

Андрій Олександрович Зінченко

РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПОБУДОВИ МЕРЕЖІ ШИРОКОСМУГОВОГО БЕЗДРОТОВОГО ДОСТУПУ ТАКТИЧНОЇ ЛАНКИ УПРАВЛІННЯ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ МІМО

Вступ

На протязі останніх років широкого поширення набули мережі широкосмугового бездротового доступу на основі технологій WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) та LTE. Набуттю їх популярності сприяла ціла низка переваг, притаманних цим технологіям.

Для ефективного спектрального ущільнення в них використовується технологія OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiple). З метою зменшення інтерференції прямого та відбитого сигналів у початок символу OFDM вставляється невеликий елемент із кінця сигналу (1/4, 1/8, 1/16, 1/32). Для формування та обробки прийнятих OFDM сигналів застосовується відповідно зворотне та пряме перетворення Фур'є. У залежності від рівня потужності сигналу і рівня шуму здійснюється вибір модуляції: QPSK, 16QAM, 64QAM. Чим краще сигнал, тим вищі модуляція та швидкість передачі даних. За аналогією здійснюється вибір алгоритму кодування. Поширений алгоритм швидкого перетворення Фур'є зменшує потрібну потужність цифрового сигнального процесору у кількості операцій. Режим МІМО (Multiple Input/Multiple Output), що застосовується в WiMAX та LTE, підвищує пропускну спроможність та дальність зв'язку за рахунок використання кількох антен на передачу та прийом. Також стандартами передбачено використання адаптивної антенної системи, діаграма спрямованості якої відслідковує переміщення абонентських пристроїв.

Постановка проблеми

Переваги інтеграції технологій МІМО та OFDM дозволили розглядати їх у якості основних для побудови перспективних бездротових мереж широкосмугового доступу тактичної ланки управління. Для потреб спеціальних користувачів базові технології мають бути змінені у бік надання їм специфічних відмінностей. На думку фахівців однією із таких специфічних відмінностей від базових технологій WiMAX та LTE є наразі відмова від реалізації режиму МІМО в обладнанні, що пропонується провідними виробниками. Підставою для такого кроку вважається складність реалізації цифрової обробки сигналів для режимів МІМО і його багатокористувальницької версії

(мульти-МІМО) за умови повної мобільності всіх елементів мережі, її динамічної конфігурації та можливості нарощування за рахунок під'єднання до зовнішніх станцій нових абонентів. Насправді ж застосування таких режимів МІМО і мульти-МІМО надасть нові можливості у побудові бездротових мереж широкосмугового доступу для потреб тактичної ланки управління Збройних Сил України.

Тому метою статті є дослідження варіантів побудови бездротових мереж широкосмугового доступу тактичної ланки управління за умови реалізації алгоритмів МІМО та мульти-МІМО [1].

Викладення основного матеріалу

Одною з вагомих переваг WiMAX та LTE вважають можливість використання адаптивної антенної системи, що має можливість підлаштовувати свою діаграму спрямованості у відповідності з переміщенням абонентської станції. Роботи над новим поколінням обладнання передбачають створення адаптивних антен (в іноземній літературі вживається термін "смарт-антена" [2]) для базових станцій та мобільних абонентів. Таким чином, окрім традиційних антен з одним променем, сьогодні можливо використання нових груп базових антен: для абонентських терміналів фіксованого зв'язку за стандартом IEEE 802.16d; для мобільного зв'язку з абонентами під час руху за стандартом IEEE 802.16e. Саме стандарт IEEE 802.16e найбільш відповідає вимогам до військового зв'язку.

Для уточнення термінології наведемо перелік різних варіантів антен та їх визначення. Багатопробленеві антени з променями, що перемикаються – це набір антенних елементів з фіксованою діаграмою спрямованості.

В антенах із скануванням промінь діаграми спрямованості у секторі направляється за допомогою процесора у потрібний бік, що надає можливість наведення на абонента або базову станцію. Різні методи цифрової обробки сигнальної суміші у процесорі дозволяють формувати максимум діаграми спрямованості (7–10 дБ) у напрямку на користувача та мінімум у напрямку перешкод. У даному випадку суттєво збільшується швидкість передачі даних. Важливою особливістю є автоматичне наведення

на кореспондента або на найкращий напрямок приходу сигналу, за умови відсутності зони прямого бачення, та робота в умовах багатопроменевого розповсюдження радіохвиль.

Реалізація MIMO систем можлива у двох варіантах. MIMO Matrix A (Diversity mode) – через різні антени передаються однакові дані. Застосовується для підвищення якості сигналу, що передається, та покращення прийому. MIMO Matrix B (Spatial Multiplexing (SM) mode) – через різні антени передаються різні дані, що дозволяє збільшити швидкість передачі даних.

При застосуванні антенних елементів, які мають направлені характеристики, можливо зменшити сектор випромінювання сигналу та підвищити енергетику радіоліній, що у сукупності з використанням багатопроменевості надасть можливість суттєво збільшити дальність зв'язку, навіть за умови відсутності відкритого інтервалу на трасі розповсюдження радіосигналу. Збільшення кількості випромінюючих елементів у системі MIMO буде майже пропорційно збільшувати пропускну спроможність. При цьому можливі різні варіанти просторово-частотно-часового та поляризаційного кодування сигналів. Наприклад, кодування Аламоуті та “магічного квадрату”, які були детально розглянуті у [3, 4].

Можливий більш складний варіант, у разі застосування замість антенних елементів із фіксованою діаграмою спрямованості адаптивних антенних систем. Прикладом є використання для формування променів кількох антенних елементів, розміщених в одну лінію, для здійснення переміщення променя в азимутальній площині, та компоновка кількох антенних лінійок у блоки одна над одною – для переміщення променя за кутом місця. Зазначений підхід дозволить здійснювати настройку кожного променя діаграми спрямованості антенних блоків за найкращим сигналом, як було розглянуто вище для адаптивних антен. Крім того, в такому варіанті є можливість формування вузьких променів діаграми спрямованості, у залежності від кількості антенних елементів, що формують промінь, та мінімуму діаграми спрямованості у напрямку приходу завади. Можливість здійснювати сканування діаграмою спрямованості за кутом місця надає можливість забезпечувати обмін даними з повітряною та космічною компонентами мережі, таким чином інтегруючи всі діючі на полі бою засоби до єдиної мережі. Програмно формована діаграма спрямованості антени дозволить забезпечити зв'язок під час руху, що важливо для спеціальних користувачів. За сприятливих умов розповсюдження радіохвиль швидкість передачі даних може досягати до 300 Мб/с і більше.

Розглянуті варіанти організації зв'язку у режимі “точка – точка” дозволять створити високошвидкісну цифрову мережеву решітку та поєднати між собою окремі різномірні мережі, але вони мають і недоліки: потреба у комплектах

обладнання за кількістю напрямків, що плануються; відсутність можливості розширення мережі без здійснення переприйому сигналу; потреба у здійсненні постійного планування та конфігурування мережі. Побудоване за таким принципом обладнання можливо позиціонувати на заміну станцій радіорелейного, тропосферного та космічного зв'язку. Виграш у пропускну спроможності складе кілька порядків.

Наступним режимом роботи є режим “точка – мульти-точка”, при цьому на останній буде застосовуватись режим мульти-MIMO. Самий простий варіант реалізації режиму – застосування розподілу часу роботи на передачу базової станції між абонентами. У кожному часовому слоті базова станція буде працювати у режимі MIMO тільки з одним кореспондентом. Обробка сигналу у процесорі не буде відрізнятися від розглянутого режиму “точка – точка”. У такому вигляді можливе розгортання мережі доступу до телекомунікаційних послуг бригадних, батальйонних, ротних тактичних груп. Зв'язок між підрозділами тактичних груп буде здійснюватись за допомогою перенаправлення пакетів базовою станцією. Пропускна спроможність базової станції буде динамічно розподілятися між кореспондентами.

Розглянутому способу притаманні переваги та недоліки. Перевага – простота реалізації базової та абонентських станцій. Недоліки: непрацездатність мережі у разі виходу з ладу базової станції; відсутність зв'язку на значних відстанях від базової станції; зменшення пропускну спроможності із збільшенням абонентів; відсутність інших маршрутів передачі трафіку.

Наступний варіант організації ширококутового зв'язку – режим роботи базової станції мульти-MIMO, що передбачає одночасне просторове розрізнення кількох абонентів. У такому варіанті базова станція буде одночасно працювати з кожним із абонентів за рахунок просторового розрізнення сигналів. Це передбачає ускладнення архітектури цифрової антенної решітки (ЦАР) за рахунок необхідності одночасного формування кількох просторово рознесених каналів. За умови необхідності роботи одночасно з кількома абонентами у секторі 360 градусів можлива компоновка антени у вигляді усіченої піраміди, на площинах якої розміщені під кутом блоки антенних елементів. Таке розташування блоків антенних елементів у цифровій антенній решітці надасть можливість формувати промені діаграми спрямованості у будь-якому напрямку за азимутом та кутом місця. Для розглянутого варіанту організації зв'язку методи обробки сигналів мульти-MIMO з урахуванням можливих варіантів кодування сигналів були описані у [5-7].

Альтернативний варіант організації зв'язку – застосування режиму мульти-MIMO на кожній станції у мережі. Саме такий варіант дозволить пов'язати між собою розрізнені мережі, не тільки за вертикально управлінням, а і по горизонталі. Структура мережі “мультиточка – мультиточка”

найбільш відповідає вимогам до військового управління. Вона пов'язує органи управління між собою за допомогою кількох зв'язків, створює обхідні шляхи та підвищує стійкість мережі, зокрема до дії активних завад.

Підвищена завадостійкість досягається застосуванням особливих методів демодуляції сигналів, що враховують наявність та просторові координати завадопостановників. В основі відповідних методів лежить специфічна модель аналітичного опису відгуку приймальної ЦАР. Розглянемо її більш докладно.

Якщо записати сукупність напруг сигналів по виходах приймальних каналів багатосекційної ЦАР у вигляді

$$U = P \cdot A + n,$$

де U – блок-вектор комплексних напруг сигналів по виходах просторових каналів сукупності секцій багатосекційної ЦАР, P – сигнальна матриця,

A – блок-вектор амплітуд OFDM сигналів та завад, n – блок-вектор шумових напруг, то структура сигнальної матриці P і блок-векторів U та A у випадку лінійних за будовою секцій ЦАР буде наступною:

$$P = Q \circ \tilde{H}_Q,$$

$$\text{де } Q = [Q_S \mid Q_P] = \begin{bmatrix} Q_{11}(x_{1S}) & \cdots & Q_{11}(x_{MS}) & \vdots & Q_{11}(x_{1P}) & \cdots & Q_{11}(x_{MP}) \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ Q_{R1}(x_{1S}) & \cdots & Q_{R1}(x_{MS}) & \vdots & Q_{R1}(x_{1P}) & \cdots & Q_{R1}(x_{MP}) \\ \hline Q_{1T}(x_{1S}) & \cdots & Q_{1T}(x_{MS}) & \vdots & Q_{1T}(x_{1P}) & \cdots & Q_{1T}(x_{MP}) \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ Q_{RT}(x_{1S}) & \cdots & Q_{RT}(x_{MS}) & \vdots & Q_{RT}(x_{1P}) & \cdots & Q_{RT}(x_{MP}) \end{bmatrix} \text{ – блок-матриця}$$

характеристик спрямованості антенних елементів лінійної антенної решітки t -ї секції $Q_{rt}(x_{mS(P)})$ у напрямку на m -е джерело OFDM сигналів (індекс S) або завад (індекс P) з кутовою координатою $x_{mS(P)}$,

де $r=1, \dots, R$ – порядковий номер антенного елемента в антенній решітці в межах t -ї секції, $t=1, T$ – порядковий номер секції у багатосекційній ЦАР;

$$\tilde{H}_Q = [\tilde{H}_{QS} \mid \tilde{H}_{QP}] = \begin{bmatrix} \tilde{h}_{Q11S} & \cdots & \tilde{h}_{Q1MS} & \vdots & \tilde{h}_{Q11P} & \cdots & \tilde{h}_{Q1MP} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{h}_{QR1S} & \cdots & \tilde{h}_{QRMS} & \vdots & \tilde{h}_{QR1P} & \cdots & \tilde{h}_{QRMP} \\ \hline \tilde{h}_{Q1TS} & \cdots & \tilde{h}_{Q1TMS} & \vdots & \tilde{h}_{Q1TP} & \cdots & \tilde{h}_{Q1TMP} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{h}_{QRTS} & \cdots & \tilde{h}_{QRTMS} & \vdots & \tilde{h}_{QRTIP} & \cdots & \tilde{h}_{QRTMP} \end{bmatrix} \text{ – блок-матриця}$$

передаточних характеристик каналу MIMO $\tilde{h}_{QrtmS(P)}$ в напрямку на m -е джерело OFDM сигналів (індекс S) або завад (індекс P) з кутовою координатою $x_{mS(P)}$;

взлів. Обробку сигналів з різних напрямків можливо здійснювати за розглянутим раніше принципом за умови перевірки гіпотези про кількість абонентів у мережі. Можливість інтеграції до мережі широкопasmового бездротового доступу повітряної і космічної компоненти, масштабування мережі за рахунок підключення на краях нових користувачів надасть можливості створити інтегральну цифрову мережеву решітку в інтересах підрозділів всіх видів та родів військ та створить технічну основу системи управління для проведення мережецентричних операцій.

$A^T = [A_S \mid A_P]$ – блок-вектор амплітуд сигналів (блок A_S) та завад (блок A_P); “ T ” – символ операції транспонування;

◦ – символ блокового добутку Адамара [8, 9].

В режимі встановлення зв'язку мають бути отримані кутові координати постановників завад, які слід використати під час демодуляції сигналів, оптимальної за методом найменших квадратів. Відповідний метод завадозахисту запропоновано, наприклад, в [10].

Висновки

Відсутність звичних базових станцій, уніфікація всього обладнання, динамічний розподіл потоків повідомлень за різними шляхами передачі, формування вузьких променів діаграми спрямованості ускладнить противнику виявлення структури системи управління та відповідно зменшить вірогідність ураження її ключових

Вважається за доцільне при формуванні технічного завдання для розробки наступного покоління станцій широкопasmового бездротового доступу орієнтуватись на реалізацію режиму роботи “мультиточка – мультиточка”, спираючись на технологію MIMO. Напрямок подальших досліджень – розробка нових методів цифрової обробки сигналів для станцій широкопasmового доступу нового покоління та створення інтегрованих систем зв'язку і радіолокаційної розвідки на основі технології MIMO [11-13].

Література

- 1. Слюсар В. И.** Технология мульти-ММО в гарантоспособных беспроводных системах связи / В. И. Слюсар, Н. А. Масесов // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2008. – Вип. 1 (16). – С. 39–42. **2. Слюсар В. И.** Smart-антенны пошли в серию. //Электроника: наука, технология, бизнес. – 2004. - № 2. – С. 62 - 65. **3. Слюсар В. И.** Методы гарантоспособной передачи сообщений в радиорелейных системах связи / В. И. Слюсар, А. О. Зінченко // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2007. – № 6(25).– С. 15-19. **4. Зінченко А. О.** Пространственно-поляризационное кодирование сигналов в радиорелейной системе связи / А. О. Зінченко // Збірник наукових праць “Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем” – 2007. – Вип.11. – С.179-183. **5. Слюсар В. И.** Мульти-ММО система и режимы ее работы / В. И. Слюсар, Н. А. Масесов //4-я Международная молодежная научно-техническая конференция "Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций RT-2008" (21 - 25 апреля 2008 г.). - Севастопольский национальный технический университет. – 2008. - С. 39. **6. Слюсар В. И.** Обработка сигналов в многопользовательской системе ММО / В. И. Слюсар, Н. А. Масесов //Международная научно-техническая конференция “Информационные системы и технологи (ИСТ-2008)” (18 апреля 2008 г.). - Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексева. – 2008. - С. 75 - 77. **7. Слюсар В. И.** Метод мульти-ММО для связи с БПЛА / В. И. Слюсар, М. В. Малярчук // 9-а науково-технічна конференція «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах». – Феодосія, ДНВЦ ЗСУ. - 10 – 11 вересня 2009 р. - С. 54 - 55. **8. Слюсар В.И.** Семейство торцевых произведений матриц и его свойства// Кибернетика и системный анализ. – 1999.- Том 35; № 3.- С. 379-384. **9. Слюсар В.И.** Обобщенные торцевые произведения матриц в моделях цифровых антенных решеток с неидентичными каналами//Известия вузов. Сер. Радиоэлектроника.- 2003. - Том 46, № 10. - С. 9 - 17. **10. Слюсар В.И., Волошко С.В.** Помехозащищенная демодуляция сигналов N-OFDM в приемном сегменте цифровой антенной решетки// Системы обработки информации. – Харьков: ХУПС. - Вип. 5 (95). – 2011. – С. 99 – 101. **11. Зінченко А. О.** Інтеграція системи зв'язку та радіолокаційної розвідки на основі технології ММО / А. О. Зінченко // Матеріали науково-практичного семінару “Сучасні інформаційні технології в системі підготовки військ”, 9 лютого 2010 р. – К.: Національний університет оборони України, 2010. – С. 25, 26. **12. Зінченко А. О.** Інтеграція системи зв'язку та радіолокаційної розвідки на основі технології ММО / А. О. Зінченко // Матеріали науково-практичного семінару “Принципи побудови інформаційно-телекомунікаційних вузлів оперативної та стратегічної ланок управління Збройних Сил України”, 2 грудня 2010 р. – К.: Національний університет оборони України, 2010. – С. 24, 25. **13. Зінченко А.О.** Деякі погляди на розвиток систем зв'язку у війнах майбутнього / А. О. Зінченко // Матеріали науково-практичної конференції “Порядок виконання завдань за призначенням підрозділами механізованої (танкової) бригади”, 26 листопада 2010 р. – К.: Національний університет оборони України, 2010. – С. 74 - 80.

В статье разработаны рекомендации относительно вариантов построения сетей широкополосного беспроводного доступа на основе технологии ММО и мульти-ММО для тактического звена управления Вооруженных Сил Украины.

Ключевые слова: цифровое диаграмообразование, цифровая антенная решетка, "точка – точка", "точка – мультиточка".

In the article recommendations are worked out in relation to the variants of construction of networks of wireless access on the basis of technology of MIMO and multi-MIMO for the tactical link of management of Military Powers of Ukraine.

Key words: digital spectrum diagram, digital array, a "point is a point", "point -multipoint".