

УДК 621.391

Руденко В. І. ORCID 0000-0003-3563-548X (ВІТІ ім. Героїв Крут)
Зінченко М. О. ORCID 0000-0002-1428-8231 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
Яковчук О. В. ORCID 0000-0002-6312-5009 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
Плугова О. Б. ORCID 0000-0001-7848-7806 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

КОНЦЕПТУАЛЬНІ АСПЕКТИ ЩОДО РОЗРОБКИ ПЕРСПЕКТИВНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ В УМОВАХ ВПЛИВУ ЗАСОБІВ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ БОРОТЬБИ

На підставі проведеного аналізу ефективності функціонування основних підсистем супутникового зв'язку Збройних Сил України під час відсічі збройної агресії російської федерації, впливу засобів радіоелектронної боротьби противника на дані системи визначаються напрямки розвитку військової системи супутникового зв'язку на ближню та подальшу перспективу. У статті розглядаються концептуальні аспекти щодо розробки нової моделі перспективної системи супутникового зв'язку ЗС України, яка базується на оренді потоків (каналів) або частотно-орбітального ресурсу в операторів супутникового зв'язку. Дані системи супутникового зв'язку спеціального призначення повинні забезпечувати високий і стабільний рівень сигналу над Україною, необхідну якість, швидкість передачі, розвід- та завадозахищений супутниковий зв'язок із використанням новітніх інформаційно-комунікаційних технологій. Для протидії засобам радіоелектронної боротьби противника використовуються супутники на низьких навіколоземних орбітах, бортова обробка сигналів та вузькі промені бортових діаграм направленості. Поряд з даними способами захисту від радіоелектронного придушення науково обґрунтовуються та пропонуються до застосування адаптивні антенні решітки. Принцип роботи даних антен характеризується її діаграмою направленості. Придушення завади досягається завдяки управлінню положеннями нулів діаграми направленості і зменшенню рівня бічних пелюсток у напрямку джерела завади. Адаптивні антени здатні також визначати напрямок впливу завад і зменшувати їх вплив в умовах відсутності апріорної інформації про сигнально-завадову обстановку.

Запропонована модель перспективної системи супутникового зв'язку ЗС України збільшить швидкість передачі, стійкість до засобів радіоелектронної боротьби противника та зменшить затримку сигналу на різних рівнях управління ЗС України.

Майбутній розвиток моделі перспективної системи буде полягати в застосуванні адаптивного формування променю антенної решітки на базі SDR технології, що дозволить формувати більш вузьку діаграму направленості та надасть можливість доступу більшій кількості користувачів.

Ключові слова: система супутникового зв'язку, супутники, термінали, перспективна система супутникового зв'язку, радіоелектронна боротьба, адаптивні антенні решітки.

V. Rudenko, M. Zinchenko, O. Yakovchuk, O. Plugova. Conceptual aspects of developing a promising model of a special-purpose satellite communication system under the influence of electronic warfare means

Based on the analysis of the effectiveness of the functioning of the main satellite communication subsystems of the Armed Forces of Ukraine during the repulsion of the armed aggression of the Russian Federation, the impact of enemy electronic warfare on these systems, the directions of development of the military satellite communication system for the near and long term are determined. The article considers conceptual aspects of developing a new model of a promising satellite communication system for the Armed Forces of Ukraine, which is based on leasing streams (channels) or frequency-orbital resources from satellite communication operators. These special-purpose satellite communication systems must provide a high and stable signal level over Ukraine, the necessary quality, transmission speed, intelligence- and jamming-protected satellite communication using the latest information and communication technologies. Particular attention is paid to the use of satellites in low Earth orbits, on-board signal processing, narrow beams of on-board directional diagrams to counter enemy electronic warfare. Along with these methods for protection against electronic jamming, adaptive antenna arrays are scientifically substantiated and proposed for use. The principle of operation of these antennas is characterized by its directivity diagram. Suppression of interference is achieved by controlling the positions of the zeros of the directivity diagram and reducing the level of side lobes in the direction of the interference source. Adaptive antennas are also able to determine the direction of interference and reduce their impact in the absence of a priori information about the signal-interference situation.

The proposed model of a promising satellite communication system for the Armed Forces of Ukraine will increase transmission speed, resistance to enemy electronic warfare equipment, and reduce signal delay at various levels of command of the Armed Forces of Ukraine.

Future development of the promising system model will involve the use of adaptive beamforming of the antenna array based on SDR technology, which will allow for the formation of a narrower directivity pattern and provide access to a larger number of users.

Keywords: *satellite communication system, satellites, terminals, promising satellite communication system, electronic warfare, adaptive antenna arrays.*

Вступ. Досвід ведення війни з російською федерацією показав, що противник активно застосовує засоби радіоелектронної боротьби (далі – РЕБ) з метою виведення з ладу системи зв'язку ЗС України [1], в тому числі і системи супутникового зв'язку (далі – ССЗ) [2], для порушення надійного управління військами (силами). Через це ситуація, яка склалася, показала, що відсутність надійного супутникового зв'язку є суттєвим недоліком існуючої системи зв'язку ЗС України. Тому було прийнято рішення щодо оренди потоків (каналів) або частотно-орбітального ресурсу у міжнародних операторів супутникового зв'язку провідних держав світу та/або у військових ССЗ країн-членів НАТО для забезпечення зв'язку військовим користувачам.

Постановка задачі. На підставі аналізу ефективності функціонування основних підсистем супутникового зв'язку ЗС України під час застосування російською федерацією засобів РЕБ можна зробити висновки, що діючі підсистеми не завжди відповідають покладеним на них функціям та потребують модернізації і перебудови. Тому ставиться задача розробити нову модель перспективної системи супутникового зв'язку (далі – ПССЗ) ЗС України на основі оренди потоків (каналів) або частотно-орбітального ресурсу. Дана система повинна забезпечувати стійкий і безперебійний зв'язок між пунктами управління об'єднань, з'єднань, частин і підрозділів в умовах активного застосування противником засобів РЕБ.

Аналіз останніх публікацій та досліджень

Доктрина [1] забезпечує загальне стратегічне керівництво із застосування зв'язку та інформаційних систем у ЗС України. Вводить термінологію в галузі зв'язку та інформаційних систем, сумісну із прийнятою термінологією в НАТО. Даний документ відповідає положенням і структурі викладення та понятійному апарату, який використовується в союзній публікації НАТО АJP-06.

Настанова [2] є регламентуючим документом, який визначає основні теоретичні положення та принципи функціонування існуючих ССЗ. Здійснює опис складових частин і технічних характеристик кінцевого обладнання супутникового зв'язку, що перебуває на озброєнні в ЗС України.

У статті [3] розроблена модель ПССЗ та передачі даних ЗС України на підставі аналізу існуючих ССЗ армій провідних країн світу та країн-членів НАТО, новітніх досягнень інформаційних технологій у галузі зв'язку і тенденцій розвитку електронних комунікаційних мереж ЗС України. До складу даної моделі входить одна система з використанням супутника на геостаціонарній орбіті та дві системи на низьких і середніх навколоземних орбітах, які повною мірою не забезпечують захист від впливу засобів РЕБ противника.

У роботі [4] розглянутий стан ССЗ збройних сил США та країн-членів НАТО. На підставі даного аналізу були розроблені пропозиції щодо побудови ПССЗ ЗС України, але дана система будувалась на використанні супутників на геостаціонарній орбіті, які мають низьку швидкість передачі та не забезпечують надійний захист від засобів РЕБ противника.

Концепція [5] забезпечує формування економічно стійкої, конкурентоспроможної, диверсифікованої ракетно-космічної галузі та передбачає розвиток сучасних космічних технологій в Україні. Документ дозволить створити потужну систему дистанційного зондування Землі та Національну систему космічного зв'язку з використанням наукового та промислового потенціалу України.

Настанова [6] дає визначення, що таке РЕБ та регламентує порядок виконання заходів радіо-, радіотехнічного контролю у процесі виконання завдань за призначенням військовими частинами (підрозділами) радіоелектронного захисту.

У виданні [7] розглядаються основні положення систем адаптивних матриць. З кожним роком кількість застосувань даних систем зростає, розширюються принципи та фундаментальні методи, які мають вирішальне значення для цих систем. Задача подавлення завад досить складна, може вирішуватись із застосуванням різних способів і методів.

У статті [8] проводиться аналіз ефективності застосування адаптивних антенних решіток у системах радіозв'язку в умовах активної РЕБ. Показано, що перспективними напрямками підвищення захисту військових систем радіозв'язку від завад є використання багатоантенних систем, що працюють з використанням адаптивних антенних решіток, але в роботі не розглядається ефект застосування антенних решіток в ССЗ.

Таким чином, проведений аналіз основних публікацій та досліджень показав, що на сьогодні існує багато статей і матеріалів стану та розвитку ССЗ спеціального призначення, але дані системи здебільшого використовують геостационарні орбіти, які не тільки мають низьку швидкість передачі, але й не здатні забезпечувати надійний зв'язок в умовах активної РЕБ.

Метою статті є розкриття концептуальних поглядів щодо розробки перспективної моделі ССЗ спеціального призначення в умовах впливу засобів РЕБ.

Виклад основного матеріалу дослідження

1. Дослідження ефективності функціонування основних систем супутникового зв'язку Збройних Сил України

Супутниковий зв'язок посідає особливе місце в системі військового зв'язку та відіграє важливу роль у забезпеченні надійного управління військами (силами).

Основне призначення ССЗ ЗС України полягає в забезпеченні надійних, захищених каналів зв'язку на усіх рівнях управління. Супутниковий зв'язок відіграє та буде продовжувати відігравати ключову роль у військових системах зв'язку. Найважливішими перевагами супутникового зв'язку щодо інших видів зв'язку є глобальне охоплення, висока стійкість та оперативність – здатність забезпечувати зв'язок з будь-якої точки Землі за дуже короткий час.

Нині ССЗ ЗС України складається з різних систем, станцій та засобів супутникового зв'язку, таких як: Starlink, Tooway, OneWeb, Satcube, KIT 9350, L-TAC Slingshot, Hughes Thuraya XT-PRO, Iridium 9575A, Kymeta Corporation, SatPaq2 та інших. У даному розділі ми проведемо дослідження технічних характеристик та ефективності функціонування трьох основних ССЗ: Starlink, Tooway, OneWeb, і зробимо висновки щодо їх використання.

1.1. Система супутникового зв'язку Starlink

Після повномасштабного вторгнення російської федерації, Україні було надано доступ до ССЗ Starlink – проєкту американської компанії SpaceX.

Комерційна ССЗ Starlink (рис. 1) – перше та найбільше у світі супутникове угруповання, яке використовує низьку навколоземну орбіту для надання ширококутового Інтернету у будь-якій точці планети. Понад 6 000 супутників знаходяться на орбітах висотою від 336 км до 570 км від поверхні Землі, які рухаються зі швидкістю 27 000 км/год. Очікуваний термін служби даних супутників складає біля 8 років [3].

ССЗ Starlink складається з двох супутникових мереж:

перша мережа – використовує Ku- та Ka-діапазони;

друга мережа – використовує V-діапазон.

Із появою у ЗС України системи Starlink ситуація щодо організації супутникового зв'язку значно покращилась. Система стала невід'ємною складовою військового управління ЗС України та використовується як основний засіб зв'язку на різних рівнях управління.

ССЗ стрімко розвивається, останнім часом на супутниках почали розміщувати додаткове обладнання в інтересах військових користувачів. Обладнання, що встановлюється, збільшує швидкість передачі та підвищує стійкість до протидії засобам РЕБ та радіоелектронної розвідки (далі – РЕР) противника.

Нині близько 3 000 терміналів ЗС України отримали доступ до захищеної мережі американського військового супутникового зв'язку Starlink – Starshield, яка сумісна з цивільними супутниками Starlink.

Таким чином, використовуючи низькі навколоземні орбіти, сучасні супутники та новітнє обладнання, ССЗ Starlink надає надійний високошвидкісний Інтернет з малою затримкою сигналів для користувачів у найвіддаленіших точках світу. Швидкість підключення Інтернету в перспективі становитиме до 1 Гбіт/с із затримкою сигналу до 40 мс. Антена терміналу користувача “бачить” один супутник в інтервалі від 3 до 5 хвилин, після чого перемикається на інший низькоорбітальний супутник. Зона покриття навколо наземних хабів знаходиться у радіусі біля 900 км.

Комплекти терміналів Starlink поставляються з усім необхідним для підключення обладнанням, терміни їх розгортання становлять лічені хвилини. Термінали rev1 та rev2 з круглою антеною (V1) знімаються з виробництва, термінали rev3, hp1 та rev4 не завжди придатні для застосування в бойових умовах та потребують доопрацювання. Сучасні модернізовані термінали адаптовані для використання в польових умовах, можуть застосовуватися на безпілотних і транспортних засобах, в яких використовуються стандартні інтегровані елементи живлення, роз'єми, перемикачі, що призводить до скорочення часу на розгортання/згортання комплектів та спрощує їх експлуатацію [9].

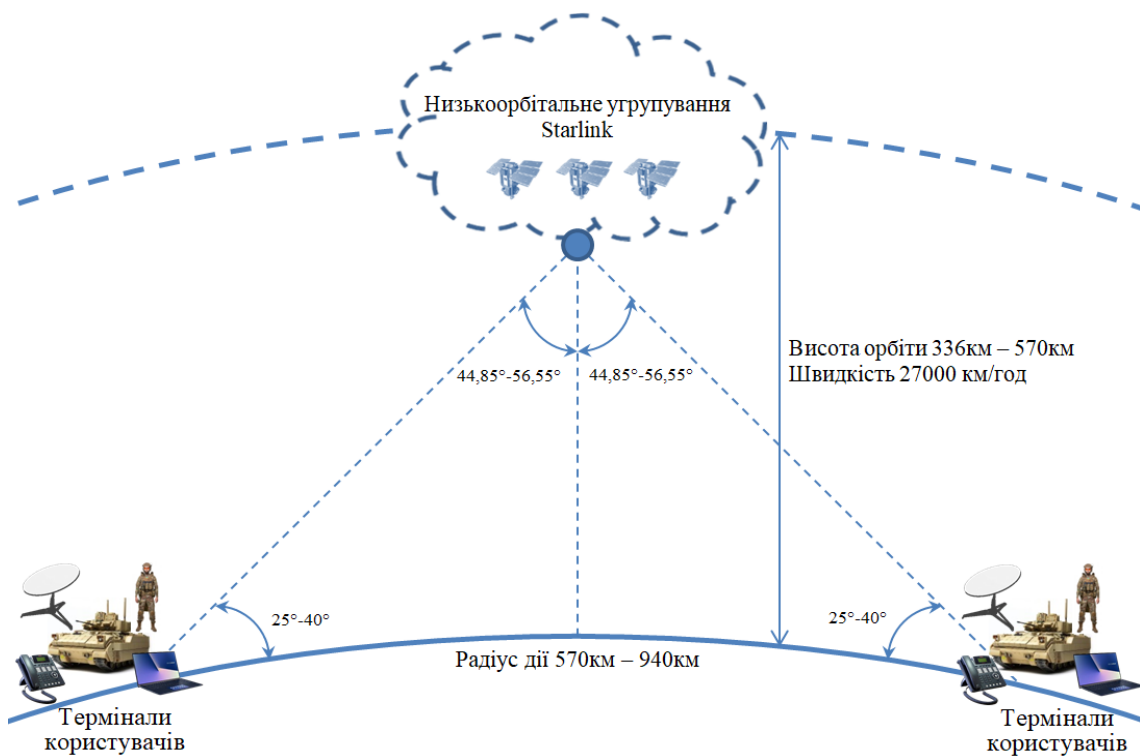


Рис. 1. Система супутникового зв'язку Starlink

Основні тактико-технічні характеристики даної системи наведено у таблиці 1.

Застосування програмних способів відключення модуля GPS в системах Starlink – Starshield та різних організаційно-технічних заходів захисту терміналів супутникового зв'язку забезпечить надійний захист системи від впливу засобів РЕБ противника.

1.2. Система супутникового зв'язку Tooway

Система резервного зв'язку Ka-Sat VSAT eTria (рис. 2) призначена для організації двостороннього супутникового зв'язку в Ka-діапазоні. Супутниковий Інтернет Tooway надається провайдером супутникового зв'язку Eutelsat на території всієї Європи з використанням супутника Ka-Sat 9A, який працює в Ka-діапазоні на геостационарній орбіті. Даний супутник обладнується чотирма багатоканальними антенами і транспондером та формує 82 промені, 10 з яких мають доступ та забезпечують 100 % покриття всієї території України. На один промінь виділяється смуга частот 237 МГц транспондера з пропускною здатністю 475 Мбіт/с. Маса корисного навантаження становить близько 1000 кг. Час роботи супутника на орбіті – 16 років. Супутник здатний забезпечити широкосмуговий доступ до мережі Інтернет для більше 1 мільйона користувачів [4].

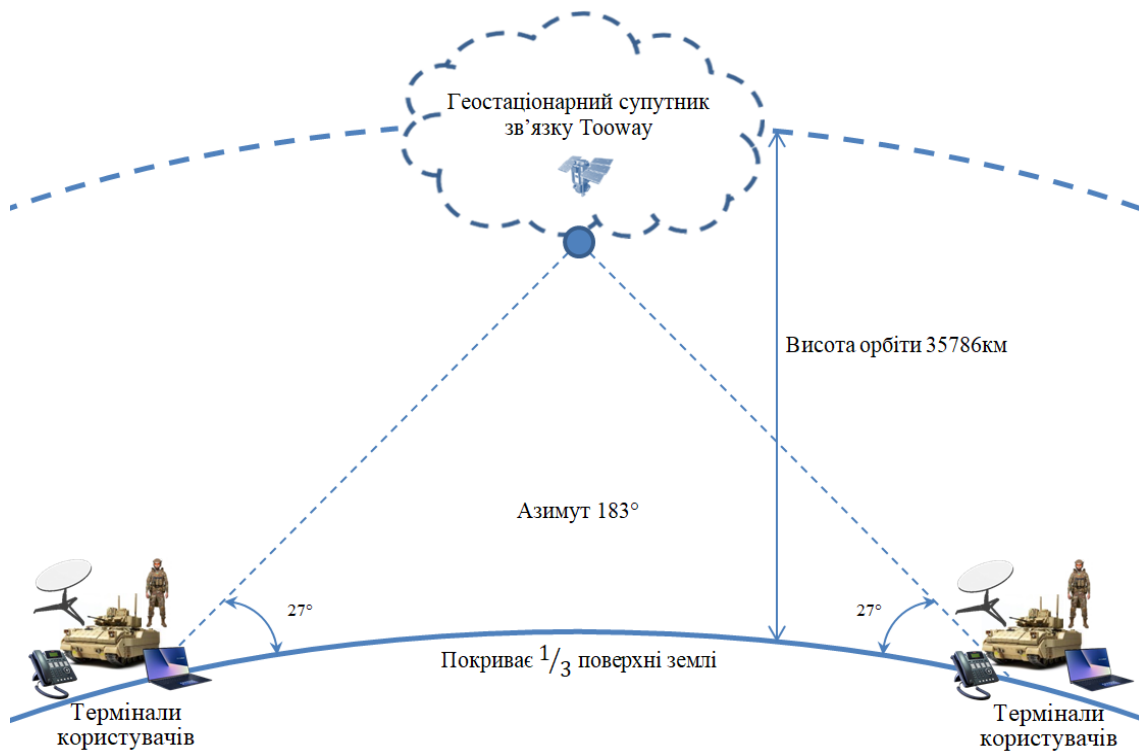


Рис. 2. Система супутникового зв'язку Tooway

ССЗ Tooway забезпечує стійкий зв'язок на усіх рівнях управління ЗС України з можливістю застосування апаратури криптографічного захисту, розширений стандарт шифрування – AES (128, 256 біт).

Основні тактико-технічні характеристики даної системи наведено у таблиці 1.

Після повномасштабного вторгнення російської федерації дана система періодично зазнає впливу зі сторони засобів РЕБ противника, що призводить до зниження швидкості передачі, рівня сигналу та періодичного зникнення сигналу від супутника. В результаті проведеного дослідження встановлено, що перебої зв'язку відбувалися внаслідок встановлення різних видів сторонніх радіозавод на транспондерах геостационарних супутників зв'язку у частотному діапазоні (Передача – 29,5–30,0 ГГц; Прийом – 19,7–20,2 ГГц), виділеному для функціонування даної системи.

1.3. Система супутникового зв'язку OneWeb

Система супутникового зв'язку OneWeb (рис. 3) призначена для надання широкосмугового Інтернету через угруповання OneWeb супутників в Ku-діапазоні з використанням технології CDMA (Code Division Multiple Access), що забезпечує роботу мережі за будь-яких погодних умов на низькій навколоземній орбіті (Low Earth Orbit – LEO) [10]. Дана система має гарантовану на 99,5 % доступність мережі, забезпечує підтримку будь-яких IP-додатків, голосового і відеоконференцзв'язку високої якості. CC3 OneWeb включає в себе технологію оптимізації мультисервісних послуг (MSO), двонаправлене визначення пріоритетів QoS, вбудовані системи керування загрозами та запобігання мережевим вторгненням, антивірусну програму та 256-бітне шифрування AEAD. Система у складі понад 400 супутників на низькій навколоземній орбіті висотою 1200 км являє собою нове покоління послуг супутникового зв'язку, забезпечує в 3–5 разів меншу затримку сигналу, ніж геостаціонарні супутники. Очікуваний термін служби кожного супутника – 5 років, маса становить 147,7 кг. Це перша низькоорбітальна система, яка повністю оптимізована для підтримки онлайн-середовища з використанням сучасних додатків: SaaS/STaaS, Office 365, Google Workspace, SAP, Oracle, IBM та інших. В CC3 можуть використовуватися термінали, як з параболічними, так і плоскими антенами. Дані термінали користувачів оснащені електронною керованою антеною, яка дозволяє автоматично відстежувати супутники OneWeb, забезпечуючи безперервне підключення сигналу. Модем CNX-WIFI дозволяє отримувати доступ до мережі Інтернет за допомогою технології WiFi.

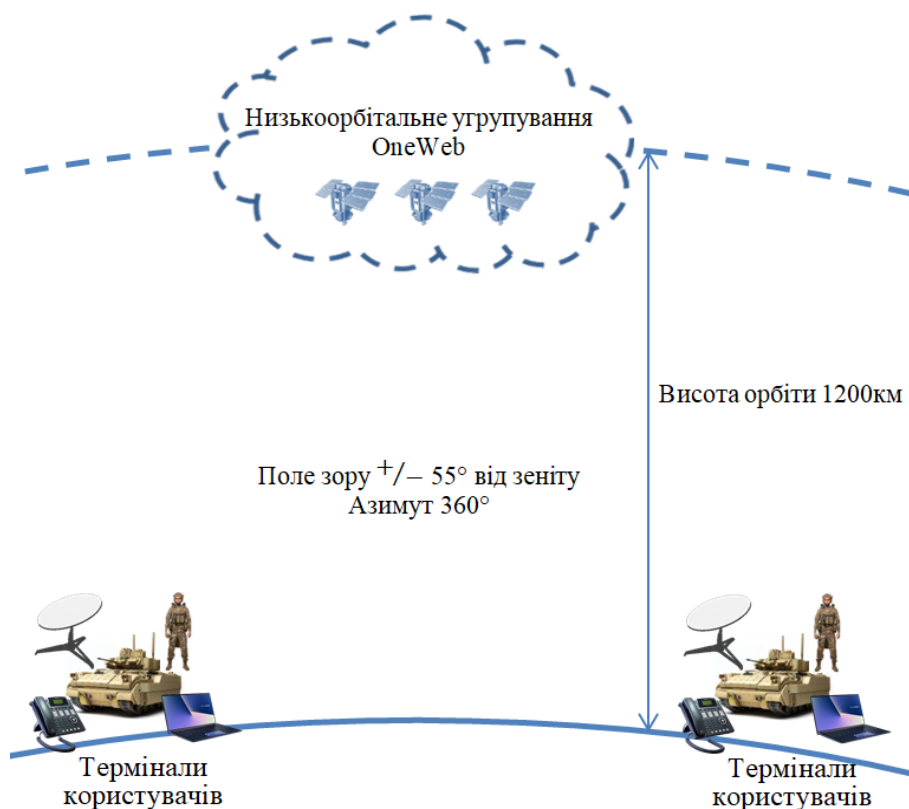


Рис. 3. Система супутникового зв'язку OneWeb

Система OneWeb використовується в наземному та морському транспорті для забезпечення фіксованого та мобільного зв'язку. Тактико-технічні характеристики даної системи наведено у таблиці 1.

ССЗ дозволяє забезпечити надійний зв'язок на всіх рівнях управління ЗС України в умовах активного застосування противником засобів РЕБ.

Тактико-технічні характеристики основних ССЗ ЗС України наведено у таблиці 1.

На підставі проведеного аналізу ефективності функціонування основних ССЗ можна зробити наступні висновки:

1. Система супутникового зв'язку Starlink забезпечує організацію високошвидкісних каналів передачі даних на усіх рівнях управління ЗС України в умовах впливу засобів РЕБ. Застосування програмних способів відключення модуля GPS та різних організаційно-технічних заходів захисту терміналів користувачів забезпечить захист системи від впливу засобів РЕБ противника.

2. Система супутникового зв'язку Tooway дозволяє організувати ефективні, інтерактивні лінії зв'язку високої якості з віддаленими військовими користувачами на різних рівнях управління. Але після повномасштабного вторгнення російської федерації система зазнала суттєвого впливу. На початку повномасштабного вторгнення була здійснена кібернетична атака на ССЗ, внаслідок чого всі станції супутникового зв'язку Ка-діапазону (модеми та прийомо-передавачі) були виведені з ладу. Кібервпливу піддалися також термінали супутникового зв'язку Ку-діапазону, а комерційний супутник, що забезпечував ресурс для ССЗ ЗС України, постійно зазнає впливу зі сторони засобів РЕБ противника, що призводить до зниження швидкості передачі, рівня сигналу або повної відсутності сигналу від супутника.

На наш погляд, перебої зв'язку відбувалися внаслідок того, що супутники на геостаціонарних орбітах постійно знаходяться над однією й тією самою точкою земної кулі, покривають майже одну третину поверхні Землі, тому противник може впливати своїми засобами РЕБ з вказаної території на роботу транспондерів даних супутників.

Таблиця 1

Системи супутникового зв'язку	Starlink (типу rev3, hp1, rev4)	Tooway Ка-діапазону	OneWeb
Основні складові	Wi-Fi роутер, антена	модем, передавач, антена	модем CNX, антена OW10HV
Модуляція	BPSK ... 64QAM	QPSK, 8PSK, 16APSK, 32APSK	
Діапазон частот, ГГц	Прд – 14,0–14,5 Прм – 10,7–12,7	Прд – 29,5–30,0 Прм – 19,7–20,2	Ку (10,7–12,7; 14,0–14,5). Ка (17,8–19,3; 27,5–30,0)
Затримка сигналу, мс	до 40	біля 239	до 70
Швидкість, Мбіт/с	до 300	до 5	до 200
Мережеві стандарти	IPv4, IPv6	VPN тунель, IPSec	IPv4, IPv6
Шифрування	WPA2, WPA3	AES (128, 256 біт)	AEAD (256 біт)
Потужність передавача, Вт	2/4	4/6	до 18
Електроживлення	100–240 В змінного струму	110/220 В змінного струму	100–240 В змінного струму, 12–24 В постійного струму
Споживана потужність, Вт	до 400	24	до 180
Тип антени	Електронна фазована решітка	Параболічна антена, ФАР	Фазована антенна решітка
Розміри антен, см	50 × 30, 57 × 51, 60 × 40	діаметром від 60 до 75	56 × 45 × 12
Поле зору (офсет)	100°, 110°, 140°	(10°)	+/- 55° від зеніту, азимут 360°

Системи супутникового зв'язку	Starlink (типу rev3, hp1, rev4)	Tooway Ка-діапазону	OneWeb
Коефіцієнт підсилення		Антенна – 75 $G_{\text{ант}} = 44,2$ дБі $G_{\text{ант}} = 40,1$ дБі	$G_{\text{ант}} = 36,6$ дБВт
Клас виконання	IP56 (IP54)	IP44	IP66
Діапазон робочих температур, °C	–30...+50	–30...+50	–40...+55
Тип орбіти	Низька навколоземна	Геостаціонарна	Низька навколоземна

3. Система супутникового зв'язку OneWeb дозволяє забезпечити надійний зв'язок на усіх рівнях управління ЗС України в умовах складної завадової обстановки. Потребує постійного контролю зі сторони експлуатуючого персоналу за технічними параметрами транспондерів і терміналів супутникового зв'язку в різних режимах роботи з метою визначення необхідності залучення додаткового обладнання, методів і способів захисту терміналів користувачів від засобів РЕБ противника.

Інші ССЗ: Satcube, KIT 9350, L-TAC Slingshot, Hughes Thuraya XT-PRO, Iridium 9575A, Kymeta Corporation, SatPac2 проходять перевірку, апробацію та дослідну експлуатацію, після чого буде прийняте рішення на їх подальше використання в ССЗ ЗС України.

Український досвід війни з російською федерацією показав, що ворог намагається заблокувати роботу всіх операторів ССЗ ЗС України. Кібернетичній атаці піддалася ССЗ Тоoway на геостаціонарній орбіті – системи Ка- та Ку-діапазонів зазнали втручання з боку противника та були виведені з ладу. Через це гостро виникло питання щодо відновлення супутникового зв'язку та застосування інших більш надійних і стійких до впливу засобів РЕБ противника ССЗ в ЗС України.

За результатами проведених досліджень та зроблених висновків щодо ефективності функціонування основних ССЗ можна констатувати, що діючи ССЗ ЗС України потребує модернізації та перебудови.

2. Метод розробки перспективної системи супутникового зв'язку Збройних Сил України

Після суттєвого впливу засобів РЕБ російської федерації на ССЗ ЗС України виникла нагальна потреба в розробці ПССЗ ЗС України.

Перспективна система супутникового зв'язку повинна забезпечувати:

управління військами (силами) ЗС України в умовах впливу засобів РЕБ противника;

доставку прийнятих рішень органам військового управління всіх рівнів шляхом збору, узагальнення та обробки різномірної інформації;

функціонування з урахуванням бойового досвіду, набутого ЗС України під час відсічі збройної агресії з боку російської федерації, переваг та недоліків існуючих ССЗ збройних сил провідних країн світу та країн-членів НАТО.

На основі проведеного аналізу провідних країн світу по створенню військових ССЗ [4], наукового потенціалу та спроможності вітчизняного оборонно-промислового комплексу України, впливу засобів РЕБ противника на ССЗ під час відсічі збройної агресії російської федерації, розробку ПССЗ ЗС України, на наш погляд, можна розділити на два етапи:

перший етап – оренда потоків (каналів) або частотно-орбітального ресурсу у захищених військових ССЗ країн-членів НАТО та/або у низькоорбітальних комерційних систем провідних країн світу;

другий етап – розроблення сучасної ССЗ ЗС України або Національної системи супутникового зв'язку з використанням новітніх інформаційно-комунікаційних технологій, у якій для військових користувачів виділяються потоки (канали) або частотно-орбітальний ресурс.

2.1. Розробка перспективної системи супутникового зв'язку ЗС України на основі оренди потоків (каналів) або частотно-орбітального ресурсу

На першому етапі розробки ССЗ ЗС України спочатку потрібно правильно вибрати оператора супутникового зв'язку з його навколоземною орбітою, а потім розвивати її наземний потенціал.

Існуючі ССЗ на геостаціонарних орбітах використовують супутники, які постійно знаходяться над однією й тією самою точкою земної кулі, покривають майже одну третину поверхні Землі, тому існує можливість впливу на неї зі сторони засобів РЕБ (РЕР) противника. До повномасштабного вторгнення російської федерації в Україну армії провідних країн світу та країн-членів НАТО здебільшого використовували/орендували ресурс у військових ССЗ на геостаціонарних орбітах, так як більшість комерційних операторів взагалі не досліджували роботу своїх систем у складній радіоелектронній обстановці [4]. Тому для прийняття рішення по оренді потоків (каналів) або частотно-орбітального ресурсу у військових ССЗ країн-членів НАТО на геостаціонарних орбітах необхідно провести випробування та дослідну експлуатацію на предмет захисту систем від засобів РЕБ противника. Водночас дані системи мають відносно низьку пропускну здатність, значну затримку сигналу і не спроможні задовольняти сучасні потреби ЗС України з організації зв'язку в режимі реального часу та тенденцій на постійне збільшення потоку інформації на одного користувача. Через це ССЗ ЗС України, на наш погляд, необхідно будувати з використанням низькоорбітальних супутників.

Уже сьогодні більшість супутників, які знаходяться на орбітах, використовують низькі навколоземні орбіти. Через незначну відстань до поверхні Землі дані системи забезпечують високу швидкість передачі, значну перевагу за енергетичними характеристиками та нижчу вартість розгортання.

Системи з використанням супутників на низьких навколоземних орбітах мають ряд переваг та недоліків щодо супутників на геостаціонарних орбітах [3].

Основні переваги:

- значна швидкість передачі даних;
- низька затримка розповсюдження сигналу;
- можливість організації зв'язку в русі;
- забезпечення зв'язку між супутниками;
- відносна дешевизна послуг та менші витрати на запуски;
- забезпечення швидкісного широкосмугового доступу до Інтернету;
- стійкі до засобів РЕБ противника.

Основні недоліки:

необхідність великої кількості супутників на орбіті, захаращення орбіти Землі та короткий термін їх експлуатації.

На підставі проведеного дослідження пропонуємо на конкурсній основі орендувати потоки (канали) або частотно-орбітальний ресурс у декількох низькоорбітальних операторів супутникового зв'язку. Цей ресурс можна використовувати на різних рівнях управління, для окремих видів та родів військ ЗС України.

За результатами проведеного дослідження пропонується нова модель ПССЗ ЗС України, яку наведено на рисунку 4.

Під час вибору/розробки ССЗ особлива увага приділяється її космічному сегменту. ССЗ повинна мати над Україною найбільш високий і стабільний рівень сигналу, забезпечувати необхідну швидкість передачі, низьку затримку сигналу та стійкість до засобів РЕБ (РЕР) противника. Хоча в сучасних військових та деяких комерційних системах вже передбачені ряд методів захисту від завад, а саме: бортова обробка сигналів, використання вузьких променів бортових діаграм направленості та інші, але це не дозволяє повністю забезпечити

надійне функціонування створюваної ПССЗ ЗС України. Водночас Китай та російська федерація вкладають значні кошти в розвиток військових супутникових систем, мають розвинені засоби наземної та космічної розвідки і РЕБ. За такими аспектами розвитку систем, як: РЕБ (РЕР) в космосі, застосування лазерних технологій, виведення з ладу супутників на орбітах різного призначення, – дані країни знаходяться на лідируючих позиціях в світі. Тому під час розроблення ПССЗ ЗС України особливу увагу необхідно приділяти захисту ССЗ від засобів РЕБ (РЕР) противника.

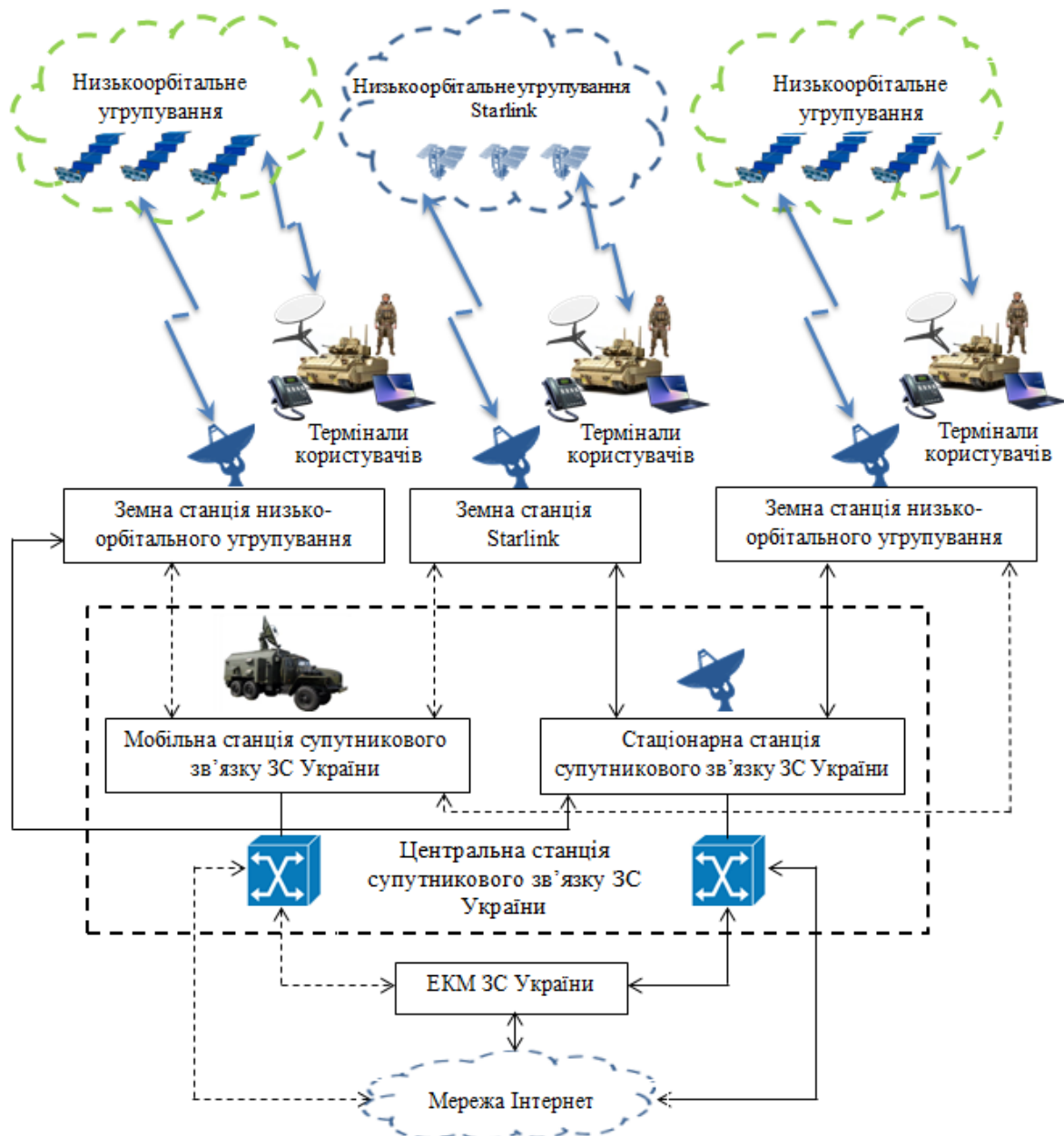


Рис. 4. Нова модель ПССЗ ЗС України з використанням низькоорбітальних супутників

Запропонована модель ПССЗ ЗС України з використанням низькоорбітальних угруповань супутників забезпечить:

збільшення швидкості передачі даних для кожного користувача до 1 Гбіт/с;

зниження затримки сигналу до 70 мс (близьку до наземних ліній зв'язку), що дає змогу передавати інформацію в режимі реального часу;

передачу інформації між супутникам за допомогою лазерного променя, який значно підвищує швидкість та стабільність сигналу;

можливість зв'язку під час руху;

незначну вартість 1 Мбіт/с швидкості передачі даних;

стійкість до засобів РЕБ противника та інші.

Стійкість до засобів РЕБ противника досягається завдяки:

багат шаровості побудови систем;

застосуванню великої кількості супутників в декількох орбітальних площинах;

використанню орбіт на різних висотах, з різним нахилом, полярних або приполярних;

руху супутників із великою швидкістю по відношенню до наземних станцій;

відносно невеликому радіусу зони покриття супутника;

антені терміналу користувача, яка "бачить" один супутник лічені хвилини з подальшим переключенням на інший;

використанню бортової обробки сигналів;

застосуванню вузьких променів бортових діаграм направленості (гостронаправлених антен);

використанню сучасних типів та видів модуляції;

наявності резерву та інших.

Після вибору низькоорбітальної ССЗ, укладання договору з оператором супутникового зв'язку на оренду потоків (каналів) або частотно-орбітального ресурсу для більш якісного управління та функціонування даної системи створюється її наземний сегмент.

До складу ПССЗ ЗС України увійдуть: орендований ресурс декількох систем на низьких навколоземних орбітах; центральні станції (стаціонарна, мобільна); земні станції; термінали користувачів. Центральна станція супутникового зв'язку виконує функції центрального вузла і забезпечує управління роботою всієї ССЗ ЗС України з використанням низькоорбітальних супутників, перерозподілом її ресурсів, виявлення несправності та з'єднання з електронною комунікаційною мережею ЗС України.

2.2. Розробка перспективної системи супутникового зв'язку ЗС України з використанням наукового та промислового потенціалу України

Діюча Концепція державної політики у сфері космічної діяльності на період до 2032 року [5] застаріла та не відповідає сучасним реаліям розвитку ракетно-космічної галузі в Україні. Тому на другому етапі розробки ССЗ ЗС України, на наш погляд, необхідно прийняти нову Концепцію Загальнодержавної цільової науково-технічної космічної програми зі створення системи космічної підтримки ЗС України, або нову Національну систему супутникового зв'язку, у якій для військових користувачів виділяються потоки (канали) або частотно-орбітальний ресурс.

Прийняття нової концепції є вкрай важливим завданням для забезпечення виконання стратегічних державних завдань у сфері національної безпеки і оборони України та потребує реалізації її на державному рівні з максимальною концентрацією зусиль і ресурсів органів державної влади та промисловості України. На основі виділених потоків (каналів) або частотно-орбітального ресурсу у Національній системі супутникового зв'язку створюється власна Військова система супутникового зв'язку (далі – ВССЗ). Створення ВССЗ, як складової Національної системи супутникового зв'язку на основі національних супутників, – головна задача, яка стоїть перед Україною на ближню перспективу. В подальшому на підставі прийнятої програми, виведення супутників на орбіти – розвивати та удосконалювати діючу ССЗ ЗС України. Під час розроблення нової ПССЗ необхідно використовувати досвід провідних держав світу та країн-членів НАТО, які розробляють й активно використовують

космос в інтересах своїх збройних сил, а також розглядають космічні засоби як найважливіший елемент забезпечення бойових дій із застосуванням новітніх інноваційно-комунікаційних технологій та державно-приватного партнерства.

ВССЗ повинна розроблятися на стадії створення Національної системи супутникового зв'язку на підставі Проектно-конструкторських та Дослідно-конструкторських робіт відповідно до Загальних вимог та тактико-технічних завдань.

3. Наукове обґрунтування застосування адаптивних антенних решіток в перспективній системі супутникового зв'язку ЗС України

ПССЗ ЗС України на ряду із забезпеченням високого та стабільного рівня сигналу над Україною, необхідної швидкості передачі, низької затримки сигналу повинна також підтримувати радіоелектронний захист від засобів РЕБ (РЕР) противника.

3.1. Основні положення та способи впливу наземних станцій радіоелектронної боротьби на системи супутникового зв'язку

Радіоелектронна боротьба (electronic warfare) – сукупність узгоджених за метою, завданням, місцем і часом дій військ (сил) щодо виявлення систем і засобів управління військами та зброєю противника, їх радіоелектронного подавлення, радіоелектронного захисту своїх систем і засобів управління, а також виконання заходів електронної підтримки радіоелектронної боротьби. РЕБ є одним із видів підтримки операцій (бойових дій) [6].

Основні задачі, які виконують засоби РЕБ:

розкриття (виявлення) радіоелектронної обстановки;

радіоелектронне подавлення систем і засобів управління військами, зброєю, РЕБ і РЕР противника;

дезорганізація систем бойового управління противника у прийнятті оперативних (бойових) рішень з метою підвищення ефективності ведення бойових дій своїми військами;

руйнування, знищення і/чи спотворення програмного забезпечення й інформації в автоматизованих системах управління противника;

зниження ефективності застосування противником засобів РЕБ;

забезпечення електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів.

Радіоелектронний захист – комплекс організаційно-технічних заходів і дій, спрямованих на забезпечення стійкої роботи своїх систем управління військами (силами) і зброєю. Радіоелектронний захист організовується та проводиться з метою забезпечення стійкої роботи систем і засобів управління своїми військами (силами) і зброєю в умовах ведення противником РЕБ та взаємного впливу радіоелектронних засобів [6].

Радіоелектронне подавлення ведеться у діапазоні радіохвиль, в якому працюють ССЗ ЗС України, і полягає в порушенні роботи супутників на різних навколоземних орбітах, наземних терміналів (станцій) і засобів радіонавігації шляхом дії на їх приймальні пристрої електромагнітним радіовипромінюванням станцій перешкод (РЕБ).

В умовах активної РЕБ з метою зниження ефективності застосування противником засобів РЕБ в сучасних ССЗ використовуються наступні заходи захисту: бортова обробка сигналів, використання вузьких променів бортових діаграм направленості, технології адаптивних антенних решіток та інші.

На рисунку 5 наведено розроблену схему впливу наземних станцій перешкод (РЕБ) на наземні термінали (станції) супутникового зв'язку та супутники на низьких навколоземних орбітах і GPS.

Як видно зі схеми, станції перешкод (РЕБ) можуть впливати на роботу не тільки наземних терміналів (станцій) супутникового зв'язку, а також на супутники на різних навколоземних орбітах та GPS. Для найпростіших ситуацій якість прийому супутників та терміналів користувачів буде залежати від відношення сигнал/шум [6].

$$P_{\text{прм}} = P_c / P_{\Sigma\text{ш}},$$

де $P_{\Sigma\text{ш}} = P_{\text{ш}} + P_3$;

$P_{\Sigma\text{ш}}$ – сумарний рівень шуму;

$P_{\text{ш}}$ – рівень шуму у вільному просторі;

P_3 – рівень завади, яка надходить від станції перешкод.

Для збільшення рівня прийому корисного сигналу, тобто зменшення шуму на орбітальних супутниках та наземних станціях, можна застосовувати технології адаптивних антенних решіток.

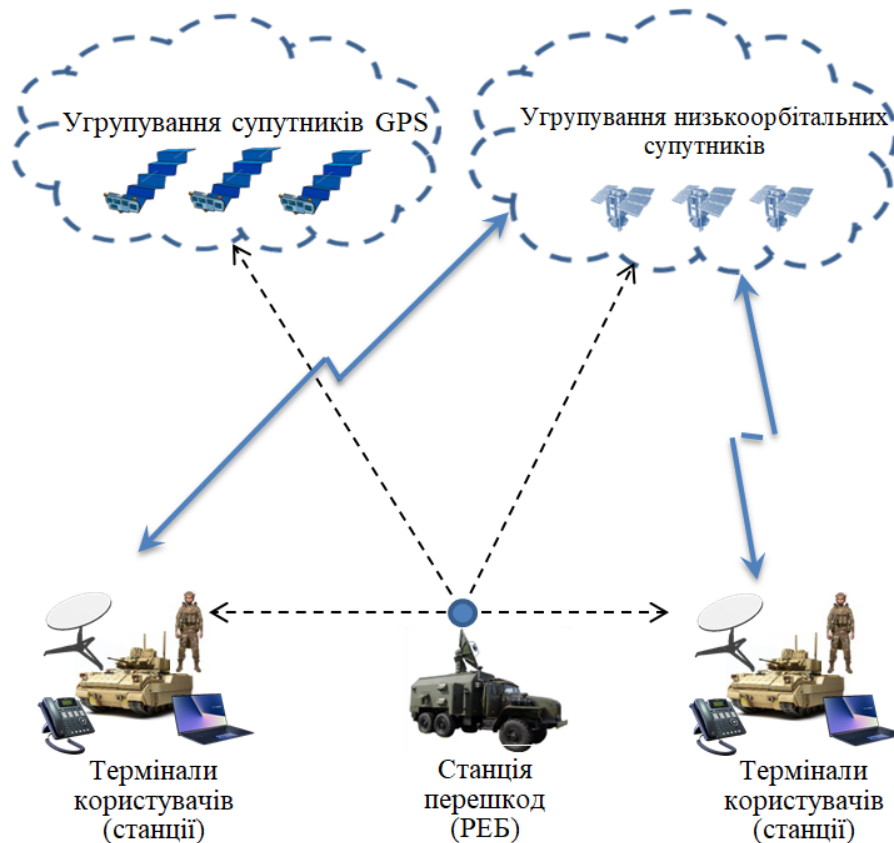


Рис. 5. Схема взаємодії між наземними терміналами супутникового зв'язку, станціями перешкод та супутниками у процесі радіоелектронного впливу

3.2. Принцип роботи адаптивних антенних решіток

Адаптивні антенні решітки здатні визначати напрямок впливу завади і зменшувати її вплив в умовах відсутності апіорної інформації про сигнально-завадову обстановку. Особливістю таких решіток є зміна діаграми направленості антени залежно від розташування терміналу (станції). Дані адаптивні антенні решітки змінюють свою діаграму направленості, зосереджуючи усю випромінювану потужність або найбільш ефективного прийому сигналу в напрям до розміщення терміналу користувача (станції).

Прийом сигналу за допомогою багатоелементних антенних решіток буде одним з основних методів вирішення складних завдань виявлення й оцінювання, оскільки формування діаграм направленості систем із решіткою має переваги перед системами з одноелементними антенними датчиками. Створення систем з антенними решітками, які здійснюють автоматичне підстроювання характеристик відповідно до змінних умов прийому сигналу, стало можливим завдяки появі недорогих міні-ЕОМ (електронно-обчислювальних

машин), що дозволяє реалізувати на їх основі відомі результати теорії виявлення, оцінювання та управління. Здатність до адаптації дає можливість більш гнучкої роботи системи і дозволяє підвищити ефективність прийому, що часто складно реалізувати іншими методами [7].

Звичайні системи чутливі до зменшення відношення сигнал/шум, що обумовлено неминучою присутністю поряд із корисним сигналом небажаних “шумових” сигналів, які надходять на вхід по бічних і/або по головній пелюсткам діаграми направленості антени (рис. 6). Ці сигнали (завади) можуть створюватися засобами РЕБ, передавачами завад, відбиванням від місцевих предметів й іншими джерелами шуму. Зменшення відношення сигнал/шум, крім того, може бути обумовлено рухом антени, невдалою її установкою, ефектами багатопроменевого поширення і змінною завадовою ситуацією.

У зв'язку з цим системи з адаптивними антенними решітками залишаються предметом інтенсивних досліджень, оскільки вони підвищують ефективність прийому корисних сигналів при наявності зазначених завад у системах супутникового зв'язку. Основна причина уваги до адаптивних антенних решіток полягає в здатності таких систем без апріорної інформації про завадову ситуацію автоматично виявляти присутність джерел завад і подавляти їх сигнали на виході, покращуючи тим самим прийом корисного сигналу.

Нижче наводиться приклад роботи адаптивної антенної решітки, яка характеризується її діаграмою направленості (рис. 6). Максимальна потужність діаграми направленості зосереджується у напрямку розміщення корисного сигналу від терміналу (станції), що призводить до найбільш ефективного прийому сигналу. Придушення завадового сигналу досягається за рахунок управління положеннями нулів діаграми направленості і зменшення рівня бічних пелюсток в напрямку джерела завад.

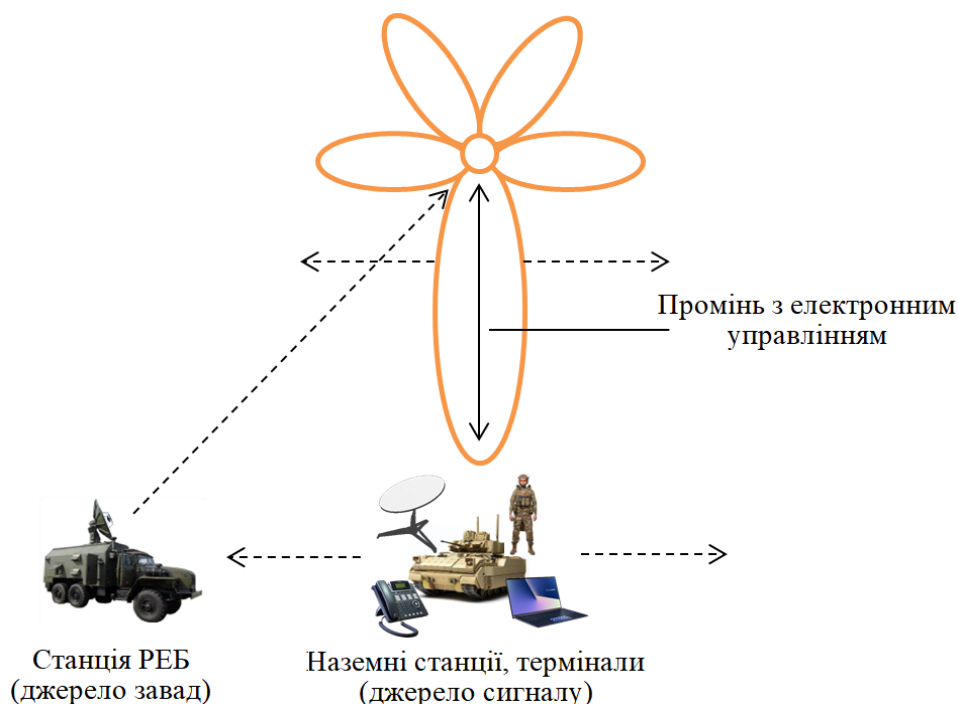


Рис. 6. Принцип роботи адаптивної антенної системи

В адаптивних антенних решітках, які іноді називають “Smart-антенами” (розумними антенами), здійснюється підстроювання характеристик корисного сигналу відповідно до інформації, що надходить про сигнал.

Пояснення роботи адаптивної антени випливає з розгляду наведеної структурної схеми (рис. 7).

Антену виконано у вигляді решітки, яка складається з S_n елементів, і призначена для прийому сигналу у відповідному середовищі поширення. Елементи розміщені так, аби забезпечувалося формування необхідної діаграми направленості в заданій області простору. Характеристики елементів та їх фактичне розташування в решітці накладають основні обмеження на результуючі властивості системи з адаптивною решіткою.

“Серцем” адаптивної антенної системи є цифровий процесор (по суті, це адаптивний фільтр), який відповідає за прийом і обробку сигналів. Основна мета обробки полягає в максимізації відношення сигнал/шум за рахунок автоматичного регулювання вагових коефіцієнтів (w_n), з якими сумуються сигнали, прийняті окремими елементами антенної решітки.

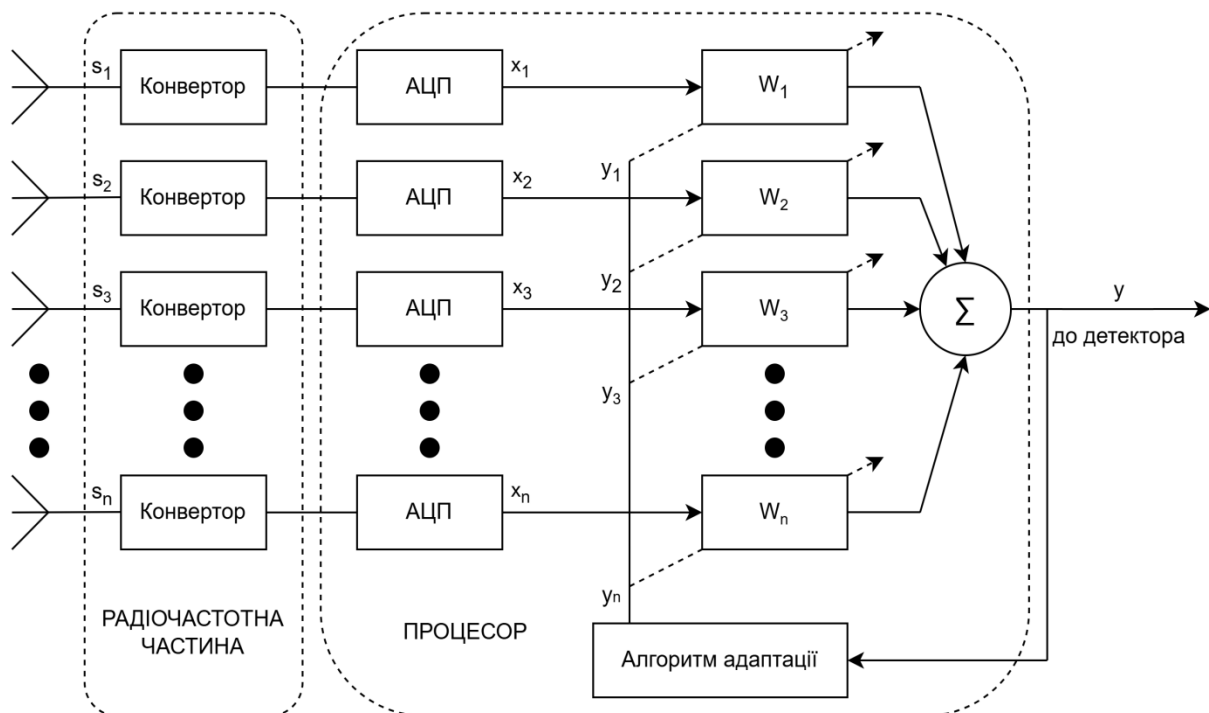


Рис. 7. Структурна схема адаптивної антенної системи

Процес адаптації математично еквівалентний відніманню з вихідної діаграми направленості антенної решітки так званої компенсаційної діаграми, що формується з урахуванням оптимальних (вагових) коефіцієнтів. Внаслідок цього результуюча діаграма направленості антени має “провали” в напрямку завади. Рівень придушення завад і складність процесора визначаються використанням методом адаптації.

Сигнали, прийняті елементами антенної решітки S_n , проходять через тракт перетворення частоти в цифровий вид в лінійці АЦП. На виході АЦП формується набір цифрових сигнальних відліків сигналів та завад $x_n(t)$ ($x_1, x_2, \dots, x_n$), далі поелементно перемножуються з набором вагових коефіцієнтів $w_n(t)$ ($w_1, w_2, \dots, w_n$) і потім поступають на суматор Σ . На виході суматора формується вихідний сигнал $y(t)$, який далі використовується в приймальному тракті. Отриманий таким чином сигнал $x_n(t)$ $w_n(t)$ порівнюється з деяким опорним сигналом $y_n(t)$, в результаті чого формується сигнал неузгодженості шляхом порівняння помилки, що підлягає мінімізації [8]:

$$v(t) = x_n(t) w_n(t) - y_n(t).$$

У разі повної відповідності $y_n(t) = x_n(t) w_n(t)$ величина отриманої неузгодженості $v(t)$ містить всю інформацію про стан завад і шумів в адаптивній антенній системі.

Вагові коефіцієнти у процесі адаптації змінюються відповідно до того чи іншого критерію мінімізації помилки. Наприклад, при використанні алгоритму LMS (мінімізації середнього квадрата помилки – Least Mean Square) оновлені вагові коефіцієнти розраховуються за формулою [7]:

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) + \mu \cdot \mathbf{e}^*(k) \mathbf{x}(k),$$

де $\mathbf{w}(k)$, $\mathbf{e}(k)$, $\mathbf{x}(k)$ – вектори вагової обробки, сигналу помилки і сигналу на вході відповідно;

* – знак комплексного сполучення.

Для генерування сигналу помилки опорний сигнал $y(n)$ вираховується із сигналу на виході фільтра. Далі сигнал помилки використовується для підстроювання коефіцієнтів цифрового фільтра, що мінімізує сигнал помилки на наступному такті обробки. Таким чином, суть адаптивної фільтрації полягає в мінімізації неузгодженості між вхідним сигналом $x(n)$ і опорним сигналом $y(n)$.

Початкові значення коефіцієнтів фільтра, як правило, визначаються при передачі деякого еталонного сигналу, що являє собою відомий зразок даних. При цьому роль алгоритму адаптації полягає в коригуванні коефіцієнтів фільтра для встановлення відповідності між оцінкою отриманих даних і їх еталоном [7].

Перевагами “Smart-антен” є: можливість адаптації до заводової обстановки; підвищення якості передачі даних; зменшення споживання енергії терміналом користувача; мала ймовірність виявлення та перехоплення. Недоліками – складність в реалізації та висока вартість.

Висновки. Використання адаптивних антенних решіток у наземних станціях та супутниках ССЗ ЗС України дозволяє без апіорної інформації про заводову ситуацію автоматично виявляти присутність джерел завад і подавляти їх сигнали на виході, покращуючи тим самим прийом корисного сигналу. В супутникових системах з адаптивними решітками можуть додатково застосовуватися інші методи придушення завад, при цьому результуюча ефективність буде набагато вищою, ніж при звичайних широко відомих способах, таких як використання широкосмугових сигналів, гостронаправлених антен та бортової обробки сигналів.

В результаті проведеного дослідження була досягнута поставлена мети, а саме: розроблена нова модель ПССЗ ЗС України на основі оренди потоків (каналів) або частотно-орбітального ресурсу у супутників на низьких навколосеземних орбітах. Створена система забезпечить необхідну швидкість передачі, живучість та стійкість до засобів РЕБ противника на різних рівнях управління ЗС України. Дана модель розроблялася з врахуванням досвіду ведення війни з російською федерацією, аналізу існуючих систем супутникового зв'язку армій провідних країн світу і країн-членів НАТО та новітніх досягнень інформаційно-комунікаційних технологій. До складу ПССЗ ЗС України увійдуть: орендований ресурс декількох систем на низьких навколосеземних орбітах; центральні станції (стаціонарна, мобільна); земні станції; термінали користувачів. Для окремих видів та родів військ ЗС України можна використовувати інші системи і засоби супутникового зв'язку. Для збільшення захисту від радіоелектронного придушення орбітальних супутників та наземних станцій (терміналів користувачів) рекомендується застосовувати адаптивні антенні решітки.

Подальші напрямки дослідження передбачають у цифрових антенних решітках застосування адаптивного формування променя антенної решітки на базі SDR технології,

що дозволить формувати більш вузьку діаграму направленості, яка призведе до зменшення інтерференції та надання доступу більшій кількості користувачів до одного і того самого елементу решітки одночасно, використовуючи одні й ті самі частоти.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ВКП 6-00(01).01. Доктрина «Зв'язок та інформаційні системи», затверджена Головнокомандувачем Збройних Сил України 1 липня 2020 року.
2. СД 7.01.1.057. Настанова «Супутниковий зв'язок Збройних Сил України», затверджена Начальником Генерального штабу Збройних Сил України в липні 2020 року.
3. Руденко В. І., Зінченко М. О., Яковчук О. В., Плугова О. Б. Аналіз ефективності функціонування та перспективи розвитку системи супутникового зв'язку спеціального призначення // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. 2024. № 1 (49). С. 45–58.
4. Білий О. А., Шолудько В. Г., Малих В. В., Гай Ю. І. Перспективи розвитку системи супутникового зв'язку ЗС України // Збірник наукових праць ВІТІ. 2018. № 2. С. 6–15.
5. Про схвалення Концепції реалізації державної політики у сфері космічної діяльності на період до 2032 року: розпорядження від 30.03.2011 № 238-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/238-2011-%D1%80#Text> (дата звернення: 14.03.2025).
6. ВКДП 10-27(56).01. Настанова виконання заходів радіо-, радіотехнічного контролю окремим спеціальним центром радіоелектронної боротьби (окремим вузлом радіоелектронної боротьби) у ході застосування військ (сил), затверджена Командувачем Сил підтримки ЗС України від 18.12.2020.
7. Монзінго Р. А., Міллер Т. У. Адаптивні антенні решітки. Введення у теорію.
8. Лебідь Є. В., Лазута Р. Р., Коваль О. М. (НУОУ ім. Черняхівського). Оцінка ефективності застосування адаптивних антенних решіток у системах радіозв'язку в умовах активної радіоелектронної боротьби // Збірник наукових праць ВІТІ. 2020. № 1. С. 46–57.
9. Starlink // Wikipedia. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Starlink> (date of access: 24.03.2025).
10. OneWeb // Wikipedia. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/OneWeb> (date of access: 31.03.2025).