

**АЛГОРИТМ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИЗНАЧЕННЯ КРАТНОСТІ МАНІПУЛЯЦІЇ
ФАЗОМАНІПУЛЬОВАНИХ СИГНАЛІВ З НЕВІДОМИМИ ПАРАМЕТРАМИ**

(Представлено д.т.н., проф. Манойловим В.П.)

Запропоновано алгоритм автоматизованого визначення кратності маніпуляції сигналів з багаторівневою фазовою маніпуляцією в умовах відсутності апріорної інформації про параметри сигналу. Алгоритм базується на кумулянтному аналізі форми сузір'я сигналу та забезпечує високу ймовірність визначення кратності маніпуляції при низьких відношеннях сигнал/шум.

Постановка проблеми у загальному вигляді. Останнім часом широкого розповсюдження набувають системи безпроводного зв'язку, що реалізують протоколи обміну з адаптивною модуляцією та розподілом частот [1]. У таких системах параметри модульованого сигналу змінюються з часом, підстроюючись під характеристики спотворень, що забезпечує найкращу спектральну та енергетичну ефективність передачі даних. Одним із основних видів модуляції, що використовуються в таких системах, є багаторівнева фазова маніпуляція (ФМн) [1]. Адаптивна зміна параметрів та кратності ФМн сигналу породжує необхідність їх постійного контролю при виконанні завдань радіомоніторингу. Автоматизація процесу визначення виду зареєстрованого сигналу та його параметрів дозволить перекласти частину завдань оператора на вимірювальні та програмно-алгоритмічні засоби, що призведе до зниження надмірності інтерфейсу користувача і, як наслідок, до підвищення продуктивності праці і зменшення впливу людського чинника на результати вимірювань [2].

Переважає більшість алгоритмів, що представлено в літературі, малоприматні для вирішення вказаного завдання, оскільки в тій або іншій формі використовують апріорну інформацію про сигнал (преамбулу), а також апріорні значення параметрів сигналу (несуча та тактова частоти, вид та характеристики формуючого фільтра тощо) [3, 4]. Область застосування таких алгоритмів обмежена рамками конкретних стандартів [3]. Таким чином, задача автоматизованого визначення кратності ФМн в умовах відсутності апріорної інформації про параметри сигналу є актуальною в теперішній час.

Аналіз попередніх досліджень. Проблемі визначення кратності ФМн сигналів присвячена досить велика кількість робіт опублікованих за останні роки (переважно за кордоном). Основна маса таких робіт описує вузькоспеціалізовані рішення, орієнтовані на застосування в цифрових приймачах. При цьому нерідко завдання визначення кратності ФМн розглядається у відриві від оцінки параметрів сигналу (як правило, передбачається, що вони відомі) і запропоновані алгоритми не можуть безпосередньо застосовуватися в системах радіомоніторингу, оскільки апріорні значення параметрів сигналів відсутні [4]. Таким чином, завдання автоматизованого визначення виду ФМн при невідомих параметрах сигналу на сьогоднішній день повною мірою не вирішене.

Існуючі алгоритми визначення кратності ФМн сигналів можна поділити на два основні класи: алгоритми, що базуються на основі теорії прийняття рішень та алгоритми, що базуються на теорії розпізнавання образів [3, 4]. Алгоритми на основі теорії прийняття рішень розраховують відношення правдоподібності та порівнюють його з визначеним порогом. Вони забезпечують оптимальне за Баєсівським критерієм рішення, проте є вимогливими до обчислювальних ресурсів, чутливими до відповідності сигналу прийнятій моделі, що сильно обмежує їх практичне застосування. Такі алгоритми потребують представлення сигналу на «нульовій частоті», що практично неможливе без апріорних відомостей про параметри сигналу [3]. В алгоритмах на основі теорії розпізнавання образів здійснюється оцінка модуляційних ознак сигналу та приймається рішення про вид модуляції, відповідно до обраних критеріїв. Хоча такі алгоритми є не оптимальними, вони, як правило, простіші в реалізації та забезпечують близьке до оптимального рішення, що зумовлює їх широке практичне застосування. Як модуляційні ознаки при визначенні кратності маніпуляції ФМн сигналів, представлених у літературі алгоритмах, використовують число та положення піків у амплітудному спектрі простепензованого сигналу [5], дисперсію та гістограму часових інтервалів переходу сигналу через «нуль» [7], фазову функцію розподілу ймовірностей та її статистичні моменти [8, 9], гістограму різниці фаз між сусідніми символами [10], дискретне перетворення Фур'є фазової гістограми [11], величини статистики вищих порядків (змішані моменти та кумулянти) [12–14] та інші. Основними недоліками більшості з представлених алгоритмів є використання апріорної інформації про сигнал, їх прив'язка до конкретних стандартів та низька ймовірність правильного рішення при низьких ВСШ.

Метою досліджень є розробка алгоритму автоматизованого визначення кратності маніпуляції ФМн при невідомих апріорних параметрах сигналу.

Постановка завдання досліджень. 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. Значення частоти дискретизації та кількості рівнів квантування повинні відповідати вимогам для подальшого правильного відтворення сигналу [15]. Результатом роботи алгоритму повинно бути рішення про кратність ФМн, що застосована в аналізованому сигналі.

Вважається, що сигнал на передавальному боці сформовано, відповідно до визначених вимог [15] та він належить до класу сигналів з ФМн. Алгоритм відокремлення класу сигналів з ФМн від інших класів з цифровою модуляцією наведено в [16]. Параметри сигналу, зокрема кратність маніпуляції, на аналізованому часовому проміжку постійні. При розповсюдженні сигнал зазнає впливу каналу, що описується гаусівською моделлю. В такому випадку прийнята сигнальна суміш $r(t)$ описується як функція від часу t [16]:

$$r(t) = A e^{j2\pi\Delta f t} e^{j\theta} \sum_{k=1}^K e^{j\theta_m(k)} g(t - (k-1)T - \varepsilon T) + n(t), \quad (1)$$

де $\theta_m \in \left\{ \frac{2\pi m}{M}, m = 0, \dots, M-1 \right\}$; M – кратність маніпуляції; A – 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; $n(t)$ – адитивний гаусівський шум.

Викладення основного матеріалу. Розв'язання завдання. За останні роки широкого розповсюдження набули методи розпізнавання цифрових видів модуляції, що основані на кумулянтному аналізі сигналів [3, 11–14]. Суть даних методів зводиться до розрахунку значень змішаних кумулянтів різних порядків, порівняння їх з теоретичними значеннями, що відповідають заданим видам модуляції та прийняття рішення, відповідно до обраного підходу. Перевагою методів основаних на кумулянтному аналізі є їх простота реалізації, порівняно низька розрахункова складність та висока ймовірність розпізнавання при низьких відношеннях сигнал/шум (ВСПШ). Останнє обумовлено тим, що всі кумулянти третього і вище порядків дорівнюють нулю для нормальних процесів, а змішані кумулянти статистично незалежних величин також рівні нулю [17, 18].

Математично кумулянти C_n визначаються як коефіцієнти у розкладанні в ряд Маклорена логарифму характеристичної функції $G(u)$ [17]:

$$\ln G(u) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(iu)^n}{n!} C_n. \quad (2)$$

Змішані кумулянти порядку p і q (C_{pq}) визначаються як [17]:

$$C_{pq} = \text{Cum} \left(\underbrace{r(k), \dots, r(k)}_{(p-q)}, \underbrace{r^*(k), \dots, r^*(k)}_{(q)} \right), \quad (3)$$

де Cum – оператор розрахунку кумулянту; $r^*(k)$ – спряжені значення комплексних чисел $r(k)$.

Наприклад, змішаний кумулянт четвертого порядку C_{41} визначається за формулою [17]:

$$C_{41} = \text{Cum}(r(k), r(k), r(k), r^*(k)). \quad (4)$$

Теоретичні значення кумулянтів для ФМн сигналів, розрахованих для ідеального фазового сузір'я (представлення сигналу на «нульовій частоті» без шуму), надано в таблиці 1 [3].

Таблиця 1

Теоретичні значення змішаних кумулянтів

Вид ФМн	C_{20}	C_{21}	C_{40}	C_{41}	C_{42}	C_{60}	C_{61}	C_{62}	C_{63}	C_{80}	C_{81}	C_{82}	C_{83}	C_{84}
ФМн-2	1	1	-2	-2	-2	16	16	16	16	-272	-272	-272	-272	-272
ФМн-4	0	1	1	0	-1	0	-4	0	4	-34	0	34	0	-34
ФМн-8	0	1	0	0	-1	0	0	0	4	1	0	0	0	-33

Як видно з таблиці, для визначення кратності ФМн сигналів можна використовувати кумулянти всіх порядків, але як показали результати досліджень, проведених у рамках даної статті, для ефективної

роботи алгоритму досить застосувати лише кумулянти четвертого та шостого порядків. Такий підхід дозволяє зменшити розрахункову складність алгоритму, практично не впливаючи на його характеристики.

Перевагою кумулянтного аналізу при визначенні типу багаторівневої ФМн є те, що значення кумулянтів є інваріантним до зміни фази несучого коливання. Однак наявність частотного зсуву Δf та неточності символної синхронізації ε призводить до значних похибок та унеможливує процес розпізнавання. В існуючих алгоритмах дані параметри вважаються відомими або заздалегідь оціненими, однак методи та способи їх оцінки, а також вплив неточностей здійснених оцінок на ефективність роботи алгоритму не приводяться.

Таким чином, алгоритм автоматизованого визначення кратності ФМн оснований на кумулянтному аналізі в умовах відсутності апріорної інформації про параметри сигналу повинен складатися з трьох етапів:

- оцінювання та корекція невідомих параметрів сигналу (відновлення фазового сузір'я);
- розрахунок значень змішаних кумулянтів четвертого та шостого порядків;
- порівняння розрахованих кумулянтів з їх теоретичними значеннями та прийняття рішення про кратність маніпуляції.

Пропонується така узагальнена схема оцінювання та корекції невідомих параметрів сигналу (рис. 1).

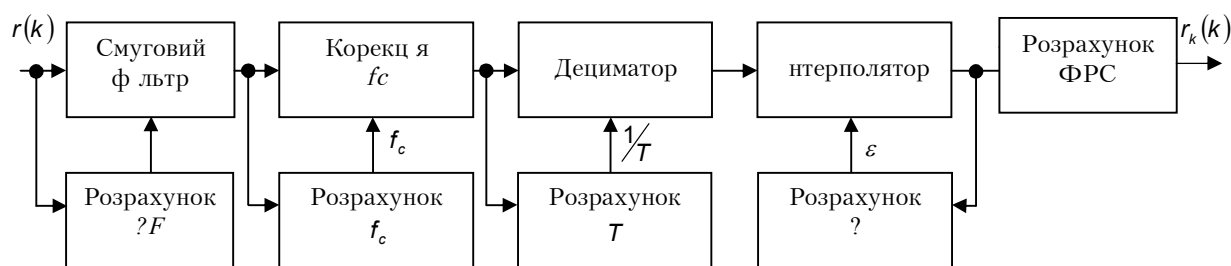


Рис. 1. Схема попередньої обробки та оцінювання невідомих параметрів сигналу

Смуговий фільтр використовується для заглушення сторонніх сигналів та шумів, що знаходяться за межами ширини спектра прийнятого сигналу. Такий фільтр на практиці може обиратися з набору заздалегідь розрахованих, що зберігаються в пам'яті обчислювального пристрою, відповідно до значення оціненої ширини спектра сигналу ΔF .

Для оцінювання несучої частоти в літературі запропоновано ряд методів. Більшість з них оснований на спектральному аналізі [19] або розрахунку статистичних характеристик тривалості часового інтервалу переходу сигналу через «нуль» [7]. Остання група методів проста в реалізації, але потребує високої частоти дискретизації та має значні похибки при оцінюванні несучої частоти сигналів з низьким ВСШ. Аналіз ефективності методів спектрального аналізу при визначенні значення несучої частоти ФМн сигналів здійснений в [20] показує, що найкращою точністю має метод ШПФ простеженого сигналу. Однак при низьких ВСШ (менше 10 дБ) похибка оцінки частоти даним методом різко збільшується. Проведені дослідження показують, що кращі показники при низьких ВСШ має метод модифікованої періодограми, відповідно до якого спектральна щільність потужності визначається за формулою [19]:

$$S(f) = \frac{1}{F_s} \frac{\left| \sum_{k=1}^K r(k) \omega(k) e^{-j \frac{2\pi f k}{F_s}} \right|^2}{\sum_{k=1}^K |\omega(k)|^2}, \quad (5)$$

де F_s – частота дискретизації сигналу; ω – вектор вагових коефіцієнтів.

Залежності відносних похибок оцінювання несучої частоти методами ШПФ та періодограми для ФМн сигналів з різними кратностями маніпуляції представлено на рисунку 2.

Як видно з рисунка 2, метод модифікованої періодограми (МП) дозволяє оцінити значення несучої частоти з відносною точністю не гірше $\delta_f = 0,1$ при ВСШ більше 6 дБ, що досить для етапу попереднього оцінювання.

Оскільки відомі методи тактової синхронізації працездатні лише при незначних відхиленнях тактової частоти від очікуваного її значення, то відсутня можливість їх безпосереднього використання при

невідомому апріорному значенні тактової частоти. Тому етап тактової синхронізації поділений на дві частини: попередня (груба) та точна корекція тактової частоти.

Для попередньої корекції використовується алгоритм, запропонований в [21], що базується на аналізі спектра модуля комплексної амплітуди сигналу, не потребує апріорних відомостей про символічну частоту та дозволяє здійснити оцінювання її значення при відношенні сигнал/шум від 5 дБ. Похибка оцінки символічної частоти даним алгоритмом не перевищує 2 % від значення символічної частоти, що забезпечує подальшу роботу алгоритмів тактової синхронізації.

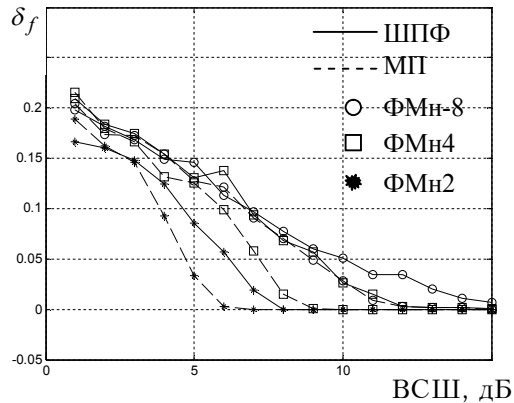


Рис. 2. Залежність відносно точності оцінки несучої частоти від ВСШ

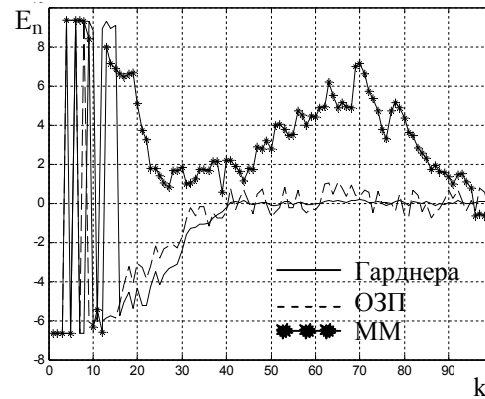


Рис. 3. Залежність похибки тактової частоти від кількості відліків

З метою вибору найбільш ефективного серед відомих алгоритмів тактової синхронізації проаналізовано їх роботу з сигналами з невідомою початковою фазою та при наявності частотного зсуву. На рисунку 3 надано залежності похибки оцінки тактової частоти методом Гарднера, методом з випереджаючим та запізнюючим стробуванням і методом Мюеллера-Мюеллера при невідомій початковій фазі та частотному зсуві 10 Гц. Як видно з рисунка 3 найкращі точнісні та дисперсійні характеристики має метод Гарднера, який забезпечує похибку тактової синхронізації близькою до нуля вже після обробки 40 відліків сигналу. Перевагою даного методу є те, що він не чутливий до фази несучого коливання та дозволяє реалізувати оцінювання тактової частоти за наявності незначного частотного зсуву.

Реалізувавши всі операції по обробці сигналу описані вище, отримуємо сигнал скоректований за тактовою частотою, але з незначним частотним зсувом та невідомою початковою фазою. Оскільки метод кумулянтного аналізу інваріантний до початкової фази, то необхідно усунути лише зсув по частоті. Методи частотної синхронізації, що представлено в літературі, потребують апріорну інформацію про сигнал (преамбула, вид фазового сузір'я і т. д.), яка в більшості випадків є недоступною в системах радіомоніторингу. Тому застосування таких методів на практиці є неможливим. Для усунення частотного зсуву пропонується при побудові фазового сузір'я використовувати не фази символів, а різниці фаз між сусідніми символами. Так як фазовий зсув, спричинений наявністю зсуву по частоті, змінюється за лінійним законом (6) та між двома сусідніми символами є постійною величиною, то різниця фаз між суміжними символами утримує лише інформацію про скачки фази. На рисунку 4, а представлено сузір'я ФМн-4 за наявності частотного зсуву, а на рисунку 4, б сузір'я, побудоване з урахуванням різниці фаз (фазово-різницевого сузір'я).

$$\phi(k) = \phi(k-1) + 2\pi \frac{\Delta f}{F_s}, \quad (6)$$

де ϕ – повна фаза сигналу.

Як видно з рисунка 4, запропонований підхід відновлює форму фазового сузір'я, що дозволяє подальше застосування кумулянтного аналізу для визначення кратності маніпуляції ФМн сигналу. Для цього потрібно розрахувати значення кумулянтів (3) для фазово-різницевого сузір'я та порівняти їх з теоретичними значеннями.

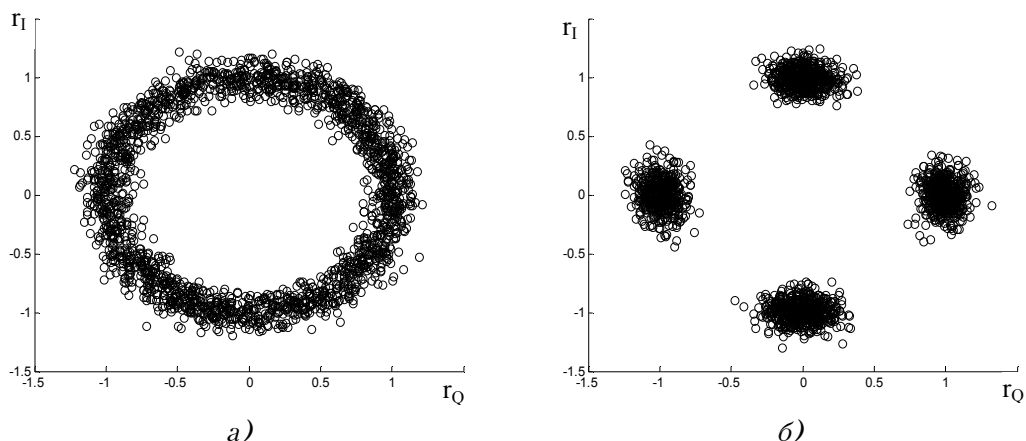


Рис. 4. Фазові сузір'я ФМн-4 сигналу за наявності частотного зсуву:
а – звичайне сузір'я; б – фазово-різницево сузір'я

Як метод порівняння теоретичних значень кумулянтів з розрахованими пропонується застосувати метод регресійного аналізу – метод найменших квадратів. Він не потребує «тренувальних» послідовностей, простий в реалізації, має низьку розрахункову складність та забезпечує високу ймовірність правильного розпізнавання [23]. Суть методу полягає в мінімізації квадратів відхилень реальних величин від їх теоретичних значень, що описується виразом:

$$\sum_{n=1}^N (C_T(n) - C(n))^2 \rightarrow \min, \quad (7)$$

де C_T – теоретичні значення кумулянтів, що представлено в таблиці 1; C – значення кумулянтів, розраховані за формулою (3); N – кількість кумулянтів, що використовуються при визначенні кратності маніпуляції.

Приймається рішення, що в сигналів застосована така кратність маніпуляції, для якої значення виразу (5) є мінімальним.

Таким чином, запропонований алгоритм містить фільтрацію сигналу, попереднє оцінювання несучої частоти методом модифікованої періодограми та її корекцію, попереднє оцінювання символної частоти методом оснований на аналізі спектра модуля комплексної амплітуди сигналу, децимацію, тактову синхронізацію методом Гарднера, розрахунок фазово-різницевого сузір'я, розрахунок змішаних кумулянтів четвертого та шостого порядків та прийняття рішення про кратність модуляції з використанням методу найменших квадратів.

Перевірка працездатності та ефективності розробленого алгоритму проведена в програмному середовищі MATLAB 2011b. Формування тестових сигналів реалізовано, відповідно до математичної моделі (1). Параметри сигналу обирались випадково в діапазоні: тактова частота 0,1–8 кГц, зсув за несучою частотою 0,01–10 кГц. Параметри каналу змінювались для забезпечення дискретних значень ВСШ 5, 10 та 15 дБ. Ймовірності правильного визначення кратності ФМн розраховувались за 1000 реалізаціями для кожного виду сигналу. Результати моделювання представлено в таблиці 2.

Таблиця 2

Результати перевірки розробленого алгоритму

Початковий сигнал, ВСШ, дБ		Ймовірність визначення кратності маніпуляції		
		ФМн-2	ФМн-4	ФМн-8
ФМн-2	5	0,999	0	0,001
	10	1	0	0
	15	1	0	0
ФМн-4	5	0	0,681	0,319
	10	0	0,999	0,001
	15	0	1	0
ФМн-8	5	0	0,217	0,783
	10	0	0,014	0,986
	15	0	0	1

Висновки. Розроблено алгоритм визначення кратності ФМн в умовах відсутності апріорної інформації про параметри сигналу, що базується на кумулянтному аналізі сигналів. На відміну від відомих, запропонований алгоритм не потребує апріорних відомостей про параметри сигналу. Здійснено порівняльний аналіз методів і алгоритмів оцінювання невідомих параметрів та обґрунтовано їх вибір для вирішення завдань, визначених у даній статті. Оцінювання та корекція несучої частоти поділені на два етапи. На першому етапі реалізовано попереднє оцінювання методом модифікованої періодограми, який має найменш зміщену оцінку серед методів спектрального аналізу та є найбільш стійким при низьких ВСШ. Остаточний частотний зсув компенсується розрахунком різниці фаз між сусідніми символами. Оцінювання значення тактової частоти також поділено на два етапи: попереднє (грубе) та точне оцінювання. Попереднє оцінювання здійснюється алгоритмом, що базується на аналізі спектра модуля комплексної амплітуди сигналу, для точного застосовано метод Гарднера. Розраховані значення кумулянтів порівнюються з теоретичними за допомогою методу найменших квадратів, відповідно до якого мінімальне значення квадрата різниці між теоретичними та розрахованими значеннями кумулянтів і визначає кратність маніпуляції сигналу. Результати моделювання показують, що запропонований алгоритм дозволяє розпізнати ФМн сигнали з кратністю маніпуляції 2, 4, 8 із імовірністю близькою до одиниці при ВСШ більше 10 дБ.

Список використаної літератури:

1. *Fette B.* Cognitive Radio Technology / *B.Fette*. – Newnes, 2006. – 622 p.
2. *Гасов В.М.* Инженерно-психологическое проектирование взаимодействия человека с техническими средствами : практ. пособие / *В.М. Гасов, Л.А. Соломонов*. – М. : Высш. шк., 1990. – 127 с.
3. Survey of Automatic Modulation Classification Techniques: Classical Approaches and New Trends / *A.Dobre, A.Abd, Y.Bar-Ness, W.Su*. – NJ, USA, 2005. – 63 p.
4. *Su W.* Comparison and Simulation of Digital Modulation Recognition Algorithms / *W.Su, J.Kosinski* // Annual Joint Electronic Warfare Conference. – 2003. – 7 p.
5. *Рембовский А.М.* Радиомониторинг: задачи, методы, средства / *А.М. Рембовский*. – М. : Горячая линия–Телеком, 2006. – 492 с.
6. *DeSimio M.* Adaptive Generation of Decision Functions for Classification of Digitally Modulated Signals / *M.DeSimio, E.Glenn* // Proc. Of NAECON88. – 1988. – Pp. 1010–1014.
7. *Hsue S.* Automatic modulation classification using zero crossing / *S.Hsue, S.Soliman* // IEE Radar and Signal Processing. – Vol. 137. – 1990. – Pp. 459–464.
8. *Yang Y.* A suboptimal algorithm for modulation classification / *Y.Yang, S.Soliman* // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. – Vol. 33. – 1997. – Pp. 38–45.
9. *Yang Y.* An improved moment-based algorithm for signal classification / *Y.Yang, S.Soliman* // Signal Processing. – 1995. – Pp. 231–244.
10. *Liedtke F.* Computer simulation of an automatic classification procedure for digitally modulated communication signals with unknown parameters / *F.Liedtke* // Signal Processing. – Vol. 6. – 1984. – Pp. 311–323.
11. *Sapiano P.* Classification of PSK signals using the DFT of phase histogram / *P.Sapiano, J.Martin, R.Holbeche* // Proc. ICASSP. – 1995. – Pp. 1868–1871.
12. *Swami A.* Hierarchical Digital Modulation Classification Using Cumulants / *A.Swami, M.Sadler* // IEEE transactions on communications. – Vol. 48. – 2000. – Pp. 234–246.
13. *Spooner C.* On the utility of sixth-order cyclic cumulants for RF signal classification / *C.Spooner* // Proc. ASILOMAR. – 2001. – Pp. 890–897.
14. *Ebrahimzadeh A.* A New Signal Type Classifier for Fading Environments / *A.Ebrahimzadeh, G.Ardeshir* // Journal of Computing and Information Technology CIT 15. – 2007. – Pp. 257–266.
15. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение : пер. с англ. / *Б.Скляр*. – 2-ое изд., испр. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
16. *Нагорнюк О.* Алгоритм автоматичного виявлення та класифікації сигналів з цифровими видами модуляції / *О.Нагорнюк, В.Павлюк* // ВІСНИК Житомирського державного технологічного університету. – № 4 (59). – 2011. – С. 71–80.
17. *Abramowitz M.* Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables / *M.Abramowitz, I.Stegun*. – New York : Dover, 1972. – 928 p.
18. *Малахов А.* Кумулянтный анализ случайных негауссовых процессов и их преобразований / *А.Малахов*. – М. : Сов. радио, 1978. – 376 с.
19. *Сергиенко А.* Цифровая обработка сигналов / *А.Сергиенко*. – СПб. : Питер, 2003. – 604 с.

20. Алгоритм оцінювання несучої частоти та параметрів імпульсів тактової синхронізації демодуляторів сигналів з фазовою маніпуляцією / *Р.Дзюбчук, О.Нагорнюк, В.Павлюк та ін.* // Проблеми створення випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. пр. – Вип. 2. – ЖВІ НАУ, 2009. – С. 131–139.
21. *Нагорнюк О.* Алгоритм попередньої оцінки символної частоти сигналів з цифровою лінійною модуляцією / *О.Нагорнюк* // Проблеми створення випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. пр. – Вип. 2. – Житомир : ЖВІ НАУ, 2011. – С. 131–139.
22. *Nezami M.* RF Architecture and Digital Signal / *M.Nezami.* – Processing Aspects of Digital Wireless transceivers, 2003. – 418 p.
23. *Вентцель Е.* Теория вероятностей / *Е.Вентцель.* – 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 удосконалення алгоритмів цифрової обробки та розпізнавання сигналів.

Стаття надійшла до редакції 23.04.2012