елементарних поверхонь визначають структурні криві, що відповідають структурним лініям рельєфу. Характеристики структурних ліній використовуються для класифікації поверхні рельєфу по профілю. Елементарні поверхні генерують ієрархію поверхонь більш високих рівнів, з яких конструюється тривимірна модель рельєфу. Побудована в такий спосіб поверхня являє собою нерегулярну сітку, вузли якої відповідають характеристичним точкам, що визначають границі елементарних поверхонь, що відповідають структурним лініям рельєфу. Для побудови тривимірного зображення рельєфу використовується локальна інтерполяція кривими. Ця інтерполяція є керованою, і вона забезпечує можливість побудови і редагування поверхні на локальному рівні і застосування рекурсивного алгоритму побудови, що не вимагає великих обчислювальних ресурсів.

Для тривимірних кривих обрана модель НРФС-кривих (неоднорідний раціональний фундаментальний сплайн). Раціональна параметрична крива на основі В-сплайнів $N_{i,m}(t)$, побудована по вершинах $p(I=1,2,\dots,n \geq m)$ с вагами w_i , може бути описана в кожній своїй точці єдиним образом за допомогою радіус – вектора

$$r(t) = \frac{\sum_{i=1}^n N_{i,m}(t) w_i p_i}{\sum_{i=1}^n N_{i,m}(t) w_i}, \text{ где } t_{min} \leq t \leq t_{max}$$

НРФС–криві володіють поруч особливостей, що дозволяють широко використовувати їх у комп'ютерному моделюванні тривимірних кривих. НРФС–крива має достатню гнучкість. Її можна легко редагувати шляхом

зміни положення вершин. Сукупність В-сплайнів порядку m являє собою базу, на основі якої можна побудувати інтерполяційні криві. Крім того, НРФС-крива другого порядку збігається зі своєю характеристичною лінією, тобто первісним представленням кривої (рис. 3.6).

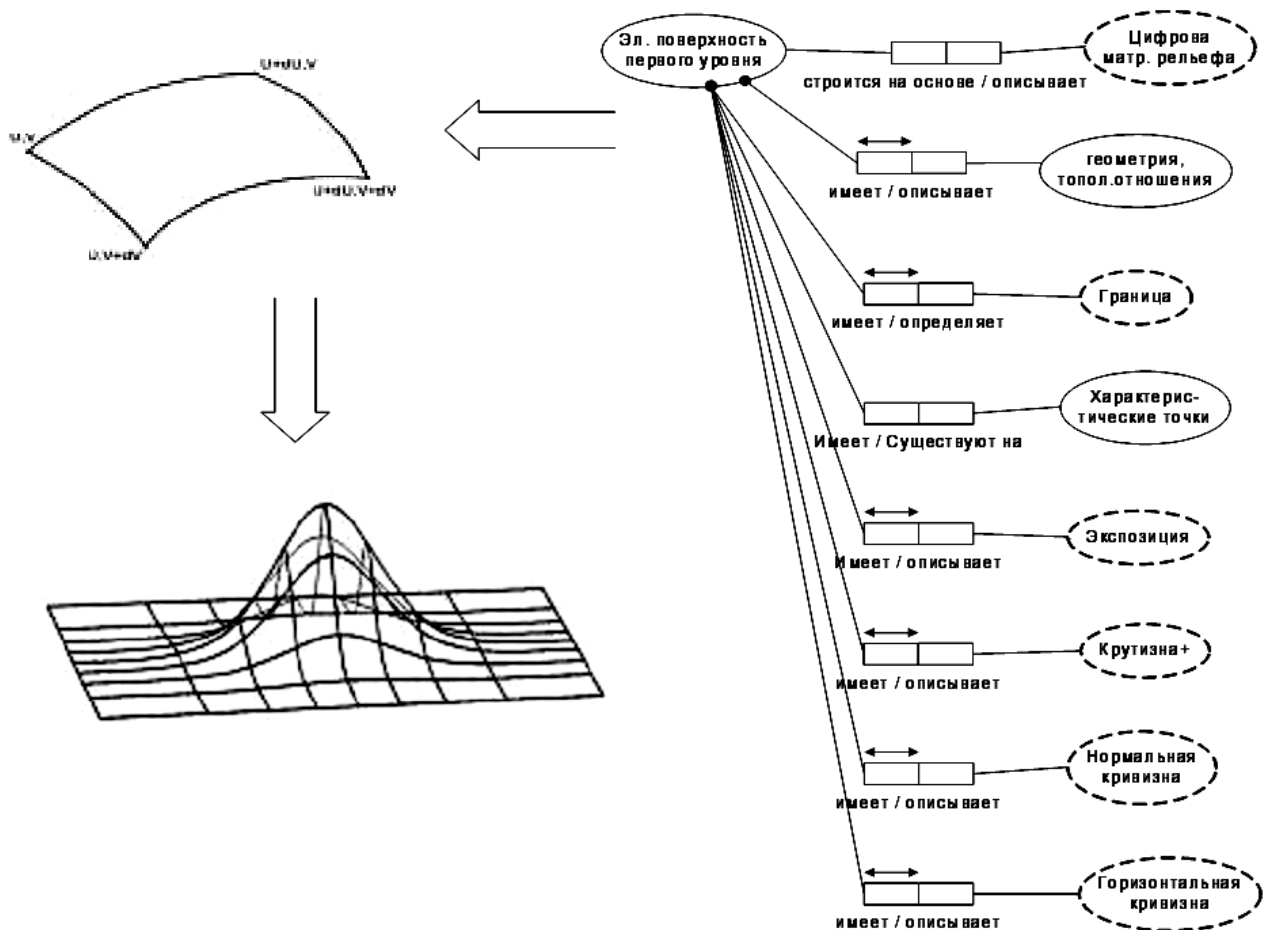


Рисунок 3.6 – Об'єкт „елементарна топографічна поверхня”

Властивості лінійних елементів/структурних ліній і їхня взаємодія з іншими елементами рельєфу визначаються властивостями прилягаючих елементарних поверхонь. Необхідні морфометричні характеристики обчислюються за допомогою першої і другої квадратичної форми поверхні, що не вимагає великої кількості обчислень при використанні рекурентних співвідношень для радіуса-вектора поверхні.

При проектуванні класу елементарної поверхні визначаються

властивості і методи взаємодії даного об'єкта з іншими об'єктами системи. На цьому рівні геометрична і геоморфологічна концепції елементарної поверхні доповнюються концепцією інтелектуального об'єкта. У рамках цієї концепції для реалізації механізму спадкування застосовується математична модель динамічного нейрона, що дозволяє реалізувати відразу кілька математичних операцій для рішення різних картографічних і геоінформаційних задач у рамках цієї моделі. Така модель дозволяє динамічно визначати властивості об'єктів-спадкоємців у залежності від різних форм поверхонь рельєфу. На основі нейронів будується нейронна мережа з різними властивостями, що забезпечує побудову експертного класифікатора ієрархії об'єктів поверхні рельєфу.

Подібна ЦМР не тільки представляє ієрархію природних об'єктів поверхні рельєфу, але і дозволяє одержувати похідні морфометричні чи інші дані:

- обчислення кутів нахилу й експозиції схилів,
- аналіз видимості/невидимості,
- побудова тривимірних зображень,
- побудова профілів поперечного переріза,
- оцінку форми схилів через кривизну їх поперечного і поздовжнього перетину, вимірювану радіусом кривизни головного нормального чи перетину її знаком, тобто опуклістю увігнутістю,
- обчислення позитивних і негативних обсягів,
- генерацію ліній сеті тальвегів і вододілів, що утворюють каркасну сіть рельєфу, його структурних ліній, і інших особливих точок і ліній рельєфу: локальних мінімумів, чи западин і локальних максимумів, чи вершин, сідловин, брівок, ліній обривів і інших порушень „гладкості” поверхні, плоских поверхонь з нульовою крутістю,
- інтерполяцію висот,
- автоматизацію аналітичного відмивання рельєфу шляхом розрахунку відносних освітлень схилів при вертикальному, бічному чи комбінованому

висвітленні від одного чи більше джерела.

Ця об'єктна модель векторного дискретно-континуального представлення рельєфу забезпечує відповідність з однієї сторони між елементами і формами, виділюваними морфологічно, з іншої сторони між структурно-змістовною організацією, генезисом, віком рельєфу, характером динаміки сучасних рельєфоутворюючих процесів, дає можливість побудови моделей розвитку рельєфу.

Структурна колова лінія водозбірного басейну збігається з положенням природного водотоку, так що елементарний клас гідрологічної мережі – природний водотік зв'язаний із класом елементарний басейн. Цей зв'язок представляє залежність „один до одного”, що ілюструє відповідність кожному природному водотоку елементарного басейну.

Клас сеті, що представляє об'єкт „річна,” містить колекцію об'єктів „ріка”. Об'єкт „річна сіть” має розгалужену деревоподібну структуру, що характеризується безліччю вузлів, що відбуваються від початкового вузла. При формуванні ієрархії об'єктів річкової сіті високого порядку застосовується рекурсивний принцип організації структури даних. До переваг рекурсивної структури даних відносяться:

- здатність змінювати розмір, у зв'язку з чим, з'являється можливість уводити потенційно нескінченні і циклічні структури даних, указувати приналежність деякої підструктури декільком різним структурам,

- наявність ефективних алгоритмів обробки, названих алгоритмами проходження.

Тому що, кожен об'єкт „природний водотік” зв'язаний з елементарним басейном (має посилання на об'єкт „елементарний басейн”), те на базі об'єкта „ріка” будується клас „басейн ріки”, що також представляє деревоподібну структуру з вузлами, що відповідають басейнам припливів. Така модель даних дозволяє визначати моделі взаємозв'язків між водотоками і фізико-географічними характеристиками їхніх басейнів і зберігати/обчислювати морфометричні параметри річкової мережі і її басейну.

У структурі класів, що описує гідрологічну мережу, визначається клас об'єктів „гідрологічна посада”. Ці об'єкти містять зведення за даними гідрологічного спостереження й оскільки ці об'єкти прив'язані до об'єкта „природний водотік”, тоді, використовуючи деревоподібну модель ріки й алгоритми обходу, можна виконати перерахунок гідрологічних параметрів для будь-якої точки гідрологічної мережі.

Тому що базовою властивістю моделі є органічна єдність моделей рельєфу і гідрографічної мережі, то забезпечується високий рівень детальності і точності ландшафтно-гідрологічного аналізу і перерахунку параметрів стоку. Класифікація поверхонь рельєфу і його структурних ліній по природно-екологічних властивостях дозволяє виконати детальне районування території по екологічних особливостях рельєфу, будувати адекватні математичні моделі перерозподілу в рельєфі природних і антропогенних матеріально-енергетичних потоків.

Метод сферичної квадроангуляції дозволяє:

- автоматизовано типізувати структурні лінії рельєфу,
- розробити математичну модель поверхні кожного конкретного елементарного об'єкта рельєфу з комплексу показників,
- визначати параметричні характеристики взаємозв'язків елементарних об'єктів поверхні,
- визначати параметричні характеристики взаємозв'язків ієрархії елементарних поверхонь і гідрологічної мережі, географічних компонентів, ландшафтів,
- забезпечити детальний морфодинамічний аналіз,
- підтримувати дискретне і континуальне представлення рельєфу.

Класи лінійних і точкових елементів, отримані методом „сферичної квадроангуляції”, являють собою структурний каркас рельєфу і є базою для побудови гравітаційно-динамічної моделі рельєфу – растрової фізичної моделі гравітаційного переносу.

З фізичної точки зору процес гравітаційного переносу, поряд з

теплопровідністю і дифузією, може бути віднесений до процесів градієнтного переносу, що підкоряються рівнянню:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = \sum_n \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D \frac{\partial \psi}{\partial x_i} \right),$$

де ψ – степнна величина,

$D=D(X_1, \dots, X_n)$ –коефіцієнт переносу ψ в даній точці простору [15].

Для моделі гравітаційного переносу в поверхневому шарі земної кори ψ має сенс щільності потенційної енергії, а D – характеристика, що описує рухливість у шарі гіпергенеза. Зокрема, на скелястих ділянках коефіцієнт переносу – істотно менше, ніж на піщаних осипах, а в лісі менше ніж на безлісних ділянках. У застосуванні до побудови гравітаційно-динамічної моделі за даними топографічних карт, елементи, прямо чи побічно утримуючу інформацію про висоти місцевості можуть бути інтерпретовані як джерела потенційної енергії. Елементи ж, що містять інформацію про властивості рельєфу визначають значення коефіцієнта переносу.

Для чисельного моделювання процесу гравітаційного переносу можна використовувати GRID модель з регулярною структурою, у якій розмір осередку настільки малий, що всі параметри рельєфу усередині її можна вважати постійними. На практиці розмір осередку вибирають порядку величини погрішності вихідних матеріалів, тому що велика точність не має змісту, а збільшення розміру осередків приводить до втрати інформації.

Гравітаційно-динамічна цифрова модель рельєфу дозволяє врахувати не тільки геометричну складову даних про рельєф, але і його властивості в кожній точці простору. Більш того, її застосування дає можливість простежити зміну поверхні рельєфу з часом.

Подібна фізична модель адекватно описує процес формування рельєфу земної поверхні в гравітаційному полі Землі. Модель гравітаційного переносу речовини в поверхневому шарі земної кори дозволяє врахувати

ступінь плинності геологічного субстрату в кожній точці простору. Ця модель може використовуватися як для одержання статичної моделі земної поверхні, так і для моделювання різних екзогенних процесів. Модель коректно відображає лінії розривів – знаки обривів, осипів, знаки насипів і виїмок штучного походження, що передаються змінами в плинності геологічного субстрату (рис. 3.7).

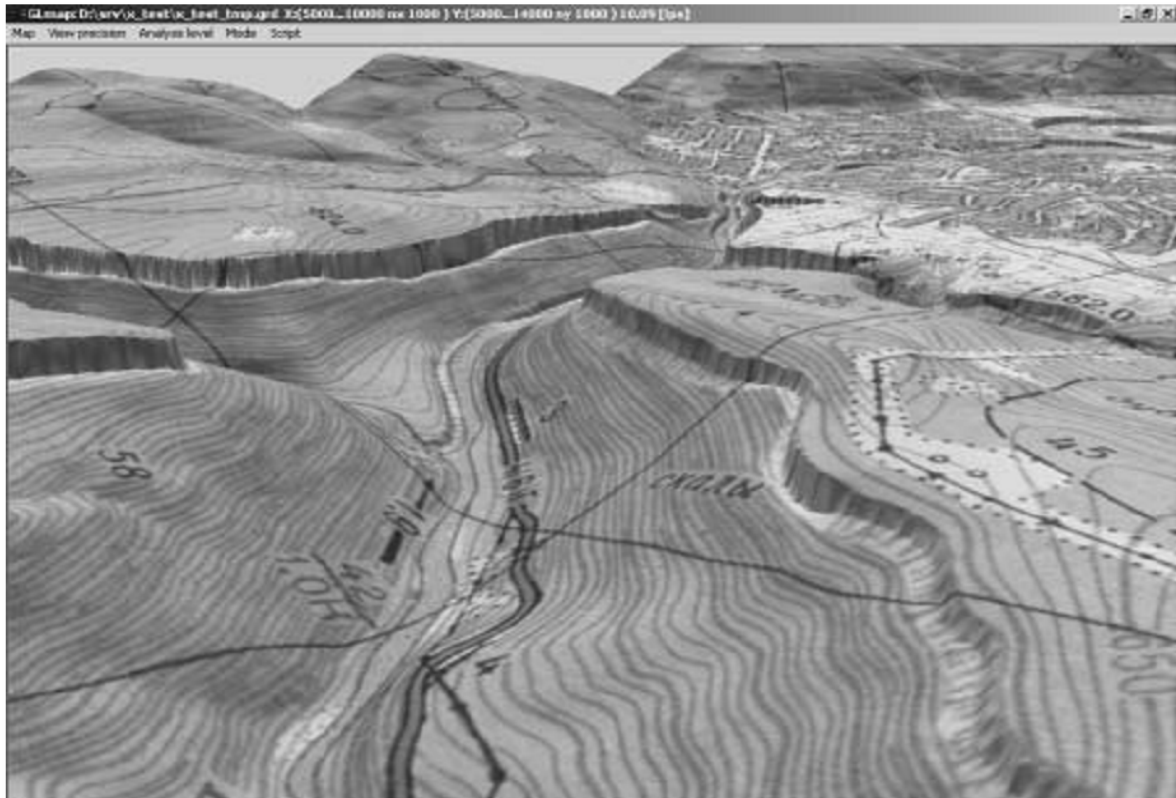


Рисунок 3.7 – Приклад візуалізації рельєфу засобами динамічно-динамічній-гравітаційно-динамічної ЦМР із натягнутою топографічною картою

Модуль гравітаційно-динамічного представлення рельєфу призначений для моделювання переносу речовини й енергії не тільки в геодинамічному шарі земної кори, але й у гідросфері й атмосфері. На його основі коректно будуються річкові долини й ареали затоплення в період паводків, забезпечуються можливості моделювання зсувних, селевих процесів і т.д.

Для побудови інтегрованої фізико-математичної моделі рельєфу в якості вихідних даних використовуються електронні топографічні карти.

Вибір саме цих джерел даних визначається тим, що:

- 1) топографічні карти є найбільш доступними з погляду ціни,
- 2) у складанні топографічних карт бере участь експерт, що проводить первинну генералізацію – виділяє основні риси рельєфу в масштабі карти, роблячи їх більш характерними для даного типу рельєфу,
- 3) накопичений досить великий фонд топографічних карт створених на тривалому тимчасовому періоді, що дозволяє створювати історичний рельєф, а також відслідковувати динаміку розвитку форм і типів рельєфу.

Описана ЦМР є базовою основою для побудови цифрової моделі місцевості яка володіє властивостями нагромадження інформації і можливості використання накопиченої інформації для зміни своїх можливостей і адаптації до змін, тобто ресурсами й інтелектуальністю.

3.5 Оцінка можливості використання даних дистанційного зондування Землі для створення цифрового рельєфу місцевості

В даний час дані супутникового моніторингу стають найважливішою складовою інформаційного забезпечення суспільства, необхідного для безпечного існування і стійкого економічного розвитку будь-якої держави. У коло активних споживачів космічної інформації в сучасній державній інфраструктурі входять метеослужби, міністерства, зв'язані з керуванням природними ресурсами, транспортом, будівництвом, картографією, енергетикою, а також силові відомства і природоохоронні організації. Для одержання необхідних даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) країни експлуатують власні космічні системи і закупають космічну інформацію закордонних комерційних систем ДЗЗ.

Зараз на навколосемних орбітах знаходиться кілька десятків природо-ресурсних космічних апаратів (КА). Цінова політика надання матеріалів ДЗЗ

залежить від того, яка організація надає матеріали, з якого джерела (супутника і спектрального каналу) замовляються матеріали. Для рішення багатьох тематичних задач необхідно скласти комплекти даних з різних приладів і з різних КА. Інформаційний продукт із різних КА відрізняється цілим поруч характеристик, серед них – якість (інтегрована характеристика) і вартість. У зв'язку з цим виникає необхідність оптимального планування збору супутникових даних за критеріями, що враховують параметри якості і фінансові характеристики.

Незважаючи на те, що космонавтика активно встає на „комерційні рейки”, висока вартість розробки і виготовлення супутників і не менш висока вартість його запуску в космос, спільно дають дуже значну суму (від 100 млн. дол. США), що безпосередньо впливає на вироблення цінової політики у відношенні космічних знімків. Також у ціну входять витрати на створення й експлуатацію численних станцій прийому даних дистанційного зондування, витрати на зарплату фахівцям, що підтримують роботу супутника, інженерам і фахівцям інших напрямків, що забезпечують безперебійний потік даних від супутника безпосередньо до замовника.

Таким чином, незважаючи на запуски нових супутників і ріст конкуренції, у найближчі 10-15 років падіння цін на інформацію про дистанційне зондування Землі не передбачається. При цьому в зниженні цін зацікавлені абсолютно усі – компаніям-операторам супутників і компаніям, що поширюють космічні знімки, це необхідно для залучення нових замовників, а замовникам для зниження собівартості виконуваних ними робіт, але факти в наявності. Конкуренція в космічній галузі через фінансову грандіозність проектів розвивається надзвичайно повільно, і саме це є основною причиною довгострокової стабілізації цін з незначним коефіцієнтом зниження.

Як приклад проаналізуємо ціни на надання послуг по ДЗЗ вітчизняного ТОВ „ТВІС” – 03680 р. Київ, вул. Паладіна, 44.

На підставі дистриб'юторських і партнерських угод зі світовими

операторами космічних програм ТОВ „ТВІС” поширює дані високого і надвисокого дозволу із супутників Geoeye-1, IKONOS, QuickBird-2, WorldView-1, Rapideye, RadarSat, EROS-B, ALOS, TerraSAR-X, IRS, Cartosat, ResourceSat.

Космічний апарат США (табл. 3.1) GeoEye-1 запускений 6 вересня 2008 року і має найвищий дозвіл серед усіх комерційних супутників. Супутник виведений на полярну сонячно-синхронну орбіту висотою 681 км, що забезпечує його проходження над будь-яким районом Землі кожні 2 дні (у залежності від широти). Супутник призначений для одержання цифрових зображень земної поверхні з просторовим дозволом 41 см у панхроматичному режимі і 1,65 м у мультиспектральному режимі при зйомці в надир.

Таблиця 3.1 – Вартість одержання даних із супутника GeoEye-1

	ціна за км ²	мінімальне замовлення
Нова зйомка	35 дол.	100 км ²
Нова стереозйомка	66 дол.	100 км ²
Архівна зйомка	18 дол.	49 км ²

Відповідно до законодавства США, дані зйомки для комерційних організацій штучно закругляються до 50 см і 2 метрів відповідно. Супутник GeoEye-1 має високу маневреність, що дозволяє одержувати великий обсяг даних за один проліт. Розрахунковий термін перебування на орбіті складає 7 років [16].

Супутники США ДЗЗ високого дозволу WorldView-1 і WorldView-2 (табл. 3.2) були запуснені відповідно в 2007 і 2009 році. В даний час ці супутники, що дозволяють одержувати дані з дозволом 50 см/піксель, є основними постачальниками нових знімків на територію України.

Таблиця 3.2 – Вартість одержання даних із супутника WorldView

	мінімальне замовлення	ціна за км ²
Нова зйомка (PAN, MSI чи PSM)	90 км ²	30 дол.
Нова зйомка (комплект PAN+MSI)	90 км ²	35 дол.
Архів (PAN, MSI чи PSM)	25 км ²	22 дол.
Архів (комплект PAN+MSI)	25 км ²	26 дол.

WorldView-2 – комерційний апарат з восьми канальним спектрометром високого дозволу, що включає традиційні спектральні канали в діапазонах: червоний, зелений, синій і ближній інфрачервоний-1 (NIR-1), а також чотири додаткових спектральних канали в діапазонах: фіолетовий (чи прибережний – coastal), жовтий, „крайній червоний” (red edge), ближній інфрачервоний-2 (NIR-2). Спектральні канали супутника WorldView-2 можуть забезпечити більш високу точність при аналізі стану рослинності, виділенні об'єкти, аналізи берегової лінії і прибережної акваторії. Дані WorldView-2 мають точність 6 м.

Ізраїльський супутник EROS-B (табл. 3.3) був запущений 25 квітня 2006 року російською ракетою „старт-1” з полігона Вільний в Амурській області.

Таблиця 3.3 – Вартість одержання даних із супутника EROS-U

	мінімальне замовлення	ціна за сцену	ціна за км ²
Нова зйомка PAN	1 сцена (49 км ²)	1265 дол.	-
Нова стерео зйомка	2 сцени (49 км ²)	2490 дол.	-
Архівна зйомка PAN	25 км ²	637 дол.	13 дол.

У класі цивільних супутників детальної зйомки Землі EROS-B є єдиним космічним апаратом класу міні: при масі 290 кг він передає на Землю зображення з просторовим дозволом 0,7 м. Супутник відноситься до апаратів подвійного призначення і призначений для інформаційного забезпечення силових відомств, державних цивільних структур і

комерційних компаній.

Японський супутник ALOS (табл. 3.4) був запусканий 24 січня 2006 року з японського космодрому Танегашима і був виведений на сонячно-синхронну орбіту висотою 691,65 км.

Таблиця 3.4 – Вартість одержання даних із супутника ALOS

	ціна за сцену
Панхром 2,5 м (кадр 35км x 35км)	1100 дол.
Мультиспектор 10 м (кадр 70км x 70км) 4 канали	1100 дол.

Власником супутника є японське аерокосмічне агентство JAXA. Супутник ALOS оснащений: картографічної стерео камерою PRISM що дозволяє одержувати знімки з дозволом до 2,5 м; мультиспектральною камерою (AVNIR-2) для одержання кольорових знімків з дозволом 10 м; радаром PALSAR L-діапазону, призначеним для цілодобового і всепогодного спостереження Землі і що дозволяє одержувати зображення з дозволом від 10 до 100 метрів. Сенсор PRISM складається з трьох об'єктивів для зйомки вперед, вниз і назад. PRISM забезпечує не тільки високу здатність, що дозволяє, але також і ширину смуги покриття до 70 км.

Індійська космічна програма IRS (табл. 3.5) (Indian Remote Sensing satellites) успішно функціонує з 1988 року з моменту запуску першого супутника цієї серії IRS-1A. Космічний апарат IRS-1C був запусканий 28 грудня 1995 року російською ракетою „блискавка” з космодрому Байконур (Казахстан). IRS-1D був запусканий 29 вересня 1996 року за допомогою ракети PSLV-C1 з космічного центру ім. Сатиша Дхвана (о. Шрихарикота). Супутники IRS-1C, IRS-1D були виведені на полярну сонячно-синхронну орбіту висотою 817 км і 373-823 км відповідно.

Супутники призначені для одержання цифрових зображень земної поверхні з просторовим дозволом 5,8 м у панхроматичному режимі, з дозволом 23,5 і 70 м у мультиспектральному режимі (LISS-3), а також з

дозволом 188 м (WiFS).

Таблиця 3.5 – Вартість одержання даних із супутника IRS

	розмір кадру	ціна	частина кадру
PAN, 5.80 м/піксель, чорно-біле зображення (панхром)	(23 x 23) км	435 дол.	1/9
PAN, 5.80 м/піксель	(23 x 46) км	690 дол.	2/9
PAN, 5.80 м/піксель	(23 x 70) км	975 дол.	1/3
PAN, 5.80 м/піксель	(46 x 46) км	1260 дол.	4/9
PAN, 5.80 м/піксель	(46 x 70) км	1830 дол.	2/3
PAN, 5.80 м/піксель	(70 x 70) км	2205 дол.	кадр
LISS-3, мультиспектральні дані, 23.50 м/піксель	(70 x 70) км	290 дол.	1/4
LISS-3, 23.50 м/піксель	(70 x 140) км	540 дол.	1/2
LISS-3, 23.50 м/піксель	(140 x 140) км	900 дол.	кадр

Для порівняння приведені ціни на надання послуг по ДЗЗ російської фірми СОВЗОНД (<http://www.sovzond.ru>)(табл. 3.6).

Таблиця 3.6 – Вартість одержання дані фірми СОВЗОНД

супутник / сенсор	країна/агентство	вартість знімка, дол	ширина смуги зйомки / кадру	дозвіл у пікселе, м
Meteosat / MVIRI	ЕКА	113	півкуля	2500
NOAA / AVHRR	США	115	2400 км	1000
Про / МСУ-СК	Росія	1300	600 км	150
IRS	Індія	300	130 км	36
MOS	Японія	316	100 км	50
Landsat / MSS	США	1233	(185 x 170) км	80
Про / МСУ-Э	Росія	200	45 км	35
Landsat / TM	США	5180	(185 x 170) км	30
Spot / XS	Франція	2487	60 км	20
Spot / P	Франція	3133	60 км	10

Аналіз показує, що в різних організаціях і комерційних фірмах на однотипну космічну інформацію ціни відрізняються несуттєво. Тому нескладно розрахувати границі вартості знімків, необхідних для придбання

для складання цифрової карти рельєфу всієї території України. При цьому потрібно врахувати те, що для складання цифрової карти рельєфу потрібні або дані альтиметричної зйомки із супутника, подібного RadarSat, або стереографічні знімки місцевості з високим дозволом.

Для території України, площа якої складає 603,7 тисячі квадратних кілометрів, вартість знімків буде виражатися в межах від 400 тис. доларів (стерео зйомка GeoEye-1) до 31 млн. доларів (стерео зйомка EROS-Y) у цінах 2010 року.

Ніякий вищий навчальний заклад країни, та й велика частина державних установ не в змозі придбати космічні знімки для цілей складання цифрових карт рельєфу місцевості за подібні гроші.

Тому на даному етапі розвитку економіки застосовувати метод створення цифрового рельєфу місцевості на основі даних дистанційного зондування Землі представляється скрутним.

3.6 Оцінка можливості використання топографічних карт для створення цифрового рельєфу місцевості

Топографічні елементи місцевості зображуються на топографічних картах у вигляді умовних знаків, знаючи які, можна представити характер і взаємне розташування місцевих предметів. Абсолютно всі об'єкти місцевості позначити неможливо, навіть на карті найбільшого масштабу. З метою поліпшення наочності і читання топографічної карти дрібні і незначні об'єкти на ній не відбиваються.

Умовними знаками топографічних карт називається система графічних, буквених, цифрових і кольорових позначень, що дозволяє зобразити місцевість на карті. До умовних знаків завжди висувалися серйозні вимоги, основними з яких є:

- знаків не повинне бути багато, оскільки їхній весь потрібно знати;
- знаки повинні нагадувати об'єкт, що зображується;

- знаки повинні бути досить простими для креслення і запам'ятовування.

Тому умовні знаки періодично змінюються. В даний час використовуються умовні знаки, прийняті в 1983 році. Умовні знаки стандартні й обов'язкові для усіх відомств і установ, що займаються створенням топографічних карт. На всіх топографічних картах умовні знаки тих самих об'єктів у цілому однакові і відрізняються тільки розмірами. Цим і забезпечується стандартність умовних знаків і полегшується читання карт різних масштабів.

Графічні умовні знаки поділяються на масштабні, не масштабні, лінійні і пояснювальні.

Масштабні (контурні) умовні знаки застосовуються для зображення місцевих предметів, розміри яких виражені в масштабі карти, і можна визначити площа такого об'єкта (ліс, луг, чагарник, болото, і т.п.). Зовнішні границі (конттури) таких об'єктів відбиваються на карті точковим пунктиром, якщо вони не збігаються з лініями місцевості (дорогами, ріками і т.п.).

До пояснювальних знаків належать ті, які вказують на рід рослинності, напрямок плину рік, глибину болота і т.п.

Не масштабні умовні знаки застосовуються для зображення об'єктів, розміри яких не можна показати в масштабі карти (вежі, колодязі, пам'ятники, окремі дерева, і т.п.), а, отже, не можна визначити по карті шляхом вимірів. Точне розташування цих предметів визначається головними точками, якими і користуються при визначенні координат, вимірі відстаней і рішенні інших задач.

Лінійними знаками відбиваються об'єкти місцевості, у яких по карті можна вимірювати довжину, але не можна вимірювати ширину (дороги, канали, нафтопроводи, лінії електропередач, і т.п.).

Крім графічних умовних знаків, якими відбиваються місцеві предмети, для додаткової характеристики застосовуються повні і скорочені підписи і цифрові позначення.

Для підвищення наочності топографічні карти друкуються в квітах, що відповідають розцвіченню об'єктів місцевості: ліс – зеленим, гідрографія – синім, рельєф і піски – коричневим, щільно забудовані квартали населених пунктів і автодороги з покриттям – жовтогарячим кольором.

Топографічні дані – це дані, що нанесені (рис.3.8) на топографічні карти. Топографічна карта – детальна великомасштабна загально географічна карта, що відображає розміщення і властивості основних природних і соціально-економічних об'єктів і дає можливість визначити їхнє планове і висотне положення.



Рис. 3.8 – Вирізка частини топографічної карти

Топографічні карти створюються (складаються) головним чином на основі:

- обробки аерофотознімки території,
- шляхом безпосередніх вимірів і зйомки об'єктів місцевості,
- картографічними методами (за допомогою карт більш великих масштабів).

Основними методами топографічної зйомки є польовий і камеральний (лабораторний).

Як і будь-яка інша географічна карта, топографічна карта є зменшеним, узагальненим і образно-знаковим зображенням місцевості. Вона створюється за визначених математичних законах, що зводять до мінімуму перекручування, що неминуче виникають при переносі поверхні земного еліпсоїда на площину, і, разом з тим, забезпечують максимальну її точність, на відміну від інших картографічних виробів [17].

До топографічних даних відносять:

а) Рельєф у вигляді ізовисотних ліній.

Рельєф – сукупність просторових форм (нерівностей) земної поверхні. Він є одним з головних елементів географічного середовища. Характер рельєфу враховується при освоєнні і заселенні території, розвитку транспорту, промисловості, сільського господарства і будівництва, виборі місця для населених пунктів, бойових дій тощо. Задача відображення рельєфу на сучасних картах у цілому зводиться до двох моментів: 1) рельєф на картах повинний бути пластичним, об'ємним, наочним; 2) рельєф повинний бути вимірним; по картах можна визначати абсолютні і відносні висоти, крутість, довжину й експозицію схилів, тощо.

Кожен умовний знак несе визначену інформацію про місцевий предмет. Дуже важливо вміти як можна повніше розкрити зміст умовного знака. За формою і накресленням умовного знака спочатку визначають, який місцевий предмет зображений, а потім докладно, по додаткових елементах малюнка основного умовного знака, пояснювальним знакам, підписам і цифрам, визначають характер зображеного на карті місцевого предмета.

б) Населені пункти.

Населені пункти в залежності від характеру виробничої діяльності населення і кількості жителів у них поділяють на міста, селища міського типу, селища сільського і дачного типів. Населені пункти, промислові і сільськогосподарські підприємства зображуються на великомасштабних

картах з дотриманням їхньої зовнішньої границі і характеру планування, з показом вулиць, перехресть, площ, парків, садів, і т.п. Населені пункти при зображенні на картах поділяють по типі поселення, чисельності жителів і політико-адміністративному значенню.

Найважливіше значення мають міста: великі – понад 100 тисяч жителів, середні – від 50 до 100 тисяч жителів і малі – менш 50 тисяч жителів.

Типи (категорії) населених пунктів і чисельність жителів у них відзначають на картах накресленням шрифтів офіційних назв цих пунктів. Міста підписуються прямим шрифтом великими буквами, селища міського типу – нахиленим (вправо) шрифтом великими буквами, селища сільського типу – прямим шрифтом малими буквами.

За назвою населеного пункту сільського типу вказується кількість жителів у тисячах. Чим великими буквами написана назва населеного пункту, тим більший він по своєму адміністративному значенню чи за кількості жителів. Неофіційні назви населених пунктів, прийняті серед місцевих жителів, вказуються в дужках під офіційною назвою. Якщо назва населеного пункту підкреслено тонкою лінією – це значить, що, поблизу є залізнична станція чи пристань з такою ж назвою.

Магістральні і головні проїзди через населені пункти виділяються більш широким умовним знаком. Як правило, таким умовним знаком відзначають ті вулиці, що з'єднують по найкоротшій відстані дороги вищих класів, що підходять до населеному пункту. У залежності від розмірів займаної площі, промислові, сільськогосподарські і соціально-культурні об'єкти на території населених пунктів позначаються масштабними, не масштабними умовними знаками з відповідними скороченими пояснювальними підписами.

Окремі місцеві предмети, що мають значення орієнтирів, наносяться на карту найбільше точно. До їхнього числа належать: видатні пам'ятники і монументи, телевежі і радіощогли, шахти і штольні, церкви, кургани, тощо.

в) Дорожня мережа.

Дорожня мережа позначається на топографічних картах дуже докладно. Необхідно не тільки знати, але і чітко представляти характер і властивості кожної дороги.

Залізниці позначають на картах усі без винятку і класифікують:

- по ширині колії (нормальної колії, вузькоколійні чи трамвайні шляхи);
- за виглядом тяги (електрифіковані і не електрифіковані);
- за кількістю шляхів (одноколійні, двоколійні, триколійні);
- за станом (діючі; споруджувані; розібрані).

На залізницях позначаються станції, роз'їзди, платформи, депо, шляхові посади і будки, насипи, виїмки, мости, тунелі і т.п. Автомобільні і ґрунтові дороги при зображенні на картах розділяють на дороги з покриттям і без покриття. До доріг з покриттям належать: автомагістралі (автостради), автомобільні дороги з удосконаленим покриттям (удосконалені шосе) і автомобільні дороги з покриттям (шосе).

На топографічних картах позначаються всі наявні на місцевості дороги з покриттям. Вони накреслюються в двох ліній і зафарбовуються жовтогарячим кольором. Цифрами і скороченими написами вказуються ширина дороги, полотнини, матеріал покриття, що підписують безпосередньо на умовних знаках дороги. Наприклад, на шосе підпис 8(12) А значить: 8 – ширина проїзної частини в метрах, 12 – ширина земляної полотнини в метрах, А – матеріал покриття (асфальт).

Автомобільні дороги з покриттям допускають рух транспорту протягом року. Лінії зв'язку уздовж доріг позначають на картах лише тоді, коли вони відходять від дороги.

На топографічних картах також позначають: автомобільні дороги без покриття (поліпшені ґрунтові дороги), ґрунтові дороги (путівці), польові і лісові дороги і стежини. Автодороги без покриття – профілюючі дороги, що не мають основи і покриття. Проїжджаючи частина систематично ремонтується і зміцнюється щебенем, гравієм, піском. Велику частину року

ці дороги придатні для руху автотранспорту середньої вантажопідйомності. Зображуються на картах двома лініями без зафарбовування, з підписом, як правило, ширини земляної полотнини.

Грунтові дороги – непрофіліруючі, без покриття, їхня прохідність залежить від якості ґрунту, часу року і погоди. На картах зображуються однією чорною лінією.

Польові і лісові дороги – тимчасові ґрунтові дороги, рух по який здійснюється епізодично, головним чином, у період польових робіт чи лісорозробок. На карті зображуються чорними переривчастими лініями.

У важкодоступних гірських і пустельних районах на картах позначаються і стежини, придатні для пішого руху. Вони також зображуються чорними переривчастими лініями, але дрібніше, ніж у польових доріг. Ділянки польових доріг, що проходять через болотисті місця, обладнаються фашинами (зв'язування хмизу, перев'язані лозою чи дротом), гатями (поперечні настили з колод) і дамбами (невисокі насипи на заболочених ділянках).

На автомобільних дорогах позначаються мости, тунелі, труби, насипу, виїмки.

Для мостів менше і понад 3 м застосовуються різні умовні знаки. У знаках найважливіших мостів даються технічні характеристики.

г) Гідрографія.

На топографічних картах позначають прибережну частину морів, озера, ріки, ставки, струмки, колодязі й інші водойми. Біля них підписуються їхні назви. Елементи гідрографії на картах позначають синім кольором. Для постійної і визначеної берегової лінії застосовується суцільний знак, для непостійної (пересихаючі водойми) і невизначеної (мігруючі водойми) – штриховий знак, для підземної і зникаючої берегової лінії – пунктирний знак.

Ріки, струмки, канали позначаються на картах усі без винятку, причому в двох ліній позначаються на картах 1:25000 і 1:50000 при їхній ширині 5

метрів і більш, на картах 1:100000 – 10 метрів і більш.

Ширину і глибину рік (каналів) у метрах підписують у вигляді дробу, у чисельнику – ширина, у знаменнику – глибина і характер ґрунту дна. Такі характеристики даються в декількох місцях уздовж лінії ріки (каналу). Назви судноплавних водойм підписуються великими буквами, а несудохідних водойм – малими. Напрямок плину рік указується стрілкою з указівкою швидкості плину (м/с).

На ріках і каналах позначаються мости, шлюзи, дамби, пороми, броди і даються їхні характеристики. Урізи води (цифри біля синього кружечка на березі водойми) означають висоту рівня води в межень над рівнем моря (у метрах).

Умовні знаки колодязів і інших джерел супроводжуються пояснювальними підписами і, у необхідних випадках, цифровими характеристиками про ємність і глибину води в джерелі, якості води.

д) Ґрунтово-рослинний покрив.

Ґрунтово-рослинний покрив зображується найчастіше масштабними умовними знаками в комбінації з пояснювальними написами і квітами. Площі, зайняті деревною рослинністю, зафарбовуються зеленою фарбою, зайняті чагарником і низькорослою деревною рослинністю – ясно-зеленою фарбою, трав'яниста рослинність має біле тло.

Породу дерева позначають знаком листяного, хвойного дерева їхнім сполученням, якщо ліс змішаний. При наявності даних про висоту, товщину дерев і щільності лісу, указується його характеристика.

У лісових масивах позначаються просіки і нумерація кварталів.

Для окремих елементів рослинності застосовуються лінійні (вузькі смуги лісу, живі огороження) і не масштабні умовні знаки (окремі дерева, кущі, невеликі гаї, і т.п.).

Ґрунту на картах відбиваються лише ті, котрі різко відрізняються характером своєї поверхні від навколишнього середовища (солончаки, піски, такири, кам'яністі поверхні і т.п.). Кожна з цих різновидів ґрунту легко

розпізнається на карті по коричневому розцвіченню умовного знака, за винятком боліт і солончаків, що виділяються горизонтальним і вертикальним штрихуванням синього кольору. Схема ґрунтів усього району і текстова довідка про їх даються на зворотній стороні карти масштабу 1:200000.

Болота позначаються на карті штрихуванням синього кольору з поділом їх на прохідні (переривчасті штрихування), важко прохідні і непрохідні (суцільне штрихування). Прохідними прийнято вважати болота глибиною не більш 0,6 м, їхню глибину на картах, як правило, не підписують.

Глибину важко прохідних і непрохідних боліт підписують поруч з вертикальною стрілкою, що вказує на місце промірювання.

е) Місцеві предмети.

Місцеві предмети наносяться на топографічну карту з високою точністю: до 0,2 мм – місцеві предмети, що виділяються висотою (геодезичні пункти, труби, вежі, і т.п.); до 0,5 мм – інші точки місцевих предметів і контурів (доріг, рік тощо); до 1 мм – не різко виражені контури (границя боліт, чагарників, і т.п.).

Рельєф – сукупність просторових форм (нерівностей) земної поверхні. Він є одним з головних елементів географічного середовища. Характер рельєфу враховується при освоєнні і заселенні території, розвитку транспорту, промисловості, сільського господарства і будівництва, виборі місця для населених пунктів, бойових дій тощо. Задача відображення рельєфу на сучасних картах у цілому зводиться до двох моментів:

- рельєф на картах повинний бути пластичним, об'ємним, наочним,
- рельєф повинний бути вимірним; по картах можна визначати абсолютні і відносні висоти, крутість, довжину й експозицію схилів, і т.п.

Гора – значне по висоті куполоподібне чи конічне узвишшя, що має подошву і вершину. Вершина буває найчастіше куполоподібною формою, але іноді являє собою майже горизонтальну площадку – плато, чи закінчується гострим піком. Зниження від вершини до подошви називають схилом. Схил може бути рівним, опуклим, увігнутим і хвильовим. Різкий перехід від

крутого схилу до положистого схилу називається виступом чи терасою, а лінія, що відокремлює терасу від крутого схилу, що лежить нижче, – брівкою. Гору висотою до 200 м називають пагорбом. Штучний пагорб – курганом.

Хребет – витягнуте підвищення, що знижується в одному напрямку. Вододіл, чи топографічний гребінь, – лінія, що з'єднує найвищі точки хребта. Хребет як типову форму рельєфу потрібно відрізнити від гірського хребта – ланцюга гір, в одну сторону. До великих хребтів прилягають хребти менших розмірів, що називають відрогами.

Улоговина – замкнуте чаша видне поглиблення, форма рельєфу протилежна горі. Має край і дно (найнижчу точку). Іноді дно улоговини буває заболоченим чи зайнятим озером. Невелику улоговину з незначною глибиною називають западиною. Западину дуже малих розмірів називають ямою.

Лощина – витягнуте поглиблення, що знижується в одному напрямку, форма рельєфу протилежна хребту. Лінія по дну, що з'єднує найнижчі точки лощини, називається водозливом. Не кожним водозливом тече вода, але будь-яка ріка, струмок тече водозливом. До різних виглядів лощин належать долини, ущелини, яри і балки.

Сідловина – зниження на гребені хребта між двома сусідніми вершинами. Найнижча точка сідловини називається перевалом. У гірській місцевості шляхи сполучення через хребти, як правило, йдуть перевалами. Низько розташовані сідловини по обох схилах хребта між двома гірськими хребтами називають гірськими проходами.

Характерні лінії (вододіли і водозливи) і точки (вершини, дно западин, перевали) рельєфу складають як би кістяк рельєфу, їхнього зображення, і взаємне розташування визначає загальний характер рельєфу місцевості.

Характерну рельєфу місцевість розділяють на рівнинну, горбкувату і гірську, котра у свою чергу розділяється на низько гористу, середньо гористу і високогірну.

Рівнинна місцевість характеризується відсутністю різко виражених нерівностей земної поверхні, відносно невеликими перевищеннями (до 25 м) і порівняно малою крутістю схилів (до 20). Абсолютні висоти над рівнем моря – до 300 м.

Горбкувата місцевість характеризується хвильовим характером земної поверхні, що утворить нерівності (пагорби) з абсолютними висотами до 500 м, відносними перевищеннями 25-200 м і гнітючою крутістю схилів 2-3°.

Низько гориста місцевість характеризується висотами над рівнем моря 500-1000 м, відносними перевищеннями 200-500 м гнітючою крутістю схилів 5-10°. У порівнянні з іншими видами гірської місцевості вона слабо розчленована, як правило, добре обжита і має досить розвитку мережу доріг. При відносно пологістих схилах і невеликих висотах така місцевість практично доступна.

Середньо гориста місцевість має висоти над рівнем моря приблизно 1000-2000 м, відносні перевищення від 500 до 1000 м і гнітючу крутість схилів 10-25°. Вона розчленована на добре виражені гірські масиви і гряди. Їхні піки і гребені, мають згладжені форми. Така місцевість часто має широкі гірські проходи, що використовуються для прокладки доріг. Ці дороги часто перетинають гірські хребти через перевали, що доступні для техніки протягом усього року чи більшої його частини. Однак застосування техніки можливо лише на окремих напрямках. У цілому середньо гориста місцевість вимагає значних інженерних робіт для забезпечення її прохідності.

Високогірна місцевість характеризується висотами над рівнем моря понад 2000 м, відносними перевищеннями 1000 м і більше, із крутістю схилів більш 25°. Високогірна місцевість розділена глибокими долинами і западинами на гірські хребти, їхні піки і гребені, часто покриті снігом. Така місцевість, як правило, мало обжита, має мало гірських проходів і дуже рідку мережу доріг. Дороги вузькі і прокладені уздовж рік по міжгір'ях, проходять через перевали, що розташовані на великих висотах, із крутими підйомами і малими радіусами поворотів. Перевали найчастіше розташовані вище

снігової лінії і тому велику частину роки закриті.

Слабо пересічена місцевість небагата на природні і штучні перешкоди, що легко переборюються технікою в будь-якому напрямку. Рельєф місцевості звичайно рівнинний, рідше горбкуватий, природні перешкоди займають менш 10% від усієї площі. Місцевість забезпечує задовільний огляд з командних висот, орієнтування.

Середньо пересічена місцевість має близько 20% площі, зайнятої природними перешкодами. Це найпоширеніший різновид добре обжитої місцевості. Рельєф, як правило, горбкуватий, зрідка рівнинний.

Сильно пересічена місцевість відрізняється великою кількістю важко прохідних природних перешкод – від ярів, ровів і балок, до рік і каналів.

За умовами спостереження місцевість розділяють на відкриту, напівзакриту і закриту.

Відкрита місцевість являє собою рівну чи злегка горбкувату безлісну територію, до 75% площі якої добре проглядається у всіх напрямках з висот. На такій місцевості забезпечується гарне спостереження.

Напівзакрита місцевість є перехідною від відкритого до закритого. По більшій частині на напівзакритій місцевості площа, займана укриттями, складає близько 20%; з висот проглядається до 50% простору.

Закрита місцевість – це територія з гірським, горбкуватим чи рівнинним рельєфом, покрита лісами, чагарниками, садами, з часто розташованими населеними пунктами. На такій місцевості площа, зайнята природними укриттями, складає 30% і більше, а площа, що переглядається з командних висот, менше 25%.

По ознаці прохідності місцевість розділяють на зручно прохідну, прохідну, важко прохідну і непрохідну.

Зручно прохідна місцевість не обмежує швидкість і напрямок руху колісних і гусеничних машин, допускає без перешкод застосування техніки в розгорнутих ладах і рух колон без зміцнення ґрунту.

Прохідна місцевість майже не обмежує швидкість, напрямок руху і

дозволяє повторний рух по одному сліді гусеничних машин, хоча окремі місця потрібно обходити чи зміцнювати. Рух колісних машин звичайної прохідності трохи ускладнено.

Важко прохідна місцевість доступна для руху машин з невеликою швидкістю, обмежує волю маневру і рух декількох машин по одному сліді. Рух колісних машин звичайної прохідності майже неможливо.

Непрохідна місцевість недоступна для руху гусеничних і колісних машин без виконання значних робіт з устаткування доріг.

3.7 Обґрунтування вибору топографічних карт для створення цифрового рельєфу місцевості

Таким чином, існує кілька методів одержання цифрового рельєфу місцевості (ЦРМ).

Безліч типів джерел вихідних даних про рельєф викликані різноманіттям способів одержання й організації первинних вимірювальних даних і їхніх похідних. Серед них – геодезичні роботи і топографічна зйомка місцевості, стерео фотограмметрична обробка знімків фототеодолітів, аеро- і космічних, альтиметричних зйомок (рельєфів суші), роботи промірів і гідролокації підвідного рельєфу акваторій океанів і внутрішніх водойм, радіолокаційна зйомка рельєфу льодовикового ложа і небесних тіл. Можна відзначити широко застосовувану супутникову й авіаційну стерео зйомку (як оптичну, так і радіолокаційну), а також повітряне лазерне сканування, що характеризується, з одного боку, максимально високою точністю, а з іншого боку - дуже високою вартістю.

Тому методи створення ЦРМ засновані на даних ДЗЗ у даний час доступні деяким організаціям, крім власників космічних апаратів.

Основу іншого методу створення ЦРМ складають топографічні карти і плани.

Одним з перешкод до використання їх для створення ЦРМ є таємність

топографічних карт, особливо великого масштабу, обумовлена деякими специфічними особливостями їхнього змісту. Однак проблему можна вирішити, якщо не включати секретну інформацію в ЦРМ відкритого використання. Такий підхід до засекречування цифрових карт уже пропонувався багатьма ГІС-спеціалістами, і обговорюється на конференціях, присвячених цьому питанню. На ЦРМ відкритого доступу потрібно залишити тільки ті об'єкти топографічних карт і їхньої характеристики, що не попадають під режим таємності і не є надлишковими [18].

Географічна карта – це зменшена узагальнена модель земної поверхні на площині, що відображає за допомогою умовних знаків розміщення, взаємозв'язки, якісні і кількісні характеристики різних природних і суспільних явищ. Карта – це одна з моделей дійсності, тому в залежності від того, що потрібно змоделювати в конкретному випадку, створюють різні види карт.

Основною відмінністю карти є картографічне зображення, тобто зображення, виконана за допомогою визначених графічних і інших засобів (умовних позначок, чи знаків), якими передають просторове розміщення, якісні і кількісні відмінності конкретних об'єктів.

Складовими (елементами) карти є картографічне зображення, математична основа, легенда і додаткові дані. Також кожна географічна карта має визначені властивості. По-перше, карта є математично обґрунтованим зображенням. Саме по математичних законах розраховується ступінь зменшення розмірів реальних об'єктів, чи їхній масштаб, при переході до картографічного зображення. Математичне обґрунтування мають картографічні проєкції, по яких на картах представляють просторове розташування двох- і тривимірних об'єктів реального світу (Земля в цілому, рельєф її поверхні і т.п.) на двомірній площині карти. По-друге, карта надає узагальнену картину чи дійсності її складових.

На одній карті, навіть з мінімальним ступенем зменшення, неможливо відобразити всі придбані людиною знання про предмети, явища чи процеси,

що входять в область його наукових чи практичних інтересів. Через це, необхідним стає добір об'єктів картографування, що супроводжується узагальненням характеристик, по яких ці об'єкти поєднуються у визначені групи (наприклад, вдома чи дерева взагалі, а не окреме дерево чи будинок, із властивими тільки кожному з них ознаками).

Просторово-тимчасова подоба картографічного зображення – правильне відображення стану об'єкта у визначеній відрізок часу, на визначену дату і представлення на картах зв'язків, територіальної підпорядкованості, взаємного розміщення об'єктів.

Абстрактність зображення зв'язана з картографічною генералізацією. Вона полягає у відкиданні несуттєвих рис об'єкта, малозначимих подробиць, цілеспрямованому узагальненні характеристик.

Метричність карт дозволяє визначити з їх допомогою якісні і кількісні відмінності об'єктів.

Безперервність – це властивість, змістом якого є відсутність пропусків і розривів зображення (за винятком тих, котрі обумовлені картографічною проекцією).

Наочність забезпечує зорове сприйняття картографічного зображення просторових форм об'єктів, їхніх розмірів, розміщення, зв'язків. Читаність карти полегшує розпізнавання елементів і деталей зображення.

Оглядовість карти дозволяє одним поглядом охопити кожен по площі територію: від невеликої ділянки до планети в цілому і т.п.

Інформативність карти забезпечується розміщенням на одиниці її площі значної кількості знаків, назв, кількісних показників, і підвищується шляхом сполучення чи перекриття знаків.

Географічна відповідність виявляється в тім, що на карті показують об'єкти і явища, що вірно відображають географічні особливості зображуваної місцевості, її головні риси і взаємозв'язки об'єктів (наприклад, зв'язок між річковою мережею, дорогами, населеними пунктами).

Ізолінії карти – це лінії, що з'єднують на карті точки з однаковими

значеннями визначених величин. Наприклад, горизонталі – точки висот, ізотерми – точки температури.

Одне із самих головних переваг карт полягає в наявності системи координат. Географічні координати – широта і довгота – це кутові величини, що визначають положення будь-якої точки щодо екватора і початкового меридіана. Географічна широта – це кут між стрімкою лінією в даній точці і площиною екватора. А географічна довгота – кут між площиною меридіана, що проходить через дану, точку, і площиною початкового меридіана. Широти і довготи визначаються за даними астрономічних і геодезичних спостережень, а на географічні карти наносять лінії паралелей і меридіанів. Ці лінії, нанесені на карту, утворюють картографічну сітку.

У середньому ціни на топографічні карти різні, але всі ціни коштують у ряді від 100 до 1000 грн. Також можна відзначити, що паперові топографічні карти продають майже у всіх канцелярських магазинах.

Таким чином, ознайомивши з двома перерахованими вище методами одержання інформації можна зробити висновок щодо остаточного вибору створення ЦРМ.

Метод дистанційного зондування набагато функціональний і більш точний, але має багато недоліків у сфері одержання даних. Одержати дані альтиметричної зйомки із супутника практично неможливо, а супутникові стерео графічні знімки – можливо, але за дуже великі гроші. Тобто застосування методу одержання даних за допомогою дистанційного зондування в нашому випадку нереально.

Залишається метод набагато більш дешевий і практичний – складання ЦРМ на основі топографічних карт.

3.8 Процес розробки програмного забезпечення

Розробка програмного забезпечення (ПЗ) – різновид людської діяльності. Виділити її компоненти можна, визначивши набір задач, які

потрібно вирішити для досягнення кінцевої мети – побудови досить якісної системи в рамках заданих термінів і ресурсів. Для рішення кожної такої задачі організується допоміжна діяльність, до якої можна також застосувати декомпозицію на окремі більш дрібні діяльності, і т.д. У підсумку повинне стати зрозуміло, як вирішувати кожен окрему під задачу і всю задачу цілком на основі наявних рішень для під задач.

Як приклади діяльностей, які потрібно проводити для побудови програмної системи, можна привести проектування – виділення окремих модулів і визначення зв'язків між ними з метою мінімізації залежностей між частинами проекту і досягнення кращої його видимості в цілому, кодування – розробку коду окремих модулів, розробку користувальницької документації, що необхідна для досить складної системи.

Однак для коректного з погляду інженерії й економіки розгляду питань створення складних систем необхідно, щоб були порушені і питання експлуатації системи, внесення в неї змін, а також найперші дії в ході її створення – аналіз потреб користувачів і вироблення рішень, „винахід” функцій, що задовольняють ці потреби. Без цього неможливо, з одного боку, врахувати реальну ефективність системи у вигляді відносини отриманих результатів до всіх зроблених витрат і, з іншого боку, правильно оцінювати в ході розробки ступінь відповідності системи реальним нестаткам користувачів і розроблювачів.

Усі ці фактори приводять до необхідності розгляду всієї сукупності діяльностей, зв'язаних зі створенням і використанням ПЗ, починаючи від виникнення ідеї про новий продукт і закінчуючи деінсталяцією його останньої копії. Весь період існування ПЗ, зв'язаний з підготовкою до його розробки, розробкою, використанням і переробками, починаючи з того моменту, коли приймається рішення розробити/придбати/зібрати з наявних компонентів нову систему що приходить сама ідея про необхідність програми визначеного роду, до того моменту, коли цілком припиняється всяке її використання, називають життєвим циклом ПЗ.

У ході життєвого циклу ПЗ воно проходить через аналіз предметної області, збір вимог, проектування, кодування, тестування, супровід і ін. види діяльності. Кожен вид діяльності являє собою досить однорідний набір дій, виконуваних для рішення однієї задачі чи групи тісно зв'язаних задач у рамках розробки і підтримки експлуатації ПЗ.

На різних етапах у створення й експлуатацію ПЗ утягують люди, що виконують різні ролі. Кожна роль може бути охарактеризована як абстрактна група зацікавлених осіб, що беруть участь у діяльності по створенню й експлуатації системи і вирішують ті самі задачі які мають ті самі інтереси стосовно неї. Прикладами ролей є бізнес-аналітик, інженер по вимогах, архітектор, проектувальник користувальницького інтерфейсу, програміст-кодувальник, тестувач, керівник проекту по розробці, кінцевий користувач, адміністратор системи, інженер по підтримці і т.п.

3.9 Алгоритм розробки програмного продукту

Розробка програмного продукту повинна спиратися на наступну послідовність етапів роботи:

I етап. Постановка завдання. Складання технічного завдання на створення програмного продукту, де повинне бути описане кожне під завдання, аж до дрібних частин.

II етап. Аналіз об'єкта. На цьому етапі розглядається досліджуваний об'єкт із погляду технічних засобів середньостатистичного користувача.

III етап. Розробка сценарію і синтез моделі. При розробці сценарію необхідно передбачити послідовність роботи зі створюваним програмним продуктом, можливість зміни ходу роботи і вихід з нього (завершення роботи). Важливо прорахувати потенційні нестандартні ситуації з метою їхнього запобігання, а також перевірити ступінь інваріантності роботи, тобто можливість досягнення того самого результату різними шляхами.

Використовуючи результати аналізу на другому етапі, потрібно

вибрати визначену модель майбутнього проекту, наприклад, ієрархічну модель, що забезпечує виклик окремих програмних продуктів чи елементів проекту.

IV етап. Форма представлення інформації і вибір програмних продуктів. Після розробки сценарію і створення моделі визначаються програмні продукти для реалізації проекту. На цьому етапі необхідно використовувати два види програмних продуктів:

- для підготовки й обробки матеріалів, що складають проект: геоінформаційних даних, графічних об'єктів, аудіо - і відеозаписів, тексту,
- безпосередній інструментарій роботи.

Після вибору програмних засобів вибирається форма представлення інформації й інструменти для її реалізації.

V етап. Синтез комп'ютерної моделі об'єкта. Після аналізу можливостей обраних програмних продуктів, можна приступити до реалізації створюваного програмного продукту на комп'ютері. У процесі її треба буде пройти дві стадій.

Стадія 1. Підготовка матеріалу до роботи. На цій стадії підготовляється картографічний, текстовий, гіпертекстовий (документ, що містить посилання на інші документи), аудіо- і відео матеріал за допомогою обраних програмних продуктів.

Стадія 2. На цій стадії створюється і тестується комп'ютерна модель створюваного програмного продукту на базі підготовленого матеріалу й обраних програмних засобів.

VI етап. Робота зі створеним програмним продуктом [19].

3.10 Узагальнена функціональна схема одержання картографічної інформації

Розглянемо узагальнену функціональну схему одержання картографічної інформації всіма можливими методами.

Структурна схема складається з трьох основних методів одержання картографічної інформації з застосуванням цифрових технологій. Це дистанційні методи, що включають у себе як фотографічні, так і сканерні системи одержання інформації з літаків і супутників. Це наземні методи, що включають у себе як методи цифрової тахеометрії, так і використання систем GPS (а також їхні різні комбінації). І, нарешті, це картометричні методи, у яких використовують сканування існуючих карт і текстових даних і їхній подальшу оцифрування (дигіталізацію). На рис. 3.9 розглянуті методи представлені в ідеалізованому вигляді (через складність графічного представлення їхніх взаємних зв'язків). На практиці ці методи використовуються, як правило, спільно й у різних сполученнях. При цьому переваги одного з методів визначається наявністю існуючої інформації й особливостями розв'язуваних задач. Послідовність етапів обробки картографічної інформації при використанні кожного методу ясна з написів у відповідних елементах схеми.

Проведемо коротке узагальнене порівняння можливостей різних методів одержання картографічної інформації.

Аерокосмічні дистанційні методи дозволяють з високою оперативністю одержувати растрові дані з великих територій. При цьому найбільш економічними є космічні методи, однак вони мають обмеження по точності і детальності одержання інформації.

Аерофотографічні методи дозволяють одержувати інформацію з високою точністю і детальністю, однак їхнє застосування зв'язане з високим рівнем витрат, особливо при необхідності вкладення засобів на придбання нової техніки.

Наземні методи дозволяють одержувати картографічні дані (векторні) практично з будь-якою заданою точністю, однак при картографуванні великих територій ці методи вимагають значних термінів проведення робіт і дуже значних фінансових вкладень[20].

3.11 Функціональні підсистеми для побудови цифрового рельєфу місцевості

Для побудови цифрового рельєфу місцевості необхідно вирішити ряд задач, що реалізуються функціональними підсистемами.

До функціональних підсистем побудови ЦРМ відносяться:

1. Підсистема введення і перетворення даних. Основна функціональна задача цієї підсистеми – створення цілісного інформаційного цифрового образу досліджуваного об'єкта чи явища на основі перетворення графічної інформації в цифровий вид і введення її в комп'ютер.

Для використання дані повинні бути перетворені в придатний цифровий формат. Процес перетворення даних з паперових карт у комп'ютерні файли називається оцифруванням.

Джерелами даних можуть бути паперові і цифрові карти, різні геодезичні прилади, авіаційні і космічні фотознімки. Така інформація може бути введена за допомогою сканера чи отримана з іншої комп'ютерної системи.

2. Підсистеми обробки й аналізу. У їхні задачі входить виконання процедур обробки даних. До найбільш важливих процедур відносяться колірна фільтрація зображення, перетворення зображення в чорно-біле, фільтрація зображення від побічних продуктів, відновлення ізоліній і безпосереднє формування цифрового рельєфу місцевості.

3. Підсистема висновку (візуалізації) даних. Вона служить для висновку зображень на екран монітора, тобто безпосередня візуалізація тривимірної моделі місцевості.

4. Користувальницький інтерфейс. Він повинен відповідати вимогам фізичного і психологічного комфорту користувача, бути ефективним, швидкодіючим, мати можливості адаптації для конкретного користувача, сполучити можливості інтерактивного введення, текстових і графічних меню [21].

3.12 Технологія побудови цифрових моделей рельєфу по топографічних картах

На першому кроці алгоритму користувач програмного комплексу повинний визначити необхідні вимоги до паперового матеріалу, що буде оброблятися. Тобто визначити масштаб карти її якість і район. У залежності від поставлених вимог, на другому кроці необхідно знайти потрібну топографічну карту. Далі потрібно визначити вимоги до якості сканування карти. Потім безпосередньо відбувається сканування карти з визначеними параметрами. Після цього карта зберігається в потрібному форматі для наступної обробки. На цьому закінчується підготовка первинної інформації для обробки.

На наступному кроці алгоритму збережена карта відкривається в програмному комплексі для її обробки. Тому що головної складової для побудови цифрового рельєфу місцевості є ізолінії, те необхідно провести їхнє виділення з усього графічного зображення карти. Для того, щоб виділити ізолінії необхідно задати параметри колірного фільтра для наступної колірної фільтрації. Потім зображення карти перетворюється в чорно-білий вид. Це робить простіше наступну обробку зображення.

Після колірної фільтрації зображення топографічної карти користувач повинен оцінити результати фільтрації і якщо необхідно повторити колірну фільтрацію з завданням інших параметрів. Якщо результати колірної фільтрації задовільні, то далі необхідно відфільтрувати зображення карти від побічних продуктів колірної фільтрації. Для цього спочатку виконується видалення дрібних побічних продуктів. Потім необхідно видалити залишкові побічні продукти, що вимагає формування визначеного вікна фільтрації. Після цього користувач оцінює результати фільтрації від побічних продуктів. Якщо ці результати є задовільними, то керування в алгоритмі передається до кроку відновлення ізоліній. Але якщо результати є незадовільними, то існує можливість видалення побічних продуктів у ручному режимі. Така побудова

алгоритму надає можливість видалити всі залишкові побічні продукти, що залишилися після попередніх процедур фільтрації.

Після фільтрації зображення карти настає етап відновлення ізоліній. Для цього спочатку виділяються складові частини ізолінії. Потім шляхом проходження по ізолінії в місцях її розриву здійснюється відновлення ізолінії. Одночасно з процесом відновлення ізолінії їй привласнюється значення її висоти. Тобто створюється матриця висот рельєфу [22].

Для того, щоб висоти були призначені й у проміжках між ізолініями, необхідно здійснити інтерполяцію отриманих точок зображення карти. Після отриманих результатів інтерполяції можна проводити візуалізацію отриманого тривимірного зображення рельєфу.

Опис алгоритму.

1. Визначення вимог до первинного матеріалу, тобто користувач повинний визначити вимоги до паперової карти, який необхідно обробити.

2. По визначеним на попередньому кроці алгоритму вимогам необхідно одержати топографічну карту для обробки.

3. Під визначенням вимог до зображення карти мається на увазі визначення параметрів сканування карти, тобто якість зображення карти в цифровому вигляді.

4. Сканування карти відбувається з заданими на попередньому кроці параметрами сканування.

5. Після сканування карту необхідно зберегти в потрібному форматі з максимальним для обробки якістю.

6. Збережена карта відкривається користувачем у програмному комплексі для обробки.

7. За допомогою маркера миші користувач повинен зафіксувати на зображенні карти кольору ізоліній, оскільки на електронному зображенні карти рівної висоти (ізогіпси) не є лініями одного кольору. Тому для кольорової фільтрації бажано використовувати кілька значень кольорів.

8. По заданому наборі значень кольорів відбувається колірна

фільтрація зображення.

9. Відтворення результату колірної фільтрації відбувається в чорно-білому вигляді. Це необхідно зробити для спрощення подальшої обробки.

10. Після колірної фільтрації користувач повинен оцінити результати і прийняти рішення: здійснити фільтрацію при нових параметрах палітри ізогіпс чи продовжити подальшу обробку.

11. Після колірної фільтрації в будь-якому випадку залишаються залишки у виді побічних продуктів, що за можливості повинні віддалятися. Для цього отримане зображення ізогіпс очищається від цих дрібних (однопіксельних) і великих (багато піксельних) побічних продуктів.

12. Для очищення зображення карти від великих залишкових побічних продуктів колірної фільтрації необхідно здійснювати віконну логічну обробку. При цьому потрібно вибрати параметри вікна чи очищення вікна фільтрації залишків.

13. По заданих параметрах вікна й алгоритму фільтрації залишків відбувається виключення великих побічних продуктів.

14. На цьому кроці користувач оцінює результати фільтрації зображення карти від побічних продуктів, і приймає рішення про продовження подальшої обробки чи зображення видаленні не вилучених залишків у режимі.

15. Надалі необхідно виділити частини ізоліній для їхнього відновлення, тобто наступне з'єднання частин ізогіпси в безупинну лінію.

16. З'єднання отриманих складових частин ізогіпси відбувається шляхом відновлення її в місцях розриву. Одночасно з цим процесом відбувається присвоєння ізолінії значення її висоти.

17. За отриманими результатами і значеннями сформованої матриці висот виробляється інтерполяція.

18. На основі інтерполяції відтворюється тривимірної моделі рельєфу.

4 ВИКОРИСТАННЯ ФІЛЬТРІВ ВІНЕРА І КАЛМАНА ДЛЯ ОБРОБКИ ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

4.1 Реалізація фільтра Калмана для відновлення ізогіпс при побудові карт цифрового рельєфу

Реалізація фільтра Калмана через бібліотеку OpenCV (англ. Open Source Computer Vision Library, бібліотека комп'ютерного зору з відкритим початковим кодом) – бібліотека алгоритмів комп'ютерного зору, обробки зображень і чисельних алгоритмів загального призначення з відкритим кодом. Реалізована на C/C++, також розробляється для Python, Ruby, Matlab, Lua і інших мов. Може вільно використовуватися в академічних і комерційних цілях — поширюється в умовах ліцензії BSD. Фактично, OpenCV – це набір типів даних, функцій і класів для обробки зображень алгоритмами комп'ютерного зору.

Основні модулі бібліотеки:

- 1) *sxcore* – ядро містить базові структури даних і алгоритми:
 - базові операції над багатовимірними числовими масивами;
 - матрична алгебра, математичні функції, генератори випадкових чисел;
 - запис/відновлення структур даних, відновлення/запис XML;
 - базові функції двовимірних (2D) графіків;
- 2) *CV* – модуль обробки зображень і комп'ютерного зору:
 - базові операції над зображеннями (фільтрація, геометричні перетворення, перетворення колірних просторів і т. п.);
 - аналіз зображень (вибір відмітних ознак, морфологія, пошук контурів, гістограми);
 - аналіз руху, стеження за об'єктами;
 - виявлення об'єктів;
 - калібрування камер, елементи відновлення просторової

структури;

3) HighGUI – модуль для введення/виведення зображень і відео, створення призначеного для користувача інтерфейсу:

- захоплення відео з камер і з відео файлів, читання/запис статичних зображень;

- функції для організації простого GUI (усі демозастосування використовують HighGUI);

4) Cvaux – експериментальні і застарілі функції:

- просторовий зір: стерео калібрування, саме калібрування;

- пошук стерео-відповідності, кліки в графах;

- знаходження і опис рис об'єктів;

5) CvCam – захоплення відео дозволяє здійснювати захоплення відео з цифрових відеокамер.

Для реалізації програми було використане середовище розробки Microsoft Visual Studio 2008.

Основні морфологічні перетворення вхідного зображення реалізовані з використанням операцій звуження (Erode) та розширення (Dilate). OpenCV реалізує їх двома функціями:

1) cvErode() – розмиває (операція звуження) зображення з використанням фільтра (ядра) один або кілька разів. Зображення формується з локальних мінімумів – тобто будуть збільшуватися темні області);

2) cvDilate() – розтягує (операція розширення) зображення з використанням фільтра (ядра) один або кілька разів. Зображення формується з локальних максимумів – тобто будуть збільшуватися світлі області).

У cvErode () ядро накладається на зображення і на місці якоря (центр ядра) залишається мінімальне значення, що лежить під ядром (у разі cvDilate () – навпаки – максимальне).

Ерозія (розмивання/звуження) зображення використовується для позбавлення від випадкових вкраплень на зображенні. Ідея полягає в тому, що вкраплення при розмиванні усунуться, тоді як великі і відповідно більш

візуально-значущі регіони залишаються.

Розтягування (розширення) так само усуває шум і сприяє об'єднанню областей зображення, які були розділені шумом, тінями. Застосування невеликого розтягування має сплавити ці області в одну.

Морфологічні операції застосовуємо над двійковими зображеннями, які виходять після порогового перетворення і є власно зображеннями ізогіпс [23].

Створення ядра довільної форми здійснюється функцією `cvCreateStructuringElementEx ()`.

Форму ядра визначаємо через `values`, яка містить маску, що визначає які сусідні пікселі повинні враховуватися. `Values` – показник на масив, де ненульові елементи визначають значущі пікселі. Якщо `values ≠ NULL` всі елементи вважаються ненульовими.

Вибираючи різну структуру ядра, можна вирішувати різні задачі обробки зображень:

- придушення шумів;
- виділення меж об'єкта;
- виділення скелетону об'єкта.

Знаходження розірваних контурів потрібно для того, щоб знайти кінцеві точки розірваних ліній. Для цього потрібна функція `cvStartFindContours()`. За основу функції узятий детектор кордонів Кенні.

Кордони (межі) – це такі криві на зображенні, уздовж яких відбувається різка зміна яскравості або інших видів неоднорідностей.

Простіше кажучи, край – це різкий перехід/зміна яскравості.

Причини виникнення кордонів:

- зміна освітленості;
- зміна кольору;
- зміна глибини сцени (орієнтації поверхні).

Виходить, що границі відображають важливі особливості зображення, і тому метою перетворення зображення в набір кривих є:

- виділення істотних характеристик зображення;
- скорочення обсягу інформації для подальшого аналізу.

В роботі використовуємо метод виділення кордонів за допомогою детектора кордонів Кенні.

Кроки детектора:

- забрати шум і зайві деталі з зображення;
- розрахувати градієнт зображення;
- зробити краї тонкими (edge thinning);
- зв'язати краї в контур (edge linking).

Детектор використовує фільтр на основі першої похідної від гауссіану. Оскільки він сприйнятливий до шумів, краще не застосовувати даний метод на необроблених зображеннях.

Кордони на зображенні можуть перебувати в різних напрямках, тому алгоритм Кенні використовує чотири фільтра для виявлення горизонтальних, вертикальних і діагональних кордонів. Скористаємось оператором виявлення кордонів і отримаємо значення для першої похідної в горизонтальному напрямку (G_y) і вертикальному напрямку (G_x).

Аналіз відповідних кінців контурів виконується методом знаходження Евклідової відстані між кінцевими точками.

Евклідова відстань - найбільш часто використовувана міра відстані. Вона не є географічною відстанню в багатовимірному просторі і обчислюється таким чином

$$P = \sqrt{\sum_{i=1}^N (A_i - B_i)^2}, \quad (4.1)$$

де P – відстань між об'єктами A і B ;

A_i – значення i -ознаки об'єкта A ;

B_i – значення i -ознаки об'єкта B .

Природна, з геометричної точки зору, евклідова міра відстані може

виявитися безглуздою, якщо ознаки виміряні в різних одиницях. Щоб виправити становище, вдаються до нормування кожної ознаки. Застосування евклідової відстані виправдано в випадках, коли ознаки об'єкта однорідні з фізичним змістом і однаково важливі для класифікації; ознаковий простір збігається з геометричним простором.

Реалізація фільтра Калмана виконана за наступною схемою (рис.4.1).

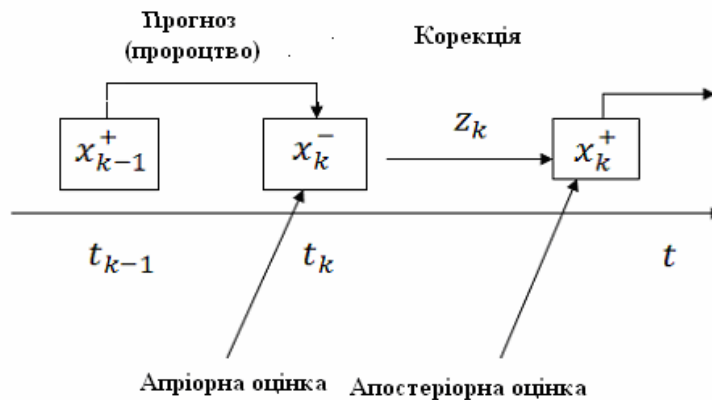


Рисунок 4.1 – Реалізація фільтра Калмана

Фільтр Калмана працює за системою прогноз-корекція. Припустимо, що в момент часу t_{k-1} отримана оцінка вектора стану системи x_{k-1}^+ і тепер хочемо отримати оцінку в момент t_k . Для цього будемо прогнозувати оцінку x_k^- , базуючись на x_{k-1}^+ , отримуємо вимірювання z_k і далі коригуємо оцінку в момент t_k , базуючись на прогнозі і вимірах, і отримуємо остаточну оцінку вектора стану x_k^+ . x_k^- називають апріорною оцінкою, x_k^+ називають апостеріорною оцінкою.

В OpenCV фільтр Калмана функціонує наступним чином. Для зберігання стану фільтра Калмана використовується структура CvKalman. Фільтр створюється за допомогою функції cvCreateKalman(). Прогнозування відбувається за допомогою функції cvKalmanPredict(), корекція – функцією cvKalmanCorrect(). Ініціалізація відбувається cvReleaseKalman(). Ця структура використовується для стандартного фільтра Калмана.

Практична реалізація відновлення ізогіпсів шляхом калманівської фільтрації. В якості вхідного зображення для фільтрації було взяте зображення вже відновлене статистичним методом (з використанням об'єктної бази даних з навчанням) (рис.4.2).

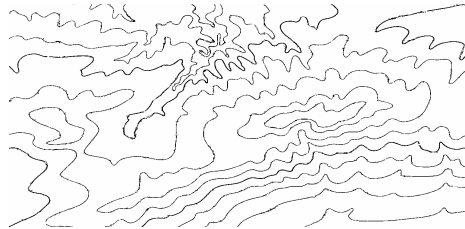


Рисунок 4.2 – Вхідне зображення

Якщо детально роздивимося видно, що не всі розриви усунені (рис.4.3).

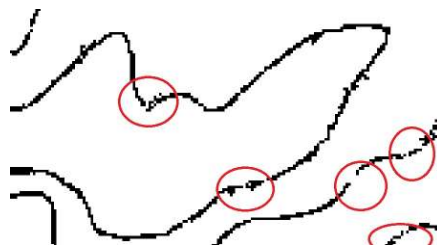


Рисунок 4.3 – Детальний розгляд зображення

Для аналізу візьмемо частину зображення з найбільшою кількістю розривів (рис.4.4). Детальний розгляд (рис. 4.5).

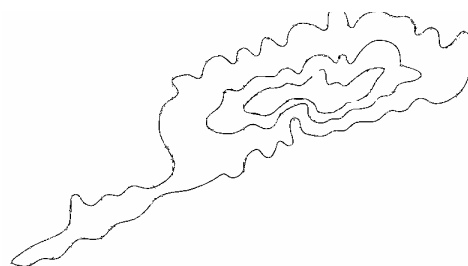


Рисунок 4.4 – Частина зображення для фільтрації

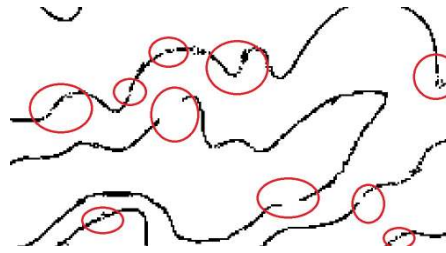


Рисунок 4.5 – Детальний розгляд частини зображення

Застосуємо алгоритм фільтрації на зображенні поетапно.

З рис. 4.6 видно, що зображення було частково позбавлено шумів та випадкових краплень.

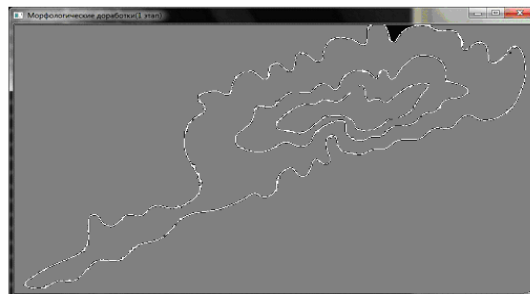
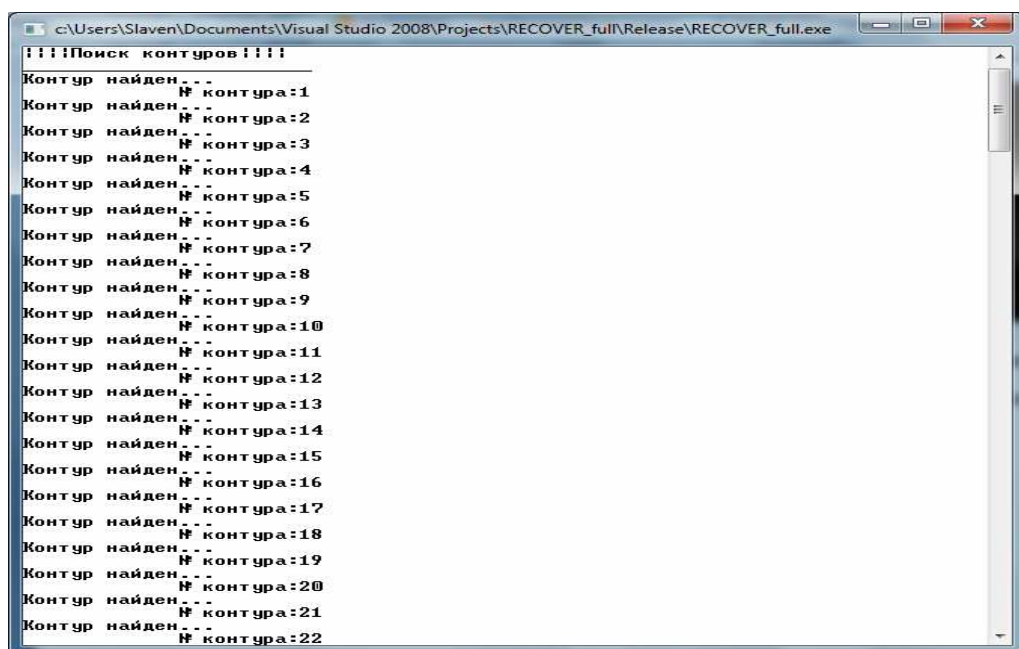


Рисунок 4.6 – Морфологічне доопрацювання зображення



Рисунку 4.7 – Знаходження розірваних контурів

З рис. 4.7 видно, що в досліджуваному фрагменту є 22 розірваних контури. Застосуємо фільтр Калмана в комплексі з морфологічними перетвореннями. Результати наведені на рис. 4.8.

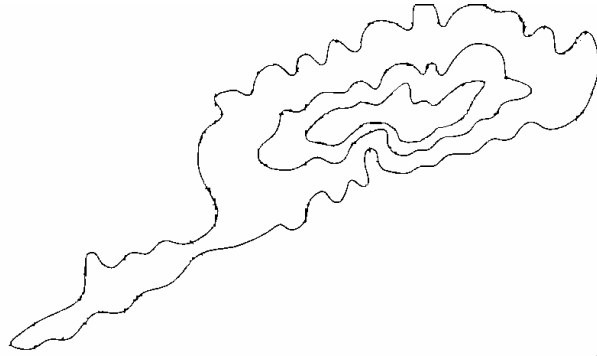


Рисунок 4.8 – Результат калманівської фільтрації

Роздивимося результат фільтрації детально (рис.4.9). З рисунку видно, що в результаті обробки вхідного зображення розриви були усунуті.



Рисунок 4.9 – Детальний результат фільтрації

Дослідження ефективності відновлення ізогіпс. Після проведеного дослідження наявно видно, що в результаті відновлення з використанням об'єктної бази даних з навчанням були усунуті далеко не всі розриви ізогіпсів. Зіставимо результати відновлення ізогіпсів з використанням об'єктної бази даних з навчанням і з використанням калманівської фільтрації. Результат порівняння наведений на рис. 4.10.

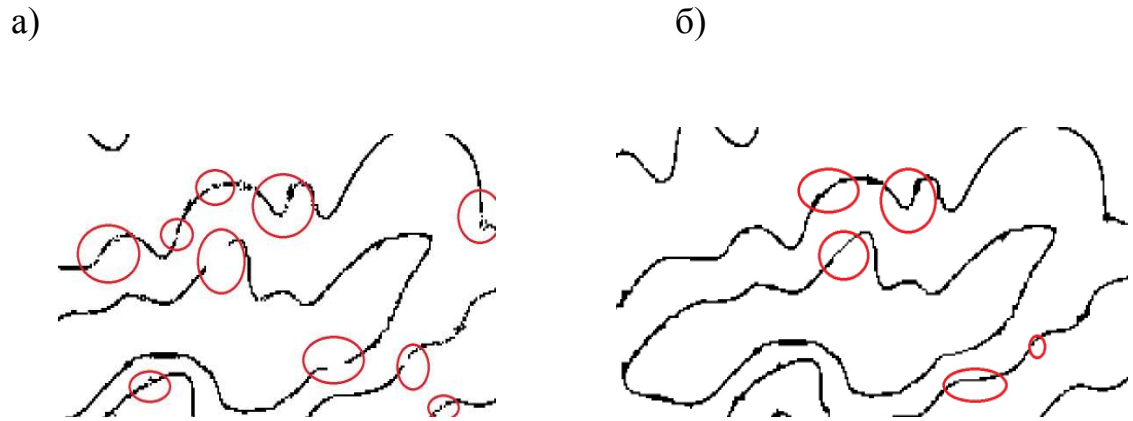


Рисунок 4.10 – Порівняння ефективності відновлення: а) - відновлення з використанням бази даних; б) - з використанням фільтра Калмана

З графіка видно, що відновлення ізогіпс за допомогою калманівської фільтрації є значно ефективнішим способом, ніж відновлення з використанням бази даних, що навчається. Це пояснюється тим, що не треба витрачати час на оновлення бази даних. Тому процес відновлення можна зробити повністю автоматизованим. Мінуси калманівської фільтрації полягають в тому, що її ефективність напряму залежить від якості вхідного зображення. Цю залежність можна побачити на рис. 4.12.

З отриманих даних побудуємо графік ефективності рис. 4.11.

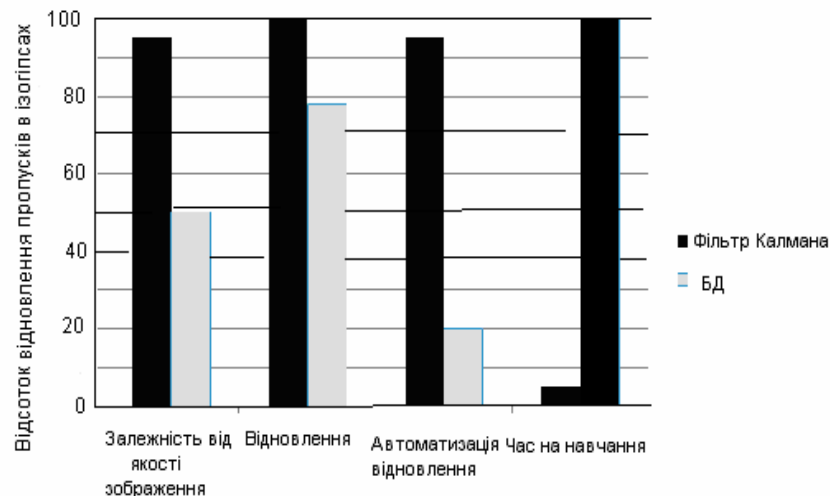


Рисунок 4.11 – Оцінка ефективності відновлення



Рисунок 4.12 – Залежність калманівської фільтрації від якості вхідного зображення

4.2 Аналіз фільтра Калмана стосовно до відновлення ізогіпс при побудові карт цифрового рельєфу

Модель динамічної системи, фільтри Калмана базуються на лінійних динамічних системах, дискретних за часом. Такі системи моделюються колами Маркова за допомогою лінійних операторів і доданків з нормальним розподілом. Стан системи описується вектором кінцевої розмірності – вектором стану. У кожен такт часу лінійний оператор діє на вектор стану і переводить його в інший вектор стану (детермінована зміна стану), додається деякий вектор нормального шуму (випадкові чинники) і в загальному випадку вектор управління, що моделює дію системи управління. Фільтр Калмана можна розглядати як аналог прихованим моделям Маркова, з тією відмінністю, що змінні системи, що описують стан, є елементами нескінченної множини дійсних чисел (на відміну від кінцевої множини простору станів в прихованих моделях Маркова). Крім того, приховані моделі Маркова можуть використовувати довільні розподіли для наступних значень вектора стану на відміну від фільтра Калмана, що використовує модель нормально розподіленого шуму. Існує строгий взаємозв'язок між рівняннями фільтра Калмана і прихованої моделі Маркова. Огляд цих і інших моделей дали Roweis і Chahramani (1999).

При використанні фільтра Калмана для отримання оцінок вектора стану процесу по серії зашумлених вимірів необхідно представити модель цього процесу відповідно до структури фільтра – у вигляді матричного рівняння певного типу. Як показано на рис.4.13, для кожного такту k роботи фільтра необхідно відповідно до наведеного нижче опису визначити: матрицю еволюції процесу F_k ; матрицю спостережень H_k ; коваріаційну матрицю процесу Q_k ; коваріаційну матрицю шуму вимірів R_k ; за наявності керувальних дій матрицю їх коефіцієнтів B_k .

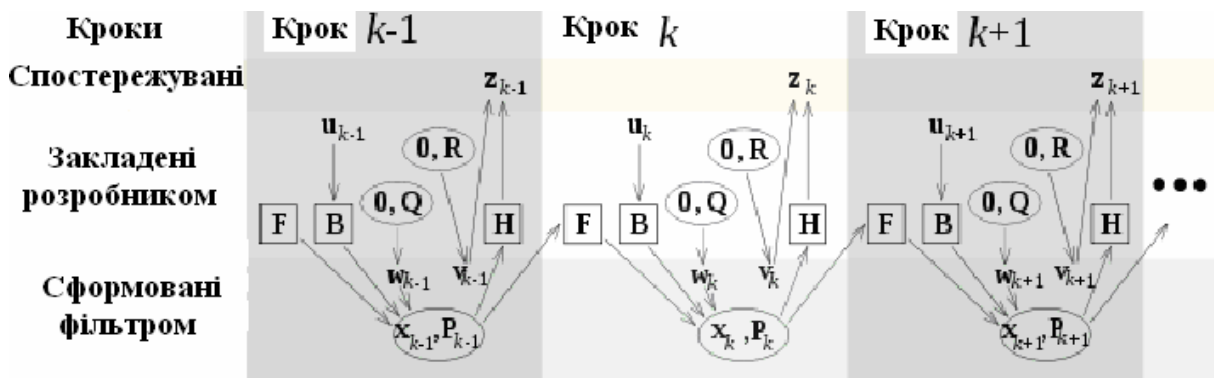


Рисунок 4.13 – Ілюстрація роботи фільтра

Модель системи (процесу) передбачає, що істинний стан у момент k виходить з істинного стану в момент $(k-1)$ відповідно до рівняння

$$x_k = F_k x_{k-1} + B_k u_k + w_k, \quad (4.2)$$

де F_k – матриця еволюції процесу/системи, яка впливає на вектор стану у момент k ;

B_k – матриця управління, яка прикладається до вектора керувальних дій u_k ;

w_k – нормальний випадковий процес з нульовим математичним

очікуванням і коваріаційною матрицею q_k , який описує випадковий характер еволюції системи/процесу:

$$w_k \square N(0, Q_k). \quad (4.3)$$

У момент k проводиться спостереження (вимір) z_k істинного вектора стану x_k , які пов'язані між собою рівнянням

$$z_k = H_k x_k + v_k, \quad (4.4)$$

де H_k – матриця вимірювань, що зв'язує істинний вектор стану і вектор проведених вимірів;

v_k – білий шум вимірів з нульовим математичним очікуванням і коваріаційною матрицею R_k

$$v_k \square N(0, R_k). \quad (4.5)$$

Початковий стан і вектори випадкових процесів на кожному такті $\{x_0, w_1, \dots, w_k, v_1 \dots v_k\}$ вважаються незалежними. Багато реальних динамічних систем не можна точно описати цією моделлю. На практиці не врахована в моделі динаміка може серйозно зіпсувати робочі характеристики фільтра, особливо при роботі з невідомим стохастичним сигналом на вході. Більше того, неврахована в моделі динаміка може зробити фільтр нестійким. З іншого боку незалежний білий шум як сигнал не призводитиме до розбіжності алгоритму. Завдання відділення шумів вимірів від неврахованої в моделі динаміки складне, вирішується воно за допомогою теорії робастних систем управління. Запропонований Калманом алгоритм цифрової фільтрації відразу одержав позитивні відгуки фахівців: розвиток обчислювальної

техніки на той час вже знаходився на досить високому рівні, а крім того, існували ряд завдань (наприклад, спільне використання навігаційних систем різної природи), які потребували зручного засобу обробки даних в реальному часі. Проте незабаром було визнано, що практичне застосування фільтра Калмана, незважаючи на простоту алгоритму, потребує особливої уваги до побудови математичних моделей оброблюваних процесів, а також до точності комп'ютерної арифметики. З урахуванням цих вимог згодом було розроблено і випробувано багато варіантів застосування алгоритму Калмана при вирішенні завдань навігації, геодезії, геології, океанографії, гідродинаміки і багатьох інших областей знання [24].

Алгоритм фільтра Калмана. Уявімо собі деяку систему, стан якої у будь-який момент часу однозначно характеризується певним набором величин (наприклад, координати, швидкості, рівні напруги і т.п.), як правило, недоступних для безпосереднього визначення. Говорячи термінами векторної алгебри, ці величини є елементами вектора стану системи, віднесеного до заданого моменту часу. Крім того, є ряд змінних, деяким чином пов'язаних із станом системи, які можна виміряти із заданою точністю; такі величини складають вектор вимірів, що відноситься до певного моменту часу. Алгоритм фільтра Калмана дозволяє в реальному часі побудувати оптимальну оцінку стану системи, ґрунтуючись на вимірах, які неминуче містять похибки; при цьому вектор вимірів розглядається як багатовимірний вихідний сигнал системи, обтяжений шумом, а вектор стану – невідомий багатовимірний сигнал, що підлягає визначенню. Умовою оптимальності побудованої оцінки стану є мінімум її середньої квадратичної помилки. Вказаний критерій визнано найбільш загальним; доведено, що застосування безлічі інших подібних умов (наприклад, середнє арифметичне деякої безперервно зростаючої, симетричної функції, такої як абсолютна величина) приводить до того ж рішення (функція модуля не має безперервної похідної, що істотно утрудняє її застосування в алгоритмах мінімізації). Фільтр Калмана став істотним удосконаленням свого попередника – алгоритму, що

дозволяє за допомогою методу найменших квадратів виділяти скалярний сигнал з шуму з незмінними статистичними характеристиками, запропонований Вінером.

Рис. 4.14 ілюструє роботу алгоритму фільтра Калмана. Початковими умовами на кожному новому циклі алгоритму служать оцінка стану системи і величина похибки, що характеризує її.

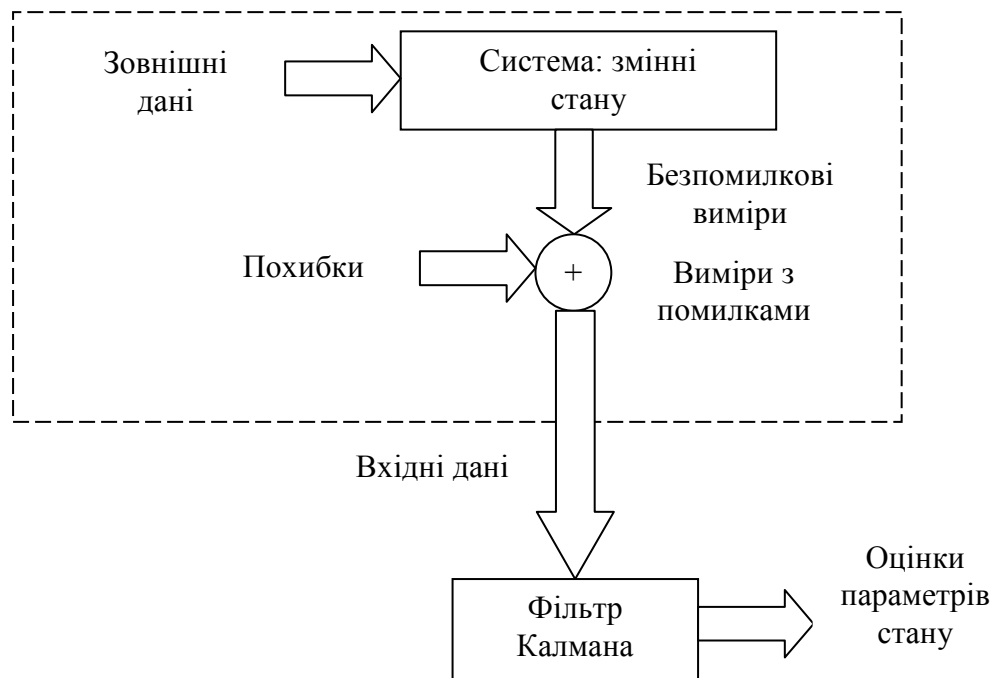


Рисунок 4.14 – Робота фільтра Калмана

У разі скалярної змінної такою характеристикою є дисперсія, яка тим більша, чим сильніший розкид індивідуальних значень відносно істинного. Поширена оцінка дисперсії – середнє квадратичне відхилення, тобто квадрат стандартного відхилення, – виражає міру розкиду величини відносно середньої. Узагальненням дисперсії для вектора, тобто сукупності скалярних величин, служить коваріаційна матриця. Її діагональні елементи є дисперсіями відповідних складових вектора, а недіагональні – коваріаціями, що характеризують взаємозв'язок між парою складових. Сукупність вимірів, віднесених до кожного з моментів часу, узагальнює вектор вимірів. Алгоритм послідовно обробляє вектори вимірів, які знову надходять, враховуючи при

цьому значення, вчислені на попередньому циклі. Ця особливість відрізняє алгоритм фільтра Калмана від нерекурентних алгоритмів, яким для роботи необхідно зберігати увесь масив оброблюваних даних. На наступному кроці за допомогою оброблюваних на цьому циклі вимірів уточнюються початкові умови. Для цього алгоритм обчислює вагу поправок до них на основі коваріаційних матриць оцінки стану і вимірів. Чим меншою похибкою характеризуються виміри в порівнянні з оцінкою стану системи, тим більшу вагу вони отримують. Відносні ваги невідомих, таких, що визначають вектор стану системи, залежать від міри їх впливу на вектор вимірів: більшу вагу отримують ті змінні, вклад яких у виміри більший.

Уточнення початкових умов на основі вимірів, що надійшли на цьому циклі, в загальному випадку, зумовлює зменшення невизначеності в оцінці стану системи. виправлені таким чином початкові умови і є вихідними даними фільтра Калмана на кожному циклі. На завершальному етапі роботи алгоритму відбувається підготовка до вступу нового вектора вимірів. На основі заданого лінійного перетворення, що зв'язує наступний вектор стану з попереднім, прогнозується оцінка стану системи, віднесена до моменту наступного виміру. При побудові коваріаційної матриці прогнозованого вектора стану фільтром Калмана враховується можливість спотворення моделі, що описує поведінку системи, деяким випадковим процесом з відомими статистичними параметрами. Оскільки конкретні значення збурювального ефекту не можуть бути відомі, ця обставина сприяє підвищенню невизначеності прогнозу. У міру послідовної обробки нових вимірів відбувається накопичення фільтром корисної інформації, тому якщо елементи вектора стану упевнено виражаються через виміряні величини, то сумарна похибка оцінок, як правило, повинна знижуватися. Проте оскільки разом з поліпшенням точності оцінок на етапі їх уточнення має місце її зниження при побудові прогнозу, то ці тенденції, компенсуючи одна одну, надалі приведуть до стабілізації невизначеності, що характеризує оцінку стану системи. У разі відсутності чинника, що вносить збурення до процесу

переходу системи з одного стану в інший, похибка оцінок у результаті досягає малих значень. Міра невизначеності оцінки стану системи, яка змінюється в процесі роботи алгоритму, спричиняє собою і зміну вагів, що обчислюються на другому кроці; ця обставина виділяє фільтр Калмана як алгоритм із змінними вагами.

Якщо стан даної системи незмінний, то алгоритм фільтра Калмана зводиться до послідовної форми класичного методу найменших квадратів, в якому матриця, зворотна коваріаційній, виступає ваговою. Іншими словами, фільтр Калмана є, по суті, рекурентним способом рішення задачі порівняння за методом найменших квадратів. Це завдання уперше вирішено К. Гаусом, результати були опубліковані в роботі "Теорія руху небесних тіл", в якій він застосував метод найменших квадратів до визначення елементів орбіт небесних тіл. Усі викладені в цій роботі положення, що стосуються ефективності застосування цього методу при обробці результатів вимірів, в рівній мірі відносяться і до фільтра Калмана.

Функціонування фільтра Калмана. Робота фільтра Калмана є циклом з двох кроків:

- 1) попередня оцінка (пророцтво) наступного значення стану;
- 2) уточнення оцінки, на даних, що надійшли.

Приклад для двовимірного випадку (тільки по положенню).

Модель процесу :

$$\begin{bmatrix} x_k \\ y_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{k-1} \\ y_{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \square & x_{k-1} \\ \square & y_{k-1} \end{bmatrix}, \quad (4.6)$$

де $\begin{bmatrix} x_k \\ y_k \end{bmatrix}$ – стан системи \bar{x}_k ;

$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ – матриця переходу станів A ;

$$\begin{bmatrix} x_{k-1} \\ y_{k-1} \end{bmatrix} - \text{стан системи на попередньому кроці } \overline{x_{k-1}};$$

$$\begin{bmatrix} \square x_{k-1} \\ \square y_{k-1} \end{bmatrix} - \text{шум } \overline{w_{k-1}}.$$

Шум береться білим, з нормальним розподілом вірогідності і незалежним для процесу і виміру. Матриця A визначає зв'язок стану системи в попередній і поточний моменти часу. Коваріація шуму процесу Q і коваріація шуму виміру R можуть змінюватися з часом, але ми вважаємо їх постійними.

З урахуванням прийнятих позначень отримаємо алгоритм роботи фільтра

$$\overline{x_k} = A\overline{x_{k-1}} + \overline{w_{k-1}}. \quad (4.7)$$

Модель вимірювань:

$$\begin{bmatrix} u_k \\ v_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_x & 0 \\ 0 & H_y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \square u_k \\ \square v_k \end{bmatrix}. \quad (4.8)$$

Матриця H співвідносить між собою стан системи і виміру Z .

Та ж модель у вигляді звичайних рівнянь

$$u_k = H_x \cdot x_k + \square u_k, \quad (4.9)$$

$$v_k = H_y \cdot y_k + \square v_k. \quad (4.10)$$

Те ж у векторно-матричному записі

$$\overline{z_k} = H\overline{x_k} + \overline{v_k}. \quad (4.11)$$

Таким чином маємо.

Матриця зв'язку:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.12)$$

Одинична матриця:

$$I = E = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.13)$$

Матриця коваріації шуму в моделі процесу:

$$Q = E \cdot \left\{ \bar{w} \cdot \bar{w}^T \right\} = \begin{bmatrix} Q_{xx} & 0 \\ 0 & Q_{yy} \end{bmatrix}. \quad (4.14)$$

Матриця коваріації шуму в моделі виміру:

$$R = E \cdot \left\{ \bar{V} \cdot \bar{V}^T \right\} = \begin{bmatrix} R_{xx} & 0 \\ 0 & R_{yy} \end{bmatrix}. \quad (4.15)$$

Ініціалізація змінних:

$$\bar{x}_0 = H \cdot \bar{z}_0, \quad (4.16)$$

$$P_0 = \begin{bmatrix} \varepsilon & 0 \\ 0 & \varepsilon \end{bmatrix}. \quad (4.17)$$

Пророцтво:

$$\bar{x}_k^- = A \cdot \bar{x}_{k-1}, \quad (4.18)$$

$$P_k^- = A \cdot P_{k-1} \cdot A^T + Q. \quad (4.19)$$

Корекція:

$$\bar{x}_k = \bar{x}_k^- + K \cdot (\bar{z}_k - H \cdot \bar{x}_k^-), \quad (4.20)$$

$$P_k = (I - K \cdot H) \cdot P_k^-, \quad (4.21)$$

$$K = P_k^- \cdot H^T \cdot (H \cdot P_k^- \cdot H^T + R)^{-1}. \quad (4.22)$$

Методика відновлення ізогіпс. При фільтрації топографічних карт з метою виділення ліній рівних висот (ізогіпси) виникає проблема, пов'язана з розривом ізогіпси, через те що на карту нанесена й інша інформація. Тому потрібно здійснювати відновлення цих розривів, зокрема і за допомогою фільтрації Калмана.

Опис взаємодії методики згладжування та екстраполяції при поліноміальній моделі та по параметрах траєкторії ізогіпси. Після автозахоплення точки на ізолінії інформація про її координати надходить на автосупроводження. Під дією різноманітних перешкод, які проявляються в помилках у вимірюванні координат, випадкових відхиленнях точки від заданої траєкторії та ін., ця інформація спотворюється. Використовуючи невірну інформацію у дискретні моменти часу, необхідно в процесі автосупроводження побудувати траєкторію із точок, які з'єднують кінцівки розриву ізогіпси.

Задачу створення оптимальних алгоритмів екстраполяції та згладжування координат, представлених у вигляді поліному з випадковими коефіцієнтами g_i , $i=0, 1, \dots, n$, можна вирішити за допомогою критерію максимальної правдоподібності. Оскільки випадкова функція $R(g, t)$ розподілена нормально, то її функція правдоподібності n -мірної вибірки відповідає функції системі корельованих нормально розподілених випадкових величин. Скориставшись загальним правилом знаходження

оцінок за методом максимальної правдоподібності, можна отримати оцінку згладженої координати, наприклад $x^*_c(t_N)$, у момент t_N останнього спостереження у вигляді:

$$X^*_c(t_N) = \sum_{r=0}^S g^*_r t^r_N. \quad (4.23)$$

Подібно до цього можна знайти оцінку екстрапольованої координати на будь який проміжок часу $t_N + p$:

$$X_E(t_{N+p}) = \sum_{r=0}^S g^*_r t^r_{N+p}. \quad (4.24)$$

Остаточні формули для оцінок координат та параметрів при поліноміальній моделі переміщення точок ізогіпси залежать від степеня вибраного поліному.

Якщо зміна координати x описується поліномом першого степеня, то значення її математичного очікування у першому огляді визначається за формулою:

$$X^*_i = X^*_i + V^*_x t_i. \quad (4.25)$$

У результаті розв'язання системи рівнянь правдоподібності можна остаточно отримати:

$$x^*_0 = -\sum_{i=1}^N \frac{6i-4-4N}{N(N+1)} x_i = \sum_{i=1}^N x_i \eta_{x_0}(i), \quad (4.26)$$

$$U^*_x = V^*_x T_0 = \sum_{i=1}^N \frac{12i-6-6N}{N(N^2-1)} x_i = \sum_{i=1}^N x_i \eta_{U_x}(i), \quad (4.27)$$

де $\eta_{x_0}(i) = -(6i-4-4N)/N(N+1)$ та $\eta_{U_x}(i) = -(12i-6-6N)/N_x(N^2-1)$ - відповідно вагові функції координати x_0 та прирощення координати x за

огляд.

У формулах (4.26) та (4.27) за нульовий відлік часу взято момент першого спостереження, яке враховується, тобто

$$t_i = (i-1)T_0, \quad (4.28)$$

де i — номер спостереження.

Знаючи (4.26) та (4.27), легко знайти вираз для згладженого значення координати x на момент останнього (N -го) спостереження:

$$x_N^* = \sum_{i=1}^N x_i \eta_{x_0}(i) + \frac{1}{T_0} \sum_{i=1}^N x_i \eta_{U_x}(i) t_N. \quad (4.29)$$

Звідси при підстановці замість t_N його значення $t_N = (N-1)T_0$ одержуємо:

$$x_N^* = \sum_{i=1}^N \frac{6i-2-2N}{N(N+1)} x_i = \sum_{i=1}^N x_i \eta_{x_N}(i), \quad (4.30)$$

де $\eta_{x_N}(i) = -(6i-2-2N)/N(N+1)$ — вагова функція згладжування координати x .

Оцінку екстрапольованої на один період огляду T_0 координати x можна знайти, якщо підставити $t_{N+p} = (N+p-1)T_0$. Тоді в результаті розв'язання рівняння отримуємо:

$$x_{N+1}^* = - \sum_{i=1}^N \frac{6i-2N-4}{N(N-1)} x_i = \sum_{i=1}^N x_i \eta_{x_{N+1}}(i), \quad (4.31)$$

де $\eta_{x_{N+1}}(i) = (6i-2N-4)/N(N-1)$ — вагова функція екстраполяції на один огляд координати x .

Для отримання значень координат, екстрапольованих на довільне число p оглядів, потрібно у (4.29) підставити $t_{N+p} = (N + p - 1)T_0$. Приведені вирази оцінок є однотипними і відрізняються лише значеннями вагових функцій.

Якщо зміна координати x описується поліномом другого степеня, то значення координати x в i -й точці спостереження визначається за формулою:

$$X_i = X_0^* + V_x^* t_i + 0,5a^* t_i^2, \quad (4.32)$$

де X_0^* , V_x^* , a^* – оцінки початкової координати, швидкості та прискорення відповідно.

Склавши систему рівнянь правдоподібності та розв'язавши її відповідно до шуканих оцінок X_0^* , V_x^* , a^* , можна отримати вираз оцінок в однотипному вигляді, наведеному для випадку поліному першого степеня. Використовуючи їх, легко знайти у тій же формі і вираз для оцінки згладженої та екстрапольованої координат точки ізогіпси.

Отримані у процесі автосупроводження відмітки повинні прив'язуватись до своїх ізогіпс. З цією метою виконується операція стробування та звірка координат екстрапольованої відмітки з координатами відміток, що потрапили у строб. Стробування дозволяє відібрати відмітки з числа отриманих в останньому огляді для продовження супроводжуваної траєкторії. Строб являє собою деяку область навколо екстраполяційної відмітки, розміри та форма якої вибираються такими, щоб забезпечити високу ймовірність потрапляння у неї відмітки, яка належить супроводжуваній траєкторії. Оскільки окрім відмітки, що належить супроводжуваній траєкторії, у строб можуть потрапити відмітки від інших ізогіпс, а також помилкові відмітки, необхідно провести операцію селекції відміток. Остання виконується з метою вибору з усіх відміток, що потрапили до стробу, тієї, котра з більшою ймовірністю належить супроводжуваній траєкторії (ізогіпси).

При потраплянні до стробу декількох відміток, справжня відмітка визначається за допомогою селекції.

Варто відзначити, що розміри стробу значно залежать від щільності ізогіпс. При малій щільності строб має мінімальні розміри. При великій щільності ізогіпс строб потрібно розширювати на величину динамічної помилки супроводження, що виникає при цьому. При пропуску однієї чи декількох відміток помилки екстраполяції значно підвищуються, отже й розміри стробу необхідно значно збільшити. Враховуючи це, рекомендується виробляти строби щонайменше трьох розмірів:

- вузький строб для супроводження ізогіпс при їхній малій щільності;
- середній строб для супроводження ізогіпс при їхній великій щільності;
- широкий строб (або набір широких стробів) для супроводження ізогіпс при наявності пропусків відміток.

При попаданні до стробу декількох відміток різних ізогіпс можна продовжувати супроводження траєкторії по кожній з них. У цьому випадку окрім правильної траєкторії з'являться також хибні. Однак через відсутність кореляції між хибними відмітками ймовірність супроводження останніх, як правило, зменшується від огляду до огляду, і через декілька оглядів вони скидаються з супроводження. Між тим, супроводження по вірних відмітках залишається.

Логічний метод полягає в аналізі фрагмента карти та автоматичному визначенні вектора направленості, у відповідності з яким визначається напрям переміщення вікна. Для визначення вектора аналізується попередня поведінка ізолінії. Цей метод є доволі складним у реалізації, а також при його використанні доволі часто виникають труднощі визначення правильного вектора направленості. Статистичний метод заснований на аналізі вмісту вікна та попиксельного порівняння його з фрагментами, що містяться в базі даних, у якій окрім самих фрагментів зберігаються також відповідні правила переміщення вікна. При знаходженні співпадіння відбувається переміщення

вікна у відповідності з правилами. До недоліків цього методу можна віднести постійну необхідність у доданні нових фрагментів до бази даних, оскільки переміщення відбувається тільки, якщо знаходиться відповідний фрагмент. Отже і розміри такої бази даних мають бути досить великими для коректної роботи.

Статистичний метод був реалізований авторами, але він не є ідеальним. Це зумовлено витратою великої кількості часу на створення бази даних та постійне її оновлення. У запропонованій методиці відновлення ізогіпс при обробці топографічних карт досліджена можливість використання фільтра Калмана, що може значно спростити процес відновлення.

Алгоритм відновлення ізогіпс наведено на рис. 4.15.

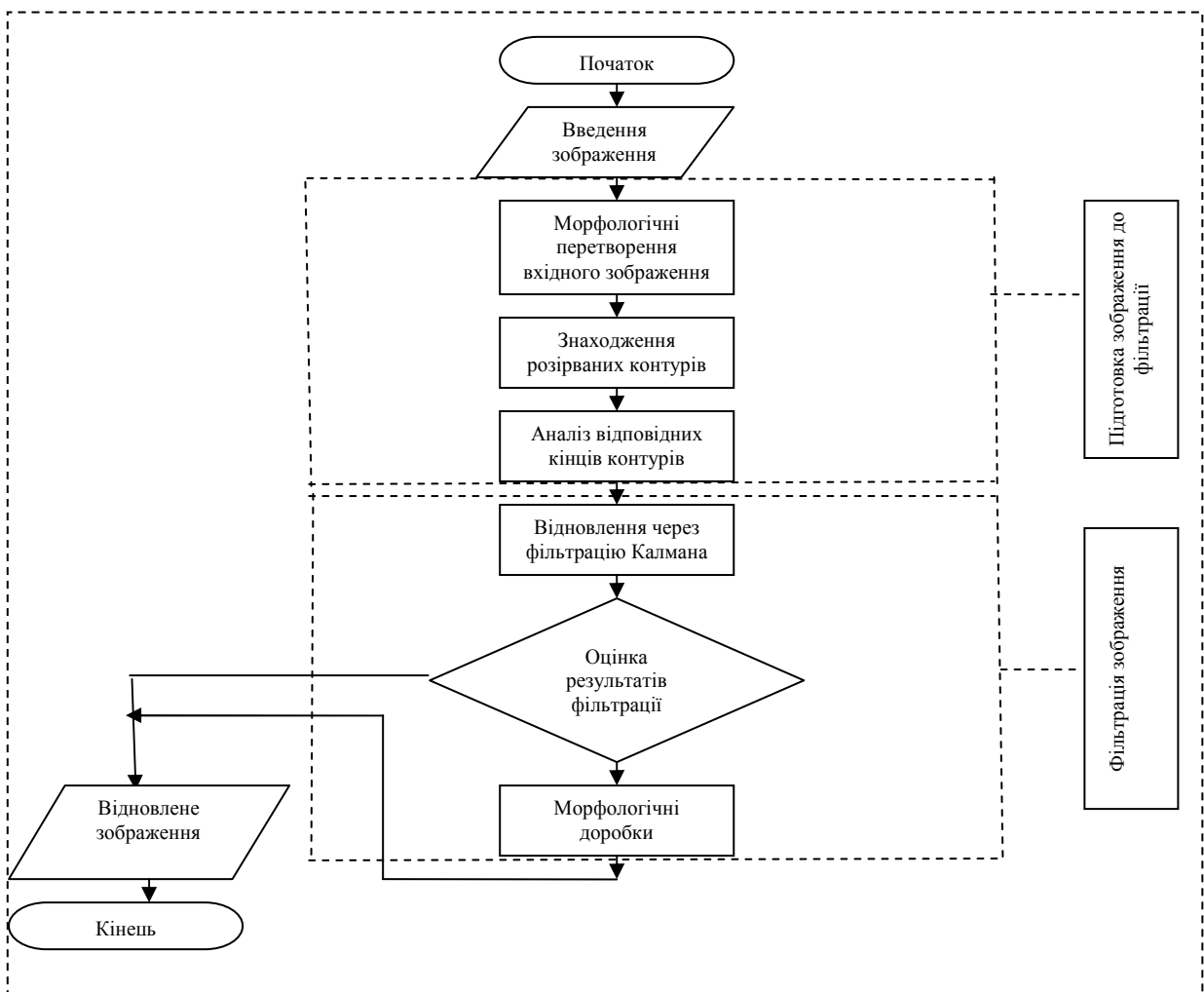


Рисунок 4.15 – Алгоритм відновлення ізогіпсів з використанням фільтра Калмана

4.3 Оптимальна оцінка скалярних величини з використанням нерекурсивної і рекурсивної фільтрації Вінера

Середня квадратична помилка дозволяє оцінити якість процесу оцінки. Середня квадратична помилка узята як основний критерій. Оцінки, що мінімізують середню квадратичну помилку, представляються як оптимальні.

Розглянемо обробку скалярного сигналу з випадковим розподілом його постійного параметра в нерекурсивному фільтрі Вінера.

На виході нерекурсивного фільтра оцінка сигналу визначається як

$$\hat{x} = \sum_{i=1}^m h(i)y(i), \quad (4.33)$$

де $y(1), y(2), \dots, y(m)$ – m вибірок сигналу.

Коефіцієнт передатної характеристики $h(i) = 1, 2, \dots, m$ мають однакові ваги $\square \frac{1}{m}$.

Коефіцієнти $h(i)$ вибираються так, щоб середня квадратична помилка була мінімальною:

$$P_e = E(e^2) = E(x - \hat{x})^2,$$

або

$$P_e = E \left[x - \sum_{i=1}^m h(i)y(i) \right]^2. \quad (4.34)$$

Мінімальна середня квадратична помилка визначається як результат диференціювання:

$$\frac{\partial P_e}{\partial h(j)} = -2E \left[x - \sum_{i=1}^m h(i)y(i) \right] \cdot y(j) = 0, \quad (4.35)$$

або

$$\sum_{i=1}^m h(i)E[y(i)Y(j)] = E[xy(j)], \quad j=1,2,\dots,m. \quad (4.36)$$

Відповідно

$$E[e \cdot y(j)] = 0, \quad (4.37)$$

де $e = x - \hat{x}$ - помилка.

З (4.36) випливає, що

$$E[y(i) \cdot y(j)] = P_{yy}(j) \quad (4.38)$$

- це автокореляційна функція вибірок. Для нестационарного процесу вона визначається як $P_y(i, j)$, а для стаціонарного процесу – як $P_y(j-i)$. У результаті

$$E[x \cdot y(j)] = P_{xy}(j) \quad (4.39)$$

є кросом-кореляцією між випадковою перемінною x і вибіркою $y(j)$. При цьому рівняння (4.36) представиться як

$$\sum h(i) \cdot P_y(i, j) = P_{xy}(j), \quad j=1,2,\dots,m. \quad (4.40)$$

Для $i=1,2,\dots,m$ маємо:

$$P_y(1, j)h(1) + P_y(2, j)h(2) + P_y(m, j)h(m) = P_{xy}(j),$$

$$P_y(1, m)h(1) + P_y(2, m)h(2) + P_y(m, m)h(m) = P_{xy}(m),$$

де $P_y(i, j) = P_y(j, i)$, тому що P_y симетрична.

Відомі значення – це $P_y(i, j)$, автокореляційні коефіцієнти вхідних величин, і $P_{xy}(j)$, коефіцієнти крос-кореляції між бажаною вихідною величиною x і вхідними вибірками y .

Невідомі величини - $h(i)$, вагомні коефіцієнти оптимального фільтра.

Оптимальному рішення буде відповідати мінімальна середня квадратична помилка:

$$P_e = E(e^2) = E \left\{ e \left[x - \sum_i h(i)y(i) \right] \right\} = E(ex) ,$$

або

$$P_e = E(x^2) - \sum_{i=1}^m h(i)P_{xy}(i) , \quad (4.41)$$

відповідно до (4.39).

Повне рішення проблеми оцінки за допомогою нерекурсивного скалярного фільтра Вінера дається набором рівнянь (4.40), рівняння оцінки (4.33) і відповідної мінімальної середньої квадратичної помилки з рівняння (4.41).

Матрична форма цих трьох рівнянь

$$P_y \cdot h = P_{xy} , \quad (4.42)$$

де P_y - $(m \times m)$ кореляційна матриця;

h і p_{xy} - $(m+1)$ стовпцеві вектори.

Формальне рішення рівняння (4.42)

$$h = P_y^{-1} \cdot p_{xy} . \quad (4.43)$$

Відповідно рівняння оцінки (4.33) представляється як

$$\hat{x} = h^T y, \quad (4.44)$$

де h і y - $(m+1)$ стовпцеві вектори,

h^T - вектор-рядок.

У результаті

$$\hat{x} = P_{xy}^T \cdot P_y^{-1} \cdot y, \quad (4.45)$$

і для мінімальної середньої квадратичної помилки

$$P_e = E(x^2) - P_{xy}^T \cdot P_y^{-1} \cdot P_{xy}, \quad (4.46)$$

тому що матриця P_y симетрична.

Рівняння (4.44) використовується також у теорії керування, де мінімальна середня квадратична оцінка використовується для систем ідентифікації.

Розглянутий нерекурсивний фільтр відомий як фільтр Вінера, рівняння (4.40) відомо як скалярне рівняння Вінера-Хопфа. Результат аналізу показує, що якщо у вибірках сигналу $y(i)$, $i=1,2,\dots,m$ є присутнім невідома випадкова величина сигналу x , то найкращою операцією лінійної фільтрації над вибірками є їхня обробка фільтром Вінера .

Однак даному способу оцінки за допомогою фільтра Вінера притаманні наступні недоліки:

- потрібно попереднє знання (чи набір оцінок) автокореляційної матриці P_y ;
- кількість вибірок m , використовуваних в обробці, повинне бути визначене заздалегідь;
- якщо m змінюється в процесі обробки (наприклад міняється обсяг вибірок), то обчислення повинні бути повторені;

- потрібно перетворення $(m \times m)$ матриці P_y . Для великих m потрібно великий комп'ютерний час для обчислень.

З метою забезпечення можливості оцінки великої кількості інформації і скорочення часу обробки пропонується інша схема фільтрації з використанням рекурсивного процесора.

При цьому для даної послідовності вибірок $y(k) = x + v(k)$ виробляється лінійна обробка $\hat{x} = \sum_{i=1}^k h(i)y(i)$ з $P_e = E(x - \hat{x})^2$ по можливості з найменшою вибіркою.

Для k вибірок результат обробки представляється як

$$\hat{x} = \hat{x}(k) = \sum_{i=1}^k h(i)y(i), \quad (4.47)$$

де $h_i = \frac{1}{k + \gamma}$ з відповідною середньою квадратичною помилкою

$$P_e = p(k) = E[x - \hat{x}(k)]^2 = \frac{\sigma^2 v}{k + \gamma}, \quad (4.48)$$

де $\gamma = \frac{\sigma^2 v}{\sigma^2 x}$.

Така оцінка виробляється після обробки k вибірок.

Для $(k + 1)$ вибірок оцінка і середня квадратична помилка відповідно рівні :

$$\hat{x}(k + 1) = \sum_{i=1}^{k+1} h(i)y(i), \quad h(i) = \frac{1}{(k + 1) + \gamma}, \quad (4.49)$$

$$p(k + 1) = \frac{\sigma^2 v}{(k + 1) + \gamma}. \quad (4.50)$$

Тут коефіцієнти h_i більш коректно представляти як $h(i, k)$.

З рівняння (4.47) маємо $h(i, k) = \frac{P(k)}{\sigma^2 v}$, і відповідно $h(i, k + 1) = p(k + 1) / \sigma^2 v$.

З відносин $\frac{P(k+1)}{p(k)} = \frac{h(i, k+1)}{h(i, k)} = \frac{k+\gamma}{k+1+\gamma} = \frac{1}{1+1/(k+\gamma)}$ маємо

$$\frac{P(k+1)}{P(k)} = \frac{1}{1+P(k)/\sigma^2\nu}. \quad (4.51)$$

З цих рівнянь випливає, що за даними $P(k)$ повинні виробляється обчислення для $P(k+1)$, потім для $P(k+2)$ і так далі. У такий спосіб ми визначили простий алгоритм для визначення зміни середньої квадратичної помилки в залежності від кількості вибірок. З рівняння (4.47) і (4.49) знаходимо оцінку сигналу $\hat{x}(k+1)$ після обробки $(k+1)$ вибірок

$$\hat{x}(k+1) = \frac{P(k+1)}{P(k)} \hat{x}(k) + \frac{P(k+1)}{\sigma^2\nu} \cdot y(k+1). \quad (4.52)$$

Це - рекурсивне оцінне рівняння, що разом з рівнянням (4.51) визначає алгоритм роботи рекурсивного фільтра. Процедура полягає в перебуванні $P(k+1)$ з рівняння (4.51) у величинах $P(k)$. Потім, з відомих значень $\hat{x}(k)$ і нових вибірок інформації $y(k+1)$ розраховуємо $\hat{x}(k+1)$. Ця процедура послідовно виробляє кращі мінімальні оцінки для x і, у той же час, дає відповідну середню квадратичну помилку $P(k+1)$. Помітимо, що в цьому випадку $P(k) \rightarrow 0$ для дуже великих значень k [25].

Для початку рекурсивного процесу ми повинні розрахувати першу оцінку $\hat{x}(1)$, засновану на одиничному огляді нерекурсивними методами. Порівнюючи рекурсивний алгоритм (4.52) з рекурсивним фільтром

$$g(k) = y(k) + ag(k-1), \quad (4.43)$$

бачимо, що це така ж форма, тільки з перемінними в часі коефіцієнтами:

$$a(k+1) = \frac{P(k+1)}{P(k)}, \text{ і } b(k+1) = \frac{P(k+1)}{\sigma^2 v} \quad (4.44)$$

Структурні схеми за алгоритмом (4.45) представлена на рис. 4.16 а, за алгоритмом (4.26) – на рис. 4.16 б.

Алгоритм (4.42) представляється як

$$\hat{x}(k+1) = a(k+1)\hat{x}(k) + b(k+1)y(k+1). \quad (4.45)$$

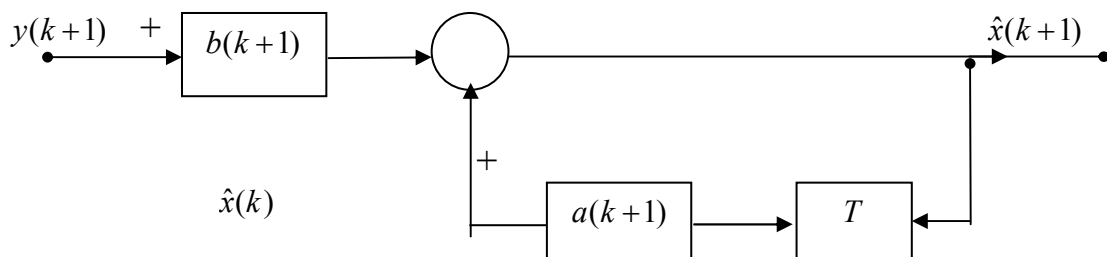
З рівнянь (4.41) і (4.44) співвідношення параметрів має вигляд:

$$a(k+1) = 1 - b(k+1) \quad (4.46)$$

і, відповідно,

$$\hat{x}(k+1) = \hat{x}(k) + b(k+1)[y(k+1) - \hat{x}(k)]. \quad (4.47)$$

а)



б)

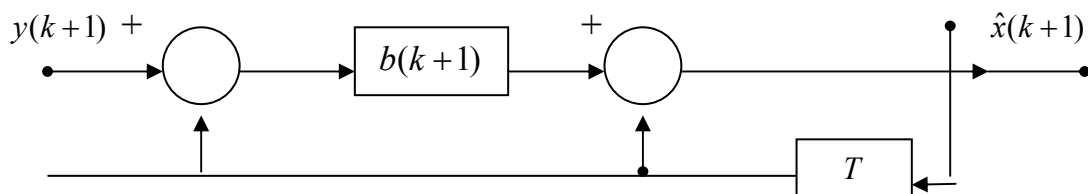


Рисунок 4.16 – Структурні схеми: а) - рекурсивний фільтр; б) - еквівалентна форма

5 ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА З ВИКОРИСТАННЯМ СУЧАСНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

5.1 Концепція автоматизації систем моніторингу навколишнього середовища

В останні десятиліття суспільство все ширше використовує у своїй діяльності умови про стан навколишнього середовища. Дана інформація необхідна в повсякденному житті людей, для аналізу стану здоров'я населення і середовища існування, при веденні господарства, у будівництві, при оцінюванні надзвичайних обставин — для оповіщення про небезпечні явища природи, що насуваються. Зміни в стані навколишнього середовища відбуваються під впливом різних біосферних процесів природного й антропогенного походження.

В даний час у плані аналізу й оцінки екологічних і техногенних небезпек виняткова роль приділяється системі екологічного моніторингу. В цій області для прогнозування розвитку екологічно небезпечних ситуацій недостатньо старої практики, заснованої на спостереженні, накопичені даних і складанні бюлетенів забруднення навколишнього середовища. Необхідний оперативний екологічний контроль, а це, виходить, потрібно нова стратегія і нові методи, що дозволять зосереджувати увагу на найближчих і майбутніх тенденціях і першорядних задачах.

Екологічний моніторинг — інформаційна система спостережень, оцінки і прогнозу змін у стані навколишнього середовища, створена з метою виділення антропогенної складової цих змін на тлі природних процесів.

Говорячи про систему екологічного моніторингу, ми маємо на увазі, що вона повинна накопичувати, систематизувати й аналізувати інформацію:

- про стан навколишнього середовища;

- причини що спостерігаються і ймовірних змінах;
- про допустимість змін і навантажень на середовище в цілому.

Відповідно до приведеного визначеннями і покладеними на систему функціями, можна виділити три основних напрямки деякої діяльності, що містить у собі екологічний моніторинг:

- спостереження за факторами впливу;
- і станом середовища;
- оцінку фактичного стану середовища;
- прогноз стану навколишнього природного середовища й оцінку прогнозованого стану.

Необхідно також відзначити, що сама система моніторингу не включає діяльність і по керуванню якістю середовища, але є і джерелом інформації необхідної для прийняття екологічно значимих рішень.

Системний метод екологічного моніторингу ґрунтується на експертизі екологічного впливу небезпечних явищ на навколишнє середовище і забезпечує комплексний облік вимірювань і зіставлення їх зі стандартними показниками, вираженими через якісні і кількісні характеристики екологічної безпеки.

Метод оцінки екологічних впливів при розробці системи містить комплекс заходів, що включають ідентифікацію, аналіз, спостереження і моніторинг екологічних ризиків від їхніх запланованих значень. При цьому інформаційна модель екологічних впливів небезпечних явищ містить у собі ідентифікацію: явних і неявних небезпек для людини, природи і суспільства в цілому.

Використання сучасних інформаційних технологій у даній області дозволяє розробити автоматизовану систему екологічного моніторингу навколишнього середовища для забезпечення екологічної безпеки різного роду об'єктів і людей, з перспективою об'єднання й інтеграції всієї екологічної інформації в масштабах країни.

Така система екологічного моніторингу визначається як система

спостережень, вимірювань, контролю, оцінки, аналізу і прогнозу стану навколишнього середовища і джерел небезпечних явищ.

Основним напрямом розробки досліджень є створення територіальної автоматизованої інформаційно-аналітичної системи екологічного моніторингу забруднення навколишнього середовища регіону, що базується на наземних засобах одержання екологічної інформації, що дозволяє оперативнo одержувати дані про стан навколишнього середовища на території регіону, прогнозувати виникнення і розвиток екологічних ситуацій, а також формувати рекомендації з керування екологічною обстановкою [26].

Ця система може складатися з підсистем збору інформації про стан атмосфери, підсистем інформаційного й аналітичного аналізу, а також надалі планується додати підсистеми збору інформації про стан води в ріках і водоймах, стані ґрунтів, а також медичного моніторингу.

Екологічний моніторинг на сьогоднішній день являє собою систему стаціонарних пунктів спостереження за станом забруднення атмосфери на території. Дану інформацію можна одержати за допомогою методів і засобів зондування атмосфери системами вітрового зондування акустичними, радіоакустичними, лідарними, на яких проводяться регулярні координовані вимірювання стратосферного аерозолу, температури й озону. Моніторинг стратосферного аерозолу й озону є найважливішою передумовою розвитку кліматологічних досліджень при рішенні екологічних задач. Для одержання достовірних даних про просторово-тимчасову трансформацію атмосферних компонентів створюються міжнародні глобальні і регіональні вимірювальні мережі, основними задачами яких є проведення регулярних вимірювань і формування баз даних.

5.2 Сучасні інформаційні технології

Інформація про вітер і його параметри: турбулентності, поривах, зрушеннях і градієнтах вітру надзвичайно важлива для дуже великого числа

споживачів, починаючи від метеослужб аеропортів і закінчуючи простими людьми, що планують вийти з будинку. В даний час найпоширеніші засоби вимірювань вітру – анеометри, що встановлюють на щоглах різної висоти. Але ці вимірювання мають контактний характер і не дозволяють одержати профіль вітру та висоти і його основні характеристики.

Інший розповсюджений тип приладів – радіозонди, що використовують оболонку, що піднімається, з вимірювальними приладами, наповнену воднем чи гелієм. Реєструючи за допомогою радіолокатора положення оболонки в просторі в різні моменти часу (чи положення оболонки і доплерівську частоту за рахунок її руху), визначають швидкість вітру на різних висотах. Радіозондування дотепер у світі є основним засобом визначення вертикального профілю вітру. Але радіозондування, поряд з високою вартістю видаткових матеріалів, має недолік, зв'язаний з рідкою частотою випуску радіозондів (звичайно 2-4 рази в добу). З огляду на, те що вітрове поле може змінюватися кардинально за кілька хвилин, така низька оперативність одержання вітрових даних не влаштовує багатьох споживачів.

Виходом є використання дистанційних засобів вітрового зондування, що оперативно реєструють вітрові характеристики в значному обсязі простору, і можуть завчасно попереджати про небезпечні явища. У даному огляді ми зупинимося на основних методах і засобах дистанційного визначення параметрів вітру, обговоримо фізичні основи вимірів у кожному випадку. Особливо зупинимося на достоїнствах і недоліках використовуваних приладів і принципових обмежень усіх розглянутих засобів вітрового зондування.

В даний час існує чотири основних типи дистанційних вимірювань вітру. Це содари, що працюють на акустичних хвилях, лідари, що використовують оптичне випромінювання, радіолокатори, що випромінюють і приймають радіохвилі, і радіоакустичні системи, що комбінують акустичне й електромагнітне випромінювання. Усі дистанційні методи зондування засновані на випромінюванні хвиль, що при поширенні через атмосферу

розсіюються в зворотному напрямку і реєструються приймачем. Розглянемо кожний з перерахованих видів зондування.

5.3 Акустичні системи вітрового зондування, содари

Теорія розсіювання акустичних хвиль в атмосфері вперше була розглянута А.М. Обуховим у 1941 р. Надалі розвитку теорії сприяли роботи В.И.Татарського й інших авторів. Великий цикл теоретичних і експериментальних робіт у СРСР був виконаний М.А.Калістратовою. Інтенсивність взаємодії акустичної хвилі з атмосферними неоднорідностями дуже велика, приблизно в мільйон разів сильніше, ніж для електромагнітних хвиль. Тому в результаті взаємодії відбувається не тільки розсіювання хвиль, але і їхнє сильне поглинання і рефракція. Це приводить до того, що висота акустичного зондування звичайно не перевищує 1000 метрів. Перераховані ефекти дуже сильно залежать від частоти випромінювання, (приблизно пропорційно квадрату частоти), тому при висоті зондування до 300 м використовуються частоти 5-10 кГц, а для досягнення висоти в 1000м частоту знижують до 1 кГц.

При акустичному зондуванні в атмосферу випромінюється коротка пачка звукових хвиль, що при поширенні розсіюється на акустичні неоднорідності атмосфери. Джерелом акустичних неоднорідностей в атмосфері є неоднорідності поля чи вітри і температури, що у першу чергу зв'язані з турбулентними рухами. Відбиті звукові хвилі реєструються акустичним приймачем, розташованим, як правило, поблизу джерела випромінювання (моностатичний содар). За часом затримки відбитого сигналу визначають дальність розсіювачів R , та потужності відбитого сигналу можна судити про інтенсивність турбулентності, а за доплерівським зрушенням частоти – визначати проекцію вітру на напрямок зондування. Тривалість випромінюваного імпульсу звичайно лежить в інтервалі $\Delta\tau_{\text{и}} = 0.05-0.3$ секунди. З огляду на, те що швидкість поширення

звуку складає масштаб $C = 340$ м/с, одержимо, що дозвіл по дальності такої системи буде дуже високим: $\Delta R = C\Delta\tau_{\text{и}}/2 = 8-55$ м.

За рахунок руху середовища, що розсіює, (зі швидкістю вітру), назад розсіяна звукова хвиля буде мати частоту, зрушену за рахунок ефекту Допплера. Допплерівський сигнал виділяється на змішувачі, при додаванні прийнятого сигналу з опорним. Оцінимо, який вид буде мати доплерівський сигнал, і який дозвіл по швидкості можна одержати при такому зондуванні. Нагадаємо, що зсув розсіювача на половину довжини хвилі $\lambda/2$ приводить до зміни фази відбитого сигналу на 2π і появи в регструючій доплерівській послідовності одного повного періоду синусоїду. Якщо проекція швидкості вітру на напрямок зондування складає $V_{\text{в}}$ м/с, то за час одного імпульсу частка зміститься вздовж променя на відстань $V_{\text{в}} \Delta\tau_{\text{и}}$, а доплерівська послідовність буде містити $N = 2V_{\text{в}}\Delta\tau_{\text{и}}/\lambda$ повних періодів коливань. Зі спектрального аналізу відомо, що чим більше N повних періодів у доплерівській послідовності, тим вужчий спектр, і тим більше точно визначається доплерівська швидкість $\Delta V_{\text{в}}$. А саме, $V_{\text{в}}/\Delta V_{\text{в}} = N$. З даної властивості одержуємо, що дозвіл по швидкості $\Delta V_{\text{в}}$ визначається тривалістю імпульсу і довжиною хвилі:

$$\Delta V_{\text{в}} = \lambda/2\Delta\tau_{\text{и}}.$$

Чим довше імпульс, тим кращий дозвіл по швидкості. Але, з іншого боку, чим довше імпульс, тим гірше дозвіл по дальності $\Delta R = C\Delta\tau_{\text{и}}/2$. В результаті, для середньо імпульсної обробки сигналу отримуємо співвідношення невизначеностей:

$$\Delta R \Delta V_{\text{в}} = \lambda C / 4, \quad (5.1)$$

де $\Delta V_{\text{в}}$ - дозвіл по швидкості,

ΔR - дозвіл по дальності,

C - швидкість звуку,

λ - довжина хвилі.

При типовій частоті зондування дорівнює 1,5 кГц, (довжина хвилі $\lambda=23$ см) та тривалість імпульсу 100 м/с дозвіл по швидкості складе 1,1 м/с, а дозвіл по дальності 17м. Для більшості метеорологічних задач це цілком прийнятні величини.



Рисунок 5.1 - Трипроменевий содар TRITON має висоту зондування 200м

Достоїнством содарів є їхня відносна простота і не дуже висока вартість, вони досить надійно забезпечують вимірювання швидкості і напрямку вітру в діапазоні висот від 20 до 200-800 метрів при відносно високому вертикальному дозволі (порядку 5-50 метрів). Численні порівняльні іспити підтвердили ці характеристики.

До недоліків варто віднести те, що випромінюваний сигнал (звичайно в діапазоні 1-10 кГц) є чутним для людського вуха і викликає неприємні відчуття в людей, тому содари рекомендується використовувати поза населеними пунктами. Гранична висота зондування сильно залежить від метеорологічних умов під час вимірювань, знижується при наявності температурних інверсій в атмосферному прикордонному шарі, при сильній турбулентності і сильних вітрах. Вимірювання дуже чуттєві до сторонніх звуків, тому вимірювання практично неможливо проводити при високому

рівні фонових шумів і при наявності рідких опадів.

Перші комерційні зразки содарів з'явилися в 70-х роках. Оскільки для прийому використовуються високочутливі мікрофони, важливо ізолювати приймач від сторонніх шумів. Для цього навколо содара створюється 26 громіздкий поглинаючий екран. Моностатичні содари мають випромінювач і приймач, сполучені в одному місці. При цьому для отримання двох компонентів вітру потрібно або два і більше випромінювачі, або необхідно повертати монособар на платформу.

Сучасні содари нерідко використовують антенну систему з трьома випромінювачами, один із яких спрямований вертикально, а два інших - під кутом до обрію (на північ і на захід). Останнім часом створені содари з випромінювачами у вигляді плоских антенних ґрат, або у вигляді фазових антенних ґрат. Більш докладна інформація про принцип дії і методи обробки даних содарів міститься в спеціальних публікаціях.

Сучасні маловисотні содари мають максимальну висоту зондування до 200 м і звичайно використовуються для обслуговування вітрових електростанцій. Прикладом можуть служити содари TRITON (США), PCS.2000-24/LP (Німеччина), 4000 WE (США) і інші.

Друга група содарів з висотою зондування до 1000 метрів використовується для метеорологічних і екологічних цілей. Наприклад: XFAS, MFAS, SFAS (Німеччина); PCS.2000 (Німеччина); PAO-5 (Франція-США); Echosonde 300, 600, 600 PA (Англія-США); Хвиля-3 (Росія), ЛАТАНИЙ-3 (Росія) і інші.

Можна виділити також пересувні содари. Як правило, вони встановлюються на спеціальному причепі, автомобілі, що дозволяє встановлювати його в короткий термін у різних місцях.

Приклади комерційних зразків: PCL.2000-24/LP(Німеччина), TRITON-mobil (США); TORAGON AB (Швеція-Німеччина); 4000 WS/WE (США) і інші.

Таким чином, содари є непоганим і не дуже дорогим інструментом, що

дозволяє проводити вимірювання вітру в 300-800 метровому прикордонному шарі атмосфери у відносно спокійних умовах (без сильного вітру і без рідких опадів).

5.4 Системи радіоакустичного зондування (RASS)

Принцип радіоакустичного вимірювання швидкості вітру полягає в штучному створенні в атмосфері неоднорідності, що відбиває, у вигляді звукових ґрат. Звуковий пакет за допомогою радара, підбираючи довжину хвилі радіолокатора такий, щоб виконувалася умова Бреґга, а саме: довжина хвилі радіолокатора повинна бути вдвічі більше довжини звукової хвилі. Швидкість поширення звукової хвилі складається зі швидкості звуку, що визначається тільки температурою, і швидкості вітру. Проводячи вимірювання у вертикальному напрямку можна одержати профіль температури, щоб потім використовувати для отримання швидкості вітру. Зручність радіоакустики полягає в тому, що швидкість вітру реєструється не на нульових доплерівських частотах, а на частоті, зрушеної на швидкість звуку. Це полегшує селекцію сигналу. Недоліки радіоакустики полягають у перекручуванні звукових ґрат як за рахунок розсіювання на турбулентність, так і за рахунок градієнтів вітру і сильної рефракції. В результаті зі збільшенням відстані звуковий пакет розпливається, і відбитий радіолокаційний сигнал різко слабшає чи пропадає зовсім. З цієї причини вітер середньої сили, порядку 10 м/с, часто створює настільки несприятливі умови, що вимірювання стають неможливими.

Система радіоакустичного зондування (**Radio Acoustic Sounding System**). (**RASS**) складається із содара, що доповнюється радіолокатором. Оскільки все це розташовується на близькій відстані, великі зусилля затрачаються на розв'язання випромінювача і приймача радіолокатора. Звичайна висота зондування вітру не перевищує 1 км. **RASS** є дуже ефективним приладом для наукових досліджень різних явищ в атмосфері,

тому що одночасно подає інформацію про профілі вітру і температури. Однак досвід використання RASS показав, що він є не оптимальним приладом для проведення мережних метеорологічних спостережень. Це в першу чергу зв'язано із сильною залежністю точності вимірювань від метеорологічних умов. Радіоакустичні вимірювання практично неможливо проводити вже при середньому вітрі, при випаданні опадів, а також при високому шумовому тлі.

Перелічимо деякі комерційні RASS на світовому ринку. LAP -3000 (Фінляндія), приставка 482 MHz RASS (Німеччина), AP1000 RASS (Німеччина); RWP50 (США).

5.5 Оптичні вітрові профайлери (лідари)

Розглянемо властивості й особливості оптичних вітрових профайлерів. Умовно лідарні засоби для вітрових вимірювань можна розділити на не доплерівські і доплерівські системи.

Не доплерівські вимірювання засновані на вимірюваннях зсуву максимуму взаємної просторово-тимчасової кореляційної функції інтенсивності, отриманої на різних рівнях конуса зондування, що описує лазерний промінь в напрямку близькому до вертикалі. Фактично відбувається спостереження за переміщенням неоднорідностей відбиваності в горизонтальній площині. За часом і напрямком зсуву неоднорідностей проводиться оцінка швидкості і напрямку вітру на заданій висоті зондування. Недоліком такого методу є можливе невиконання умови стаціонарності поля відбиваності при горизонтальному переміщенні розсіювачів. При переносі аерозолів до іншої ділянки конуса за рахунок турбулентності і вертикальних переміщень центр ваг неоднорідностей зміщується не так, як середній вітер, що приводить до наростання погрешностей чи вимірювань неможливості їхнього проведення. Ймовірно тому дані методи вітрового зондування дотепер не знайшли серійного застосування.

Некогерентні доплерівські лідари реєструють сигнал, розсіяний на аерозолях чи молекулах повітря. Розсіяне випромінювання збирають телескопічним приймачем і аналізують на інтерферометрі. При цьому відбувається пряме детектування сигналу на різних частотах (каналах). Вимірюється доплерівське зрушення частоти прийнятого сигналу, по якому визначають проекцію вітру на напрямок зондування. При кінчному зондуванні це дозволяє визначати і швидкість, і напрямок вітру на різних висотах. Якщо розсіювання відбувається на аерозолях, то одержують досить вузький сигнал, що зручно інтерпретувати. На великих висотах, де аерозолів майже немає, основний сигнал формується при розсіюванні на молекулах повітря. Ця властивість є перевагою методу в порівнянні з доплерівськими лідарами, що не можуть працювати у відсутності аерозолів. Однак, при молекулярному розсіюванні спектр сигналу набагато ширше, ніж при аерозольному розсіюванні, через що реєстрація доплерівського зрушення стає важкою, і потрібно довгострокове накопичення сигналу для аналізу.

Прикладом довгострокового використання даної методики служить ALOMAR лідар, який використовується у Норвегії для вітрових вимірювань у діапазоні висот 10-45 км. Лідар має наступні основні параметри: довжина хвилі випромінювань 532 нм, частота повторення імпульсів – 30 Гц, енергія в імпульсі – 600 мдж, дозвіл по висоті 200 м.

Дана методика, як правило, використовується для зондування верхньої атмосфери. Вартість такого лідара висока.

Когерентні доплерівські лідари (КДЛ).

У випадку КДЛ розсіяне на аерозольних частках випромінювання зондувального пучка після проходження через прийомну апертуру телескопа змішується з опорним пучком і подається на чуттєву площадку детектора. З вимірювань які виникають в колі і детектора фотоструму за допомогою вузько смугового частотного фільтра виділяється сигнал (сигнал відлуння), що несе інформацію про доплерівські зрушення частоти. Таким чином, у КДЛ використовується лазерне гетеродинування. Необхідною умовою такого

гетеродинування є виконання твердих вимог до узгодження хвильових фронтів поля розсіяного випромінювання й опорного пучка в площині чуттєвої площадки детектора. Ефективність гетеродинування залежить від розміру площадки когерентності розсіяного випромінювання стосовно площі поперечного перерізу опорного пучка. Посилення інтенсивності турбулентних пульсацій показника переломлення повітря в атмосфері може привести до істотного зменшення радіуса просторової когерентності розсіяного в атмосфері зондувального випромінювання в площині телескопа і, як результат, до падіння відносин сигнал-шум до рівня, при якому вимірювання вітру неможливі. З висотою коефіцієнт аерозольного зворотного розсіювання зменшується у вільній атмосфері він може стати настільки малим, що інформація про вітер може бути отримана при досить великих потужностях зондувального лазерного випромінювання з використанням спеціальних процедур обробки вихідних даних при тривалих лідарних вимірюваннях.

Зондувальний лазерний пучок може бути як безупинного, так і імпульсного випромінювання, тобто когерентні доплерівські лідари за цією ознакою підрозділяються на два типи: 1) безупинний КДЛ і 2) імпульсний КДЛ.

У випадку **безупинного КДЛ** обсяг зондування формується шляхом фокусування лазерного пучка на задану відстань. Зі збільшенням фокусної відстані разом з ростом дальності виміру відбувається збільшення обсягу зондування. За допомогою такого лідара інформація про вітер може бути отримана з відстані 10 м, але при фокусуванні зондувального пучка на відстань 1,5 – 2 км подовжній розмір обсягу зондування стає порівнянний з дальністю вимірювання. Максимальна дальність вимірювання таким лідаром складає 1 км. Для створеного в НПП «Лазерні системи» (м. Санкт-Петербург) малогабаритного безупинного КДЛ, марка ПЛВ -300, що працює на довжині хвилі 1,55 мкм, максимальна дальність не перевищує 300 м (<http://www.lsystems.ru>). Недоліком безупинних КДЛ є те, що для

відновлення висотного профілю вітру необхідно для кожної висоти здійснювати перефокусування зондувального пучка на відповідну відстань. Крім того, при зондуванні безупинним випромінюванням у промінь може попадати сильно та розсіює неоднорідність, що дає додатковий пік у сигнал майже при будь-якому фокусуванні променя. Це ускладнює інтерпретацію сигналів. Аналогічний ефект спостерігається при наявності в атмосфері хмар і фокусуванню зондувального пучка на великі відстані.

Загальним недоліком безупинних доплерівських лідарів є поганий дозвіл по дальності, масштаб якого порівнюємо із самою дальністю.

Найбільшими (у порівнянні з безупинними КДЛ) можливостями вітрового зондування володіють **імпульсні КДЛ**. Для імпульсного КДЛ обсяг зондування визначається тривалістю зондувального імпульсу і поперечним розміром лазерного пучка. Слід зазначити, що при цьому виробляється в середині імпульсу когерентна обробка кожного імпульсу (аналогічно обробці акустичних сигналів у содарів). Це накладає обмеження на довжину хвилі випромінювання, дозвіл по швидкості V і по дальності ΔR , що повторимо ще раз:

$$\Delta V \Delta R = c\lambda/4, \quad (5.2)$$

де c - швидкість світла.

Через це обмеження використання C_2 лазерів стає важким, тому що при прийнятному дозволі по швидкості в 1 м/с, дозвіл по дальності складе майже 800 м, що представляється занадто великим значенням для вітрового зондування в прикордонному шарі атмосфери. Спроба домогтися поліпшення просторового дозволу (зменшення подовжнього розміру обсягу зондування) неминуче приводить до розширення доплерівського спектра і, отже, до зменшення піку корисної складової спектрального розподілу, що у граничному випадку може буквально «потонути» в шумі.

У науковій групі Стерлядікіна В.В. і Гореліка А.Г. створені нові

кореляційні методи в середині імпульсного зондування, що дозволяють зняти вищенаведене співвідношення невизначеності чи збільшити дозвіл системи в 5-8 разів. Ці методи є новими, поки не пройшли експериментальну апробацію..

Зі співвідношення (5.2) видно, що для одержання кращого дозволу імпульсні доплерівські лідари краще проектувати на більш коротких хвилях, наприклад на ближньому ІК випромінюванні. Однак, тут існує інша проблема. Для детектування потрібно налагодити на приймачі хвильові фронти опорного і розсіяного випромінювання з точністю до десятих часток довжини хвилі. А в короткохвильовому діапазоні це технічно дуже непроста задача, що додатково ускладнюється перекручуванням фронту розсіяної хвилі при дворазовому проходженні атмосфери.

До дійсного часу створено кілька типів імпульсних КДЛ, що працюють на довжинах хвиль 10,6 мкм (лідар, побудований на основі газового лазера C_2 , 2 мкм [26], 1,5 мкм і 1,06 мкм (лідари, побудовані на основі твердотільних лазерів). Подовжній розмір обсягу зондування, який формується імпульсами C_2 лазером, складає ~ 300 м. Даний лідар при використанні конічного сканування зондувальним пучком призначений для виміру висотних профілів швидкості і напрямку вітру також продемонстрована можливість відновлення профілів вітру до висоти 10 км. В 1,06-мікронного лідара енергія зондувального імпульсу нерідко складає 1 Дж, що дозволило авторам роботи відновити профілі швидкості і напрямку вітру до висоти 26 км. У 1,5-мікронного лідара енергія зондувального імпульсу складає 100 мкДж, але частота повторення імпульсів досить висока (10 кГц), що дозволяє використовувати акумуляцію доплерівських спектрів по великому числу посилок зондувального імпульсу, і підвищити точність оцінки доплерівського зрушення частоти. Максимальна дальність вимірювання таким лідаром $\sim 1,5 - 2$ км.

Найбільш сучасні технології дозволили фірмі LEOSPHERE (LidarEnvironmentalObservations) створити лінію цілком волоконних вітрових

лідарів, що забезпечують вимірювання в діапазоні висот від 40м до 6500м. Наприклад, модель Windcubev2, за даними виробника, має діапазон вимірювання 40-200 м, з дозволом по висоті 20 м, точність вимірювання швидкості вітру 0.2м/с і точності вимірювання напрямку 2° . Час усереднення досягає 10 хв. Старша модель ряду Windcube 200 за даними виробника має діапазон вимірювань 100-6000 м, з дозволом по висоті 50 м і точністю вимірювань швидкості вітру 0.3м/с. Довжина хвилі випромінювання – 1.54 мкм, когерентна доплерівська обробка сигналів, відображення даних у необхідному форматі з виведенням на дисплей у поточному режимі. Достоїнством цих приладів є їхня компактність.

Недоліки виробник не відзначає, однак, при такій методиці обробки сильна турбулентність і опади різко знижує дальність вимірювань, а опади, туман і хмарність обмежують погодність.

З огляду на викладене, відзначимо, що оптичні профайлери прекрасно працюють у ясну і тиху погоду, при якій радари випробують ускладнення, і навпаки, при складних і небезпечних метеорологічних ситуаціях: при сильній турбулентності, вітрі та при випаданні опадів, найкращі параметри мають радари, а лідари практично не працездатні.

На рис. 5.2 представлений зовнішній вигляд лідарів.



Рисунок 5.2 Ліворуч - вітровий цілком волоконний профайлер Windcube- фірми LEOSPHERE і праворуч Qineti/NaturalPowerZephIR

5.6 Територіальна система екологічного моніторингу

Лідарні станції для моніторингу стратосферного аерозолю в нашій країні були створені ще в 1988 році, але до останнього часу координованих дій по прогнозуванню глобальних кліматичних і екологічних процесів з міжнародними мережами не проводилося. У 2004 році наукові установи Білорусії, Росії і Киргизстана при підтримці міжнародного співтовариства створили мережу для лідарного контролю в країнах СНД. До неї ввійшли станції в Мінську, Москві, Томську, Владивостоці, Сургутії, Киргизії і Байкалу. Більш того, необхідно відзначити, що Сургутська лідарна станція є найважливішою ланкою лідарної мережі СНД. Найближчим часом лідарна мережа СНД увійде у світову мережу.

Така система екологічного моніторингу дозволить забезпечити автоматизований збір даних моніторингу стратосферного аерозолю й озону з відомчих форматів різних лідарних станцій розташованих на території регіону в одну базу даних, обробку й аналіз даних моніторингу, візуалізацію даних і результатів обробки у вигляді побудови різних тематичних карт і діаграм.

Очевидно, що структура сучасної системи повинна бути багаторівнева. Верхнім рівнем буде територіальний інформаційно-аналітичний центр, що виконує наступні функції:

- отримання інформації від інформаційно-аналітичних центрів середнього рівня і від частини автоматизованих (стаціонарних і мобільних) систем контролю навколишнього середовища;
- постійний аналіз екологічної інформації, виявлення тенденцій і екологічно небезпечних районів і зон;
- моделювання і прогнозування різних надзвичайних ситуацій і оцінювання їхніх наслідків;
- утворення рекомендацій для прийняття управлінських рішень по надзвичайних ситуаціях;

- формування банку даних про екологічний стан окремих міст і районів, а також регіону в цілому;
- моделювання і довгострокове прогнозування екологічного стану навколишнього середовища.

Інформація з посад контролю лідарних станцій, локальних інформаційно-аналітичних центрів, пересувних посад по провідним і безпровідних лініях зв'язку в режимі реального часу буде надходити в систему, дозволяючи оперативно відслідковувати зміни, що відбуваються, і утворюються рішення, спрямовані на нормалізацію екологічної обстановки.

На середньому рівні системи будуть розташовані інформаційно-аналітичні центри, що збирають інформацію про екологічний стан території конкретного промислового, сільського або району міста.

Ця інформація буде надходити в систему безпосередньо від стаціонарних посад контролю з лідарними станціями і пересувними лабораторіями, що контролюють стан атмосфери та водного середовища в районі спостереження.

Інформаційно-аналітичні центри середнього рівня вирішують задачі виявлення аварійних екологічних ситуацій і прогнозування їхнього розвитку в конкретному районі з урахуванням специфіки місцевого виробництва, а також географічних, кліматичних і метеорологічних особливостей.

Нижній рівень системи утворює автоматизовані вузли контролю навколишнього середовища, що включають автоматизовані стаціонарні посадки і пересувні контрольні-вимірювальні лабораторії, виконані на базі автомобіля або вертольота.

Картографічна основа системи буде базуватися на електронній карті автономного регіону. На основі цієї карти повинен бути атлас електронних карт, що включає в себе такі компоненти, як базова карта округу, атлас промислових підприємств, атлас промислових викидів у повітряне середовище і викидів в поверхневі води, атлас ґрунтів, спрощена схема з основними об'єктами системи моніторингу, де буде зазначене місце

розташування лідарних і стаціонарних станцій екологічного моніторингу.

На першому етапі створення повинна бути розроблена програмна оболонка, універсальний програмний інтерфейс майбутньої системи, проєктована і заповнена електронна база даних, призначена для структурованого збереження інформації, що вводиться, по екологічному моніторингу. На функціональному рівні повинні бути програмні модулі, за допомогою яких будуть зважуватися задачі по організації функціонування системи і численних задач по обробці екологічних даних. Розробимо і програмно реалізується математична модель екологічного стану навколишнього середовища за допомогою статистичних методів аналізу даних.

Така система являє собою відкриту нарощувану геоінформаційну систему, установлену на комп'ютерних засобах інформаційно-аналітичних центрів різного рівня та доступну для багатьох користувачів.

6 ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ І ФУНКЦІОНУВАННЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ПОВІТРЯНОГО БАСЕЙНУ НАД ПРОСТОРОВО-ЗОСЕРЕДЖЕНИМИ ПРОМИСЛОВО- ГОСПОДАРСЬКИМИ ОБ'ЄКТАМИ

6.1 Постановка задачі

Проблема моніторингу техногенного забруднення навколишнього середовища а особливо атмосферного повітря є в даний час надзвичайно актуальною як в екологічному аспекті, так і в зв'язку із сучасними проблемами суспільної безпеки. Так наприклад, у великих містах України, що мають могутні промислові підприємства (Одеський припортовий завод, Одеський нафтопереробний завод і т.і.) виникають екологічно небезпечні проблеми для різних видів живих істот і, у першу чергу, самої людини. Крім того, що постійно росте в містах України чисельність автотранспорту приводить до додаткового забруднення повітряних басейнів міст. При цьому, по зрозумілих причинах, контроль за станом атмосфери переважно вести дистанційними методами. Технології лазерного дистанційного зондування атмосферного середовища дають можливість усунути недоліки й обмеження, властивим традиційним методам локального моніторингу: низька інформативність, труднощі забезпечення широкої зони покриття, великий час розгортання мереж локальних датчиків і т.і.

Особливо ефективно представляється застосування мобільних багатофункціональних комплексів дистанційного лазерного зондування – мобільних лідарів. Проблема оперативного екологічного моніторингу повітряного простору над досить великими об'єктами вимагає створення лазерних лідарних комплексів, що здійснюють рівнобіжне спостереження за широким спектром можливих забруднюючих речовин у реальному масштабі часу [27].

Лазерні лідарні комплекси (ЛЛК) повинні бути призначені для оперативного дистанційного контролю біологічної і хімічної обстановки. Задачею комплексів є спостереження за аномальними змінами атмосфери, обумовленими наявністю в ній аерозолів, а також визначення параметрів переміщення хмар. ЛЛК будуються як автоматизована дистанційна система оперативного контролю екологічної обстановки промислових центрів і здатна швидко, в автоматичному режимі, виявляти аварії і забезпечувати інформаційну підтримку дій аварійно-рятувальних служб.

Створення малогабаритного мобільного лідарного комплексу для моніторингу і прогнозування екологічної обстановки над критично важливими (небезпечними) об'єктами у районах ймовірних терористичних атак дозволить:

- визначати концентрації широкого спектра речовин на відстанях до 8 км;
- в режимі реального часу відображати на карті місцевості райони забруднення і кількісні характеристики масштабу зараження;
- визначати напрямок поширення отруйної хмари;
- прогнозувати розвиток ситуації над критичними об'єктами;
- контролювати вміст небезпечних речовин атмосфері та оповіщати сигналом тривоги у випадку перевищення ПДК чи виявлення викидів на контрольованих або об'єктах території.

Сканування сектора відповідальності може здійснюватися в різних тимчасових режимах: безупинному, періодичному і за вимогою оператора (чергового). В даний час, лазерний аналіз дозволяє визначити протягом декількох хвилин факт аномального викиду, вид речовини, інтенсивність і напрямок його поширення.

Серед типових аварійно-хімічних небезпечних речовин (АХНР) можна виділити наступний перелік забруднювачів, зараження якими становить інтерес на більшості територій, що вимагають посиленого контролю:

- хлор - Cl₂,

- аміак - NH_3 ,
- діоксид сірки - SO_2 ,
- діоксид азоту - NO_2
- соляна кислота – HCl ,
- продукти нафтопереробки.

Крім зазначених вище речовин існують загрози аварій на специфічних об'єктах по виробництву, збереженню й утилізації особливо небезпечних хімічних речовин. Усі ці речовини досить ефективно розпізнаються лідарними методами зондування, заснованими на різних фізичних ефектах взаємодії лазерного випромінювання з атмосферою. У той же час, інтерпретація даних, отриманих при лазерному зондуванні аерозолів, сполучена з використанням ряду поляризаційних голографічних методів. Крім того, застосування голографічних методів обробки даних підвищує наочність і інформативність лідарних засобів контролю за станом атмосфери, що дозволяє з більшою точністю виявляти джерела забруднень і більш докладно досліджувати динаміку процесів, що йдуть у приземній атмосфері.

6.2 Лідарний газоаналіз атмосфери

Лідарні методи зондування відносяться до так називаних активних методів контролю забруднення навколишнього середовища, оскільки вони засновані на взаємодії лазерного випромінювання з різними компонентами атмосферного повітря. При принципових труднощах, дозвіл яких буде сприяти впровадження в лідарні технології та лазерному зондуванні в основному використовуються наступні ефекти взаємодії світлової хвилі з середовищем: аерозольне і молекулярне розсіювання, спонтанне комбінаційне розсіювання, а також резонансне поглинання. Як правило, в створених для контролю атмосфери установках використовується який-небудь один з перерахованих вище ефектів, вибір якого залежить від поставленої задачі.

Так, наприклад, метод резонансного поглинання, заснований на поглинанні світлової енергії молекулами при збігу частоти випромінювання лазера з частотою електронного або коливально-оберткового переходу, дозволяє визначати з високою точністю середню концентрацію досліджуваного газу уздовж обраної траси. Однак, незважаючи на те, що існуючі в даний час лазерні газоаналізатори диференціального поглинання (зокрема, “ТРАЛ-3” і “ТРАЛ-3М”) дозволяють визначати деякі гази при мінімальній концентрації порядку декількох молекул на мільйон сторонніх, даний метод не позбавлений недоліків. Насамперед слід зазначити необхідність точного налаштування застосовуваних лазерів на яку-небудь визначену частоту, причому лазери повинні володіти гарною спектральною стабільністю.

По-друге, для обліку впливу на результати вимірювань аерозольного і молекулярного розсіювання і поглинання сторонніми речовинами, виникає необхідність використання іншого лазера, що працює на частоті, що небагато відрізняється від частоти поглинання молекулами досліджуваного газу.

По-третє, висока чутливість цього методу досягається насамперед за рахунок роботи в режимі тимчасового накопичення. Крім того, якщо приймач розташовується поруч з випромінювачем, то на іншому кінці траси зондування повинен знаходитися який-небудь відбивач (дзеркало, кутовий відбивач чи топографічний об'єкт). У випадку лідарного методу як відбивач використовується атмосферний аерозоль, що розглядається як розподілений в атмосфері рефлектор. Це дозволяє одержувати профілі концентрацій забруднюючих газів із просторовим дозволом від 200 до 500 м, однак чутливість методу при цьому помітно знижується [28].

Лідарний метод диференціального поглинання ефективний для вимірювання концентрацій компонентів, що мають вузькі піки поглинання в ультрафіолетовому (УФ) і видимому діапазонах, на якому не накладаються елементи спектрів інших компонентів. В основному він застосовується для контролю за станом озонного шару на висотах до 30 км із мінімальним

просторовим дозволом до 500 м. Що стосується дослідження нижніх шарів атмосфери, то лідар диференціального поглинання, дозволяє проводити вимірювання концентрацій газів: Оз, NO, NO₂ і NO₃ за час близько 10 хв на трасі довжиною до 1 км із дозволом по дальності 50 м. Також не дуже високий просторовий і тимчасовий дозвіл і при цьому — деякий програш у чутливості, робить лідарний метод диференціального поглинання менш популярне, ніж інтегральний метод диференціального поглинання (визначення середніх концентрацій вздовж траси). Останній застосовується на приземних трасах у тих випадках, коли необхідно знайти дуже малі концентрації досліджуваного газу, але при цьому немає необхідності визначати локалізацію джерел забруднення [29].

6.3 Лідарний контроль стану атмосфери методом диференціального поглинання і диференціального розсіювання

Використання високочутливих і розроблених лідарних методів зондування атмосфери на наявність небезпечних речовин, таких як диференціальне поглинання (DIAL) і диференціальне розсіювання (DISC) дозволяє вимірювати величину концентрацій на рівнях ПДК робочих і житлових зон. Для проведення комплексного аналізу й прогнозу екологічної ситуації необхідно, щоб всі отримані дані були погоджені в просторі, як по розмірах зон покриття, так і по просторовому дозволу, синхронізовані в часі та малий єдиний формат [30].

Позаштатна екологічна ситуація або терористичний акт супроводжується характерним аерозольним викидом. Аерозольний лідар, побудований на основі безгрубного для очей Er - лазера або Nd:YAG - лазера, який визначає наявність атмосферного аерозолю та вимірює його концентрацію, будує просторовий розподіл у реальному часі й аналізує його фізичну природу. Для цього аерозольний лідар і поляризаційний лідар об'єднані в єдиний функціональний вузол.

Лідар диференціального поглинання видимого й ближнього ІК-діапазону на основі двоканалного імпульсного лазера, що перебудовує, на сапфірі з титаном дистанційно вимірює розподіл концентрації окислів азоту, сірки й широкого набору неорганічних забруднювачів повітряного середовища на рівні ПДК.

Багатоспектральний лідар диференціального поглинання далекого ІК-діапазону на основі перебудованого імпульсного CO₂-ТЕА лазера вимірює поле концентрацій широкого класу органічних речовин, а також озону. Об'єднання аерозольного й флуоресцентного лідача, а також лідарів диференціального поглинання видимого, УФ, ближнього й дальнього ІК-діапазонів на єдиній платформі збільшує габарити системи до контейнера, здатного розміститися на носії з вантажопідйомністю кілька тонн. Доцільно розділити покладені на комплекс завдання в такий спосіб:

1. Детектування аерозольних викидів і спостереження за динамікою (аерозольних лідарів);
2. Детектування аерозольних викидів та ідентифікація неорганічних АХНР (аерозольний лідар, короткохвильовий ДІАЛ);
3. Детектування аерозольних викидів й ідентифікація органічних АХНР та НР (аерозольний лідар, довгохвильовий ДІАЛ або пасивний ІК-спектрометр).

Нижче наведений склад і технічні характеристики пропонованих варіантів ЛЛК [31].

Детектування аерозольних складових викиду можна визначити за допомогою одного лазера. Лазер для аерозольного каналу може бути побудований на базі безгрубного для очей волоконного випромінювача з довжиною хвилі 1,55 мкм або лазера на неодимовому склі з довжиною хвилі 1,064 мкм. Висока частота проходження імпульсів дозволяє робити сканування з високою кутовою швидкістю без втрати кутового дозволу, а короткі лазерні імпульси забезпечують високий просторовий дозвіл. Лазер разом з устаткуванням обробки, зберігання й передачі даних, а також допоміжним устаткуванням і

засобами електроживлення й життєзабезпечення утворюють комплекс. Структурна схема диференціального розсіювання рис. 6.1.

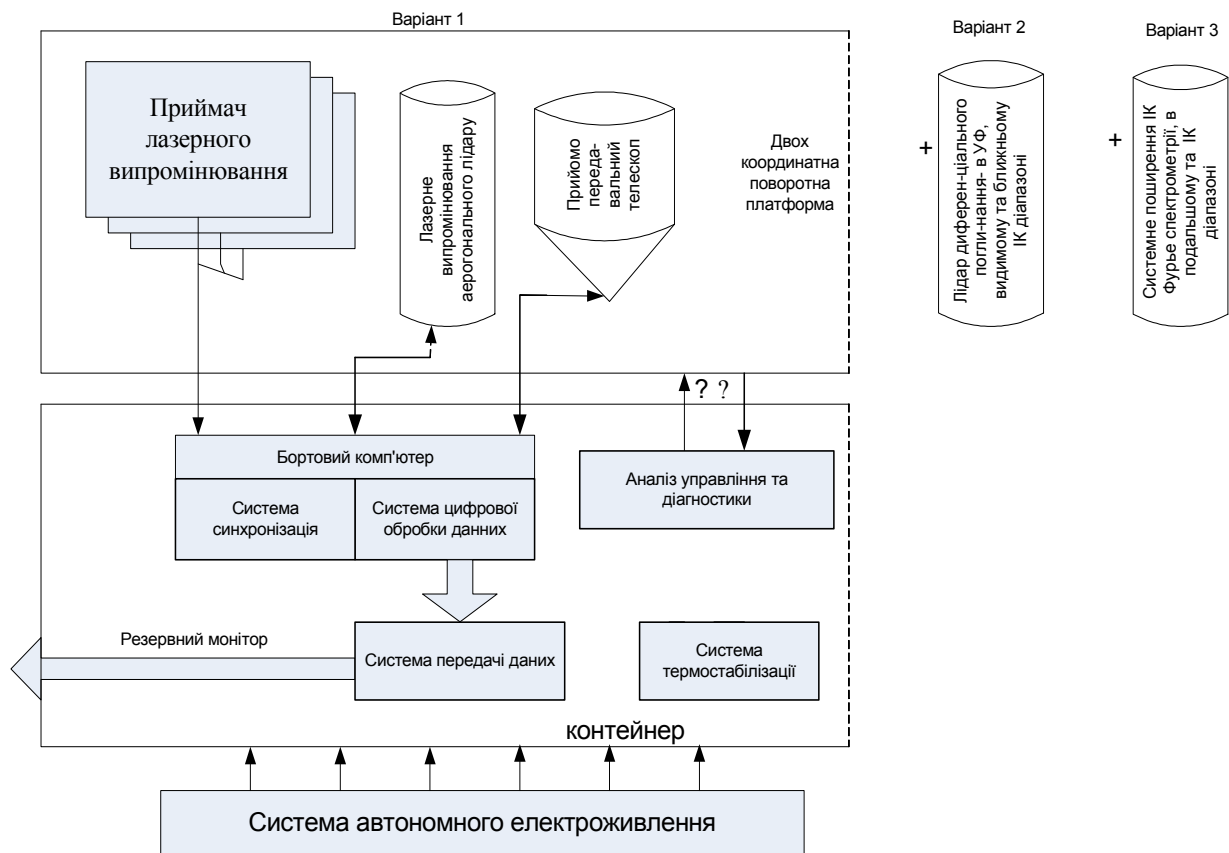


Рисунок 6.1 - Структурна схема лідарного комплексу контролю за станом атмосфери методом диференціального поглинання і диференціального розсіювання

Структурна схема містить у собі:

- поворотну платформу (одне або двох дзеркальний сканер);
- лазерний випромінювач аерозольного лідара;
- приймально-передавальний телескоп;
- приймачі випромінювання;
- бортовий комп'ютер;
- систему передачі даних;
- систему термостабілізації відсіків комплексу;
- апаратури керування й діагностики;

- система автономного електроживлення.

Основні ТТХ комплексу наведені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 - Основні ТТХ комплексу

№	Параметри	Значення
1	Максимальна дальність вимірювань у режимі сканування	не менш 5 км
2	Мінімальна дальність вимірювань у режимі сканування	не більше 0,5 м
3	Огляд	-7° ... +15°
4	Вертикальний напрямок (кут місця)*	± 90°
5	Горизонтальний напрямок (азимут)*	± 180°
6	Розмір детектуючих аерозолів	0,5 – 11 мкм
7	Довжина хвилі в режимі аерозольного сканування	1,55 (1,064) мкм
8	Година сканування обраного сектора **	не більше 130 с
9	Просторовий дозвіл у режимі сканування	15 м
10	Енергія імпульсу	1 – 2 мДж (1,55 мкм) 100 мДж (1,064 мкм)
11	Тривалість імпульсу	~10 нс
12	Частота проходження імпульсів	1 – 2 кГц
13	Діаметр приймально-передавального телескопа	300 мм

* - з автоматичним скануванням

** залежно від кроку сканера й обраного сектора огляду

Детектування аерозольних складових викиду з можливістю ідентифікації неорганічних АХНР має на увазі використання поряд з аерозольним лідаром лідара диференціального поглинання в УФ, у видимому й ближньому ІК-діапазоні. Лінії поглинання основних АХНР лежать в діапазоні перебудови лазера на титан-сапфірі, так для SO₂ це – 300,05 нм (On) і 299,51 нм (Off), для NO₂ – 448,25 нм (on) 446,83 нм (off). Основні ТТХ комплексу іншого варіанта наведені в таблиці 6.2.

Таблиця 6. 2 - Основні ТТХ комплекси

№	Параметри	Значення
1	Максимальна дальність вимірювань у режимі сканування	не менш 8 км
2	Максимальна дальність вимірювань у режимі вимірювань	не менш 3 км
3	Мінімальна дальність вимірювань у режимі сканування	не більше 0,5 м
4	Огляд	-7° ... +15°
5	Вертикальний напрямок (кут місця)*	± 90°
6	Горизонтальний напрямок (азимут)*	± 180°
7	Розмір детектуючих аерозолів	0,5 – 11 мкм
8	Довжина хвилі в режимі аерозольного сканування	1,55 (1,064) мкм
9	Година сканування обраного сектора **	не більше 130 с
10	Просторовий дозвіл у режимі сканування	15 м
11	Енергія імпульсу	1 – 2 мДж (1,55 мкм) 100 мдж (1,064 мкм)
12	Тривалість імпульсу	~10 нс
13	Частота проходження імпульсів	1 – 2 кГц
14	Ti:Sph	лазер (2 шт.)
15	Діапазон довжин хвиль	350 – 480 нм 230 - 310 нм
16	Частота проходження імпульсів	10 Гц
17	Енергія імпульсу	L=450 нм, L=300 нм 25 мДж, 6 мдж

* - з автоматичним скануванням

** - залежно від кроку сканера й обраного сектора огляду

Склад устаткування для комплексу 2 аналогічний складу першого, за винятком, на поворотній платформі встановлюється додатково лазерний випромінювач Діал-лідара. Детектування аерозольних складових викиду з можливістю ідентифікації органічних АХНР має на увазі використання поряд з аерозольним лідаром лідара диференціального поглинання в дальньому ІК-діапазоні. Лінії поглинання основних АХНР лежать в діапазоні перебудови лазера на С₂. На сьогоднішній день існують ТЕА С₂ - лазери з високими

надійними характеристиками, здатні ефективно виконувати поставлені завдання. Технічні характеристики ЛЛК третього наведені в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 - Технічні характеристики

№	Параметри	Значення
1	Максимальна дальність вимірювань у режимі сканування	не менш 5 км
2	Мінімальна дальність вимірювань у режимі сканування	не більше 0,5 м
3	Огляд	-7° ... +15°
4	Вертикальний напрямок (кут місця)*	± 90°
5	Горизонтальний напрямок (азимут)*	± 180°
6	Канал C ₂ FTDia для особливо небезпечних хімічних сполук	
7	Розмір детектувальних аерозолів (для аерозольного каналу)	0,5 – 11 мкм
8	Довжина хвилі в режимі аерозольного сканування	1,55 (1,064 мкм)
9	Діапазон довжин хвиль у режимі аналізу (не менш 60 ліній CO ₂ VR-спектри)	9 – 11 мкм
10	Година сканування обраного сектора **	не більше 130 с
11	Просторовий дозвіл у режимі аналізу	150 м
12	Просторовий дозвіл у режимі сканування	50 м
13	Параметри передавальної системи	
14	ТЕА CO ₂	лазер (2 шт.)
15	Енергія імпульсу (10P20)	0.3 Дж
16	Діапазон довжин хвиль (не менш 60 ліній CO ₂ VR-спектри)	9 – 11 мкм
17	Тривалість імпульсу	1 мкс
18	Частота проходження імпульсів	200 – 300 Гц
19	Аерозольний лідар	
20	Енергія імпульсу	1 – 2 мДж
21	Довжина хвилі	1,55 мкм
22	Тривалість імпульсу	300 нс
23	Частота проходження імпульсів	1 – 2 кГц
24	Діаметр приймально-передавального телескопа	300 мм

* - з автоматичним скануванням

** - залежно від кроку сканера й обраного сектора огляду

Існують також системи пасивної ІК-Фур'є спектроскопії, які в сполученні з аерозольним лазерним каналом дозволяють визначити дистанцію до об'єкта й простежити її еволюцію.

Склад устаткування **аналогічний першому**, за винятком, на поворотній платформі додатково встановлюється лазерний випромінювач Діал-лідара й пасивний ІК- спектроскоп.

Програмне забезпечення всіх зазначених типів лідарів виконує наступні функції:

- керування лазерами;
- обробка прийнятих сигналів з атмосфери;
- виконання процедури виявлення та ідентифікації аерозольних і газових забруднень в результаті математичної обробки прийнятих сигналів;
- архівування та ведення бази даних шкідливих речовин;
- візуалізація та накладення на карту місцевості результатів виявлення аерозольних і газо-аерозольних утворень;
- сигналізація у випадку виявлення речовини зі списку детектуючих речовин (знаходження в базі даних при порівнянні спектрів).

Застосування того або іншого варіанта побудови ЛЛК визначається апріорно очікуваним для даного району переліку хімічних і забруднюючих речовин.

6.4 Лідарний контроль стану атмосфери методом спонтанного комбінаційного розсіювання

На відміну від методу диференціального поглинання, метод спонтанного комбінаційного розсіювання (СКР) має трохи меншу чутливість і дальність (до 2 км), однак він дозволяє одержувати практично миттєвий розподіл забруднювачів вздовж траси з високим просторовим дозволом (порядку одного метра) [32]. До переваг методу СКР варто віднести і той факт, що в цьому випадку відпадає необхідність зондування на двох частотах

і не потрібно лазера з визначеною частотою чи випромінювання, що перебудовується. Визначення хімічного складу атмосфери методом СКР засновано на аналізі спектра розсіяного назад випромінювання, у якому крім ліній, що характеризують падаюче світло, спостерігаються додаткові лінії — супутники. Розходження в частотах збудженої первинної лінії і ліній кожного із супутників є характеристикою речовини, що розсіює, і дорівнює частотам власних коливань його молекул. Тому, на відміну від методу диференціального поглинання, список обумовлених методом СКР газів конструктивно нічим не обмежений.

Оскільки поперечний переріз комбінаційного розсіювання пропорційні четвертого ступеня частоти збудливого випромінювання, тоді для збільшення дальності зондування в СКР-лідачах — переважніше використання лазерів, що генерують випромінювання в ультрафіолетовій області спектра. Крім того, використання довжин хвиль менш 270,0 нм дозволяє ігнорувати фонове випромінювання, зв'язане зі світінням неба, і проводити цілодобові вимірювання газових забруднень.

Проведення вимірювань на частоті випромінювання лазера дає можливість одержати за допомогою СКР-лідача інформацію про аерозольне і молекулярне розсіювання в досліджуваній області атмосфери. Рельєвське розсіювання застосовується для дослідження турбулентності атмосфери і визначення видів молекул у турбулентному потоці. Контур лінії рельєвського розсіювання містить також інформацію про температуру (внаслідок ефекту Доплера). Аерозольне розсіювання може бути використане для визначення розмірів, концентрацій і швидкостей часток.

Таким чином, СКР-лідар дозволяє одержати більше різноманітної інформації про стан атмосферного повітря, ніж пристрою, засновані на методі диференціального поглинання. Важливою перевагою методу СКР є і те, що абсолютну концентрацію газових компонентів можна визначити шляхом порівняння інтенсивності супутників досліджуваних забруднювачів з інтенсивністю супутника, обумовленого одним з основних атмосферних газів

—азотом або киснем, концентрація яких у приземній області атмосфери є відомою. При цьому з рівняння лазерної локації для СКР виключаються складні атмосферні й інструментальні параметри, і концентрація цікавлячого нас газу ($N(2)$) може бути обчислена по формулі (6.1):

$$N_{СКР}(z) = M \frac{P_i(z, \lambda)}{P_{N_2}(z, \lambda_{N_2})} - \frac{\sigma_{N_2}^{СКР}}{\sigma_i^{СКР}} N_{N_2}(z), \quad (6.1)$$

де M - апаратна константа, обумовлена розходженнями в коефіцієнтах пропускання оптики і чутливості фотоприймача для довжин хвиль супутників;

λ_i та λ_{N_2} ;

$P_i(z, \lambda), P_{N_2}(z, \lambda_{N_2})$ - число зареєстрованих фотоелектронів на молекулах досліджуваного газу і молекулах атмосферного азоту відповідно;

$\sigma_i^{СКР}, \sigma_{N_2}^{СКР}$ - зворотній поперечний переріз СКР досліджуваного газу й азоту;

$N_{N_2}(z)$ - концентрація азоту.

Перераховані переваги методу спонтанного комбінаційного розсіювання роблять його найбільш прийнятним для створення комплексного газоаерозольного лідара, призначеного для екологічного моніторингу приземного шару атмосфери [33].

6.5 Лідарний контроль за станом атмосферного аерозоля

На відміну від СКР, при аерозольному розсіюванні не існує способу виключення “зайвих” атмосферних параметрів з рівняння лазерного зондування, що у випадку моностатичного лідара та одноразового розсіювання фотона на аерозольній частці має вигляд:

$$P(z) = \eta P_0 \frac{c\tau_u}{2} \frac{S_0}{z^2} G(z) \sigma_a(z) T^2(z) \quad (6.2)$$

де P - потужність, прийнята від всього освітленого обсягу;

z - відстань, з якої випромінювання приймається в момент часу t ;

η - сумарний коефіцієнт пропускання прийомної оптичної системи;

P_0 - пікове значення тимчасового розподілу потужності випромінювання;

λ - швидкість світла;

τ_i - тривалість зондувального імпульсу (звичайно $\tau_i \approx 10 - 20$ нс);

S_0 - площа прийомної апертури;

$G(z)$ - геометрична функція лідара, цілком обумовлена параметрами прийомо-передавальною оптичною системою;

$\sigma_a(z)$ - коефіцієнт зворотного розсіювання середовища;

$T(z) = \exp\left[-\int_0^z \alpha(z') dz'\right]$ - прозорість ділянки середовища $[0, z]$ на

довжині хвилі лазера;

a - коефіцієнт послаблення.

Рівняння (6.2) містить дві невідомі функції $\sigma_a(z)$ і $T(z)$. Тому рішення даного рівняння стає можливим лише при введенні деякої апріорної інформації про досліджуваний аерозоль, а також при розширенні виміральної інформації.

Відомо, що коефіцієнт зворотного розсіювання залежить не тільки від показника переломлення аерозольної речовини m і функції розподілу аерозольних часток по розмірах $f(a)$, але і від довжини хвилі зондувального випромінювання λ :

$$\sigma_a(\lambda) = N_a \int_0^{\infty} \pi a^2 K_p(a, m, \lambda) f(a) da,$$

де N_a - число часток в одиниці об'єму;

$Kp(a, m, \lambda)$ - фактор ефективності розсіювання випромінювання на частці радіуса a .

Застосовуючи зондування на декількох частотах і визначаючи характер залежності $\sigma_a(z)$ від λ , можна в принципі визначити і параметри мікроструктури аерозолі m та $f(a)$ за умови, що аерозоль складається з ізотропних діелектричних сфер. Припущення про сферичність та ізотропність є прийнятним для “вологих” часток серпанка, тумана, хмарних і малих дощових крапель, однак не виконується для пилових структур, ядер конденсації й індустріального аерозолі. Для несферичних часток інтерпретація оптичних вимірювань в атмосфері вимагає введення додаткових допущень, заснованих на інформації про параметри форми часток, що розсіюють.

Найбільш повну інформацію про те, наскільки форма аерозольних часток відрізняється від сферичної, можна одержати з поляризаційних вимірювань, оскільки поляризаційні властивості розсіяних електромагнітних хвиль більш істотно залежать від форми тіл розсіювання, чим їхні енергетичні характеристики. На основі аналізу поляризаційних характеристик відлуння сигналу можливе якісне розпізнавання аерозолів різного типу без безпосереднього рішення зворотних задач атмосферної оптики. Інформативними характеристиками, що дозволяють розрізнити аерозолі зі сферичними і несферичними частками, є:

- початкове значення деполаризації на границі хмари;
- середній градієнт деполаризації на ділянці від границі хмари до максимальної глибини вимірювання відлуння сигналу;
- зрушення в часі між максимумами поляризованого і деполаризованого компонентів відлуння сигналу.

Проведені експерименти показали, що спільний аналіз перерахованих вище поляризаційних параметрів відлуння сигналу дозволяє відрізнити індустріальний аерозоль від природного (фонового), у той час як енергетичні

параметри розсіяного назад випромінювання в цих аерозолях не мають розходжень при приблизно рівних концентраціях.

Слід зазначити, що навіть таке, суцільно якісне, виявлення аерозолі, що містить несферичні частки, є важливим і для рішення питання про застосованість до досліджуваного аерозолі теорії багато частотного зондування. На жаль, багато частотне зондування для несферичних часток індустріального аерозолі виявляється малоефективним. Визначеного роду допущення, що приходиться застосовувати в цьому випадку, дають дуже істотні погрішності при спробах визначити в такий спосіб рахункову, а потім і масову концентрацію досліджуваного аерозолі. У цій ситуації поляризаційна лідарна голографія є єдиним методом, що дозволяє одержувати як розподіл часток по розмірах (незалежно від їхньої форми), так і їхню рахункову концентрацію [34].

6.6 Пристрій і принцип дії комплексного газоаерозольного поляризаційного голографічного лідара

Запропонований лідарний комплекс, принципова блок-схема якого представлена на рис. 6.2, забезпечує комплексне дослідження як газових, так і аерозольних забруднювачів нижніх шарів атмосфери шляхом сполучення методу спонтанного комбінаційного розсіювання з поляризаційним голографічним зондуванням. Оскільки в СКР-методі зондування переважніше вести в УФ-діапазоні, а реєстрація та обробка голограми — у видимій області спектра, випромінювання імпульсного невидимого лазера 1 з довжиною хвилі $\lambda_0 = 1060$ нм подається на подвійну частоту 2.

Після проходження подвійної частоти 2 випромінювання з довжиною хвилі $\lambda_1 = 530$ нм поділяється напівпрозорим дзеркалом 3 на два пучки, один із яких знову подається на подвійну частоту 4. Імпульси, що створюються після подвоєння частоти 4 довжину хвилі $\lambda_2 = 265$ нм, попадають через відбитий інтерференційний фільтр 5 на коліматор 7 і використовуються для

газоаналізу атмосфери. Випромінювання з довжиною хвилі $\lambda_1 = 530$ нм, відбите від напівпрозорого дзеркала 3, відбивається від поворотних дзеркал 6 і 6', направляється в коліматор 7 за допомогою відбитого інтерференційного фільтра 5 і використовується для поляризаційного голографічного зондування аерозолію.

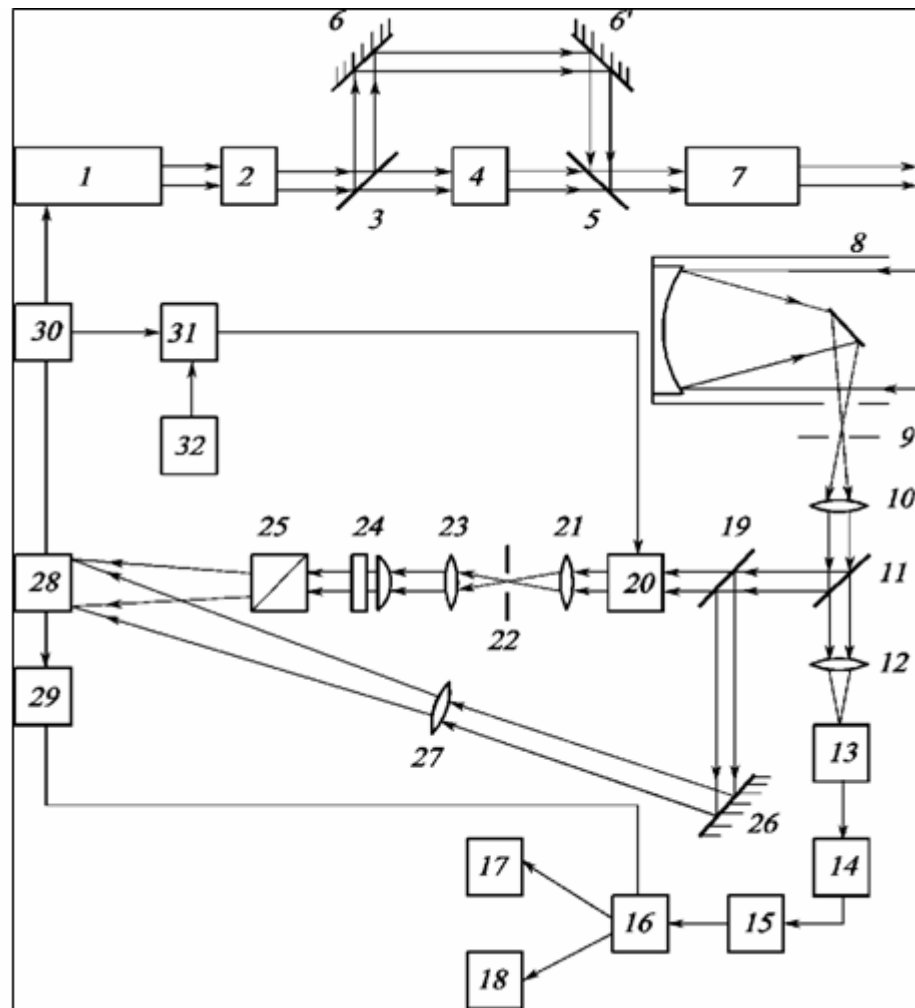


Рисунок 6.2 Принципова блок-схема комплексного газоаерозольного поляризаційного голографічного лідара

Світло яке розсіяне назад досліджуваним обсягом атмосферного повітря, попадає в прийомний телескоп 8, проходить через діафрагму 9, що погодить об'єктив 10 і поділяється на два пучки відбитим інтерференційним фільтром 11. Частина світла з довжиною хвилі, $\lambda_1 = 530$ нм відбита

інтерференційним фільтром 11, використовується для формування поляризаційних голограм, а минулий через поляризаційний фільтр 11 світло всіх інших довжин хвиль за допомогою об'єктива, що збирає, 12 подається на подвійний монохроматор 13. Подвійна монохроматизація дозволяє позбутися від паразитного світла, а зображення досліджуваної ділянки спектра попадає на матрицю світловодів 14, що дає можливість “набудуватися” на виділення ліній — супутників різних забруднюючих газів. З матриці світловодів 14 аналізована частина спектра попадає на ПЗС-матрицю 15 і далі надходить в ЕОМ 16 для реєстрації й обробки. Результати обробки отриманого спектра відображаються на дисплеї 17 і можуть бути роздруковані на принтері 18.

Використання світловодів і охолоджуваної ПЗС-матриці дозволяє робити одночасно вимірювання інтенсивності відразу багатьох спектральних компонентів, що в сполученні з технікою стропування дає можливість одержувати миттєві значення концентрації різних газів вздовж траси зондування. Змінюючи напрямок зондування, можна визначити тривимірні профілі розподілу цікавлячих нас газів у досліджуваному обсязі атмосфери.

Переходячи до опису аерозольного каналу в розглянутому лідарному комплексі, помітимо, що голографічні методи в силу ряду об'єктивних причин ще не знайшли досить широкого поширення в лідарних дослідженнях. Справа в тім, що традиційними методами можна реєструвати голограми об'єктів, що знаходяться на відстанях не більш 5-10 м, що обумовлено обмеженням довжиною когерентності імпульсного лазерного випромінювання. Крім того, істотною перешкодою при формуванні голограм в умовах реальної атмосфери є її турбулентність. Тому для цілей голографічного лідарного зондування був розроблений ряд методів, що дозволяють перебороти зазначені труднощі.

Метод, що дозволяє одержувати голограми на відстанях, що перевищують довжину когерентності використовуваного лазера, є застосування як опорний пучок частини розсіяного назад випромінювання.

Один з варіантів його технічної реалізації де для зондування використовується кругополяризоване світло, а прийняте випромінювання розкладається на два пучки за допомогою двояко заломлюючої поляризаційної призми. Тому що промені, що вийшли з поляризаційної призми, поляризовані в двох взаємно перпендикулярних площинах, один з них пропускають через напівхвильовий пристрій, що повертає площину поляризації. Після цього один із променів використовується як об'єктний сигнал, а інший - після просторової фільтрації для формування опорних коливань.

В лідарі, структурна схема виділене за допомогою відбитого інтерференційного фільтра випромінювання з довжиною хвилі $\lambda_1 = 530$ нм відразу ж направляється в два канали — об'єктний і опорний — за допомогою напівпрозорого дзеркала. В опорному каналі випромінювання підсилюється оптичним квантовим підсилювачем (ОКУ) і фокусується об'єктивом у площину діафрагми, за допомогою якої утворюється необхідна просторова фільтрація опорних коливань [35].

Запуск оптичного квантового підсилювача здійснюється блоком живлення за допомогою імпульсів, що надходять з виходу синхронізатора, що затримують щодо зондувальних імпульсів на величину затримки сигналів, розсіяних на аерозолі. В блоці керування утворюється керуюча напруга, за допомогою якого регулюють коефіцієнт підсилення ОКУ, підтримуючи необхідне співвідношення потужностей опорного й об'єктного сигналів у площині формування голограми.

Як було зазначено вище, поляризація розсіяного назад випромінювання є важливим інформативним параметром, знання якого забезпечує правильність класифікації аерозольного компонента атмосферних забруднень. Тому пропонована схема голографічної лідарної установки містить елементи, що дозволяють отримувати поляризаційні голограми зондуючого обсягу повітря. Для цієї мети опорний пучок за допомогою об'єктива подається на схрещені циліндричні лінзи, що формують пучок із

прямокутним перетином, після чого направляється на поляризаційну призму. Поляризаційна призма являє собою перегороджену по діагоналі скляну кювету, одна частина якої заповнена ізотропною рідиною, а друга — гліцерином. Поляризаційна призма створює на виході опорний пучок, що містить набір лінійно поляризованих компонентів з безупинно мінливим у площині формуванням голограм азимутом.

Об'єктний сигнал направляється напівпрозорим дзеркалом на відбивач, що проходить через об'єктив і надходить на вхід блоку формування голограм, де інтерферує з опорними коливаннями. Запуск блоку формування голограм здійснюється від синхронізатора. Оскільки поляризація опорних коливань різна, то інтерференція буде відбуватися тільки в тих областях площини формування голограм, де поляризації опорного й об'єктного сигналів збігаються.

Тому що при відображенні від рідкокапельного аерозоля стан поляризації не змінюється, а при відображенні від твердих часток відбувається деполяризація, тоді зображення якісно різних аерозольних часток формуються на просторово рознесених ділянках голограми. Це дає можливість за допомогою блоку відновлення зображень ЕОМ, тоді звістка автоматичний роздільний підрахунок аерозольних часток, що володіють різними фізичними властивостями. При цьому техніка стробування дозволяє формувати голограми часток, розташованих по-різному вилучених зрізах простору на трасі зондування.

Слід особливо зазначити, що лідарна голографія є єдиним методом, що не вимагає введення яких-небудь апріорних зведень про досліджуваний аерозоль, оскільки тут визначення рівня концентрації утворюється безпосередньо за аналізом зображень часток в атмосферному повітрі. Крім того, одержані за допомогою описаної лідарної установки поляризаційні голограми дозволяють визначати параметри Стокса окремих аерозольних часток, що, у свою чергу, дає можливість судити не тільки про їхню форму, але і про складові їхніх речовинах.

В даний час у Харківському національному університеті створені кілька модифікацій голографічних лідарів, що дозволяють формувати голограми аерозолів по сигналах, відбитим від вилучених до декількох кілометрів аерозольних часток, і відновлювати за голограмами їхнє зображення. В результаті вимірювань визначаються усереднені за обсягом повітря, що дозволяється, масова концентрація аерозолів з точністю 15-20 % і концентрації газових компонентів з чутливістю до десятків обумовлених молекул на мільйон сторонніх. Гази, що виявляються: N_2 , He_2 , C , C_2 , N_0 , N_{20} , H_2He , S_0_2 , CH_4 , H_2S , NH_3 , Cl_2 , C_2H_2 , H_2 і інші. Результати вимірювань оперативно відображаються на екрані кольорового монітора і при необхідності документуються.

Застосовність голографічного поляризаційного лідара для виявлення і вимірювання характеристик масових відбивачів була перевірена в ході проведених натурних досліджень. Розходження у відбивній здатності викидів підприємств у вигляді часток у твердій і рідкій фазах були проаналізовані за допомогою формованих поляризаційних голограм. На виході лідарного комплексу роздільно спостерігалися тверді частки і крапельки рідини. Аналіз зображень, відновлених за голограмами, дозволив визначати склад і щільність часток у досліджуваному обсязі.

Апаратура комплексного газоаерозольного поляризаційного голографічного лідара, як і раніше розглянута, може бути розміщена в закритому кузові вантажного автомобіля і мати автономне джерело електроживлення, що забезпечить можливість переміщення комплексу і проведення вимірювань у будь-якій точці в межах досить великої території [36].

ВИСНОВКИ

Основні результати проміжного звіту зводяться до наступного.

Запропонована методика перетворення дискретних сигналів з використанням фільтрів Калмана.

Розроблений векторний екстраполятор Калмана.

Запропоновано для цифрової обробки гідрометеорологічної інформації застосовувати вейвлет-аналіз.

Проаналізовані види рельєфу місцевості.

Розглянута методика створення цифрового рельєфу місцевості з використанням дистанційного зондування Землі.

Розглянута методика створення цифрового рельєфу місцевості на основі топографічних карт.

Проведена оцінка можливості використання топографічних карт для створення цифрового рельєфу місцевості.

Отримана функціональна схема одержання картографічної інформації.

Реалізований фільтр Калмана для відновлення ізогіпсів при побудові карт цифрового рельєфу.

Запропонована концепція автоматизації моніторингу навколишнього середовища. Вона включає в себе: спостереження за станом середовища; оцінка фактичного стану; прогноз стану.

Показано що найбільш ефективно це можливо здійснити за допомогою комплексної системи, яка складається з акустичних, радіоакустичних, оптичних пристроїв.

Розроблені в даний час лідарні методи контролю забруднення атмосфери дозволяють з високою точністю і просторовим дозволом отримувати оперативну інформацію про газовий і аерозольний склад атмосферного повітря на приземних трасах зондування. Використання методів диференціального поглинання, спонтанного комбінаційного

розсіювання і поляризаційної лазерної голографії дає можливість будувати мобільні лідарні комплекси, що піднімають на новий рівень рішення проблеми моніторингу атмосфери у великих містах, промислових центрах. З'являється можливість визначати не тільки хімічний склад забруднюючих домішок, але і їхній вид і концентрацію. Мобільність лідарних комплексів значно розширює можливості по охопленню моніторингом повітряного басейну над контролюючих територіях.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. *Лимонов А.С., Пустовит Т.М., Лимонов А.А.* Экстраполяция дискретных сигналов с использованием фильтров Калмана // Ж. Український гідрометеорологічний журнал. 2011.-Р.1, №9. - С.26-37.
2. *Лимонов А.С., Перельгин Б.В., Лимонов А.А.* Вейвлет анализ в цифровой обработке сигналов // Ж. Український гідрометеорологічний журнал. 2011.-Р.1, №9. - С.5-12.
3. *Лимонов А.С., Перельгин Б.В., Лимонов А.А.* Фильтровая реализация вейвлет-преобразования // Ж. Український гідрометеорологічний журнал. 2011.-Р.1, №9. - С.19-25.
4. *Блейхут Р.* Бистродействующие алгоритмы цифровой обработки сигналов – М.: Мир, 1989. – 576 с.
5. *Вайдінатхан П.П.* Цифровые фильтры, блоки фильтров и полифазные цепи с многочастотной дискретизацией. Методологический обзор// ТИИЭР, т.29, №9, 1990.
6. *Воеводин В. В. Кузнецов Ю. А.* Матрицы и вычисление – М.: Мир. Гл. ред. Физ.-мат. литературы, 1984. – 318 с.
7. *Добеши И.* Десять лекций по вейвлетам – Ижевск: НИЦ “Регулярная и хаотичная динамика”, 2001. – 464 с.
8. *Дьяконов В.П.* Вейвлеты. От теории к практике. Изд. 2-е, – Г.: Салон-пресс, 2004. – 400 с.
9. *Тикунов В.С.* Моделирование в картографии: Учебник – М.: Изд-во МГУ, 1997. – 405 с.
10. *Кулямин В.В.* Технологии программирования. Компонентный подход. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://panda.ispras.ru/~kuliamin/sdt-course.html>
11. *Варшанина Т.П., Плисенко О.А., Пикин С.Ф. и др.* Объектно-ориентированная цифровая модель рельефа // Вестник Адыгейского

государственного университета. – 2007. – № 4. – с. 211-217.

12. *Буриштинська Х. В.* Теоретические и методологические основы цифрового моделирования рельефа за фотограмметричными и картометричными данными: диссертация д-ра. техн. наук: 05.24.02 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.lib.ua-ru.net/diss/cont/19357.html>

13. *Кононов В., Черемшинский М.* ЦАКИЗ ИГН НАН України, Укргеодезкартографія „дистанційні методи як складова частина загального процесу одержання картографічної інформації для реєстраційних і кадастрових робіт (елементи системного підходу)”. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://loi.sscs.ru/gis/RS/chapter101.html>

14. Демиденко А.Г. (ЗАТ КБ „панорама”) Яструбів А.И. (ЗАТ „транзас”) Про якість моделей рельєфу. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.gisinfo.ru/item/22.htm>

15. ЗАТ КБ „панорама” [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.panorama.vn.ua>

16. ТОВ „ТВІС” [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.tvis.com.ua/sitemap.htm>

17. ТОВ „ТВІС” Космічні дані супутника GEOEYE-1. [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://www.tvis.com.ua/sd_gemain.htm

18. ТОВ „ТВІС” Космічних даних супутників WORLDVIEW. [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://www.tvis.com.ua/sd_wvmain.htm

19. ТОВ „ТВІС” Космічні дані супутника EROS B. [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://www.tvis.com.ua/sd_ebmain.htm

20. ТОВ „ТВІС” Космічні дані супутника ALOS. [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://www.tvis.com.ua/sd_almain.htm

21. ТОВ „ТВІС” Космічні дані супутника IRS. [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://www.tvis.com.ua/sd_irmsmain.htm

22. Компанія „Совзонд”: Космічні знімки. [Електронний ресурс] –

Режим доступу: <http://www.sovzond.ru/satellites/>

23. Лимонов А.С., Перелигін Б.В., Пустовіт Т.М. Реалізація фільтра Калмана для відновлення ізогіпс при побудові карт цифрового рельєфу // Ж. Український гідрометеорологічний журнал. 2012.-Р.1, №11. - С.68-75.

24. Лимонов А.С., Перелигін Б.В., Пустовіт Т.М. Аналіз фільтра Калмана стосовно до відновлення ізогіпс при побудові карт цифрового рельєфу // Ж. Український гідрометеорологічний журнал. 2012.-Р.1, №11. - С.58-67.

25. Лимонов А.С. Оптимальная оценка скалярных сигналов с использованием нерекурсивной и рекурсивной фильтрации Винера // Ж. Вісник. 2010.-Р.6, №10. - С.237-242.

26. Байков Ю.П., Кравец Л.В., Маринушкин В.Н. Лидар для измерения температуры атмосферы // VII Всесоюзный симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Тез. докл. Ч. II. - Томск. - 1984. - С. 368-371.

27. Голографическое устройство: Авторское свидетельство СССР N 1149206 / А.Б. Согоконь, В.П. Титарь (1983 г.)

28. Долгий С.И., Зуев В.В., Смирнов С.В., Шубин С.Ф. ИК лазерные газоанализаторы дифференциального поглощения "ТРАЛ-3" и "ТРАЛ-3М" // Оптика атмосферы. - 1991. Т. 4, N 5. - С. 515-521

29. Ельников А.В., Зуев В.В., Маричев В.Н., Ца-регородцев С.И. Первые результаты лидарных наблюдений стратосферного озона над Западной Сибирью // Оптика атмосферы. - 1989. Т. 2, N 9. - С. 995-996.

30. Захаров В.М., Костко О.К., Торговичев В.А., Чаянова Э.А. Лазерные методы исследования загрязнений атмосферы. - Обнинск, Информац. центр. - 1976. - 34 с.

31. Зуев В.Е., Кауль Б.В., Самохвалов И.В. и др. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей. - Новосибирск: Наука. - 1986. - 185с.

32. Зуев В.Е., Наац И.Э. Обратные задачи лазерного зондирования атмосферы. - Новосибирск: Наука. - 240 с.

33. Капитанов Ал.В., Капитанов Ан.В., Смирнов Н.Д. О возможности применения лидаров при изучении азотного цикла в фотохимическом смоге // Оптика атмосферы. - 1991. - Т. 4, N 4.-С. 404-409.

34. Кравец Л.В. Метод лидарного измерения температуры атмосферы по спектру молекулярного рассеяния // Лазерно-оптические методы зондирования атмосферы и водных сред. М.: Гидрометеиздат. - 1985. - С. 80-87.

35. Наац И.Э. Теория многочастотного лазерного зондирования атмосферы. - Новосибирск: Наука. - 1980. - 158 с.

36. Способ голографической идентификации материалов удаленных объектов: Авторское свидетельство СССР N 678969 / Г.С. Сафронов, А.Б. Согоконь, В.П.Титарь (1980 г.)