

ОЦІНКА ГРАНИЧНОЇ ДАЛЬНОСТІ ЗВ'ЯЗКУ НА СУЧАСНИХ РАДІО- ТА РАДІОРЕЛЕЙНИХ ЛІНІЯХ

В статті проведено розрахунки очікуваної граничної дальності зв'язку для цифрових радіорелейних інтервалів, засобів широкосмугового безпроводового доступу та УКХ радіозасобів при різних швидкостях передачі інформації.

Гурський Т.Г., Степаненко Є.О., Шишацький А.В. Оценка предельной дальности связи на современных радио- и радиорелейных линиях. В статье проведены расчёты ожидаемой дальности связи для цифровых радиорелейных интервалов, средств широкополосного доступа и УКВ радиосредств при разных скоростях передачи информации.

T. Hurskyi, E. Stepanenko, A. Shishatskyi. Evaluation of boundary communication range of modern radio and radio relay links. The calculations of the expected communication distances for radio relay, wireless wideband access and UHF radio communication means for different data rates have been performed in the article.

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

Постановка завдання. При плануванні та організації зв'язку з використанням сучасних військових цифрових радіозасобів важливим та актуальним завданням є визначення дальності зв'язку при забезпеченні необхідної швидкості передачі інформації із заданою якістю. Сучасні засоби УКХ радіозв'язку, радіорелейні станції (РРС) та засоби широкосмугового безпроводового доступу (ШБД) 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. В залежності від необхідної швидкості передачі та, відповідно, інших параметрів радіолінії, дальність зв'язку може коливатися у широких межах. Основним чинником, який визначає дальність зв'язку в діапазоні УКХ, є рельєф місцевості та місцеві предмети (будівлі, насадження тощо).

Очевидно, що завдання визначення дальності зв'язку на практиці розв'язати можна, як правило, тільки наближено. Проте навіть приблизний розрахунок є доцільним на етапі планування ліній та мереж зв'язку.

Аналіз публікацій за темою дослідження. Для визначення можливості забезпечення зв'язку між кореспондентами із заданими координатами необхідно розв'язати задачу з розрахунку рівня сигналу на вході приймача P_2 , що представляє собою рівняння радіолінії [1, 2]:

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

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 [3]. Втрати у вільному просторі визначаються з виразу

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

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 ($L_{\text{сер}}$) для різних типів радіоліній.

Умови здійснення радіозв'язку. Для здійснення радіозв'язку необхідне дотримання наступних умов [1, 2]:

1) розраховане за формулою (1) значення P_2 повинне перевищувати чутливість приймача P_4 :

$$P_2, \text{ дБ} \geq P_4; \quad (3)$$

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:

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

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.

Розрахунок втрат за рахунок середовища проводиться за різними методиками, в залежності від діапазону частот, типу траси, типу місцевості (міська, сільська, сильно або слабо пересічена) та забудови тощо.

Найбільш простий спосіб підвищення точності прогнозування рівня сигналу в точці прийому для радіоліній з високо піднятими антенами полягає у моделюванні поверхні Землі як плоскої відбиваючої поверхні [1, 2]. Урахування сферичності поверхні Землі дозволяє отримати уточнене значення рівня сигналу на прийомі.

При розрахунку втрат, обумовлених загасанням електромагнітного поля за рахунок дифракції на перешкодах, як правило, використовується методика, викладена у Рекомендації ІТУ-Р Р.526 [4]. В системах рухомого радіозв'язку передбачення рівня сигналу на вході приймача на основі строгих моделей розповсюдження радіохвиль ускладнене наявністю, як правило, декількох (більше двох) перешкод на трасах розповсюдження радіохвиль. В таких випадках використовують методики, засновані на узагальненні великого об'єму емпіричних даних [4]. Найбільш відома серед них – заснована на кривих розповсюдження радіохвиль, представлених у рекомендації ІТУ-Р Р.1546.

Особливості розповсюдження радіохвиль у міському середовищі враховуються у моделях Окамура-Хата [5, 6] та Уолфіша-Ікегамі [4, 5].

Аналіз методик розрахунку зон покриття базових станцій мереж рухомого радіозв'язку проведено у роботах [7 – 9].

Розрахунок втрат за рахунок середовища та максимальної дальності зв'язку (у заданому напрямку та, тим більше, зоні) потребує детального аналізу топографічних карт (даних геоінформаційних систем) та значних затрат часу. Існує спеціалізоване програмне забезпечення, що призначене для розрахунку напруженості поля в точці прийому, зокрема „Radio Mobile”, „Radio Works”, „Radio Planner”, „CRC-COVWEB” та ін. [10], проте його використання не регламентоване керівними документами з організації зв'язку, і вони не завжди дозволяють врахувати всі необхідні технічні параметри радіозасобів.

Метою статті є оцінка максимально можливої дальності зв'язку на сучасних цифрових радіолініях (радіорелейних, широкосмугового безпроводового доступу, ультракороткохвильових) для різних значень швидкості передачі даних.

Виклад основного матеріалу. У випадках, коли оцінити втрати за рахунок середовища передачі складно, або неможливо, розрахунок дальності зв'язку можна провести принаймні для випадку вільного простору з подальшим уточненням на етапі експлуатації (рис. 1).

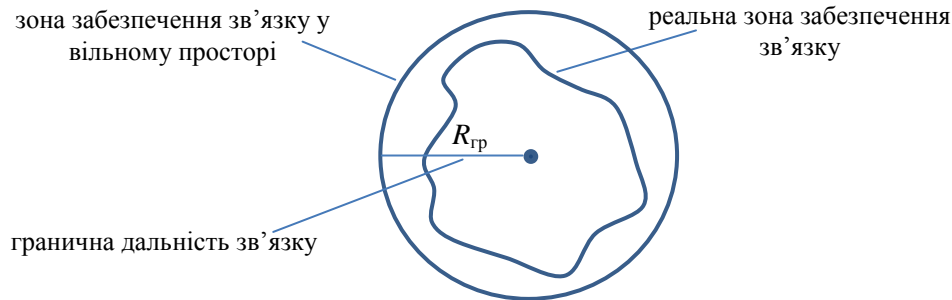


Рис. 1. Поняття граничної дальності зв'язку

Очевидно, що максимально можлива (гранична) дальність зв'язку (із забезпеченням заданих вимог щодо якості передачі інформації) буде досягтися при наближенні сигналу на вході приймача до величини його реальної чутливості. Тому визначити граничну дальність зв'язку можна, якщо виразити відстань у складовій втрат у вільному просторі (2) через інші складові рівняння радіолінії (1). При цьому, замість значення очікуваного рівня сигналу в точці прийому P_2 необхідно підставити значення чутливості приймача $P_ч$:

$$R_{гр}, \text{ км} = 0,001 \times 10^{\left(0,05 \left(P_1 + G_1 + G_2 - L_{\phi 1} - L_{\phi 2} - P_ч - 101 \lg \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right)^2 - L_{сер} - W_3 \right) \right)} \quad (5)$$

Якщо умова (4) не виконується, то замість значення $P_ч$ у формулі (5) необхідно підставити

$$P'_ч = SNR + P_з,$$

тобто при розрахунках чутливість приймача навмисно погіршується до такого значення, при якому забезпечується необхідна енергетична перевага корисного сигналу над сумарним рівнем шумів та завад на вході приймача.

Оцінка граничної дальності зв'язку на радіорелейному інтервалі. Нехай необхідно забезпечити радіорелейний інтервал (лінію) між двома пунктами управління з пропускнуною спроможністю не менше заданої.

При плануванні радіорелейного зв'язку обов'язково 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) [11, 12]. 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 по якості зв'язку для цифрових РРС задаються припустимим значенням ймовірності помилкового прийому інформаційних символів ($P_{пом} = N_{пом}/N_{пер}$, де $N_{пом}$ – кількість помилково прийнятих інформаційних символів; $N_{пер}$ – загальна кількість переданих інформаційних символів).

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

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

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 радіорелейних ліній (РРЛ) наведена у [11, 12]. Розрахунок стаціонарних РРЛ проводиться на основі рекомендації ІТУ-Р Р.530 [4].

Для радіорелейних інтервалів сумарні втрати у середовищі передачі L_{Σ} визначаються втратами 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 променя, на напіввідкритих – величина втрат залежить від розміру перешкоди, яка потрапляє у зону, суттєву для розповсюдження радіохвиль [11, 12].

Величина надійності зв'язку (коефіцієнта готовності) інтервалу залежить від величини енергетичного запасу W_3 , який забезпечує необхідну якість зв'язку за заданий відсоток часу роботи РРЛ.

Розрахунок W_3 проводиться за формулою:

$$W_3, \text{ дБ} = P_1 + G_1 + G_2 - L_{\phi 1} - L_{\phi 2} - L_0 - L_p - P_4.$$

За відомим значенням W_3 за графіками розподілення завмирань на інтервалах РРЛ (рис. 2), які отримані шляхом статистичного усереднення експериментальних даних, проводиться визначення величини втрат надійності зв'язку (коефіцієнта неготовності). Графіки на рис. 2 приведені для найгіршої доби року [11, 12].

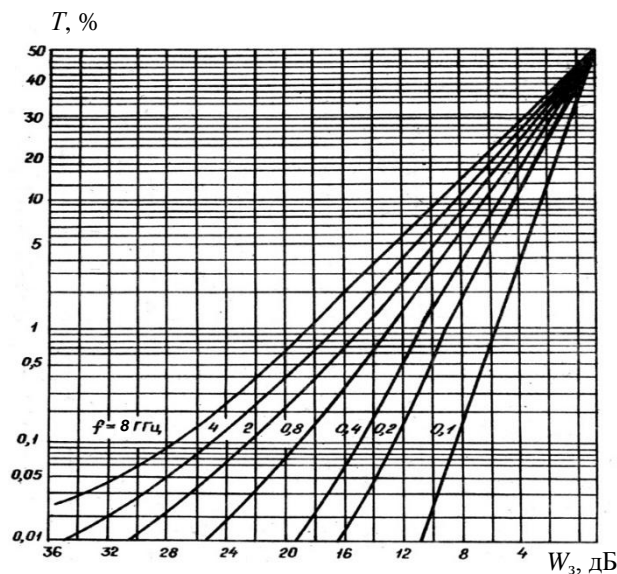


Рис. 2. Графіки залежності коефіцієнта неготовності від енергетичного запасу

Для визначення граничної дальності зв'язку на радіорелейному інтервалі необхідно виконати зворотну операцію – визначити необхідний енергетичний запас для забезпечення заданої надійності зв'язку. Наприклад, для частоти 4 ГГц для забезпечення $T = 0,01\%$ ($H = 99,99\%$) необхідний енергетичний запас $W_3 \approx 35$ дБ.

Значення параметрів: P_1 , $L_{\phi 1}$, $L_{\phi 2}$, G_1 , G_2 , P_4 визначається 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 (СКК)). При цьому втрати за рахунок рельєфу L_p прийmemo рівними 0, що відповідає умовам вільного простору.

Розрахуємо граничну дальність зв'язку для сучасних військових РРС. Технічні характеристики, необхідні для енергетичного розрахунку, наведені у табл. 1 – 3 [13 – 15]. Значення граничної чутливості приймача в табл. 2, 3 наведені для $P_{\text{пом}} = 10^{-6}$.

Таблиця 1

| 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 | $P_{ч}$, дБм | $R_{гр}$, км | 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 |
| 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 |

Примітка: значення швидкості передачі розраховані орієнтовно, виходячи з максимального значення, наведеного в технічній документації, 150 Мбіт/с.

Результати розрахунків граничної дальності зв'язку, проведених за формулою (5), для різних режимів роботи при $W_s = 35$ дБ ($H > 99,95$ %) приводяться для РРС P-425C3 на частоті 7 ГГц у табл. 2, для РРС P-402 (з направленими антенами) на частоті 6 ГГц – у табл. 3. Втрати у фідері на передачі та прийомі при розрахунках прийняті рівними 0, оскільки блоки прийомо-передавача в P-425C3 безпосередньо підключені в антену, а у P-402 з'єднані коротким відрізком кабелю.

На рис. 3 результати розрахунків граничної дальності зв'язку представлені графічно. Числа біля графіків відповідають ширині каналу, точки на графіках – виду модуляції у порядку зменшення позиційності сигналу (кратності модуляції). Наприклад, для P-425C3 найвища точка відповідає 256QAM, найнижча – QPSK.

Таким чином, якщо забезпечення зв'язку з необхідною пропускнуною спроможністю між двома заданими точками для умов вільного простору можливе, можна переходити до перевірки умови (3). Для цього здійснюється побудова профілю, розрахунок енергетичного запасу та визначення надійності зв'язку на реальному інтервалі.

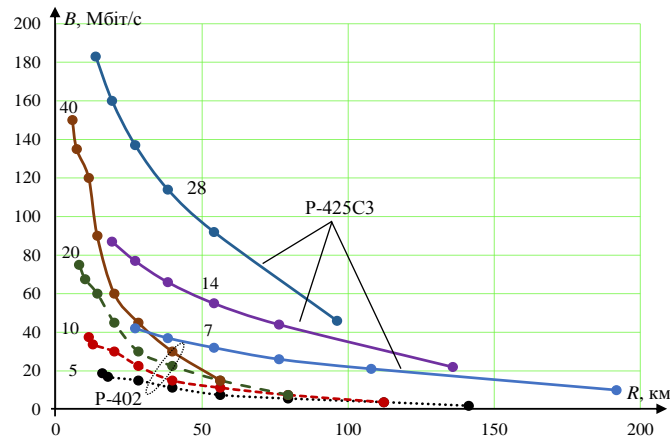


Рис. 3. Залежність граничної дальності зв'язку від параметрів РРС

Отримані результати розрахунків граничної дальності зв'язку дозволяють перед побудовою профілю місцевості між заданими пунктами та розрахунком коефіцієнта готовності радіорелейного інтервалу приймати рішення на зменшення (збільшення) дальності інтервалів та зміну координат розгортання станцій. Наприклад, з рис. 3 видно, що при необхідності побудови РРЛ на Р-425С3 з пропускнуною спроможністю 155 Мбіт/с довжина інтервалу не повинна перевищувати 20 км.

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 Р-425С3, наведено в табл. 4 [16].

Таблиця 4

Необхідні значення ВСШ для Р-425С3

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

Необхідні значення ВСШ для різних СКК РРС Р-402 потребують уточнення у виробника.

Оцінка граничної дальності зв'язку для засобів широкопasmового безпроводового доступу. У якості станції широкопasmового безпроводового доступу може використовуватися як РРС Р-402, так і будь-який безпроводовий Wi-Fi маршрутизатор [18]. Організація ШБД передбачає використання секторних або всенаправлених антен на базовій станції та, як правило, всенаправлених антен на абонентських пристроях (смартфонах, планшетах тощо). Відомо, що Wi-Fi прийомо-передавачі абонентських пристроїв мають гірші технічні характеристики, ніж засоби ШБД. Зокрема, потужності передавачів складають всього 11 – 20 дБм (12,5 – 100 мВт): 11 дБм для смартфонів, 11 – 14 дБм для планшетів, 11 – 17 дБм для нетбуків та 17 – 20 дБм для ноутбуків [21].

Для збільшення дальності зв'язку необхідно забезпечувати значну висоту підйому антени базової станції, у тому числі за рахунок розміщення засобів ШБД у складі телекомунікаційних аероплатформ (ТА) [18 – 20].

Припустимо, у мережі є станції Р-402 у складі ТА і у складі наземних транспортних засобів – мобільних базових станцій (МБС), та абонентські пристрої (АП).

Вихідні дані для розрахунку: значення швидкостей передачі, наведені у табл. 3, для режиму МІМО 2x2 необхідно подвоїти; робоча частота – 5,5 ГГц; коефіцієнти підсилення антен – $G_{\text{ТА}} = 2$ дБі, $G_{\text{МБС}} = 13$ дБі, $G_{\text{АП}} = 0$ дБі; потужність передавача АП (наприклад, тактичного планшета) дорівнює 17 дБм; значення чутливості приймача АП відповідають Р-402 (табл. 3); енергетичний запас $W_3 = 15$ дБ.

Результати розрахунку граничної дальності зв'язку, проведеного за формулою (5) для декількох типів радіоліній у мережі, наведені на рис. 4.

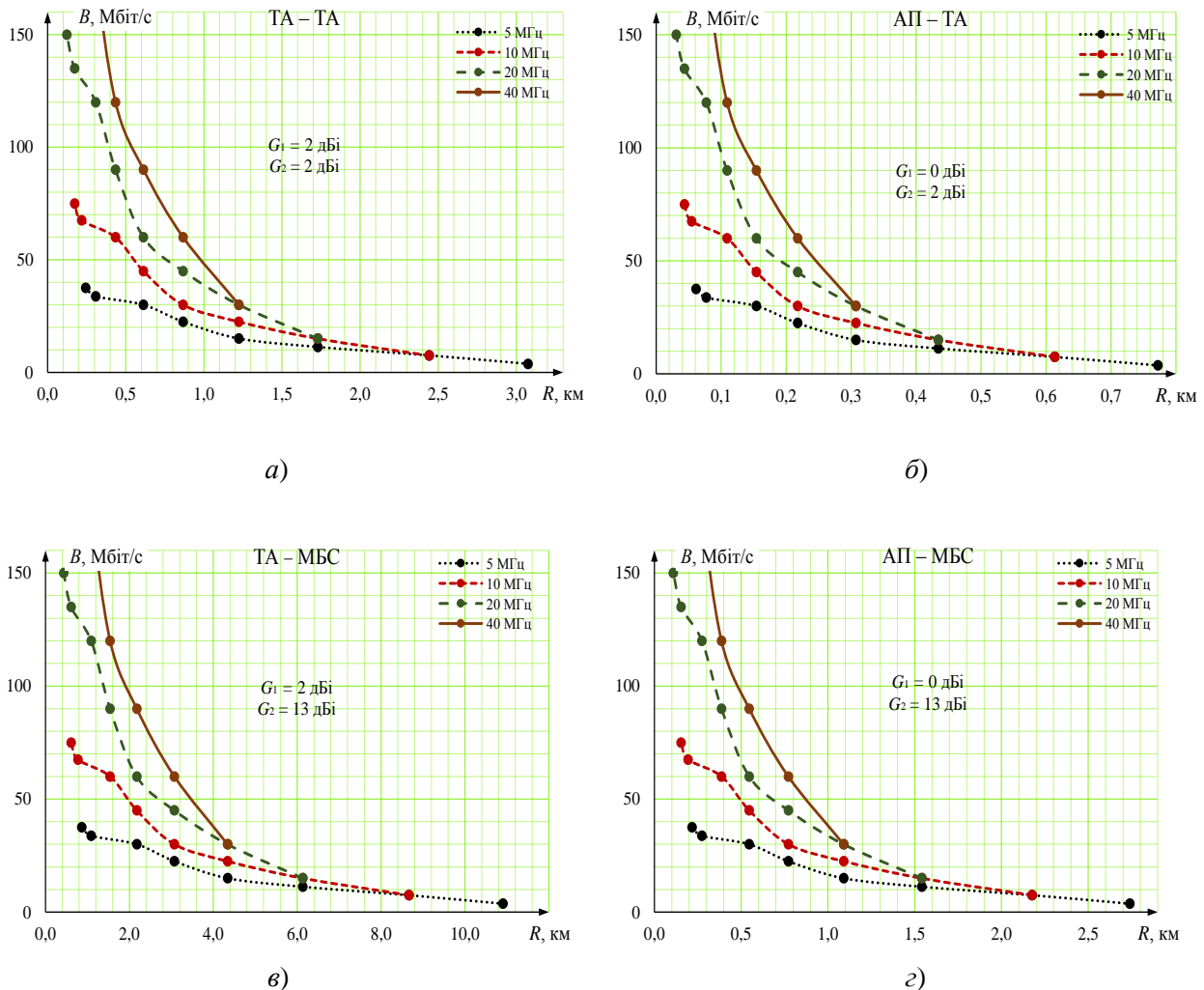


Рис. 5. Гранична дальність зв'язку при організації мереж ШБД на частоті 5,5 ГГц

Максимальне значення швидкості на графіках (рис. 4) по осі y обмежене значенням 160 Мбіт/с. Для ширини 40 МГц максимальна швидкість (для MCS7) буде досягати 300 Мбіт/с (при цьому дальність зв'язку буде меншою, ніж для MCS7 при ширині каналу 20 МГц).

Виходячи з результатів розрахунку граничної дальності зв'язку найбільш доцільним варіантом забезпечення зв'язку з використанням засобів ШБД в тактичній ланці управління є розгортання ієрархічної мережі [17, 18]. До її складу на верхньому рівні увійде транспортна MESH-мережа у складі засобів ШБД на ТА (FANET – Flying Ad Hoc Network). Кожна ТА створюватиме власну мережу для обслуговування наземних мобільних базових станцій (МБС), які, у свою чергу, формуватимуть зони обслуговування абонентських пристроїв. У випадку відсутності зв'язку у мережі наземної МБС користувач зможе перейти у інші доступні мережі, у тому числі і мережі ТА. Очевидно, що у складі ТА та МБС необхідно мати по два засоби ШБД.

Іншим варіантом, зважаючи на невеликі дальності зв'язку між ТА (до 3 км, рис. 4, а), може бути включення до транспортної MESH-мережі як засобів ШБД на ТА, так і наземних МБС. У цьому випадку на ТА достатньо буде мати один засіб ШБД, а дальність зв'язку між двома ТА за допомогою ретрансляції через МБС може досягати до 20 км.

Для збільшення дальності зв'язку з абонентськими терміналами необхідно оснащувати їх додатковими виносними Wi-Fi адаптерами з антенами, які мають більший коефіцієнт підсилення, ніж вбудовані.

Визначення реальної дальності зв'язку у певному напрямку (зони можливого ведення зв'язку, як сукупності напрямків) можна провести з урахуванням рекомендацій щодо врахування втрат сигналу у середовищі передачі, наведених у [3, 21].

Оцінка граничної дальності зв'язку для УКХ радіозасобів. Завдання оцінки граничної дальності УКХ радіозв'язку із заданими показниками якості та пропускної спроможності ускладнене у зв'язку з відсутністю у технічній документації достатньої кількості інформації для здійснення відповідних розрахунків [22].

Зокрема, для УКХ радіостанцій виробництва „Harris” відсутні дані щодо значення чутливості приймача для ширини каналу 75 кГц, а також для режиму MTNW (ANW2C) з шириною каналу 1, 2 МГц.

Крім цього, необхідно знати необхідні значення відношень сигнал/шум для різних режимів роботи, що визначаються використовуваними СКК.

Тому для забезпечення розрахунків як граничної дальності зв'язку, так і уточненого розрахунку з використанням методик [4 – 9], необхідно отримати від виробників (постачальників) відомості щодо значень чутливості приймача та необхідних відношень сигнал/шум для різних режимів роботи та варіантів налаштувань радіозасобів.

Орієнтовні значення чутливості приймача та швидкості передачі інформації для радіостанцій PRC-9661 (потужністю 10 Вт) виробництва „Aselsan” у різних режимах роботи наведені в табл. 6.

Результати розрахунків залежності граничної дальності зв'язку від частоти, виконаних за формулою (5) для різних режимів роботи, представлені на рис. 4. У табл. 6 наведені значення граничної дальності зв'язку для трьох номіналів частот – 150, 300 та 450 МГц.

При розрахунках коефіцієнти підсилення антен приймалися рівними 1 дБі, енергетичний запас $W_3 = 10$ дБ, втрати у фідері на передачу та прийом по 1,5 дБ (орієнтовні втрати у роз'ємах).

Таблиця 6

Деякі технічні характеристики радіостанцій Aselsan

| | Режим роботи | | | | | | | | | | |
|--|--------------|----------|---------|-----------|-----|-----|------|-----------------------------|------|------|------|
| | ACNR | NBNR | | WBNR ППРЧ | | | | WBNR фіксована частота (ФЧ) | | | |
| Діапазон частот, МГц | 30 – 512 | 30 – 512 | | 108 – 512 | | | | 225 – 512 | | | |
| Ширина каналу | 25 кГц | 25 кГц | | 1 МГц | | | | 5 МГц | | | |
| Вид модуляції (підрежим) | н/д | 8 PSK | 16 APSK | 1A | 1B | 1C | 1D | 1A | 1B | 1C | 1D |
| B , кбіт/с | 19 | 22 | 30 | 160 | 400 | 600 | 880 | 800 | 2000 | 3000 | 4400 |
| $P_{\text{ч}}$, дБм | -118 | -115 | -108 | -101 | -96 | -91 | -86 | -91 | -86 | -81 | -76 |
| $R_{\text{гр}}$, км для $f = 150$ МГц | 3563 | 2522 | 1127 | 503 | 283 | 159 | 89,5 | 159 | 89,5 | 50 | 28 |
| $R_{\text{гр}}$, км для $f = 300$ МГц | 1782 | 1261 | 563 | 252 | 142 | 80 | 45 | 80 | 45 | 25 | 14 |
| $R_{\text{гр}}$, км для $f = 450$ МГц | 1188 | 841 | 376 | 168 | 94 | 53 | 30 | 53 | 30 | 17 | 9,5 |

Примітка: у режимі NBNR вид модуляції обирається автоматично, у режимі WBNR операторами вручну обирається або один з чотирьох підрежимів, або активується автоматичний вибір одного з них.

Отримані результати розрахунків граничної дальності зв'язку можуть використовуватись при плануванні зв'язку між ТА або іншими повітряними об'єктами при забезпеченні між ними відкритого інтервалу, а також для оцінки граничної дальності зв'язку наземних радіостанцій з повітряним ретранслятором.

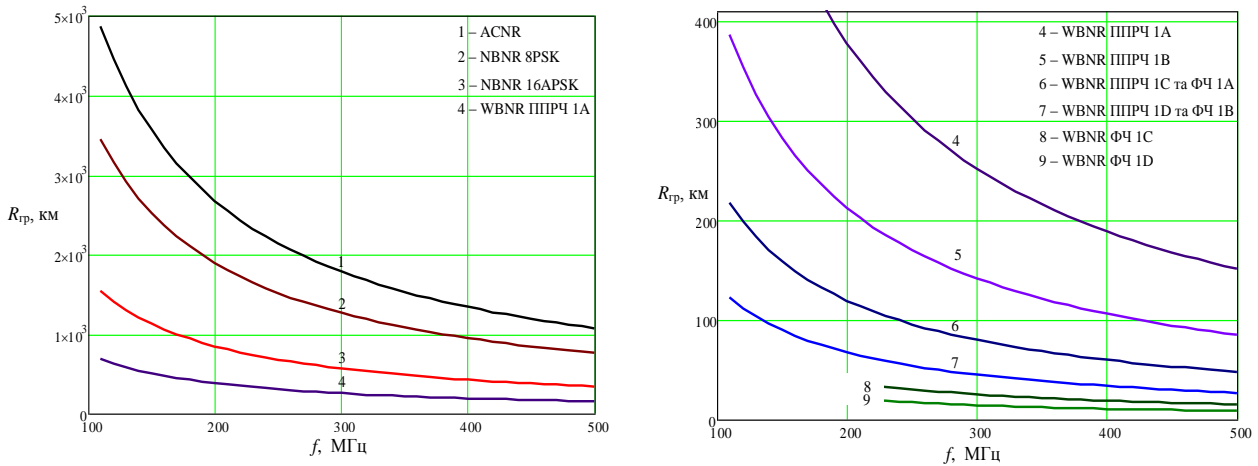


Рис. 4. Гранична дальність зв'язку між радіостанціями PRC-9661 у вільному просторі

Для орієнтовної оцінки дальності зв'язку в реальних умовах можна скористатися відомою моделлю Хата для умов міста та відкритої (сільської) місцевості [5, 6]. Модель Хата можна застосовувати при виконанні наступних умов: діапазон частот 100 – 1500 МГц, відстань 1 – 300 км, висота антени базової станції h_1 від 30 до 200 м, висота антени мобільної станції – 1 – 10 м.

Сумарні втрати сигналу в умовах міста (середніх розмірів) L_u визначаються з виразу

$$L_u = 69,55 + 26,16 \lg(f) - 13,82 \lg(h_1) - \alpha(h_2) + (44,9 - 6,55 \lg(h_1)) (\lg(R))^b, \quad (6)$$

де f – частота; $\alpha(h_2) = (1,1 \lg(f) - 0,7) h_2 - 1,56 \lg(f) - 0,8$; – поправочний коефіцієнт, який враховує висоту підйому антени мобільної станції; h_1, h_2 – висоти підйому передавальної та приймальної антен, відповідно; b – коефіцієнт, що враховує протяжність радіолінії. Для відстаней $R \leq 20$ км $b = 1$, для $R > 20$ км

$$b = 1 + (0,14 + 0,000187 f + 0,00107 h_1') (\log(0,05 R))^{0,8},$$

де $h_1' = h_1 / \sqrt{1 + 0,000007 h_1^2}$.

Сумарні втрати сигналу на відкритій місцевості L_r визначаються з виразу

$$L_r = L_u - 4,78 (\lg(f))^2 + 18,33 \lg(f) - K, \quad (7)$$

де коефіцієнт K лежить у межах від 35,94 до 40,94 в залежності від типу ґрунту.

Тоді, якщо у виразі (1) замінити $L_0 + L_{сер}$ на L_u або L_r , та замість рівня сигналу на вході приймача підставити значення його чутливості, для відстаней до 20 км отримаємо граничні дальності для умов міста та відкритої місцевості, відповідно:

$$R_u = 10^{\left(\frac{P_1 + G_1 + G_2 - L_{\phi 1} - L_{\phi 2} - P_{ч} - 69,55 - 26,16 \lg(f) + 13,82 \lg(h_1) + (1,1 \lg(f) - 0,7) h_2 - 1,56 \lg(f) - 0,8}{44,9 - 6,55 \lg(h_1)} \right)}; \quad (8)$$

$$R_r = 10^{\left(\frac{P_1 + G_1 + G_2 - L_{\phi 1} - L_{\phi 2} - P_{ч} - 69,55 - 26,16 \lg(f) + 13,82 \lg(h_1) + (1,1 \lg(f) - 0,7) h_2 - 1,56 \lg(f) - 0,8 + 4,78 (\lg(f))^2 - 18,33 \lg(f) + K}{44,9 - 6,55 \lg(h_1)} \right)}. \quad (9)$$

Для відстаней понад 20 км вивести вираз для безпосереднього розрахунку граничної дальності зв'язку складно, тому розрахувати її можна з використанням ітераційної процедури, результатом якої є визначення такого значення відстані, при якому $P_2 = P_{ч}$.

Очікувана дальність зв'язку для відкритої місцевості та в умовах міста, розрахована за формулами (9), (10) для радіостанцій PRC-9661 потужністю 10 Вт у різних режимах роботи для висот підвісу антен h_1 200 та 30 м та для $h_2 = 2,2$ м подано на рис. 5 – 8. Позначення режимів роботи на графіках відповідає рис. 4.

При розрахунках втрати у фідері приймалися рівними 3 дБ для $h_1 = 200$ м (втрати у роз'ємах). Для $h_1 = 30$ м додатково до втрат у роз'ємах враховувалися втрати у

радіочастотному кабелі довжиною 30 м (від 2 дБ на частоті 100 МГц до 4 дБ на частоті 500 МГц).

Графіки, які відповідають $h_1 = 200$ м, можна використовувати при розрахунках зони покриття ретранслятора (радіостанції), розміщеного на борту ТА (повітряному об'єкті), при цьому для висот підйому більше 200 м дальність зв'язку буде збільшуватися, а графіки для $h_1 = 30$ м – при розміщенні 11-метрової шогли на підвищеннях місцевості висотою близько 20 м порівняно з середнім рівнем навколишнього рельєфу.

При плануванні траєкторії руху ТА необхідно враховувати не тільки показники орієнтовної (граничної) дальності зв'язку, а і забезпечення максимальної завадозахищеності [23].

Умови застосування моделі Хата не дозволяють оцінити орієнтовні значення дальності зв'язку УКХ радіозасобів для реальних висот підйому h_1 антен наземних радіостанцій (до 11 м на командно штабних машинах (КШМ) на стоянці та 2 – 2,5 м на КШМ та лінійних бойових машинах у русі) та повітряних радіостанцій (понад 200 м). Оцінити втрати сигналу для висот h_1 від 10 до 1200 м та для частот від 30 до 2000 МГц дозволяють криві, наведені у рекомендації ІТУ-Р Р.1546.

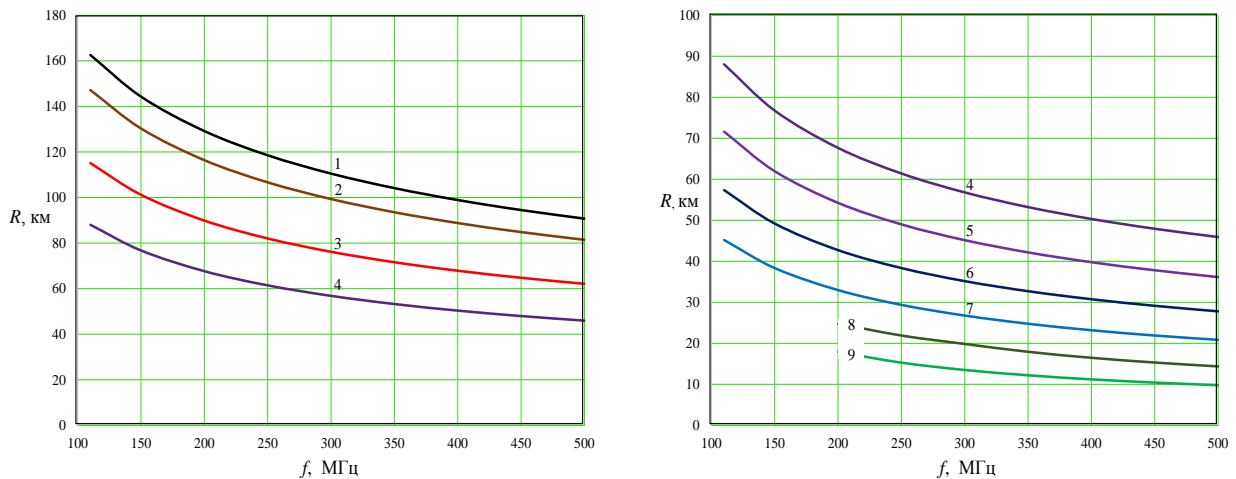


Рис. 5. Орієнтовна дальність зв'язку між радіостанціями PRC-9661 для відкритої місцевості при $h_1 = 200$ м, $h_2 = 2,2$ м

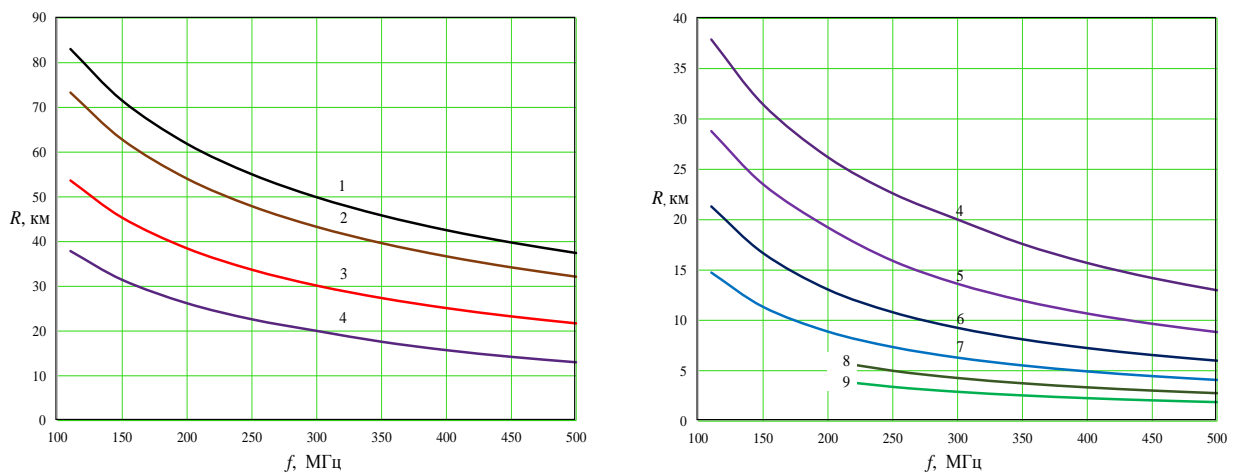


Рис. 6. Орієнтовна дальність зв'язку між радіостанціями PRC-9661 для умов міста при $h_1 = 200$ м, $h_2 = 2,2$ м

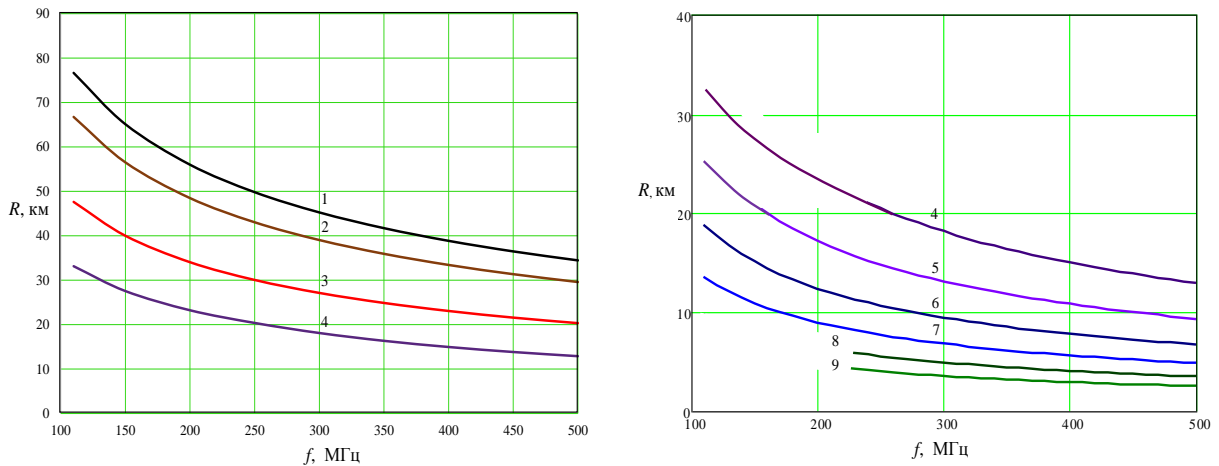


Рис. 7. Орієнтовна дальність зв'язку між радіостанціями PRC-9661 для відкритої місцевості при $h_1 = 30$ м, $h_2 = 2,2$ м

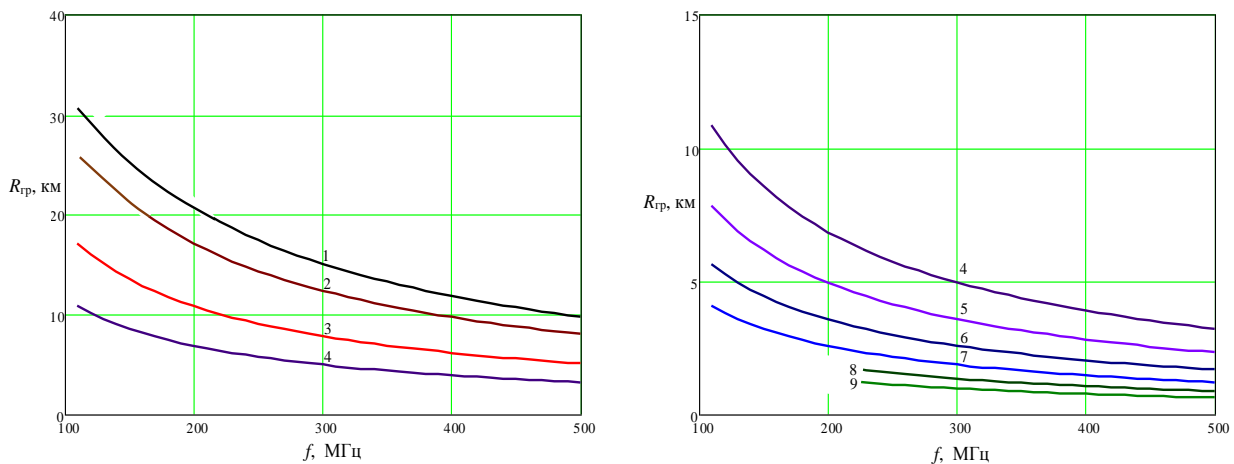


Рис. 8. Орієнтовна дальність зв'язку між радіостанціями PRC-9661 для умов міста при $h_1 = 30$ м, $h_2 = 2,2$ м

Висновки. Таким чином, у роботі проведено розрахунки граничної дальності зв'язку на лініях радіорелейного зв'язку, широкосмугового безпроводового доступу та УКХ радіолініях для різних режимів роботи, яким відповідають різні швидкості передачі. Найбільш точно отримані у результаті розрахунку значення відповідають радіорелейним інтервалам, оскільки при їх побудові обов'язково забезпечується наявність прямої видимості між антенами кореспондентів, а втрати, що виникають додатково до втрат радіолінії, які можна розрахувати (втрат у вільному просторі та за рахунок рельєфу), оцінюються на основі узагальнених статистичних даних.

Розрахунки граничної дальності, проведені для засобів широкосмугового безпроводового доступу та УКХ радіозв'язку, будуть найближче відповідати реальним для випадку організації зв'язку з використанням повітряного ретранслятора при наявності прямої видимості з ним), або між повітряними об'єктами за умови забезпечення відкритого інтервалу між ними. Для засобів УКХ радіозв'язку, крім цього, розрахована орієнтовна дальність зв'язку з використанням моделі Хата для висот підйому антени однієї з станцій (ретранслятора) 30 та 200 м.

Напрямами подальших досліджень є наступні:

створення спеціального програмного забезпечення для розрахунку реальної дальності (зони) можливого ведення зв'язку для різних типів радіозасобів з використанням відповідних моделей розповсюдження радіохвиль, даних топографічних карт місцевості та геоінформаційних систем;

розробка методик управління топологією наземно-повітряних радіомереж для забезпечення необхідної зв'язності, пропускнув спроможності та завадозахищеності.

ЛІТЕРАТУРА

1. Лінії радіозв'язку та антенні пристрої. Навчальний посібник / [М.Д. Ільїнов, Т.Г. Гурський, І.В. Борисов, К.М. Гриценко]. – К.: ВІТІ, 2018. – 268 с.
2. Гряник М. В. Распространение радиоволн. Учебное пособие / М. В. Гряник, В. И. Ломан. – К.: КВВИУС, 1989. – 382 с.
3. Тарасюк О.М. Исследование и разработка энергоэффективных беспроводных сетей. Практикум / Тарасюк О.М., Горбенко А.В. Под ред. Харченко В.С. – МОН України, НАУ ім. Н.Е. Жуковского „ХАИ”, 2016. – 96 с.
4. Системы и сети цифровой радиосвязи: учеб. пособие / [Н.И. Листопад, В.М. Козел, К.Л. Горбачев, К.А. Ковалев]. – Минск.: „Изд-во Гревцова”, 2009. – 200 с.: ил.
5. Голдсмит А. Беспроводные коммуникации. Основы теории и технологии беспроводной связи / Голдсмит А. – М.: Техносфера, 2011. – 904 с.
6. М. Nata. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services / М. Nata // IEEE Trans. Vehic. Technol. – 1980. – Vol. VT-29. – No. 3. – Pp. 317 – 325.
7. Реформат А. Н. Обзор методик расчета зон покрытия базовых станций сетей подвижной радиосвязи / А. Н. Реформат, В. Г. Сосунов, О. В. Плыгунов // Международный научный журнал „Символ науки”. – 2015. – №5. – С. 51 – 55.
8. Горобец Н.Н. Особенности расчета энергетических характеристик каналов подвижной радиосвязи / Н.Н. Горобец, А.А. Елизаренко // Радиотехника. – 2017. – Вып. 188. – С. 116 – 125.
9. Утц В. А. Исследование потерь при распространении радиосигнала сотовой связи на основе статистических моделей / В. А. Утц // Вестник Балтийского государственного университета им. И. Канта. – 2011. – Вып. 5. – С. 44 – 49.
10. Обзор ПО для планирования радиосетей. Часть 1 [Ел. ресурс]. – URL: <http://omoled.ru/publications/view/876>.
11. Волков Е.А. Военные системы радиорелейной и тропосферной связи / Е.А. Волков. – Л.: ВАС, 1982. – 403 с.
12. Голь В.Д. Військова техніка багатоканального радіозв'язку. Методичні рекомендації до виконання курсового проекту / В.Д. Голь, В.М. Раєвський. – К.: ВІТІ НТУУ „КПІ”, 2011. – 36 с.
13. Радиорелейна станція Р-425С3. Посібник з експлуатування ААМВ.464412.003 РЭ. – 68 с.
14. Mini-Link TN ETSI Release 5.3FP. Product Spec. – Ericsson AB, 2014. – 152 p.
15. Станція радиорелейна широкопугова СРШ-5000 (Станція радиорелейна Р-402). Посібник по експлуатації ААНЗ.464428.006 РЭ. – 96 с.
16. Банкет В. Л. Сигнально-кодовые конструкции в телекоммуникационных системах / В. Л. Банкет. – Одесса: Фенікс, 2009. – 180 с.
17. Хилевич С.С. Організація зв'язку в тактичній ланці управління на основі MESH-мережі / С.С. Хилевич, А.А. Щеглов, Т.Г. Гурський // Збірник тез доповідей VIII науково-практичної конференції „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення з урахуванням досвіду АТО”. – К.: ВІТІ, 2015. – С. 42 – 49.
18. Романюк В.А. Задачі управління топологіями мереж зв'язку тактичної ланки управління / В.А. Романюк, Є.О. Степаненко // Збірник наукових праць ВІТІ. – 2017. – № 2. – С. 101 – 109.
19. Романюк В.А. Алгоритми побудови топології мереж радіозв'язку з телекомунікаційними аероплатформами / В.А. Романюк, Є.О. Степаненко // Збірник наукових праць ВІТІ. – 2018. – № 3. – С. 70 – 78.
20. Романюк В.А. Літаючі самоорганізуючі радіомережі / [В.А. Романюк, Є.О. Степаненко, І.В. Панченко, О.І. Восколович] // Збірник наукових праць ВІТІ. – 2017. – № 1. – С. 104 – 114.
21. Альшаев И.А. О проектировании и оптимизации сетей Wi-Fi / И.А. Альшаев, В.А. Лаврухин // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2016. – Т.4. – № 1. – С. 87 – 95.
22. Аналіз режимів роботи та перспектив бойового застосування військових УКХ радіостанцій іноземного виробництва / [Кувшинов О.В., Гурський Т.Г., Гриценко К.М., Шишацький А.В.] // Збірник наукових праць ВІТІ. – 2018. – № 1. – С. 43 – 50.
23. Аналіз завадозахищеності радіомереж з використанням повітряних ретрансляторів в умовах навмисних шумових завад / [Гурський Т.Г., Сова О.Я., Гриценко К.М., Гай Ю.І.] // Збірник наукових праць ВІТІ. – 2018. – № 4. – С. 26 – 33.