

А.П. ШАМРАЙ, І.Є. КОНДРАШОВ

**АНАЛІЗ ЗОНДУВАЛЬНИХ СИГНАЛІВ СИСТЕМ
РАДІОАКУСТИЧНОГО ЗОНДУВАННЯ АТМОСФЕРИ
В ФУНКЦІОНАЛЬНОМУ ПРОСТОРИ**

Вступ

Системи радіоакустичного зондування (РАЗ) атмосфери забезпечують отримання інформації про стан процесів, що відбуваються в нижніх шарах атмосфери. Вони дозволяють вимірювати вертикальні профілі температури атмосфери та швидкості вітру [1 – 5]. Отримана інформація використовується в прикладних задачах для забезпечення зльоту та посадки літальних апаратів, прогнозування погоди, вивчення атмосферних процесів [1, 2]. Протягом декількох десятиріч розвивається теорія радіоакустичного зондування атмосфери, системи РАЗ розробляються рядом фірм і пропонуються на ринок [6 – 8], однак до цього часу не вдалося подолати низку недоліків, які суттєво обмежують можливості систем РАЗ на практиці [4, 9, 10]. Розвиток теоретичних і практичних аспектів створення і використання систем РАЗ [1, 2, 11] не дав відповіді на існуючі проблемні питання.

Найбільш важливими серед існуючих обмежень систем РАЗ є недостатня ефективність методів і пристроїв обробки інформаційних сигналів, вітровий знос плями розсіяного радіосигналу внаслідок переміщення акустичного хвильового пакета під дією вітру та порушення умов Брегга зондувальних сигналів по трасі зондування [12 – 14]. Недостатньо вивчені питання аналізу і синтезу зондувальних сигналів систем РАЗ, в той час, як ефективність локаційних систем значною мірою визначається саме потенційними можливостями зондувальних сигналів, що використовуються. Крім того, в системах РАЗ випромінюється пара зондувальних сигналів – акустичний та електромагнітний, які мають різну фізичну природу, що також є значною відмінністю систем РАЗ від інших локаційних систем і потребує додатково вивчення [10 – 12].

У статті розглядаються питання аналізу зондувальних сигналів систем РАЗ в абстрактному функціональному просторі, результати досліджень статті забезпечать можливість постановки і вирішення актуальних задач аналізу і синтезу зондувальних сигналів з використанням математичного апарату функціонального аналізу.

Аналіз публікацій

Найважливіша і невід'ємна частина теорії локаційних систем будь-якого призначення – методи аналізу зондувальних сигналів. Причому слід мати на увазі, що завдання вибору зондувальних сигналів стосовно радіоакустичних систем більш складне і багатопланове, ніж відповідне завдання радіолокаційних систем, має велику кількість ступенів свободи, а, отже, можливості оптимального або навіть задовільного її вирішення шляхом випадкового, інтуїтивного або експериментального пошуку (вибору) дуже невеликі.

Види використовуваних зондувальних сигналів у перших системах РАЗ вибиралися на основі досвіду та знань, отриманих з радіолокації. На підставі результатів експериментів була запропонована досить вдала комбінація зондувальних сигналів, що набула широкого поширення на практиці, – імпульсний акустичний сигнал із синусоїдальним заповненням і безперервний монохроматичний радіосигнал.

Ряд теоретичних робіт [4, 10, 11], присвячених аналізу деяких типів зондувальних сигналів, з'явилися пізніше. Отримані в них результати підтвердили правильність інженерної

інтуїції, що підказала використання зазначеної комбінації сигналів, і дещо розширили уявлення про властивості та можливості інших видів зондувальних коливань.

В [14, 15] розглянуто можливість використання безперервного монохроматичного акустичного випромінювання. Показано, що електромагнітні коливання відбиваються у цьому разі лише від деякого шару, у якому виконується умова Брега. Відбиваючий шар залишається нерухомим з часом, а частота радіосигналу при розсіянні зміщується на частоту звуку і не залежить від швидкості поширення акустичних хвиль у цьому шарі. Доплерівські виміри при цьому неможливі, інформацію про швидкість звуку можна отримати тільки за амплітудними ознаками сигналу, зважаючи на те, що максимум обвідної відповідає висоті, на якій виконується умова Брега. Зрозуміло, що застосування безперервного зондувального акустичного випромінювання з незмінною частотою на практиці недоцільно через низьку оперативність отримання профілів метеовеличин і невисоку точності вимірювань.

Висловлювалася можливість використання акустичного імпульсу змінної частоти з метою забезпечення виконання умови Брега по всій його просторовій протяжності [4]. Це може бути досягнуто за узгодженням закону зміни частоти акустичного імпульсу із законом зміни за висотою швидкості звуку. У реальних умовах профіль швидкості звуку не відомий і його потрібно визначати, а отже використання такого сигналу на практиці важко. Неможливе використання акустичного сигналу як послідовності імпульсів [2] з тієї причини, що спектр відбитого радіосигналу виявляється здвигнутим на значення частоти звуку щодо спектра зондувального сигналу.

Вважається, що отримання інформації з спектра відбитого радіосигналу можливе лише при використанні акустичного зондувального випромінювання у вигляді одиночного імпульсу [10]. При використанні інших видів звукових коливань жодної інформації у частоті відбитого радіосигналу, крім частоти звуку, немає. Інформація про стан атмосфери закодована у цьому випадку в амплітуді радіосигналу, що залежить від ступеня виконання умови Брега.

Певні переваги має акустичний імпульс з лінійною частотною модуляцією (ЛЧМ), що дозволяє підвищити оперативність зондування [4, 10]. Імпульсні звукові сигнали, крім зазначених переваг, забезпечують досить просте виділення просторової області, в якій сформований розсіяний радіосигнал [4, 10].

Завдання вибору виду зондувального радіосигналу для локації обмеженого простору звукового пакету також є непростим. Найбільш прийнятним видом радіосигналу для точного вимірювання доплерівського зсуву є безперервне монохроматичне випромінювання [15, 16], причому його частота повинна вибиратися таким чином, щоб задовольняти умову Брега. Можливе використання також імпульсної послідовності з малою шпаруватістю [2], яка має лінійний спектр.

Найбільшого поширення на практиці отримали акустичні імпульси з немодульованим по частоті заповненням (чи з ЛЧМ заповненням) і безперервне монохроматичне радіовипромінювання (або відповідні імпульси досить великої тривалості) [17].

Значною перешкодою для виконання теоретичних досліджень в області зондувальних сигналів систем РАЗ тривалий час було використання для вирішення цих задач математичного апарату, що базується на рівняннях Максвелла. Існуючі моделі розсіювання хвиль на неоднорідностях атмосфери припускають, як правило, рішення радіофізичного завдання, виходячи з рівнянь Максвелла, внаслідок чого є досить складними та громіздкими [2, 4].

Складність використовуваних моделей ускладнює отримання нових відомостей про об'єкти, що вивчаються, і обмежує коло дослідників, здатних ними скористатися. Крім того, в силу зазначених властивостей вони не можуть виступити як «заступники» розсіювальних об'єктів при вирішенні характерних для теорії систем завдань – аналізу та синтезу зондувальних сигналів, розробки алгоритмів оптимального прийому і т.д.

Останнім часом було запропоновано конструктивну математичну модель інформаційного радіоакустичного локаційного каналу, засновану на системному математичному апараті,

яка отримала назву кореляційної моделі [2, 17]. Це відкриває значні можливості для розвитку досліджень у галузі зондувальних сигналів систем РАЗ.

Розробка математичного апарату аналізу зондувальних сигналів систем РАЗ на основі кореляційної моделі в абстрактному функціональному просторі забезпечить можливість постановки та вирішення актуальних завдань аналізу та синтезу зондувальних сигналів з використанням математичного апарату функціонального аналізу.

Постановка задачі дослідження

У сучасній теорії інформаційних систем і сигналів широке застосування знаходять геометричні уявлення сигналів, що використовують такі поняття як простір, вектор, відстань, і т.п. Широко використовується в практиці аналізу і синтезу сигналів і інших структурних елементів інформаційних систем – антен, фільтрів і т.д. поняття гільбертова простору, яке є лінійним нормованим метричним простором і на якому визначений скалярний добуток.

Яку б природу не мали елементи, що розглядаються, їх вдається уподібнити точкам простору, зберігши аналогію з геометричними образами. При цьому багато залежностей і властивостей об'єктів, що розглядаються, зазвичай отримують наочний геометричний опис, що спрощує вирішення низки завдань. Геометричні аналогії можна і не використовувати при доказі основних результатів, але вони допоможуть намітити шляхи вирішення, усвідомити суттєві особливості завдань, що розглядаються.

Питання підвищення ефективності дослідження, аналізу і синтезу зондувальних систем радіоакустичного зондування атмосфери зараз стоять досить гостро. З одного боку, недостатня вивченість цього питання стримує розвиток систем радіоакустичного зондування, можливість підвищення якісних показників систем. З іншого боку, потенційні можливості зондувальних сигналів значною мірою визначають характеристики локаційних систем, в тому числі і систем РАЗ, а ефективного математичного апарату для вирішення вказаних питань зараз не існує. Особливістю радіоакустичних систем є використання в процесі їх функціонування двох видів зондувальних сигналів – акустичного і електромагнітного, які мають різну фізичну природу. Тому потрібно розробляти нові підходи і новий математичний апарат для використання в задачах аналізу і синтезу зондувальних сигналів систем радіоакустичного зондування атмосфери. Описання процесу взаємодії таких різномірних сигналів в середовищі за допомогою функціонального аналізу і абстрактних математичних просторів, дозволить розглядати такі сигнали сумісно, використовувати наочні геометричні подання і взагалі підвищити ефективність задач дослідження і синтезу таких комплексних, різномірних сигналів.

Подання зондувальних сигналів систем РАЗ у функціональному просторі

При розгляді завдань аналізу та синтезу зондувальних сигналів систем РАЗ атмосфери доцільно використовувати методи та подання функціонального аналізу, що дозволить використовувати наочні геометричні образи та уявлення, при яких сигнали розглядаються як елементи деякого простору, властивості сигналів як властивості простору, а перетворення сигналів, наприклад при розсіянні, як відображення одного простору в інший.

Все різноманіття допустимих акустичних та електромагнітних сигналів представимо у вигляді відповідних множин S_M і E_M (рис. 1, *a*). Завдання синтезу полягає у знаходженні такої пари сигналів, які належать різним множинам, що забезпечує деякі необхідні (оптимальні) властивості критерію синтезу. Вибір критерію доцільно здійснювати з урахуванням вихідних передумов та фізичного змісту задачі, що призвела до постановки проблеми синтезу, на основі неформалізованих процедур [18 – 20]. Структура функціоналу якості повинна визначатися бажаними властивостями синтезованих сигналів, зокрема їх спільними властивостями.

Функціонал якості повинен відображати спільну фізичну здатність акустичного та електромагнітного сигналів до формування розсіяної радіохвилі при їх неузгодженні (розстройці) у просторі та в області хвильових частот, а з іншого боку, відображати їхню близькість у деякому геометричному сенсі при такому неузгодженні. Фізичне суміщення

(а також попередня і подальша неузгодженість) сигналів у просторі завжди виконується в деякому діапазоні дальностей, якщо радіосигнал випромінюється з деякою затримкою у часі після випромінювання акустичного сигналу, а напрямки випромінювання обох хвиль збігаються. Зміна параметра розладу q двох сигналів в області хвильових частот пов'язана зі зміною довжини акустичної хвилі по трасі зондування внаслідок мінливості метеопараметрів (зокрема температури та швидкості вітру).

Ступінь відмінності функцій (сигналів), що належать різним множинам, слід задавати у вигляді деякої відстані, під якою можна розуміти квадратичну різницю сигналів (квадратична метрика), максимальне відхилення функцій у деякому діапазоні значень аргументів (рівномірна або чебишевська метрика) та ін. Квадрат відстані між елементами множини S_M допустимих акустичних сигналів та множини E_M допустимих радіосигналів визначимо як інтеграл квадрата різниці $E(2r' - r)$ та $S(r')e^{-jqr'}$:

$$\Delta^2(r, q) = \int_{-\infty}^{+\infty} |E(2r' - r) - S(r')e^{-jqr'}|^2 dr'. \quad (1)$$

При такому записі кожен елемент множини E_M включає в себе підмножину сигналів, що мають однакову комплексну обвідну E , але відрізняються зсувом по дальності r , відповідно елементи множини S_M відрізняються зсувом по просторовій частоті q .

Розкриваючи підінтегральний вираз, отримаємо

$$\begin{aligned} \Delta^2(r, q) = & \int_{-\infty}^{+\infty} |E(2r' - r)|^2 dr' + \int_{-\infty}^{+\infty} |S(r')e^{-jqr'}|^2 dr' - \\ & - 2 \operatorname{Re} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} E(2r' - r) S^*(r') e^{jqr'} dr' \right). \end{aligned} \quad (2)$$

Вважаючи, що $\int_{-\infty}^{+\infty} |E(2r' - r)|^2 dr' = \|E\|^2 = 1$, $\int_{-\infty}^{+\infty} |S(r')e^{-jqr'}|^2 dr' = \int_{-\infty}^{+\infty} |S(r')|^2 dr' = \|S\|^2 = 1$ і враховуючи, що третій член (2) містить взаємнокореляційну функцію сигналів $\int_{-\infty}^{+\infty} E(2r' - r) S^*(r') e^{jqr'} dr' = F(r, q)$, запишемо

$$\Delta^2(r, q) = 2[1 - \operatorname{Re}(F(r, q))].$$

Таким чином, двовимірна взаємнокореляційна функція $F(r, q)$, що характеризує спільну фізичну здатність акустичного та електромагнітного сигналів до формування розсіяної радіохвилі, визначає геометричну міру близькості даних сигналів у функціональному просторі при їх неузгодженні по координаті r та в області хвильових частот q .

Відповідно, завдання синтезу має полягати у знаходженні функцій, які забезпечують необхідний рельєф функціоналу $\Delta^2(r, q)$ чи $F(r, q)$.

Як відомо [21], максимізація вещественної частини скалярного добутку нормованих комплексних функцій еквівалентна мінімізації відстані між цими функціями в комплексному просторі гільбертовому сигналів L^2 . При геометричній інтерпретації кут ϕ між векторами E та S в комплексному гільбертовому просторі визначається співвідношенням

$$\cos \phi = \frac{\operatorname{Re}(E, S)}{\|E\| \|S\|} = \frac{\operatorname{Re} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} E(2r' - r) S^*(r') e^{jqr'} dr' \right]}{\|E\| \|S\|}.$$

Для нормованих сигналів $\cos \phi = \operatorname{Re}(E, S)$.

Оскільки у цій задачі синтезу істотну роль грає форма, структура сигналів, а не їх масштаб, який визначається амплітудою, доцільно використовувати нормовані сигнали, які мають одиничну енергію. Амплітуда сигналу у функціональному просторі визначає лише довжину вектора, отже, нормовані сигнали подаються точками на поверхні одиничної гіперсфери I , а множини E_M та S_M відображаються тоді деякими ділянками гіперсфери.

Таким чином, зменшення відстані між одиничними векторами відповідає зменшенню кута між ними та збільшенню $\cos \phi$. Якщо функції E і S збігаються, то $(E, S) = 1$, $\cos \phi = 1$ ($\phi = 0$). При $(E, S) = 0$ і $\cos \phi = 0$ ($\phi = \pi/2$) сигнали стають ортогональними (рис. 1, б).

Кут ϕ між акустичним та електромагнітним сигналами є функцією параметрів r , q , що характеризують неузгодженість функцій. При $r = 0$, $q = 0$, якщо функції $E(2r')$ і $S(r')$ еквівалентні, вони відображаються однією точкою гіперсфери, оскільки, як відомо [21], і в комплексному і в дійсному гільбертових просторах L^2 еквівалентні між собою функції є одним і тим же елементом простору. Отже, кут між такими сигналами $\phi = 0$.

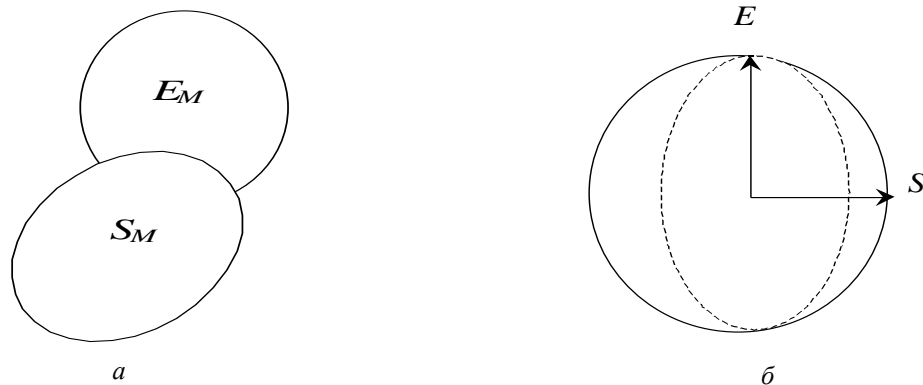


Рис. 1 Геометричні образи електромагнітного та акустичних сигналів, а також множин E_M і S_M , які є перетинальними

Зі зміною r та q функції $E(2r' - r)$, $S(r')e^{-jqr'}$, змінюючи своє геометричне положення, віддаляються один від одного і при деяких значеннях параметрів r , q , кут між цими векторами сигнальними стає рівним $\phi = \pi/2$, тобто сигнали стають ортогональними. Розсіяний радіосигнал за такого стану функцій на гіперсфері дорівнює нулю.

Величину $\cos \phi$ (або взаємкореляційну функцію), що характеризують відстань у функціональному просторі з квадратичною метрикою між нормованими сигналами і кут між їх геометричними образами, називають [22, 23] коефіцієнтом близькості сигналів E і S : $B(E, S)$. Коефіцієнт близькості множин E_M і S_M , що відповідає мінімальній відстані між цими множинами, визначається як

$$B(E_M, S_M) = \max_{S \in S_M, E \in E_M} \text{Re}(S, E)$$

Дослідження взаємного положення векторів зондувальних сигналів у функціональному просторі

Аналіз відстаней між зондувальними сигналами – радіо- та акустичним імпульсами з прямокутними обвідними. У роботі досліджується зміна відстаней між зондувальними сигналами систем радіоакустичного зондування атмосфери у функціональному просторі. Аргументами функції відстані в цьому просторі є поздовжня просторова координата, вздовж якої переміщуються сигнали в процесі зондування атмосфери, будучи випромінюваними з поверхні землі, а також параметр розладу умови Бреґу q .

На рис. 2 представлена поверхня відстаней у функціональному просторі між векторами простих зондувальних сигналів – радіоімпульсу та акустичного імпульсу з прямокутними обвідними. В області малих значень параметрів r , q поверхня відстаней спрямовується в область малих значень, форма поверхні в цій області визначається основною пелюсткою поверхні довгастої форми і в деякому діапазоні значень аргументів поблизу точки $r = 0$, $q = 0$ значення функції будуть близькі до нуля, тобто. вектори акустичного та електромагнітного сигналів у цій галузі досить близькі один до одного і відстань між ними у функціональному просторі невелика.

Як видно, поверхня відстаней аналізованих сигналів на деякому віддаленні від головної пелюстки має бічні пелюстки. Це є наслідком того, що прямокутні форми обвідних аналізованих зондувальних сигналів містять круті фронти, по суті розривні функції, мають досить широкий спектр, що простягається досить далеко по осі просторових частот у вигляді бічних пелюсток.

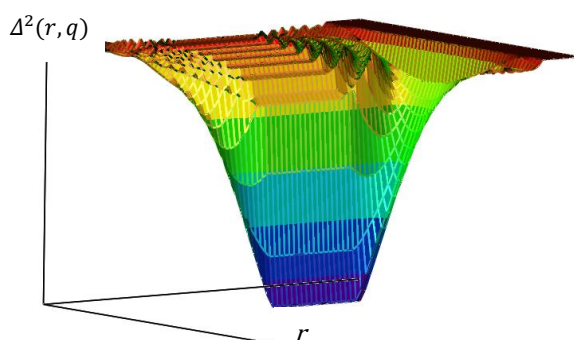


Рис. 2. Поверхня відстаней простих зондувальних сигналів – радіо- і акустичного імпульсів з прямокутними обвідними

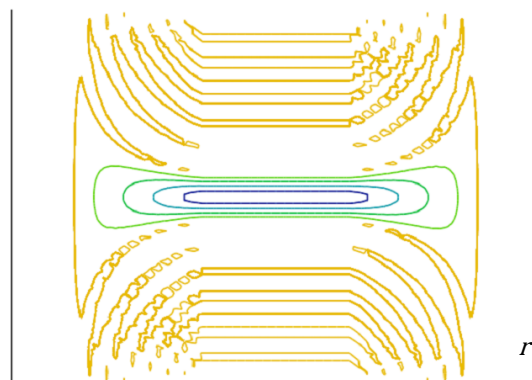


Рис. 3. Поверхня відстаней для простих зондувальних сигналів – радіо- та акустичного імпульсів з прямокутними обвідними у вигляді ліній однакових контурів

Поверхня відстаней у вигляді ліній однакових контурів для простих зондувальних сигналів – акустичного та радіоімпульсів з прямокутними обвідними представлена на рис. 3. Дана форма подання поверхні відстаней дозволяє більш наочно уявити бічні пелюстки аналізованої поверхні, що знаходяться у верхній частині поверхні, де ступінь зв'язку аналізованих зондувальних сигналів відносно невелика.

Перетин поверхні відстаней сигналів, зображеної на рис. 2 вертикальними площинами при фіксованих значеннях параметра q вздовж осі r , представлені на рис. 4. Перетин, отриманий при значенні параметра розладу $q_1 = 0$, визначає форму головної пелюстки поверхні, перерізи, отримані при значеннях параметра $q_2 > q_1$, $q_3 > q_2$ також характеризують форму головної пелюстки, але їх рівень свідчить про менше зближення зондувальних сигналів в даній області функціонального простору. Перетин, отриманий при значенні параметра $q_4 > q_3$, припадає на область бічних пелюсток поверхні, що свідчить про ще менше зближення зондувальних сигналів в даній області. Рівень бічних пелюсток поверхні є досить значним, що обумовлено присутністю в комбінації зондувальних сигналів двох коливань з прямокутними обвідними, що володіють крутими переднім і заднім фронтами.

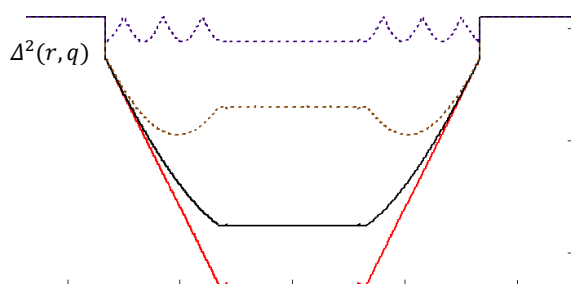


Рис. 4. Перетин поверхні відстаней сигналів, зображеної на рис. 2, вертикальними площинами вздовж осі r при фіксованих значеннях параметра q

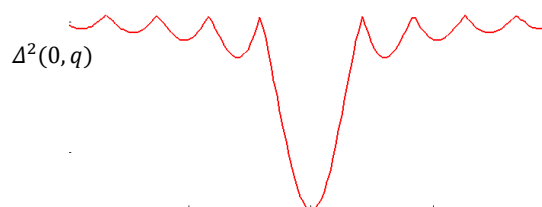


Рис. 5. Перетин поверхні відстаней сигналів, що зображена на рис. 2, вертикальною площиною вздовж осі q при значенні параметра $r=0$

Перетин поверхні відстаней сигналів, що зображено на рис. 5, вертикальної площиною, що проходить вздовж осі q , при значенні параметра $r=0$ характеризує зближення сигналів у функціональному просторі зі зміною значення параметра розладу умови Брегга, викликаною зміною довжини хвилі акустичного сигналу під впливом зміни метеорологічних параметрів атмосфери. Крива має монотонний характер в області головної пелюстки – у міру зменшення значень параметра q відбувається зближення, зменшення відстані між зондувальними сигналами, при $q=0$ досягається мінімум відстані, і далі в міру збільшення значення параметра q , тобто різниці між значеннями просторових частот зондувальних сигналів відбувається монотонне збільшення відстані між сигналами. У міру подальшого збільшення

значення параметра розладу q спостерігаються бічні пелюстки в залежності, рівень яких досить значний, він становить близько 0,1 від рівня головної пелюстки.

Аналіз поверхні відстаней між зондувальними сигналами – радіоімпульсом з прямокутною обвідною та акустичним імпульсом з гаусовою обвідною. На рис. 6 представлена поверхня відстаней між векторами простих зондувальних сигналів – радіоімпульсу з прямокутною обвідною і акустичного імпульсу з гаусовою обвідною. В області малих значень параметрів r, q поверхня відстаней спрямовується в область малих значень, форма поверхні в цій області визначається основною пелюсткою поверхні і в деякій області поблизу точки $r = 0, q = 0$ значення функції будуть близькі до нуля, тобто вектори акустичного та електромагнітного сигналів у цій області досить близькі один до одного.

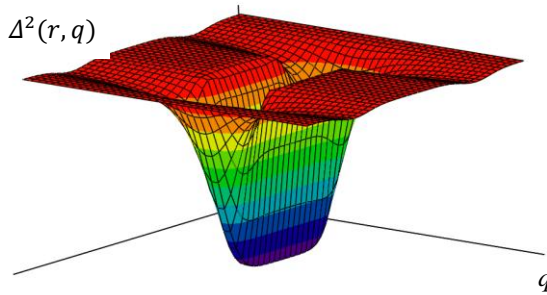


Рис. 6. 3D уявлення поверхні відстаней простих зондувальних сигналів – радіоімпульсу з прямокутною обвідною та акустичного імпульсу з гаусовою обвідною

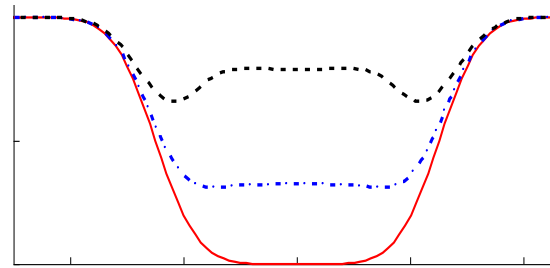


Рис. 7. Перетин поверхні відстаней сигналів, зображеної на рис. 6, вертикальними площинами вздовж осі r при фіксованих значеннях параметра q

Перетин поверхні відстаней сигналів, зображеної на рис. 6 вертикальними площинами вздовж осі r при фіксованих значеннях параметра q , представлено на рис. 7. Перетин, отриманий при значенні параметра розладу $q_1 = 0$, визначає форму головної пелюстки поверхні, переріз, отриманий при значенні параметра $q_2 > q_1$ відображає менший рівень максимального зближення сигналів у цій області. Перетин, отриманий при значенні параметра $q_3 > q_2$ забезпечує ще менший рівень максимального зближення сигналів, переріз має також невеликі бічні пелюстки, обумовлені присутністю в комбінації зондувальних сигналів одного сигналу з прямокутною обвідною, що має круті передній і задній фронти.

Перетин поверхні відстаней сигналів, що зображена на рис. 6, вертикальною площиною вздовж осі q при значенні параметра $r=0$ має вигляд гладкої кривої (рис. 8). Найменше значення функції, що відповідає максимальному зближенню зондувальних сигналів, забезпечується при $r = 0, q = 0$. У міру збільшення параметра розладу q значення функції збільшується, що свідчить про розходження векторів зондуючих сигналів у просторі відстаней.

Перетин поверхні відстаней сигналів, що зображена на рис. 7, вертикальною площиною вздовж осі q при значенні параметра $r=0$ характеризує зближення сигналів у функціональному просторі зі зміною значення параметра розладу умови Брега при зміні довжини хвилі акустичного сигналу під впливом зміни метеорологічних параметрів атмосфери. Крива має монотонний характер – зі зменшенням значень параметра q відбувається зближення, зменшення відстані між векторами зондувальних сигналів, при $q = 0$ досягається мінімум відстані, і далі зі збільшенням параметра q , тобто різниці між значеннями просторових частот зондувальних сигналів, відбувається монотонне збільшення відстані між сигналами.

Аналіз поверхні відстаней між векторами зондувальних сигналів – радіо- та акустичного імпульсів з гаусовими обвідними. 3D подання поверхні відстаней сигналів, зображеної на рис. 9, характеризує зближення зондувальних сигналів з гаусовими формами обвідної у функціональному просторі зі зміною значення параметра розладу умови Брега і при зміні неузгодженості сигналів по поздовжній просторовій координаті.

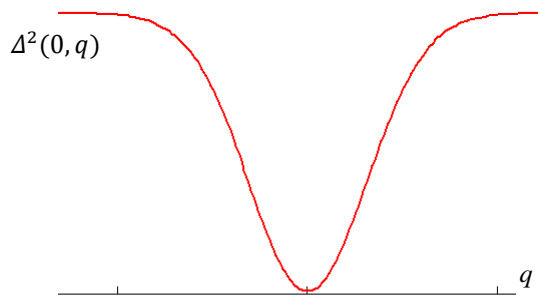


Рис. 8. Перетин поверхні відстаней сигналів, що зображена на рис. 6, вертикальною площиною вздовж осі q при значенні параметра $r=0$

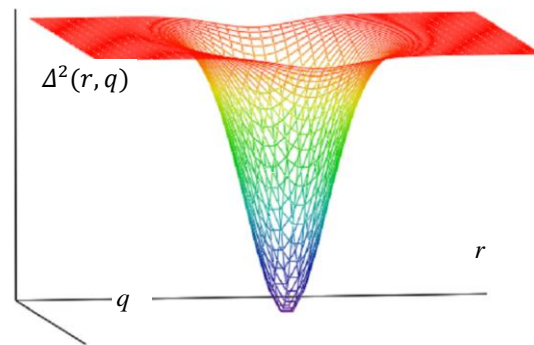


Рис. 9. 3D подання поверхні відстаней для простих зондувальних сигналів – радіо- та акустичного імпульсів з гаусовими формами обвідних

Крива має монотонний характер – в міру зменшення значень параметрів r і q спостерігається зближення, зменшення відстані між зондувальними сигналами, при $r = 0$, $q = 0$ досягається мінімум відстані, і далі в міру збільшення значень параметрів r і q має місце монотонне збільшення відстані між сигналами. Обидва аналізовані зондувальні сигнали мають обвідні гладкої форми, тому характер зміни відстаней між сигналами у функціональному просторі також описується гладкою монотонною залежністю, що не має бічних пелюсток.

Висновки

1. Розроблено математичну модель, що визначає відстань між векторами акустичного та електромагнітного зондувальних сигналів систем радіоакустичного зондування атмосфери у функціональному абстрактному математичному просторі. Аргументами функції відстані в цьому просторі є поздовжня просторова координата, уздовж якої переміщуються сигнали в процесі зондування атмосфери, будучи випроміненими з поверхні землі, а також параметр розстроювання умови Брега q . Параметр Брега q змінюється внаслідок зміни довжини хвилі акустичних коливань під впливом зміни метеорологічних параметрів атмосфери – температури середовища, вологості повітря.

Розглянуті аргументи r і q , з одного боку, є фізичними параметрами, що характеризують стан простору, в якому відбувається взаємодія акустичної та електромагнітної хвиль, які мають різну фізичну природу, а з іншого боку, їх слід розглядати як параметри абстрактного функціонального математичного простору, що дасть змогу вивчити характерні особливості зміни відстані між функціями, що розглядаються, у математичному просторі.

2. Методом математичного моделювання вивчено особливості поверхонь відстаней для різних пар зондувальних сигналів у вигляді простих без внутрішньоімпульсної модуляції імпульсів із прямокутними та гасовими формами обвідних. Загальні закономірності вивчених поверхонь відстаней сигналів такі: є деяка головна пелюстка поверхні, у якій зв'язок зондувальних акустичного й електромагнітного сигналів, що мають різну фізичну природу, значний. У міру зростання значень параметрів функціонального простору, ступінь зв'язку сигналів зменшується і залежно від форм обвідних сигналів, можуть спостерігатися бічні пелюстки поверхні, розміри яких залежать від характерних особливостей обвідних.

3. Вивчені особливості поверхонь відстаней для різних видів і форм зондувальних сигналів будуть затребувані в задачах дослідження й аналізу властивостей різних зондувальних сигналів, у задачах синтезу оптимальних форм зондувальних сигналів, адаптації форм сигналів до мінливих зовнішніх характеристик середовища. Усі ці сигнальні задачі будуть розв'язуватися в абстрактному функціональному математичному просторі з використанням певних критеріїв оптимальності та математичних методів, що використовуються у функціональному аналізі.

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. 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
6. Remtech Radio Acoustic Sounding System (RASS) for remote sensing of temperature. URL: <https://remtechinc.com/wp-content/uploads/RASS3.pdf>.
7. Temperature Profiler RASS. URL: <https://metek.de/product-group/rass/>.
8. RASS for Radar Wind Profilers. URL: <https://www.scintec.com/catalogs/rass-for-radar-wind-profilers/>.
9. Ситнік О.В., Карташов В.М. Радіотехнічні системи : навч. посіб. Харків : Сміт, 2009. 448 с.
10. 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. 2008. №26. P. 2531–2542. <https://doi.org/10.5194/angeo-26-2531-2008>
11. 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. 2013. №13. P. 3121–3132. doi:10.5194/acp-13-3121-2013
12. Kartashov V.M. Estimation of Signal Parameters Scattered by an Acoustic Wave Packet // Telecommunications and Radio Engineering, 2004. Vol. 61, №2. P. 125–129.
13. 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
14. Kartashov V.M. Signal Scattering Functions of Atmospheric Sounding System // Telecommunications and Radio Engineering. 2003. Vol. 59, №7–9. P. 88–94.
15. Kartashov V., Oleinikov 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.
16. Developing and Applying Optoelectronics in Machine Vision / O. Sergiyenko, J.C. Rodriguez-Quiñonez. IGI Global, 2016. 341p.
17. 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. V. 75, Iss. 20. P.1885–1892.
18. Oleksandr Sotnikov, Vladimir Kartashov, Oleksandr Tymochko, Oleg Sergiyenko, Vera Tyrsa, Paolo Mercorelli, Wendy Flores-Fuentes. Methods for Ensuring the Accuracy of Radiometric and Optoelectronic Navigation Systems of Flying Robots in a Developed Infrastructure. Chapter 16 // Machine Vision and Navigation. Springer, Cham. P.537–578.
19. Developing and Applying Optoelectronics in Machine Vision / O. Sergiyenko, J.C. Rodriguez-Quiñonez. IGI Global, 2016. 341p.
20. Піза Д.М. Теорія і проектування радіолокаційних систем : навч. посіб. Запоріжжя : ЗНТУ, 2019. 82 с.
21. Сумик М. М. Основи теорії радіотехнічних систем : навч. посіб. Львів : Львівська політехніка, 2004. 240 с.
22. Радіоелектронні системи : навч. посіб. / Ю.М. Седишев та ін. Харків : ХУПС, 2010. 360 с.
23. Радіоелектронні системи : навч. посіб. / П. Ю. Баранов, В. П. Лавриненко, О. М. Мелешкевич, В. С. Дмитренко. Одеса, 2012. 232 с.

Надійшла до редколегії 15.10.2024

Відомості про авторів:

Шамрай Антон Павлович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем, Україна; email: anton.shamrai@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4714-4983>

Кондрашов Ігор Євгенович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем, Україна; email: igor.kondrashov@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4618-1415>