УДК 621.396.96 **DOI:10.30837/rt.2024.2.217.15**

О.В. КАРТАШОВ, І.Є. КОНДРАШОВ

МЕТОД АДАПТАЦІЇ СИСТЕМ РАДІОАКУСТИЧНОГО ЗОНДУВАННЯ АТМОСФЕРИ

Вступ

Системи радіоакустичного зондування атмосфери (РАЗ) є ефективним та перспективним засобом отримання інформації про стан та динамічні процеси, що відбуваються в нижніх шарах атмосфери. Системи РАЗ дозволяють здійснювати вимірювання вертикальних профілів таких характеристик атмосфери як температура, швидкість та напрям вітру, параметри турбулентності, вологість повітря [1 – 4].

Теорія і практика систем РАЗ розвиваються протягом кількох десятиліть, починаючи з 1961 р. [5 – 7], проте до цього часу не вдалося подолати низку обмежень і недоліків, які суттєво обмежують можливості застосування систем РАЗ на практиці при вирішенні актуальних прикладних завдань – метеорологічне забезпечення зльоту та посадки літальних апаратів, прогнозування поширення радіо- та акустичних хвиль в атмосфері, прогнозування умов, що призводять до формування екологічно небезпечних ситуацій [3, 8, 9].

Основними серед існуючих обмежень систем РАЗ є порушення умов Брегга по трасі зондування та вітровий знос плями розсіяного радіосигналу внаслідок переміщення акустичного хвильового пакета під дією вітру. В даний час відомий ряд алгоритмів, спрямованих на усунення або компенсацію впливу порушення умови Брегга на точність та оперативність радіоакустичного зондування. Однак ці алгоритми не дозволяють суттєво покращити зазначені характеристики систем РАЗ, оскільки вони не враховують ряд особливостей розсіювання радіохвиль на неоднорідностях, створюваних акустичним хвильовим пакетом, та отримані евристичним шляхом [10 – 13].

У статті синтезується алгоритм частотної адаптації систем РАЗ до метеорологічної обстановки, що змінюється, на основі адекватної моделі радіоакустичного інформаційного каналу і з використанням основних досягнень теорії оптимального управління.

Відомі алгоритми частотної адаптації систем РАЗ

Принцип дії систем РАЗ заснований на розсіюванні електромагнітних хвиль на збуреннях середовища, створюваних імпульсними звуковими коливаннями, що випромінюються з поверхні землі у вертикальному напрямку.

Для того щоб отримати достатній для реєстрації та обробки рівень розсіяного радіосигналу, необхідно забезпечити виконання умови Брегга [1, 3], за якої електромагнітні хвилі, розсіяні різними частинами акустичного пакета, складаються з урахуванням їх фаз когерентно

$$\lambda_e = 2\lambda_s \sin\theta, \tag{1}$$

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

Довжина електромагнітної хвилі, що випромінюється, практично не залежить від значень параметрів атмосфери, а довжина хвилі акустичного випромінювання істотно змінюється внаслідок змін температури повітря з висотою. У зв'язку з цим виникає необхідність підстроювання частот зондувальних сигналів з метою виконання умови Брегга по трасі зондування. При цьому в принципі можна змінювати адаптивно частоту як акустичного, так і електромагнітного зондувальних коливань.

Технічно простіше реалізувати зміни частоти звукового сигналу. З початку розвитку методу РАЗ робилися досліди, спрямовані на вимірювання профілів температури атмосфери «за допомогою однієї звукової посилки», коли частота акустичного сигналу підбирається для метеорологічних умов, які існують у середній точці висотного профілю.

На рис. 1 наведено залежності дисперсії температури атмосфери від висоти, отримані експериментальним шляхом при використанні двох методик зондування [14, 15]. Графіки, що відповідають методиці «точка», показані суцільними лініями, а графік, отриманий з використанням методики «траса», – пунктирною лінією. В експерименті застосовувалася система РАЗ, що використовує такі частоти зондувальних сигналів: частота звукового сигналу – 5 см, частота радіосигналу – 10 см.

Методика зондування «траса» передбачає виконання умови Брегга спочатку на деякій нижній висоті, виконання заданої кількості зондувань атмосфери для цієї висоти, вимірювання зсувів доплерівської частоти з подальшим усередненням отриманих результатів вимірювання температури на обраній висоті. Далі описана сукупність дій послідовно виконується для наступних висот профілю. Відстань по висоті між сусідніми точками профілю зазвичай вибирається рівною просторової протяжності акустичного зондувального імпульсу.

Методика «точка» 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 [14].

Далі здійснюється випромінювання пакета 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 [15]. Зондування здійснювалося протягом часу, який зазвичай застосовується при усередненні отриманих «миттєвих» результатів вимірювань метеопараметрів (2, 3, 5, 10 хв.).

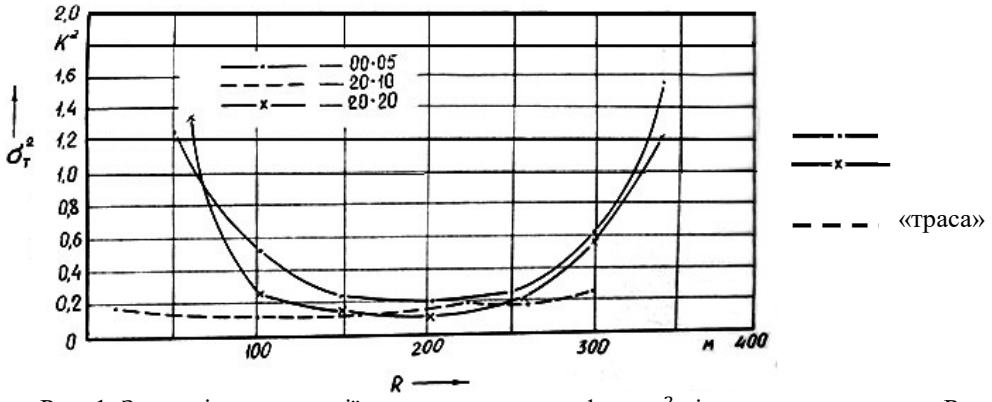

Рис. 1. Залежність дисперсії температури атмосфери σ_T^2 від висоти зондування R ри використанні методик зондування «точка» і «траса»

З даних рис. 1 видно, що дисперсія профілів температури, отриманих методом «траса», знаходиться приблизно на однаковому рівні, з деякою тенденцією до зростання, що спостерігається на найбільш висотній ділянці профілю. Що може пояснюватися зменшенням значень відношення сигнал шум для відбитого радіосигналу, що отримується з цих висот.

Дисперсія профілів температури, отриманих з використанням методики «точка», має мінімальні значення в районі висоти 200 м, для якої виконувалася настройка умови Брегга, що забезпечує отримання максимальної амплітуди радіосигналу, що відбивається від звукової посилки.

У міру відходу від цієї точки у бік більших і менших висот, спостерігається збільшення значення дисперсії температури, причому для великих висот абсолютні значення дисперсії дещо більше, що також пояснюється меншими значеннями співвідношень сигнал-шум для цих висот.

Забезпечення налаштування за умови Брегга в кожній з точок висотного профілю (які іноді називають «майданчиками») шляхом зміни частоти звукового сигналу зондуючого

вручну вимагає значної кількості часу, яка в залежності від наявних метеорологічних умов і від кількості висотних точок профілю може становити 1-2 години.

Такий алгоритм виконання вимірювань суттєво обмежує такий показник систем РАЗ, як оперативність отримання профілів метеоінформації. У той самий час даний показник є одним із основних потенційних переваг методу в порівнянні з наявними засобами вимірів. Крім того, зазначений час вимірів можна порівняти з часом квазістаціонарності процесів в атмосфері. Перевищення часу квазістаціонароності при виконанні вимірювань методом усереднення значень метеопараметра призводить до суттєвого погіршення результуючої похибки вимірювань. Саме з цієї причини вже на початковому етапі розвитку методу РАЗ стали робити спроби отримати профілі температури «по одній звуковій посилці» з підстроюванням частоти акустичного сигналу в середньому по трасі.

У літературі описані також алгоритми частотної адаптації систем РАЗ до метеообстановки, що змінюється, в яких забезпечення умови Брегга досягається шляхом підстроювання частоти зондуючого радіосигналу в міру просування зондуючого акустичного хвильового пакета в атмосфері. Це стає можливим через суттєву відмінність швидкостей використовуваних зондувальних коливань – акустичного та електромагнітного.

У роботі [16] описано використання методу фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ) радіосигналу при реалізації алгоритму частотної адаптації систем РАЗ. Використання автопідстроювання частоти радіосигналу системи заснована на тому факті, що при виконанні умови Брегга доплерівський зсув частоти радіосигналу точно співпадає зі значенням несучої частоти звукового зондувального сигналу f_s.

У даному методі, у міру поширення звукового імпульсу в напрямку зондування, здійснюється вимірювання параметра Δ – поточного значення різниці між значеннями несучої частоти розсіяного радіосигналу f_p і номінальної частоти задаючого генератора радіосигналу. Далі здійснюється перетворення значення параметра Δ в керуючу напругу $U_{\text{упр}}$, яка використовується для управління частотою задаючого генератора радіосигналу. Це дозволяє забезпечити виконання умови Брегга по всій трасі зондування.

Інформація про швидкість звуку в атмосфері в даному методі зондування буде міститися не у значенні частоти розсіяного сигналу $f_{\text{р}}$, як це зазвичай буває, а зміні несучої частоти радіосигналу. Значення параметра $f_{\text{р}}$ має залишатися незмінним.

Схема ФАПЧ включала в себе компаратор, фазовий детектор і пропорційно-інтегруючий фільтр. Поточні вимірювання значень частоти генератора електромагнітного випромінювання та зсувів частоти розсіяного сигналу вимірювалися 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 має місце зрив стеження схеми автопідстроювання за значенням f_s . Внаслідок цього потрібно здійснювати попередній вибір частоти акустичного сигналу з метою виконання умови Брегга в будь якій точці траси зондування. У разі сильного поривчастого вітру мають місце глибокі завмирання амплітуди розсіяного радіосигналу на окремих ділянках траси, і стійкість роботи системи радіоакустичного зондування у такому разі також порушується.

Відзначено [16], що за наявності зривів у роботі системи автопідстроювання частоти отримані значення температури атмосфери на кілька градусів перевищують значення температури у сусідніх точках профілю, тобто, по суті, мають місце аномальні похибки результатів вимірювань.

Таким чином, розглянуті алгоритми частотної адаптації систем РАЗ не забезпечують практично необхідної точності та оперативності вимірювань. Це пояснюється насамперед використанням невірних уявлень про процес розсіювання радіохвиль на протяжній радіолокаційної цілі у вигляді акустичного хвильового пакета. Крім того, алгоритми адаптації

створені евристичним шляхом, без використання знань про процеси управління об'єктами та спостереженнями, що отримані у відповідних галузях науки та техніки [2, 17 – 20].

У статті розглядається синтез алгоритму частотної адаптації систем РАЗ до метеорологічної обстановки, що змінюється, на основі адекватної моделі радіоакустичного інформаційного каналу і з використанням основних досягнень теорії стохастичного оптимального управління.

Математична модель радіоакустичного інформаційного каналу

Значна частина завдань щодо побудови теорії радіоелектронних систем у різних галузях пов'язана з побудовою математичної моделі інформаційного каналу, що описує механізм поширення та розсіювання хвиль у існуючих системах [21 – 23].

У сучасній теорії вимірювальних радіосистем зондований об'єкт, що досліджується, розглядається як елемент інформаційного каналу і представляється деяким детермінованим або стохастичним математичним оператором розсіювання, який описує зміни просторово-часового сигналу при його проходженні по каналу.

За наявності адекватного, конструктивного математичного оператора інформаційного каналу стає можливою побудова теорії радіосистем відповідного призначення (а також теорії зондувальних сигналів), суттєво спрощується вирішення завдань вибору видів сигналів при проєктуванні станцій, спрощується завдання оцінювання параметрів, керування системою [24 – 26].

В даний час при аналізі, синтезі та проєктуванні комплексів РАЗ найчастіше використовуються математичні уявлення, засновані на строгому вирішенні радіофізичного завдання на основі рівнянь Максвелла, внаслідок чого вони є досить складними та громіздкими [3]. Для фахівців у галузі технічних засобів РАЗ при розгляді обговорюваних у роботі завдань доцільно використовувати більш простіший і фізично наочний модельний підхід, заснований на математичному апараті, що використовується в теорії систем, що дозволяє відобразити характерні особливості процесу розсіювання радіохвилі на звуку та розсіяного інформаційного сигналу.

В роботі розглядається математична модель інформаційного локаційного каналу як взаємної кореляційної просторової функції акустичного і радіо сигналів за їх просторовим поданням [11, 12]

$$E_1(r) = \mathrm{A}\int_{-\infty}^{\infty} E(2r' - r)S^*(r')e^{jqr'}dr', \tag{2}$$

де E – комплексна обвідна зондувального радіосигналу; S – комплексна обвідна зондувального акустичного сигналу; $q = 2k_e - k_s$ – параметр розстроювання умови Брегга; k_e, k_s – хвильові числа відповідно електромагнитної та акустичної та хвиль; r – взаємне зміщення зондуючих атмосферу сигналів вздовж просторової координати r'; A – амплітудний множник пропорційності.

Застосувавши до правої частини виразу (2) теорему Парсеваля, отримаємо рівняння, де розсіяний сигнал визначається через просторові спектри відповідних комплексних обвідних коливань, що випромінюються системою

$$E_1(r) = \frac{K}{4\pi}\int_{-\infty}^{\infty} S_E\left(\frac{k}{2}\right)S_S^*(k+q)e^{-j\frac{r}{2}k}dk, \tag{3}$$

де $\int_{-\infty}^{+\infty} S(r')e^{-jqr'}e^{-jkr'}dr' = S_S(k+q)$,

$\int_{-\infty}^{\infty} E(2r' - r)e^{-jkr'}dr' = e^{-j\frac{r}{2}k}\int_{-\infty}^{\infty} E(2r')e^{-jkr'}dr' = \frac{1}{2}e^{-j\frac{r}{2}k}S_E\left(\frac{k}{2}\right)$,

$k = \frac{2\pi}{r'}$ – просторова частота.

У ряді випадків більш зручнішим є наступний вираз для розсіяного сигналу:

$$E_1(r) = \frac{K}{4\pi}\int_{-\infty}^{\infty} S_E(k)S_S^*(2k+q)e^{-jrk}dk, \tag{4}$$

оскільки коефіцієнт при аргументі k в функції S_E тут дорівнює одиниці. Вираз отримано з (3) шляхом заміни змінних і являє собою спектральне подання математичної моделі інформаційного локаційного каналу. Як показує практика, частотне уявлення математичної моделі каналу розсіювання систем РАЗ є більш зручним і конструктивним з точки зору вирішення завдань, що розглядаються в роботі, і забезпечує в ряді випадків більш наочні з фізичної точки зору результати.

Графічне подання модулів виразів (2), (3) (4) у трьохмірних координатах називають тілом розсіювання [12]. На рис. 2 представлено тіло розсіювання для зондувальних акустичного та електромагнітного сигналів у вигляді імпульсів з синусоїдальним заповненням та прямокутними формами обвідних.

Як бачимо з рис. 2, амплітуда розсіяного радіосигналу суттєво зменшується при збільшування значення параметру q, саме тому необхідно виконувати підстроювання частоту зондуючого радіосигналу з метою виконання умови Брегга по трасі зондування.

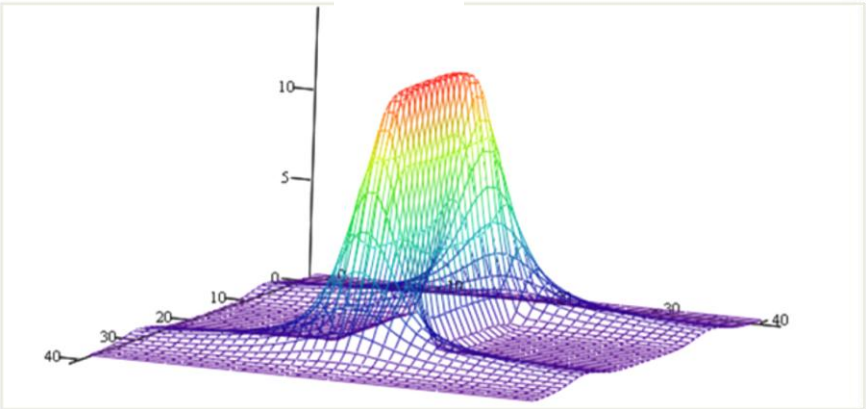

Рис. 2. Тіло розсіювання зондувальних акустичного та електромагнітного імпульсних сигналів з гаусівською та прямокутною формами обвідних

Синтез методу частотної адаптації систем РАЗ

Розглянемо задачу синтезу алгоритму адаптації систем РАЗ шляхом зміни частоти зондувального радіосигналу з метою виконання умови Брегга у міру переміщення випромінюваного акустичного імпульсного сигналу трасою зондування з позицій теорії оптимального управління.

Так як у задачі синтезу алгоритму управління частотою радіосигналу процес, що обурює та призводить до порушень умови Брегга при поширенні акустичного пакета по трасі зондування, а також процес, що викликає похибки вимірювання, розглядаються як випадкові, то дану задачу слід розглядати як завдання стохастичного оптимального управління [30 – 34].

Ступінь розробки питань управління параметрами та структурою радіолокаційних систем нині недостатня. Більшість відомих завдань управління в радіолокаційних комплексах вирішується на основі підходу, який не передбачає достатньої міри формалізації та оптимізації цих завдань, а також чіткої кількісної оцінки якості управління.

У [26 – 29] зазначено, що до найважливіших напрямів подальшого розвитку статистичної теорії вимірювальних радіосистем відноситься побудова прикладної теорії управління станом систем, режимами функціонування, прийому та обробки сигналів, розвиток цієї теорії в рамках завдань вимірювальних комплексів.

Підвищення вимог до функцій управління радіоелектронними системами змушує використовувати при їх проєктуванні адекватний математичний апарат [33]. Таким апаратом є теорія оптимальної динамічної оптимізації, що широко використовується в теорії оптимального управління.

Завдання проєктування оптимальної системи управління у загальному випадку можна сформулювати в такий спосіб [34]: заданий об'єкт чи процес управління; використовуючи деяку інформацію про його стан, потрібно знайти закон управління або керуючу послідовність впливів, що призводять отримання максимуму або мінімуму заданої сукупності критеріїв якості системи.

Завдання управління частотою радіосигналу в РАЗ формулюється наступним чином: на основі послідовного спостереження швидкості акустичного імпульсу при його проходженні по трасі зондування необхідно здійснювати оптимальне, у сенсі обраного критерію якості, підстроювання частоти радіосигналу для виконання умови Брегга. Відповідність між довжинами акустичної та радіохвиль, до якої слід прагнути у процесі керування частотою, зручно представляти графічно у вигляді лінії оптимального управління (рис. 3).

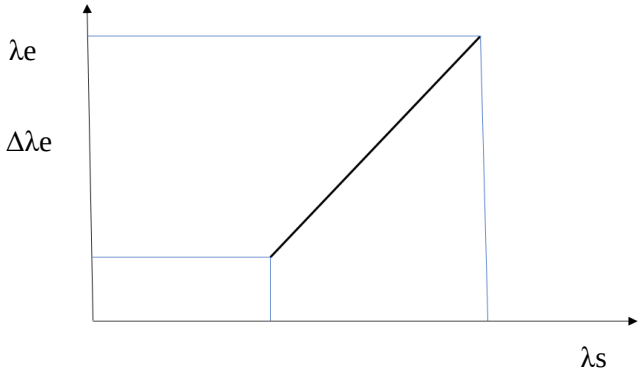

Рис. 3. Лінія оптимального управління

На рис. 3 $\Delta\lambda_s$ – діапазон можливих значень довжин хвиль акустичних коливань; $\Delta\lambda_e$ – подібний діапазон змін довжини хвилі для електромагнітних коливань. Діапазон значень $\Delta\lambda_s$ визначається максимально та мінімально можливими значеннями температури та швидкості поздовжнього вітру.

Системи управління поділяють на системи, що керують об'єктами та системи, що керують спостереженнями [24, 25]. У першому випадку якість функціонування об'єкта визначається управляючими впливами (управліннями), що надходять на його вхід. Інформація про функціонування об'єкта, необхідна для формування управлінь, надходить на вхід системи деякими каналами.

У другому випадку спостерігаються сигнали, які залежать не тільки від інформативних параметрів, у зв'язку з якими повинні бути прийняті певні рішення: виявлення, оцінка, розпізнавання і т.д., а й від параметрів управлінь, що додатково вибираються. Останні вибираються так, щоб забезпечити найкращі якості прийняття рішень.

Очевидно, що завдання управління частотою зондувального радіосигналу для виконання умови Брегга по трасі зондування, іншими словами, для отримання відбитого від пакета сигналу максимальної потужності, відноситься до завдань управління спостереженнями. Характеристики відбитого сигналу залежать не тільки від стану об'єкта зондування – акустичного пакета, а й від параметра управління, що визначає частоту зондуючого сигналу. Частота зондуючого радіосигналу вибирається так, щоб отримати максимально можливу амплітуду відбитого сигналу та забезпечити найкращу якість прийняття рішення – оцінки інформаційних параметрів розсіяного сигналу.

Загальний підхід до вирішення задачі статистичного синтезу алгоритму оптимального управління при використанні моделі в просторі станів полягає в тому, що складається функціонал від функцій стану та управління, визначаються фізичні обмеження на ці функції та знаходяться управління, що мінімізують або максимізують заданий функціонал [31]. Управління повинно бути обрано так, щоб траєкторія зображувальної точки у фазовому просторі задовольняла певному критерію оптимальності. Критерій оптимальності визначається, виходячи з фізичного сенсу розв'язуваної задачі, він повинен бути математично продуктивним і не ускладнювати рішення задачі [34]. В якості такого критерію можуть бути обрані різні показники, наприклад точність, продуктивність та інші характеристики.

Найчастіше критерій якості управління станом системи на деякому кінцевому інтервалі $[0, M]$ задається функціоналом

$$J_M = < \{\sum_{i=1}^{M}([X_i - X_{0i}]^T \mathrm{A}_i[X_i - X_{0i}] + U_i^T B_i U_i)\} >, \quad (5)$$

де X_{0i} – вектор бажаного стану системи в момент часу i; X_i – вектор стану системи; U_i – вектор управління; A_i, B_i – матриці, що визначають вартість похибок стану системи та керуючих зусиль відповідно; знак $<\cdot>$ – означає операцію математичного очікування.

У критерії (5) враховується поведінка як вектору стану, так і вектору управління. Важливість цих двох членів визначається вибором матриць A_i, B_i. Оскільки критерій імовірнісний, використовуються операції математичного очікування, тобто оцінюється якість ансамблю систем з урахуванням усереднення. Зазвичай критерій якості типу (5) інтерпретують як критерій типу «помилка системи плюс керуюче зусилля», тобто він є компромісом між похибкою системи та керуючим зусиллям (енергетичними витратами на управління тощо).

Структура та параметри оптимальної системи управління, отриманої в результаті синтезу, значною мірою визначається критерієм оптимальності. Зауважимо, що формулювання та розв'язання стохастичних завдань мають проводитися на основі ймовірнісних критеріїв, які, на відміну від детермінованих, обов'язково містять операцію статистичного усереднення і тому є складнішими. Часто виявляється, що система оптимальна за деяким критерієм, є квазіоптимальною і за низкою інших критеріїв. Оскільки кожному критерію оптимальності відповідає своя теорія синтезу, вибір конкретного критерію слід проводити з урахуванням розвиненості теорії синтезу та її складності [30].

Аналіз даного конкретного завдання показує, що на керуюче зусилля штраф можна не призначати, оскільки відомі нині технічні засоби можуть забезпечити необхідну швидкість і діапазон перебудови частоти радіопередавача і для цього не потрібно значних енергетичних витрат і витрат іншого роду. При виборі критерію оптимальності слід виходити з вимоги забезпечити мінімум похибки управління, або з вимоги забезпечити виконання більш складніших імовірнісних показників.

У зв'язку з цим в якості критерію оптимальності функціонування пристрою управління частотою зондувального радіосигналу для виконання умови Брегга виберемо точностний критерій. Залежно від вибору відповідних фізичних параметрів можливі два види запису критерію оптимальності

$$J_M =< \{\sum_{i=1}^{M}([\lambda_{ei} - 2\lambda_{si}]^2)\} >, \quad J_M =< \{\sum_{i=1}^{M}([c_{si} - c_{s0i}]^2)\} >. \tag{6}$$

Критерій виду (6) забезпечує мінімум інтегральної дисперсії похибки налаштування, а також мінімум дисперсії налаштування для кожного моменту часу (кожної точки профілю).

Вибраний для вирішення даної задачі квадратичний критерій якості має важливу особливість, яка дозволяє значно спростити розв'язання задачі оптимального синтезу алгоритму оптимального керування частотою радіосигналу. Ця особливість пов'язана з існуванням так званого принципу стохастичної еквівалентності (принцип або теорема розподілу). Даний результат займає дуже важливе місце у завданнях синтезу оптимальних управлінь у лінійних та нелінійних системах при випадкових збуреннях і широко використовується в теорії та на практиці.

Для лінійних систем теорема розподілу формулюється таким чином [34]. Оптимальний регулятор при випадкових гаусових процесах і квадратичному критерії якості являє собою послідовне з'єднання оптимального лінійного фільтра для оцінки вектору стану системи і детермінованого оптимального регулятора. Цей важливий результат дозволяє звести завдання управління до двох послідовно вирішуваних окремих завдань стохастичної фільтрації та детермінованого управління. У цьому матриця передачі зворотного зв'язку системи управління не залежить від стохастичних параметрів завдання, а оптимальний фільтр не залежить від виду критерію якості управління.

В даний час справедливість теореми розподілу доведена також для нелінійних систем та деяких інших критеріїв якості [31]. У нелінійних системах для формування оцінки стану необхідно використовувати нелінійні теорії фільтрації, а власне регулятор, як і раніше, буде детермінованим.

Важливим наслідком теореми розподілу є можливість поєднання результатів досить добре розвиненої теорії фільтрації випадкових процесів та детермінованої теорії оптимального керування. Принцип поділу знаходить широке застосування на практиці при побудові систем управління у різних галузях, зокрема під час управління рухом літальних апаратів і космічних об'єктів [22].

Відповідно до цього пристрій оптимального керування частотою зондувального радіосигналу буде являти собою послідовне з'єднання дискримінатора, оптимального лінійного фільтра та детермінованого регулятора.

Схема оптимального управління частотою зондувального радіосигналу, побудована відповідно до описаного алгоритму, представлена на рис. 4.

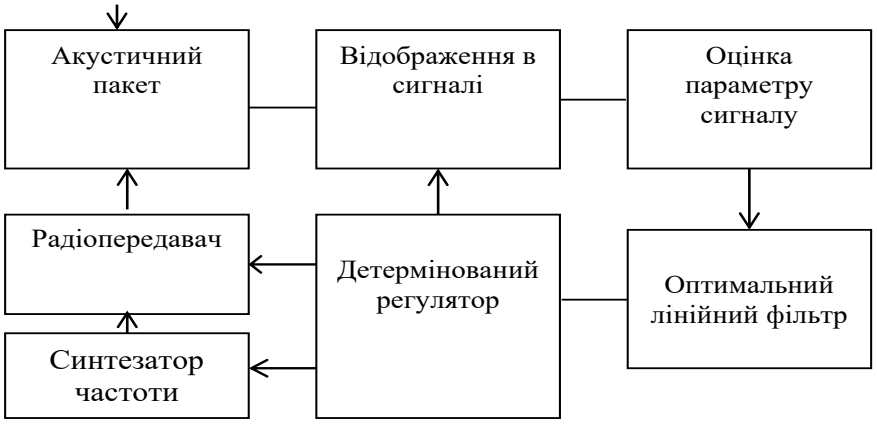

Рис. 4. Схема оптимального управління частотою зондуючого радіосигналу

Основна ідея роботи синтезованого пристрою полягає у наступному. Отримані за результатами вимірювань інформаційного параметра сигналу оцінки вектору стану акустичного пакета (швидкості звуку та його похідних) зазнають в реальному масштабі часу послідовної фільтрації. Дисперсія фільтрованих оцінок суттєво зменшується порівняно з дисперсією вхідних результатів. За уточненими значеннями швидкості звуку в попередніх точках здійснюється оптимальна екстраполяція (прогнозування) його значення в наступну точку профілю. Частота зондуючого радіосигналу в цій точці визначається за екстрапольованим значенням швидкості звуку. Екстраполяція швидкості звуку в наступну точку профілю за відомою передісторією процесу дозволяє значно зменшити динамічну похибку налаштування за умови Брегга.

Обробка швидкості звуку викликана тим, що значення інформаційного параметра в точках профілю знаходяться при різних значеннях частоти зондуючого радіосигналу. А щоб згладжувати відліки інформаційного параметра, їх потрібно «відновити», тобто перерахувати значення даного параметра до однієї частоти зондуючого радіосигналу. Більш доцільною є обробка оцінок швидкості звуку, фільтровані значення яких потім використовуються як для обчислення частоти зондуючого сигналу, так і для визначення метеопараметрів.

При детермінованому управлінні випадкові перешкоди та обурення не враховуються, тому синтез оптимального детермінованого регулятора проведено для критерію якості виду

$$J_M = \{\sum_{i=1}^{M}([\lambda_{ei} - 2\lambda_{si}]^2)\}, \qquad J_M = \{\sum_{i=1}^{M}([c_{si} - c_{s0i}]^2)\}. \tag{7}$$

Функціонали (7) еквівалентні відповідним функціоналам (6), тільки вони не містять операцію статистичного усереднення.

Висновки

1. Процес розсіювання електромагнітних хвиль на акустичному хвильовому пакеті є вузькосмуговим, найбільший рівень розсіяного радіосигналу досягається при виконанні

умови Брегга між несучими частотами акустичного і радіосигналів (або довжинами їх хвиль в атмсфері).

2. Оскільки довжина хвилі акустичних коливань в атмосфері змінюється в залежності від наявних умов, а довжина радіохвилі залишається практично незмінною, то необхідно здійснювати адаптивну зміну частот зондуючих сигналів. Найбільш доцільним є варіант адаптивної зміни частоти зондувального радіосигналу в міру просування звукового пакета атмосфері.

3. Відомі алгоритми частотної адаптації систем РАЗ отримано евристичним шляхом, вони є детермінованими і не задовольняють вимогам, що пред'являються практикою. У статті розглядається синтез методу частотної адаптації систем РАЗ до метеорологічної обстановки, що змінюється, на основі адекватної моделі радіоакустичного інформаційного каналу і з використанням основних досягнень теорії стохастичного оптимального управління.

4. Показано, що у відповідності з теоремою розділення, відомої з теорії оптимального стохастичного управління, метод управління частотою зондувального радіосигналу повинен включати послідовно виконувані операції формування оцінок інформаційного параметра розсіяного радіосигналу, оптимальної лінійної фільтрації отриманих оцінок і детермінованого управління частотою зондуючого радіосигналу.

Список літератури:

1. Bradley S. Atmosphere Acoustic Remote Sensing. Principes andApplication. 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. 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, pp. 43–53.
6. 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, pp. 54–59.
7. Atlas D. Indirect probing techniques // Bull.Ainer.Meteorol.Soc. Vol. 43, № 9, pp. 457–466.
8. Marshall I.M., Peterson A.M., and Barnes A.A. Combined Radar-Acoustic Sounding System // Appl. Opt., 1972, v.11, №1. pp. 108–112. DOI: 10.1364/AO.11.000108
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., 26, 2008, pp. 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., 13, 2013. pp. 3121–3132. doi:10.5194/acp-13-3121-2013
12. Kartashov V.M. Signal Scattering Functions of Atmospheric Sounding System // Telecommunications and Radio Engineering. 2003, Vol. 59, №7-8-9. P. 88–94.
13. Kartashov V.M. Estimation of Signal Parameters Scattered by an Acoustic Wave Packet // Telecommunications and Radio Engineering. 2004. Vol. 61, №2. P. 125–129.
14. 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.
15. 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.
16. 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. pp. 372–376. DOI: 10.1109/UkrMiCo61577.2023.10380339
17. 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.

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. 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.
21. Піза Д.М. Теорія і проєктування радіолокаційних систем : навч. посіб.. Запоріжжя : ЗНТУ, 2019. 82 с.
22. Сумик М. М. Основи теорії радіотехнічних систем : навч. посіб. Львів : Львів. політехніка, 2004. 240 с.
23. Радіоелектронні системи : навч. посіб. / Ю.М. Седишев та ін. Харків : ХУПС, 2010. 360 с.
24. Радіоелектронні системи : навч. посіб. / П. Ю. Баранов, В. П. Лавриненко, О. М. Мелешкевич, В. С. Дмитренко. Одеса, 2012. 232 с.
25. Петров В.А., Пилипенко Ю.Л. Радіотехнічні системи. Курсове проєктування : навч. посіб. Харків : ХНУРЕ, 2003. 48 с.
26. Карташов В.М., Тихонов В.А., Воронін В.В., Тимошенко Л.П. Комплексні моделі випадкових сигналів в задачах акустичного зондування атмосфери // Радіотехніка. 2016. Вип. 185. С. 81–86.
27. Vasilchenko A., Kartashov V.M. Analysis of influence exerted by longitudinal Doppler effect upon output signal of sodar antenna array // Telecommunications and Radio Engineering. Vol.66, Iss. 9. P. 841–847. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v66.i9.50.
28. Semenets V. V., Kartashov V.M., Leonidov V. I. Registration of refraction Phenomenon in the Problem of acoustic Sounding of Atmosphere in Airport Zone // Telecommunications and Radio Engineering. 2018. Vol. 77, Iss. 5. P.461–468. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v77.i5.90.
29. Карташов В.М., Тихонов В.А., Воронін В.В. Особливості побудови та застосування комплексних систем дистанційного зондування атмосфери // Радіотехніка. 2016. Вип. 186. С. 184–185.
30. Тютюнник А. Г. Оптимальні і адаптивні системи автоматичного керування : навч. посіб. Житомир : ЖІТІ, 1998. 512 с.
31. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування. Київ : Либідь, 2007. 656 с.
32. Самотокін Б. Б. Лекції з теорії автоматичного керування : навч. посіб. Житомир : ЖІТІ, 2001. 508 с.
33. Бублік Б. Н., Кириченко Н. Ф. Основи теорії управління. К. : Вища шк., 1975. 328 с
34. Іванов А. О. Теорія автоматичного керування. Дніпропетровськ : Нац. гірнич. ун-т, 2003. 250 с.

Надійшла до редколегії 02.06.2024

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