

М.В. БУГАЙОВ, канд. техн. наук

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРИЙНЯТОГО СИГНАЛУ ПАНОРАМНИМ ЗАСОБОМ РАДІОМОНІТОРИНГУ НА БЕЗПЛОТНОМУ ЛІТАЛЬНОМУ АПАРАТІ

Вступ

В умовах зростаючої інформатизації усіх галузей науки, техніки та суспільства постійно збільшується кількість радіоелектронних випромінюючих засобів. Такі пристрої мають, як правило, малу потужність випромінювання, а щільність їх розміщення в населених пунктах може бути досить високою. Виявлення таких джерел радіовипромінювання (ДРВ), їх локалізація та оцінювання параметрів за допомогою стаціонарних засобів радіомоніторингу (РМ) буде малоєфективним. В основному це пов'язано із відсутністю енергетичної доступності.

На даний час малорозмірні безпілотні літальні апарати (БпЛА) все частіше використовуються для вирішення завдань збирання даних про навколишнє середовище. Розмістивши на БпЛА засіб РМ, можна реалізувати збирання даних про просторові, частотні та часові параметри ДРВ в деякому обмеженому просторі шляхом його обльоту та аналізу прийнятих сигналів. При цьому накладаються обмеження на час збирання та оброблення даних, що пов'язано із обмеженим часом польоту БпЛА. Передача зібраних даних може проводитися відразу після їх оброблення або оброблені дані можуть накопичуватися на БпЛА. Перший підхід вимагає використання деякого ресурсу часу на передачу, що зменшує час на аналіз сигналів.

Радіомоніторинг із використанням БпЛА ведеться, як правило, в умовах відсутності або неповної інформації щодо кількості, положення та параметрів ДРВ, а також про середовище поширення радіохвиль. Відсутність або неповнота апріорної інформації вимагає створення відповідної математичної моделі, що буде враховувати невідомі параметри ДРВ та середовища поширення радіохвиль, а також постійне переміщення засобу РМ на БпЛА.

Стрімкий розвиток БпЛА стимулює їх впровадження для вирішення найрізноманітніших завдань, зокрема ведення РМ. Даному питанню присвячено велику кількість досліджень. У роботах [1 – 4] описано процедури оптимізації траєкторії польоту БпЛА для дослідження відомих ДРВ, часу сканування та передачі даних про результати вимірювань. У [5] запропоновано стратегію сканування, яка мінімізує витрати часу та ресурсів шляхом знаходження оптимальної комбінації кількості сенсорів. У роботах [6 – 10] розглянуто просторово-часовий аналіз радіочастотного спектра із використанням БпЛА. В [11 – 12] показано, що розміщення засобів РМ на БпЛА зумовлено також пошуком вільних частотних каналів для оптимізації зв'язку між окремими БпЛА під час виконання спільних завдань. Результати моделювання поширення радіохвиль для виділення інформації про параметри середовища та прогнозування потужності прийнятого сигналу наведено у [13]. У [14] описано процес аналізу радіочастотного спектра із використанням рою БпЛА. У [15] запропоновано геостатистичне моделювання покриття бездротових мереж. Метод автоматичної 3D реконструкції місцевості і моделювання поширення радіохвиль із використанням алгоритмів машинного навчання запропоновано у [16]. У [17] наведено підхід до реконструкції радіочастотної картини в тривимірному просторі, включаючи коригування траєкторії польоту БпЛА [18]. Систему спектрального картографування за допомогою БпЛА та алгоритм реконструкції спектральних даних і моделі каналу наведено у [19]. Проте у наведених роботах не розглядаються питання математичного моделювання прийнятого сигналу в умовах панорамного аналізу РЧС та обмеженого ресурсу часу на обліт заданої області простору і оцінювання потужності ДРВ.

Метою статті є оптимізація процесу аналізу електромагнітної обстановки із використанням розміщеного на БпЛА панорамного засобу РМ шляхом побудови математичної моделі прийнятого сигналу, що враховує ефекти поширення радіохвиль спричинені переміщенням БпЛА.

Вплив каналу на поширення радіосигналів

Для проведення дослідження виділимо три групи параметрів, що характеризують процес РМ із використанням БпЛА під час польоту: параметри засобу РМ, ДРВ та каналу поширення сигналу. Засіб РМ можна описати такими параметрами: смуга пропускання та чутливість приймача, швидкість сканування, форма діаграми спрямованості (ДС) антени. Також на процес РМ впливатиме швидкість та траєкторія руху БпЛА. До параметрів ДРВ будемо відносити: координати ДРВ, потужність випромінювання, частотно-часові параметри сигналів, форму та орієнтацію в просторі ДС антени, швидкість руху ДРВ. Канал поширення радіохвиль будемо характеризувати ступенем прояву ефектів відбиття, дифракції, розсіювання та інтерференції в різних діапазонах частот та швидкістю їх зміни при переміщенні БпЛА. У даній роботі обмежимося діапазоном частот від 100 до 6 ГГц. Основними факторами, що впливатимуть на рівень прийнятого сигналу, в даному випадку є втрати на поширення, затінення, завмирання та неізотронність ДС антен ДРВ та БпЛА. Доплерівським зсувом частоти в даних умовах можна знехтувати, оскільки при швидкості руху БпЛА 150 км/год і частоті сигналу ДРВ 6 ГГц зсув частоти не перевищуватиме 1 кГц, що для вирішення завдань виявлення сигналів та оцінювання їх зовнішніх параметрів є несуттєвим.

Моделі втрат на поширення радіохвиль дозволяють враховувати співвідношення між потужностями передавача і прийнятого сигналу в залежності від відстані між ними. Потужність прийнятого сигналу однією антеною за ідеальних умов можна розрахувати із використанням рівняння Фрііса [20]:

$$P_r = P_t G_r(\theta, \gamma) G_t(\theta, \gamma) \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2, \quad (1)$$

де P_t – потужність випромінювання ДРВ; θ, γ – азимут і кут місця відповідно; $G_r(\theta, \gamma)$ – коефіцієнт підсилення антени ДРВ в напрямку на антену засобу РМ; $G_t(\theta, \gamma)$ – коефіцієнт підсилення антени засобу РМ в напрямку на антену ДРВ; λ – робоча довжина хвилі сигналу ДРВ; r – відстань між ДРВ та засобом РМ.

У загальному випадку значення азимуту та кута місця є функціями від часу, що описують взаємне положення ДС антен ДРВ та засобу РМ.

Дане рівняння не враховує наявність перешкод між антенами, багатопроменевого поширення радіохвиль, втрат у фідерах і роз'ємах, та втрат за рахунок неспівпадіння поляризацій, а також інші втрати. Проте у даному дослідженні суттєвою є саме залежність зміни рівня прийнятого сигналу від різних параметрів, а не його абсолютний рівень. Для отримання коректних результатів за виразом (1) засіб РМ повинен знаходитися в дальній зоні (зоні Фраунгофера).

Крім відстані на рівень потужності прийнятого сигналу впливає ряд факторів. Наприклад, між антенами передавача і приймача можуть бути розташовані дерева і будівлі, викликаючи при цьому тимчасове зменшення рівня прийнятого сигналу під час руху БпЛА. У загальному випадку врахувати при моделюванні положення усіх перешкоджаючих об'єктів в області польоту БпЛА неможливо, тому вводять стандартний метод врахування варіацій рівня потужності сигналу на приймачі як випадковий вплив – затінення. Для даного фактора рівень втрат на відстані r можна записати в такому вигляді [21]:

$$L(r) = L(r_0) \left(\frac{r}{r_0} \right)^v \chi, \quad (2)$$

де r_0 – деяка опорна відстань у вільному просторі, на якій втрати сигналу складають $L(r_0)$; v – коефіцієнт втрат на поширення радіохвиль, який залежить від типу навколишнього середовища і знаходиться в межах 2-6; χ – випадкова величина затінення.

У такому разі втрати на поширення радіохвиль можуть розглядатись як середнє значення (2) з дисперсією затінення χ . Оскільки затінення викликають макроскопічні об'єкти, то типова кореляційна відстань складає від одиниць до десятків метрів. Затінення відносять до великомасштабних завмирань.

Значення χ є логарифмічно нормальною випадковою величиною:

$$\chi = 10^{0,1\xi}, \quad (3)$$

де ξ – нормальна випадкова величина із нульовим середнім та середньоквадратичним відхиленням σ_ξ . Типові значення σ_ξ складають 4–13 дБ і також залежать від типу середовища.

Втрати потужності сигналу, що описують виразом (2) підпорядковані логарифмічно-нормальному розподілу [22].

На відміну від втрат на поширення і затінення, які є впливом великомасштабних затухань від навколишніх об'єктів та відстані, найбільш впливовими в системах мобільного зв'язку є маломасштабні завмирання. Серед багатьох фізичних ефектів у радіоканалі на формування маломасштабних завмирань найсильніше впливають багатопротеневе поширення, швидкість руху ДРВ та засобу РМ, швидкість оточуючих об'єктів і ширина смуги передачі сигналу. При дрібномасштабному завмиранні рівень сигналу може змінюватися на 30–40 дБ при переміщенні засобу РМ лише на частину довжини хвилі.

Просторова мінливість сигналу приймачем, що рухається, сприймається як мінливість у часі. Просторову мінливість розділяють на швидкі завмирання, викликані багатопротеневим поширенням, що виникають на деяких довжинах хвиль, та повільні завмирання внаслідок змін затінення. Відбиття сигналу від місцевих предметів можуть бути корисними тим, що усувають до певної міри зони радіотіні.

У масштабі кількох довжин хвиль мінливість сигналу визначається впливом багатопротеневого поширення, що призводить до завмирань, які описують моделями Релея або Райса. Завмирання Релея є прийнятною моделлю, коли багато об'єктів у середовищі відбивають і розсіюють сигнал на його шляху до приймальної антени. Причому між приймальною і передавальною антенами немає прямої видимості. Це характерно для міських або лісових районів. Для випадку завмирань Райса крім перевідбиттів та розсіювання є також пряма видимість між антенами. Завмирання Райса описуються параметром, що визначається співвідношенням потужності складової, яка поширюється в межах прямої видимості, до дисперсії решти багатопротеневого складових [23].

У часовій області завмирання поділяють на швидкі та повільні, що пов'язано із відношенням тривалості пакету даних та швидкості зміни характеристик каналу. У частотній області розрізняють частотно-селективні (для відносно ширококутових сигналів) та частотно-незалежні завмирання [22].

Більшість радіосистем зв'язку функціонують у складному середовищі поширення хвиль, котре не можливо змоделювати точно, визначаючи траєкторію поширення променів і втрати на трасі поширення. Існують моделі визначення втрат на трасі для прогнозування затухання в типовому робочому середовищі, наприклад для міських і приміських районів. Ці моделі головним чином базуються на даних емпіричних вимірювань із врахуванням частотного діапазону і географічного району [24].

У загальному випадку завмирання можна розглядати як результат впливу на сигнал мультипликативної перешкоди, що призводить до суттєвих коливань потужності прийнятого сигналу.

Моделювання прийнятого сигналу

На антену БпЛА надходить велика кількість радіохвиль від різних ДРВ і різними шляхами за рахунок багатопротеневого поширення. На рис. 1 наведено схему польоту БпЛА із засобом РМ через задану область простору, в якій розміщено кілька ДРВ, причому деякі з них можуть бути рухомими, наприклад інші БпЛА та портативні радіоелектронні засоби.

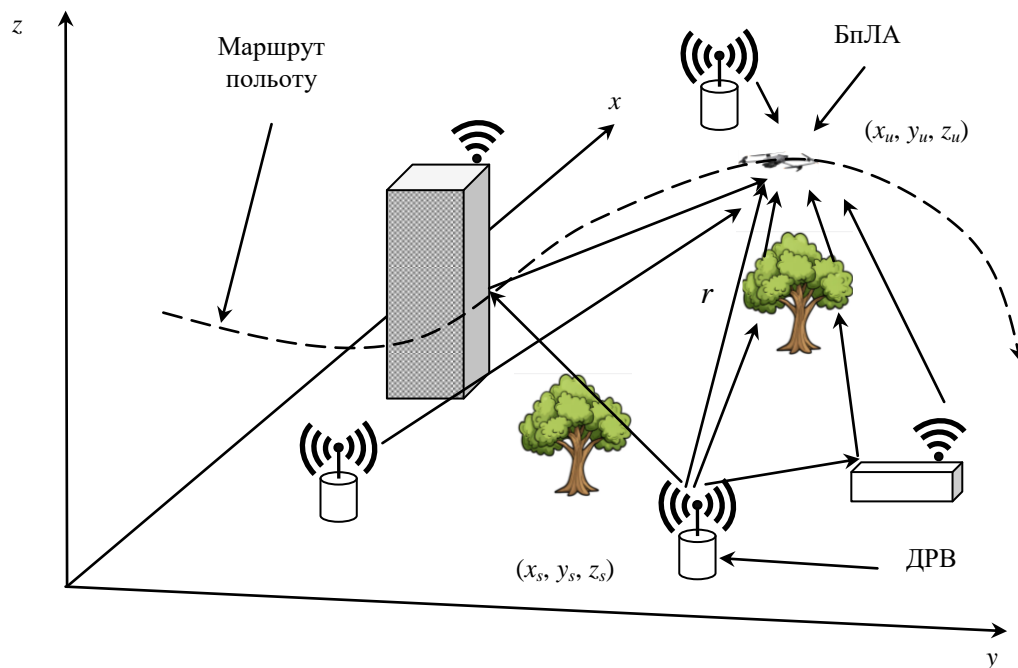


Рис. 1. Взаємне розміщення засобу РМ на БПЛА та ДРВ

Модель багатопроменевого поширення сигналу часто описують із використанням імпульсної характеристики (ІХ) каналу. Втрати сигналу за рахунок згасання та швидких завмирань часто використовують для моделювання впливу велико- та дрібномасштабних флуктуацій прийнятого сигналу. ІХ використовують для опису часових затримок в каналі. Узагальнену модель прийнятого на одну антену засобу РМ сигналу із використанням ІХ каналу можна записати в такому вигляді:

$$x(t) = \sum_{i=1}^{N_S} s_i(t) * h_i(t) + \xi(t), \quad (4)$$

де N_S – кількість ДРВ; $s_i(t)$ – сигнал i -го ДРВ; $h_i(t)$ – ІХ каналу поширення сигналу від i -го ДРВ до приймальної антени; $\xi(t)$ – внутрішній шум приймача.

Проте, якщо координати БПЛА із засобом РМ в кожен момент часу ще можна визначити, то положення ДРВ відносно як засобу РМ так і інших оточуючих предметів є невідомим. Тому характеристики каналу поширення досить важко спрогнозувати і оцінити їх вплив на рівень прийнятого сигналу. Також за рахунок взаємного переміщення приймача та ДРВ канал поширення можна вважати нестационарним (зі змінними в часі параметрами). Тому ІХ каналу поширення можна записати в такому вигляді [25]:

$$h(t) = \sum_{i=1}^{N_p(t)} \alpha_i(t) \delta(t - t_i(t)) e^{j\varphi_i(t)}, \quad (5)$$

де $N_p(t)$ – кількість променів поширення сигналу в момент часу t ; $\alpha_i(t)$ – амплітуда сигналу в i -му промені в момент часу t ; $t_i(t)$ – затримка сигналу в i -му промені в момент часу t ; $\varphi_i(t)$ – фаза сигналу в i -му промені в момент часу t , що включає набіг фази за рахунок поширення, відбиття та ефекту Доплера; $\delta()$ – дельта-функція.

Зміна фази прийнятого сигналу за рахунок впливу ефекту Доплера можна визначити з такого рівняння:

$$\varphi_{Di}(t) = f_0 \frac{v}{c} \cos \vartheta_i(t), \quad (6)$$

де f_0 – несуча частота радіосигналу; v – швидкість БПЛА; c – швидкість поширення радіохвиль; ϑ_i – кут між вектором швидкості та напрямком поширення радіохвилі.

Параметри IX каналу поширення є випадковими процесами, а їх залежність від часу пояснюється зміною взаємного положення ДРВ та засобу РМ через переміщення останнього, що призводить до змін умов поширення радіохвиль (кількості шляхів поширення, їх характеристик, довжини шляху поширення кожного променя). Варто відмітити, що параметр α змінюється відносно повільно в обмеженій ділянці простору, тоді як φ змінюється суттєво при малих змінах відстані.

З урахуванням виразів (4) та (5) математичну модель прийнятого сигналу можна записати у такому вигляді:

$$x(t) = \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{l=1}^{N_p(t)} \alpha_{il}(t) s_i(t - t_{il}(t)) e^{j(2\pi f_0(t - t_{il}(t)) + \varphi_{il}(t))} + \xi(t), \quad (7)$$

де $\alpha_{il}(t)$ – амплітуда сигналу i -го ДРВ в l -му промені в момент часу t ; $\varphi_{il}(t)$ – фаза сигналу i -го ДРВ в l -му промені в момент часу t .

Затримка часу поширення сигналу по l -му шляху від i -го ДРВ:

$$t_{il}(t) = r_{il}(t)/c, \quad (8)$$

де $r_{il}(t)$ – довжина шляху поширення радіохвилі від i -го ДРВ до засобу РМ по l -шляху.

Дальність прямої видимості між антенами ДРВ та засобу РМ в кожен момент часу можна визначити з рівняння

$$r = \sqrt{(x_s - x_u)^2 + (y_s - y_u)^2 + (z_s - z_u)^2}, \quad (9)$$

де (x_s, y_s, z_s) та (x_u, y_u, z_u) – координати ДРВ та засобу РМ.

Вираз (7) відображає «тонку» структуру прийнятого сигналу, включаючи амплітудно-фазові співвідношення. Складність процесу поширення радіохвиль унеможливило отримання однієї моделі, якою можна було б точно описати втрати сигналу для усіх типів середовищ та діапазонів частот. Тому часто доцільно використати просту модель, яка відображає сутність поширення сигналу, не вдаючись до складних моделей втрат на шляху, які в будь-якому випадку є лише наближенням до реального каналу [26]. Тут же показано, що зміна рівня сигналу в залежності від дальності між передавачем та приймачем визначається такими факторами: втратами на поширення, затінення та завмирання за рахунок багатопроменевого поширення. При цьому припускається, що приймач переміщується зі сталою швидкістю v . Тоді потужність прийнятого сигналу буде в загальному випадку нестационарним процесом.

Для оцінювання потужності прийнятого засобом РМ сигналу з частотою f в момент часу t будемо використовувати модель, що враховує крім IX каналу поширення неізотропність ДС антени ДРВ та засобу РМ:

$$P_r(t, f) = P_t \underbrace{\left(\frac{c}{4\pi r(t) f} \right)^{v(t)}}_1 \underbrace{\frac{1}{\chi(t, f)}}_2 \underbrace{m(t, f)}_3 \underbrace{G_r(\theta(t), \gamma(t)) G_t(\theta(t), \gamma(t))}_4. \quad (10)$$

Математичну модель потужності прийнятого сигналу (10) можна розглядати як добуток чотирьох функцій часу, які змінюються з різною швидкістю:

1 – повільна, що визначається зміною дальності між передавальною і приймальною антенами. При цьому значення коефіцієнта втрат на поширення радіохвиль $v(t)$ змінюється в часі за рахунок переміщення засобу РМ через різні середовища. Відстань між ДРВ та БПЛА $r(t)$ визначається траєкторією його польоту;

2 – швидка, що визначається ефектом затінення.

Просторова коваріація ефекту затінення описується таким виразом [27, 28]:

$$C(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2) = \sigma_{\xi}^2 e^{-\frac{|\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1|}{r_c}}, \quad (11)$$

де $\mathbf{p}_1 = (x_s, y_s, z_s)$ та $\mathbf{p}_2 = (x_u, y_u, z_u)$; r_c – кореляційна відстань затінення, яка залежить від розміру перешкоди і складає від кількох до десятків метрів.

Під час зміни відстані між ДРВ та засобом РМ дана просторова мінливість змінюється на часову і масштабується швидкістю переміщення БпЛА v :

$$C(t_1, t_2) = \sigma_{\xi}^2 e^{-\frac{v}{r_c} |t_2 - t_1|}; \quad (12)$$

3 – дуже швидко, що визначається багатопробним поширенням.

Для статистичного опису радіоканалу із рухомим приймачем використовують розподіл Релея. Даному розподілу підпорядковуються значення обвідної прийнятого сигналу в каналі без частотно-селективних завмирань, тобто обвідна окремої багатопробної складової. Відомо, що обвідна суми квадратів центральних гаусових випадкових процесів розподілена за законом Релея. Для моделювання завмирань Релея використовують метод Джейка [29]. Низькочастотна комплексна обвідна прийнятого сигналу формується в результаті суперпозиції деякої кількості гармонік N_p з випадковими параметрами:

$$m(t) = \sqrt{s_I^2(t) + s_Q^2(t)}, \quad (13)$$

де дійсна та уявна частину записують відповідно до таких виразів:

$$s_I(t) = \frac{1}{\sqrt{N_p}} \sum_{i=1}^{N_p(t)} I_i \cos(2\pi F_d \cos \vartheta_i t + a_i), \quad s_Q(t) = \frac{1}{\sqrt{N_p}} \sum_{i=1}^{N_p(t)} Q_i \sin(2\pi F_d \cos \vartheta_i t + b_i), \quad (14)$$

де F_d – максимальне значення частоти Доплера; I_i, Q_i – випадкові значення амплітуд гармонік; ϑ_i – кут приходу радіохвилі, a_i, b_i – випадкові значення фаз, що рівномірно розподілені в діапазоні $[0, 2\pi]$.

Для моделювання завмирання Райса використовують суму нецентрально-гаусових випадкових процесів.

Швидкість відносного переміщення засобу РМ та ДРВ визначає наскільки швидко змінюється рівень прийнятого сигналу. Часовий інтервал між мінімумами (максимумами) рівня завмирань складає наближено півперіоду частоти Доплера, що відповідає переміщенню приймача (передавача) на половину довжини хвилі несучої частоти сигналу;

4 – складова впливу неізотропності ДС антен засобу РМ та ДРВ може проявлятися на усі інші складові в залежності від їх форми та параметрів руху БпЛА.

Припускаємо, що ДС антени ДРВ не змінюється в часі. Тоді даний фактор є детермінованим проте невідомим. Ступінь впливу даного чинника на рівень прийнятого сигналу визначається формою ДС та її орієнтацією відносно засобу РМ на БпЛА.

На рис. 2 наведено схему переміщення БпЛА на площині відносно одного ДРВ та пояснення втрат сигналу на різних ділянках траєкторії польоту. Якщо відсутнє затінення, то будемо вважати, що є умови прямої видимості і завмирання, підпорядковані розподілу Райса, які мають меншу глибину порівняно із завмираннями Релея. Також припускаємо, що антена засобу РМ є неспрямованою.

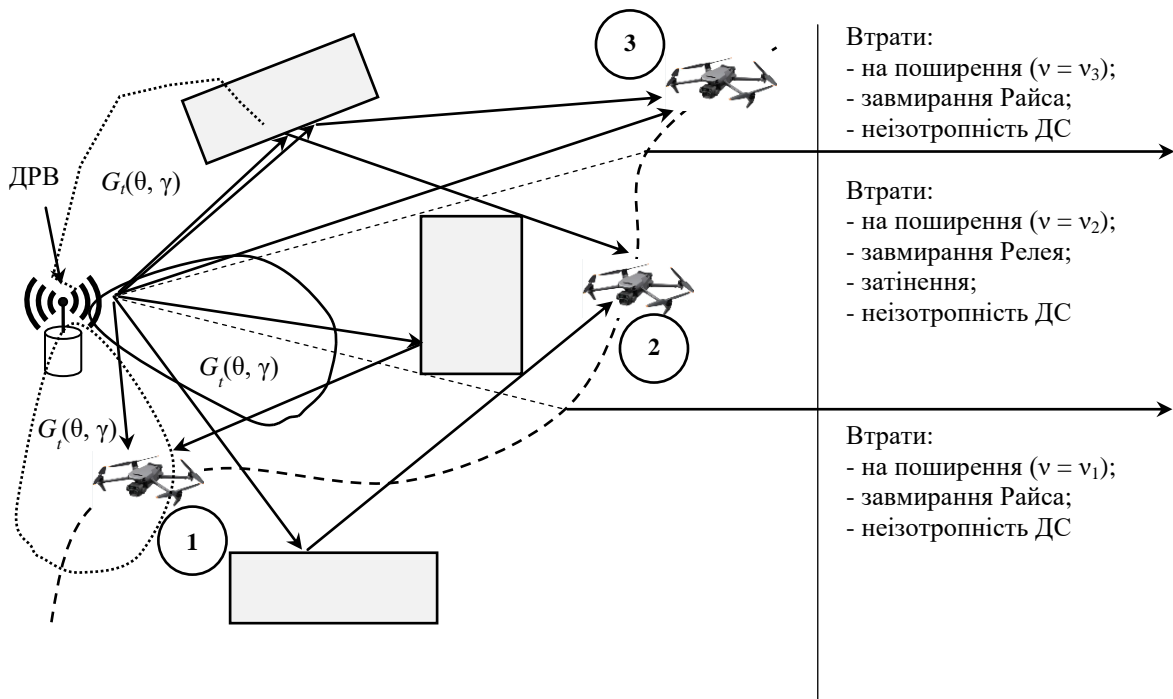


Рис. 2. Схема переміщення БПЛА відносно одного ДРВ

При знаходженні БПЛА із засобом РМ в положенні 1 є умови прямої видимості, він знаходиться найближче до ДРВ та в максимумі ДС його антени. Тому рівень прийнятого сигналу буде високим із незначними пульсаціями, що спричинені завмираннями Райса. У другому положенні відсутня пряма видимість через затінення, що спричинить логарифмічно-нормальне затухання та завмирання Релея. Засіб РМ знаходиться в максимумі ДС. Тому на прийнятий сигнал впливатимуть швидкі та дуже швидкі глибокі завмирання. У третьому положенні між ДРВ та БПЛА є пряма видимість і засіб РМ знаходиться в мінімумі ДС антени ДРВ. Тому в даній точці простору рівень прийнятого сигналу буде невисоким із неглибокими завмираннями Райса. Припускаємо, що середня потужність випромінювання ДРВ P_t не змінюється в часі. Тоді оброблення вимірних значень потужності прийнятого сигналу засобом РМ з урахуванням рельєфу місцевості та розміщення інших об'єктів (будівель, дерев) на маршруті польоту БПЛА дозволить наближено оцінити розміщення ДРВ за умови його незмінного положення. Збільшення кількості прольотів за різними маршрутами дозволить підвищити точність оцінювання координат ДРВ. Припускаємо, що БПЛА рухається без зупинок і на аналіз усієї смуги частот, що підлягає аналізу, виділяється деякий час T_s . За цей час БПЛА пролетить відстань $r_s = v \cdot T_s$. На аналіз одного діапазону частот витрачається час T_0 , причому, як правило, $T_0 \ll T_s$. За час T_0 середовище (умови поширення радіохвиль) не повинно сильно змінитися в плані дрібномасштабних завмирань, щоб не вносилися спотворення у вимірне значення потужності прийнятого сигналу. В такому разі за час аналізу діапазону частот БПЛА повинен переміститися на відстань, що значно менше половини довжини хвилі. За такого підходу T_0 можна розрахувати відповідно до виразу

$$T_0 \ll \frac{\lambda}{2v} \approx \frac{c}{20vf_0}. \quad (15)$$

Проте розраховане таким чином значення T_0 не забезпечить стійкості оцінок значень рівня прийнятого сигналу. При послідовному скануванні смуги частот аналізу кожного разу при аналізі діапазону з центральною частотою f_0 антена засобу РМ на БПЛА може знаходитися як в мінімумі, так і в максимумі електромагнітного поля, що пов'язано з дрібномасштабними завмираннями. Для забезпечення більшої стійкості оцінок рівня сигналу значення T_0 можна обрати виходячи з такої умови:

$$T_0 \gg \frac{\lambda}{2v} \approx \frac{5c}{vf_0}. \quad (16)$$

Такий підхід забезпечить усереднення потужності прийнятого сигналу приблизно за 10 періодами завмирань, спричинених багатопробним поширенням. Отримане таким чином значення рівня прийнятого сигналу буде наближено відображати втрати сигналу на поширення та затінення (рис. 3). На даному рисунку відображено умовну залежність втрат сигналу від відстані між ДРВ та БпЛА для таких значень параметрів: $f_0 = 900$ МГц; $v = 150$ км/год; $N_p = 10$.

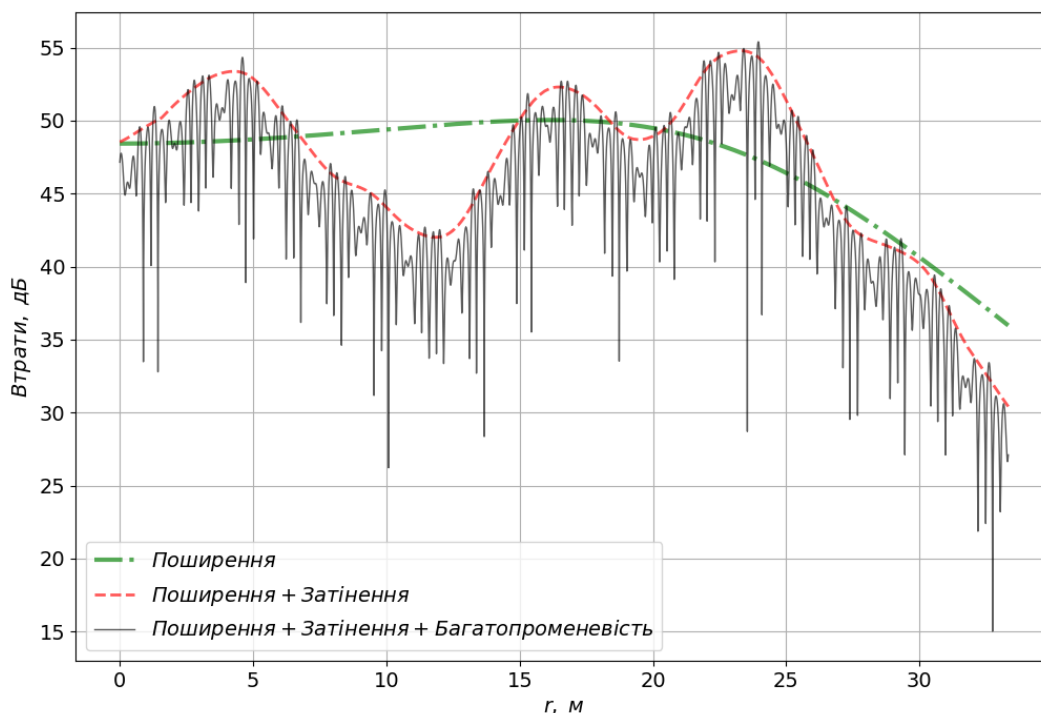


Рис. 3. Залежність втрат сигналу від відстані між ДРВ та БпЛА

Різкі високочастотні (швидкі) коливання рівня втрат сигналу є неінформативними для вирішення завдання локалізації ДРВ і їх необхідно згладити, щоб отримати криву втрат, яка описує вплив ефектів на поширення та затінення.

Виміряні значення рівня прийнятого сигналу будуть розрідженими з точки зору просторового переміщення БпЛА. Це пов'язано з тим, що частота надходження вимірів складає $1/T_0$, а періодичність надходження даних про рівень потужності в конкретному діапазоні частот з центральною частотою f_0 буде ще нижчою і становитиме $1/T_s$. Для отримання більш щільних даних необхідно зменшувати швидкість БпЛА. Проте при фіксованій тривалості його польоту це призведе до обльоту меншої ділянки простору і збору меншої кількості інформації про ДРВ.

Дані для різних частот f_0 необхідно обробляти окремо, оскільки характеристики середовища поширення радіохвиль змінюються при зміні частоти радіосигналу. Також на різних частотах працюють, як правило різні радіоелектронні засоби із різними потужностями випромінювання. Не врахування даного факту призведе до внесення додаткових похибок у оцінки рівня сигналу через усереднення вимірювань.

Оцінювання місцеположення ДРВ за рівнем прийнятого сигналу можна формалізувати до визначення параметрів складових 1 та 2 запропонованої моделі (10), а саме дальності та кореляційної відстані затінення в різні моменти часу та для різних частот. Значення коефіцієнта втрат на поширення радіохвиль ν є принциповим у випадку коли маршрут польоту БпЛА проходить через межу середовищ, для яких дане значення суттєво змінюється. В такому випадку буде спостерігатися зміна рівня прийнятого сигналу, що не пов'язана зі зміною

дальності та затіненням. Даний вплив є паразитним і слабо прогнозованим. Проте, маючи карту місцевості та знаючи маршрут польоту БпЛА, можна грубо оцінити межу середовищ. Паразитний вплив складової 3 усувається шляхом згладжування швидких пульсацій потужності прийнятого сигналу. Щодо складової 4, то її паразитний і невідомий вплив усунути неможливо, якщо відсутня інформація про форму ДС антени ДРВ та її орієнтацію у просторі.

Розділення складових, що змінюються з різними частотами в часі, можливе шляхом низькочастотної фільтрації для двох різних частот зрізу. Для фільтрації високочастотних складових, що пов'язані із завмираннями Релея, частота зрізу фільтра низьких частот (ФНЧ) визначається швидкістю польоту БпЛА v та несучою частотою сигналу f_0 . Якщо значення T_0 визначене виразом (15) то частоту зрізу ФНЧ необхідно обирати з умови

$$f_{LPF} \approx 2v f_0 / c. \quad (17)$$

Після фільтрації високочастотних складових необхідно прибрати тренд, пов'язаний із затіненням. Отримана в результаті крива відповідатиме залежності зміни відстані між ДРВ та БпЛА. Для фільтрації логарифмічно-нормальних завмирань параметри фільтра визначаються кореляційною відстанню затінення r_c . Частоту зрізу ФНЧ в такому випадку можна розрахувати за формулою

$$f_{LPF} \approx v / r_c. \quad (18)$$

Низькочастотну фільтрацію можна реалізувати шляхом згладжування даних вікном ковзаючого середнього.

Висновки

У результаті проведених досліджень отримано математичну модель, що описує потужність прийнятого сигналу в умовах впливу різномасштабних завмирань і враховує скануючий режим роботи засобу радіомоніторингу, його переміщення та невідому форму діаграми спрямованості антени ДРВ. Надано пропозиції щодо розділення складових затухання та завмирань із використанням низькочастотної фільтрації. Це дозволить оцінити місцеположення ДРВ у разі сумісного оброблення вимірних значень потужності прийнятого сигналу і траєкторії польоту БпЛА із засобом РМ. Перспективи подальших досліджень в даному напрямку полягають у розробленні методу локалізації ДРВ за результатами аналізу рівнів прийнятого сигналу, а також оптимізації маршруту польоту БпЛА з урахуванням апріорних даних щодо можливого положення ДРВ та карти місцевості. Також доцільно розробити математичні моделі прийнятого сигналу для випадку одночасного прольоту заданої області простору кількома БпЛА із засобами РМ.

Список літератури:

1. Gul N., Kim S. M., Ali J., Kim J. UAV aided virtual cooperative spectrum sensing for cognitive radio networks // PLoS One. 2023. Vol. 5. 36 p. doi: 10.1371/journal.pone.0291077.
2. Liu X., Guan M., Zhang X., Ding H. Spectrum Sensing Optimization in an UAV-Based Cognitive Radio // IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 44002–44009. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2862424.
3. Yan L., Cai Y., Wei H. Unmanned aerial vehicle-assisted wideband cognitive radio network based on DDQN-SAC. EURASIP // Adv. Signal Process. 2024. Vol. 43. doi: 10.1186/s13634-024-01141-3
4. Abohashish S. M. M., Rizk R. Y., Elsedimy E. I. Trajectory optimization for UAV-assisted relay over 5G networks based on reinforcement learning framework // Wireless Com Network. 2023. 55. doi: 10.1186/s13638-023-02268-x
5. Min A. W., Shin K. G. Impact of Mobility on Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks // CoRoNet '09: Proceedings of the 2009 ACM workshop on Cognitive radio networks. P. 13–18. doi: 10.1145/1614235.1614239
6. Shang B. et al. 3D Spectrum Sharing for Hybrid D2D and UAV Networks // IEEE Transactions on Communications. 2020. Vol. 68. No. 9. P. 5375–5389. doi: 10.1109/TCOMM.2020.2997957
7. Shen F., Ding G., Wang Z., Wu Q. UAV-Based 3D Spectrum Sensing in Spectrum-Heterogeneous Networks // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2019. Vol. 68, No. 6. P. 5711–5722. doi: 10.1109/TVT.2019.2909167
8. Chen H.-C. et al. Collaborative compressive spectrum sensing in a UAV environment // MILCOM 2011 Military Communications Conference, Baltimore, MD, USA, 2011. P. 142–148. doi: 10.1109/MILCOM.2011.6127507.

9. Galkyn S., Ananiev V., Zadonskiy O., Kovshar V. Simulation Mathematical Modeling of the Electronic Environment for Evaluating of Radio Monitoring Systems Effectiveness // IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW), Kharkiv, Ukraine, 2020. P. 1099-1102. doi: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252728.
10. Sova O. et al. Development of a method for assessment and forecasting of the radio electronic environment // EUREKA: Physics and Engineering. 2021. Vol. 4. P. 30–40. doi: 10.21303/2461-4262.2021.001940
11. Xu W., Wang S., Yan S., He J. An Efficient Wideband Spectrum Sensing Algorithm for Unmanned Aerial Vehicle Communication Networks // IEEE Internet of Things Journal. 2019. Vol. 6, No. 2. P. 1768–1780. doi: 10.1109/JIOT.2018.2882532.
12. Jasim M. A. et al. A Survey on Spectrum Management for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 11443–11499. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3138048.
13. Clark L. et al. PropEM-L: Radio Propagation Environment Modeling and Learning for Communication-Aware Multi-Robot Exploration // Robotics: Science and Systems. 2022. 8 p. doi: 10.48550/arXiv.2205.01267
14. Jiang K. et al. Distributed UAV Swarm Augmented Wideband Spectrum Sensing Using Nyquist Folding Receiver // Electrical Engineering and Systems Science 2023. doi: 10.48550/arXiv.2308.07077
15. Phillips C., Ton M., Sicker D., Grunwald D. Practical radio environment mapping with geostatistics // IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks, Bellevue, WA, USA, 2012. P. 422–433. doi: 10.1109/DYSPAN.2012.6478166.
16. He D., Liang G., Portilla J., Riesgo T. A novel method for radio propagation simulation based on automatic 3D environment reconstruction // 6th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Prague. Czech Republic, 2012. P. 1445–1449. doi: 10.1109/EuCAP.2012.6206457.
17. Shen F. et al. 3D Compressed Spectrum Mapping With Sampling Locations Optimization in Spectrum-Heterogeneous Environment // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2022. Vol. 21, No. 1. P. 326–338. doi: 10.1109/TWC.2021.3095342
18. Shrestha R., Romero D., Chepuri S. P. Spectrum Surveying: Active Radio Map Estimation with Autonomous UAVs // Electrical Engineering and Systems Science. 2022. 14 p. doi: 10.48550/arXiv.2201.04125
19. Du X. et al. UAV-Assisted Three-Dimensional Spectrum Mapping Driven by Spectrum Data and Channel Model. Symmetry, 2021, Vol. 13(12). doi: 10.3390/sym13122308.
20. Lathi B. P., Ding Z. Modern digital and analog communication systems. 5th ed. Oxford University Press, 2019. 1025 p.
21. Ільченко М. Ю., Кравчук С. О. Телекомунікаційні системи : моногр. Київ : Наук. думка, 2017. 734 с.
22. Sklar B. Digital Communications // Fundamentals and Applications. 2nd ed. Prentice Hall, 2003. 953 p.
23. Recommendation ITU-R P.1406-2 (07/2015) Propagation effects relating to terrestrial land mobile and broadcasting services in the VHF and UHF bands P Series Radiowave propagation. 13 p.
24. Proakis J. G., Salehi M. Digital Communications. 5th ed. McGraw-Hill, 2008. 1170 p.
25. Rappaport T. S. Wireless Communications: Principles And Practice, 2/E. Pearson Education, 2010. 709 p.
26. Goldsmith A. Wireless communications. 2nd ed. Stanford University. 2020. 597 p.
27. Lu S., May J., Haines R. Efficient modeling of correlated shadow fading in dense wireless multi-hop networks. In Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2014. P. 311–316. doi: 10.1109/WCNC.2014.6951986
28. Karagiannis G. A., Panagopoulos A. D. Dynamic Lognormal Shadowing Framework for the Performance Evaluation of Next Generation Cellular Systems // Future Internet, MDPI. 2019. Vol. 11(5). P. 1–18. doi:10.3390/fi11050106
29. Patzold M., Laue F. Statistical properties of Jakes' fading channel simulator // VTC '98. 48th IEEE Vehicular Technology Conference. Pathway to Global Wireless Revolution (Cat. No.98CH36151). Ottawa, ON, Canada, 1998. Vol.2. P. 712–718. doi: 10.1109/VETEC.1998.683675.

Надійшла до редколегії 03.11.2024

Відомості про автора:

Бугайов Микола Вікторович – канд. техн. наук, старший дослідник, Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова, заступник начальника науково-дослідного відділу наукового центру, Україна; e-mail: karunen@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0899-9843>