

УДК 621.396.4

DOI: [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2022.3\(35\).68-76](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2022.3(35).68-76)

О. Ю. ЮДІН, кандидат технічних наук
<https://orcid.org/0000-0002-4730-1463>
e-mail: office@ukrdefteach.com.ua

О. А. ЛИПСЬКИЙ, кандидат технічних наук
доцент
<https://orcid.org/0000-0002-8816-3227>
e-mail: alexander256@bigmir.net

А. А. ПАЛАМАРЧУК, кандидат технічних наук
головний науковий співробітник
<https://orcid.org/0000-0003-0323-0226>
e-mail: andriy42@meta.ua

Я. І. СТЕФАНИШИН, науковий співробітник
<https://orcid.org/0000-0002-8317-4131>
e-mail: yaroslavstf@meta.ua
(Державний науково-дослідний інститут технологій кібербезпеки та захисту інформації Державної служби спеціального зв'язку та захисту інформації України, м. Київ)

В. І. СЛЮСАР, доктор технічних наук, професор
<https://orcid.org/0000-0002-2912-3149>
e-mail: swadim@ukr.net
(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)

А. М. АЛЕСИН, генеральний директор
ПАТ «Міррад»
<https://orcid.org/0000-0002-7248-6252>
e-mail: mirrad@ukr.net

А. А. АЛЕСИН, провідний конструктор
<https://orcid.org/0000-0002-4254-3017>
e-mail: mirrad.ukr@gmail.com
(ПАТ «Міррад», м. Київ)

РАДІОРЕЛЕЙНА СТАНЦІЯ V-ДІАПАЗОНУ «КАССІОПЕЯ»

Обґрунтовано оптимальний варіант побудови перспективної радіорелейної станції (PPC) V-діапазону (59–64 ГГц). Наведено функціональну схему і зовнішній вигляд експериментального повнодуплексного зразка PPC. При натурних випробуваннях PPC швидкість передавання інформації сягала 10 Мбіт/с на відстані 1,75 км. Потужність випромінювання передавального тракту PPC становила 10 дБм, для передавання інформаційних сигналів використано модем з VPSK-модуляцією та коригуванням помилок методами турбокодування. Зроблено висновок про

перспективність використання радіоліній спеціального зв'язку на інтервалах "першої (останньої) милі" у V-діапазоні, зважаючи на труднощі створення штучних завод їх функціонуванню внаслідок затухання радіохвиль, обумовленого резонансним поглинанням атомарним киснем в атмосфері.

Ключові слова: міліметровий діапазон, резонансне поглинання радіохвиль, захищені лінії зв'язку, двоантенні приймально-передавальні пристрої, радіорелейна станція.

ВСТУП

Прогрес у створенні та використанні засобів зв'язку практично вичерпав можливості традиційних діапазонів частот (до 40 ГГц). Зважаючи на це, актуальним є освоєння більш високочастотних діапазонів електромагнітного спектру. Зокрема, поточним трендом розвитку засобів зв'язку у світі є активне освоєння діапазону міліметрових (мм) хвиль, до якого відносять смуги частот 59–64 ГГц (V-діапазон) та 71–76 ГГц і 81–86 ГГц (E-діапазон). У більшості країн світу мм-діапазон хвиль використовують на безліцензійній основі, або за умов спрощеного ліцензування. Разом з тим, законодавча база у державі [1–3] не встановлює чіткі правила використання цього діапазону, тому, скоріш за все, у подальшому, вона потребуватиме уточнення.

До переваг використання мм-хвиль у радіолініях зв'язку можна віднести можливість збільшення швидкості передавання даних при підвищенні заводозахищеності інформаційного каналу та зменшенні габаритів і маси радіочастотних блоків PPC.

Одним із суттєвих недоліків PPC мм-діапазону є порівняно невеликі інтервали зв'язку (2–5 км у V-діапазоні та 10–12 км – у E-діапазоні). Однак, стійкість PPC мм-діапазону до штучно створених завод, що обумовлюється великим погонним затуханням радіохвиль в атмосфері, може бути суттєвою перевагою PPC саме при спеціальних застосуваннях (захищені від ураження засобами радіоелектронної боротьби (РЕБ) лінії зв'язку та інформаційні мережі об'єктів силових структур, важливих об'єктів господарської чи управлінської діяльності тощо). Додатковим фактором захищеності технічних засобів зв'язку мм-діапазону є непристосованість наявних засобів РЕБ до створення завод у цьому діапазоні.

Прогрес у розвитку елементної бази мм-діапазону надає можливість створити декілька модифікацій PPC, які можуть бути застосовані не тільки в захищених мережах зв'язку, а й для дистанційного керування об'єктами спеціального призначення з метою зменшення ймовірності ураження персоналу.

Метою статті є викладення основних результатів науково-дослідної роботи щодо визначення шляхів створення захищеного каналу зв'язку у 5 мм діапазоні електромагнітного спектру, шифр «Кассіопея» [4], виконаної ДержНДІ технологій кібербезпеки Держспецзв'язку.

ОСОБЛИВОСТІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ РАДІОХВИЛЬ ММ-ДІАПАЗОНУ

При взаємодії електромагнітного випромінювання із середовищем розповсюдження спостерігаються процеси розсіювання, послаблення, деполяризації, амплітудних та фазових спотворень. Послаблення радіохвиль в атмосфе-

рі має загальну тенденцію зростання з підвищенням частоти і суттєво залежить від погодних умов. При цьому, атмосферні гази і водяна пара обумовлюють наявність кількох частот резонансного затування, зокрема, 22,2 ГГц (H₂O), 60 ГГц (O₂), 118,8 ГГц (O₂) та 180 ГГц (H₂O), що наочно представлено на рис. 1 [5].

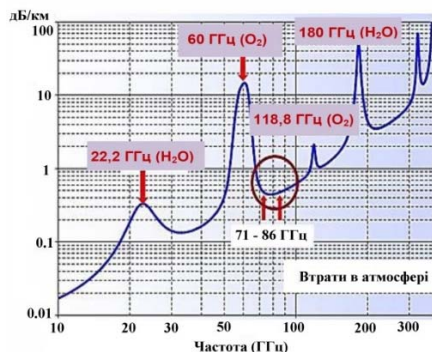


Рис. 1. Залежність затування радіохвиль в атмосфері

Таблиця 1. Основні властивості V- та E-діапазонів

Найменування характеристики	V-діапазон	E-діапазон
1) Затування в атмосфері, дБ/км	14	0,5
2) Довжина каналу зв'язку, км	0,5–2 (5)	1–12
3) Можливість ретрансляції сигналу на тій же частоті	+	+
4) Стійкість до штучно створених завад	+++	+
5) Ширина дуплексного рознесення каналів, ГГц	2...2,5	10
6) Перспективність для створення ліній зв'язку для умов:		
дії засобів РЕБ (спеціальні захищені мережі),	+++	++
міської забудови,	++	++
оперативного подолання водних та гірських перешкод,	+	++
ліквідації надзвичайних ситуацій	+	+

Примітка: + перспективно; ++ дуже перспективно; +++ надзвичайно перспективно.

Принцип дії адаптивної модуляції представлено на рис. 2 [6], де гарантований безперервний трафік (за найбільш несприятливих метеорологічних умов) забезпечується з використанням модуляції QPSK, а більш прогресивні (щодо частотної ефективності) типи модуляції (зокрема, 16–128 QAM) автоматично вмикаються при покращанні погодних умов.

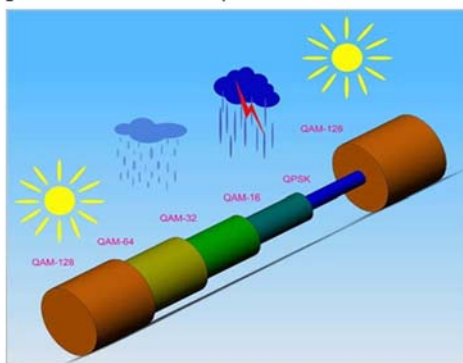


Рис. 2. Принцип дії адаптивної модуляції

РЕТРАНСЛЯТОРИ ММ-ДІАПАЗОНУ

Для подовження інтервалів зв'язку РРС мм-діапазону доцільним є використання методів та засобів ретрансляції сигналів. Типовим рішенням є використання ретранслятора, створеного із двох комплектів

Основні властивості V- та E-діапазонів, які визначають перспективність їх використання для створення радіоліній зв'язку різного призначення, представлені у табл. 1.

АДАПТИВНА МОДУЛЯЦІЯ

Зважаючи на сильну залежність параметрів функціонування радіоліній мм-діапазону від погодних факторів, типовим рішенням при створенні РРС є використання адаптивної модуляції (автоматична зміна виду модуляції та швидкості передавання даних у залежності від параметрів розповсюдження сигналу), що дає можливість за несприятливих погодних умов забезпечити безперервний трафік для каналів з найвищим пріоритетом (звичайно, за рахунок каналів з нижчим пріоритетом). Загальновизнано, що у більшості випадків експлуатації мереж зв'язку мм-діапазону такі умови є цілком прийнятними.

РРС. При цьому, у певних випадках для зменшення витрат можуть бути використані більш прості конструкції. Наприклад, в [7] запропоновано варіанти достатньо простих ретрансляторів.

Найпростіший пасивний ретранслятор складається з двох параболічних антен, що зв'язані хвилеводом без будь-якого підсилення сигналу. Очевидно, що, незважаючи на використання антен з достатньо великими коефіцієнтами підсилення (до 50 дБі), подовження інтервалу зв'язку буде незначним. Однак, таке рішення може бути доречним при забезпеченні покриття радіосигналом локальних об'єктів, що знаходяться у зоні радіотіні (актуально, наприклад, для умов щільної урбанізованої забудови).

Більш досконалим рішенням, відомим ще з 1899 року [8], є активний ретранслятор. Функціональна схема типового варіанту його сучасної реалізації представлена на рис. 3.

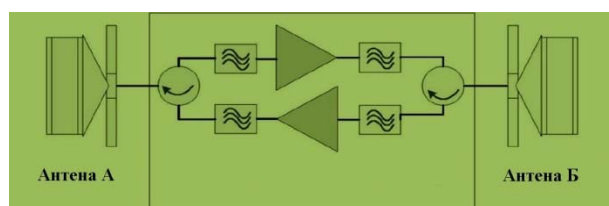


Рис. 3. Активний ретранслятор мм-діапазону

У цьому ретрансляторі для кожного напрямку розповсюдження сигналу використовується свій підсилювач з коефіцієнтом підсилення близько 50–60 дБ. Основною проблемою, яка обмежує величину коефіцієнта підсилення при створенні таких ретрансляторів, є схильність системи до самозбудження. Крім того, жорсткі вимоги висуваються і до лінійності тракту підсилення, особливо, при використанні перспективних методів модуляції, зокрема, QAM з високою позиційністю та сигналів OFDM [9].

ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ЗВ'ЯЗКУ V– ТА E–ДІАПАЗОНІВ

Коло світових компаній-виробників радіорелейних станцій (PPC) мм-діапазону достатньо різноманітне, крім того, йому притаманна тенденція сталого розширення. Технічні характеристики PPC V-діапазону BW64 (знято з виробництва), BridgeWave Communication (США) [10], StreetNode V60-PTP, Intracom-Telecom (Греція) [11] та Liberator V1000, Fastback Networks (США) [12] представлено у табл. 2, а їх загальний вигляд – на рис. 4.

Таблиця 2. Основні технічні характеристики PPC V-діапазону

Найменування технічної характеристики	BW64	StreetNode V60-PTP	Liberator V1000
Швидкість передавання даних, Гбіт/с	1	1,65	1
Ширина смуги частот, МГц	1400	250	700
Модуляція	BPSK	(4–128)QAM	8PSK, QPSK
Вихідна потужність, дБм	-	7	6
Коефіцієнт підсилення антени, дБі	38	34	38
Робоча частота, ГГц	57–64		58,25–63,25
Довжина каналу зв'язку, км	0,1...1	1	0,8
Маса, кг	12	3	2,5
Габаритні розміри, мм	318×318×150	298×151×176	182×182×100
Споживана потужність, Вт	45	38	35



а)



б)



в)

Рис. 4. Загальний вигляд PPC V-діапазону: а) BW64, Bridge Wave Communication, USA; б) StreetNode V60-PTP, Intracom-Telecom, Greece; в) Liberator V1000, Fastback Networks, USA



а)



б)



в)

Рис. 5. Загальний вигляд PPC E-діапазону: а) Flex 4G-10000, Bridge Wave Communication, USA; б) Ultralink-GX80, Intracom-Telecom, Greece; в) E-link Eagle, E-band Communication, USA



а)

б)

в)

Рис. 6. Загальний вигляд PPC E-діапазону: а) Mini-link PT 6020, Ericsson, Norway; б) Liberator E1000e, FastBack Networks, USA; в) PPC-10G, DOK Company, Russia

Не менш різноманітними є також технічні засоби зв'язку E-діапазону. Зокрема, заслуговують на увагу PPC Flex 4G-10000, BridgeWave Communication (США) [13], Ultralink-GX80, Intracom-Telecom (Греція) [14], Liberator E1000e, Fastback Networks (США) [12], E-link

Eagle, E-band Communication, (США) [15], Mini-link PT 6020, Ericsson (Норвегія) [16] та PPC-10G, PPC-10G, DOK Company (РФ) [17]. Їх загальний вигляд представлений на рис. 5 та 6, а технічні характеристики – у табл. 3.

Таблиця 3. Основні технічні характеристики PPC E-діапазону

Найменування технічної характеристики	Flex 4G-10000 (Bridge Wave Communication, USA)	Ultralink-GX80 (Intracom-Telecom, Greece)	E-link Eagle (E-and Communication, USA)	Mini-link PT 6020 (Ericsson, Norway)	Liberator E1000e (FastBack Networks, USA)	PPC-10G (DOK Company, Russia)
Швидкість передавання даних, Гбіт/с	9,7	1,65	3	1	1	10
Ширина смуги частот, МГц	250/500/750	250/500/750/1500	250/500/750	250	500	250-2000
Модуляція	QPSK/8PSK/16/64QAM	4/8/16/32/64/128/256QAM	QPSK, 16/32/64 QAM	4/8/16/32/64 QAM	BPSK, QPSK	BPSK, 256QAM
Вихідна потужність, дБм	-	-	20	-	13...18	20
Коефіцієнт підсилення антени, дБі	43,8/51/54	44/50	44/50	44/50	44/50	45/51
Робоча частота, ГГц	71-76, 81-86					
Довжина каналу зв'язку, км	0,1...2	-	6	8	4	11
Маса, кг	4,4	4,5	3,9	5,7	2,5	6
Габаритні розміри, мм	334×296×102	290×240×96	251×119×79	117,3×260×321	182×182×10	246×246×110
Споживана потужність, Вт	7,3	70	-	40	40	35

Слід зазначити, що модифікації PPC Mini Link 6363 та Mini Link 6352 фірми Ericsson (Норвегія), AlfaPlus80HDX фірми SIAE Microelettronica (Італія) [18] та EtherHaul фірми Siklu (Ізраїль) [19] мають конструктивне виконання, подібне до наведених.

ПЕРЕВАГИ V-ДІАПАЗОНУ ДЛЯ СТВОРЕННЯ РАДІОЛІНІЙ СПЕЦІАЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ

На поточний час технічні засоби V-діапазону комерційного використання переживають бурхливий розвиток. Зокрема, в [20] наводиться опис міжнародних стандартів щодо унормування параметрів та

принципів побудови систем зв'язку цього діапазону (нормативний документ IEEE 802/15/3c), а також згадка про розгортання робіт зі створення спеціальних ліній зв'язку тактичного рівня (взвод).

Доцільність використання V-діапазону для створення радіоліній спеціального зв'язку «першої (останньої) милі» обґрунтована також в [21]. Зокрема, визначено, що ключовими критеріями для побудови радіоліній V-діапазону є не стільки ціна, скільки скритність дії, стійкість до несанкціонованого втручання (перехоплення, створення завад), надійність функціонування, зменшені габарити та маса.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ ЗРАЗОК РАДІОРЕЛЕЙНОЇ СТАНЦІЇ V-ДІАПАЗОНУ

Для експериментального підтвердження можливості використання V-діапазону при створенні захищених корпоративних мереж спеціального зв'язку, а також радіоліній «першої (останньої) милі», у результаті виконання НДР [4] розроблено та виготовлено 2 експериментальних зразки РРС «Кассіопея», функціональні схеми яких наведено на рис. 7, а їх загальний вигляд – на рис. 8.

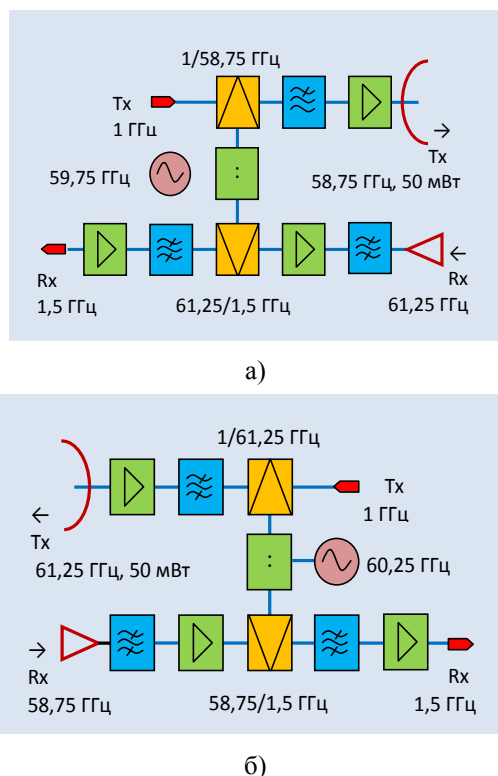


Рис. 7. Функціональна схема експериментальних зразків РРС «Кассіопея»: а) літера «А»; б) літера «Б»

Особливістю побудови експериментального зразка РРС (захищено патентом України на корисну модель №135686) є використання спільного гетеродина для каналу передавального і приймального трактів, а також окремих антен для приймання і передавання інформації з коефіцієнтами підсилення, що відрізняються на 25–30 дБі (сумарно – близько 60 дБі). До переваг такої архітектури РРС можна віднести значне скорочення терміну наведення антен та спрощення конструкції дуплексера, до недоліків – необхідність літерного виконання приймально-передавальних пристроїв («А» та «Б»).

Приймально-передавальні пристрої експериментального зразка РРС «Кассіопея» виготовлені з використанням елементної бази V-діапазону на основі гібридно-інтегральної технології. Зокрема, у складі вхідних та вихідних підсилювачів, а також змішувачів та генераторів використовуються мікросхеми фірми Analog Devices. Для виготовлення офсетної антени використано рефлектор приймального пристрою супутникового телебачення фірми TechniSat. У якості модемів, які забезпечують модуляцію/демодуляцію інформаційних сигналів на проміжних частотах (1 ГГц

для передавального тракту та 1,5 ГГц для приймального тракту), а також їх цифрове оброблення з автоматичним коригуванням помилок методами турбокодування, використані цифрові модеми Q-Flex фірми Teledyne Paradise Datacom LLC, USA.



Рис. 8. Загальний вигляд експериментальних зразків РРС «Кассіопея»

Конструктивно експериментальний зразок РРС «Кассіопея» розміщений на легкому штативі, що, загалом, забезпечило певну зручність у транспортуванні. При цьому, вибраний штатив не завжди забезпечував стійкість експериментального зразка РРС до поривів вітру (зокрема, зі швидкістю більше 10 м/с), що загрожувало його пошкодженню та впливало на терміни проведення випробувань. Для взаємного наведення антен до складу кожного із експериментальних зразків були введені оптичні приціли Nikko Stirling Diamand Long Range 4–16×50 AOIR HF.

Розрахунки потенціалу одноінтервальної радіолінії, виконані для РРС з середньою робочою частотою 60 ГГц, потужністю випромінювання 17 дБм (50 мВт), сумарним коефіцієнтом підсилення антен 60 дБі та температурою шумів вхідного підсилювача 500 К, показали, що рівень сигналу на вході приймального тракту РРС складе не менше 115 дБВт. Це є цілком досяжним при практичній реалізації. При цьому за умов дуплексного рознесення робочих частот 2,5 ГГц та використання модуляції 16QAM забезпечується швидкість передавання інформації до 100 Мбіт/с.

РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАНЬ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ЗРАЗКІВ РРС

Натурні випробування проведено на одноінтервальної радіолінії V-діапазону, створеній з викорис-

танням двох експериментальних зразків РРС «Кассіопея» (потужність випромінювання передавального тракту – 10 дБм, модуляція – BPSK, цифровий модем Q-Flex фірми Teledyne Paradise Datacom LLC, USA). У результаті випробувань радіолінії забезпечено передавання цифрової інформації у V-діапазоні зі швидкістю 10 Мбіт/с на відстань 1,75 км з бітовим відношенням сигнал/шум $E_b/N_0=7$ дБ (досягнуті показники, в основному, визначалися характеристиками вибраної траси та цифрового модема Q-Flex). Крім того, на цій же відстані було встановлено голосовий зв'язок з використанням захищеного IP-телефона. За експертними оцінками, якість голосового зв'язку – задовільна.

При випробуваннях експериментальної радіолінії спеціального зв'язку V-діапазону виявлено доцільність внесення наступних удосконалень до конструктивного виконання РРС «Кассіопея»:

розроблення спрощеного спеціалізованого модема, пристосованого для роботи з оптичними лініями передавання інформаційних цифрових сигналів, з метою, окрім оптимізації конструкції, виключення впливу засобів РЕБ на радіолінію через вхідні інформаційні ланцюги;

використання надійного штатива (наприклад, геодезичного), з метою підвищення стійкості РРС до впливу поривів вітру швидкістю до 30 м/с;

використання спеціалізованого оптичного прицілу, з виведенням цифрової інформації на монітор комп'ютера, з метою спрощення процесу взаємного наведення РРС.

ВИСНОВКИ

Сучасний стан розвитку елементної бази відкрив перспективи використання мм-діапазону електромагнітного спектру для оперативної організації захищеного зв'язку тактичного та, у обґрунтованих випадках, оперативного рівня. Крім того, мм-діапазон є перспективним для захищеного дистанційного керування об'єктами спеціального призначення з метою зменшення ймовірності ураження персоналу.

Зважаючи на порівняно невеликі інтервали зв'язку радіоліній V-діапазону (2–5 км), створювана РРС «Кассіопея» вважається перспективною для оперативного розгортання захищених локальних мереж спеціального зв'язку, переважно тактичного рівня.

При виконанні ДКР щодо розроблення дослідних зразків РРС «Кассіопея» доцільно основну увагу приділити створенню спеціалізованого модема, зокрема, на основі OFDM сигналів, та його інтеграції до складу приймально-передавального пристрою РРС. Крім того, необхідно вжити дієвих заходів для забезпечення РРС від негативного несанкціонованого впливу випромінювання технічних засобів РЕБ на проміжних частотах, зокрема, екранування її складових частин та передавання інформаційних цифрових потоків оптичними лініями.

РРС E-діапазону, зважаючи на їх значно більшу довжину каналу зв'язку (10–12 км), є перспективними для оперативного створення захищених радіоліній не тільки тактичного, а і в обґрунтованих випадках, оперативного рівня на інтервалах «першої та останньої милі».

З урахуванням перспективності використання височастотних діапазонів електромагнітного спектру (зокрема, мм-діапазону) для створення спеціальних

ліній зв'язку, а також бурхливого зростання перспектив їх комерційного застосування, доцільно прийняти управлінські рішення щодо відновлення втрачених та формування нових вітчизняних наукових шкіл і відповідної виробничої бази для широкомасштабного освоєння мм-діапазону електромагнітного спектру.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Закон України «Про радіочастотний ресурс України № 1770–III від 01.06.2000». [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.zakon.rada.gov.ua/laws/show/1770-14#Text.
2. Постанова Кабінету Міністрів України «Про затвердження Національної таблиці розподілу смуг радіочастот України № 1208 від 15.12.2005». [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.zakon.rada.gov.ua/laws/show/1208-2005-n#Text.
3. Постанова Кабінету Міністрів України «Про затвердження Плану використання радіочастотного ресурсу України № 815 від 09.06.2006» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.zakon.rada.gov.ua/laws/show/815-2006-n#Text.
4. Вергелес Д.Д. Визначення шляхів створення захищеного каналу зв'язку в 5 мм діапазоні електромагнітного спектру, шифр «Кассіопея»: звіт про НДР. № держреєстрації 0118U004940. Київ. 2019. 102 с.
5. Офіційний сайт GigaBitRadio. О миллиметровом диапазоне. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.gigabitradio.ru/info-centr/23-2.
6. Офіційний сайт LanTorg. Современная радиорелейная связь. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://lantorg.com/article/sovremennaya-radiorelejnyaya-svyaz>.
7. Грегор Рашпет, Войко Кович. Проектирование радиорелейных линий связи в условиях отсутствия прямой видимости. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.integra-pro.com/rus/lib/articles/microwavelinksinnloscon.
8. Слюсар В.И. Радиорелейным системам связи 115 лет. Первая миля. Last mile (Приложение к журналу «Электроника: наука, технология, бизнес»). 2015. № 3. С. 108—111.
9. Слюсар В.И. Современные тренды радиорелейной связи. Технологии и средства связи. 2014. № 4. С. 32—36.
10. Офіційний сайт BridgeWave Communications, USA. BW64. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.bridgewave.com/wp-content/uploads/2017/06/DS_BW64.pdf.
11. Офіційний сайт Intracom–Telecom, Greece. Street-Node V60. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.intracom-telecom.com/en/products/wireless_network_systems/4G_smallcell_son_backhaul/streetnodeV60.
12. Офіційний сайт Fastback Networks, USA. Liberator Family: High capacity, Low Complexity Urban Connectivity. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.fastbacknetworks.com/product.

13. Офіційний сайт BridgeWave Communications, USA. Flex4G-10000. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.bridgewave.com/flex4g-10000.
14. Офіційний сайт Intracom–Telecom, Greece. Ultralink–GX80. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.intracom-telecom.com/en/products/wireless_network_systems/4G5G_backhaul_fronthaul/ultralinkGX80.
15. Офіційний сайт E-band Communications LLC, USA. E-link Eagle. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.e-band.com/product.
16. Офіційний сайт Tele–A, рф. РПЛ системи миллиметрового діапазона. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.tele-a.ru/radio-communication/rll-v-e-band.
17. Офіційний сайт DOK Company, рф. PPC-10G. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.dokltd.ru/products/a20190.
18. Офіційний сайт SIAE Microelettronica, Італія. ALFOplus80HDX. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.siaemic.com/index.php/products-services/telecommunication-systems/microwave-product-portfolio/alfa-plus-80hdx.
19. Офіційний сайт Siklu, Ізраїль. EtherHaul Kilo Series. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.siklu.com/product/etherhaul-kilo-series.
20. Вишневицкий В., Фролов С., Шахнович И. Миллиметровый диапазон как промышленная реальность. Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2010. № 3. [Електронний ресурс] – Режим доступу: www.electronics.ru/journal/article/52.
21. Вергелес Д.Д., Бурак В.Д., Паламарчук А.А., Стефанишин Я.І. Основні підходи до створення широкосмугової станції зв'язку міліметрового діапазону «Кассіопея». Безпека інформації у інформаційно-телекомунікаційних системах: Матер. XX Ювілейної Міжнар. наук.-практ. конф. Київ. 2018. Вип. 20. С. 184—185.

REFERENCES

1. The Law of Ukraine (2000), “*Pro radiochastotniy resurs Ukrainy No.1770–III vid 01.06.2000*” [On the Radio Frequency Resource of Ukraine No. 1770–III dated 01.06.2000]. Available at: www.zakon.rada.gov.ua/laws/show/1770-14#Text (accessed 22 February 2021).
2. The Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine (2005), “*Pro zatverdzhennia Natsionalnoi tablytsi rozpodilu smug radiochastot Ukrainy No.1208 vid 15.12.2005*” [About approval of the National Table of Radio Frequency Allocation of Ukraine No. 1208 dated 15.12.2005]. Available at: www.zakon.rada.gov.ua/laws/show/1208-2005-n#Text (accessed 22 February 2021).
3. The Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine (2006), “*Pro zatverdzhennia Planu vykorystannia radiochastotnogo resursu Ukrainy No. 815 vid 09.06.2006*” [About approval of the Plan of Use of the RF Frequency Resource of Ukraine No.815 dated 09.06.2006]. Available at: www.zakon.rada.gov.ua/laws/show/815-2006-n#Text (accessed 22 February 2021).
4. Vergeles, D. (2019), “*Vyznachennia shliakhiv stvo-rennia zahytschenного kanalu zviyazku u 5 mm diapazoni elektromagnitnogo spectru, shyfr Kassiopeia: zvit pro NDR*” [Determining Creation Ways secured communication channel in 5mm range electromagnetic spectrum, code Cassiopeia], К. 2019. 102 p.
5. The official site of GigaBitRadio (2021), “*O millimetrovom diapazone*” [About the millimeter range], available at: www.gigabitradio.ru/info-centr/23-2 (accessed 22 February 2021).
6. The official site of LanTorg (2021), “*Sovremennaiya radioreleinaia sviaz*” [Modern radio relay communication]. Available at: <https://lantorg.com/article/sovremennaya-radiorelejnyaya-svyaz> (accessed 22 February 2021).
7. Gregor Razpet & Voiko Kovic (2021), “*Proektirovanie radioreleinykh liniy svyazi v usloviiah otsutstviya priamoi vidimosti*” [Designing Radio Relay Communication Lines in No-Line-of Sight Conditions]. Available at: www.integra-pro.com/rus/lib/articles/microwave-links-in-no-line-of-sight (accessed 23 February 2021).
8. Slusar, V. “Radioreleinyy systemem svyazi 115 let. Pervaia milia. Posledniaia milia” [115 Years of Radio-Relay Communication Systems. First mile. Last mile] (The Addition of J. «Electronics: Science, Technology, Business»). 2015. № 3. Pp. 108—111.
9. Slyusar, V. “Sovremennye trendy radioreleinoi svyazi” [Modern trends of radio relay communication]. Communication Technologies & Equipment Magazine. 2014. № 4. Pp. 32—36.
10. The official site of BridgeWave Communications (2021), «BW64», available at: www.bridgewave.com/wp-content/uploads/2017/06/DS_BW64.pdf (accessed 24 February 2021).
11. The official site of Intracom–Telecom (2021), «SreetNoude V60», available at: www.intracom-telecom.com/en/products/wireless_network_systems/4G_smallcell_son_backhaul/streetnodeV60 (accessed 23 February 2021).
12. The official site of Fastback Networks (2021), «*Liberator Family: High capacity, Low Complexity Urban Connectivity*», available at: www.fastback-networks.com/product (accessed 23 February 2021).
13. The official site of BridgeWave Communications (2021), «Flex4G-10000», available at: www.bridgewave.com/flex4g-10000 (accessed 23 February 2021).
14. The official site of Intracom–Telecom (2021), «Ultralink–GX80», available at: www.intracom-telecom.com/en/products/wireless_network_systems/4G5G_backhaul_fronthaul/ultralinkGX80 (accessed 24 February 2021).

15. The official site of E-band Communications LLC (2021), «E-link Eagle». Available at: www.e-band.com/product (accessed 24 February 2021).
16. The official site of Tele-A (2021), «RRL sistemy milimetrovogo diapazona» [Radio relay systems mm band]. Available at: www.tele-a.ru/radio-communication/rll-v-e-band (accessed 23 February 2021).
17. The official site of DOK Company (2021), «RRS-10G», available at: www.dokltd.ru/products/a20190 (accessed 23 February 2021).
18. The official site of SIAE Microelektronika (2021), «Alfoplus80HDX», available at: www.siaemic.com/index.php/products-services/telecommunication-systems/microwave-product-portfolio/alfo-plus-80hdx (accessed 1 March 2021).
19. The official site of Siklu (2021), «EtherHaul Kilo Series», available at: www.siklu.com/product/ether-haul-kilo-series (accessed 23 February 2021).
20. Vishnevsky, V., Frolov, S. & Shakhnovich, I. (2021), “Millimetrovii diapazon kak promyshlennaya realnost” [Millimeter range as an industrial reality], *Electronics: Science, Tecnology, Busness*. No 3. Available at: www.electronics.ru/journal/article/52 (accessed 22 February 2021).
21. Vergeles, D.D., Burak, V.D., Palamarchuk, A.A. & Stefanyshyn, Y.I. (2018), “Osnovni pidhody do stvorennia shyrokosmugovoi stantsii zviazku milimetrovogo diapazonu Kassiopeia” [Basic Approaches to Creating a Cassiopeia Millimeter Broadband Station], *Information security in information and telecommunication systems. Proc. of the XX Anniversary Intern. Scient. and Practical Conf.* K. Iss. 20. Pp.184—185.

**Yudin O., Lypskyi O., Palamarchuk A.,
Stefanyshyn Ya., Slyusar V., Alesin A., Alesin A.**

V-BAND RADIO RELAY STATION «CASSIOPEIA»

The paper briefly reviews the results of an analytical review of the state of development of technical means for creating communication lines of the millimeter (mm) range of the electromagnetic spectrum: 59–64 GHz (V-band), 71–76 GHz and 81–86 GHz (E-band). The results of the analytical review of the state of development of technical means for the creation of communication lines of this range and the calculation of the energy potential of the radio line are presented. The optimal variant of construction of perspective radio relay station (RRS) of mm range is substantiated. The functional scheme and appearance of an experimental full-duplex sample of V-band RRS with separate antennas for transmitting (offset) and receiving (horn) paths with different gain (in total about 60 dBi) are given. The radiation power of the transmitting path of the experimental sample RRS was 20 dBm, BPSK modulation was used to transmit information signals, no additional measures were taken to ensure the separation between the

receiving and transmitting paths. The Q-Flex modem from Teledyne Paradise Datacom LLC, USA was used as a digital modem with the function of automatic error correction by turbo coding methods. In field trials of the experimental radio of special communication, the speed of information transmission was 10 Mbit per second (determined by the capabilities of the digital modem used) in the communication interval of 1.75 km. It is concluded that the use of special communication radio lines at the intervals of the "first (last) mile" in the V-range, given the difficulty of creating artificial interference to their operation due to the effect of anomalous attenuation of radio waves due to resonant absorption of atmospheric atomic oxygen.

Keywords: millimeter range, resonant absorption of radio waves, protected communication lines, dual-antenna transceivers, radio relay station.

Відомості про авторів:

Юдін Олексій Юрійович

кандидат технічних наук
заступник начальника Державного науково-дослідного інституту технологій кібербезпеки та захисту інформації Державної служби спеціального зв'язку та захисту інформації України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-4730-1463>
e-mail: office@ukrdefteach.com.ua

Липський Олександр Анатолійович

кандидат технічних наук
доцент
начальник відділу Державного науково-дослідного інституту технологій кібербезпеки та захисту інформації Державної служби спеціального зв'язку та захисту інформації України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-8816-3227>
e-mail: alexander256@bigmir.net

Паламарчук Андрій Андрійович

кандидат технічних наук
головний науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту технологій кібербезпеки та захисту інформації Державної служби спеціального зв'язку та захисту інформації України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-0323-0226>
e-mail: andriy42@meta.ua

Стефанишин Ярослав Іванович

науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту технологій кібербезпеки та захисту інформації Державної служби спеціального зв'язку та захисту інформації України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-8317-4131>
e-mail: yaroslavstf@meta.ua

Слюсар Вадим Іванович

доктор технічних наук
професор
начальник групи головних наукових співробітників
Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-2912-3149>
e-mail: swadim@ukr.net

Алесин Анатолій Михайлович

Генеральний директор
приватного акціонерного товариства «Міррад»
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/000-0002-7248-6252>
e-mail: mirrad@ukr.net

Алесин Артем Анатолійович

Провідний конструктор
приватного акціонерного товариства «Міррад»
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/000-0002-4254-3017>
e-mail: mirrad.ukr@gmail.com

Information about the authors:**Oleksiy Yudin**

Candidate of Technical Sciences
Deputy Chief of Scientific Research Management of
State Research Institute of Cyber Protection Technologies
and Information Protection of the State Service for Special
Communication and Information Protection of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-4730-1463>
e-mail: office@ukrdefteach.com.ua

Oleksandr Lypskiy

Candidate of Technical Sciences
Associate Professor
Chief of Scientific Research Department of State Research
Institute of Cyber Protection Technologies and Information
Protection of the State Service for Special Communication
and Information Protection of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8816-3227>
e-mail: alexander256@bigmir.net

Andriy Palamarchuk

Candidate of Technical Sciences
Chief Researcher of
State Research Institute of Cyber Protection Technologies
and Information Protection of the State Service for Special
Communication and Information Protection of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0323-0226>
e-mail: andriy42@meta.ua

Yaroslav Stefanyshyn

Researcher of
State Research Institute of Cyber Protection Technologies
and Information Protection of the State Service for Special
Communication and Information Protection of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8317-4131>
e-mail: yaroslavstf@meta.ua

Vadym Slyusar

Doctor of Technical Sciences
Professor
Chief of Research Group of Central Research Institute of
Armament and Military Equipment of the Armed Forces
of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-2912-3149>
e-mail: swadim@ukr.net

Anatoliy Alesin

CEO
Private joint-stock company «Mirrad»
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/000-0002-7248-6252>
e-mail: mirrad@ukr.net

Artem Alesin

Leading designer
private joint-stock company «Mirrad»
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/000-0002-4254-3017>
e-mail: mirrad.ukr@gmail.com