

АЛГОРИТМ ВИЯВЛЕННЯ РАДІОСИГНАЛІВ ІЗ ПСЕВДОВИПАДКОВИМ ПЕРЕСТРОЮВАННЯМ РОБОЧОЇ ЧАСТОТИ КАНАЛІВ ДИСТАНЦІЙНОГО КЕРУВАННЯ БЕЗПЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ

Одним із підходів до вирішення завдання виявлення малорозмірних безпілотних літальних апаратів є пошук радіосигналів систем дистанційного керування. Більшість із них використовують для передачі даних на безпілотний літальний апарат псевдовипадкове перестроювання робочої частоти, а це потребує розроблення алгоритму виявлення таких радіосигналів для роботи в умовах апріорної невизначеності. Основою запропонованого алгоритму є накопичення значень частот, які відповідають максимумам спектральної щільності потужності послідовних реалізацій швидкого перетворення Фур'є, та їх подальше оброблення із формуванням статистики – квадрата відхилень елементів даного вектора від середнього значення, – її порівняння з граничними значеннями. Такий підхід інваріантний до номіналів частот системи із псевдовипадковим перестроюванням робочої частоти і потребує знання лише допустимих меж їх кількості, тривалості стрибка радіосигналу з псевдовипадковим перестроюванням робочої частоти та ширини спектра одного каналу.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, псевдовипадкове перестроювання робочої частоти, алгоритм виявлення, швидке перетворення Фур'є, імовірність правильного виявлення.

Постановка проблеми в загальному вигляді. В останні роки безпілотні літальні апарати (БпЛА) активно використовують у більшості збройних конфліктів, а також в інших сферах [1]. Керівництво багатьох країн стурбоване проблемою несанкціонованого проникнення малорозмірних БпЛА у повітряний простір закритих зон (військових баз, атомних електростанцій, місць проведення масових заходів), де вони можуть здійснювати шпіонаж і навіть терористичні акти. Завдання виявлення таких апаратів стає особливо складним у міських районах, де відсутні умови прямої видимості і багато об'єктів (зокрема тих, що низько літають) можуть рухатися з однією швидкістю, а більшість систем для їх виявлення за таких умов стають непридатними [2]. Одним із підходів до вирішення даної проблеми є виявлення каналів дистанційного керування БпЛА. Проте поряд із системами, що працюють на фіксованих частотах у діапазонах 27, 35, 40, 70 та 433 МГц і використовують сигнали з частотною або амплітудною маніпуляцією, сучасні системи керування БпЛА все частіше застосовують методи розширення спектра із псевдовипадковим перестроюванням робочої частоти (ППРЧ) у діапазоні частот від 2400 МГц до 2483,5 МГц. Тому виявлення таких каналів дистанційного керування БпЛА є актуальним завданням сьогодення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У [3] описано комплекс “Шиповник-Аеро” (Російська Федерація), який має у своєму складі апаратуру радіомоніторингу в діапазоні

© В. В. Павлюк, М. В. Бугайов, 2017

частот від 25 МГц до 2500 МГц, а також радіоподавлення каналів управління дистанційно керованих авіаційних моделей. Від моменту виявлення БпЛА, що працює під управлінням оператора, до подавлення радіосигналу необхідно близько 25 с, якщо ж частоти відомі, то близько 700 мкс. Недоліком вказаного підходу є те, що основний час витрачається на збір та оброблення статистики об'єкта.

У роботі [4] розроблено алгоритм, який забезпечує встановлення факту належності прийнятого радіовипромінювання до класу радіосигналів систем дистанційного керування БпЛА з імпульсно-позиційною та імпульсно-ковою модуляціями, проте сигнали з ППРЧ не розглядаються.

Значна кількість публікацій присвячена дослідженню підходів до виявлення радіосигналів із ППРЧ, проте не вказано галузь їх практичного використання. Зокрема, у [5] розроблено метод виявлення сигналів із ППРЧ, який дозволяє визначити їх частотно-часову структуру і напрямок надходження. Проте не дано рекомендацій щодо його практичної реалізації та не вказано рівень апіорної невизначеності для параметрів радіосигналу. У [6] наведено методику оцінювання розвіддосяжності радіоелектронного засобу з програмним перестроюванням робочої частоти, а в [7] проаналізовано відому методику виявлення радіосигналів передавача з ППРЧ [8] та розширення меж її використання у випадку, коли смуги частот передавача системи радіозв'язку та сканувального приймача станції радіотехнічної розвідки не збігаються. У [9] розглядається метод виявлення пачки радіоімпульсів із ППРЧ та здійснюється статистичний аналіз приймача виявлення. У [10] досліджено відомі алгоритми виявлення сигналів із ППРЧ та наведено їх робочі характеристики. До загальних недоліків розглянутих алгоритмів можна віднести низьку ефективність при роботі в умовах апіорної невизначеності.

Детальний аналіз відомих публікацій вказує на необхідність розроблення конкретних практичних рекомендацій для ефективного виявлення радіосигналів систем дистанційного керування БпЛА.

Формулювання завдання дослідження. Метою запропонованої статті є розроблення алгоритму виявлення радіосигналів із ППРЧ каналів дистанційного керування БпЛА та оцінювання його ефективності.

Виклад основного матеріалу

1. Аналіз структури радіосигналів дистанційного керування БпЛА з ППРЧ. Для створення систем дистанційного керування більшість безпілотних авіаційних комплексів застосовують програмно-апаратні та схемотехнічні рішення фірм Futaba, FlySky, Turnigy тощо. Близько 90% систем використовують ISM-2,4 та ППРЧ. У діапазоні 2,4 ГГц використовують такі протоколи передачі даних із розширенням спектра: FHSS, S-FHSS, T-FHSS [11].

Система передачі FASST (Futaba Advanced Spread Spectrum Technology) передбачає стрибкоподібну в псевдовипадковій послідовності зміну робочої частоти. Даний протокол передачі даних у своїй основі є модифікацією добре відомих протоколів DSSS (Direct-Sequence Spread Spectrum) і FHSS (Frequency-Hopping Spread Spectrum) та забезпечує максимальні перешкодозахищеність і швидкість відпрацювання команд. Частотний діапазон від 2,401 ГГц до 2,4835 ГГц або від 2,401 ГГц до 2,453 ГГц з кількістю частот 81

або 52 (залежно від регіону). Тривалість перебування передавача на одній частоті становить близько 2 мс [11]. Проте кількість рівнів частотної маніпуляції змінна для різних моделей пультів керування. Відомі також спрощені протоколи передачі даних Futaba S-FHSS, T-FHSS у смузі частот від 2,404 ГГц до 2,4475 ГГц, що мають 30 каналів шириною 1,5 МГц. Час перебування передавача на одній частоті при нормальній швидкості – 14 мс, а при високій швидкості перестроювання частоти – 7 мс [12].

Крім того, кількість частотних каналів ППРЧ різна для різних моделей пультів дистанційного керування і може становити 20, 30, 52, 81 та 160 [13].

Значна кількість протоколів передачі радіосигналів керування на БпЛА спричиняє необхідність розроблення алгоритмів їх виявлення для роботи в умовах апріорної визначеності. Невизначеність параметрів ППРЧ передачі в межах заданої смуги частот $\Delta P = (2,4835 - 2,4) \text{ ГГц} = 83,5 \text{ МГц}$, яка є суттєвою на етапі виявлення, опишемо такими характеристиками:

- 1) ширина частотного каналу ΔF (ширина спектра радіосигналу), Гц;
- 2) кількість частотних каналів L ;
- 3) центральні частоти каналів f_i , Гц;
- 4) час перебування передавача на одній частоті T , с;
- 5) закон зміни стрибків частоти.

Зважаючи на вказане вище, можна зробити висновок, що алгоритм виявлення таких радіосигналів повинен бути інваріантним щодо невідомих параметрів, характерних для ППРЧ передачі.

2. Алгоритм виявлення радіосигналів із ППРЧ каналів дистанційного керування БпЛА. При виявленні радіосигналів одним із важливих апріорно невідомих енергетичних параметрів, який не пов'язаний з параметрами ППРЧ, є відношення сигнал-шум (ВСШ) q , значення якого знаходимо через відношення потужності сигналу до потужності шуму. Воно може змінюватися при зміні потужності шуму або потужності сигналу в точці прийому. Незнання вказаного параметра або зміна його значення в часі призводить до труднощів, пов'язаних з оцінюванням показників якості алгоритмів виявлення радіосигналів. Так, наприклад, для критерію Неймана – Пірсона для підтримання фіксованого значення помилки першого роду при зміні потужності шуму необхідно адаптивно змінювати значення порога. При невідомому значенні ВСШ ускладненим буде оцінювання значення помилки другого роду. Тому пропонуємо перейти від енергетичного трактування до структурних особливостей при роботі в частотній області.

Оскільки $\Delta F \ll \Delta P$, то радіосигнали систем дистанційного керування БпЛА можна вважати вузькосмуговими, для їх оброблення будемо використовувати швидке перетворення Фур'є (ШПФ). Позначимо відліки вхідної сигнальної суміші $r(n)$, $n = 1, 2, \dots, N$, де N – довжина ШПФ, тоді значення відліків спектральної щільності потужності (СЩП) можна розрахувати відповідно до такого виразу:

$$W(k) = \left| \text{FFT} \{ r(n), N, w(n) \} \right|^2, \quad k = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

де $\text{FFT}(\)$ – оператор ШПФ;

$w(n)$ – віконна функція.

До переваг застосування непрямокутних вікон $w(n)$ можна віднести згладжування оцінок СЦП, зменшення рівня витікання, а до недоліків – втрати, пов'язані із розширенням бінів ШПФ [14].

Сітка частот ШПФ пов'язана з індексами бінів ШПФ через співвідношення $f_k = kN^{-1}F_s$, де F_s – частота дискретизації, пов'язана зі смугою частот, $F_s \geq 2\Delta F$. Довжина ШПФ обирається в такий спосіб, щоб в один бін ШПФ потрапляло не більше одного частотного каналу шириною ΔF , тобто $N \leq F_s \Delta F^{-1}$. Таким чином, можна усунути невизначеність за ΔF , якщо обрати N за максимально можливим значенням ширини частотного каналу ΔF_{max} .

Як правило, виявлення радіосигналів здійснюється на фоні шумів, основним видом яких на частотах вище 300 МГц є внутрішній шум приймача [15]. Його можна описати нормальним законом розподілу значень амплітуд у часовій області та майже рівномірною СЦП у частотній області. Характер взаємодії вказаного шуму з корисним сигналом вважатимемо адитивним, тому в подальшому розглядатимемо виявлення радіосигналу з ППРЧ саме на фоні такого шуму.

При пороговій обробці окремої реалізації ШПФ та низьких значеннях ВСШ можлива ситуація, коли значення відліку СЦП, що відповідає сигнальній складовій, перевищуватиме значення всіх шумових відліків, але не перевищить значення порога γ для заданої ймовірності хибної тривоги P_F , тому сигнал не буде виявлений. У такому випадку доцільним буде провести накопичення кількості появ частот F_{max} , що відповідають максимумам СЦП у серії із M послідовних реалізацій ШПФ.

З'ясуємо статистичні характеристики вектора $\mathbf{F}_{max} = [F_{max1}, F_{max2}, \dots, F_{maxM}]$, утвореного шляхом визначення частот, які відповідають максимумам M послідовних реалізацій ШПФ. Розглянемо випадок, коли аналізований процес не містить сигнальних компонент і отриманий у результаті дискретизації лише нормального шуму. Вектор відліків шуму $\xi(n)$ будемо вважати стаціонарним і з нульовим математичним сподіванням.

Побудуємо для 250 послідовних реалізацій шуму гістограму, яка відображає кількість появи $N_{F_{max}}$ кожної з частот F_{max} у серії із M реалізацій ШПФ (рис. 1а). Із її використанням створимо ще одну гістограму (рис. 1б), яка відображає кількість $M_{F_{max}}$ появ кожного значення $N_{F_{max}}$.

У межах значень частот $[0, F_s/2]$ існує $N/2$ позицій для дискретної частоти F_{max} . У разі ідеального білого шуму кожна з частот повинна зустрітися M/N разів при проведенні серії з M реалізацій ШПФ. У даному випадку навіть при меншому значенні M можна спостерігати нерівномірність у частоті появи деяких значень F_{max} . Як видно з рис. 1а, деякі частоти не з'являються жодного разу, а інші можна спостерігати два, три і навіть чотири рази.

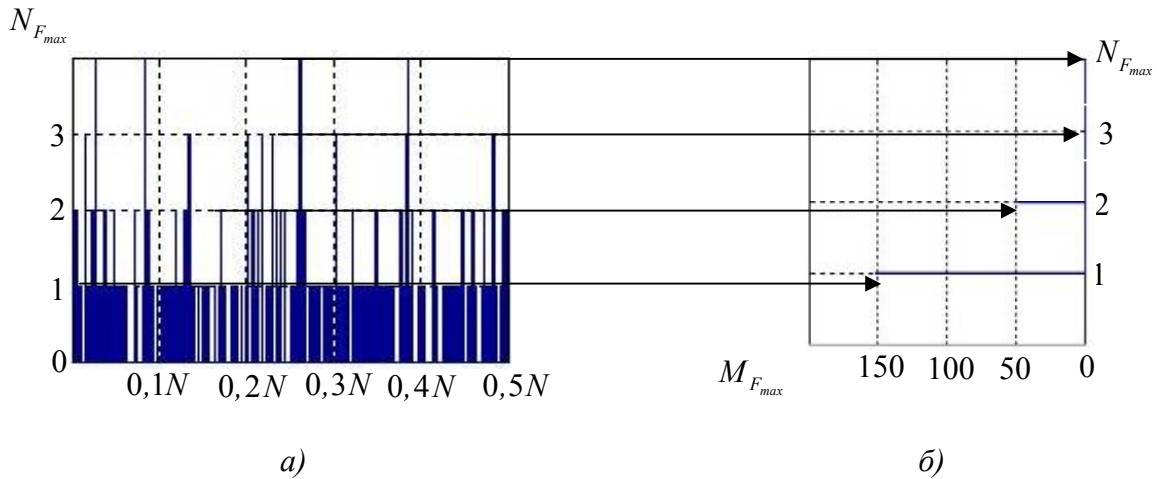


Рис. 1. Гістограми для кількості появ частот $N_{F_{max}}$ (а) та їх значень $M_{F_{max}}$ (б)

Якщо відома кількість частотних каналів L і тривалість стрибка частоти T , але невідомі номінали частот f_i (через значну кількість режимів роботи пультів керування), то порівняння з еталонами сіток частот буде ускладненим через їх величезну кількість або взагалі відсутність. У такому разі доцільним є формування деякої статистики з вектора $\mathbf{N}_{F_{max}}$ – квадрата відхилення елементів даного вектора від деякого середнього значення $\bar{N}_{F_{max}}$. Оскільки кількість реалізацій ШПФ M може змінюватися, то необхідно провести нормування даної статистики до суми елементів вектора $\mathbf{N}_{F_{max}}$. Тоді результуючу статистику запишемо у такому вигляді:

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^J (N_{F_{max}^i} - \bar{N}_{F_{max}})^2}{\sum_{i=1}^J N_{F_{max}^i}} = \frac{\sum_{i=1}^J (N_{F_{max}^i})^2}{M} - \frac{M}{N} \left(2 - \frac{1}{N} \right), \quad (2)$$

де J – довжина вектора $\mathbf{N}_{F_{max}}$;

$$N_{F_{max}^i} - \text{значення } i\text{-го елемента вектора } \mathbf{N}_{F_{max}}; \quad \bar{N}_{F_{max}} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^J N_{F_{max}^i} = \frac{M}{N}.$$

Оцінимо межі значень Q для двох граничних випадків:

1) вхідний сигнал є гармонічним коливанням (або модульованим сигналом, для якого ширина спектра менша за величину $N^{-1}F_s$), тоді $\sum_{i=1}^J (N_{F_{max}^i})^2 = M^2$ і максимальне значення статистики Q становитиме

$$Q_{max} = M \left(1 - \frac{1}{N} \left(2 - \frac{1}{N} \right) \right); \quad (3)$$

2) вхідний сигнал становить собою білий шум (кожна із частот зі смуги аналізу зустрічається однаково кількість разів), у такому разі $\sum_{i=1}^J (N_{F_{max}i})^2 = M^2 N^{-2}$ і мінімальне значення статистики Q становитиме

$$Q_{min} = \frac{2M}{N} \left(\frac{1}{N} - 1 \right). \quad (4)$$

Для решти сигналів $Q_{min} < Q < Q_{max}$. У загальному випадку значення статистики Q можна записати як функцію $Q = f(N, M, T, L)$. Як бачимо, обчислення даної статистики не потребує знання номіналів частот, тобто знімається невизначеність відносно параметра f_i . Якщо відомі межі, у яких можуть знаходитися значення T, L , то можна оцінити граничні значення для Q : Q_{high}, Q_{low} . Тоді, якщо обчислене значення Q для заданого M потрапляє у задані межі, то можна прийняти рішення про наявність у даній реалізації радіосигналу дистанційного керування БПЛА з ППРЧ.

Опишемо методику розрахунку граничних значень Q_{high} і Q_{low} . Нехай відомий вектор можливих значень ширини спектра $\Delta F = [\Delta F_1, \Delta F_2, \dots, \Delta F_K]$ довжиною K , а також вектори, які містять набори можливих значень кількості частотних каналів: $\mathbf{L} = [L_1, L_2, \dots, L_G]$ довжиною G та $\mathbf{T} = [T_1, T_2, \dots, T_D]$ довжиною D . Тоді значення довжини ШПФ можна розрахувати відповідно до такого виразу:

$$N = F_s \cdot \left(\max_i \Delta F_i \right)^{-1}. \quad (5)$$

Якщо припустити, що для кожного конкретного радіосигналу з ППРЧ тривалість стрибка частоти є незмінною протягом сеансу управління, то граничні значення Q можна оцінити відповідно до таких виразів:

$$Q_{low} = \min_i (L_i T_i F_s N^{-1}) \cdot \left(\frac{1}{\max_i (L_i)} - \frac{1}{N} \left(2 - \frac{1}{N} \right) \right), \quad (6)$$

$$Q_{high} = \max_i (L_i T_i F_s N^{-1}) \cdot \left(\frac{1}{\min_i (L_i)} - \frac{1}{N} \left(2 - \frac{1}{N} \right) \right). \quad (7)$$

Тоді інваріантний відносно значень f_i алгоритм виявлення радіосигналів дистанційного керування БПЛА з ППРЧ на основі накопичення значень частот, що відповідають максимумам СЩП, можна подати у вигляді, наведеному на рис. 2.

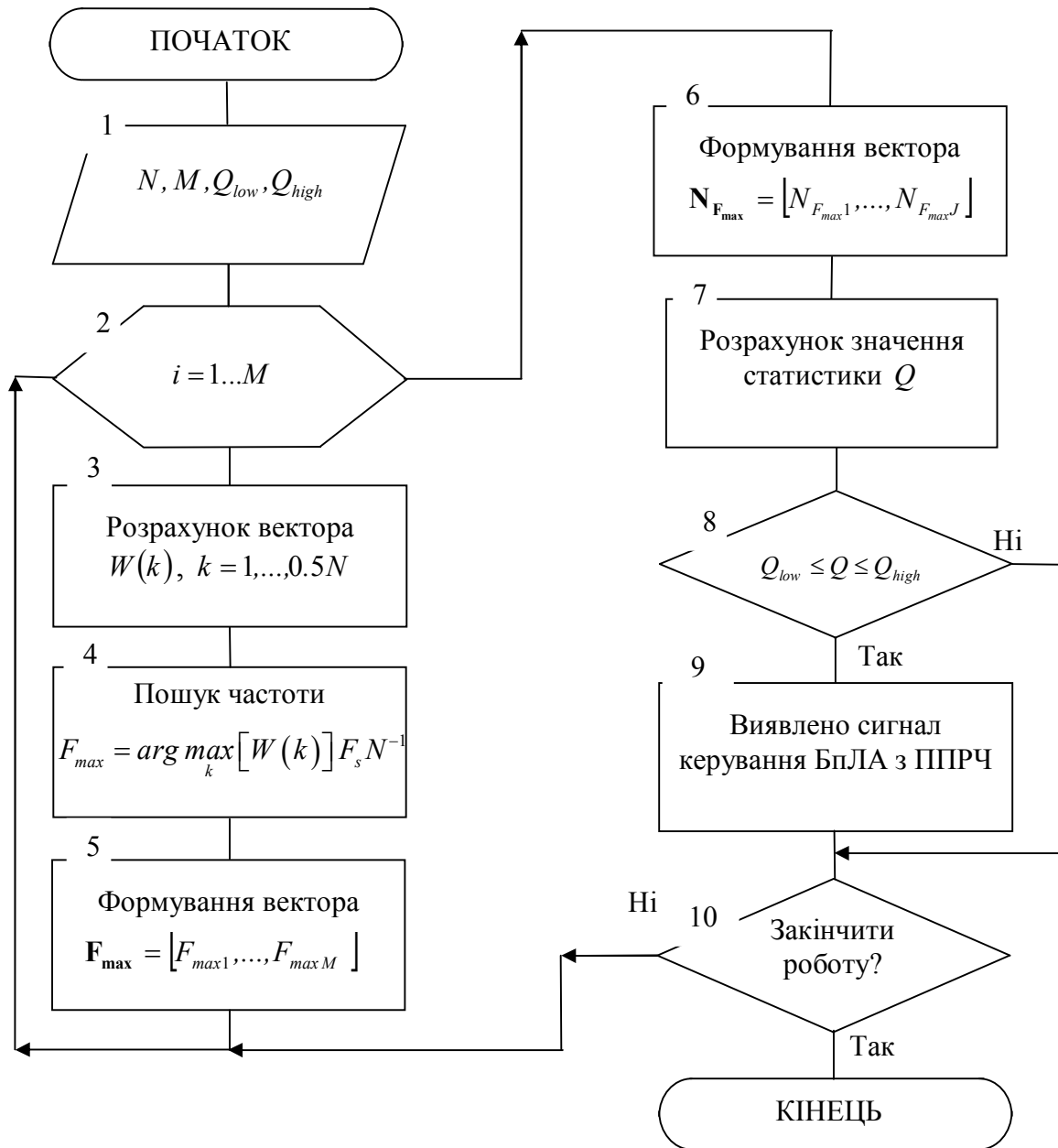


Рис. 2. Алгоритм виявлення радіосигналів дистанційного керування БпЛА з ППРЧ

У блоці 1 алгоритму вводять початкові дані для розрахунків, а в 3-му блоці розраховують вектор відліків СЦП. У блоці 4 алгоритму знаходять номер біна k , що відповідає максимуму СЦП реалізації ШПФ, та розраховують відповідне значення частоти $F_{max} = kF_s N^{-1}$. У векторі, сформованому зі значень F_{max} , довжиною M , у блоці 5 підраховують кількість однакових значень $F_{max} - N_{F_{max}}$, тобто частоту їх появи, і формують у блоці 6 новий вектор $N_{F_{max}}$ довжиною J , яка відповідає кількості різних значень $F_{max} - L_{F_{max}}$. У блоці 7 розраховують значення статистики Q і порівнюють її з граничними значеннями Q_{low} і Q_{high} у блоці 8, а також формують повідомлення про виявлення відповідного радіосигналу керування БпЛА з ППРЧ.

Розроблений алгоритм має фільтруючу властивість щодо кількості радіосигналів систем дистанційного керування. У ході його роботи будуть виявлені радіосигнали з ППРЧ лише того передавача, потужність випромінювання якого в місці прийому є більшою за показники решти радіосигналів. Обмеженням використання даного алгоритму є також те, що за наявності в смузі частот від 2400 МГц до 2483,5 МГц інших радіосигналів з потужністю, яка перевищує потужність радіосигналів від пультів дистанційного керування БпЛА в точці прийому, останні не будуть виявлені. Обійти дане обмеження можна шляхом модифікації блока 4 алгоритму (рис. 2), у якому замість пошуку і визначення частоти лише одного максимуму СЦП виконувати дані операції для кількох відліків СЦП з максимальними значеннями.

3. Оцінювання показників якості розробленого алгоритму. Оцінювання ймовірності правильного виявлення P_D радіосигналів з ППРЧ проведемо шляхом імітаційного моделювання роботи алгоритму в середовищі математичного моделювання MATLAB. Значення параметрів ППРЧ сигналу оберемо такими: $\Delta F = 10$ кГц, $L = 30$, $T = 2$ мс. Тоді довжина ШПФ при частоті дискретизації $F_s = 167$ МГц (F_s розраховано згідно з теоремою Котельникова) матиме значення 1024 відліки (найближчий до 1670 менший степінь 2), а кількість реалізацій ШПФ для перекриття 30 стрибків частоти становитиме близько 9780, час на виявлення – 60 мс.

На рис. 3 наведено криві виявлення радіосигналів дистанційного керування БпЛА з ППРЧ для вказаних вище параметрів.

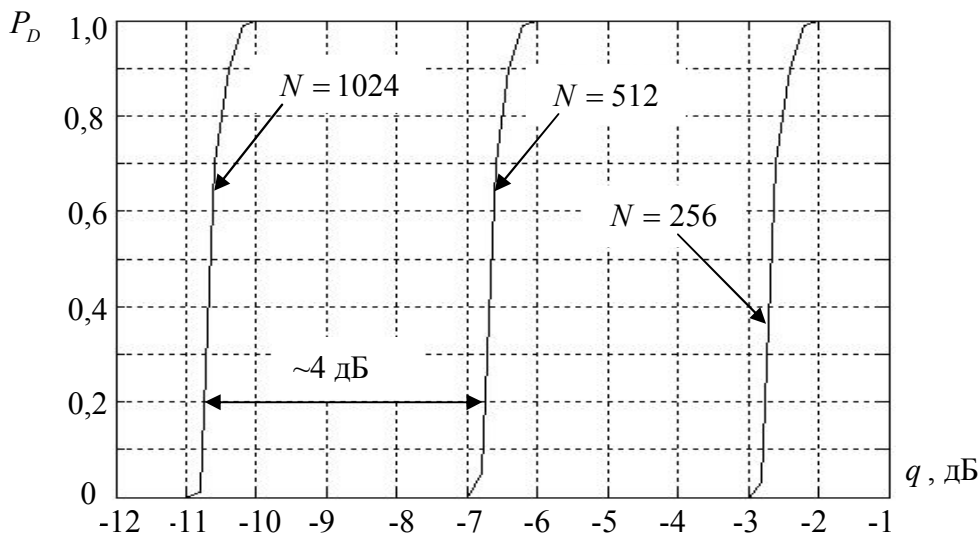


Рис. 3. Залежність ймовірності правильного виявлення радіосигналів з ППРЧ від ВСШ

Порогова обробка проводилася відповідно до критерію Неймана – Пірсона для ймовірності хибної тривоги $P_F = 0,001$. З даних кривих видно, що значення ймовірності правильного виявлення P_D змінюється практично стрибкоподібно від 0 до 1 при деякому значенні ВСШ для заданої довжини ШПФ. Це можна пояснити малим значенням середньоквадратичного відхилення статистики Q (випадкової величини із нормальним законом розподілу), значення якого є практично незмінним при зменшенні ВСШ.

Зменшення довжини ШПФ удвічі призводить до зміщення кривих виявлення вправо приблизно на 4 дБ.

Висновки. У роботі запропоновано алгоритм виявлення радіосигналів із ППРЧ каналів дистанційного керування БПЛА, сутність якого полягає в оцінюванні ступеня нерівномірності накопичених значень частот, що відповідають максимумам спектральної щільності потужності послідовних реалізацій ШПФ за допомогою спеціально підібраної статистики. Такий підхід є інваріантним до номіналів частот системи із ППРЧ і потребує знання лише допустимих меж для кількості частот, тривалості стрибка ППРЧ та ширини спектра одного каналу. Імовірність правильного виявлення радіосигналів із ППРЧ залежить від їх параметрів і зростає при збільшенні довжини ШПФ.

Перспективи подальших досліджень полягають у вдосконаленні запропонованого алгоритму для виявлення радіосигналів дистанційного керування БПЛА з ППРЧ в умовах дії сигналів, що заважають.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Austin R. Unmanned aircraft systems: UAVS design, development and deployment / R. Austin. – Boston Eye on Low-Flying Unmanned Aerial Systems in Cities [Electronic resource]. – Mode of access : <http://www.darpa.mil/news-events/2016-09-13>.
2. Keeping a Watchful борьбы с БПЛА «Шиповник-Аэро» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://rufor.org/showthread.php?t=29323>.
3. Комплекс радиоэлектронной: John Wiley & Sons Ltd, 2010. – P. 113–127.
4. Даник Ю. Г. Алгоритм виявлення радіосигналів систем дистанційного керування безпілотними літальними апаратами / Ю. Г. Даник, О. В. Манько, В. В. Павлюк // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. – Житомир : ЖВІ НАУ, 2013. – Вип. 7. – С. 5–13.
5. Макаруч В. І. Метод виявлення сигналів з псевдовипадковим перестроюванням робочої частоти / В. І. Макаруч // Збірник наукових праць ВІТІ ДУТ. – К. : ВІТІ ДУТ, 2014. – № 1. – С. 30–34.
6. Оцінка розвіддосязності засобів зв'язку з програмною перебудовою робочої частоти при обґрунтуванні способів ведення їх радіоелектронного подавлення та радіоелектронної розвідки / С. О. Тищук, С. М. Шолохов, М. М. Конотопець, О. Ю. Мелашенко // Системи обробки інформації. – Х. : ХУПС, 2004. – Вип. 12 (40). – С. 222–230.
7. Математична модель перехоплення одиничного стрибка сигналу передавача з ППРЧ / В. Ф. Єрохін, О. М. Рома, С. В. Василенко, Д. Є. Бездрабко // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія «Радіотехніка. Радіоапаратобудування». – К. : КПІ, 2016. – № 64. – С. 75–85.
8. Höring H.-Ch. Probability of intercept for frequency hop signals using search receivers / Höring H.-Ch. // News from Rohde&Schwarz. – 1998. – № 160. – P. 26–29.
9. Сорочан А. Г. Обнаружение пачки радиоимпульсов с расширением спектра сигнала псевдослучайной перестройкой рабочей частоты / А. Г. Сорочан // Восточноевропейский

журнал передових технологій. – Х. : Технологический центр, 2009. – № 40 (4/2). – С. 12–22.

10. Борисов В. И. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / В. И. Борисов. – М. : Радио и связь, 2000. – 384 с.

11. Transmitters&Receivers Futaba Radios [Electronic resource]. – Mode of access : http://www.rc711.com/shop/futaba-radios-c-167_24.html.

12. 2.4GHz FASSTest Technology [Electronic resource]. – Mode of access : <http://www.futabarc.com/technology/fasstest.html>.

13. Weatronic.com – weatronic GmbH, professionelle RCKomponenten [Electronic resource]. – Mode of access : www.weatronic.com or www.weatronic-usa.com.

14. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов / Р. Лайонс. – [2-е изд.]; пер с англ. – М. : ООО “Бином-Пресс”, 2006. – 656 с.

15. Обнаружение радиосигналов / П. С. Акимов, Ф. Ф. Евстратов, С. И. Захаров и др. ; под ред. А. А. Колосова. – М. : “Радио и связь”, 1989. – 288 с.

Подано 24.05.2017

В. В. Павлюк, Н. В. Бугаёв

АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ РАДИОСИГНАЛОВ С ПСЕВДОСЛУЧАЙНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ КАНАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

Одним из подходов к решению задачи обнаружения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов является обнаружение радиосигналов дистанционного управления с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Значительное количество протоколов передачи данных на беспилотные летательные аппараты требует разработки алгоритма обнаружения радиосигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты для работы в условиях высокой априорной определенности относительно их параметров. В основе предложенного алгоритма лежит накопление значений частот, соответствующих максимумам спектральной плотности мощности последовательных реализаций быстрого преобразования Фурье, и их дальнейшая обработка с формированием статистики – квадрата отклонений элементов данного вектора от некоторого среднего значения, а также ее сравнение с предельными значениями. Такой подход является инвариантным к номиналам частот системы с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты и требует знания только допустимых пределов для количества частот, длительности скачка частоты и ширины спектра одного канала. Вероятность правильного обнаружения радиосигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты зависит от их параметров и возрастает при увеличении длины быстрого преобразования Фурье.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, псевдослучайная перестройка рабочей частоты, быстрое преобразование Фурье, алгоритм обнаружения, вероятность правильного обнаружения.

V. V. Pavliuk, M. V. Buhaiov

THE DETECTION ALGORITHM OF THE FREQUENCY HOPPING SPREAD SPECTRUM SIGNALS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES REMOTE CONTROLLED CHANNELS

One approach to solving the problem of detection of small unmanned aerial vehicles is the detection of radio signals to remote control with frequency hopping spread spectrum. A significant number of data transmission protocols for unmanned aerial vehicles requires the development of algorithm of radio signals detection with frequency hopping for operation in conditions of high a priori uncertainty about their parameters. The basis of the proposed algorithm is the accumulation of values of frequencies corresponding to maxima of power spectral density of the serial implementations of the fast Fourier transform and further processed with the formation of a statistics – square deviations of elements of a given vector from a certain average value and its comparison with critical values. This approach is invariant to the nominal frequency of the system with frequency hopping spread spectrum, and requires knowledge only of the allowable limits for the number of frequencies, the duration of the jump frequency hopping and spectrum width of a single channel. The probability of detection of radio signals with frequency hopping depends on their parameters and increases with the length of the fast Fourier transform.

Keywords: *unmanned aerial vehicle, frequency hopping spread spectrum, fast Fourier transform, detection algorithm, probability of detection.*