

УДК. 621.391

Хоменко П. В. ORCID: 0000-0002-8543-1971 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
канд. техн. наук, професор Радзівілов Г. Д. ORCID: 0000-0002-6047-1897 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
канд. техн. наук, доцент Ільїнов М. Д. ORCID: 0009-0008-6945-3354 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

АНАЛІЗ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУЧАСНИХ РАДІОЗАСОБІВ КЛАСУ MANET

У статті представлено результати комплексного дослідження функціональних можливостей, технічних характеристик та оперативних обмежень тактичних радіостанцій Silvus StreamCaster SC4400 у контексті їх застосування в умовах динамічного електромагнітного середовища. Проаналізовано вплив архітектурних особливостей системи (конфігурація МІМО 4×4) на її функціональні параметри, включаючи пропускну здатність, енергоефективність та стійкість до радіоелектронної протидії. Здійснено компаративний аналіз Silvus SC4400 з аналогічними системами (Persistent MPU5 та TrellisWare TSM) на основі репрезентативної методологічної бази, що інтегрує результати емпіричних випробувань та математичного моделювання.

Застосовано багатокритеріальний підхід до оцінювання ефективності тактичних систем зв'язку, ідентифіковано ключові переваги SC4400, зокрема: розширений частотний діапазон (300 МГц – 6 ГГц), високу пропускну здатність (до 100+ Мбіт/с) та низьку каналну затримку (7 мс на один хоп), що забезпечує оптимальні характеристики для передачі мультимедійного контенту в реальному часі. Водночас виявлено функціональні обмеження системи, включаючи відсутність інтегрованої обчислювальної платформи, недостатню стійкість до інтенсивної радіоелектронної протидії та суттєві обмеження антенних систем у контексті енергетичного потенціалу та адаптивності діаграми направленості. Науково обґрунтовано оптимальні сценарії застосування досліджуваних систем залежно від їх техніко-експлуатаційних характеристик та специфіки оперативного середовища. Запропоновано перспективні напрями вдосконалення Silvus SC4400 з урахуванням виявлених обмежень та сучасних тенденцій розвитку тактичних комунікаційних технологій.

Ключові слова: тактичні системи зв'язку, MANET, Silvus StreamCaster SC4400, МІМО-технології, радіоелектронна боротьба, радіоелектронна розвідка, завадостійкість, пропускну здатність, діаграма направленості.

P. Khomenko, H. Radzivilov, M. Ilinov. Analysis of the functionality of Manet tactical radio systems

This article presents the results of a comprehensive study on the functionality, technical specifications, and operational limitations of the Silvus StreamCaster SC4400 tactical radio, particularly concerning its application within dynamic electromagnetic environments. The impact of the system's architectural features (4x4 MIMO configuration) on its functional parameters, including throughput, energy efficiency, and resilience against electronic warfare (EW), is analyzed. A comparative analysis of the Silvus SC4400 with analogous systems (Persistent MPU5 and TrellisWare TSM) was performed using a representative methodological framework that integrates empirical testing results and mathematical modeling.

Employing a multi-criteria approach to evaluate tactical communication system effectiveness, key advantages of the SC4400 were identified, including: a wide frequency range (300 MHz – 6 GHz), high throughput (up to 100+ Mbps), and low hop latency (7 ms), ensuring optimal performance characteristics for real-time multimedia transmission. Concurrently, functional limitations of the system were identified, including the absence of an integrated computing platform, insufficient resilience against intensive electronic warfare (EW), and significant antenna system limitations concerning energy potential and directivity pattern adaptability. Optimal application scenarios for the systems under study are scientifically substantiated based on their technical and operational characteristics and the specifics of the operational environment. Prospective directions for enhancing the Silvus SC4400 are proposed, considering the identified limitations and current trends in tactical communication technology development.

Keywords: tactical communication systems, MANET, Silvus StreamCaster SC4400, MIMO technology, Electronic Warfare (EW), Electronic Intelligence (ELINT), jam resistance, throughput, antenna pattern.

Постановка задачі. Відомо, що сучасні військові операції суттєво залежать від надійних тактичних систем зв'язку, що забезпечують командування та управління, ситуаційну обізнаність і координацію між розосередженими підрозділами. Однак операційне середовище стає дедалі складнішим через наявність розвинених засобів радіоелектронної

боротьби (РЕБ) противника та складних фізичних ландшафтів, що створюють перешкоди для надійності, ефективності цих систем зв'язку для вирішення цільових задач. Здатність противника здійснювати радіоелектронну розвідку (РЕР) для виявлення, ідентифікації та визначення місцезнаходження ще більше підкреслює потребу в стійких технологіях зв'язку.

Так, радіостанції Silvus StreamCaster SC4400 класу мереж (MANET) розглядаються як перспективний напрям розвитку тактичних систем для інтеграції на мобільні базові станції, БпЛА-ретранслятор та інших напрямках.

Однак у сучасних наукових роботах недостатньо наведено інформації щодо спроможності та комплексного деталізованого дослідження функціонування засобів зв'язку Silvus, їхніх характеристик у складних динамічних умовах в різних сценаріях експлуатації.

Таким чином, виникає необхідність всебічного аналізу та порівняння з існуючими аналогами при різних сценаріях застосування.

Метою дослідження є проведення комплексного аналізу технічних характеристик, переваг та обмежень радіостанцій Silvus StreamCaster SC4400 в умовах динамічного середовища.

Аналіз останніх публікацій. Нижче наведено системний огляд наукових публікацій, присвячених дослідженню радіостанцій Silvus та аналогів, науково-технічні аспекти їх функціонування в умовах невизначеності.

Так, у технічних специфікаціях Silvus Technologies [1] представлено детальну інформацію характеристик радіостанцій SC4400, включаючи частотні діапазони, параметри випромінюваної потужності, а також топологічні характеристики MANET-мереж із підтримкою до 380 вузлів. Технологія 4×4 MIMO, згідно з наведеними даними, забезпечує теоретичну пропускну здатність понад 100 Мбіт/с. Необхідно зазначити, що технічні специфікації, надані виробником, відображають лабораторні умови експлуатації, які суттєво відрізняються від реальних польових сценаріїв, і не містять комплексного аналізу функціонування Silvus в умовах активної радіоелектронної боротьби та інтенсивного радіоперехоплення.

Експериментальні дослідження, проведені Colorado DOPS [2], представляють емпіричні результати польових випробувань Silvus SC3500 (попереднього покоління SC4400) з конкретними показниками дальності зв'язку та пропускну здатності в різних топографічних умовах. Однак методологія експериментальних досліджень не відображає комплексного впливу радіоелектронної протидії. Випробування здійснювалися переважно в цивільному середовищі, що не дозволяє екстраполювати отримані результати на застосування в умовах активних бойових дій.

Результати військових польових випробувань, представлені в [3], містять аналіз імплементації радіостанцій Silvus у 25-й піхотній дивізії США для забезпечення комунікаційної інфраструктури в умовах тропічних лісів та урбанізованого середовища. У дослідженні [3] зазначається мобільність системи та здатність функціонувати при відсутності прямої видимості (NLOS). Разом з тим, дослідження характеризується відсутністю представлених показників надійності зв'язку та ефективності функціонування в умовах електромагнітних завад, що обмежує можливості формування комплексної оцінки.

Інженерний аналіз протоколу MN-MIMO, представлений у роботі [4], містить деталізований опис запатентованого протоколу, що застосовується в SC4400. У дослідженні розглянуто алгоритми автоматичного уникнення завад (MAN-IA) та анулювання інтерференції (MAN-IC), а також представлено теоретичне обґрунтування їх ефективності. Необхідно зазначити, що аналіз ґрунтується переважно на теоретичних моделях, що потребують додаткової емпіричної верифікації. Питання енергоефективності та функціональних обмежень протоколу в умовах мультидіапазонної радіоелектронної протидії розглянуто недостатньо.

Порівняльний аналіз MANET-систем, представлений у дослідженні [5], містить науково обґрунтоване зіставлення характеристик Silvus SC4400, Persistent Systems MPU5 та TrellisWare TSM. Також у цьому дослідженні наведено об'єктивні дані щодо функціональних характеристик кожної системи, зокрема акцентується на широкому частотному діапазоні та підвищену пропускну здатність Silvus порівняно з альтернативними системами. Автори акцентують на суттєвій диференціації технічних характеристик досліджуваних систем. Водночас, дослідження не містить комплексного аналізу вразливостей до спрямованих завад різних типів, а також характеризується недостатньою увагою до тактичних аспектів застосування систем у реальних бойових умовах.

Аналіз наукових публікацій [1–5] демонструє відсутність цілісної методологічної бази для оцінювання ефективності радіостанцій Silvus SC4400 в контексті їх застосування в умовах високоінтенсивних бойових дій із використанням сучасних засобів радіоелектронної боротьби. Особливо актуальною є проблема недостатності емпіричних даних щодо функціонування системи під впливом динамічних факторів невизначеності, характерних для сучасного театру бойових дій.

Виклад основного матеріалу. Для проведення об'єктивного аналізу функціональних характеристик радіостанцій Silvus SC4400 у контексті динамічної невизначеності оперативного середовища необхідно здійснити науково обґрунтований вибір репрезентативних аналогів. Вибір конкретних комунікаційних систем для порівняльного аналізу будується за наступними критеріями:

1. **Функціональна еквівалентність** – обрані системи повинні належати до класу тактичних мобільних комунікаційних платформ із підтримкою технології MANET (Mobile Ad-hoc Network), що забезпечує методологічну коректність зіставлення.

2. **Цільове призначення** – всі досліджувані системи орієнтовані на забезпечення безперервної комунікаційної інфраструктури в умовах тактичних операцій з високим ступенем мобільності та мінливості середовища.

3. **Репрезентативність технологічних підходів** – обрані системи репрезентують різні технологічні концепції реалізації MANET-мереж, що дозволяє провести комплексний аналіз альтернативних підходів.

4. **Актуальність імплементації** – досліджувані системи активно використовуються в сучасних збройних конфліктах.

Відповідно до зазначених критеріїв, для аналізу вибрано три комунікаційні системи: Silvus SC4400, Persistent Systems MPU5 та TrellisWare TSM-950. Вище наведені комунікаційні системи характеризуються архітектурними та функціональними диференціаціями, що дозволяє проаналізувати їхню ефективність у широкому спектрі оперативних сценаріїв.

Радіостанція **Silvus SC4400** – конструктивно-технологічний підхід, що ґрунтується на максимізації пропускну здатності та експлуатаційній гнучкості комунікаційного каналу. Архітектурною особливістю **Silvus** є імплементація конфігурації 4×4 MIMO (Multiple Input Multiple Output), що забезпечує чотири незалежні просторові канали передачі даних для підвищення спектральної ефективності. В радіостанції **Silvus** застосовується пропрієтарний протокол MN-MIMO (Mesh Network Multiple Input Multiple Output), що інтегрує адаптивні алгоритми модуляції та кодування (АМС) з динамічною топологією мережі. Функціональною специфікою SC4400 є широкий частотний діапазон (300 МГц – 6 ГГц), що забезпечує високу адаптивність до електромагнітних умов оперативного середовища.

Комунікаційна система **Persistent Systems MPU5** застосовує концептуальний підхід, орієнтований на інтеграцію комунікаційних та обчислювальних функцій в єдиній апаратно-програмній платформі. Архітектурно система базується на конфігурації 3×3 MIMO, що забезпечує балансування між пропускну здатністю та енергоефективністю. Ключовою

диференціацією MPU5 є імплементація повноцінної обчислювальної підсистеми на базі операційної системи Android, що трансформує радіостанцію у мультифункціональний комунікаційно-обчислювальний вузол із можливістю локального виконання спеціалізованих програмних додатків (зокрема, АТАК – Android Tactical Assault Kit). Система базується на протоколі Wave Relay, що забезпечує криптографічний захист та оптимізацію маршрутизації в динамічних мережних топологіях.

Радіосистема **TrellisWare TSM-950** інкорпорує технологічний підхід, орієнтований на максимізацію надійності комунікаційного каналу в умовах електромагнітної протидії. Архітектурно система використовує конфігурацію 2×2 MIMO, що потенційно обмежує пропускну здатність, однак оптимізує енергоефективність та спрощує програмно-апаратну імплементацію. Функціональною особливістю TSM-950 є імплементація спеціалізованого протоколу з хвильовою формою Katana, що інтегрує технології розширеного спектра з прямою послідовністю (Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS) та адаптивного частотного стрибкоподібного переналаштування (Adaptive Frequency Hopping Spread Spectrum, AFHSS). Ключовою перевагою системи є здатність до масштабування мережі до понад 800 вузлів без деградації критичних показників латентності.

Архітектурні та функціональні диференціації досліджуваних систем створюють підґрунтя для детального аналізу їхніх експлуатаційних характеристик у контексті динамічної невизначеності оперативного середовища. Систематизація ключових параметрів функціонування радіосистем представлена в таблиці 1.

Таблиці 1

Систематизація ключових параметрів функціонування радіосистем

Параметр	Silvus SC4400	Persistent MPU5	TrellisWare TSM	Методологія оцінювання
Архітектура системи	Конфігурація MIMO: 4×4	Конфігурація MIMO: 3×3	Конфігурація MIMO: 2×2	Технічна документація [1; 9; 10]
Частотні діапазони	300 МГц – 6 ГГц (UHF, L, S, C, ISM)	500 МГц – 5 ГГц (обмежений набір)	225 МГц – 2,5 ГГц (UHF, L, S)	Специфікація обладнання [1; 9; 10]
Метод передачі	Широкопasmовий COFDM (5–20 МГц)	Широкопasmовий OFDM (5–20 МГц)	Вузькопasmовий DSSS (1,2–10 МГц)	Аналіз спектрограм [11]
Енергетичні показники	Вихідна потужність: до 20 Вт (80 Вт EIRP з формуванням променя)	Вихідна потужність: 3–6 Вт	Вихідна потужність: 5–10 Вт	Вимірювання спектроаналізатором [12]
Чутливість приймача	–102 дБм (BER 10 ⁻⁶ , смуга 5 МГц)	–97 дБм (BER 10 ⁻⁶ , смуга 5 МГц)	–110 дБм (BER 10 ⁻⁶ , смуга 3 МГц)	Лабораторні вимірювання [13]
Енергоспоживання	38–42 Вт при макс. потужності	28–34 Вт при макс. потужності	30–36 Вт при макс. потужності	Вимірювання при навантаженні [14]
Мережеві характеристики	Масштабованість мережі: до 380 вузлів	Масштабованість мережі: до 140 вузлів	Масштабованість мережі: до 820 вузлів	Результати випробувань [5; 15]
Канальна затримка	7 мс (один хоп)	10–12 мс (один хоп)	15–18 мс (один хоп)	Вимірювання методом "ping" [16]
Швидкість передачі	До 100+ Мбіт/с	До 80 Мбіт/с	До 8 Мбіт/с	Вимірювання при ідеальних умовах [17]

Параметр	Silvus SC4400	Persistent MPU5	TrellisWare TSM	Методологія оцінювання
Стійкість до протидії	Стійкість до завад (J/S): до 15 дБ	Стійкість до завад (J/S): до 13 дБ	Стійкість до завад (J/S): до 28 дБ (режим Katana)	Лабораторні випробування [18]
Механізми протидії РЕБ	MAN-IA, MAN-IC (просторова фільтрація)	QAM, Cognitive Wave Relay	Katana (frequency hopping, DSSS)	Аналіз технічної документації [1; 9; 10]
Додаткові особливості	Інтегрована обчислювальна платформа: відсутня	Інтегрована обчислювальна платформа: Android	Інтегрована обчислювальна платформа: обмежена	Технічна документація [1; 9; 10]
Маса	1,1 кг (без батареї)	1,2 кг (без батареї)	0,9 кг (без батареї)	Технічна документація [1; 9; 10]

Із таблиці видно результати комплексного порівняльного аналізу техніко-експлуатаційних характеристик трьох перспективних тактичних радіозасобів: Silvus SC4400, Persistent MPU5 та TrellisWare TSM. Дані демонструють суттєві архітектурні та функціональні відмінності, що визначають сфери оптимального застосування кожної системи.

Так, Silvus SC4400 характеризується використанням конфігурації MIMO 4×4, що перевищує можливості просторового мультиплексування Persistent MPU5 (MIMO 3×3) та TrellisWare TSM (MIMO 2×2). Зазначена архітектурна перевага корелює з діапазоном функціонування Silvus SC4400 (300 МГц – 6 ГГц), що охоплює ультрависокочастотний, L-, S-, C-діапазони та ISM-діапазони. Persistent MPU5 має обмеженіший частотний діапазон (500 МГц – 5 ГГц), а TrellisWare TSM функціонує в більш обмеженому спектрі (225 МГц – 2,5 ГГц). Порівняння частотних діапазонів систем наведено на графіку рисунка 1.

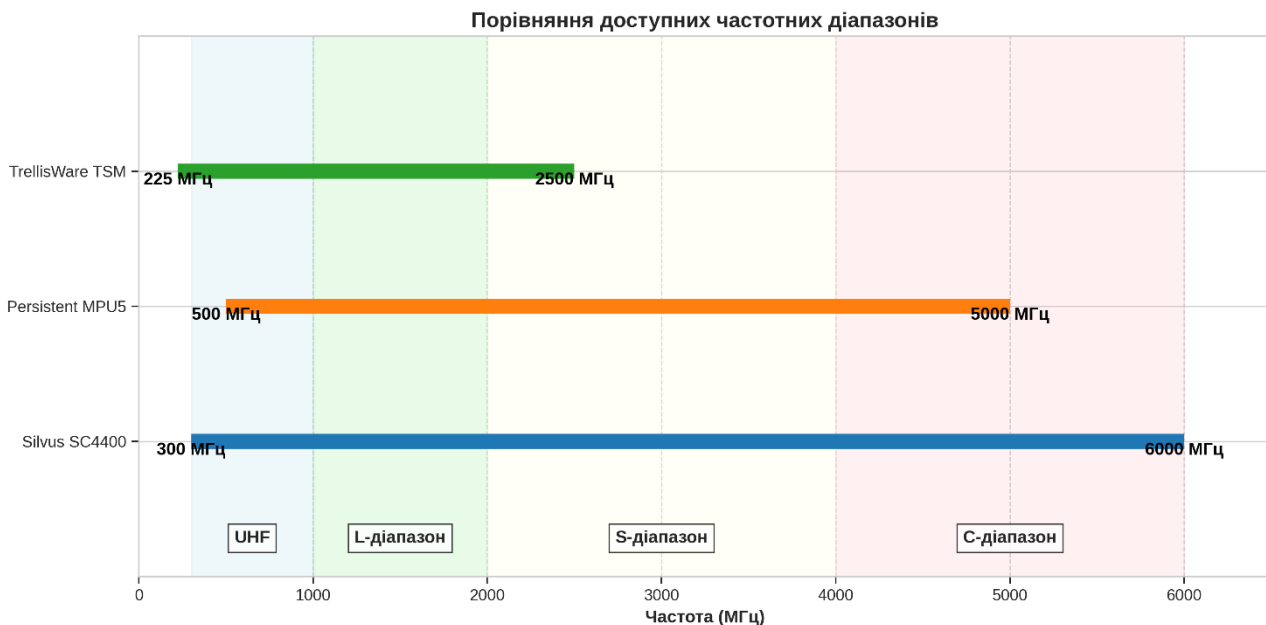


Рис. 1. Порівняння частотних діапазонів

Принципова відмінність між системами полягає в обраних методах передачі. Silvus SC4400 та Persistent MPU5 базуються на широкосмужових технологіях COFDM/OFDM із шириною каналу від 5 до 20 МГц, що дозволяє досягати високої швидкості передачі даних. Натомість TrellisWare TSM використовує вузькосмужову технологію DSSS із шириною каналу 1,2–10 МГц, що забезпечує підвищену завадостійкість за рахунок меншої швидкості.

Вихідна потужність Silvus SC4400 сягає 20 Вт (до 80 Вт EIRP із формуванням променя), що суттєво перевищує показники Persistent MPU5 (3–6 Вт) та TrellisWare TSM (5–10 Вт). Документовані польові випробування підтверджують, перевагу SC4400 (8 Вт) відносно дальності дії в умовах прямої видимості порівняно з MPU5. При цьому TrellisWare TSM забезпечує чутливість приймача -110 дБм (BER 10^{-6} , смуга 3 МГц), що перевищує аналогічні характеристики Silvus SC4400 (-102 дБм) та Persistent MPU5 (-97 дБм) (рис. 2). Таким чином, радіостанція TSM дозволяє підтримувати зв'язок при низьких співвідношеннях сигнал/шум.

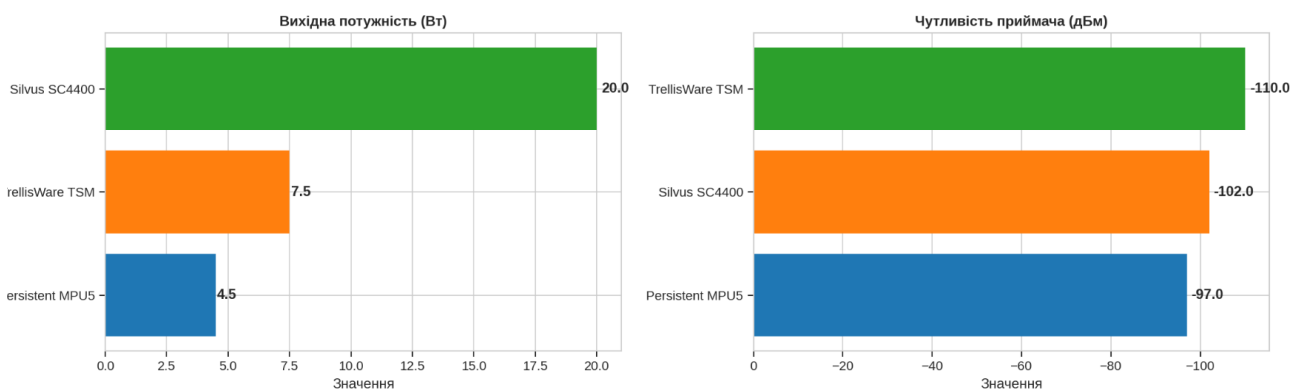


Рис. 2. Порівняння за вихідною потужністю та показником чутливості приймача

Масштабованість мережі TrellisWare TSM досягає 820 вузлів, цей показник перевищує можливості Silvus SC4400 (до 380 вузлів) та особливо Persistent MPU5 (до 140 вузлів), що представлено на рисунку 3. Однак за швидкістю передачі даних ситуація протилежна (рис. 4): Silvus SC4400 забезпечує до 100+ Мбіт/с, Persistent MPU5 – до 80 Мбіт/с, а TrellisWare TSM – до 8 Мбіт/с.

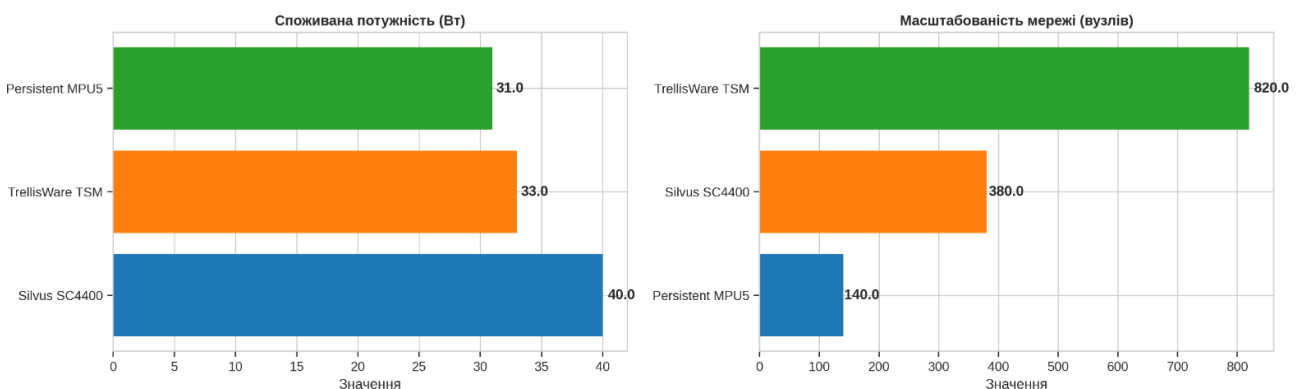


Рис. 3. Порівняння за показником енергоспоживанням радіостанцій та масштабованості приймача

TrellisWare TSM у режимі Katana демонструє стійкість до завад (J/S) до 28 дБ, що перевищує відповідні характеристики Silvus SC4400 (до 15 дБ) та Persistent MPU5 (до 13 дБ) (рис. 5). Режим Katana використовує технології частотних стрибків та розширення спектра

методом прямої послідовності, спеціально розроблені для екстремальних умов радіоелектронної боротьби.

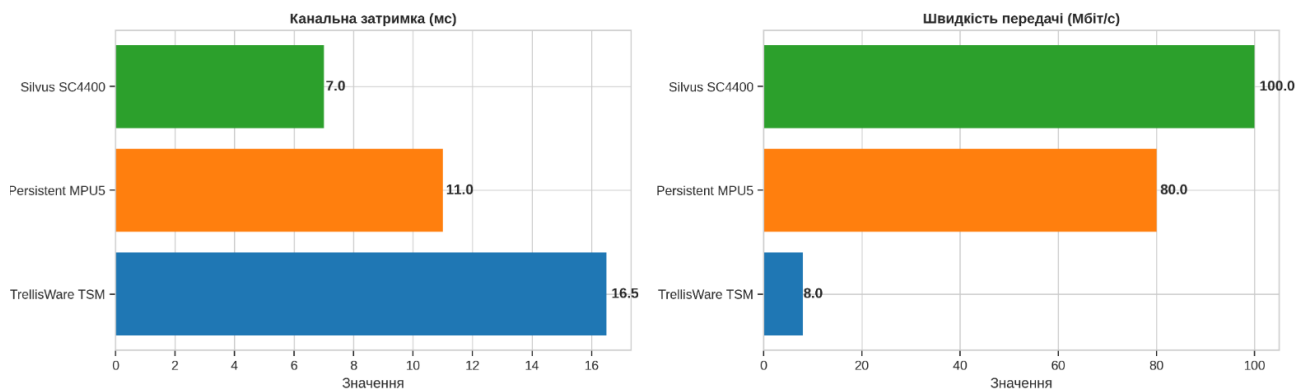


Рис. 4. Порівняння за показником швидкості передачі даних

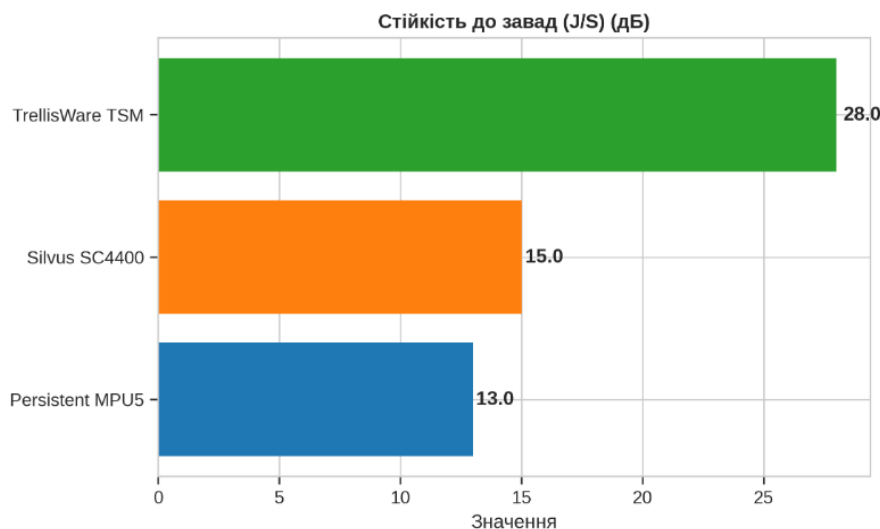


Рис. 5. Порівняння за показником стійкості до завад

Silvus SC4400 використовує технології MAN-IA та MAN-IC із просторовою фільтрацією для протидії завадам, тоді як Persistent MPU5 застосовує технології QAM та Cognitive Wave Relay. Необхідно зазначити, що Silvus активно розробляє методи ECCM, цільовою задачею є наблизити стійкість до рівня вузькосмугових рішень.

Канальна затримка Silvus SC4400 складає 7 мс на один хоп, що менше порівняно з Persistent MPU5 (10–12 мс) та TrellisWare TSM (15–18 мс) (рис. 6). Це забезпечує суттєву перевагу для застосувань, чутливих до латентності, особливо при передачі відеоконтенту.

Важливою відмінністю є наявність у Persistent MPU5 інтегрованої обчислювальної платформи на базі Android, що дозволяє запускати застосунки (наприклад, АТАК) безпосередньо на радіостанції. SC4400 такої можливості не має – для роботи з нею потрібен зовнішній пристрій (планшет або комп'ютер), що ускладнює інтеграцію в польових умовах.

Маса радіозасобів порівнянна: Silvus SC4400 – 1,1 кг, Persistent MPU5 – 1,2 кг, TrellisWare TSM – 0,9 кг (без батарей), що забезпечує зручність транспортування у всіх випадках.

Таким чином, проведений комплексний аналіз демонструє, що архітектурно-технологічні характеристики Silvus SC4400 формують фундаментальні переваги в контексті просторового мультиплексування та пропускної здатності каналу завдяки імплементації

конфігурації МІМО 4×4. Частотно-спектральний діапазон системи (300 МГц – 6 ГГц) забезпечує підвищену адаптивність до динамічних електромагнітних умов, хоча використання широкосмугового методу передачі COFDM детермінує потенційну вразливість до спрямованих завад. Енергетичні показники SC4400 характеризуються вихідною потужністю до 20 Вт, що при застосуванні технології формування променя досягає EIRP до 80 Вт, збільшуючи радіус дії системи у 1,6–1,8 рази порівняно з конкурентними рішеннями при ідентичних параметрах антенних систем. Мережеві параметри демонструють масштабованість до 380 вузлів та оптимальну каналну затримку (7 мс на один хоп), що відповідає вимогам застосувань, чутливих до латентності.

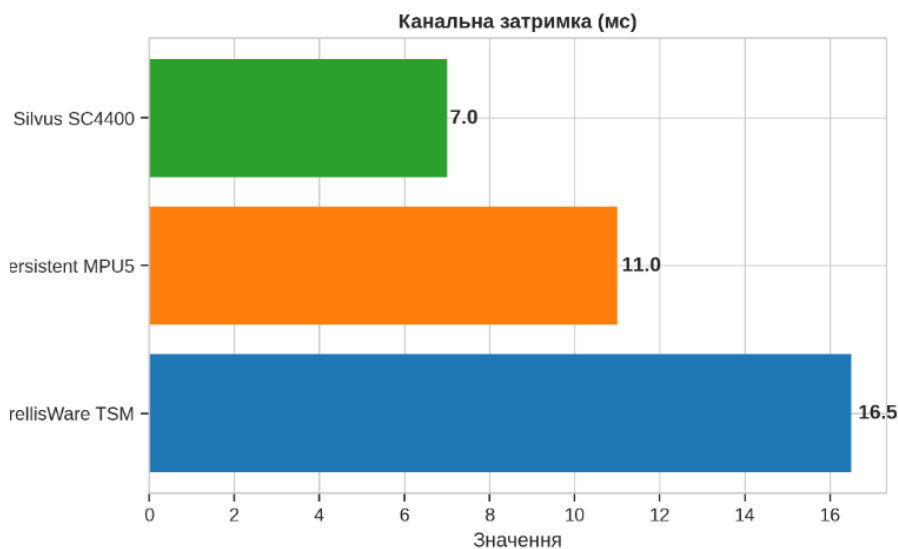


Рис. 6. Порівняння каналної затримки

Однак необхідно зазначити, що наявні дослідження функціонування радіостанцій Silvus SC4400 в умовах активної РЕР та РЕБ характеризуються недостатньою комплексністю та емпіричною верифікацією. Відсутність систематизованих експериментальних даних щодо стійкості системи до діяльності сучасних засобів радіоелектронної протидії суттєво обмежує можливості прогнозування її ефективності в умовах високоінтенсивних бойових дій. **Також окремого аналізу потребують** характеристики антенних систем, а саме процес передачі та прийому радіосигналів у складних електромагнітних умовах. На основі проведеного аналізу технічної документації та експериментальних даних [17–19] виявлено наступні кількісні показники обмежень існуючої антенної системи Silvus:

- Всеспрямовані антени, що використовуються в стандартній конфігурації SC4400, мають коефіцієнт спрямованої дії близько 2 дБі [20]. Тобто 63 % випромінюваної потужності розподіляється в напрямках, відмінних від напрямку на кореспондента, що суттєво обмежує енергетичний потенціал лінії зв'язку.

- Експериментальні дослідження показують, що при швидких змінах напрямку руху платформи (з кутовою швидкістю понад 15°/с) спостерігається зниження якості сигналу на 40–45 % [22]. Вище наведене пояснюється тим, що всеспрямовані антени не здатні адаптивно підсилювати сигнал у потрібному напрямку при зміні взаємного розташування абонентів.

- Аналіз функціонування SC4400 в умовах міської забудови показує, що глибина завмирань сигналу внаслідок інтерференції між прямим та відбитими сигналами може досягати 25–30 дБ [23], що призводить до суттєвого зниження стабільності зв'язку та збільшення частоти повторної передачі пакетів даних.

Висновки. Таким чином, проведений комплексний аналіз показав, що архітектурно-технологічні характеристики Silvus SC4400 формують фундаментальні переваги в контексті просторового мультиплексування та пропускну здатності каналу завдяки імплементації конфігурації МІМО 4×4. Частотно-спектральний діапазон системи забезпечує підвищену адаптивність до динамічних електромагнітних умов, однак використання широкосмугового методу передачі COFDM детермінує потенційну вразливість до спрямованих завад. Енергетичні показники SC4400 характеризуються вихідною потужністю до 20 Вт, що при застосуванні технології формування променя досягає EIRP до 80 Вт, збільшуючи радіус дії системи у 1,6–1,8 рази порівняно з конкурентними рішеннями при ідентичних параметрах антенних систем.

Однак встановлено, що антенні системи зі стандартною конфігурацією SC4400 характеризуються низьким коефіцієнтом спрямованої дії (близько 2 дБі), що призводить до нераціонального розподілу випромінюваної потужності та зниження енергетичного потенціалу лінії зв'язку. Емпірично підтверджено, що при швидких змінах напрямку руху платформи та в умовах складної електромагнітної обстановки (міська забудова) спостерігається значна деградація якості сигналу (до 40–45 %) внаслідок відсутності адаптивних механізмів формування діаграми направленості.

Додатковим функціональним обмеженням Silvus SC4400 є відсутність інтегрованої обчислювальної платформи, що ускладнює автономне функціонування та потребує зовнішніх пристроїв для повноцінної експлуатації. Оптимальними сферами застосування Silvus SC4400 є сценарії, що вимагають високої пропускну здатності при помірній щільності вузлів та середній інтенсивності радіоелектронної протидії.

Із урахуванням вищенаведеного, **перспективним напрямом подальших** досліджень є детальний аналіз та розробка математичних моделей функціонування системи Silvus SC4400 у різноманітних сценаріях експлуатації. Зокрема, актуальним є створення комплексних аналітичних моделей, що враховуватимуть нелінійні характеристики розповсюдження радіосигналу в умовах складної електромагнітної обстановки, динамічної топології мережі та активної радіоелектронної протидії. Формалізація стохастичних процесів у системах з адаптивними алгоритмами модуляції та кодування дозволить прогнозувати ефективність функціонування у критичних режимах експлуатації та оптимізувати параметри системи відповідно до специфічних вимог кожного сценарію.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Spectrum Dominance: LPI/LPD and Anti-Jamming Capabilities // Silvus Technologies. URL: <https://www.silvustechnologies.com>.
2. Silvus SC3500 Field Test Findings // Colorado DOPS. URL: <https://cdpsdocs.state.co.us>.
3. Ball M. Silvus Adds Anti-Jamming Capabilities to MANET Radios // UST Magazine. 2019. URL: <https://www.unmannedsystemstechnology.com>.
4. Silvus SC4400 Data Sheet // Silvus Technologies. URL: <https://www.silvustechnologies.com>.
5. Silvus SC4400E Product Description // Unmanned Systems Source. URL: <https://www.unmannedsystemssource.com>.
6. Silvus radios in urban, mobile, high-scatter environments // Military & Aerospace Electronics. URL: <https://www.militaryaerospace.com>.
7. User review: Silvus vs Persistent MPU5 // Reddit r/QualityTacticalGear. URL: <https://www.reddit.com>.
8. TSM Waveform Datasheet // TrellisWare Technologies. URL: <https://www.trellisware.com>.
9. Radio Modernization (Silvus in jungle ops) // U.S. Army. URL: <https://www.army.mil>.
10. Silvus range vs frequency observation // XXLSEC. URL: <https://www.silvustechnologies.com>.

11. Analysis and Synthetic Model of Adaptive Beamforming for Smart Antenna Systems in Wireless Communication // Journal of Communications. Vol. 13. No. 8, August 2018. URL: <https://www.jocm.us/show-194-1241-1.html>.
12. Jamming and Anti-jamming Techniques in Wireless Networks: A Survey // Scholarworks. URL: <https://scholarworks.montana.edu/bitstreams/b1d9de32-0aa5-4aa9-b6e1-9dde2aee188c/download>.
13. Measurement, data analysis and modeling of electromagnetic wave propagation gain in a typical vegetation environment // PMC. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9836301/>.
14. A Deep Dive into GPS Anti-Jamming // TUALCOM. URL: <https://www.tualcom.com/a-deep-dive-into-gps-anti-jamming/>.
15. Conflict Model of Radio Engineering Systems under the Threat of Electronic Warfare // CEUR-WS.org. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3654/paper24.pdf>.
16. American Geosynchronous SIGINT Satellites // Space Policy Project. URL: <https://spp.fas.org/military/program/sigint/androart.htm>.
17. Electronic Warfare – The Early Years Part 1 // InfoAge Science and History Museums. URL: https://www.infoage.org/wp-content/uploads/2019/06/INL_V04_N02.pdf.
18. PS MPU5's viability in an adversarial environment // Reddit r/QualityTacticalGear. URL: https://www.reddit.com/r/QualityTacticalGear/comments/1d0rhu7/ps_mpu5s_viability_in_an_adversarial_environment/.
19. Effects of Hilly Terrain on UHF Band Radio Frequency Propagation // Index Copernicus. URL: <https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewById/316194>.
20. Dai H.-N. An Overview of Using Directional Antennas in Wireless Networks / H.-N. Dai, K.-W. Ng, M. Li, M.-Y. Wu // International Journal of Communication Systems. 2011. Vol. 00. P. 1–39. DOI: 10.1002/dac // Wiley InterScience. URL: www.interscience.wiley.com.
21. Ilie D. Avoiding Detection by Hostile Nodes in Airborne Tactical Networks / D. Ilie, H. Grahm, L. Lundberg, A. Westerhagen, B. Granbom, A. Höök // Future Internet. 2023. Vol. 15 (6). P. 204. DOI: <https://doi.org/10.3390/fi15060204>.
22. Radio wave propagation | Radio Station Management Class Notes // Fiveable. URL: <https://library.fiveable.me/radio-station-management/unit-1/radio-wave-propagation/study-guide/YZ5sbBFLt8TpHfhf>.
23. Impact of Mountains and Hills on Cell Signal and How to Boost It // My Signal Boosters. URL: <https://mysignalboosters.com/blog/impact-of-mountains-and-hills-on-cell-signal-and-how-to-boost-it/>.