

УДК 621.396

В.І. Слюсар¹, М.О. Масесов²¹Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, Київ²Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”, Полтава

УДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД ТРОПОСФЕРНОГО ЗВ'ЯЗКУ З МУЛЬТИ-МІМО СИСТЕМОЮ НА БАЗІ ПЛОСКОЇ ЦИФРОВОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ

У статті представлений удосконалений метод тропосферного зв'язку із застосуванням технології мульти-МІМО на базі плоскої цифрової антенної решітки. Приведений метод відрізняється від відомих врахуванням діаграм спрямованості антенних елементів плоскої решітки у вертикальній і горизонтальній площинах. Запропоновані ідеї розширюють наукове підґрунтя застосування цифрових антенних решіток в тропосферному зв'язку, сприяють підвищенню стійкості роботи системи в умовах радіоелектронної протидії противника та збільшенню швидкості передачі інформації.

Ключові слова: тропосферний зв'язок, цифрове діаграмоутворення, цифрова антенна решітка.

Вступ

Постановка проблеми. Аналіз сучасних збройних конфліктів показав, що у протиборстві кожна із сторін намагається, в першу чергу, вивести з ладу систему управління противника шляхом знищення її матеріально-технічної основи – системи зв'язку та автоматизації. Тому формування єдиного інформаційного простору на основі нових та вдосконалених базових зразків зв'язку військового призначення, здатних надійно функціонувати в умовах протидії противника і забезпечити зростаючі потреби у передачі великих об'ємів інформації, є одною з важливих проблем, які потрібно вирішити найближчим часом [1]. Тільки за таких умов Збройні Сили України зможуть успішно виконувати свої функції щодо оборони Держави у збройних конфліктах 21-го сторіччя.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останній час у збройних силах розвинених держав та країн НАТО для побудови засобів зв'язку з можливістю передачі високошвидкісних інформаційних потоків та підтримки мультисервісних функцій часто застосовуються технології подвійного призначення. Серед них слід виділити бездротову технологію множинного входу – множинного виходу (МІМО), сутність якої полягає у використанні кількох антен у передавачі і приймачі [2]. Її відмінною рисою у порівнянні зі стандартним підходом є випромінювання кожним антенним елементом передавача різної інформації та використання багатопробеневого розповсюдження радіохвиль для утворення кількох розрізнених у просторі шляхів передачі сигналів. Таким чином, збільшення швидкості передачі інформації буде пропорційне кількості антен

передавача і приймача, а робота такої системи стає стійкою до швидкоплинних умов розповсюдження сигналів. Подальшим розвитком технології є мульти-МІМО – система, яка складається з кількох кореспондентів і використовує канали МІМО для зв'язку між ними [3–5].

Мета статті. Слід відмітити, що технології МІМО і мульти-МІМО ґрунтуються на застосуванні багатопробеневого розповсюдження радіохвиль, яким характеризується тропосферний канал передачі даних. Тому цілком логічно, що авторами пропонується комбінація антенної технології з методами просторово-часового кодування сигналів для впровадження в системи тропосферного зв'язку. Але для цього слід вирішити ряд наукових задач. Метою статті є удосконалення методів просторово-часової обробки телекомунікаційних сигналів в цифрових антенних решітках (ЦАР) в мульти-МІМО режимах роботи перспективної мережі тропосферного зв'язку. В попередніх публікаціях [4, 5] авторами були представлені результати аналогічної обробки сигналів для лінійної ЦАР. Далі викладені особливості реалізації запропонованого методу тропосферного зв'язку стосовно плоскої ЦАР.

Виклад основного матеріалу

Для викладення основного матеріалу статті слід ввести певні обмеження та припущення. В якості моделі застосовується наступний вигляд відгуку приймальної ЦАР:

$$u_i = \sum_{k=1}^M h_{ik} A_k + n_i, \quad (1)$$

де u_i – напруги по виходу i -го приймального каналу ($i=1, \dots, N$, де N – кількість антен приймача); h_{ik} –

передаточна характеристика каналу МІМО між k -ю антеною передавача ($k=1, \dots, M$, де M – кількість антен передавача) та i -ю приймальною антеною; A_k – сигнал, що випромінюється k -ю антеною передавача; n_i – напруга шуму на виході i -го приймального каналу [3].

Узагальнений вигляд системи рівнянь (1) охоплюється компактним матричним виразом:

$$U = H \cdot A + N, \quad (2)$$

спираючись на який для демодуляції сигналів можна скористатись відомими формулами:

$$\hat{A} = H^{-1}U$$

при умові $N=M$, та

$$\hat{A} = H^H (HH^H)^{-1}U \quad (3)$$

у випадку $N>M$.

З метою збереження ефективності даного методу в умовах впливу навмисних завад необхідно здійснити його удосконалення за рахунок використання процедури цифрового діаграмоутворення (ЦДУ) [6], яка дозволяє досягти високої завадостійкості в умовах ведення розвідки та радіопротидії противника. Таке удосконалення для лінійної ЦАР представлено в роботах [3, 4]. У випадку плоскої антени необхідно проводити багатовимірне оцінювання напрямів приходу M сигналів від кореспондентів.

Для прикладу обрана плоска ЦАР, що складається з ідентичних однонаправлених антенних елементів, розташованих в R_x стовпцях і R_y рядках з відстанями d_x по горизонталі і d_y – по вертикалі. Вважатимемо також, що діаграми спрямованості антенних елементів факторизуються, тобто можуть бути представлені у вигляді добутку діаграм спрямованості (ДС) в двох площинах.

Відгук плоскої ЦАР для варіанту 2-координатної процедури можна оцінити за допомогою “натягування” вектора A комплексних амплітуд M сигналів на діагональ одиничної матриці $A = \text{diag}[a_1 \ a_2 \ \dots \ a_M]$. Згідно [7], класична аналітична модель відгуку плоских решіток в матричному вигляді при одновідліковому вимірюванні напрямів на M сигналів і факторизованих ДС має вигляд:

$$U = GAP^T, \quad (4)$$

де $A = \text{diag}[a_1 \ a_2 \ \dots \ a_M]$,

G і P – матриці ДС каналів ЦАР в напрямках M сигналів, відповідно у вертикальній і горизонтальній площинах:

$$P = \begin{bmatrix} Q_1(x_1) & Q_1(x_2) & \dots & Q_1(x_M) \\ Q_2(x_1) & Q_2(x_2) & \dots & Q_2(x_M) \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ Q_{R_x}(x_1) & Q_{R_x}(x_2) & \dots & Q_{R_x}(x_M) \end{bmatrix},$$

$$G = \begin{bmatrix} Q_1(y_1) & Q_1(y_2) & \dots & Q_1(y_M) \\ Q_2(y_1) & Q_2(y_2) & \dots & Q_2(y_M) \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ Q_{R_y}(y_1) & Q_{R_y}(y_2) & \dots & Q_{R_y}(y_M) \end{bmatrix}.$$

З урахуванням впливу шумів, вираз (4) можна представити у вигляді:

$$U = GAP^T + n.$$

Із збільшенням розмірності аналітичної моделі ЦАР, наприклад, внаслідок врахування амплітудно-частотних характеристик фільтрів швидкого перетворення Фур’є, формалізація вказаної моделі сигналів істотно ускладнюється, що впливає на можливість її практичної реалізації. В цьому випадку необхідно застосовувати розвинений матричний апарат сімейства торцевих матричних добутків [7]. Це скоротить об’єм операцій при перемноженні діагональної матриці A на матрицю P . Зокрема, відгук плоскої ЦАР у разі проведення в одному відліку часу 2-координатних вимірювань (наприклад, для двох кутових площин) з урахуванням шумів можна представити аналогічно лінійній ЦАР:

$$U = PA + n,$$

де $P = Q_V \square (Q_H)^H$,

A – вектор оцінок комплексних амплітуд M сигналів,

U – блок-вектор комплексних напруг приймальних каналів ЦАР,

Q_V , Q_H – матриці ДС каналів ЦАР, відповідно у вертикальній і горизонтальній площинах,

$$Q_H = \begin{bmatrix} Q_1(x_1) & Q_1(x_2) & \dots & Q_1(x_M) \\ Q_2(x_1) & Q_2(x_2) & \dots & Q_2(x_M) \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ Q_{R_x}(x_1) & Q_{R_x}(x_2) & \dots & Q_{R_x}(x_M) \end{bmatrix},$$

$$Q_V = \begin{bmatrix} Q_1(y_1) & Q_1(y_2) & \dots & Q_1(y_M) \\ Q_2(y_1) & Q_2(y_2) & \dots & Q_2(y_M) \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ Q_{R_y}(y_1) & Q_{R_y}(y_2) & \dots & Q_{R_y}(y_M) \end{bmatrix},$$

де x_m, y_m – кутові координати напрямку приходу m -го сигналу по горизонталі і вертикалі,

R_y , R_x – кількість просторових каналів плоскої ЦАР відповідно по вертикалі і горизонталі,

M – кількість сигналів,

“ \square ” – операція торцевого добутку матриць [7].

Як альтернативний варіант можна використовувати представлення матриці P через операцію добутку Хатрі-Рао [8]:

$$P = Q_V \blacksquare Q_H.$$

Відгук антенних решіток можна узагальнити на випадок трьох, чотирьох і більше параметрів без втрати спільності шляхом зміни тільки матриці P . Це спрощує застосування і узгодження відомих однокоординатних процедур в складніших завданнях.

Приймаючи до уваги [7], можна представити вираз для сигнального відгуку плоскої ЦАР, що враховує особливості тропосферного розповсюдження сигналів. В цьому випадку матриця H видозміниться з урахуванням другої кутової координати. У разі факторизованих ДС при формуванні H слід застосовувати транспонований торцевий добуток для матриць ДС каналів ЦАР у вертикальній (Q_V) і горизонтальній площинах (Q_H):

$$H = (Q_V \circ \tilde{H}_V) \blacksquare (Q_H \circ \tilde{H}_H),$$

де \tilde{H}_V , \tilde{H}_H – матриці передаточних характеристик каналу МІМО у вертикальному і горизонтальному перетинах траси тропосферного розповсюдження сигналів, “ \circ ” – поелементний добуток Адамара.

Для демодуляції сигналів знадобиться вже зазначена оцінка вектора амплітуд (3), яка у розглянутому випадку P кореспондентів буде блочною.

Висновки

Представлений метод розширює наукове підґрунтя застосування плоских ЦАР з реалізацією ЦДУ у тропосферному зв'язку, що дозволить забезпечити стійку роботу системи в складних умовах впливу випадкових і навмисних завад. Практичне впровадження запропонованого метода дозволить будувати мережу тропосферного зв'язку з можливістю одночасної роботи кількох кореспондентів з економією у кількості необхідних станцій або апаратних машин.

Серед напрямків подальших досліджень слід відмітити удосконалення запропонованого методу з використанням неортогональної частотної дискретної модуляції (N-OFDM) сигналів та оцінку граничних можливостей просторового рознесення каналів розповсюдження тропосферних сигналів в режимі мульти-МІМО.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНЫЙ МЕТОД ТРОПОСФЕРНОЙ СВЯЗИ С МУЛЬТИ-МІМО СИСТЕМОЙ НА БАЗЕ ПЛОСКОЙ ЦИФРОВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

В.И. Слюсар, Н.А. Масесов

В статье представлен усовершенствованный метод тропосферной связи с применением технологии мульти-МІМО на базе плоской цифровой антенной решетки. Приведенный метод отличается от известных учетом диаграмм направленности антенных элементов плоской решетки в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Предложенные идеи расширяют научную базу применения цифровых антенных решеток в тропосферной связи, способствуют повышению стойкости работы системы в условиях радиоэлектронного противодействия противника и увеличению скорости передачи информации.

Ключевые слова: тропосферная связь, цифровое диаграммообразование, цифровая антенная решетка.

Список літератури

1. Рудик В. В. *Актуальні проблеми та напрями розвитку системи зв'язку Збройних Сил України як складової частини системи управління військами (силами)* / В. В. Рудик // *Наука і оборона*. – 2005. – № 2. – С. 22–28.
2. Слюсар В. И. *Системы МІМО: принципы построения и обработка сигналов* / В. И. Слюсар // *Электроника: наука, технология, бизнес*. – 2005. – № 10. – С. 52–59.
3. Слюсар В. И. *Обработка сигналов в многопользовательской системе МІМО* / В. И. Слюсар, Н. А. Масесов // *Информационные системы и технологии (ИСТ-2008) : междунар. науч.-техн. конф., 18 апреля 2008 г. : тезисы докл.* – Н. Новгород, 2008. – С. 75–77.
4. Слюсар В. И. *Мульти-МІМО система и режимы ее работы* / В. И. Слюсар, Н. А. Масесов // *Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2008 : 4 междунар. молодежная науч.-техн. конф., 21-25 апреля 2008 г. : тезисы докл.* – Севастополь, 2008. – С. 39.
5. Слюсар В. И. *Тропосферные сети связи на основе мульти-МІМО систем* / В. И. Слюсар, Н. А. Масесов // *Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке : 12-й Междунар. молодежный форум, 1-3 апреля 2008 г. : тезисы докл.* – Х., 2008. – С. 162.
6. Слюсар В. И. *Цифровое диаграммообразование – базовая технология перспективных систем связи* / В. И. Слюсар // *Радиоаматор*. – 1999. – № 8. – С. 58–59.
7. Слюсар В. И. *Семейство торцевых произведений матриц и его свойства* / В. И. Слюсар // *Кибернетика и системный анализ*. – 1999. – № 3. – С. 43–49.
8. Слюсар В. И. *Обобщенные торцевые произведения матриц в моделях цифровых антенных решеток с неидентичными каналами.* / В. И. Слюсар // *Известия вузов. Сер. Радиоэлектроника*. – 2003. – Том 46, № 10. – С. 9–17.

Надійшла до редакції 15.09.2009 р.

Рецензент: професор кафедри, канд. техн. наук, доцент В.В. Варич, Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”, Полтава.

IMPROVED METHOD OF TROPOSPHERE COMMUNICATION WITH THE MULTI-MIMO SYSTEM ON THE BASE OF FLAT DIGITAL ANTENNA ARRAY

V.I. Slyusar, M.O. Masesov

In the article improved method of troposphere communication with the use of technology of multi-MIMO on the base of by flat digital antenna array is presented. The resulted method differs from the known diagrams of orientation of antenna elements of flat array in vertical and horizontal planes. The offered ideas extend scientific base for applications of digital arrays in troposphere communication, render assistance to the increase of firmness of work of the system in the conditions of radioelectronic counteraction of opponent and increase of speed of passing information.

Keywords: troposphere communication, digital beamforming, digital antenna array.

УДК 621.384.3

В.І. Боженко¹, Р.В.Казмірчук¹, В.І.Шклярський², П.О.Кондратов²

¹Академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

²Національний університет «Львівська політехніка», Львів

МОЖЛИВІ МЕТОДИ ФОРМУВАННЯ КОМПЛЕКСНИХ ТЕПЛОВІЗІЙНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Багатоспектральне зображення значно полегшує контроль та ідентифікацію об'єктів. Перехід від окремих зображень у різних діапазонах спектру до формування комплексного багатоспектрального зображення істотно підвищує ефективність моніторингу досліджуваного об'єкту. У даній статті розглянуті різні способи реалізації багатоспектральних пристроїв, проблеми, що виникають при цьому, та шляхи їх подолання. Запропоновано комплекс обробки тепловізійного зображення, призначений для формування комплексного дводіапазонного зображення.

Ключові слова: багатоспектральний моніторинг, комплексне зображення, тепловізійна камера

Вступ

Постановка проблеми. Контроль та аналіз зображень, отриманих у різних спектральних діапазонах, відіграють важливу роль при визначенні ступеня аварійності різних об'єктів, особливо у тих спектральних діапазонах, що перебувають за межами сприйняття людського ока. Перш за все це тепловізійні камери (ТК), чутливі до ближнього (1...5 мкм) та далекого (8...14 мкм) інфрачервоного (ІЧ) випромінення. Водночас вплив таких відомих фізичних явищ, як теплова дифузія і теплове маскування, значною мірою спотворюють теплову картину, ускладнюючи точне визначення координат місць із граничною температурою [1].

Наприклад, у області спектру 1,4 – 1,8 мкм можливо ідентифікувати об'єкти до певного ступеню у деяких димах та у пилюці, а також візуалізувати випромінення сучасних лазерних цілевказівників-далекомірів, що працюють на

довжині хвилі 1,55 та 1,7 мкм. З цієї метою вельми результативним є застосування приладів нічного бачення, що працюють у області спектру 1,4-2,0 мкм. На рис. 1 наведені криві відбивальної здатності форми військовослужбовця колишнього СРСР (крива 1), форми солдата США (крива 2) та природної рослинності (крива 3) [2]. З нього видно, що у області спектру 1,4-2,0 мкм різниця у відбивальній здатності обмундирування дозволяє не лише виокремити вояка на тлі рослинності, але й провести ідентифікацію за принципом «світ-чужий».

Загальновідомо, що метою застосування камуфляжу є маскування різноманітних об'єктів на тлі оточуючого середовища. Однак камуфляж, розроблений для видимої області спектру, є неефективним для області спектру 1,4-1,8 мкм. Для неї узор камуфляжу зникає, та лишається видимим силует замаскованого об'єкту.