https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-359-43
УДК 004.934:004.7:004.056.5

ЛАВДАНСЬКИЙ АРТЕМ
Черкаський державний технологічний університет
https://orcid.org/0000-0002-1596-4123
e-mail: a.lavdanskyi@chdtu.edu.ua
КОРОБЕЙНИК ЮРІЙ
Черкаський державний технологічний університет
https://orcid.org/0009-0004-6096-5725
e-mail: yu.o.korobeinyk.asp24@chdtu.edu.ua
ЛАВДАНСЬКА ОЛЬГА
Черкаський державний технологічний університет
https://orcid.org/0000-0001-5571-2281
e-mail: o.yehorova@chdtu.edu.ua
ГРЕСЬКО СВІТЛАНА
Черкаський державний технологічний університет
https://orcid.org/0000-0002-4049-4530
e-mail: s.hresko@chdtu.edu.ua

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПРОТОКОЛІВ ВІДДАЛЕНОГО КЕРУВАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ФАКТОРІАЛЬНОГО КОДУВАННЯ

У роботі представлено аналітичний огляд сучасних протоколів керування віддаленими безпілотними об'єктами, що активно застосовуються у різних сферах діяльності — від авіації, промислового виробництва та сільського господарства до військової справи, логістики, рятувальних операцій і екологічного моніторингу. Розглянуто ключові технічні характеристики, переваги та обмеження найбільш поширених протоколів, серед яких AFHDS, DSMX, FHSS-системи Futaba, FASST/FASSTest, ACCST/ACCESS, TBS Crossfire та інші. Проведено порівняльний аналіз їх можливостей у контексті забезпечення надійності передачі команд, рівня завадостійкості, підтримки телеметрії, дальності зв'язку та швидкості реакції на зміну умов експлуатації.

Особливу увагу приділено вимогам до сучасних протоколів, здатних гарантувати стабільний і захищений канал управління в умовах підвищеного рівня електромагнітних перешкод, обмеженої пропускної здатності та ризиків зовнішнього втручання. Визначено проблеми, що залишаються актуальними: затримка сигналу, енергоспоживання модулів зв'язку, інтеграція з автономними системами навігації, а також забезпечення інформаційної безпеки на рівні шифрування даних і автентифікації користувача.

Окремо розглянуто перспективи розвитку протоколів, пов'язані з використанням технологій 5G, супутникових каналів зв'язку та нових методів завадостійкого кодування. Акцентовано на важливості стандартизації протоколів для забезпечення сумісності обладнання різних виробників і створення єдиного інформаційного простору для керування безпілотними системами. У підсумку визначено основні характеристики, якими повинен володіти надійний протокол керування: висока завадостійкість, низька затримка, розширена телеметрія, гнучкість налаштувань та можливість масштабування у складних багатоканальних системах.

Ключові слова: *безпілотні об'єкти, протоколи керування, факторіальне кодування, телеметрія, завадостійкість, FHSS, DSSS, ACCST, ACCESS, Crossfire.*

LAVDANSKYI ARTEM, KOROBEINYK YURII,
LAVDANSKA OLHA, HRESKO SVITLANA
Cherkasy State Technological University

ANALYSIS OF MODERN REMOTE CONTROL PROTOCOLS AND PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF FACTORIAL CODING

The paper presents an analytical review of modern control protocols for remote unmanned systems, which are actively applied in various fields of activity — from aviation, industrial production, and agriculture to defense, logistics, rescue operations, and environmental monitoring. The study examines the key technical characteristics, advantages, and limitations of the most widely used protocols, including AFHDS, DSMX, Futaba FHSS systems, FASST/FASSTest, ACCST/ACCESS, TBS Crossfire, and others. A comparative analysis of their capabilities is provided in the context of ensuring reliable command transmission, interference resistance, telemetry support, communication range, and responsiveness to changing operational conditions.

Special attention is given to the requirements for modern protocols that can guarantee stable and secure control channels under conditions of increased electromagnetic interference, limited bandwidth, and risks of external intervention. The paper highlights the problems that remain relevant, including signal delay, energy consumption of communication modules, integration with autonomous navigation systems, and information security at the levels of data encryption and user authentication.

The prospects for protocol development are also considered, with emphasis on the use of 5G technologies, satellite communication channels, and new methods of interference-resistant coding. The importance of protocol standardization is underlined to ensure compatibility between equipment from different manufacturers and to create a unified information space for controlling unmanned systems. In conclusion, the essential characteristics of a reliable control protocol are defined: high interference resistance, low latency, extended telemetry, configuration flexibility, and scalability in complex multichannel systems.

Keywords: *unmanned systems, control protocols, factorial coding, telemetry, interference resistance, FHSS, DSSS, ACCST, ACCESS, Crossfire.*

Стаття надійшла до редакції / Received 27.10.2025
Прийнята до друку / Accepted 15.11.2025

Постановка проблеми у загальному вигляді
та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

У сучасних умовах використання віддалених безпілотних об'єктів стає не просто інновацією, а необхідністю для ефективного вирішення задач у різних галузях діяльності. Сучасні виклики, такі як потреба у підвищенні безпеки, зменшенні людського фактору, роботі в умовах, небезпечних для життя людини та необхідності оперативного реагування на надзвичайні ситуації, змушують активно впроваджувати дистанційно керовані пристрої. Протоколи керування безпілотними об'єктами стають ключовими елементами для забезпечення стабільності, безпеки й оперативності роботи систем у сферах промисловості, військової справи, рятувальних операцій та екологічного моніторингу. Проте ефективність та безпечність таких систем багато в чому залежить від надійних і захищених методів керування, здатних забезпечувати стабільний зв'язок, точність управління і захист від втручання третіх осіб. Саме тому аналіз та удосконалення технологій керування безпілотними засобами, а також розробка нових ефективних протоколів їх взаємодії набувають особливої актуальності.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: аналітичний огляд існуючих протоколів керування віддаленими безпілотними об'єктами та визначення характеристик, якими повинен володіти надійний протокол керування віддаленими безпілотними об'єктами, зокрема за використання системи завадостійкого інформаційного обміну на основі перестановок [1].

Для досягнення мети необхідно виконати наступні задачі:

- виконати огляд сучасних протоколів керування віддаленими безпілотними об'єктами;
- виконати порівняльний аналіз основних характеристик розглянутих протоколів;
- визначити основні вимоги до сучасного протоколу керування віддаленими безпілотними об'єктами.

Виклад основного матеріалу

Розглянемо основні сучасні протоколи керування для віддалених безпілотних об'єктів, їх історію, технічні характеристики та можливості.

Компанія FlySky – виробник недорогих радіосистем для початківців, відома своїми передавачами FS-i6, FS-i6X, FS-i10 тощо. Протокол AFHDS (Automatic Frequency Hopping Digital System) першого покоління з'явився близько 2010 р. в 6-канальних апаратурах FlySky, надаючи базовий зв'язок без телеметрії. Його розвитком став AFHDS 2A (друге покоління, версія A), представлений у 2014 р. Саме AFHDS 2A нині використовується у більшості передавачів FlySky і сумісних систем (Turnigy Evolution, iRangeX тощо). Це простий, але дієвий протокол для простих задач [2].

Протокол AFHDS 2A – це протокол, що працює на частоті 2,4 ГГц з використанням псевдовипадкового перелаштування робочої частоти FHSS та цифрової модуляції GFSK. Діапазон 2,408-2,475 ГГц поділений на 135 підканалів по 500 кГц, які передавач постійно змінює. Протокол підтримує як односторонній режим для простих приймачів, так і двосторонній режим з телеметрією. Більшість сучасних приймачів (FS-iA6B, FS-iA10B, X6B) – двосторонні.

Протокол AFHDS 2A може передавати до 14 каналів керування. Наприклад, приймач FS-iA10B має 10 PWM-виходів, а через цифровий вихід i-Bus може видавати ще декілька каналів (всього до 14). Розрядність сигналу становить 12 біт.

Стандартна частота кадрів AFHDS 2A складає близько 9 мс при 8 каналах (111 Гц) у швидкісному режимі, та близько 18 мс (55 Гц) при 14 каналах. У протоколі реалізований гнучкий механізм зміни частоти: є можливість виставити бажану частоту кадру від 50 Гц до 400 Гц. Затримка AFHDS 2A невелика – близько 15 мс (при 6-10 каналах).

Одне з вагомих удосконалень 2A над 1A – наявність телеметрії. Приймачі FS-iA6B, X6B та інші мають вбудований датчик напруги і можуть передавати інформацію про рівень RSSI та напругу приймача назад у передавач. Також через порт Ain2 на деяких приймачах можна підключити зовнішній датчик напруги батареї. Дані телеметрії відображаються на екрані апаратури (наприклад, FS-i6X) у режимі реального часу. Асортимент датчиків у FlySky обмежений (простий висотомір, датчик температури, GPS), і їхня інтеграція не така зручна, як у інших виробників. Телеметрія передається з періодичністю кілька разів на секунду, чого достатньо для моніторингу. Загалом, AFHDS 2A забезпечує базовий рівень телеметрії для безпечного польоту.

Приймач FS-iA6B має дальність понад 500 м. Реальні користувачі досягали відстані до 1 км на FS-i6 за прямої видимості, однак варто врахувати: система менш завадостійка, ніж аналоги.

Spektrum (бренд компанії Horizon Hobby) була однією з перших компаній, що почали впровадження систем керування на частоті 2,4 ГГц у радіокеруванні моделей. Протокол DSM2 з'явився близько 2005 р., ставши одним із перших масових DSSS-протоколів (Direct Sequence Spread Spectrum) для керування віддаленими об'єктами. DSM2 (Digital Spectrum Modulation 2) використовував технологію розширення спектру з унікальним кодом для кожного передавача (GUID) та прив'язкою приймача, що виключало взаємні перешкоди між передавачами. У 2010 р. Spektrum представив удосконалений протокол DSMX, сумісний з DSM2, але більш завадостійкий [3].

Протокол DSM2 базується на множинному доступі з кодовим розділенням каналів (CDMA): сигнал модулюється власним кодом і займає широку смугу, що забезпечує стійкість до шумів та перешкод на одній частоті. При увімкненні передавач DSM2 обирає дві вільні частотні піднесучі (канали) в діапазоні 2,4 ГГц і

постійно веде передачу тільки на них. Якщо одна частота зашумлена, зв'язок може підтримуватися на іншій. Проте, в разі глушення обох обраних частот, зв'язок втрачається. Це обмеження усунуто в DSMX – він додатково використовує FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum), динамічно перестрибуючи між 23 частотними каналами за псевдовипадковою послідовністю, синхронізованою між передавачем і приймачем. Перемикання частот відбувається дуже швидко (тисячі разів на секунду), тому навіть у разі перешкод на частині з них сигнал не втрачається, а лише можливі непомітні мікропаузи. Обидва протоколи використовують цифрову модуляцію з розширеним спектром у межах дозволеного ISM-діапазону 2,4 ГГц.

DSM2/DSMX підтримують від 6 до 9 каналів керування у ранніх системах, пізніше розширені до 11-12 і навіть 18-20 каналів у найновіших передавачах (наприклад, серія iX від Spektrum). Спершу розрядність каналів становила 10 біт, згодом її підвищили до 11 біт для точнішого керування. Стандартний інтервал посилання кадрів – 22 мс (45 Гц). У швидкісному режимі пауза між кадрами складає 11 мс (90 Гц). Варто зазначити, що при збільшенні числа каналів понад 7 протокол автоматично переходить на нижчу частоту кадрів, рівну близько 45 Гц.

Протоколи DSM2/DSMX працюють у смузі 2400-2483,5 МГц з малою вихідною потужністю (до 100 мВт), використовуючи близько 80 доступних каналів шириною 1 МГц. Типова дальність повноцінного зв'язку сягає близько 1-2 км на відкритому просторі за прямої видимості.

Ранні версії DSM2 не підтримували зворотного каналу, проте сучасний DSMX дозволяє передавати базові телеметричні дані (наприклад, напругу бортового акумулятора, RSSI тощо) від приймача до апаратури. Телеметрія здійснюється в паузах між основними пакетами керування і має обмежену пропускну здатність. У деяких приймачах Spektrum реалізовано лише низькопотужний режим телеметрії для близької відстані, тому в разі віддалення більш ніж на кілька десятків метрів показники можуть зникати. У повнорозмірних приймачах DSMX телеметрія функціонує на повну дальність, хоча частота оновлення даних від датчиків невисока (типово 1-2 рази на секунду для параметрів типу висоти чи GPS). Загалом DSMX забезпечує двосторонній зв'язок, достатній для базової телеметрії, але поступається за обсягом даних новішим протоколам з ширшим каналом.

Futaba – інший провідний виробник апаратур керування, пропонує власні протоколи FASST та сімейство FHSS-протоколів. Близько 2011 р. з'явився S-FHSS (Secure/Simple FHSS) – друге покоління протоколів Futaba для масових передавачів середнього та початкового рівня. Згодом йому на зміну прийшов T-FHSS (Telemetric FHSS) – третє покоління, що додало можливості телеметрії. Обидва ці протоколи працюють на частоті 2,4 ГГц і є взаємонесумісними між собою (приймачі S-FHSS не працюють з T-FHSS і навпаки), хоча деякі передавачі Futaba підтримують декілька протоколів одночасно для зворотної сумісності [4].

Протоколи S-FHSS та T-FHSS використовують псевдовипадкове перелаштування робочої частоти (FHSS) зі швидким перемиканням між декількома десятками робочих частот в межах діапазону 2,4 ГГц. Смуга поділена приблизно на 30 каналів по 1,5 МГц, якими передавач і приймач користуються синхронно в псевдовипадковому порядку. Модуляція – цифрова GFSK, характерна для багатьох FHSS-систем. S-FHSS є однонапрямним протоколом без телеметрії, натомість T-FHSS – двонапрямний (має зворотній канал для телеметрії). Оскільки телеметрія потребує часу ефіру, T-FHSS дещо повільніший або має меншу максимальну кількість каналів, проте Futaba оптимізувала його, щоб користувач не відчував різниці у керуванні.

Протокол S-FHSS в авіамоделях підтримує до 8 каналів керування. У бюджетних передавачах (типу Futaba 6J, 8J) зазвичай використовується 6-8 каналів. Протокол T-FHSS розширює цю кількість до 14 каналів PWM (12 пропорційних + 2 перемикачі) при використанні стандартних виходів, або до 18 каналів при застосуванні цифрової шини S.Bus. Фактично T-FHSS дає можливість передати 16 пропорційних і 2 цифрових сигнали (ідентично до старшого FASSTest), однак більшість недорогих передавачів Futaba мають не більше 10-14 фізичних каналів, тому на практиці ця кількість складає 10-14. Перевагою T-FHSS є наявність ідентифікатора моделі (Model ID) – унікального коду, що зберігається в приймачі і має співпасти з передавачем, щоб уникнути випадкового керування чужим об'єктом.

Протокол S-FHSS забезпечує досить швидке оновлення каналів – типовий інтервал кадру 14-20 мс. Для сумісності може використовуватися режим 20 мс.

Розрядність керуючих каналів у FHSS-протоколах Futaba становить 11 біт.

Протокол S-FHSS не підтримує телеметрію – він призначений тільки для управління віддаленим об'єктом. Натомість T-FHSS передбачає двосторонній зв'язок: приймачі оснащені портом S.Bus2 для підключення телеметричних датчиків (GPS, висота, температура, оберти тощо). Дані телеметрії передаються в проміжках між основними пакетами керування; частота оновлення різниться залежно від типу датчика (зазвичай 1-10 Гц). З огляду на обмежену пропускну здатність каналу 2,4 ГГц, T-FHSS може одночасно передавати лише кілька параметрів з прийнятною швидкістю, але цього достатньо для контролю напруги, висоти, температури та ін. Таким чином, T-FHSS надає користувачу повноцінний набір телеметрії, аналогічний тому, що доступний у дорожчих системах Futaba (FASSTest).

Заявлена дальність протоколів S-FHSS і T-FHSS сягає 1-1,5 км (за сприятливих умов), що підтверджується практикою використання в радіокерованих об'єктах. Наприклад, 8-канальний приймач R2008SB у комбінації з передавачем 8J забезпечує стабільний контроль на дистанції понад 1000 м. Різниця між S- і T-варіантами у контексті дальності мінімальна: незважаючи на наявність телеметрії, протокол T-FHSS має дальність, подібну до FASSTest (а отже, не гіршу за S-FHSS). Для обох протоколів Futaba застосовує ефективну систему рознесеного прийому (dual antenna diversity) в приймачах, що підвищує надійність зв'язку на межі дальності.

Протокол FASST (Futaba Advanced Spread Spectrum Technology) – технологія компанії Futaba, впроваджена

приблизно у 2007 р. для флагманських передавачів. FASST зарекомендував себе як надзвичайно надійний і завадостійкий протокол, що здобув популярність серед професійних користувачів. Спочатку він був однонапрямним (тільки керування, без телеметрії). Пізніше, з розвитком вимог ринку, Futaba представила розширену версію FASSTest (2012 р.), де додано телеметрію (Test у даному контексті означає Telemetry System). FASSTest використовується у сучасних апаратурах Futaba (наприклад, T14SG, T16SZ, T18MZ тощо) і забезпечує зворотну сумісність: передавач може працювати як в режимі FASSTest (з телеметрією), так і в режимі класичного FASST.

Протокол FASST поєднує методи FHSS і DSSS для забезпечення стійкості зв'язку. Він ділить діапазон 2,4 ГГц на численні канали (близько 36) і переключається між ними за певним алгоритмом. Проте, точні подробиці роботи не поширюються компанією Futaba.

У передавачах Futaba існує перемикання режимів FASST: 7-канальний (FASST-7) і мультиканальний (FASST-Multi) режими. FASST-7 застосовувався у відносно простих моделях (наприклад, T7C), забезпечуючи до 7 каналів PWM. Режим Multi призначений для старших систем і може передавати до 18 каналів (16 пропорційних + 2 перемикачі) одночасно. Розрядність сигналів FASST – 10 або 11 біт (залежно від налаштувань швидкості). З появою приймачів з цифровою шиною S.Bus Futaba фактично реалізувала передачу 16 каналів навіть на 14-канальних передавачах (додаткові канали могли бути виведені через S.Bus).

Протокол FASSTest є розвитком FASST. Він також працює за принципом FHSS+DSSS у діапазоні 2,4 ГГц, але містить зворотній канал для телеметрії. Через це структура кадру FASSTest гнучкіша: Futaba передбачила три режими FASSTest залежно від потреб користувача: 18-канальний режим (18 каналів: 16 пропорційних + 2 перемикачі) та повна підтримка всіх телеметричних датчиків; 14-канальний режим (до 14 каналів (12+2) і повна телеметрія; 12-канальний режим (до 12 каналів (10+2) із пріоритетом швидкодії).

У режимі FASSTest 12CH частота кадрів становить близько 7 мс (142 Гц), тоді як у 18CH – близько 14-16 мс (60-70 Гц). Роздільна здатність каналів – 11 біт у режимах 14CH/18CH і може бути підвищена до 12 біт у швидкісному 12CH. Це дозволяє дуже плавно керувати об'єктом. Затримка від передавача до приймача вимірюється одиницями мілісекунд.

Ключова відмінність FASSTest – наявність телеметрії. Приймачі передають у передавач інформацію про напругу бортового живлення, силу сигналу, а підключені через S.Bus2 датчики – дані про стан моделі (GPS-координати, висоту, швидкість, температуру двигуна, струм тощо). Телеметрія працює у режимі реального часу з частотою оновлення 1-10 Гц залежно від параметра. Наприклад, висота може оновлюватися 5-10 разів на секунду, тоді як стан батареї – раз на секунду. Передавачі Futaba з екраном або голосовим виходом (T18MZ, 16SZ тощо) відображають/озвучують ці дані. У режимі 18CH телеметрія передається повністю, але може мати знижену частоту оновлення каналів; у режимі 12CH майже вся пропускна здатність віддана керуванню, тому телеметрія обмежена (для мінімізації затримки).

Протоколи FASST та FASSTest мають винятково велику дальність зв'язку. При стандартній потужності 100 мВт і двохантенному приймачі досягається стабільне керування на відстанях 2-3 км (за прямої видимості). В польових умовах моделі з FASSTest можуть керувати на відстанях до 5-6 км без втрати сигналу за використання передавачів із підсиленням або сприятливих умов.

Протокол ACCST (Advanced Continuous Channel Shifting Technology) – це протокол, розроблений компанією FrSky (Китай) у кінці 2000-х як недорога та відкрита альтернатива системам інших виробників. Перші версії ACCST з'явилися у формі модулів DJT/DHT для встановлення в передавачі Futaba або JR, а з 2012 р. FrSky випустила власні передавачі (Taranis X9D тощо) з вбудованим ACCST. Протокол швидко здобув популярність завдяки доступній ціні, надійності і активному розвитку. У 2019 р. йому на зміну прийшов новий протокол ACCESS, але ACCST досі широко використовується, особливо у вигляді ACCST D16 (16-канальний режим) [5, 6].

ACCST – це протокол з перелаштуванням робочої частоти у діапазоні 2,4 ГГц. Назва "Continuous Channel Shifting" вказує на те, що передавач постійно змінює частоти каналів за визначеним псевдовипадковим алгоритмом, узгодженим з приймачем. Це аналогічно до принципу роботи DSMX чи Futaba FHSS: у кожному кадрі керування використовується нова піднесуча частота, обрана із понад 40 доступних у смузі. Модуляція – FHSS з двофазною маніпуляцією GFSK. Протокол ACCST версії 1 забезпечував двонапрямний зв'язок: невелика частина кадру зарезервована під телеметричні дані від приймача. Версія ACCST v2 (2020 р.) поліпшила стабільність і виправила деякі помилки, зберігши зворотну сумісність по радіоінтерфейсу. Приймачі ACCST поділяються на стару лінійку D8 (8-канальні, застарілі) та актуальнішу X-серію (протокол D16, 16 каналів).

У режимі D8 передаються 8 каналів керування з базовою розрядністю 10 біт. Цей режим підтримувався першими передавачами FrSky та сумісний з деякими дрібними приймачами. Режим D16 (ACCST 16) передає 16 каналів (у 2 групах по 8 каналів) з розрядністю 11 біт. Фактична частота оновлення залежить від налаштувань: існує опція High Speed в модулях FrSky XJT, яка обмежує кількість каналів вісьмома і вимикає телеметрію задля прискорення. У стандартному режимі D16 з 16 каналами і телеметрією кадри надсилаються приблизно кожні 18 мс (55 Гц). В режимі високої швидкості (8 каналів, без телеметрії) інтервал скорочується до 9 мс (110 Гц). Це означає, що користувач може обирати між максимальною кількістю каналів або нижчою затримкою залежно від задачі.

Протокол ACCST працює на тих же частотах 2,4 ГГц і з потужністю 100 мВт. Протокол забезпечує впевнений контроль на відстанях до 1,5-2 км. Тестові польоти показали, що навіть за потужності 100 мВт звичайний ACCST-приймач X8R може не втрачати сигнал на відстані 2 км.

Однією з новацій FrSky було впровадження розгалуженої телеметрії у бюджетному сегменті. Протокол ACCST D16 підтримує одночасну роботу кількох датчиків через Smart Port (S.Port) – послідовний інтерфейс, яким датчики послідовно з'єднуються з приймачем. Значення висилаються приймачем у передавач, зазвичай з інтервалом 1-2 рази/сек для кожного датчика. Хоча цей канал не надто швидкісний, його достатньо для моніторингу стану батареї, GPS-координат, висоти, струму тощо під час польоту. На екрані передавача Taranis можна одночасно бачити десяток параметрів. Під час критичних подій (низький заряд, втрата сигналу) передавач генерує звукові та голосові попередження. Важливо, що передача телеметрії дещо знижує загальну швидкість оновлення каналів, тому для деяких застосувань інколи відключають телеметрію. Але для більшості завдань ACCST надає збалансований двосторонній зв'язок без суттєвого впливу на керування.

Протокол ACCESS (Advanced Communication Control, Elevated Spread Spectrum) – новітній протокол від FrSky, представлений у 2019 р. Його розроблено на основі досвіду з ACCST, аби підвищити продуктивність і додати нові функції. ACCESS використовується у передавачах серії Horus, Tandem, Taranis X-lite Pro тощо і поступово витісняє ACCST у нових моделях. Головні акценти ACCESS – збільшення кількості каналів, зменшення затримки, покращений захист від перешкод і розширена функціональність (бездротове оновлення прошивок, гнучке прив'язування приймачів).

Як і попередник, ACCESS є протоколом з використанням FHSS на 2,4 ГГц, проте використовує вдосконалені методи модуляції і широкосмуговий канал. Доступно до 24 каналів керування, що на 50 % більше, ніж у ACCST. У протоколі реалізовано шифрування та автентифікацію зв'язку, аби виключити можливість перехоплення чи втручання. Введено концепцію «Smart Match» – приймач можна прив'язати до нового передавача без натискання кнопки, віддалено через ефір. Також з'явилася можливість OTA-оновлення прошивки приймачів – передавач бездротово перепрошиває приймачі на борту віддаленого об'єкта. Ці функції значно полегшують експлуатацію безпілотних системи.

Протокол ACCESS підтримує режими з різною кількістю каналів і відповідною швидкодією. Стандартні режими наступні: 8-канальний режим (для сумісності або мінімальної затримки), 16-канальний і 24-канальний. В 8CH-режимі досягається наднизька затримка – всього 11 мс. Це приблизно на 40% швидше, ніж у ACCST, тобто частота кадрів складає 90 Гц. У 16- і 24-канальних режимах затримка залежить від навантаження: 14 мс при невеликій кількості каналів і до 23 мс при повному завантаженні 24 каналами. Навіть у гіршому випадку це співмірно з ACCST, а у кращому – значно перевершує. Таким чином ACCESS дає змогу обирати: або дуже низьку затримку на 8 каналах, або більше каналів для складних БПЛА з підвісами, камерами тощо. Розрядність сигналів залишається 11 біт.

Пропускна здатність зворотного каналу ACCESS також зросла (на 60% порівняно з ACCST). Це означає швидше оновлення телеметричних даних і підтримку більшої кількості датчиків одночасно. Протокол сумісний із існуючими датчиками FrSky (на S.Port) та підтримує нові типи пристроїв. З'явилася функція спектроаналізатора в передавачі – вона дозволяє сканувати ефір 2,4 ГГц на предмет шумів, використовуючи приймач у режимі моніторингу. Це стало можливим завдяки двонаправленості ACCESS і достатній ширині каналу. Такі особливості корисні за необхідності обрати вільніший канал або виявити джерело перешкод.

Протокол Team BlackSheep (TBS) Crossfire – це протокол, що концентрується на забезпеченні віддаленого радіозв'язку. Випущений у 2015 році, Crossfire переносить управління з 2,4 ГГц на нижчу частоту 900 МГц. Система спроектована для польотів на десятки кілометрів [7].

Протокол TBS Crossfire працює в діапазонах 868 МГц (Європа) або 915 МГц (США) – ці частоти нижчі за 2,4 ГГц, що дає краще проникнення сигналу та більшу далекобійність за тої самої потужності. Протокол використовує модуляцію LoRa (Long Range) – вид розширення спектру з широкосмуговими сигналами, дуже стійкими до шуму. Це дозволяє досягти неймовірно високої чутливості приймача (до -130 дБм) при вузькій смузі пропускання. Crossfire – повністю двосторонній і адаптивний протокол: він динамічно змінює параметри зв'язку залежно від умов. Якщо сигнал якісний, система переходить у режим надшвидкої передачі; якщо об'єкт відлітає далеко чи з'являються перешкоди – протокол автоматично сповільнює передачу і підвищує чутливість, підтримуючи зв'язок.

У оптимальних умовах Crossfire передає пакети керування з частотою 150 Гц (кожні 7 мс) – це один з найнижчих показників затримки серед усіх систем. У цьому режимі використовується порівняно широка смуга та висока швидкість, тому дальність обмежена (режим «Race», рекомендований тільки для невеликої відстані). При збільшенні відстані або погіршенні умов зв'язку протокол автоматично переключається на частоту 50 Гц (20 мс), потім, за потреби, – до 4-10 Гц. Відповідно збільшується чутливість приймача і радіус дії. Така багаторівнева адаптація відбувається динамічно і багато раз за секунду, тобто пілот може не помітити момент переходу. Стан поточного режиму відстежується через показник LQ (якість сигналу) у телеметрії. За бажанням, користувач може примусово зафіксувати режим: наприклад, Forced 150Hz – для мінімальної затримки, або Forced 50Hz – для надійності з телеметрією.

Crossfire передає до 12-16 каналів керування (цифровий протокол CRSF між приймачем і польотним контролером містить 16 пропорційних каналів). Розрядність складає 11 біт або вище.

Основна перевага Crossfire – наддалека відстань керування. У стандартному режимі (50 Гц, 100 мВт) безпечно можна літати на 10-15 км. Підвищення потужності до 500 мВт або 2 Вт (з додатковим модулем) дозволяє досягати 30-50 км. Рекорди дальності з Crossfire перевищують 100 км в режимі 4 Гц з великими антенами. Протокол здатен працювати навіть при -120…-130 дБм RSSI, коли традиційні 2,4 ГГц системи давно втратили сигнал. Крім того, довша хвиля 900 МГц краще огинає перешкоди: у польотах на малих висотах між

пагорбами або в місті Crossfire зберігає зв'язок там, де 2,4 ГГц перестає працювати за кілька сотень метрів.

Протокол Crossfire – двосторонній канал із високою пропускною здатністю. З об'єкта на апаратуру повертається інформація про якість сигналу (RSSI, LQ), а також дані польотного контролера. Протокол CRSF (Crossfire Serial) підтримує передачу телеметрії з частотою до 150 Гц. Можна отримувати на екрані передавача повний набір параметрів – від напруги і струму до GPS-координат і режиму польоту. Звісно, із ростом дальності швидкість телеметрії падає, але навіть на 4 Гц залишається можливим отримувати критичні дані.

Протокол Crossfire впровадив концепцію «self-healing link» – самовідновлюваного каналу: якщо сигнал втрачено, приймач продовжує сканувати ефір і як тільки знову детектує передавач (на іншій частоті), зв'язок відновлюється за лічені мілісекунди. Це підвищує надійність в екстремальних умовах. Система також підтримує бездротове налаштування деяких компонентів віддаленого об'єкта через меню передавача (технологія TBS Agent Lite) – наприклад, можна змінити параметри відеопередавача прямо з пульта зворотним каналом, економлячи час на посадку.

Протокол ExpressLRS (ELRS) – відкритий проект радіопротоколу, розпочатий приблизно у 2019 р. групою ентузіастів, як відповідь на закриті системи інших виробників. Мета – створити максимально швидкий та далекобійний протокол з доступних апаратних компонентів, з відкритим вихідним кодом. Перші версії ELRS працювали на частоті 900 МГц, а згодом реалізовано і варіант на 2,4 ГГц (на базі чипів Semtech SX127x та SX1280 відповідно). До 2021 р. ExpressLRS став надзвичайно популярним: багато виробників (Happymodel, BetaFPV, Radiomaster) випускають сумісні передавачі та приймачі. Відкритість коду означає, що пілоти можуть самостійно оновлювати та налаштовувати систему, додаючи нові можливості.

Протокол ExpressLRS доступний у двох діапазонах – 2,4 ГГц та 868/915 МГц. Він також використовує LoRa-модуляцію для досягнення високої чутливості й далекобійності, подібно до Crossfire. Однак ELRS оптимізовано під максимальну швидкодію: розробники пожертвували деякими надлишковими механізмами задля збільшення частоти кадрів. Протокол підтримує кілька фіксованих режимів оновлення (на відміну від динамічного Crossfire): 500 Гц, 250 Гц, 150 Гц, 50 Гц тощо. Є можливість вибору режиму перед польотом залежно від того, що важливіше – швидкість чи дальність. У версії ELRS 3.0 з'явилися навіть експериментальні режими 1000 Гц (з інтервалом кадру 1 мс) з використанням модулів FLRC. Для більшості випадків режим 250-500 Гц на 2,4 ГГц дає вже наднизьку затримку.

У режимі 500 Гц загальна затримка становить близько 2-3 мс, досягнута за рахунок використання швидкої модуляції FLRC та меншої дальності. В режимі 50 Гц (LoRa) протокол працює повільніше, проте набагато збільшує надійність прийому. Вибір режиму відбувається через налаштування передавача; також доступний Dynamic Power – автоматичне регулювання потужності сигналу залежно від відношення сигнал-шум для економії батареї на малій відстані керування. Протокол передає стандартні 16 каналів (протокол CRSF) і ще 2 дискретних, аналогічно Crossfire.

Протокол ExpressLRS демонструє вражаючі результати дальності, особливо на частоті 2,4 ГГц. Попри вищу частоту ніж 900 МГц, завдяки LoRa та оптимізації вдалося досягти дальності понад 30 км на 2,4 ГГц за потужності всього у 100 мВт (режим 50 Гц, антени з круговою поляризацією). На 900 МГц результати ще кращі – 100 км і більше у повільних режимах. Звісно, у найшвидшому режимі 500 Гц дальність різко падає, тому на далеких відстанях рекомендується перемикатися на 150 або 50 Гц. ELRS дозволяє одному модулю працювати як в надшвидкому режимі, так і в далекобійному режимі для дальніх польотів (десятки км на 50 Гц). Потужність передавачів варіюється (25 мВт, 100 мВт, 250 мВт, 500 мВт, 1 Вт); причому навіть 250 мВт зазвичай достатньо для кількох кілометрів на 500 Гц [7].

Протокол ELRS передає телеметрію подібно до Crossfire (через CRSF-сумісний обмін). У режимах 50-150 Гц можлива передача великого обсягу даних: усі датчики, такі як RSSI, GPS тощо, будуть оновлюватися швидко. В режимах 250 Гц і вище пропускна здатність зворотного каналу обмежується – зазвичай залишають тільки критичні показники (RSSI, LQ). Пілот може обрати профіль телеметрії: наприклад, Full (повна телеметрія, працює до 150 Гц), Reduced (скорочена, щоб дозволити 250 Гц), або Off (відключена для досягнення 500 Гц). В новіших версіях ELRS також впроваджено «дублюючі пакети» (режим D250/D500), коли кожен пакет надсилається двічі для підвищення надійності за рахунок трохи більшої затримки. Це корисно в умовах перешкод: повторення допомагає компенсувати втрачені пакети.

Протокол ExpressLRS повністю відкритий – користувачі можуть змінювати код, пропонувати свої удосконалення. Це призвело до бурхливого розвитку: оновлення виходять регулярно, додаючи підтримку нових MCU, OLED-дисплеїв, функцій. Система підтримує Binding Phrase – зручну прив'язку за допомогою текстової фрази замість кнопок, що полегшує використання десятків приймачів (достатньо прописати однакову фразу, і всі приймачі автоматично зв'язуються з передавачем).

Наведемо характеристики розглянутих протоколів у Таблиці 1.

Таблиця 1

Характеристики протоколів керування для віддалених безпілотних об'єктів

Протокол	Діапазон частот	Канали керування	Частота кадрів	Телеметрія	Типова дальність
Spektrum DSM2	2,4 ГГц	до 12, 10-11 біт	45 Гц	Відсутня	близько 1 км
Spektrum DSMX	2,4 ГГц	до 18-20, 11 біт	45 Гц або 90 Гц	Так (обмежена)	близько 1-2 км

Протокол	Діапазон частот	Канали керування	Частота кадрів	Телеметрія	Типова дальність
Futaba S-FHSS	2,4 ГГц	до 8, 11 біт	близько 50-70 Гц	Відсутня	близько 1 км
Futaba T-FHSS	2,4 ГГц	до 18, 11 біт	близько 60-70 Гц (SR: близько 160 Гц)	Так	близько 1,5 км
Futaba FASST	2,4 ГГц	до 18, 10-11 біт	близько 70-100 Гц	Відсутня	близько 2 км
Futaba FASSTest	2,4 ГГц	до 18, 11-12 біт	142 Гц (12CH), 70 Гц (18CH)	Так	близько 2-3 км
FrSky ACCST (D16)	2,4 ГГц	до 16, 11 біт	близько 55 Гц або 111 Гц (HS)	Так	близько 1,5-2 км
FrSky ACCESS	2,4 ГГц	до 24, 11 біт	90 Гц (8CH); 70 Гц (16CH)	Так (AES шифр.)	близько 2 км
TBS Crossfire	868 МГц / 915 МГц	до 16, 11 біт	4-150 Гц (динамічно)	Так	10-30 км (100 мВт)
ExpressLRS	2,4 ГГц або 868/915 МГц	до 16, 11 біт	50-500 Гц (профілі)	Так	5-30 км
FlySky AFHDS 2A	2,4 ГГц	до 14, 12 біт	близько 100 Гц (типово), макс. 400 Гц	Так (основні параметри)	близько 0,5-1 км

Висновки

Розглянуті протоколи керування віддаленими безпілотними об’єктами переважно не реалізують шифрування каналу передачі даних. З наведених, лише протокол FrSky ACCESS використовує алгоритм шифрування AES. Відсутність шифрування каналу передачі даних може призвести до перехоплення керування безпілотним об’єктом, або до визначення його місцеположення (за перехоплення телеметричних даних з даними GPS).

Стійкість до радіоелектронної боротьби (РЕБ) наведених протоколів переважно базується на динамічному використанні смуг частот, що допомагає підтримувати надійний зв’язок з об’єктом. Проте за використання широкосмугових РЕБ такі протоколи можуть бути повністю подавлені.

Натомість, застосування нероздільного факторіального кодування [8] дозволяє забезпечити ефективний механізм одночасного захисту переданої інформації як від помилок, що можуть виникати у каналі зв’язку за рахунок використання засобів РЕБ, так і від несанкціонованого доступу зловмисників, що намагаються змінити/перехопити передані дані.

Додатково, використання трьохетапного протоколу на основі перестановок [9] дозволяє встановити захищений канал без попереднього обміну ключовими даними, а складність факторизації перестановок і реалізації перетворень, які є зворотними до нелінійних операцій на основі ідентичної циклової структури спряжених перестановок, дає змогу створити захищений канал обміну даними з віддаленим об’єктом без необхідності у додаткових заходах безпеки, що, у свою чергу, знижує складність апаратної та програмної частини системи зв’язку.

Таким чином, використання нероздільного факторіального кодування виглядає перспективним для застосування у системах керування віддаленими безпілотними об’єктами за рахунок можливості роботи за великої ймовірності бітової помилки в каналі передавання даних з одночасною інтеграцією криптографічного захисту каналу.

Відповідно до характеристик розглянутих протоколів, наведених у Таблиці 1, протокол керування віддаленими безпілотними об’єктами на основі факторіального кодування даних повинен відповідати наступним характеристикам:

- розрядність каналу керування – не менше 10 біт;
- кількість каналів керування – не менше 8;
- частота оновлення каналів – не менше 60 Гц;
- робоча частота – 2.4 ГГц, 433/868/915 МГц;
- наявність телеметрії;
- дальність зв’язку – від 1 км.

Розробка протоколу керування віддаленими безпілотними об’єктами з наведеними характеристиками за використання нероздільного факторіального кодування [8] та трьохетапного протоколу на основі перестановок [9] дозволить забезпечити стійкий до РЕБ двосторонній канал передачі даних, захищений від несанкціонованого доступу та модифікації даних сторонніми особами.

Подяка

Роботу виконано в рамках науково-технічної (експериментальної) розробки молодих вчених «Розробка завадозахищеної енергоефективної системи контролю та управління віддаленими безпілотними об'єктами на основі факторіального кодування даних» (№0125U000637).

Література

1. Faure E. Algorithms and simulation model for the synchronisation subsystem of the noise-resilient communication system based on permutations / E. Faure, A. Skutskyi, A. Lavdanskyi // Bull. Cherkasy State Technol. Univ. — 2024. — Вип. 29, № 4. — С. 62–74.

2. Бахтіяров Д. І. Дослідження мультиплексованого сигналу керування безпілотними літальними апаратами / Д. І. Бахтіяров // Inf. Technol. Secur. — 2015. — Вип. 3, № 2. — С. 152–159.

3. Mototolea D. Software Defined Radio for Analyzing Drone Communication Protocols / D. Mototolea, C. Stolk. — Bucharest : IEEE, 2018. — ISBN 978-1-5386-2350-3.

4. Haluza M. Analysis and decoding of radio signals for remote control of drones / M. Haluza, J. Cechak. — Demanovska dolina, Slovakia : IEEE, 2016. — ISBN 978-80-8040-529-8.

5. Plotz S. How to Take Over Drones / S. Plotz, F. Armknecht, C. Bunse. — Virtual Event Hong Kong : ACM, 2021.

6. Taranis X9D Plus [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://www.frsky-rc.com/product/taranis-x9d-plus-2/. – Назва з екрана.

7. Нагорнюк О Методика розпізнавання радіосигналів FPV-бпла, сформованих за стандартами Crossfire та ExpressLRS / Нагорнюк О // Наукові Праці Державного Науково-Дослідного Інституту Випробувань І Сертифікації Озброєння Та Військової Техніки. — 2024. — Вип. 20, № 3. — С. 90–98.

8. Faure E. Permutation-Based Block Code for Short Packet Communication Systems / E. Faure, A. Shcherba, M. Makhynko, та ін. // Sensors. — 2022. — Вип. 22, № 14. — С. 53–91.

9. Faure E. Three-Pass Protocol on Permutations: Implementation Example and Security / E. Faure, A. Shcherba, A. Lavdanskyi, та ін. // CEUR Workshop Proc. — 2024. — Вип. 3654. — С. 110–125.

References

1. Faure E. Algorithms and simulation model for the synchronisation subsystem of the noise-resilient communication system based on permutations / E. Faure, A. Skutskyi, A. Lavdanskyi // Bull. Cherkasy State Technol. Univ. — 2024. — Iss. 29, No. 4. — P. 62–74.

2. Bakhtiyarov D. I. Study of the Multiplexed Control Signal of Unmanned Aerial Vehicles / D. I. Bakhtiyarov // Inf. Technol. Secur. — 2015. — Iss. 3, No. 2. — P. 152–159.

3. Mototolea D. Software Defined Radio for Analyzing Drone Communication Protocols / D. Mototolea, C. Stolk. — Bucharest : IEEE, 2018. — ISBN 978-1-5386-2350-3.

4. Haluza M. Analysis and decoding of radio signals for remote control of drones / M. Haluza, J. Cechak. — Demanovska dolina, Slovakia : IEEE, 2016. — ISBN 978-80-8040-529-8.

5. Plotz S. How to Take Over Drones / S. Plotz, F. Armknecht, C. Bunse. — Virtual Event Hong Kong : ACM, 2021.

6. Taranis X9D Plus [Electronic resource]. — Available at: https://www.frsky-rc.com/product/taranis-x9d-plus-2/. – Title from the screen.

7. Nahorniuk O. Methodology for Recognizing FPV-UAV Radio Signals Formed According to Crossfire and ExpressLRS Standards / O. Nahorniuk // Scientific Works of the State Research Institute of Testing and Certification of Armaments and Military Equipment. — 2024. — Iss. 20, No. 3. — P. 90–98.

8. Faure E. Permutation-Based Block Code for Short Packet Communication Systems / E. Faure, A. Shcherba, M. Makhynko, et al. // Sensors. — 2022. — Vol. 22, No. 14. — P. 53–91.

9. Faure E. Three-Pass Protocol on Permutations: Implementation Example and Security / E. Faure, A. Shcherba, A. Lavdanskyi, et al. // EUR Workshop Proc. — 2024. — Vol. 3654. — P. 110–125.