

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

М. Ф. Бабаков, О. В. Кривенко, В. І. Луценко

**РАДІОЕЛЕКТРОННІ ЗАСОБИ ДИСТАНЦІЙНИХ
АЕРОКОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Частина 2

**НЕСТАЦІОНАРНІ ВІДБИТТЯ ВІД НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА
ТА ЙОГО ЗОНДУВАННЯ З АЕРОКОСМІЧНИХ НОСІЇВ**

Навчальний посібник

Харків «ХАІ» 2022

УДК 537.86+621.371:621.396
Б19

Рецензенти: д-р фіз.-мат. наук Ю. Ф. Логвінов,
канд. фіз.-мат. наук О. В. Соболяк

Бабаков, М. Ф.

Б19 Радіоелектронні засоби дистанційних аерокосмічних досліджень

[Текст] : навч. посіб. У 3 ч. Ч. 2. Нестационарні відбиття від навколишнього середовища та його зондування з аерокосмічних носіїв / М. Ф. Бабаков, О. В. Кривенко, І. В. Луценко. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2022. – 96 с.

ISBN 978-966-662-882-7

Розглянуто результати експериментальних досліджень нестационарних відбиттів від поверхні моря, суші та ясного неба, виконаних вітчизняними дослідниками у НВЧ- та ВВЧ-діапазонах хвиль з використанням багаточастотних і багатополяризаційних комплексів. Розглянуто особливості побудови аерокосмічних і наземних радіотехнічних комплексів і програми космічних досліджень провідних космічних держав.

Для магістрів спеціальності «Телекомунікації та радіотехніка» під час виконання практичних робіт і самостійної підготовки з дисципліни «Радіоелектронні засоби дистанційних аерокосмічних досліджень», при розробленні дипломних проєктів, а також для аспірантів, які розробляють радіоелектронні засоби й методи дистанційних аерокосмічних досліджень.

Іл. 40. Табл. 16. Бібліогр.: 10 назв

УДК 537.86+621.371:621.396

© Бабаков М. Ф., Кривенко О. В., Луценко В. І., 2022

© Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», 2022

ISBN 978-966-662-882-7

ПЕРЕДМОВА

Предметом вивчення навчальної дисципліни «Радіоелектронні засоби дистанційних аерокосмічних досліджень» є радіофізичні характеристики об'єктів зондування в навколишньому середовищі, математичні моделі, що використовуються для опису процесів відбиття радіохвиль від природних та антропогенних об'єктів, моделі та методи комп'ютерного моделювання радіофізичних процесів і сигналів, оброблення даних експериментів і сигналів у радіоелектронній апаратурі для дистанційних аерокосмічних досліджень.

Навчальна дисципліна базується на матеріалі попередніх навчальних дисциплін «Вища математика», «Спеціальні розділи вищої математики», «Основи програмування», «Основи теорії сигналів», «Статистичні методи обробки сигналів» і створює підґрунтя професійної підготовки магістра спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка», забезпечуючи виконання дипломного проєкту, а також подальше навчання в аспірантурі.

Навчальний посібник з дисципліни складається з трьох частин: у першій частині розглянуто радіофізичні властивості навколишнього середовища; у другій – моделі нестаціонарних негауссових відбитих сигналів, методи їх аналізу, а також засоби дистанційного зондування атмосфери та підстильних поверхонь з використанням аерокосмічних носіїв; у третій – використання радіовипромінювання глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС) для моніторингу навколишнього середовища та вирішення завдань радіолокації.

Основою матеріалу частини 2 посібника є оригінальні результати експериментальних досліджень нестаціонарних відбиттів від поверхні моря, суші та ясного неба, виконаних вітчизняними дослідниками у надвисокочастотних (НВЧ) та вкрайвисокочастотних (ВВЧ) діапазонах хвиль з використанням багаточастотних і багатопляризаційних комплексів. Тут розглянуто особливості побудови аерокосмічних і наземних радіотехнічних комплексів і програми космічних досліджень провідних космічних держав. Ці результати можуть бути використані не тільки студентами в навчальному процесі, але й спеціалістами та науковцями під час розроблення нових методів і засобів дистанційних аерокосмічних досліджень. Матеріал кожного з розділів частини 2 посібника викладено таким чином, що вивчати його можна незалежно від інших.

Розділ 1. ПРОСТОРОВО-ЧАСОВІ І ПОЛЯРИЗАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕСТАЦІОНАРНИХ ВІДБИТТІВ ВІД ПОВЕРХНІ МОРЯ Й АТМОСФЕРНИХ ЯВИЩ

Для експериментальних досліджень характеристик нестационарних відбиттів від моря, суші і «ясного неба» необхідним є використання вимірвальних систем як з імпульсним, так і безперервним режимами випромінювання. Використання систем з імпульсним режимом зондування простору є переважним у тих випадках, коли необхідно дослідити просторовий розподіл розсіювачів, а комплексів з безперервними видами випромінювання (монохроматичним і з ЧС-модуляцією) – для вивчення особливостей спектрів зворотного розсіювання.

У цьому розділі наведено результати експериментального дослідження поляризаційно-спектральних особливостей зворотного розсіювання радіохвиль сантиметрового й міліметрового діапазонів морем і гідрометеорами.

Розглянуто опис поляризаційної структури нестационарних відбиттів, що базується на використанні статистичних матриць розсіювання повної структури сигналу, його змінних середніх, а також матриць коефіцієнтів кореляції і деполіризації окремих спектральних компонент розсіяних сигналів на ортогональних поляризаціях.

У класі напівмарковських вкладених процесів описано статистичну модель негауссового сигналу, розсіяного морською поверхнею. З використанням експериментальних даних щодо зворотного розсіювання від моря в сантиметровому й міліметровому діапазонах радіохвиль визначено параметри, що входять до її складу. Показано можливість використання запропонованого підходу для опису нестационарного відбиття від ділянок суші, покритих рослинністю, від «ясного неба».

Запропоновані моделі дають змогу імітувати сигнали зворотного розсіювання від моря, ділянок суші і «ясного» неба при високій роздільній здатності РЛС за дальністю й азимутальним кутом, а також оцінити робочі характеристики систем селекції і виявлення об'єктів на фоні природних завад від місцевості й гідрометеорів.

Розглянуті підходи й методи опису нестационарних негауссових процесів є основою для аналізу характеристик систем дистанційних аерокосмічних досліджень.

1.1. Стаціонарні і нестационарні процеси

На практиці часто мають місце випадкові процеси, що відбуваються в часі приблизно однорідно протягом досить тривалого періоду часу й мають вигляд безперервних випадкових коливань навколо деякого середнього значення, причому ні середня амплітуда, ні характер цих

коливань істотно не змінюються з плином часу. Такі випадкові процеси прийнято називати стаціонарними. Як приклади стаціонарних випадкових процесів можна назвати: коливання літака на сталому режимі горизонтального польоту; коливання напруги в електричній освітлювальній мережі; випадкові шуми в радіоприймачі; процес качки корабля і т. ін. Кожен стаціонарний процес можна розглядати як такий, що триває в часі невизначено довго; під час дослідження стаціонарного процесу як початок відліку можна вибрати будь-який момент часу. Досліджуючи стаціонарний процес на будь-якому проміжку часу, ми маємо отримати одні й ті самі його числові характеристики. Для нестаціонарних процесів характерним є змінення їх числових характеристик у часі. Більшість процесів у природі – нестаціонарні.

Марковський процес – випадковий процес, еволюція якого після будь-якого заданого значення часового параметра не залежить від еволюції, яка відбулася перед, за умови, що значення процесу в цей момент є фіксованим («майбутнє» процесу не залежить від «минулого» при відомому «теперішньому»); інше трактування: «майбутнє» процесу залежить від «минулого» лише через «теперішнє»).

Процес Маркова – модель авторегресії першого порядку. Марковський ланцюг – окремий випадок марковського процесу, коли простір його станів є дискретним (тобто зліченим).

Напівмарковський процес, або, як його іноді називають, процес марковського відновлення, поєднує в собі властивості марковських процесів і процесів відновлення. Напівмарковський процес – це такий випадковий процес, який переходить з одного стану в інший відповідно до заданих розподілів імовірностей, а час перебування процесу в будь-якому стані є випадковою величиною, розподіл якої залежить як від цього стану, так і від стану, у який буде здійснено наступний перехід процесу. Ці види процесів і будемо використовувати в подальшому під час опису нестаціонарних відбиттів від морської поверхні, суші і «ясного неба».

1.2. Поляризаційна і просторово-часова структури відбиттів від моря

1.2.1. Статистичний опис

Наслідком багатофакторного механізму розсіювання ВВЧ-радіохвиль морською поверхнею є поєднання в структурі відбитого сигналу як порівняно «повільних», низькочастотних складових, обумовлених модульовальним ефектом великих гравітаційних хвиль, так і «швидких», високочастотних, пов'язаних з властивостями резонансно розсіювальних бриж, відбиттями від хвиль, що обрушуються, і бризок. Ці складові по-різному впливають на роботу радіосистем. Для ослаблення їх негативної

дії можуть застосовуватися різні способи, і тому доцільно, у міру можливості, розділити характеристики цих двох сторін явища. Зокрема, для вивчення впливу великих хвиль на структуру розсіяного сигналу запропоновано використовувати процедуру обчислення «змінного середнього» для виокремлення квазіперіодичної або трендової складової відбитого від поверхні моря сигналу. Цей підхід може використовуватися і для поділу в поляризаційних ефектах ролі різних складових процесу.

Вивчення повної поляризаційної структури розсіяного морем сигналу ґрунтується на дослідженні кореляційної $[\dot{\rho}]$ матриці, яка є ермітовою, і її Фур'є-перетворень:

$$[\dot{\rho}] = \begin{pmatrix} [\dot{\rho}_{11}] & [\dot{\rho}_{12}] \\ [\dot{\rho}_{21}] & [\dot{\rho}_{22}] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{11}^2 & \dot{\rho}_{1121} & \dot{\rho}_{1112} & \dot{\rho}_{1122} \\ \dot{\rho}_{2111} & \sigma_{21}^2 & \dot{\rho}_{2112} & \dot{\rho}_{2122} \\ \dot{\rho}_{1211} & \dot{\rho}_{1221} & \sigma_{12}^2 & \dot{\rho}_{1222} \\ \dot{\rho}_{2211} & \dot{\rho}_{2212} & \dot{\rho}_{2212} & \sigma_{22}^2 \end{pmatrix}. \quad (1.1)$$

Дійсні елементи σ_{ij}^2 , що лежать на головній діагоналі, мають значення ЕПР морської поверхні при опроміненні її на i -й і прийманні на j -й поляризаціях, а недіагональні елементи являють собою комплексні коефіцієнти взаємної кореляції різних елементів $\langle \dot{N}_{ij} \dot{N}_{lm}^* \rangle$ статистичної матриці \vec{N} розсіювання, причому i, l відносять до поляризації випромінювання, а j, m – приймання.

На теперішній час досить повно розроблено методи опису поляризаційних характеристик флуктуаційних радіолокаційних цілей з використанням автокореляційних і взаємно кореляційних функцій (енергетичних і взаємних спектрів) ортогонально поляризованих компонент відносно стаціонарних випадкових процесів з гауссовою статистикою. Відбиття від моря у багатьох випадках є істотно нестационарними в часі й неоднорідними в просторі. Це можна врахувати, подавши їх у вигляді двох співмножників:

$$\dot{S}_{ij}(r, t) = \dot{G}_{ij}(r, t) \dot{s}_{ij}(r, t), \quad (1.2)$$

де r, t – просторова й часова координати;

$\dot{G}_{ij}(r, t)$ – процеси, пов'язані з поляризаційними властивостями великомасштабних неоднорідностей, таких, як великі морські хвилі, що приводять до амплітудної і фазової модуляції розсіяного сигналу;

$\dot{s}_{ij}(t)$ – процеси, пов'язані з поляризаційними властивостями дрібномасштабної структури – бриж, що резонансно розсіюють, накладеної на велику хвилю.

У першому наближенні будемо вважати характеристики бриж такими, що не залежать від їх положення на великій хвилі, хоча, як показали експериментальні дослідження, спектральна щільність бриж, що резонансно розсіюють, на передньому схилі великої хвилі є більшою, ніж на задньому і в западині.

З урахуванням співвідношення (1.2) можна записати вираз для статистичної матриці розсіювання:

$$\vec{N}(r,t) = \begin{pmatrix} \dot{G}_{11}(r,t)\dot{s}_{11}(t) & \dot{G}_{12}(r,t)\dot{s}_{12}(t) \\ \dot{G}_{21}(r,t)\dot{s}_{21}(t) & \dot{G}_{22}(r,t)\dot{s}_{22}(t) \end{pmatrix}. \quad (1.3)$$

При цьому опис поляризаційної структури відбиття від моря фактично ґрунтується на двокomпонентній моделі розсіювання від моря, згідно з якою відбиття обумовлюється брижами з резонансною довжиною хвилі, а великі хвилі приводять через змінення локального кута їх опромінення до амплітудної і фазової модуляції. Оскільки процеси, що описуються множниками $\dot{G}_{ij}(r,t)$ і $\dot{s}_{ij}(t)$, мають інтервали кореляції, що істотно різняться в часовій області: $\dot{G}_{ij}(r,t)$ – повільноосцилювальна функція, пов'язана з періодом морського хвилювання, а $\dot{s}_{ij}(t)$ – швидкоосцилювальна, то існує можливість окремого вивчення пов'язаних з ними нестационарних властивостей відбитого морем сигналу.

Вивчення поляризаційних характеристик розсіяного сигналу, пов'язаних з модульовальним ефектом великих хвиль. Нехай для амплітуд кожної з компонент здійснюється операція згладжування на $(t, t+t_n)$, де t_n – час інтегрування, тобто при цьому визначається змінне середнє. Інтервал згладжування t_n можна вибрати таким чином, щоб він був значно більшим від інтервалу кореляції процесів $\dot{s}_{ij}(t)$ (що становить навіть у сантиметровому діапазоні не більше 10...20 мс) і значно меншим від інтервалу кореляції $\dot{G}_{ij}(r,t)$ процесів і порівняним з періодом морського хвилювання (становить одиниці секунд). Після згладжування модуль статистичної матриці розсіювання з точністю до постійного множника можна записати так:

$$\overline{|\dot{N}(t)|} = \overline{|\vec{N}(t)|} = \int_t^{t+t_n} |\dot{N}(t)| dt = \int_t^{t+t_n} \vec{N}(t) dt \approx \begin{pmatrix} G_{11}(r,t)G_{12}(r,t) \\ G_{11}(r,t)G_{12}(r,t) \end{pmatrix}, \quad (1.4)$$

де (\bullet) – позначення операції усереднення на інтервалі $(t, t+t_n)$.

Інтегрування протягом часу t_n , поки функції $|\dot{G}_{ij}(r, t)| = G_{ij}(r, t)$ ще залишаються незмінними, оскільки поверхню моря при цьому можна, мабуть, уважати «замороженою», приводить до згладжування швидкоосцилювальних функцій $|\dot{s}_{ij}(t)| = s_{ij}(t) \approx 1$. Це дає змогу вивчати трендові явища, пов'язані з модулювальним ефектом $G_{ij}(r, t)$. Помноживши матрицю на ермітово-сполучену, після операції статистичного усереднення отримують блокові матриці, аналогічні (1.1). У них коефіцієнти взаємної кореляції (елементи блокової матриці (1.1)) будуть характеризувати міру статистичного зв'язку не компонент повного сигналу, а згладженої матриці (1.4). При цьому з'являється можливість вивчення спектральних і кореляційних властивостей трендів, тобто нестационарних (при короткому часі спостереження) особливостей розсіяного морем сигналу. Існує оптимальний час згладжування t_n , протягом якого функції $G_{ij}(t, r)$ ще можна вважати незмінними, тобто поверхню моря для таких проміжків часу спостереження можна вважати «замороженою». Інтегрування дає змогу згладити швидкоосцилювальні процеси у відбитому сигналі, обумовлені інтерференцією сигналів елементарних розсіювачів, які знаходяться на гравітаційній хвилі. Більш детальний розгляд показує, що збільшення часу накопичення приводить до невиконання гіпотези «замороженої» поверхні, тобто не можна вважати функції $G_{ij}(t, r)$ на інтервалі накопичення незмінними, а при його зменшенні зростає статистична змінність оцінок $\hat{S}_{ij}(t, r)$, так званий шум. Таким чином, існує якийсь оптимум за кількістю накопичуваних імпульсів M_{opt} (інтервалу інтегрування t_n), що забезпечує мінімізацію повної помилки оцінки $\hat{S}_{ij}(t, r)$: динамічної, обумовленої згладжуванням $G_{ij}(t, r)$, і статистичної, пов'язаної зі змінністю оцінок, отриманих при кінцевому інтервалі згладжування. Якщо взяти спектр морського хвилювання в поданні Пірсона – Московітца, то отримуємо такий вираз для оптимального числа незалежних відліків M_{opt} :

$$M_{opt} = \frac{(4 - \pi)^{1/3}}{2\pi} (1 + b^2)^{-1/3} \left(\frac{F_0}{\Delta f} \right)^{-2/3}, \quad (1.5)$$

де F_0 , $b = \Delta F / F_0$ – частота і відносна ширина спектра морського хвилювання;

Δf – ширина спектра радіолокаційного відбиття від моря.

Оцінки з використанням (1.5) показують, що оптимальні значення інтервалу згладжування становлять 25...100 мс. При таких інтервалах

згладжування з'являється можливість вивчення поляризаційних особливостей відбитого сигналу, пов'язаних з модульовальним ефектом великих хвиль.

Вивчення поляризаційних характеристик розсіяного морем сигналу, пов'язаного з дрібномасштабною розсіювальною структурою. Аналізуючи компоненти статистичної матриці розсіювання при короткому часі спостереження t_n , коли модульовальні функції $\dot{G}_{ij}(r, t)$ можна вважати незмінними, можна отримати оцінки поточних спектрів і щільності розподілу, що значною мірою обумовлені швидкоосцилювальними функціями $\dot{s}_{ij}(t)$. Статистику подібних процесів через велику кількість елементарних розсіювачів в елементі роздільної здатності РЛС (резонансні брижі, бризки) можна апроксимувати змінною в часі релеївською моделлю для амплітуд і гауссівською для квадратур. Для опису спектральних характеристик компонент потребується їх вивчення для всієї множини можливих значень модульовальних функцій $\dot{G}_{ij}(r, t)$. Для спрощення, з використанням підходу, викладеного в підрозд. 1.3, уся множина значень $\dot{G}_{ij}(r, t)$ розбивається за інтенсивністю на дві підмножини і для кожної з них вивчаються статистичні і спектральні характеристики. При цьому якщо значення функції $\dot{G}_{ij}(r, t)$ належить множині H_0 (має інтенсивність нижче порогової), то кажуть про «паузи» у відбитому сигналі, а якщо множині H_1 (інтенсивність перевищує порогову), то про «сплеск», який фізично обумовлений проходженням гребеня хвилі через імпульсний обсяг. Такий підхід при деякому огрубінні фізичної картини процесу відбиття від моря характеризується значною простотою і наочністю опису відбитого сигналу, а також зручністю аналізу технічних характеристик радіосистем.

Таким чином, опис поляризаційної структури відбитого морем сигналу може базуватись на використанні:

1) других моментів статистичної матриці розсіювання та їх Фур'є-перетворень (спектрів) для повної структури сигналу;

2) других моментів змінного середнього статистичної матриці розсіювання та їх Фур'є-перетворень для визначення особливостей, пов'язаних з модульовальним ефектом великих хвиль;

3) статистичних і спектральних характеристик компонент статистичної матриці розсіювання на коротких інтервалах спостереження для визначення особливостей розсіювання сигналу резонансними брижами і бризками.

Вивчення особливостей поляризаційно-спектральної структури відбитого морем сигналу може ґрунтуватися на використанні матриці коефіцієнтів кореляції спектральних компонент вертикальної і горизонтальної поляризацій (МКСК):

$$\rho(F_i, F_j) = \frac{\langle S_V(F_i, t) S_H(F_j, t) \rangle - \langle S_V(F_i, t) \rangle \langle S_H(F_j, t) \rangle}{\sqrt{\left(\langle S_V^2(F_i, t) \rangle - \langle S_V(F_i, t) \rangle^2 \right) \left(\langle S_H^2(F_j, t) \rangle - \langle S_H(F_j, t) \rangle^2 \right)}}, \quad (1.6)$$

де $S_V(F_i, t), S_H(F_j, t), \rho(F_i, F_j)$ – оцінки спектральної щільності у момент часу t на вертикальній V і горизонтальній H поляризаціях на F_i - і F_j -частотах і коефіцієнт їх взаємної кореляції відповідно. Уведена характеристика – МКСК – показує, наскільки є синхронними флуктуації спектральних компонент розсіяних сигналів на різних поляризаціях. Таким чином, вивчення поляризаційної і просторово-часової структур розсіяного морем сигналу може базуватися на дослідженні часових і просторових кореляційних (спектральних) характеристик сигналів з виходів синхронного й амплітудного детекторів, змінних середніх амплітуд, фінальних імовірностей появи й розподілів часу існування сплесків на ортогональних поляризаціях, а також коефіцієнтів кореляції різних спектральних компонент.

1.2.2. Експериментальне вивчення

Проведено дослідження кореляційних зв'язків між розсіяними сигналами на ортогональних поляризаціях. Вивчено поляризаційні особливості радіолокаційного відбиття від моря на хвилях 3 см, 8 мм і 4 мм. Використовувалися комплекси безперервного й імпульсного режимів випромінювання. При слабкому вітрі (близько 2...3 м/с) і за відсутності на поверхні моря великих хвиль спостерігається переважання інтенсивності сигналу вертикально поляризованої компоненти над горизонтальною в паузах на 3...10 дБ (рис. 1.1).

На рис. 1.1 показано фотографії екрану при подаванні на вертикальні й горизонтальні пластини осцилографа сигналів з виходів фазових детекторів вертикальної й горизонтальної поляризацій. При слабкому хвилюванні тільки в моменти сплесків компоненти мають приблизно однакові інтенсивності (рис. 1.1, в), тоді як при паузах домінують відбиття на вертикальній поляризації (рис. 1.1, а). При бурхливому морі (швидкості вітру близько 20 м/с) як для пауз (рис. 1.1, б), так і для сплесків (рис. 1.1, д) ортогонально поляризовані компоненти мають приблизно однакові інтенсивності. Перерізи двовимірної щільності розподілу ортогонально поляризованих компонент сигналу, відбитого від моря, як у моменти пауз, так і в моменти сплесків можуть описуватися кругом для бурхливого моря або еліпсом для безвітряного стану поверхні моря з великою піввіссю, що збігається з вертикально поляризованою компонентою. Немає кореляції ортогонально поляризованих компонент, яка мала б приводити до 45°-ї орієнтації великої осі еліпса щільності розподілу і до зменшення розмірів його малої осі. Інший вигляд мають перерізи щільності розподілу

квадратур ортогонально поляризованих компонент сигналу, відбитого від гідрометеорів (зокрема від дощу) і радіолокаційних цілей.

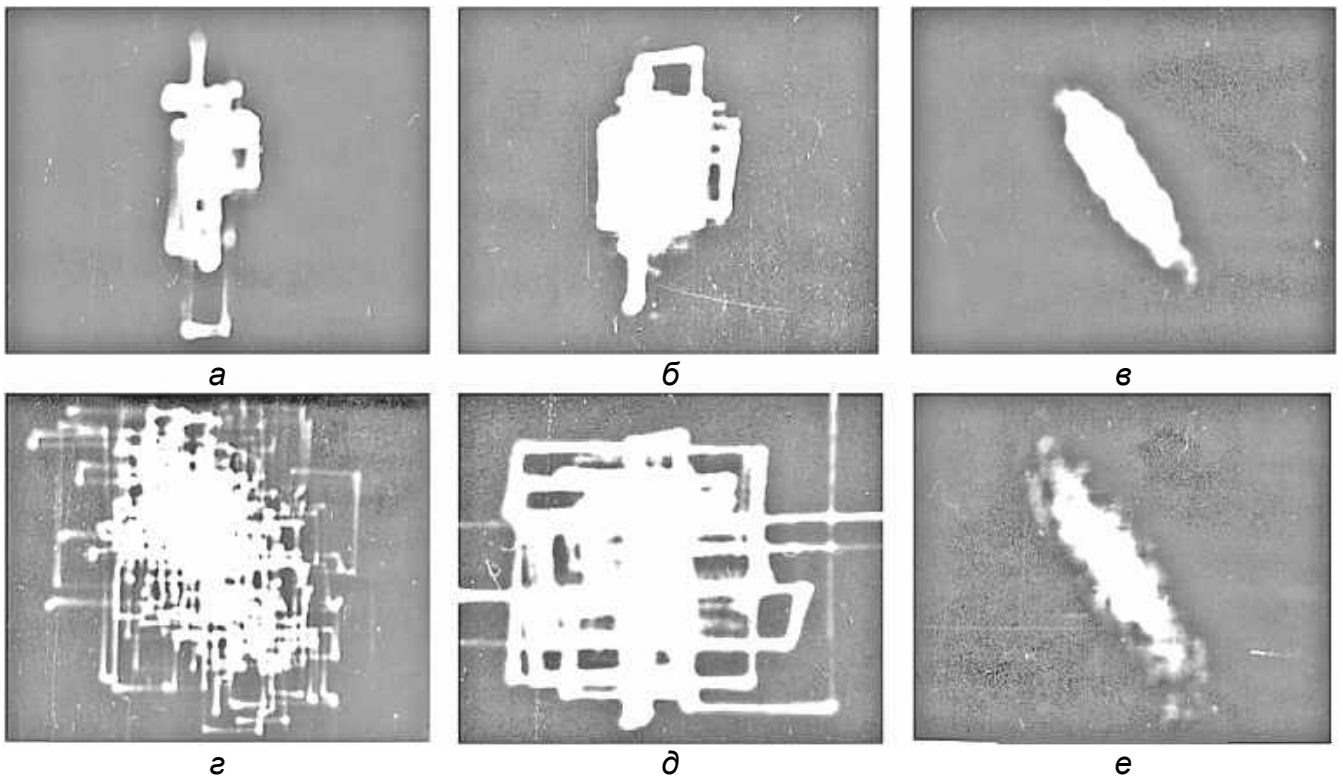


Рис. 1.1. Переріз двовимірної щільності розподілу ортогонально поляризованих компонент відбиття: а, г – штильове море 0–1 бал; б, д – штормове море 5–6 балів; в, е – дощ; а, б – паузи; г, д – викиди

Для щільності розподілу ортогонально поляризованих компонент відбиття від дощу, як і для цілей, простежується 45° -на орієнтація головної осі еліпса (рис. 1.1, в, е). Це свідчить про значно сильнішу, ніж для моря, кореляцію ортогонально поляризованих компонент відбиття. На рис. 1.2, а зображено записи флуктуацій амплітуди й доплерівського зсуву частоти відбиття від моря. Отримано на хвилі 8 мм при вертикальній (криві 1, 2) і горизонтальній (криві 3, 4) поляризаціях приймання й опромінення поверхні похило поляризованою (з кутом 45°) хвилею.

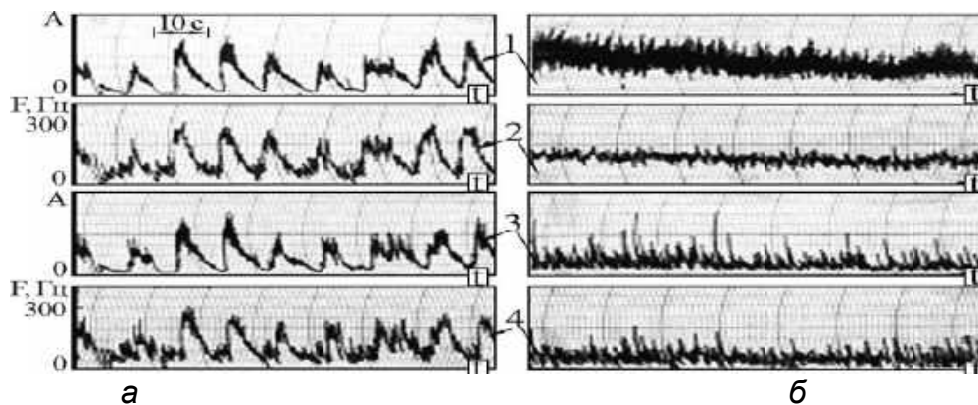


Рис. 1.2. Записи відбиття від моря на ортогональних поляризаціях, хвиля 8 мм: а – штормове море; б – штильове; 1, 3 – амплітуда; 2, 4 – доплерівська частота; 1, 2 – вертикальна поляризація (ВП); 3, 4 – горизонтальна поляризація (ГП), 1 см = 10 с

З рис. 1.2, а видно, що при штормовому морі (хвилюванні близько 6 балів) амплітуди розсіяних сигналів на вертикальній (крива 1) і горизонтальній (крива 3) поляризаціях є практично однаковими, як при сплесках, так і при паузах. Сплески інтенсивностей на обох поляризаціях є синхронними й спостерігаються з періодичністю морського хвилювання (для наведених записів близько 9 с). Одночасно зі зростанням інтенсивності відбитого сигналу спостерігається збільшення й доплерівського зсуву частоти (криві 2, 4 на рис. 1.2 а). Найбільшого значення він набуває приблизно в момент проходження гребеня хвилі через імпульсний обсяг. Можна зробити висновок, що для штормового моря кореляція середніх амплітуд і доплерівських зсувів частоти розсіяного сигналу на ортогональних поляризаціях – досить висока. Істотно іншу структуру (рис. 1.2, б) має сигнал, відбитий від спокійного моря (хвилювання близько 2 бали). Амплітуда сигналу на вертикальній поляризації на 5...7 дБ є більшою, ніж на горизонтальній (криві 1 і 3 відповідно). На вертикальній поляризації відбитий сигнал має шумоподібний характер, тоді як на горизонтальній поляризації спостерігаються рідкісні й інтенсивні викиди, що перевищують середній рівень на 10...14 дБ. Аналогічні особливості характерні і для відбиття від моря в сантиметровому (хвиля 3 см) діапазоні і в короткохвильовій частині міліметрового (хвиля 4 мм) діапазону.

На рис. 1.3, а–в зображено залежності коефіцієнтів кореляції амплітуди A з доплерівським зсувом частоти F від азимута опромінення поверхні відносно напрямку бігу морських хвиль θ , тривалості імпульсу τ_u і кута ковзання ψ .

Усі залежності отримано при різних поляризаціях випромінювання/приймання на хвилях 4 мм і 8 мм з використанням РЛС імпульсного (рис. 1.3, а, б) і безперервного (рис. 1.3, в) режимів випромінювання. Перший індекс позначає поляризацію випромінювання, другий – приймання (V – відповідає вертикальній, H – горизонтальній). На рис. 1.3, г для різних азимутів θ опромінення поверхні показано коефіцієнти кореляції амплітуди й доплерівського зсуву частоти відбитого морем сигналу на горизонтальній поляризації при використанні безперервного випромінювання на хвилі 3 см. Видно, що азимут опромінення поверхні практично не впливає на коефіцієнт кореляції. Кореляція амплітуди й доплерівської частоти (рис. 1.3, г) на ортогональній поляризації є меншою, ніж на узгодженій з випроміненою. Збільшення тривалості імпульсу (розмірів елемента розділення за дальністю) (рис. 1.3, б) приводить до зниження кореляції. Таким же чином впливає і збільшення розмірів опромінюваного майданчика в азимутальній площині. Незважаючи на те, що в різних діапазонах хвиль елементарними розсіювачами є різні дрібномасштабні утворення на морській поверхні, змінення середньої інтенсивності й доплерівського зсуву, обумовлені модульовальним ефектом великих морських хвиль, виявляються однаково.

Це спричиняє досить сильну кореляцію змінного середнього амплітуди й доплерівського зсуву частоти розсіяного морем сигналу в сантиметровому й міліметровому діапазонах довжин хвиль.

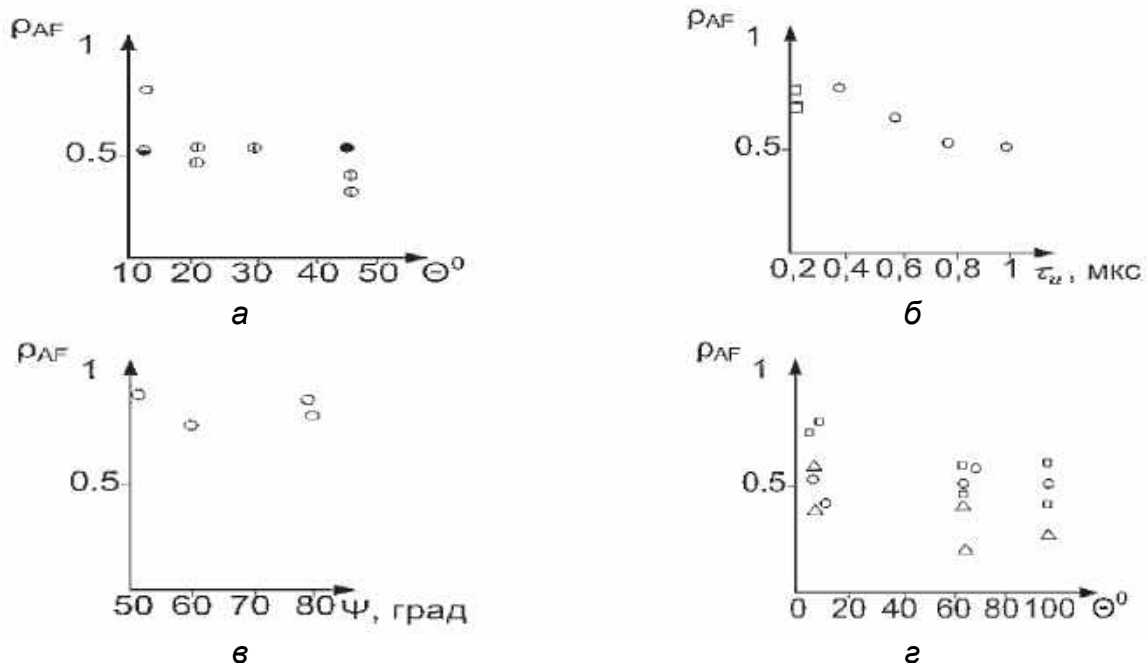


Рис. 1.3. Кореляція амплітуди й доплерівської частоти відбиття від моря:
 а – $\lambda = 4$ мм, VV , \bullet – $\tau = 0,2$ мкс; \circ – $\tau = 0,8$ мкс; $\lambda = 8$ мм, VV , \circ – $\tau = 0,2$ мкс; \ominus – $\tau = 0,8$ мкс; б – $\lambda = 8$ мм; \circ – $U_B = 5$ м/с, $D = 1$ км, VV ; \square – $U_B = 2$ м/с, $D = 0,6$ км, HH ;
 в – \circ – $\lambda = 8$ мм; $U_B = 5$ м/с, VV ; г – $\lambda = 3$ см; $U_B = 14,5$ м/с, \square – HH ; Δ – VH ; \circ – 45° ;
 H – горизонтальна поляризація; V – вертикальна поляризація

Кореляцію повної структури сигналу і змінних середніх ортогонально поляризованих компонент відбиття від моря на хвилях 8 мм і 4 мм для імпульсного режиму зондування показано на рис. 1.4.

Слабка кореляція сигналів з виходів синхронних (рис. 1.4, а), а також амплітудних (рис. 1.4, б) детекторів на ортогональних поляризаціях пояснюється взаємними зміщеннями фазових центрів розсіювання на ортогональних поляризаціях для такої складної системи, як резонансно розсіювальні брижі на великій хвилі. Часткова кореляція пов'язана із загальним для обох поляризацій модулювальним ефектом великих хвиль і поляризаційно-нечутливими механізмами, наприклад, розсіюванням на бризках від хвиль, що обрушуються.

Слабка кореляція миттєвих значень ортогонально поляризованих компонент відбиття від моря з виходів як фазових, так і амплітудних детекторів може використовуватися для підвищення контрастності спостереження об'єктів на фоні відбиття від морської поверхні в системах дистанційного зондування й радіолокації.

Для радіолокаційного сигналу, відбитого від дощу, коефіцієнт кореляції амплітуд і квадратур ортогонально поляризованих компонент перевищує 0,7.

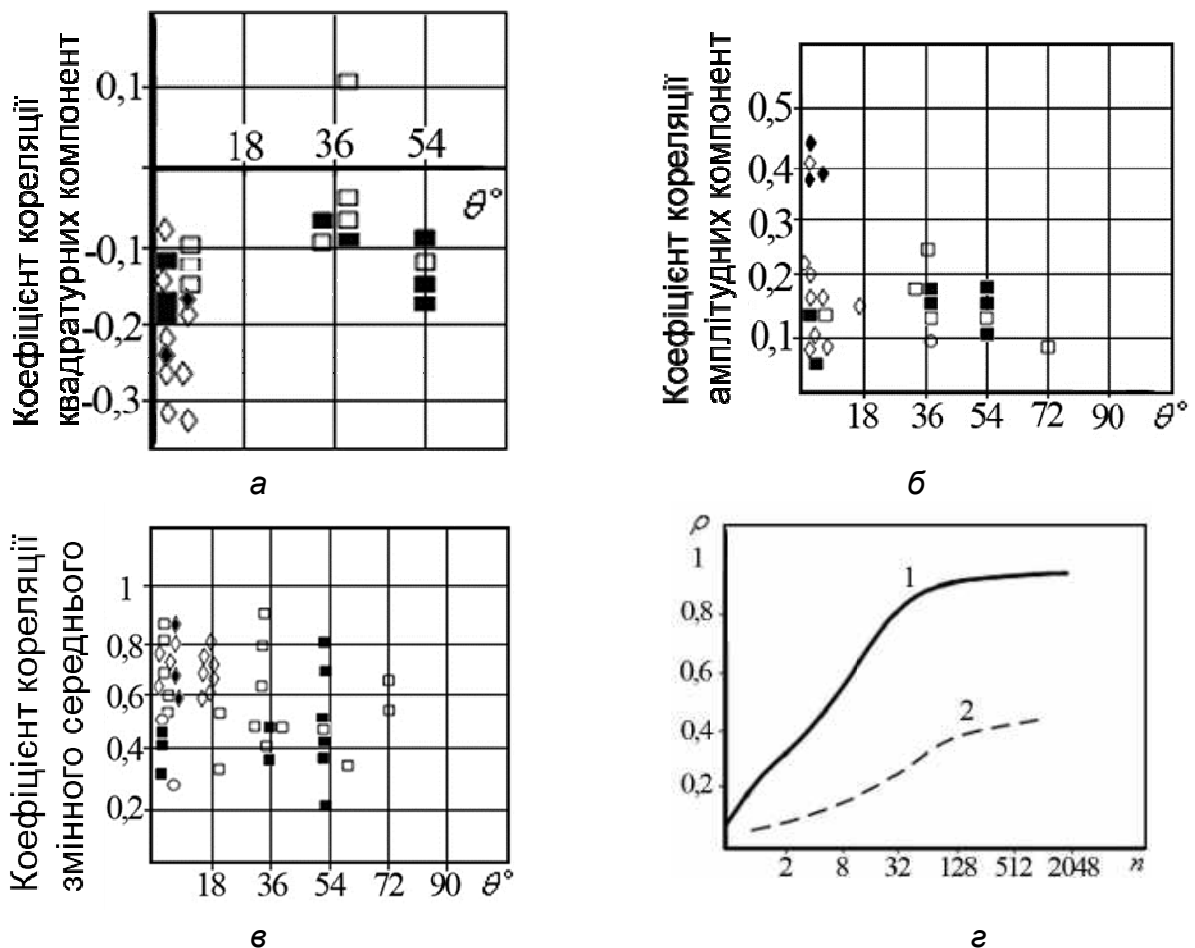


Рис. 1.4. Кореляція ортогонально поляризованих компонент відбиття від моря: а – квадратур; б – амплітуд; в – змінного середнього; г – залежність кореляції від інтервалу згладжування; $\lambda = 8\text{ мм}$, випромінювання 45° ; ■ – штиль на морі, вітер $< 3\text{ м/с}$; □ – бурхливе море, вітер $7\dots 15\text{ м/с}$; ∇ , \circ – бурхливе море; $\lambda = 4\text{ мм}$, бурхливе море, вітер $7\dots 15\text{ м/с}$; \diamond – ∇ ; \blacklozenge – випромінювання 45° ; г – $\lambda = 8\text{ мм}$, 1 – 5 балів, 2 – 2 бали

З цього можна зробити висновок про значно сильнішу, ніж для моря, кореляцію ортогонально поляризованих компонент. Збільшення пачки накопичуваних імпульсів (інтервалу згладжування) при отриманні оцінок змінного середнього амплітуди приводить до зростання кореляції розсіяних морем сигналів на ортогональних поляризаціях. На рис. 1.4, г показано змінення коефіцієнта кореляції змінного середнього амплітуд розсіяних морем сигналів на хвилі 8 мм від обсягу пачки накопичуваних імпульсів n при хвилюваннях 5 і близько 2 бали (криві 1 і 2 відповідно).

Видно, що для слабкого хвилювання кореляція не перевищує $0,45$, тоді як для штормового моря може становити $0,95$. Інтервал згладжування, при якому настає насичення в значеннях коефіцієнта кореляції, становить приблизно $60\dots 100\text{ мс}$, що задовільно узгоджується з результатами теоретичних оцінок (1.5).

Вивчення взаємної кореляції змінного середнього амплітуд розсіяних морем сигналів на ортогональних поляризаціях дає змогу відповісти на запитання: «Наскільки є синхронними сплески перешкод від моря на різних

поляризаціях?» Залежності коефіцієнтів кореляції змінних середніх амплітуд розсіяних морем сигналів на ортогональних поляризаціях від азимутального кута опромінення поверхні, показані на рис. 1.4, в, дають змогу зробити висновок про набагато більш сильну їх кореляцію, ніж для миттєвих значень сигналів з виходів синхронних та амплітудних детекторів (рис. 1.4, а, б). Визначені закономірності спостерігаються в розсіяному морем сигналі і на хвилі 3 см при безперервному режимі випромінювання. Коефіцієнти кореляції сигналів вертикальної й горизонтальної поляризацій наведено в табл. 1.1.

Високу кореляцію змінних середніх ортогонально поляризованих компонент можна використовувати, щоб підкреслити загальні для обох поляризацій модульовальні ефекти, пов'язані з великою хвилею. Це можна використовувати в радіотехнічних системах (РТС) для автоматичного регулювання посилення (АРП), демпфуючи проходження викидів перешкод, пов'язаних з відбиттям від гребенів морських хвиль, на вихід пристрою.

Таблиця 1.1

Коефіцієнти кореляції ортогонально поляризованих компонент відбиття від моря

Довжина хвилі, мм	Поляризація	Стан моря, вітер, хвилювання	Коефіцієнти кореляції		
			змінного середнього	амплітуд	квадратур
8	45 ⁰	Штиль, вітер 3 м/с	0,49	0,13	-0,15
8	45 ⁰	Вітер 16 м/с, 6 балів	0,6	0,22	0,04
4	45 ⁰	Вітер 11 м/с, 4 бали	-	0,42	0,19
4	ВП		0,71	0,21	0,19
30	ГП	Вітер 15 м/с, 5 балів	0,85	-	-
30	ВП		0,85	-	-
30	45 ⁰		0,85	-	-

Крім того, це можна використовувати для підвищення ефективності виділення рельєфу морського хвилювання в системах дистанційного зондування морської поверхні для підвищення точності визначення параметрів морського хвилювання.

У табл. 1.2 наведено ймовірності наявності сплесків і пауз по каналах ортогонально поляризованих компонент, отримані для змінних середніх амплітуд розсіяних сигналів на хвилі 3 см при безперервному режимі випромінювання, а також для миттєвих значень амплітуд відбитого морем сигналу на хвилі 4 мм при імпульсному режимі зондування. Значення аргументів «0» і «1» позначають відповідно паузу і сплеск у розсіяному сигналі, причому перший аргумент відноситься до вертикальної, а другий – до горизонтальної поляризації приймання. Аналіз даних для хвилі 3 см

показує, що у змінних середніх амплітуд сигналів на ортогональних поляризаціях протягом 30...40 % часу спостерігається збіг викидів і пауз по каналах, і лише протягом 10...20 % часу вони не збігаються. Викиди миттєвих значень амплітуди відбитого морем сигналу на обох поляризаціях хвилі 4 мм спостерігаються одночасно приблизно протягом 30 % часу.

На узгодженій та ортогональній поляризаціях збіг викидів відбувається приблизно протягом 10 % часу.

Таблиця 1.2

Фінальні ймовірності станів перешкоди (сплеск / пауза) по каналах ортогональних поляризацій

Довжина хвилі, мм	Поляризація	Стан моря	Ймовірність викидів		Загальні ймовірності			
			$P_V(1)$	$P_H(1)$	$P(0,0)$	$P(0,1)$	$P(1,0)$	$P(1,1)$
30	V	Вітер	0,53	0,50	0,34	0,13	0,17	0,37
	H	15 м/с,	0,51	0,50	0,32	0,17	0,19	0,32
	45°	6 балів	0,51	0,46	0,40	0,1	0,14	0,36
4	V	Вітер	0,45	0,15	0,49	0,05	0,36	0,1
	45°	14 м/с, 5 балів	0,42	0,49	0,37	0,21	0,14	0,28

Вимірювання, проведені при опроміненні поверхні моря похило поляризованою хвилею, показали, що ЕПР відбитого сигналу в міліметровому діапазоні хвиль при швидкості вітру понад 4 м/с на горизонтальній і вертикальній поляризаціях є практично однаковими. Питомі ЕПР моря на вертикальній і горизонтальній поляризаціях відрізняються не більше ніж на 1...2 дБ. При слабкому хвилюванні (вітрі менше 3...4 м/с) інтенсивність на вертикальній поляризації на 6...10 дБ вище, ніж на горизонтальній. Це пов'язано з тим, що при слабкому хвилюванні, коли немає обрушення хвиль, відповідно до двомасштабної моделі розсіювання домінують відбиття від моря на вертикальній поляризації. Для штормового моря розсіяний сигнал формується і через відбиття на хвилях, що обрушуються, бризках. Тому його інтенсивність практично не залежить від поляризації випромінювання. Аналогічна картина спостерігається і на хвилі 3 см. До швидкостей вітру приблизно 7...8 м/с більшим є сигнал вертикальної поляризації випромінювання й приймання, ніж сигнал горизонтальної поляризації, тоді як при штормовому морі їх інтенсивність є приблизно однаковою. Сказане підтверджує рис. 1.5, на якому показано відношення питомих ЕПР горизонтальної σ_H^0 і вертикальної σ_V^0 поляризацій приймання для різних азимутів опромінення моря. Опромінення поверхні на хвилі 3 см (хвилювання 5–6 балів, швидкість вітру 15 м/с) відбувалося похилою з кутом поляризації 45° хвилею, а також вертикальною й горизонтальною

поляризаціями. На цьому ж рисунку показано дані, отримані на хвилі 4 мм для хвилювань на морі близько 5 балів (швидкості вітру 14,5 м/с).

Видно, що при сильному хвилюванні розсіяний сигнал є сильно деполаризованим.

Коефіцієнт деполаризації становить 3...6 дБ як на хвилі 3 см, так і на хвилі 4 мм. Це дає змогу зробити висновок про відсутність переваг будь-якої з поляризацій при дистанційному зондуванні як морської поверхні, так і надводних об'єктів. Сильна деполаризація розсіяного сигналу значно обмежує можливості застосування традиційних поляризаційних методів для підвищення контрасту надводних об'єктів на фоні моря.

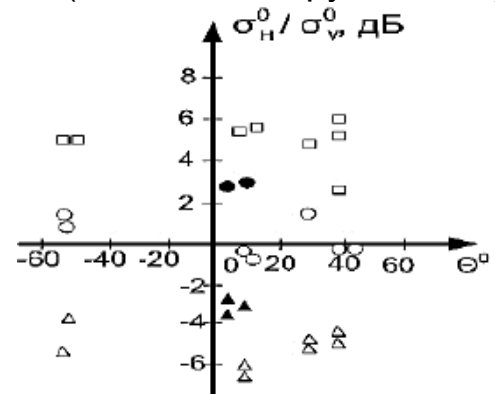


Рис. 1.5. Деполаризація розсіяних морем сигналів: $\lambda = 3$ см, $U_B = 15$ м/с, \square – H, Δ – V, \circ – 45°; $\lambda = 4$ мм, $U_B = 14,5$ м/с, \blacktriangle – V, \bullet – 45°

Міжспектральні кореляційні зв'язки на ортогональних поляризаціях.

Поляризаційно-спектральна структура радіолокаційного відбиття від моря досліджувалася за допомогою матриць коефіцієнтів взаємної кореляції спектральних компонент (1.6). Обчислена матриця коефіцієнтів кореляції $\rho(F_i, F_j)$ подавалася графічно. Її елементи зображувалися у вигляді кіл, діаметр яких пропорційний коефіцієнту кореляції. На рис. 1.6 зображено такі матриці при випромінюванні похилої поляризації для хвилювання моря 5-6 балів (рис. 1.6, а), а також слабкого (близько 2 бали) хвилювання (рис. 1.6, б).

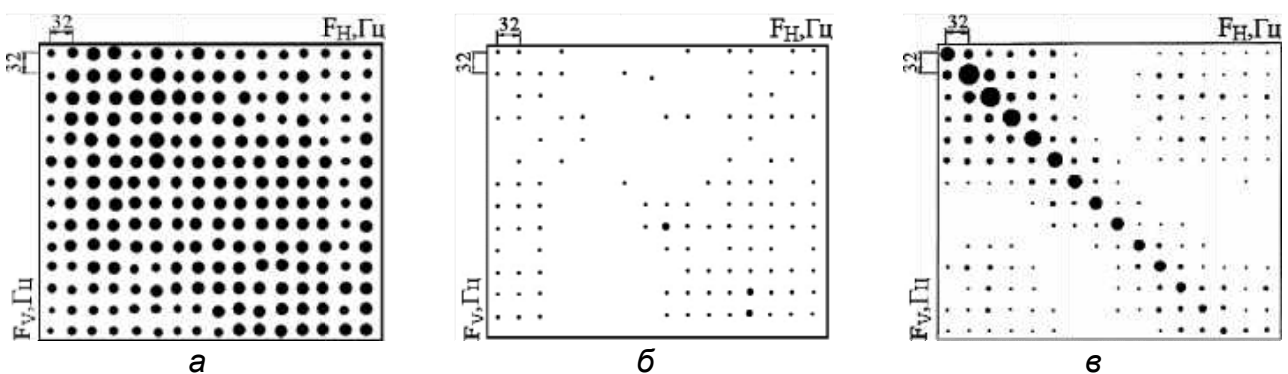


Рис. 1.6. Коефіцієнти кореляції спектрів відбиття на ортогональних поляризаціях:

а – море, 5-6 балів; б – море, 2 бали; в – дощ; \bullet – 0,8; \bullet – 0,4

Діапазон аналізу за частотою становить 500 Гц при дозволених 32 Гц. Необхідно зазначити, що при сильному хвилюванні моря матриці коефіцієнтів кореляції мають приблизно однаковий вигляд при опроміненні поверхні сигналами як похилої, так і вертикальної поляризацій. Найбільшу величину мають діагональні елементи, тобто сильніше корельованими на ортогональних поляризаціях є спектральні компоненти, що збігаються за

частотою. При слабкому хвилюванні кореляції спектральних компонент на ортогональних поляризаціях практично немає (рис. 1.6, б).

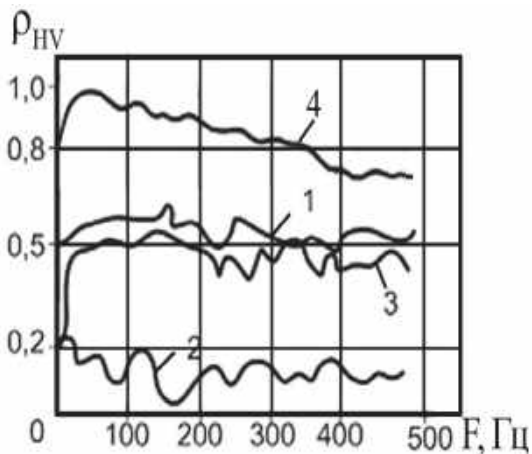


Рис. 1.7. Значення діагональних елементів МКСК: $\lambda = 8$ мм; море – 1 – 45°, 5–6 балів; 2 – 45°, 0–2 бали; 3 – V, 6 балів; 4 – 45° – дощ 2 мм/год

На рис. 1.7 показано значення діагональних елементів матриць кореляції для відбиття від моря при хвилюванні 5-6 балів (крива 1) і хвилюванні близько 2 бали (крива 2) при похилій 45°-й поляризації випромінювання, а також відбиття від моря при хвилюванні близько 6 балів і вертикальній поляризації опромінення (крива 3). Видно, що для бурхливого моря коефіцієнти кореляції спектральних компонент, що збігаються, на ортогональних поляризаціях мають величину 0,5...0,7, що істотно вище, ніж при слабкому хвилюванні.

Для дощу сильно корельовані тільки діагональні елементи матриці (див. рис. 1.6, в). Коефіцієнт кореляції становить 0,95 (крива 4) (див. рис. 1.7).

Поляризаційні особливості розсіювання радіохвиль дрібномасштабними утвореннями. Вивчення поляризаційних особливостей розсіювання хвиль сантиметрового й міліметрового діапазонів дрібномасштабними утвореннями типу капілярних хвиль проведено в лабораторних умовах у хвильовому лотку. Розміри лотка становили 0,75 x 0,75 м при глибині заповнення водою 3 см. Це означало, що на воді такої глибини всі хвилі бриж, довжина яких менше 6 см, можуть уважатися хвилями на глибокій воді. Вибір невеликої глибини заповнення лотка й наявність гофрованого дна дали змогу практично зняти проблему генерації в ньому хвиль з великим періодом. Порушення капілярних хвиль здійснювалося повітряним потоком, швидкість якого на висоті 1,5 см від поверхні води становила від 1,5 до 7,2 м/с. Значення чисел Рейнольдса, які характеризують ступінь турбулентності для збудливого потоку, становили $5 \cdot 10^3 \dots 5 \cdot 10^4$. Для використовуваних сопел критичні значення, починаючи з яких повітряний потік ставав турбулентним, становили $Re_{кр} \approx 2500$. Тому в проведених експериментах генерація мерехтіння в широкому діапазоні хвильових чисел забезпечувалася використанням турбулентного потоку.

Поверхня води опромінювалася під кутом ковзання близько 40° у 8-міліметровому діапазоні на різних поляризаціях і здійснювалося приймання двох ортогонально поляризованих компонент розсіяних хвиль (вертикальної і горизонтальної) при розв'язці між каналами приймання не менше 17 дБ. Крім того, здійснювалося опромінення поверхні на хвилі

10 см вертикально поляризованою хвилею й приймання розсіяної хвилі на горизонтальній поляризації.

Установлено, що незалежно від напрямку опромінення відносно напрямку повітряного потоку (за напрямком вітру або проти нього) коефіцієнт деполаризації $D_{12} \approx -8...-9$ дБ практично не залежить від швидкості (рис. 1.8, а).

Інтенсивності розсіяних сигналів вертикальної й горизонтальної поляризацій при опроміненні поверхні похилою 45° -ю поляризацією є приблизно однаковими (рис. 1.8, а). Різниця не перевищує 1 дБ і спостерігається при швидкостях повітряного потоку менше 3 м/с. Коефіцієнти кореляції сигналів на узгодженій та ортогональній випромінєній поляризаціях при опроміненні поверхні горизонтально поляризованою хвилею становлять $-0,35...-0,15$ (рис. 1.8, б). При збільшенні швидкості повітряного потоку від 1,5 м/с до 7 м/с відбувається зменшення від 0,5 до 0,05 коефіцієнта кореляції компонент вертикальної й горизонтальної поляризацій для випадку опромінення поверхні сигналом похилої поляризації. Значення ширини спектрів і центральні зміщення частоти розсіяних сигналів горизонтальної (крива 1) і вертикальної (крива 2) поляризацій є приблизно однаковими (рис. 1.8, в).

Зображені спектри відображають опромінення поверхні в напрямку повітряного потоку горизонтально поляризованою хвилею. На цьому ж рисунку показано спектр розсіяного сигналу на хвилі 10 см (крива 3). Порівняння експериментально отриманих доплерівських зсувів частоти розсіяних сигналів на хвилях 10 см і 8 мм з розрахунковими залежностями (1.1) для поверхневих хвиль показує їх задовільну відповідність (рис. 1.8, г). Це підтверджує, що розсіяне поле на хвилі як 10 см, так і 8 мм формується брижами з резонансною довжиною хвилі. Однак відношення ширини спектра до доплерівського зсуву частоти на хвилі 8 мм у 5–7 разів більше, ніж на хвилі 10 см. Це пов'язано зі зменшенням більш ніж на порядок інтервалу просторової когерентності резонансно-розсіювальних бриж через механізм внутрішньої вузької дисипації при переході з сантиметрового в міліметровий діапазон хвиль.

Зміна доплерівського зсуву частоти розсіяного сигналу від швидкості вітру відбувається синхронно на обох поляризаціях і пов'язана з наявністю вітрового зносу поверхневого шару рідини (рис. 1.8, д).

Обчислена за експериментальними даними швидкість вітрового зносу становить близько 3,5 % від швидкості повітряного потоку і є дещо меншою від наведеної в більш ранніх роботах – 5 %. Відмінності можуть бути пов'язані з невеликими розмірами хвильового лотка.

На рис. 1.8, е показано різниці фаз розсіяних на ортогональних поляризаціях сигналів при різних поляризаціях опромінювального поля й опроміненні бриж назустріч вітру. Видно, що найменша різниця фаз між діагональними елементами поляризаційної матриці розсіювання – близько

30°, причому вона зменшується зі збільшенням швидкості повітряного потоку.

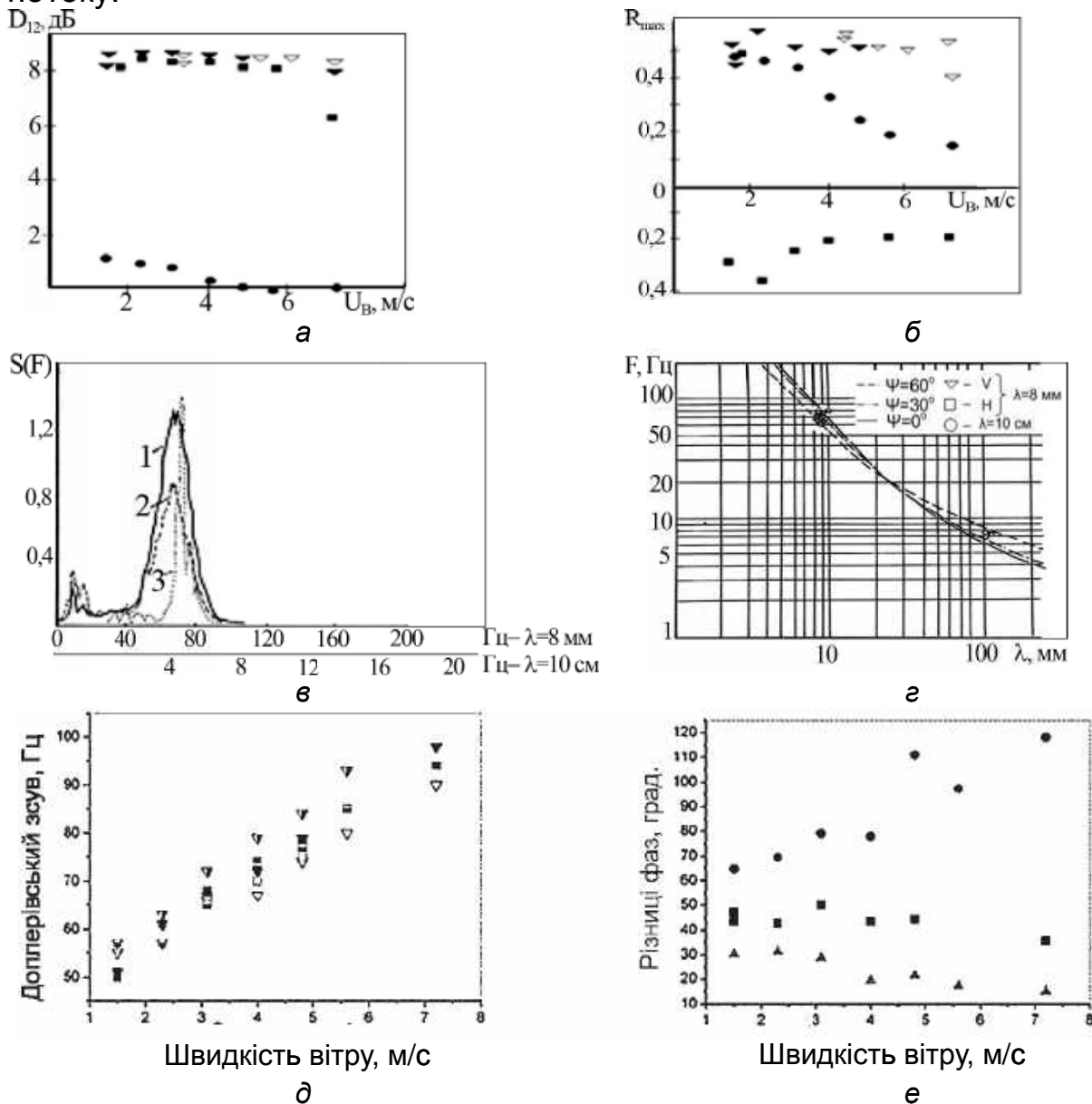


Рис. 1.8. Розсіювання сантиметрових і міліметрових радіохвиль брижами: а – коефіцієнти деполаризації, б – коефіцієнти кореляції: V, опромінення за вітром – ∇ ; проти вітру – \blacktriangledown ; H, опромінення проти вітру – \blacksquare ; \bullet – 45°; в – спектри, $\lambda = 8$ мм, випромінювання – H, приймання 1 – H, 2 – V, 3 – $\lambda = 10$ см, випромінювання – H, приймання – V; г, д – доплерівський зсув, випромінювання ВП, приймання \blacktriangledown – ВП, \blacksquare – ГП; випромінювання ГП, приймання ∇ – ВП, \square – ГП; випромінювання 45°, приймання \blacktriangledown – ВП, \blacksquare – ГП; е – різниця фаз на ортогональних поляризаціях, \triangle – похила 45°, \bullet – ВП, \blacksquare – ГП

При опроміненні бриж сигналом вертикальної або горизонтальної поляризації різниця фаз сигналів узгодженої та ортогональної поляризацій більше, причому спостерігається фазове запізнювання сигналу на поляризації, ортогональній опромінювальному полю.

Порівняння отриманих даних з результатами натурних експериментів показує, що деполяризація розсіяних морем сигналів обумовлена в основному дрібномасштабними структурами на поверхні моря, а декореляція миттєвих значень і кореляція змінних середніх амплітуд розсіяних сигналів – модульовальним ефектом гравітаційних хвиль.

Просторовий і частотно-спрямований спектри розсіяного морем сигналу. На цей час існує велика кількість експериментальних робіт, що стосуються проблеми дистанційного визначення параметрів морського хвилювання за характеристиками розсіяних сигналів. У цих дослідженнях основна увага приділяється вивченню тих областей просторового спектра радіолокаційного сигналу, які містять інформацію про просторові довжини морських хвиль. Разом з тим, практично немає даних про залежність просторового спектра розсіяного сигналу від азимутального кута опромінення поверхні, не вивчено його високочастотну область. Однак знання саме цих характеристик є необхідним для розроблення систем просторової селекції об'єктів на фоні відбиття від моря.

Оскільки сигнал, відбитий розсіювачами в елементі розділення, має випадковий характер, то кожна конкретна реалізація амплітуди луно-сигналу за дальністю відображає рельєф моря (пов'язана зі структурою, що відбиває) в імовірнісному сенсі. Однак статистичне усереднення безлічі незалежних реалізацій при «замороженому» рельєфі моря дає можливість знизити рівень «просторового» шуму, який виникає через подібності властивостей морської поверхні, що відбиває, сукупності випадкових відбивачів, і виокремити складову завади, обумовлену рельєфом хвиль. Флуктуації цієї складової обумовлені мінливістю морської поверхні і мають пов'язані з нею просторово-часові масштаби. Картину просторових перерізів радіолокаційного сигналу при фіксованому азимуті опромінення морської поверхні ілюструє рис. 1.9, де верхня розгортка – сигнал вертикальної поляризації, а нижня – горизонтальної на хвилі 8 мм при хвилюванні моря в 5 балів і випромінюванні похилої 45° -ї поляризації.



Рис. 1.9. Радіолокаційні відбиття від моря на хвилі 8 мм

Помітна просторова періодичність відбитого сигналу є однаковою для обох поляризацій та існує збіг у просторовому положенні викидів, обумовлених відбиттям від областей поблизу гребенів хвиль, що мають найбільшу крутизну. Для кількісного аналізу просторових характеристик здійснювалися перетворення сигналу в цифрову форму з тактовою частотою 13 МГц (роздільна здатність за дальністю 11,25 м) і подальша

його реєстрація. На рис. 1.10, а, б показано одержані при цьому радіолокаційні зображення морської поверхні у вигляді відміток яскравості.

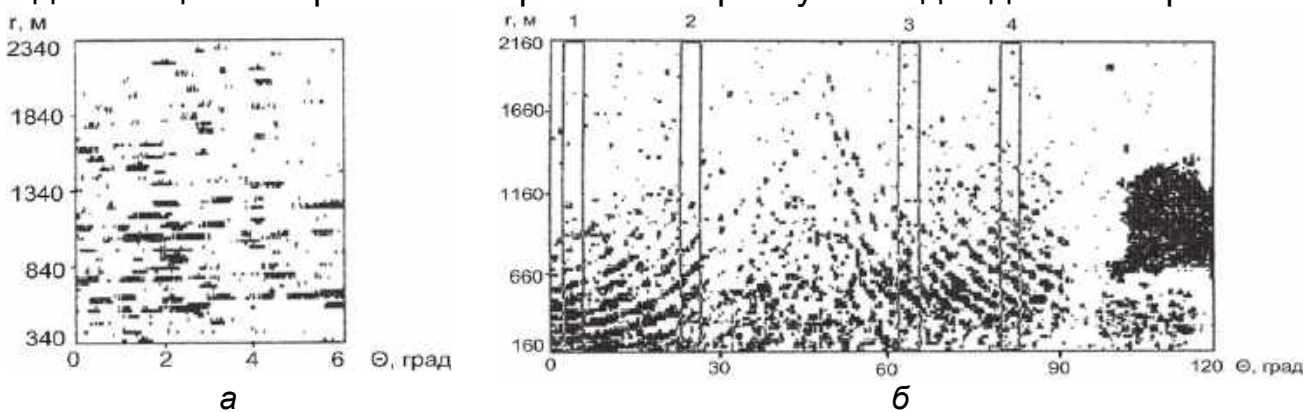


Рис. 1.10. Радіолокаційні зображення морської поверхні:
а – $\lambda = 8$ мм; б – $\lambda = 3$ см

Ці зображення були отримані на хвилях 8 мм і 3 см при вертикальній поляризації випромінювання, хвилюванні на морі близько 3 бали і однакою для обох РЛС швидкості огляду простору – 180 град/с. Для обох довжин хвиль видно періодичну за дальністю структуру, яка руйнується при напрямках опромінення поверхні вздовж гребеня хвилі (азимутальні кути близько 45° на рис.1.10, б). На цьому ж рисунку справа знаходиться ділянка суші (зачорнена). Просторовий період зображення визначається періодом морського хвилювання і є однакою для обох хвиль: 3 см і 8 мм. За радіолокаційним зображенням розраховано просторові кореляційні функції (рис. 1.11, б) і спектри (рис. 1.11, а) для ділянок 1 і 2 на рис. 1.10, б.

Для кожного з азимутів по 10 періодах зондування обчислювалися згладжені оцінки просторових спектрів. З них шляхом оберненого перетворення Фур'є отримували автокореляційні функції, номери яких відповідають номерам зон, за якими їх отримано. При зсуві на просторовий період відбиття від моря найбільших значень (близько 0,4) коефіцієнт кореляції набуває при опроміненні поверхні назустріч хвилі (зона 1), зменшуючись до 0,1 при кутах опромінення, близьких до напрямку вздовж гребенів морських хвиль (зона 2). При зміщенні променя РЛС відносно головного напрямку бігу морських хвиль спостерігається збільшення просторового періоду розсіяного морем сигналу, що виявляється в його кореляційних функціях і просторових спектрах.

Швидкість зменшення спектральної щільності просторових спектрів у високочастотній області пропорційна $x^{-1} - x^{-2}$, де x – хвильове число, і є приблизно такою ж самою, як у спектрів ухилів морської поверхні. Необхідно зазначити, що при зміщенні азимута опромінення поверхні від напрямків назустріч хвилі відбувається збільшення просторового періоду для відповідного перерізу радіолокаційного зображення моря (див. рис. 1.11).

Спектри розсіяного сигналу, отримані на хвилі 8 мм, при хвилюванні 5–6 балів на вертикальній (крива 1), горизонтальній (крива 2) поляризаціях

випромінювання й приймання, при опроміненні поверхні моря назустріч хвилі $\theta = 0^\circ$ показано на рис. 1.12, а, а під кутом $\theta = 72^\circ$ – на рис. 1.12, б.

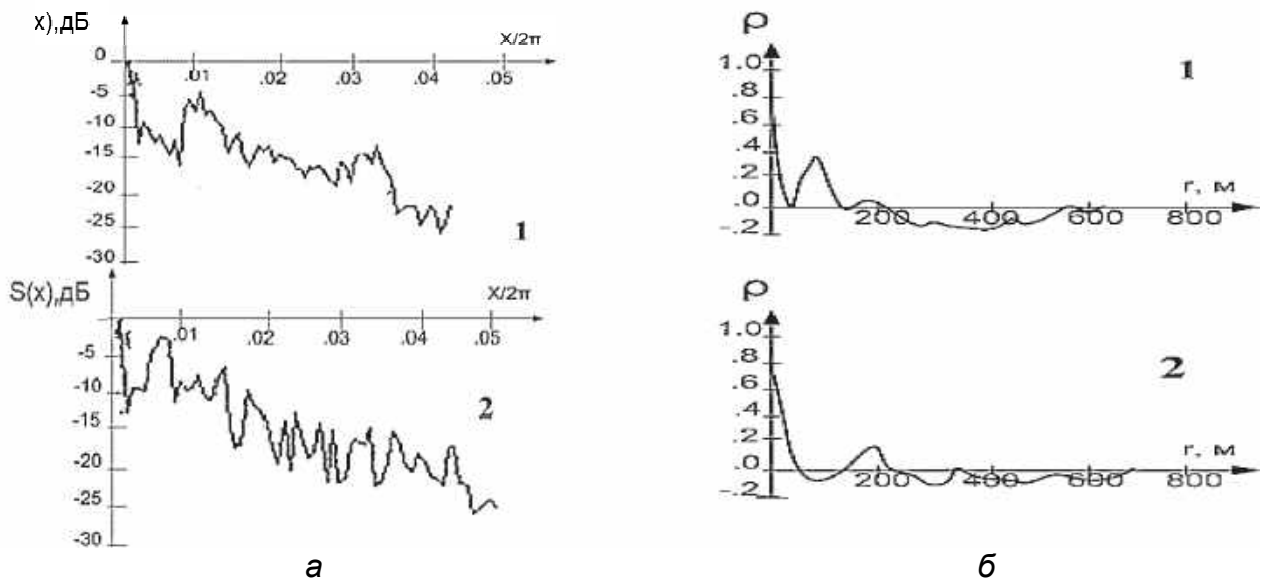


Рис. 1.11. Просторові характеристики відбиття від моря:
а – спектри; б – кореляційні функції

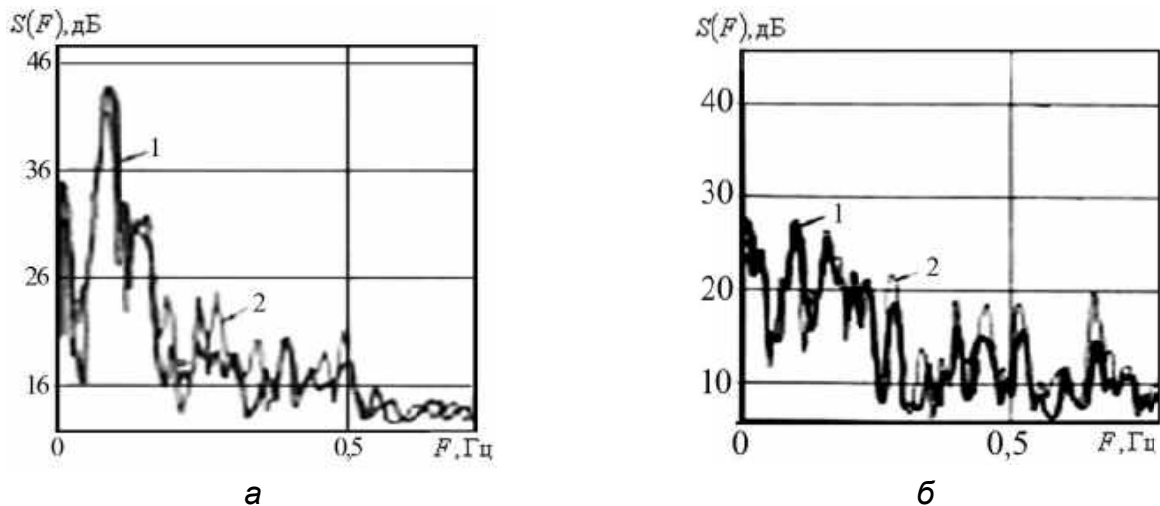


Рис. 1.12. Спектри змінного середнього амплітуд розсіяного морем сигналу для різних азимутів опромінення і поляризацій: $\lambda = 8$ мм; випромінювання похилої 45° -ї поляризації; 1 – V, 2 – H, а – $\theta = 0^\circ$; б – $\theta = 72^\circ$

При опроміненні під кутом до хвилі спектр є більш широкосмуговим. Одночасно з цим зменшуються рівні складових, що відповідають енергонесним частотам морського хвилювання (під час експерименту близько 0,1 Гц). Необхідно зазначити, що на вертикальній і горизонтальній поляризаціях спектри є приблизно однаковими, і змінення рівня спектральних складових відбувається синхронно при зміні азимута опромінення поверхні. На рис. 1.13, а, б зображено залежності окремих компонент спектра розсіяного сигналу на вертикальній і горизонтальній поляризаціях від азимута опромінення поверхні.

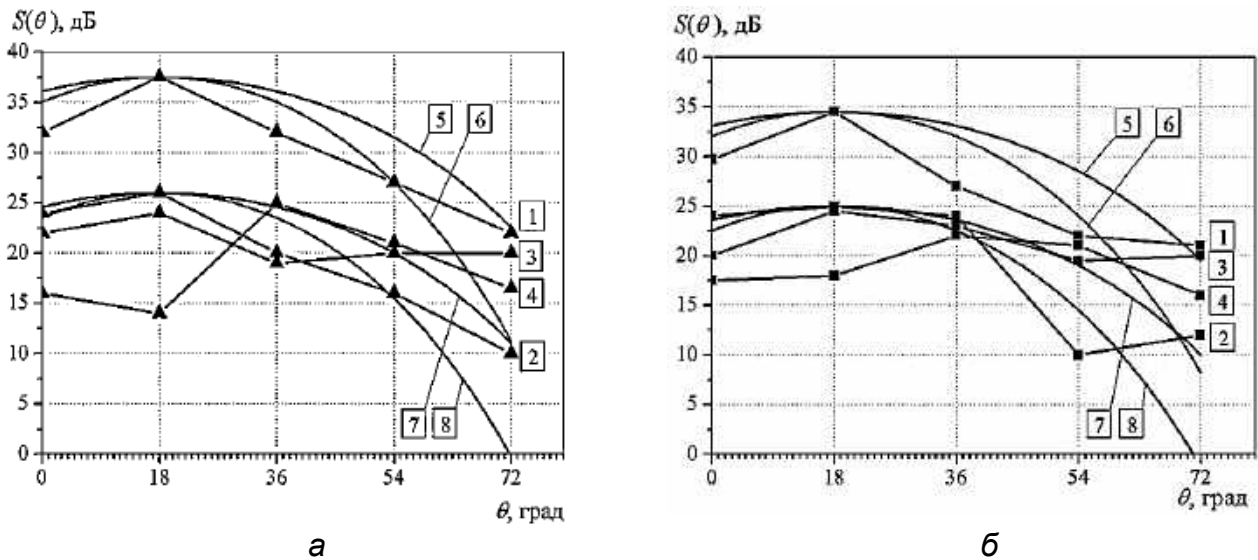


Рис. 1.13. Азимутальна залежність інтенсивності окремих спектральних компонент розсіяного морем сигналу: $\lambda = 8$ мм, випромінювання похилої 45° -ї поляризації; 1 – $F = 0,095$ Гц, 2 – $F = 0,125$ Гц, 3 – $F = 0,14$ Гц, 4 – $F = 0,19$ Гц, 5, 7 – $n \approx 6,5$; 6, 8 – $n \approx 11,4$; а – V; б – H

Найбільшу анізотропію у напрямку мають складові, що відповідають енергонесним частотам максимуму хвилювання. Кутові залежності інтенсивності розсіяного сигналу від азимутального кута опромінення поверхні знаходяться в якісній відповідності зі спектром морського хвилювання. Однак оцінки, отримані з використанням функції розподілу енергії згідно зі співвідношенням $S(\theta) \approx \cos^m(\theta)$, показують, що анізотропія спектральних компонент розсіяного сигналу в азимутальній площині, яка характеризується показником ступеня $m \approx 6-12$, є трохи більшою (криві 5–8 на рис. 1.13), ніж для морського хвилювання. Це може бути пов'язано з проявом азимутальної залежності питомої ЕПР морської поверхні, яка накладається у вигляді додаткового модульовального впливу на кутівий розподіл інтенсивності спектральних компонент хвилювання.

Слід зазначити, що зміщення у високочастотну область відносно частоти максимуму приводить до значно більш різкого зменшення ступеня просторової анізотропії розсіяного сигналу, що може бути пов'язано з бімодальним розподілом кутової енергії морських хвиль. У цілому просторові характеристики відбиття від моря в міліметровому діапазоні хвиль (на хвилях 8 мм і 4 мм) мають такі самі особливості, що й при роботі в сантиметровому й дециметровому діапазонах. У просторових і частотних діапазонах спостерігаються максимуми на частотах, близьких до енергонесного максимуму морського хвилювання. Разом з тим, визначено невідомі раніше особливості. Так, виявлено досить хороший збіг просторових і частотних спектрів змінного середнього відбиттів від моря на вертикальній і горизонтальній поляризаціях. Вимірювання частотно-спрямованих спектрів відбиттів показало, що вони мають більшу

анізотропію за напрямком, ніж характеристики морського хвилювання. Зазначені особливості, пов'язані з просторово-часовою періодичністю характеристик хвилювання, можуть використовуватися при побудові пристроїв селекції цілей на фоні моря.

1.3. Імітаційна модель розсіяного морською поверхнею сигналу

При високій роздільній здатності за дальністю і кутовими координатами фіксуються істотні відхилення законів розподілу флуктуацій відбитих поверхнею моря сигналів від стандартних, що обумовлено послідовним спостереженням ділянок поверхні з різними статистичними властивостями нерівностей, що породжує нестационарність і негауссів характер. Уперше на це звернули увагу в своїх роботах Г. Транк і Д. Мішель.

Спробою врахувати негауссів характер розсіяного морем і сушею сигналу було використання логарифмічно нормального для амплітуд і складеного нормального для квадратур законів розподілу для відбиттів від моря, а також моделі зі змінною кількістю розсіювачів для суші. Використовуючи нелінійні безінерційні перетворення гауссова випадкового процесу, з подальшим спектральним «фарбуванням» отриманого масиву можна отримати негауссові процеси зі спектральними характеристиками й законами розподілу, характерними для відбиття від моря і суші. Для синтезу негауссових процесів широко використовується моментно-кумулятивний опис їх статистик і застосовуються стохастичні поліноми, що отримали назву поліномів Кунченка. Розвитку цей підхід набув у роботах Ю. П. Кунченка та його школи. Однак створення статистичної моделі розсіяного підстильними поверхнями сигналу в класі квазістационарних негауссових випадкових процесів обмежувало її можливості для оцінювання характеристик радіотехнічних систем (РТС) в умовах впливу реальних завод, які є нестационарними. Істотним просуванням уперед при створенні моделей негауссових процесів було використання змішаних марковських процесів для опису статистики завод. Одна з компонент процесу використовувалася для опису фазового стану процесу, а інша – описувала характеристики всередині нього. Цей підхід з успіхом був використаний для оцінювання якості приймання сигналів в умовах негауссових перешкод у системах зв'язку. Однак у запропонованих моделях передбачалося, що час очікування в кожному з фазових станів до переходу в наступний підпорядковується експоненціальному розподілу і спектральні характеристики перешкоди не змінюються при зміні фазових станів. Це справджується для перешкод, що існують у каналах зв'язку. Для перешкод, що створюються відбиттям від підстильних поверхонь (суші, моря), ці умови зазвичай не виконуються. Щільність розподілу часу існування перешкоди в кожному з фазових станів може мати розподіл, що істотно відрізняється від експоненціального, і різний спектральний склад. Для суші це пов'язано з

відмінністю в спектрах зворотного розсіювання ділянок з різним рослинним покривом, різною ймовірністю їх існування і характерними просторовими розмірами для різних регіонів, а для моря – з суттєвою відмінністю в спектрах відбиття від гребенів морських хвиль і западин. Було зроблено спробу подолати труднощі, що виникають, шляхом застосування моделі розсіяного сигналу в класі двокомпонентних вкладених напівмарковських процесів. У цьому розділі викладено основні результати цих робіт.

1.3.1. Теоретичний аналіз

Статистичний опис ґрунтується на використанні вкладених двокомпонентних випадкових процесів $\{\overline{S}(t), \Theta(t)\}$, у яких одна компонента $\overline{S}(t)$ є неперервною, а інша $\Theta(t) = \nu_i$ – дискретною, а t – час або просторові координати. Ці компоненти є залежними і в загальному випадку не є марковськими. Це означає, що не накладаються ніякі обмеження на розподіл часу існування процесу в кожному з фазових станів. Нехай у кожний момент часу процес перебуває в одному з K фазових станів: $H_i \in \nu_1 \dots \nu_K$. Уважаємо також відомими початковий стан $\Theta_0 = \nu_i$ у момент часу $t=0$ і однокрокові ймовірності переходу π_{ij} , де $i, j = \overline{1 \dots K}$. Прирівняємо кожному ненульовому елементу π_{ij} матриці ймовірності переходу випадкову величину T_{ij} зі щільністю розподілу $f_{ij}(t)$. Назвемо її часом очікування в стані ν_i до переходу в стан ν_j . Якщо величини T_{ij} розподілюються за експоненціальним законом, то такий процес буде марковським. У середині кожного з ν_i станів процес будемо вважати квазістаціонарним. Він описується своєю статистичною матрицею розсіювання $[S_i(t)] = \begin{bmatrix} s_{11i}(t) & s_{12i}(t) \\ s_{21i}(t) & s_{22i}(t) \end{bmatrix}$, щільністю розподілу значень $[p_i(s)] = \begin{bmatrix} p_{11i}(s); p_{12i}(s) \\ p_{21i}(s); p_{22i}(s) \end{bmatrix}$ і спектром $[S_i(\omega)] = \begin{bmatrix} s_{11i}(\omega) & s_{12i}(\omega) \\ s_{21i}(\omega) & s_{22i}(\omega) \end{bmatrix}$. Це означає, що статистична матриця розсіювання процесу $\|S(t)\|$, матриці щільності розподілу значень $\|p(s)\|$ і спектрів $\|S(\omega)\|$ є блоковими векторами – кожний елемент i вектора є квадратною матрицею 2×2 .

Розглянемо систему Ξ , яка може перебувати в одному і тільки одному фазовому стані з множини станів E і еволюція якої здійснюється таким чином:

1. У початковий момент $t=0$ система перебуває в одному з фазових станів множини E , наприклад у стані $i \in E$, протягом деякого випадкового часу Θ_0 , після чого переходить (миттєво) у стан $j \in E$. При цьому час Θ_0 ,

проведений системою в стані i до переходу в стан j , є випадковою величиною з функцією розподілу $f_{ij}(t)$. Система, що перебуває в i -му стані, описується статистичною матрицею розсіювання, де враховуються поляризаційні особливості відбиття електромагнітної хвилі різними кластерами підстильної поверхні на різних поляризаціях

$\|S_i(t)\| = \begin{pmatrix} s_{11i}(t) & s_{12i}(t) \\ s_{21i}(t) & s_{22i}(t) \end{pmatrix}$. Кожен з її елементів $[s_{lmi}(t)]$ має свою щільність

розподілу значень $[p_{lmi}(s)]$ і характеризується своїм спектром $[S_{lmi}(\omega)]$, причому перший індекс відноситься до поляризації випромінювання, а другий $m \in (1, 2)$ – до поляризації приймання, індекс 1 позначає горизонтальну поляризацію, а 2 – вертикальну. Слід зазначити, що елементи розсіювання на кросполяризованій компоненті $s_{lm}(t)$ і всі їх характеристики (щільності розподілу, спектри) можуть визначатися елементами $s_{ll}(t)$ на поляризаціях, узгоджених з випроміненою, і коефіцієнтами деполяризації $D_{lm}^{1/2}(t) = s_{lm}(t)/s_{mm}(t)$ та їх характеристиками (щільністю розподілу значень $p_{lm}(D)$ і спектром $S_{lm}^D(\omega)$). У середині фазового стану система є ергодичною.

2. Перехід системи зі стану i в стан j відбувається з імовірністю $\pi_{ij} \geq 0$, причому $\sum_{i \in E} \pi_{ij} \leq 1$ для будь-якого $i \in E$.

3. У стані j система перебуватиме випадковий час Θ_1 і буде описуватись елементами блокової матриці розсіювання $[s_{lmj}(t)]$, щільністю розподілу $[p_{lmj}(s)]$ і спектрами $(S_{lmj}(\omega))$, після чого перейде в наступний фазовий стан \mathcal{G} .

Математичною моделлю системи є вкладені процеси, один з яких визначає змінення фазових станів і є у загальному випадку напівмарковським, а інший – поведінку системи всередині фазового стану і в багатьох випадках може описуватися ергодичним стаціонарним гауссовим процесом. Відмова від вимоги показниковості розподілу часу існування в кожному зі станів і є головною відмінністю напівмарковського процесу від ланцюга Маркова. При цьому втрачається витонченість і простота, властиві теорії ланцюгів Маркова, але з'являється можливість охопити більш широкий клас процесів, описати які неможливо за допомогою ланцюгів Маркова. Так, для розвиненого морського хвилювання розподіл періодів відрізняється від експоненціальної моделі, а отже, і розподіл викидів відбиття від моря також може відрізнятись від експоненціального розподілу. Відбиття від ясного неба створюються структурами, розподіл розмірів і відстаней між якими також відрізняється від експоненціального.

Для суші розподіли розмірів окремих кластерів, що визначаються типами місцевості, і відстаней між ними також можуть відрізнятись від

експоненціальних. Разом з тим, усередині кластера є можливість опису процесу як ергодичного з гауссовою статистикою для кожної з ортогонально поляризованих компонент і своїм спектром. Тому для статистичного опису всіх цих типів процесів зручно використовувати запропоновану модель векторного гауссового ергодичного процесу із заданою матрицею спектральних щільностей, який вкладено у напівмарковський процес. Моделювання розсіяного сигналу здійснюється таким чином:

1. Задається початковий стан, у якому перебуває процес при $t = 0$; нехай для визначеності H_i .

2. Визначається наступний фазовий стан процесу. Для цього з імовірностями (π_{ij}) вибирається випадкове число $j \in E \in (1...K)$.

3. Визначається час перебування процесу в i -му стані до переходу в j -й стан, для чого генерується випадкове число T_{ij} , що має щільність розподілу $f_{ij}(t)$. Протягом цього часу генерується векторна випадкова величина $\vec{S}_{ij}(t)$, що має щільність розподілу $p_i(\vec{S})$ і спектр $\vec{S}_i(\omega)$.

4. Проводиться змінення стану $H_i \rightarrow H_j$, і процес обчислення повторюється.

Запропонована модель може використовуватися для опису нестационарного негауссового сигналу, відбитого від моря в різних діапазонах довжин хвиль, а також при одночасному прийманні на різних поляризаціях. Для останнього випадку граф-схема сигналу має вигляд, зображений на рис. 1.14, а.

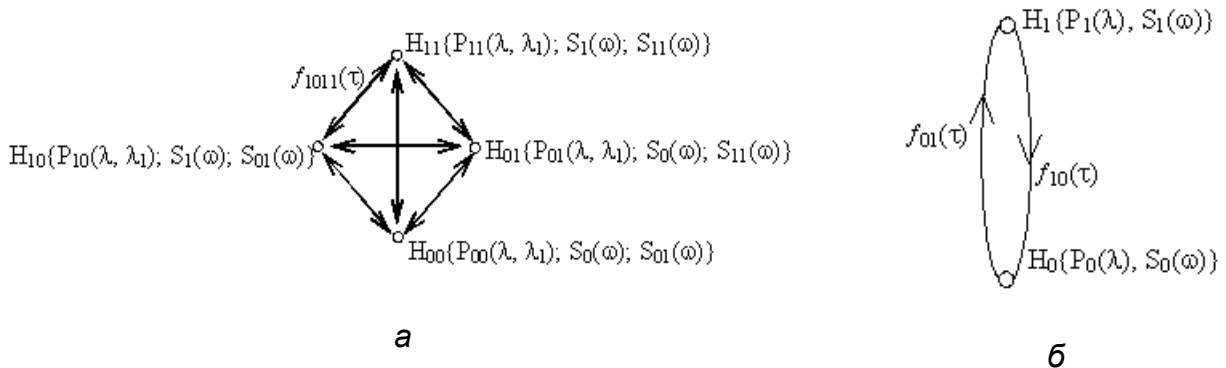


Рис. 1.14. Граф-схема розсіяного морем сигналу

Перший індекс у позначенні стану H_{ij} відноситься до узгодженої поляризації, а другий – до ортогональної. Під одиничним станом $i, j = 1$ будемо розуміти наявність у розсіяному сигналі сплеску («спайку»), обумовленого проходженням через елемент роздільної здатності РЛС гребеня морської хвилі, а під нульовим $i, j = 0$ – відсутність сплеску, тобто паузу; $p_{ij}(\lambda, \lambda_1)$ – двовимірна щільність розподілу значень на узгодженій λ та ортогональній λ_1 поляризаціях; $\{S_i(\omega); S_{ij}(\omega)\}$ – енергетичні спектри при сплесках $i = 1$ і паузах $i = 0$ на узгодженій та ортогональній

поляризаціях відповідно; $f_{ijm}(\tau)$ – щільність розподілу часу існування сигналу в стані « ij » до переходу в стан « m ».

Під час опису розсіяного морською поверхнею сигналу на одній з поляризацій випромінювання й приймання можна обмежитися двома фазовими станами. При цьому під одиничним станом H_1 – сплесками («спайками») – слід розуміти сигнал від тих ділянок морської поверхні і в ті моменти часу, коли в них знаходяться гребені морських хвиль, а під нульовим – паузи в розсіяному сигналі. Граф-схема в цьому випадку має вигляд, зображений на рис. 1.14, б.

При описі зворотного розсіювання від суші кожному з фазових станів відповідає розсіювання від ділянок суші, що відрізняються типом рослинного покриву або типом нерівностей (різними параметрами шорсткості). Для кожного з фазових станів характерним є свій спектр і закон розподілу ПЕПР відбитого сигналу, а також імовірність його існування й змінення. Останні характеристики можуть визначатися за топографічними картами регіону.

Запропонована нами модель являє собою композиційну суміш двох процесів з різними часовими й просторовими масштабами. Кожен з них може описуватися в загальному випадку напівмарковським процесом. Один із них вкладається в інший, і тому результативний процес можна назвати напівмарковським змішаним процесом. Іноді, наприклад, під час опису характеристик розсіювання від суші, може бути недостатньо використання двох рівнів вкладення напівмарковських процесів. Запропонована модель допускає узагальнення на більш високий рівень вкладення процесів, наприклад третій. При цьому на першому етапі вкладення вибір фазового стану відповідає вибору регіону (з відповідними ймовірнісними характеристиками), на другому етапі фазовий стан визначається з урахуванням існування різних ландшафтів у конкретному регіоні, а на третьому етапі конкретизуються спектральні і статистичні характеристики вже для конкретного типу ландшафту. Цей підхід може бути дуже продуктивним для опису різноманіття сигналів, розсіяних підстильними поверхнями.

Для оцінювання робочих характеристик радіотехнічних систем (РТС) необхідно знати статистичні характеристики розсіяного підстильною поверхнею сигналу, що описується розглянутою моделлю на інтервалі спостереження (t_0, t_0+t) , де t – може бути, наприклад, час накопичення інформації з елемента роздільної здатності. Визначення аналітичного виразу для спектра $S(\omega)$ і щільності розподілу значень $p(s)$ при довільному часі спостереження t становить значні труднощі. Однак для двох граничних випадків – малих, тобто $t \ll T_{ij}$, і великих значень часу спостереження $t \gg \sum_{ij}^{lk} \pi_{ij} T_{ij}$ – результати стають очевидними. При малих значеннях часу спостереження практично не відбувається змінення стану,

і щільність розподілу значень процесу, спектр і всі числові характеристики відповідають його початковому стану:

$$p(S) = p_i(S); S(\omega) = S_i(\omega), \quad (1.7)$$

причому якщо вибір початкової точки t_0 є несуттєвим, то ці характеристики реалізуються з можливостями, що відповідають фінальним імовірностям кожного зі станів P_i . При великих значеннях часу спостереження щільність розподілу значень, спектр і всі числові характеристики процесу визначаються як середньозважені характеристики в кожному зі станів H_i з вагами, обумовленими фінальними ймовірностями їх наявності:

$$p(S) = \sum_{i=1}^K p_i(S)P_i; S(\omega) = \sum_{i=1}^K S_i(\omega)P_i; \sigma^2 = \sum_{i=1}^K \sigma_i^2 P_i, \quad (1.8)$$

де σ_i^2, σ^2 – дисперсія в стані H_i і процесу в цілому.

Розглянемо фізичну інтерпретацію запропонованої моделі щодо перешкоди, створеної відбиттям від моря. Зворотне розсіювання від моря при малих кутах ковзання обумовлено: розсіюванням від западин хвиль з розташованими в них дрібномасштабними утвореннями типу резонансних бриж – стан H_0 ; відбиттями від гребенів хвиль, гребенів хвиль, що обрушуються, з розташованими на них дрібномасштабними утвореннями, піною, бризками – стан H_1 . Оскільки в межах елемента роздільної здатності перебуває досить велика кількість елементарних розсіювачів, то є підстави вважати, що щільність розподілу миттєвих значень розсіяного сигналу для кожного з фазових станів буде підпорядковуватися нормальному закону, а щільність розподілу амплітуд – релеївському. Через некорельованість розсіювачів ЕПР відбитого сигналу в паузах $\sigma(0)$ буде лінійно збільшуватись зі збільшенням розмірів елемента роздільної здатності РЛС:

$$\sigma(0) = \sigma^0(0) \frac{c\tau_u}{2} \theta_\beta D, \quad (1.9)$$

де $\sigma^0(0)$ – ПЕПР дрібномасштабних утворень на морській поверхні; D – дальність до відбивального елемента поверхні; $\frac{c\tau_u}{2}$ – розмір елемента роздільної здатності за дальністю; τ_u – тривалість імпульсу; θ_β – ширина діаграми антени в азимутальній площині.

Згідно з двомасштабною моделлю розсіювання доплерівський спектр відбитого сигналу визначається через спектр орбітальних швидкостей морських хвиль, який, своєю чергою, залежить від спектра підвищень

морської поверхні. Використовуючи для високочастотної області спектра підвищень апроксимацію, запропоновану А. У. Філіпсом, показано, що високочастотна частина спектра розсіяного морем сигналу спадає пропорційно $F^{-3} \dots F^{-4}$. При проходженні через елемент роздільної здатності загострених хвиль або гребенів морських хвиль, що руйнуються, спостерігаються сплески інтенсивності розсіяного сигналу, що відповідають в розглянутій моделі стану H_1 . Дифракція сигналу на гребенях хвиль пояснює поляризаційні відмінності, які спостерігаються для розсіяного сигналу в сантиметровому й дециметровому діапазонах довжин хвиль. При переході до міліметрового діапазону переважальним механізмом є відбиття від гребенів хвиль, що руйнуються, і бризок.

Для цього механізму поляризаційна вибірковість виражена слабо. Одночасно з відбиттям від гребенів хвиль, що обрушуються, у розсіяному сигналі є компонента, пов'язана з відбиттям від дрібномасштабних утворень типу резонансних бриж. Використовуючи статистичну незалежність компонент, обумовлених різними механізмами, вираз для ЕПР моря при сплесках запишемо у такому вигляді:

$$\sigma(l) = \sigma(0) + \sigma^0(l) D \theta_\beta, \quad (1.10)$$

де $\sigma^0(l)$ – ПЕПР одиниці довжини гребеня морської хвилі.

При сплесках, що формуються внаслідок розсіювання на гребенях морських хвиль, високочастотна частина спектра розсіяного сигналу, пов'язана з відбиттям від бризок, має меншу, також пропорційну F^n швидкість спадання спектральної щільності, де n у граничному випадку може дорівнювати близько 2. Ширина спектра і центральний зсув частоти розсіяного сигналу при сплесках можуть істотно перевищувати аналогічні параметри при паузах. Як параметри законів розподілу, що описують час перебування процесу в станах H_0 і H_1 , використовуються: τ_e – середній час викиду перешкоди, що визначається часом існування гребеня в елементі роздільної здатності РЛС; T – середній період процесу, що відповідає середньому періоду морського хвилювання:

$$T = 0,56 U, \quad (1.11)$$

де U – швидкість вітру.

Закон розподілу періодів морського хвилювання має вигляд

$$f_T(\tau) = \exp \left[-0,712 \left(\frac{\tau}{T} \right)^3 \right]. \quad (1.12)$$

Пропонована статистична модель розсіювання від морської поверхні дає змогу пояснити деякі експериментальні залежності, що раніше спостерігалися, але були незрозумілими в межах наявних моделей. ПЕПР моря σ_{Σ}^0 у розглянутій моделі розсіювання визначається через ПЕПР сплесків і пауз (1.10) з використанням співвідношення

$$\sigma_{\Sigma}^0 = \sigma^0(0) + \frac{2}{c\tau_u} \sigma^0(1)P, \quad (1.13)$$

де P – імовірність наявності сплесків, яка, своєю чергою, визначається через щільність розподілу часу існування процесу в кожному з фазових станів:

$$P = \frac{\int_0^{\infty} \tau f_{10}(\tau) d\tau}{\int_0^{\infty} \tau (f_{01}(\tau) + f_{10}(\tau)) d\tau}. \quad (1.14)$$

Відношення дисперсій компонент у різних фазових станах, що буде характеризувати ступінь негауссовості процесу, визначається через співвідношення ЕПР розсіяного сигналу при сплесках і паузах:

$$\gamma^2 = 1 + \frac{\sigma^0(1)}{\sigma^0(0)} \frac{2}{c\tau_u}. \quad (1.15)$$

Видно, що при $\tau_u \rightarrow \infty$ спостерігається виродження двокомпонентного закону розподілу (1.8) (складеного нормального для миттєвих значень та релеївського для амплітуд) в однокомпонентний (нормальний або релеївський). Тому за величиною γ зручно оцінювати ступінь відмінності закону розподілу розсіяного морем сигналу від стандартних моделей. Цей параметр будемо надалі називати параметром негауссовості. Необхідно зазначити, що така трансформація закону розподілу і спектра розсіяного сигналу спостерігалася і в експериментах. При розмірах елемента роздільної здатності РЛС, менших від середнього періоду морських хвиль, розподіл розсіяного сигналу істотно відрізнявся від гауссового і при великих часах спостереження описувався складеним нормальним законом для квадратур або логарифмічно нормальним законом для амплітуд. Якщо ж розмір елемента роздільної здатності перевищує середній період морського хвилювання, то закон розподілу флуктуацій розсіяного сигналу близький до нормального. Аналіз співвідношень (1.8) – (1.11), (1.15) і залежності окремих параметрів, що входять до їх складу, від метеоумов,

характеристик траси та РТС дає змогу прогнозувати змінення статистичних характеристик розсіяного морем сигналу. Зупинимось на цьому моменті трохи докладніше. Згідно з двомасштабною моделлю розсіювання ПЕПР моря на вертикальній поляризації (ВП) має бути більшою, ніж на горизонтальній (ГП). Це означає, що для пауз $\sigma_{ГП}^0(0) < \sigma_{ВП}^0(0)$. З іншого боку, ЕПР сплесків для сантиметрового діапазону визначається розсіюванням на загострених гребнях морських хвиль і є більшою на горизонтальній поляризації. Водночас у міліметровому діапазоні переважальним є розсіювання від хвиль, що обрушуються, і бризок, яке є поляризаційно невідчутним. Отже, при слабкому вітрі, коли сплески є рідкісними і мають невелику інтенсивність, тобто $\sigma(1) \approx \sigma(0)$, переважають відбиття на вертикальній поляризації. При сильному вітрі $\sigma(1) \gg \sigma(0)$, і результівна ЕПР морської поверхні буде визначатися насамперед сплесками. У сантиметровому діапазоні більш інтенсивними є відбиття на горизонтальній поляризації, а в міліметровому діапазоні вони є приблизно однаковими на обох поляризаціях. Ця обставина підтверджується результатами експериментальних досліджень. Дистанційна (кутова) залежність приблизно однакова для обох поляризацій і визначається в основному залежністю $\sigma^0(1)$ від дальності. Це пов'язано з тією обставиною, що викиди перешкоди створюються ділянками поверхні поблизу гребенів хвиль, тобто найвище розташованими, з великим рівнем опромінення, ніж ділянки западин. Унаслідок цього на великій дальності розсіяний морем сигнал набуває дискретної структури, що виявляється в зростанні ступеня негауссовості його статистик, збільшенні доплерівського зсуву частоти й розширенні спектра розсіяного сигналу.

Розглянемо трохи докладніше закони розподілу миттєвих значень квадратур і амплітуд розсіяного морем сигналу. Оскільки в елементі роздільної здатності РЛС укладається досить велика кількість елементарних розсіювачів у моменти як сплесків, так і пауз, то досить обґрунтованим є опис розсіяного сигналу в кожному з фазових станів нормальним законом розподілу для квадратур і релеївським для амплітуд. З урахуванням (1.8) це означає, що при великих інтервалах спостереження розсіяний сигнал може описуватися складеним нормальним законом розподілу для квадратур і складеним релеївським для амплітуд. Прогнозовані з використанням пропонованої моделі ефекти, а саме, змінення спектральних характеристик розсіяного сигналу, його законів розподілу й ЕПР, підтверджуються натурними експериментами. Необхідно зазначити, що в більшості експериментальних робіт дослідження розсіяного морем сигналу здійснюється як квазістаціонарний процес, що не дає змоги використовувати отримані результати для імітаційного моделювання і, у кінцевому підсумку, оцінювання робочих характеристик РТС. Пропонована модель дає змогу досить просто прогнозувати змінення статистичних характеристик (законів розподілу, спектрів, ПЕПР) відбитого морем сигналу при змінні довжини

хвилі, поляризації випромінювання, розмірів елемента роздільної здатності і стану морської поверхні, а, крім того, як буде показано далі, оцінити робочі характеристики радіотехнічних систем в умовах впливу перешкод від моря.

1.3.2. Експериментальне вивчення статистичних характеристик

До теперішнього часу не набуло достатньо повного відображення в літературі питання про розподіл квадратур на виході фазового детектора когерентної РЛС, а експериментальні дані, що стосуються статистик розсіяного морем сигналу в міліметровому діапазоні хвиль, є дуже обмеженими. Вони не відповідають на запитання, як будуть змінюватися закони розподілу розсіяного сигналу при змінненні дальності спостереження, тривалості зондувального імпульсу, довжини хвилі й поляризації опромінювального поля. Для їх вивчення використовувалися луно-сигнали з виходів фазових детекторів вимірювальних РЛС з довжиною хвилі 3 см, 8 мм і 4 мм. Використання вибірки $10^5 \dots 10^6$ некорельованих відліків дало змогу вивчити функції розподілу до рівня забезпеченості $10^{-4} \dots 10^{-5}$, що необхідно для розроблення автоматичних виявителів цілей з малим рівнем імовірності хибної тривоги (рис. 1.15).

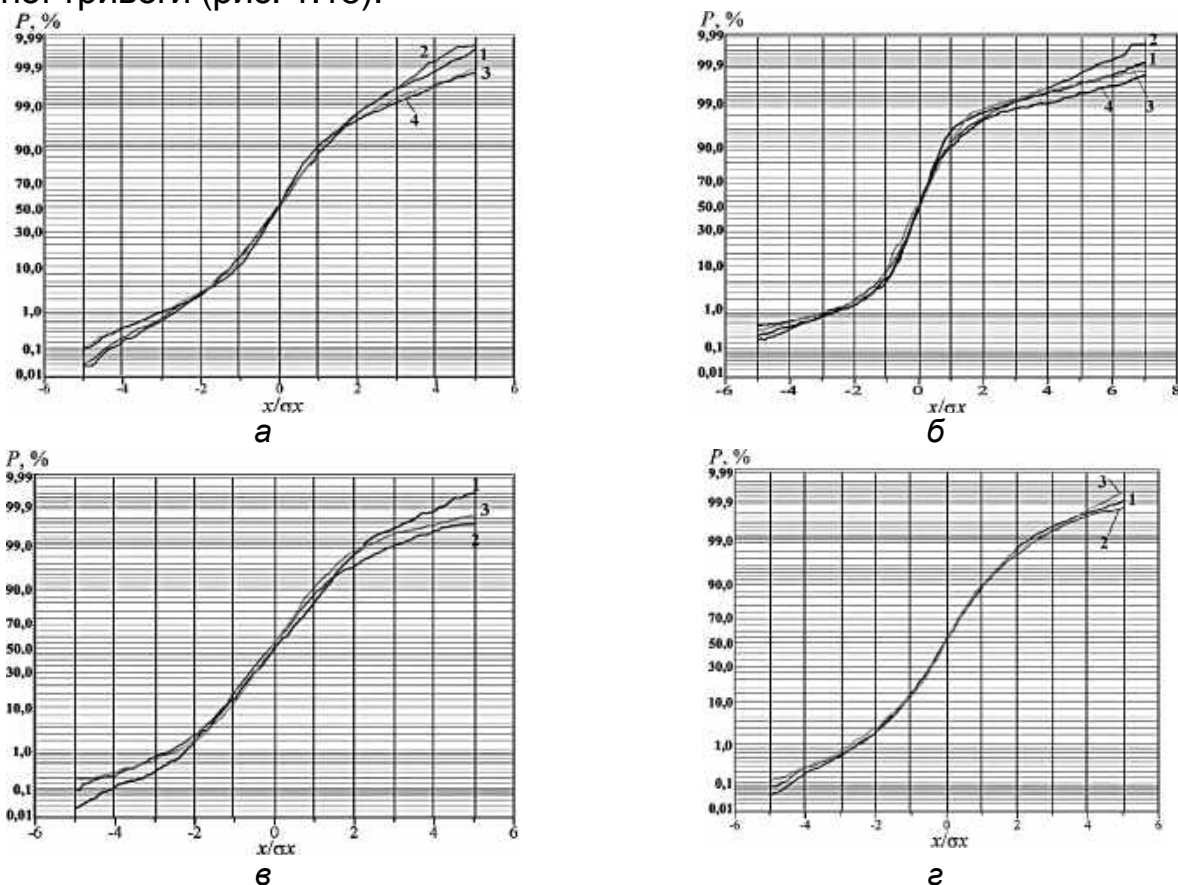


Рис. 1.15. Інтегральні функції розподілу квадратур відбиття від моря:
 А – $\psi = 9$ град; $\lambda = 3$ см – 1, 3; $\lambda = 8$ мм – 2, 4; ВП – 1, 2; ГП – 3, 4; б – ГП; $\lambda = 3$ см – 1, 3; $\lambda = 8$ мм – 2, 4; $\psi = 12$ град – 1, 2; $\psi = 5$ град – 3, 4; в – $\lambda = 3$ см; г – $\lambda = 8$ мм; $\psi = 12$ град – 1; $\psi = 4,6$ град – 2; $\psi = 3$ град – 3

У масштабі, що спрямляє нормальний закон, на рис. 1.15 показано інтегральні функції розподілу миттєвих значень з виходів фазових детекторів синхронно працюючих вимірювальних РЛС (хвилі 3 см і 8 мм) при різних поляризаціях (ВП, ГП) випромінювання і кутах ковзання.

По осі абсцис відкладено нормоване на середньоквадратичне відхилення значення квадратури. З рис. 1.15, а видно, що при горизонтальній поляризації як у сантиметровому (криві 3), так і в міліметровому (криві 4) діапазонах хвиль спостерігається підвищення ймовірності появи великих значень порівняно з нормальним законом розподілу. Ці розбіжності є дещо меншими при вертикальній (рис. 1.15, а – криві 1, 2) і круговій поляризаціях. Синхронні вимірювання в сантиметровому (рис. 1.15, а – криві 1, 3) і міліметровому (рис. 1.15, а – криві 2, 4) діапазонах довжин хвиль показують, що при збігу поляризацій випромінювання для обох хвиль статистики відбиття від моря є приблизно однаковими. При зменшенні кута ковзання сильніше виявляється дискретний характер розсіяного сигналу, що приводить до зростання його негауссовості (рис. 1.15, б). Істотно підвищуються ймовірності появи великих значень у $10 \dots 10^2$ разів порівняно з гауссовим шумом. Як у сантиметровому (рис. 1.15, в), так і в міліметровому (рис. 1.15, г) діапазонах довжин хвиль зменшення кута ковзання спричиняє зростання ступеня негауссовості в розсіяному сигналі. Його структура стає більшою мірою дискретною, що нагадує відбиття від надводних об'єктів.

Протилежним чином впливає на вид закону розподілу збільшення розмірів елемента роздільної здатності РЛС. Відбувається лінеаризація функції розподілу, тобто можна казати про зменшення ступеня негауссовості перешкод. Для оцінювання можна використовувати пропорційність між ймовірністю викиду, отриманою експериментально при тривалості імпульсу $\tau = 0,2$ мкс, і шуканою тривалістю імпульсу τ :

$$P(\tau) = \frac{\tau}{0,2} P(\tau = 0,2) \leq 1. \quad (1.16)$$

Слід зазначити, що на дальностях, менших від критичної, коли ще не відбувся перехід в залежності питомої ЕПР до інтерференційної області при опроміненні поверхні назустріч хвилі, змінення радіальних розмірів елемента роздільної здатності РЛС від 30 до 60 м приводить практично до повної нормалізації статистик відбиття. На великих відстанях, де вже починають позначатися ефекти затінення, це не відбувається, навіть при істотно більшій тривалості імпульсу (розмірі, що відображає елемент поверхні).

Установлені залежності розподілів миттєвих значень від поляризації і кута ковзання пояснюються в межах запропонованої феноменологічної моделі. Задовільна відповідність апроксимації експериментальних даних складеному нормальному закону розподілу (див. рис. 1.4, б) дає змогу

стверджувати, що всередині кожного з фазових станів (сплеск/пауза) перешкода задовільно описується нормальним законом розподілу.

Рисунки 1.16, 1.17 ілюструють вплив довжини хвилі (рис. 1.16, а, б), кута ковзання (рис. 1.16, в, г), азимута (рис. 1.17, а, б), швидкості вітру (рис. 1.17, в, г) на ймовірність викидів і параметр негауссовості γ відбиття від моря. Видно (див. рис. 1.16, а, б), що ймовірність викиду практично не змінюється при переході від сантиметрового до міліметрового діапазону. Це пояснюється тим, що при відсутності затінення, тобто при кутах ковзання, більших від критичного, цей параметр визначається ймовірністю появи в елементі роздільної здатності гребеня морської хвилі й не залежить від частоти випромінювання. Параметр негауссовості γ має дещо більші значення в сантиметровому, ніж у міліметровому діапазоні хвиль (див. рис. 1.15, б). Це пов'язано з тим, що зі зменшенням довжини хвилі зменшується різниця рівнів поля, що опромінює западину й вершину морської хвилі, через звуження інтерференційної пелюстки поля за висотою. Це зменшує різницю рівнів сигналів у паузах і сплесках і, в остаточному підсумку, значення параметра негауссовості. На рис. 1.16, в, г показано залежності ймовірності викидів від кута ковзання (дальності до відбивального елемента поверхні) у сантиметровому (див. рис. 1.16, в) і міліметровому (див. рис. 1.16, г) діапазонах хвиль. На рис. 1.16 зображено залежності ймовірності викидів від кута ковзання

$$P(\psi) = P_0 \frac{(\psi / \psi_{кр})^4}{1 + (\psi / \psi_{кр})^4}, \quad (1.17)$$

аналогічні тим, що описують поведінку питомої ЕПР моря. При цьому критичний кут визначається формулою

$$\psi_{кр} = \frac{\lambda}{5H_B}, \quad (1.18)$$

де H_B – середня висота морських хвиль.

Слід зазначити, що якщо в сантиметровому діапазоні хвиль зменшення кута ковзання спричиняло зменшення ймовірності викидів, то в міліметровому діапазоні вона практично не змінювалася залежно від дальності (кута ковзання). Це пов'язано з тим, що при зменшенні довжини хвилі залежність виявляється, починаючи з менших кутів ковзання (більшої дальності), оскільки при цьому відбувається зменшення критичних кутів, починаючи з яких виявляються інтерференційні ефекти. Зменшення кута ковзання приводить до зменшення ймовірності викидів унаслідок впливу затінювань, коли відбиття можуть приходити тільки від найвищих хвиль, ступінь опромінення яких визначається інтерференційною структурою поля над поверхнею розділу.

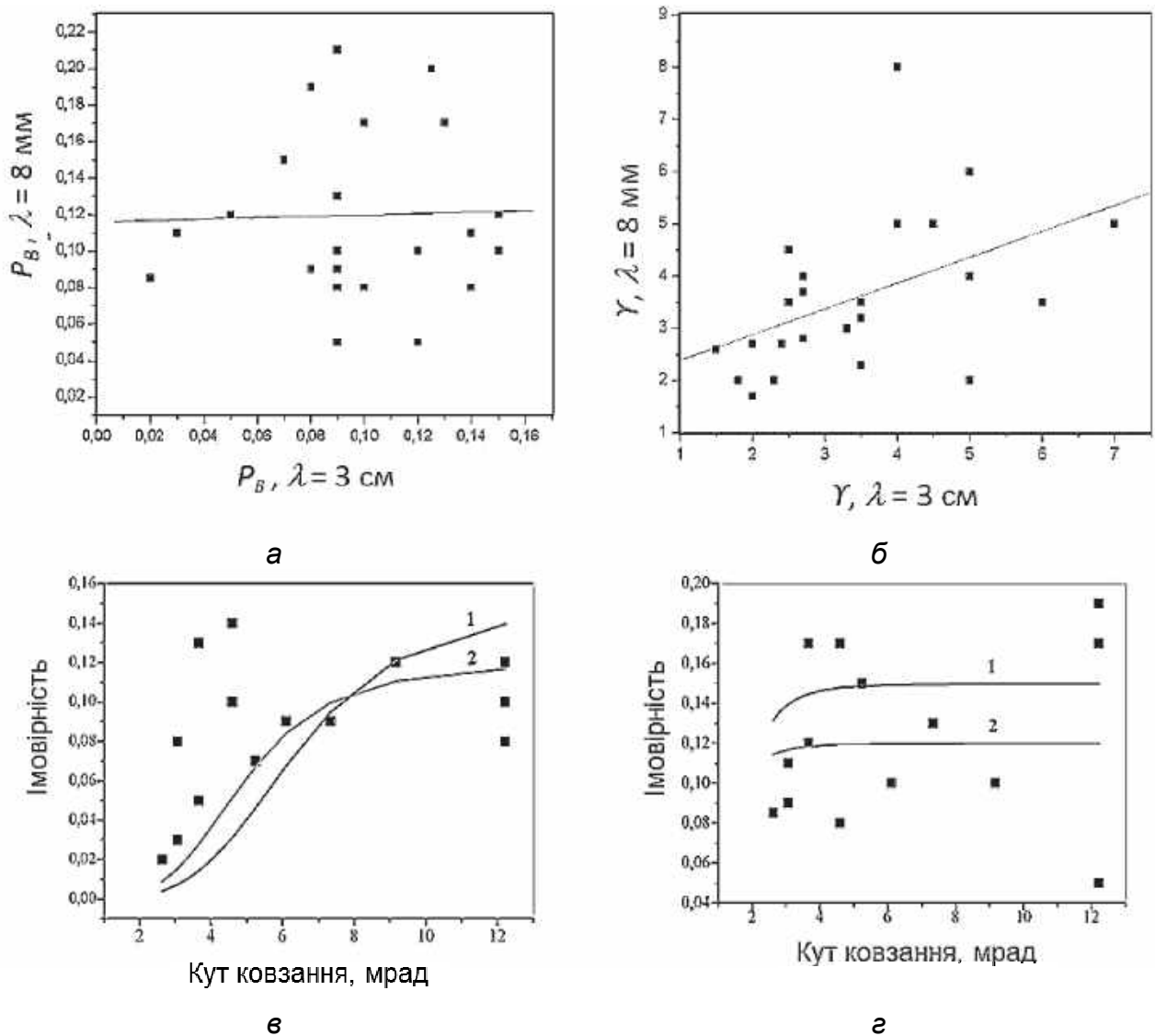


Рис. 1.16. Вплив довжини радіохвилі й кута ковзання на характеристики викидів перешкод від моря: а – імовірності викидів на хвилях 3 см і 8 мм; б – відношення інтенсивностей компонент γ на хвилях 3 см і 8 мм; в, г – залежність імовірності викидів від кута ковзання на хвилі 3 см (в) і 8 мм (г); 1 – $P_0 = 0,15$; $H_B = 1$ м; 2 – $P_0 = 0,12$; $H_B = 1,3$ м

При подовженні радіохвилі ступінь опромінення гребенів хвиль на великій дальності зменшується, а отже, внесок у формування викидів будуть давати тільки найвищі гребені морських хвиль. При цьому буде зменшуватися ймовірність спостереження викидів, що й має місце в експериментах. У сантиметровому діапазоні хвиль імовірність викидів на великих відстанях (при малих кутах ковзання) є істотно меншою, ніж на міліметрових хвилях. На рис. 1.17 показано нормовані на середнє значення по серії дослідів імовірності викидів і параметрів негауссовості для різних азимутів опромінення поверхні відносно напрямку вітру. Видно, що азимут опромінення практично не позначається на характеристиках викидів як у сантиметровому, так і в міліметровому діапазонах хвиль. Дуже слабо впливає і швидкість вітру, від якої залежить ступінь хвилювання морської поверхні (рис. 1.17, в, г).

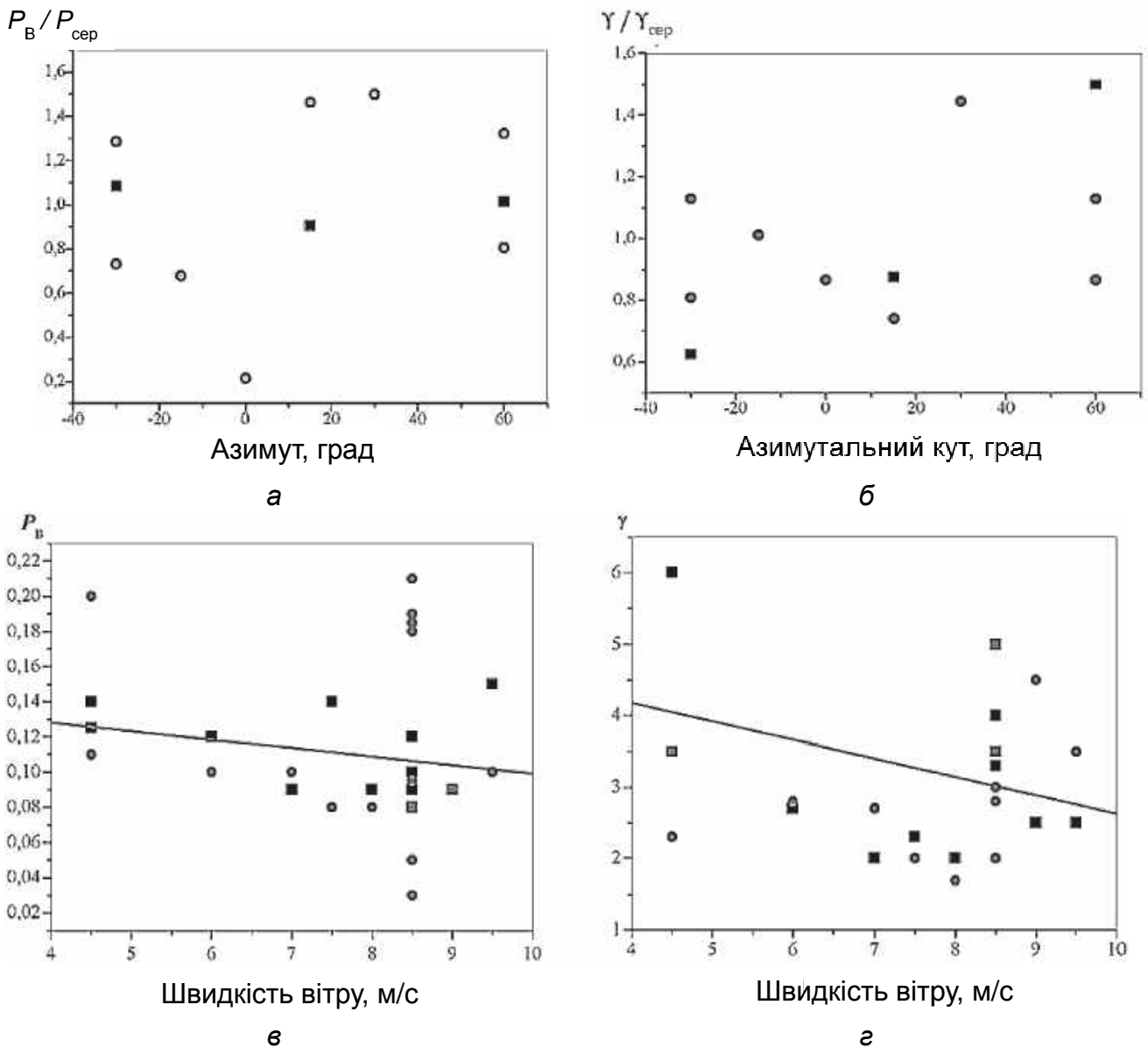


Рис. 1.17. Вплив азимута опромінення (а, б) і швидкості вітру (в, г) на характеристики викидів перешкод від моря: залежність характеристик викидів від азимута – а, б; швидкості вітру – в, г; імовірність викиду – P ; гама – $\gamma / \gamma_{сер}$; середнє по серії значення ймовірності викиду й гама – $P_{сер}$; γ ; ■ – $\lambda = 3$ см; ● – $\lambda = 8$ мм

Експериментально вивчалися закони розподілу часу існування викидів $f_{10}(\tau)$ і пауз $f_{01}(\tau)$, їх доплерівські спектри $S_1(\omega)$, $S_0(\omega)$, а також імовірність появи викидів, відношення ЕПР морської поверхні в різних фазових станах H_1 і H_0 .

Класифікаційна задача поділу множини прийнятих значень на дві підмножини (паузи – H_0 , сплески – H_1) може бути сформульована як задача вимірювання поточного значення інтенсивності й виявлення моментів її ступеневого змінення, які й відповідають зміненню фазових станів процесу. Оскільки дисперсія при сплесках є вищою, ніж при паузах, то розпізнавання фазових станів здійснюється шляхом оцінювання поточного значення

дисперсії $\hat{\sigma}^2$ і порівняння її із середнім значенням $\hat{\sigma}_\Sigma^2$, яке використовується як порогове. При його перевищенні в задану кількість разів робиться висновок про наявність сплеску перешкоди й фіксується часова координата його початку, а після зменшення нижче порогового значення – координата кінця сплеску. Послідовність координат початків і кінців дає змогу оцінити щільність розподілу часу існування викидів і пауз, крім того, вона може використовуватися для розподілу по двох каналах вхідного сигналу, що дає змогу досліджувати енергетичні спектри сплесків і пауз. Суттєвим моментом, від якого, у кінцевому підсумку, залежить рівень помилок, що одержуються при розв'язанні класифікаційної задачі, є вибір порога прийняття рішення й кількості відліків (визначається часом спостереження), за якими визначається оцінка змінного середнього інтенсивності перешкоди. Оптимальний поріг, який мінімізує повну ймовірність помилки класифікації, можна оцінити, припускаючи, що всередині кожного з фазових станів флуктуації амплітуди розсіяного морем сигналу описуються законом Релея. Оцінки показують, що при $\gamma \geq 6$ дБ, коли має сенс проводити розпізнавання гіпотез H_0 і H_1 , і кількості накопичуваних некорельованих відліків більше 10 спостерігається відносна стійкість порогового рівня Π :

$$\Pi / \hat{A} = 1,5 \dots 2,$$

де \hat{A} – оцінка середньої амплітуди процесу.

При цьому ймовірність повної помилки класифікації при змінненні P і γ в досить широких межах не перевищує 0,1 (рис. 1.18).

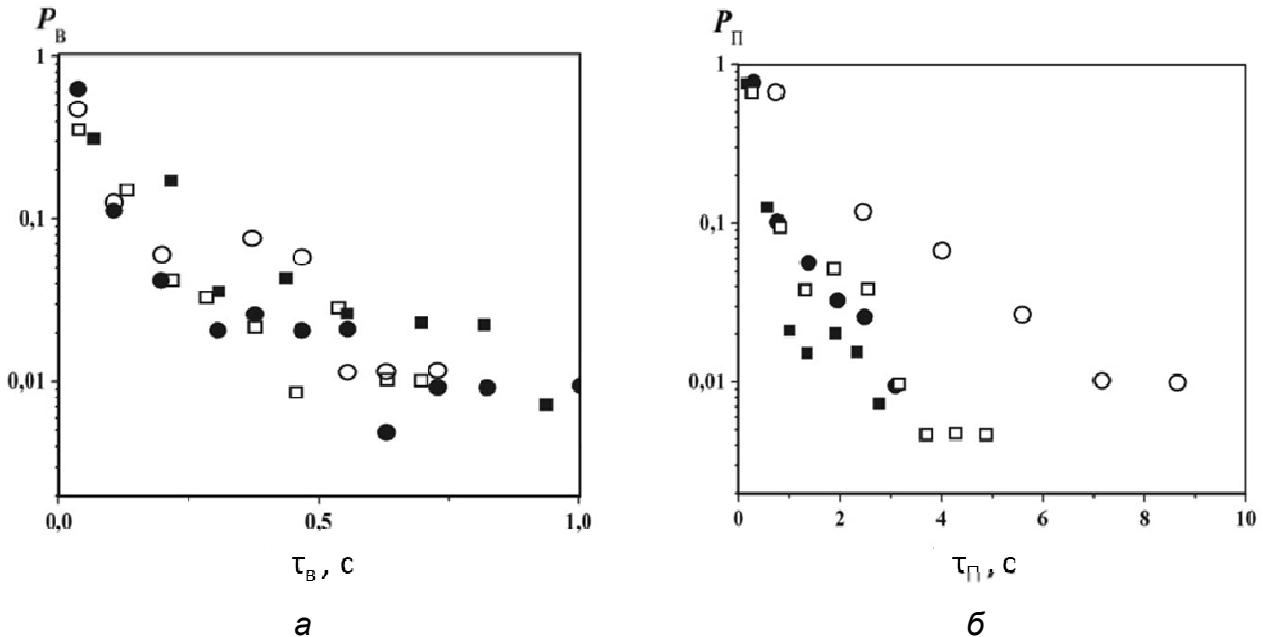


Рис. 1.18. Гістограми розподілу тривалості сплесків і пауз: а – сплески; б – паузи; $\psi = 5$ мрад, $U = 7$ м/с; хвилювання 3 бали; $\lambda = 3,2$ см, ГП,

● – $\Pi = 1,5\bar{A}$; ○ – $\Pi = 2,0\bar{A}$; $\lambda = 8$ мм, ГП, ■ – $\Pi = 1,5\bar{A}$; □ – $\Pi = 2,0\bar{A}$

На рис. 1.18, а, б зображено гістограми розподілу тривалості сплесків і пауз для різних діапазонів частот, побудовані в логарифмічному масштабі. Різними значками показано дані, отримані при виборі класифікаційного порога, що на 3 і 6 дБ перевищує середнє значення інтенсивності перешкоди.

Для більшості з наведених даних характерним є експоненціальне або близьке до нього спадання частоти появи сплесків і пауз залежно від тривалості, принаймні, до рівня забезпеченості 1...5 %. Щільності розподілу часу існування слабо змінюються при зміні діапазону довжин хвиль.

У табл. 1.3 наведено результати дослідження характеристик викидів відбиття від моря в сантиметровому й міліметровому діапазонах хвиль при вітрі 6...7 м/с і хвилюванні 2–3 бали. Видно, що ймовірність наявності викидів в обох діапазонах є приблизно однаковою. Ймовірнісні характеристики існування викидів на ортогональних поляризаціях приймання також наведено в табл. 1.3.

Таблиця 1.3

Ймовірнісні характеристики викидів у відбитому від моря сигналі на хвилях 3 см і 8 мм

Поляризація випромінювання приймання	Кут ковзання при проходженні, мрад	Ймовірність викиду на хвилі 3 см	Ймовірність викиду на хвилі 8 мм	Ймовірність збігу викидів	Рівень порога	Кількість днів вимірювань
Горизонтальна	3...10	0,27	0,26	0,06	1,5	6
Вертикальна	3...6	0,22	0,26	0,05	1,5	3
Горизонтальна	3...10	0,09	0,10	0,02	2	6
Вертикальна	3...6	0,09	0,10	0,01	2	3

Ймовірності існування викидів на різних хвилях і поляризаціях входять як фінальні ймовірності P_{ij} у статистичну модель розсіяного морем сигналу. Ймовірності викидів є приблизно однаковими в сантиметровому й міліметровому діапазонах хвиль. При цьому ймовірність збігу викидів у сантиметровому й міліметровому діапазонах хвиль становить 2...6 % на вертикальній і 1...5 % на горизонтальній поляризаціях. Це означає, що комплексування радіолокаційних систем сантиметрового й міліметрового діапазонів може істотно знизити ймовірність проходження помилкових викидів перешкоди від моря на вихід.

Дослідження просторових характеристик викидів і пауз проводилося за методикою, яку застосовували раніше для вивчення часових характеристик викидів. Як приклад на рис. 1.19 показано радіолокаційні зображення ділянок моря на хвилях 8 мм і 3 см, функції розподілу амплітуди відбитого сигналу й обсягів викидів і пауз. Функції розподілу зображено в масштабах, що лінеаризують релеївський закон розподілу. По осі абсцис відкладено параметр, нормований на його середньоквадратичне значення.

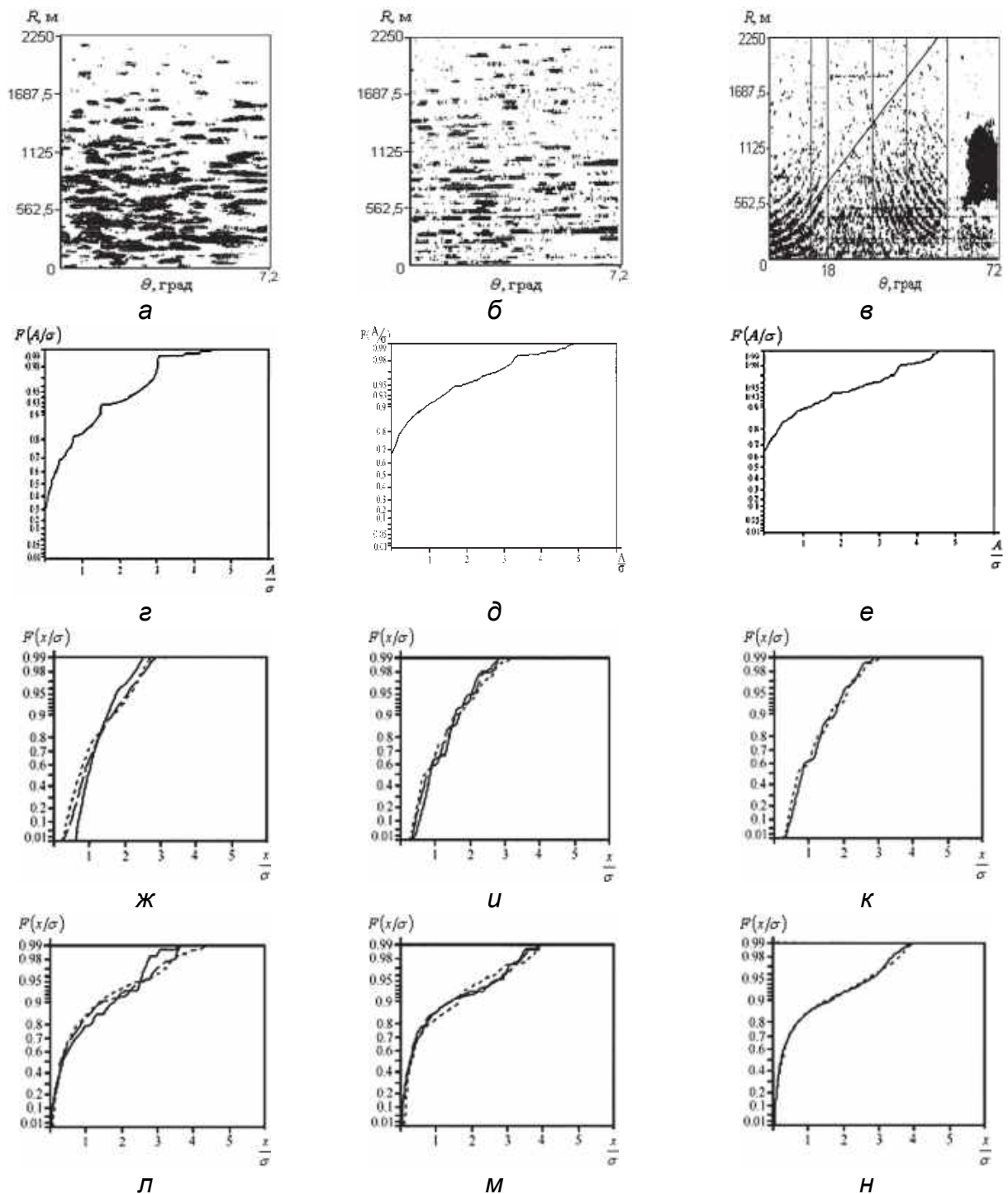


Рис. 1.19. Характеристики відбиття від моря: $\lambda = 8$ мм; 8 м/с, хвилювання 3 бали (а, б, г, д, ж, и, л, м); $\lambda = 3$ см; 8 м/с, хвилювання 4 бали (в, е, к, н); РЛ-зображення моря (а, б, в); розподіл амплітуд (г, д, е); тривалість викидів (ж, и, к); тривалість пауз (л, м, н);
 — $\Pi = 3\bar{A}$; — — — $\Pi = 2\bar{A}$; ······ $\Pi = \bar{A}$; Π – поріг прийняття рішення

Видно, що розподіли амплітуди розсіяного сигналу (рис. 1.19, г–е) і відстаней між викидами (рис. 1.19, л–н) істотно відрізняються від релеївського закону розподілу. Водночас для опису просторової протяжності викидів (рис. 1.19, ж–к) можна використовувати стандартні моделі. Зміна порога прийняття рішення практично не впливає на вид закону розподілу викидів і пауз.

Таблиця 1.4

Просторові характеристики викидів відбиття від моря

Хвиля, см	Вітер, бали	Сектор, градуси	Азимут, градуси	Викиди			Паузи			Період $T_X, м$	Імовірність P	Поріг Π / A
				$m_X, м$	$\sigma_X, м$	V	$m_X, м$	$\sigma_X, м$	V			
3,0	8 м/с, 4 бали	24	0	30,3	18,1	0,6	204,1	294,9	1,44	234,4	0,13	3
				35,0	23,7	0,68	171,5	236,3	1,38	206,5	0,17	2
				41,6	32,5	0,78	116,0	162,7	1,40	157,6	0,26	1
				33,9	23,7	0,7	245,4	352,7	1,44	279,2	0,12	3
				36,2	26,7	0,73	186,8	268,4	1,44	223,0	0,16	2
				43,1	41,9	0,97	133,8	179,8	1,34	222,9	0,19	1
0,8	8 м/с, 3 бали	7,2	90	33,9	19,8	0,57	245,3	396	1,61	279,2	0,12	3
				38,6	24,2	0,62	198,9	336,4	1,69	237,3	0,16	2
				48,5	38,0	0,78	152,5	256,2	1,68	201	0,24	1
				33,9	21,6	0,64	237	366,8	1,55	270,9	0,13	3
				37,5	26,1	0,7	203,4	319,7	1,57	240,9	0,16	2
				34,4	15,9	0,46	265,7	296,2	1,11	300,1	0,11	3
0,8	8 м/с, 3 бали	7,2	90	35,6	16,3	0,46	208,2	228,7	1,10	264,3	13,5	2
				37,5	19,0	0,51	147	160,5	1,10	198	0,19	1
				35,6	14,6	0,41	351	407,7	1,16	386,6	0,092	3
				40,8	24,6	0,60	171,9	225,1	1,31	212,7	0,19	2
				52	37,8	0,73	109,4	152,3	1,39	161,4	0,32	1

Середні m_x і середньоквадратичні σ_x значення тривалості викидів і пауз, коефіцієнт варіації $V = \sigma_x / m_x$, середній просторовий період відбиття T_x і ймовірність викидів P при різних значеннях порога прийняття рішення Π , нормованого відносно середньої амплітуди \bar{A} , для хвилювань 3–4 бали наведено в табл. 1.4. При змінненні азимута опромінення поверхні відносно напрямку бігу хвиль, що визначається напрямком вітру, спостерігається збільшення просторового періоду відбиття. Водночас імовірність викидів при цьому практично не змінюється, що узгоджується з результатами, отриманими при вивченні поведінки функцій розподілу квадратур. Імовірності викидів при порозі, що дорівнює 2–3 значенням середньої амплітуди, приблизно відповідають тим, які виходили за функціями розподілу. Це підтверджує правильність раніше зробленого висновку про оптимальність вибору класифікаційного порога, що в 1,5–2 рази перевищує середній рівень. Середній період радіолокаційного зображення при опроміненні назустріч вітру є пропорційним середній довжині морської хвилі. Середнє значення коефіцієнта варіації $V = \sigma_x / m_x$ для викидів становить приблизно 0,71, для пауз приблизно 1,4 при середньоквадратичному значенні відхилення цієї величини $\sigma_V \approx 0,12$ і $\sigma_V \approx 0,19$ відповідно.

Крім імовірнісних характеристик часу існування викидів і пауз у розсіяному морем сигналі вивчалися і їх доплерівські спектри. Установлено, що при порозі, що дорівнює середній інтенсивності розсіяного сигналу, основна енергія укладена у сплесках, які за своїми спектральними характеристиками незначно відрізняються від спектрів повного сигналу (рис. 1.20).

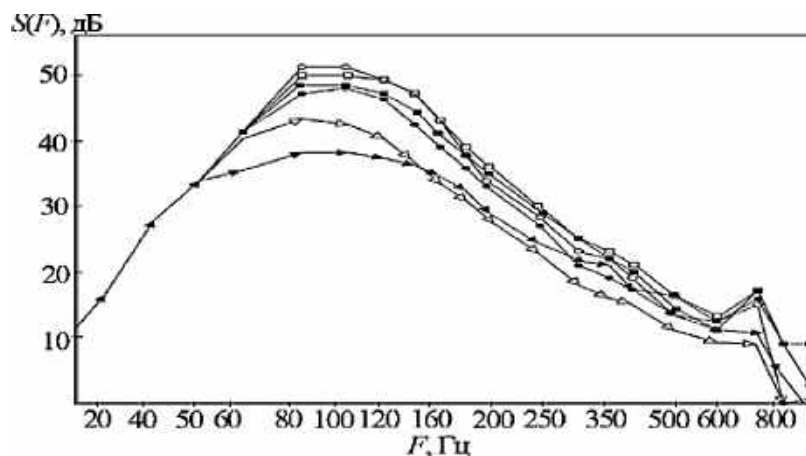


Рис. 1.20. Спектри сплесків і пауз: $\lambda = 3$ см; ГП; швидкість вітру $v_g = 10$ м/с; висота хвилі $H_g = 2 \dots 2,5$ м; \circ – повний спектр процесу; \square – спектр сплесків при $U_{nop} = \bar{U}$, $p = 0,55$; \triangle – спектр пауз при $U_{nop} = \bar{U}$; \blacksquare – спектр сплесків при $U_{nop} = 2\bar{U}$, $p = 0,28$; \blacktriangle – спектр сплесків при $U_{nop} = 3\bar{U}$, $p = 0,023$; \bullet – спектр пауз при $U_{nop} = 2\bar{U}$

При порозі в 2–3 рази більше середнього рівня класифікуються у вигляді сплесків найбільш потужні викиди, які спостерігаються протягом 1...10 % часу. При збільшенні класифікаційного порога спостерігається збільшення як центрального зміщення, так і ширини спектра сплесків. При цьому зменшується швидкість зменшення спектральної щільності (див. рис. 1.20). Це пов'язано з тим, що при цьому як сплески («спайки») реєструються найбільш потужні викиди перешкод. Оскільки «крила» спектра, як повного, так і для сплесків та пауз, при логарифмічному масштабі по осі абсцис і лінійному по осі частот, задовільно описуються лінійними функціями, то для їх апроксимації $S(F)$ можна використовувати степеневі залежності вигляду

$$S(F) = S_0 \left(1 + \left| \frac{F - F_0}{\Delta F} \right|^n \right)^{-1}, \quad (1.19)$$

де S_0 – максимум спектральної щільності на центральній частоті спектра F_0 , а $\Delta F, n$ – півширина спектра й швидкість зменшення його спектральної щільності. Числові характеристики спектрів сплесків і пауз наведено в табл. 1.5.

Таблиця 1.5

Числові характеристики спектрів розсіяного сигналу
при сплесках і паузах

Аналізований параметр	Досліджувана фаза процесу	Відношення середніх значень
Зсув частоти	Сплески	1,06...1,17
Ширина спектра		1,08...1,22
Показник степеня		0,95...0,81
Зсув частоти	Паузи	0,86...0,96
Ширина спектра		0,9...0,93
Показник степеня		1,01...1

Рис. 1.20 ілюструє змінення спектрального складу викидів і пауз розсіяного морем сигналу при змінненні рівня класифікаційного порога. Видно, що при збільшенні порога від 0 до 10 дБ відносно середнього рівня відбувається зменшення ймовірності існування викидів у відбитому сигналі, розширення їх спектра і збільшення центрального зсуву частоти.

Спектри на рис. 1.20 зображено в подвійному логарифмічному масштабі (по осях абсцис та ординат). Їх можна апроксимувати в цьому масштабі лінійною функцією. Це означає, що спектри як сплесків, так і пауз можна описати степеневою залежністю (1.19). Результати оцінювання центрального зсуву частоти, ширини спектра та показника степеня (при степеневій апроксимації) для сплесків і пауз залежно від порога прийняття рішення наведено в табл. 1.5. Вони нормовані на аналогічні характеристики повного спектра розсіяного сигналу. При цьому нормований класифікаційний поріг прийняття рішення змінювався від 1,5 до 2. Видно, що в доплерівських спектрах при сплесках спостерігається збільшення порівняно з паузами на 30...40 % центрального зміщення й ширини і зменшення на 15...20 % показника степеня. Крім того, при сплесках відбувається істотне збільшення (на 10...25 дБ) рівня спектральної щільності на високочастотних «крилах» спектра.

Таким чином, з використанням змішаних напівмарковських процесів було запропоновано імітаційну модель сигналу, відбитого від підстильної поверхні, що враховує його нестационарність і негауссів характер. Ця модель дає змогу пояснити особливості спектрів і законів розподілу розсіяного морем сигналу, що спостерігалися під час експериментів у сантиметровому й міліметровому діапазонах хвиль.

Розроблена на її основі методика класифікації сплесків і пауз дала змогу отримати кількісні дані за їх спектрами й законами розподілу тривалості. Установлено, що середні значення часу існування сплесків перешкоди не перевищують 0,7 с, хоча деякі можуть становити кілька секунд. Паузи за тривалістю більш ніж у 3 рази перевищують сплески. Для опису щільності розподілу тривалості сплесків можна використовувати експоненціальний закон. Імовірності появи сплесків відбиття від моря в міліметровому й сантиметровому діапазонах є приблизно однаковими. У доплерівських спектрах відбиття в моменти сплесків спостерігається збільшення центрального зсуву частоти в середньому на 20 %, ширини спектра приблизно на 20...30 % і зменшення швидкості спадання спектральної щільності з частотою на 6...20 % порівняно з аналогічними характеристиками при паузах. Крім того, при сплесках відбувається істотне збільшення (на 10...25 дБ) рівня спектральної щільності на високочастотних «крилах» спектра.

Змінення спектрального складу перешкод від моря й інтенсивності при переході від сплеску до паузи необхідно враховувати під час розроблення адаптивних пристроїв селекції малорозмірних цілей на фоні морської поверхні.

Розроблена модель може бути корисною для оцінювання робочих характеристик як наявних систем селекції і виявлення об'єктів на фоні перешкод від моря, так і перспективних при їх розробленні.

1.3.3. Використання фінитних функцій Кравченка для опису статистик відбиття

Для опису процесу всередині фазового стану, як було показано, можуть бути використані стандартні моделі гауссових процесів. Однак інтенсивність розсіяного морем сигналу визначається крутизною великої вітрової хвилі, яка не може бути нескінченно великою, оскільки, починаючи з деякої крутизни, хвилі втрачають гідродинамічну стійкість і руйнуються. Це є передумовою того, що існує обмеження амплітуди розсіяного морем сигналу. Логічно припустити, що для опису статистик розсіяного сигналу всередині кожного з фазових станів доцільним є використання фінитних функцій Кравченка.

Методика оброблення результатів експериментів. Для оброблення використовувалися фотографічні зображення РЛ-відбиттів від морської поверхні.

Фотографії отримано з екрана імпульсно-когерентної РЛС з довжиною хвилі 2 см і тривалістю випромінюваного імпульсу 0,4 мкс (роздільна здатність за дальністю 60 м), що працює в режимі секторного огляду простору (рис. 1.21).

Антенна РЛС розміщувалася на висоті близько 11 м. Під час експерименту хвилювання моря становило близько 6 балів (середня швидкість вітру понад 13 м/с). При цьому дальність приймання відбиття від моря становила від 0,5 до 10 км, кути ковзання від $1,5^\circ$ до $0,05^\circ$. Здійснювалося фотографування різних діапазонів дальності: 0,5...5 і 5,5...10 км. У радіолокаційних відбиттях простежується періодичність, пов'язана з періодом морських хвиль (див. рис. 1.21). Змінення напрямку опромінення приводить до змінення просторового періоду в радіолокаційних зображеннях. Мінімальним він буде при опроміненні поверхні моря назустріч хвилі і максимальним – при опроміненні поверхні вздовж хвилі. На дальності 2...2,5 км відбиття від морської поверхні в умовах розвинутого хвилювання мають чітко виражену просторову періодичну структуру з періодом, який визначається проєкцією просторового періоду морських хвиль на напрямок опромінення. При опроміненні назустріч хвилі просторовий період відбиття становив 120...130 м. На великих відстанях відбиття набувають спорадичного характеру. Стає видно лише гребні найвищих хвиль. Гістограма щільності розподілу радіолокаційного зображення морської поверхні для зони інтенсивного відбиття стає бімодальною (див. рис. 1.21). Перший максимум гістограми відповідає зонам слабого відбиття, другий – сильного (гребені

морських хвиль). На великих відстанях різниця максимальних значень щільності розподілу для рівнів «чорного» і «білого» стає настільки великою, що фактично видно тільки один максимум – рівень «чорного».

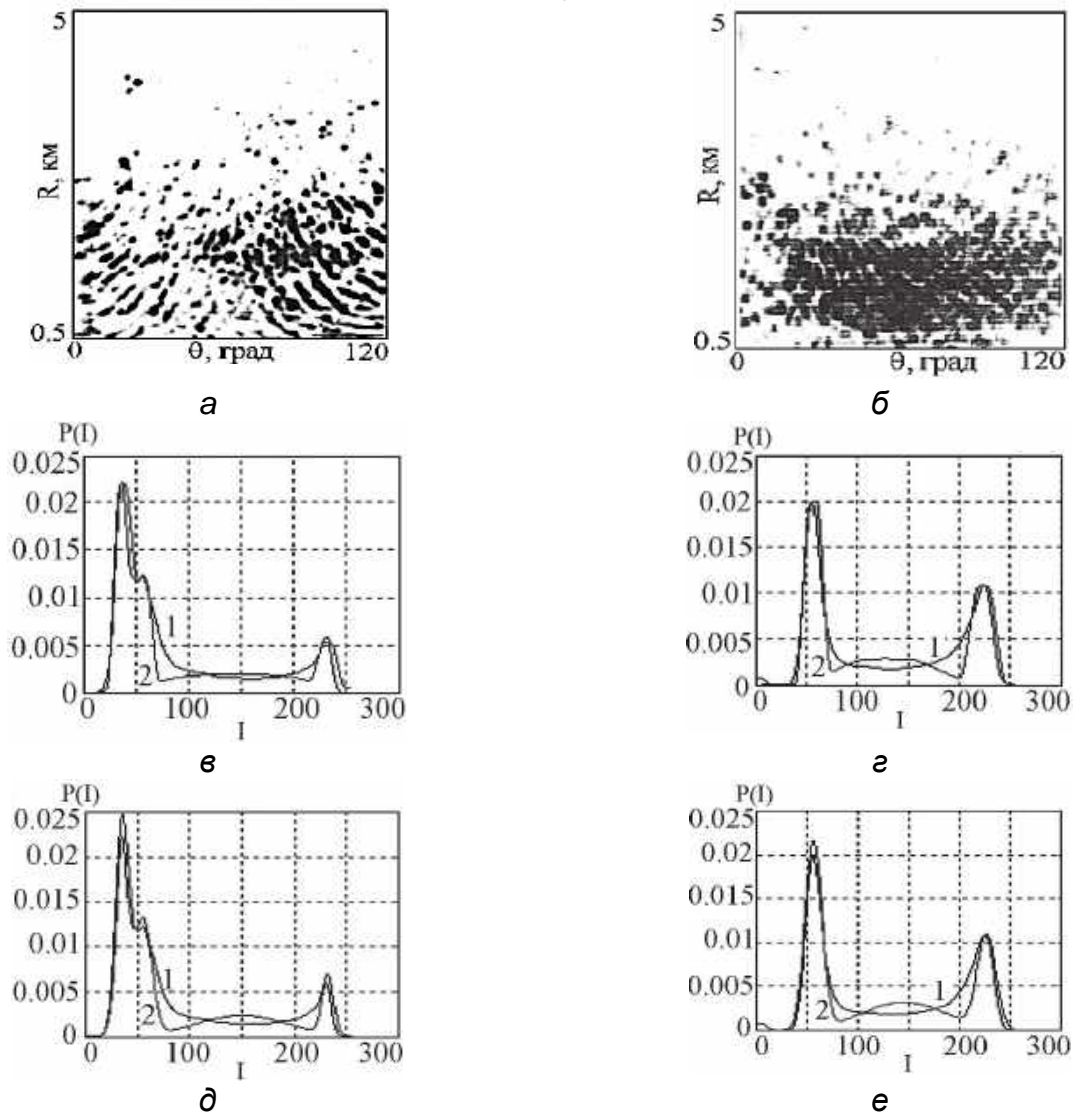


Рис. 1.21. Радіолокаційні зображення морської поверхні на хвилі 2 см при хвилюванні 6 балів, щільності розподілу значень та їх апроксимації функціями Кравченка – Рвачова і Гаусса: а, б – радіолокаційні зображення, швидкість сканування 4 град/с; в, г – апроксимація функціями Кравченка – Рвачова; д, е – апроксимація полігауссовим розподілом; а, в, д – 1 скан, сектор 120 град, дальність 0,5...5 км; б, г, е – 2 скани, дальність 0,5...5 км

Експериментально отримана щільність розподілу апроксимувалася функціоналами:

$$p(I) = \sum_{k=1}^{k_0} p_k \varphi_k(I), \quad (1.20)$$

де p_k – фінальні ймовірності кожного з k фазових станів, причому в загальному випадку $k \in (1, 2, 3)$, де $k=1$ – рівень «чорного», $k=2$ – рівень «сірого», $k=3$ – рівень «білого». Як апроксимувальні функціонали

використовувалися гауссові щільності розподілу

$$\varphi_k(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_k} \exp\left(-\frac{(I-I_k)^2}{\sigma_k^2}\right), \quad (2.21)$$

а також фінитні атомарні функції Кравченка – Рвачова

$$\varphi_k(I) = \frac{1}{b_k} h_a\left(\frac{I-I_k}{b_k}\right) = \frac{1}{b_k} up\left(\frac{I-I_k}{b_k}\right) \quad \text{при } a=2. \quad (2.22)$$

Обчислити щільність розподілу з використанням атомарної функції Кравченка – Рвачова $up(x)$ можна або шляхом оберненого перетворення Фур'є від характеристичної функції, отриманої як добуток характеристичних функцій прямокутних імпульсів, або шляхом визначення щільності розподілу ряду, утвореного як сума ряду випадкових чисел з рівномірними законами розподілу. Останній підхід і використовувався для отримання базової материнської функції $up(x)$. Отримана випадкова величина масштабувалася коефіцієнтами b_k і зміщувалася на I_k . Так формувалася величина I зі щільністю розподілу $\varphi_k(I)$, яка й використовувалася для апроксимації експериментальних даних. Апроксимувалися як отримані експериментально щільності, так і інтегральні функції розподілу. Визначалися параметри (p_k, I_k, b_k) для функцій Кравченка – Рвачова і (p_k, I_k, σ_k) для функцій Гаусса, які мінімізують дисперсію помилки. Аналіз отриманих при цьому помилок показує, що обидві апроксимації дають близькі результати. Однак приблизно в 1/3 випадків для щільності і 1/2 випадків для інтегральної функції розподілу радіолокаційних зображень морської поверхні фінитні атомарні функції Кравченка – Рвачова дають кращі результати, ніж стандартні функції Гаусса.

1.4. Імітаційна модель розсіяного сушею сигналу

1.4.1. Особливості структури моделі

Пропонована модель сигналу, розсіяного ділянками суші, використовує вкладені напівмарковські процеси й містить три рівня деталізації. Перший рівень – це опис статистичних характеристик ділянок у межах регіону. Він ґрунтується на результатах вивчення топографічних зйомок, що дають змогу визначити фінальні ймовірності наявності кожного з кластерів, їх характерні просторові розміри і функції розподілу для конкретних ділянок (сільськогосподарські угіддя різних типів, лісові масиви, зони забудов і т. ін.) у межах окремих регіонів. Опис на другому рівні

ґрунтується на знанні просторових розподілів зон з високою інтенсивністю відбитого сигналу в межах досить однорідних за характером ділянок. Результати експериментальних досліджень у цьому напрямі описано в цьому підрозділі. На третьому рівні опису необхідним є знання спектрів і статистик окремих типів рослинних покривів і ділянок місцевості, окремих фрагментів рослин та їх залежності від запасу вологи.

Пропонована модель є подальшим розвитком розглянутої моделі радіолокаційного відбиття від моря.

Для суші розподіл розмірів окремих кластерів, які визначаються типами місцевості й відстанями між ними, можуть відрізнятися від експоненціальних. Разом з тим, усередині кластера можливий опис процесу для кожної з ортогонально поляризованих компонент як ергодичного з гауссовою статистикою і спектром. Тому статистичний опис таких процесів може ґрунтуватися на запропонованій моделі вкладеного в напівмарковський процес векторного гауссова ергодичного процесу із заданою матрицею спектральних щільностей. Алгоритм моделювання розсіяного поверхнею суші сигналу має таку структуру:

1. Задається початковий стан, у якому перебуває процес при $t = 0$; нехай для визначеності H_i .

2. Визначається наступний фазовий стан процесу. Для цього з імовірностями (π_{ij}) вибирається випадкове число $j \in E \in (1...K)$.

3. Визначається час перебування процесу в i -му стані до переходу в j -й стан, для чого генерується випадкове число T_{ij} , що має щільність розподілу $f_{ij}(t)$. Протягом цього часу генерується векторна випадкова величина $\vec{S}_{ij}(t)$, що має щільність розподілу $P_i(\vec{S})$ і спектр $\vec{S}_i(\omega)$.

4. Проводиться змінення стану $H_i \rightarrow H_j$, і процес обчислення повторюється.

Для оцінювання робочих характеристик систем селекції і виявлення цілей необхідно знати функції розподілу і спектри перешкод, описані розглянутою моделлю, на інтервалі спостереження $(t, t+T_0)$, де T_0 може бути, наприклад, час накопичення інформації з елемента роздільної здатності. Визначення спектра $S(\omega, T_0)$ і щільності розподілу значень $P(S, T_0)$ для довільного часу спостереження T_0 становить значні труднощі. Однак на практиці найбільш цікавими є два граничних випадки: малі $T_0 \leq \min_{i \in E}(\overline{T_{ij}})$ і великі $T_0 \geq \max_{i \in E}(\overline{T_{ij}})$ значення часу спостереження. При

малих значеннях часу спостереження практично ніколи не відбувається змінення стану, отже, щільність розподілу значень процесу, його спектр і всі числові характеристики відповідають його початковому стану:

$$\overrightarrow{P(S)} = \overrightarrow{P_i(S)}; \overrightarrow{S(\omega)} = \overrightarrow{S_i(\omega)}, \quad (1.23)$$

причому якщо вибір початкової точки є несуттєвим, то ці характеристики реалізуються з можливостями, які визначаються фінальними ймовірностями кожного зі станів. При великих значеннях часу спостереження щільність розподілу значень, спектр і всі числові характеристики, наприклад моменти m порядку M_m , визначаються як середньозважені характеристики в кожному зі станів з вагами, обумовленими фінальними ймовірностями їх наявності:

$$\overrightarrow{P(S)} = \sum_{i=1}^K P_i \overrightarrow{P_i(S)}; \overrightarrow{S(\omega)} = \sum_{i=1}^K P_i \overrightarrow{S_i(\omega)}; \overrightarrow{M_m} = \sum_{i=1}^K P_i \overrightarrow{M_{im}}, \quad (1.24)$$

де M_{im} – m -й момент для i -го стану і в цілому M_m , а P_i – фінальні ймовірності існування процесу в i -му стані,

$$P_i = \frac{D_i}{\sum_{j=1}^K D_j}. \quad (1.25)$$

Тут D_i – мінор, який одержують викреслюванням i -го рядка та i -го стовпця матриці $\|D\|$:

$$\|D\| = I - \|\pi\|, \quad (1.26)$$

де I – одинична матриця.

Середній час перебування в i -му стані до переходу в j -й стан визначається формулою

$$\overline{T_{ij}} = \int_0^{\infty} t f_{ij}(t) dt, \quad (1.27)$$

а середній час перебування процесу в i -му стані до переходу в один з наступних станів так:

$$\overline{T_i} = \sum_{j=1}^K \pi_{ij} \overline{T_{ij}}. \quad (1.28)$$

Оскільки другий момент процесу характеризує інтенсивність розсіяного сигналу, а, отже, ЕПР, то поляризаційну матрицю розсіювання

для ПЕПР поверхні $\overline{\sigma^0}$ можна записати таким чином:

$$\|\sigma^0\| = \begin{pmatrix} \sigma_{11}^0 & \sigma_{12}^0 \\ \sigma_{21}^0 & \sigma_{22}^0 \end{pmatrix} = \overline{\begin{pmatrix} \sigma_{11}^0 & \sigma_{12}^0 \\ \sigma_{21}^0 & \sigma_{22}^0 \end{pmatrix}_i} \overline{P} = \sum_{i=1}^K P_i \begin{pmatrix} \sigma_{11i}^0 & \sigma_{12i}^0 \\ \sigma_{21i}^0 & \sigma_{22i}^0 \end{pmatrix}, \quad (1.29)$$

де σ_{lmi}^0 – ПЕПР i -го кластера поверхні суші (фазового стану) при l -й поляризації опромінення і m -й поляризації приймання розсіяного сигналу.

У випадках, коли розподіл значень часу існування відрізняється від експоненціального, можна використовувати штучний прийом, який полягає у введенні додаткових фіктивних фазових станів при збереженні для розподілу значень часу перебування в них експоненціального розподілу. Це дає змогу з певним наближенням описати неекспоненціальні процеси.

Розглянемо фізичну інтерпретацію запропонованої моделі. Для сигналу, розсіяного поверхнею суші, дискретна компонента $\theta(t)$ визначається набором типових ділянок поверхні, кожна з яких описується матрицею питомих ЕПР $[\sigma_{lmi}^0]$, функцією розподілу значень $[P_{lmi}(S)]$ і спектром $[S_{lmi}(\omega)]$ розсіяного сигналу. На хвилях 2 см і 8 мм вивчено спектральні й поляризаційні характеристики розсіювання електромагнітних хвиль окремими типами земних покривів. Визначення величин $f_{ij}(t)$ і π_{ij} , що описують їх просторовий розподіл для кожного конкретного типу місцевості, може ґрунтуватися на даних топографічної зйомки, додаткових результатах радіолокаційного картографування. Усереднені статистичні характеристики (1.24) визначаються з урахуванням фінальних імовірностей P_i кожного з типів ділянок. Для цього за картою місцевості визначається відсоток площі, яку займають конкретні типи ділянок, що й дає оцінки фінальних імовірностей певного фазового стану перешкоди.

1.4.2. Експериментальне визначення просторових характеристик ділянок місцевості

Вивчення ділянок місцевості здійснювалося за результатами їх радіолокаційного картографування із застосуванням макета імпульсної виміральної РЛС з довжиною хвилі 2 см. Вивчався просторовий розподіл радіолокаційних плям усередині досить однорідних за характером ділянок, таких, як лісовий масив, пагорб з травостоем, зона забудови висотними будинками і сільгоспугіддя з зонами лісопосадок. Картографування велося в літньо-осінній період (з липня до початку вересня), тобто в період, коли закінчилася активна вегетація рослинності. Радіолокаційні зображення ділянок місцевості (рис. 1.22) були отримані після порогового оброблення і відображення записів радіолокаційних сигналів з виходу амплітудного детектора РЛС.

Верхні зображення на кожному з рисунків стосуються випадку, коли поріг дорівнює середньому по кадру значенню сигналу, а нижні – на 12 дБ перевищує його рівень. Для синхронізації системи реєстрації як малі використовувалися імпульси рухомої мітки дальності, синхронізовані з частотою випромінюваних імпульсів передавача, а як кадрові – імпульси з датчика кутового положення антени. Запис радіолокаційного зображення рядка здійснювався з дискретом за дальністю близько 11 м при можливості програмного керування початковою затримкою відносно рухомої мітки дальності. Обсяг пачки імпульсів, корельованих за азимутом, у межах ширини діаграми спрямованості антени також змінювався програмно і для наведених зображень становив близько 20 імпульсів.

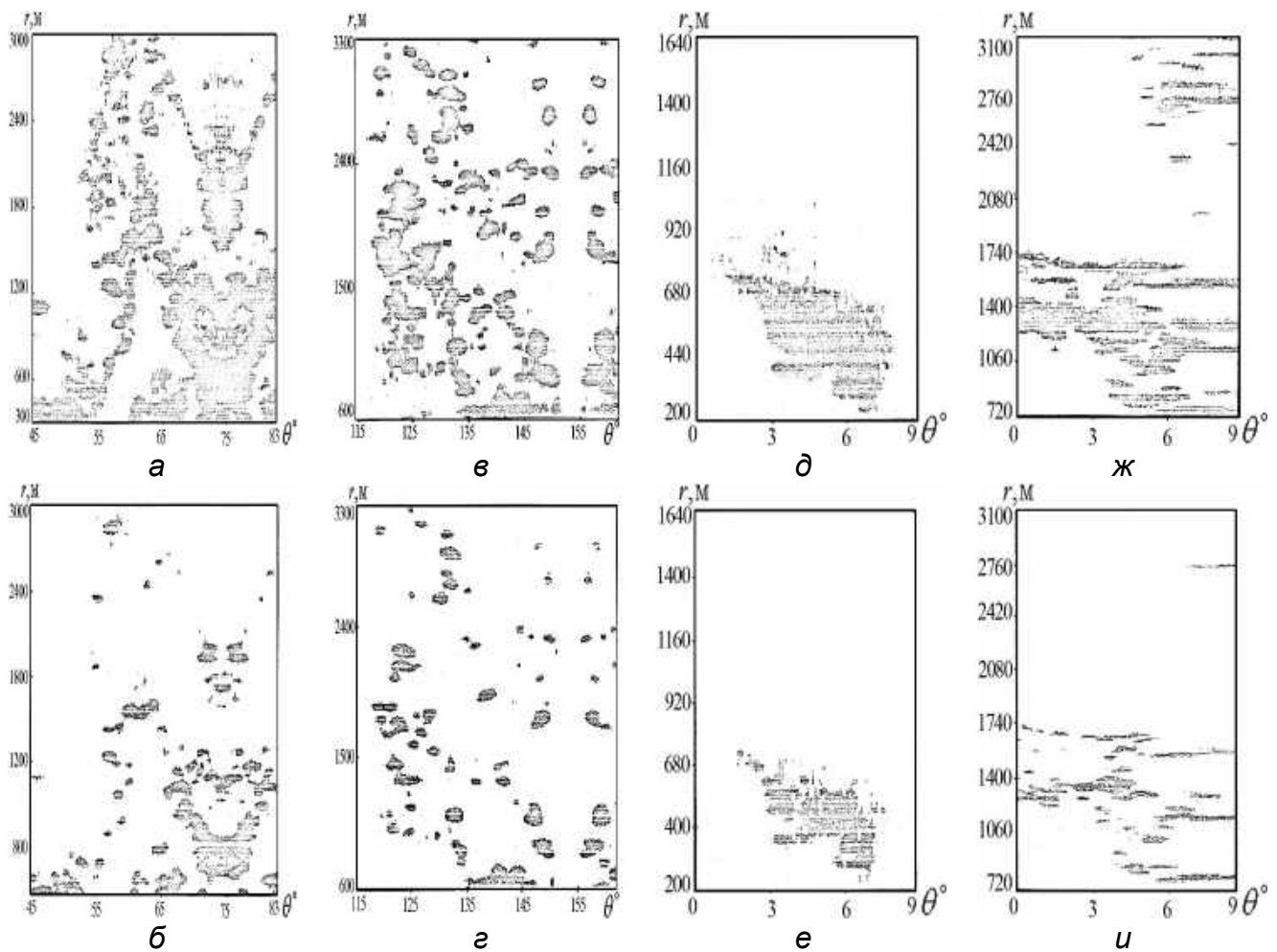


Рис. 1.22. Радіолокаційне зображення місцевості ($\lambda = 2\text{ см}$):

- а, б – пагорб з трав'янистою рослинністю, $\psi = 3^{\circ} \dots 0,5^{\circ}$; в, г – зона забудови висотними будинками, $\psi = 3^{\circ} \dots 0,5^{\circ}$; д, е – лісовий масив, $\psi = 8^{\circ} \dots 1^{\circ}$;
ж, и – сільськогосподарські угіддя з посадками, $\psi = 2,4^{\circ} \dots 0,5^{\circ}$;
а, в, д, ж – поріг 0 дБ; б, г, е, и – поріг 12 дБ

З наведених рисунків видно, що навіть для досить топографічно однорідних за характером ділянок місцевості радіолокаційний сигнал має неоднорідну, «плямисту» за дальністю й азимутом структуру.

Коефіцієнт варіації (відношення середньоквадратичного значення флуктуації амплітуди до середнього по кадрі) для досліджуваних ділянок становив 1,5...1,6 для пагорба з травостоєм і сільгоспугідь з посадками і 1,8...1,9 для зони забудови. Для лісового масиву він становив близько 2, проте це значення дещо завищене, оскільки на початок кадру крім кромки лісового масиву потрапляла ділянка луки. З наведених даних можна зробити висновок про значне перевищення для розсіяного місцевістю сигналу випадкової компоненти над стабільною. Аналіз радіолокаційних зображень місцевості показує, що зона забудови (рис. 1.22, в, г) і пагорб з травостоєм (рис. 1.22, а, б) дають приблизно однакову щільність засвічення по кадру. Разом з тим, для лісового масиву (рис. 1.22, д, е) найбільше засвічення дає передня кромка й ділянки лісу, розташовані на підвищеннях місцевості. Просторовий розподіл ПЕПР можна визначити, використовуючи ту ж методику, що й при отриманні часового розподілу. При цьому вимірюється частота появи заданої амплітуди відбитого сигналу у всіх осередках за дальністю до азимуту.

На рис. 1.23 у масштабі, що лінеаризує релеївський закон розподілу, зображено функції розподілу амплітуд сигналів, розсіяних пагорбом з травостоєм, зоною забудови, сільгоспугіддями і лісовим масивом.

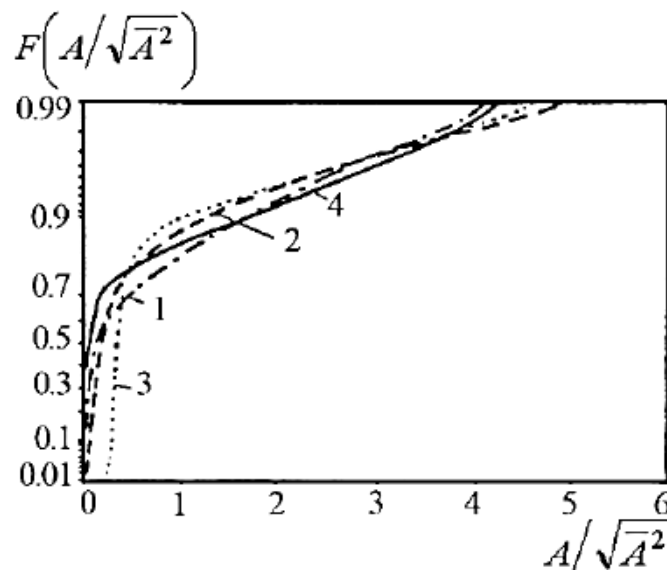


Рис. 1.23. Функції розподілу амплітуди сигналу, відбитого ділянками земної поверхні:
 1 – пагорб з трав'яним покривом; 2 – зона забудови будинками;
 3 – сільгоспугіддя з посадками; 4 – лісовий масив

Амплітуди розсіяних сигналів нормувалися на величину, що дорівнює кореню квадратному із середньої інтенсивності. Для всіх типів місцевості спостерігаються суттєві відхилення експериментальних законів розподілу від закону Релея. Вони мають більш високу ймовірність появи великих значень.

Для опису перешкод від суші в межах досить однорідних ділянок можна використовувати двокомпонентну модель, що раніше

використовувалася для опису перешкод від моря. При цьому під сплесками будемо розуміти відбиття від тих ділянок місцевості, ЕПР яких є істотно вищою від середнього рівня, а під паузами – відповідно, де вона є нижчою. Якщо припустити, що в кожному з фазових станів (сплеск, пауза) флуктуації амплітуд розсіяних сигналів описуються законом Релея, то функція розподілу флуктуації амплітуди сигналу, відбитого ділянкою місцевості, як видно зі співвідношення (1.24), буде описуватися складеним релеївським законом розподілу. Для такої апроксимації експериментально отриманих законів розподілу амплітуд розсіяних ділянками суші сигналів було визначено ймовірності наявності сплесків P у їх радіолокаційному зображенні й відношення інтенсивності сигналів γ^2 при сплесках і паузах, які наведено в табл. 1.6.

Незважаючи на різнотипність досліджуваних ділянок, ймовірність наявності в них зон з високою інтенсивністю відбитого сигналу (викидів перешкоди) і відношення високоінтенсивної до малоінтенсивної компоненти в розсіяному сигналі є приблизно однаковими. Найбільшою є різниця інтенсивностей компонент для ділянок, забудованих будинками (до 30 дБ). Для лісового масиву з ділянками луки, пагорба з травостоем, сільгоспугідь з зонами посадок перепад інтенсивності становить 23...27 дБ. Ймовірність наявності в межах однотипної ділянки зон інтенсивного відбиття сигналу становить від 0,15 до 0,3.

Таблиця 1.6

Радіолокаційні характеристики ділянок місцевості

Тип місцевості	Довжина хвилі, см	P	γ^2 , дБ
Зона забудови будинками	2	0,17	30
Лісовий масив	2	0,25 0,3	27
Холм, покритий травою	2	0,17	25
Сільгоспугіддя і зони посадок	0,8		23

Просторова неоднорідність різних типів земної поверхні описується ймовірністю наявності ділянок із заданою ЕПР і щільністю розподілу проміжків між ними. Інтегральні розподіли розмірів відбивальних ділянок за дальністю і проміжків між ними для різних типів місцевості зображено на рис. 1.24.

Числа, що позначають номери кривих, збігаються з величиною порога Π , нормованого на корінь квадратний від середньої по кадру інтенсивності розсіяного сигналу $(\overline{A^2})^{0,5}$. Поріг змінювався від 0 до 12 дБ відносно середнього рівня. При збільшенні порога відбувається зменшення розмірів ділянок, що відбивають, і збільшення відстані між ними. Розміри відбивальних областей для різних типів місцевості при рівнях забезпеченості 0,5 і 0,9 наведено в табл. 1.7. Аналіз показує, що

при рівні забезпеченості 0,5 (медіанне значення) розміри відбивальних зон становлять 50...80 м для лісового масиву з луком, зони забудови, пагорба з травостоєм і 20...40 м для сільгоспугідь, обмежених посадками.

Медіанні значення розмірів між областями, що відбивають, істотно перевищують характерні розміри самих областей і становлять сотні метрів. При цьому з 90%-вою забезпеченістю вони не перевищують 1...2 км.

Приклади спектрів і кореляційних функцій для лісового масиву й зони забудови показано на рис. 1.25. Просторові спектри задовільно описуються фрактальними залежностями. В енергетичній області спектри є практично однаковими і мають нахил $S(\chi) \sim \chi^{-n}$, де $n \in (1...1,5)$. У високочастотній області нахил спадання спектральної щільності збільшується, причому $n \in (3...6)$.

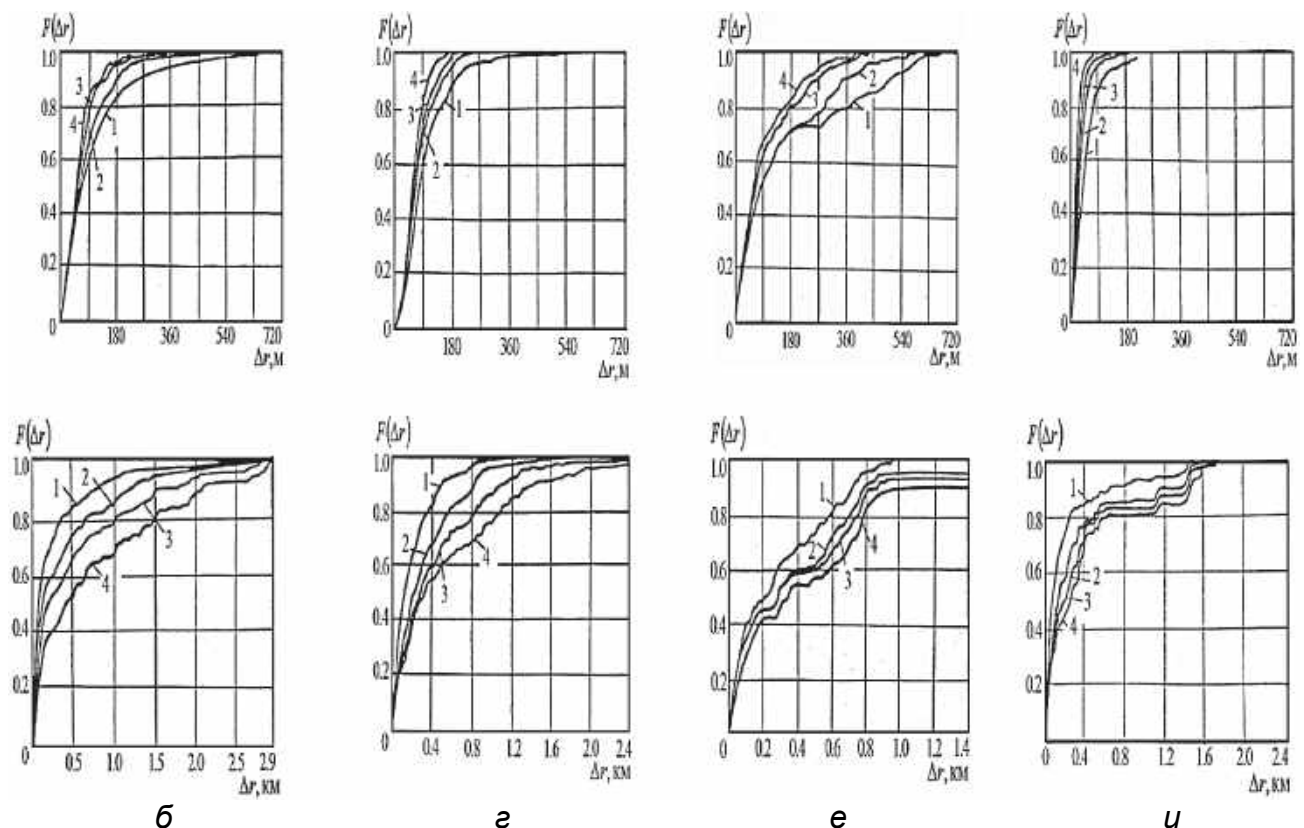


Рис. 1.24. Розподіл розмірів ділянок, що відбивають, і відстаней між ними: а, в, г, ж – розподіл розмірів; б, г, е, и – розподіл відстані; а, б – лука; в, г – зона забудови;

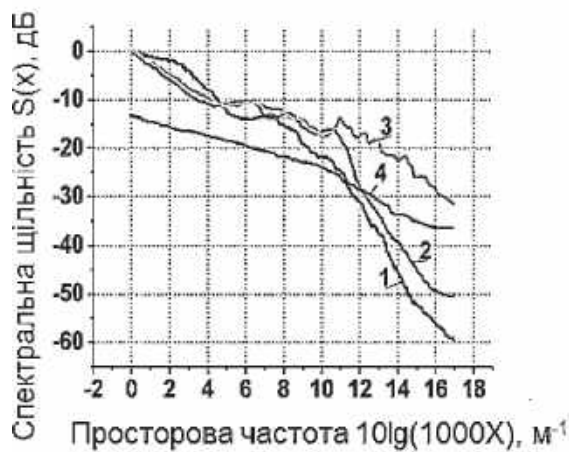
д, е – лісовий масив; ж, и – поле; $1 - \Pi / (\overline{A^2})^{0,5} = 1$; $2 - \Pi / (\overline{A^2})^{0,5} = 2$; $3 - \Pi / (\overline{A^2})^{0,5} = 3$;
 $4 - \Pi / (\overline{A^2})^{0,5} = 4$

Видно, що найбільшими є просторові радіуси кореляції для лісового масиву (рис. 1.25, а). Для зони забудови, поля і луки просторова кореляція є істотно вужчою (рис. 1.25, б). Інтервали кореляції для різних типів місцевості, наведені в табл. 1.7, показують, що на половинному рівні $R(\Delta r) = 0,5$ вони не перевищують сотні метрів.

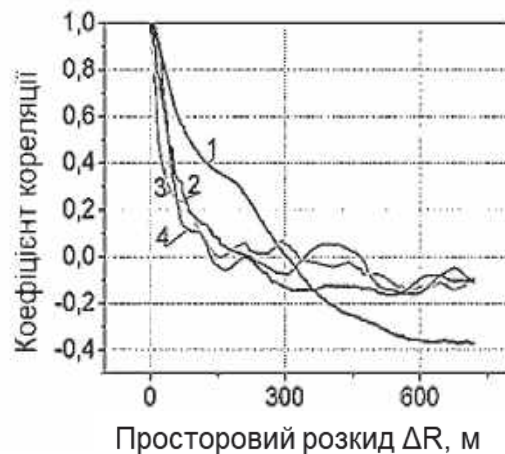
Таблиця 1.7

Розміри відбивальних ділянок і проміжків між ними

Поріг, дБ	Розміри відбивальних ділянок, м			Проміжки між ділянками, м			Інтервал Δr , м $R(\Delta r) = 0,5/0$
	0	6	12	0	6	12	
Забезпеченість	0,5/0,9	0,5/0,9	0,5/0,9	0,5/0,9	0,5/0,9	0,5/0,9	
Лісовий масив	80/489	67/236	58/204	204/720	276/800	336/1066	93/307
Зона забудови	76/178	58/124	53/102	142/533	245/924	373/1600	40/133
Лука	71/231	53/138	53/124	71/675	124/1066	391/1991	47/207
Поле	40/98	22/53	18/40	58/583	102/1079	233/1400	20/147



а



б

Рис. 1.25. Спектри і кореляційні функції відбиття від лісу і зони забудови: а – спектри; б – кореляційні функції; 1 – лісовий масив; 2 – зона забудови; 3 – поле; 4 – лука

1.5. Використання вкладених напівмарковських процесів для опису перешкод від атмосферних процесів

1.5.1. Моделювання відбиття

Для відбиття від ясного неба, як показали експериментальні дослідження, багато в чому є характерними такі ж самі особливості, що й для розсіяного морем сигналу: дискретна просторова структура й часова нестационарність. Тому для моделювання розсіяного сигналу також можна

використовувати напівмарковські вкладені процеси аналогічно тому, як це було зроблено для відбиття від морської поверхні й суші.

Експериментально встановлено, що щільність розподілу «ангел – луна» слабо залежить від дальності й азимутальних кутів спостереження, тому при імітації координат розташування центрів «ангел – луна» можна використовувати випадкові числа з рівномірним законом розподілу $\xi \in (0, 1)$. Отримані значення $\{\xi_i; \xi_{i+1}\}$ перетворюють в координати $\{x_i, y_i\}$ розташування центрів розсіювання «ангел–луна». Кожна пара рівномірно розподілених випадкових чисел $\{\xi_i; \xi_{i+1}\}$ дає координати центра розсіювання $\{x_i, y_i\}$. Слід зазначити, що загальна кількість зон розсіювання від ясного неба в межах зони огляду РЛС є незмінною і становить $i_{\max} = N$.

Як показали експериментальні дослідження, відбиття від ясного неба мають різну конфігурацію. Області відбиття можуть являти собою коло, еліпс, якщо відбиває зона в цілому, а також кільцеві й еліптичні структури, коли відбиття відбувається від її кромки. При моделюванні конфігурації області ясного неба, що розсіює, необхідно знати фінальні ймовірності наявності процесу в кожному з фазових станів (P_{00} – відбивальна область тропосфери являє собою коло; P_{01} – еліпс; P_{00}^0 – кільце; P_{01}^0 – еліпсоїдальну структуру).

Вибір фазового стану (конфігурації відбивальної області) здійснюється шляхом генерації чисел з рівномірним законом розподілу на інтервалі (0, 1). Інтервал «забарвлюється» з використанням фінальних ймовірностей наявності кожного зі станів (H^1 – відбивальна зона в цілому, H^0 – відбивальна кромка (межа) зони):

$$H^1, \text{ якщо } v_i \in (0, P_{00} + P_{01}); H^0, \text{ якщо } v_i \in (P_{00} + P_{01}, 1); \quad (1.30)$$

H^i – відповідає при $i = 1$ суцільній відбивальній зоні, а при $i = 0$ – зоні, у якій відбиває межа розділу. У першому випадку ($i = 1$) зображення відбивальної області на екрані РЛС має суцільну структуру у вигляді еліпса (в окремому випадку кола), а в другому ($i = 0$) – у вигляді еліптичної структури (окремих випадків кільцевої). Після визначення конфігурації відбивальної області (тобто фазового стану H^i процесу) оцінюються її розміри за азимутом (лінійні) і дальністю. Для цього генеруються пари чисел $\{a_i, b_i\}$ з нормальними законами розподілів, у яких $\{a_0, \sigma_a, b_0, \sigma_b\}$ – середні й середньоквадратичні значення осей еліпса області ясного неба, що розсіює.

Межі зони відбиття описуються відомим рівнянням

$$\frac{(y - y_i)^2}{b_i^2} + \frac{(x - x_i)^2}{a_i^2} = 1, \quad (1.31)$$

де $\{x_i, y_i, a_i, b_i\}$ – координати центра і розміри осі i області розсіювання. Значення квадратур $\{S, S_{\perp}\}$ сигналу, відбитого від ясного неба, описуються нормальним, а амплітуди $\{A\}$ – релеївським законами розподілу з дисперсією флуктуацій сигналу σ^2 . Дисперсія флуктуацій амплітуди розсіяного сигналу визначається питомою ЕПР (об'ємною для суцільних зон або поверхневою для кільцевих зон) відбиття від ясного неба η , розмірами елемента роздільної здатності за азимутом θ_{ε} , кутом місця θ_{β} і дальністю ΔR , а також площею (для суцільних зон відбиття):

$$S_i \approx \pi a_i b_i \quad (1.32)$$

або периметром (для кільцевих або еліптичних зон розсіювання)

$$R_i \approx 2\pi \sqrt{a_i b_i}. \quad (1.33)$$

Для опису спектра сигналу, розсіяного ясним небом, можна використовувати гауссову модель, аналогічну тій, що використовується для гідрометеорів, або модель у вигляді набору дискретних ліній. Як показали останні експериментальні дослідження, найбільшу інтенсивність мають відбиття, що складаються зазвичай з однієї дискретної лінії з частотою f_i . Для опису закону розподілу f_i можна використовувати такий же підхід, як і для опису доплерівської частоти метеорологічних утворень. Інтенсивну частину спектра відбиття від хмар та опадів можна апроксимувати гауссовою функцією. Для опису розподілу доплерівського зсуву частоти відбиття від ясного неба можна також використовувати гауссову модель, у якій f_0 – доплерівський зсув частоти, який визначається вітровим знесенням U_H , а σ_f – середньоквадратичне значення флуктуацій доплерівського зсуву частоти в приземному шарі тропосфери:

$$\sigma_f = (0,4 \dots 0,8) U_H / \lambda. \quad (1.34)$$

Щільність розподілу часу існування відбиття від i -ї області можна описати експоненціальною моделлю із середнім часом існування τ_0 .

Дослідження на хвилях від 35 до 4 см з використанням високопотенціальних макетів (потенціал понад 210 дБ) показали, що середній час існування дискретної лінії становить $\tau_0 = 2 \dots 4$ с і практично не залежить від довжини хвилі. Протягом випадкового часу τ_i існує дискретна спектральна лінія з ω_i , амплітудою A_i , координатами центра $\{x_i, y_i\}$ і розмірами зони розсіювання $\{a_i, b_i\}$. Вибір початкового моменту є несуттєвим, і можна вважати, що $t = 0$. Після зникнення i -ї відбивальної області в момент $t = \tau_i$ генеруються координати центра, розміри, амплітуда, зсув частоти і час існування наступної зони відбиття, яка буде існувати до моменту $t = \tau_i + \tau_k$.

1.5.2. Розподіл амплітуд і просторових розмірів зон відбиття

Для отримання диференціальних та інтегральних функцій розподілу амплітуд використовувалися цифрові записи просторових картин відбиття від ясного неба, отримані з використанням високопотенціальних РЛС. Як приклад на рис. 1.26 у координатах азимут – дальність показано відбиття від ясного неба, отримані з інтервалом 27...0 с. Аналіз зображень свідчить про те, що вони можуть як мати суцільну структуру, так і являти собою області, у яких найбільш інтенсивно відбиває кромка. На рис. 1.27, а, б зображено диференціальні й інтегральні функції розподілу для різних умов експерименту. Лінія 1 – це розподіл, що відповідає меншому посиленню приймального пристрою, а лінії 2, 3 – розподіл, отриманий в один і той же день з інтервалом приблизно 3 години. Необхідно зазначити наявність викиду на початковій ділянці як диференціальної, так і інтегральної функцій розподілу амплітуд розсіяного сигналу. Це означає, що при вибраних посиленнях приймача рівень відбиття від ясного неба вище шуму, і вони відбиваються як кілька дискретних областей, які, як видно з рис. 1.26, можуть мати різну конфігурацію.

Їх побудовано в масштабі лінеаризувального релеївського закону розподілу, і вони показують, що флуктуації амплітуд сигналів від зон відбиття ясного неба задовільно описуються законом Релея.

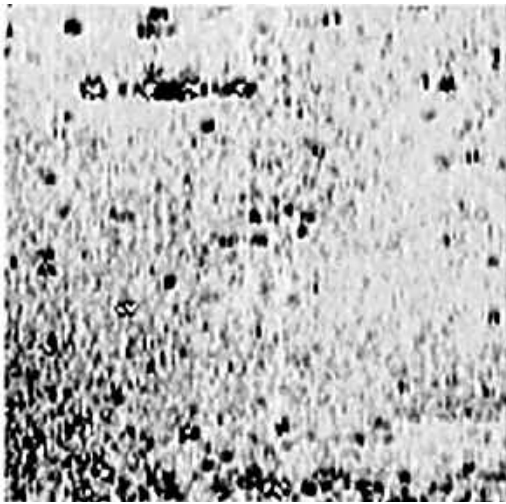
Результивні числові характеристики розсіяних сигналів для різних умов спостереження наведено в табл. 1.8: N_0 – загальна кількість оброблюваних точок; P_{\max} – максимальне значення диференціальної гістограми розподілу; $\{m, \sigma, k, j\}$ – середнє і середньоквадратичне значення, коефіцієнти асиметрії і ексцесу відповідно.

Слід зазначити, що діапазон змінення значень амплітуди сигналу становив від 0 до 128. Аналіз наведених даних дає змогу стверджувати, що коефіцієнти асиметрії та ексцесу для законів розподілу розсіяних ясним небом сигналів є істотно більшими, ніж для релеївського шуму. Це пов'язано з тією обставиною, що вони мають дискретну просторову структуру.

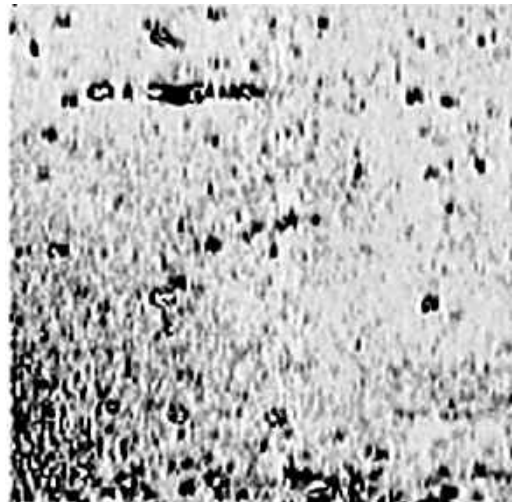
Для отримання оцінок просторових характеристик проводилося виявлення при заздалегідь заданому порозі зон відбиття, після чого здійснювалося їх сортування за типами (зони суцільного засвічення й еліпсоїдальні структури) з подальшим обчисленням характерних розмірів. Використовувалася гауссова модель еліпсоїдальних структур.

Метеоумови та просторові характеристики зон відбиття від ясного неба наведено в табл. 1.9: $\%S_{\Sigma}$ – відсоток площі, яку займає «ангел – луна» при певних метеоумовах; $\%S_0$ – відсоток, який кільцеві (еліпсоїдальні) структури становлять від загальної кількості «ангелів». Аналіз показує, що «ангели», у яких відбиття відбувається від кромки, становлять 3...16 % від загальної кількості. Загальна площа, яку займають «ангели» при градієнті коефіцієнта заломлення $g_N = -0,09...-0,14$ N од./м, тобто при рефракції, що наближається до критичної, становить від 7 до 21 %. Середні розміри відбивальних областей залежать від тропосферної рефракції і при значеннях $g_N = -0,14$ N од./м як за дальністю так і за азимутом становлять 400...600 м на дальності спостереження 20...40 км. Збільшення швидкості вітру приводить зазвичай до зменшення площі екрану, що зайнято «ангел – луна». Водночас спостерігається збільшення їх середніх розмірів. Середньоквадратичне значення флуктуацій характерних розмірів слабо залежить від швидкості вітру, але на цю характеристику суттєво впливає градієнт коефіцієнта заломлення. При його збільшенні відбувається збільшення і дисперсії флуктуацій розмірів.

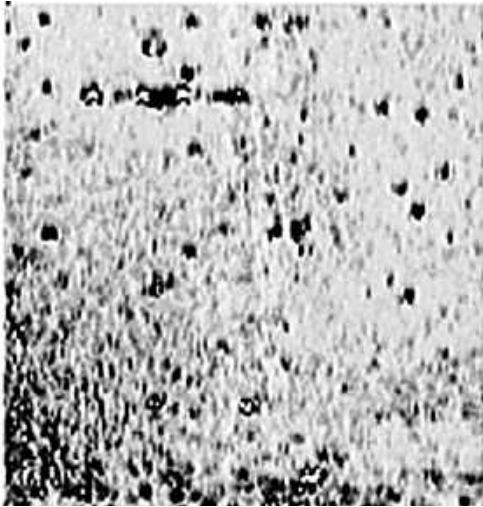
Таким чином, модель вкладених напівмарковських процесів, запропонована для опису відбиття від моря може використовуватися і для опису відбиття від ясного неба.



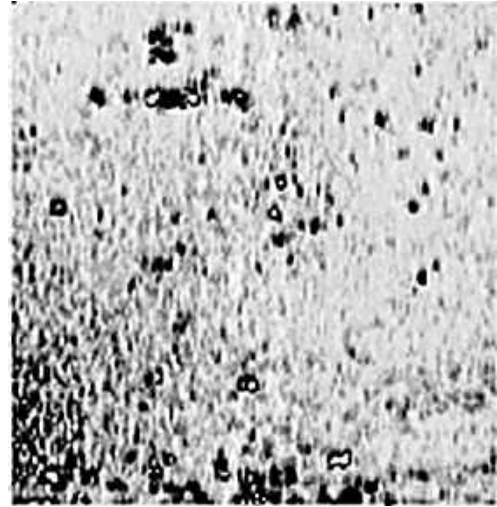
a



б



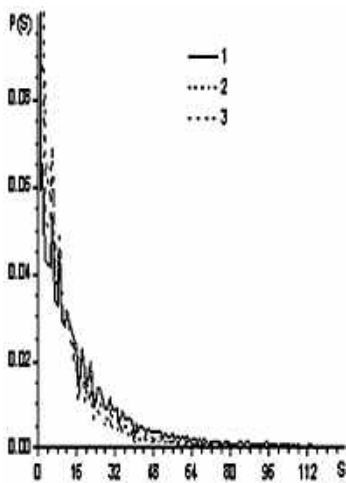
в



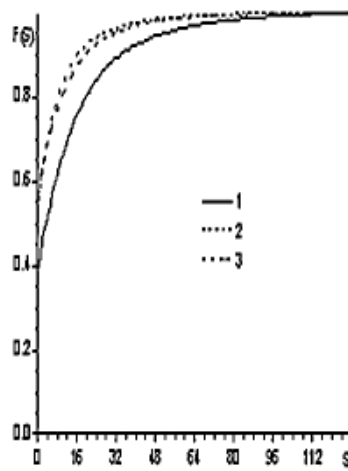
г

Рис. 1.26. Радіолокаційні відбиття від ясного неба: азимут $54^{\circ} \dots 134^{\circ}$, дальність 3...15 км, піксель 60 м

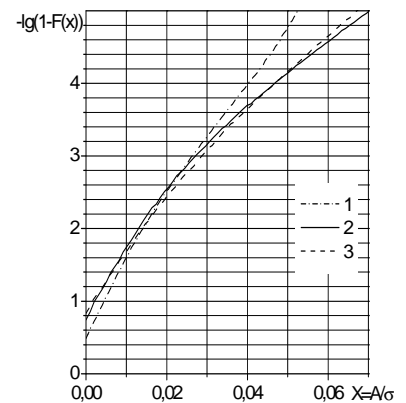
На рис. 1.27, в зображено інтегральні функції розподілу амплітуд розсіяного ясным небом сигналу.



a



б



в

Рис. 1.27. Функції розподілу амплітуд відбиття від ясного неба: *a* – диференціальна; *б* – інтегральна; *в* – інтегральна в масштабі лінеаризувального релеївського закону

Таблиця 1.8

Метеоумови та числові характеристики зон відбиття від ясного неба

Метеоумови району вимірювання				Числові характеристики						
Температура, °С	Вітер		Градiєнт коефіцієнта заломлення $g_{N_{EE}}$, N од./м	Хвилювання моря, бали	N_0	P_{max}	m	σ	k	γ
	швидкість, м/с	напрямок, град								
10	14,2	1	180	-0,09	1	0,18	13,4	39,0	2,56	4,57
14	13,9	5	310	-0,1	3	0,15	9,7	33,7	3,2	8,1
12	13,9	1	270	-0,13	1	0,07	29,1	53,4	1,29	-0,34
12	13,9	1	270	-0,13	1	0,112	12,0	37,1	2,78	5,7
13	13,9	2	270	-0,13	1	0,09	14,6	40,5	2,41	3,82
13	13,9	<1	180	-0,14	<1	0,044	35,2	59,6	0,994	-1,013
10	13,9	<1	180	-0,15	<1	0,062	19,06	45,4	1,96	1,84
15	14	1	270	-0,14	1	0,063	21,5	47,6	1,47	1,12

22

Таблиця 1.9

Метеоумови та просторові характеристики відбиття від ясного неба

Метеоумови району вимірювання				Числові характеристики							
Температура, °С	Вітер		Градiєнт коефіцієнта заломлення $g_{N_{EE}}$, N од./м	Хвилювання моря, бали	$\%S_{\Sigma}$	$\%S_0$	a , м	b , м	σ_a , м	σ_b , м	
	швидкість, м/с	напрямок, град									
10	14,2	1	180	0,09	1-2	7,45	8,1	377	395	94	65,6
13	13,9	2	270	0,13	1	8,2	10,4	483	490	161	245
13	13,9	2	270	0,13	1	8,5	8,6	400	576	196	143
13	13,9	1	180	0,14	Штиль	9,3	4,7	295	511	190	142
11	14	1	270	0,14	1	21,2	3,9	392	430	130	116
10	14	2	270	0,14	1	13	11,2	593	545	200	173
15	13,2	6	270	0,13	1	9,3	14,9	990	560	230	113

1.6. Контрольні запитання

1.1. Фізичний механізм розсіяння ЕМХ від моря. Чим обумовлені амплітудна та фазова (частотна) модуляції розсіяного сигналу? Де і для чого можуть використовуватись ці ефекти?

1.2. Чим обумовлено те, що інтенсивність зворотного розсіяння від моря при слабкому хвилюванні є більшою на вертикальній поляризації, а при сильному є приблизно однаковою?

1.3. Чому поточні значення відбиття від моря на ортогональних поляризаціях з виходів фазового й амплітудного детекторів – слабо корельовані, а змінне середнє має достатньо сильну кореляцію? Яким чином це можна використовувати в системах дистанційного зондування й радіолокації?

1.4. Які поляризації випромінювання й приймання необхідно використовувати для вивчення елементів і компонент поляризаційної матриці розсіювання підстильних поверхонь?

1.5. Для чого необхідно вивчати матриці кореляції спектральних компонент? Яким чином проводиться їх графічне зображення? Який вигляд мають матриці для відбиття від моря (при сильному й слабкому хвилюванні), суші, гідрометеорів і цілей? Для чого це можна використовувати?

1.6. З яких міркувань потрібно вибирати довжину елементарного сегмента та всієї реалізації під час обчислення МКСК? Як вони впливають на частотне розрізнення та стійкість отриманих оцінок?

1.7. Для чого необхідно проводити дослідження з розсіювання радіохвиль водною поверхнею в хвильовому лотку? Для чого використовується випромінювання вертикальної, горизонтальної й похилої поляризацій? Про що свідчать однакові кореляції розсіяних сигналів на різних поляризаціях?

1.8. Навіщо оцінювати просторові кореляційні функції і спектри радіолокаційних відбиттів від моря? З якими характеристиками морського хвилювання вони пов'язані? Які параметри навколишнього середовища можуть бути отримані за радіолокаційним зображенням морської поверхні? Вплив азимутального кута опромінення поверхні на спектри й кореляційні характеристики розсіяного сигналу на різних поляризаціях опромінення. Як це можна використовувати в системах дистанційного зондування поверхні моря?

1.9. Чим відрізняються марковські процеси від напівмарковських? Яким чином їх визначити? Для чого використовуються напівмарковські вкладені процеси при створенні імітаційної моделі розсіяного морем сигналу? Для яких типів розсіювачів потрібно використовувати модель на

основі вкладених напівмарковських процесів? Послідовність моделювання розсіяного морем сигналу.

1.10. Граф-схеми імітаційних моделей поляризованого сигналу, відбитого від моря, і сигналу на одній поляризації. Які існують моделі опису миттєвих значень розсіяних морем сигналів з виходів фазового й амплітудного детекторів і процесу в цілому? Чим обумовлені стани сплесків і пауз у розсіяному морем сигналі і яким чином вони залежать від стану морської поверхні й швидкості вітру? Параметр негауссовості і при яких його значеннях відбувається виродження негауссівського процесу в гауссівський?

1.11. Чим пояснюється поведінка ПЕПР моря при сплесках і паузах на різних поляризаціях при різних ступенях хвилювання моря? Яким чином впливає розмір елемента роздільної здатності системи ДЗЗ на ймовірність сплесків? Яким чином впливають на ймовірність сплесків і параметр негауссовості довжина опромінювальної хвилі, кут ковзання і швидкість вітру? Чим відрізняються ці характеристики для сантиметрового й міліметрового діапазонів хвиль опромінювального сигналу? Яким чином визначається критичний кут й на що впливає?

1.12. Які функції використовуються для опису спектрів сплесків, пауз і повного спектра розсіяного морем сигналу? Яким чином змінюються характеристики спектрів при зміні рівня класифікаційного порога? Чим вони відрізняються для сплесків і пауз?

1.13. Якими є фізичні передумови використання атомарних функцій Кравченка для опису законів розподілу розсіяного морем сигналу? Методика обчислення цих функцій.

1.14. Використання багаторівневих вкладених напівмарковських процесів для створення імітаційної моделі розсіяного сушею сигналу. Яким є фізичний зміст кожного з рівнів вкладення? Які фактори використовуються для визначення його параметрів? Алгоритм моделювання розсіяного сушею сигналу.

1.15. З яких міркувань вибираються класифікаційні пороги для визначення стану завадового сигналу? Чим відрізняються характеристики (параметр негауссовості, ймовірність сплесків) завад для різних типів місцевості? Якими є характерні розміри зон відбиття для різних типів місцевості?

1.16. Особливості використання запропонованих моделей для опису відбиття від ясного неба. Фізичні передумови появи відбиття від неба. Чим обумовлені типи конфігурацій зон відбиття? Методика вибору зон відбиття. Спектри відбиття від ясного неба. Розподіл амплітуд і розмірів зон відбиття. При яких метеоумовах більш ймовірною є поява відбиття від неба? Для яких систем ДЗЗ і радіолокації найнебезпечнішими є відбиття від неба?

Розділ 2. МЕТОДИКИ, ТЕХНОЛОГІЇ Й АПАРАТУРНІ КОМПЛЕКСИ ДЛЯ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ

2.1. Космічні програми різних країн

У сучасному світі визнаними космічними державами є США, Росія і Китай. Про свої наміри підкорити космос заявляють й уряди інших країн. Їх підтримують місцеві компанії, які здійснюють розроблення й запуск космічних кораблів.

Космічна програма США. У США політику в області ДЗЗ визначає держава, яка останніми роками вжила заходів щодо збільшення супутникового угруповання інформаційних систем подвійного призначення для посилення й захисту своєї безпеки і зміцнення положення США як світового лідера в розробленні й використанні систем дистанційного зондування Землі (ДЗЗ).

Нова політика, спрямована на подальше зміцнення лідируючого положення в світі американських компаній, охоплює такі області діяльності:

- ліцензування діяльності й функціонування КС ДЗЗ;
- використання ресурсів КС ДЗЗ в інтересах оборонних, розвідувальних та інших державних відомств США;
- доступ іноземних замовників (державних і комерційних) до ресурсів ДЗЗ, експорт технологій і матеріалів ДЗЗ;
- міжурядова співпраця в області військової і комерційної космічної видової зйомки.

Основні ідеї нової космічної політики США:

- законодавчо закріплюється, що ресурси американських КС ДЗЗ будуть максимально використовуватися для вирішення оборонних, розвідувальних завдань, забезпечення внутрішньої і міжнародної безпеки та в інтересах цивільних користувачів;
- урядові системи ДЗЗ (наприклад, Landsat, Terra, Aqua) будуть орієнтовані на завдання, які не можуть ефективно вирішуватися операторами КС ДЗЗ через економічні фактори, інтереси забезпечення національної безпеки або з інших причин;
- установлення й розвиток довгострокового співробітництва між урядовими органами й аерокосмічною промисловістю США, забезпечення оперативного механізму ліцензійної діяльності в області функціонування операторів систем ДЗЗ та експорту технологій і матеріалів ДЗЗ;
- створення умов, що забезпечують промисловості США конкурентні переваги у сфері надання послуг ДЗЗ іноземним урядовим і комерційним споживачам.

Характерною рисою космічних програм США є комерціалізація отриманих при дистанційному зондуванні Землі як фундаментальних, так і військово-прикладних результатів. Підхід США до формулювання

космічних програм в цьому суттєво відрізняється від підходу інших країн, зокрема Росії, де впровадженню результатів дистанційних аерокосмічних досліджень до останнього часу приділялося недостатньо уваги.

Результатом багаторічних спостережень з використанням систем ДЗЗ США стало виявлення ландшафтних змін на поверхні Землі. Так, порівняння багаторічних даних, отриманих НАСА за допомогою супутникової системи ДЗЗ (рис. 2.1), дало змогу встановити, що льодовик Бранта в Антарктиді покривається сіткою тріщин. 2016 року в льодовику виникла ще одна тріщина – Геловінська (рис. 2.1, б, г).

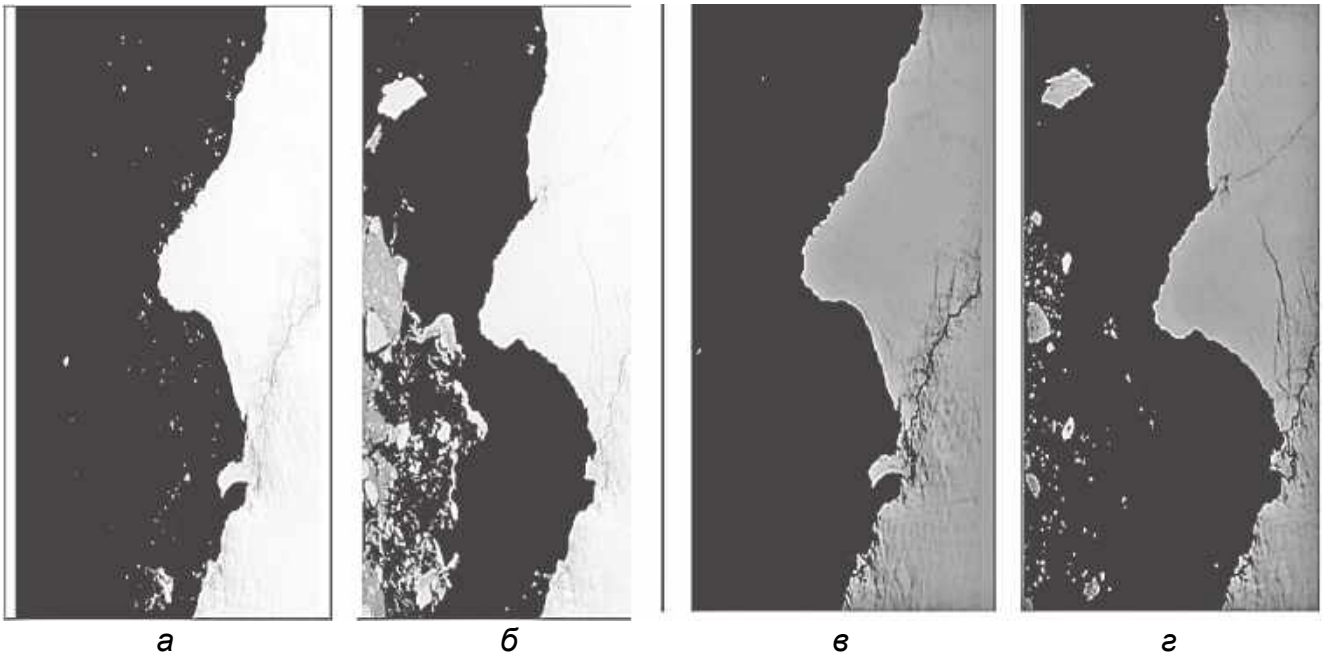


Рис. 2.1. Розвиток сітки тріщин на льодовику Бранта в Антарктиді: а, в – зйомка 30 січня 1986 р.; б, г – 23 січня 2019 р.; а, б – первинні матеріали; в, г – після попереднього оброблення

Характерною рисою космічної програми США є комерціалізація розробок, що створювались на замовлення військового відомства США. Останнім часом до ринку створення космічних продуктів США активно залучається приватний бізнес. У цьому сегменті діяльності США є безперечним лідером у світі. Провідною приватною компанією є компанія SpaceX Ілона Маска.

Space Exploration Technologies Corporation (SpaceX) – американська компанія, виробник космічної техніки. Штаб-квартира – у місті Хоторне, Каліфорнія, США. Заснована 2002 року колишнім акціонером PayPal і CEO Tesla Motors Ілоном Маском для зменшення витрат на польоти в космос і відкриття шляху до колонізації Марса.

Компанія розробила ракети-носії Falcon 1, Falcon 9 і Falcon Heavy, з самого початку маючи на меті зробити їх багаторазовими, і космічний корабель Dragon (виведений на орбіту тими ж Falcon 9), призначений для поповнення запасів на Міжнародній космічній станції. 30 травня 2020 року

відбувся перший пілотований запуск пасажирської версії корабля Dragon V2, призначеної для транспортування астронавтів на МКС.

Технології SPACEX

Сімейство ракет Falcon. SpaceX успішно розробила і запустила в космос ракету-носій легкого класу Falcon 1, середнього класу Falcon 9 і ракету-носій важкого класу Falcon Heavy, перший запуск якої відбувся в лютому 2018 року.

Космічний корабель Dragon. Стикування Dragon з МКС за допомогою Канадарм 2. Dragon – приватний транспортний космічний корабель (КК) компанії SpaceX. Його розроблено на замовлення NASA в межах програми Commercial Orbital Transportation Services (COTS) для доставки та повернення корисного вантажу (Dragon) і людей (Dragon 2) на Міжнародну космічну станцію. Виводиться в космос ракетою-носієм Falcon 9.

Двигуни SuperDraco. З моменту заснування SpaceX компанія розробила кілька ракетних двигунів:

- Kestrel – для другого ступеня Falcon 1;
- Merlin – для першого ступеня Falcon 1 і обох ступенів Falcon 9 і Falcon Heavy;
- Draco – маневрові двигуни для корабля Dragon і другого ступеня Falcon 9 v1.0;
- SuperDraco – для системи аварійного порятунку.

Також у стадії розроблення перебуває двигун Raptor, який буде використовуватися для майбутніх польотів на Марс.

Повторне використання першого ступеня. Перший ступінь ракети Falcon 9 може бути повторно використаний. На ракеті встановлено обладнання для повернення й вертикального приземлення на посадковий майданчик або плавну платформу. Перше успішне приземлення першого ступеня відбулося 22 грудня 2015 року після запуску на орбіту 11 супутників Orbcomm-G2. Уперше перший ступінь був використаний повторно 31 березня 2017 року, а 3 грудня 2018 року перший ступінь був успішно використаний утретє. Усього протягом 2017–2018 рр. було здійснено 16 повторних запусків першого ступеня. 9 травня 2021 року перший ступінь Falcon 9 запущено вдесяте, уперше виконано 10-ту посадку.

Технологія посадки на плавну платформу. Для зниження собівартості запусків SpaceX використовує керовану посадку першого ступеня ракетно-носія на плавну платформу – Autonomous spaceport drone ship. На платформі немає екіпажу, вона функціонує повністю в автономному режимі, також може керуватися дистанційно, з корабля підтримки.

Hyperloop. SpaceX залучалася до роботи над ідеєю вакуумного поїзда ще 2013 року: «альфа-версія» Hyperloop була розміщена в тому числі й на сайті цієї компанії.

Міжпланетна транспортна система. Представлений компанією проєкт багаторазового космічного транспорту для доставки людей на Марс з довгостроковою метою створення там самопідтримуваної колонії.

Глобальний супутниковий інтернет: Starlink. У межах програми із забезпечення високошвидкісним інтернетом всієї планети SpaceX планує розмістити на низькій навколоземній орбіті 4425 супутників, що працюють на частотах Ku(10,7...18 ГГц)- і Ka(26,5...40 ГГц)-діапазонів, на 83 різних навколоземних орбітах на висотах від 1110 до 1325 км. Перші повнофункціональні супутники планували почати запускати в 2019 році, завершення розміщення супутникового угруповання очікують до 2024 року. Також компанія подала заявку до Федеральної комісії зі зв'язку на розміщення додаткових 7518 супутників, які будуть використовувати частоти V-діапазону (40...75 ГГц) і розташовуватися на низьких орбітах заввишки від 335 до 345 км.

Запуск двох прототипів майбутнього глобального супутникового угруповання – тестових мінісупутників Microsat 2a і Microsat 2b – ракетою-носієм Falcon 9 відбувся 22 лютого 2018 року.

29 березня 2018 року Федеральна комісія зі зв'язку (США) схвалила заявку Space Exploration Holdings, LLC на створення, розгортання й експлуатацію мережі з 4425 нестационарних супутників зв'язку для надання широкопasmового доступу до інтернету споживачам у Сполучених Штатах і в усьому світі за умови, що 50 % з них почнуть експлуатацію не пізніше 29 березня 2024 року.

23 травня 2019 року на орбіту були виведені перші 60 супутників глобального інтернету.

Програма запуску малих супутників. У вересні 2018 року президент компанії Гвін Шотвелл повідомила про плани компанії щодо проведення серії окремих місій, призначених для виведення на орбіту малих супутників для комерційних клієнтів.

5 квітня 2019 року SpaceX представила власну програму щодо запуску малих супутників за допомогою ракети-носія Falcon 9, аносувала щорічні окремі запуски на сонячно-синхронну орбіту зі стартового комплексу SLC-4 на базі Ванденберг, починаючи з 2021 року. Ціна виведення супутника масою до 150 кг – 2,25 млн дол., 300 кг – 4,5 млн дол.

I. Маск пообіцяв, що компанія зможе знизити ціну до 1100 дол. за кілограм корисного вантажу, що доставляється на орбіту. На цей час ціна становить 5000 дол./кг. Це відкриває широкі можливості для впровадження технологій наносупутників, коли запуск на орбіту корисного вантажу масою пару кілограмів коштуватиме кілька тисяч доларів. Наразі, у зв'язку з високим інтересом замовників до програми, компанія прискорила початок програми, збільшила кількість запусків і знизила ціну за виведення корисного вантажу на орбіту. Починаючи з 2020 року компанія планує виконувати по три щорічних окремих запуски на сонячно-синхронну орбіту з інтервалом близько 4 місяці. На додаток до цього, у клієнтів є можливість розмістити свої супутники як другорядний корисний вантаж під час щомісячних запусків Falcon 9 з супутниками Starlink на навколоземну

орбіту з нахилом $53,2^\circ$. Ціна виведення супутника масою до 200 кг становить 1 млн дол.

Франція. Авіаційна й космічна промисловість Франції займає перше місце в Європі і третє у світі (після США і Росії).

Космічні дослідження Франції здійснюються широким фронтом відповідно до національної програми і в межах двосторонніх угод, а також Франція практично формує програму Європейського космічного агентства (ESA).

Франція стала третьою країною, яка змогла самостійно здійснити космічний запуск і вивести на навколоземну орбіту національний штучний супутник Землі (листопад 1965 р.).

Програма SPOT була схвалена французьким урядом 1978 року. Система супутників дистанційного зондування Землі SPOT була спроектована Національним центром космічних досліджень Франції (CNES) і розроблена з участю Швеції і Бельгії. Система складається з кількох космічних апаратів (КА), а також наземного обладнання для контролю й програмування супутників ДЗЗ і поставки космічних знімків споживачам. Перший КА SPOT 1 запуснено 22 лютого 1986 року, а останній супутник цієї серії SPOT 5 – у травні 2002 року. Нині залишаються в робочому стані три з п'яти запуснених супутників.

Німеччина. Німеччина здійснює свою космічну програму в межах двостороннього співробітництва з США, Францією, а також з Європейським космічним агентством під керівництвом Аерокосмічного науково-експериментального центру. Хоча Німеччина й не має своїх ракет-носіїв, вона брала активну участь у створенні західноєвропейської ракети-носія «Аріан», на якій встановлено третій, киснево-водневий, ступінь німецького виробництва. Німеччина довгий час перебувала в тіні лідерів ринку космічної інформації – США, Франції та Індії, скромно беручи участь у загальноєвропейських програмах дистанційного зондування Землі. Новий німецький супутник TerraSAR-X зробить Німеччину монополістом на ринку високодетальних радіолокаційних продуктів (систем з високою просторовою роздільною здатністю), доступних раніше тільки спецслужбам.

Після успішного запуску TerraSAR-X Німеччина стала першою країною, яка запустила цивільний супутник з радіолокатором з просторовою роздільною здатністю до 1 м. Сьогодні аналогічні радары експлуатують тільки оборонні відомства США (супутники видової розвідки LACROSSE) і Японії (супутник IGS-1R). У гонці зі створення космічних радарів різного призначення (військових, цивільних, подвійного застосування) беруть участь Італія, Росія, Ізраїль і Канада, але першими на ринку з'явилися продукти німецького супутника TerraSARX.

Німеччина слідом за Канадою і США створює власні системи спостереження за поверхнею Землі в інтересах як Бундесверу, так і цивільних користувачів. Унаслідок запуску супутника TanDEM-X 2009 року на орбіті сформовано угруповання з двох радарних космічних апаратів, що здійснюють спільний (тандемний) політ на невеликій відстані один від одного. Протягом трьох років тандемна пара радарних супутників-близнюків зняла всю земну поверхню (150 млн км²) для розроблення глобальної цифрової моделі рельєфу (ЦМР) з безпрецедентною точністю й детальністю (помилка по висоті 2 м, крок 12 м).

Сьогодні у вільному доступі є американська ЦМР з кроком 90 м і помилками по висоті 16 м, що не охоплює всю земну поверхню. Німеччина створює також військову систему радарної розвідки в складі п'яти мінісупутників SAR-Lupe. Система має забезпечити оперативну зйомку будь-якого району Землі незалежно від метеоумов з максимальною роздільною здатністю до 0,7 м. Перший з мінісупутників масою 770 кг був виведений на орбіту російською ракетою «Космос-3М» з полігону Плесецьк 19 грудня 2006 року. Основою цієї системи є відкриття для Франції доступу до можливостей німецьких космічних апаратів SAR-Lupe в обмін на доступ для Німеччини до французької системи оптичного діапазону HELIOS-2.

Італія. Італійська програма космічних досліджень базується на використанні ракет-носіїв США («Скаут»), Європейської організації з розроблення ракет-носіїв («Європа-1») і Європейського космічного агентства («Аріан»). Керівництво космічними програмами Італії покладено на Комісію з дослідження проблем космосу і Центр аерокосмічних досліджень. 1988 року було створено Італійське космічне агентство. За витратами на космос Італія займає третє місце в Західній Європі після Франції та ФРН.

Великобританія. Проводить космічні дослідження в межах національної програми за спільними програмами з США і Європейським космічним агентством. Британська компанія розробила SSTL кілька десятків міні- і мікророзмірних супутників і вважається визнаним світовим лідером у цій галузі. У жовтні 2005 року російською ракетою «Космос-3М» був виведений на орбіту мінісупутник TOPSAT-1. Вартість TOPSAT-1 становила близько 25 млн дол. і на момент запуску мінісупутник по праву вважався найдешевшим у класі мініапаратів з апаратурою високої роздільної здатності. Мініапарат дає змогу отримувати знімки високої роздільної здатності (2,8 м), причому вартість цих знімків у 5 разів нижче, ніж вартість аналогічних знімків, отриманих з великих супутників.

Іспанія. Іспанія бере участь у багатьох роботах, що виконуються ESA. КА «Геліос-1А» був першим супутником оптичної розвідки, виготовленим і

запущеним в Європі, і Іспанія взяла на себе 7 % фінансування робіт зі створення КА «Геліос-1». Запити на зйомку від італійського, іспанського та французького командувань надходять на французьку авіабазу Крейл. Там за участю військових представників Іспанії складається інтегрована програма зйомки (у якій кожна сторона має право на частку, яка відповідає її частці фінансування проєкту). Одержувані зображення передаються на приймальні станції, обладнані в кожній країні-учасниці, в тому числі на станцію Західноєвропейського Союзу (ЗЄС) у Торрехоні (Іспанія), де ведеться оброблення зображень з «Геліоса» для їх використання країнами ЗЄС.

Іспанія бере участь і в створенні глобальної європейської системи супутникового спостереження оборонного призначення.

Японія. Японія стала четвертою країною світу, яка зі свого космодрому своїм ракетносієм «Ламбда-4S» здійснила в лютому 1970 року запуск першого штучного супутника Землі «Осумі». Ця країна працює в космосі виключно за національними програмами, які здійснюються відповідно до довготривалого плану робіт під керівництвом Національного управління з космічних досліджень та Інституту досліджень в області космосу й аеронавтики Токійського університету. Реалізуючи цей план, Японія досягла великих успіхів в області космонавтики, створивши ряд ракет-носіїв «Ламбда-4S», «Мю», «Н-I», «Н-II» і супутників зв'язку, метеорології для досліджень природних ресурсів Землі і т. д. Основною особливістю японської космічної програми є широта тематики при мінімальних витратах. Японія при всіх своїх досягненнях у космосі витрачає у десять разів менше коштів, ніж НАСА. Для реалізації національних космічних програм в Японії створено й оснащено сучасним технологічним і випробувальним обладнанням два космодрами «Утіноура» і «Танегасима» і кілька науково-дослідних центрів.

Індія. 10 січня 2007 року запущено супутник Cartosat-2, за допомогою якого Індія вийшла на ринок даних метрової роздільної здатності. Cartosat-2 є супутником дистанційного зондування з панхроматичною камерою для картографії. Камера призначена для фотозйомки з просторовою роздільною здатністю 1 м і шириною смуги захоплення 10 км. Космічний апарат має сонячно-синхронну полярну орбіту заввишки 630 км.

Ізраїль. Ізраїль з цілковитою підставою вважається однією з провідних космічних держав світу. З моменту запуску першого супутника «Офек-1» у вересні 1988 року ізраїльськими фахівцями були створені десятки новітніх зразків космічної техніки та здійснені пуски космічних кораблів різного призначення. Спочатку космічна програма Ізраїлю мала військову спрямованість, але з роками військова складова космічного проєкту доповнилася цілим спектром приладів різного призначення: від

телекомунікаційних супутників до науково-дослідних станцій. Ізраїлем створений EROS-B – перший в світі мінісупутник масою близько 300 кг, здатний отримувати зображення Землі з просторовою роздільною здатністю до 0,7 м з висоти 500 км.

Китай (КНР). Космічна програма Китаю здійснюється під керівництвом Академії космічної техніки. Програма КНР у космосі в основному має військове й господарсько-прикладне спрямування.

Відповідно до офіційного плану 2006 року китайська космічна програма має такі завдання:

- розвідка космічного простору;
- підвищення розуміння і знання Землі й космосу;
- використання космосу з мирними намірами;
- заохочення цивілізації й соціального розвитку на благо всього людства;
- вирішення питань економічного устрою, наукового й технологічного розвитку, безпеки країни та суспільного розвитку;
- підвищення наукової освіченості китайських громадян;
- охорона національних інтересів і прав Китаю;
- нарощування національної могутності.

Китай має кілька десятків наукових і виробничих підприємств космічної галузі. Основними організаціями, що відповідають за розвиток космічної галузі в КНР, є Китайське національне космічне управління та Китайська академія космічних технологій (CAST). Китай має можливість здійснювати запуски КА з одного з чотирьох космодромів: «Цзюцюань»; «Січан»; «Тайюань»; «Веньчан» (найбільш південний).

Китай має третій у світі флот морських кораблів космічного стеження й мережу наземних радарних станцій спостереження, у тому числі за межами своєї території (у Намібії, Кірибаті тощо). Асигнування КНР на космос оцінюються в 1,5 млрд дол. на рік. Перший свій штучний супутник Землі «Чайна-1» китайці вивели на орбіту ракетою-носієм «Великий похід-1» у квітні 1970 року. КНР активно використовує два космодроми – «Шуанченцзи» і «Січан». Для спостереження за поверхнею Землі 1999 року на орбіту був виведений супутник CBERS-01. Він був розрахований на роботу протягом двох років, але працював майже чотири роки, після чого в жовтні 2003 року його замінив CBERS-02. Маса цього супутника становить близько 1400 кг, він знаходиться на сонячно-синхронній орбіті заввишки 775 км з нахилом 98,5° до екватора. На ньому встановлено три камери, які мають роздільну здатність 20, 80 і 160 м. Бразилія і Китай з 1998 р. співпрацюють у розробленні супутників, призначених для спостереження за поверхнею Землі. І результатом цієї співпраці стали вже два супутники серії CBERS. Запуски здійснювалися китайськими ракетами. Ці супутники використовуються для моніторингу забруднення річок та океанів, вирубки лісів і розростання міст.

Проєкт зі створення китайської системи дистанційного зондування Землі «Гаофень» офіційно стартував 2010 року, за його реалізацію відповідає Державний комітет оборонної науки, техніки і промисловості КНР. Передбачається, що проєкт «Гаофень» відіграватиме стратегічно важливу роль для соціально-економічного розвитку та державної безпеки КНР у забезпеченні матеріалами ДЗЗ високої роздільної здатності. Усього до складу системи крім супутника «Гаофень-1» мають увійти ще шість космічних апаратів: «Гаофень-2» – низькоорбітальні супутники оптичного спостереження з високою роздільною здатністю (1 м в панхроматичному режимі і 4 м у багатоспектральному); «Гаофень-3» – низькоорбітальні супутники радіолокаційного спостереження високої роздільної здатності (до 1 м) з радіолокатором С-діапазону частот; «Гаофень-4» – геостаціонарний супутник ДЗЗ оптичного спостереження з роздільною здатністю до 50 м; «Гаофень-5» – низькоорбітальний супутник гіперспектральної зйомки з роздільною здатністю до 10 м; «Гаофень-6» – апарат-близнюк «Гаофень-1» (був успішно виведений на задану орбіту 3 червня 2018 року); «Гаофень-7» – низькоорбітальний супутник, оснащений оптичною стереосистемою для 3D-картографічної зйомки земної поверхні.

Корея. Уряд Республіки Кореї запровадив програму підтримки високих технологій, у тому числі аерокосмічних, уважаючи це найкращим способом підвищити конкурентоспроможність країни на міжнародному ринку.

Канада. Канада 1990 року створила Канадське космічне агентство, під керівництвом якого ведуться роботи з ракетно-космічної тематики. 4 листопада 1995 року канадський комерційний супутник RADARSAT-1 почав роботу на орбіті. RADARSAT-1 став першим у світі комерційним апаратом з радаром синтезованої апертури, що зумовило його високу (до 8 м) просторову роздільну здатність, а разом з тим і стійкий попит на дані. Радар дає змогу проводити зйомку незалежно від погодних умов і в будь-який час доби, що надзвичайно важливо для супутникової системи дистанційного зондування. Крім того, замовник може провести екстрену зйомку заданого району, надіславши заявку лише за 29 годин, та отримати дані без затримки, у реальному масштабі часу.

Білорусь. Космічна програма Білорусі здійснюється відповідно до союзної програми «Розроблення й використання перспективних космічних засобів і технологій в інтересах економічного й науково-технічного розвитку Союзної держави». Фінансування робіт з розроблення союзної програми здійснюється за рахунок власних коштів підприємств та організацій Російської Федерації і Республіки Білорусь, які беруть участь у програмі. Космічні апарати «Канопус-В» і БКА призначені для вирішення таких завдань: моніторинг надзвичайних ситуацій; картографування; виявлення осередків лісових пожеж і викидів забруднювальних речовин; реєстрація аномальних фізичних явищ з метою вивчення й прогнозування землетрусів;

моніторинг водних ресурсів і сільського господарства; вирішення завдань землекористування; високо-оперативне спостереження.

Україна. Дистанційне зондування Землі з космосу. 1 вересня 1979 року в ІРЕ АН УРСР був створений відділ дистанційних методів дослідження природного середовища для розвитку нового наукового напрямку – космічної радіоокеанографії і дистанційного зондування Світового океану і морських льодів. Основою нового відділу, який очолив А. І. Калмиков, стала група, що розробляла дистанційні методи радіолокації моря у відділі поширення радіохвиль І. Є. Островського. З початку 1980-х рр. у відділі починається розроблення космічного радіолокатора бокового огляду і сканувального радіометра для вивчення океану й льоду. Одночасно створюється літаковий комплекс апаратури, що складається з радіолокатора бокового огляду сантиметрового діапазону (РБО-3) і сканувального восьмиміліметрового радіометра (РМ-08) з оперативним обробленням інформації на борту, аналог космічної системи. У перших же експериментах було доведено ефективність запропонованої в ІРЕ АН УРСР системи для вивчення океану й льоду.

Спільне використання інформації РБО-3 і РМ-08 принципово мало б забезпечити отримання даних про стан морської поверхні і льодів, глибших, ніж дані кожного окремого датчика. У багатьох ситуаціях ці можливості було проілюстровано, проте інформативність радіометричних систем виявилася меншою, ніж очікувалося. У цей період отримано переконливі дані про можливості радіолокаційних спостережень льоду. Результати цих досліджень переконали співробітників відділу в перспективах радіолокаційних спостережень льоду з космосу. Численні спроби теоретично інтерпретувати дані зондування льодів, на жаль, не привели до створення адекватної моделі і методів розрахунку. Явище розсіювання радіохвиль льодом виявилось набагато складнішим, ніж розсіювання морем. Разом з тим виконані дослідження показали перспективи вирішення широкого кола завдань з вивчення океану й льоду з космосу.

1983 року був запуск ШСЗ «Космос-1500» (рис. 2.2) з першим вітчизняним оперативним РБО зі смугою огляду близько 500 км і просторовою роздільною здатністю 1–2 км.

Параметри РБО «Космос-1500» (табл. 2.1) вибрано оптимальними для вивчення мезомасштабних процесів в океані й льодах, що забезпечувало можливість контролю основних взаємодій у системі океан – атмосфера, основних процесів льодоутворення та динаміки льодових покривів.

Висока оперативність системи досягалась як вибором параметрів, так і обробленням інформації на борту й передаванням її в міжнародному стандарті АРТ на широку мережу споживачів (у тому числі і на автономний пункт приймання й оброблення космічної інформації в ІРЕ).

За виконання циклу робіт «Створення радіолокаційних методів (дистанційного зондування) природного середовища Землі з аерокосмічних носіїв і їх впровадження», пов'язаних з розробленням і впровадженням в серійне виробництво апаратури дистанційного зондування космічного

базування, співробітники відділу отримали Державну премію України в галузі науки і техніки за 1987 р., а за створення апаратного комплексу ШСЗ «Космос-1500» – високі урядові нагороди.

Таблиця 2.1
Основні технічні характеристики
радіолокатора бокового огляду (РЛБО)
ШСЗ «Космос-1500»

Параметри	РБО-3
Довжина хвилі, см	3,1
Поляризація	ВВ
Діапазон кутів спостереження	20°...46°
Ширина ДН антени: в азимутальній площині в кутомісцевій площині	0,2° 42°
Просторова роздільна здатність, км: при передачі по М-лінії при передачі по ДМ-лінії	2×2,5 0,8×2,5
Чутливість приймача, дБ/Вт	-140
Потужність передавача	100 КВт
Тривалість імпульсу, мкс	3
Частота повторення імпульсів, Гц	100
Висота орбіти ШСЗ, км	650
Нахил орбіти	82,6°
Смуга огляду, км	450

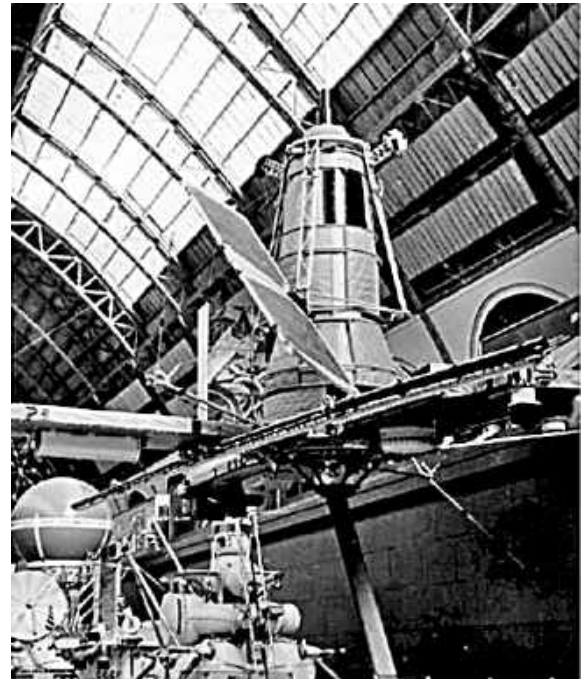


Рис. 2.2. Зовнішній вигляд космічного апарата «Космос-1500» з радіофізичною апаратурою ДЗЗ на борту (ВДНГ СРСР 1985 року)

Розробку РБО і сканувального радіометра передано до НДІ «Радіовимірювання» для промислового виготовлення. Було виготовлено системи ШСЗ: «Космос-1766», «Космос-1899», «Океан»; перші українські національні супутники ДЗЗ: «Січ-1», «Січ-1М». У середині 1980-х рр. відділ розпочав розроблення концепції побудови багатоцільових аерокосмічних оперативних радіолокаційних систем (МРЛК), що забезпечують зондування океану, льодів і суші. Ця концепція ґрунтувалася на загальному врахуванні фізичних властивостей розсіювання різними об'єктами природного середовища, тактичних вимог щодо оптимізації співвідношень смуги огляду, роздільної здатності при обробленні інформації на борту та інформаційних можливостей різних систем. З цих позицій розроблено варіант побудови перспективної космічної системи дистанційного зондування, що поєднує можливості РБО і РСА. Ця система планувалась для встановлення на ДОС «Світ». Пізніше було запропоновано рішення щодо оцінювання інформативності різних радіолокаційних систем дистанційного зондування. Було показано, що максимальну інформативність має комплекс з РБО, РСА і скатерометром. Відповідно до концепції запропонованої в період 1987–1990 рр., спільно з ЦСКБ (м. Самара) і КБ «Південне» було розроблено перспективний варіант багатоцільового радіолокаційного комплексу.

Багатоцільовий авіаційний радіолокаційний комплекс. Паралельно з



Рис. 2.3. Зовнішній вигляд літака лабораторії МРЛК Ил-18Д з радіофізичною апаратурою багаточастотного радіолокаційного комплексу «МАРС»

розробленням космічного варіанта створювався літаковий багатоцільовий авіаційний радіолокаційний комплекс (МРЛК «МАРС») (рис. 2.3), призначений як для забезпечення наукових досліджень, так і для виконання експлуатаційних робіт. Склад і параметри комплексу вибиралися також на основі запропонованої концепції (рис. 2.3, табл. 2.2). 1995 року запусчено перший український супутник «Січ-1», а 1999 року – українсько-російський супутник «Океан-О» для комплексних спостережень у видимому, інфрачервоному і НВЧ-діапазонах спектра. Обидва супутники

продовжують функціонувати за цільовим призначенням. Створено наземну інфраструктуру для керування супутником, приймання й попереднього оброблення даних спостережень Землі. Запусчено

модернізований супутник «Січ-1М» з оптичним сканером підвищеної роздільної здатності (~ 30 м) і багатосмуговим (оптичний, ІЧ, НВЧ) комплексом оглядового спостереження; ведеться проектування космічних систем оптичного й радіолокаційного спостереження з роздільною здатністю 1...8 м.

Таблиця 2.2

Основні технічні характеристики МРЛК «МАРС»

№ п/п	Параметри	РБО-0,8	РБО-3	РСА-23	РСА-180
1	Довжина хвилі, см	0,8	3	23	180
2	Тривалість імпульсу, мкс: стисненого ЛЧМ імпульсу розтягнутого ЛЧМ імпульсу	0,15	0,15	0,15 7	0,25 28
3	Потужність випромінювання імпульсу, кВт	50	100	1,5	0,3
4	Ширина спектра, МГц	6,5	6,5	12	6,5
5	Частота повторення імпульсу, Гц	1000	1000	1000	1000
6	Чутливість приймача, Вт	10^{-12}	10^{-13}	10^{-14}	5×10^{-14}
7	Коефіцієнт посилення антени, дБ	33	30	19,4	11
8	Ширина ДН антени, град: в азимутальній площині в кутомісцевій площині	0,3 50	0,6 42	3,6 63	35 70
9	Тип антени	АДИ	ВЩ	АФАР	ФАР
10	Поляризація	ВВ, ГГ, ВГ	ВВ	ВВ, ГГ, ВГ, ГВ	ВВ, ГГ, ВГ, ГВ
11	Смуга огляду, км	15	2x45	15, 30	30, 60
12	Початковий кут огляду, град	20	20	20	20
13	Роздільна здатність, м	30...50*	20...50*	25...50* 2,5...25**	50...100* 10...50**

У табл. 2.2. позначено:

* – цифрове бортове оброблення;** – цифрове наземне оброблення.

Проте сьогодні основним проблемним питанням у розвитку ДЗЗ залишається низька комерційна віддача космічних засобів, що є характерним, без винятку, для всіх сучасних космічних систем.

Ефективність РБО «Космос-1500» базувалася насамперед на використанні результатів фундаментальних досліджень і підтверджена на практиці.

Так, 1983 року за даними РБО «Космос-1500» врятовано з кризового становища у важких льодах караван суден (Арктика, протока Лонга).

1984 року виявлено ураган «Diana» на узбережжі США, проведено синхронні літакові (США) і космічні (СРСР) експерименти, визначено точності вимірювання параметрів вітру.

1985 року проведено операцію з порятунку судна «Михайло Сомов», затертого в льодах Антарктики.

1986 року патрулювався відкол шельфового льодовика в Антарктиді зі станцією «Дружная-1».

1988 року за даними РБО «Космос-1766» патрулювали процес танення снігів у Дніпровському каскаді. Велика кількість снігів загрожувала катастрофічною повинню, і побоюючись цього, адміністративні органи збиралися спустити водосховища у Східній Україні. Було б завдано величезної матеріальної та екологічної шкоди. Небезпека повені підсилювалась Чорнобильською катастрофою. Інформація РБО оперативно використовувалася в штабі паводкової ситуації й дала змогу уникнути подібних втрат у Дніпровському каскаді водосховищ.

Програми ДЗЗ в Україні після 1991 р. через недостатнє фінансування були частково згорнуті. Зараз в Україні активно розвивається програма створення студентських наносупутників, у якій активну участь беруть провідні ВНЗ країни – НТУУ «КПІ ім. І.Сікорського» та НАКУ ім. М. Є. Жуковського «ХАІ».

Програма Polyitan. PolyITAN-1 – перший український наносупутник, створений у НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» у кооперації з українськими радіоаматорами (рис. 2.4, а). Активне розроблення космічного апарата формату CubeSat почалося 2009 року. 19 червня 2014 року в 19:11:11 UTC ракетоносій «Дніпро» було успішно запущено, супутник PolyITAN-1 був виведений на орбіту в першій групі супутників, що відокремилися від ракети-носія. PolyITAN-1 зможе знаходитись на висоті 650...710 км кілька років. Завдання створення супутника: підготовка висококваліфікованих фахівців для ракетно-космічної галузі на новій сучасній елементній базі з широким залученням провідних фахівців ракетно-космічної галузі; створення малогабаритної уніфікованої платформи класу «наносупутник» для проведення космічних досліджень, відпрацювання нових конструкторських, технологічних рішень і нової елементної бази з низькими енергетичними та високими інформаційними характеристиками, малими

габаритами і малою вартістю для широкого класу корисного навантаження; створення на базі уніфікованої платформи університетського наносупутника як основного інструменту лабораторного практикуму з керування малими космічними апаратами, приймання й оброблення супутникової інформації.

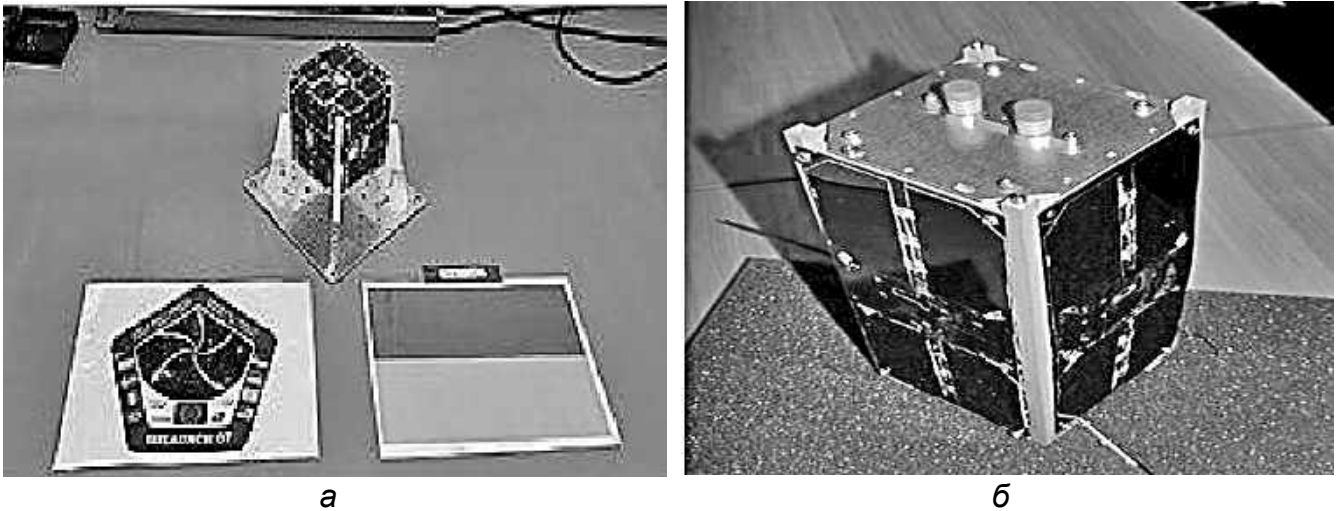


Рис. 2.4. Загальний вигляд супутників PolyITAN-1 (а) і PolyITAN-2 (б)

Конструкція PolyITAN-1. Супутник базується на платформі «CubeSat» з використанням процесора Cortex-M3, STM32F105. Конструкція забезпечує механічне поєднання бортової апаратури і всіх елементів супутника в єдине ціле, монтаж кабельної мережі, зачековки, їх фіксацію на момент транспортування, виведення на орбіту й приведення в робочий стан на орбіті. Конструкція наносупутника складається з ферми, приладових панелей, сотопанелі, елементів кріплення до адаптера ракетно-носія, елементів кріплення і монтажу. Ферма, що є єдиною зварною конструкцією з габаритами 116x116x110 мм, складається з плити установної верхньої окантовки, а також силових поперечних елементів. Установна плита має вигляд квадратної фрезерованої плити розміром 140x140x6 мм. Для забезпечення необхідного теплового режиму й радіаційного захисту апаратури, розміщеної всередині корпусу, до відкритих граней ферми кріпляться п'ять сонячних батарей. У конструкціях сонячних батарей застосовувалися кремнієві фотоперетворювачі з ККД = 17,2...17,5 %. Фотоперетворювачі виготовлено в НТУУ «КПІ». Сотопанельний каркас являє собою тришарову панель з полегшеним алюмінієвим стільниковим заповнювачем, двома вуглепластиковими обшивками і приклеєною діелектричною поліамідною плівкою (ППМ).

Підсистеми PolyITAN-1:

- оброблення даних;
- орієнтації і стабілізації;
- навігації;
- телеметрії;
- електрозабезпечення;
- приймально-передавальна;

- міжсистемна кабельна мережа;
- конструкції (ферми і плити установної).

Комунікаційна система. Для супутника було вибрано систему з використанням двох радіоканалів: один працює в радіоаматорському УКХ-діапазоні на частоті 437,675 МГц (довжина хвилі ~70 см) і призначений для передавання сигналу маяка в телеграфі (CW), а також для телеметрії на швидкості 9600 біт/с, а інший – для передавання даних у широкосмуговому діапазоні, що входить в міжнародну сітку промислових, наукових і медичних частот, на частоті 2,4 ГГц (ISM).

Чутливість:

- приймача 437,675 МГц 116 dBm;
- приймача 2,4 ГГц 116 dBm.

Потужність:

- передавача 437,675 МГц 33 dBm;
- передавача 2,4 ГГц 30 dBm.

Швидкість передавання:

- у діапазоні 437,675 МГц 9600 біт/с;
- у діапазоні 2,4 ГГц 500 кбіт/с.

Система орієнтації. За даними датчиків магнітного поля, гіроскопа у напрямку на Сонце, а також залежно від режиму роботи супутника згідно з циклограмою періодично розраховується поточна орієнтація супутника. Відповідно до поточної орієнтації супутника розраховується керувальний сигнал і подається на котушки орієнтації.

Завдання та апаратура супутника POLYITAN-2-SAU. Цей супутник має стати частиною наукової космічної мережі, призначеної для дослідження термосфери (рис. 2.5). У межах проєкту QB50 супутник несе на борту корисне навантаження – експериментальний датчик аналізу зустрічного потоку газу FIPEX, який здатний розрізняти й вимірювати характеристики атомарного й молекулярного кисню (атомарний кисень – основний елемент на висоті 90...420 км від земної поверхні, тому вимірювання його характеристик є дуже важливим для оцінювання моделей термосфери). PolyITAN-2-SAU перевірятиме роботу системи орієнтації з маховиком, що спеціально для нього розробили політехніки. Власною розробкою є також розміщені на гранях апарата сонячні датчики, що входять до складу системи орієнтації, а також каркаси сонячних батарей, виконаних як багатошарові сотопанелі з вуглепластику й алюмінієвих комірок (так звані сендвіч-панелі), що забезпечують пасивну терморегуляцію і водночас виконують функції захисту. Одночасно буде проводитись вивчення і транслявання інформації про нижні шари атмосфери Землі – термосфери й іоносфери на великих відстанях. Уся отримана інформація буде записуватися в архів центрального бортового процесора і за допомогою плати радіоканалу передаватися на Землю і розсилатися в бази даних усіх університетів, які беруть участь у проєкті.

Компонування апаратури супутника PolyITAN-2-SAU показано на рис. 2.5, а панель приймача ГНСС (GPS GLONASS) супутника – на рис. 2.6.

PolyITAN-2-SAU створено у форматі CubeSat у межах міжнародного проєкту QB50, маса супутника становить 1,9 кг.

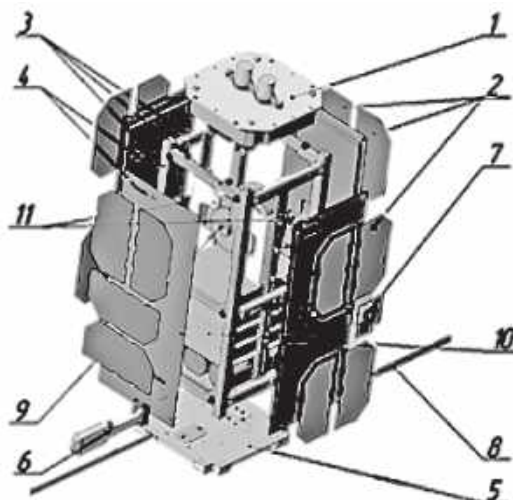


Рис. 2.5. Структурна схема супутника: 1 – корисне навантаження (FIPEX); 2 – сонячні батареї; 3 – несні елементи конструкції; 4 – сонячні панелі; 5 – антенний модуль; 6 – магнітометр з механізмом розгортання; 7 – GPS / ГЛОНАСС антени; 8 – радіоантена; 9 – маховик; 10 – електронна платформа; 11 – датчик координат Сонця

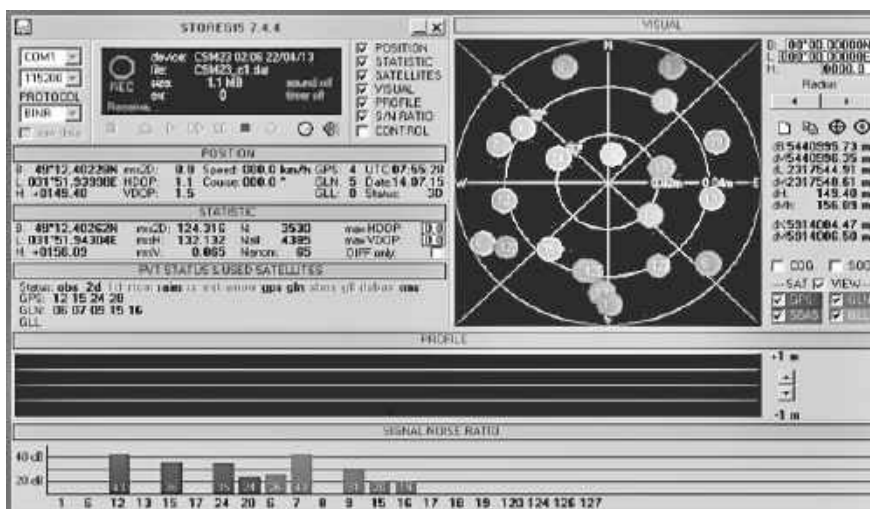


Рис. 2.6. Зовнішній вигляд програми відображення сигналів навігаційної апаратури супутника PolyITAN-2-SAU

Програма відображення сигналів навігаційної апаратури супутника PolyITAN-2-SAU дає змогу отримати таку інформацію: співвідношення сигнал/шум для кожного із супутників систем ГЛОНАСС і GPS; поточні координати приймача (висоту, довготу і широту) і результати їх статистичного оброблення (середнє та середньоквадратичне їх значення); динаміку змінення висоти й лінійне відхилення від центра мішені, яку можна розмістити або в точці з заданими географічними координатами, або в точці, що відповідає обчисленим середнім значенням поточних координат. Розкид значень виміряної поточної координати відносно центра мішені характеризує вплив умов поширення на результати визначення координат.

Приймачі вітчизняного виробництва типу СН 4706 масою до 150 г крім координатної інформації про положення супутника, що потрібні для його навігації, дають змогу отримати додаткову інформацію, яка може використовуватись для вивчення стану атмосфери (тропосфери, іоносфери) і гравітаційного поля Землі, коли наносупутник використовується як пробне тіло, що рухається в цьому полі і на рух якого впливають його неоднорідності, що можуть вивчатися. При створенні навігаційних приймачів ГНСС для наносупутників розробником (КБ «Центр», м. Сміла, Черкаська обл.) були зняті обмеження на швидкість (до 600 м/с) і виміряну висоту (до 18 км), що вводяться Вайсенарськими домовленостями для запобігання поширенню засобів навігації на об'єктах ракетної техніки. Створення вітчизняної лінійки наносупутників масою декілька кілограмів і з малою ціною виведення на орбіту (10...20 тис. дол. США) відкриває нові можливості для проведення досліджень у близькому космосі, у яких можуть брати участь ВНЗ країни.

2.2. Супутники дистанційного зондування Землі

ERS-1 (англ. *European RemoteSensing Satellite*) – супутник дистанційного зондування Землі, вироблений Європейським космічним агентством і призначений для здійснення високоточних вимірювань при спостереженні за поверхнею Землі та її атмосферою (рис. 2.7, табл. 2.3).

Таблиця 2.3

Експлуатаційні характеристики супутника
ERS-1

Стартовий майданчик	Гвіана (департамент Франції), Куру
Ракета-носіє	Аріан-4 V44 L416a
Запуск	17 липня 1991 р., 21:46:31 UTC
Тривалість польоту	9 років
Сходження з орбіти	10 березня 2000 р.
NSSDC ID	1991-050A
SCN	21574
Технічні характеристики	
Маса	2 400 кг
Термін активного існування	2–3 роки
Елементи орбіти	
Тип орбіти	Сонячно-синхронна
Нахил	98,5°
Період обертання	100,3 хв
Апоцентр	775 км
Перицентр	775 км



Рис. 2.7. Зовнішній вигляд супутника ERS-1

Апарат було запусчено на орбіту 17 липня 1991 року з космодрому Куру у Французькій Гвіані. Незважаючи на розрахунковий термін

експлуатації, супутник пропрацював 9 років і за цей час передав понад 1,5 мільйона зображень через радар з синтезованою апертурою (SAR). ERS-1 завершив свою роботу 10 березня 2000 року через відмову бортової системи орієнтації.

Супутник ERS-1 оснащено такими приладами:

1. AMI (англ. Active Microwave Instrument) – прилад, який об'єднав у собі радіолокатор синтезованої апертури SAR (англ. Synthetic Aperture Radar) і вітровий скаттерометр. Прилад був призначений для отримання інформації про погодні умови на поверхні океану, у полярних регіонах, прибережній зоні і про стан суші.

2. RA (англ. Radar Altimeter) – висотомір, що забезпечував точне вимірювання рівня моря, різних характеристик льодового покриву і швидкості океанічного вітру.

3. ATSR-1 (англ. Along Track Scanning Radiometer) – прилад, призначений для вимірювання температури морської поверхні, температури й вологості хмар. Складався з інфрачервоного й мікрохвильового радіометрів.

4. PRARE (англ. Precise Range and Range-rate Equipment) – навігаційний прилад, необхідний для точного визначення координат супутника й параметрів орбіти, геодезичного фіксування.

5. LRR (англ. Laser Retro-reflectors) – відбивачі для визначення положення супутника та його орбіти за допомогою наземної лазерної станції. Набори сенсорів для всепогодного і такого, що не залежить від часу доби спостереження за Землею.

Програма польоту. Виходячи з конструктивного терміну експлуатації ERS-1, було складено програму дослідження з кількох окремих етапів і шести основних фаз:

- перші два тижні після запуску – збір відомостей про параметри орбіти, увімкнення і функціональний контроль систем;

- 3 серпня – 10 грудня 1991 року – екзаменаційна фаза, політ з повторенням траси через три дні;

- 28 грудня 1991 року – 30 березня 1992 року – перша «льодова» фаза (для вивчення льодового покриву теж з триденним циклом);

- 15 квітня 1992 року – 15 грудня 1993 року – багатозадачна фаза (політ з повторенням траси через 35 діб);

- 1 січня – 31 березня 1994 року – друга «льодова» фаза з триденним циклом;

- 15 квітня 1994 року – геодезична фаза, політ з повторенням траси через 176 діб.

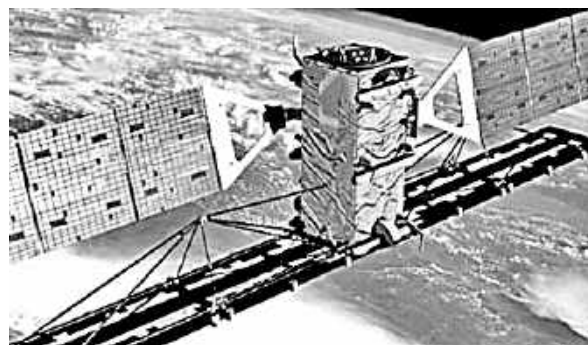
Результати й завдання. Отримані дані дали змогу виявити поруч з антарктичною станцією «Схід» витягнуте плато з аномально малим перепадом висот. Це плато було проінтерпретоване як велике підлідне озеро, що отримало назву «Схід». Головне завдання супутників ERS, сконструйованих на замовлення Європейського космічного агентства (ESA) – спостереження за малодослідженими регіонами – океанами й покритими

льодом частинами суші і надання супутникових даних кліматологам, океанографам та організаціям з охорони навколишнього середовища. Основним інструментом супутника був радар з синтезованою апертурою Synthetic Aperture Radar (SAR), який вів спостереження на смузі завширшки 100 км з роздільною здатністю 28 м. Хоча спочатку супутник ERS-1 був розроблений для спостережень за океаном і кригою, він дуже швидко довів свою багатосторонність і щодо суші в сільському й лісовому господарствах, у рибальстві, геології та картографії. Після трьох років виконання своєї місії ERS-1 був замінений на ERS-2 для аналогічного призначення. Супутник ERS-2 оснащено вимірювальним приладом Global Ozone Monitoring Experiment Gome, який ураховує обсяг і розподіл озону та інших газів в атмосфері Землі. За допомогою цього приладу можна було спостерігати за небезпечною озоною дірою і змінами, що відбуваються. Експлуатацію супутника припинено у вересні 2011 року. Доступними є лише архівні дані. Подальший його розвиток – це ERS-2.

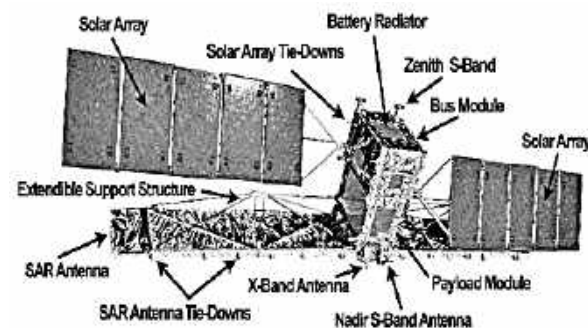
RADARSAT-1 – перший комерційний супутник спостереження Землі в Канаді. Тут використовувався радар з синтезованою апертурою (SAR) для отримання зображень земної поверхні для керування природними ресурсами й моніторингу глобального змінення клімату (рис. 2.8., табл. 2.4).

Таблиця 2.4
Експлуатаційні характеристики
супутника RADARSAT-1

Тип місії	Спостереження за Землею
Оператор	CSA
COSPAR ID	1995-059A
SATCAT №	23710
Тривалість місії	5 років
Виробник MDA (раніше Spar)	Ball Aerospace
Стартова маса	2750 кг
Потужність	2100 Вт
Дата запуску	4 листопада 1995 р., 14:22 за UTC
Ракета	Delta II 7920-10
Останній контакт	29 березня 2013 р.
Система відліку	Геоцентрична
Висота перигею	793 км
Висота апогею	821 км
Нахил	98,6 °
Період	100,70 хв
Площа збору	0,05...500 км
Діапазон довжин хвиль	C
Роздільна здатність	8...100 м



а



б

Рис. 2.8. Зовнішній вигляд супутника RADARSAT-1 (а); компоненти та характеристики (б)

RADARSAT-1 був запущений о 14:22 UTC 4 листопада 1995 року з Ванденбергського AFB полігону в Каліфорнії на сонячно-синхронну орбіту (світанок – сутінки) над Землею з висотою 798 км (496 миль) і нахилом 98,6°. Супутник розроблено під керівництвом Канадського космічного агентства (CSA) у співпраці з урядами провінцій Канади і приватним сектором. Його використання дало змогу отримати зображення Землі як для наукових, так і для маркетингових цілей. Дані RADARSAT-1 були корисними в багатьох областях, включаючи сільське господарство, картографію, гідрологію, лісове господарство, океанографію, геологію, моніторинг льоду й океану, арктичний нагляд і виявлення нафтових плям в океані.

Орбітальний слід. RADARSAT-1, а потім і RADARSAT-2, який було запущено 14 грудня 2007 року з Байконура (Казахстан) (табл. 2.5), з орбітальним періодом 100,7 хв обертається навколо Землі 14 разів на день.

Таблиця 2.5
Основні характеристики RADARSAT-2

Виробник	Канада, MDA
Завдання	Дистанційне зондування Землі
Супутник	Земля
Стартовий майданчик	Росія, Байконур
Ракета-носій	«Союз-ФГ»
Запуск	14 грудня 2007 р., 13:17 UTC
Тривалість польоту	13 років 8 місяців 26 днів
NSSDC ID	2007-061A
SCN	32382
Платформа	PRIMA
Маса	2225 кг
Розміри антени	15x1,5 м
Потужність, не менше	2400 Вт
Орієнтація	Тривісна, не гірше $\pm 0,05^\circ$
Тип орбіти	Сонячно-синхронна
Велика піввісь	7169,9 км
Ексцентриситет	0
Нахил	98,6°
Період обертання	100,8 хв
Апоцентр	799 км
Перицентр	792 км
Кількість витків за день	14

Траєкторія орбіти повторюється кожні 24 дні. Це означає, що супутник знаходиться точно в одному й тому ж місці й може знімати одне й те саме зображення (той самий режим і те саме положення променя) кожні 24 дні. Це є корисним для інтерферометрії і виявлення змін у певному місці, які відбулися протягом 24 днів. Використовуючи різні положення променя, місце розташування можна також сканувати кожні кілька днів. RADARSAT-1 був правостороннім супутником. Це означає, що мікрохвильовий промінь передає й приймає на правій стороні супутника відносно його орбітального шляху.

Коли він спускається на своїй орбіті з Північного полюса, він дивиться на захід, а коли він піднімається з Південного полюса, він дивиться на схід.

Таким чином, позиціонування може бути відображене з протилежних сторін. У поєднанні з різними режимами й положеннями променя це дало користувачам багато можливих перспектив. Основним вимірювальним приладом обох супутників був радіолокатор з синтезованою апертурою.

Envisat (2002–2012). Envisat («Супутник навколишнього середовища») запущено 1 березня 2002 року з борту Ariane 5 з Гайянського космічного

центру в Куру, Французька Гвіана, на сонячну синхронну полярну орбіту на висоті 790 км (490 миль) (± 10 км або 6,2 миль) (рис. 2.9). Період орбіти – приблизно 101 хв з повторенням кожні 35 днів. Після втрати зв'язку із супутником 8 квітня 2012 року ЕКА офіційно оголосила про завершення місії Envisat 9 травня 2012 року. Вартість розробки й запуску Envisat становить 2,3 млрд євро (включаючи 300 млн євро за п'ять років роботи). Місія має бути замінена серією супутників Sentinel. Перший з них, Sentinel 1, узяв на себе функції радарів Envisat з моменту його запуску 2014 року. Envisat запущено як супутник спостереження Землі.

Його мета полягала в тому, щоб забезпечити безперервність польотів європейських супутників дистанційного зондування, надаючи додаткові параметри спостережень для поліпшення екологічних досліджень. У багатьох наукових дисциплінах сьогодні використовуються дані, отримані від різних датчиків на супутнику, для вивчення таких речей, як хімія атмосфери, виснаження озону, біологічна океанографія, температура і колір океану, вітрові хвилі, гідрологія, сільське господарство і садівництво, стихійні лиха, цифрове моделювання рельєфу (з використанням інтерферометрії), моніторинг морського руху, моделювання атмосферного розсіювання (забруднення), картографія та дослідження снігу та льоду.

Технічні характеристики:

- розміри 26 м (85 футів) x 10 м (33 фути) x 5 м (16 футів);
- маса 8 211 кг (18 102 фунти), включаючи 319 кг (703 фунти) палива і 2118 кг (4 669 фунтів) корисного навантаження приладу;
- потужність сонячної батареї із загальним навантаженням 3560 Вт.

Слід зазначити, що орбіти всіх супутників ДЗЗ мають багато схожих елементів (висоти, нахил), зокрема всі вони є сонячно-синхронними.

Інструменти. Envisat містить набір з дев'яти приладів спостереження Землі, які збирають інформацію про Землю (сушу, воду, льод та атмосферу) з використанням різних принципів вимірювання. Десятий інструмент, DORIS, забезпечував керування і контроль. Деякі з цих приладів були вдосконаленими версіями приладів, які використовувалися в попередніх польотах супутників ДЗЗ ERS 1 і ERS 2 та інших супутників.



Рис. 2.9. Зовнішній вигляд супутника Envisat

1. MWR – мікрохвильовий радіометр, розроблений для вимірювання водяної пари в атмосфері.

2. AATSR вимірює температуру поверхні моря у видимій та інфрачервоній областях спектра протягом польоту. Завдяки наявності ширококутної лінзи можна проводити дуже точні вимірювання атмосферних впливів на те, як поширюються випромінювання з поверхні Землі.

3. AATSR є наслідувачем ATSR1 і ATSR2, корисних навантажень ERS 1 і ERS 2, може вимірювати температуру поверхні Землі з точністю до 0,3 K (0,3 °C) для дослідження клімату. Серед другорядних завдань AATSR – спостереження за такими параметрами навколишнього середовища, як уміст води, біомаса та її зростання у рослинності.

4. MIPAS (інтерферометр Майкельсона для пасивного зондування атмосфери) – інфрачервоний спектрометр з перетворенням Фур'є, який забезпечує вимірювання профілю тиску й температури, а також профілів слідів газів діоксиду азоту NO_2 , закису азоту N_2O , метану CH_4 , азотної кислоти HNO_3 , озону O_3 та води H_2O в стратосфері. Прилад функціонує з високою спектральною роздільною здатністю в розширеному спектральному діапазоні, що дає змогу охопити всю Землю в будь-яку пору року і при однаковій якості вночі і вдень. MIPAS має вертикальну роздільну здатність від 3 до 5 км залежно від висоти (більше на рівні верхньої стратосфери).

5. MERIS (MEdium Resolution Imaging Spectrometer) вимірює відбивну здатність Землі (поверхні й атмосфери) у сонячному спектральному діапазоні (від 390 до 1040 нм) і передає 15 спектральних смуг назад у наземний сегмент. MERIS побудовано в Каннському космічному центрі Мандели.

6. SCIAMACHY (спектрометр сканування зображень атмосферної діаграми) порівнює світло, що виходить від Сонця, зі світлом, відбитим Землею, що дає інформацію про атмосферу, через яку пройшов відбитий від Землі промінь. SCIAMACHY – це спектрометр зображень, основним завданням якого є картування концентрації слідів газів та аерозолів у тропосфері і стратосфері. Промені сонячного світла, які відбиваються та розсіюються і відбиваються від атмосфери, реєструються з високою спектральною роздільною здатністю (від 0,2 до 0,5 нм) для довжин хвиль від 240 до 1700 нм і в деяких ділянках спектра від 2000 до 2400 нм. Його висока спектральна роздільна здатність у широкому діапазоні довжин хвиль дає змогу виявляти багато слідів газів навіть у малих концентраціях. Охоплені довжини хвиль також дають змогу ефективно виявляти аерозолі та хмари. У SCIAMACHY використовуються три різних режими наведення: на надир (проти сонця), на лімб (через атмосферну корону) і під час сонячних або місячних затемнень. SCIAMACHY побудовано Нідерландами і Німеччиною в TNO/TPD, SRON і Airbus Defense and Space (Нідерланди).

7. RA-2 (радар-висотомір) являє собою двочастотний прилад-висотомір, який працює на надир. Працює в $K(8...26,5 \text{ ГГц})$ - і $S(2...4 \text{ ГГц})$ -діапазонах. Використовується для визначення рельєфу океану, відображення/моніторингу морського льоду й вимірювання земельних висот.

Вимірювання середнього рівня моря від Envisat постійно відображаються на веб-сайті Центру національних досліджень Spatiales на сторінці Aviso.

8. ASAR – удосконалений радар з синтезованою апертурою, що працює в діапазоні С(3,4...8 ГГц) у різних режимах, може виявляти зміни висоти поверхні з точністю до міліметра. Радар був каналом передавання даних для ERS 1 і ERS 2 і забезпечував численні функції, такі як спостереження на різних поляризаціях світла або об'єднання даних різних поляризацій, кутів падіння й просторової роздільної здатності.

9. DORIS (доплерівська орбітографія й радіопозиціонування, інтегровані супутником) визначає орбіту супутника з точністю до 10 см (4 дюйми).

10. GOMOS (глобальний моніторинг озону) по оклюзії зірок дивиться на зірки, коли вони спускаються через атмосферу Землі і змінюють колір, даючи можливість вимірювати гази, такі як озон O_3 , включаючи їх вертикальний розподіл. У GOMOS використовується принцип затінення. Його датчики виявляють світло від зірки, що проходить через атмосферу Землі, і вимірюють загасання цього світла і слідові гази: двоокис азоту NO_2 , триоксид азоту, озон O_3 та аерозолі, наявні на висоті від 20 до 80 км (12...50 миль). Його роздільна здатність становить 3 км (1,9 милі).

Подальшого розвитку ці розробки набули в серії супутників Sentinel-1A (перший запущено 2014 року) (рис. 2.10, табл. 2.6).

Таблиця 2.6

Основні експлуатаційні характеристики
супутників Sentinel-1A

Тип місії	Спостереження за Землею
Оператор	ESA
COSPAR ID	2014-016A
SATCAT №	39634
Суха маса	2170 кг
Розміри	3,4×1,3 м
Потужність	5900 Вт
Дата запуску	3 квітня 2014, 21:02:31 UTC
Ракета	«Союз-СТА/Фрегат»
Система відліку	Геоцентрична
Апогей, висота	693 км
Нахил	98,18°
Період	98,6 хв
Інтервал	12 днів
Смуга	S-діапазон (ТТ & С підтримка), X-діапазон та оптичний лазер за допомогою EDRS (збір даних)
Роздільна здатність	64 кбіт/с завантаження (діапазон S), 128 кбіт/с...2 Мбіт/с униз (діапазон S), 520 Мбіт/с униз (діапазон X/оптичний)



Рис. 2.10. Зовнішній вигляд супутника Sentinel-1A

Серія супутників ALOS. ALOS – удосконалений супутник спостереження за Землею, розроблений JAXA (Японське агентство аерокосмічних досліджень, Токіо; раніше NASDA), уперше його запущено 24 січня 2006 року. ALOS був розроблений для точного картографування, регіонального спостереження за земельним покриттям, моніторингу стихійних лих і геодезичних робіт. Удосконалює технології спостереження за Землею завдяки розробленню й експлуатації його попередників – японського супутника земних ресурсів JERS-1 і провідного супутника спостереження Землі ADEOS. Мета місії полягала в тому, щоб надати спільноті користувачів дані з достатньою роздільною здатністю, щоб мати можливість створювати карти масштабу 1: 25 000.

Основними областями застосування ALOS є:

- дослідження землекористування й земного покриву (цифрова модель рельєфу з високою роздільною здатністю, дані про землекористування й земний покрив);
- топографія та геологія (ЦМР з високою роздільною здатністю, ортофотозображень, зміна висоти);
- наземні (рослинність) екосистеми;
- дослідження в галузі сільського й лісового господарства. (розподіл лісів, вимірювання розподілу рослинної біомаси, застосування для лісового господарства, моніторингу продуктивності пасовищ та орних земель, зміни рослинності, опустелювання);
- кліматична система, гідрологічні процеси й дослідження, пов'язані з водними ресурсами (рослинність, вологість ґрунту, аналіз стоку, аналіз забруднення води, DEM високої роздільної здатності, землекористування/земного покриву, аналіз снігу і льоду/льодовика);
- дослідження, пов'язані з океанографією і прибережною зоною (розлив нафти);
- прибережні зони: морський поверхневий вітер, висота хвиль, хвильовий перебіг і динаміка океану, морський лід тощо;
- лиха (виверження вулканів, повені, землетруси тощо);
- поновлювані ресурси;
- фундаментальні дослідження розсіювальних та інтерферометричних характеристик (метод розкладання для поляриметричних даних SAR).

ALOS містить оптичне й активне корисне навантаження мікрохвильового датчика L-діапазону (1...2 ГГц), дані з високою роздільною здатністю якого можуть використовуватися для моніторингу навколишнього середовища і небезпек.

Серія супутників ALOS (табл. 2.7) має три основні прилади дистанційного зондування: AVNIR-2, PRISM і PALSAR.

DAICHI-2 (ALOS-2) обладнано провідним у світі SAR діапазону L (1...2 ГГц) (PALSAR-2) для проведення перевірки роботоздатності, головним чином, земних ділянок суші.

Продуктивність спостережень поліпшена для більш швидкого проведення точних спостережень за поверхнею при збереженні широкої смуги спостереження. Отже, супутник може точно і своєчасно спостерігати не тільки діастрофізм (тобто спотворення або змінення форми земної кори), а й повені або зсуви, спричинені стихійним лихом, наприклад штормом. Його попередник, DAICHI, відповідав на багато запитів про моніторинг стихійних лих з-за кордону, тому Японія змогла отримати велику кількість зображень з іноземних супутників в обмін на дані, отримані DAICHI, коли Японія потерпала від великого східнояпонського землетрусу. Ці дані дуже допомогли зрозуміти ситуацію.

Таблиця 2.7

Основні експлуатаційні характеристики супутника ALOS

Завдання	Дистанційне зондування Землі
Супутник	Земля
Стартова площадка	Японія, Танегасима
Ракета-носій	H-IIA, політ F8
Випуск	24 січня 2006 р.
Ідентифікатор	NSSDC 2006-002A
Маса	3850 кг
Розміри супутника	6,2x3,5x4 м
Орієнтація	Тривісна
Тип орбіти	сонячно-синхронна
Велика піввісь	7070 км
Ексцентриситет	1,413
Нахил	98,2 °
Період обертання	98,7 хв
Апоцентр	700,0 км
Перицентр	698,0 км
Інтервал повторення	46 днів
Смуга захоплення PRISM	35 км (3 камери) і 70 км (тільки на надир)
Швидкість передавання	До 240 Мбіт/с
Бортова пам'ять	90 ГБ SSD

Крім спостережень за стихійними лихами DAICHI-2 буде регулярно спостерігати за тропічними лісами, які оптично важко спостерігати, тому що їх часто покривають густі хмари, а також через сніг і лід у полярних районах. Після об'єднання даних спостережень, отриманих за більш ніж 11 років, будуть продовжені спостереження в часі, щоб зафіксувати зміни в лісовому господарстві, яке є стоком парникових газів, а також трансформацію снігу і льоду для приполярних районів унаслідок ефекту накопичення парникових газів. Тим самим буде зроблено істотний внесок у вирішення екологічних проблем у глобальному масштабі.

З SAR L-діапазону, що є однією з особливостей Японії, яка була успадкована протягом довгого часу, DAICHI-2 є «національним проектом»,

який робить свій внесок у забезпечення безпеки у співпраці з відповідними національними та зарубіжними агентствами.

Космічний апарат. Систему ALOS-2 розроблено Mitsubishi Electric Corporation за контрактом з JAXA (Японське агентство аерокосмічних і геологорозвідувальних робіт) (рис. 2.11, 2.12).

Для точного позиціонування ALOS-2 обладнано космічними двочастотними GPS-приймачами, що використовують смуги L1 і L2, і супутник демонструє точну навігацію на орбіті. Однак для досягнення більш високої роздільної здатності спостереження і більш точного маневрування на орбіті для наступних супутників спостереження Землі був необхідний удосконалений приймач GPS.

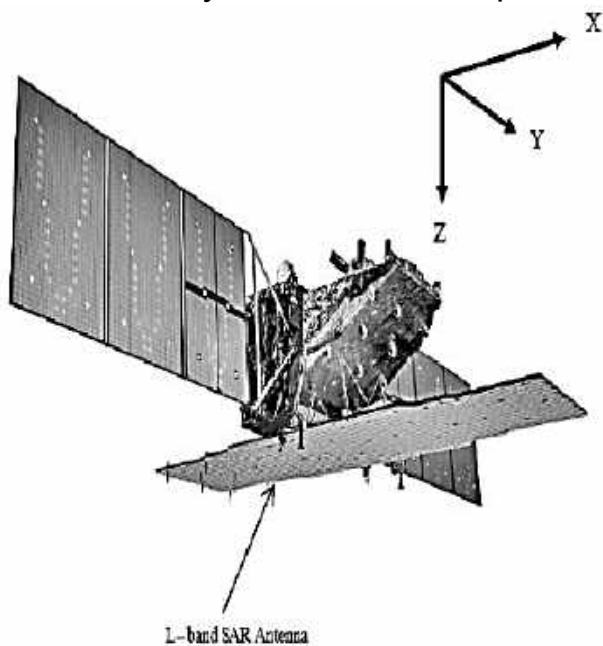


Рис. 2.11. Зовнішній вигляд супутників типу ALOS

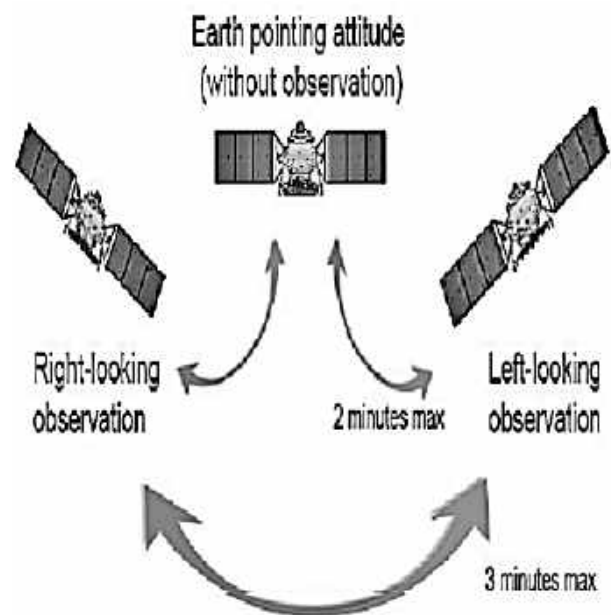


Рис. 2.12. Концептуальне зображення орієнтації супутника на сонячно-синхронній орбіті

Група керування й контролю JAXA провела серію досліджень для космічного GPS-приймача наступного покоління. У цій розробці підвищення точності навігації є основною темою, і новий приймач буде мати посилену здатність приймати кілька частот і кілька каналів, щоб відповідати модернізації GPS.

Останнім часом розроблено алгоритм підвищення точності навігації, особливо при використанні смуги L1 тільки шляхом зменшення похибки, пов'язаної із затримкою в іоносфері. На основі алгоритму, запропонованого в цій роботі, розроблено програмне забезпечення, установлене в приймачі GPS для ALOS-2.

GPS L1 – навігація в реальному часі:

– при моніторингу стихійних лих важливою є навігація в реальному часі з використанням сигналу L1;

- розроблено алгоритм підвищення точності навігації (оцінювання іоносферної затримки та її змінення);
- точність вимірювання <10 м (95 %, 3Drss), точне позиціонування в автономному режимі;
- подвійне (L1 і L2) визначення положення в автономному режимі <1 м;
- частота SAR ALOS-2 перекривається з сигналом L2, розробляється покращений малошумний підсилювач для зовнішнього приймача GPS, завадозахищений до сигналу SAR.

На рис. 2.13 зображено діаграму періодів розроблення серії супутників ALOS.

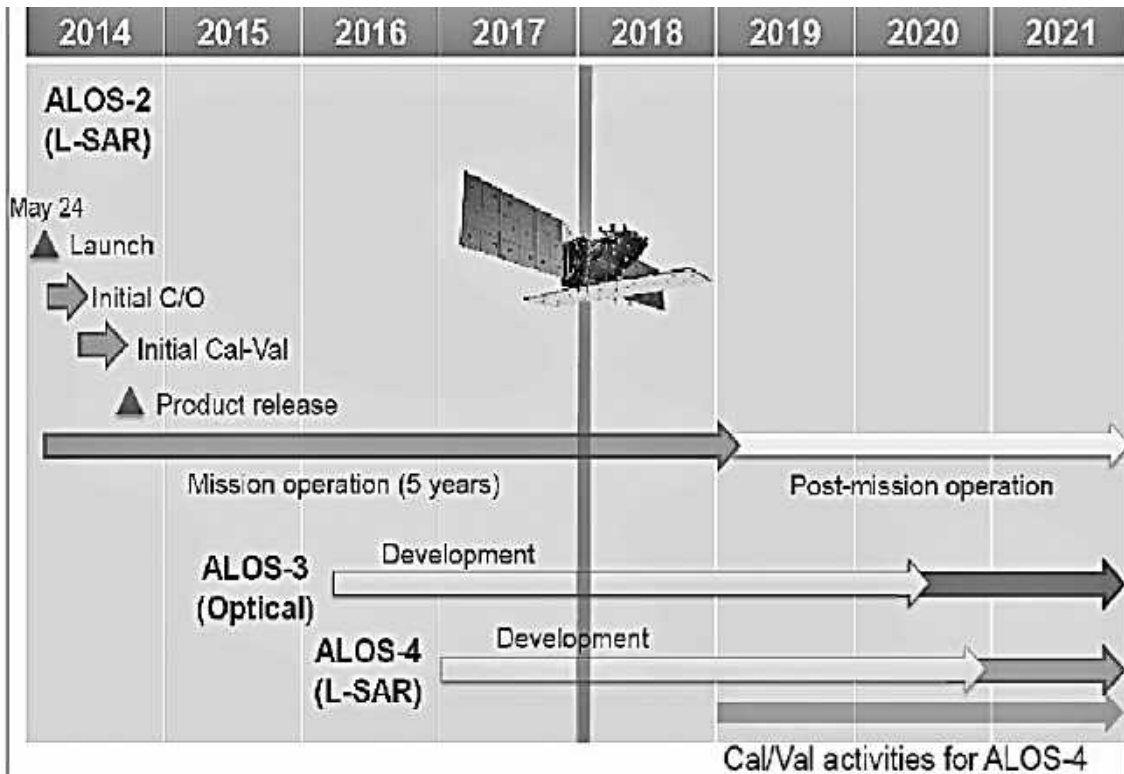


Рис. 2.13. Діаграма періодів розроблення/експлуатації супутників серії ALOS

Більшість супутників ДЗЗ використовують сонячно-синхронну орбіту (див. рис. 2.12).

Сонячно-синхронна орбіта (іноді її називають *геліосинхронною*) – геоцентрична орбіта з такими параметрами, що об'єкт, який знаходиться на ній, проходить над будь-якою точкою земної поверхні приблизно в один і той же місцевий сонячний час. Такі постійні умови освітлення дуже добре підходять для супутників, що одержують зображення земної поверхні (зокрема, для супутників дистанційного зондування землі, метеосупутників). Однак наявні річні коливання сонячного часу зумовлені еліптичністю земної орбіти.

Для досягнення подібних характеристик параметри орбіти вибираються таким чином, щоб орбіта прецесувала східному напрямку на 360° на рік (приблизно на 1° на день), компенсуючи обертання Землі навколо Сонця.

Прецесія відбувається внаслідок взаємодії супутника із Землею, що має несферичність через полярне стиснення. Швидкість прецесії залежить від висоти орбіти. Потрібної швидкості прецесії можна досягти лише для певного діапазону висот орбіт (зазвичай вибираються значення 600...800 км з періодами 96...100 хв), необхідний кут нахилу орбіти для цього діапазону висот становить близько 98° .

Для орбіт з великими висотами потрібні досить великі значення нахилу, через що в зону відвідувань супутника перестають потрапляти полярні райони. Цей тип орбіт може мати різні варіації. Наприклад, можливі сонячно-синхронні орбіти з великим ексцентриситетом. У цьому випадку сонячний час проходження буде зафіксовано тільки для однієї точки орбіти (зазвичай перигею). Період обертання вибирається відповідно до необхідного періоду повторних проходів над однією й тією ж точкою поверхні. Хоча супутник на круговій сонячно-синхронній орбіті перетинає екватор в один і той же місцевий час, це відбувається в різних точках екватора (на різній довготі) через те, що Земля повертається на деякий кут між проходами супутника. Припустимо, період обертання становить 96 хв. Це значення ділить сонячну добу на 15. Таким чином, за добу супутник пройде над п'ятнадцятьма різними точками екватора, через добу повернувшись до першої точки. Підбираючи складніші (нецілі) відношення, можна збільшити кількість відвідуваних точок шляхом збільшення періоду відвідувань однієї й тієї ж точки.

Особливими випадками сонячно-синхронної орбіти є орбіта, на якій відвідування екватора відбувається опівдні/опівночі, а також орбіта, що знаходиться у площині термінатора, тобто у смузі сходу й заходу Сонця. Останній варіант не підходить для супутників, що здійснюють оптичну фотозйомку, але підходить для радарних супутників, тому що супутник не потрапляє в тінь Землі. На такій орбіті сонячні батареї супутника постійно освітлюються Сонцем.

Отже, розглянуто як загальні риси, так і особливості, притаманні різним супутникам ДЗЗ, набір апаратури, якою їх оснащено, задачі, які вирішуються, та особливості космічних програм провідних космічних держав. Усе це створює наукові засади для розроблення методів і засобів дистанційних аерокосмічних досліджень навколишнього середовища.

2.3. Контрольні запитання

2.1. Особливості космічних програм провідних у цій галузі країн світу. Чим вони обумовлені? Спеціалізація й кооперація в галузі виконання космічних програм. Які спільні моменти є характерними для орбіт супутників ДЗЗ і чим це обумовлено? Які основні експлуатаційні характеристики супутників ДЗЗ? Особливості приватних космічних програм, зокрема І. Маска. Системи багаторазового використання та їх переваги й недоліки.

2.2. Мікро- та наносупутники. Відмінності та можливі галузі їх використання. Країни, що займають провідне місце в розробленні мікро- та наносупутників. Корисне навантаження супутників серії POLYITAN. Особливості їх конструкції. Що таке CubeSat і чому така конструкція є характерною для наносупутників? Використання нано- та мікросупутників для побудови систем глобального інтернету, зв'язку, глобальної системи спасіння «Коспас-Сарсат» (англ. *Cospas-Sarsat*).

2.3. Базовий набір апаратури для супутників ДЗЗ. Які завдання вирішує цей комплекс? Радари бокового огляду та синтезованої апертури.

2.4. Що таке сонячно-синхронна орбіта? Для чого її використовують при ДЗЗ? Основні характеристики орбіт супутників ДЗЗ з радарними RSA й супутниками з оптичними сканерами.

2.5. Супутники Європейського космічного агентства. Які країни входять до його складу? Де базується? Які основні завдання досліджень вирішують супутники?

2.6. На вирішення яких завдань в основному орієнтовані канадські супутники ДЗЗ? Визначення приповерхневої швидкості вітру. Японські супутники ДЗЗ ALOS.

2.7. Яким чином розв'язується проблема енергозбереження апаратури супутників ДЗЗ? Енергоживлення апаратури супутників різних класів.

2.8. Космічні супутники України. Апаратура, програми досліджень, отримані результати дослідження льодових покривів, океану, забруднень моря. Студентські програми досліджень і супутники. Перспективи їх використання. Які підсистеми є на українських наносупутниках? Їх технічні характеристики. Особливості системи живлення.

2.9. Для чого призначені Вайсенарські домовленості? Якими є обмеження і для чого їх устанавлюють?

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

Белоус, А. И. Космическая электроника. В 2 кн. Кн. 1 / А. И. Белоус, В. А. Солодуха, С. В. Шведов. – М. : Техносфера, 2015. – 696 с.

Загородников, А. А. Радиолокационная съемка морского волнения с летательных аппаратов / А. А. Загородников. – Л. : Гидрометеиздат, 1978. – 239 с.

Иванов, В. К. Развитие методов дистанционного зондирования Земли в ИРЭ НАН Украины / В. К. Иванов, С. Е. Яцевич // Радиофизика и электроника. – 2008. – Т. 16. – С. 333–343.

Кравченко, В. Ф. Рассеяние радиоволн морем и обнаружение объектов на его фоне / В. Ф. Кравченко, В. И. Луценко, И. В. Луценко. – М. : Физматлит, 2015. – 448 с.

Морская радиолокация / под ред. В. И. Винокурова. – Л. : Судостроение, 1986. – 256 с.

Применение радиолокации Земли из космоса в гидрометеорологии / В. Б. Ефимов, И. А. Калмыков, О. А. Краснов, А. С. Курекин, В. Н. Цимбал, В. А. Комяк, С. Е. Яцевич // Космічні науки і технології. – 2000. – Т. 6, № 5/6. – С. 16–28.

Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В. С. Верба, Л. Б. Неронский, И. Г. Осипов, В. Э. Турук, под ред. В. С. Вербы. – М. : Радиотехника, 2010. – 680 с.

Радиолокация поверхности Земли из космоса. Исследования морской поверхности, ледяного и ледникового покровов с помощью спутниковой радиолокационной станции бокового обзора / под ред. М. Митника, С. В. Викторова. – Л. : Гидрометеиздат, 1990. – 200 с.

Справочник по радиолокации. Основы радиолокации / под ред. Я. С. Ицхоки. – М. : Сов. радио, 1976. – 456 с.

Шовенгард, Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / Р. А. Шовенгард. – М. : Техносфера, 2010. – 560 с.

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	3
Розділ 1. ПРОСТОРОВО–ЧАСОВІ І ПОЛЯРИЗАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕСТАЦІОНАРНИХ ВІДБИТТІВ ВІД ПОВЕРХНІ МОРЯ ТА АТМОСФЕРНИХ ЯВИЩ.....	4
1.1. Стаціонарні і нестаціонарні процеси	4
1.2. Поляризаційна і просторово-часова структури відбиттів від моря	5
1.2.1. Статистичний опис	5
1.2.2. Експериментальне вивчення	10
1.3. Імітаційна модель розсіяного морською поверхнею сигналу	25
1.3.1. Теоретичний аналіз.....	26
1.3.2. Експериментальне вивчення статистичних характеристик.....	34
1.3.3. Використання фінітних функцій Кравченко для опису статистик відбиття	46
1.4. Імітаційна модель розсіяного сушею сигналу.....	48
1.4.1. Особливості структури моделі.....	48
1.4.2. Експериментальне визначення просторових характеристик ділянок місцевості	51
1.5. Використання вкладених напівмарковських процесів для опису перешкод від атмосферних процесів.....	56
1.5.1. Моделювання відображень	56
1.5.2. Розподіл амплітуд і просторових розмірів зон відбиття	59
1.6. Контрольні запитання	63
Розділ 2. МЕТОДИКИ, ТЕХНОЛОГІЇ ТА АПАРАТУРНІ КОМПЛЕКСИ ДЛЯ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ.....	65
2.1. Космічні програми різних країн.....	65
2.2. Супутники дистанційного зондування Землі	81
2.3. Контрольні запитання	92
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК	94

Навчальне видання

**Бабаков Михайло Федорович
Кривенко Олена Владиславівна
Луценко Владислав Іванович**

**РАДІОЕЛЕКТРОННІ ЗАСОБИ ДИСТАНЦІЙНИХ
АЕРОКОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Частина 2

**НЕСТАЦІОНАРНІ ВІДБИТТЯ ВІД НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА
ТА ЙОГО ЗОНДУВАННЯ З АЕРОКОСМІЧНИХ НОСІЇВ**

Редактор Т. О. Іващенко

Зв. план, 2022

Підписано до друку 21.12.2022

Формат 60×84 1/16. Папір офс. Офс. друк

Ум. друк. арк. 5,3. Обл.-вид. арк. 6. Наклад 30 пр.

Замовлення 108. Ціна вільна

Видавець і виготовлювач
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний університет»
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17
<http://www.khai.edu>
Видавничий центр «ХАІ»
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17
izdat@khai.edu

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001