

Зв'язок, радіотехніка, радіолокація, акустика та навігація

УДК 621.391

В.І. Василюшин¹, В.В. Лютов¹, В.Д. Луняка², С.Л. Бутенко², А.К. Суслов²

¹ Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

² Командування Повітряних Сил Збройних Сил України, Вінниця

СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

В роботі розглянуті стан, перспективи розвитку та напрями підвищення потенційних можливостей телекомунікаційних систем спеціального призначення за рахунок використання сучасних телекомунікаційних технологій, методів просторово-часової, поляризаційно-часової обробки сигналів та сучасних підходів щодо вдосконалення телекомунікаційних систем.

Ключові слова: просторово-часова обробка сигналів, поляризаційно-часова обробка сигналів, адаптивна модуляція, когнітивне радіо, технологія МІМО.

Вступ

У відповідності до стратегічного оборонного бюлетеня України досягнення мети оборонної реформи Збройних Сил (ЗС) України здійснюватиметься шляхом виконання розподілених відповідно до пріоритетності стратегічних цілей, першою з яких є об'єднане керівництво силами оборони, що здійснюється згідно принципів і стандартів, прийнятих державами – членами НАТО. Оперативними цілями оборонної реформи є створення ефективної системи оперативного (бойового) управління, зв'язку, розвідки та спостереження (C4ISR–Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance), удосконалення системи кібербезпеки та захисту інформації [1].

Збройні конфлікти, що застосовують концепцію C4ISR та подібні концепції, називають мережецентричними війнами (network centric warfare–NCW) [1–3]. Сутність мережецентричних дій полягає в інтеграції наявних сил та засобів в єдиному операційно-інформаційному просторі, що дозволяє збільшити ефективність їхнього бойового використання.

Мережецентричне управління в ході бойових дій на сьогоднішній день можливе за умови використання технологій засобів радіозв'язку з програмуємими параметрами (software defined radio– SDR), пакетних радіомереж, що самоорганізуються (ad hoc та мобільних MANET (Mobile Ad-Hoc Networks) та інших сучасних технологій та концепцій.

В США прикладом програми, що використовує технологію SDR, є об'єднана тактична система ра-

діозв'язку JTRS (Joint Tactical Radio System). Система JTRS включає цілий ряд програм ведення тактичних дій, прикладом є WNW (wideband networking waveform– широкопasmовий мережевий режим роботи), що вже реалізується в сучасних радіостанціях. В Туреччині технологію SDR для радіо-, радіорелейних та супутникових систем використовує тактична система зв'язку та автоматизації TASMUS II.

Стрімкий розвиток різноманітних технологій в сфері телекомунікацій, використання в сучасних засобах радіозв'язку розвинутих країн світу технологій SDR і інших, режимів роботи, що використовують принципи MANET, зумовлюють потребу визначення перспектив розвитку телекомунікаційних систем в інтересах Повітряних сил ЗС України. Таким чином, **метою статті** є визначення стану та перспектив розвитку телекомунікаційних систем (ТКС) спеціального призначення.

Виклад основного матеріалу

Сучасний стан телекомунікаційних систем

На сьогоднішній день для організації радіозв'язку окрім традиційних та сучасних засобів, розроблених ТОВ «Телекарт-Прилад», знаходять використання радіостанції корпорації Harris (США). Перспективними до використання можуть бути визначені радіостанції компанії Aselsan (Туреччина), Thales (Франція), Rohde&Schwarz, Elbit Systems (Ізраїль).

Особливістю радіостанцій Harris є реалізація режиму псевдовипадкової перебудови робочої частоти (frequency hopping), забезпечення прихованого

радіозв'язку (режими криптографічного захисту інформації AES Advanced Encryption Standard – удосконалений стандарт шифрування) та Citadel II, можливість одночасної передачі мови та даних. В деяких радіостанціях ультракороткохвильового (УКХ) діапазону реалізовано режим Adaptive Networking Wideband Waveform (ANW2 – мережевий режим роботи широкодіапазонних станцій), що забезпечує канали передачі даних по технології MANET [4]. Окрім Citadel II компанією Harris розроблена програмуєма спеціалізована інтегральна мікросхема (ASIC – Application-Specific Integrated Circuit) для вирішення завдань криптографії Sierra II, яка відповідає вимогам системи JTRS.

Мобільні радіомережі (MANET) – динамічна архітектура побудови мереж, яка самоорганізується, та не містить базових станцій і фіксованих маршрутів передачі інформації [4]. Під вузлом мережі розуміють термінал, який виконує функції хоста та маршрутизатора. В MANET топологія випадкова, її елементи можуть бути мобільними. Принцип організації передачі інформації – комутація повідомлень (пакетів), тип управління – децентралізований.

Реалізацією MANET, основою на використанні механізму DLEP (dynamic link exchange protocol – протокол обміну динамічного зв'язку), технології MIMO (multiple input-multiple output system – системи з багатьма входами та виходами) [5] є Wave Relay компанії Persistent Radio Systems.

В радіостанціях компаній Aseslan, Elbit system окрім розширення спектру з використанням стрибкоподібної зміни частоти (FHSS – frequency hopping spread spectrum) використовується розширення спектру методом прямої послідовності (DSSS – Direct Sequencing Spread Spectrum), адаптивне завадостійке кодування [6].

Для кодування/стиснення мовної інформації в радіостанціях застосовуються вокодери (vocoder – voice coder), що реалізують алгоритми CVSD (continuously variable slope delta modulation – дельта-модуляція зі зміною модуляцією та швидкістю), MELP (mixed excitation linear prediction – лінійного передбачення зі змішаним збудженням) та інші.

Особливістю сучасних та перспективних засобів телекомунікації є використання протоколу ARQ та його модифікацій. Протокол ARQ (Automatic repeat request – автоматичний запит на повторну передачу (пересилання) даних) знайшов використання в сучасних радіостанціях короткохвильового (КХ) діапазону. Даний протокол є складовою протоколу високошвидкісної передачі даних (HDL – High-Rate Data Link Protocol), який призначений для передачі даних від однієї станції до іншої через заздалегідь установлений канал КХ- радіозв'язку з під-

твердженням доставки та повторної передачі некоректно прийнятих даних. Модифікація протоколу ARQ– (HARQ-hybrid ARQ, гібридний ARQ) використовується в технології LTE та MIMO системах.

Використання сучасних радіостанцій спрощується за умови використання спеціалізованого програмного забезпечення. Відома система управління боєм RF 5410 – інтегрований програмний додаток, що забезпечує управління та контроль бойовими діями підрозділів. Передавання повідомлень (даних) радіостанціями Harris спрощується при використанні програми RF-6760 WMT.

Прикладом сучасної радіорелейної станції (засобу широкопasmового безпроводового доступу) є RF-7800W. ТОВ «Телекарт-Прилад» розроблено радіорелейну станцію P-450. Компанією Harris заявлено використання в RF-7800W технології MIMO. Вказана технологія дозволяє підвищувати пропускну здатність системи за рахунок паралельної передачі інформації по просторовим підканалам.

Вітчизняними компаніями запропоновані комплексні рішення для систем військового зв'язку, а саме мобільні телекомунікаційні комплекти, які характеризуються широким використанням стандартів та протоколів IEEE, ITU. Характерною особливістю сучасних засобів телекомунікацій є використання маршрутизаторів (комутаторів) виробництва Cisco system (або інших), VoIP (Voice over IP– передача голосу по IP-мережам) шлюзів і т.д. Здійснення IP (internet protocol – міжмережевий протокол) телефонії забезпечують SIP (session initiation protocol) сервери.

Таким чином, сучасні ТКС спеціального призначення характеризуються впровадженням деяких сучасних підходів та технологій, що використовуються в ТКС загального призначення та спеціалізованих технологій (FHSS і інших). Разом з тим, доцільно проаналізувати напрями підвищення їх потенційних можливостей з урахуванням сучасних та перспективних технологій, що використовується в області зв'язку та споріднених областях.

Перспективи розвитку телекомунікаційних систем

Перспективи розвитку телекомунікаційних систем пов'язані з використанням сучасних технологій та їх комбінацій, сучасних та перспективних підходів по обробці сигналів в адаптивних (інтелектуальних) антенних решітках і т.д. Розглянемо перспективи використання технологій MPLS, MIMO, OFDM, стеганографії, когнітивного радіо, активної модуляції та кодування, обчислень в хмарі, поляризаційно-часової обробки сигналів і інших підходів.

Однією з тенденцій розвитку телекомунікаційних мереж спеціального призначення країн НАТО є

впровадження стандартів TACOMS POST- 2000, які забезпечать ведення коаліційних мережецентричних операцій.

Пріоритетним напрямком розвитку телекомунікаційних мереж спеціального призначення є використання технології багатопротокольної комутації міток MPLS– Multiprotocol Label Switching) [7], що дозволяє забезпечити ефективну передачу трафіка з підтримкою параметрів якості обслуговування (Qos – Quality of Service). Основними сферами застосування протоколу MPLS є віртуальні приватні мережі (Virtual Private Network, VPN), керування трафіком (Traffic Engineering, TE), підтримка класів і Qos.

В MIMO системах використовують декілька варіантів передачі, основними з яких є просторове мультиплексування (SDM – Spatial Division Multiplexing) та диверсифіковане передавання (diversity – рознесення). У першому випадку кожен антенний канал транслює незалежний інформаційний потік. Потoki можуть належати одному користувачу (single user MIMO) або різним користувачам (Multi User MIMO – MU-MIMO). Просторове мультиплексування можливе з замкнутою петлею зворотнього зв'язку (closed loop) та розімкненою петлею (open loop). При цьому здійснюється оцінка стану каналу на приймальній стороні з передачею оцінки на передавальну сторону або використовуються попередньо визначені параметри.

У другому випадку декілька рознесених антенних канали використовують для передачі одного потоку даних. Як правило, перед передаванням реалізується додаткове просторово-часове кодування (прикладом якого є метод Аламоуті). Методи просторово-часового кодування доволі часто розгадуються в рамках узагальненого терміну STBC (space-time block coding – просторово-часове блочне кодування). Великий порядок рознесення при використанні схеми Аламоуті забезпечується за рахунок взаємної ортогональності передаваних потоків комплексних ортогональних символів.

Подальшим розвитком систем з MIMO є стандарт (протокол, радіотехнологія) LTE (Long-Term Evolution). Тут окрім просторового мультиплексування знаходить використання адаптивне формування променя діаграми спрямованості (ДС) як на передавальній, так і на приймальній стороні, технології мультиплексування ортогональними несучими (OFDM – Orthogonal Frequency Division Modulation) в поєднанні з технологією радіодоступу OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access).

Особливістю OFDM є використання прямого та зворотнього швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). ШПФ в ТКС також може використовуватися для формування багатопроменевої ДС, промені якої є взаємноортогональними (рис. 1) [8].

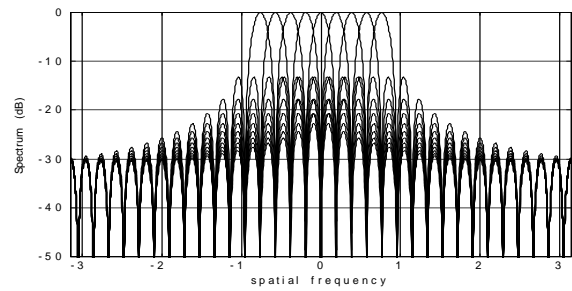


Рис. 1. Багатопроменева діаграма спрямованості з 9 променів

Просторово-рознесена передача ортогональних ресурсів (SORTD-space orthogonal-resource transmit diversity), що основана на використанні ортогональних функцій Уолша і інших, застосовується в системі LTE-advanced.

Покращення скритності на фізичному рівні в багатоантенних системах радіозв'язку (з MIMO) на передавальній стороні здійснюється за рахунок адаптивного формування променя ДС (на основі попереднього кодування або власне адаптивного формування променя діаграми спрямованості (beamforming)) [9]. В напрямку пристрою перехвату повідомлень (eavesdropper) формується провал ДС. Крім того, в напрямку такого пристрою може випромінюватися штучний шум. Особливістю такого підходу є потреба в інформації про стан каналу зв'язку (channel state information). Для вирішення цього завдання можуть використовуватися сучасні методи спектрального аналізу, основані на використанні підпросторів власних векторів кореляційної матриці спостережень (елементів функціонального аналізу, спектрального подання операторів). Просторовий спектр для випадку оцінювання кутових координат двох джерел сигналів наведено на рис. 2.

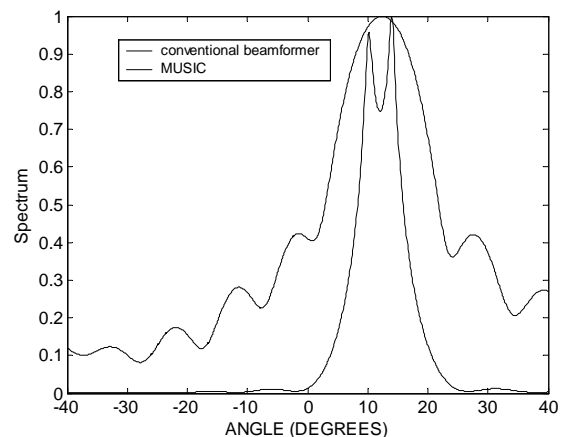


Рис. 2. Просторовий спектр методу MUSIC та формувача ДС

Високий темп передачі інформації в ТКС може забезпечуватися використанням адаптивної модуляції та кодування (adaptive modulation and coding–

АСМ). Сутність АСМ полягає в зміні темпу передачі в залежності від стану каналу [10].

Стеганографія, на відміну від криптографії, дозволяє скривати самий факт існування даних з обмеженням доступу при їх передачі. Дані можуть передаватися з використанням контейнера (зображення, тексту і т.д.). При цьому мають бути виконані певні перетворення над контейнером, а на приймальній стороні – зворотні перетворення [11].

Під системою когнітивного (cognitive – пов'язаний із отриманням знань) радіозв'язку розуміють систему зв'язку, що здатна аналізувати сигнально-завадову обстановку та адаптуватися до неї [12]. Концепція когнітивного зв'язку може бути використана як в радіозв'язку, так і в мобільних мережах, що самоорганізуються (MANET).

Концепція обчислень в «хмарі» (cloud computing) полягає в тому, що процедури складної обробки та зберігання великих масивів даних переносять в хмару (центри обробки даних). Наприклад, в програмно-визначених мережах (SDN-software-defined networks) функції складної обробки з маршрутизаторів переносяться в деякий центр. Відомі «хмарові» технології управління мережами радіодоступу (RAN – radio access network) [13].

Особливістю перспективних ТКС (систем радіозв'язку п'ятого покоління (5G)) є використання подібного до OFDM формату модуляції FBMC (filter bank multicarrier), коли піднесучі пропускаються через фільтри, що подавляють бічні пелюстки сигналів, та просторово-часового ущільнення (Time frequency packed signaling –TFS) [14]. Використання FBMC дозволяє суттєво придушити позасмугове випромінювання, підвищити спектральну ефективність багаточастотного сигналу і завадозахищеність каналів зв'язку.

Наступним напрямом підвищення потенційних можливостей ТКС є використання принципу поляризаційного розподілу сигналів. Наприклад, в перспективних радіорелейних системах будуть використовуватися метод АСДР (Adjacent Channel Dual Polarized), який припускає використання різних частот сигналів (сусідніх або суміжних по частотній сітці) на ортогональних поляризаціях [15], та інтелектуальні ретранслятори (smart relay), які потребують знання передаточних характеристики радіорелейних каналів. "Інтелектуальна" обробка сигналів передбачає додаткову корекцію амплітуд і фаз сигналів з обліком характеристик передачі просторових МІМО-каналів на інтервалі радіорелейної лінії.

Крім того, слід вказати на перспективи використання в ТКС перетворення Карунена-Лоева (методу головних компонент), вейвлет перетворення, технології сурогатних даних, досягнень нелінійної динаміки, теорії випадкових матриць, статистик високого порядку (кумулянтів), цифрових методів генерування та оброб-

ки сигналів в ортогональних базисах [8; 16–19], методів пониження шуму в спостереженні, методів стегаграфії, теорії ігор (game theory), теорії випадкових матриць (random matrix theory) та інших підходів.

Висновки

Таким чином, перспективи розвитку ТКС спеціального призначення можуть бути реалізовані за рахунок:

- використання нових сигнально-кодових конструкцій та властивостей сигналів, що застосовуються в телекомунікаційних системах;

- адаптивного розподілу потужності між променями багатопрменевої діаграми спрямованості, використання адаптивної модуляції та кодування;

- адаптивного формування діаграми спрямованості (з використанням попереднього кодування або безпосередньо формування діаграми спрямованості);

- підвищення швидкості передачі інформації за рахунок формування паралельних просторових потоків (МІМО технології);

- використання в умовах радіоелектронного подавлення режиму ППРЧ, його комбінації з розширенням спектру методом прямої послідовності та іншими підходами;

- вдосконалення існуючих та розробки нових методів оцінки стану каналу зв'язку;

- використання вейвлет (wavelet) перетворень для задач подавлення шуму в спостереженні, виявлення сигналів, ортогонального мультиплексування замість ортогонального частотного мультиплексування OFDM і т.д.;

- використання ортогональних просторово-часових кодів, що дозволить отримати максимальну можливий порядок рознесення при незначній обчислювальній складності;

- використання результатів теорії ігор (game theory), теорії випадкових матриць (random matrix theory), статистик високого порядку (кумулянтів);

- широкого впровадження методів просторово-часової, поляризаційно-часової, частотно-часової обробки сигналів, адаптивних (інтелектуальних-smart) антенних решіток;

- використання сучасних методів подавлення шуму (noise reduction) в спостереженні, основаних на використанні методу головних компонент, технології сурогатних даних і інших;

- прискорення реалізації найбільш складних складових сучасних методів обробки сигналів з використанням розпаралелювання обчислень (системних обчислювачів), графічних процесорних елементів;

- використання цифрових методів генерування та обробки сигналів в ортогональних базисах (на

основі власних векторів кореляційної матриці спостереження, степеневому, з використанням ортогоналізації Грама-Шміда і інших).

Список літератури

1. Рішення Ради національної безпеки і оборони України від 20 травня 2016 року «Про Стратегічний оборонний бюлетень України».
2. Алімпієв А.М. Особливості гібридної війни РФ проти України. Досвід, що отриманий Повітряними Силами Збройних Сил України / А.М. Алімпієв, Г.В. Певцов // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2017. – № 2. – С. 19-25.
3. Кушнір О.І. Аналіз впливу «гібридної» війни на розвиток автоматизованої системи управління авіацією та ППО Збройних Сил України / О.І. Кушнір, О.П. Давикоза, Ю.Ф. Кучеренко // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2017. – № 2. – С. 116-120.
4. Романюк В.А. Мережі MANET / В.А. Романюк, О.Я. Сова // Коммуникации и сети. Телеком: Военная связь. – 2016. – С. 82-87.
5. Бакулин М.Г. Технология MIMO: принципы и алгоритмы / М.Г. Бакулин, Л.А. Варукина, В.Б. Крейнделін. – М.: Горячая линия – Телеком, 2014. – 244 с.
6. Борисов В.И. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / В.И. Борисов, В.М. Зинчук. – М.: РадиоСофт, 2008. – 512 с.
7. Вивек О. Структура и реализации современной технологии MPLS / О. Вивек. – М.: Вильямс, 2004. – 480 с.
8. Vasylyshyn V.I. High-resolution phased array signal processing via DFT Beamspace TLS-ESPRIT with structure weighting / V.I. Vasylyshyn // IEEE Phased Array Systems and Technology Symposium: int. symp., 14-17 Oct. 2003, Boston, USA. – Boston, 2003. – P. 605-610.
9. Hong Peter Y.W. Enhancing physical-layer secrecy in multiantenna wireless systems / Y.W. Peter Hong, P.C. Lan, C.C.J. Kuo // IEEE SP magazine. – 2013. – No. 9. – Pp. 29-40.
10. Chung S.T. Degrees of freedom in adaptive modulation: a unified view / S.T. Chung, A.J. Goldsmith // IEEE Trans. on communications. – 2001. – Vol. 49. – No. 9. – Pp. 1561-1571.
11. Коханович Г.Ф. Компьютерная стеганография. Теория и практика / Г.Ф. Коханович, А.Ю. Пузыренко. – К.: МК-Пресс, 2006. – 288 с.
12. Haykin S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications / S. Haykin // IEEE journal on selected areas in communications. – 2005. – Vol. 23, No. 2. – Pp. 201-220.
13. Benefits and impact of cloud computing on 5g signal processing / D. Wubben, P. Rost, J. Bartelt, M. Lalam, V. Savin, M. Gorgoglion, A. Dekorsy, G. Fettweis // IEEE SP magazine. – 2014. – Vol. 31, No. 6. – Pp. 35-44.
14. Modulation formats and waveforms for 5G networks: who will be the heir of OFDM? / P. Banelli, S. Buzzi, G. Colavolpe, A. Modenini, F. Rusek, A. Ugolini // IEEE SP magazine. – 2014. – Vol. 31, No. 6. – Pp. 80-93.
15. Слюсар В. Современные тренды радиорелейной связи / В. Слюсар // Технологии и средства связи. – 2014. – № 4. – С. 32-35.
16. Василюшин В.И. Эффективность спектрального анализа собственноструктурными методами при предварительной обработке сигналов модифицированным методом SSA / В.И. Василюшин // Системы обработки информации. – 2016. – Вып. 8 (145). – С. 21-24.
17. Аналіз ефективності попередньої обробки сигналів модифікованим методом SSA / В.И. Василюшин, К.Г. Маціна, Р.А. Лукянюк, Р.В. Касіхін // Збірник наукових праць ХНУПС. – 2017. – Вып. 2 (51). – С. 95-98.
18. Костенко П.Ю. Коррекция обработки сигналов при их спектральном анализе с использованием суррогатных автоковариационных функций наблюдения, полученных ATS-алгоритмом / П.Ю. Костенко, В.И. Василюшин // Радиоэлектроника. – 2014. – Т. 5. – № 6. – С. 3-12.
19. Васюта К.С. Оцінка потенційних можливостей організації багатоканальності в хаотичних системах передачі даних / К.С. Васюта, І.В. Захарченко // Системи озброєння і військова техніка. – 2016. – № 2. – С. 70-73.

Надійшла до редколегії 12.06.2017

Рецензент: д-р техн. наук проф. К.С. Васюта, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В.И. Василюшин, В.В. Лютов, В.Д. Луняка, С.Л. Бутенко, А.К. Суслов

В работе рассмотрены состояние, перспективы развития и направления повышения потенциальных возможностей телекоммуникационных систем специального назначения за счет использования современных телекоммуникационных технологий, методов пространственно-временной, поляриционно-временной обработки сигналов и современных подходов по усовершенствованию телекоммуникационных систем.

Ключевые слова: пространственно-временная обработка сигналов, поляриционно-временная обработка сигналов, адаптивная модуляция, когнитивное радио, технология MIMO.

STATE AND PERSPECTIVES OF DEVELOPMENT OF THE SPECIAL PURPOSE TELECOMMUNICATION SYSTEMS

V. Vasylyshyn, V. Lyutov, V. Lunyaka, S. Butenko, A. Suslov

The state, development perspectives and the improvement directions of special purpose telecommunication systems potentialities by using modern telecommunication technologies, the methods of space-time, polarization-time signal processing and modern approaches for improving the telecommunication systems.

Keywords: space-time signal processing, polarization-time signal processing, adaptive modulation, cognitive radio, MIMO technology.