

О.А. Нагорнюк, н.с.

В.В. Павлюк, к.т.н., с.н.с.

*Житомирський військовий інститут ім. С.П. Корольова
Національного авіаційного університету*

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧНОГО ВИЯВЛЕННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЇ СИГНАЛІВ З ЦИФРОВИМИ ВИДАМИ МОДУЛЯЦІЇ

Розроблено алгоритм автоматичного виявлення та класифікації сигналів з цифровими видами модуляції, який базується на аналізі модуляційних ознак сигналу та дереві рішень. Запропоновано та досліджено нові модуляційні ознаки сигналу та критерії розпізнавання цифрових видів модуляції. На відміну від існуючих, розроблений алгоритм не потребує апріорних відомостей про параметри сигналу, точної оцінки несучої частоти та є працездатним при відношенні сигнал/шум більше 5дБ.

Постановка проблеми у загальному вигляді. Стрімкий розвиток цифрових технологій та комп'ютеризованих систем обумовлює широке розповсюдження сигналів з цифровими видами модуляції (ЦВМ), що дозволяють реалізувати швидкісну передачу даних між різними радіоелектронними пристроями [1]. Забезпечення необхідних рівнів перешкодозахищеності систем і стійкості до зовнішніх впливів, реалізація автоматизованих алгоритмів встановлення та підтримання з'єднання призводить до збільшення різноманіття та ускладнення структури сигналів, що застосовуються. Проте це значно ускладнює задачі їх прийому, обробки, аналізу та демодуляції в радіоелектронних системах [2].

Задачі виявлення та класифікації сигналів з ЦВМ вважаються найбільш важливими при роботі з великою номенклатурою сигналів, зокрема в інтелектуальних приймачах та системах програмного радіо [3], а також для випадків, коли вид сигналу, що приймається та його параметри апріорно невідомі, а саме при веденні радіомоніторингу і контролю джерел радіовипромінювань [4]. При цьому, виявлений цифровий сигнал на першому етапі повинен бути класифікований за видом модуляції, найбільш поширеними з яких є амплітудна (АМн), частотна (ЧМн), фазова (ФМн) та квадратурна амплітудна (КАМн) маніпуляції [1]. Всі етапи виявлення і класифікації сигналів повинні бути реалізовані в автоматичному режимі, у реальному масштабі часу та з мінімальним втручанням у налаштування радіоприймального пристрою [4]. Враховуючи це, розробка методів та алгоритмів автоматичного виявлення та класифікації прийнятого сигналу на вказані види є актуальним науковим завданням.

Аналіз попередніх досліджень. У сучасній літературі описано досить велику кількість методів та алгоритмів, що реалізують розпізнавання як аналогових, так і цифрових видів модуляції сигналів [5–17]. Частковий порівняльний аналіз алгоритмів розпізнавання сигналів з ЦВМ проведено в [6, 7]. Незважаючи на те, що задача розпізнавання виду модуляції інтенсивно досліджувалась на протязі останніх десятиліть [6], більшість із запропонованих методів і підходів мають суттєві недоліки. Зокрема деякі підходи [9–14] вимагають апріорних значень несучої частоти та швидкості маніпуляції прийнятого сигналу, типів і параметрів каналних фільтрів, достатньо високих відношень сигнал/шум (ВСШ) [12–14].

Існуючі алгоритми розпізнавання сигналів з ЦВМ умовно поділяються на два основні класи: алгоритми, що базуються на відношенні максимальної правдоподібності (ВМП) [14, 15] та алгоритми, що базуються на аналізі модуляційних ознак сигналу (АМОС) [7–10]. Алгоритми, що базуються на ВМП, забезпечують оптимальне за Баєсівським критерієм рішення, проте вони є досить складними в реалізації, вимогливими до обчислювальних ресурсів та є чутливими до відповідності сигналу прийнятій моделі, що обмежує їх практичну цінність. В алгоритмах з АМОС здійснюється оцінка декількох параметрів сигналу та приймається рішення про вид модуляції відповідно до певних критеріїв. Хоча такі алгоритми можуть бути не оптимальними, вони, як правило, простіші в реалізації, що дозволяє їх використовувати для вирішення визначених у даній статті завдань у реальному масштабі часу. Найбільш поширеними для прийняття рішення при розпізнаванні сигналів вважаються векторний метод, метод опорних векторів, нейронні мережі та метод дерева рішень. При цьому останній з них є найбільш зручним, оскільки передбачає розрахунок лише тих модуляційних ознак, що використовуються в момент прийняття рішення [8].

Загальними й найбільш суттєвими недоліками існуючих методів і алгоритмів класифікації сигналів є їх розрізненість та можливість розпізнавати лише певний для кожного алгоритму набір видів модуляції сигналу [6].

Метою досліджень є розробка алгоритму автоматичного виявлення та класифікації сигналів з амплітудною, частотною фазовою і квадратурною маніпуляцією, який базується на аналізі модуляційних ознак сигналу.

Викладення основного матеріалу. Вхідними даними для роботи алгоритму є масив відліків $S_k, k = 0..K-1$, отриманих після дискретизації у часі з частотою f_s та квантування за рівнем сигнальної суміші з виходу радіоприймального пристрою. Значення частоти дискретизації та кількості рівнів квантування повинні відповідати вимогам для подальшого правильного відтворення сигналу [2]. Результатом роботи алгоритму повинні бути рішення стосовно розв'язання у комплексі двох окремих завдань: виявлення та класифікації сигналів.

Виявлення сигналу передбачає прийняття рішення про наявність корисного сигналу в сигнальній суміші прийнятій приймачем.

Класифікація полягає у коректному віднесенні аналізованого зразка сигналу до одного з класів: ФМн, АМн, ЧМн, КАМн або прийняття рішення про неможливість розпізнавання виду модуляції.

Вважається, що сигнал на передавальній стороні сформовано відповідно до визначених вимог [1], він не є комбінованим має лише один вид маніпуляції та належить до одного з класів: ФМн, АМн, ЧМн, КАМн. Параметри модуляції на протязі ділянки, що аналізується, є постійними. При розповсюдженні сигнал зазнає впливу каналу, що описується Гавсівською моделлю. В такому випадку прийнята сигнальна суміш $r(t, U_i)$ складається з корисного сигналу $s(t, U_i)$ та адитивного гавсівського шуму $n(t)$, що описуються як функції від часу t [5]:

$$r(t, U_i) = s(t, U_i) + n(t), \tag{1}$$

де $U_i = [a_i \Delta f \theta T \varepsilon g(t) \{\varphi_k\}_{k=1}^K \{S_k^{(i)}\}_{k=1}^K]$ – вектор параметрів сигналу для i -го сузір'я; a_i – амплітуда сигналу; Δf – зсув частоти; θ – інваріантна в часі фаза несучої частоти; T – символний період; ε – похибка символної синхронізації; $g(t)$ – сумісна імпульсна характеристика формуючого фільтра та каналу; $\{\varphi_k\}_{k=1}^K$ – стрибки фази; $\{S_k^{(i)}\}_{k=1}^K$ – K комплексних символів, що передаються та беруться з i -го кінцевого алфавіту для відповідного виду модуляції.

Корисний сигнал описується виразом (2), що справедливий для всіх ЦВМ [5]:

$$s(t, U) = a_i e^{j2\pi\Delta f t} e^{j\theta} \sum_{k=1}^K e^{j\varphi_k} S_k^{(i)}(t) g(t - (k-1)T - \varepsilon T), \tag{2}$$

де $j = \sqrt{-1}$ – уявна одиниця.

Амплітуда сигналу визначається за формулою [5]:

$$a_i = \sqrt{\frac{E_s}{\sigma_{s^{(i)}}^2} E_p}, \tag{3}$$

де E_s – енергія сигналу на відео частоті; E_p – енергія імпульсу; $\sigma_{s^{(i)}}^2$ – дисперсія i -го сузір'я сигналу з нульовим математичним очікуванням (МО).

Енергія імпульсу визначається як інтеграл від квадрата імпульсної характеристики формуючого фільтра передавача $p_T(t)$ [5]:

$$E_p = \int_{-\infty}^{\infty} |p_T(t)|^2 dt. \tag{4}$$

Дисперсія $\sigma_{s^{(i)}}^2$ визначається за формулою [5]:

$$\sigma_{s^{(i)}}^2 = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M_i} |s_m^{(i)}|^2, \tag{5}$$

де M_i – кількість рівноймовірних точок у i -му сузір'ї сигналу.

Сумісна імпульсна характеристика визначається як згортка імпульсних характеристик передавача $p_T(t)$ та каналу $h(t)$:

$$g(t) = p_T(t) \otimes h(t). \tag{6}$$

Комплексні значення символів з різними ЦВМ та кратністю маніпуляції M описуються формулами, що представлені нижче.

Амплітудна маніпуляція (АМн) [5]:

$$S_k^{(i - \hat{A}li)} = S_{k,l}^{(M - \hat{A}li)}; \\ S_{k,l}^{(M - \hat{A}li)} \in \left\{ \frac{2m-1-M}{\sigma_{s^{(i - \hat{A}li)}}}, m = 1, \dots, M \right\} k = 1, \dots, K. \tag{7}$$

Квадратурна амплітудна маніпуляція (КАМн) [5]:

$$S_k^{(i - \hat{E}Ali)} = S_{k,l}^{(i - \hat{E}Ali)} + j S_{k,q}^{(i - \hat{E}Ali)}; \tag{8}$$

$$s_{k,I}^{(i - \hat{E} \Delta i l)}, s_{k,Q}^{(i - \hat{E} \Delta i l)} \in \left\{ \frac{2m - 1 - \sqrt{M}}{\sigma_{s^{(i - \hat{E} \Delta i l)}}}, m = 1, \dots, \sqrt{M} \right\} k = 1, \dots, K.$$

Фазова маніпуляція (ФМн) [5]:

$$s_k^{(i - \hat{O} l i)} = e^{j \theta_m};$$

$$\theta_m \in \left\{ \frac{2\pi m}{M}, m = 0, \dots, M - 1 \right\} k = 1, \dots, K. \tag{9}$$

Частотна маніпуляція (ФЧн) [5]:

$$s_k^{(i - \hat{x} l i)}(t) = e^{j 2\pi f_m t};$$

$$f_m \in \{(2m - 1 - M) f_d, m = 1, \dots, M\} k = 1, \dots, K,$$

де індекси I та Q представляють синфазну та квадратурну складові сигналу; M – кратність маніпуляції, що дорівнює степені від числа 2; f_d – девіація частоти.

Зазначимо, що символи даних залежать від часу t лише для ЧМн сигналів. Для решти сигналів (АМн, ФМн, КАМн) $s_k^{(i)}$ є постійна величина для кожного періоду $(k - 1)T - kT$.

Вирішення завдання. Задача виявлення сигналу передбачає оцінку потужності його спектральних складових та порівняння їх із заданим пороговим рівнем [8]. Для зменшення впливу випадкових флуктуацій у спектрі сигналу на ймовірність виявлення необхідно його згладити. Для цього пропонується розбити спектр сигналу на відрізки, що перекриваються та усереднити амплітуди спектральних гармонік на кожному відрізку за формулою:

$$S(kF) = \sum_{n=k}^{k+N} \frac{S(nF)}{N}, \tag{11}$$

де N – кількість відліків, що беруться для усереднення.

На рисунку 1 наведено приклад згладженого амплітудно-частотного спектра суміші прийнятого ФМн сигналу з шумом, потужність якого відповідає рівню P_w .

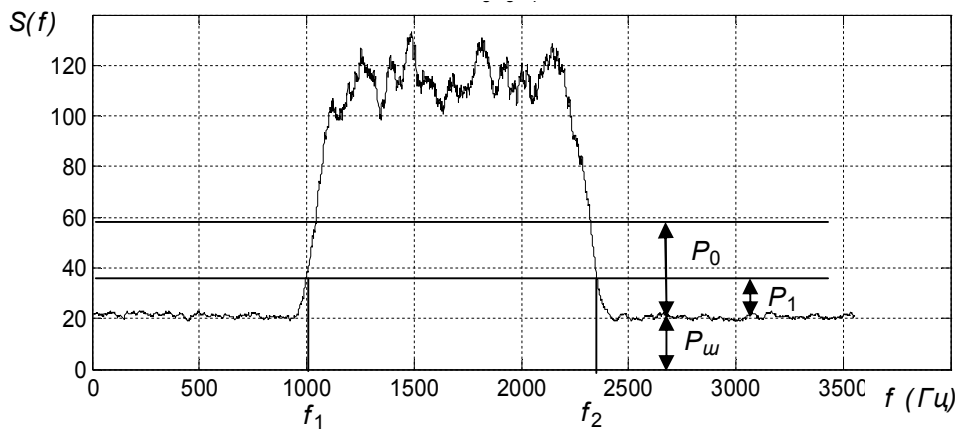


Рис. 1. Згладжений амплітудно-частотний спектр прийнятого сигналу

Сигнал вважається наявним, якщо енергія спектральних складових перевищує рівень заданий порогом $P_{\text{вд}} = P_{\theta} + P_0$, де P_0 – величина, що визначає перевищення потужності сигналу над шумами. Якщо потужність сигналу нижче встановленого порогу, ВСШ вважається малим для подальшого аналізу.

Після прийняття рішення про наявність сигналу здійснюється розпізнавання виду модуляції, що застосована в ньому. Задача розпізнавання сигналу передбачає [7]:

- попередню обробку сигналу;
- розрахунок модуляційних ознак сигналу;
- прийняття рішення про вид модуляції.

Етап попередньої обробки застосовується з метою зменшення впливу частотного зсуву та шумів на процес розпізнавання. Він включає розрахунок оцінок середньої частоти та ширини спектра, корекцію центральної частоти, а також фільтрацію.

Оцінка середньої частоти f_0 здійснюється шляхом розрахунку центральної частоти для спектральних гармонік, що перевищують встановлений поріг $P_{\theta} + P_1$, який є нижчим за поріг виявлення сигналу (рис. 1) за формулою [8]:

$$f_0 = \frac{\sum_i f_i \cdot S(f_i)}{\sum_i S(f_i)}, \quad (12)$$

де $S(f_i)$ – амплітуда спектральної гармоніки, що відповідає частоті f_i .

Відповідно до оціненого значення середньої частоти f_0 здійснюється корекція частоти сигналу за формулою:

$$r_e(k) = r(k)e^{-2\pi f_0 k T_s}, \quad (13)$$

де $r_e(k)$ – скоректований вектор відліків сигналу, $r(k)$ – вхідний вектор відліків сигналу, T_s – період дискретизації сигналу.

Оцінка ширини спектра Δf_0 розраховується як різниця частот $f_2 - f_1$, що відповідають перевищенням спектральних складових порога $P_0 + P_1$. Для зменшення впливу шумів на процес подальшого розпізнавання здійснюється фільтрація сигналу відповідно до оцінених раніше значень центральної частоти та ширини спектра сигналу. Фільтр вибирається з набору попередньо розрахованих, що зберігаються в пам'яті системи розпізнавання, смуга пропускання якого відповідає ширині спектра сигналу.

Для розпізнавання сигналу розраховуються ряд величин, значення яких залежить від виду модуляції. Такі величини називають модуляційними ознаками. Залежно від набору видів модуляції, які необхідно розпізнати, використовуються різні набори величин. Виберемо та дослідимо модуляційні ознаки для алгоритму розпізнавання сигналів з ЦВМ.

Основною відмінністю ЧМн сигналів від сигналів з іншими ЦВМ є відсутність модуляції (корисної інформації) в амплітуді сигналу. Наявність інформації в обвідній сигналу можна визначити за допомогою безрозмірного коефіцієнта γ_{\max} , що є амплітудою максимальної гармоніки в спектрі нормованої та центрованої амплітуди сигналу. Даний коефіцієнт, запропонований в [7], використовується в багатьох алгоритмах та дозволяє розрізнати сигнали з частотною модуляцією від інших при ВСШ більше 5 дБ. Коефіцієнт γ_{\max} розраховується за формулою [7]:

$$\gamma_{\max} = \max \left(\frac{|DFT(A_{i0}(k))|^2}{N_s} \right), \quad (14)$$

де $DFT()$ – дискретне перетворення Фур'є; N_s – кількість відліків у спектрі; $A_{i0}(k)$ – вектор амплітуд сигналу центрований відносно нуля та нормований математичним очікуванням, що розраховується за формулою [7]:

$$A_{i0}(k) = \frac{|r(k)|}{E[|r(k)|]} - 1, \quad (15)$$

де $|r(k)|$ – вектор амплітудних значень відліків вхідного сигналу; $E[|r(k)|]$ – середнє значення амплітуд вхідного сигналу, що визначається за формулою [7]:

$$E[|r(k)|] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |r_i(k)|, \quad (16)$$

де N – кількість відліків, що використовуються в розрахунку.

Параметр γ_{\max} не залежить від зміни фази прийнятого сигналу, а отже і від неточності попередньої оцінки несучої частоти. В [9] проведено дослідження значень γ_{\max} для АМн, ФМн та ЧМн сигналів з кратностями маніпуляції 2–8. Однак використана модель при розрахунках не враховує застосування формуючих фільтрів, що не дає можливості вибрати вірний поріг при розпізнаванні. Тому проведено дослідження залежностей γ_{\max} для всіх ЦВМ при різних значеннях кратностей маніпуляції та ВСШ. Отримані графічні залежності представлено на рисунку 2. З рисунка видно, що при ВСШ більше 5 дБ для ЧМн сигналів коефіцієнт γ_{\max} не перевищує 1,5, а для сигналів інших видів він більше 10. Це підтверджує доцільність використання даного параметра як модуляційної ознаки при віднесення прийнятого сигналу до класу ЧМн.

Подальші етапи класифікації оперуватимуть лише з класами АМн, ФМн та КАМн.

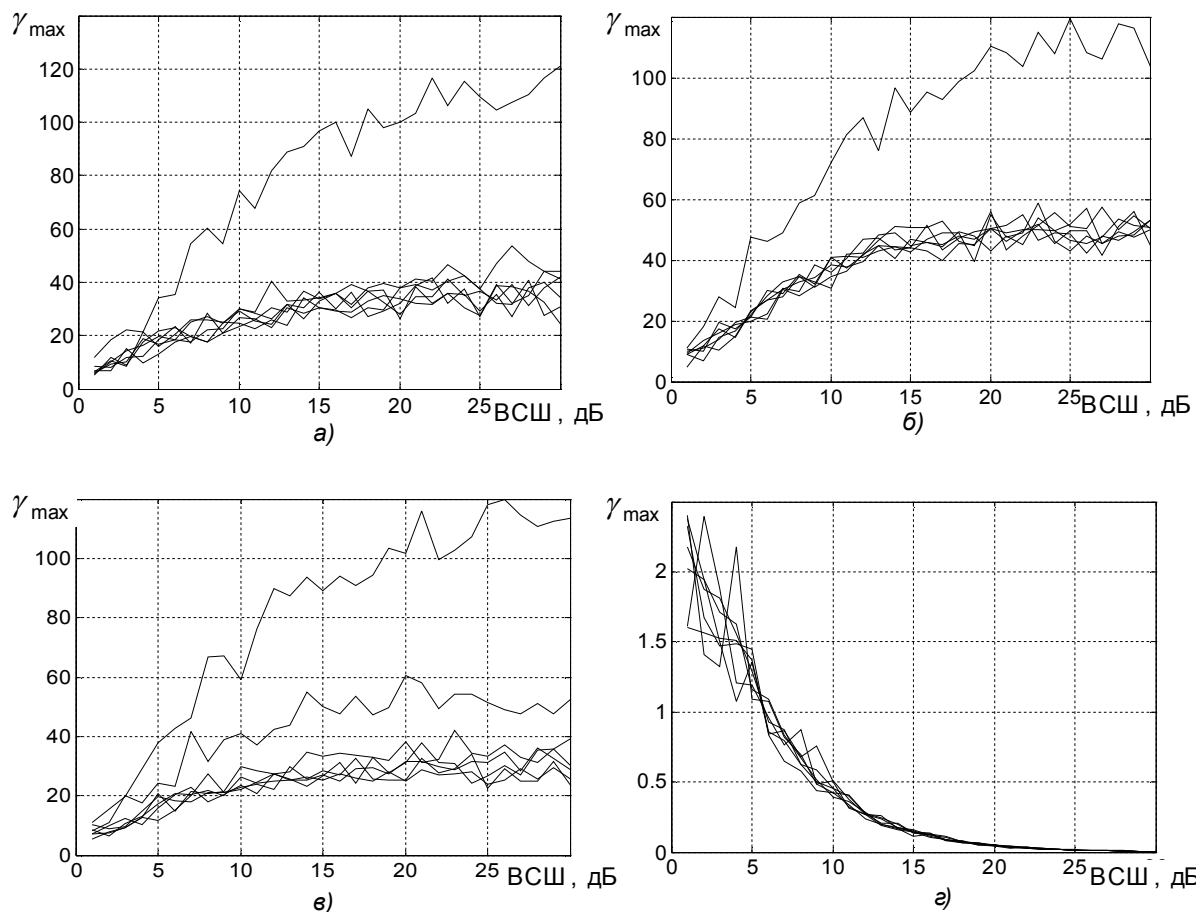


Рис. 2. Залежність параметра γ_{\max} для сигналів з різними видами модуляції:
 а – АМн; б – ФМн; в – КАМн; г – ЧМн

При розпізнаванні сигналів з АМн модуляцією слід взяти до уваги факт, що в даному виді сигналів, на відміну від ФМн і КАМн, відсутня модуляція в миттєвій фазі. В існуючих алгоритмах при розділенні даних видів модуляції використовуються оцінки дисперсій абсолютної та розгорнутої фаз. Основним недоліком такого підходу є сильна залежність точності оцінки дисперсій від точності оцінки центральної частоти. Так при точності оцінки гірше 1 Гц, алгоритми стають непрацездатними. Тому пропонується новий параметр для розпізнавання АМн сигналів ψ_{\max} , значення якого не залежить від частотного зсуву:

$$\psi_{\max} = \max \left(\frac{|DFT(\Phi_a(k))|^2}{N_\phi} \right), \tag{17}$$

де N_ϕ – кількість відліків, що беруться в розрахунках, Φ_a – вектор абсолютних фаз сигналу, що розраховується за формулою:

$$\Phi_a(n) = \arg(|I(k)| + j|Q(k)|), \tag{18}$$

де $I(k)$ та $|Q(k)|$ – синфазні та квадратурні відліки сигналу $r(k)$.

Графіки залежностей параметра ψ_{\max} від виду модуляції при різних ВСШ надано на рисунку 3.

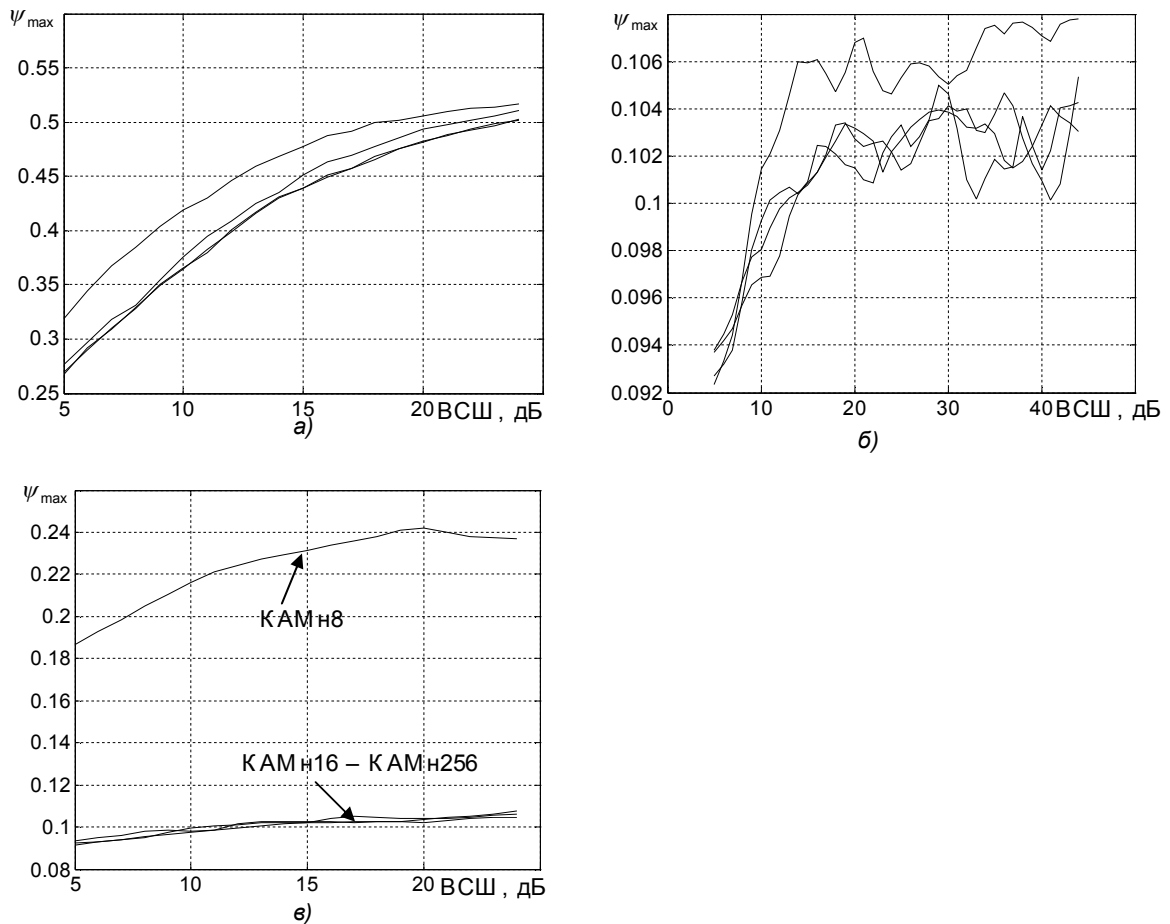


Рис. 3. Залежність параметра ψ_{\max} для сигналів з різними видами модуляції:
 а – АМн; б – ФМн; в – КАМн

З рисунка 3 видно, що значення параметра ψ_{\max} при ВСШ від 5 дБ для сигналів з АМн модуляцією більше 0,257, для ФМн та КАМн16 – КАМн256 сигналів не перевищує 0,11, а для КАМн8 менше 0,242. Таким чином, запропонований параметр може використовуватись як ефективна модуляційна ознака при класифікації АМн, ФМн та КАМн сигналів.

Наступним етапом класифікації є віднесення сигналу до одного з класів: КАМн або ФМн. Основною відмінністю цих класів є наявність модуляції в модулі амплітуди КАМн сигналів, тому для їх розрізнення потрібно застосовувати параметри, що залежать від миттєвої амплітуди сигналу. Пропонується як такий параметр взяти оцінку дисперсії амплітуди нормованого за потужністю сигналу, що розраховується за виразом [18]:

$$D_a = E[A_i(k)^2] - E[A_i(k)]^2, \tag{19}$$

де A_i – нормований за потужністю сигнал, що розраховується за формулою:

$$A_i(k) = \frac{r(k)}{\sqrt{\sum_{k=1}^N r(k)^2}}, \tag{20}$$

де N – кількість відліків в масиві r .

Графіки залежностей дисперсії D_a для ФМн та КАМн при різних значеннях ВСШ наведено на рисунку 4.

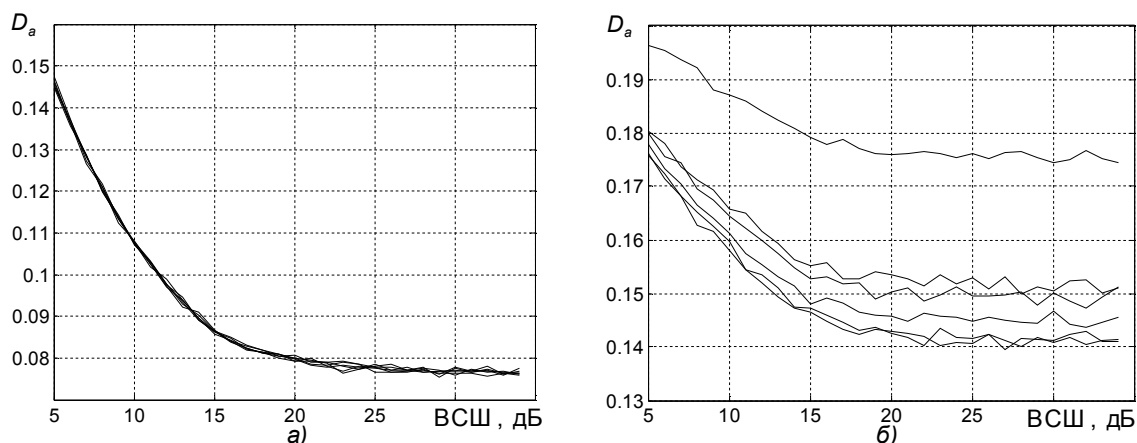


Рис. 4. Залежність дисперсії D_a для сигналів з різними видами модуляції:
 а – ФМн; б – КАМн

Як видно з рисунка 4, при ВСШ 5 дБ, дисперсія D_a для ФМн сигналів не перевищує 0,145, а для КАМн сигналів більше 0,175. Відповідні межі можна вибрати і для інших значень ВСШ. Отже при відомому значенні ВСШ параметр D_a може використовуватись як модуляційна ознака при розділенні ФМн та КАМн сигналів.

У загальному випадку алгоритм класифікації є процес прийняття послідовних бінарних рішень, утворюючих деревовидну структуру. При цьому для кожного етапу прийняття рішення визначається своя модуляційна ознака та встановлюється певний поріг, корекція якого може проводитись відповідно до умов прийому та обробки. Адаптація порогів прийняття рішень до умов прийому дозволяє покращити ймовірність правильного розпізнавання сигналів [8]. Також послідовна оцінка модуляційних ознак дозволяє виключити із розрахунків ті з них, що відповідають прийнятому раніше рішення.

Розрахунок порогів прийняття рішення здійснено з використанням комп'ютерного моделювання та методу найменших квадратів, їх значення для різних ВСШ представлено в таблиці 1.

Таблиця 1

Значення порогів для параметрів γ_i, ψ_i, D_i

ВСШ, дБ	Поріг для γ_i	Поріг для ψ_i	Поріг для D_i
5	4	0,23	0,16
10	4	0,23	0,135
15 і більше	4	0,23	0,12

Враховуючи сказане вище, алгоритм автоматизованого виявлення та класифікації сигналів з ЦВМ пропонується у вигляді схеми наведеної на рисунку 5.

При виявленні сигналу оцінюється потужність його спектральних складових P_c та порівнюється з порогом $P_\theta + P_1$. Якщо оцінка потужності перевищує поріг, то здійснюється подальша класифікація сигналу, в іншому випадку він класифікується як шум. Процес класифікації складається з двох основних етапів. На першому етапі здійснюється оцінка та корекція центральної частоти, оцінка ширини спектра та фільтрація. На другому етапі розраховуються три модуляційні ознаки ($\gamma_{max}, \psi_{max}, D_a$), які порівнюються з відповідними порогоми та приймається рішення про віднесення сигналу до одного з чотирьох класів: ЧМн, АМн, ФМн, КАМн.

Таким чином, розроблений алгоритм формує єдине рішення про відповідність сигналу, що аналізується, одному з чотирьох класів. Дане рішення виводиться у вигляді порядкового номера даного класу, або класичного буквеного позначення.

Оцінка працездатності та ефективності розробленого алгоритму проведена шляхом моделювання в програмному середовищі MATLAB. Для аналізу використано тестові сигнали, сформовані відповідно до відомих математичних моделей та класичних алгоритмів. Вплив каналу розповсюдження промодельовано з використанням вбудованих програмних генераторів білого Гаусівського шуму.

Моделювання проведено для дискретних значень ВСШ: 5, 10, 15 та 20 дБ. Результати всіх експериментів усереднено за 1000 реалізаціями. Результати моделювання надано у таблиці 2.

Таблиця 2

*Результати перевірки
розробленого алгоритму*

Початковий сигнал, ВСШ, дБ		Ймовірність віднесення до класу			
		ЧМн	АМн	ФМн	КАМн
ЧМн	5	0,980	0	0	0,020
	10	0,990	0	0	0,010
	15	0,997	0	0	0,003
	20	1	0	0	0
АМн	5	0	0,980	0,020	0
	10	0	0,999	0,001	0
	15	0	1	0	0
	20	0	1	0	0
ФМн	5	0	0	0,820	0,180
	10	0	0	0,987	0,013
	15	0	0	0,999	0,001
	20	0	0	1	0
КАМн	5	0	0	0,090	0,910
	10	0	0	0,022	0,978
	15	0	0	0,010	0,990
	20	0	0	0	1

Результати проведеного моделювання свідчать про працездатність розробленого алгоритму в цілому. При ВСШ 10–20 дБ розроблений алгоритм дозволяє класифікувати сигнали з ймовірністю близькою до 1. Працездатність алгоритму зберігається при ВСШ 5 дБ, проте ймовірність правильного розпізнавання зменшується до 0,9...0,82.

Оскільки в алгоритмі не здійснюється точна оцінка несучої та символної частот, його розрахункова складність є нижчою, порівняно з іншими відомими алгоритмами, що дозволяє застосовувати його для розпізнавання сигналів у реальному часі.

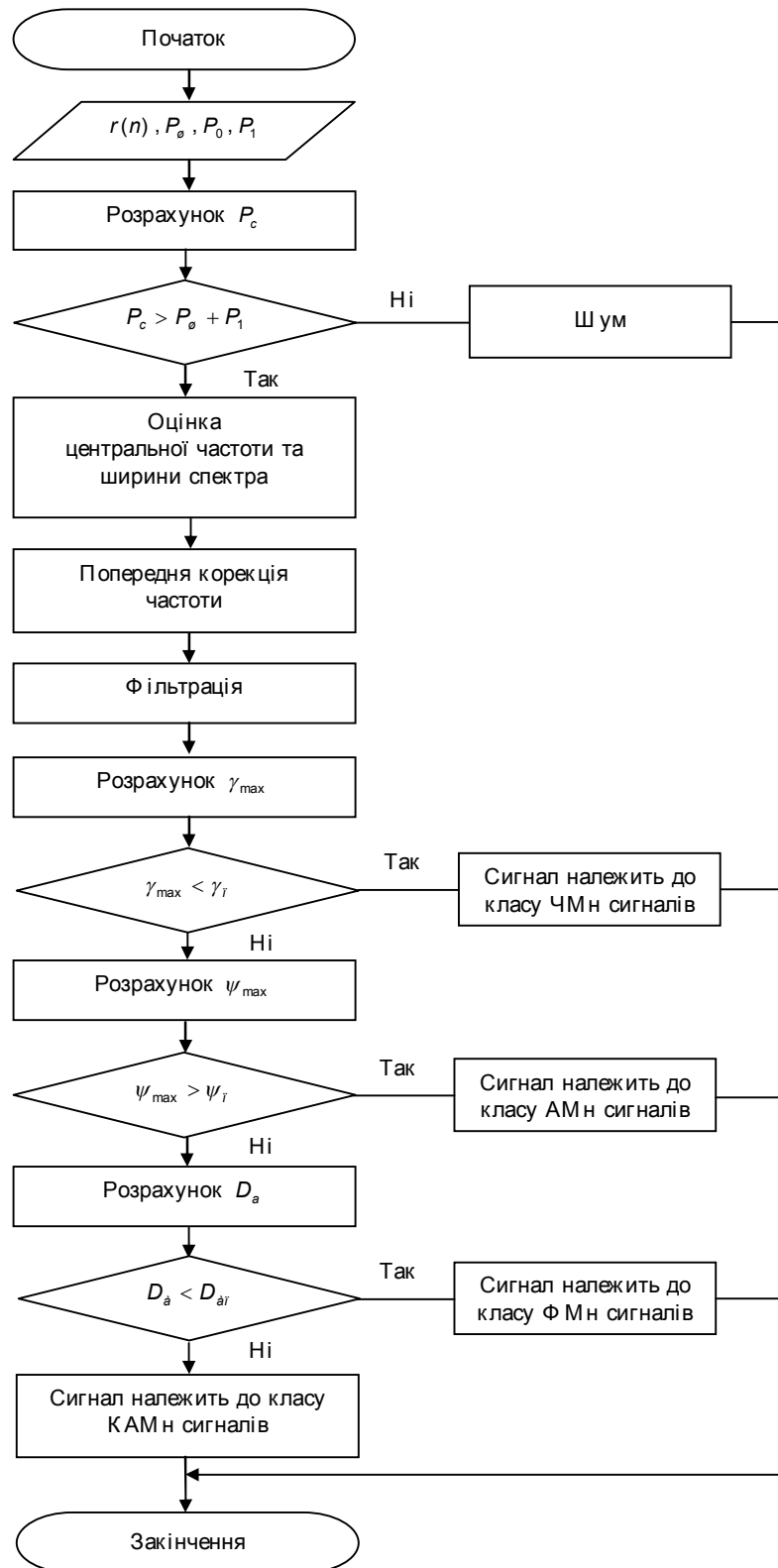


Рис. 5. Схема алгоритму автоматизованого виявлення та класифікації сигналів з ЦВМ

Висновки. Розроблено алгоритм автоматичного виявлення та класифікації сигналів з цифровими видами модуляції, який базується на аналізі модуляційних ознак сигналу та дереві рішень. Алгоритм дозволяє виявляти факт наявності сигналу в прийнятій сигнальній суміші та визначати його приналежність до одного з чотирьох класів: амплітудно, частотно, фазово чи квадратурно-амплітудно

маніпульованих. Запропоновані та обґрунтовані модуляційні ознаки та критерії класифікації, визначено порогові прийняття рішення для кожної з них. Алгоритм має невисоку розрахункову складність, що дозволяє застосовувати його для розпізнавання сигналів у реальному часі.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Склад Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение : пер. с англ./ Б.Склад. – изд. 2-ое, испр. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2003. –1104 с.
2. J.G. Proakis. Digital Communications / J.G. Proakis. – McGraw-Hill, 4rd edition, 1995. – 938 p.
3. Dillinger B. Software defined radio: architectures, systems, and functions / B.Dillinger. – Wiley, 2003. – 345 p.
4. Рембовский А.М. Радиомониторинг: задачи, методы, средства / А.М. Рембовский. – М. : Горячая линия–Телеком, 2006. – 492 с.
5. Octavia A. A Survey of Automatic Modulation Classification Techniques: Classical Approaches and New-Princeton / A.Octavia. – NJ, USA, 2006. – 63 p.
6. Su W. Comparison and Simulation of Digital Modulation Recognition Algorithms / W.Su, J.Kosinski // Annual Joint Electronic Warfare Conference, 2003. – 7 p.
7. Azzouz E. Automatic Modulation Recognition of Communication Signals / E.Azzouz, A.Nandi. – Kluwer Academic Publishers, 1996. – 231 p.
8. Method and system for detecting and classifying the modulation Christian Dubuc. United States Patent № 7428270.
9. Le Guen D. Automatic Recognition Algorithm for Digitally Modulated Signals/ Le Guen D., A.Mansour // SIGNAL Processing, pattern recognition & applications, 2002. – 8 p.
10. Method and device for modulation recognition of digitally modulated signals with multi-level magnitudes. United States Patent № 7379507B2.
11. Mansour A. Automatic modulation recognition of MPSK signals using constellation rotation and its 4th order cumulant / A.Mansour // Digital Signal Processing, 2005 p. – Pp. 295–304.
12. Swami A. Hierarchical digital modulation classification using cumulants/ A.Swami, B.Sadler// IEEE Trans. Commun. – Vol. 48. – 2000. – Pp. 416–429.
13. Mobasseri B. Constellation shape as a robust signature for digital modulation recognition / B.Mobasseri // IEEE MILCOM, 1999. – Pp. 442–446.
14. Huo X. A simple and robust modulation classification method via counting / X.Huo, D.Donoho // ICASSP, 1998. – Pp. 3289–3292.
15. Sills J. Maximum-likelihood modulation classification for PSK and QAM / J.Sills // Signal Exploitation and Geolocation Division Southwest Research Institute San Antonio, 1999. – Pp. 48–54.
16. Hong L. Identification of digital modulation types using the wavelet transform / L.Hong, K.Ho // IEEE MILCOM, 1999. – Pp. 427–431.
17. Ibnkahla M. Applications of neural networks to digital communications / M.Ibnkahla // Signal Processing, 2000. – Pp. 1185–1215.
18. Венцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Венцель. – 4-ое изд. – М. : Наука, 1969. – 576 с.

НАГОРНЮК Олександр Анатолійович – науковий співробітник науково-дослідної лабораторії наукового центру Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова Національного авіаційного університету.

Наукові інтереси:

- розробка та вдосконалення алгоритмів цифрової обробки та розпізнавання сигналів.

ПАВЛЮК Володимир Володимирович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії наукового центру Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова Національного авіаційного університету.

Наукові інтереси:

- вдосконалення блоків та алгоритмів функціонування радіотехнічних систем.

Подано 14.11.2011