

ОЦІНКА ДАЛЬНОСТІ ЗВ'ЯЗКУ В РАДІОМЕРЕЖАХ З ПОВІТРЯНИМИ РЕТРАНСЛЯТОРАМИ

В останні десятиліття стрімко розвивається теорія і практика бойового застосування безпілотних літальних апаратів. Одним із важливих завдань, які можуть вирішуватися за допомогою БЛА, є ретрансляція сигналів у військових УКХ радіомережах тактичної ланки управління.

У статті проведено розрахунки очікуваної дальності зв'язку на УКХ радіолініях між наземною радіостанцією та повітряним ретранслятором на базі БЛА у різних режимах роботи (при різних швидкостях передачі інформації), для висот польоту БЛА від 200 до 1000 м та різних значень робочої частоти (від 100 до 500 МГц). Розрахунки на лінії „вниз” здійснювалися за методикою ITU-R P.1546, розрахунки на лінії „вгору” – за методикою ITU-R P.528. Отримані результати можуть використовуватися при плануванні та організації зв'язку у різних режимах роботи у радіомережах з одним або декількома повітряними ретрансляторами на БЛА з метою визначення зони покриття повітряного ретранслятора, а також при розрахунку очікуваного значення відношення сигнал/завада на вході приймача повітряного ретранслятора у випадку впливу засобів радіоелектронної боротьби.

Ключові слова: рівняння радіолінії, втрати у вільному просторі, множник ослаблення, сумарні втрати, енергетичний запас, Рекомендація ITU-R P.1546, Рекомендація ITU-R P.528.

Гурський Т.Г., Борисов І.В., Боголій С.М., Хоменко П.В. Оцінка дальності зв'язку в радіомережах з повітряними ретрансляторами. В последние десятилетия стремительно развивается теория и практика боевого применения беспилотных летательных аппаратов. Одной из важных задач, которые могут решаться с помощью БЛА, является ретрансляция сигналов в военных УКВ радиосетях тактического звена управления.

В статье проведены расчеты ожидаемой дальности связи на УКВ радиолиниях между наземной радиостанцией и воздушным ретранслятором на базе БЛА в различных режимах работы (при разных скоростях передачи информации), для высот полета БЛА от 200 до 1000 м и различных значений рабочей частоты (от 100 до 500 МГц). Расчеты на линии „вниз” осуществлялись по методике ITU-R P.1546, расчеты на линии „вверх” – по методике ITU-R P.528. Полученные результаты могут использоваться при планировании и организации связи в различных режимах работы в радиосетях с одним или несколькими воздушными ретрансляторами на БЛА с целью определения зоны покрытия воздушного ретранслятора, а также при расчете ожидаемого значения отношения сигнал/помеха на входе приемника воздушного ретранслятора в случае воздействия средств радиоэлектронной борьбы.

Ключевые слова: уравнение радиолинии, потери в свободном пространстве, множитель ослабления, суммарные потери, энергетический запас, Рекомендация ITU-R P.1546, Рекомендация ITU-R P.528.

T. Hurskyi, I. Borisov, S. Boholiy, P. Khomenko. Evaluation of communication range in the radio networks with air repeaters. In recent decades, the theory and practice of combat use of unmanned aerial vehicles (UAV) has been developing rapidly. One of the important tasks that can be solved with the help of UAVs is the relaying of signals in the military tactical VHF radio networks.

The article calculates the expected communication distance on VHF radio links between a terrestrial radio station and an airborne repeater based on an unmanned aerial vehicle (UAV) in different communication modes (for different bitrates), for UAV flight heights from 200 to 1000 m and different values operating frequency (from 100 to 500 MHz). Calculations on the „downlink” were carried out according to the method ITU-R P.1546, calculations on the „uplink” – according to the method ITU-R P.528. The results obtained can be used in the planning and organization of communication in different communication modes in radio networks with one or more UAV air repeaters to determine the coverage area of the air repeater, as well as to calculate the expected value signal-to-interference ratio at the input of the receiver of the air repeater in conditions of jamming.

Keywords: radio line equation, free space loss, attenuation factor, total loss, energy reserve, Recommendation ITU-R P.1546, Recommendation ITU-R P.528.

Постановка завдання. В останні десятиліття активно розвиваються теоретичні положення бойового застосування безпілотних авіаційних комплексів та відбувається їхнє практичне впровадження для виконання різних завдань [1], у тому числі й у інтересах збройних сил [2]. Одним із таких завдань є забезпечення ретрансляції сигналів в радіомережах УКХ.

На етапі планування мережі з метою визначення просторових координат (траєкторії руху) безпілотного літального апарату (БЛА) виникає завдання оцінки максимальної дальності зв'язку між наземними радіостанціями (НР) та повітряним ретранслятором (ПР) в обох напрямках у різних режимах роботи.

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 [3, 4]:

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

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 [5]. 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.

Крім цього, необхідно виконати умови по забезпеченню необхідного відношення сигнал/шум на вході приймача, що визначається видом модуляції (сигнально-кодовою конструкції) [6].

В роботі [4] проведено розрахунки дальності зв'язку на УКХ радіолініях у різних режимах роботи для наступних вихідних даних:

- 1) в ідеалізованих умовах вільного простору;
- 2) для відкритої місцевості за методикою Окамура-Хата;
- 3) в умовах міста за методикою Окамура-Хата.

Методика Окамура-Хата [7] може використовуватись для розрахунку втрат сигналу при розповсюдженні у реальних умовах при висоті підвісу антени ретранслятора до 200 м. У той же час, висота польоту БЛА, на базі якого розгортається ПР, може складати до 1000 м і більше для забезпечення значної дальності зв'язку у високошвидкісних режимах роботи. Крім цього, у роботі [8] показано, що антена ПР при висотах підвісу його антени до 200 – 500 м має володіти діаграмою направленості з випромінюванням у нижню півсферу та шириною основного пелюстка близько 180° , що унеможливує просторову фільтрацію навмисних завад, які можуть створюватися потужними наземними засобами радіоелектронної боротьби (РЕБ). У той же час, збільшення висоти польоту ПР дозволяє використовувати антени з дещо вужчою ДН і обирати координати (траєкторію польоту) ПР таким чином, щоб забезпечити максимальне ослаблення завади на вході приймача.

Відомо, що для якісного планування радіомереж з використанням ПР необхідно розрахувати і значення дальності зв'язку на лінії „вгору” – між НР та ПР, оскільки зона покриття ПР „на передачу” може не відповідати зоні його покриття „на прийом” [6, 9 – 11].

Тому метою статті є оцінка максимальної дальності зв'язку між наземною радіостанцією та повітряним ретранслятором на БЛА при висоті його польоту понад 200

м на лініях „вниз” та „вгору” для різних режимів роботи (швидкостей передачі даних) УКХ радіозасобів.

Виклад основного матеріалу.

Лінія „вниз” (повітряний ретранслятор – наземна радіостанція). Виходячи з проведеного у роботах [9 – 11] аналізу методик розрахунку енергетичних параметрів каналів радіозв’язку, для розрахунку зони покриття повітряного ретранслятора при висотах його баражування до 3000 м доцільно використовувати методику, наведену в Рекомендації ІТУ-Р Р.1546 [12]. Вона призначена для прогнозування розповсюдження радіохвиль в діапазоні частот від 30 МГц до 4000 МГц на трасах довжиною від 1 до 1000 км. В рекомендації приводяться графіки напруженості поля, отримані емпіричним шляхом, для наступних умов:

еквівалентна випромінювана потужність (ЕВП), що представляє собою добуток вихідної потужності передавача на коефіцієнт підсилення передавальної антени, дорівнює 1 кВт;

робоча частота – 100, 600 та 2000 МГц;

висота підвісу передавальної антени – 10; 20; 37,5; 75; 150; 300; 600; 1200 м;

відсоток часу, протягом якого напруженість поля буде перевищувати значення, отримане з графіків, – 1; 5; 10; 50 %;

тип траси – сухопутна, морська (для теплого та холодного моря).

Якщо вихідні дані відрізняються від тих, для яких приводяться відповідні графіки, наприклад, частота складає 300 МГц, а висота підвісу антени – 2000 м., то для розрахунку напруженості використовуються процедури інтерполяції/екстраполяції даних, отриманих з графіків.

Графіки для сухопутних трас побудовані на основі даних, отриманих для умов помірного клімату, що цілком відповідає кліматичним умовам в Україні.

На рис. 1 для прикладу наведено один з множини графіків, представлених у рекомендації (для частоти 100 МГц, 50 % часу та для сухопутної траси).

Для зручності розрахунків на ПЕОМ значення напруженості поля можна отримати в Бюро радіозв’язку в табличному вигляді у форматі Microsoft Excel [12].

Якщо при проведенні розрахунків дальності зв’язку зручніше оперувати рівнями потужності сигналу, то значення напруженості поля, представлені на графіках (у таблицях), можна перерахувати у втрати сигналу:

$$L = 139,3 - E + 20 \log f, \quad (3)$$

де L – втрати при передачі (дБ); E – напруженість поля (дБ(мкВ/м)) для ЕВП 1 кВт; f – частота (МГц).

Інтерполяція втрат (напруженості) для висоти h_1 , відмінної від тих, для яких побудовані графіки у Рекомендації, здійснюється з використанням наступного виразу:

$$L = L_{inf} + (L_{sup} - L_{inf}) \log(h_1 / h_{inf}) / \log(h_{sup} / h_{inf}), \quad (4)$$

де h_1 – висота передавальної антени над середнім рівнем моря, для якої необхідний прогноз (м); h_{inf} – найближча номінальна ефективна висота, яка менша за h_1 ; h_{sup} – найближча номінальна ефективна висота, яка більша за h_1 ; L_{inf} – значення втрат передачі для h_{inf} на необхідній відстані; L_{sup} – значення втрат передачі для h_{sup} на необхідній відстані. Якщо розрахунки здійснюються по напруженості поля, то замість L у формулі (4) слід записати E .

Якщо частота для прогнозу не є однією з частот, представлених на рисунках, або наведених в табличних даних, то втрати сигналу (напруженість) слід розраховувати з використанням виразу

$$L = L_{inf} + (L_{sup} - L_{inf}) \log(f / f_{inf}) / \log(f_{sup} / f_{inf}), \quad (5)$$

де f – частота, для якої необхідний прогноз (МГц); f_{inf} – нижня номінальна частота (100 МГц при $f < 600$ МГц, інакше 600 МГц); f_{sup} – верхня номінальна частота (600 МГц при $f < 600$

МГц, інакше 2000 МГц); L_{inf} – значення втрат передачі для f_{inf} ; L_{sup} – значення втрат передачі для f_{sup} .

Процедура розрахунку дозволяє також уточнити отримане з графіків (таблиць) значення напруженості (втрат сигналу) з урахуванням поправки на висоту приймальної антени та висоту місцевої репрезентативної перешкоди у напрямку на передавальну антену, кута просвіту місцевості у напрямку на передавальну антену та інших поправок [12].

Слід зауважити, що висота підвісу передавальної антени h_1 визначається відносно усередненої висоти навколишнього рельєфу місцевості у напрямку на приймальну. Для сухопутних трас ефективна висота передавальної антени визначається як її висота в метрах над середнім рівнем землі на відстанях 3 – 15 км від передавальної антени в напрямку приймальної антени.

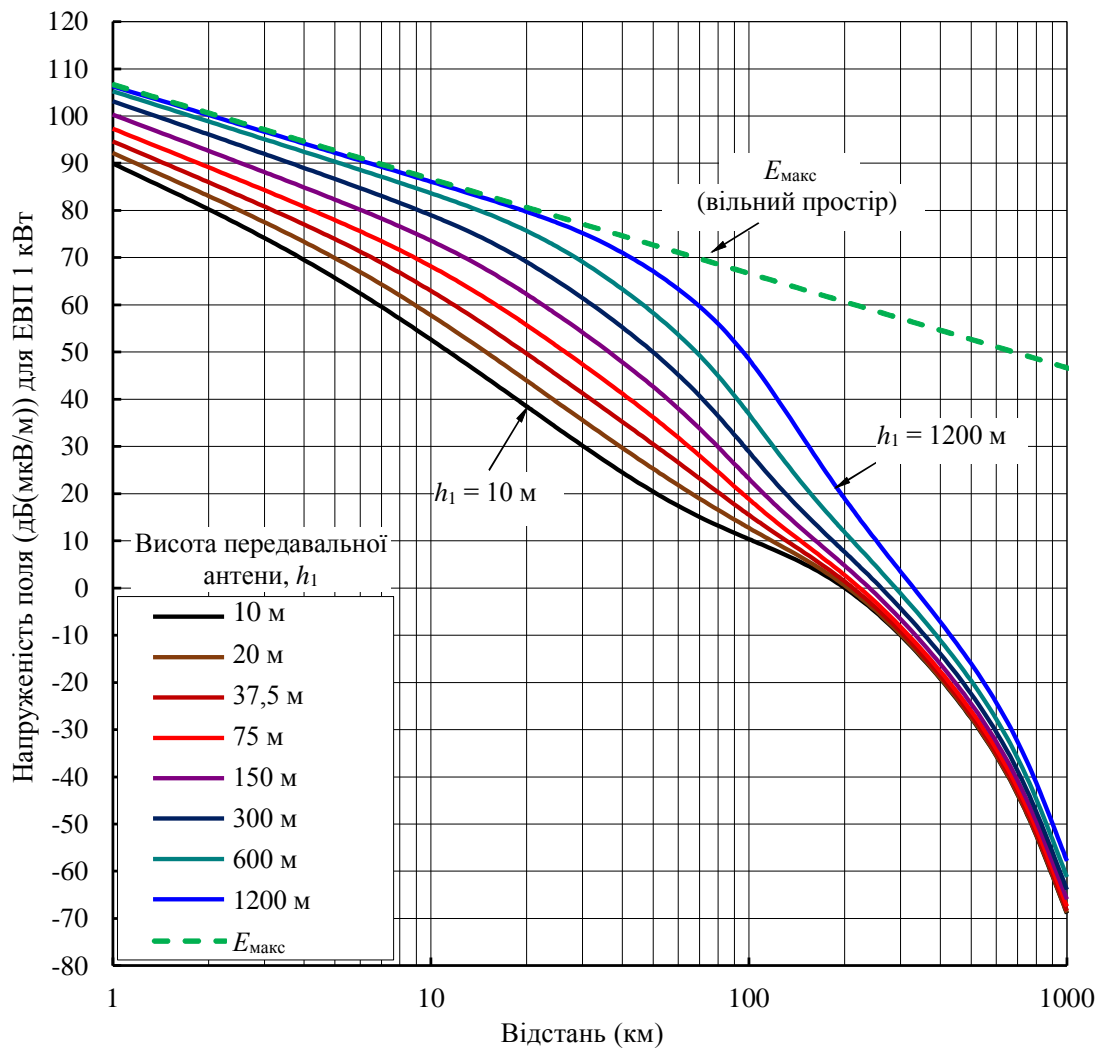


Рис. 1. Залежність напруженості поля від відстані при ЕВП 1 кВт для частоти 100 МГц, сухопутна траса, 50% часу [12]

Загальна послідовність визначення максимальної дальності зв'язку з використанням методики ITU-R P.1546:

- 1) розрахувати енергетичний потенціал радіолінії P_{EP} для заданого режиму роботи:

$$P_{EP}, \text{дБ} = P_1 + G_1 + G_2 - L_{\phi 1} - L_{\phi 2} - P_ч; \quad (6)$$

- 2) здійснити перерахунок напруженості поля для заданих значень частоти у втрати передачі (за формулою (2));

3) знайти (за графіками або за табличними даними) значення відстані, при якій втрати дорівнюють енергетичному потенціалу радіолінії. Це і буде значення орієнтовної дальності зв'язку;

4) провести інтерполяцію (екстраполяцію) отриманих результатів розрахунків втрат, якщо висота передавальної антени або частота, не відповідають тим, для яких необхідний прогноз;

5) уточнити отримані значення з урахуванням поправок.

В табл. 1 наведено деякі технічні характеристики радіостанцій Aselsan VRC-9661 [4], а також розраховані значення енергетичного потенціалу у різних режимах роботи для наступних вихідних даних: потужність передавача $P_1 = 10$ Вт (40 дБм), втрати у фідерах та роз'ємах на передачу ($L_{\phi 1}$) та прийом ($L_{\phi 2}$) – по 2 дБ, коефіцієнти підсилення передавальної та приймальної антен – $G_1 = G_2 = 2$ дБі.

Таблиця 1

Деякі технічні характеристики УКХ 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, не більше	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
$P_{\text{ЕП}}$, дБ	158	155	148	141	136	131	126	131	126	121	116

Результати розрахунків залежності орієнтовної (без урахування рельєфу місцевості) максимальної дальності зв'язку від частоти, виконаних згідно Рекомендації ІТУ-R P.1546 для різних режимів роботи, представлені на рис. 2. Позначення на рис. 2 відповідають режимам роботи: 1 – ACNR, 2 – NBNR (8PSK), 3 – NBNR (16APSK), 4 – WBNR FH 1A, 5 – WBNR FH 1B, 6 – WBNR FH 1C та FF 1A, 7 – WBNR FH 1D та FF 1B, 8 – WBNR FF 1C, 9 – WBNR FF 1D.

Вигляд отриманих графіків відповідає отриманим у роботі [4], проте при однаковій висоті підвісу передавальної антени h_1 (200 м) Рекомендація ІТУ-R P.1546 дає дещо менші значення дальності зв'язку порівняно з методикою Окамура-Хата, особливо у нижній частині діапазону.

Отримані результати розрахунків орієнтовної максимальної дальності зв'язку можуть використовуватись при плануванні зони покриття повітряних ретрансляторів.

На практиці для зменшення обчислювальної складності завдання доцільно розраховувати не зону покриття, а здійснювати перевірку рівня сигналу в місцях можливого розташування радіостанцій з урахуванням їх переміщення на певний інтервал часу та з урахуванням місць можливого різкого зменшення рівня за рахунок значних перепадів висот рельєфу (за пагорбами, у впадинах), або через інші перешкоди (будівлі, споруди).

Тоді, якщо енергетичний запас, тобто різниця розрахованого очікуваного рівня сигналу у точці, що перевіряється, та енергетичного потенціалу радіолінії, більше нуля – робиться висновок про наявність покриття у даній точці. Якщо енергетичний запас у точці, де його значення найменше, більше нуля, може бути прийнято рішення на зменшення потужності передавача повітряного ретранслятора, або зменшення висоти баражування БЛА. Перше дозволить подовжити час безперервного польоту БЛА та підвищити розвідзахищеність, друге – призведе до збільшення втрат сигналу передавача ПР у напрямку засобів РЕП, що підвищить розвідзахищеність, та збільшення втрат сигналу передавача станції завад на вході приймача ПР, що підвищить відношення сигнал/завада і, відповідно, завадостійкість приймання.

Лінія „вгору” (повітряний ретранслятор – наземна радіостанція).

Для розрахунку рівня сигналу НР на вході приймача ПР при висоті польоту БЛА від 1000 м і більше доцільно використовувати методику, наведену в рекомендації ІТУ-R P.528 [13]. Методика призначена для прогнозування сумарних втрат передачі в діапазоні частот 125 – 15500 МГц для повітряної і супутникової служб. Вона використовує метод інтерполяції за даними сумарних втрат передачі з сімейств кривих, які можуть використовуватися для ліній земля-повітря, земля-супутник, повітря-повітря, повітря-супутник і супутник-супутник. Єдиними даними, необхідними для розрахунку, є відстані між антенами, висоти антен над середнім рівнем моря, частота і відсоток часу.

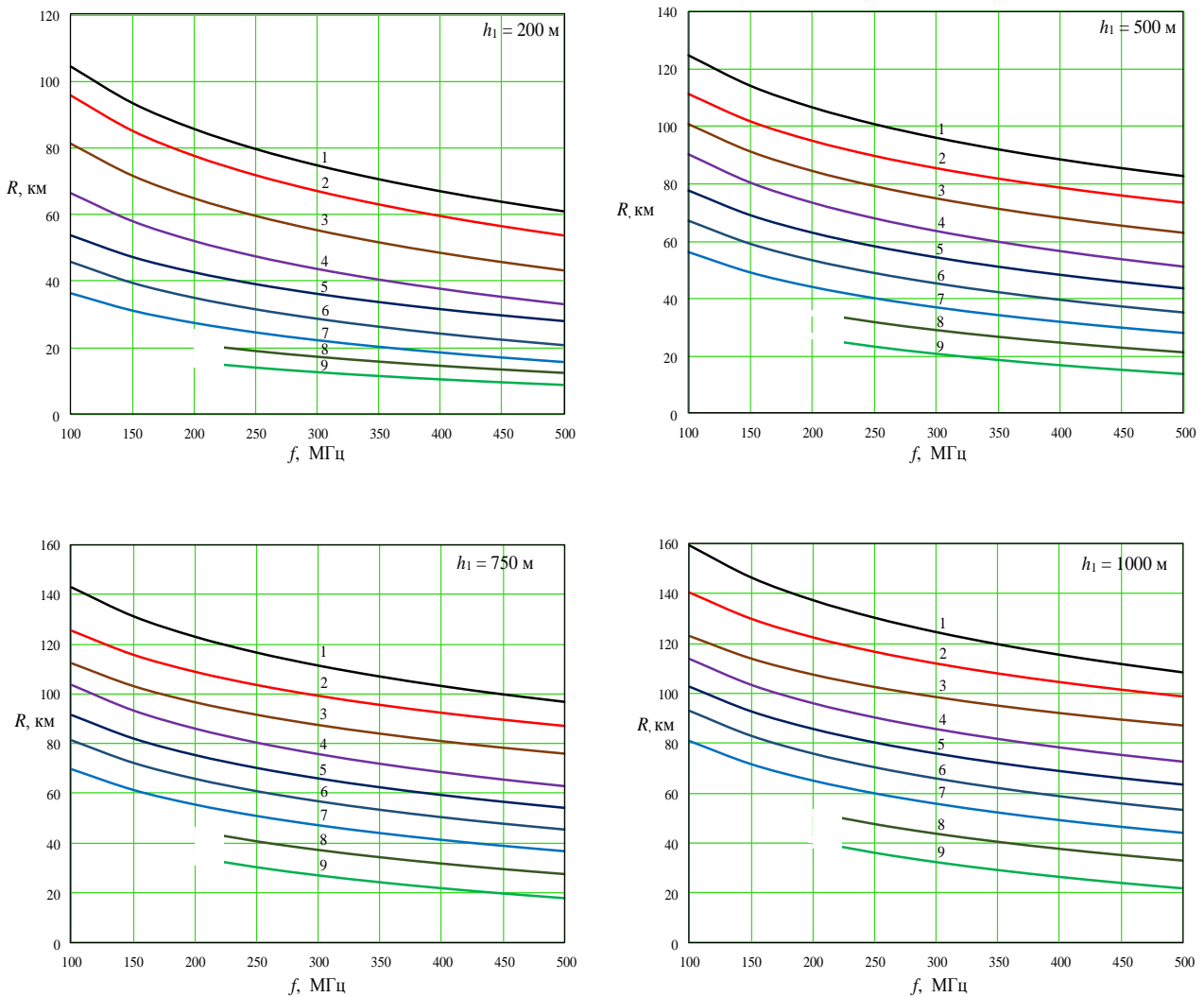


Рис. 2. Орієнтовна максимальна дальність зв'язку між радіостанціями PRC-9661 (10 Вт) у різних режимах роботи для різних значень висоти підвісу антени повітряної радіостанції h_1

Крім цього, при плануванні координат розміщення ПР необхідно враховувати можливий рівень навмисних завад на вході його приймача, створюваних засобами радіоелектронного подавлення противника [8, 14, 15]. Розрахунок радіолінії „постановник завад” – „повітряний ретранслятор” також може здійснюватися з використанням [13], причому як для наземного, так і для повітряного постановника завад.

Розрахунки радіоліній „вгору” при висотах підвісу приймальної антени менше 1000 м можна здійснювати з використанням Рекомендації ІТУ-R P.1546 із застосуванням певних допущень [12].

В рекомендації [13] приводяться графіки сумарних втрат (втрати у вільному просторі плюс множник ослаблення за рахунок середовища передачі), отримані для помірною континентального клімату емпіричним шляхом для наступних умов:

номінали робочої частоти – 125, 300, 600, 1200, 2400, 5100, 9400 та 15500 МГц;

висота підвісу передавальної антени – 1,5; 15; 30; 60; 1000; 10000; 20000 м;

висота підвісу приймальної антени – 1000; 10000; 20000 м;

відсоток часу – 1; 5; 10; 50; 95 %.

На рис. 3 для прикладу наведено графіки залежності сумарних втрат L_{Σ} від відстані для висот повітряного об'єкту (h_2) 1000 та 10000 м для частоти 125 МГц.

Якщо вихідні дані відрізняються від тих, для яких приводяться відповідні графіки, наприклад, частота складає 400 МГц, висота підвісу приймальної антени – 2000 м, висота підвісу передавальної антени – 10 м, то для розрахунку напруженості використовуються процедури інтерполяції даних, отриманих з графіків.

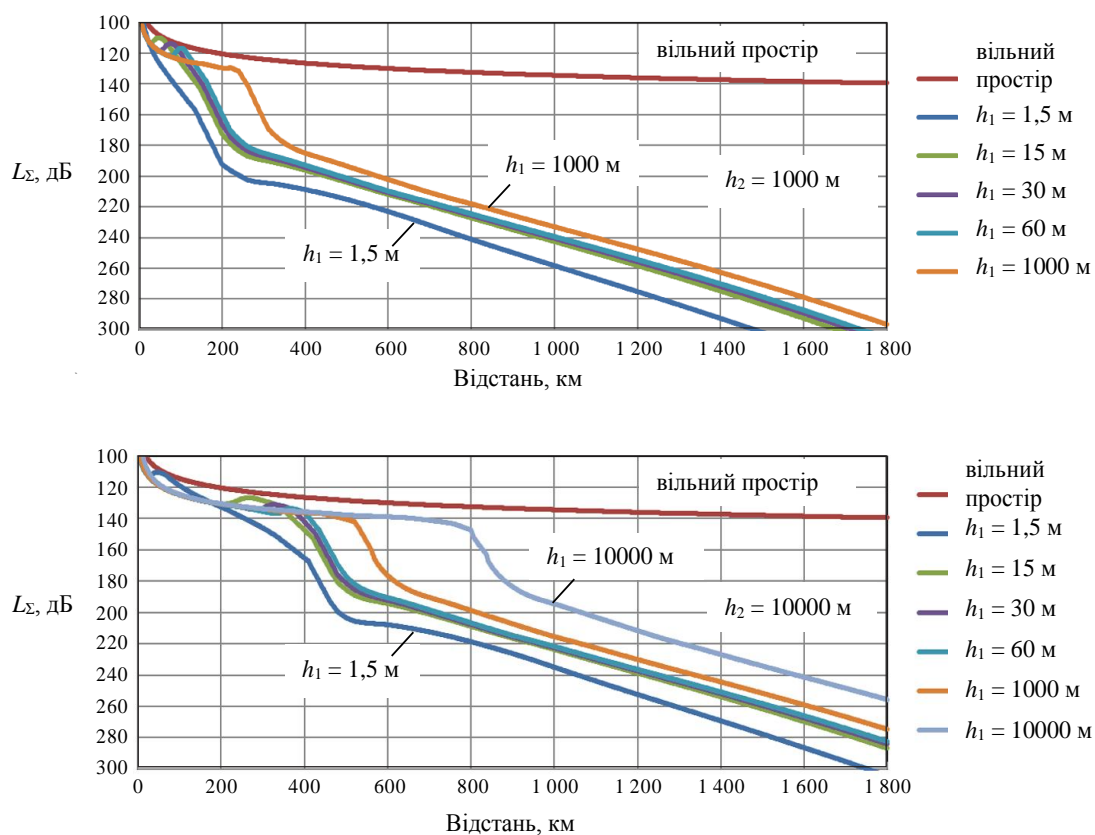


Рис. 3. Сімейство кривих для сумарних втрат передачі на частоті 125 МГц для 95% часу та різних значень h_1 [13]

Інтерполяція втрат для висоти (h_1 або h_2), відмінної від тих, для яких побудовані графіки у Рекомендації ITU-R P.528, здійснюється з використанням виразу (4).

Якщо частота для прогнозу не є однією з частот, представлених на рисунках, або наведених в табличних даних, то сумарні втрати передачі слід розраховувати з використанням виразу (5).

Орієнтовні значення максимальної дальності зв'язку (км) на радіолініях НР – ПР для різних режимів роботи радіостанцій Aselsan для висот підвісу передавальної антени $h_1 = 1,5$ м, приймальної – $h_2 = 1000$ м, наведено в табл. 2. Інші вихідні дані відповідають тим, які використовувались для проведення розрахунків згідно рекомендації ITU-R P.1546.

Зі значень, наведених в табл. 2, видно, що на радіолініях „вгору” зміна робочої частоти від 125 МГц до 500 МГц, на відміну від радіолінії „вниз”, несуттєво впливає на дальність

зв'язку. Це пов'язано з тим, що множник ослаблення за рахунок середовища передачі на таких радіолініях (низько розташована антена наземного передавача – високо піднята антена повітряного приймача) збільшується зі зменшенням робочої частоти (через збільшення радіуса зони, суттєвої для розповсюдження радіохвиль), а основні втрати при розповсюдженні радіохвиль (втрати у вільному просторі), навпаки, зменшуються. Наприклад, для відстані 30 км, втрати у вільному просторі зростають від 103,9 дБ на частоті 125 МГц до 117,6 дБ на частоті 600 МГц. У той же час, множник ослаблення, який визначається як різниця між сумарними втратами та втратами у вільному просторі, зменшується від 13,3 дБ на частоті 125 МГц до 1,2 дБ на частоті 600 МГц [13]. Тому сумарні втрати виходять приблизно однаковими.

Таблиця 2

**Орієнтовні значення максимальної дальності зв'язку (км) на радіолініях
НР – ПР для різних режимів роботи радіостанцій Aselsan**

Режими роботи		Частота, МГц					
		125		300		500	
		95%	50%	95%	50%	95%	50%
ACNR		137	146	126	140	119	136
NBNR	8PSK	129	140	119	135	113	129
	16APSK	108	118	102	113	99	110
WBNR	FH 1A	88	94	85	93	84	92
	FH 1B	74	79	73	78	72	78
	FH 1C/FF 1A	60	64	59	64	59	63
	FH 1D/FF1B	47	50	47	50	47	50
	FF 1C	37	39	36	39	20,5	38
	FF1D	28	30	28	29	13	26

Різде зменшення дальності зв'язку у режимах WBNR FF 1C та 1D у верхній частині діапазону робочих частот пояснюється, в першу чергу, впливом явища інтерференції за рахунок перевідбиття радіохвиль від поверхні землі поблизу передавальної антени.

З результатів розрахунків, наведених на рис. 2 (для $h_1 = 1000$ м) та у табл. 2, видно, що у нижній частині діапазону робочих частот більшою є дальність зв'язку на лінії „вниз”, у той же час, у верхній частині – на лінії „вгору”. Очевидно, що при визначенні просторових координат ПР для забезпечення гарантованого двостороннього зв'язку необхідно враховувати мінімальне значення.

Висновки. Таким чином, у роботі проведено розрахунки орієнтовної максимальної дальності зв'язку на УКХ радіолініях між наземною радіостанцією та повітряним ретранслятором на борту безпілотної літальної апаратури для різних режимів роботи, яким відповідають різні швидкості передачі даних.

Розрахунки на лінії „вниз” проводились згідно Рекомендації ІТУ-Р Р.1546 для висот польоту БЛА від 200 до 1000 м, розрахунки на лінії „вгору” – згідно Рекомендації ІТУ-Р Р.528 для висоти польоту БЛА 1000 м.

Отримані результати можуть використовуватися на етапі планування радіомереж для попередньої оцінки зони покриття повітряних ретрансляторів, а також при розрахунку очікуваного відношення сигнал/завада на вході приймача повітряного ретранслятора у випадку радіоелектронного продавлення наземними засобами радіоелектронної боротьби.

Напрямки подальших досліджень:

розробка методики управління топологією наземно-повітряної радіомережі для забезпечення необхідної завадозахищеності, зв'язності та пропускну здатності;

створення спеціального програмного забезпечення для розрахунку зони покриття повітряного ретранслятора для різних типів радіозасобів з використанням відповідних

моделей розповсюдження радіохвиль, даних топографічних карт місцевості та геоінформаційних систем та з урахуванням потенційного впливу засобів радіоелектронної боротьби.

ЛІТЕРАТУРА

1. Романченко І.С. Моделі застосування інформаційно-телекомунікаційних технологій на основі безпілотних авіаційних комплексів у надзвичайних ситуаціях: монографія / І.С. Романченко, С.Л. Данилюк, С.М. Чумаченко [та ін.]. – К.: НАУ, 2016. – 332 с.
2. 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.
3. Лінії радіозв'язку та антенні пристрої. Навчальний посібник / [М.Д. Ільїнов, Т.Г. Гурський, І.В. Борисов, К.М. Гриценюк]. – К.: ВІТІ, 2018. – 268 с.
4. Гурський Т.Г. Оцінка граничної дальності зв'язку на сучасних радіо- та радіорелейних лініях / Т.Г. Гурський, Є.О. Степаненко, А.В. Шишацький // Збірник наукових праць ВІТІ. – 2019. – № 1. – С. 6 – 17.
5. Тарасюк О.М. Исследование и разработка энергоэффективных беспроводных сетей. Практикум / Тарасюк О.М., Горбенко А.В. Под ред. Харченко В.С. – МОН Украины, НАУ им. Н.Е. Жуковского „ХАИ”, 2016. – 96 с.
6. 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.
7. M. Nata. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services / M. Nata // IEEE Trans. Vehic. Technol. – 1980. – Vol. VT-29. – No. 3. – Pp. 317 – 325.
8. Гурський Т.Г. Підвищення заводо захищеності повітряних ретрансляторів УКХ радіомереж в умовах навмисних шумових завод / Т.Г. Гурський // Збірник матеріалів XII науково-практичної конференції ВІТІ ім. Героїв Крут. – 2019. – С. 69 – 76.
9. 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.
10. Горобец Н.Н. Особенности расчета энергетических характеристик каналов подвижной радиосвязи / Н.Н. Горобец, А.А. Елизаренко // Радиотехника. – 2017. – Вып. 188. – С. 116 – 125.
11. 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.
12. Recommendation ITU-R P.1546-6 (08/2019). Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 4 000 MHz. P Series. Radiowave propagation [Ел. Ресурс]. – Режим доступу: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1546/en>.
13. Recommendation ITU-R P.528-4 (08/2019). A propagation prediction method for aeronautical mobile and radionavigation services using the VHF, UHF and SHF bands. P Series. Radiowave propagation [Ел. Ресурс]. – Режим доступу: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.528-4-201908-I/en>.
14. Аналіз заводо захищеності радіомереж з використанням повітряних ретрансляторів в умовах навмисних шумових завод / [Гурський Т.Г., Сова О.Я., Гриценюк К.М., Гай Ю.І.] // Збірник наукових праць ВІТІ. – 2018. – № 4. – С. 26 – 33.
15. Гурський Т.Г. Аналітична модель оцінки впливу засобів РЕБ на радіолінії з ППРЧ у радіомережах з повітряним та наземним ретрансляторами / Т.Г. Гурський // Збірник наукових праць ВІТІ. – 2019. – № 3. – С. 23 – 32.