

УДК 621.396.93

*М.В. Малярчук,
В.І. Слюсар*

ПЕРСПЕКТИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗВ'ЯЗКУ З БЕЗПІЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ

Істотне розширення застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в інтересах збройних сил провідних країн світу обумовлене широкими можливостями їхнього використання. В той же час БПЛА, що є на озброєнні в Україні, істотно відстають від рівня розвитку закордонних систем, через що вживається низка заходів, спрямованих на оснащення Збройних Сил України новими БПЛА. Зокрема, у 2008 р. була здійснена закупівля безпілотного авіаційного комплексу ізраїльського виробництва для отримання досвіду експлуатації й забезпечення виробництва аналогічних комплексів на вітчизняних підприємствах. Окремими з них ведуться ініціативні роботи зі створення новітніх зразків БПЛА. Розроблена Концепція оснащення Збройних Сил України безпілотними авіаційними комплексами на період до 2025 року.

Основними проблемними питаннями, з якими зіштовхуються розробники БПЛА, є:

- необхідність оснащення БПЛА сучасним ретрансляційним і розвідувальним обладнанням, створення захищених від завад каналів управління та передачі даних;
- низька розвідзахищеність каналів зв'язку;
- забезпечення в умовах обмеженого частотного ресурсу високої швидкості передачі даних у каналі зв'язку (до 50 Мбіт/с, відповідно до стандарту НАТО STANAG 4609).

Тому актуальним напрямом наукових досліджень є пошук методів модуляції сигналів, що дозволяють вирішити завдання:

- збільшення розвідзахищеності каналів зв'язку й керування БПЛА;
- підвищення завадозахищеності радіоканалів передачі даних та їхньої пропускної здатності в умовах завад.

Метою статті є обґрунтування застосування перспективних інформаційних технологій для забезпечення зв'язку з безпілотними літальними апаратами зразка 2025 року.

Слід вказати, що ситуація з розробкою радіозасобів для зв'язку із БПЛА у світі сьогодні характеризується різноманіттям підходів. Певну частку міжнародного ринку займають системи із традиційними, перевіреними протягом багатьох років методами модуляції сигналів.

Разом з тим, зазначені вище вимоги щодо пропускної здатності радіоліній зв'язку із БПЛА змушують розробників шукати нові підходи до вирішення проблеми підвищення швидкості передачі даних з багатосенсорних платформ у складі БПЛА. Одним з ефективних напрямів є використання OFDM модуляції сигналів. Серед перших проектів, в якому досліджувалась можливість застосування OFDM модуляції для зв'язку з БПЛА, слід вказати проект MinuteMan, що фінансувався Office of Naval Research (ONR) і здійснювався з 2000 року департаментами електротехніки і комп'ютерних наук університету Каліфорнії у Лос-Анжелосі UCLA [1] (рис. 1). Мета проекту — розробка системи радіозв'язку й обміну даними сил флоту з безпілотними повітряними, надводними і наземними апаратами. Серед напрямків проекту слід виділити наступні: розробка фундаментальних основ

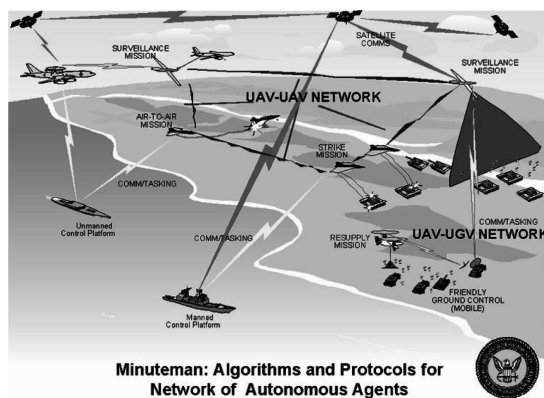


Рис. 1. Сутність проекту MinuteMan

організації рухомої бездротової інтелектуальної мережі зв'язку — “інтернет у небі”; надання динамічних послуг для потреб мережного обчислення; організація відмовостійкого зв'язку і самореконфігурації для розподілу інформації в реальному масштабі часу, керування задачами, ситуативна поведінка в сумнівному навколишньому середовищі; передача голосу, відео, зображень, даних у реальному масштабі часу з адаптивним QoS (Quality of Service) і керуванням ресурсами; передача голосу, відео, зображень, даних у реальному масштабі часу.

Як варіант застосування OFDM сигналів в радіолініях “БПЛА — наземні абоненти” доцільно навести проект Інституту електроніки та зв'язку Української академії наук зі створення системи передачі даних на базі висотного БПЛА (СПД “Фаетон”). При передачі даних у прямих каналах в цьому проекті пропонується використовувати стандарт DVB-S з модуляцією OFDM-256, а при передачі у зворотних напрямках (з землі на борт БПЛА) — стандарти множинного доступу TDMA та FDMA. Діапазон частот OFDM сигналів стандарту DVB-S, випромінюваних у зону обслуговування, становить 11,7—12,5 ГГц, смуга одного радіоканалу за рівнем мінус 30 дБ сягає 40 МГц. Граничний радіус зони обслуговування однією центральною станцією БПЛА при забезпеченні умов прямої радіовидимості, потужності передавача 50 мВт та інтенсивності опадів до 40 мм/год заявлено у межах 50—60 км. Разом з тим, за рахунок збільшення потужності бортового передавача радіус зони покриття сигналами одного БПЛА може бути збільшений до 250 км.

Слід вказати, що взагалі військовий напрям застосування OFDM сигналів постійно розширюється. Так, фірма Nova Engineering вже кілька років пропонує комплекти зв'язку для ВМС США, які реалізують принцип OFDM та випускаються серійно (HDR LOS Radio Modem). У сухопутних військах НАТО з'явилися системи зв'язку, що використовують військову версію протоколу 802.11g (OFDM), її виробництво освоїла нідерландська фірма MobiComm.

Американська компанія Aeronix Inc. пропонує готові модемні рішення для двостороннього зв'язку з БПЛА в сучасному стандарті WIMAX 802.16.2004 [2]. При цьому на відстані до 75 морських миль забезпечується швидкість передачі даних від 12 до 65 Мбіт/с. Габаритні розміри модема становлять 24 кубічних дюймів, вага — близько 360 г. Існує й мініверсія модема для спорядження малих БПЛА, яка вписується в об'єм 10 кубічних дюймів і має вагу близько 150 г. Модеми працюють в діапазонах 5,725—5,825 ГГц та 4,5—4,8 ГГц, в них фор-

мується відповідно 4 та 9 каналів зв'язку з шириною смуги пропускання 17 МГц. При обробці сигналів застосовуються дві проміжних частоти: 20 МГц та 570 МГц. Залежно від дальності зв'язку, швидкості руху БПЛА та заводої обстановки можуть застосовуватись різні види модуляції. При цьому відповідно змінюється максимальна пропускна здатність до величин: 6,0 Мбіт/с (BPSK); 15,0 Мбіт/с (QPSK); 22,5 Мбіт/с (8PSK1); 30,0 Мбіт/с (QAM16 або 16PSK1); 65,5 Мбіт/с (QAM64). Суттєво, що надійний зв'язок забезпечується при максимальному доплерівському зрушенні частоти, що відповідає взаємній швидкості пунктів прийому та передачі даних 2500 миль / год.

Окрім модуляції OFDM основний акцент має бути зроблений на використанні методів багатоканальної обробки сигналів, що у системах зв'язку з БПЛА може здійснюватися за двома напрямками. Перший з них базується на заміні традиційних антен цифровими антенними решітками (скорочено ЦАР) з використанням технології МІМО [3]. Другий напрям полягає у підвищенні пропускної здатності каналів зв'язку при обмеженій спектральній смузі за рахунок використання надрелеївського ущільнення сигналів за частотою.

У випадку застосування технології ЦАР підвищується заводостійкість зв'язку. Перехід до ЦАР дозволяє забезпечити одночасну роботу з кількома БПЛА на одну антену в порівняно широкому просторовому секторі, що дозволяє розширити кількість взаємодіючих засобів ретрансляції та розвідки.

Багатопроменеve поширення радіохвиль на пересіченій місцевості й множинні перевідбиття сигналів роблять актуальним використання для зв'язку з БПЛА технології МІМО, що також базується на застосуванні в засобах зв'язку цифрових антенних решіток.

Одним з перших прикладів використання МІМО технології для зв'язку з літальними апаратами є реалізація двоантенної передачі телеметричних даних з борта літального апарата на наземну станцію телеметрії [4]. Початок циклу публікацій з даної тематики датується 2002 р. Тоді в [5] була продемонстрована ефективність застосування найпростішої схеми просторово-часового кодування за алгоритмом Аламоуті для варіанта “2 бортові антени — один наземний приймач” (схема MISO, “багато входів — один вихід”, рис. 2). Наявність двох антен на корпусі БПЛА дозволила вирішити проблему підтримки надійного зв'язку при різних орієнтаціях корпусу БПЛА відносно напрямку на наземну станцію. Надалі в [6, 7] ця схема просторово-часового кодування одержала більш глибоке теоретичне обґрунтування, а ви-

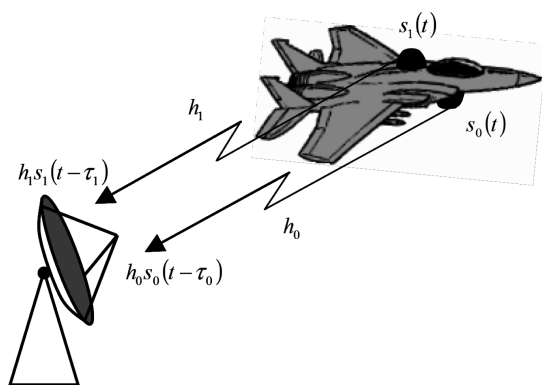


Рис. 2. Типова система MIMO за схемою "2С1" при вирішенні завдань бортової телеметрії

кладені в [8] експериментальні результати підтвердили його справедливості. У підсумку була експериментально доведена стаціонарність коефіцієнтів передачі MISO каналу протягом декількох секунд під час відсутності маневру літального апарата. Це створило передумови для розробки більш просунутих MIMO-рішень, що використовують багатоелементні антенні решітки.

Принцип MIMO використовується, наприклад, для прийому даних від бортових сенсорів вертолітного міні-БПЛА, розробленого Фраунгоферським інститутом хімічних технологій (ФРН). Відповідна 4-елементна антенна система приймально-передавальної станції зв'язку із БПЛА у діапазоні частот 2,4 ГГц (рис. 3) була представлена на виставці "TechDemo 08", що проводилася у вересні 2008 р. на військово-морській базі Еккернфьорде (ФРН) у рамках Робочої програми НАТО по боротьбі з тероризмом (DAT) Конференції національних директорів озброєнь (CNAD).

Основною умовою успішного застосування MIMO-систем, як відомо, є стаціонарність коефіцієнтів передачі радіоканалу з моменту їхнього оцінювання до завершення передачі масиву даних. Зрозуміло, що для малошвидкісних БПЛА ці умови дотримати набагато простіше, ніж для швидкісних, однак при прийомі сигналів у режимі відсут-

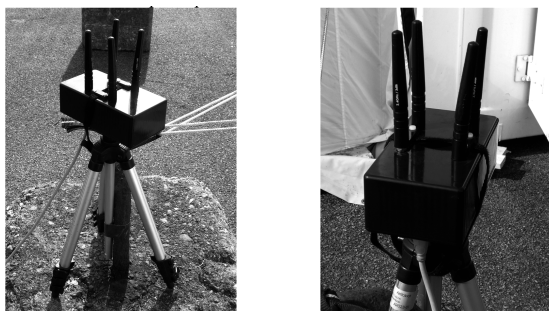


Рис. 3. Антенна система зв'язку з БПЛА за принципом MIMO

ності прямої видимості (N-LOS) умова псевдостационарності коефіцієнтів передачі сигналів по трасі їхнього поширення також може бути прийнята й для БПЛА, що рухаються з великою швидкістю.

Перспектива поширення БПЛА в бойових порядках сучасних військ робить необхідним забезпечення одночасного зв'язку з кількома БПЛА, що перебувають у польоті. У цьому випадку заслуговує на увагу узагальнення технології MIMO, що одержала найменування мульти-MIMO. Прикладом її ефективного застосування є робота [9], у якій багатокористувальницьке узагальнення MIMO запропоноване для тропосферного зв'язку. Треба, однак, відзначити, що проблемним питанням забезпечення зв'язку із БПЛА в бойових умовах є забезпечення надійної передачі даних в умовах впливу активних перешкод. Донедавна цій проблемі приділялася недостатня увага. Тому поребує уваги розгляд можливих підходів до придушення активних перешкод у багатокористувальницькій системі MIMO, що забезпечує одночасний зв'язок з кількома БПЛА.

Традиційним підходом до придушення перешкод у системі MIMO може бути формування нулів у діаграмі спрямованості вторинних просторових каналів цифрової антенної решітки (ЦАР). Альтернативний варіант, запропонований, наприклад, в [10], полягає у застосуванні двоетапної процедури демодуляції амплітуд по виходах приймальних каналів ЦАР. Стосовно мульти-MIMO системи при цьому можна розглядати два випадки:

- а) сигнал перешкоди від точкового джерела поширюється без перевідбиттів і приходить у вигляді плоскої хвилі;
- б) сигнали перешкод піддаються множинним перевідбиттям і приходять на приймальну ЦАР у вигляді суперпозиції кількох плоских хвиль (у цьому випадку завадовий сигнал від одиночного джерела можна розглядати як еквівалентну сукупність множини перешкод).

Зазначені моделі прийому сигналів на тлі завад цілком доречні й у випадку зв'язку із БПЛА. При цьому передбачається, що на етапі входження у зв'язок формуються оцінки кутових координат джерел завад, необхідні для їхньої просторової селекції.

Виходячи з аналізу перспективних методів цифрової обробки сигналів, в основу функціонування засобів зв'язку із БПЛА варто покласти застосування методу неортогональної частотної дискретної модуляції (надалі N-OFDM), з неортогональним розміщенням частот піднесучих, що дозволяє звузити спектральну смугу сигналів [11]. Однак, інтеграція зазначених підходів в інтересах рішення завдань зв'язку із

БПЛА раніше не пророблялася. З огляду на вищесказане, можна констатувати актуальність досліджень з цього напрямку.

При використанні технології МІМО, як відомо, виникають труднощі у формуванні цифрової діаграми спрямованості антенної решітки, пов'язані з підвищенням швидкості оцифровування сигналів (частота дискретизації до 100 МГц і більше), що приводить до збільшення фінансових і масогабаритних показників радіоприймальних пристроїв.

Відомі два основних варіанти обробки сигналу: квадратурний і безквадратурний. Для зменшення бортової апаратури БПЛА перевагу варто віддати безквадратурній схемі. Однак вона характеризується високим рівнем бічних пелюстків амплітудно-частотної характеристики (АЧХ), що приводить до зниження завадозахищеності. Крім того, необхідність врахування комплексно-сполученої складової (КСС) у сигнальному відліку, значно ускладнює обробку сигналу.

Тому в [12] був запропонований удосконалений метод додаткового стробування відліків АЦП із використанням попередньої цифрової фільтрації, що разом утворили тандемну процедуру розквадратурення сигналів у приймальних ЦАР.

Для розрахунку вагових коефіцієнтів тандемного фільтра була розроблена методика синтезу цифрових квадратурних демодуляторів довільного порядку [13].

Розглянутий тандемний метод фільтрації відліків АЦП характеризується відсутністю амплітудних погрешностей і малих фазових помилок у межах основного пелюстка АЧХ. Зазначені переваги тандемної фільтрації послужили підставою для інтеграції перспективних інформаційних технологій багатоканальної обробки сигналів у багатокористувальницькому режимі (мульти-) МІМО з урахуванням тандемної фільтрації. Це удосконалення дозволяє:

- знизити позасмутовий прийом сигналів (на 40 і більше дБ);
- забезпечити одночасну роботу з кількома БПЛА (до 16 і більше);
- збільшити пропускну здатність каналу зв'язку в умовах завад.

Досягнутого рівня придушення КСС сигналів у запропонованій тандемній фільтрації (від 80 до 270 дБ, залежно від порядку I/Q-демодулятора) досить, щоб відмовитися від врахування КСС сигналів при їхній обробці у безквадратурних приймачах ЦАР. При цьому може бути у 2 рази скорочена кількість модулів АЦП, у 2 рази зменшена кількість підсилювачів проміжної частоти, що дозволяє спростити приймальне обладнання й здешевити його виробництво.

Цифрове обладнання для наземних і бортових вузлів зв'язку з БПЛА пропонується

стандартизувати за специфікацією VITA 65. Це забезпечить дотримання вимог до бортового й наземного сегментів системи зв'язку із БПЛА з вібростійкості та удароміцності, а також стійкості до впливу кліматичних факторів. Такий підхід дозволяє вибудувати загальну ідеологію апаратної реалізації цифрового сегмента бортового й наземного устаткування комплексу зв'язку з БПЛА.

В цілому, спираючись на розглянуті інформаційні технології, можливо зробити наступні **висновки**:

- використання методу тандемної фільтрації дозволяє підвищити завадозахищеність від позасмутових завад, спростити апаратну реалізацію обладнання зв'язку;
- за рахунок придушення комплексно-сполученої складової сигналу можуть бути збільшені завадозахищеність і пропускну здатність радіоліній;
- спираючись на можливості ЦАР щодо супроводу БПЛА максимумами діаграми спрямованості, слід розраховувати на зростання розвідзахищеності каналів зв'язку через просторові обмеження у випромінюванні сигналів.

Зазначені ефекти, що притаманні застосуванню запропонованих перспективних інформаційних технологій, дозволяють віддати перевагу розглянутим методам обробки сигналів та схемотехнічним рішенням при розробці новітніх БПЛА на період до 2025 року.

Література

1. Overview of UCLA MinuteMan-Project. — <http://www.icsl.ucla.edu/minutesman>.
2. Aeronix 802.16 UAV EDL Digital Data Link. — http://www.aeronix.com/products/uav_sensor_data_link.
3. В. Слюсар. Системы МІМО: принципы построения и обработка сигналов // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. — 2005. — № 8. — С. 52—58.
4. Tom Nelson. Space-Time Coding with Offset Modulations. A dissertation for the degree of Doctor of Philosophy // Department of Electrical and Computer Engineering, Brigham Young University. — December, 2007.
5. R. C. Crummett, M. A. Jensen and M. D. Rice. Transmit diversity scheme for dual-antenna aeronautical telemetry systems, in Proceedings of the 38th International Telemetry Conference, San Diego, CA, October 21—24, 2002, p. 113—121. — <http://www.ee.byu.edu/~mdr/publications/CrummettJensenRice-ITC2002.pdf>.
6. M. Jensen, M. Rice, T. Nelson and A. Anderson "Orthogonal dual-antenna transmit diversity for SOQPSK in aeronautical telemetry channels," in Proceedings of the International Telemetry Conference, San Diego, CA, October 2004, p. 337—344. — <http://www.ee.byu.edu/~mdr/publications/JensenRice-ITC2004.pdf>.
7. M. Jensen, M. Rice and A. Anderson "Comparison of Alamouti and differential space-time codes for aeronautical telemetry dual-antenna transmit diversity," in Proceedings of the International Telemetry Conference, San Diego, CA, October 2004, p. 345—354. — <http://www.ee.byu.edu/~mdr/publications/JensenRice-ITC2004-2.pdf>.
8. Tom Nelson, Michael Rice and Michael Jensen "Experimental Results for Space-Time Coding Using ARTM Tier-1 Modulation," in Proceedings of the International Telemetry Conference, Las Vegas, NV, October 2005, p. 90—100. — <http://www.ee.byu.edu/~mdr/publications/NelsonRiceJensenITC05.pdf>.
9. Слю-

- сар **В.І.** Метод просторово-часового кодування сигналів тропосферного зв'язку на основі удосконаленої технології мульти-МІМО / В.І. Слюсар, М.О. Масесов // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ "КПІ". — 2009. — Вип. 1. — С. 132—136. **10. Слюсар В.І.** Метод помехозащищенной демодуляции сигналов N-OFDM в приемном сегменте ЦАР / В.І. Слюсар, С.В. Волошко // XV Международная научно-техническая конференция "Информационные системы и технологии (ИСТ-2009)". — Нижегородский госуд. технич. ун-т им. Р.Е.Алексеева. — 2009. — С. 6. **11. Слюсар В.І.** Частотное уплотнение каналов связи на основе сверхрелеевого разрешения сигналов / В.І. Слюсар, В.Г. Смоляр // Известия вузов. Сер. Радиоэлектроника. — 2003. — Том 46, № 7. — С. 22—27. **12. Патент** України на корисну модель № 46666. МПК (2006) G01S 7/36, H03D 13/00. Спосіб додаткового стробування відліків аналого-цифрового перетворювача / В.І. Слюсар, М.В. Малярчук. — Заявка на видачу патенту України на корисну модель № u200909210 від 07.09.2009. — Патент опубліковано 25.12.2009, бюл. № 24. **13. Слюсар В.І.** Методика синтезу I/Q-демодуляторів произвольной размерности / В.І. Слюсар, М.В. Малярчук, М.В. Бондаренко // III Міжнародний науково-технічний симпозіум "Нові технології в телекомунікаціях" — (ДУІКТ — Карпати '2010, с. Вишків). тези доповідей. — Київ: Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій. — 2—5 лютого 2010. — С. 53—55.

В статье обосновывается методология использования совокупности усовершенствованных инновационных информационных технологий для решения задач

эффективной связи с перспективными беспилотными летательными аппаратами.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, метод тандемной фильтрации, разведзащищенность, метод обработки сигналов.