Соболев В.В., Геращенко М.М., Рудніченко С.В., Трофименко С.І., Ільєнко В.М.
Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ОРГАНІЗАЦІЇ НАДІЙНОГО ЗАВАДОСТІЙКОГО ТА ЗАХИЩЕНОГО КАНАЛУ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ З БЕЗПІЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ

На сучасному етапі розвитку безпілотних авіаційних комплексів швидкими темпами продовжуються роботи щодо подальшого вдосконалення їх спроможностей у напрямку більш ефективного виконання бойових та спеціальних завдань. Дані зміни особливо помітні у двох ключових напрямках: збільшення радіусу дії і тривалості польоту та зменшення фізичних розмірів безпілотних літальних апаратів.

Поєднання збільшення тривалості польоту та зменшених, полегшених конструктивних характеристик має значний вплив на вимоги щодо апаратури зв'язку безпілотних авіаційних комплексів та організацію супутникового зв'язку (поза межами прямої радіовидимості), який в даний час розглядається як основний канал передачі розвідувальної, телеметричної інформації в режимі реального часу. В сучасних умовах ведення бойових дій організація каналів зв'язку за принципом поза межами прямої радіовидимості з використанням наземних (повітряних) ретрансляторів або введенням додаткових наземних станцій управління є практично невиправданим, що пов'язано з високою динамічністю зміни оперативної обстановки та обмеженням в часі на прийняття рішень.

Тому, на цьому фоні до супутникових каналів зв'язку та передачі даних безпілотних літальних апаратів висуваються жорсткі вимоги щодо забезпечення успішного та безпечного виконання бойових завдань.

У статті розглядаються сучасні підходи до реалізації супутникових каналів зв'язку з безпілотними літальними апаратами, в контексті вимог як для бортового обладнання, так і безпосередньо до організації каналу супутникового зв'язку. Надані рекомендації щодо основних вимог до організації супутникового дуплексного зв'язку поза межами прямої радіовидимості з безпілотними літальними апаратами на базі геостационарних (середньовисотних) космічних апаратів зв'язку з високою пропускнуою здатністю в Ка діапазоні частот.

Ключові слова: *безпілотний авіаційний комплекс, канал супутникового зв'язку, зв'язок у межах прямої радіовидимості, зв'язок поза межами прямої радіовидимості, космічні апарати зв'язку з високою пропускнуою здатністю, розвідка, стеження і рекогносцировка.*

Постановка проблеми. В умовах сучасних мережецентричних бойових дій на безпілотні літальні апарати (БпЛА) покладається широкий спектр завдань: від бойового забезпечення дій своїх військ до безпосереднього вогневого ураження об'єктів противника. Складна радіоелектронна обстановка (особливо застосування противником систем радіоелектронної боротьби та робота радіоелектронних засобів різного призначення), постійне збільшення бойового радіусу БпЛА пред'являють жорсткі вимоги до каналів зв'язку та передачі даних БпЛА, особливо щодо передачі розвідувальної інформації від корисного навантаження різного призначення в режимі реального часу. На сучасному етапі розвитку технологій найбільш повно цим вимогам відповідає організація супутникових каналів зв'язку за принципом поза межами прямої радіовидимості (BLOS). У статті розглядаються необхідні вимоги та сучасні підходи до реалізації супутникових каналів зв'язку з безпілотними літальними апаратами, в контексті вимог як для бортового обладнання, так і безпосередньо до організації каналу супутникового зв'язку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У [1] надана загальна інформація щодо переваг космічних апаратів зв'язку з високою пропускнуою здатністю (HTS).

У [2] розглянуто використання методів обробки сигналів для розширення їх спектрів DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum, розширення спектру методом прямої послідовності) та FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum, псевдовипадкова зміна робочої частоти) з метою підвищення стійкості супутникового каналу до зовнішнього втручання.

У [3–5] приведені основні вимоги, які пред'являються до каналів зв'язку (передачі даних) та бортового обладнання БпЛА, варіант побудови системи зв'язку і передачі даних з БпЛА.

У [6–9] приведені порівняльні характеристики та можливості різних стандартів супутникового широкосмугового зв'язку (DVB–S2, DVB–S2X).

Основні характеристики, яким мають відповідати канал супутникового зв'язку та окремі елементи бортового обладнання БпЛА, наведені в [10].

Мета статті. Розробити рекомендації щодо основних вимог до організації супутникового зв'язку з БпЛА.

Виклад основного матеріалу. На сучасному етапі розвитку озброєння та військової техніки безпілотні авіаційні комплекси (БпАК) стали важливим компонентом під час вирішення тактичних (оперативно-тактичних) завдань в ході проведення військових операцій (ведення бойових дій). Застосування сучасних безпілотних авіаційних платформ військового призначення має значні переваги перед пілотованими. Перш за все, залучення підрозділів БпАК до виконання завдань значно знижує ризик бойових втрат серед особового складу та озброєння і військової техніки. Також вони спроможні забезпечити виконання більш довготривалих завдань (місій) по відношенню до пілотованих систем. Що стосується критерія вартість/ефективність: вартість часу польоту БпЛА значно менша, ніж вартість часу польоту літака або вертольоту. БпАК головним чином використовуються як фактор підвищення бойової ефективності (один з головних чинників бойового забезпечення) військ (сил). На БпАК покладаються завдання ведення в режимі реального часу розвідки, стеження і рекогносцировки (ISR) за віддаленими об'єктами розвідки та районами, а також проведення дорозвідки та ведення радіоелектронної боротьби. Також, вони широко застосовуються під час здійснення прикордонного контролю та проведення антитерористичних операцій. Разом з тим, досвід застосування БпЛА в останніх конфліктах свідчить про початок їх активного залучення для виконання бойових польотів з метою нанесення авіаційних ударів.

На сучасному етапі розвитку БпАК швидкими темпами продовжуються роботи щодо подальшого вдосконалення їх спроможностей у напрямку більш ефективного виконання бойових та спеціальних завдань. Дані зміни особливо помітні у двох ключових напрямках:

- збільшення радіусу дії та тривалості польоту – залежно від типу платформи, БпЛА спроможні здійснювати політ до 30 годин без дозаправки, в той час як радіус дії може досягати тисяч кілометрів. Група БпЛА, в якій окремі БпЛА послідовно змінюють один одного, спроможна здійснювати контроль зони інтересу (району відповідальності) необмежено в часі;

- зменшення фізичних розмірів БпЛА – відмічається стійка тенденція в зосередженні зусиль оборонних організацій провідних країн світу на мініатюризації БпЛА. Завдання полягає у зменшенні масогабаритних розмірів та енергоспоживання (SWaP) пристроїв, встановлених на БпЛА, таких як первинні перетворювачі, без погіршення їх ефективності застосування. Слід відмітити, що зменшення даних характеристик безпосередньо впливає на всі підсистеми, включаючи канали зв'язку і передачі даних та антенні системи.

Поєднання збільшення тривалості польоту та зменшених, полегшених конструктивних характеристик має значний вплив на вимоги щодо апаратури зв'язку БпАК. Зокрема, особливо критичним постає питання обладнання БпАК тактичного рівня системами зв'язку з низьким рівнем SWaP, які спроможні як передавати ISR фото (відео) інформацію високої чіткості на наземну станцію управління, так і забезпечувати надійне функціонування командного каналу управління та контролю (C2 або каналу зв'язку “Земля–Борт”) [3].

На цьому фоні до каналів зв'язку та передачі даних БпЛА пред'являються жорсткі вимоги щодо забезпечення успішного та безпечного виконання бойових завдань. Насамперед це стосується таких характеристик як сумісність, стійкість до перешкод та введенню в оману, низька ймовірність перехоплення тощо.

На сучасному етапі розвитку концепції бойового застосування БпЛА розглядається два принципи організації каналів зв'язку: в межах прямої радіовидимості (LOS) та поза межами прямої радіовидимості (Рис.1) [4].

Якщо канал зв'язку і передачі даних за принципом LOS можливо організувати з любым типом (класом) БпЛА, то за принципом BLOS (до недавнього часу) можливо було лише з середньовисотними та висотними БпЛА з великою тривалістю польоту (класів MALE та HALE).

У зв'язку з постійним збільшенням бойового радіусу дії БпЛА під час виконання довготривалих завдань та підвищення вимог до надійності і завадозахищеності каналів зв'язку, застосування комунікаційних рішень, які притаманні для LOS, вже максимально можливі, тому все частіше використовуються принципи побудови зв'язку типу BLOS.

Рис.1. Організація ліній зв'язку типу LOS/BLOS

До недавнього часу з метою організації зв'язку типу BLOS між БпЛА та наземною станцією управління використовувались наземні або бортові ретрансляційні станції. В сучасних умовах ведення бойових дій використання даного рішення стає практично не виправданим, що пов'язано з високою динамічністю зміни оперативної обстановки та обмеженням в часі на прийняття рішень. У цьому контексті збільшення бойового радіусу БпЛА, які використовують принцип LOS, за рахунок введення додаткових наземних станцій управління (метод передачі управління) також не завжди є виправданим рішенням (Рис.2).

На теперішній час найбільш раціональним шляхом організації зв'язку між БпЛА та наземною станцією управління слід вважати використання надійних каналів супутникового BLOS зв'язку, який забезпечує передачу інформації в режимі реального часу. Слід зазначити, що при організації BLOS зв'язку відсутня необхідність організації LOS зв'язку (або використання в якості резервного) з БпЛА.

Організація супутникового дуплексного BLOS зв'язку між БпЛА та наземною станцією управління пропонується здійснювати на базі геостационарних (середньовисотних) HTS в Ка діапазоні частот (26,5 ГГц – 40 ГГц та вищому) [1].

Рис.2. Схема організації передачі керування БпЛА між пунктами дистанційного пілотування

Застосування HTS дозволяє значно збільшити швидкість передачі даних з використанням одного приймально-передавального модуля супутникового зв'язку (терміналу) на борту БпЛА, що є одною з головних умов для організації каналу зв'язку для передачі повнокадрового відео та фотознімків з високою роздільною здатністю у масштабі реального часу.

Слід зазначити, що вдосконалення супутникових технологій, особливо поява HTS, надають значних переваг для використання супутникового зв'язку у безпілотній авіації. HTS, які формують канали передачі даних у діапазоні Ка, забезпечують 300 % – 400 % покращення пропускної здатності порівняно з традиційними геостационарними космічними апаратами (КА), які мають широкую діаграму направленості одного променя антени. На відміну від традиційних КА, антенна система HTS дозволяє формувати декілька сфокусованих променів з вузькими діаграмами направленості. Їх значна пропускна здатність забезпечує більший об'єм передачі даних на меншу за розміром поверхню географічного району. Разом з тим, оскільки сфокусовані промені покривають меншу площу, при організації супутникового зв'язку на базі HTS, необхідна реалізація функції поступового перемикавання між променями в ході виконання польотного завдання БпЛА.

Враховуючи експлуатаційні та масо-габаритні обмеження сучасних безпілотних платформ, розробка та впровадження ефективних рішень із застосуванням супутникового зв'язку на БпЛА є складним комплексним завданням. Необхідно досягати узгодження співвідношення переваг і недоліків між розміром та необхідними експлуатаційними характеристиками в інтересах безумовного виконання бойового завдання. При максимальному корисному навантаженні БпЛА всього кілька десятків кілограм маса обладнання становить вирішальною – кожен додатковий кілограм корисного навантаження призводить до зменшення на один кілограм палива. Разом з тим, мінімізація SWaP не завжди дає можливість досягти максимального рівня пропускної здатності каналу передачі даних.

Таким чином, головними вимогами, які пред'являються до терміналу на борту БпЛА, є компактність та полегшена маса без погіршення показників високої пропускної здатності

каналу зв'язку. У цьому контексті спроможність терміналу БпЛА працювати в діапазоні Ка разом з високою пропускною здатністю каналів зв'язку HTS КА є основною перевагою. Приклад сучасного зразка терміналу супутникового зв'язку для БпЛА (маса 4,5 кг) компанії Gilat (Ізраїль) представлено на рисунку 3.

Рис.3. Термінал супутникового зв'язку БпЛА компанії Gilat

Окрім масо-габаритних показників та пропускної здатності, термінали супутникового зв'язку БпЛА повинні відповідати іншим технічним вимогам, які пред'являються до антени, модему та можливостям з контролю і управління.

Враховуючи обмежений вільний внутрішній простір БпЛА (особливо тактичного рівня), для антени супутникового зв'язку важливо максимізувати розмір її апертури в межах об'єму антенного обтічника. Крім того, з метою підтримання безперервного зв'язку між БпЛА та наземною станцією управління, антена повинна використовувати високоточні та стабільні системи супроводження. Також, через невеликий розмір антени та значну кількість КА на орбіті, необхідно мінімізувати внесення перешкод від сусідніх КА, що реалізується за допомогою використання адаптивного вибору виду сигналу (адаптивної модуляції сигналу), низькошвидкісного кодування (система корекції помилок з надмірним кодуванням), а також за рахунок передачі з рознесенням сигналу по спектру. Висока чутливість сучасних модемів терміналів супутникового зв'язку дозволяє працювати їм на менших рівнях співвідношення сигнал/шум, зменшуючи тим самим необхідний енергетичний потенціал каналу передачі КА. З цієї причини чутливість модему є найважливішим параметром, який дозволяє компенсувати зменшення розмірів антени.

Подальший розвиток нових напівпровідникових матеріалів, наприклад, на базі нітриду галію (GaN), дає можливість розробляти компактні конструкції активних плоскочастотних фазованих антенних решіток, придатних для встановлення на борту БпЛА.

Слід зазначити, що використання вузькоспрямованих діаграм направленості каналів супутникового зв'язку (Земля–КА–БпЛА та в зворотному напрямку) мають такі ж переваги, що і релейні канали зв'язку, а саме:

- висока завадостійкість при застосуванні противником засобів радіоелектронної боротьби;
- висока живучість внаслідок складності виявлення роботи як бортового, так і наземного обладнання;

– висока складність щодо втручання противником в роботу каналів зв'язку: перехоплення управління БпЛА чи корисним навантаженням; надання на наземну станцію управління хибної телеметричної та розвідувальної інформації; перехоплення телеметричної та розвідувальної інформації.

Для зменшення впливу негативних факторів на передачу інформації в каналі зв'язку, таких як складні атмосферні умови (призводять до загасання сигналу під час розповсюдження), дія різних видів перешкод (у тому числі навмисних), викривлення сигналу у вигляді загасання (у першу чергу внаслідок Допплерівського зсуву частот) важливу роль відіграє вибір схем адаптивного кодування та модуляції, шифрування інформації, що потребує передачі [5].

Корекція помилок – це один з ключових інструментів для досягнення найкращих характеристик супутникового каналу передачі інформації в умовах високого рівня шумів і інтерференції. Для каналів з випадковим характером помилок, зазвичай, з адитивними перешкодами типу “білого шуму”, практичний інтерес представляють лише кілька кодів з десятків відомих. Найбільш часто використовуються три види кодів: згорткові, Ріда–Соломона і турбокоди, до яких відносяться коди з низькою щільністю перевірки на парність (LDPC). Поєднання декількох схем завадостійкого кодування дозволяє врахувати різні умови експлуатації та досягти необхідного рівня надійності. При передачі даних, коли потрібний вищий рівень надійності, застосовуються так звані каскадні коди, в яких зовнішнім є код Боуза–Чоудхурі–Хоквінгема (окремий випадок – код Ріда–Соломона), а внутрішнім – згортковий або LDPC код.

На теперішній час найбільш ефективною вважається система, де в якості зовнішнього коду використовується код Боуза–Чоудхурі–Хоквінгема, а в якості внутрішнього – LDPC код, яка дозволяє максимально близько підійти до межі Шеннона (максимальної пропускної здатності) для каналів з адаптивним “білим” гауссовським шумом. Обрана за основу вищенаведена схема кодування у поєднанні з модуляціями типу QPSK (квадратурна фазова маніпуляція) або APSK (амплітудно-фазова маніпуляція), дає можливість стійкої високошвидкісної передачі потокового відеозображення з борту БпЛА на наземну станцію управління з низькою ймовірністю помилок в нелінійному супутниковому каналі.

На сучасному етапі розвитку стандартів супутникового широкосмугового зв'язку даним вимогам відповідає стандарт DVB–S2X, який, зокрема, передбачає встановлення стійкого, надійного супутникового зв'язку з повітряними суднами [6–9].

Стандарт DVB–S2X підтримує значно вищу ефективність використання спектра при відношеннях несуча/шум (у порівнянні із DVB–S2), типову для професійного застосування (Рис.4).

Придатний до використання діапазон співвідношення несуча/шум розширюється до значення мінус 10 дБ завдяки додатковим варіантам кадрів, кодування і модуляції, що значно підвищує якість супутникового зв'язку з БпЛА, дає змогу встановлювати на них направлені антени малого розміру.

Найбільш важливими перевагами стандарту DVB–S2X, які дозволяють отримувати якісний відеосигнал на вході, є можливість об'єднання каналів, більш висока гранулярність модуляції та наявні можливості прямої корекції помилок. Об'єднання до трьох супутникових каналів дозволить підтримувати більш високі сукупні швидкості передачі даних та отримувати додатковий вигравш від статистичного мультиплексування для послуг з високими швидкостями передачі даних. Обов'язкова реалізація адаптивного кодування і модуляції в приймачах створює можливість підвищення ефективності використання спектра, гарантуючи при цьому стійкість каналу під час сильних атмосферних опадів завдяки одночасній передачі компонентів стандартної роздільної здатності з високим ступенем захисту.

Більш висока гранулярність і опції прямої корекції помилок забезпечують підвищену експлуатаційну гнучкість. Використання схем високоефективної модуляції дозволяють добиватися спектральної ефективності до 6 біт/с/Гц (з 256–APSK). Досягнення значень у відношеннях несуча/шум до рівня 20 дБ дозволяє збільшити посилення на 50%.

Рис.4. Графік порівняння стандартів DVB-S2X та DVB-S2

Реалізацію інформаційної безпеки для цілісності даних потоків інформації у супутниковому каналі зв'язку між БпЛА та наземною станцією управління пропонується здійснювати за допомогою криптографічного алгоритму SHA-3.

Довідково: 5 серпня 2015 року алгоритм затверджений і опублікований в якості Федерального стандарту по обробці інформації (FIPS 202, США).

Також для підвищення стійкості супутникового каналу до зовнішнього втручання, зокрема, постановки фальшивих сигналів глобальної супутникової навігаційної системи та перехоплення управління, окрім методів шифрування, слід передбачити використання методів обробки сигналів для розширення їх спектрів: DSSS або FHSS [2].

Важливим параметром, який необхідно враховувати під час організації супутникового зв'язку з БпЛА (для сигналу, що передається з БпЛА на наземну станцію), є час затримки передачі даних, значення якого необхідно звести до мінімуму. Основним фактором, який має вплив на його значення, є вибір висоти орбіти КА зв'язку. Перевагою геостационарної навколоземної орбіти є постійне перебування КА над обраною земною поверхнею в одній і тій же точці, що не потребує створення складної системи стеження антенних систем (затримка близько 280 мс). Однак, мінімальне значення часу затримки може бути досягнуте за допомогою КА на низькій навколоземній орбіті (5,3 мс). Мінімізувати час затримки також можливо за рахунок вибору оптимальних варіантів багатостанційного доступу (або їх поєднань) та багаторівневого шифрування [10].

Що стосується контролю та управління, слід відзначити, що для забезпечення безперервного виконання завдань ISR та інших бойових завдань, як правило застосовуються окремі підрозділи БпЛА, які здійснюють управління своїм парком БпЛА з різних наземних станцій управління, що вимагає значних зусиль для організації взаємодії між ними. Разом з тим, застосування космічних каналів зв'язку дозволяє організувати управління БпЛА різних підрозділів для виконання спільного завдання з одного пункту управління, що суттєво зменшує підготовчі заходи та час на виконання такого завдання.

Рекомендації щодо основних вимог для організації супутникового зв'язку з БпАК представлено в таблиці 1.

Таблиця 1

Рекомендації щодо основних вимог для організації супутникового зв'язку з БпАК

№ з/п	Критерій	Мінімальне (максимальне) допустиме значення	Рекомендація
1	Швидкість передачі інформації (борт-земля)	3 Мбіт/с	Схема модуляції: 16QAM, 16APSK або вище (≥ 3 біт/с/Гц).
2	Швидкість передачі інформації (земля-борт)	0,5 Мбіт/с	
3	Інтенсивність бітових помилок	$\leq 10^{-7}$	Корекція помилок переадресації: турбокодування або використання кодів з низькою щільністю перевірок на парність з використанням методів еквалізації (вирівнювання частотних характеристик)
4	E_b/N_0	≥ 16 дБ	
5	Діаметр антени на БпЛА	$\leq 0,7$ м	ФАР
6	Безпека передачі інформації	–	SHA-3 (AES-256) шифрування
7	Затримка сигналу	≤ 150 м/с	Низькоорбітальні КА зв'язку. Використання оптимальних варіантів багатостанційного доступу (або їх поєднань) та багаторівневого шифрування

Водночас, на сучасному етапі розвитку безпілотної авіації повністю відмовитись від використання LOS зв'язку, особливо для БпЛА стратегічного (оперативного) рівнів неможливо, що пов'язано з необхідністю:

- виконання міжнародних правил управління повітряним рухом, насамперед стосовно безпеки польотів (для організації зв'язку повітряних суден між собою та з авіадиспетчерськими службами повітряного руху використовується УКХ (КХ) LOS зв'язок);
- підвищення надійності управління БпЛА за рахунок створення резервних каналів управління та передачі даних.

Висновки

Таким чином, у найближчий перспективі слід очікувати подальше активне застосування супутникових каналів BLOS зв'язку у безпілотної авіації (у тому числі тактичного рівня), насамперед, щодо організації управління та передачі даних. Разом з тим повністю відмовитись від LOS зв'язку наразі неможливо, що в першу чергу пов'язано з необхідністю забезпечення безпеки польотів. Існуючі стандарти організації супутникового зв'язку в повному обсязі можуть задовольнити вимоги, які пред'являються для організації зв'язку з БпЛА військового призначення. Використання супутникових систем зв'язку, організованих на базі середньовисотних КА зв'язку з високою пропускнуою здатністю в Ка діапазоні частот і стандартом DVB-S2X, слід вважати найбільш перспективним напрямом створення космічних каналів BLOS зв'язку в безпілотної авіації, оскільки в даному випадку забезпечується висока швидкість передачі даних, низький рівень коефіцієнту побутових помилок і затримки, необхідні для стійкої потокової передачі відеоінформації в режимі реального часу. У роботі наведені рекомендації щодо основних технічних вимог для організації надійного завадостійкого та захищеного каналу супутникового зв'язку з БпАК.

Подальший розвиток технологій космічного зв'язку у напрямку створення гнучких радіочастотних трактів з декількома несучими частотами, які можуть адаптуватися в умовах погіршення якості каналів, є найбільш перспективним напрямком забезпечення надійних космічних каналів BLOS зв'язку з БПЛА і в перспективі дозволить повністю відмовитись від використання KX LOS зв'язку.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. HTS [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ru.wikipedia.org/wiki/HTS>.
2. Spread Spectrum Modulation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.tutorialspoint.com/digital_communication/digital_communication_spread_spectrum_modulation.htm.
3. Chaim Weinberger. Long Endurance UAS Missions – A Satcom Challenge.
4. İsmet Çuhadar and Mahir Dursun. Unmanned Air Vehicle System's Data Links.
5. Hüseyin Okcu. Operational Requirements of Unmanned Aircraft Systems Data Link and Communication Systems
6. Цифровая спутниковая система радиовещания с гибкой конфигурацией (телевидение, звук и данные) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bo/R-REC-BO.1784-1-201612-I!!PDF-R.pdf
7. Adjacent Satellite Interference in Mobile/VSAT Environments. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.intelsatgeneral.com/wp-content/uploads/2015/06/sat-interfere-2.pdf>
8. DVB-S2 выходит на орбиту [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://old.telesputnik.ru/archive/137/article/90.html>.
9. DVB-S2X – Теория и практика. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://telesputnik.ru/materials/tekhnika-i-tehnologii/article/dvb-s2x-teoriya-i-praktika>.
10. Tim Hill. Satellite Communication System Study for Unmanned Autonomous Aircraft (UAVs).

Соболєв Василь Васильович

науковий співробітник Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Чернігів, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-4137-8360>
+38-063-238-60-53

Герашенко Максим Михайлович

начальник науково-дослідного відділу Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Чернігів, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-6587-0355>
+38-063-119-65-79

Рудніченко Сергій Володимирович

провідний науковий співробітник науково-дослідного відділу Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Чернігів, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-1810-142X>
+38-099-368-05-68

Vasyl Soboliev

Researcher of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, Chernihiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-4137-8360>
+38-063-238-60-53

Maksym Herashchenko

Chief of Section of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, Chernihiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-6587-0355>
+38-063-119-65-79

Serhii Rudnichenko

Lead Researcher of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, Chernihiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-1810-142X>
+38-099-368-05-68

Трофименко Сергій Іванович

старший науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту
випробувань і сертифікації озброєння та
військової техніки, Чернігів, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-9391-7226>
+38-093-631-50-31

Ільєнко Володимир Миколайович

старший науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту
випробувань і сертифікації озброєння та
військової техніки, Чернігів, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-2854-1012>
+38-093-531-25-45

Serhii Trofymenko

Senior Researcher of State Scientific Research
Institute of Armament and Military Equipment
Testing and Certification, Chernihiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-9391-7226>
+38-093-631-50-31

Volodymyr Iliencko

Senior Researcher of State Scientific Research
Institute of Armament and Military Equipment
Testing and Certification, Chernihiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-2854-1012>
+38-093-531-25-45

**MODERN APPROACHES TO THE ORGANIZATION OF A RELIABLE JAM-RESISTANT
AND SECURED SATELLITE COMMUNICATION CHANNEL WITH UNMANNED AERIAL VEHICLES**
V Soboliev, M Herashchenko, S Rudnichenko, S Trofymenko and V Iliencko

At the present stage of development of unmanned aircraft systems work continues at a rapid pace to further improve their capabilities in the direction of more effective combat and special tasks.

This is especially noticeable in two key areas: increasing the range and flight duration; reducing the physical size of the unmanned aerial vehicles.

The combination of increasing flight duration and decreasing design characteristics significantly affects the requirements for unmanned aircraft system communication equipment and the development of a beyond line of sight satellite communication channel, which is currently considered as the main channel for transmitting intelligence, telemetry information in real time. Under existent warfighting conditions, the development of communication lines on the principle of a beyond line of sight with the use of ground or airborne relay stations, or through the introduction of additional ground control stations is virtually unjustified, due to the high dynamics of operational conditions and time constraints for decision making.

In this context, the unmanned aerial vehicles' satellite communication channels are subject to strict requirements to ensure the combat missions are carried out successfully and safely.

The article examines current approaches to the implementation of satellite communication channels with unmanned aerial vehicles in the context of the requirements for both on-board equipment and directly to the development of a satellite communication channel. Recommendations are given for the basic requirements for the organization of satellite duplex communication beyond line-of-sight with unmanned aerial vehicles based on geostationary (medium-altitude) high throughput satellites in the Ka frequency range.

Keywords: *unmanned aircraft system, unmanned aerial vehicle, satellite communication channel, beyond line of sight, line of sight, high throughput satellite, intelligence, surveillance and reconnaissance.*