

АЛГОРИТМ ДИНАМІЧНОЇ ІМІТАЦІЇ РАДІОВИПРОМІНЮВАНЬ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Для забезпечення підвищення ефективної протидії безпілотним літальним апаратам виникає необхідність в імітації певної радіоелектронної обстановки у визначеному районі. Для вирішення цього завдання запропоновано модель імітації розповсюдження радіовипромінювань елементів обладнання безпілотних літальних апаратів у польоті. На її основі розроблено алгоритм імітації радіовипромінювань безпілотних літальних апаратів з урахуванням режимів функціонування бортової радіопередавальної апаратури апарата, можливої траєкторії його руху, втрат у середовищі розповсюдження радіохвиль і впливу бортових та зовнішніх завад.

Розроблений алгоритм також дозволяє досліджувати ефективність імітації роботи власних безпілотних літальних апаратів в інтересах дезінформації противника, можливості власних засобів радіомоніторингу щодо виявлення радіовипромінювань безпілотних літальних апаратів противника, енергетичні характеристики змодельованих радіосигналів безпілотних літальних апаратів, обґрунтовувати вимоги до перспективних зразків, засобів радіомоніторингу та боротьби з безпілотними літальними апаратами.

Ключові слова: *безпілотний літальний апарат, безпілотний авіаційний комплекс, імітація радіовипромінювання, модель, алгоритм.*

Постановка проблеми в загальному вигляді. Технічний прогрес на сучасному етапі життя дає можливість створювати багато техніки й обладнання для виконання різних завдань, у тому числі й для добування, обробки та передачі розвідувальної інформації.

Розвиток сучасної техніки відбувається дуже швидко і знаходить своє застосування як у цивільному житті, так й у військовій сфері. Сучасний збройний конфлікт важко уявити без застосування засобів розвідки, систем зв'язку та передачі даних.

Протягом останніх років велика увага приділялася розвитку безпілотних літальних апаратів (БпЛА) та безпілотних авіаційних комплексів (БпАК), які в усьому світі здобули неабияку популярність та широко застосовуються для вирішення різноманітних завдань.

Переважна більшість БпЛА в процесі виконання завдань постійно або періодично здійснюють передачу інформації на наземний пункт управління (ПУ) або ретранслятор. Застосування значної кількості різнотипних БпЛА обумовлює використання як різноманітного програмно-алгоритмічного забезпечення, так і багатьох видів складних сигналів. Це, у свою чергу, призводить до ускладнення цілеспрямованого впливу засобами радіоелектронної боротьби (РЕБ) на радіоелектронні системи БпЛА противника.

Дієвим підходом до підвищення ефективності протидії БпЛА засобами РЕБ є створення системи імітації радіоелектронної обстановки (РЕО) у районі виконання спеціальних завдань, при чому засоби імітації радіовипромінювань БпЛА в польоті будуть одним із важливих елементів такої системи.

З урахуванням зазначеного, дослідження можливостей порушень електромагнітної сумісності бортових систем БпЛА для забезпечення втрати або погіршення стійкості

зв'язку з ПУ шляхом імітації радіовипромінювань БпЛА в польоті є складним та актуальним науково-практичним завданням.

Складність розробки та значна вартість упровадження засобів імітації радіовипромінювань БпЛА в польоті перш за все вимагають проведення досліджень із використанням методів імітаційного моделювання. Таким чином, постає часткове завдання щодо розробки математичної моделі та алгоритму імітації радіовипромінювань БпЛА в польоті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із відомих способів створення перешкод радіоелектронним засобам противника є імітація РЕО у визначеному районі. Загальні відомості щодо реалізації заходів імітації РЕО розглянуто у [1, 2]. Створення зворотних імітаційних (дезінформуючих) перешкод для подавлення каналів визначення дальності, швидкості та кутових координат радіолокаційних станцій, а також особливості застосування різноманітних пасивних імітаційних засобів для модифікації сигнального простору якісно проаналізовано у [3]. Проте питанням імітації РЕО в умовах застосування БпЛА приділялося недостатньо уваги. Так, один із підходів передбачає розробку концептуальної моделі динамічної РЕО для систем зв'язку без конкретизації особливостей застосування БпЛА: траєкторії його руху в польоті, а також режимів роботи бортової радіопередавальної апаратури [4]. В інших [5, 6] розглядають сигнали, які випромінюються БпЛА, лише з урахуванням передачі інформації, не звертаючи увагу на формування імітаційних перешкод у зоні застосування БпЛА.

Отже, завданням досліджень є розробка алгоритму імітації радіовипромінювань елементів обладнання БпЛА в польоті, який врахує особливості функціонування апарата, втрати в середовищі розповсюдження радіохвиль та вплив бортових і зовнішніх завад.

Виклад основного матеріалу. Оскільки одним з основних завдань, для виконання яких призначені БпЛА, є передача розвідувальної та телеметричної інформації на ПУ, то радіосигнали, які випромінюються, є носіями інформації, а взаємодія такої радіоелектронної системи з навколишнім середовищем відбувається в електромагнітному вигляді. Якщо характер цієї взаємодії сприяє передачі інформації на ПУ, то мова йде про корисні радіовипромінювання, усі ж інші вважаються перешкодами. Такий радіосигнал може бути описаний у вигляді випадкового процесу $U_{\text{БпЛА}}(t)$:

$$U_{\text{БпЛА}}(t) = f(D_{\text{БпЛА}}(t), n_{\text{БпЛА}}(t), r_{\text{БпЛА}}(t)) \text{ при } f_{\text{БпЛА}} \neq 0, \quad (1)$$

де $D_{\text{БпЛА}}(t)$ – інформативний параметр;

$n_{\text{БпЛА}}(t)$ – сукупність невідомих неінформативних параметрів;

$r_{\text{БпЛА}}(t)$ – точка в просторі;

$f_{\text{БпЛА}}$ – частота електромагнітного випромінювання елемента обладнання БпЛА.

У результаті проведеного аналізу власних випромінювань обладнання БпЛА [7] встановлено, що до його елементів, які мають корисні власні радіовипромінювання, належить апаратура інформаційного та телеметричного радіоканалів. Для забезпечення імітації радіовипромінювань зазначених елементів обладнання БпЛА в польоті необхідно також враховувати певні особливості, розглянемо їх.

1. Переміщення БпЛА в просторі відбувається протягом усього часу виконання завдання, при чому траєкторія його польоту змінюється за програмою, керуючими сигналами з ПУ або комбіновано.

2. Власні радіовипромінювання елементів обладнання БпЛА мають різний енергетичний потенціал.

3. Функціонування БпЛА відбувається в умовах відсутності навмисних радіоелектронних завад противника, тому що вони перш за все впливатимуть на роботу його бортової радіоелектронної апаратури.

4. Спектр власних радіовипромінювань БпЛА знаходиться в широкому діапазоні.

5. Бортові радіопередавальні засоби БпЛА можуть функціонувати в постійному чи періодичному режимі, а також за програмою.

6. Структурні властивості радіовипромінювань елементів обладнання БпЛА визначаються типами радіоелектронного обладнання та алгоритмами їх функціонування.

7. У зв'язку з необхідністю забезпечення надійного радіозв'язку в умовах маневрування та зміни напрямку польоту БпЛА використовуються ненаправлені передавальні антени.

Відповідно до відомих підходів розробки радіоелектронних систем [8], передусім варто розробити концептуальну модель імітації розповсюдження радіовипромінювань БпЛА. Докладну структурну схему моделі, що відображає сутність поставленої задачі та принципи її розв'язання, зображено на рис. 1

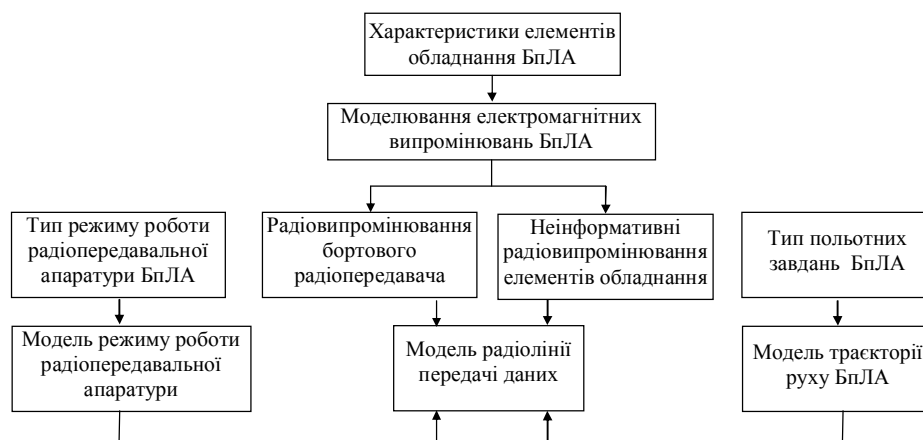


Рис. 1. Концептуальна модель імітації розповсюдження радіовипромінювань елементів обладнання БпЛА в польоті

Вхідними елементами для імітації радіовипромінювань елементів обладнання БпЛА в польоті доцільно встановити характеристики його обладнання, які залежать від типу апарата, можливу траєкторію його руху та режими роботи бортової радіопередавальної апаратури. Результатом моделювання будуть параметри радіовипромінювання бортового радіопередавача БпЛА в польоті з урахуванням впливу бортових та зовнішніх завад, режиму роботи радіопередавальної апаратури, типу польотних завдань, а також умов розповсюдження радіохвиль у середовищі. Конкретизація запропонованої концептуальної моделі імітації радіовипромінювань елементів обладнання БпЛА в польоті зводиться до встановлення основних вхідних та вихідних даних, а також порядку визначення результату.

Задля вирішення завдання розробки моделі імітації радіовипромінювань БпЛА в польоті попередніми вхідними даними визначено:

- S_{KH} – радіоелектронне обладнання корисного навантаження (КН) БпЛА;
- $S_{БКУ}$ – радіоелектронне обладнання бортового комплексу управління (БКУ) БпЛА;
- $S_{ВМ}$ – тип виконавчих механізмів (ВМ) БпЛА;
- $S_{СУ}$ – тип силової установки (СУ) БпЛА;
- $V_{БпЛА}$ – швидкість руху БпЛА;
- X_0, Y_0, Z_0 – початкові просторові координати БпЛА;
- $B_{БпЛА}$ – кут курсу БпЛА;
- $R_{БпЛА}$ – кут нахилу траєкторії руху БпЛА;
- $T_{ім}$ – час імітації радіовипромінювання БпЛА;
- $\Delta t_{мод}$ – крок моделювання;
- $T_{рзв}$ – час радіозв'язку БпЛА;
- $T_{рмовч}$ – час радіомовчання БпЛА;
- $k_{рзв}$ – коефіцієнт, який визначає час радіозв'язку;
- $k_{рмовч}$ – коефіцієнт, який визначає час радіомовчання;
- $K_{сзв}$ – кількість сеансів радіозв'язку.

Оцінку результатів доцільно здійснювати в точці з координатами X_{PM}, Y_{PM}, Z_{PM} , у якій розміщено засіб радіомоніторингу (РМ). У такому разі результатом буде випадковий процес $U_{БпЛА}(t)$, що характеризує радіовипромінювання БпЛА в польоті. Зв'язок вхідних і вихідних параметрів запропонованої моделі імітації розповсюдження радіовипромінювань елементів обладнання БпЛА в польоті зображено на рис. 2.

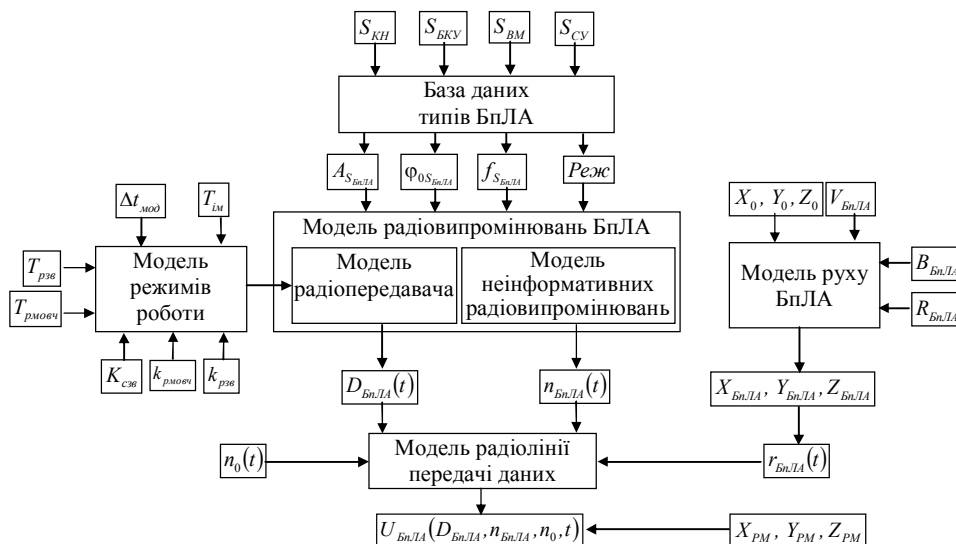


Рис. 2. Модель імітації розповсюдження радіовипромінювань елементів обладнання БпЛА в польоті

Параметрами для моделювання випромінювань елементів обладнання БпЛА є:

- $f_{S_{БпЛА}}$ – частота радіовипромінювання елемента обладнання БпЛА;

$A_{S_{\text{БпЛА}}}$ – амплітуда радіовипромінювання елемента обладнання БпЛА;

$\varphi_{0S_{\text{БпЛА}}}$ – початкова фаза радіовипромінювання елемента обладнання БпЛА;

Реж – режим роботи бортового радіопередавального засобу БпЛА.

Зазначені радіовипромінювання (див. рис. 2) можуть бути розділені на інформативні $D_{\text{БпЛА}}(t)$ та неінформативні $n_{\text{БпЛА}}(t)$, причому перші визначаються характеристиками радіопередавача, а другі виступають у ролі бортових радіоелектронних завод. У такому разі радіосигнал, який випромінюється радіопередавачем БпЛА, складається із суміші корисного сигналу $D_{\text{БпЛА}}(t)$, бортових завод $n_{\text{БпЛА}}(t)$ та білого гаусівського шуму $n_0(t)$:

$$U_{\text{БпЛА}}(t) = D_{\text{БпЛА}}(t) + n_{\text{БпЛА}}(t) + n_0(t). \quad (2)$$

Інформативні електромагнітні випромінювання БпЛА в польоті $D_{\text{БпЛА}}(t)$ використовують для передачі на ПУ дані про стан обладнання літального апарата, навігаційні параметри, фото- та відеоінформацію тощо. Для цього призначені [5]: командно-телеметричний радіоканал, радіоканали передачі даних, навігації, автоматичної рятівної системи (АРС), пристрою забезпечення посадки (ПЗП) та передачі диференційних поправок (ПДП) (рис. 3).

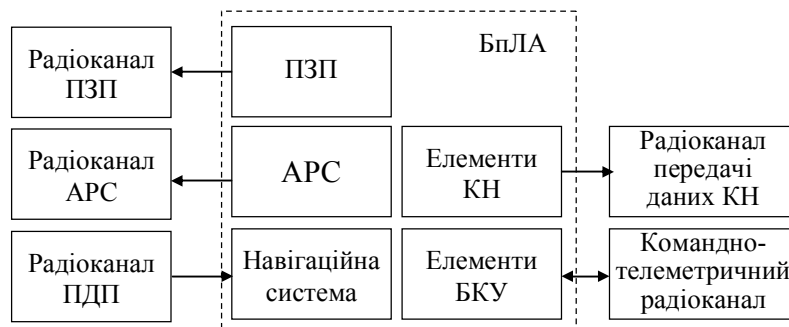


Рис. 3. Радіоканали БпЛА

Частотний діапазон систем передачі даних із БпЛА на ПУ знаходиться в межах ультракороткохвильового (УКХ) діапазону (300–3000 МГц). Його використання обумовлено необхідністю застосування радіопередавального пристрою з невеликою масою та антеною малих габаритних розмірів. Перспективним напрямком у розвитку систем радіозв'язку БпЛА може бути використання частотних діапазонів вище 3 ГГц. Робота в цих діапазонах дасть змогу передавати великі об'єми розвідувальної інформації в режимі реального часу. Проте значна залежність розповсюдження електромагнітних коливань надвисоких частот від погодних умов, вплив багатопроменевості та низка інших факторів значно обмежують сферу його застосування.

Одним з основних показників, що визначає можливості радіоканалу передачі даних з БпЛА на ПУ, є вид модуляції радіопередавача. Крім цього, вимоги до систем зв'язку БпЛА передбачають забезпечення передачі даних із необхідною швидкістю та заданою ймовірністю помилки при великих відстанях між БпЛА і ПУ [9]. Виконання цих вимог у повній мірі досягається в цифрових системах передачі даних. До видів маніпуляцій, які найбільш часто використовуються в цифрових радіолініях передачі даних з борту БпЛА

на ПУ, належать [6] квадратурна фазова маніпуляція QPSK, квадратурна фазова маніпуляція зі зсувом OQPSK та частотна маніпуляція FSK.

Використання інших багатопозиційних видів модуляції доцільне лише в разі функціонування БпЛА на невеликих відстанях від наземного ПУ, що значно звужує сферу їх застосування. Крім того, якісний прийом сигналів із багатопозиційними модуляціями значно ускладнюється в умовах впливу радіоперешкод. Отже, інформативні електромагнітні випромінювання $D_{\text{БпЛА}}(t)$ можуть приймати одне зі значень, яке встановлюється відповідно до вимог щодо якості каналу зв'язку та швидкості передачі даних із борту БпЛА на ПУ.

Бортові завади у виразі (2) можливо задати адитивною сумішшю радіовипромінювань S елементів обладнання БпЛА:

$$n_{\text{БпЛА}}(t) = \sum_{n=1}^S n_{S_{\text{БпЛА}}}(t) = n_{\text{КН}}(t) + n_{\text{БКУ}}(t) + n_{\text{СУ}}(t) + n_{\text{ВМ}}(t), \quad (3)$$

де $n_{\text{КН}}(t)$ – радіовипромінювання елементів КН БпЛА;

$n_{\text{БКУ}}(t)$ – радіовипромінювання елементів БКУ БпЛА;

$n_{\text{СУ}}(t)$ – радіовипромінювання елементів СУ БпЛА;

$n_{\text{ВМ}}(t)$ – радіовипромінювання елементів ВМ БпЛА.

Необхідною умовою дослідження радіолінії розповсюдження електромагнітних коливань є врахування втрат у середовищі. Радіосигнал $U_{\text{БпЛА}}(D_{\text{БпЛА}}, n_{\text{БпЛА}}, n_0, t)$, який випромінюється, зазнає затухань у радіолінії БпЛА – засіб РМ. У цьому разі результат проходження радіосигналу $U_{\text{БпЛА}}(t)$ від БпЛА до засобу РМ визначається в такий спосіб:

$$U_{\text{БпЛА}}(t) = K_{\text{втр}} U_{\text{БпЛА}}(D_{\text{БпЛА}}, n_{\text{БпЛА}}, n_0, t), \quad (4)$$

де $K_{\text{втр}}$ – втрати потужності радіосигналу в середовищі.

Під час розповсюдження електромагнітних коливань у певному середовищі внаслідок його поляризації виникають зміни їх фазової швидкості та поглинання енергії. Вектор поляризації P середовища в такому випадку визначається як [10]

$$P = (\varepsilon - 1) \varepsilon_0 E = \chi \varepsilon_0 E, \quad (5)$$

де ε – діелектрична проникність речовини середовища;

$\varepsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – діелектрична проникність вакууму;

E – напруженість електричного поля;

χ – діелектрична сприйнятливості речовини середовища.

За відомих значень E вектор поляризації середовища залежить від його діелектричної сприйнятливості, яка для атмосфери визначається за співвідношенням:

$$\chi = \frac{1,552 \cdot 10^{-6} p}{T} + \frac{7,46 \cdot 10^{-4} e}{T^2}, \quad (6)$$

де T – абсолютна температура, К;

p – атмосферний тиск, мбар;

$e = 1,61pq$ – тиск водяних парів, мбар;

q – кількість грамів водяної пари в 1 кг повітря.

Для визначених χ розраховують коефіцієнт ослаблення, виражений у децибелах на кілометр:

$$\psi = \frac{\chi}{\lambda} 4\pi \cdot 10^4 \lg e, \quad (7)$$

де λ – довжина хвилі, м.

Коефіцієнт втрат енергії електромагнітних коливань $K_{emp}(r_{БнЛА})$ для заданої дальності за різних погодних умов з урахуванням [11] може бути розрахований за таким виразом:

$$K_{emp} = 10^{-\frac{\psi r_{БнЛА}}{20}}, \quad (8)$$

де $r_{БнЛА}$ – відстань між БпЛА і засобом РМ.

Окрім зазначеного вище, результуючий сигнал у точці прийому X_{PM}, Y_{PM}, Z_{PM} також буде залежати від поточного місця знаходження БпЛА, якому відповідає вектор $\vec{r}_{БнЛА}(t)$ з початком координат у точці розташування засобу РМ:

$$\vec{r}_{БнЛА}(t) = X_{БнЛА}(t)\vec{i} + Y_{БнЛА}(t)\vec{j} + Z_{БнЛА}(t)\vec{k}, \quad (9)$$

де $X_{БнЛА}(t), Y_{БнЛА}(t), Z_{БнЛА}(t)$ – поточні координати БпЛА на час t ;

$\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – одиничні вектори;

t – поточний час проведення обчислень.

Значення відстані між БпЛА і засобом РМ визначається траєкторією його руху. Для її моделювання доцільно скористатися підходом, за яким встановлюють характер польотного завдання. До найбільш застосовуваних польотних завдань належать [12]: пошук у заданій зоні, баражування у ній, обліт визначеного рубежу, вихід у задану точку та її обліт, пошук у конкретному кутовому секторі чи на заданому маршруті польоту.

Характер руху БпЛА в такому разі доцільно описати математичною моделлю, запропонованою в [13]. Враховуючи те, що для енергетичного оцінювання радіовипромінювань достатньо визначити просторові координати БпЛА, апроксимацію (годограф) траєкторії його руху опишемо системою рівнянь:

$$\begin{cases} X_{БнЛА}(t) = X_0 + V_{БнЛА} t \cos(B_{БнЛА}) \sin(R_{БнЛА}); \\ Y_{БнЛА}(t) = Y_0 + V_{БнЛА} t \cos(B_{БнЛА}) \cos(R_{БнЛА}); \\ Z_{БнЛА}(t) = Z_0 + V_{БнЛА} t \sin(B_{БнЛА}). \end{cases} \quad (10)$$

Для розрахованих поточних координат у тримірному просторі відстань від засобу РМ з відомими координатами X_{PM}, Y_{PM}, Z_{PM} визначаємо як

$$r_{\text{БнЛА}}(t) = \sqrt{(X_{\text{БнЛА}}(t) - X_{\text{PM}})^2 + (Y_{\text{БнЛА}}(t) - Y_{\text{PM}})^2 + (Z_{\text{БнЛА}}(t) - Z_{\text{PM}})^2}. \quad (11)$$

В умовах використання радіопередавача УКХ діапазону дальність радіозв'язку, окрім впливу середовища, обмежується умовою прямої видимості без урахування рефракції [10]:

$$r_{\text{БнЛА}}^{\text{ПВ}} = 3,57(\sqrt{H_{\text{БнЛА}}} + \sqrt{H_{\text{PM}}}), \quad (12)$$

де $H_{\text{БнЛА}}$ – висота польоту БпЛА, м;

H_{PM} – висота підйому приймальної антени засобу РМ, м;

3,57 – безрозмірний коефіцієнт, який з урахуванням нормальної тропосферної рефракції приймає значення 4,12.

У такому разі втрати на лінії можна визначити як

$$K_{\text{emp}}(r_{\text{БнЛА}}(t)) = 10^{-\frac{\psi r_{\text{БнЛА}}(t)}{20}} \quad \text{при} \quad r_{\text{БнЛА}}(t) \leq r_{\text{БнЛА}}^{\text{ПВ}}(t). \quad (13)$$

Отже, математична модель імітації радіовипромінювань елементів обладнання БпЛА в польоті, що розробляється, може бути подана в такому вигляді:

$$U_{\text{БнЛА}}(t) = K_{\text{emp}}(r_{\text{БнЛА}}(t)) [D_{\text{БнЛА}}(t) + n_{\text{БнЛА}}(t) + n_0(t)]. \quad (14)$$

У результаті аналізу параметрів власних радіовипромінювань елементів КН, БКУ, ВМ та СУ [7] можна зробити висновок про наявність корисного (інформативного) сигналу, який можливо виявляти засобами РМ під час функціонування радіопередавальної апаратури інформаційного або (та) телеметричного каналу. Також встановлено, що БпЛА малої дальності інформаційний і телеметричний канали можуть бути об'єднані в один зворотний радіоканал. Крім цього, для забезпечення необхідних вимог щодо обміну інформацією з ПУ використовуються цифрові системи передачі даних. Радіовипромінювання інших елементів обладнання в такому разі відіграє роль невідомих неінформативних параметрів, які доповнюють загальну РЕО.

Важливою особливістю імітації радіовипромінювань БпЛА в польоті є режими роботи бортових засобів. Встановлено [5, 7], що вони можуть функціонувати в постійному чи періодичному режимі, а також у режимі роботи за програмою.

За умови постійного режиму роботи розрахунок значень $U_{\text{БнЛА}}(t)$ здійснюється протягом усього часу імітації $T_{\text{ім}}$ (рис. 4а), який може бути заданий таким співвідношенням:

$$T_{\text{ім}} = \sum_{i=1}^{M_{\text{мод}}} \Delta t_{\text{мод}}, \quad (15)$$

де $M_{\text{мод}}$ – кількість кроків моделювання;

$\Delta t_{\text{мод}} = (t_{i+1} - t_i)$ – крок моделювання.

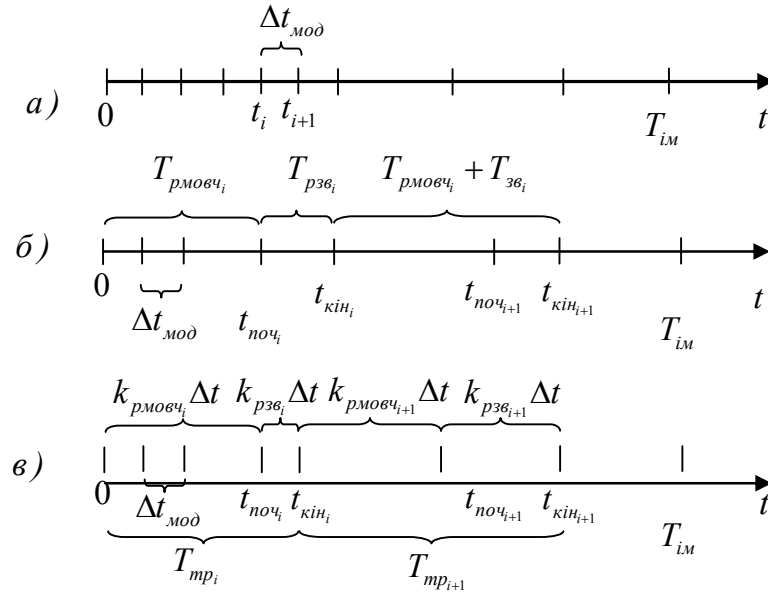


Рис. 4. До визначення часу початку і завершення зв'язку в різних режимах роботи БпЛА

Час початку зв'язку для постійного режиму становить $t_{ноч} = 0$, а час закінчення $-t_{кін} = T_{ім}$.

Періодичний режим роботи характеризується часом радіомовчання $T_{рмовч_i}$ та часом радіозв'язку $T_{рзв_i}$ (рис. 4б), які повторюються через однакові проміжки часу $T_{рмовч_i} + T_{рзв_i}$. Для такого режиму час початку i -го сеансу зв'язку $t_{ноч_i}$ може бути заданий таким співвідношенням:

$$t_{ноч_i} = t_{ноч_{i-1}} + T_{рмовч_i} + T_{рзв_{i-1}}, \quad i = \overline{1, K_{сзв}}, \quad (16)$$

а час закінчення сеансу i -го зв'язку $t_{кін_i}$ визначається як

$$t_{кін_i} = t_{ноч_i} + T_{рзв_i}, \quad i = \overline{1, K_{сзв}}, \quad (17)$$

де $K_{сзв} = \text{div} \left(\frac{T_{ім}}{T_{рмовч_i} + T_{рзв_i}} \right)$ – кількість сеансів зв'язку.

У разі режиму роботи за програмою час початку та закінчення сеансів зв'язку визначається в певному, наперед заданому, порядку (рис. 4в). Для такого режиму час початку i -го сеансу зв'язку $t_{ноч_i}$ може бути заданий з урахуванням коефіцієнтів, які визначають час радіомовчання $k_{рмовч_i}$ та час радіозв'язку $k_{рзв_i}$ для кожного сеансу:

$$t_{ноч_i} = \Delta t \sum_{i=0}^{K_{сзв}} (k_{рмовч_{i+1}} + k_{рзв_i}), \quad (18)$$

а час закінчення i -го сеансу зв'язку $t_{кін_i}$ знаходимо таким чином:

$$t_{кін_i} = \Delta t \sum_{i=1}^{K_{сзв}} (k_{рмовч_i} + k_{рзв_i}). \quad (19)$$

Тривалість між i -и сеансами радіозв'язку T_{mp_i} у такому разі дорівнює

$$T_{mp_i} = \Delta t (k_{рмовч_i} + k_{рзв_i}). \quad (20)$$

Очевидно, що для умов $\forall k_{рмовч_i} = const$ і $\forall k_{рзв_i} = const$ режим роботи за програмою стає періодичним: $T_{mp_i} = T_{рмовч} + T_{рзв} = const$.

Таким чином, визначено основні математичні залежності, що характеризують зміст розробленої математичної моделі імітації радіовипромінювань БПЛА в польоті, яка для квадратурної фазової маніпуляції, наприклад, може бути подана в такому вигляді:

$$U_{БнЛА}(t) = [A_{PSK} \cos(2\pi f_{PSK} t + \varphi_{i_{PSK}}(t)) + n_{БнЛА}(t) + n_0(t)] \cdot 10^{-\frac{\Psi_{р_{БнЛА}}(t)}{20}}, \quad (21)$$

де $t = 0, t_i, t_{i+1}, \dots, T_{ім}$.

Модель імітації радіовипромінювань БПЛА в польоті реалізована за допомогою алгоритму, порядок роботи якого зображено на рис. 5.

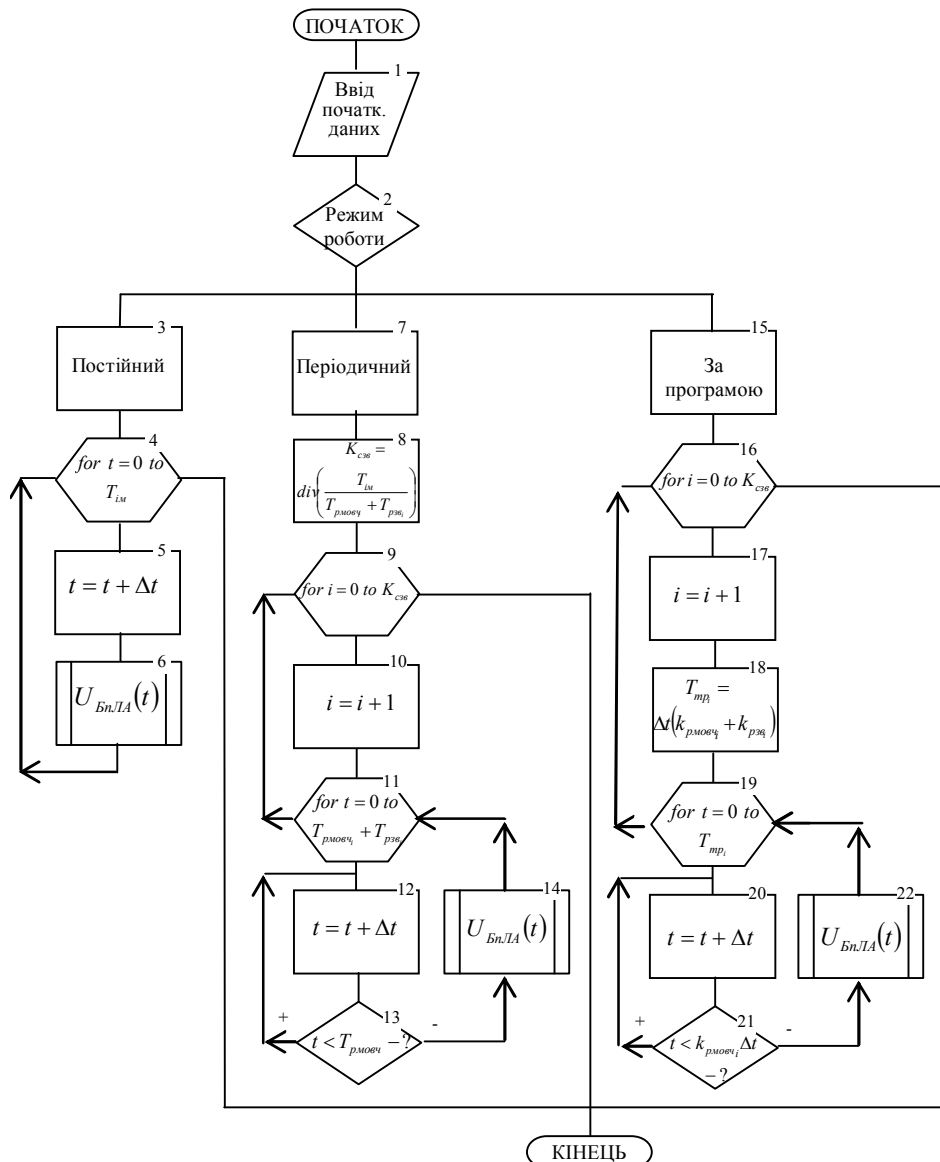


Рис. 5. Блок-схема алгоритму імітації радіовипромінювань БПЛА в польоті

Вхідними даними для розробленого алгоритму визначено загальний час імітації T_{im} та крок моделювання Δt_{mod} . Також для періодичного режиму роботи вхідними даними додатково встановлено постійні значення $T_{рмовч}$ та $T_{рзв}$. Для розрахунку параметрів режиму роботи за програмою в ньому за вхідні дані взято значення кількості сеансів радіозв'язку $K_{сзв}$ та коефіцієнти $k_{рмовч_i}$ і $k_{рзв_i}$, які визначають час радіомовчання та час радіозв'язку для кожного сеансу.

У результаті роботи розробленого алгоритму реалізується імітація випромінювання радіосигналу БпЛА в польоті $U_{БпЛА}(t)$ для заданого режиму роботи протягом часу моделювання T_{im} .

Висновки. У результаті проведених досліджень визначено особливості радіовипромінювань елементів обладнання БпЛА в польоті. Розроблено модель імітації його радіовипромінювань, яка враховує вплив бортових і зовнішніх завад та умови розповсюдження радіохвиль у середовищі. З метою більш точного відтворення процесів, що відбуваються під час польоту БпЛА, враховано можливу траєкторію його руху та режими роботи бортової радіопередавальної апаратури.

Розроблений алгоритм також може застосовуватись під час проведення досліджень: ефективності імітації роботи власних БпЛА в інтересах дезінформації противника; можливостей власних засобів РМ щодо виявлення радіовипромінювань БпЛА противника; енергетичних характеристик змодельованих радіосигналів для оцінювання ефективності застосування БпЛА, а також для обґрунтування вимог до перспективних БпЛА, засобів РМ та РЕБ з БпЛА.

Перспективним напрямом подальших досліджень є розробка методики імітації динамічної РЕО з урахуванням імітації радіовипромінювань БпЛА.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Радиоэлектронная борьба. От экспериментов прошлого до решающего фронта будущего / М. С. Барабанов, С. А. Денисенцев, В. Б. Кашин и др.; под ред. Н. А. Колесова, И. И. Насенкова. Москва : Центр анализа стратегий и технологий, 2015. 248 с.
2. Simulation of Radio Wave Propagation by Beam Tracing / A. Schmitz, T. Rick, Th. Karollstri, Th. Kuhlen, L. Kobbelt // Eurographics Symposium on Parallel Graphics and Visualization. – 2009. URL: https://www.graphics.rwth-aachen.de/media/papers/schmitz_2009_egpgv1.pdf (дата звернення 14.06.2018).
3. Куприянов А. И., Сахаров А. В. Теоретические основы радиоэлектронной борьбы : учеб. пособ. Москва : Вузовская книга, 2007. 356 с., ил.
4. Агеев П. А., Копичев О. А., Петров И. Б. Модель динамической радиоэлектронной обстановки на основе автоматически-лингвистического описания параметров функционирования радиоэлектронных средств // Труды учебных заведений связи. 2016. № 4. С. 5–10.
5. Анализ радиолиний связи с беспилотными летательными аппаратами. Радиотехнические системы. URL: http://radio-systems.org/uav_communications_links (дата звернення 14.06.2018).

6. Слюсар В. Передача данных с борта БПЛА: стандарты НАТО // Электроника: НТБ. 2010. № 3. С. 80–86.
7. Даник Ю. Г., Дупелич С. О. Аналіз власних випромінювань обладнання безпілотних літальних апаратів // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир: ЖВІ ДУТ, 2015. Вип. 10 С. 21–27.
8. Методологічні основи наукових досліджень. Математичне моделювання та оптимізація складних систем і процесів : навч. посіб. / І. Г. Грабар, М. О. Гуменюк, Ю. Г. Даник та ін. Житомир : ЖВІ ДУТ, 2014. 600 с.
9. Дупелич С. О. Удосконалена методика розрахунку дальності виявлення тактичних безпілотних літальних апаратів засобами радіомоніторингу // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. Харків : ХНУПС, 2016. № 3 (24). С. 93–97.
10. Черный Ф. Б. Распространение радиоволн. Изд. 2-е, доп. и перераб. Москва : «Сов. радио», 1972. 464 с.
11. Смирнов Ю. А. Радиотехническая разведка. Москва : Воениздат, 2001. 456 с., ил.
12. Ростопчин В. В. Элементарные основы оценки эффективности применения беспилотных авиационных систем для воздушной разведки // Беспилотная авиация. URL: <http://uav.ru> (дата звернення 14.06.2018).
13. Канатников А. Н., Крищенко А. П., Ткачев С. Б. Допустимые пространственные траектории беспилотного летательного аппарата в вертикальной плоскости // Наука и образование. Москва : МГТУ им. М. Э. Баумана, 2012. № 2 (61). С. 1–14.

Подано 14.06.2018

С. А. Дупелич, С. В. Журавский

АЛГОРИТМ ДИНАМИЧЕСКОЙ ИМИТАЦИИ РАДИОИЗЛУЧЕНИЙ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Для обеспечения повышения эффективного противодействия беспилотным летательным аппаратам необходима имитация определенной радиоэлектронной обстановки в обусловленном районе. Для решения этой задачи предложена модель имитации распространения радиоизлучений элементов оборудования беспилотных летательных аппаратов в полете. На ее основе разработан алгоритм имитации радиоизлучений беспилотных летательных аппаратов с учетом режимов функционирования бортового радиопередатчика аппарата, возможной траектории его движения, потерь в среде распространения радиоволн и влияния бортовых и внешних помех.

Разработанный алгоритм также разрешает исследовать эффективность имитации работы собственных беспилотных летательных аппаратов в интересах дезинформации противника, возможности собственных средств радиомониторинга относительно выявления радиоизлучений беспилотных летательных аппаратов противника, энергетические характеристики смоделированных радиосигналов беспилотных летательных аппаратов, обосновывать требования к перспективным образцам, средствам радиомониторинга и борьбы с беспилотными летательными аппаратами.

Ключевые слова: *беспилотный летательный аппарат, беспилотный авиационный комплекс, имитация радиоизлучения, модель, алгоритм.*

S. O. Dupelich, S. V. Zhuravskiy

ALGORITHM OF DYNAMIC RADIO INCIDENCE IMMEDIATES SAFE LITTLE APPARATUS

In order to increase the effective counteraction to unmanned aerial vehicles, it is necessary to simulate a certain radio-electronic situation in a certain area. To solve this problem, a simulation model for the propagation of radio-exposure to unmanned aerial vehicle equipment components in flight was proposed. On its basis, an algorithm for simulating radiofrequencies of unmanned aerial vehicles has been developed, taking into account the modes of operation of the on-board radio transmitting apparatus of the apparatus, the possible trajectory of its movement, the losses in the environment of the propagation of radio waves and the impact of on-board and external noise.

The developed algorithm also allows us to investigate the effectiveness of simulating the work of our own unmanned aerial vehicles in the interest of disinformation of the enemy, the possibility of own means of radio-monitoring to detect radio-exposure of unmanned aerial vehicles, energy characteristics of simulated radio signals of unmanned aerial vehicles and substantiate the requirements for promising unmanned aerial vehicles, radio monitoring and combat equipment with unmanned aerial vehicles.

Keywords: *unmanned aerial vehicle, unmanned aerial system, imitation of radio emission, model, algorithm.*