

О. А. Нагорнюк, В. В. Павлюк, Б. В. Молодецький

СПОСОБИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ТИПУ ФАЗОВОГО СУЗІР'Я РАДІОСИГНАЛІВ НА ОСНОВІ ГІСТОГРАМ МИТТЄВИХ АМПЛІТУД І ФАЗ

У статті запропоновано два способи автоматизованого визначення типу фазового сузір'я (ФС) радіосигналів із лінійною цифровою модуляцією. Перший спосіб ґрунтується на розділенні ФС за амплітудою його символів та сумісному аналізі параметрів гістограм миттєвих амплітуд і фаз сигналу. Другий спосіб реалізується шляхом побудови амплітудно-частотних спектрів центрованих нормованих гістограм миттєвих амплітуд і фаз сигналу, пошуку частот домінуючих спектральних гармонік. Відповідно до їх значень приймається рішення про тип ФС. Розділення символів за амплітудою дозволило підвищити ймовірність правильного визначення типу ФС за рахунок вищих значень пікфакторів внутрішнього та зовнішнього ФС порівняно із загальним ФС. Такі ФС мають більш виражені максимальні значення при низьких відношеннях сигнал/шум та спотвореннях, обумовленими неточностями схем тактової та частотної синхронізації. Застосування перетворення Фур'є до центрованих нормованих гістограм дозволило реалізувати аналіз їх амплітудно-частотних спектрів, кількість та положення домінуючих гармонік в яких пов'язані із типом ФС. У статті наводяться порівняльні графічні залежності ймовірності правильного визначення типу ФС від відношення сигнал/шум розробленими способами.

Ключові слова: фазове сузір'я, лінійна цифрова модуляція, визначення параметрів, гістограма, амплітудно-частотний спектр.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Радіочастотний моніторинг – один із найбільш ефективних інструментів отримання об'єктивної інформації про стан електромагнітної обстановки та використання радіочастотного ресурсу [1]. Важливим завданням, яке вирішується в ході радіомоніторингу, є визначення модуляційних параметрів радіосигналів цифрових телекомунікаційних систем. Основними видами модуляції тут є різновиди фазової (ФМн), амплітудної (АМн) та квадратурної амплітудної (КАМн) маніпуляції [2, 3]. Зокрема, такі види маніпуляції використовуються і при модуляції підпотоків радіосигналів з ортогональним частотним розділенням каналів [3]. Вказані види маніпуляції сигналів об'єднує поняття ФС, а визначення його типу в системах радіомоніторингу передбачає знаходження кількості та положень точок, що відповідають модуляційним символам, на комплексній площині. У зв'язку із складністю форм та великим різноманіттям ФС виникає необхідність удосконалення підходів до визначення їх типу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільшого розповсюдження набув спосіб визначення типу ФС, що базується на аналізі гістограм миттєвих амплітуд та фаз радіосигналу [4–6]. Однак він має ряд недоліків, основним із яких є низька ймовірність правильного розпізнавання радіосигналів із складними формами ФС в умовах відсутності

апріорної інформації про параметри сигналів та комунікаційного каналу. Також для прийняття рішення про тип ФС використовуються кількість та положення максимумів гістограм [4], порівнюються розраховані гістограми із шаблонами. Для підвищення ймовірності правильного визначення при наявних похибках частотної синхронізації використовують гістограми різницевих фаз [5], а при низьких відношеннях сигнал/шум (ВСШ) до гістограми застосовують дискретне перетворення Фур'є [6]. Однак у запропонованих підходах кількість видів модуляції обмежена (в основному розглядаються ФМн та класичні типи КАМн), а ймовірність правильного визначення ФС є низькою при низьких ВСШ. Тому **метою статті** є розробка способів, які дозволять визначати більшу кількість ФС та матимуть більшу ймовірність правильного визначення типу ФС при низьких ВСШ.

Постановка завдання досліджень. Вважається, що сигнал на передавальній стороні сформовано відповідно до визначених вимог [7], він некомбінований та має один із видів лінійної цифрової модуляції. Параметри маніпуляції на ділянці аналізованого сигналу постійні, а попередня інформація про їх можливі значення відсутня, що відповідає умовам апріорної параметричної невизначеності. При розповсюдженні сигнал зазнає впливу каналу, що описується гауссівською моделлю [7]. У такому разі прийнята та перетворена в цифровий код сигнальна суміш $r(n, U_i)$ складається з корисного сигналу $s(n, U_i)$ та адитивного гауссівського шуму $n_g(n)$ [7]:

$$r(n, U_i) = s(n, U_i) + n_g(n), \quad (1)$$

де $U_i = \left[a_i \ f_c \ \theta \ R_s \ g(n) \ M \ \{s_k\}_{k=1}^M \right]$ – вектор апріорно невідомих параметрів сигналу;

a_i – амплітуда сигналу;

f_c – частота несучого коливання;

θ – початкова фаза несучого коливання;

$R_s = 1/T$ – символна швидкість;

$g(n)$ – імпульсна характеристика формуючого фільтра;

M – кратність маніпуляції;

$\{s_k\}_{k=1}^M$ – комплексні символи кінцевого алфавіту різновидів маніпуляцій;

T – символний період;

n – номер відліку в масиві.

Корисний сигнал для лінійних цифрових видів модуляцій описується виразами [8]:

$$s(n, U_i) = a_i e^{j\left(2\pi f_c \frac{n}{F_s} + \theta\right)} \sum_{k=1}^K s_k^{(i)} g\left(\frac{n}{F_s} - (k-1)T - \varepsilon T\right) + n_g\left(\frac{n}{F_s}\right), \quad (2)$$

де F_s – частота дискретизації;

ε – похибка тактової синхронізації.

Комплексні символи алфавітів $\{s_k\}_{k=1}^M$ описуються такими виразами [8]:

амплітудна маніпуляція:

$$s_k^{(AMn-M)} = s_{k,I}^{(AMn-M)}; \quad s_{k,I}^{(AMn-M)} \in \left\{ \frac{2m-1-M}{\sigma_{s^{(M-AMn)}}}, m = 1, \dots, M \right\}, k = 1, \dots, K; \quad (3)$$

фазова маніпуляція:

$$s_k^{(\Phi Mn-M)} = e^{j\theta_m}; \quad \theta_m \in \left\{ \frac{2\pi m}{M}, m = 0, \dots, M-1 \right\}, k = 1, \dots, K; \quad (4)$$

квадратурно-амплітудна маніпуляція:

$$s_k^{(KAMn-M)} = s_{k,I}^{(KAMn-M)} + js_{k,Q}^{(KAMn-M)}; \quad (5)$$

$$s_{k,I}^{(KAMn-M)}, s_{k,Q}^{(KAMn-M)} \in \left\{ \frac{2m-1-\sqrt{M}}{\sigma_{s^{(M-KAMn)}}}, m = 1, \dots, \sqrt{M} \right\}, k = 1, \dots, K, \quad (6)$$

де індекси I та Q подають синфазну та квадратурну складові сигналу відповідно;

$\sigma_{s^{(M-AMn)}}$, $\sigma_{s^{(M-KAMn)}}$ – середні квадратичні відхилення символів ФС АМн та КАМн.

Розміщення модуляційних символів на комплексній площині є ФС у класичному розумінні. Окрім ФС, що описуються виразами (3)–(6), використовуються й інші, графічне подання яких наведено на рис. 1.

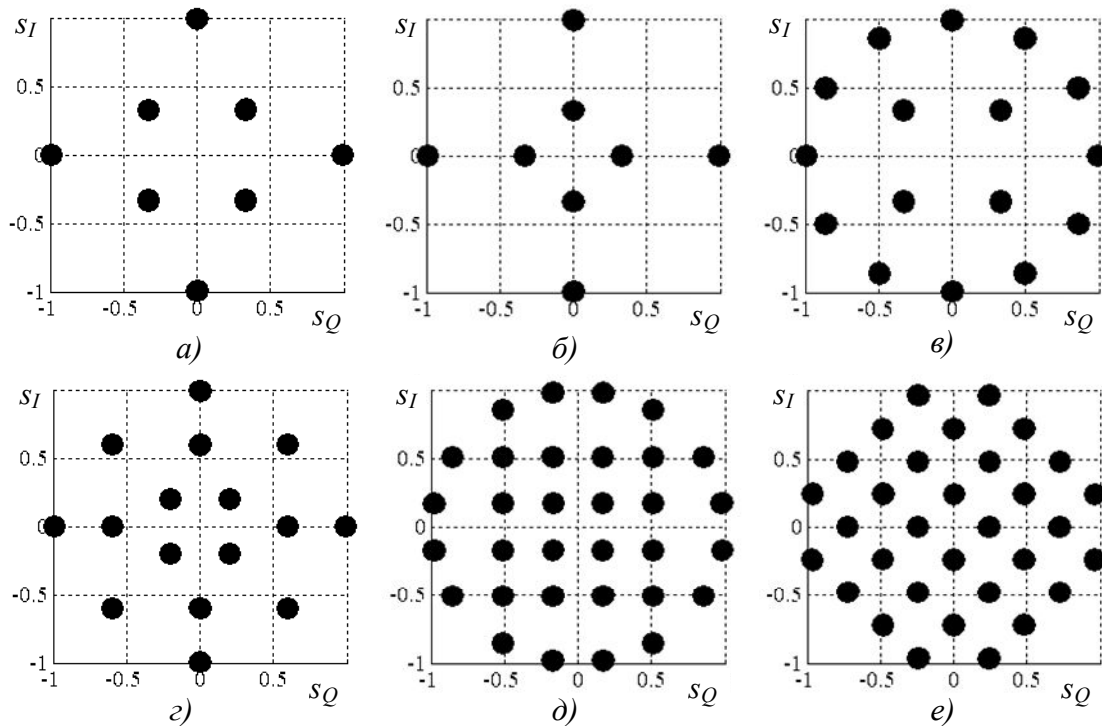


Рис. 1. Зовнішній вигляд ФС: а) КАМн-8-v29, б)КМн-8-star, в) КАМн-16-m, г) КАМн-16-v29, д) КАМн-32-m, е) КАМн-32-v29

Після перетворення в цифровий код до аналізованого радіосигналу застосовуються операції фільтрації, децимації, визначення та корекції несучої частоти, символної швидкості, еквайзування [7, 9, 10].

Необхідно визначити тип ФС, який для АМн, ФМн та класичних видів КАМн визначається лише кратністю маніпуляції М, а для решти КАМн – кратністю маніпуляції та способом розміщення символів у ФС (див. рис. 1).

Виклад основного матеріалу дослідження. Відомо, що радіосигнали з АМн, ФМн та КАМн формуються за рахунок зміни амплітуди та фази несучого коливання [2]. Тому при визначенні типу їх ФС використовується інформація, що міститься в миттєвих амплітудах та фазах. Така інформація отримується шляхом побудови та аналізу гістограм миттєвих амплітуд і фаз [5]. Гістограма являє собою статистичну функцію, що дозволяє оцінити щільність розподілу ймовірності параметра та розраховується за виразами

для миттєвої фази:

$$H_{\varphi}(i) = \frac{n_{\varphi i}}{N\Delta\varphi_i}, \quad (7)$$

для миттєвої амплітуди:

$$H_A(i) = \frac{n_{A_i}}{N\Delta A_i}, \quad (8)$$

де $H_{\varphi}(i)$, $H_A(i)$ – гістограми миттєвих фаз та амплітуд;

$\Delta\varphi_i = \varphi_i - \varphi_{i-1}$ – величина i -го інтервалу миттєвої фази;

$\Delta A_i = A_i - A_{i-1}$ – величина i -го інтервалу миттєвої амплітуди;

$n_{\varphi i}$ – кількість значень миттєвої фази, що потрапили до i -го інтервалу:

$$n_{\varphi i} = \sum_{j=1}^N 1\{\varphi_j \in (\varphi_{i-1}, \varphi_i]\}; \quad (9)$$

n_{A_i} – кількість значень миттєвої амплітуди, що потрапили до i -го інтервалу:

$$n_{A_i} = \sum_{j=1}^N 1\{A_j \in (A_{i-1}, A_i]\}, \quad (10)$$

N – загальна кількість елементів вибірки.

Для прикладу, гістограми миттєвих значень амплітуд і фаз ФМн-16-в та КАМн-8-в29 зображено на рис. 2.

З рис. 2 видно, що гістограми миттєвих фаз мають максимуми, що відповідають кутам положень комплексних символів у ФС (16 максимумів для КАМн-16-в та 8 максимумів для КАМн-8-в29), а гістограми миттєвих амплітуд – максимуми, кількість яких дорівнює кількості амплітудних рівнів КАМн.

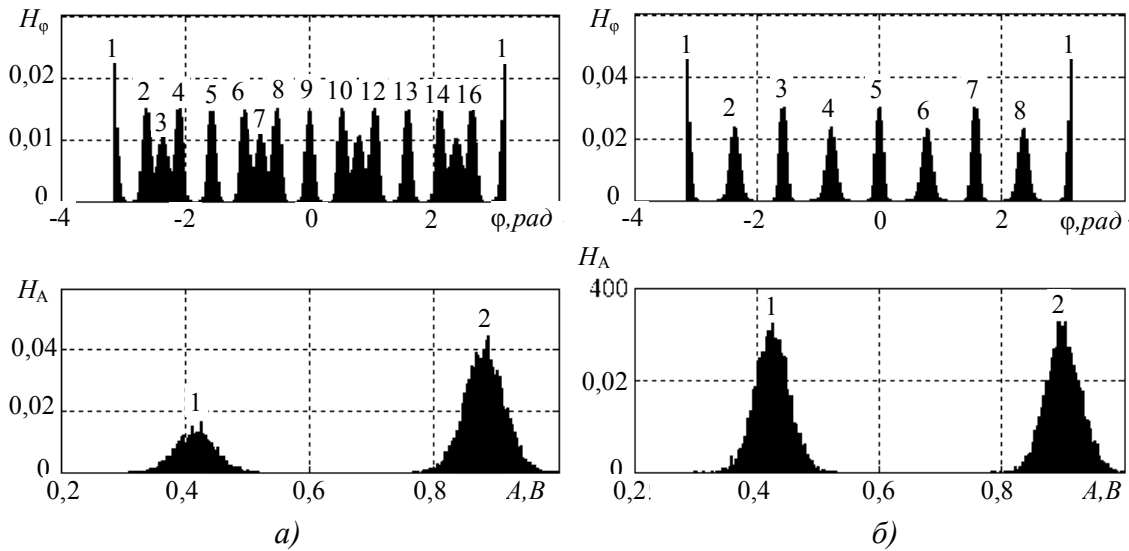


Рис. 2. Гістограми миттєвих значень фаз та миттєвих амплітуд радіосигналів із КАМн-16-т (а) та КАМн-8-в29 (б)

У класичних підходах визначення типу ФС порівнюються параметри гістограм (кількість максимумів, їх положення тощо) з теоретично відомими та приймається рішення про тип ФС. Ймовірність правильного визначення ФС в такому випадку залежить від кількості символів у ФС, оскільки збільшення кількості символів призводить до «розмиття» гістограм ФС та підвищує ймовірність хибної ідентифікації їх максимумів (особливо при низьких ВСШ та наявних похибках тактової і частотної синхронізації).

Для підвищення ймовірності правильного визначення типу ФС пропонуються два способи.

Перший спосіб полягає в розділенні ФС за амплітудою на два окремі ФС. При цьому в гістограмах миттєвих амплітуд та фаз таких ФС відношення максимального значення до середнього (підфактор) буде вищим, і, як наслідок, покращиться ймовірність правильного розпізнавання. Зазначений факт добре видно на рис. 3, на якому зображено гістограми миттєвих амплітуд, фаз внутрішнього і зовнішнього ФС КАМн-16-т (рис. 1,в).

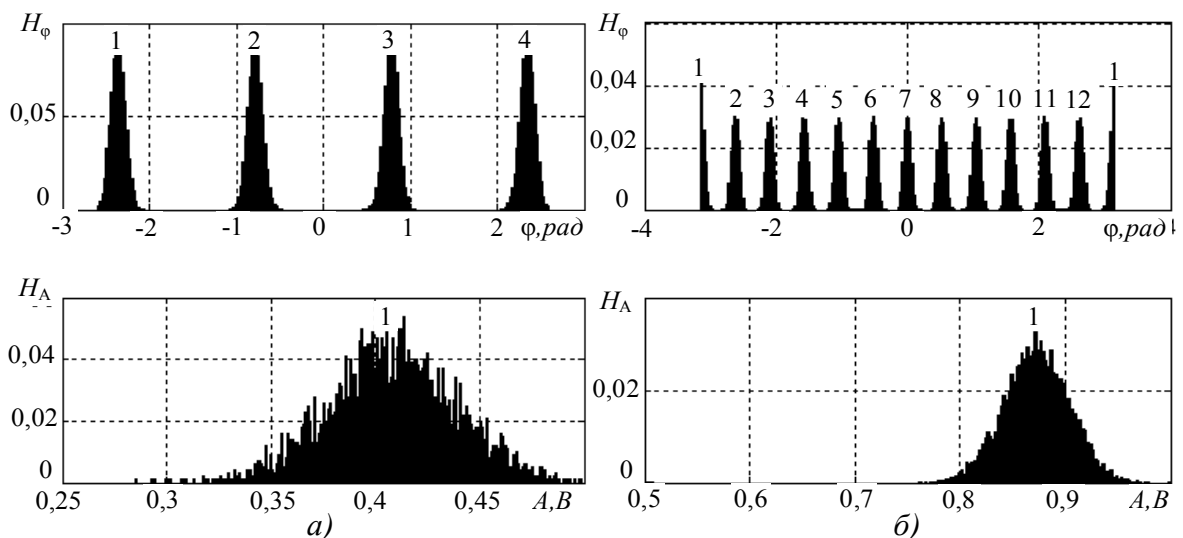


Рис. 3. Гістограми миттєвих амплітуд та фаз внутрішнього (а) зовнішнього (б) ФС радіосигналу із КАМн-16-т

Спосіб визначення типу ФС шляхом розділення його за амплітудою зображено у вигляді блок-схеми на рис. 4.

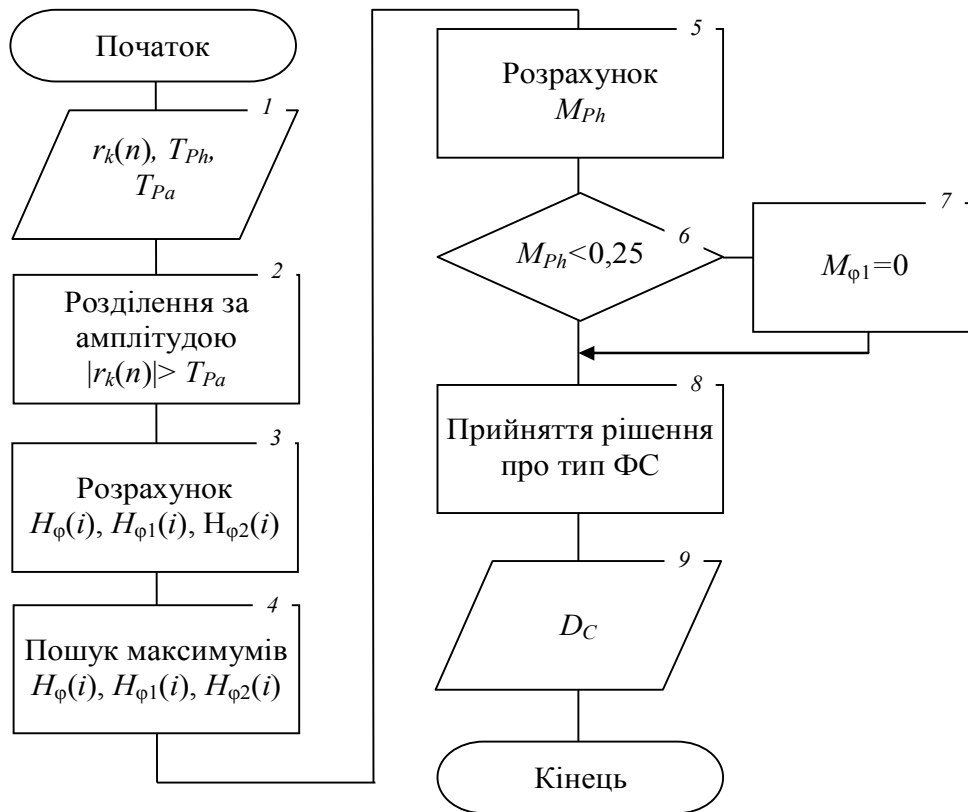


Рис. 4. Блок-схема способу розпізнавання типу ФС

Вхідними даними є відліки радіосигналу $r_k(n)$ після реалізації операцій екваляйзування, частотної і тактової синхронізації, а також пороги прийняття рішень T_{ph} , T_{pa} .

Першою операцією є розділення за амплітудою всіх комплексних відліків сигналу на дві групи відповідно до встановленого порогу T_{pa} (внутрішнє та зовнішнє ФС) (блок 2). Для отриманих ФС розраховуються гістограми миттєвих фаз H_ϕ , $H_{\phi1}$, $H_{\phi2}$ (блок 3) та визначається кількість максимумів, що перевищують встановлений поріг (блок 4).

Наступною операцією є розрахунок відношення середніх значень амплітуд внутрішнього та загального ФС (блок 5):

$$M_{ph} = \frac{E(|r_{k1}(n)|)}{E(|r_k(n)|)}, \quad (11)$$

де $r_{k1}(n)$ – відліки, амплітуда яких менша або дорівнює порогу T_{pa} ;

$E()$ – оператор розрахунку середнього арифметичного.

Оскільки відліки ФС ФМн мають однакову амплітуду (близьку до 1), то середнє значення амплітуди символів внутрішнього ФС $r_{k1}(k)$ буде близьке до нуля, що дозволяє попередньо визначити клас ФМн ($M_{\phi1}=0$). Відповідно до кількості максимумів у загальному M_ϕ , внутрішньому $M_{\phi1}$ та зовнішньому $M_{\phi2}$ ФС приймається рішення D_C про тип ФС (блок 8).

Другий спосіб визначення ФС ґрунтується на аналізі спектральних характеристик центрованих нормованих гістограм миттєвих амплітуд та фаз. Центровані нормовані гістограми миттєвих фаз $H_{\varphi}^{nc}(i)$ та амплітуд $H_A^{nc}(i)$ визначаються за виразом

$$H_{\varphi,A}^{nc}(i) = \frac{H_{\varphi,A}(i)}{E(H_{\varphi,A}(i))} - 1. \quad (12)$$

Амплітудно-частотні спектри (АЧС) центрованих нормованих гістограм, які розраховуються за виразом, мають максимуми, кількість та положення яких залежить від типу ФС:

$$S_{\varphi,A} = \left| FFT(H_{\varphi,A}^{nc}) \right|, \quad (13)$$

де $FFT(\)$ – оператор швидкого перетворення Фур'є.

На рис. 5 наведено АЧС центрованих нормованих гістограм для ФМн-4, ФМн-8, з якого видно, що в АЧС амплітудної гістограми ФМн присутній один глобальний максимум, частота якого постійна для різних кратностей маніпуляції. Положення максимумів АЧС фазової гістограми залежить від кратності маніпуляції: з подвоєнням кратності частота максимумів також подвоюється.

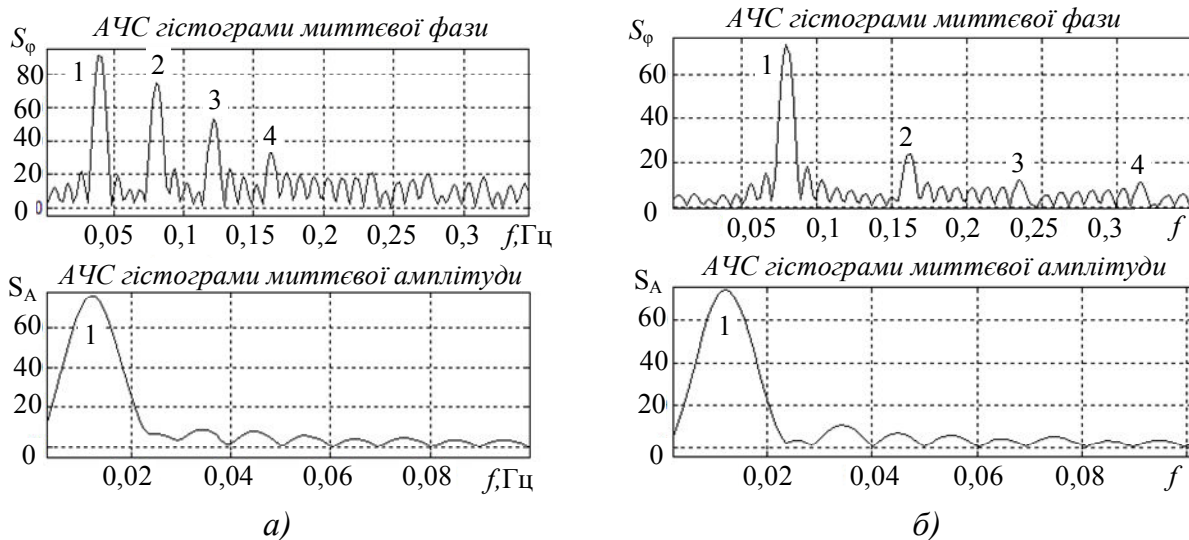


Рис. 5. АЧС центрованих нормованих гістограм миттєвих амплітуд та фаз ФМн-4 (а) та ФМн-8 (б)

Оскільки схожі закономірності присутні і в АЧС гістограм решти ФС, то їх можна використати як ознаки при визначенні ФС.

Таким чином, спосіб визначення типу ФС, що ґрунтується на аналізі АЧС центрованих нормованих гістограм миттєвих амплітуд і фаз, складається із таких операцій:

- розрахунок миттєвої амплітуди та побудова її гістограми;
- розрахунок миттєвої фази та побудова її гістограми;
- розрахунок АЧС центрованої нормованої гістограми миттєвої амплітуди;

розрахунок АЧС центрованої нормованої гістограми миттєвої фази;
 пошук максимумів АЧС, розрахунок їх кількості, амплітуди та частот;
 прийняття рішення про тип ФС шляхом порівняння отриманих значень АЧС гістограм з апіорно відомими даними.

Перевірку ефективності розроблених способів автоматизованого визначення типу ФС радіосигналів із лінійною цифровою модуляцією в умовах апіорної невизначеності здійснено відповідно до вимог статистичного моделювання та методів Монте-Карло [11] в програмному середовищі MATLAB [12]. Сигнальні суміші формувались шляхом генерування багатопозиційних ФМн, АМн, КАМн та додавання до них шуму, модель якого описувалась нормальним законом розподілу ймовірностей. ВСШ змінювалось у діапазоні від 0 до 18 дБ з дискретністю 1 дБ. Модуляційні параметри сигналу кожної реалізації обирались за випадковим законом. Для кожного значення ВСШ та кратності маніпуляції проведено 1000 операцій із визначення типу ФС. У результаті статистичного моделювання отримано графічні залежності ймовірності правильного визначення типів ФС від ВСШ. Для чотирьох типів ФС залежності зображено на рис. 6.

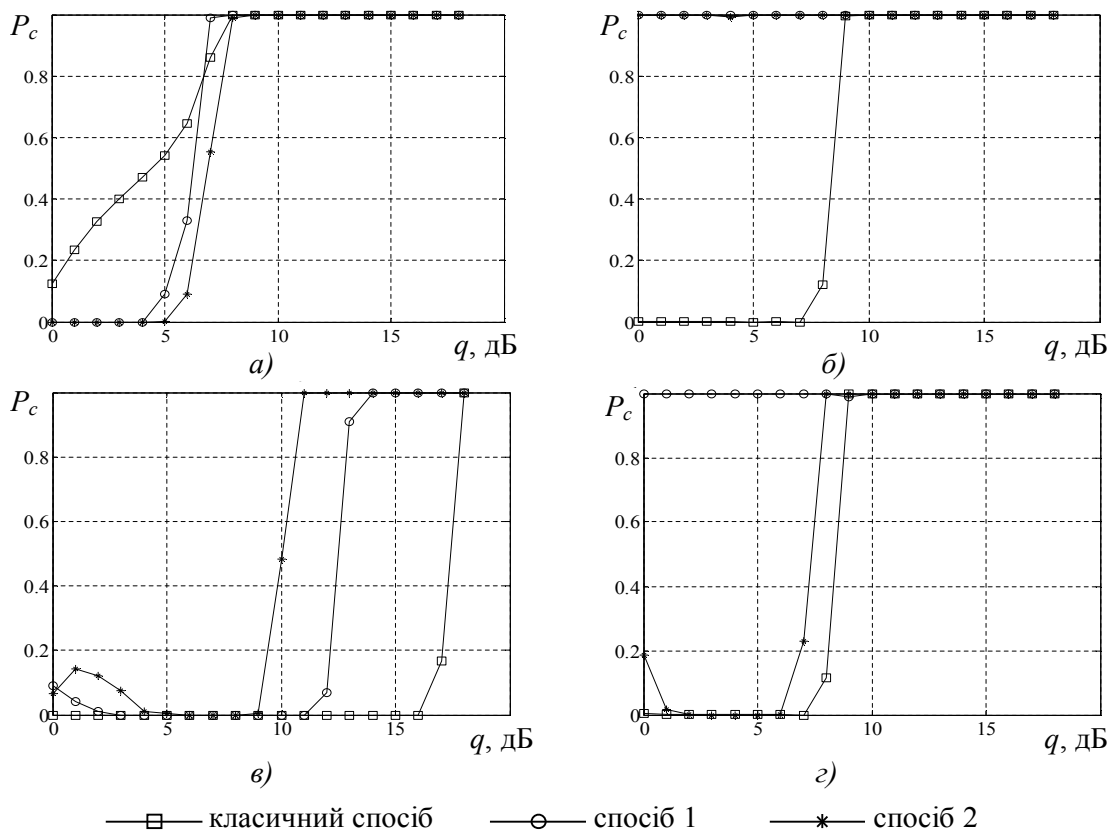


Рис. 6. Залежності ймовірності правильного розпізнавання типу ФС від ВСШ для таких видів модуляцій: а) ФМн-8, б) АМн-4, в) КАМн-16, з) КАМн-16-ν29

Аналіз результатів моделювання показав, що для ФМн сигналів з малою кратністю маніпуляції (8 та менше) запропоновані способи неефективні, а ймовірність правильного визначення нижча, ніж з використанням класичного підходу (рис. 6,а). Це пов'язано з тим, що при розділенні відліків за амплітудою зовнішнє та загальне ФС практично тотожні при високих ВСШ. Однак при низьких ВСШ кількість відліків, які попадають за рахунок шумової складової до внутрішнього ФС, збільшується, що призводить до хибного

визначення ФС. Оскільки пікфактор у гістограмах ФС ФМн з малою кратністю маніпуляції високий, то і ймовірність їх визначення класичним способом також є високою.

Якщо в радіосигналі присутня амплітудна маніпуляція (АМн, КАМн), то запропоновані способи забезпечують більшу ймовірність правильного визначення типу ФС. Так, ймовірність правильного визначення АМн та КАМн-16-v29 близька до одиниці при ВСШ від 0 дБ (рис. 6,б), а КАМн-16 при ВСШ 11 дБ. Підвищення ймовірності пов'язане, насамперед, збільшенням пікфактора гістограм розділених ФС, а також меншим впливом шумових складових при аналізі АЧС центрованих нормованих гістограм.

Висновки. Розроблені способи автоматизованого визначення типу ФС, які ґрунтуються на розділенні символів ФС за амплітудою та аналізі АЧС центрованих нормованих гістограм, забезпечують більшу ймовірність правильного визначення ФС радіосигналів із АМн та КАМн. При цьому величина збільшення ймовірності порівняно із класичними підходами кожним способом залежить від типу ФС. Так, якщо ФС КАМн складається із двох ФМн сузір'їв (КАМн-8-v29, КМн-8-star, КАМн-16-v29), то більш ефективним є спосіб, що ґрунтується на розділенні символів за амплітудою. Таким чином, для кожного типу ФС можна обрати найбільш ефективний спосіб, що забезпечуватиме більшу ймовірність правильного визначення ФС. Тому подальші дослідження в даному напрямку доцільно спрямувати на розробку методики автоматизованого визначення типу ФС на основі аналізу гістограм миттєвих амплітуд та фаз, яка б об'єднувала як класичний, так і розроблені способи для забезпечення більшої ймовірності правильного розпізнавання типу ФС радіосигналів з лінійною цифровою модуляцією.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Слободянюк П. В. Радиомониторинг: вчера, сегодня, завтра (Теория и практика построения системы радиомониторинга) / П. В. Слободянюк, В. Г. Благодарный. – Прилуки : «Аір-поліграф», 2010. – 296 с.
2. Сергиенко А. Б. Цифровая связь / А. Б. Сергиенко. – Спб. : ГЭТИ «ЛЕТИ», 2012. – 164 с.
3. Recommendation ITU-R SM.328-11. Spectra and bandwidth of emissions, 2006. – 91 p.
4. Нагорнюк О. А. Аналіз методів автоматизованого розпізнавання виду модуляції радіосигналів телекомунікаційних систем / О. А. Нагорнюк, Р. В. Дзюбчук, А. М. Токар // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем: зб. наук. праць. – Житомир : ЖВІ ДУТ, 2015. – Вип. 9. – С. 172–182.
5. Su W. Comparison and Simulation of Digital Modulation Recognition Algorithms / W. Su, J. Kosinski // Annual Joint Electronic Warfare Conference, 2003. – 7 p.
6. Sapiano P. Classification of PSK signals using the DFT of phase histogram / P. Sapiano, J. Martin, R. Holbeche // In Proc. IEEE ICASSP. Vol. 3, 1995. – P. 1868–1871.
7. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.

8. A survey of automatic modulation classification techniques: classical approaches and new trends / A. Dobre, A. Abdi, Y. Bar-Ness, W. Su. – NJ. : USA, 2005. – 63 p.
9. Нагорнюк О. А. Методика синхронізації радіосигналів з лінійною цифровою модуляцією в умовах апіорної невизначеності / О. А. Нагорнюк, В. В. Павлюк // Цифрові технології : зб. наук. праць. – Одеса : ОНАЗ, 2015. – Вип. 18. – С. 46–55.
10. Benvenuto N. Algorithms for communications systems and their applications / N. Benvenuto, G. Cherubini. – Chichester : John Wiley & Sons, 2003. – 1285 p.
11. Mikhalov G. A. Parametric estimates by the Monte Carlo method / G. A. Mikhalov. – Netherlands, Utrecht : VSP, 1999. – 376 p.
12. Matlab R2014b. Programming Fundamentals. – Natick : MathWorksc, 2014. – 100 p.

Подано 08.11.2016

А. А. Нагорнюк, В. В. Павлюк, Б. В. Молодецкий

СПОСОБЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТИПА ФАЗОВОГО СОЗВЕЗДИЯ РАДИОСИГНАЛОВ НА ОСНОВАНИИ ГИСТОГРАММ МГНОВЕННЫХ АМПЛИТУД И ФАЗ

В статье предложены два способа автоматизированного определения типа фазового созвездия (ФС) радиосигналов с линейной цифровой модуляцией. Первый способ основан на разделении ФС по амплитуде его символов и совместном анализе параметров гистограмм мгновенных амплитуд и фаз сигнала. Второй способ реализуется путем построения амплитудно-частотных спектров центрированных нормированных гистограмм мгновенных амплитуд и фаз сигнала, поиска частот доминирующих спектральных гармоник и, в соответствии с их значениями, принятии решения о типе ФС. Разделение символов по амплитуде позволило повысить вероятность правильного определения типа ФС за счет высоких значений пикфакторов внутреннего и внешнего ФС по сравнению с общим ФС. Такие ФС имеют более выраженные максимальные значения при низких отношениях сигнал/шум и искажениях, обусловленными неточностями схем тактовой и частотной синхронизации. Применение преобразования Фурье к центрированным нормированным гистограммам позволило реализовать анализ их амплитудно-частотных спектров, количество и положение доминирующих гармоник в которых связаны с типом ФС. В статье приводятся сравнительные графические зависимости вероятности правильного определения типа ФС от отношения сигнал/шум разработанными способами.

Ключевые слова: фазовое созвездие, линейная цифровая модуляция, определение параметров, гистограмма, амплитудно-частотный спектр.

О. А. Nahorniuk, V. V. Pavliuk, B. V. Molodetskyi

METHODS OF AUTOMATED PHASE CONSTELLATION TYPE DETERMINATION OF RADIO SIGNALS USING INSTANTANEOUS AMPLITUDE AND PHASE HISTOGRAMS

Two methods of automated phase constellation (PhC) type determination of digital linear modulated radio signals are suggested in the article. The first method is based on PhC separation according to its symbols amplitudes and joint analysis of parameters of instantaneous amplitudes and phases histogram of signal. The second method is realized by calculation of the

amplitude-frequency spectrum of centered normalized histograms of instantaneous amplitudes and phases of the signal, by searching the dominant spectral harmonic frequencies, and, in accordance with their values, making a decision on PhC type. Symbols separation according to its amplitudes allowed to increase the probability of correct PhC type determination due to higher values of the peak factors of internal and external PhC compared to general PhC. Such PhC have more pronounced maximum values at low signal/noise ratio and distortion caused by errors of clock and frequency synchronization circuits. The using of the Fourier transform to centered normalized histograms made possible to realize an analysis of their amplitude-frequency spectrum, the number and position of the dominant harmonics in which are related to the PhC type. Comparative graphic characteristics of the probability of correct PhC determination from signal/noise ratio by developed methods are given in the article.

Keywords: *phase constellation, linear digital modulation, parameter determination, histograms, amplitude-frequency spectrum.*