

АЛГОРИТМ ВИЯВЛЕННЯ РАДІОСИГНАЛІВ СИСТЕМ ДИСТАНЦІЙНОГО КЕРУВАННЯ БЕЗПЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ

Розроблено алгоритм, який забезпечує встановлення факту належності прийнятого радіовипромінювання до класу радіосигналів систем дистанційного керування безпілотними літальними апаратами з імпульсно-позиційною та імпульсно-кодуючою модуляціями. Алгоритм базується на послідовних перевірках енергетичної, модуляційної та структурної ознак сигналу, передбачає можливість автоматичного виявлення сигналу та супроводження його за частотою.

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвитку науки і техніки різноманітні радіотехнічні системи знаходять все більше поширення у багатьох галузях народного господарства, а також у побуті. При цьому функціональні можливості радіотехнічних пристроїв досить широкі, а шкода від їх невмілого або несанкціонованого застосування може бути надзвичайно великою [1 – 2]. До таких систем належать радіокеровані моделі літальних апаратів аматорського та середнього класів [2, 3]. Як показують результати спостережень, саме такі безпілотні літальні апарати (БПЛА) у разі їх несанкціонованого застосування можуть становити суттєву небезпеку при проведенні масових заходів [2 – 4]. Своєчасному вжиттю заходів для унеможливлення несанкціонованого застосування БПЛА повинне передувати їх виявлення. При цьому просте візуальне виявлення недостатньо ефективно та взагалі неможливе за відсутності освітлення або поганої видимості. Натомість більш ефективним способом встановлення факту застосування БПЛА, у тому числі поза межами зони візуального спостереження, є виявлення радіосигналів їх систем дистанційного радіокерування. Розробка методів та алгоритмів виявлення таких сигналів є актуальним та складним науково-практичним завданням.

Огляд останніх досліджень і публікацій. Завдання виявлення розпізнавання виду і класу сигналів для ідентифікації типу об'єктів вирішувались, зокрема, у роботах [5 – 12]. При цьому головна увага була зосереджена на одиночні умови при апріорно відомих параметрах сигналу та його внутрішній структурі [5 – 8]. Реалізація алгоритмів послідовної чи одночасної перевірки множинних умов розглядається у [10, 11]. У більшості відомих алгоритмів не враховується структурна складова сигналу. Крім того, загальним недоліком, що притаманний більшості відомих алгоритмів, є розрізненість результатів, що ускладнює практичну (програмну) реалізацію та зменшує їх ефективність.

Отже, **метою** досліджень є розробка алгоритмів і програмних засобів виявлення радіосигналів систем дистанційного керування БПЛА.

Викладення основного матеріалу. Виявленням сигналів систем керування БПЛА будемо називати встановлення факту належності прийнятого радіовипромінювання до класу сигналів систем керування БПЛА.

Мету досліджень досягнемо у такій послідовності операцій:
аналіз принципів формування сигналів у системах дистанційного керування БПЛА;
визначення умов виявлення сигналів;
формування системи критеріїв для розпізнавання сигналів;
безпосередньо розробка необхідних алгоритмів;
програмна реалізація та перевірка працездатності розроблених алгоритмів.

Номенклатура наявних на світовому ринку систем дистанційного радіокерування моделями технічних засобів (автомобілів, суден, літаків тощо) надзвичайно велика, а детальна інформація про використовувані види сигналів, режими та протоколи є комерційною таємницею підприємств-виробників та відсутня для вільного доступу [2, 3]. За результатами проведеного аналізу встановлено, що системи керування БПЛА умовно поділяються на дві групи [2 – 4]:

системи, що працюють на фіксованих частотах у діапазонах метрових хвиль, використовують сигнали з частотною або амплітудною маніпуляцією та порівняно нескладні протоколи пакетної передачі команд управління;

системи, що використовують режими адаптивного перестроювання робочої частоти у діапазоні 2400...2483,5 МГц, сигнали з гауссівською частотною, фазовою або квадратурною амплітудною маніпуляціями, а також різноманітні алгоритми розширення спектра.

За результатами аналізу ринку систем дистанційного радіокерування встановлено, що кількісне співвідношення між наявними зразками, що відносяться до визначених вище груп, приблизно рівне. Натомість, ринкова вартість систем другої групи приблизно на порядок вища, ніж першої. Незважаючи на те, що модельний ряд зразків обох груп має приблизно рівне кількісне співвідношення, популярність їх зразків співвідноситься приблизно як 80% на 20%. Саме тому для подальших досліджень обрано саме першу групу систем керування БПЛА.

Принципи формування сигналів у системах дистанційного управління

Найбільш поширені протоколи передачі команд управління мають назви імпульсно-позиційна (PPM – Pulse Position Modulation) та імпульсно-кодова (PCM – Pulse Code Modulation) модуляції.

Формування сигналу на передавальній стороні при імпульсно-позиційній модуляції (ПІМ) передбачає такі етапи:

складання пакета одиночних імпульсів за кількістю каналів, позиція кожного з яких відповідає значенню керуючої величини;

додавання синхронізаційного інтервалу;

маніпуляція несучої (піднесучої) частоти передавача отриманим пакетом імпульсів.

Тривалість одиночного імпульсу становить звичайно $\tau_p=0,3-0,5$ мс, а синхронізаційного τ_c – до 22 мс. Девіація частоти для логічних рівнів F_M становить від 3 до 10 кГц. Враховуючи те, що середня шпаруватість пакета імпульсів становить 0,08–0,2, відбувається асиметрична частотна маніпуляція, якій відповідає така ж асиметрична форма амплітудно-частотного спектра, як це показано на рис. 1 для випадку модуляції піднесучої. При цьому замість центральної частоти спектра має місце так звана домінантна частота f_D , яка для сигналу, що розглядається на рис. 1, становить близько 1100 Гц.

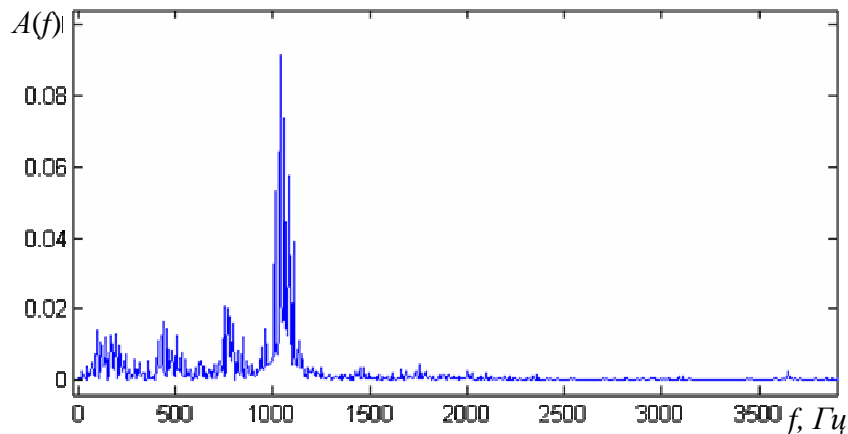


Рис. 1. Типовий амплітудно-частотний спектр сигналу з імпульсно-позиційною модуляцією

Сигнали з імпульсно-ковою модуляцією (ІКМ) формуються шляхом двопозиційної частотної маніпуляції бітових послідовностей, до яких входять восьмирозрядні кодові слова (байти) у такій типовій послідовності: преамбула (6 – 12 байтів), інформаційні канали (4 – 8 каналів по 2 байти), контрольна сума (2 або 4 байти). На відміну від ПМ, відбувається звичайна симетрична частотна маніпуляція. Типовий амплітудно-частотний спектр такого сигналу наведено на рис. 2.

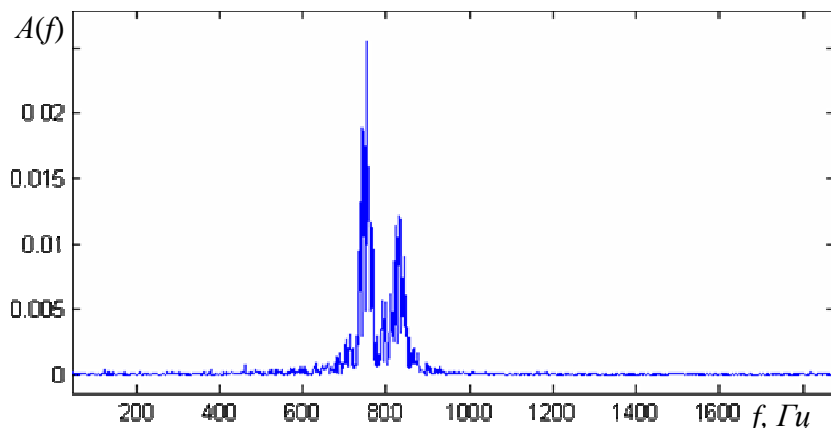


Рис. 2. Типовий амплітудно-частотний спектр сигналу з імпульсно-ковою модуляцією

Умовами виявлення сигналів систем керування БПЛА є [5, 12]:

- енергетична (електромагнітна) доступність джерела радіовипромінювання;
- знаходження амплітудно-частотного спектра сигналу в межах смуги пропускання радіоприймального пристрою (РПрП) протягом часу, що виділений для аналізу;
- знаходження у вимкненому стані систем автоматичного підстроювання частоти та автоматичного регулювання підсилення РПрП;
- робота РПрП у режимі перенесення сигналу на низькочастотну піднесучу (USB або LSB), або перетворення на квадратурні складові.

Система ознак та критеріїв для розпізнавання сигналів

Відповідно до класичної теорії виявлення сигналів з частково відомими параметрами модуляції першою ознакою S_1 для нашого випадку є енергетична [9], згідно з якою енергія сигналу

$$E(t) = \frac{1}{t} \int_0^t U^2(\tau) d\tau \quad (1)$$

протягом певного інтервалу часу t , обмеженої часом початку t_s та завершення t_f аналізу, повинна перевищує порогове значення E_0 :

$$S_1 = \left\{ E(t) > E_0 \right\}_{t \in (t_s, t_f)}, \quad (2)$$

де $U^2(\tau)$ – дійсний сигнал (сигнальна суміш), що підлягає аналізу. Порогове значення E_0 встановлюється за результатами аналізу фонові електромагнітної обстановки за умови роботи радіоелектронних засобів, що не становлять небезпеки. У більш загальному випадку виявлення повинне здійснюватись у певному діапазоні частот, тому E_0 повинне бути функцією від частоти, дискретні значення якої взяті з кроком, що дорівнює типовій ширині спектра сигналу.

Наступною ознакою є модуляційна [5], яка вказує на належність сигналу, що підлягає аналізу, до класу сигналів із частотною маніпуляцією. Сама ознака S_2 описується сукупністю часткових ознак за виразом

$$S_2 = \{S_{2.1} \cap S_{2.2} \cap S_{2.3}\}, \quad (3)$$

де часткова ознака

$$S_{2.1} = \left\{ \max_i (F_i) < 2 \cdot \pi \frac{1}{N_s} \sum_{i=0}^{N_s-1} |F_i| \right\}, \quad (4)$$

в якій $F_i, i=0..N_s-1$ – дискретне перетворення Фур'є розмірністю N_s від вхідного сигналу [14], відповідає за його належність до класу сигналів із постійною амплітудою; ознака

$$S_{2.2} = \left\{ \frac{1}{N_s - 1} \sum_{i=0}^{N_s-1} (\theta_i)^2 > \frac{\pi^2}{16} \right\}, \quad (5)$$

в якій $\theta_i = \arctg(Q_i/I_i)$ – відліки абсолютної фази сигналу;

I_i та $Q_i, i=0..N_s-1$ – квадратурні складові сигналу, отримані за допомогою перетворення Гілберта [14], свідчать про належність сигналу до класу сигналів із кутовою модуляцією;

ознака

$$S_{2.3} = \left\{ \sum_{i=1}^{N_s/2-1} (f_i - f_D)^2 \neq \sum_{i=N_s/2}^{N_s-1} (f_i - f_D)^2 \right\}, \quad (6)$$

вказує на те, що модулююча функція (миттєва частота сигналу) $f_i = (\theta_i + \theta_{i-1}) \cdot F_s$, де F_s – частота дискретизації, має імпульсний характер. Домінантна частота f_D у спектрі сигналу обчислюється ітераційно за виразом

$$f_D = k \cdot \frac{1}{N_s} f_i + (1-k) \cdot f'_D, \quad (7)$$

де f'_D – значення, обчислене за попередньою ітерацією;

k – безрозмірний ваговий коефіцієнт, що обирається в діапазоні 0,05 – 0,1.

Завершальною ознакою є наявність у модулюючій функції сигналу $F(t)$, що підлягає аналізу, інформації про команди керування (структурна ознака). Тобто сама модулююча функція повинна мати структуру та вигляд, подібний до тієї, що формується на передавальній стороні. Аналітично ознаку S_3 запишемо у такому вигляді:

$$S_3 = \left\{ \left[\frac{|\hat{\tau}_c - \tau_c|}{\tau_c} < D_1 \right] \cap \left[\frac{|\hat{F}_M - F_M|}{F_M} < D_2 \right] \cap \left[\frac{1}{T} \int_0^T F(t) dt < D_3 \right] \right\}, \quad (8)$$

де $\hat{\tau}_c$ та \hat{F}_M – виміряні значення тривалості синхроімпульсу і девіації частоти відповідно, безрозмірні порогові значення D_1 , D_2 та D_3 встановлюються експериментальним шляхом залежно від необхідних значень імовірностей правильного виявлення та хибної тривоги.

Алгоритм виявлення сигналів систем управління БПЛА базується на послідовних перевірках ознак (2), (3), (8), яким передують необхідні розрахунки. Вхідними даними для роботи алгоритму є масив відліків $r(k)$, $k = 0..K-1$, отриманих після дискретизації у часі з частотою F_s , та квантування за рівнем сигнальної суміші $r(t)$ з виходу радіоприймального пристрою:

$$r(t, U) = s(t, U) + n(t), \quad (9)$$

де $s(t, U)$ – корисна складова;

$n(t)$ – шум;

$U = [a, f, \theta, T]$ – вектор параметрів сигналу;

a – амплітуда сигналу;

f – центральна частота спектра;

θ – інваріантна в часі фаза несучої частоти;

T – символний період.

Значення частоти дискретизації F_s та кількості рівнів квантування повинні відповідати вимогам для подальшого правильного відтворення сигналу [14]. Результатом роботи алгоритму має бути рішення S про наявність ($S = True$) чи відсутність ($S = False$) сигналу систем управління БПЛА у прийнятій сигнальній суміші. Схема розробленого алгоритму наведена на рис. 3.

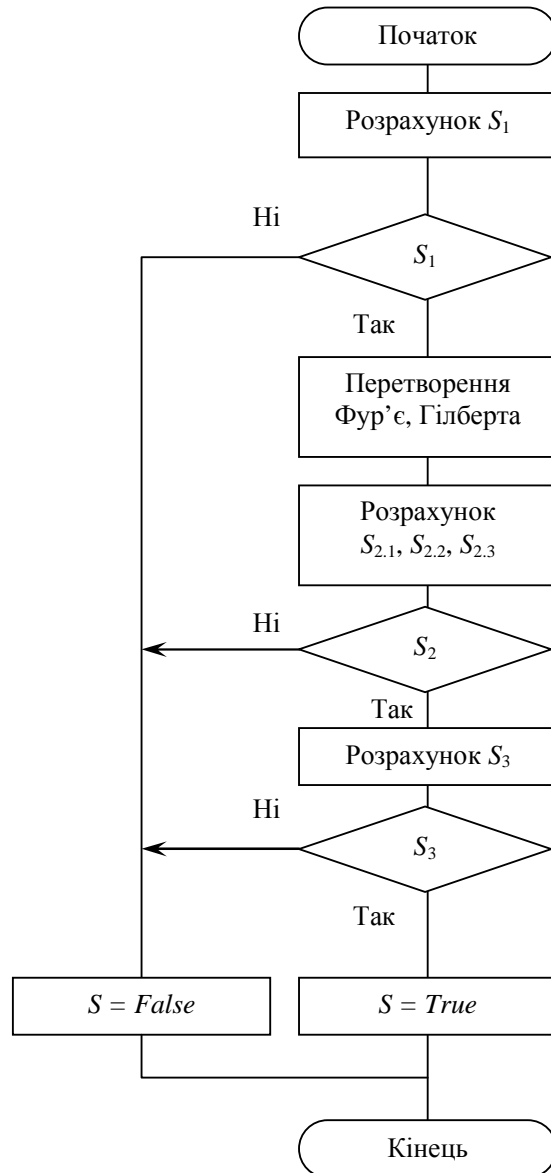


Рис. 3. Схема алгоритму виявлення сигналів систем управління БПЛА

Першим етапом роботи алгоритму є перевірка енергетичної ознаки S_1 . Перевірка інших ознак здійснюється лише при $S_1 = True$, тобто наявності будь-якого сигналу, енергія якого достатня для подальшого аналізу. Інакше приймається рішення про відсутність будь-якого сигналу (у тому числі сигналу систем управління БПЛА) й алгоритм завершує свою роботу. Додатково за цією ознакою може здійснюватись перестроювання радіоприймального пристрою для аналізу іншої ділянки частотного діапазону.

Другим етапом роботи алгоритму є перевірка модуляційної ознаки S_2 , якій передують проміжні розрахунки: перетворення Фур'є та Гілберта, виділення модулюючої функції (вектора миттєвої частоти сигналу), фільтрація та автоматичне налаштування на домінуючу частоту сигналу. При $S_2 = True$ маємо випадок сигналу, що за видом модуляції відповідає сигналу систем управління БПЛА.

Третім етапом роботи алгоритму є перевірка структурної ознаки S_3 . При її виконанні приймається остаточне рішення про наявність ($S = True$) чи відсутність ($S = False$) сигналу систем управління БПЛА у прийнятій сигнальній суміші.

Практична реалізація розробленого алгоритму виявлення сигналів систем управління БПЛА здійснена у програмному засобі, головне вікно якого наведено на рис. 4.

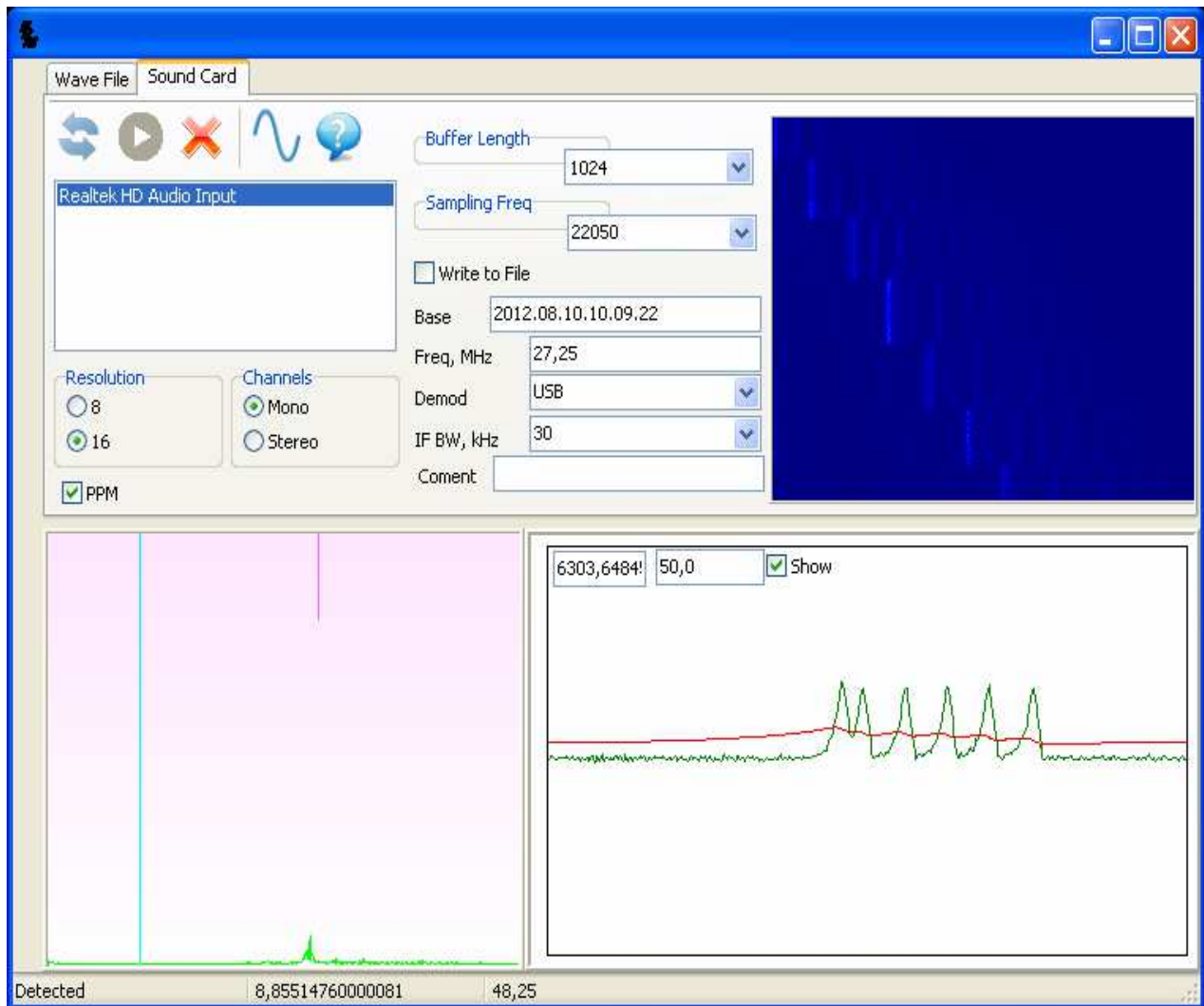


Рис. 4. Програмна реалізація розробленого алгоритму

Програмний засіб орієнтований на використання у середовищі Windows XP та вище. Він забезпечує обробку звукових файлів із записом сигналу у форматі WAW або безпосередньо потоку відліків з аудіоадаптера електронно-обчислювальної машини у реальному масштабі часу. Аналіз сигналу з автоматичним настроюванням на центральну (домінантну) частоту здійснюється у смузі пропускання аудіоадаптера, яка може становити до 96 кГц. Під час роботи відображаються основні етапи обробки: осцилограма, миттєвий спектр та сонограма сигналу, графік модулюючої функції. Для виявлення сигналу систем управління БПЛА потрібно в середньому 0,5 – 1,2 с. У разі такого виявлення передбачено звукову та візуальну індикацію.

Розроблені алгоритм та програмний засіб експериментально перевірені та використані на практиці під час організації безпеки проведення заходів чемпіонату Європи з футболу Євро-2012.

Висновки. У результаті проведених досліджень розроблено алгоритм, який забезпечує встановлення факту належності прийнятого радіовипромінювання до класу радіосигналів систем дистанційного керування БПЛА з імпульсно-позиційною та

імпульсно-кодую модуляціями. Алгоритм базується на послідовних перевірках енергетичної, модуляційної та структурної ознак сигналу, передбачає можливість автоматичного виявлення сигналу супроводження його за частотою.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Безопасность в опасности? Национальный прогноз [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.tass-ural.ru/> – 2012.
2. Кобилянський К. Є. Безпілотні літальні апарати. Сучасний стан та перспективи розвитку / К. Є. Кобилянський. – К. : Військова освіта. – 2012. – С. 328.
3. Карпунин И. В. Аппаратура радиоправления / И. В. Карпунин [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.avmodels.ru/articles/equipment/index.html>.
4. Елюсеев Д. Радиоправление авиамоделями: история и современность / Д. Елюсеев // Радио. – 2011. – № 7. – С. 23–32.
5. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Том 1. Теория обнаружения, оценок и линейной модуляции / Г. Ван Трис ; перев. с англ. под ред. В. И. Тихонова. – М. : Советское радио, 1972. – 744 с.
6. Репин В. Г. Обнаружение сигнала с неизвестными моментами появления и исчезновения / В. Г. Репин // Проблемы передачи информации. – 1991. – Т. 27. – № 1. – С. 61–72.
7. Идеи скейлинга и дробной размерности в схеме фрактального обнаружителя радиосигналов / Ю. В. Гуляев, С. А. Микитов, А. А. Потапов, В. А. Герман // Радиотехника и электроника (Россия). – 2007. – Т.51. – № 8. – С. 968–975.
8. Болховская О. В. Характеристики обнаружения пространственных сигналов для статистик обобщенного отношения правдоподобия в случае коротких выборок / О. В. Болховская. А. А. Мальцев, К. В. Родюшкин // Изв. вузов. Радиофизика – 2007. – Т. 48. – № 5. – С. 446–453.
9. Костылев В. И. Характеристики энергетического обнаружения квазидетерминированных радиосигналов с амплитудой Райса / В. И. Костылев // Изв. вузов. Радиоэлектрон. – 2007. – Т. 47. – № 1. – С. 55–61.
10. Татарский Б. Г. Последовательное обнаружение в нечетких условиях / Б. Г. Татарский, Г. С. Романенко, Р. З. Дыморец // Радиотехника (Россия). – 1997. – № 8. – С. 67–71.
11. Розов А. К. Алгоритмы последовательного обнаружения сигналов / А. К. Розов. – СПб. : Политехника, 1992. – 234 с.
12. Otnes R. Improved receivers for digital High Frequency communications: Iterative channel estimation, equalization, and decoding (adaptive turbo equalization) / Roald Otnes // Department of Telecommunications. Faculty of Information Technology, Mathematics and Electrical Engineering. Norwegian University of Science and Technology. – Trondheim. – 2002. – 201 p.
13. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр. – [2 изд.]. – М. : Вильямс, 2007. – 1104 с.
14. Айфичер Э. С. Цифровая обработка сигналов: практический подход / Э. С. Айфичер, Б. У. Девис. – М. : Вильямс, 2004. – 534 с.

Ю. Г. Даник, О. В. Манько, В. В. Павлюк

**АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЕ РАДИОСИГНАЛОВ СИСТЕМ
ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ
АППАРАТАМИ**

Разработан алгоритм, обеспечивающий установление факта принадлежности принятого радиоизлучения к классу радиосигналов систем дистанционного управления беспилотными летательными аппаратами с импульсно-позиционной и импульсно-кодовой модуляциями. Алгоритм базируется на последовательных проверках энергетических, модуляционных и структурных признаков сигнала, предусматривает возможность автоматического обнаружения сигнала и сопровождения его по частоте.

Y. G. Danik, O. V. Manko, V. V. Pavliuk

**DETECTION ALGORITHM FOR DRONES REMOTE RADIO CONTROL SYSTEMS
SIGNALS**

The algorithm providing the determination of the received radio signal belonging to a class of drones remote radio control systems with a pulse position and pulse code modulation is offered. The algorithm is based on sequential checking the energetic, modulation and structural features of signal and provides the automatic signal detection and frequency tracking.