

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЛОКАЦІЙНОГО КАНАЛУ КОНТУРУ АДАПТАЦІЇ
СИСТЕМ РАДІОАКУСТИЧНОГО ЗОНДУВАННЯ АТМОСФЕРИ**

Вступ

Системи радіоакустичного зондування (РАЗ) атмосфери є ефективним дистанційним засобом отримання інформації про стан процесів, що відбуваються в нижніх шарах атмосфери. Вони дозволяють вимірювати вертикальні профілі температури атмосфери, швидкості вітру, вологості повітря [1–4].

Отримана інформація використовується для забезпечення зльоту та посадки літальних апаратів, прогнозу погоди, прогнозування процесів поширення радіо і акустичних хвиль, вивчення атмосфери [1, 2]. В даний час розвивається теорія радіоакустичного зондування атмосфери, створюються і виробляються станції РАЗ рядом фірм, які пропонуються на ринок [5–7].

Теоретичні і практичні аспекти створення і використання систем РАЗ досліджуються протягом кількох десятиліть, починаючи з 1961 р. [8, 9], проте до цього часу не вдалося подолати низку недоліків, які суттєво обмежують можливості застосування систем РАЗ на практиці [1, 4, 10].

Найбільш важливими серед існуючих обмежень систем РАЗ є вітровий знос плями розсіяного радіосигналу внаслідок переміщення акустичного хвильового пакета під дією вітру та порушення умов Брегга зондувальних сигналів по трасі зондування. Відомі в даний час алгоритми адаптації, які спрямовані на компенсацію впливу порушення умови Брегга на точність та оперативність радіоакустичного зондування, мають недостатню ефективність і не дозволяють суттєво покращити основні характеристики систем РАЗ. Вони не враховують ряд суттєвих особливостей розсіювання радіохвиль на акустичному хвильовому пакеті та створені евристичним шляхом [10–12].

У статті розглядається адекватна математична модель радіоакустичного інформаційного локаційного каналу для використання її в контурі управління частотою зондувального радіосигналу з метою адаптації систем РАЗ до існуючої метеорологічної обстановки.

1. Аналіз публікацій. Відомі алгоритми частотної адаптації систем РАЗ

Вимірювання метеопараметрів в системах РАЗ засновано на отриманні радіосигналу, що розсіюється на імпульсних звукових посиленнях, які випромінюються з поверхні Землі у вертикальному напрямку.

Достатній для наступної обробки рівень розсіяного радіосигналу забезпечується тільки при виконанні умови Брегга [1, 3] між довжинами акустичної та електромагнітної хвиль:

$$\lambda_e = 2\lambda_s \sin \theta,$$

де λ_s – довжина звукової хвилі; λ_e – довжина електромагнітної хвилі; θ – кут розсіювання електромагнітних хвиль.

Довжина хвилі акустичного випромінювання в атмосфері змінюється внаслідок змін температури повітря і швидкості вітру з висотою, що приводить до необхідності підстроювання частот зондувальних сигналів з метою виконання умови Брегга по трасі зондування. В принципі, можливо змінювати адаптивно частоту як акустичного, так і електромагнітного зондувальних сигналів.

В практиці зондування найчастіше використовується метод адаптації до змін метеорологічних умов шляхом підстроювання частоти звукового сигналу зондувального сигналу в ручному режимі. Якщо виконується забезпечення виконання умови Бреґґа для кожної точки висотного профілю, які іноді називають «майданчиками», то це вимагає значної кількості часу, що може досягати 1-2 годин.

Використовується також методика зондування "точка", що передбачає такий вибір частоти акустичного сигналу, при якій оптимальне співвідношення довжин хвиль акустичного та електромагнітного сигналів забезпечується на деякій середній висоті профілю. При цьому частота звукового сигналу підлаштовується під метеоумови, що спостерігаються на цій висоті, експериментально, по максимуму відбитого радіосигналу [13].

Далі здійснюється випромінювання пакету звукових хвиль та послідовна реєстрація значень доплерівських зсувів частоти через рівні інтервали часу, що відповідають переміщенню звукового пакета на величину його просторової протяжності, у міру поширення пакета звукових хвиль трасою зондування [14]. При цьому похибки вимірювання температури в крайніх точках профілю okazуються досить значними за величиною, порядку одиниць градусів.

Відомі також і алгоритми частотної адаптації систем РАЗ до метеоумов, що змінюються, в яких забезпечення умов Бреґґа досягається шляхом керування частотою зондувального радіосигналу в міру просування зондувального акустичного хвильового пакета в атмосфері.

У роботі [13] при реалізації алгоритму частотної адаптації систем РАЗ використовується фазове автопідстроювання частоти (ФАПЧ) радіосигналу. В методі здійснюється вимірювання параметра Δ – поточної різниці між значеннями несучої частоти розсіяного радіосигналу f_p і номінальної частоти задаючого генератора радіосигналу у міру поширення звукового імпульсу в напрямку зондування. Далі виконується перетворення значення інформаційного параметру Δ в напругу $U_{упр}$, яка використовується для управління частотою задаючого генератора радіосигналу.

Інформація про швидкість звуку в атмосфері в даному методі зондування буде полягати в зміні несучої частоти радіосигналу, а значення параметра f_p має залишатися незмінним.

Поточні вимірювання значень частоти генератора електромагнітного випромінювання та зсувів частоти розсіяного сигналу виконувались в системі методом «рахунку нулів», далі отримані значення вводилися в комп'ютер, в якому обчислювалися значення швидкості звуку в атмосфері, а також значення температури середовища по трасі зондування.

У розглянутій схемі зондування за наявності значного початкового розстроювання частот зондувальних сигналів мав місце зрив стеження схеми автопідстроювання за значенням f_s . У разі сильного поривчастого вітру спостерігаються глибокі завмирання амплітуди розсіяного радіосигналу на окремих ділянках траси і стійкість роботи системи РАЗ у такому разі також порушується.

Зазначено [13], що зриви в роботі системи автопідстроювання частоти супроводжуються отриманням значень температури атмосфери, які на кілька градусів перевищують значення температури у сусідніх точках профілю, тобто, формуються аномальні похибки результатів вимірювань.

Таким чином, проаналізовані алгоритми частотної адаптації систем РАЗ не забезпечують необхідних умов до точності вимірювань. Це виникає насамперед внаслідок використання неадекватних уявлень про процес розсіювання радіохвиль на об'єкті, що спостерігається, у вигляді акустичного хвильового пакету, або, іншими словами, внаслідок використання неадекватної математичної моделі каналу систем РАЗ.

Модель інформаційного локаційного каналу в інформаційних радіосистемах значною мірою впливає на функціонування систем [15]. Використання неадекватної моделі каналу призводить до формування додаткових похибок при вимірюванні координат і інших параметрів, для виконання яких існує система, а використання неадекватної моделі каналу в контурі управління об'єктом або в контурі управління параметром при спостереженні за об'єктом, як в системах радіоакустичного зондування атмосфери, не забезпечує ефективного функціону-

вання системи і не дозволяє забезпечити процес відповідного управління об'єктом або процесом.

2. Постановка задачі дослідження

Значний вплив на ефективність функціонування вимірювальних локаційних радіосистем різного призначення має математична модель інформаційного вимірювального радіоканалу, реалізована в алгоритмі функціонування вимірювальної системи. Математична модель каналу описує особливості механізму поширення хвиль у процесі проходження зондувального сигналу до об'єкта, на якому розсіюються радіохвилі, та назад. Модель визначає також особливості розсіювання радіохвиль на об'єкті, за яким здійснюється спостереження. Таким чином, математична модель каналу описує просторово-часовий сигнал, що надходить на вхід приймальної антени вимірювальної системи. Алгоритм роботи пристрою прийому та обробки сигналу на фоні перешкод синтезується з використанням математичної моделі каналу та особливостей сигналу, що приходить.

Особливості систем радіоакустичного зондування атмосфери полягають перш за все в тому, що в якості радіолокаційної цілі або об'єкта спостереження використовується звукова хвиля, найбільш часто локалізована в просторі, у вигляді акустичного хвильового пакета. Такий об'єкт спостереження має низку істотних особливостей як об'єкт розсіювання радіохвиль. Деякі з цих особливостей виявлено експериментальним шляхом. Однак глибокого вивчення і розуміння такий метод дослідження не може забезпечити.

У зв'язку з цим в статті ставиться задача дослідити канал поширення радіохвиль у радіоакустичних системах зондування атмосфери з використанням теоретичних методів дослідження. Далі отримані результати дослідження будуть використані при побудові алгоритмів та пристроїв обробки сигналів з метою отримання інформації про стан атмосфери, а також у контурі управління параметрами випромінюваного радіосигналу з метою якісного виконання завдання спостереження за акустичним хвильовим пакетом.

3. Математична модель радіоканалу систем РАЗ

Математична модель інформаційного локаційного каналу систем РАЗ [14, 16] дозволяє досліджувати характеристики каналу, визначати вид розсіяного радіосигналу, одержуваного при використанні різних видів зондувальних акустичних та електромагнітних коливань та у різних станах атмосфери.

Як показано в [16], розсіяний на звуковій посиленні радіосигнал описується співвідношенням

$$F(r, q) = K \int_0^{\infty} E(2r' - r) S^*(r') e^{jqr'} dr', \quad (1)$$

де E – комплексна обвідна електричного поля випромінюваної радіохвилі; S – комплексна обвідна випромінюваної акустичної хвилі; $q = 2k_e - k_s$ – параметр розстройки умови Бреґґа; k_e, k_s – хвильові числа електромагнітної та акустичної хвиль відповідно; r – зміщення взаємодіючих сигналів за поздовжньою просторовою координатою r' ; K – амплітудний множник пропорційності. Радіосигнал, що описується у виразі (1) функцією $E(2r' - r)$, стискається вдвічі за просторовою координатою, що описує ефективну взаємодію зондувальних сигналів і формування значення кореляційного інтеграла.

За допомогою теореми Парсеваля отримуємо з (1) співвідношення, де функція $E_1(r)$, що описує розсіяний радіосигнал, визначається через просторові спектри відповідних комплексних обвідних сигналів, які взаємодіють між собою:

$$F(r, q) = \frac{K}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_E\left(\frac{k}{2}\right) S_S^*(k + q) e^{-j\frac{r}{2}k} dk, \quad (2)$$

тут $\int_{-\infty}^{+\infty} S(r') e^{-jqr'} e^{-jkr'} dr' = S_S(k + q)$, $\int_{-\infty}^{\infty} E(2r' - r) e^{-jkr'} dr' = \frac{1}{2} e^{-j\frac{r}{2}k} S_E\left(\frac{k}{2}\right)$; $k = 2\pi/r'$ – просторова частота.

Далі будемо використовувати більш зручний при виконанні аналізу особливостей розсіяного радіосигналу вираз

$$F(r, q) = \frac{K}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_E(k) S_S^*(2k + q) e^{-jrk} dk, \quad (3)$$

якій отримано із співвідношення (2) шляхом заміни змінних. У виразі (3) коефіцієнт при аргументі k в спектральній функції електромагнітного сигналу S_E дорівнює одиниці, що є істотним для наступних міркувань.

Опис процесів взаємодії зондувальних сигналів систем РАЗ з використанням частотних уявлень відкриває значні можливості для аналізу властивостей зондувальних коливань, вивчення особливостей розсіяного сигналу, розуміння та правильної інтерпретації накопичених у цій галузі наукових даних, отриманих як теоретичним, так і експериментальним шляхом у ході розвитку даного напрямку.

Як впливає з виразу (3), під інтегралом знаходиться добуток енергетичних просторових спектрів процесів $E(r')$ і $S(r'/2)$, що являє собою взаємний енергетичний просторовий спектр цих коливань

$$S_y(k, q) = S_E(k) S_S^*(2k + q). \quad (4)$$

Вирази (2), (3), що визначають розсіяний на звуковій посиленні радіосигнал, містять перетворення Фур'є взаємного енергетичного просторового спектру зондувальних коливань.

При $r = 0$ в правих частинах виразів (2) і (3) маємо кореляційні інтеграли за хвильовими просторовими частотами спектральних щільностей взаємодіючих сигналів, поєднаних у просторі. При деякому іншому фіксованому значенні параметра зсуву r праві частини (2), (3) також будуть кореляційними інтегралами за частотою k , але вже для сигналів, зміщених на відстань r .

Опис взаємодії зондувальних сигналів систем РАЗ з використанням частотних уявлень – кореляційної функції спектрів сигналів за просторовою частотою та взаємного енергетичного просторового спектру відіграють ключову роль у розумінні особливостей процесів розсіювання та формування відбитої хвилі в системах радіоакустичного зондування атмосфери [2]. Сформований у просторі взаємний енергетичний просторовий спектр взаємодіючих коливань відтворюється на виході спектрального аналізатора системи РАЗ у формі спектру часових частот. Спектроаналізатор призначений для аналізу розсіяного радіосигналу, що приходить на вхід, та для оцінки необхідних інформативних параметрів сигналу – центральної частоти спектру, ширини спектру та ін.

Справді, отриманий в результаті просторово-часової взаємодії хвиль та розсіювання на акустичній хвильовій посиленні просторово-часовий електромагнітний сигнал досягає приймальної антени і перетворюється на часове коливання. Спектр хвильових чисел розсіяного радіосигналу перетворюється при прийомі сигналу антеною вимірювального радіоакустичного комплексу в спектр часових частот за правилом $k = 2\pi/\lambda \leftrightarrow f = kc/2\pi$. Значенню $k = 1$ рад/м ($\lambda = 6,28$ м), наприклад, відповідає значення частоти $f = 47,77$ МГц. При цьому форма спектру сигналу не змінюється. Після відповідних перетворень і фільтрації в приймальному пристрої системи сигнал, що несе корисну інформацію про стан атмосфери, піддається переважно перетворенню Фур'є, і далі, по суті, відтворюється взаємний енергетичний просторовий спектр взаємодіючих сигналів у вигляді спектру часових частот [17, 18].

Отже, форма і параметри спектра розсіяного сигналу, сформованого і закладеного в сигнал в процесі розсіювання, містять у собі всю інформацію про стан атмосфери з урахуванням особливостей використовуваних у процесі роботи зондувальних коливань: їх структурних особливостей, параметрів спектрів, значень несучих частот, амплітуд і т.д. Форма і параметри сформованого спектру, що характеризують, наприклад, несиметричність або «скошеність» спектральної функції, кардинально впливають на значення основних інформаційних характеристик систем зондування атмосфери.

Таким чином, розробка як самої системи радіоакустичного зондування, так і алгоритмів, і пристроїв, що реалізують операції вилучення корисної інформації з сигналу, що приходить на вхід, повинні виконуватися з урахуванням особливостей розглянутої взаємодії хвильових процесів в атмосфері, де в розсіяний сигнал закладається корисна інформація.

В системах РАЗ досить поширене використання в якості випромінюваного звукового зондувального сигналу $s(t, r')$ імпульсних акустичних коливань з гармонійним заповненням [19, 20]. Спектр сигналу $S_s(k)$ в цьому випадку є вузькосмуговим у просторі хвильових чисел і отриманий вираз (3) описує основну особливість розсіювання на створюваній сигналом неоднорідності – насамперед істотну частотну залежність, що спостерігається і яка значно впливає як на енергетичну, так і на інформаційну складові розсіяного сигналу.

Уздовж траси зондування відбувається зміна метеопараметрів, що супроводжується зміною швидкості поширення звуку, яка призводить до деформації (стисненню або розтягуванню) акустичної хвилі вздовж напрямку зондування по координаті r' , а отже, к переміщенню спектру сигналу $S_s(k)$ вздовж осі хвильових частот k . Електромагнітна хвиля до впливу змін метеопараметрів уздовж траси зондування практично не схильна і положення спектру радіосигналу $S_e(k)$ на осі частот залишається практично незмінним.

Внаслідок цього максимума просторових спектрів взаємодіючих сигналів можуть не збігатися (див. рис. 1), а діапазон перекриття спектрів звужуватиметься. Амплітуда розсіяного радіосигналу, що формується, та рівень його спектру при цьому зменшується.

Тут і далі використовуватимемо в якісних міркуваннях для наочності не комплексні обвідні, а сигнали e, s та спектри S_e, S_s , що містять частоти заповнення.

На рис. 1 представлено спектри зондувальних сигналів, що взаємодіють, систем РАЗ. Лінією 1 показаний спектр акустичного зондувального сигналу, лінією 2 – спектр випромінюваного електромагнітного сигналу. Частоти випромінюваних сигналів вибираються таким чином, щоб просторова довжина хвилі звукових коливань була вдвічі меншою за довжину хвилі радіосигналу. Тоді, як видно з рисунку, максимум спектру звукового сигналу буде розміщуватися на частоті, що вдвічі перевищує частоту екстремуму спектру радіосигналу. Протяжність спектру звукової зондувальної посилки зазвичай значно ширше спектру радіосигналу, оскільки радіосигнал має значно більшу просторову протяжність, ніж протяжність звукової посилки внаслідок значної різниці в швидкостях поширення зондувальних коливань, що використовуються, при порівнянні тривалості за часом сигналів. Лінією 3 показаний стислий вдвічі вздовж осі частот k спектр звукової посилки. Стиснення спектру пояснюється присутністю коефіцієнта 2 перед аргументом k спектральної функції $S_s^*(2k + q)$ у виразі (3). Якщо параметр розстройки умови Брега $q = 2k_e - k_s$ дорівнює нулю, то максимумами спектрів акустичного та радіосигналів збігаються. Якщо значення параметра розстроювання q відмінне від нуля, то максимумами спектрів будуть зміщені по частоті (саме така ситуація – розбіжності максимумів спектрів сигналів, як найбільш загальна, показана на рис. 1).

На рис. 1 форми спектрів 1 і 3 акустичних сигналів – гаусівські, а форма спектру 2 – відповідає прямокутній обвідній зондувального радіоімпульсу.

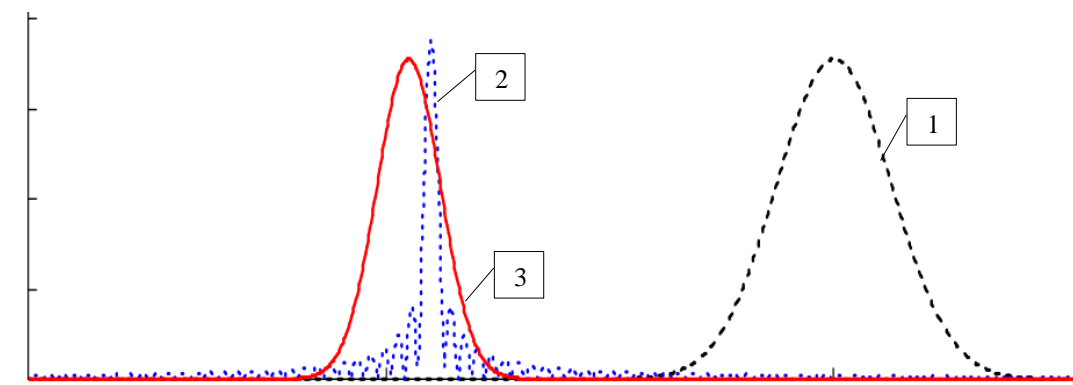


Рис. 1. Ілюстрація взаємодії зондувальних сигналів систем РАЗ у просторі хвильових чисел (1 – спектр акустичного зондувального сигналу, 2 – спектр випромінюваного електромагнітного сигналу, 3 – стиснутий вдвічі вздовж осі частот k спектр звукової посилки)

Механізм взаємодії зондувальних сигналів при розсіюванні хвиль в атмосфері наступний: кожна спектральна складова радіосигналу вибирає з просторового спектру акустичного сигналу складову, що відповідає умові $k \leftrightarrow 2k$. При взаємодії спектр звукового сигналу як би стискається вдвічі під час переходу на частоту k ($k \leftrightarrow 2k$). Відповідно до цього, якщо в просторі хвильових чисел виконується умова $k_s = 2k_e$ (або в просторі довжин хвиль умова $\lambda_e = 2\lambda_s$), то максимуми спектру радіосигналу і стиснутого в два рази спектру акустичного сигналу збігаються. Однак, зауважимо, що ділянка спектру акустичного сигналу, що вибирається радіосигналом із спектру акустичного коливання в процесі взаємодії, буде вдвічі ширше ($\Delta k_e = 2\Delta k_s$).

Якщо під впливом зміни характеристик середовища спектр звукових коливань $S_s(k)$ зміщується настільки, що спектри сигналів $S_e(k)$ і $S_s(2k)$, що взаємодіють, в просторі хвильових чисел, не будуть перекриватися, то такі зондувальні сигнали в результаті взаємодії не формують розсіяний сигнал. Відповідно до виразу (4) вони стають ортогональними, а акустичний сигнал у такому разі стає повністю прозорим для радіосигналу, що набігає. З іншого боку, в принципі радіосигнал може розсіюватися і на бічних пелюстках спектру акустичного сигналу, або бічні пелюстки спектральної щільності радіосигналу можуть розсіюватися на звуку. Але через досить слабкий рівень розсіяного на звуку радіосигналу в системах РАЗ, практично зареєструвати таке розсіювання не вдається. Тим більше «не видно» результатів розсіяння бічних пелюсток спектру електромагнітної хвилі на бічних пелюстках спектру звукових збурень середовища, хоча таке розсіяння теоретично повинно існувати. У цьому полягає основні енергетичні аспекти взаємодії зондувальних сигналів систем радіоакустичного зондування атмосфери.

Інформаційні аспекти частотних особливостей розглянутого виду розсіяння проявляються в такий спосіб. Якщо максимуми спектрів зондувальних сигналів $|S_e(k)|$ і $|S_s(2k)|$ не збігаються і має місце розстроювання умови Бреґґа, то максимум просторового спектру розсіяного радіосигналу $|S_y(k)|$, одержуваного в результаті перемноження спектрів взаємодіючих сигналів, внаслідок несиметричності і нерівномірності спектральної функції звуку $|S_s(2k)|$ в діапазоні перекриття спектрів зміщується додатково на деяку величину Δk .

Це призводить, у свою чергу, до зміщення максимуму часового спектру розсіяного радіосигналу на величину $\Delta\omega = c\Delta k$, яке не є доплерівським зсувом частоти, а підсумовується з ним і призводить до відмінності результуючого зсуву частоти сигналу, отриманого при розсіянні, від суто доплерівського. Аналогічно, можна показати і зміщення центру тяжкості спектральної функції розсіяного сигналу $|S_y(k)|$ в умовах, що розглядаються. Слід підкреслити, що при переході від просторових частот до часових навіть дуже мале зміщення Δk спектру розсіяного сигналу внаслідок досить великого значення швидкості поширення радіохвиль c трансформується у відчутну різницю $\Delta\omega$ часових частот.

Значення зсуву спектру $\Delta\omega$ при визначенні швидкості звуку по доплерівському зсуву частоти буде проявлятися як систематична похибка у вимірах, наявність якої призводить до помітних похибок при визначенні температури. Формування такої систематичної похибки буде також негативно позначатися на ефективності функціонування алгоритму управління частотою зондувального радіосигналу з метою адаптації систем РАЗ до метеоумов, що змінюються по трасі.

Внаслідок наявності систематичної похибки в результатах вимірювань швидкості звуку в контурі адаптації системи РАЗ до метеообстановки буде знижуватись значення критерія якості системи, якій в детермінованому виді має вигляд,

$$J_M = \{\sum_{i=1}^M ([\lambda_{ei} - 2\lambda_{si}]^2)\},$$

і в міру зростання миттєвого, термінального значення критерія це приведе к зриву процесу адаптації.

Фінітне значення критерію якості визначає точнісні характеристики вимірювання висотного профілю температури атмосфери в заданому висотному діапазоні, а термінальне значення критерію – якості вимірювання температури в конкретній точці профілю.

4. Дослідження інформаційного каналу з використанням тіл розсіювання

Співвідношення (1), (2) визначають результат взаємодії зондувальних коливань систем РАЗ – акустичного і електромагнітного сигналів, а також атмосфери. Вплив середовища при взаємодії сигналів в цих співвідношеннях представлений функціонально лише одним параметром q , якій інтегрує в собі вплив на довжину хвилі акустичного коливання таких характеристик атмосфери як температура середовища, швидкість вітру, тиск, вологість повітря.

Присутність в виразах (1), (2) тільки одного параметру впливу атмосфери спрощує модель і робить її зручною для проведення досліджень в напрямку теорії систем РАЗ. Функція $F(r, q)$, що описується виразами (1) і (2), характеризує розсіяні радіосигнали у просторовому поданні і має назву функції розсіювання.

Використання просторового подання зондувальних атмосфери сигналів E і S , та, відповідно, двовимірної функції розсіювання, пов'язане з тим, що саме за допомогою такого подання адекватно описується їх взаємодія в середовищі. Наприклад, акустична хвиля з частотою $f_s=4$ КГц і електромагнітна хвиля, що має частоту $f_e=1760$ МГц, мають довжини хвиль відповідно $\lambda_e=17$ см і $\lambda_s=8,5$ см. Вони досить далекі одна від одної в області часових частот, проте близькі в області довжин хвиль та відповідають умові Брегга $q=0$. Внаслідок цього вони ефективно взаємодіють в атмосфері та формують розсіяний радіосигнал. Отримані за допомогою функції розсіювання просторові характеристики розсіяних сигналів досить просто перетворюються на часові характеристики.

Модуль функції розсіювання $|F(r, q)| = Z(r, q)$ являє собою обвідну, а аргумент – описує фазову структуру розсіяного коливання [2]. Функцію $Z(r, q)$ зручно зображувати у прямокутній системі координат у вигляді 3D поверхні [3], а об'єм, що міститься між поверхнею функції $Z(r, q)$ та площиною (r, q) , названий тілом розсіювання (рис. 2). На рис. 2 представлено тіло розсіювання простих за структурою акустичного і електромагнітного сигналів, які мають прямокутні обвідні.

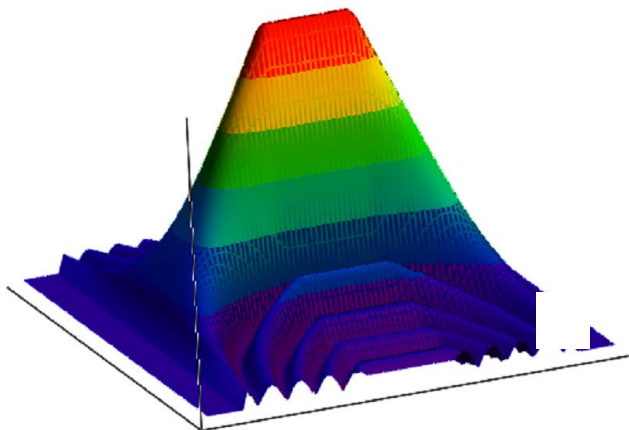


Рис. 2. Тіло розсіювання простих за структурою акустичного та електромагнітного сигналів, які мають прямокутні обвідні

Тіло розсіювання містить в собі інформацію про основні характеристики системи зондування, у якій використовуються обрані зондувальні сигнали. Поряд з 3D поданням, воно може бути охарактеризоване також за допомогою перерізів вертикальними площинами $r = const$, $q = const$. Форма перерізу тіла площиною $q = q_0 = const$ є обвідною розсіяного сигналу для випадку, коли просторові частоти зондувальних акустичного та електромагнітного сигналів розстроєні на задану величину q_0 . Аналіз форм відповід-

них обвідних дозволяє встановити вплив розстройки на характер змін обвідної розсіяного сигналу, на ступінь зменшення амплітуди і, відповідно, на основні характеристики системи зондування, які залежать від амплітуди і особливостей розсіяного сигналу.

Переріз тіла розсіювання площиною $r = 0$ визначає діапазон хвильових чисел Δq параметру розстроювання, в якому відбувається розсіювання. Тому перетин $Z(0, q)$ тіла характеризує зв'язок амплітуди розсіяного сигналу й значень параметра q . Тіло розсіювання дозволяє дослідити, як змінюється амплітуда розсіяного сигналу залежно від значення параметра q .

Рельєф тіла розсіяння сигналів можливо також подавати за допомогою ліній, які формуються при перерізі тіла горизонтальними площинами на певному рівні функції $Z(r, q) = \text{const} = Z_c$. Ці замкнуті лінії мають назву діаграм розсіяння. Можуть бути використані перерізи на рівні функції $Z_c = 0,5(0,7)$, $Z_c = 0,1$ або інших рівнях. Кількість градацій, якщо потрібно, можна збільшувати або зменшувати, залежно від завдання дослідження.

Перетин функції вертикальною площиною $Z(r, 0)$ формує обвідну в області головної пелюстки, яка має трапецієдальну форму. При збільшенні значення параметру q обвідна розсіяного сигналу отримає амплітудну модуляцію. Тіло розсіювання має, як бачимо, головну і бокові пелюстки.

В ряді задач дослідження зондувальних сигналів і взагалі систем РАЗ доцільно використати спектральне подання $Z(k, q)$ двовимірної функції розсіювання [2]. Відповідне тіло розсіяння для простих сигналів – акустичного імпульсу з гаусівською обвідною та прямокутного радіоімпульсу зображено на рис. 3, а. Перерізи тіла вертикальними площинами $q = \text{const}$ являють собою просторові спектри розсіяних сигналів для заданих значень параметру q (рис. 3, б, в, г).

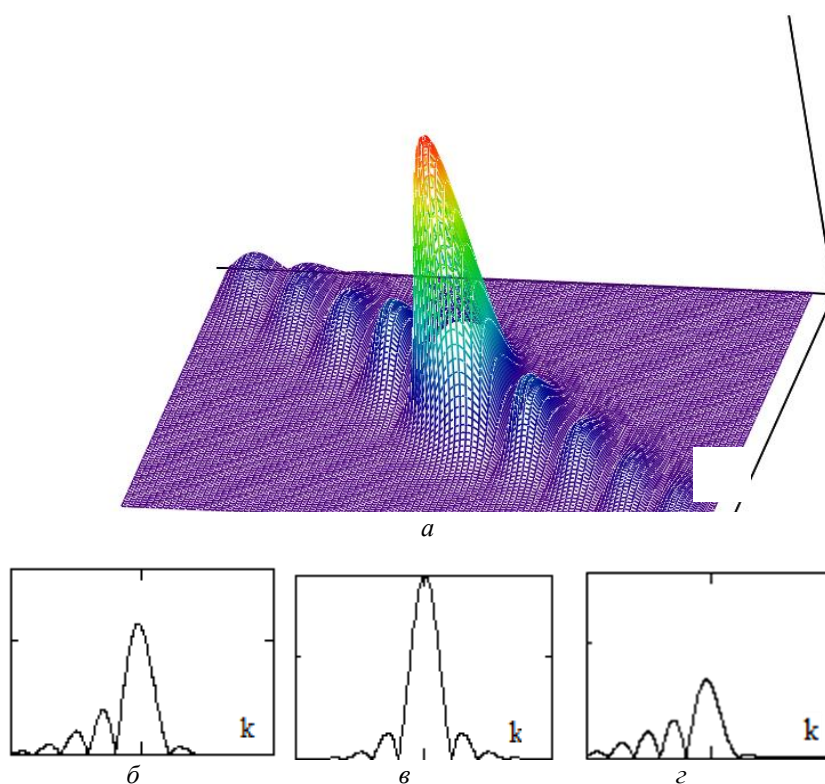


Рис. 3. Тіло розсіяння прямокутного радіоімпульсу та акустичного імпульсу з гаусівською обвідною в спектральному поданні в координатах Z, k, q (а) та його перерізи площинами $q = \text{const}$:

$$\bar{b} - q_1 = 0; \bar{v} - q_2 < 0; \bar{z} - q_3 < q_2 < 0$$

Структура тіла має головну і бокові пелюстки (рис. 3, а), які формуються внаслідок розсіювання бокових пелюсток спектру радіосигналу на акустичному імпульсі. Головний і бокові пелюстки розгорнуті на деякий кут, значення якого залежить від протяжності зондувальних акустичного і електромагнітних імпульсів. При $q = 0$ форма спектру розсіяного сигналу є симетричною, а якщо $q \neq 0$, то спектр розсіяного сигналу має несиметричний вигляд, максимум спектру додатково зміщений відносно нуля частот, а значення зміщення залежать від кута повороту тіла розсіяння.

Як показано раніше, спектри розсіяних сигналів систем РАЗ залежать від видів зондувальних сигналів і від стану атмосфери – значень її характеристик. Вони формуються в результаті взаємодії акустичного і електромагнітного сигналів в конкретних атмосферних умовах, відтворюються на виході спектроаналізатору системи у вигляді спектру часових частот і

несуть інформацію про стан атмосфери. Вивчення особливостей спектрів розсіяних сигналів, отриманих для різних видів зондувальних сигналів і при різних станах середовища, дозволяє зрозуміти основні особливості систем РАЗ, їх відмінності від інших інформаційних локаційних систем, а також застосувати отримані знання при проектуванні станцій РАЗ і алгоритмів їх функціонування.

Для більшості тіл розсіяння перерізи або спектри сигналів при $q \neq 0$ є суттєво несиметричними і характеризуються зміщенням максимуму, а також центру ваги відносно точки $k = 0$. Це зміщення при розсіянні додається до доплерівського зсуву частоти і проявляється при оцінюванні як неінформативна добавка чи похибка (величина похибки визначення температури може досягати одиниць градусів).

Розроблені уявлення дозволили дати зрозумілу фізичну інтерпретацію, пояснити та упорядкувати значну кількість наукових результатів і даних, накопичених за тривалий період розвитку методів. Особливо продуктивними в цьому відношенні виявились частотні зображення.

Тіло розсіяння простих електромагнітного та акустичного імпульсів, які мають прямокутні обвідні, у спектральному поданні $Z(k, q)$ представлено на рис. 4. Спектральне тіло розсіяння аналізованих сигналів має, як видно, декілька рядів бічних піків і розгорнута на деякий кут основну пелюстку. Один ряд пелюсток формується при розсіюванні головного пелюстка спектру радіосигналу на бокових пелюстках спектру акустичного сигналу, а інші – внаслідок розсіювання бокових пелюсток спектру радіосигналу на основному пелюстку спектру акустичного сигналу.

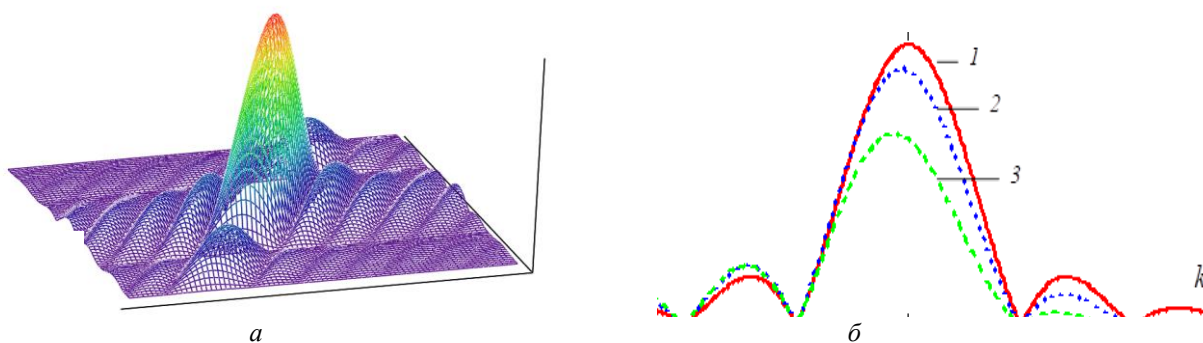


Рис. 4. Тіло розсіяння електромагнітного та акустичного імпульсів з прямокутними обвідними у спектральному поданні $Z(k, q)$ (а) та перетини тіла розсіяння площинами $q = const$ (б): 1 – $q_1 = 0$; 2 – $q_2 > 0$; 3 – $q_3 > q_2 > 0$

Перетини тіла площинами $q = const$ є просторовими спектрами розсіяних сигналів, що відповідають певним станам атмосфери (рис. 4). Як видно, просторовий спектр розсіяного сигналу при $q = 0$ є симетричним, а при $q \neq 0$ несиметричним і характеризується зсувом максимуму (а також центру ваги) Δk відносно точки $k = 0$. Додатковий неінформативний зсув максимуму спектральної функції при розсіюванні радіосигналу на звуковій посилювачі додається до доплерівського зсуву частоти й проявляється при оцінюванні частоти сигналу, а, отже, оцінюванні швидкості звуку, як похибка при використанні традиційних методів обробки.

Рельєф тіл розсіяння з гаусівськими обвідними (рис. 5), як видно, не має бічних піків через особливості використовуваних коливачів (у спектрах зондувальних сигналів гаусівського виду таких бічних пелюсток також немає). Тіла розсіяння більшості сигналів у спектральному поданні мають характерну рису – їхні піки повернені на деякий кут, що характерно і для тіла на рис. 5.

Перетини тіла розсіяння (рис. 5, а) площинами $q = const$: 1 – $q_1 = 0$; 2 – $q_2 > 0$; 3 – $q_3 > q_2 > 0$ подано на рис. 5, б. Просторові спектри розсіяних сигналів, як видно, не мають бокових пелюсток, але для випадків $q \neq 0$ вони також є несиметричними і мають додатковий неінформативний зсув по осі просторових і часових частот.

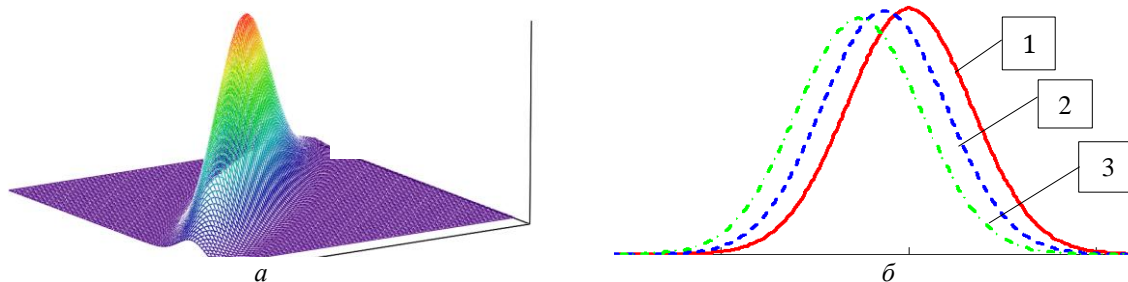


Рис. 5. Тіло розсіяння простих радіо- та акустичного імпульсів, які мають гаусівські обвідні, у спектральному поданні $Z(k, q)$ (а) та перетини тіла розсіяння площинами $q = \text{const}$ (б): 1 – $q_1 = 0$; 2 – $q_2 > 0$; 3 – $q_3 > q_2 > 0$

Вираз, що описує неінформативне зміщення частоти максимуму спектра розсіяного радіосигналу для тіл, наведених на рис. 5, має вигляд

$$\Delta f = -\frac{2v_e^2}{2\pi(4v_e^2 + v_s^2)} \cdot q, \quad (5)$$

де v_e , v_s – параметри, що характеризують просторові тривалості радіо- та акустичного сигналів. Саме значення цих параметрів визначає кут повернення пелюсток тіла розсіяння в спектральному поданні.

Як показують результати розрахунків за допомогою виразу (5), для значень параметрів зондувальних сигналів $\lambda_e = 0,68$ м ($f_e = 440$ МГц), $\lambda_s = 0,34$ м ($f_s = 1$ КГц) зміна температури атмосфери з висотою на один градус призводить до додаткового неінформативного зсуву частоти сигналу на $\Delta f \approx 0,32$ Гц, що відповідає систематичній похибці вимірювання швидкості звуку $\Delta v_s \approx 0,11$ м/с і похибці вимірювання температури середовища $\Delta T \approx 0,18$ С. У реальних умовах зондування значення систематичної похибки результатів вимірювання температури атмосфери може бути значно більше і досягати одиниць градусів.

Висновки

1. Удосконалено математичну модель інформаційного локаційного каналу систем РАЗ, що відрізняється використанням просторових хвильових частотних уявлень зондувальних акустичного та електромагнітного сигналів, які дозволяють фізично змістовно та наочно описати процес їх взаємодії в атмосфері та формування розсіяного радіосигналу при різних видах зондувальних коливань і різних станах атмосфери.

2. Проаналізовано тіла розсіяння в частотному поданні найчастіше використовуваних видів зондувальних акустичних та електромагнітних сигналів – простих за структурою акустичних та електромагнітних імпульсних сигналів з прямокутними та гаусівськими формами обвідних. Досліджено основні властивості та особливості вказаних сигналів. Показано, що при виконанні умови Брегга, коли параметр $q = 2k_e - k_s$ дорівнює нулю, спектр розсіяного сигналу при використанні досліджених сигналів є симетричним, що дозволяє використовувати при обробці і оцінюванні інформативних параметрів відомі класичні методи оцінювання параметрів спектрів сигналів. Коли параметр Брегга $q \neq 0$, спектр сигналу є несиметричним і такий метод обробки сигналів використовувати неможливо.

3. З використанням запропонованої математичної моделі каналу з'ясовано фізичні причини появи різноманітних специфічних похибок в результатах вимірювань швидкості звуку радіоакустичними системами. Зазначені види похибок не можуть бути усунені осередненням одиничних результатів вимірювань, а також не можуть бути усунені методами послідовної оптимальної лінійної фільтрації, які використовуються в контурах керування параметрами систем зондування. Наявність систематичної похибки в контурі адаптації буде негативно позначатися також на ефективності функціонування алгоритму управління частотою зондувального радіосигналу з метою адаптації систем РАЗ до метеоумов, що змінюються по трасі.

4. Сформульовано можливості використання на практиці проаналізованих видів сигналів і вказано, які методи обробки сигналів доцільно використовувати. Визначено рекомендації щодо використання зондувальних сигналів систем РАЗ, режимів роботи та вимірювань у станціях зондування з метою реалізації на практиці методів та алгоритмів частотної адаптації систем до метеорологічної обстановки, що змінюється.

Список літератури:

1. Bradley S. Atmosphere Acoustic Remote Sensing. Principles and Application. CRC Press. 2007. 267 p.
2. Kartashov V.M., Tikhonov V.A., Oleinikov V.N. Signal processing in radio electronic systems for remote monitoring of the atmosphere. Kharkiv : KNURE, 2014. 312 p.
3. Карташов В.М. Моделі і методи обробки сигналів систем радіоакустичного і акустичного зондування атмосфери. Харків : ХНУРЕ, 2011. 234 с.
4. Lataitis R.J. Theory and Application of a radio-acoustic sounding system (RASS): NOAA Technical Memorandum ERL WPL-230. Nat. Oceanic and Atmos. Admin. Environ. Res. Labs. Boulder, CO, 1993, 207 p.
5. Remtech Radio Acoustic Sounding System (RASS) for remote sensing of temperature. URL: <https://remtechinc.com/wp-content/uploads/RASS3.pdf> (дата звернення 14.07.2024).
6. Temperature Profiler RASS. URL: <https://metek.de/product-group/rass/> (дата звернення 14.07.2024).
7. RASS for Radar Wind Profilers. URL: <https://www.scintec.com/catalogs/rass-for-radar-wind-profilers/> (дата звернення 14.07.2024).
8. Smith P. L. Remote measurements of wind velocity by the electromagnetic-acoustic probe. 1. System analysis. 1961 // Conf. proc. 5th Annu. convention on military electronics, Wash (D.C.), rep № 419. P. 43–53.
9. Fetter R. V. Remote measurements of wind velocity by the electromagnetic-acoustic probe. II. Experimental system. 1961 // Conf. proc. 5th Annu. convention on military electronics, Wash (D.C.), rep № 419. P. 54–59.
10. Ситнік О.В., Карташов В.М. Радіотехнічні системи : навч. посіб. Харків : Сміт, 2009. 448 с.
11. Chandrasekhar Sarma, T. V., Narayana Rao, D., Furumoto, J., and Tsuda, T. Development of radio acoustic sounding system (RASS) with Gadanki MST radar – first results, Ann. Geophys., 26, 2008, pp. 2531–2542. <https://doi.org/10.5194/angeo-26-2531-2008>
12. Alexander S. P., Murphy D. J., Klekociuk A. R., High resolution VHF radar measurements of tropopause structure and variability at Davis, Antarctica (69° S, 78° E). Atmos. Chem. Phys., 13, 2013. pp. 3121– 3132. doi:10.5194/acp-13-3121-2013
13. Бабкін С.І., Куценко В.І., Максимова Н.Г. Оцінка похибки двох методик температурного радіоакустичного зондування атмосфери. Експериментальні результати // Радіотехніка. 1988. № 84. С.98–106.
14. Kartashov V.M. Estimation of Signal Parameters Scattered by an Acoustic Wave Packet // Telecommunications and Radio Engineering, 2004. Vol. 61, №2. P. 125–129.
15. Muradyan P., Richard Coulter R. Radar Wind Profiler (RWP) and Radio Acoustic Sounding System (RASS) Instrument Handbook. March, 2020. Environmental Science Division, Argonne National Laboratory. 20 p. URL: https://www.arm.gov/publications/tech_reports/handbooks/rwp_handbook.pdf (дата звернення 14.07.2024).
16. Kartashov V.M. Signal Scattering Functions of Atmospheric Sounding System // Telecommunications and Radio Engineering. 2003, Vol. 59, №7-8-9. P. 88–94.
17. Kartashov V., Babkin S., Kartashov A., Pershyn Y. Development of the Atmosphere Radio-Acoustic Sounding Method in Ukraine and in the World in the Period of 1961-2000 // 2023 IEEE 6th International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics, UkrMiCo 2023, 13–15 November 2023, Kyiv, Ukraine. P. 372–376. DOI: 10.1109/UkrMiCo61577.2023.10380339
18. Kartashov V., Oleynikov V., Koryttsev I., Sheiko S., Zubkov O., Babkin S. Processing of Wide Band Acoustic Signals During Detection of Unmanned Aerial Vehicles // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW). Kharkiv, Ukraine, September 21 – 25, 2020. Vol. 1 on 2020 IEEE 12th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). P. 35–39.
19. Developing and Applying Optoelectronics in Machine Vision / O. Sergiyenko, J.C. Rodriguez-Quifonez. IGI Global, 2016. 341 p.
20. Kartashov V.M., Tikhonov V.A., Voronin V.V. and Tymoshenko L.P. Complex model of random signal in problems of acoustic sounding of atmosphere // Telecommunications and Radio Engineering. 2016. Vol. 75, Iss. 20. P.1885–1892.

Надійшла до редколегії 22.08.2024

Відомості про автора:

Карташов Олександр Володимирович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем; Україна; email: oleksandr.kartashov@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4618-4787>