

В.А. ТИХОНОВ, д-р физ.-мат. наук, О.В. КАРТАШОВ

СИНТЕЗ КОМПЛЕКСНОГО АЛГОРИТМУ ФУНКЦІОНУВАННЯ РАДІОАКУСТИЧНОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ

Вступ

Станції радіоакустичного зондування (РАЗ) атмосфери є перспективним засобом отримання інформації про висотний розподіл метеопараметрів в атмосфері Землі. Отримана інформація використовується в процесі вирішення актуальних науково-прикладних завдань: забезпечення зльоту, посадки та польотів літальних апаратів (як пілотованих, так і безпілотних), прогнозу погоди, прогнозування процесів поширення радіо-, акустичних та оптичних хвиль різних діапазонів [1, 2]. В даний час розвивається теорія радіоакустичного зондування атмосфери, створюються радіоакустичні станції різними науково-дослідними організаціями для виконання досліджень, станції РАЗ виробляються виробничими фірмами і пропонуються на ринок невеликими партіями [3].

Проте в цілому ефективність існуючих радіоакустичних засобів є недостатньою для вирішення актуальних прикладних завдань. Потреби практики формують необхідність суттєвого поліпшення основних тактико-технічних характеристик систем РАЗ. Тому існує необхідність у розвитку теорії систем радіоакустичного зондування атмосфери, методів проектування радіоакустичних систем, а також у розробці відповідних перспективних підходів, структур та алгоритмів, що реалізуватимуться при побудові конкретних станцій, призначених для вирішення актуальних прикладних завдань [3, 4].

Синтез узагальненої структурної схеми комплексу

Проектування складних інформаційно-керуючих систем поділяється на дві досить яскраво виражені стадії – системного проектування, яке полягає в синтезі (розробці, виборі) та організації функцій структури системи в цілому, та технічного проектування, що включає синтез, вибір та проектування алгоритмів функціонування та технічної реалізації елементів системи [5]. На стадії системного проектування основним предметом розгляду є структура (архітектура) майбутньої системи – фіксована сукупність елементів та зв'язків між них. Вивчення можливих варіантів структури дозволяє вирішити низку питань про вигляд проектованої системи, абстрагуючись від конкретних елементів, на яких вона буде виконана [5 – 8].

При розробці систем радіоакустичного зондування атмосфери, як і розробки інших досить складних інформаційних систем, структурну схему доцільно отримувати евристичними методами, а проектування елементів системи доцільно проводити за допомогою аналітичних методів синтезу і методів комп'ютерного моделювання. При синтезі структурної схеми радіоакустичного вимірювального комплексу (РАВК), що розробляється, далі використовується досвід проектування подібних пристроїв, а також результати розгляду багатоканального радіоакустичного методу [5, 9, 10]. В результаті цього розгляду були визначені параметри сигналу (істотні параметри), що підлягають вимірюванню, розроблено методику відновлення характеристик атмосфери за отриманими значеннями параметрів сигналів, проаналізовано вплив різних факторів на точнісні показники, сформульовано найбільш загальні вимоги до вимірювального радіоакустичного комплексу. Все це дозволяє сформулювати вимоги до окремих елементів структури комплексу.

Розроблена узагальнена структурна схема радіоакустичного комплексу представлена на рис. 1. Вона містить такі елементи:

1. Передавальна радіо- і приймально-передавальна акустична антена.
2. Приймальна дискретна радіоантена.
3. Пристрій формування зондувальних акустичного та радіосигналів.

4. Пристрій перетворення і посилення радіосигналів, що приймаються.
5. Пристрій оптимального (квазіоптимального) виділення сигналів із перешкод, що виконує, наприклад, фільтрацію сигналів.
6. Пристрій виявлення та оцінки параметрів сигналів, виділених із перешкод.
7. Обчислювальний пристрій обробки інформації для розрахунку профілів метеовеличин за вимірними значеннями параметрів сигналів.
8. Пристрій керування РАВК, призначений для керування роботою всіх пристроїв (наприклад, з метою синхронізації), а також для адаптації до умов, що змінюються.
9. Приймач акустичного сигналу.
10. Пристрій обробки і визначення параметрів акустичного сигналу.
11. Пристрій збору апріорної інформації, яка служить для уточнення фізичних констант, що входять до розрахункових виразів, що використовуються при визначенні профілів метеопараметрів, та для визначення початкових значень параметрів зондувальних сигналів. Крім того, вимірювання вологості, температури, а також швидкості і напрямки вітру контактними метеодатчиками в приземному шарі атмосфери дозволяє здійснювати екстраполяцію значень швидкості звуку і швидкості вітру в першу висотну точку вимірювання методом РАЗ, забезпечуючи отримання при цьому досить вузького апріорного розподілу метеовеличин, що вимірюються, та сприяючи реалізації режиму захоплення у пристроях РАВК.
12. Пристрій відображення отриманої інформації та комунікаційні канали для зв'язку із споживачами.

Інформаційні зв'язки між елементами схеми на рис. 1 показані безперервною лінією, а зв'язки управління – пунктиром.

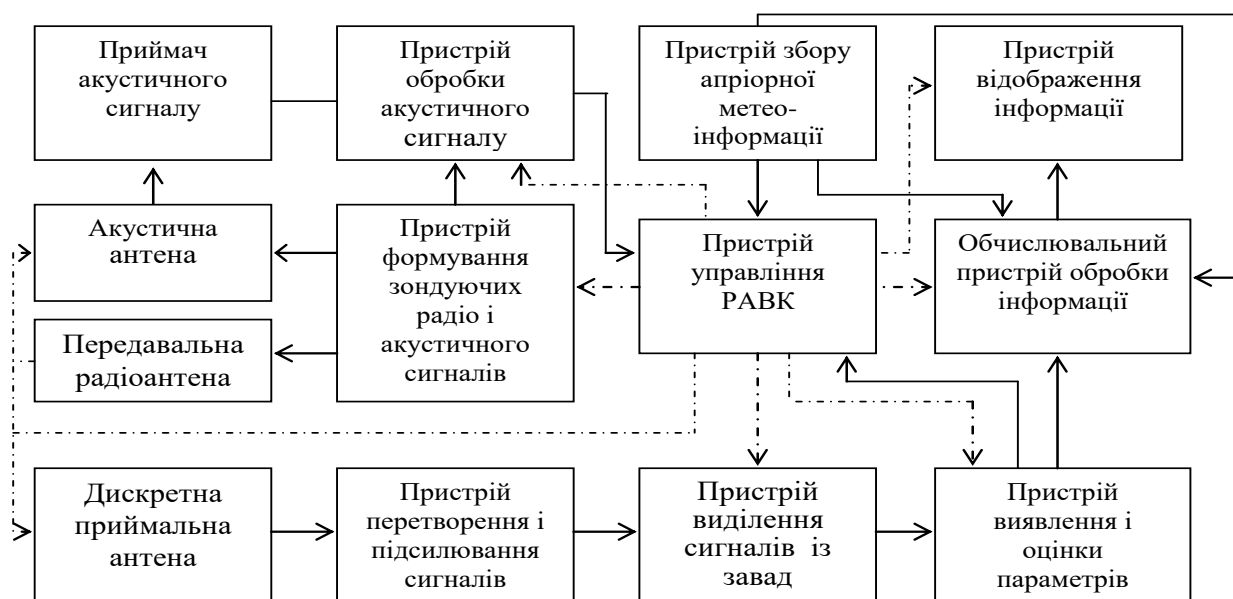


Рис. 1. Узагальнена структурна схема радіоакустичного вимірювального комплексу

Особливості запропонованої структурної схеми полягають, передусім, у тому, що вона представляє комплекс у досить узагальненому вигляді, відбиваючи ті основні функції, які мають виконуватися. Структурні схеми існуючих радарів, наприклад [3], є набором відомих блоків: вони розкривають структуру вже відомих, розроблених на інженерному рівні систем. Дана схема розкриває функціональну структуру перспективного комплексу, що синтезується, і є основою для його подальшого проектування. Є й інші відмінності, але вони стануть очевиднішими в подальшому, при детальному розкритті елементів представленої структурної схеми.

Наступну розробку елементів структурної схеми РАВК та виконуваних системою функцій доцільно відповідно до системного підходу розбити на частини (системи), виконати

декомпозицію. Розбиття необхідно проводити таким чином, щоб кожна виділена частина мала власні показники якості, що однозначно пов'язані з показниками якості комплексу в цілому.

Процес розробки РАВК можна звести до розробки незалежних питань:

1. Синтез (вибір) типів зондувальних радіо- та акустичних сигналів, їх енергетичних параметрів, а також розробка відповідних пристроїв генерації (формування часової структури) та випромінювання (формування просторової структури) сигналів.

2. Синтез алгоритмів просторової та часової обробки сигналів для оптимального (квазіоптимального) виділення корисної інформації з сигналів, що приймаються на фоні шумів і перешкод, і розробка відповідних радіопристроїв та обчислювальних засобів для їх реалізації.

3. Розробка алгоритмів управління комплексом та адаптації комплексу до змінних зовнішніх умов, що формуються зовнішнім оточенням, а також розробка обчислювальних засобів, призначених для реалізації даних алгоритмів.

Зазначені частини можуть розроблятися окремо, але тільки в умовах їхньої постійної взаємодії та узгодження. Важливість, актуальність, взаємозв'язок і взаємозалежність, певна повнота переліку розв'язуваних завдань послужили основою декомпозиції їх із загального наукового завдання розвитку теорії та практики аналізованих систем.

Природно, що для створення ефективних радіоакустичних систем потрібна глибока теоретична розробка відповідних питань апаратурного характеру з використанням адекватних підходів, оскільки багато питань даного напрямку не містяться в теорії радіолокаційних систем.

Теоретичне вивчення та дослідження властивостей радіоакустичних систем, а також синтез та розробка технічних рішень повинні мати комплексний системний характер, що враховує взаємний вплив різних підсистем, та виконуватися з використанням відповідних підходів та адекватного математичного апарату, що застосовуються в теорії систем, теорії стохастичного оптимального управління, теорії сигналів та ін.

У літературі сформувалася чітка думка [5, 13 – 18], що розробка сучасних ефективних радіосистем, що вирішують складні інформаційно-вимірювальні завдання та працюють в умовах різноманітної заводової обстановки, можлива лише на базі сучасних методів оптимізації. Причому системи певного, нехай досить вузького класу, що мають характерні особливості, повинні мати власну, адаптовану до наявної специфіки теорію, яка «обслуговує» цей напрямок.

Синтез (вибір) видів зондувальних сигналів

При проєктуванні комплексу РАЗ першим вирішується питання, яке пов'язане з вибором видів зондувальних сигналів та їх параметрів, а також методів їхньої генерації та випромінювання. До другого системного питання під час проєктування комплексу РАЗ можна приступати лише за наявності принципової визначеності у першому питанні.

Визначення типів зондувальних сигналів у загальному випадку має проводитися у межах завдання синтезу (оптимізації) сигналів. Питання, пов'язані з оптимізацією часової структури зондувальних сигналів інформаційних систем, розглянуті в [3 – 5], проте користуватися викладеною там методикою в практичному плані досить непросто, особливо стосовно радіоакустичного зондування, що має ряд істотних особливостей.

Вибір форми зондувальних радіо- та акустичного сигналів на практиці при побудові конкретної системи може здійснюватися шляхом аналізу відомих, що широко використовуються на практиці, поєднань сигналів. Такий аналіз, виконаний в [5], показує, що найбільш переважним є використання імпульсного акустичного сигналу з синусоїдальним заповненням і безперервного монохроматичного радіосигналу. Це пояснюється тим, що імпульсний акустичний сигнал створює локалізовану в просторі неоднорідність діелектричної проникності, що досить зручно при побудові системи та виконанні вимірювань, а безперервний

монохроматичний радіосигнал є найкращим при виконанні доплерівських вимірювань на поширених в радіолокації цілях. Однак застосування зазначеної комбінації сигналів у системах радіоакустичного зондування атмосфери не є оптимальним рішенням і призводить до появи певного роду специфічних похибок щодо характеристик атмосфери, природу яких вдалося розкрити тільки при виконанні теоретичних досліджень в даній галузі.

Таким чином, як впливає із загального розуміння принципів та особливостей функціонування радіоакустичних систем, основну увагу в процесі проектування подібних систем слід приділяти вибору зондуючих сигналів, що використовуються. Процес вибору має бути заснований на обліку (аналізі) їх взаємодії із зовнішнім середовищем, взаємодії між собою (акустична – електромагнітна хвиля) та формуванням розсіяного сигналу. Саме на цьому етапі закладається корисна інформація в сигнал і зумовлюються багато характеристик станцій, і саме змістом цього етапу відрізняється в першу чергу теорія, що розробляється, від класичної теорії радіолокаційних сигналів, де етап формування розсіяного сигналу моделюється точковою метою.

У радіоакустичних системах використовуються зондувальні коливання різної фізичної природи – акустичні та електромагнітні, при цьому об'єкт, що розсіює, створюваний акустичним сигналом, не є точковим частотно-незалежним відбивачем і, отже, змінює при розсіюванні форму випромінюваних електромагнітних коливань. Відповідно до цього завдання аналізу зондувальних сигналів для радіоакустичних систем зондування атмосфери має полягати у спільному вивченні характеристик двох взаємозалежних видів сигналів – електромагнітного та акустичного.

Зондуючий сигнал радіоакустичних систем може бути представлений як векторний зондуючий сигнал, що складається з двох компонентів:

$$\vec{S} = |S_s, S_e|,$$

де S_s – акустичний зондувальний сигнал; S_e – електромагнітний зондувальний сигнал.

Отже, методика аналізу та вибору зондувальних сигналів розглянутих систем повинна не тільки відповідати на питання, який сигнал є найкращим або найбільш прийнятним для певних фіксованих зовнішніх умов, але також і на питання, якими повинні бути сигнали за умов, що змінюються (в заданих межах), наприклад уздовж траси зондування.

Синтез алгоритмів обробки сигналів

Проектування другої системи комплексу полягає у розробці алгоритмів, радіопристроїв та обчислювальних засобів для обробки отриманої з атмосфери інформації, починаючи від приймальних антен і закінчуючи розрахунком профілів метеовеличин. До основних питань даної частини відносяться синтез алгоритмів виявлення сигналів, що приймаються, а також алгоритм вимірювання координат центру плями і доплерівської частоти [4, 5].

Основними методами розробки алгоритмів виділення корисної інформації сигналів на фоні шумів є методи статистичного синтезу. Результати застосування цих методів залежать від типу сигналів, які на даному етапі проектування визначені. Тому цю частину комплексу можна розробляти окремо.

Алгоритми і пристрої, що їх реалізують, призначені для обробки інформації, що отримується з атмосфери, в подальшому називатимемо системою обробки радіоакустичної інформації.

Причому слід зауважити, що методи часової та просторової обробки розсіяних сигналів систем радіоакустичного зондування атмосфери характеризуються рядом специфічних особливостей. Ці особливості зумовлені насамперед особливостями часової та просторової структури радіосигналу, розсіяного звуковою посилкою. Як впливає з результатів теоретичних досліджень і результатів численних експериментів, розсіяний на звуку радіосигнал має несиметричний спектр, а просторова структура розсіяного радіосигналу представляє локалізовану «пляму», яка до того ж переміщається поверхнею Землі.

Алгоритми управління комплексом

Управління комплексом полягає в такій зміні параметрів його пристроїв залежно від зміни зовнішніх умов, які забезпечують виконання розв'язуваної задачі з найкращими показниками. Основними показниками якості комплексу, як було показано раніше, є дальність, точність, просторове і часове розрізнення результатів вимірювань. У зв'язку з цим третє завдання, що полягає в проектуванні системи управління, повинне включати синтез алгоритмів обробки інформації, що отримується з атмосфери, та алгоритмів формування керуючих впливів, які спрямовані на досягнення зазначених цілей управління, а також розробку відповідних технічних засобів [19 – 22].

Основні напрями впливу та прояви зовнішнього середовища, що впливають на роботу РАВК, – вплив атмосферних умов на звукову хвилю, яка поширюється в атмосфері, що полягає у зміні як часових, так і просторових параметрів акустичного зондувального сигналу, а також часової та просторової структури даного сигналу. Крім того, мають місце відбиття зондувальних сигналів від поверхні, що підстилає, місцевих предметів, пилу, гідрометеорів і т.д., значний вплив на роботу комплексу надають також природні і штучні перешкоди в акустичному і радіо каналах.

Таким чином, управління РАВК будемо розглядати як засіб досягнення цілей, що стоять перед РАВК, в системі вищого порядку, а з іншого боку як спосіб компенсації змін довкілля, які несприятливо впливають на комплекс і перешкоджають його ефективному (нормальному, оптимальному) функціонуванню.

Як відомо, система вважається керованою, якщо для неї виконуються необхідні умови спостережуваності та керованості [23, 24]. Перша умова полягає у забезпеченні можливості отримання інформації про поточний стан системи, а друга – у наявності каналів управління та керованих параметрів, що впливають на стан системи. Чим більше каналів управління, тим вище можливості з організації управління і тим вище його ефективність.

Під системою управління РАВК далі розумітимемо алгоритми обробки інформації та вироблення керуючих рішень, спрямованих на досягнення заданих цілей управління. Під терміном «управління» тут розуміється, з одного боку, позначення процесу досягнення поставленої мети, а з другого, – цілеспрямований вплив на структуру і параметри РАВК. На виконання цілей впливає значення вектору $\vec{X}(t)$ – вектору зовнішніх або вихідних параметрів РАВК, який визначає у загальному вигляді показник ефективності функціонування РАВК $E = E[\vec{X}(t)]$.

Об'єктом управління у розглянутій задачі, таким чином, є складові вектору внутрішніх параметрів РАВК $\vec{Y}(t)$, що визначають способи (алгоритми) використання його можливостей та витрачання його обмежених внутрішніх інформаційних, енергетичних та інших ресурсів. Для реалізації завдань управління комплексом необхідна наявність спеціальних інформаційних каналів управління, якими у межах комплексу передаються сформовані сигнали управління.

Показники якості інформації, що видається РАВК зовнішнім споживачам, залежать від вектору стану комплексу $\vec{Y}(t)$ (вектору внутрішніх параметрів), скоригованих системою управління, вектору стану зовнішнього середовища або вектору стану оточення комплексу $\vec{Z}(t)$ та вироблених керуючих впливів $\vec{H}(t)$:

$$\vec{X}(t) = F[t, \vec{Y}(t), \vec{Z}(t), \vec{H}(t)],$$

де $F[\cdot]$ – оператор функціонування аналізованого комплексу як об'єкта управління.

Відповідно до розглянутого підходу мета управління полягає у досягненні таких значень вектору стану об'єкта $\vec{X}(t) = \vec{X}^*(t)$, які дозволяють забезпечувати максимум ефективності функціонування комплексу:

$$\max E[\bar{X}(t)] = E[X^*(t)] = E^*(t).$$

Сигнали управління, вироблені системою управління та адаптації на підставі цілей управління $\bar{R}(t)$, інформації про стан зовнішнього середовища та стан вимірювального комплексу, можна подати таким чином:

$$\bar{U}(t) = f[t, \bar{Y}_U(t), \bar{Z}(t), \bar{R}(t), \bar{X}(t)].$$

При вирішенні завдань управління в РАВК виникають певні труднощі, які обумовлені необхідними витратами обчислювального ресурсу для вирішення завдань у досить короткі проміжки часу, що визначаються динамікою зміни обстановки та функціонування РАВК. Швидкість динамічних процесів, що протікають у РАВК, або масштабування реального часу визначається, перш за все, швидкістю розповсюдження звуку в атмосфері. З іншого боку, труднощі процесів і завдань управління в РАВК пояснюються відсутністю в даний час методів формалізації та оптимізації завдань управління, які б отримували кількісні оцінки оптимальності управління в цілому.

З метою підвищення оперативності та зниження трудомісткості завдань управління комплексний алгоритм управління РАВК доцільно будувати за ієрархічним принципом. Ієрархічна структура управління будується шляхом виділення кількох підлеглих один одному рівнів управління. При цьому алгоритми управління вищих рівнів координують та впорядковують роботу підлеглих їм пристроїв. Інформація про стан атмосфери в систему управління надходить по приймальних акустичного та радіоканалів, а також через пристрій збору апіорної метаінформації. Ієрархічна система управління і адаптації РАВК представлена на рис. 2.

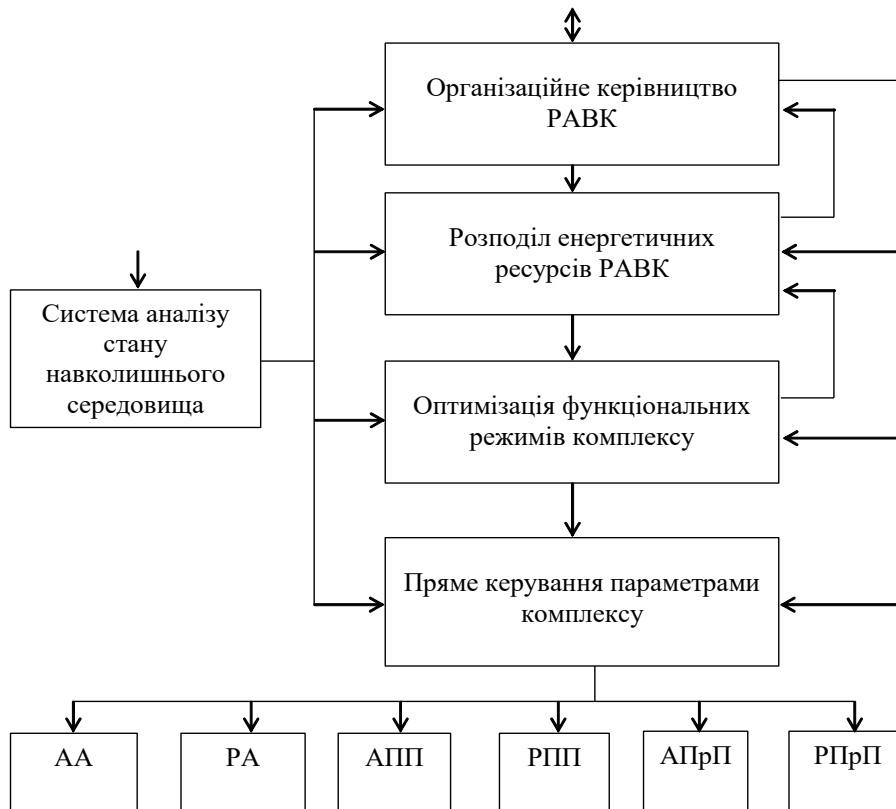


Рис. 2. Ієрархічна система управління і адаптації РАВК:

АА – акустична антена; РА – радіоантена; АПП – акустичний передавальний пристрій;
 РПП – радіопередавальний пристрій; АПрП – акустичний приймальний пристрій;
 РПрП – радіоприймальний пристрій

Відповідно до викладених загальних положень, РАВК як об'єкт управління може бути розділений на керовані елементи (пристрої), що відповідають основним пристроям радіоакустичного комплексу та системі обробки інформації. Основними об'єктами управління є такі елементи структури РАВК:

1. Передавальна радіо- та приймально-передавальна акустична антена: вибір використовуваної радіоантени (однієї з кількох просторово-рознесених антен), орієнтування антен у заданому напрямку.

2. Приймальна радіоантена: визначення просторового положення антени, вибір та підключення для аналізу відповідних приймальних елементів.

3. Пристрій адаптивного вибору видів зондуючих акустичного та радіосигналів та формування зондуючого векторного радіоакустичного сигналу:

- зміна несучої частоти акустичного сигналу;

- зміна несучої частоти радіосигналу.

4. Пристрій оптимального виділення інформативних сигналів на фоні перешкод:

- адаптивне формування опорних коливань у кореляційних системах обробки сигналів;

- управління центральною частотою налаштування вузькосмугових фільтрів;

- управління шириною смуги пропускання фільтрів.

Комплексний алгоритм функціонування радіоакустичного комплексу

При проектуванні зазначених систем обробки інформації та управління користуватимемося широко застосовуваним в системотехніці методом декомпозиції – поділу систем на окремі, простіші підсистеми, що мають власні показники якості. Наприклад, завдання виявлення та оцінки параметрів вирішуватимемо окремо, використовуючи при цьому відповідні критерії, безпосередньо пов'язані з якістю інформації, що видається споживачеві [25, 26].

Алгоритми управління та обробки інформації з урахуванням зв'язків між ними утворюють комплексний алгоритм функціонування радіоакустичного комплексу.

Природно, що структура РАВК має певну стійкість до змін схеми побудови, цільового призначення, набору параметрів сигналу, що вимірюються, і т.д., тому ряд елементів структури може бути виконаний таким же чином, як і у відомих установках РАЗ, зокрема побудованих за основною схемою. До таких елементів відносяться передавальні радіо- та акустична антени, алгоритми і пристрої оцінки доплерівської частоти, радіоприймач і т.д. При розробці елементів структури РАВК доцільно використати наявний досвід та застосувати апробовані технічні рішення.

Основну увагу в процесі проектування слід приділяти тим елементам структури та алгоритмам їх роботи, які були відсутні у відомих установках РАЗ, або були, але по суті не виконували своїх функцій через низьку ефективність роботи.

Це, в першу чергу, алгоритми та пристрої обробки сигналу, що приймається, з метою оцінки координат центру плями та алгоритми, що забезпечують виконання умови Бреґґа при поширенні акустичного сигналу по трасі зондування. На етапі технічної реалізації розроблених алгоритмів постає питання про вибір відповідних технічних, зокрема обчислювальних засобів.

Питання прийому та обробки відбитого акустичного сигналу, необхідного для вимірювання поздовжньої складової швидкості вітру, у цій роботі не розглядається. Різні методичні питання та аспекти апаратної реалізації подібних пристроїв описані у відповідній літературі.

Висновки

1. Розробку елементів структурної схеми РАВК та комплексного алгоритму його функціонування (виконуваних системою функцій) відповідно до системного підходу доцільно розбити на частини (системи), виконавши декомпозицію. Розбиття необхідно проводити таким чином, щоб кожна виділена частина мала власні показники якості, що однозначно пов'язані з показниками якості комплексу в цілому.

2. Процес розробки РАВК можна звести до розробки наступних незалежних питань:

- синтез (вибір) типів зондувальних радіо- та акустичних сигналів, їх енергетичних параметрів, а також розробка відповідних пристроїв генерації (формування часової структури) та випромінювання (формування просторової структури) сигналів;

- синтез алгоритмів просторової та часової обробки сигналів для оптимального (квазі-оптимального) виділення корисної інформації з сигналів, що приймаються на фоні шумів і перешкод, і розробка відповідних радіопристроїв та обчислювальних засобів для їх реалізації;

- розробка алгоритмів управління комплексом і адаптації комплексу до зовнішніх умов, що змінюються, формуються зовнішнім оточенням, а також розробка обчислювальних засобів, призначених для реалізації даних алгоритмів.

3. Зондувальний сигнал радіоакустичних систем може бути представлений як векторний зондувальний сигнал, що складається з двох компонентів $\vec{S} = |S_s, S_e|$, де S_s – акустичний зондувальний сигнал; S_e – електромагнітний зондувальний сигнал. Відповідно до цього завдання синтезу (аналізу, вибору) зондувальних сигналів для радіоакустичних систем зондування атмосфери у процесі проектування має полягати у спільному вивченні характеристик та виборі двох взаємозалежних видів сигналів – електромагнітного та акустичного.

4. Основними методами розробки алгоритмів виділення корисної інформації із сигналів на фоні шумів у комплексах РАЗ є методи статистичного синтезу. Результати застосування цих методів залежать від типів сигналів, які на даному етапі проектування визначені. Тому цю частину комплексу можна розробляти окремо.

При цьому методи часової та просторової обробки розсіяних сигналів систем радіоакустичного зондування атмосфери характеризуються рядом специфічних особливостей, які обумовлені насамперед особливостями часової та просторової структури радіосигналу, розсіяного звуковою посилюю.

5. Третє завдання проектування комплексу полягає в розробці системи управління, яке повинне включати синтез алгоритмів обробки інформації, що отримується з атмосфери, і алгоритмів формування керуючих впливів, які спрямовані на досягнення зазначених цілей управління. Далі розробляються відповідні технічні засоби, призначені для реалізації алгоритмів управління в реальному масштабі часу.

Список літератури:

1. Калистратова М.А., Кон А.И. Радиоакустическое зондирование атмосферы. Москва : Наука, 1985. 200 с.
2. Карташов В.М., Тихонов В.А., Олейников В.Н. Обработка сигналов в радиоэлектронных системах дистанционного мониторинга атмосферы. Харьков : ХНУРЭ, 2014. 312 с.
3. Карташов В.М. Модели и методы обработки сигналов систем радиоакустического и акустического зондирования атмосферы. Харьков : ХНУРЭ, 2011. 230 с.
4. Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли ; под ред. Б.Л. Кашеева, Е.Г. Прошкина, М.Ф. Лагутина. Харьков : Бизнес Информ, 2002. 426 с.
5. Ситнік О.В., Карташов В.М. Радіотехнічні системи : навч. посібник. Харків : Сміт, 2009. 448 с.
6. Kartashov V.M., Oleynikov V.N, Sheyko S.A., Koryttsev I.V., Babkin S.I., Zubkov O.V. Peculiarities of small unmanned aerial vehicles detection and recognition // Telecommunications and Radio Engineering. 2019. Vol. 78, Iss. 9. pp. 771 – 781.
7. Oleynikov V. N., Zubkov O. V., Kartashov V. M., Koryttsev I. V., Babkin S. I., Sheiko S. A. Investigation of detection and recognition efficiency of small unmanned aerial vehicles on their acoustic emission // Telecommunications and Radio Engineering. 2019. Vol. 78, Iss. 9. pp. 759 – 770.
8. В.А. Тихонов, В.М. Карташов, В.М. Олейников, В.И. Леонидов, Л.П. Тимошенко, И.С. Селезнев, Н.В. Рыбников. Обнаружение-распознавание беспилотных летательных аппаратов с использованием составной модели авторегрессии их акустического излучения // Вісник НТУУ «КПІ». Радіотехніка. Радіоапаратобудування. 2020. Вип. №81. С. 38 – 46.
9. V. Kartashov, V. Oleynikov, I. Koryttsev, S. Sheiko, O. Zubkov, S. Babkin. Processing of Wide Band Acoustic Signals During Detection of Unmanned Aerial Vehicles // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW). Kharkiv, Ukraine, September 21 – 25, 2020. Volume 1 on 2020 IEEE 12th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). pp. 35 – 39.

10. O. Sotnikov, V. Kartashov, O. Tymochko, O. Sergiyenko, V. 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. pp. 537 – 578.
11. Developing and Applying Optoelectronics in Machine Vision/ O. Sergiyenko, J.C. Rodriguez-Quiñonez. IGI Global, 2016. 341p.
12. Koryttsev S., Sheiko V., Kartashov O., Zubkov O., Oleynikov V., Anohin M., Selieznov I.. Practical Aspects of Range Determination and Tracking of Small Drones by Their Video Observation // 2020 International Scientific-Practical Conference. Problems of Infocommunications. Science and Technology. Kharkiv, Ukraine. October 6 – 9, 2020. 5 p.
13. Карташов В.М., Олейников В.Н., Колендовская М.М., Тимошенко Л.П., Капуста А.И., Рыбников Н.В. Комплексирование изображений при обнаружении беспилотных летательных аппаратов // Радиотехника. 2020. Вып. 201. С. 120 – 129.
14. 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. pp.1885 – 1892.
15. Oleynikov V.N., Kartashov V.M., Babkin S. I., Zubkov O.V., Korytsev I.V., Sheiko S.A., Seleznev I.S. Structure and Parameter Unmanned Aerial Vehicles Sound Fields // Telecommunications and Radio Engineering. New York. 2020. Vol. 79, №17. P.1539 – 1550.
16. Карташов В.М., Тихонов В.А., Воронин В.В., Тимошенко Л.П. Комплексные модели случайных сигналов в задачах акустического зондирования атмосферы // Радиотехника. 2016. Вып. 185. С. 81 – 86.
17. Vasilchenko A., Kartashov V. Analysis of influence exerted by longitudinal Doppler effect upon output signal of sodar antenna array // Telecommunications and Radio Engineering. Vol. 66, Iss.9. pp. 841 – 847. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v66.i9.50.
18. 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. pp. 461 – 468. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v77.i5.90.
19. Карташов В.М., Тихонов В.А., Воронин В.В. Особенности построения и применения комплексных систем дистанционного зондирования атмосферы // Радиотехника. 2016. Вып. 186. С. 184 – 185.
20. Олейников В.Н., Зубков О.В., Карташов В.М., Коротцев И.В., Бабкин С.И., Шейко С.А., Селезнев И.С. Экспериментальная оценка эффективности алгоритмов пеленгования беспилотных летательных аппаратов по акустическому излучению // Радиотехника. 2019. Вып. 199. С. 29 – 37.
21. Карташов В.М., Коротцев И.В., Олейников В.Н., Зубков О.В., Шейко С.А., Бабкин С.И., Левский Н.А., Селезнев И.С. Алгоритмы пеленгации беспилотных летательных аппаратов по их акустическому излучению // Радиотехника. 2019. Вып. 196. С. 22 – 31.
22. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферы. Новосибирск : Наука, 1986. 167 с.
23. Карташов В.М., Куля Д.Н., Кушнер М.В., Толстых Е.Г. Выбор модели изменения скорости звука для оптимального линейного фильтра систем радиоакустического зондирования атмосферы // Радиотехника. 2013. №173. С. 63 – 78.
24. Карташов В.М., Куля Д.Н., Пащенко С.В. Алгоритм автосопровождения изменений информационного параметра сигнала радиоакустических систем // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2012. №4/9(58). С. 57 – 61.
25. Карташов В.М. Функции рассеяния сигналов систем зондирования атмосферы // Радиотехника. 2001. №118. С.61 – 65.
26. Карташов В.М., Пащенко С.В. Алгоритм формирования оценок максимального правдоподобия параметров радиосигнала, рассеянного акустическим волновым пакетом // Радиотехника. 2011. №164. С. 35 – 40.

Надійшла до редколегії 21.02.2023

Відомості про авторів:

Тихонов В'ячеслав Анатолійович – д-р ф.-м. наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем; Україна; email: vyacheslav.tykhonov@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4618-4787>

Карташов Олександр Володимирович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем; Україна; email: oleksandr.kartashov@nure.ua