

УДК.621.39

канд. техн. наук Коваленко І. Г. ORCID: 0000-0002-6827-5196 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
канд. техн. наук Масесов М. О. ORCID: 0000-0003-4537-4295 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
Драглюк О. В. ORCID: 0000-0001-8572-7257 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
канд. техн. наук Ткаченко А. Л. ORCID: 0000-0002-9789-8536 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

МЕТОДИКА ПОБУДОВИ РАДІОРЕЛЕЙНИХ ЛІНІЙ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ГЕОПРОСТОРОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ

При плануванні та організації зв'язку з використанням сучасних військових цифрових радіозасобів важливим та актуальним завданням є забезпечення максимально можливої дальності зв'язку при забезпеченні необхідної швидкості передачі інформації із заданою якістю. З-поміж основних чинників, які визначають можливу дальність зв'язку сучасних військових цифрових радіозасобів, крім їхніх характеристик, є рельєф місцевості, забудова та рослинність. Крім того, для організації радіорелейного зв'язку можуть використовуватися існуючі висотні об'єкти на місцевості (зокрема вежі операторів зв'язку).

Проведений аналіз показав, що існуючі методики та спеціалізоване програмне забезпечення може використовуватись для окремих розрахунків рівнів сигналів, що розповсюджуються, проте не завжди дозволяють врахувати всі необхідні технічні параметри радіозасобів та додаткову вихідну геопросторову інформацію. А головне існуюче програмне забезпечення не призначено для побудови багатointervalних радіорелейних ліній з урахуванням додаткових геопросторових даних. При побудові радіорелейних ліній часто складається ситуація, коли один інтервал не може забезпечити зв'язок із заданою якістю. Тоді постає задача планування радіорелейної лінії з використанням станцій-ретрансляторів. Вибір місця розташування ретрансляторів залежить від багатьох чинників: можливості встановлення зв'язку, мінімізації кількості ретрансляцій, геопросторової інформації щодо рельєфу місцевості та наявності в місті встановлення відповідної інфраструктури (збудов, електроживлення, точок прив'язки, веж тощо).

У статті запропонована методика побудови радіорелейних ліній зв'язку на основі розрахунків рівнів сигналів з урахуванням геопросторових даних, яка дозволяє аналізувати окремі радіорелейні інтервали для побудови багатointervalних радіорелейних ліній. Програмна реалізація розробленої методики дозволяє створити програмне забезпечення розрахунку радіорелейних ліній з урахуванням необхідних вихідних даних та геопросторової інформації щодо місцевості.

Ключові слова: рівняння радіолінії, умови здійснення радіозв'язку, втрати у вільному просторі, енергетичний запас, технічні характеристики радіозасобів.

I. Kovalenko, M. Masesov, O. Draglyuk, A. Tkachenko Methodology for building radio relay lines based on the use of geospatial information.

When planning and organizing communication using modern military digital radios, a crucial and relevant task is to ensure the maximum possible communication range while providing the necessary speed and quality of information transmission. The main factors determining the possible communication range of modern military digital radios, in addition to their characteristics, are the terrain relief, buildings, and vegetation. Additionally, existing height objects in the area, such as communication operator towers, can be used to organize radio relay communication.

An analysis showed that existing methods and specialized software can be used for certain calculations of signal levels, but they do not always take into account all necessary technical parameters of radio equipment and additional geospatial information. Moreover, the existing software is not designed to construct multi-interval radio relay lines while considering additional geospatial data. In constructing radio relay lines, there is often a situation where one interval cannot provide communication with the required quality. This situation calls for planning a radio relay line using relay stations. The choice of the location of relay stations depends on many factors, including the possibility of establishing communication, minimizing the number of relays, geospatial information regarding the terrain relief, and the presence of the necessary infrastructure (buildings, power supply, anchor points, towers, etc.) in the area.

The article proposes a methodology for constructing radio relay communication lines based on calculations of signal levels while considering geospatial data. This methodology allows analyzing individual radio relay intervals for constructing multi-interval radio relay lines. The software implementation of the developed methodology allows creating software for calculating radio relay lines with the necessary input data and geospatial information regarding the terrain.

Keywords: radio line equation, conditions of radio communication, losses in free space, energy reserve, technical characteristics of radio equipment.

Постановка завдання. На сьогодні для організації радіорелейного зв'язку та широкосмугових ліній прив'язки використовуються як прийняті на озброєння засоби військового призначення (P-414МУ, P-425, P-402), так і комерційні вироби широкосмугового радіодоступу (виробництва компаній Ubiquiti, MikroTik, D-Link, TP-Link тощо) з направленими антенами. Також країнами-партнерами надаються окремі засоби радіорелейного та тропосферного зв'язку.

При плануванні та організації зв'язку з використанням сучасних військових цифрових радіозасобів важливим та актуальним завданням є забезпечення максимально можливої дальності зв'язку при забезпеченні необхідної швидкості передачі інформації із заданою якістю. Сучасні засоби – радіорелейні станції (РРС) та засоби широкосмугового радіодоступу – підтримують декілька режимів роботи, які можуть відрізнятися шириною смуги каналу, видом модуляції, схемою завадостійкого кодування, потужністю передавача, чутливістю приймача та іншими параметрами. Крім цього, можуть використовуватися антени з різними значеннями коефіцієнта підсилення; висота підвісу антен також може бути різною. Залежно від необхідної швидкості передачі та, відповідно, інших параметрів радіолінії, дальність зв'язку може коливатися у широких межах. З-поміж основних чинників, які визначають можливу дальність зв'язку, крім характеристик радіозасобів, є рельєф місцевості, забудова та рослинність. Також суттєво впливають інші чинники: опади, атмосферні явища тощо. Крім того, для організації радіорелейного зв'язку може використовуватися додаткова геопросторова інформація, зокрема щодо висотних об'єктів на місцевості (споруди, вежі Концерну радіомовлення, радіозв'язку та телебачення (КРРТ) та інших операторів зв'язку).

Очевидно, що розрахунок рівнів сигналів, що передаються, з урахуванням вказаних вище чинників, в умовах обмеження кількості і якості вихідних даних (рельєфу місцевості, забудови, рослинності, погодних умов тощо) розв'язати можна, як правило, тільки наближено. Проте навіть приблизний розрахунок є доцільним на етапі планування ліній та мереж зв'язку.

Для вирішення задач планування радіорелейних ліній (РРЛ) доцільно використовувати відповідне програмне забезпечення (ПЗ) на основі розроблених методик розрахунків та додаткових геопросторових даних (розташування веж КРРТ, операторів зв'язку та інших висотних об'єктів).

Існуюче спеціалізоване ПЗ, що призначене для розрахунку напруженості поля в точці прийому для окремих радіорелейних інтервалів, зокрема „Radio Mobile”, „Radio Works”, „Radio Planner”, „CRC-COVWEB” та ін., може використовуватись для окремих розрахунків рівнів сигналів, що розповсюджуються, проте його використання не регламентоване керівними документами з організації зв'язку, не завжди дозволяє врахувати всі необхідні технічні параметри радіозасобів та додаткової вихідної геопросторової інформації [1]. А головне існуюче ПЗ орієнтовано на розрахунки рівнів сигналів для окремих радіоелектронних засобів (радіорелейних інтервалів) і не призначено для побудови багатоінтервальних РРЛ.

Тому постає задача розробки методик та алгоритмів побудови й розрахунку РРЛ з використанням геопросторової інформації, що дозволить розробити відповідне ПЗ для їх планування.

Аналіз публікацій за темою дослідження. Проведений аналіз показав, що існуючі методики та ПЗ для визначення можливості забезпечення зв'язку між кореспондентами із заданими координатами вирішують задачу з розрахунку рівня сигналу на вході приймача P_2 , що являє собою рівняння радіолінії (1) [1–3]:

$$P_2, \text{ дБ} = P_1 + G_1 + G_2 - L_{\phi 1} - L_{\phi 2} - L_0 - L_{\text{сер}} - W_3, \quad (1)$$

де P_1 – потужність сигналу на виході передавача;

G_1, G_2 – коефіцієнти підсилення передавальної та приймальної антен відповідно;

$L_{\phi 1}, L_{\phi 2}$ – втрати у антенно-фідерних трактах на передачі та прийомі відповідно;

L_0 – основні втрати радіолінії (втрати у вільному просторі);

$L_{\text{сер}}$ – втрати, які визначають вплив реального середовища на розповсюдження радіохвиль (так званий множник ослаблення);

W_3 – енергетичний запас, який необхідний для компенсації втрат сигналу на прийомі через низку несприятливих факторів, які призводять до зменшення дальності зв'язку (температурний дрейф чутливості приймача і вихідної потужності передавача, атмосферні явища (туман, сніг, дощ), неузгодженість антени, приймача, передавача з антенно-фідерним трактом та ін.). При проведенні розрахунків енергетичний запас (W_3) у системах радіозв'язку зазвичай приймається рівним 10–15 дБ [4].

Втрати у вільному просторі визначаються з виразу (2):

$$L_0 = 10 \lg \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2, \quad (2)$$

де R – відстань між радіостанціями;

λ – довжина хвилі.

На підставі виразу (1) можуть бути розраховані радіолінії всіх видів. Відмінність полягає у методиці розрахунку множника ослаблення радіосигналів $L_{\text{сер}}$ для різних типів радіоліній.

Умови здійснення радіозв'язку. Для здійснення радіозв'язку необхідне дотримання наступних умов [2; 3]:

1) розраховане за формулою (1) значення P_2 повинне перевищувати чутливість приймача $P_{\text{ч}}$:

$$P_2, \text{ дБ} \geq P_{\text{ч}}, \quad (3)$$

2) має бути забезпечене певне перевищення потужності сигналу над потужністю різного роду завад P_3 на вході приймача (відношення сигнал/шум (SNR)), що залежить від виду роботи, достовірності і надійності прийому (4):

$$P_2, \text{ дБ} \geq SNR + P_3; \quad (4)$$

3) спотворення сигналу в процесі розповсюдження не повинні перевищувати допустимих норм. Ця умова обмежує смугу частот неспотвореної передачі, тобто швидкість передачі інформації.

З ряду причин потужність завад, а в ряді випадків і потужність сигналу на вході приймача, зазнають безперервних і безладних змін (флуктуацій). Тому у виразах (3), (4) доводиться оперувати середніми значеннями потужностей сигналу і завад (P_2 і P_3) і враховувати закони їх статистичного розподілу.

Порядок розрахунку радіорелейних інтервалів без урахування рельєфу місцевості наведено в [1]. При розрахунку втрат, обумовлених загасанням електромагнітного поля за рахунок рельєфу місцевості, а саме дифракції на перешкодах, необхідно використовувати методики, викладені у Рекомендації ІТУ-Р Р.526 [5].

Проведений аналіз показав, що існуючі методики та спеціалізоване ПЗ можуть використовуватись для окремих розрахунків рівнів сигналів, що розповсюджуються, проте не завжди дозволяють врахувати всі необхідні технічні параметри радіозасобів та додаткову вихідну геопросторову інформацію. А головне існуюче ПЗ не призначено для побудови багатоінтервальних РРЛ з урахуванням додаткових геопросторових даних. При побудові РРЛ часто складається ситуація, коли один інтервал не може забезпечити зв'язок із заданою якістю. Тоді постає задача планування РРЛ з використанням станцій-ретрансляторів. Вибір місця розташування ретрансляторів залежить від багатьох чинників: можливості встановлення зв'язку, мінімізації кількості ретрансляцій, геопросторової інформації щодо рельєфу місцевості та наявності в місті встановлення відповідної інфраструктури (забудов, електроживлення, точок прив'язки, веж тощо).

Мета статті. Провести аналіз методик розрахунку РРЛ та запропонувати методику побудови радіорелейних ліній зв'язку з використанням геопросторової інформації.

Вихідні дані.

У запропонованій Методиці використовуються такі вихідні дані.

1. РРС з відповідними технічними характеристиками:

- потужність передачі P , дБВт;
- коефіцієнт підсилення антени G , її тип, поляризація випромінювання і втрати в антенно-фідерному тракту η ;

- чутливість приймача, дБВт, мВ/м (коефіцієнт шуму, дБ);
- швидкість цифрового потоку, біт/с;
- припустимий рівень помилок і величина захисного відношення для заданого % часу.

2. Смуги частот, які використовуються, f_1-f_n .

3. Характеристики місць розташування початкової та кінцевої РРС:

- географічні координати розташування початкової та кінцевої РРС, широта/довгота;
- висота основи РРС над рівнем моря, м;
- висота підвісу антени над рівнем Землі, м.

4. Характеристики місцевості навколо РРС: висота над рівнем моря (м) та покриття (забудова, вода, рослинність), погодні умови тощо.

5. Додаткова геопросторова інформація щодо забудови, висотних об'єктів на місцевості: розташування/межі (координати), висота (м), додаткові характеристики.

1. Розрахунок радіорелейної лінії зв'язку. Нехай необхідно забезпечити РРЛ між двома пунктами управління з пропускною спроможністю не менше заданої.

При плануванні радіорелейного зв'язку проводиться побудова профілю місцевості з визначенням типу інтервалу (відкритий, напіввідкритий або закритий) та подальший енергетичний розрахунок, кінцевим підсумком якого є визначення надійності зв'язку H [%] (коефіцієнта готовності) [6; 7]. При цьому H [%] = 100 % T [%], де T [%] – коефіцієнт неготовності, який визначає відсоток часу (за добу), протягом якого можуть не виконуватися вимоги щодо забезпечення заданої якості зв'язку на інтервалі РРЛ. Вимоги до якості зв'язку для цифрових РРС задаються припустимим значенням ймовірності помилкового прийому інформаційних символів ($P_{\text{пом}} = N_{\text{пом}}/N_{\text{пер}}$, де $N_{\text{пом}}$ – кількість помилково прийнятих інформаційних символів; $N_{\text{пер}}$ – загальна кількість переданих інформаційних символів).

Для всієї РРЛ T^* [%] визначають як суму значень втрат надійності усіх інтервалів, з яких складається РРЛ (5):

$$T^* [\%] = \sum_{i=1}^M T_i [\%], \quad (5)$$

де T_i [%] – величина втрат надійності на i -му інтервалі РРЛ;

M – кількість інтервалів РРЛ.

Відповідно до цього надійність зв'язку (коефіцієнт готовності) всієї РРЛ визначається як $H^* [\%] = 100 \% T^* [\%]$.

Методика розрахунку військових польових РРЛ наведена у [6; 7]. Розрахунок стаціонарних РРЛ проводиться на основі рекомендації ІТУ-R P.530 [8]. Для радіорелейних інтервалів сумарні втрати у середовищі передачі L_{Σ} визначаються втратами рівня сигналів за рахунок розповсюдження радіохвиль у вільному просторі (L_0), рельєфом місцевості (L_p) та рефракційними завмираннями (L_3):

$$L_{\Sigma} = L_0 + L_{\text{сер}} = L_0 + L_p + L_3,$$

де L_0 та L_p мають фіксовані значення, а L_3 постійно змінюється протягом доби, а його максимально можлива величина враховується у енергетичному запасі W_3 .

Розрахунок L_p залежить від типу інтервалу. На відкритих інтервалах враховується інтерференція за рахунок відбитого від поверхні землі променю, на напіввідкритих величина втрат залежить від розміру перешкоди, яка потрапляє у зону, суттєву для розповсюдження радіохвиль [6; 7].

Величина надійності зв'язку (коефіцієнта готовності) інтервалу T_i залежить від величини енергетичного запасу W_3 , який забезпечує необхідну якість зв'язку за заданий відсоток часу роботи РРЛ. Відповідно, для визначення можливості зв'язку необхідно вирішити зворотну (5) задачу – визначення значення необхідного W_3 відповідно заданому $T_i = T_{\Sigma}/n_i$ (n_i – кількість інтервалів) за графіками розподілення завмирань на інтервалах РРЛ (рис. 1), які отримані шляхом статистичного усереднення експериментальних даних. Графіки на рисунку 1 приведені для найгірших погодних умов протягом року відповідно до метеорологічної статистики для відповідного регіону [6; 7].

Значення параметрів $P_1, L_{\phi 1}, L_{\phi 2}, G_1, G_2, P_4$ визначаються з технічної документації на РРС. Тоді за формулою (5) можна визначити граничну дальність зв'язку для кожного з

можливих режимів роботи, що визначаються шириною смуги та видом модуляції (сигнально-кодової конструкції).

Гранична дальність зв'язку для сучасних військових РРС без урахування рельєфу місцевості розрахована в [1]. Технічні характеристики, необхідні для енергетичного розрахунку, наведені у таблицях 1–3 [9–10]. Значення граничної чутливості приймача в таблицях 2, 3 наведені для $P_{\text{пом}} = 10^{-6}$.

Таким чином, можливість забезпечення зв'язку з необхідною пропускнуною спроможністю між двома заданими точками оцінюється на основі перевірки умови (3). Для цього здійснюється побудова профілю, розрахунок енергетичного запасу та визначення надійності зв'язку на реальному інтервалі.

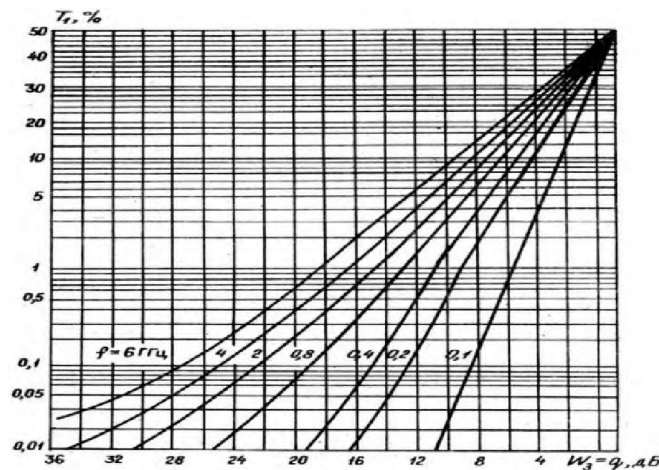


Рис. 1. Графіки залежності коефіцієнта неготовності від енергетичного запасу

Таблиця 1

Значення параметрів РРС, необхідних для енергетичного розрахунку

Характеристика	P-425C3	P-402			
		P-402.01	P-402.02	P-402.03	P-402.04
Діапазон робочих частот, ГГц	6,43–7,10	4,8–6,75		4,92–6,1	
Потужність передавача, дБм	30	до 29	до 27		
Коефіцієнт підсилення антени, дБі	35	28 направлена, 20 секторна (90°), 16 секторна (120°), 13 всенаправлена			

Таблиця 2

Гранична дальність для різних режимів роботи P-425C3

Вид модуляції	Ширина каналу, МГц								
	7			14			28		
	B, Мбіт/с	P _ч , дБм	R _{гр} , км	B, Мбіт/с	P _ч , дБм	R _{гр} , км	B, Мбіт/с	P _ч , дБм	R _{гр} , км
QPSK	10	-90 (-89)	192	22	-87 (-86)	136	46	-84 (-83)	96
16QAM	21	-85 (-82)	108	44	-82 (-80)	76	92	-79 (-77)	54
32QAM	26	-82	76	55	-79	54	114	-76	38
64QAM	32	-79 (-76)	54	66	-76	38	137	-73	27
128QAM	37	-76 (-73)	38	77	-73 (-71)	27	160	-70 (-68)	19
256QAM	42	-73	24	87	-70	17	183	-67	12

Примітка: в дужках наведені значення чутливості для режиму адаптивної модуляції.

Таблиця 3

Гранична дальність для різних режимів роботи P-402

MCS	Вид СКК	Ширина каналу, МГц											
		5			10			20			20–40		
		B , Мбіт/с	P_n , дБм	$R_{гр}$, км	B , Мбіт/с	P_n , дБм	$R_{гр}$, км	B , Мбіт/с	P_n , дБм	$R_{гр}$, км	B , Мбіт/с	P_n , дБм	$R_{гр}$, км
MCS0	BPSK-1/2	1,875	-101	141	3,75	-99	112	7,5	-96	79	15	-93	56
MCS1	QPSK-1/2	3,75	-99	112	7,5	-96	79	15	-93	56	30	-90	40
MCS2	QPSK-3/4	5,625	-96	79	11,25	-93	56	22,5	-90	40	45	-87	28
MCS3	16QAM-1/2	7,5	-93	56	15	-90	40	30	-87	28	60	-84	20
MCS4	16QAM-3/4	11,25	-90	40	22,5	-87	28	45	-84	20	90	-81	14
MCS5	64QAM-2/3	15	-87	28	30	-84	20	60	-81	14	120	-79	11
MCS6	64QAM-3/4	16,875	-84	18	33,75	-81	13	67,5	-79	10	135	-76	7
MCS7	64QAM-5/6	18,75	-83	16	37,5	-80	11	75	-77	8	150	-74	6

Для перевірки виконання умови (4) необхідно, по-перше, знати величину відношення сигнал/шум (ВСШ), необхідного для забезпечення заданої ймовірності помилкового приймання, по-друге, виміряти значення рівнів сигналу та завад на вході приймача.

Необхідні значення ВСШ для багатопозиційних сигналів, що використовуються в РРС P-425C3, наведено в таблиці 4 [11].

Таблиця 4

Необхідні значення ВСШ для P-425C3

Вид модуляції	QPSK	16QAM	32QAM	64QAM	128QAM	256QAM
ВСШ, дБ ($P_{пом} = 10^{-5}$)	9,6	14	16,1	18,5	20,9	23,5

2. Розрахунок послаблень радіосигналів за рахунок розповсюдження радіохвиль з використанням геопросторової інформації щодо рельєфу місцевості. Відповідно до рекомендацій ITU-R P.530, ITU-R P.526 з урахуванням ITU-R P.525 [12], ITU-R P.676 [13], ITU-R P.452 [14] були розроблені алгоритми розрахунків послаблення за рахунок розповсюдження радіохвиль з урахуванням рельєфу місцевості, які включають в себе:

аналіз профілю траси на наявність перешкод (рис. 2, а);

аналіз характеристик перешкод (рис. 2, б);

розрахунок послаблення на окремому інтервалі розповсюдження радіохвиль з урахуванням перешкод (рис. 2, в);

розрахунок загального послаблення на трасі як суми послаблень на перешкодах (рис. 2, г).

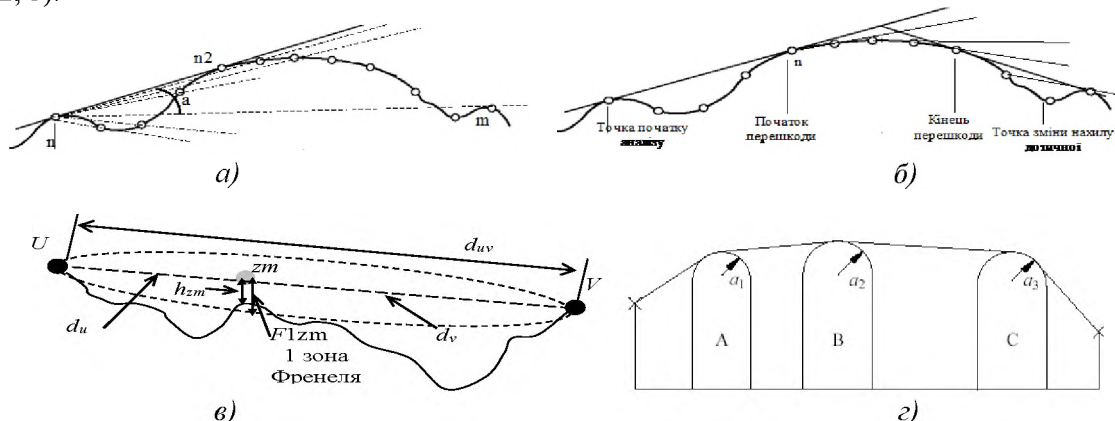


Рис. 2. Приклади розрахунків послаблення розповсюдження радіохвиль за рахунок наявності перешкод:

a – аналіз профілю траси на наявність перешкод; b – аналіз характеристик перешкод;
 v – розрахунок послаблення на окремому інтервалі розповсюдження радіохвиль з урахуванням перешкод; $г$ – розрахунок загального послаблення на трасі як суми послаблень на перешкодах

На основі розроблених алгоритмів була розроблена програмна реалізація розрахунку радіорелейних інтервалів (рис. 3), яка дозволяє розрахувати можливість встановлення зв'язку для окремого інтервалу для обраних характеристик РРС та заданої якості зв'язку (чутливість відповідно до режимів роботи та захисне відношення) (рис. 4).

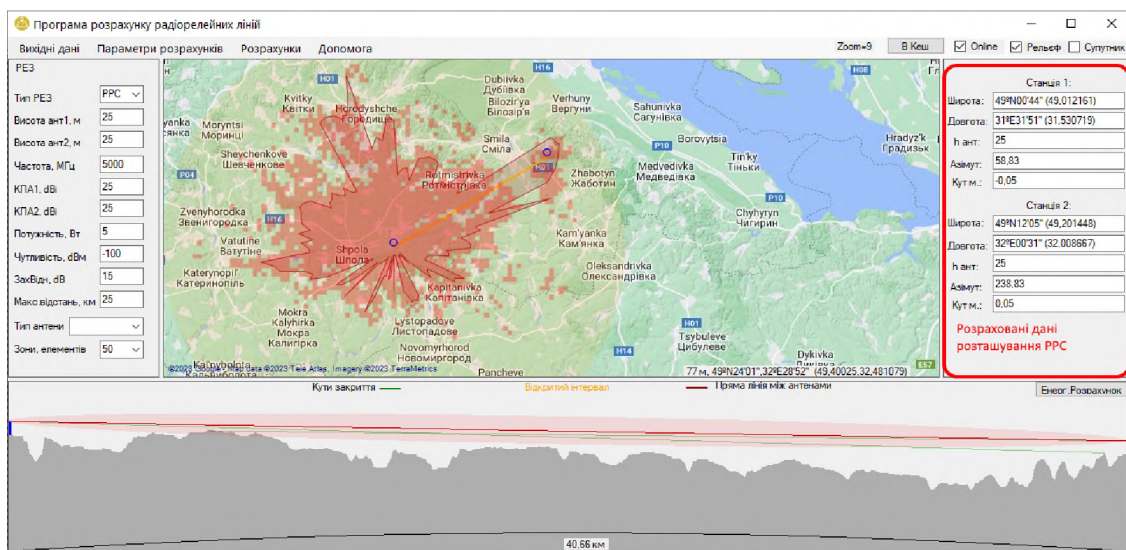


Рис. 3. Приклад розрахунку радіорелейного інтервалу

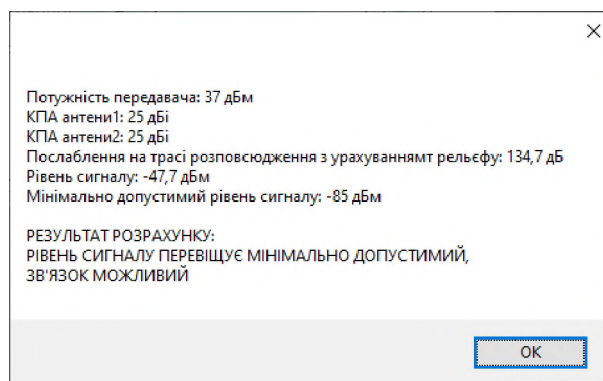


Рис. 4. Результат енергетичного розрахунку радіорелейного інтервалу

3. Методика побудови РРЛ з використанням геопросторової інформації.

При побудові РРЛ часто виникає ситуація, коли один інтервал не може забезпечити зв'язок із заданою якістю. Тоді постає задача планування РРЛ з використанням станцій-ретрансляторів. Вибір місця розташування ретрансляторів залежить від багатьох чинників: можливості встановлення зв'язку, мінімізації кількості ретрансляцій, геопросторової інформації щодо рельєфу місцевості та наявності в місті встановлення відповідної інфраструктури (забудов, електроживлення, точок прив'язки, веж тощо). Тому для побудови РРЛ пропонується наступна методика та відповідний алгоритм (рис. 5).

Суть методики – послідовна побудова зон можливого розташування взаємодіючих станцій (інтервалу) та пошук близького до оптимального розташування антен РРС для побудови багатоінтервальної РРЛ з використанням геопросторових даних.

Етапи методики:

1. Визначення місця розташування антени початкової РРС. При визначенні початкової точки аналізується додаткова геопросторова інформація щодо рельєфу, наявності забудов, веж та інших висотних об'єктів в зоні досяжності проводів зв'язку для максимального підняття антени.

2. В межах граничного радіусу можливої дальності зв'язку (табл. 2, 3) проводиться розрахунок зони можливого розташування взаємодіючої станції із вказаними

характеристиками та максимальні дальності прямої видимості (рис. 6) з урахуванням рельєфу місцевості відповідно до (1) та (4).

3. Якщо кінцева РРС знаходиться в межах зони можливого розташування взаємодіючої станції – перехід до п. 8.

4. Вибір найвіддаленішого від поточної точки (найближчого до кінцевої) місця розташування станції-ретранслятора в напрямку кінцевої станції з урахуванням можливості забезпечення якості зв'язку в розрахованій зоні можливого розташування та з використанням геопросторової інформації щодо наявності відповідної інфраструктури (веж, забудов, електроживлення, точок прив'язки тощо) в зоні граничної дальності зв'язку (табл. 2, 3) для обраного режиму роботи.

5. Розрахунок обраного радіорелейного інтервалу з урахуванням додаткової геопросторової інформації (збудови, вежі) відповідно до (1) з відповідними даними щодо додаткової висоти підвісу антени.

6. Якщо інтервал не забезпечує необхідну якість зв'язку відповідно до (4) – виключення останньої обраної точки та перехід до п. 4

7. Збереження даних розташування станції-ретранслятора, визначення її як поточної та перехід до п. 2.

8. Вивід результатів.

9. Кінець.

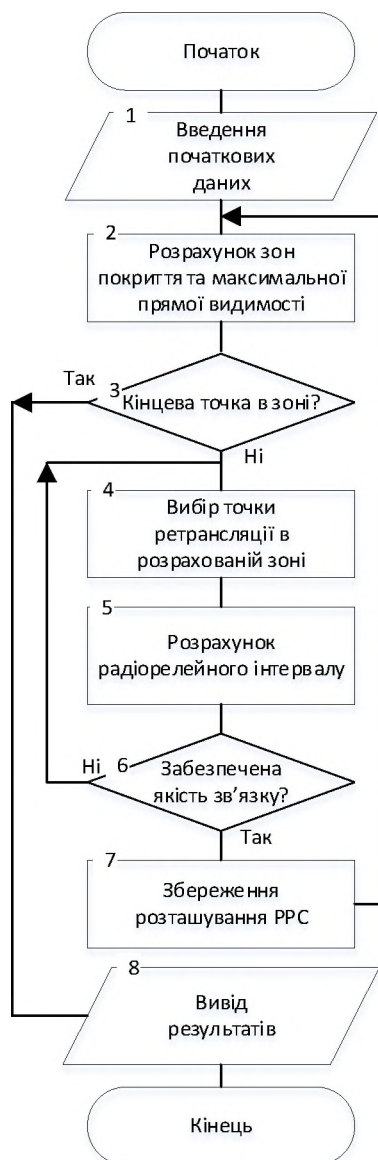


Рис. 5. Блок-схема алгоритму побудови РРЛ

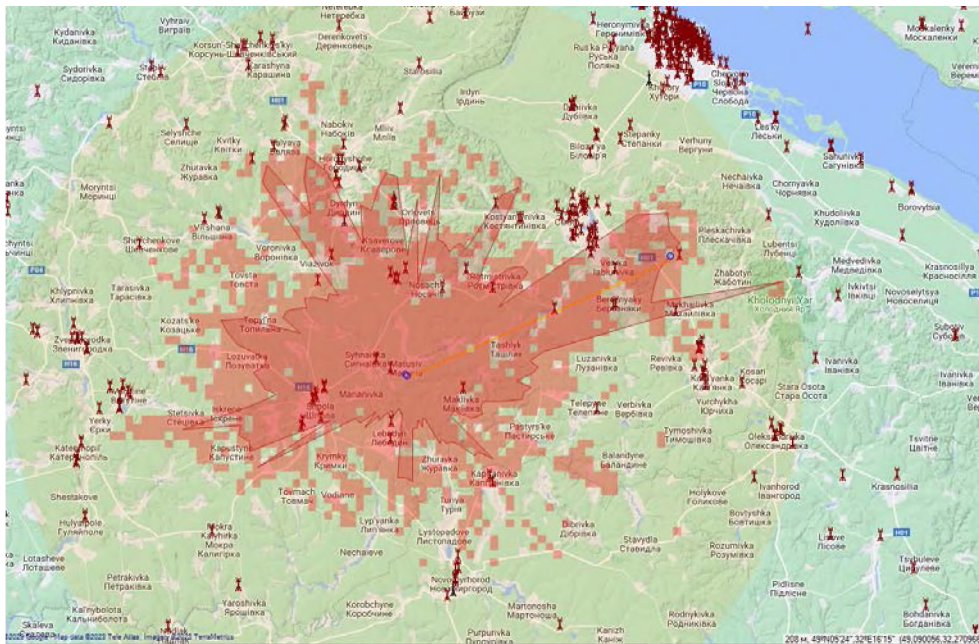


Рис. 6. Розрахунок зони можливого розташування взаємодіючої станції

Результатом застосування методики є отримання параметрів розгортання РРС (з відповідними технічними характеристиками та режимами роботи) для побудови РРЛ, а саме: координати, висоти підвісу антен, азимуту, кути місць.

Оцінка ефективності. Програмна реалізація методики дозволяє оператору проводити розрахунки для побудови РРЛ в близькому до реального масштабі часу. Залежно від заданої точності (кроку) розрахунків зон можливого розташування РРС час розрахунку складає одиниці – десятки секунд на ПЕОМ з двоядерним процесором з тактовою частотою 2 ГГц та 4 Гб оперативної пам'яті.

Висновок. У статті представлена методика побудови РРЛ зв'язку з використанням геопросторової інформації, відповідні алгоритми та їх програмна реалізація. Особливістю запропонованої методики є можливість будувати багатоінтервальні радіорелейні лінії зв'язку на основі розрахунків рівнів сигналів з урахуванням рельєфу місцевості та іншої геопросторової інформації (споруди, вежі та інші висотні об'єкти). Також особливістю є побудова зон досяжності (можливості встановлення зв'язку) та зон максимальної прямої видимості для визначення місць розташування станцій-ретрансляторів. Програмна реалізація розроблених алгоритмів дозволяє створити ПЗ планування та розрахунку РРЛ, яке на відміну від існуючого ПЗ, орієнтованого на розрахунки рівнів сигналів між окремими радіорелейними засобами, призначено для побудови багатоінтервальних РРЛ на основі наявних вихідних даних.

Подальші дослідження. У подальшому пропонується розширити розрахунки для тропосферних ліній зв'язку та доопрацювати алгоритми та ПЗ для підвищення ефективності (зменшення часу) планування мереж зв'язку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гурський Т. Г., Степаненко Є. О., Шишацький А. В. Оцінка граничної дальності зв'язку на сучасних радіо- та радіорелейних лініях // Збірник наукових праць ВІПІ. 2019. № 1. С. 6–17.
2. Лінії радіозв'язку та антенні пристрої: навч. посіб. / М. Д. Ільїнов, Т. Г. Гурський, І. В. Борисов, К. М. Гриценко. К.: ВІПІ, 2018. 268 с.
3. Грянник М. В. Распространение радиоволн: учеб. пособ. / М. В. Грянник, В. И. Ломан. К.: КВВИУС, 1989. 382 с.
4. Тарасюк О. М. Исследование и разработка энергоэффективных беспроводных сетей: практикум / Тарасюк О. М., Горбенко А. В.; под ред. Харченко В. С. НАУ им. Н. Е. Жуковского „ХАИ“, 2016. 96 с.

5. ITU-R. Recommendation P.526: Propagation by diffraction. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.526/>.
6. Волков Е. А. Военные системы радиорелейной и тропосферной связи / Е. А. Волков. Л.: ВАС, 1982. 403 с.
7. Наритник Т. М. Радіорелейні та тропосферні системи передачі: навч. посіб. / Т. М. Наритник, В. М. Почерняєв, Ю. В. Уткін. Міністерство науки та освіти, 2007. 312 с. (Серія «Системи передачі»).
8. ITU-R. Recommendation P.530: Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.530/>.
9. Радіорелейна станція Р-425С3. Посібник з експлуатування ААМВ.464412.003 РЭ. 68 с.
10. Mini-Link TN ETSI Release 5.3FP. Product Spec. Ericsson AB, 2014. 152 p.
11. Банкет В. Л. Сигнально-кодовые конструкции в телекоммуникационных системах / В. Л. Банкет. Одесса: Фенікс, 2009. 180 с.
12. ITU-R. Recommendation P.525: Calculation of free-space attenuation. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.525/>.
13. ITU-R. Recommendation P.676: Attenuation by atmospheric gases and related effects. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.676/>.
14. ITU-R. Recommendation P.452: Prediction procedure for the evaluation of interference between stations on the surface of the Earth at frequencies above about 0.1 GHz. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.452/>.