

М. В. Бугайов, В. В. Клязника, М. І. Оборонов

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РАДІОМОНІТОРИНГУ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

У зв'язку зі стрімкими темпами розвитку техніки радіозв'язку, упровадженням нових радіотехнологій, зростанням швидкостей передавання все більших обсягів інформації, потреба в радіочастотному спектрі загального користування з кожним роком суттєво зростає, тому особливу роль у процесі вдосконалення системи управління радіочастотним спектром відіграє радіомоніторинг. У великих містах зі щільною забудовою із багатоповерхових будівель ведення радіомоніторингу навіть із використанням портативних засобів досить ускладнене, а в деяких випадках практично не можливе. Застосування безпілотних літальних апаратів підвищує гнучкість просторового розміщення засобів радіомоніторингу та швидкість огляду заданої області простору, покращує енергетичну доступність джерел радіовипромінювання за рахунок можливості створення умов прямої видимості. Метою статті є розроблення математичних моделей процесу радіомоніторингу із використанням безпілотних літальних апаратів, що дозволить підвищити ефективність вирішення відповідних завдань в умовах багатопроменевих замирань за рахунок оптимізації методів та алгоритмів оброблення сигналів. У ході викладення основного матеріалу дослідження визначено завдання та складові процесу радіомоніторингу, описано параметри окремого джерела радіовипромінювання та їх сукупності в деякій області простору із використанням відповідних імовірнісних моделей, а також зазначено параметри засобу радіомоніторингу та середовища поширення радіохвиль. Показано, що планування траєкторії польоту безпілотного літального апарата повинно здійснюватися з урахуванням перешкод та апіорного розподілу щільності розміщення джерел радіовипромінювання в просторі. Наведено моделі прийнятого сигналу для їх вузькосмугових та широкосмугових описів. У разі моделювання процесу пошуку джерел радіовипромінювань доцільно окремо розглядати пошук сигналів у частотно-часовій області та в просторі.

Ключові слова: багатопроменеве замирання; безпілотний літальний апарат; джерело радіовипромінювання; математичне моделювання; радіомоніторинг.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Через швидкі темпи розвитку техніки радіозв'язку, впровадження нових радіотехнологій, зростання швидкостей передавання все більших обсягів інформації потреба в радіочастотному спектрі (РЧС) загального користування щороку стає нагальнішою. Постійне збільшення кількості радіоелектронних засобів (РЕЗ) призводить до перевантаження РЧС і ще більше ускладнює електромагнітну обстановку, погіршує електромагнітну сумісність між РЕЗ. Саме тому особливу роль у процесі вдосконалення системи управління РЧС відіграє радіомоніторинг (РМ), який

дозволяє визначати ефективність використання радіочастотного ресурсу, забезпечувати електромагнітну сумісність РЕЗ, які функціонують, а також виявляти джерела електромагнітних завад, незаконно діючого радіобладнання та інших джерел радіовипромінювання (ДРВ) [1–3].

Моніторинг РЧС організовують переважно із застосуванням стаціонарних і мобільних засобів. Портативні засоби застосовують для інструментального оцінювання параметрів радіовипромінювання РЕЗ під час проведення моніторингу спектра лише у виняткових випадках у тих місцях, де його реалізація із використанням інших технічних засобів не можлива, а також для уточнення результатів, отриманих із використанням мобільних комплексів РМ [4].

У великих містах зі щільною забудовою із багатоповерхових будівель ведення РМ навіть із застосуванням портативних засобів досить ускладнене, а іноді практично не можливе. Використання засобів РМ, розміщених на безпілотних літальних апаратах (БпЛА), відкриває нові можливості щодо вирішення завдань РМ, а саме підвищує гнучкість просторового розміщення засобу РМ та швидкість огляду заданої області простору, покращує енергетичну доступність ДРВ за рахунок можливості створення умов прямої видимості. Крім того, із використанням кількох БпЛА можна швидко розгортати мережі РМ та змінювати їх конфігурацію, що дозволить визначати положення ДРВ. Проте ефективне застосування БпЛА для виконання завдань РМ потребує вдосконалення відповідної математичної моделі процесу РМ, що буде враховувати ефекти, пов'язані із переміщенням БпЛА відносно ДРВ в умовах міської забудови.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням використання БпЛА для ведення РМ присвячено велику кількість теоретичних та прикладних досліджень. Зокрема, у роботах [5–8] описано процедури оптимізації траєкторії їх польоту для дослідження відомих ДРВ. У [9] наведено пропозиції щодо застосування БпЛА із засобами РМ для виявлення джерел радіоперешкод приймачам сигналів супутникової навігації. Просторово-часовий аналіз РЧС із використання БпЛА розглянуто в [10–11]. У [12] описано процес аналізу РЧС роєм БпЛА. У [13] запропоновано підхід до реконструкції розподілу електромагнітного поля в тривимірному просторі.

Щодо практичної реалізації результатів досліджень, то в доступних джерелах кількість інформації про готові рішення є досить обмеженою. У [14] запропоновано оснащувати БпЛА першого класу антенною системою, програмновизначеним радіоприймачем, процесором попереднього оброблення сигналів та радіоканалом для передавання інформації про радіоелектронну обстановку. У [15] вказано, що для ведення РМ у міських та приміських районах використовують БпЛА із обладнанням компаній Colibrex та LS Telcom, яке працює в діапазоні частот від 20 МГц до 50 ГГц. Фірми Ericsson та Nokia також розробляють засоби РМ для БпЛА, які потім можуть об'єднуватися в рої. Французька компанія ANFR виготовляє засоби РМ для БпЛА DJI у діапазонах частот 3 ГГц–30 ГГц та 30 ГГц–300 ГГц. Вимірюванню підлягають такі параметри: частота радіосигналу ДРВ, рівень сигналу, координати БпЛА і час виявлення сигналу. Подібні проекти розробляються також фірмами Ofcom (Великобританія) та FCC (США). Описані

рішення призначені здебільшого для об'єкту веж мобільного зв'язку з метою вимірювання рівнів потужності та оцінювання інших параметрів випромінювання. Компанія CRFS (Великобританія) пропонує інтегровані рішення радіочастотних сенсорів на БпЛА [16], одним із яких є малогабаритний засіб РМ, що досить легко може бути інтегрований практично в будь-який БпЛА. Цей засіб працює в діапазоні частот від 9 кГц до 18 ГГц. Компанія LS Telcom (Німеччина) [17] також пропонує повністю інтегровані рішення засобів РМ та БпЛА.

У результаті проведеного аналізу останніх наукових публікацій встановлено, що не вирішеним досі залишається питання математичного моделювання процесу РМ із використанням БпЛА, що буде враховувати параметри ДРВ, засобу РМ, траєкторії польоту БпЛА та середовища поширення радіохвиль (ПРХ), яке через переміщення БпЛА відносно ДРВ буде в загальному випадку нестационарним. Також у переважній більшості робіт вважається, що сигнал приймається, якщо є умови прямої видимості, і сигнал відсутній, якщо ці умови не забезпечуються, при цьому не враховуються явища перевідбиття та дифракції радіохвиль.

Формулювання завдання дослідження. Метою статті є розроблення математичних моделей процесу РМ із використанням БпЛА, що дозволить підвищити ефективність вирішення завдань РМ в умовах багатопроменевих завмирань за рахунок оптимізації методів та алгоритмів оброблення сигналів.

Виклад основного матеріалу

1. Визначення завдань радіомоніторингу

Основними завданнями моніторингу РЧС є [3]:

- 1) пошук, виявлення та спостереження за радіовипромінюваннями в заданому діапазоні частот;
- 2) інструментальне оцінювання параметрів радіовипромінювань;
- 3) селекція радіовипромінювань;
- 4) пеленгування ДРВ;
- 5) визначення місцеположення ДРВ;
- 6) ідентифікація радіовипромінювань та ДРВ.

Для виконання наведених завдань необхідно використовувати параметричний опис кожної зі складових процесу РМ (рис. 1), що впливають на нього.

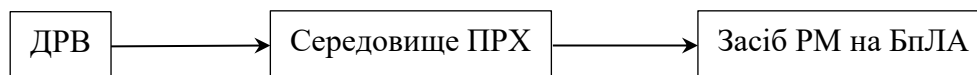


Рис. 1. Складові процесу РМ

У загальному випадку кількість ДРВ, сигнали яких можуть прийматися засобом РМ, може бути довільною. Для підвищення швидкості виявлення та точності визначення місцеположення ДРВ може використовуватися група (мережа) з кількох БпЛА.

Середовище ПРХ може бути описане як відкритий простір, сільська місцевість, передмістя, місто із середньою та щільною забудовою. Проте канал розповсюдження радіосигналу для кожної пари ДРВ та засобу РМ буде різним, що обумовлюється різним взаємним місцеположенням ДРВ та БпЛА відносно перешкод, параметрами ДРВ та динамікою руху БпЛА.

2. Визначення параметрів ДРВ

Окреме ДРВ будемо описувати за допомогою таких основних параметрів:

1) його просторові координати в прямокутній (x_e, y_e, z_e) або сферичній (r, θ, γ) системах координат, де r – відстань від ДРВ до БпЛА, θ – азимут, γ – кут місця. Ці значення можуть бути повністю невідомими або відомими неточно. У разі переміщення ДРВ із деякою швидкістю з'являється залежність значень координат від поточного часу t , тому в загальному випадку значення координат є залежними від часу;

2) припускаємо, що потужність випромінювання ДРВ P_e не змінюється в часі;

3) форма діаграми спрямованості (ДС) антенної системи $G_e(\theta, \gamma)$, її поляризація та орієнтація відносно БпЛА можуть змінюватися за рахунок переміщення апарата або ДРВ;

4) несуча частота радіосигналу f_0 ;

5) ширина спектра (смуги) сигналу ΔF_e ;

6) структура смугового комплексного сигналу $U(t)$, який у загальному вигляді можна навести в такому вигляді:

$$U(t) = A(t)e^{j\psi(t)}, \quad (1)$$

де $A(t)$ – залежність обвідної сигналу від часу;

$\psi(t)$ – залежність фази сигналу від часу;

7) розподіл щільності ймовірностей (РЩЙ) тривалостей випромінювання $p(T_e)$ ДРВ характеризує режим роботи ДРВ у часовій області (безперервний, пакетне передавання даних, імпульсний). Його доцільно розглядати як умовний для конкретного значення несучої частоти f_0 (частотного каналу) – $p(T_e|f_0)$. Це пов'язано з тим, що в різних діапазонах частот працюють РЕЗ за різними радіотехнологіями і в різних режимах. Наприклад, на частотах роботи FM-радіостанцій та веж цифрового телебачення завантаженість η становитиме 100% (оскільки вони працюють постійно). Для веж мобільного зв'язку, транкінгових систем завантаженість каналу визначатиметься лише активністю абонентів;

8) часова завантаженість η смуги випромінювання на частоті f_0 , що визначається як відношення сумарного часу тривалості випромінювання ДРВ до часу спостереження.

Сукупність усіх ДРВ у деякій області простору можна описати із використанням відповідних імовірнісних моделей, а саме:

1) розподілу щільності розміщення ДРВ на площині $p_e(x_e, y_e)$ або у просторі $p_e(x_e, y_e, z_e)$. Перша модель описує випадок, характерний для сільської місцевості та передмістя, коли висота польоту БпЛА z_s набагато більша за висоту розміщення ДРВ z_e , а всі ДРВ перебувають приблизно на одній висоті (рис. 2).

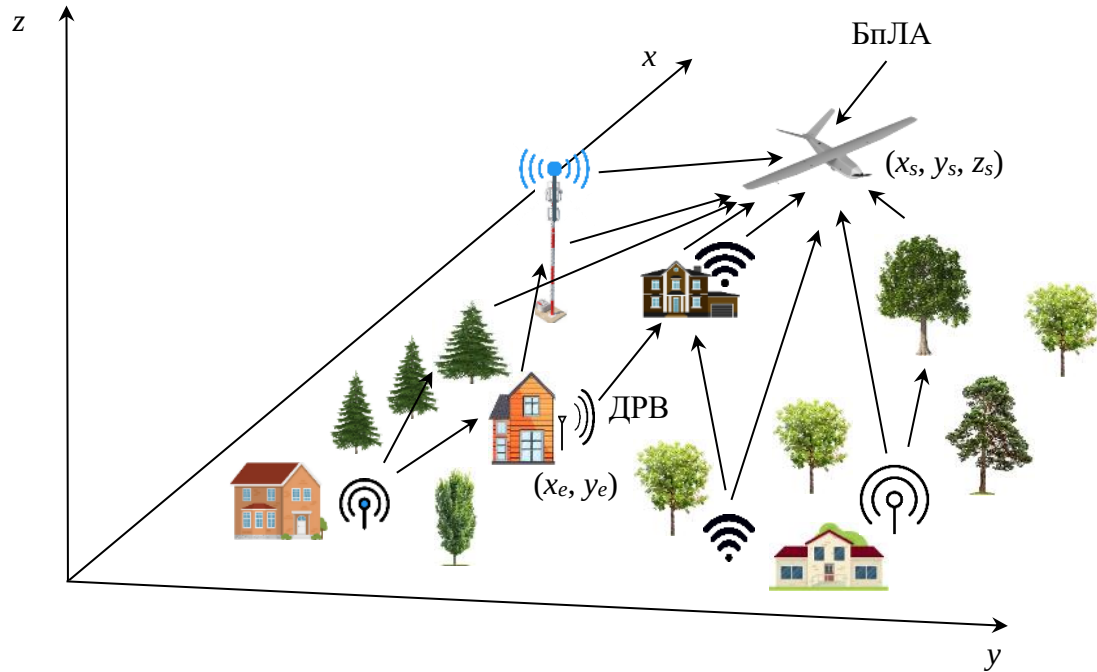


Рис. 2. Розміщення ДРВ на площині відносно БПЛА

Друга модель більше підходить для великих міст зі щільною забудовою із хмарочосів, коли ДРВ можуть бути на одному рівні або навіть вище за БПЛА (рис. 3).

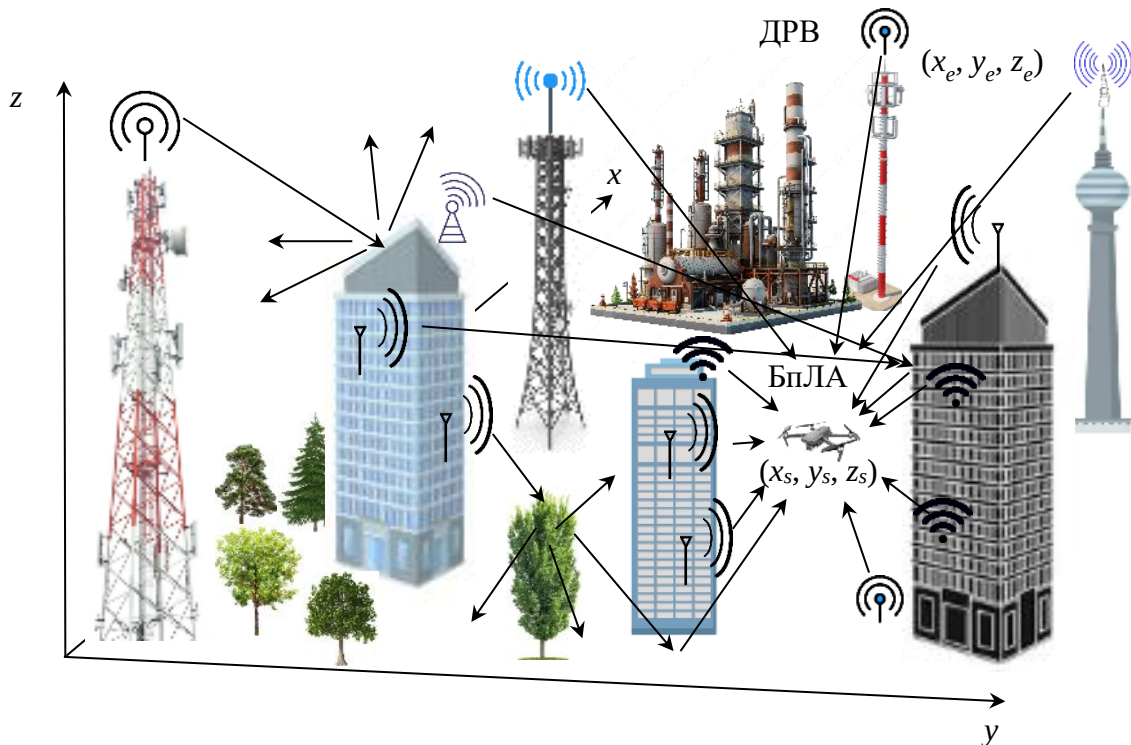


Рис. 3. Розміщення ДРВ у просторі відносно БПЛА

У [18] для опису умовної ймовірності розміщення об'єктів у різних точках простору запропоновано використовувати двовимірну функцію щільності розподілу об'єктів. Вона

створюється на основі апіорних даних про місцевість, попередніх спостережень або інтелектуальних оцінок, що відображають розподіл можливих об'єктів у певній області простору. Часто для цього використовують просторовий процес Пуассона [19–21].

Відомо кілька підходів до побудови цієї функції [22]: аналітичний (наприклад, двовимірним нормальним розподілом), емпіричний (ядерне оцінювання щільності із використанням віконного методу Парзена – Розенблатта [23], двовимірні гістограми), імітаційного моделювання (метод Монте-Карло) та кластеризації;

2) розподіл щільності ДРВ у частотній області $N_e(f_0)$, для відносно широкої смуги частот аналізу в загальному випадку він буде полімодальним, оскільки в неліцензованих діапазонах частот (наприклад, 433 МГц, 868 МГц) варто очікувати більшої кількості ДРВ, ніж у решті. Фізично залежність $N_e(f_0)$ вказує на те, як багато ДРВ потенційно можуть працювати в деякому діапазоні частот, наприклад, миттєвій смузі пропускання приймача;

3) РЩЙ значень ширини спектра (смуги) $p(\Delta F_e)$ радіосигналів ДРВ у смузі частот аналізу;

4) розподіл часової завантаженості в частотній області $\eta(f_0)$.

Дані функції розподілу щільності розміщення ДРВ та їх параметрів доцільно використовувати як апіорні дані для оптимізації маршрутів польоту БПЛА, сканування РЧС та алгоритмів оброблення сигналів. У разі відсутності будь-яких апіорних даних, що дозволятимуть побудувати необхідні щільності розподілів, доцільно користуватися припущенням про рівномірне розподілення щільності як ДРВ у просторі, так і значень параметрів їх випромінювань.

3. Визначення параметрів засобу РМ на БПЛА

Хоча засіб РМ і розміщено на БПЛА, проте через суттєву різницю фізичного змісту їх параметрів доцільно окремо описати засіб РМ та БПЛА.

Основними параметрами засобу РМ є:

- 1) миттєва ширина смуги пропускання приймача ΔF_s ;
- 2) мінімальна f_{min} та максимальна f_{max} частоти смуги сканування;
- 3) швидкість сканування за частотою f_s ;
- 4) чутливість приймача P_n ;
- 5) форма ДС антенної системи $G_s(\theta, \gamma)$, її поляризація та орієнтація відносно ДРВ.

Основними параметрами БПЛА, що впливають на процес РМ, є:

- 1) швидкість польоту v , можливі межі її зміни (v_{min} , v_{max});
- 2) тривалість польоту БПЛА T_F ;
- 3) координати БПЛА (x_s , y_s , z_s) та помилки визначення його місцеположення;
- 4) масогабаритні обмеження (максимальна вага корисного навантаження);
- 5) енергетичні обмеження (ємність та потужність джерела живлення).

Планування траєкторії польоту БПЛА повинно здійснюватися з урахуванням перешкод та апіорного розподілу щільності розміщення ДРВ у просторі. Під час ведення РМ траєкторія польоту може змінюватися для спостереження за виявленим ДРВ.

У разі використання групи БПЛА для ведення РМ заданої області простору суттєвим також є організація обміну інформацією за результатами аналізу РЧС для подальшої адаптації маршруту польоту з метою більш точної локалізації ДРВ.

4. Визначення параметрів середовища ПРХ

Під час поширення радіохвиля може зустріти на своєму шляху велику кількість перешкод. Залежно від геометричних розмірів та їх електромагнітних властивостей канал ПРХ в ультракороткохвильовому (УКХ) діапазоні довжин хвиль можна охарактеризувати ступенем прояву ефектів відбиття, дифракції, поглинання, розсіювання та інтерференції на конкретний радіосигнал у різних діапазонах частот та швидкістю їх зміни за взаємного переміщення ДРВ та засобу РМ.

Основними факторами, що впливають на рівень прийнятого сигналу, є втрати на поширення, великомасштабні та дрібномасштабні завмирання, неізотропність ДС антен ДРВ і БпЛА та неузгодженість їх поляризацій.

На відміну від втрат на поширення і затінення, які є впливом великомасштабних згукань від навколишніх об'єктів та відстані, найбільший вплив у мобільних радіосистемах мають дрібномасштабні завмирання. Серед багатьох фізичних ефектів у радіоканалі на формування дрібномасштабних завмирань найбільше впливають багатопроменеве поширення, швидкість руху ДРВ та БпЛА, швидкість навколишніх об'єктів, від яких відбиваються радіохвилі, ширина спектра сигналу та тривалість інформаційного символу.

Для опису каналу ПРХ часто використовують його імпульсну характеристику (ІХ), яку для нестаціонарного каналу поширення можна записати в такому вигляді [24]:

$$h(t) = \sum_{i=1}^{N_p(t)} \alpha_i(t) \delta(t - \tau_i(t)) e^{j\varphi_i(t)}, \quad (2)$$

де $N_p(t)$ – кількість променів поширення сигналу в момент часу t ;

$\alpha_i(t)$ – амплітудний множник сигналу в i -му промені в момент часу t ;

$\tau_i(t)$ – затримка сигналу в i -му промені в момент часу t ;

$\varphi_i(t)$ – фаза сигналу в i -му промені в момент часу t , що змінюється за рахунок збільшення / зменшення відстані між ДРВ та БпЛА і зсуву фази в разі відбиття та розсіювання від перешкод, і є рівномірно розподіленою випадковою величиною на інтервалі від 0 до 2π ;

$\delta()$ – дельта-функція.

У таких каналах завмирання глибиною 30–40 дБ і більше відносно середнього рівня можуть зустрічатися кілька разів за секунду [25] й залежать від швидкості БпЛА (ДРВ) і несучої частоти сигналу та проявляються в разі їх переміщення лише на частину довжини хвилі.

Параметри ІХ каналу поширення є випадковими процесами, а їх залежність від часу пояснюється зміною взаємного положення ДРВ та засобу РМ, що призводить до трансформації умов ПРХ. Варто відмітити, що амплітудний множник α змінюється відносно повільно в обмеженій ділянці простору, тоді як фаза φ – суттєво за малих змін відстані.

Основними статистичними характеристиками, що описують мобільний радіоканал, є: РЦЙ миттєвих значень амплітуди прийнятого сигналу (логарифмічно нормальний,

Релея, Райса, Накагамі, Сузукі, Вейбулла) [26–28], автокореляційна функція випадкового процесу, що описує завмирання в каналі, середня тривалість завмирань (показує, як довго обвідна сигналу перебуває нижче деякого рівня), кількість перетинів деякого рівня за одиницю часу, смуга та час когерентності каналу.

Логарифмічно нормальне завмирання є результатом затінення від нерухомих місцевих перешкод і відображає дифракційні втрати. Відстань, на яких проявляється даний тип завмирання, є одного порядку з розмірами перешкод і проявляється, як правило, на інтервалах кількох десятків довжин хвиль. Шлях, на якому розраховують втрати за рахунок логарифмічно нормального затухання, складає зазвичай 20-40 довжин хвиль. Логарифмічно нормальний процес завмирання можна описати таким виразом:

$$f_L(t) = \exp\left(\sqrt{f_I^2(t) + f_Q^2(t)}\right), \quad (3)$$

де $s_I(t)$ та $s_Q(t)$ є випадковими процесами, які можна описати такими рівняннями:

$$\begin{aligned} f_I(t) &= \frac{1}{\sqrt{N_L(t)}} \sum_{i=1}^{N_L(t)} I_i \cos\left(2\pi \frac{\nu}{r_{ci}} t + \varphi_i\right); \\ f_Q(t) &= \frac{1}{\sqrt{N_L(t)}} \sum_{i=1}^{N_L(t)} Q_i \sin\left(2\pi \frac{\nu}{r_{ci}} t + \varphi_i\right), \end{aligned} \quad (4)$$

де $N_L(t)$ – кількість гармонік для моделювання процесу затінення;

I_i , Q_i – випадкові значення амплітуд гармонік, що є стандартними, нормально розподіленими величинами;

r_{ci} – випадкове значення кореляційної відстані затінення [29], яке є випадковою величиною, рівномірно розподіленою в діапазоні $(10-60)\lambda$, де λ – довжина РХ;

φ_i – випадкове значення фази, що рівномірно розподілене в діапазоні $[0, 2\pi]$.

Завмирання Релея використовують для моделювання бездротових каналів в умовах відсутності прямої видимості, коли багато об'єктів у середовищі відбивають і розсіюють сигнал на його шляху до приймальної антени, що характерно для міських або лісових районів. Розподіл Релея застосовують для статистичного опису радіоканалу із рухомим приймачем. Цьому розподілу підпорядковуються значення обвідної прийнятого сигналу в каналі без частотно-селективних завмирань, тобто обвідна окремої частотної багатопроменевої складової. Відомо, що обвідна суми квадратів центральних гаусових випадкових процесів розподілена за законом Релея. Для моделювання завмирань Релея використовують метод Джейка [30], відповідно до якого низькочастотна комплексна обвідна прийнятого сигналу формується як результат суперпозиції деякої кількості гармонік N_p з випадковими параметрами (процес Релея):

$$f_R(t) = \sqrt{f_I^2(t) + f_Q^2(t)}, \quad (5)$$

де доданки є випадковими нормальними процесами, які записують відповідно до таких виразів:

$$\begin{aligned} f_I(t) &= \frac{1}{\sqrt{N_p(t)}} \sum_{i=1}^{N_p(t)} I_i \cos(2\pi F_D (\cos \vartheta_i) t + \varphi_i), \\ f_Q(t) &= \frac{1}{\sqrt{N_p(t)}} \sum_{i=1}^{N_p(t)} Q_i \sin(2\pi F_D (\cos \vartheta_i) t + \varphi_i), \end{aligned} \quad (6)$$

де F_D – максимальне значення частоти Доплера;

ϑ_i – випадковий кут надходження радіохвилі, що рівномірно розподілений у діапазоні $[0, 2\pi]$.

Завмирання Райса враховує потужну компоненту прямого поширення та слабші розсіяні багатопроменеві компоненти. Його використовують для моделювання каналу всередині приміщення із відбивальними поверхнями. Завмирання Райса описують параметром, який визначають зі співвідношення потужності складової, що поширюється в межах прямої видимості, до дисперсії решти багатопроменевих складових [31]:

$$C_R = \frac{A^2}{2\sigma_R^2}, \quad (7)$$

де A – амплітуда сигналу;

σ_R – середьоквадратичне відхилення (СКВ) багатопроменевих складових.

За $A \rightarrow 0$ розподіл Райса вироджується в розподіл Релея.

Для моделювання завмирання Райса використовують (5), де значення складових у підкореновому виразі визначають у такий спосіб:

$$\begin{aligned} f_I(t) &= \frac{1}{\sqrt{N_p(t)}} \sum_{i=1}^{N_p(t)} I_i \cos(2\pi F_D (\cos \vartheta_i) t + \varphi_i) + \mu, \\ f_Q(t) &= \frac{1}{\sqrt{N_p(t)}} \sum_{i=1}^{N_p(t)} Q_i \sin(2\pi F_D (\cos \vartheta_i) t + \varphi_i) + \mu, \end{aligned} \quad (8)$$

де I_i , Q_i – випадкові значення амплітуд гармонік, що є нормально розподіленими величинами із середнім μ і СКВ σ_C , а саме:

$$\sigma_C = \sqrt{\frac{1}{2(C_R + 1)}} \quad \text{і} \quad \mu = \sqrt{\frac{C_R}{2(C_R + 1)}}. \quad (9)$$

Завмирання Сузукі є добутком процесу Релея та логарифмічно нормального процесу, воно не передбачає наявності прямої видимості через ефект затінення:

$$f_S(t) = f_R(t) f_L(t). \quad (10)$$

Цей тип завмирань є найбільш реалістичним для опису бездротових радіоканалів.

Завмирання Накагамі застосовують для моделювання середніх та сильних завмирань у каналах мобільного зв'язку та супутникових лініях, а завмирання Вейбула – для каналів зі змінними в часі умовами поширення.

Процеси Накагамі та Вейбула отримують із використанням процесу Релея шляхом введення додаткових параметрів, що дозволяє змінювати форму РЦЙ у досить широких межах.

Час когерентності каналу $\Delta T_{coh} \approx 0,423/F_D$ [26] відображає часовий інтервал, протягом якого канал залишається наближено стаціонарним. У загальному випадку канал вважають повільним, якщо тривалість інформаційного символу не перевищує час когерентності каналу, і швидким – у протилежному випадку.

Смуга когерентності каналу $\Delta F_{coh} \approx (5\sigma_\tau)^{-1}$ [26], де σ_τ – СКВ часу затримки в каналі, визначає його селективність за частотою. Канал вважається плоским, якщо ширина спектра сигналу менша за смугу когерентності, і частотно-селективним – у протилежному випадку. Частотні складові у спектрі сигналу, рознесені більше ніж на ΔF_{coh} , завмирають незалежно.

5. Модель прийнятого сигналу

Відсутність лінії прямої видимості призводить до того, що прийнятий сигнал є суперпозицією сигналів від одного ДРВ, що надходять із різних напрямків через наявність перешкод на шляху поширення, причому чим далі рознесені ДРВ і засіб РМ, тим швидше зростає кількість можливих непрямих шляхів поширення сигналу (рис. 2–3). Через багатопроменеве поширення прийнятий сигнал є сумою нескінченної кількості послаблених, затриманих у часі та зсунутих за фазою копій переданого сигналу, а переміщення ДРВ, приймача або перешкод призводять до появи ефекту Доплера та зміщення частоти прийнятого сигналу в кожному промені. Через цей ефект спостерігається також розширення спектра сигналу [33–34]. Зміщення частоти в i -му промені в момент часу t за рахунок ефекту Доплера в загальному випадку визначаємо з такого рівняння:

$$f_{Di}(t) = f_0 \frac{v(t)}{c} \cos \vartheta_i(t), \quad (11)$$

де $v(t)$ – швидкість руху БпЛА в момент часу t ;

c – швидкість ПРХ;

$\vartheta_i(t)$ – кут між вектором швидкості БпЛА та напрямком ПРХ.

Під час переміщення БпЛА відносно ДРВ тип каналу буде змінюватися, оскільки трансформуватиметься саме фізичне середовище (положення перешкод, відбивачів і розсіювачів у каналі). Крім того, один і той самий фізичний канал матиме різні статистичні характеристики залежно від параметрів ДРВ та швидкості БпЛА. В умовах

апріорної невизначеності щодо параметрів сигналу ДРВ та його місцеположення відносно перешкод і БпЛА тип каналу також буде невідомим. Наявні моделі каналів ПРХ розроблені для конкретних типів радіотехнологій [35]. Зокрема, COST 207 – для опису поширення вузькосмугових сигналів за технологією GSM, а COST 259 – для широкосмугових сигналів CDMA. Проте залежно від ширини спектра сигналу можна зробити деякі узагальнені припущення щодо моделі прийнятого сигналу з довільним видом модуляції.

У кожен момент часу на антену засобу РМ може надходити велика кількість сигналів від різних ДРВ. Сигнал k -го ДРВ будемо записувати в такому вигляді:

$$s_k(t) = U_k(t) e^{j2\pi f_{0k}t}, \quad (12)$$

де $U_k(t)$ – k -й смуговий сигнал;

f_{k0} – несуча частота k -го сигналу.

Тоді, відповідно, для опису каналу ПРХ вузькосмугових сигналів можна використовувати випадкові процеси завмирання (наприклад, Релея, Райса). У такому разі випадкові флуктуації k -го сигналу на вході антени можуть моделюватися як добуток переданого сигналу та стохастичного процесу $f_F(t)$, що описує завмирання в каналі [32]:

$$x_k(t) = s_k(t) f_{Fk}(t). \quad (13)$$

Для опису поширення широкосмугових сигналів доцільніше використовувати ІХ каналу (2). Узагальнену модель k -го сигналу із використанням ІХ k -го каналу можна записати в такий спосіб:

$$x_k(t) = s_k(t) * h_k(t). \quad (14)$$

Прийнятий від усіх ДРВ сигнал засобом РМ одного БпЛА можна записати у такий формі [36]:

$$x(t) = \sum_{k=1}^{N_e(t)} x_k(t) + \xi(t), \quad (15)$$

де $N_e(t)$ – кількість ДРВ, що спостерігаються в момент часу t ;

$\xi(t)$ – внутрішній шум приймача РМ.

У разі використання групи БпЛА для ведення РМ прийнятий m -м засобом РМ вузькосмуговий сигнал запишемо в такому вигляді:

$$x_m(t) = \sum_{k=1}^{N_{em}(t)} s_k(t) f_{Fkm}(t) + \xi(t), \quad (16)$$

де $N_{em}(t)$ – кількість ДРВ, що спостерігаються m -м БпЛА в момент часу t ;

$f_{km}(t)$ – випадковий процес ПРХ між k -м ДРВ та m -м БпЛА.

Відповідно, прийнятий широкосмуговий сигнал m -м засобом РМ можна описати таким виразом:

$$x_m(t) = \sum_{k=1}^{N_{em}(t)} s_k(t) * h_{km}(t) + \xi(t), \quad (17)$$

де $h_{km}(t)$ – ІХ каналу ПРХ між k -м ДРВ та m -м БпЛА.

Кількість ДРВ, які потенційно можуть бути виявлені БпЛА в деякій області простору, визначається розподілом щільності їх розміщення, параметрами ДРВ та засобу РМ, а також ПРХ, що безпосередньо впливає на доступність ДРВ.

У разі ведення панорамного РМ необхідно враховувати: чим нижча частота радіохвилі, тим краще вона відбивається від перешкод і їх огинає, тобто буде далі поширюватися навіть в умовах відсутності прямої видимості. Тому за однакових параметрів польоту БпЛА (швидкість і маршрут польоту) тип каналу ПРХ може суттєво змінюватися під час сканування усієї смуги частот. Крім того, тип каналу змінюватиметься для сигналів, які суттєво відрізняються такими параметрами, як: тривалість символу та ширина спектра.

Також в умовах завмирань необхідно враховувати такі фактори:

сигнали, які передаються на двох ортогональних поляризаціях, мають некорельовані статистичні властивості завмирань;

сигнал, що випромінюється спрямованою антеною, підлягає впливу менш сильних завмирань (випромінювання в бік від основного шляху поширення буде невеликим через малий рівень бічних пелюсток антени, а отже, меншим буде і рівень багатопроменевої складової);

сигнали, що передаються на частотах, які рознесені більше ніж у 2–4 рази за смугу когерентності каналу, мають некорельовані завмирання;

рознесені в часі амплітудні відліки будуть некорельовані, якщо їх взаємна затримка буде більшою, ніж $1/(2F_D)$ [26].

6. Моделювання процесу пошуку ДРВ

Модель процесу РМ під час польоту БпЛА буде динамічною, оскільки час відіграє роль незалежної змінної, а поведінка системи змінюється в часі, і стохастичною, бо параметри складових процесу РМ є випадковими величинами та процесами [37–39]. Просторово-часове рівняння спостереження, що пов'язує сигнал із виходу антени з параметрами електромагнітного поля, записати в цьому випадку практично неможливо через наявність в середовищі поширення граничних областей та фізичних перешкод, де з'являються неоднорідні плоскі хвилі [40]. Тому будемо окремо розглядати пошук сигналів у частотно-часовій області та в просторі.

6.1. Пошук ДРВ за часом та за частотою

На сьогодні максимальні значення миттєвої смуги пропускання радіоприймальних пристроїв не перевищують кількох сотень мегагерц. У разі звуження миттєвої смуги пропускання приймача до одиниць-десятиків мегагерц підвищується його чутливість, що

збільшує ймовірність виявлення сигналів за нижчих значень відношення сигнал-шум (ВСШ). Тому для аналізу РЧС в УКХ-діапазоні шириною кілька гігагерц необхідно проводити перебудову смуги приймача для пошуку ДРВ.

Алгоритм сканування заданої смуги РЧС полягає у визначенні послідовності та тривалості аналізу різних її ділянок у межах миттєвої смуги пропускання приймача. В умовах апіорної невизначеності щодо розподілу кількості ДРВ за несучими частотами та завантаженості різних діапазонів частот алгоритм сканування полягатиме в послідовному скануванні заданої смуги частот та виділенні на їх аналіз однакових інтервалів часу.

Наявність та врахування апіорної інформації про розподіл щільності ДРВ у частотній області $N_e(f_0)$ та часову завантаженість $\eta(f_0)$ смуг випромінювання дозволить підвищити ефективність роботи алгоритмів пошуку ДРВ за частотою. Це досягається за рахунок перерозподілу часу аналізу між різними діапазонами частот. Як показник якості алгоритмів пошуку ДРВ за частотою доцільно обрати кількість виявлених ДРВ N_D . Тоді критерієм оптимізації алгоритмів буде максимізація цього показника.

На рис. 4 показано залежність часу аналізу T_a у частотному каналі від частоти для випадків рівномірного сканування, коли на кожен частотний канал (у цьому контексті під частотним каналом розуміємо миттєву смугу пропускання приймача ΔF_s) виділяється однаковий інтервал часу, а після перерозподілу – з урахуванням апіорних даних.

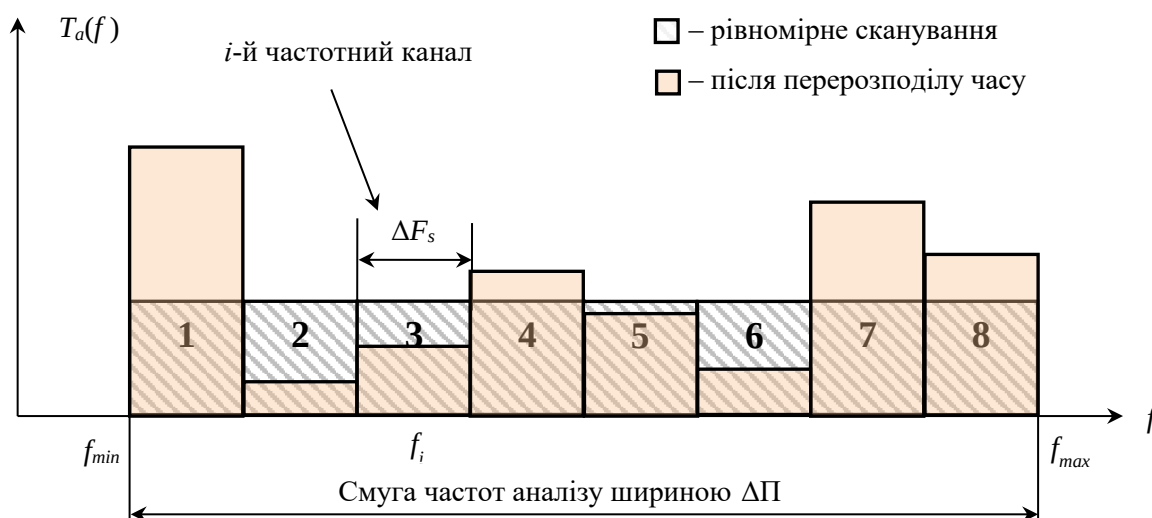


Рис. 4. Перерозподіл часу аналізу між частотними каналами

Нехай в умовах апіорної невизначеності для аналізу частотного каналу виділяється деякий час T_0 , що забезпечує виявлення сигналу ДРВ з імовірністю P_D для деякого значення ВСШ. Для сканування усієї смуги частот шириною $\Delta\P$ затрачається час $T_0\Delta\P/\Delta F_s$. У разі перерозподілу часу аналізу за частотними каналами сумарний час повинен залишатися незмінним. Очевидно, що для максимізації кількості виявлених ДРВ N_D необхідно виділяти більший час для аналізу тих частотних каналів, де їхня щільність вища, а завантаженість нижча. Якщо кожному частотному діапазону надати ще деяку функцію важливості $u(f)$ і виділяти більший час аналізу для тих частот, де її значення більше, то залежність часу аналізу від частоти можна отримати із використанням функції

$$g(f) = g(N_e(f), \bar{\eta}(f), u(f)), \quad (18)$$

де $\bar{\eta}(f)$ – середнє (за сукупністю ДРВ) значення завантаженості в i -му частотному каналі.

Тоді з урахуванням апіорних даних про розподіл ДРВ за частотами можна розрахувати залежність часу аналізу від частоти відповідно до такого виразу:

$$T_a(f) = \frac{T_0 \Delta \Pi}{\Delta F_s} \frac{\int_{f_i - 0,5\Delta F_s}^{f_i + 0,5\Delta F_s} g(f) df}{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} g(f) df}, \quad (19)$$

де f_i – центральна частота i -го частотного каналу.

Пошук оптимального значення початкового часу аналізу T_0 потребує проведення додаткових досліджень, оскільки ним визначатимуться як показники якості виявлення сигналів в умовах багатопробного ПРХ, так і помилки оцінювання частотно-часових і просторових параметрів ДРВ.

У разі використання групи БпЛА можливий розподіл усієї смуги сканування на окремі діапазони частот і виділення кожного діапазону окремому БпЛА.

6.2. Пошук ДРВ у просторі

Вихідні припущення для моделювання:

1) місцеположення ДРВ, які підлягають оцінюванню, у деякій області простору задане розподілом щільності їх розміщення $p_e(\mathbf{r}_e)$, де $\mathbf{r}_e = (x_e, y_e, z_e)$ – це вектор координат ДРВ;

2) вектор координати БпЛА $\mathbf{r}_s = (x_s, y_s, z_s)$ у кожен момент часу вважаємо відомим (із деякою похибкою), у загальному випадку він змінюється в часі за рахунок переміщення апарату;

3) координати фізичних перешкод є невідомими, оскільки невідомими є координати ДРВ, тому неможливо визначити, які саме із просторових об'єктів розміщені на шляху ПРХ від ДРВ до БпЛА.

Відомими є лише координати будівель та інших великих об'єктів, які потенційно можуть бути перешкодами для ПРХ та заважають польоту БпЛА. Для УКХ-діапазону частот, зокрема вище 900 МГц, практично будь-який об'єкт (дерево, стовп, рекламний щит, лінія електропередач тощо) може бути перешкодою на шляху ПРХ, розсіювачем або відбивачем. Якщо координати будівель та їх вплив на ПРХ ще якось можна врахувати, то вплив таких об'єктів практично не підлягає врахуванню.

Задачею пошуку ДРВ у просторі є побудова такого оптимального маршруту польоту БпЛА, що дозволить із найменшими енергетичними затратами виявити максимальну кількість ДРВ. Маршрут польоту будемо шукати у вигляді масиву координат БпЛА в послідовні моменти часу:

$$\mathbf{R}_s = (\mathbf{r}_{s0}, \mathbf{r}_{s1}, \dots, \mathbf{r}_{sK}), \quad (20)$$

де K – кількість точок для побудови маршруту, а

$$\mathbf{r}_{si} = (x_s(t_i), y_s(t_i), z_s(t_i)) \quad (21)$$

є положенням БпЛА в момент часу t_i .

Обмеження для побудови маршруту:

його розраховують у деякій обмеженій області простору $\mathbf{A}_s$, що визначається дальністю польоту БпЛА;

він повинен мати мінімальну довжину, оскільки час польоту БпЛА обмежений;

максимальна кількість ДРВ буде виявлена тоді, коли ВСШ для більшості з них на маршруті польоту БпЛА буде якомога вищим, тому він повинен рухатися якомога ближче до максимумів розподілу щільності розміщення ДРВ $p(\mathbf{r}_e)$.

У разі полімодального розподілу $p(\mathbf{r}_e)$ (на рис. 5 наведено розподіл для 3 мод) область пошуку $\mathbf{A}_s$ необхідно розбити на окремі райони (**A**, **B** та **C**) таким чином, щоб у кожному з них був один екстремум. На рис. 5 для простоти візуалізації наведено порядок планування маршруту польоту одного БпЛА для випадку розміщення ДРВ на площині. У подальшому будемо розглядати більш загальний випадок для простору.

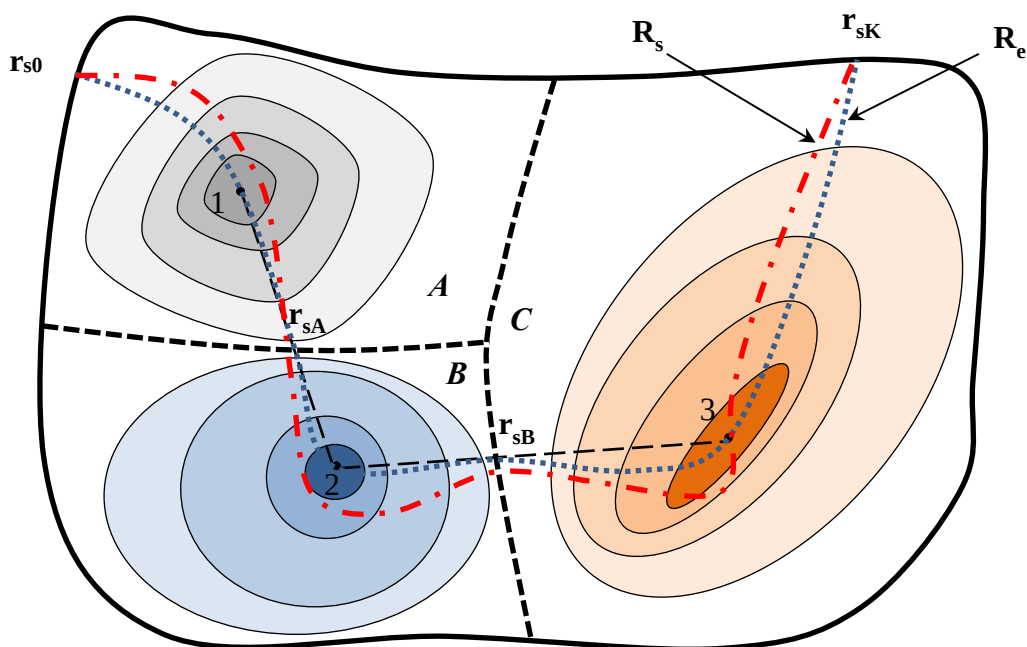


Рис. 5. Планування маршруту польоту одного БпЛА в разі розміщення ДРВ на площині

Перед розрахунком маршруту $\mathbf{R}_s$ задамо точки входу $\mathbf{r}_{s0}$ та виходу $\mathbf{r}_{sK}$ БпЛА з області $\mathbf{A}_s$. Тоді оцінку траєкторії польоту БпЛА будемо розраховувати за таким виразом:

$$\mathbf{R}_s = \arg \min_{\mathbf{R}_s \in \mathbf{A}_s} (\|\mathbf{R}_e - \mathbf{R}_s\|_2 + a \|\Delta \mathbf{r}_s\|_1), \quad (22)$$

де

$$\mathbf{R}_e = (\mathbf{r}_{e0}, \mathbf{r}_{e1}, \dots, \mathbf{r}_{eK}), \quad (23)$$

є масивом значень координат, що відповідають траєкторії польоту БПЛА вздовж максимуму щільності розміщення ДРВ;

$\Delta \mathbf{r}_s$ – масив довжин елементарних переміщень БПЛА;

a – параметр, що визначає штраф за нормою l_1 , і накладає обмеження на довжину шляху, яка повинна бути мінімальною;

$\|\cdot\|_1$ – норма l_1 (манхеттенська відстань);

$\|\cdot\|_2$ – норма l_2 (евклідова відстань).

Відмінність між масивами $\mathbf{R}_s$ та $\mathbf{R}_e$ полягає в тому, що для розрахунку $\mathbf{R}_s$ враховується низка додаткових обмежень, наприклад необхідність обльоту перешкод [41].

Елементи масиву $\mathbf{R}_e$ розраховують із використанням градієнта в такий спосіб:

$$\nabla p_e(\mathbf{r}_{ei}) = \frac{\partial p_e(\mathbf{r}_{ei})}{\partial x_{ei}} \vec{i} + \frac{\partial p_e(\mathbf{r}_{ei})}{\partial y_{ei}} \vec{j} + \frac{\partial p_e(\mathbf{r}_{ei})}{\partial z_{ei}} \vec{k}, \quad (24)$$

де $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – орти системи координат.

Тоді поточне значення вектора $\mathbf{r}_{ei}$ розраховують із використанням методу Ньютона – Рафсона відповідно до такого виразу [42]:

$$\mathbf{r}_{ei}(\Delta r) = \mathbf{r}_{ei-1} - \Delta r \nabla p_e(\mathbf{r}_{ei-1}), \quad (25)$$

де Δr – крок градієнта, оптимальне значення якого визначається шляхом побудови функції

$$F(\Delta r) = p_e(\mathbf{r}_{ei}(\Delta r)), \quad (26)$$

яку необхідно мінімізувати як функцію від Δr . Для цього розраховують і прирівнюють до нуля похідну, а саме:

$$\frac{\partial F(\Delta r)}{\partial \Delta r} = -\nabla p_e(\mathbf{r}_{ei}) \nabla p_e(\mathbf{r}_{ei-1}) = 0. \quad (27)$$

Як видно з виразу (25), для визначення масиву $\mathbf{R}_e$ використовується градієнтний спуск, що дозволяє розраховувати вектори від деякої точки до максимуму щільності $p_e(\mathbf{r}_e)$ (на рис. 5 максимуми позначено точками 1, 2 та 3 всередині районів **A**, **B** та **C**). Перші точки (вектори масиву $\mathbf{R}_e$) обчислюють від точки $\mathbf{r}_{s0}$ до точки 1. Точку $\mathbf{r}_{sA}$ на межі районів **A** та **B** розраховують як перетин прямої, що з'єднує точки 1 та 2 з лінією розділу районів.

Із цієї точки визначають множину точок до точок 1 та 2. Аналогічно знаходять множини точок від точки $\mathbf{r}_{\text{св}}$ до точок 2 та 3. Від точки $\mathbf{r}_{\text{ск}}$ розраховують маршрут до точки 3. Запропонований підхід масштабується на довільну кількість мод розподілу $p_e(\mathbf{r}_e)$.

Під час планування РМ із використанням кількох БПЛА доцільно враховувати відомі методи математичного моделювання застосування груп БПЛА, які розглянуто в [43–45]. Для визначення місцеположення ДРВ у такому разі необхідно організувати обмін інформацією між окремими БПЛА безпосередньо або через наземну станцію керування та контролю для адаптації маршруту польоту до поточної радіоелектронної обстановки.

Висновки. Наукова новизна результатів проведеного досліджень полягає у формулюванні узагальнених моделей прийнятого радіосигналу в умовах багатопроменевого поширення в разі ведення РМ із використанням БПЛА, а також моделей пошуку ДРВ у частотно-часовій області та в просторі. Надано рекомендації щодо оптимізації процесів РМ із погляду максимізації виявлених ДРВ. Отримані результати можуть бути впроваджені в наявні та перспективні комплекси й системи РМ на базі БПЛА, оскільки це дозволить підвищити ефективність пошуку ДРВ в умовах багатопроменевого поширення радіохвиль. Перспективи подальших досліджень у даному напрямку полягають у розробленні параметричних моделей розподілів щільності розміщення ДРВ у просторі.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Лаптев О. А. Методологічні основи автоматизованого пошуку цифрових засобів негласного отримання інформації : монографія. Київ : ДУТ, 2020. 332 с.
2. Методи та засоби цифрового оброблення радіосигналів для систем безпеки та моніторингу : монографія / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, В. М. Кичак. Вінниця : ВНТУ, 2020. 126 с.
3. Слободянюк П. В., Благодарний В. Г., Ступак В. С. Довідник з радіомоніторингу / Під заг. ред. П. В. Слободянюка. Ніжин : ТОВ "Видавництво "Аспект-Поліграф", 2008. 588 с.
4. Про затвердження Порядку здійснення радіочастотного моніторингу у смугах радіочастот загального користування : постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах електронних комунікацій, радіочастотного спектра та надання послуг поштового зв'язку від 19.04.2023 № 139. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0758-23#Text> (дата звернення: 14.07.2025).
5. Papoci P., Radisic T., Mustra M. Integration of Software Defined Radio on an Unmanned Aerial Vehicle // Transportation Research Procedia. 2022. Vol. 64. P. 308–315. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.09.035>
6. UAV Aided Virtual Cooperative Spectrum Sensing for Cognitive Radio Networks / N. Gul, S. Kim, J. Ali, J. Kim // PLoS One. 2023. Vol. 5. P. 36. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0291077>
7. Abohashish S. M. M., Rizk R. Y., Elsedimy E. I. Trajectory Optimization for UAV-Assisted Relay over 5G Networks Based on Reinforcement Learning Framework // J. Wireless Com Network. 2023. Vol. 55. <https://doi.org/10.1186/s13638-023-02268-x>

8. Yan L., Cai Y., Wei H. Unmanned Aerial Vehicle-Assisted Wideband Cognitive Radio Network Based on DDQN-SAC. EURASIP // J. Adv. Signal Process. 2024. Vol. 43. <https://doi.org/10.1186/s13634-024-01141-3>
9. Demonstration of UAV based GPS Jammer Localization During a Live Interference Exercise / A. Perkins et al. // Proc. the 29th International Technical Meeting of the Satellite. 2016. P. 3094–3106.
10. 3D Spectrum Sharing for Hybrid D2D and UAV Networks / B. Shang et al. // IEEE Transactions on Communications. 2020. Vol. 68, № 9. P. 5375–5389. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.2997957>
11. UAV-Based 3D Spectrum Sensing in Spectrum-Heterogeneous Networks / F. Shen, G. Ding, Z. Wang, Q. Wu // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2019. Vol. 68, № 6. P. 5711–5722. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2909167>
12. Distributed UAV Swarm Augmented Wideband Spectrum Sensing Using Nyquist Folding Receiver / K. Jiang et al. // Electrical Engineering and Systems Science. 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.07077>
13. 3D Compressed Spectrum Mapping with Sampling Locations Optimization in Spectrum-Heterogeneous Environment / F. Shen et al. // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2022. Vol. 21, № 1. P. 326–338. <https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3095342>
14. Integrating Cognitive Radio with Unmanned Aerial Vehicles: An Overview / D. Santana et al. // Sensors. 2021. Vol. 21. P. 830. <https://doi.org/10.3390/s21030830>
15. Overview of the Use of Drones for Spectrum Monitoring Applications. Document WINNF-TR-2009. Version 1.0.0. 2021. 38 p.
16. Integrated Drone Solutions. High-performance TRL-9 RF Sensors for MoD, Government Agencies, and Commercial Customers Requiring EW & ISR Sensor Payload Solutions for UAVs. URL: <https://www.crfs.com/deployment/integrated-drones> (last accessed: 04.06.2025).
17. Spectrum Monitoring, Direction Finding and Microwave Link Measurements from the Air // LS OBSERVER Airborne Monitoring Unit (AMU) URL: <https://www.lstelcom.com/en/products/airborne-measurements/amu/> (last accessed: 04.06.2025).
18. Функція щільності розподілу цілей для планування застосування безпілотних літальних апаратів / І. В. Пулеко, В. О. Чумакевич., І. М. Шестак та ін. // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2024. Вип. 27 (І). С. 69–81. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2024.27.06>
19. Diggle P. J. Statistical Analysis of Spatial and Spatio-Temporal Point Patterns. 3rd ed. Taylor & Francis Group, LLC, 2014. 297 p.
20. Statistical Analysis and Modelling of Spatial Point Patterns / J. Illian et al. John Wiley & Sons Ltd, 2008. 557 p.
21. Streit R. L. Poisson Point Processes. Imaging, Tracking, and Sensing. Springer Science+Business Media, LLC, 2010. 280 p.
22. Bishop C. M. Pattern Recognition and Machine Learning. Springer, 2006. 758 p.
23. Kernel Density Estimation via the Parzen-Rosenblatt Window Method – Explained Using Python. URL: https://sebastianraschka.com/Articles/2014_kernel_density_est.html (last accessed: 04.06.2025).

24. Rappaport T. S. Wireless Communications: Principles And Practice. 2/E. Pearson Education, 2010. 709 p.
25. Microwave Mobile Communications. Ed. by William C. Jakes. A John Wiley & Sons, Inc. Publication, 1974. 645 p.
26. Lathi B. P., Ding Z. Modern Digital and Analog Communication Systems. 5th ed. Oxford University Press, 2019. 1025 p.
27. Huang P., Rajan D., Camp J. Weibull and Suzuki Fading Channel Generator Design to Reduce Hardware Resources // IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Shanghai, China, 2013. P. 3443–3448. <https://doi.org/10.1109/WCNC.2013.6555117>
28. Stüber G. L. Principles of Mobile Communication. 4th ed. Springer, 2017. 732 p.
29. 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. <https://doi.org/10.3390/fi11050106>
30. 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. <https://doi.org/10.1109/VETEC.1998.683675>
31. Recommendation ITU-R P.1406-2. Propagation Effects Relating to Terrestrial Land Mobile and Broadcasting Services in the VHF and UHF Bands P. Series Radiowave Propagation. (07/2015). 13 p.
32. Kim H. Wireless Communications Systems Design. John Wiley & Sons, Ltd., 2015. 437 p.
33. Pätzold M. Mobile Fading Channels. John Wiley & Sons, Ltd., 2002. 430 p.
34. Simon M. K., Alouini M.-S. Digital Communication over Fading Channels: A Unified Approach to Performance Analysis. John Wiley & Sons, Inc., 2000. 551 p.
35. The COST 259 Directional Channel Model. Part II: Macrocells / H. Asplund et al. / IEEE Transactions on Wireless Communications. Vol. 5, № 12. 2006. P. 3434–3450. <https://doi.org/10.1109/TWC.2006.01118>
36. Бугайов М. В. Математична модель прийнятого сигналу панорамним засобом радіомоніторингу на безпілотному літальному апараті // Всеукр. міжвідомчий наук.-техн. зб. “Радіотехніка”. Харків : ХНУРЕ, 2024. № 219. С. 82–91. <https://doi.org/10.30837/rt.2024.4.219.09>
37. Heinz S. Mathematical Modeling. Springer, 2011. 474 p.
38. Davison A. C. Statistical Models. Cambridge University Press, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, 2003, 738 p.
39. Wasserman L. All of Statistics: A Concise Course in Statistical Inference. Springer Science & Business Media, 2013, 442 p.
40. Van Trees H. L. Optimum Array Processing. Part IV of Detection, Estimation and Modulation Theory. J. Wiley & Sons, Inc., New York, 2002. 1470 p. <https://doi.org/10.1002/0471221104>
41. Advances in UAV Path Planning: A Comprehensive Review of Methods, Challenges, and Future Directions / W. Meng et al. // Drones. 2025. Vol. 9. P. 376. <https://doi.org/10.3390/drones9050376>

42. Brunton S. L., Kutz J. N. Data-Driven Science and Engineering. Machine Learning, Dynamical Systems, and Control. Cambridge University Press, 2019. <https://doi.org/10.1017/9781108380690>
43. Василенко О. Методи математичного моделювання застосування рою ударних безпілотних літальних апаратів // Повітряна міць України. 2025. № 1 (8). С. 54–70. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2025-1-8-54-70>
44. Yang Y., Xiong X., Yan Y. UAV Formation Trajectory Planning Algorithms: A Review // Drones. 2023. Vol. 7 (1). P. 62. <https://doi.org/10.3390/drones7010062>
45. Adaptive Multi-UAV Trajectory Planning Leveraging Digital Twin Technology for Urban IIoT Applications / L. Zhao et al. // IEEE Transactions on Network Science and Engineering. Nov.-Dec. 2024. Vol. 11, № 6. P. 5349–5363. <https://doi.org/10.1109/TNSE.2023.3344428>

Стаття надійшла до редакції 14.08.2025.

REFERENCES

1. Laptiev, O. A. (2020). *Metodolohichni osnovy avtomatyzovanoho poshuku tsyfrovyykh zasobiv nehlasnoho otrymannia informatsii: monohrafiia* [Methodological Foundations of Automated Search for Digital Means of Covert Information Acquisition: Monograph]. Kyiv [in Ukrainian].
2. Bortnyk, H. H., Vasylykivskiy, M. V., & Kychak, V. M. (2020). *Metody ta zasoby tsyfrovoho obroblyennia radiosyhnaliv dlia system bezpeky ta monitorynhu: monohrafiia* [Methods and Means of Digital Processing of Radio Signals for Security and Monitoring Systems: Monograph]. Vinnytsia [in Ukrainian].
3. Slobodianiuk, P. V., Blahodarnyi, V. H., & Stupak, V. S. (2008). *Dovidnyk z radiomonitorynhu* [Handbook of Radio Monitoring]. Nizhyn [in Ukrainian].
4. *Pro zatverdzhennia Poriadku zdiisnennia radiochastotnoho monitorynhu u smuhakh radiochastot zahalnoho korystuvannia : postanova Natsionalnoi komisii, shcho zdiisniue derzhavne rehuliuвання u sferakh elektronnykh komunikatsii, radiochastotnoho spektra ta nadannia posluh poshtovoho zv'iazku vid 19.04.2023 № 139* [On Approval of the Procedure for Conducting Radio Frequency Monitoring in Public Radio Frequency Bands: Resolution of the National Commission for State Regulation in the Spheres of Electronic Communications, Radio Frequency Spectrum and Provision of Postal Services from 19.04.2023 № 139]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0758-23#Text> [in Ukrainian].
5. Papoci, P., Radisic, T., & Mustra, M. (2022). Integration of Software Defined Radio on an Unmanned Aerial Vehicle. *Transportation Research Procedia*, 64, 308–315. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.09.035>
6. Gul, N., Kim, S., Ali, J., & Kim, J. (2023). UAV Aided Virtual Cooperative Spectrum Sensing for Cognitive Radio Networks. *PLoS One*, 5, 36. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0291077>
7. Abohashish, S. M. M., Rizk, R. Y., & Elsedimy, E. I. (2023). Trajectory Optimization for UAV-Assisted Relay over 5G Networks Based on Reinforcement Learning Framework. *J. Wireless Com Network*, 55. <https://doi.org/10.1186/s13638-023-02268-x>
8. Yan, L., Cai, Y., & Wei, H. (2024). Unmanned Aerial Vehicle-Assisted Wideband Cognitive Radio Network Based on DDQN-SAC. *EURASIP. J. Adv. Signal Process*, 43. <https://doi.org/10.1186/s13634-024-01141-3>

9. Perkins, A. et al. (2016). Demonstration of UAV based GPS Jammer Localization During a Live Interference Exercise. In *Proc. the 29th International Technical Meeting of the Satellite*. (pp. 3094–3106).
10. Shang, B. et al. (2020). 3D Spectrum Sharing for Hybrid D2D and UAV Networks. *IEEE Transactions on Communications*, 68, 9, 5375–5389. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.2997957>
11. Shen, F., Ding, G., Wang, Z., & Wu, Q. (2019). UAV-Based 3D Spectrum Sensing in Spectrum-Heterogeneous Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68, 6, 5711–5722. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2909167>
12. Jiang, K. et al. (2023). Distributed UAV Swarm Augmented Wideband Spectrum Sensing Using Nyquist Folding Receiver. *Electrical Engineering and Systems Science*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.07077>
13. Shen, F. et al. (2022). 3D Compressed Spectrum Mapping with Sampling Locations Optimization in Spectrum-Heterogeneous Environment. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 21, 1, 326–338. <https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3095342>
14. Santana, D. et al. (2021). Integrating Cognitive Radio with Unmanned Aerial Vehicles: An Overview. *Sensors*, 21, 830. <https://doi.org/10.3390/s21030830>
15. *Overview of the Use of Drones for Spectrum Monitoring Applications*. Document WINNF-TR-2009. (2021). Version 1.0.0.
16. *Integrated Drone Solutions. High-performance TRL-9 RF Sensors for MoD, Government Agencies, and Commercial Customers Requiring EW & ISR Sensor Payload Solutions for UAVs*. (n.d.). Retrieved from <https://www.crfs.com/deployment/integrated-drones>
17. *Spectrum Monitoring, Direction Finding and Microwave Link Measurements from the Air. LS OBSERVER Airborne Monitoring Unit (AMU)*. (n.d.). Retrieved from <https://www.lstelcom.com/en/products/airborne-measurements/amu/>
18. Puleko, I. V., Chumakevych, V. O., & Shestak, I. M. et al. (2024). Funktsiia shchilnosti rozpodilu tsilei dlia planuvannia zastosuvannia bezpilotnykh litalnykh aparativ [Target Density Function for UAV Planning]. *Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats [Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems: Scientific Journal of Korolov Zhytomyr Military Institute]*, 27 (I), 69–81. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2024.27.06> [in Ukrainian].
19. Diggle, P. J. (2014). *Statistical Analysis of Spatial and Spatio-Temporal Point Patterns*. (3rd ed.). Taylor & Francis Group, LLC.
20. Illian, J. et al. (2008). *Statistical Analysis and Modelling of Spatial Point Patterns*. John Wiley & Sons Ltd.
21. Streit, R. L. (2010). *Poisson Point Processes. Imaging, Tracking, and Sensing*. Springer Science+Business Media, LLC.
22. Bishop, C. M. (2006). *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer.
23. *Kernel Density Estimation via the Parzen-Rosenblatt Window Method – Explained Using Python*. (n.d.). Retrieved from https://sebastianraschka.com/Articles/2014_kernel_density_est.html
24. Rappaport, T. S. (2010). *Wireless Communications: Principles And Practice*. 2/E. Pearson Education.

25. *Microwave Mobile Communications*. (1974). Ed. by William C. Jakes. A John Wiley & Sons, Inc. Publication.
26. Lathi, B. P., & Ding, Z. (2019). *Modern Digital and Analog Communication Systems*. (5th ed.). Oxford University Press.
27. Huang, P., Rajan, D., & Camp, J. (2013). Weibull and Suzuki Fading Channel Generator Design to Reduce Hardware Resources. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. Shanghai, China. (pp. 3443–3448). <https://doi.org/10.1109/WCNC.2013.6555117>
28. Stüber, G. L. (2017). *Principles of Mobile Communication*. (4th ed.). Springer.
29. Karagiannis, G. A., & Panagopoulos, A. D. (2019). Dynamic Lognormal Shadowing Framework for the Performance Evaluation of Next Generation Cellular Systems. *Future Internet*, MDPI, 11 (5), 1–18. <https://doi.org/10.3390/fi11050106>
30. Patzold, M., & Laue, F. (1998). Statistical Properties of Jakes' Fading Channel Simulator. In *VTC '98. 48th IEEE Vehicular Technology Conference. Pathway to Global Wireless Revolution (Cat. No. 98CH36151)*. Ottawa, ON, Canada. Vol. 2. (pp. 712–718). <https://doi.org/10.1109/VETEC.1998.683675>
31. Recommendation ITU-R P.1406-2. Propagation Effects Relating to Terrestrial Land Mobile and Broadcasting Services in the VHF and UHF Bands. (07/2015). *P. Series Radiowave Propagation*.
32. Kim, H. (2015). *Wireless Communications Systems Design*. John Wiley & Sons, Ltd.
33. Pätzold, M. (2002). *Mobile Fading Channels*. John Wiley & Sons, Ltd.
34. Simon, M. K., & Alouini, M.-S. (2000). *Digital Communication over Fading Channels: A Unified Approach to Performance Analysis*. John Wiley & Sons, Inc.
35. Asplund, H. et al. (2006). The COST 259 Directional Channel Model. Part II: Macrocells In *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 5, 12, 3434–3450. <https://doi.org/10.1109/TWC.2006.01118>
36. Buhaiov, M. V. (2024). Matematychna model pryiniatoho syhnalu panoramnym zasobom radiomonitorynhu na bezpilotnomu litalnomu aparati [Mathematical Model of the Received Signal by Panoramic Means of Radio Monitoring on an Unmanned Aerial Vehicle]. In *Vseukr. mizhvidomchyi nauk.-tekhn. zbirn. "Radiotekhnika" [All-Ukrainian interdepartmental scientific and technical collection "Radio engineering"]*. Kharkiv. № 219. (pp. 82–91). <https://doi.org/10.30837/rt.2024.4.219.09> [in Ukrainian].
37. Heinz, S. (2011). *Mathematical Modeling*. Springer.
38. Davison, A. C. (2003). *Statistical Models*. Cambridge University Press, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne.
39. Wasserman L. (2013). *All of Statistics: A Concise Course in Statistical Inference*. Springer Science & Business Media.
40. Van Trees, H. L. (2002). *Optimum Array Processing*. Part IV of Detection, Estimation and Modulation Theory. J.Wiley & Sons, Inc., New York. <https://doi.org/10.1002/0471221104>
41. Meng, W. et al. (2025). Advances in UAV Path Planning: A Comprehensive Review of Methods, Challenges, and Future Directions. *Drones*, 9, 376. <https://doi.org/10.3390/drones9050376>

42. Brunton, S. L., & Kutz, J. N. (2019). *Data-Driven Science and Engineering. Machine Learning, Dynamical Systems, and Control*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108380690>
43. Vasylenko, O. (2025). Metody matematychnoho modeliuвання zastosuvannya roiu udarnykh bezpilotnykh litalnykh aparativ [Methods of Mathematical Modeling of the Use of Swarms of Strike Unmanned Aerial Vehicles]. *Povitriana mits Ukrainy [Air Power of Ukraine]*, 1 (8), 54–70. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2025-1-8-54-70> [in Ukrainian].
44. Yang, Y., Xiong, X., & Yan, Y. (2023). UAV Formation Trajectory Planning Algorithms: A Review. *Drones*, 7 (1), 62. <https://doi.org/10.3390/drones7010062>
45. Zhao, L. et al. (2024). Adaptive Multi-UAV Trajectory Planning Leveraging Digital Twin Technology for Urban IIoT Applications. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 11, 6, 5349–5363. <https://doi.org/10.1109/TNSE.2023.3344428>

M. V. Buhaiov, V. V. Kliaznyka, M. I. Oboronov

UNMANNED AERIAL VEHICLES BASED SPECTRUM SENSING PROCESS MATHEMATICAL MODELING

Due to rapid development of radio communication technology, implementation of new radio technologies and increasing in the speed of transmission of ever-increasing volumes of information, the need for a general purpose radio frequency spectrum is growing significantly every year. Therefore, spectrum sensing comprises a special role in the process of improving the radio frequency spectrum management system. In large cities with dense multi-story buildings, spectrum sensing, even with the use of portable devices, will be quite difficult, and in some cases practically impossible. The use of unmanned aerial vehicles increases the flexibility of spatial placement of radio monitoring devices and the speed of scanning a given area, improves the energy accessibility of radio emission sources by creating conditions for direct visibility. The purpose of the article is to develop mathematical models of spectrum sensing process using unmanned aerial vehicles, which will increase the efficiency of radio monitoring in conditions of multipath fading by optimizing signal processing methods and algorithms. When presenting the main material of the study, the tasks and components of spectrum sensing process are defined, the parameters of a single source of radio emission and their set in a certain area of space are described using appropriate probability models, as well as parameters of radio monitoring device and radio wave propagation environment. It is shown that flight path of an unmanned aerial vehicle should be planned taking into account obstacles and a priori distribution of the density of radio emission sources in space. Models of received signal are presented for their narrowband and broadband representations. When modeling the process of radio emission sources searching, it is advisable to consider separately the search for signals in frequency-time domain and in space.

Keywords: multipath fading; unmanned aerial vehicle; radio frequency source; mathematical modelling; spectrum sensing.