УДК 621.396

к.т.н. Масесов М.О. (ВІТІ ДУТ)
д.т.н. Субач І.Ю. (ВІТІ ДУТ)
Руденко Д.М. (ВІТІ ДУТ)
Станович О.В. (ВІТІ ДУТ)

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ЦИФРОВОГО ДІАГРАМОУТВОРЕННЯ У СТАНЦІЯХ ТРОПОСФЕРНОГО ЗВ'ЯЗКУ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

У статті викладені пропозиції щодо перспектив розвитку засобів тропосферного зв'язку, напрямки та шляхи розв'язання проблеми підвищення пропускної спроможності радіоканалів. Представлені результати можуть бути використані за основу подальших наукових досліджень з розробки теорії цифрової обробки сигналів, а також при виробництві цифрових сегментів спеціальних систем і комплексів зв'язку на базі сучасних технологій.

Масесов Н.А., Субач И.Ю., Руденко Д.Н., Станович А.В. Предложения по использованию цифрового диаграммообразования в станциях тропосферной связи специального назначения. *В статье изложены предложения по перспективам развития средств тропосферной связи, направления и пути решения проблемы повышения пропускной способности радиоканалов. Представленные результаты могут быть использованы в основе последующих научных исследований по разработке теории цифровой обработки сигналов, а также при производстве цифровых сегментов специальных систем и комплексов радиосвязи на базе современных технологий.*

M.Masesov, I.Subach, D.Rudenko, O.Stanovich *The offers on use digital beamforming in troposphere stations special purpose. Offers are stated in article on prospect of the development of the facilities troposphere stations, directions and ways of the decision of the problem of increasing to capacity radio link. Presented results can be used in base of the following scientific studies on development of the theories of the digital processing signal, as well as at production digital segment special systems and complex radio communication on base modern technology.*

Ключові слова: *комплекс зв'язку спеціального призначення, тропосферна станція, цифрова обробка сигналів.*

В ході стратегічного розгортання та застосування Збройних Сил України, а також в ході виконання завдань в рамках проведення антитерористичної операції, виникла критична ситуація щодо забезпечення зв'язком службових осіб на пунктах управління. Як показав проведений аналіз, найгірший стан справ – у тактичній ланці управління Збройних Сил України та інших військових формувань.

Серед основних факторів, що негативно вплинули на організацію зв'язку, слід зазначити наступні:

обмежене використання стаціонарних та польових кабельних ліній зв'язку через викрадання (пошкодження) кабелів невстановленими особами, як серед місцевого населення, так і можливими диверсійними групами;

недоцільність побудови багатоінтервальних радіорелейних ліній зв'язку через складнощі при організації охорони та оборони радіорелейних станцій на територіях, що не контролюються військовими формуваннями;

відсутність національної супутникової системи зв'язку та необхідність оренди трафіку у цивільних операторів зв'язку, при цьому телекомунікаційне обладнання орендованих супутникових станцій не відповідає польовим умовам експлуатації;

невідповідність технічних характеристик існуючих на озброєнні радіостанцій щодо можливостей забезпечення захищеного радіозв'язку при розширенні територіальних розмахів проведення операцій (бойових дій);

нагальне вичерпання ресурсу роботи засобів зв'язку, особливо в тактичній ланці управління, його моральна та фізична застарілість;

недостатня кількість апаратних (станцій) зв'язку та відповідного особового складу в штаті військових частин для виконання поставлених завдань у складі батальйонних (ротних) тактичних груп.

В той же час перед телекомунікаційними системами та мережами спеціального призначення постають сучасні вимоги системи управління військами (силами) щодо забезпечення всіма видами телекомунікаційних послуг з визначеною якістю. Це, в свою чергу, вимагає вирішувати ряд наукових та прикладних завдань, серед яких є забезпечення високої пропускної спроможності транспортних телекомунікаційних систем спеціального призначення.

Вирішення поставлених питань спонукало керівництво Збройних Сил України та інших військових формувань переосмислювати стандартні підходи щодо організації та забезпечення зв'язку. В таких умовах, для забезпечення зв'язку на перший план виходять засоби, які дозволяють швидко організувати інформаційні напрямки між пунктами управління.

Такими є супутникові та тропосферні станції зв'язку. Однак супутникові засоби, як зазначалося вище, мають певні недоліки: залежність від іноземного оператора, висока вартість оренди послуг, відсутність на озброєнні військових станцій супутникового зв'язку, тощо.

Тому, на думку авторів, найбільш актуальними для застосування у Збройних Силах України та інших військових формуваннях для побудови цифрових телекомунікаційних систем та мереж є станції та комплекси тропосферного зв'язку.

Серед основних переваг застосування тропосферного зв'язку слід зазначити наступні:

відсутність залежності від рельєфу та інших факторів місцевості;

забезпечення зв'язку на велику дальність (до 200 км та більше);

невеликий час на розгортання тропосферних ліній зв'язку;

висока мобільність станцій на автомобільній базі, можливість встановлення обладнання на бронебазу.

Серед основних недоліків застосування тропосферного зв'язку можна відмітити:

невелика (у порівнянні з радіорелейними та проводовими лініями) пропускна спроможність;

висока потужність, що споживається;

спеціальні вимоги щодо вибору місця розгортання тропосферних станцій.

Як показав ***аналіз літератури*** [1 – 7], саме для усунення основних недоліків, які характеризують тропосферний зв'язок, були проведені дослідження різних авторів. В той же час, найбільш суттєвим недоліком залишається забезпечення високої пропускної спроможності.

Таким чином, ***метою статті*** є визначення перспектив вдосконалення тропосферних станцій спеціального призначення та підвищення пропускної спроможності каналів тропосферного зв'язку.

Виклад основного матеріалу

На теперішній час пропускна спроможність тропосферних ліній зв'язку, що побудовані з використанням сучасних станцій (модернізованих і прийнятих на озброєння у Збройних Силах України – Р - 417МУ, Р – 423 - 1МУ), обмежується швидкістю 2 Мбіт/с [8]. Такої швидкості недостатньо для побудови телекомунікаційної транспортної мережі спеціального призначення, з урахуванням зростаючих вимог щодо забезпечення голосового та відеозв'язку, передачі даних, тощо.

В сучасних цифрових тропосферних станціях іноземного виробництва застосовуються методи боротьби з міжсимвольною інтерференцією, адаптивну корекцію зі зворотнім зв'язком. Характерною особливістю таких станцій є забезпечення роботи в режимах як тропосферного розсіювання, так і прямої видимості – тобто створення радіорелейно-тропосферних комплексів.

Завдяки цьому закордонні спеціалісти намагаються скоротити типаж станцій, підвищують міжвидову уніфікацію засобів, що значно скорочує витрати на їх виробництво, експлуатацію і дозволяє скорочувати кількість особового складу екіпажу. Модульна

конструкція станцій покращує умови ремонтопридатності та дозволяє за 1 - 3 хвилини з допомогою автоматичної сигналізації визначити несправність та замінити модуль, що вийшов з ладу. В деяких системах забезпечується автоматичне перемикання несправного модуля на резервний.

Кожний модуль має світлоіндикацію, покази системи діагностування виведені на передню панель та вказують на їх технічний стан.

В країнах НАТО [2, 6, 7] для вирішення проблеми підвищення розвід- та завадозахищеності радіорелейних та тропосферних засобів використовуються гостронаправлені антени, зменшуються рівні бокового та заднього випромінювань, створюються антени з керуємим нулем діаграми направленості, шукаються можливості керування променем випромінювання антени (1,5^{o}по ширині та куту місцевості), а також використовуються складні сигнали, методи завадостійкого кодування, завадозахищені модеми, адаптація по потужності передавачів, впроваджується апаратура контролю та визначення завад з візуальним їх відображенням, вишукуються інженерно-технічні шляхи для створення завадозахищених багатопроменевих антенних систем.

Подальше вдосконалення засобів тропосферного зв’язку, за поглядами закордонних і вітчизняних спеціалістів, направлено на прискорене впровадження цифрових методів передавання сигналів, продовження створення уніфікованих типів апаратури, що складаються з декількох модифікацій, використання єдиних засобів тропосферного зв’язку для військових, урядових та комерційних цілей, подальше підвищення розвід- і завадо захищеної роботи, збільшення пропускної спроможності, удосконалення роботи в режимі прямої видимості при пониженій потужності, використання крім рознесеного прийому комбінованих способів боротьби з багатопроменевістю, в тому числі адаптивні модеми, метод прямої корекції помилок, що дозволить підвищити ефективність використання частотного спектру.

В умовах недоцільності збільшення масогабаритних показників тропосферних станції та енергії сигналу передавача, на перший план у проблемі підвищення пропускної спроможності тропосферних ліній зв’язку виходить удосконалення обробки сигналів у модемі приймача тропосферної станції.

Найбільш прийнятною в цьому контексті є впровадження цифрової обробки сигналів та використання цифрових антенних решіток (ЦАР). Поряд із ЦАР, пропонується використовувати механізми просторово-часової обробки (Space-Time Processing – STP) сигналів.

В контексті радіозв’язку під STP розуміється адаптивна обробка сигналів системою, що складається з кількох антенних елементів, з використанням особливостей як просторової, так і часової областей радіоканалу. Техніка STP може використовуватися на передавальному, приймальному або на обох кінцях каналу. В перших двох випадках вона називається Multiple Input Single Output (MISO) та Single Input Multiple Output (SIMO), а також технологія інтелектуальних антен (smart antenna) [9].

Найчастіше на базі інтелектуальних антен використовують формування діаграми направленості. Вузька діаграма направленості дозволяє сфокусувати енергію сигналу у визначеному напрямку (зазвичай назустріч приймальному пристрою), що збільшує відношення сигнал/шум, або, навпаки, сформувати провал в діаграмі направленості в напрямку завади, що особливо критично для придушення радіоелектронних джерел противника (рис. 1).

При вузькому антенному промені зменшуються також завади, збільшується відношення сигнал/шум і, таким чином, підвищується ефективність використання спектра частот [10].

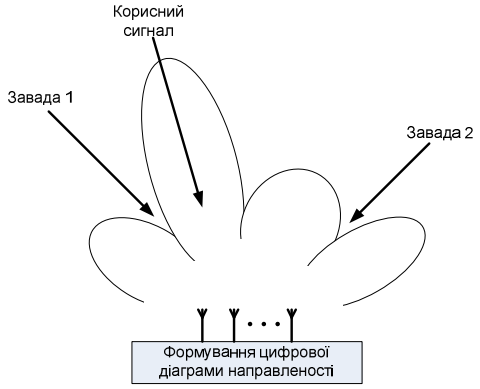

Рисунок 1. Принцип цифрового діаграмо утворення

Інші схеми покращуються якість сигналу за рахунок коефіцієнта підсилення при прийомі на рознесені антени. При багатопроменевому розповсюдженні сигналу рівень потужності, що приймається, є випадковою функцією, що залежить від місцезнаходження, часу і поточного завмирання сигналу. При використанні антенного масиву ймовірність втрати сигналу всіма антенами зменшується експоненціально зі збільшенням кількості некорельованих сигналів (або антен). Схеми рознесення з системами MISO та SIMO частіше використовують звичайну комутацію, щоб обрати антену (наприклад, одну із двох) з найкращим відношенням сигнал/шум. В системах на базі інтелектуальних антен (MISO та SIMO) покращується лише якість каналу, а швидкість передавання даних не збільшується. Для того, щоб підвищити пропускну спроможність каналу, необхідно застосувати STP як на передавальному, так і на приймальному його кінцях. Саме такі системи і називаються MIMO (Multiple Input Multiple Output) [11]. Для дослідження та моделювання систем MIMO відгук приймальної ЦАР можна записати у вигляді

$$u_i = \sum_{k=1}^{M} h_{ik} A_k + n_i \,, \tag{1}$$

де u_i – напруги по виходу i-го приймального каналу (i=1, …, N, де N – кількість антен приймача); h_{ki} – передаточна характеристика каналу MIMO між k-ю антеною передавача (k=1, ..., M, де M – кількість антен передавача) та i-ю приймальною антеною; A_k – сигнал, що випромінюється k-ю антеною передавача; n_i – напруга шуму на виході i-го приймального каналу. В узагальненому вигляді систему рівнянь (1) можна представити компактним матричним виразом:

$$U = H \cdot A + N. \tag{2}$$

Ефект багатопроменевого розповсюдження радіохвиль, яким характеризується тропосферний канал зв’язку, використовується в системах MIMO для збільшення пропускної спроможності каналу. Система з M передавальними та M приймальними антенами здатна забезпечити пікову пропускну спроможність теоретично в M разів більшу, ніж звичайні системи Single Input Single Output (SISO). Передавач розбиває потік даних на незалежні послідовності бітів та пересилає їх одночасно, з використанням масиву антен (просторове мультиплексування). При передаванні в одному частотному діапазоні кожна приймальна антена приймає всі сигнали одночасно. Однак, якщо багатопроменеве розсіювання достатньо велике, то підпотоки, що передаються різними антенами, розсіюються по-різному, оскільки рознесені у просторі. Приймач, після обробки налаштувальної послідовності, має необхідну інформацію про кожний підканал та відновлює із різних підпотоків первинний масив даних. Таким чином, для вирішення задачі розділення і оцінки інформаційних параметрів переданих M сигналів необхідно розв’язати систему N рівнянь з M невідомими. При N=M можна скористатися матрицею, зворотній матриці характеристик каналу, і оцінити вектор переданих сигналів за формулою:

$$\widehat{A} = H^{-1}U\,. \tag{3}$$

При $N>M$ доцільно застосувати узагальнену інверсію, яка отримується з рішення системи рівнянь по методу найменших квадратів (MMSE, Minimum Mean-Square Error):

$$\widehat{A} = H^{H}(HH^{H})^{-1}U. \tag{4}$$

Просторово-часова обробка сигналів та одна з її технік реалізації – просторово-часове блочне кодування, в системах радіозв'язку дозволяє забезпечити подавлення зосереджених по спектру завад. Однією з основних переваг такої обробки є відсутність необхідності зміни режиму ведення зв'язку, структури сигналу і параметрів приймально-передавальних пристроїв. Крім того, кодування добре поєднується з іншими видами обробки сигналів.

Для вирішення завдань просторово-часової обробки сигналів необхідно використовувати сучасну обчислювальну техніку, що спроможна в реальному масштабі часу та з високою точністю здійснити відповідні розрахунки векторів вагових коефіцієнтів.

Основні існуючі на сьогодні та перспективні системи зв'язку можуть використовувати методи просторово-часової обробки сигналів. При цьому безпосередньо алгоритми цифрової обробки сигналів можна закладати та, при необхідності, змінювати на програмному рівні з використанням програмованих логічних інтегральних схем та масових процесорів. У сукупності це дозволить знизити вартість та час реалізації спеціалізованих проектів по створенню дослідних зразків військової техніки зв'язку. Крім того, можлива реалізація мультиядерних технологій й реалізація еволюційного напрямку розвитку тропосферних систем – обслуговування одним комплектом обладнання кількох тропосферних напрямків. Вже зараз на ринку України доступні варіанти вбудованих комп'ютерних систем, що виконані на основі багатоядерних мікропроцесорів фірми Intel.

Розвиток обраного шляху вирішення проблеми підвищення пропускної спроможності тропосферних засобів зв'язку можливий з вирішенням часткових наукових і науково-практичних завдань, орієнтовний перелік яких представлено на рис. 2.

Рисунок 2. Орієнтовний перелік часткових наукових і науково-практичних завдань, необхідних для вирішення задачі створення перспективних тропосферних станцій з підвищеною пропускною спроможністю

Використання розроблених у рамках визначених напрямків досліджень результатів дасть змогу забезпечити:

– подальший розвиток теорії цифрової обробки сигналів;

– подальший розвиток теорії антен;

– впровадження сучасних технологій обробки радіосигналів на основі цифрових методів і способів їх формування, обробки та декодування;

– тривале наукове супроводження, реалізацію довгострокової перспективи розвитку та використання стандартів у техніці військового зв'язку;

– гарантування сумісності радіозасобів, що створюються з виконанням розроблених вимог та практичних рекомендацій;

– можливість створення засобів та комплексів техніки зв'язку, сумісних з іншими вітчизняними та закордонними зразками, з мінімальними змінами їх апаратної частини, шляхом програмної реконфігурації обладнання;

– реалізацію інтелектуальних властивостей системи (мережі) зв'язку, що будується на основі перспективних комплексів зв'язку;

– автоматизацію процесів управління зразками, комплексами, лініями та мережами радіорелейного і тропосферного зв'язку;

– створення необхідних передумов створення та функціонування єдиної автоматизованої системи управління Збройними Силами України;

– розробку методологічних основ використання інформаційних технологій у цифровому сегменті обробки сигналів спеціальних систем та комплексів радіозв'язку.

Таким чином, в статті представлено пропозиції щодо перспектив розвитку засобів тропосферного зв'язку із викладенням напрямків та шляхів розв'язання проблеми підвищення пропускної спроможності каналів зв'язку на основі використання сучасних радіотехнологій та методів цифрової обробки сигналів. Представлені пропозиції доцільно використовувати під час модернізації існуючих станцій тропосферного зв'язку, та розробки і виробництві перспективних комплексів, наприклад малогабаритної тропосферної радіорелейної станції з підвищеною завадозахищеністю. Подальші дослідження будуть направлені на вирішення часткових наукових і науково-практичних завдань, основними з яких є розробка методів та способів обробки сигналів у цифровому сегменті техніки тропосферного (радіорелейного) зв'язку, а також методів оцінки параметрів середи розповсюдження радіосигналів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Серов В. В. Развитие тропосферной связи в МНИРТИ. ИНФОРМОСТ / В.В. Серов, А. М. Сеченых // Радиоэлектроника и телекоммуникации. – 2006. – №4(46). – С. 37 – 39.

2. Слюсар В. И. Военная связь стран НАТО: проблемы современных технологий // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2008. – №4. – С. 66 – 71.

3. Мацков А. А. Перспективы использования линий загоризонтной связи / А. А. Мацков, В. В. Серов, Л. И. Чернобельский // Электросвязь. – 2006. – №8. – С. 33 – 37.

4. Гусятинский И. А. Системы борьбы с интерференционными замираниями на тропосферных линиях связи / И. А. Гусятинский, А. С. Немировский // Электросвязь. – 1973. – №2. – С. 7 – 12.

5. Невзоров Ю. В. Новые направления развития систем СВЧ радиосвязи // Электросвязь – 2012. – №8. – С. 26 – 28.

6. Wietgrefe H., Bastos L., Deskeuvre J.– C., Yamamoto M., Reddy P. Tactical Troposcatter Terminals for Modern Tactical Networks: Opportunities and Technical Challenge, Technical Panel, IEEE Conference MILCOM, Baltimore, 7 – 10 November 2011.

7. L. Bastos, H. Wietgrefe. A Geographical Analysis of Highly Deployable Troposcatter Systems Performance // 2013 IEEE Military Communications Conference, San Diego, 18 – 20 November 2013, P. 661 – 667.

8. Відкрите акціонерне товариство „Олімп". – Режим доступу : olimp-corp.com.

9. Слюсар В. И. Системы MIMO: принципы построения и обработка сигналов // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2005. – №8. – С. 52 – 59.

10. Слюсар В. И. Цифровое диаграммообразование – базовая технология перспективных систем связи // Радіоаматор. – 1999. – № 8. – С. 58 – 59.

11. Слюсар В. І. Метод обробки тропосферних сигналів у режимі мульти-MIMO з додатковим стробуванням відліків АЦП / В. І. Слюсар, М. О. Масесов // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ". – 2009. – Вип. 3. – С. 77 – 81.