УДК 621.396.43 к.т.н. Татарінов А.С. (ВІТІ) https://orcid.org/0000-0001-9911-0020
Османов Р.Н. (ВІТІ) https://orcid.org/0000-0002-3827-9233
Пилипенко М.Г. https://orcid.org/0000-00021771-4259

ВИКОРИСТАННЯ ТРАНСПОРТНИХ РАДІОТЕХНОЛОГІЙ ДІАПАЗОНУ 80 ГГц ДЛЯ ПОБУДОВИ ЗАХИЩЕНИХ ЛІНІЙ ПРИВ'ЯЗКИ

У статті аналізуються компромісні завдання щодо побудови радіоліній зі швидкістю передачі до 10 Гб/с. На основі класичного підходу Найквіста щодо співвідношень необхідної швидкості передачі/прийому сигналів за умови відсутності міжсимвольної інтерференції та, відповідно, необхідної смуги частот каналу, обґрунтована необхідність використання міліметрового діапазону хвиль, де є можливість будувати резонансні системи зі смугою до 1 та й більше ГГц. На основі аналізу особливостей розповсюдження радіохвиль у діапазоні 80 ГГц (Е-діапазон), та наявності ділянки 71-86 ГГц з відносно низькими рівнем резонансного поглинання енергії хвиль в атмосферних газах (переважно, в молекулах води і кисню), надається обґрунтування можливості та доцільності використання цієї ділянки для побудови радіорелейних ліній прив'язки з пропускною спроможністю до 10 Гб/с. Наведені умови та переваги використання сучасних цифрових методів модуляції для використання в радіолініях діапазону 80 ГГц з метою досягнення високої спектральної ефективності та забезпечення мультігігабітної пропускної спроможності на відносно великих інтервалах. Показано, що завдяки балансу просторово-енергетичних характеристик радоліній діапазону 80 ГГц, зокрема високих спрямованих властивостей антенних систем та використанню сучасних методів цифрової модуляції QPSK, QAM, можливо отримати швидкості передачі на Ethernet інтерфейсі до 10 Гб/с на відстанях 8-13 км. Показано, що відсутність у вірогідного противника засобів РЕБ у міліметровому діапазоні хвиль є додатковим мотивуючим фактором для впровадження радіо технологій 80 ГГц для побудови захищених ліній прив'язки інформаційно – телекомунікаційних вузлів зв'язку ЗСУ стратегічної та оперативної ланках управління до транспортної компоненти Національної телекомунікаційної мережі (НТМ) України.

Ключові слова: *міліметровий діапазон, смуга частот, міжсімвольна інтерференція, спектральна ефективність, радіорелейний зв'язок, пропускна спроможність, захищеність.*

Татаринов А.С., Османов Р.Н., Пилипенко. М.Г. Использование транспортных радиотехнологий диапазона 80 ГГц для построения защищеных линий привязки

В статье анализируются компромиссные задачи по построению радиолиний со скоростью передачи до 10 Гб/с. На основе классического подхода Найквиста по соотношению необходимой скорости передачи/приема сигналов при отсутствии междусимвольной интерференции и, соответственно, необходимой полосы частот канала, обоснована необходимость использования миллиметрового диапазона волн, где есть возможность строить резонансные системы с полосой до 1 и более ГГц. На основе анализа особенностей распространения радиоволн в диапазоне 80 ГГц (Е-диапазон) и наличии участка 71-86 ГГц с относительно низкими уровнем резонансного поглощения энергии волн в атмосферных газах (в основном, в молекулах воды и кислорода), обоснована возможность и целесообразность использования этого участка для построения радиорелейных линий привязки с пропускной способностью до 10 Гб/с. Приведенны условия и преимущества использования современных цифровых методов модуляции для использования в радиолиниях диапазона 80 ГГц с целью достижения высокой спектральной эффективности и обеспечения мультигигабитной пропускной способности на относительно больших интервалах. Показано, что благодаря балансу пространственно-энергетических характеристик радолиний диапазона 80 ГГц, в частности высоких направленных свойств антенных систем, и использованию современных методов цифровой модуляции QPSK, QAM, можно получить скорости передачи на Ethernet интерфейсе до 10 Гб/с на расстояниях 8-13 км. Показано, что отсутствие в вероятного противника средств РЭБ в миллиметровом диапазоне волн, является дополнительным мотивирующим фактором для внедрения радиотехнологий 80 ГГц для построения защищенных линий привязки информационно - телекоммуникационных узлов связи ВСУ стратегического и оперативного звеньях управления к транспортной компоненте Национальной телекоммуникационной сети (НТС) Украины.

Ключевые слова*: миллиметровый диапазон, полоса частот, межсимвольная интерференция, спектральная эффективность, радиорелейная связь, пропускная способность, защищенность.*

A.Tatarinov, R.Osmanov, M. Pilipenko Usage of 80 GHz transport radio technologies for secured interconnection line implementation*. The article analyzes the compromise tasks of constructing radio links with a transmission speed of up to 10 Gbps. Based on the classic Nyquist approach in terms of the*

of using the millimeter wave range with potential ability to realize resonance systems with a frequency band up to 1 or more GHz. Based on the analysis of the propagation characteristics of radio waves in the range of 80 GHz (E-band) and the presence of a section of 71-86 GHz with relatively low level of resonance absorption of wave energy in atmospheric gases (mainly in water and oxygen molecules), was argued the possibility and expediency of using this part of the frequency range for implementation of microwave links with throughput up to 10 Gbps. Provided the conditions and advantages of using of modern digital modulation methods for usage in millimeter radio technologies in order to

achieve high spectral efficiency and ensure multi-gigabit bandwidth at relatively large intervals. It is shown that due to the balance of the spatial-energy characteristics of the 80 GHz radio links, in particular the high directional characteristics of antenna systems, and the usage of modern digital modulation methods QPSK, QAM, it is possible to reach transmission speeds on the Ethernet interface up to 10 Gbps at distances of 8-13 km.

It also shown that millimeter links characterized as Low Probability of Detect/Low Probability of Intercept (LPD/LPI), system which is a perfect technology to satisfy hostile territory battlefield situations where there's a need for high security, high speed, point-to-point, non-wire-line communications. This motived to use millimeter range radios in the Joint Forces Operation (JFO), for interconnection of Armed forces telecommunication networks to the 10G backbone of National Telecommunication Network (NTM) of Ukraine.

Keywords: *millimeter range, frequency band, intersymbol interference, spectral efficiency, radio relay communication, bandwidth, security.*

Постановка завдання.

Перевід акценту на протиборство у інформаційну сферу безпосередньо впливає на стан та розвиток інфокомунікаційних технологій в інтересах збройних сил. Аналіз опублікованих матеріалів [1,2] свідчить, що в цей час фахівці з оборони, розвідувального співтовариства, інших урядових відомств і представники академічних кіл США ведуть посилене відпрацювання нових концепцій і принципів будівництва, управління, організації та застосування збройних сил, які повинні прийти на зміну моделі масової мобілізації, дислокації, оснащення і використання військової потужності, притаманної сучасності.

В умовах переходу до інформаційної війни набуває особливої уваги удосконалення основних характеристик транспортних мереж зв'язку, зокрема: пропускної спроможності, мобільності та захищеності від РЕБ супротивника. Слід зазначити, що перелічені характеристики, на жаль, є взаємно суперечливими. Насамперед стосується радіо технологій, які відповідають принципам забезпечення мобільності систем військового зв'язку. З іншого боку на сьогодні можливості існуючих радіо технологій транспортних мереж с точки зору пропускної спроможності, обмежені швидкістю передачі 155 Мбс [3]. Це фактично унеможливлює, наприклад, використання ресурсу Національної телекомунікаційної мережі (НТМ) України з потенціалом транспортної компоненти в 10 Гб/с. Слід додати, що практично усі існуючи радіо технології мають принципово низку захищеність існуючих від РЕБ супротивника. Тому пошук системних рішень для забезпечення потреб інформаційної війни з балансом усіх перелічених вище характеристик, зокрема з підтримкою мультігігабітних швидкостей передачі є важливою задачею статті.

Аналіз останніх публікацій.

Для досягнення достатньо великих швидкостей обміну інформацією треба мати широкі смуги частот каналів. Тому вибір діапазону міліметрових хвиль для побудови сучасних мультігігабітних транспортних мереж для систем військового зв'язку є практично, доцільним та необхідним. Тенденція використання засобів в міліметровому діапазоні хвиль зафіксована і в НАТО [4,5]. Незважаючи на високі загасання сигналів в Е-діапазоні, як показує аналіз системних компромісів між просторово-енергетичними характеристиками та показниками пропускної спроможності, використання міліметрового Е-діапазону для побудови транспортних мереж є дуже перспективним напрямком. Обґрунтування вимог, технічних характеристик та бойового використання засобів радіо зв'язку в Е-діапазоні, або М-діапазону по класифікації НАТО для використання в системі військового зв'язку формулюється вперше. Існує декілька публікацій стосовно використання Е-діапазону для передачі інформації. В більшості існуючих публікацій надається аналіз характеру розповсюдження радіохвиль в міліметровому діапазоні. Так матеріал [6] присвячений моделям ослаблення каналу та впливу фазового шуму генераторів синтезатору на прийом сигналів для Е-діапазону, та аналізується загальна пропускна спроможність у тому числі вплив на її при впровадженні MIMO. Аналізуються аспекти регуляції використання діапазону по регіонах світу. Наприклад в [7] на основі аналізу особливостей розповсюдження електромагнітних хвиль в Е-діапазоні аналізується вплив дощу на коефіцієнт готовності та дальність зв'язку. Пропонується використовувати розподілені в просторі антенні системи для підвищення спектральної ефективності в Е-діапазоні. В той же час важливими та

відсутнім є дослідження щодо величини пропускної спроможності в залежності від схеми многопозиційної модуляції QAM та дальності зв'язку.

Мета статті: Обґрунтувати можливість та доцільність використання технологій діапазону 80 ГГц для побудови мультігігабитних захищених від РЕБ супротивника радіорелейних ліній та прив'язки інформаційно-телекомунікаційних вузлів Збройних сил України (ЗСУ) до НТМ, а також для резервування волоконо-оптичних ліній зв'язку в місцях їх пошкодження.

Виклад основного матеріалу.

Впровадження в 2015-2019 рр. державної транспортної оптичної мережі с пропускною спроможністю 10 Гб/с як складової НТМ дозволяє суттєво підвищити можливості управління державою в умовах сучасної інформаційної війни, у тому числі управління в ЗСУ. На сьогодні реально для потреб Міністерства оборони України НТМ може надати на рівні усіх районних/обласних центрів ресурс транспортної мережі з інтерфейсами 100 Мб/с; 1Гб/с; 10Гб/с. Між тім існуючи технічні рішення прив'язки, наприклад, обладнання радіорелейної станції Р- 425С3, мають обмежені можливості по передачі інформаційних потоків, а саме до 100-155 Мб/с [8]. При цьому, пропускна спроможність радіорелейної лінії 155 Мб/с може буде досягнута на інтервалі до 19 км [3], тому, що потребує використання рівня багатопозиційної модуляції типу QAM-64, що можливо при наявності необхідного значення відношення сигнал/шум, а саме 24дБ в каналі. Саме це значення можливо отримати на відстанях до 19 км [3]. Для отримання у разі потреби, суттєво більшої бітової R_B швидкості передачі на Ethernet інтерфейсі радіолінії, а саме до 10 Гб/с, в радіосистемі, згідно до розрахунків Найквіста [8], для успішного прийому цифрових сигналів та недопущення міжсимвольної інтерференції, необхідно використовувати полосу частот не менш як $R_B/2$. Це означає, що для передачі на швидкості до 10 Гб/с, полоса частот каналу має бути не менш як 500 МГц!

На практиці, реальна полоса частот каналу має бути ще більше на 10-40% [8], у зв'язку з неідеальної АЧХ реальних фільтрів. Тобто для бітової швидкості, наприклад, 10 Гб/с практично треба мати полосу приблизно в 900-1000 МГц замість стандартних смуг 7/14/28 МГц. Такі смуги частот можуть бути реальними тільки у міліметровому діапазоні хвиль. Аналіз ділянок спектру міліметрового діапазону (наприклад, 60-100 ГГц) [9,10] показує, що для побудови радіорелейних ліній є ділянки 71-86 ГГц (Рис. 1) з відносно низьким, в порівнянні з іншими ділянками, коефіцієнтом загасання [10].

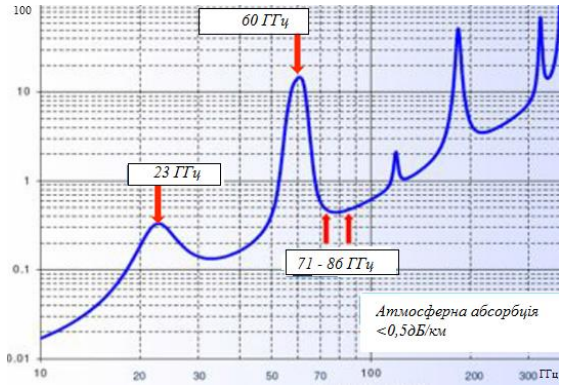

Рис. 1. Атмосферні затухання при різних діапазонах частот.

Загалом ширина смуги складає 10 ГГц, є дуже великою - по 5 ГГц в частках 71-76 та 81-86 ГГц відповідно (Рис. 2), що дозволяє будувати радіорелейні лінії зв'язку з частотним розподіленням каналів.

Як й в інших діапазонах частот, для побудови транспортної мережі в Е-діапазоні треба йти на системні компроміси: завдання підвищення швидкості передачі, як завжди стикається з завданням мінімізації енергетичних показників, або, що еквівалентно, зменшенню

відношення енергії одного біта до спектральної щільності шуму, зменшенням смуги частот каналу.

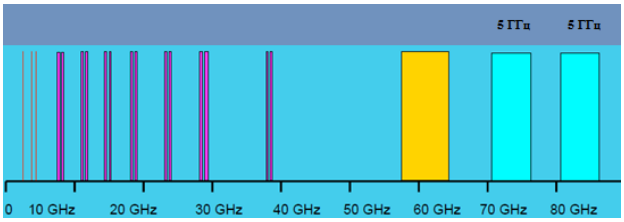

Рис.2 Полоси частот для організації зв'язку в Е-діапазоні.

Основними стримуючими факторами, звісно, є розрахунки Найквіста щодо мінімально необхідної смуги частот для прийому сигналів без межсімвольної інтерференції, а також границі Шеннона щодо досяжної пропускної спроможності. В рамках цих обмежень, значну ефективність використання канальних смуг частот можна досягнути шляхом використання багатопозиційних методів модуляції, таких як *QPSK, QAM* [11,12,13]. При цьому, при використанні сузір'я символів $M=2^k$ швидкість передачі символів в радіоканалі R_S буде в k разів менше за швидкість R передачі біт на Ethernet інтерфейсі:

$$R_S = R/k = R/\log_2 M \qquad (1)$$

Використовуючи (1) та з урахуванням співвідношення між смугоюW каналу, швидкістю R передачі бітів та тривалістю T імпульсу, а саме:

$$W=1/T,\ \ T=1/R,$$

можна отримати

$$W=R/\log_2 M \qquad (2)$$

Це означає, що з збільшенням M (збільшенням сузір'я символів) смуга частот, яка потрібна для передачі фіксованої бітової швидкості R, зменьшується. Наприклад, для передачі інформації на Ethernet інтерфейсі зі швидкістю 1 Гб/с та використанням модуляції *QAM 64 (k=6*), необхідна смуга частот каналу буде дорівнювати

$$W=(1000Мб/с/6)*1,4=233\ МГц$$

З використанням (2), потрібні смуги частот для типових можливих варіантів квадратурної амплітудної модуляції и для каналу передачі R=1 Гб/с наведені в Таблиці 1.

Таблиця 1

Варіант QAM	Кількість біт на символ	Потрібна смуга частот, МГц*
QAM 16	4	350
QAM 32	5	300
QAM 64	6	250
QAM 128	7	200
QAM 256	8	175

*) Смуга, приведена до існуючих стандартів

Відповідно, для інших швидкостей передачі, потрібні інші смуги частот каналів. Наприклад, для передачі 10 Гб/с з використанням модуляції *QAM256*, потрібна смуга частот каналу буде складати близько до 2000 МГц.

Ключове питання для практичної реалізації транспортної мережі в Е-діапазоні при використанні наведених варіантів модуляції на каналах 200МГц-2ГГц є досягнення найбільшої дальності зв'язку за умови дотримання якості , що, як правило може задаватися вірогідністю помилкового прийому біту P_B як функції відношення енергії біта до нормованої

енергії шуму E_b/N_0. Оскілки канал в Е-діапазоні є чисто гаусовським, вираз для P_B для сузір'я *QAM з* $M=2^k$ може бути записаний у вигляді [14]:

$$P_в = \frac{2\cdot(M-1)}{M\cdot\log_2 M}\cdot Q\left(\sqrt{\frac{6\cdot\gamma\cdot\log_2 M}{M^2-1}}\right)$$

Графікі P_B залежності від $\gamma = E_b/N_0$ для деяких варіантів багатопозиційної модуляції наведені на рис.3 та 4.

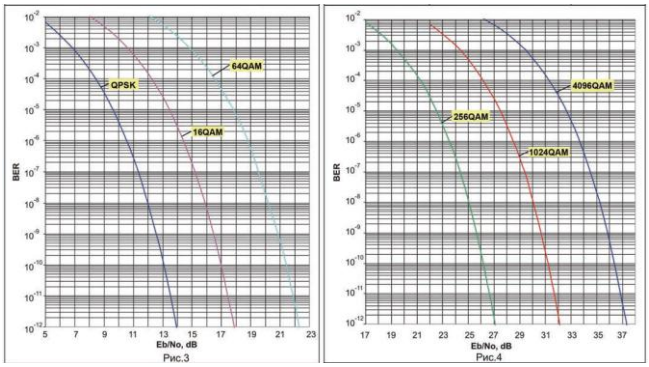

Рис.3,4 Графікі P_B залежності від $\gamma = E_b/N_0$ для деяких варіантів багатопозиційної модуляції

З урахуванням втрат енергії на коригуюче кодування, які можуть бути отримані з формули $P_{втр} = 10lg(1/FEC)$, можна скласти таблицю порогових відношень E_b/N_0 необхідних для роботи демодуляторів для $Pв=10^{-5}$ для типових схем цифрової модуляції.

Таблиця 2

Метод модуляції, *FEC*	*BPSK 1/2*	*QPSK 1/2*	*16QAM 1/2*	*64QAM 2/3*	*128QAM 3/4*	*256QAM 3/4*
E_b/N_0, *дБ*	7	*10*	14	18	21	24

З метою отримання відповіді щодо реальних відстаней між станціями, для яких виконуються означені мінімально необхідні відношення E_b/N_0 в Е-діапазоні, необхідно розрахувати енергетичний бюджет лінії, а саме визначити рівень сигналу на вході приймача, використовуючи стандартну математичну модель для умов прямої видимості [10]:

$$P_R = P_T\frac{G_T G_R \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \qquad (4)$$

де,

PR – потужність сигналу на вході приймача;
PT – потужність передавача;
GR - коефіцієнт посилення приймальні антени;
GT - коефіцієнт посилення передавальної антени;
d – відстань між станціями;
λ - довжина хвилі; λ = c / f;

Формула (4) при розрахунках в децибелах має наступний вигляд:

$$P_R = P_T + G_T + G_R - L_0, \qquad (5)$$

де L_0 - загасання сигналу в діапазоні 80 ГГц в свобідному просторі, дБ.

Реальні показники загасання сигналу L_0 для ввідстаней 100м/ 1км /10км наведені на Рис. 5.

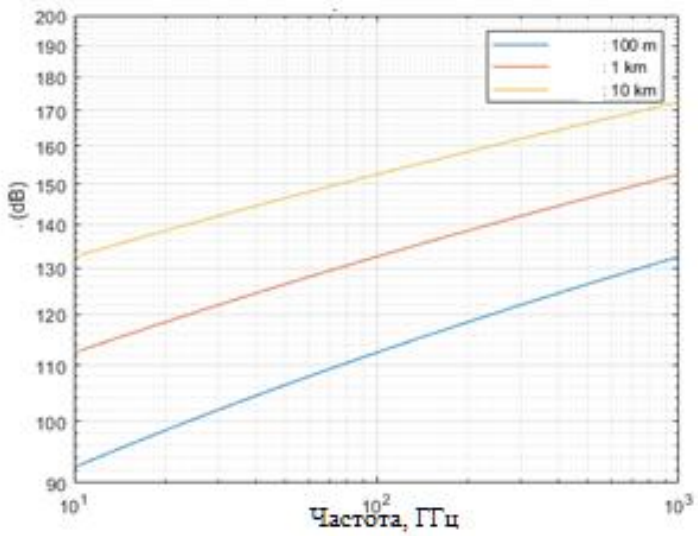

Рис. 5 Загасання сигналів в міліметровому діапазоні хвиль на різних відстанях між станціями [10,15]

Розрахунки загасання сигналу в Е-діапазоні на різних відстанях від передавача, та з антеною на висоті 30 м зроблені за формулою:

$$L_0 = \frac{(4\pi)^2 d^2}{\lambda^2}$$

наведені в таблиці 3.

Таблиця 3

Відстань від передавача, км	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Рівень загасання сигналу, L_0 дБ	130	133	135	137	139	142	145	147	149	151	153	156

З урахуванням фактичних технічних характеристик обладнання для Е-діапазону, вказаних в таблиці 4 [15-17]:

Таблиця 4

P_T	*20 дБм*
G_T (60см)	*50 дБі*
G_R (60см)	*50 дБі*
P_0 (порогова чутливість)	*-66 дБм**

*) для полоси 500 МГц та модуляції *QAM 64*

З урахуванням значення потужності шумів за формулою [9]

$$N_0 = -228{,}6 + 10lg(T) + 10lg(W),\ дБ\cdot Вт,$$

можливо розрахувати баланс радіолінії та реальні відстані між станціями для отримання необхідної швидкості передачі на Ethernet інтерфейсі для різних смуг частот. Фінальні розрахунки наведені в Таблиці 5.

Отримані результати потенційної дальності зв'язку для радіорелейних ліній Е-діапазону є компромісом між досяжною швидкістю передачі з фіксованою якістю та просторово-енергетичними параметрами лінії.

Для організації зв'язку на дистанціях, які перевищують вказані у таблиці 4, треба будувати радіолінії з проміжними станціями.

Таблиця 5

Полоса каналу	**Метод модуляції**	**Пропускна спроможність**	**Дальність зв'язку***
250МГц	64QAM	1000 Мбіт	12 км
	32QAM	835 Мбіт	13 км
	QPSK	333 Мбіт	15 км
500МГц	64QAM	2000 Мбіт	10 км
	32QAM	1666 Мбіт	11 км
	16QAM	1333 Мбіт	12 км
	8PSK	1000 Мбіт	13 км
	QPSK	666 Мбіт	14 км
1000МГц	64QAM	4500	10 км
2000МГц	256 QAM	9680	8 км

*) для антени діаметром 60см

Додатково слід зазначити про високу захищеність транспортних технологій Е-діапазону. Аналіз існуючих комплексів На основі аналізу оперативно-технічних характеристик систем РЕБ супротивника підтверджено факт що радіорелейні лінії діапазону 80 ГГц, не можуть бути виявлені, подавлені, тому що:

1. На сьогодні не існує технічних засобів у вірогідного супротивника для виявлення та придушення радіоліній в діапазоні 80 ГГц.
2. Навіть при наявності у супротивника технічних засобів РЕБ, особливі просторово-енергетичні характеристики радіоліній 80 ГГц, перш за все, вузька діаграма спрямованості, а саме $0{,}3^0$ для антен діаметром 60 см та $0{,}9^0$ для антен 30см, широка смуга частот каналу унеможливлюють провести виявлення та ефективну постановку перешкод. Це робить доцільним впровадження радіорелейних ліній діапазону 80 ГГц для організації зв'язку між основними пунктами управління в ООС.

Висновки:

1. В умовах переходу до інформаційної війни набуває особливої уваги удосконалення основних характеристик транспортних мереж зв'язку, зокрема: пропускної спроможності, мобільності та захищеності від РЕБ супротивника. Використання радотехнологій діапазону 80 ГГц для побудови мультігігабітних радіорелейних ліній є одним з напрямків цього удосконалення.

2. Аналіз характеристик розповсюдження радіохвиль в міліметровому діапазоні підтверджує наявність смуги 71-86 ГГц з відносно низьким рівнем загасання електромагнітної енергії сигналу та фактично низьку залежність рівня загасання від погодних умов в зонах Східної Європи. Ці обставини, а також п'ятирічний практичний досвід автора використання технологій Е-діапазону в умовах України підтверджує можливість та доцільність побудови транспортних мереж в Е-діапазоні для систем військового зв'язку.

3. З метою досягнення балансу між завданням отримання гігабітних швидкостей передачі інформації та завданням збільшення дальності зв'язку запропоновано використовувати методи багатопозиційної модуляції типу QPSK/QAM при фіксованої характеристиці якості ($P_в$) та сузі частот для досягнення максимальної спектральної ефективності. Наприклад, швидкість майже 10 Гб/с, може буда досягнута на інтервалі до 8 км на каналі смугою 2 ГГц та при використанні QAM 256 та антени діаметром 60 см, яка має коефіцієнт спрямованості 52 дБі.

4. На основі аналізу оперативно-технічних характеристик систем РЕБ потенційного супротивника підтверджено факт, що радіорелейні лінії діапазону 80 ГГц, не можуть бути виявлені, придушені, тому що на сьогодні не існує ефективних технічних засобів для

боротьби з ними. Це робить доцільним впровадження радіорелейних ліній діапазону 80 ГГц також для організації зв'язку між основними пунктами управління в ООС.

Наступним кроком досліджень є дослідження способів подальшого підвищення спектральної ефективності радіоліній міліметрового діапазону хвиль до 20-30 біт/с/Герц шляхом використання різноманітних схем MIMO, просторового-часового кодування з метою реалізації рішень в інтересах систем військового зв'язку.

ЛІТЕРАТУРА

1. Інформаційний компонент у сучасних концепціях ведення війни/ Пєвцов Г.В., Гордієнко А.М // XXII Всеукраїнська науково-практична конференція. Житомирський військовий інститут імені С.П. Корольова, 2018.

2. Roger C. Molander, Peter A. Wilson, B. David Mussington, Richard Mesic/ Strategic Information Warfare Rising//National defense research institute, RAND, 1998, pp 113.

3. Оцінка граничної дальності зв'язку на сучасних радіо-та радіорелених лініях / Т.Г. Гурський, Є.О. Степаненко, А.В.Шишацький // Сбірник наукових праць ВІТІ. – 2019. – № 1 – С. 6 – 17.

4. M-band NATO. https://en.m.wikipedia.org/wiki/M_band_(NATO)

5. Department of Defense (DoD) Strategic Spectrum Plan In Response to The Presidential Spectrum Policy Reform Initiative, 2008.

6. . Mehrpouyan, H. ; Khanzadi, M. ; Matthaiou, M. Improving Bandwidth Efficiency in E-band Communication SystemsIEEE Communications Magazine (ISSN: 0163-6804).

7. V. Dyadyuk, J. D. Bunton, and Y. J. Guo/Multi-gigabit wireless communication technology in the E-band//Conference/ Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology, 2009. Wireless VITAE 2009

8. Nyquist H. Certain topic on telegraph transmission theory. Trans.AIEE,vol.47, April, 1928, pp.617 – 644.

9. Calculation of free space attenuation/ RECOMMENDATION// ITU-R P.525-2.-1996.

10. Распространение радиоволн. Учебное пособие./М.В.Гряник М.В., В.И. Ломан.-К.: КВВИУС,1989. – 389 с.

11. Sklar.B. Digital Communications. Fundamentals and Applications. University of California. LA. Prentice-Hall, 1988 P.776

12. J. G. Proakis, Digital Communications, Fourth Edition, McGraw-Hill Book Co., New York. 2001.P1001

13. MIMO CyOFDM Wireless Communications with MATLAB by Yong Soo Cho, Jaekwon Kim, Won Young Yang, Chung G. Kang, 2010, John Wiley & Sons.

14. Korn I.Digital communications. Van Nostrand Reinhold Co., New York,1985

15. E-band com: https://e-band.com/products/e-link-1000q-fp/, https://e-band.com/products/e-link-eagle2/.

16. Huawei:https://e.huawei.com/ru/products/wireless/microwave/e-Band-millimeter/.

17. Bridgewave: https://www.everythingrf.com/products/microwave-backhaul/bridgewave/722-681-flexport/.