

АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ВПЛИВУ ЗАСОБІВ РЕБ НА РАДІОЛІНІЇ З ППРЧ У РАДІОМЕРЕЖАХ З ПОВІТРЯНИМ ТА НАЗЕМНИМ РЕТРАНСЛЯТОРАМИ

У статті розглянуто радіоелектронне подавлення радіомереж з псевдовипадковою перебудовою робочої частоти (ППРЧ) з повітряними (на безпілотних літальних апаратах (БЛА)) та наземними ретрансляторами, а також без ретранслятора. Для оцінки потенційного впливу засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ) на радіолінії проведено розрахунки очікуваних значень відношення сигнал/завада на входах приймачів ретрансляторів та радіостанцій. Розрахунки проводились за умови постановки шумової загороджувальної завади, що створюється наземною станцією РЕБ та повітряною, розташованою на борту БЛА.

Встановлено, що найбільш завадозахищеною є радіомережа з повітряним ретранслятором, проте найбільш уразливим, як і для радіомережі з наземним ретранслятором, є приймач ретранслятора при подавленні його потужним наземним постановником завад.

Запропонована модель дає можливість на етапі проектування мережі визначати максимально можливу відстань між ретранслятором та радіостанціями та ширину хопсету для забезпечення задовільного очікуваного значення відношення сигнал/завада на вході приймача.

Визначено напрямки підвищення завадозахищеності радіомереж з повітряними ретрансляторами.

Ключові слова: повітряний ретранслятор, наземна радіостанція, постановник завад, шумова загороджувальна завада, відношення сигнал/завада, завадозахищеність.

Гурский Т.Г. Аналитическая модель оценки влияния средств РЕБ на радиолинии с ППРЧ в радиосети с воздушным и наземным ретрансляторами. В статье рассмотрено радиоэлектронное подавление радиосетей с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ) с воздушными (на беспилотных летательных аппаратах (БЛА)) и наземными ретрансляторами, а также без ретранслятора. Для оценки потенциального воздействия средств радиоэлектронной борьбы (РЕБ) на радиолинии проведены расчеты ожидаемых значений отношения сигнал/помеха на входах приемников ретрансляторов и радиостанций. Расчеты проводились при условии постановки шумовой заградительной помехи, создаваемой наземной станцией РЕБ и воздушной, расположенной на борту БЛА.

Установлено, что наиболее помехозащищенной является радиосеть с воздушным ретранслятором, однако наиболее уязвимым, как и для радиосети с наземным ретранслятором, является приемник ретранслятора при подавлении его мощным наземным постановщиком помех.

Предложенная модель позволяет на этапе проектирования сети определять максимально возможное расстояние между ретранслятором и радиостанциями и ширину хопсета для обеспечения удовлетворительного ожидаемого значения отношения сигнал/помеха на входе приемника.

Определены направления повышения помехозащищенности радиосетей с воздушными ретрансляторами.

Ключевые слова: воздушный ретранслятор, наземная радиостанция, постановщик помех, шумовая заградительная помеха, отношение сигнал / помеха, помехозащищенность.

T.Hurskyi Analytical model of evaluation of the effects of electronic warfare on frequency hopping radio links in the radio networks with air and terrestrial repeaters. *The paper deals with jamming of frequency hopping radio networks with airborne (based on unmanned aerial vehicles (UAVs)) and terrestrial repeaters, as well as without a repeater. To assess the potential impact of jamming on the radio network, the expected values of the signal/interference ratio at the inputs of the receivers of the repeaters and radios were calculated. The calculations were carried out for the conditions of setting up a noise barrier created by the ground jammer and the air jammer, based on the UAV's board.*

It is found that the most jamming resistance has the radio network with an air repeater, but the most vulnerable, as for the radio network with a terrestrial repeater, is the receiver of the repeater when suppressed by its powerful terrestrial jammer.

The proposed model makes it possible, at the design stage of the network, to determine the maximum possible distance between the repeater and radios and the width of the hopset to ensure a satisfactory signal-to-noise ratio at the receiver input.

The directions of increase of anti-jammingness of radio networks with air repeaters are determined.

Key words: air repeater, terrestrial radio station, jammer, noise obstruction, signal to noise ratio, noise immunity.

Постановка завдання.

В останні десятиліття у арміях різних держав активно використовуються безпілотні літальні апарати (БЛА). Основним їх призначенням є ведення розвідки. У той же час перспективним напрямком бойового застосування БЛА є розміщення на їхній платформі малогабаритних ретрансляторів для наземних радіомереж [1, 2]. Це дозволить значно

збільшити зону покриття ретранслятора, підвищити зв'язність радіостанцій у мережі, підвищити як енергетичну, так і частотну ефективність радіоканалів.

У той же час, БЛА можуть використовуватися з метою радіоелектронного подавлення (РЕП) [3, 4] за допомогою малогабаритних станцій навмисних завад. Як приклад можна навести комплекси „Мошкара” та „Мошкарець” (РФ), MQ-9 та ADM-160 MALD (США). Очевидно, що постановники завад (ПЗ) з БЛА можуть значно підвищити ефективність радіоелектронного подавлення систем радіозв'язку.

Тому актуальним завданням є оцінка потенційного впливу засобів радіоелектронної боротьби, як потужних наземних, так і малопотужних повітряних, на радіомережі з повітряними ретрансляторами. Для цього необхідно розрахувати очікуване відношення сигнал/завада на входах приймачів як ретранслятора, так і наземних радіостанцій.

Аналіз останніх публікацій.

В літературі широко висвітлені питання, присвячені бойовому застосуванню розвідувальних та ударних БЛА [5 – 10] та протидії ним, зокрема – радіоелектронному подавленню каналів управління та навігації (прийому GPS-сигналів) [11 – 14]. У роботі [15] розглянуто потенційний вплив наземних засобів РЕБ на радіомережу групи БЛА.

Очевидно, що повітряний ретранслятор (ПР) доцільно розміщувати достатньо віддалено від противника, щоб ускладнити завдання його фізичного знищення та радіоелектронного подавлення приймачів каналів управління і навігації. Тому традиційні способи боротьби з розвідувальними та ударними БЛА можуть виявитись недостатньо ефективними. Для радіоелектронного подавлення радіомереж з ПР можуть застосовуватися як наземні, так і повітряні засоби РЕБ, які можуть впливати на приймачі як повітряного ретранслятора, так і наземних радіостанцій.

Одним з основних засобів забезпечення високої заводозахищеності радіоліній є використання режиму псевдовипадкової перебудови робочої частоти (ППРЧ). При цьому ефективне радіоелектронне подавлення може бути забезпечене з використанням широкосмугових шумових завад – загороджувальної та у частині смуги [16]. Шумова загороджувальна завада (ШЗЗ) перекриває усю смугу частот, в межах якої здійснюється стрибкоподібна зміна частоти (хопсет).

У роботі [17] проведено розрахунки очікуваних рівнів напруженості електричного поля корисного сигналу та навмисної завади на вході приймачів повітряного ретранслятора та наземних радіостанцій та визначено величину енергетичної переваги завади над сигналом на входах відповідних приймачів. Розрахунки напруженості електричного поля як корисного сигналу, так і завади здійснювались за формулою Введенського, або для ідеалізованих умов розповсюдження радіохвиль у вільному просторі (якщо не виконувалась умова застосування формули Введенського). У той же час, існує низка методик для розрахунку рівня сигналу в точці прийому, апробованих на практиці в реальних умовах розповсюдження радіохвиль [18].

Тому метою статті є уточнений розрахунок відношення сигнал/завада на радіолініях у радіомережах з ППРЧ та з використанням повітряних і наземних ретрансляторів в умовах постановки шумової загороджувальної завади, що створюється як наземними, так і повітряними (на БЛА) засобами РЕБ, та визначення напрямків її підвищення.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо три радіомережі:

- 1) з повітряним ретранслятором на БЛА (рис. 1);
- 2) з наземним ретранслятором (НР) (рис. 2);
- 3) без ретранслятора (рис. 3).

Радіоелектронне подавлення радіомереж можливе з використанням як потужного наземного постановника завад (НПЗ), так і повітряного ПЗ (ППЗ) малої потужності на борту БЛА. У радіомережах першого та другого типу ПЗ може впливати як на приймачі наземних радіостанцій (РС), так і ретранслятора, у мережах третього типу – тільки на приймачі наземних радіостанцій.

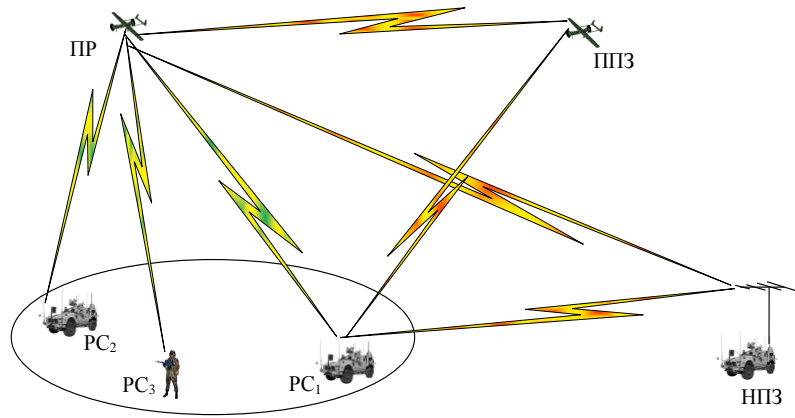


Рис. 1. Варіанти постановки навмисних завад радіомережі з повітряним ретранслятором

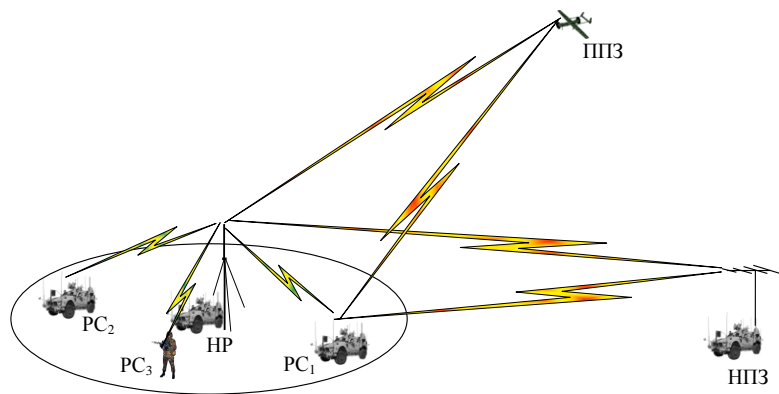


Рис. 2. Варіанти постановки навмисних завад радіомережі з наземним ретранслятором

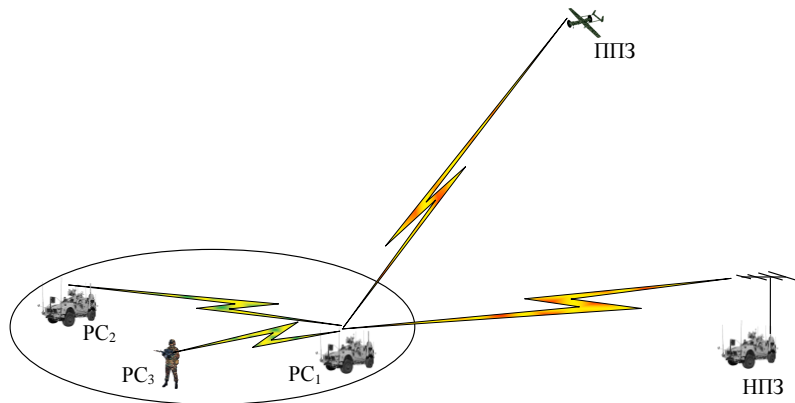


Рис. 3. Варіанти постановки навмисних завад радіомережі без ретранслятора

Для оцінки завадозахищеності радіолінії необхідно розрахувати енергетичну перевагу сигналу над завадою (відношення сигнал/завада (ВСЗ)) на вході приймача:

$$\zeta = P_c - P_z, \quad (1)$$

де P_c та P_z – рівні сигналу та завади, відповідно. Очевидно, що для забезпечення можливості передачі інформації у різних режимах роботи (для різних сигнально-кодових конструкцій) необхідно забезпечити ВСЗ від декількох одиниць (низькошвидкісна передача даних (ПД), короткі текстові повідомлення, голос) до понад двадцяти (високошвидкісна ПД).

Розрахунок рівня як корисного сигналу, так і навмисної завади на вході приймача, здійснюється з рівняння радіолінії [19]:

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

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 [18]. Втрати у вільному просторі визначаються з виразу

$$L_0 = 10 \lg \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2, \quad (3)$$

де R – відстань між передавачем та приймачем, λ – довжина хвилі.

На підставі виразу (2) можуть бути розраховані радіолінії всіх видів. Відмінність полягає у методиці розрахунку множника ослаблення ($L_{\text{сер}}$).

Існує низка методик розрахунку втрат за рахунок середовища передачі $L_{\text{сер}}$, розглянутих у роботах [18, 20 – 23]. Більшість з них розроблено для радіомереж, де використовуються базові станції (ретранслятори), та мають обмеження щодо застосування за такими параметрами, як робоча частота, висоти підвісу антен ретранслятора та радіостанцій тощо.

Для розрахунку рівнів сигналу та завади у радіомережах з повітряним та наземним ретрансляторами з певними допущеннями скористаємося відомою моделлю Хата для умов відкритої (сільської) місцевості [21, 22]. Умови застосування моделі Хата: діапазон частот 100 – 1500 МГц, відстань між передавачем (ретранслятором) та приймачем (радіостанцією) – від 1 до 300 км, висота антени передавача від 30 до 200 м, висота антени приймача – від 1 до 10 м.

Сумарні втрати сигналу ($L_0 + L_{\text{сер}} + W_3$) в умовах міста (середніх розмірів) L_u визначаються з виразу

$$L_u = 69,55 + 26,16 \lg(f) - 13,82 \lg(h_1) - \alpha(h_2) + (44,9 - 6,55 \lg(h_1)) (\lg(R))^b, \quad (4)$$

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

$$b = 1 + (0,14 + 0,000187f + 0,00107h_1') (\log(0,05R))^{0,8}, \quad (5)$$

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

Сумарні втрати сигналу в умовах сільської місцевості L_r визначаються з виразу

$$L_r = L_u - 4,78 (\lg(f))^2 + 18,33 \lg(f) - K, \quad (6)$$

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

Вихідні дані.

Радіолінія: режим роботи – ППРЧ, середня частота $f = 300$ МГц ($\lambda = 1$ м); ширина хопсету $\Delta f_X = 5 \dots 400$ МГц; ширина каналу $\Delta f_{K1} = 25$ кГц, $\Delta f_{K2} = 1$ МГц (типові значення, які відповідають режимам роботи УКХ радіозасобів виробництва компаній Aselsan та Harris з підтримкою ППРЧ [24]); для наземних радіостанцій потужність передавача $P_{\text{ПД}} = 10$ Вт, коефіцієнт підсилення антени $G_A = 0$ дБі, висота підвісу антени $h = 2,2$ м; для повітряного ретранслятора $P_{\text{ПД}} = 5$ Вт, $G_A = 0$ дБі, $h = 200$ м; для наземного ретранслятора $P_1 = 50$ Вт, $G_A = 0$ дБі, $h = 30$ м. Довжина радіолінії (відстань від радіостанції до ретранслятора) $R_{\text{рл}}$ може змінюватися від 0 до 20 км за рахунок віддалення ретранслятора (у радіомережі без

ретранслятора – кореспондента) від радіостанції. Відношення сигнал/завада будемо розраховувати на радіолінії, утвореній між ретранслятором та радіостанцією, найближчою до засобів РЕП.

Повітряний постановник завад: $P_{\text{ПД}} = 5$ Вт, $G_A = 0$ дБі, $h = 200$ м, відстань до наземної радіостанції $R = 2$ км. Наземний постановник завад: $P_{\text{ПД}} = 1$ кВт, $G_A = 13$ дБі, $h = 30$ м, відстань до наземної радіостанції $R = 10$ км. Постановники завад формують широкопasmову загороджувальну заваду (ШЗЗ) з потужністю $P_{\text{ПД}}$ у смузі частот, що відповідає ширині хопсету ($\Delta F_{\text{Ш}} = \Delta f_X$).

Для спрощення розрахунків втрати у всіх фідерних трактах приймемо рівними 0.

Допущення, які були прийняті (додатково до вихідних даних) при розрахунках для виконання умов застосування моделі Хата.

1. Радіомережа з ПР.

1.1. Подавлення приймача ПР.

При розрахунках рівнів сигналу та завади на вході приймача ПР, передавач та приймач міняються місцями:

радіолінія НПЗ – ПР: $h_{\text{НПЗ}} = 200$ м; $h_{\text{ПР}} = 10$ м;

радіолінія РС – ПР: $h_{\text{РС}} = 200$ м; $h_{\text{ПР}} = 2,2$ м.

З теорії розповсюдження радіохвиль відомо, що перешкоди (рельєф місцевості, будівлі тощо) поблизу передавача значно більше послаблюють сигнал, ніж поблизу приймача, тому реальний рівень сигналу на вході приймача ретранслятора буде нижчим, проте такий розрахунок забезпечить меншу різницю розрахованого значення з реальним, ніж у випадку використання формули для розрахунку втрат у вільному просторі. Оскільки відстань РС – ПР менша, ніж НПЗ – ПР, реальне ВСЗ на вході приймача ПР буде більшим, порівняно з розрахованим.

Радіолінію ППЗ – ПР вважатимемо такою, що відповідає умовам вільного простору ($L_{\text{сер}}$ у виразі (2) приймемо рівним нулю). ВСЗ при використанні ППЗ буде дещо меншим, порівняно з розрахованим (через заміну місць передавача та приймача на радіолінії РС – ПР).

1.2. Подавлення приймача радіостанції.

Висота підвісу антени НПЗ складає близько 10 м, а при проведенні розрахунків приймалося 30 м, тому реальне ВСЗ для варіанту подавлення НПЗ – РС буде дещо більшим, порівняно з розрахованим.

2. Радіомережа з НР.

2.1. Подавлення приймача НР.

Радіолінія НПЗ – НР: $h_{\text{НПЗ}} = 30$ м; $h_{\text{НР}} = 10$ м (в реальних умовах висоти підвісу антен НПЗ та НР приблизно однакові, тому рівень завади на вході приймача НР буде нижчим). Радіолінія РС – НР: $h_{\text{РС}} = 30$; $h_{\text{НР}} = 2,2$ (в реальних умовах рівень сигналу буде нижчим). Оскільки для обох радіоліній розрахунковий рівень сигналу вищий, за реальний, то результуюча похибка розрахунку ВСЗ для варіанту подавлення НПЗ – НР зменшується.

На радіолінії ППЗ – НР $h_{\text{НР}}$ приймається рівною 10 м, на радіолінії РС – НР $h_{\text{НР}}$ приймається рівною 30 м. Тому реальне ВСЗ на вході приймача НР буде нижчим.

2.2. Подавлення приймача радіостанції.

Згідно прийнятих вихідних даних висота підвісу антен як НПЗ, так і НР складає 30 м. Якщо врахувати, що в реальних умовах висоти підвісу для обох радіоелектронних засобів будуть меншими (приблизно 10 м), то можна припустити, що величина ВСЗ при подавленні радіостанцій буде приблизно відповідати розрахованій. Ефективність повітряного ПЗ при подавленні радіостанцій буде дещо вищою, порівняно з розрахованою, оскільки реальна висота підвісу антени НР складає 10 м (при розрахунках приймається 30). У той же час слід зазначити, що зазначені допущення та висновки, зроблені на їх основі є досить умовними, оскільки реальні висоти підвісу антен НР, радіостанцій та НПЗ залежать від висоти рельєфу місцевості.

Перед проведенням розрахунків необхідно визначити, яка потужність передавача станції завад витрачається на подавлення корисного сигналу з ППРЧ.

Спектральна щільність потужності завади дорівнює

$$S_{ПЗ} = P_{ПЗ} / \Delta F_{ПЗ}, \quad (7)$$

де $S_{ПЗ}$ – спектральна щільність потужності завади, Вт/Гц; $P_{ПЗ}$ – потужність передавача станції завад, Вт; $\Delta F_{ПЗ}$ – смуга частот шумової завади, Гц.

Введемо поняття умовного елементарного каналу з шириною смуги Δf_k . У режимі ППРЧ радіолінія (РЛ) в кожен момент використовує один з умовних елементарних каналів з потужністю $P_{РЛ}$, що дорівнює вихідній потужності передавача. У смузі завади шириною $\Delta F_{ПЗ}$ міститься

$$N = \Delta F_{ПЗ} / \Delta f_k$$

умовних елементарних каналів. Потужність завади, що приходить на один умовний елементарний канал, дорівнює:

$$P_{ПЗ0} = S_{ПЗ} \cdot \Delta f_k = P_{ПЗ} / N. \quad (8)$$

Саме значення $P_{ПЗ0}$ необхідно підставляти у вираз (2) замість P_1 при розрахунку рівня завади на вході приймача.

Завадозахищеність радіоліній у радіомережах з повітряним та наземним ретрансляторами. Результати розрахунків очікуваного відношення сигнал/завада в залежності від відстані між ретранслятором та радіостанцією та для трьох значень ширини хопсету (10, 100, 400 МГц) представлені на рис. 4. Видно, що найбільш ефективним з погляду системи РЕП противника є вплив потужного наземного ПЗ на приймач ретранслятора (як повітряного, так і наземного), причому очікуване ВСЗ на вході приймача приблизно однакове у радіомережах обох типів. За усіма іншими варіантами РЕП радіомережа з ретранслятором на борту БЛА має вищу завадозахищеність, порівняно з радіомережею з наземним ретранслятором. Це можна пояснити значно кращими умовами розповсюдження радіохвиль (меншими втратами) між ретранслятором та радіостанціями. Очевидно, що для підвищення завадозахищеності радіолінії необхідно збільшувати ширину хопсету та зменшувати дальність радіоліній за рахунок наближення ретранслятора до радіостанцій.

При цьому, у випадку повітряного ретранслятора важливо забезпечити необхідне віддалення від противника для унеможливлення впливу його засобів РЕП на канали прийому сигналів управління та геопозиціонування [17]. З погляду ослаблення сигналу завади на вході приймача, при визначенні висоти та траєкторії баражування ПР на БЛА необхідно враховувати характеристики спрямованості його антени та здійснювати аналіз місцевості (побудову профілю, сукупності профілів між точкою знаходження БЛА та точкою встановлення антени ПЗ) з метою використання її захисних властивостей [17]. При ширині каналу 1 МГц ВСЗ зменшується приблизно на 16 дБ (вигляд графіків такий же самий, як на рис. 4).

Крім того, для забезпечення необхідної достовірності передачі інформації у широкосмуговому режимі необхідно набагато більше відношення сигнал/(шум + завада). Отже, завадозахищеність широкосмугового режиму роботи значно менша. Відомо, що ефективність постановки шумових завад можна підвищити за рахунок не повного, а часткового перекриття хопсету, але з більшою спектральною щільністю потужності [16].

Тому очевидно є необхідність вживати додаткових заходів для підвищення завадозахищеності, особливо у широкосмуговому режимі. Додатково зменшити рівень сигналу на вході приймача повітряного ретранслятора можна вибором висоти його баражування та віддалення від станції завад з метою просторової фільтрації за рахунок направлених властивостей антени.

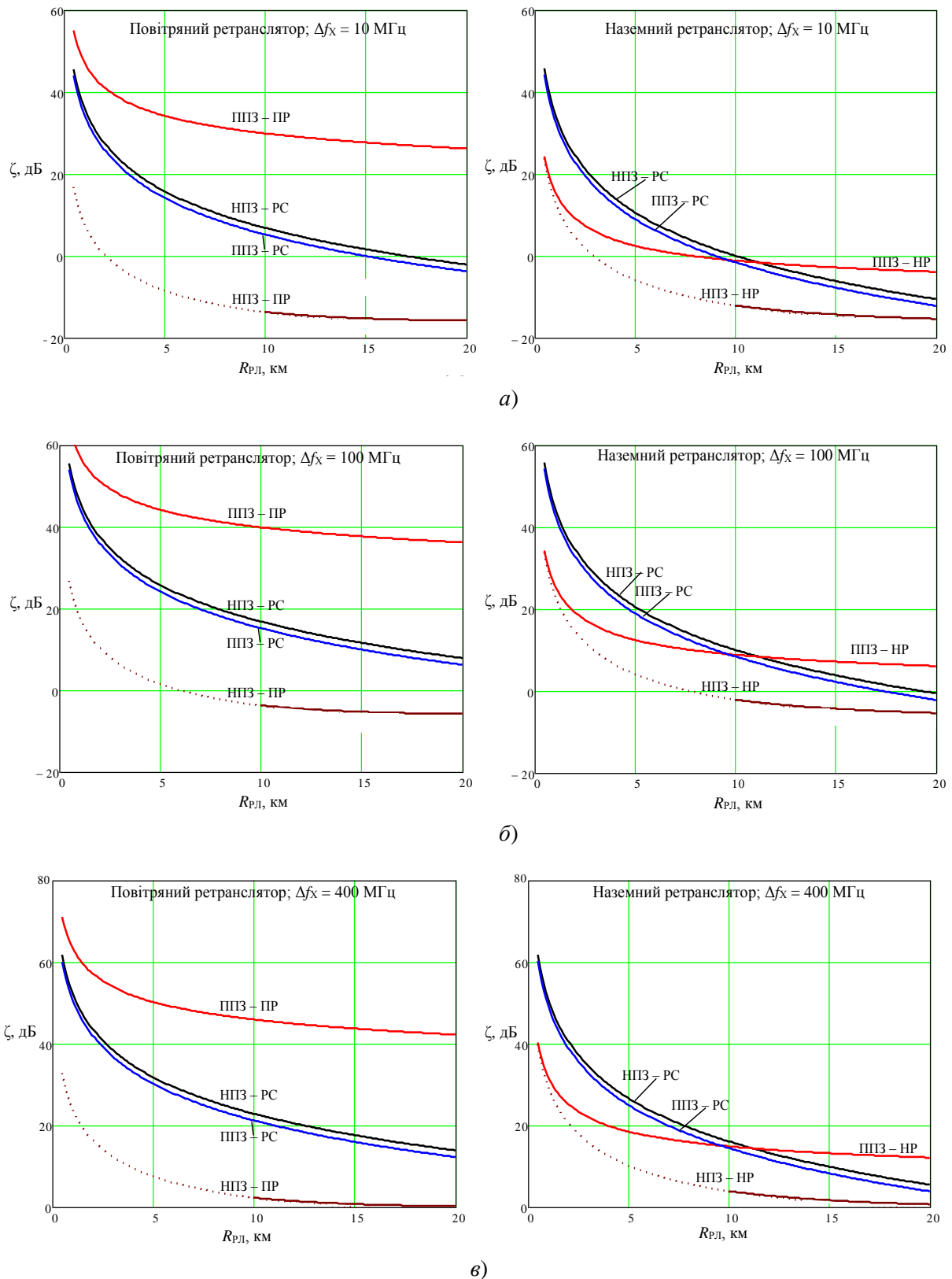


Рис. 4. Залежність величини відношення сигнал/завада від відстані між радіостанцією та ретранслятором ($\Delta f_k = 25$ кГц) для різних варіантів постановки завад та значень ширини хопсету: а) 10 МГц; б) 100 МГц, в) 400 МГц

Вищу завадозахищеність для будь-якого з чотирьох варіантів подавлення будуть забезпечувати режими роботи з підтримкою MANET (вужькосмуговий – NBNR, широкосмуговий – WBNR [24]), оскільки для них подавлення ретранслятора не призведе до

повної втрати зв'язку в мережі – маршрут передачі може проходити через одну або декілька наземних радіостанцій, крім того, зменшуються відстані між радіостанціями на окремих радіолініях, а значить – збільшується відношення сигнал/(шум + завада) в точці прийому. Слід зазначити, що у таких мережах термін „ретранслятор” є умовним, і позначає радіостанцією з порівняно великою висотою підвісу антени. Тому в таких мережах можуть бути розгорнуті одночасно декілька як наземних, так і повітряних ретрансляторів.

У режимах без підтримки MANET доцільно для кожної мережі передбачати запасний ретранслятор, що рухається по іншій траєкторії та налаштований на інші частоти. У той же час, у випадку постановки завади з потужної наземної станції РЕБ у напрямку повітряного ретранслятора може виникнути ситуація, коли більшість радіостанцій не потраплятимуть у зону покриття ретранслятора, де забезпечується задовільне відношення сигнал/(шум + завада).

Завадозахищеність радіомережі без ретранслятора.

Для оцінки очікуваного ВСЗ у радіомережі без ретранслятора (або на окремих радіолініях з відносно низько розташованими антенами у радіомережах класу MANET) скористаємося моделлю, запропонованою в [17]. Розрахунок радіоліній ПЗ – РС та РС – РС проведемо за формулою Введенського:

$$E = \frac{4\pi\sqrt{30P_1}h_1h_2}{\lambda R^2}, \quad (9)$$

де E – напруженість електричного поля поблизу приймальної антени. Умовою застосування формули (9) є

$$R > \frac{18h_1h_2}{\lambda}. \quad (10)$$

Радіолінію ПЗ – РС, через невиконання умови (10), будемо розраховувати для умов вільного простору:

$$E = \frac{\sqrt{30P_1}}{R}. \quad (11)$$

Оскільки напруженість у формулах (9), (11) виражена у абсолютних величинах, то ВСЗ будемо розраховувати за формулою [17]:

$$\zeta = (E_c/E_3)^2.$$

Видно (рис. 5), що радіомережі без ретранслятора в умовах постановки ширококугової загороджувальної завади забезпечують меншу дальність зв'язку, порівняно з мережами з ретранслятором. При цьому малопотужний повітряний ПЗ, на відміну від радіомереж з ретранслятором, значно ефективніший (приблизно на 10 дБ), ніж потужний наземний з ефективною антеною. Якщо провести розрахунки для вихідних даних, які дозволяють застосувати обидві моделі (Хата та Введенського), а саме: $h_{\text{ПЗ}} = 50$ м (дозволяє забезпечити виконання умови (10)), висоти підвісу антен кореспондента та наземного ПЗ складають 30 м (дозволяє використати модель Хата), отримані результати практично однакові. Тому можна припустити, що результати розрахунків ВСЗ у радіомережі без ретранслятора за моделлю, запропонованою в [17], є цілком достовірними.

У ширококуговому режимі роботи ($\Delta f_k = 1$ МГц) ВСЗ, як і для радіомереж з ретранслятором, є приблизно на 16 дБ меншим, порівняно з вузькосмуговим режимом.

Висновки. Застосування повітряних ретрансляторів значно зменшує ефективність радіоелектронного подавлення радіоліній як наземними, так і повітряними засобами РЕБ. Радіомережі класу MANET мають вищу завадозахищеність, порівняно з „класичними” радіомережами, за рахунок можливості багатократної ретрансляції інформаційних пакетів через декілька проміжних радіостанцій.

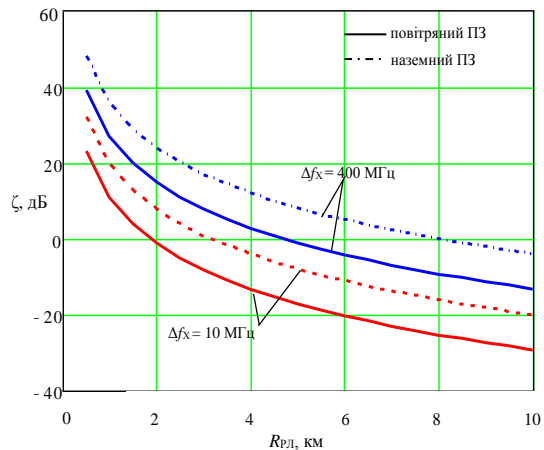


Рис. 5. Залежність відношення сигнал/завада від протяжності радіолінії у радіомережі без ретранслятора ($\Delta f_k = 25$ кГц)

Найбільшу ефективність серед варіантів подавлення радіомереж з ППРЧ та повітряним ретранслятором широкосмисловою загороджувальною завадою має вплив потужного наземного постановника завад на приймач ретранслятора. Ефективність впливу повітряного постановника завад малої потужності на приймачі наземних радіостанцій практично така ж сама, як і наземного. Тому найбільш доцільною стратегією з погляду системи РЕП є одночасне застосування наземних постановників завад для подавлення повітряних ретрансляторів (радіостанцій) та повітряних або наземних – для подавлення наземних радіостанцій. При цьому значно зменшити енергетичний виграш як наземного, так і повітряного постановників завад можна за рахунок раціонального вибору висоти та траєкторії баражування БЛА, а також шляхом застосування направлених антен, адаптивних антенних решіток. Запропонована математична модель дозволяє на етапі планування радіомережі визначати необхідну ширину хопсету та віддалення повітряного ретранслятора від наземних радіостанцій в залежності від режиму роботи.

Напрямами подальших досліджень є наступні:

розробка математичних моделей для розрахунку завадозахищеності радіоліній у радіомережах з повітряним ретранслятором у різних режимах роботи в умовах шумової загороджувальної завади, шумової завади у частині смуги та завади у відповідь;

розробка методики розрахунку розташування (траєкторії руху) повітряних ретрансляторів з урахуванням характеристики спрямованості їх антен.

розробка спеціалізованого програмного забезпечення для розрахунку очікуваних значень відношень сигнал/завада на входах приймачів повітряних та наземних ретрансляторів і радіостанцій з урахуванням реального рельєфу місцевості.

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. 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. Гурський Т.Г. Перспективи використання безпілотних літальних апаратів для радіоелектронного подавлення систем радіозв'язку / Т.Г. Гурський, Л.Л. Бортнік, О.М. Макаручук // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2010. – № 1. – С. 15 – 23.

4. Попов А. О. Загальні тенденції розвитку засобів радіоелектронної боротьби / А. О. Попов, В. В. Твердохлібов // Озброєння та військова техніка. – 2014. – №4. – С. 4 – 11.

5. Радецький В.Г. Безпілотна авіація в сучасній збройній боротьбі: Монографія / В.Г.Радецький, І.С. Руснак, Ю.Г. Даник. – К.: НАОУ, 2008. – 224 с.

6. Беспилотная разведывательная авиация стран мира: история создания, опыт боевого применения, современное состояние, перспективы развития: Монография. – К.: Изд. Дом «Румб», 2008. – 160 с.
7. Теорія і техніка протидії безпілотним засобам повітряного нападу / [В.І. Ткаченко, Ю.Г. Даник, Г.А. Дробаха та ін.]. – Харків: ХВУ, 2002. – 220 с.
8. Згурец С.Г. Оружие Украины. Беспилотники: призыв на войну. Беспилотные авиационные комплексы: создание и применение / С.Г. Згурец, М.Э. Канарский // Журнал Defence Express, 2015. – 95 с.
9. Моисеев В.С. Основы теории эффективного применения беспилотных летательных аппаратов: монография. – Казань: редакционно-издательский центр „Школа”, 2015. – 444 с.
10. Zeng Y. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges / Y.Zeng, R.Zhang, T. J.Lim // IEEE Commun. Mag. – 2008. – Vol. 54. – № 5. – Pp. 36 – 42.
11. Security Analysis of FHSS-type Drone Controller / [H.Shin, K.Choi, Y.Park and oth.] // In International Workshop on Information Security Applications. – 2015. – Springer. – Pp. 240 – 253.
12. Protecting GNSS receivers from jamming and interference / [G.X.Gao, M.Sgammini, M.Lu, N.Kubo] // Proceedings of the IEEE. – 2016. – № 104 (6). Pp. 1327 – 1338.
13. Unmanned aircraft capture and control via GPS spoofing / [A.J.Kerns, D.P.Shepard, J.A.Bhatti, T.E.Humphreys] // Journal of Field Robotics. – 2014. – № 31(4). – Pp. 617 – 636.
14. Farlik J. Detectability and jamming of small UAVs by commercially available low-cost means / J.Farlik, M.Kratky, J.Casar // In Communications (COMM) International Conference. IEEE. – 2016. – Pp. 327 – 330.
15. Особенности построения радиосети группы БПЛА / [В.Н. Шлокин, С.В. Малахов, А.Л. Гостев, Я.Н. Кожушко] // Системи озброєння і військова техніка. – 2013. – № 1(33). – С. 49 – 57.
16. Борисов В.И. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / В.И. Борисов, В.М. Зинчук, А.Е. Лимарев. – М.: РадиоСофт, 2008. – 512 с.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. Голдсмит А. Беспроводные коммуникации. Основы теории и технологии беспроводной связи / Голдсмит А. – М.: Техносфера, 2011. – 904 с.
22. 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.
23. 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.
24. 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.