

Олександр Анатолійович Нагорнюк (науковий співробітник)

Олексій Олександрович Писарчук (д-р техн. наук, с.н.с., начальник кафедри)

Володимир Володимирович Павлюк (канд. техн. наук, с.н.с., начальник науково-дослідної лабораторії)

Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова Державного університету телекомунікацій, Житомир

МЕТОДИКА АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СИГНАЛУ ТА РОЗПІЗНАВАННЯ ВИДУ МОДУЛЯЦІЇ ЗАСОБАМИ РАДІОМОНІТОРИНГУ В УМОВАХ АПРІОРНОЇ ПАРАМЕТРИЧНОЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

В статті запропоновано методику автоматизованого розпізнавання виду модуляції та визначення параметрів сигналу засобами радіомоніторингу, яка встановлює зміст та порядок застосування підходів до отримання аналітичного представлення сигналу, оцінювання якості сигналу, реалізації операцій його оброблення, визначення та корекції сигнальних параметрів, розпізнавання виду модуляції і типу фазового сузір'я, при умові відсутності апріорної інформації про параметри сигналу, який аналізується.

Ключові слова: методика, автоматизація, радіосигнал, розпізнавання, модуляція, параметр, дискретизація, квантування, фазове сузір'я.

Своєчасне та якісне виконання завдань радіомоніторингу і радіоконтролю є важливою передумовою для виявлення, ідентифікування несанкціонованих джерел радіовипромінювання, усунення радіоперешкод, а також здійснення заходів радіочастотного менеджменту [1, 2]. Ускладнення структури сигналів сучасних телекомунікаційних систем, що використовують в радіообміні велику кількість частот і різних видів модуляцій, призвело до зниження ефективності вирішення завдань технічного аналізу існуючих засобами радіоконтролю [1]. Це пояснюється великими часовими витратами, викликаними необхідністю використання ручної праці оператора в процесі обробки сигналу, необхідністю задіяння великої кількості різних програмних та апаратних засобів при аналізі сигналів систем радіозв'язку [1]. Одним із шляхів вирішення даної проблеми є автоматизація процесів пошуку, радіоперехоплення та обробки радіосигналів, що дозволить перекласти значну частину завдань оператора на вимірювальні програмно-алгоритмічні засоби, зменшити вплив людського чинника на результати вимірювань та підвищити загальну продуктивність системи [2].

Важливими етапами обробки сигналу оператором посту радіоконтролю, без результативної реалізації яких неможлива ідентифікація джерела радіовипромінювання, є визначення параметрів радіосигналу та розпізнавання виду його модуляції. Отже розробка нових та удосконалення існуючих підходів до автоматизованого проведення вказаних операцій є актуальним науковим завданням.

Дана стаття є продовженням попередніх досліджень [3-11] та висвітлює проблемні питання комплексного застосування операцій попередньої обробки, аналого-цифрового перетворення, визначення якості сигналу та можливості його технічного аналізу, а також порядок застосування раніше розроблених способів та алгоритмів

автоматизованого визначення параметрів сигналу та розпізнавання виду його модуляції.

В останні десятиріччя опубліковано багато праць, переважно за кордоном, присвячених розробці методів та способів визначення параметрів радіосигналу та розпізнаванню виду його модуляції [12-14]. Проте, дані підходи призначалися для застосування у вузькоспеціалізованих цифрових приймачах, тому більшість з них обмежені в кількості видів модуляцій, потребують апріорної інформації про структуру та параметри сигналу і каналу радіозв'язку [12]. Незважаючи на велику кількість опублікованих теоретичних досліджень щодо визначення параметрів сигналу та розпізнавання виду модуляції, реальних прикладних результатів дуже мало. Достатньо дієві методи обробки, які б поєднували вказані операції технічного аналізу сигналу в автоматизованому режимі відсутні.

Метою досліджень є розробка методики автоматизованого розпізнавання виду модуляції та визначення сигнальних параметрів засобами радіомоніторингу в умовах апріорної параметричної невизначеності.

Вхідними даними є сигнальна суміш з виходу проміжної частоти радіоприймального пристрою $r(t, U_i)$, яка складається з корисного сигналу $s(t, U_i)$ та адитивного гауссівського шуму $n(t)$ [15]:

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

де $U_i = \left[a_i f_c \theta T \varepsilon g(t) \{ \varphi_k \}_{k=1}^K \{ s_k^{(i)} \}_{k=1}^K \right]$ – вектор

параметрів сигналу; a – амплітуда сигналу; f_c – несуча частота; θ – початкова фаза; T – символний період; ε – похибка тактової синхронізації; $g(t)$ – сумісна імпульсна характеристика формуючого фільтра та каналу; $\{ s_k^{(i)} \}_{k=1}^K$ – K комплексних символів, що

передаються, та беруться з i -го кінцевого алфавіту для відповідного виду модуляції.

При розробці методики вважається, що радіосигнал має одну несучу частоту f_c , параметри його модуляції протягом деякого часового відрізка, що аналізується, постійні та в сигналі застосовано один із таких видів модуляцій: немодульоване коливання (НК).

амплітудна модуляція з наявною несучою (АМ-Н);

амплітудна модуляція з подавленою несучою (АМ-ПН);

амплітудна модуляція з нижньою боковою смугою (АМ-НБС);

амплітудна модуляція з верхньою боковою смугою (АМ-ВБС);

амплітудна модуляція з частково придушеною боковою смугою (АМ-ЧПС);

частотна модуляція (ЧМ);

багатопозиційна фазова маніпуляція (ФМн) з кратністю 2, 4, 8, 16 (ФМн-2, ФМн-4, ФМн-8, ФМн-16);

багатопозиційна амплітудна маніпуляція (АМн) з кратністю 4, 8, 16 (АМн-4, АМн-8, АМн-16);

$\pi/4$ чотирьохпозиційна фазова маніпуляція ($\pi/4$ -ФМн-4);

багатопозиційна квадратурна амплітудна маніпуляція (КАМн) з кратністю 8, 16, 32, 64, 128, 256 (КАМн-8, КАМн-8-v29, КАМн-8-star, КАМн-16, КАМн-16-v29, КАМн-16в, КАМн-32, КАМн-32-v29, КАМн-32в, КАМн-64, КАМн-64в, КАМн-128, КАМн-256). Літери в кінці аббревіатур вказують форму фазового сузір'я.

багатопозиційна частотна маніпуляція (ЧМн) з кратністю 2, 4, 8, 16 (ЧМн-2, ЧМн-4, ЧМн-4, ЧМн-8);

маніпуляція з мінімальним частотним зсувом (МЧЗ);

гауссівська маніпуляція з мінімальним частотним зсувом (ГМЧЗ).

Результатом застосування методики мають бути значення несучої f_c та символної $f_{sym}=1/T$ частоти сигналу, ширини спектру ΔF та рішення про вид застосованої в сигналі модуляції $D \in$ (АМ-Н, АМ-ПН, АМ-НБС, АМ-ВБС, АМ-ЧПС, АМ-АТ, $\pi/4$ -ФМн-4, ФМн-2, ФМн-4, ФМн-8, АМн-4, АМн-8, АМн-16, КАМн-16, КАМн-32, КАМн-64, КАМн-128, КАМн-256, КАМн-8-v29, КАМн-16-v29, КАМн-32-v29, КАМн-16в, КАМн-32в, КАМн-64в, КАМн-8-star, ЧМн-2, ЧМн-4, ЧМн-4, ЧМн-8, МЧЗ, ГМЧЗ).

Більшість сучасних методів та способів реалізують обробку сигналу в цифровому вигляді, що передбачається передовими концепціями побудови сучасних комунікаційних систем з архітектурою, що визначається програмно (Software-defined and cognitive radio systems) [16]. У таких системах цифровий обчислювальний пристрій є ядром як приймача так і передавача, завдяки чому практично весь обсяг робіт із обробки сигналу перекладається на програмне забезпечення, яке виконується на електронно-обчислювальній машині або спеціалізованих мікропроцесорних пристроях, призначених для

обробки сигналу. Метою такого підходу є приймання та передавання широкого набору радіосигналів за допомогою гнучкого і адаптивного програмного забезпечення, що забезпечує підтримку різноманітних радіопротоколів з можливістю їх швидкої зміни в часі. Враховуючи факт, що більшість операцій з обробки сигналу реалізуються в цифровому вигляді, процес визначення сигнальних параметрів та розпізнавання виду модуляції можна розділити на п'ять основних етапів:

перетворення сигналу в цифровий код;

оцінювання якості сигналу;

попередня обробка;

визначення сигнальних параметрів;

розпізнавання виду модуляції.

В умовах апіорної параметричної невизначеності два останні етапи взаємопов'язані, а тип операції на кожному з них обирається з урахуванням результату отриманого на попередньому етапі аналізу сигналу [2].

Особливості перетворення сигналу в цифровий код

Важливою операцією є перетворення сигналу в цифровий код, оскільки проведення її з порушенням вимог [15, 17], неодмінно призведе до безповоротної втрати інформації про первісну форму аналогового сигналу. Приведення сигналу до цифрової форми подання включає дискретизацію, квантування та цифрове кодування [17].

При здійсненні дискретизації сигналу мають дотримуватися вимоги визначені теоремою Котельникова (критерієм Найквіста) [17].

$$F_s \geq 2F_{\max}, \quad (2)$$

де F_s – частота дискретизації; F_{\max} – максимальна частота в спектрі сигналу (частота Найквіста).

При виконанні умови (2) для сигналів з обмеженим спектром аналогова форма сигналу може бути відновлена за дискретними відліками, якщо він на інтервалі подання t_c є фінітним або настільки швидко затухає, що значення амплітуди за межами інтервалу t_c практично дорівнюють нулю [17]. Задача дискретизації ускладнюється для сигналів, що затухають повільно, безкінечної тривалості і сигналів зі спектром необмеженим за частотою. Останнє має місце, якщо в сигналі присутні розриви або скачки, що характерно для різновидів цифрової модуляції та пакетної передачі даних. Отже, у більшості практичних випадків тривалість сигналу і ширина його спектру не можуть бути одночасно обмежені кінцевими інтервалами. Якщо тривалість сигналу обмежена і сигнал урізаний в області ненульових значень, то спектр сигналу необмежений і навпаки [18]. Однак обробка реальних сигналів можлива лише з їх обмеженням як за тривалістю, так і за шириною спектру. При цьому в якості оцінки коректності обмеження доцільно використати енергетичний критерій відповідно до якого тривалість сигналу t_c і практичну ширину спектру ΔF_p встановлюють такими щоб в них була зосереджена переважна частина енергії сигналу. Це досягається виконанням таких умов [18]:

$$\int_0^{t_c} |r(t)|^2 dt = k_k \int_{-\infty}^{\infty} |r(t)|^2 dt; \quad (3)$$

$$\int_0^{\Delta F_p} |S(\omega)|^2 d\omega = k_k \int_0^{\infty} |S(\omega)|^2 d\omega, \quad (4)$$

де $k_k = 0.9 \dots 0.99$ – коефіцієнт якості подання сигналу, значення якого встановлюється залежно від цільових задач обробки; $S(\omega)$ – спектральна щільність сигналу.

У такому випадку дисперсію похибки апроксимації D_x обмеженого в часовій і частотній областях сигналу можна визначити за виразом [18]:

$$D_x \approx \frac{1}{\Delta F_p t_c}. \quad (5)$$

Отже, обмеження ширини спектру необхідно здійснювати з урахуванням допустимого середньоквадратичного відхилення (СКВ) апроксимації сигналу $\sigma_x = \sqrt{D_x}$. Частота ΔF_p при обмеженні спектра приймається за частоту Найквіста, тоді частота дискретизації визначається з умови: $F_s \geq 2\Delta F_p$ [18].

В сигнальній суміші, як правило, містяться широкопasmові шуми, високочастотні складові яких неминуче перекриваються при періодизації спектру в процесі дискретизації, що призводить до похибок при наступній цифровій обробці сигналу. Для виключення даного фактора перед здійсненням дискретизації всі частоти вище частоти Найквіста мають бути подавлені, тобто виконана низькочастотна фільтрація сигналу [19]. Якщо остання операція не проведена або реалізована неякісно, то частоту дискретизації доцільно збільшити в 2-4 рази відносно оптимального значення і першою операцією цифрової обробки виконати низькочастотну цифрову фільтрацію, після чого здійснити децимацію [19].

При виборі розрядності квантування необхідно враховувати точність подання сигналу, яку потребують алгоритми цифрової обробки. Це пов'язано з виникненням шумів квантування, дисперсія D_k та СКВ σ_k яких визначаються за формулами [19]:

$$D_k = \frac{\Delta h^2}{12}; \quad \sigma_k \approx 0.3\Delta h, \quad (6)$$

де Δh – крок квантування.

Як показує практичний досвід [2], крок квантування Δh доцільно обрати таким чином, щоб не відбувалося помітної зміни ВСШ $\sigma_{\text{кх}}^2 \ll \sigma_{\text{ш}}^2$.

Також одним із важливих завдань при перетворенні сигналу в цифровий код є правильний вибір співвідношення максимальної амплітуди сигналу U_m та опорного рівня аналого-цифрового перетворювача U_0 [17]. Якщо $U_m \ll U_0$, то це призведе до втрати складових сигналу з низьким рівнем, оскільки вони при перетворенні

будуть подані одним значенням Δh . З іншого боку, якщо $U_m > U_0$, то миттєва амплітуда сигналу буде обмежена величиною $2^v \cdot \Delta h$, де v – розрядність квантування. Наслідком такого обмеження є втрата інформації, що передається в амплітуді сигналу (амплітудна модуляція) [17]. Тому при реалізації операції аналого-цифрового перетворення необхідно намагатися щоб U_0 була близькою до значення U_m , але в ніякому разі не перевищувала його. Винятком є обробка сигналів з частотною модуляцією, інформація в амплітуді яких відсутня [15].

Цифрове кодування при аналогово-цифровому перетворенні полягає в перетворенні дискретного квантованого числового значення відліку сигналу в двійковий код зручний для подальшої обробки засобами цифрової обробки сигналу (ЦОС). Вибір типу кодування не вносить жодних похибок при наступній цифровій обробці сигналу [18], тому воно вибирається відповідно до характеристик апаратури ЦОС, що використовується.

Таким чином, після виконання операцій дискретизації та квантування сигналу з врахуванням вимог (2) - (6) отримується масив відліків сигналу з частотою F_s . У випадку коли в радіоприймачі присутні квадратурні схеми перетворення частоти кожен відлік представляється комплексним числом $r(k)$, а сам сигнал буде мати аналітичну форму подання [19]. В іншому разі масив буде являти собою набір дійсних чисел $r_I(k)$, і для забезпечення правильного функціонування алгоритмів визначення параметрів та розпізнавання виду модуляції сигналу необхідно обчислити уявну частину $r_Q(k)$, використавши перетворення Гільберта [19]:

$$r_Q(k) = r_I(k) \otimes h_N(n); \quad (7)$$

$$r(k) = r_I(k) + jr_Q(k), \quad (8)$$

де $r_I(k)$, $k = 1 \dots K$ – масив дійсних відліків сигналу; $h_N(n)$, $n = 1 \dots N$ – імпульсна характеристика фільтра Гільберта; \otimes – оператор згортки.

Оцінювання якості сигнальної суміші

Перед виконанням операцій з визначення сигнальних параметрів та розпізнавання виду модуляції необхідно оцінити якість сигнальної суміші, яка в більшості випадків визначається відношенням сигнал/шум (ВСШ):

$$q = \frac{P_c}{P_{\text{ш}}}, \quad (8)$$

де P_c – середня потужність сигналу; $P_{\text{ш}}$ – середня потужність шумів.

Звісно, що при низьких значеннях ВСШ q (для складних видів сигналів $q < 5$) визначення деяких параметрів сигналу та розпізнавання виду модуляції є неможливим або реалізується з недостатньою точністю та ймовірністю, тому їх обробка є недоцільною. Виключення сигналів з низьким ВСШ з наступних етапів технічного аналізу дозволить зекономити розрахункові ресурси засобів ЦОС та підвищить швидкість обробки більш якісних сигналів.

Потужність шумів може бути визначена шляхом оцінювання їх рівня в часових проміжках між сусідніми посилками у випадку пакетної передачі даних або на момент відсутності сигналу [18]. Альтернативним рішенням може бути вимірювання рівня шуму в найбільш близькому за частотою сусідньому каналі (сусідній частоті) [12]. У таких випадках середня потужність сигналу визначається як різниця між середніми потужностями суміші сигналу з шумом $P_{\text{с}}$ та самого шуму: $P_{\text{с}} = P_{\text{сс}} - P_{\text{ш}}$. Розрахувавши значення ВСШ за формулою (8) та порівнявши його з заданим порогом $q_{\text{п}}$ можна зробити висновок про доцільність подальшого здійснення технічного аналізу сигналу. Якщо $q < q_{\text{п}}$, то сигнал вважається нежакісним і подальша його обробка не проводиться. В іншому разі здійснюється попередня обробка сигнальної суміші.

Попередня обробка сигнальної суміші

Попередня обробка сигнальної суміші проводиться з метою розрахунку основних частотних параметрів сигналу та зменшення впливу сторонніх випромінювань і шумів на подальший процес розпізнавання виду модуляції [7]. Для цього визначається центральна частота сигналу f_0 , розраховується ширина спектру ΔF та здійснюється смугова фільтрація сигналу.

Центральна частота f_0 сигналу визначається за формулою [7]:

$$f_0 = \frac{\sum_{n=1}^N nF \cdot W(nF)}{\sum_{n=1}^N W(nF)}, \quad (9)$$

де $W(nF)$, $n = 1 \dots N$ – значення потужності, що відповідає амплітуді спектральної складової енергетичного спектра на частоті nF та перевищує пороговий рівень $P_{\text{ш}} + P_1$. P_1 – заданий рівень перевищення потужності спектральних складових сигналу потужності шумів; F – дискретність представлення енергетичного спектру.

Ширина спектру ΔF розраховується як різниця частот $f_2 - f_1$, що відповідають перевищенням спектральними складовими порогового рівня $P_{\text{ш}} + P_1$ [7].

Смугова фільтрація сигналу здійснюється з метою зменшення впливу позасмугових шумів на подальший процес розпізнавання виду модуляції. Центральна частота та смуга пропускання фільтру вибираються відповідно до визначених значень центральної частоти f_0 та ширини спектру сигналу ΔF [7].

Таким чином, результатом попередньої обробки є профільований смуговим фільтром сигнал $r(k)$, розраховані значення центральної частоти f_0 та ширини спектру ΔF .

Визначення параметрів радіосигналу та розпізнавання виду його модуляції

Так як апріорні відомості про параметри аналізованого сигналу відсутні, то визначення

параметрів та розпізнавання виду модуляції пропонується здійснювати в наступному порядку. Спочатку застосовуються параметронезалежні ознаки для розділення всіх сигналів на два загальні класи: з постійною та змінною амплітудами. Далі визначаються параметри сигналів кожного класу, розпізнаються види застосованої модуляції та уточнюються отримані параметри сигналу.

Враховавши дослідження присвячені визначенню параметрів радіосигналу [3-6] та розробці способів і алгоритмів розпізнавання виду модуляції [7-11] методика автоматизованого розпізнавання виду модуляції та визначення параметрів сигналу засобами радіомоніторингу в умовах параметричної апріорної невизначеності може бути подана у вигляді структурної схеми (рис. 1).

Отримання аналітичного подання сигналу, оцінювання його якості та попередня обробка, порядок виконання яких описаний вище, реалізуються в блоках 1-5 структурної схеми.

На першому етапі розпізнавання (блоки 6-8) здійснюється поділ усіх видів сигналів на два загальних класи: сигнали з постійною та змінною амплітудами. Для цього застосовуються дві модуляційні ознаки: максимальне значення щільності потужності в частотному спектрі нормованого центрованого модуля миттєвої амплітуди сигналу та коефіцієнт кореляції між миттєвими амплітудою та частотою сигналу [10]. Дані ознаки не залежать від несучої та символної частот, а також початкової фази несучого колювання [7], тобто є параметронезалежними.

Якщо сигнал віднесено до класу зі змінною амплітудою, то реалізується пошук гармоніки символної частоти в спектрі модуля сигналу (блок 9) [10].

Коли така гармоніка існує, то приймається рішення про те, що сигнал має цифрову лінійну модуляцію, в іншому випадку – аналогову амплітудну модуляцію (блоки 11-14). Поява гармоніки з максимальною амплітудою (домінантна гармоніка) в спектрі модуля сигналу ґрунтується на циклостационарних властивостях сигналів з цифровою лінійною модуляцією, причому її частота дорівнює символній частоті $f_{\text{sym}} = 1/T$, алгоритм визначення якої подано в [5].

Для аналогових видів модуляції несуча частота визначається як частота спектральної складової з максимальною амплітудою в частотному спектрі сигналу на виході нелінійності другого порядку (блок 24). Для забезпечення вищої точності оцінювання частоти використовуються перша похідна функції спектральної щільності та ітераційний метод хибного положення [6]. Розпізнавання виду аналогової амплітудної модуляції (блоки 26, 29-34), реалізується з використанням наступних модуляційних ознак: коефіцієнт кореляції спектра відносно несучої частоти, коефіцієнт симетричності спектра та факт наявності домінантної гармоніки на несучій частоті в амплітудно-частотному спектрі сигналу [10].

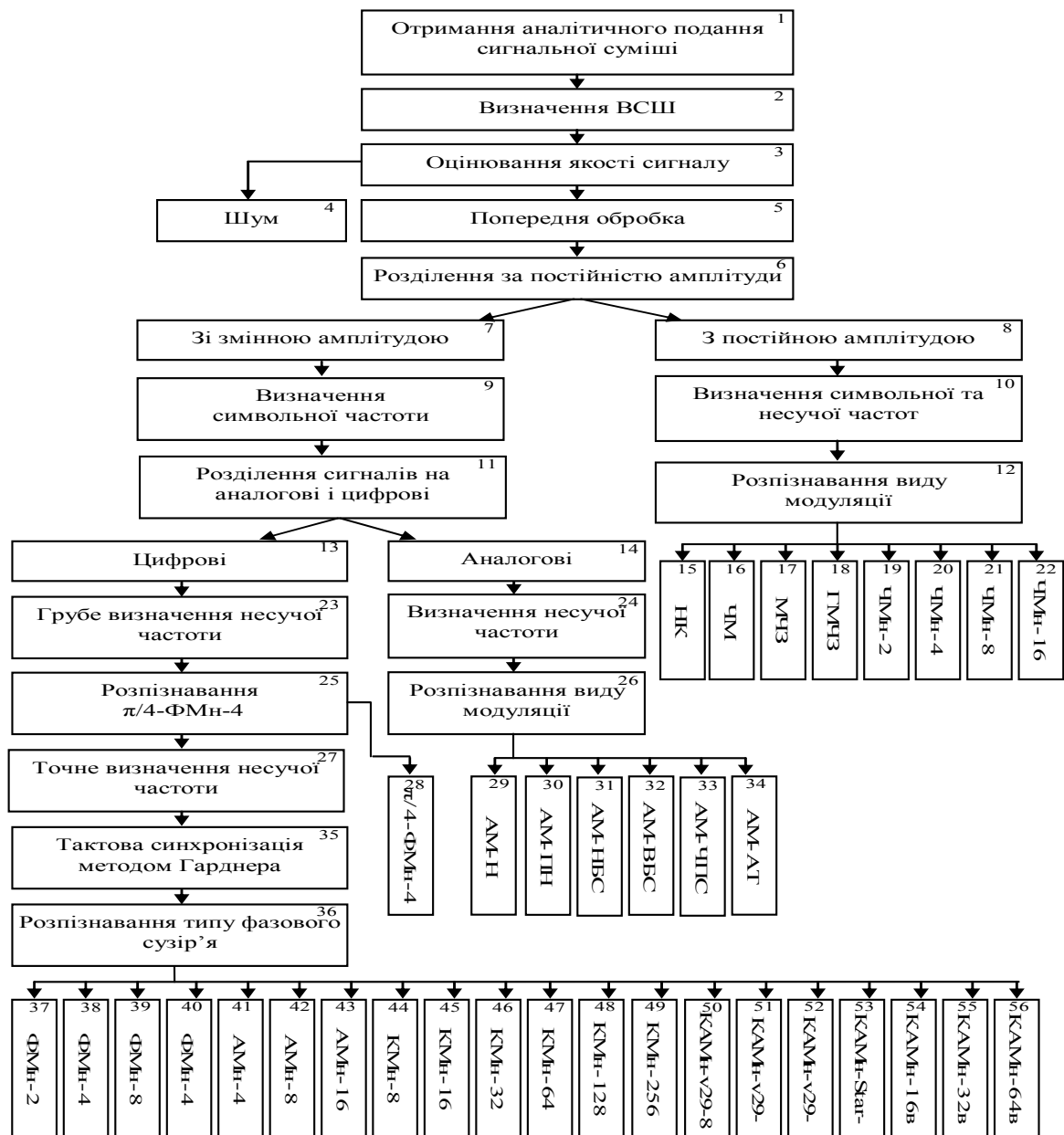


Рис. 1. Методика автоматизованого визначення параметрів сигналу та розпізнавання виду модуляції засобами радіомоніторингу в умовах апіорної параметричної невизначеності

Порівнявши значення вказаних параметрів з пороговими приймається рішення про вид модуляції аналізованого сигналу [10]. Розпізнавання виду лінійної цифрової модуляції здійснюється шляхом кумулянтного аналізу фазового сузір'я, суть якого полягає в розрахунку змішаних кумулянтів різних порядків та порівняння їх з теоретично відомими значеннями [11]. Винятком є розпізнавання модуляції $\pi/4$ -ФМн-4 сигналу, який має таке саме фазове сузір'я як і ФМн-8.

Щоб розпізнати такий вид модуляції здійснюється аналіз спектральної щільності сигналу на виході нелінійності четвертого порядку, в якій присутні дві домінуючі гармоніки, на відміну від інших видів лінійної цифрової модуляції [10] (блок 25). Середнє арифметичне частот домінуючих гармонік дорівнює несучій частоті сигналу [10].

Для застосування кумулянтного аналізу необхідно відновити фазове сузір'я сигналу, тобто здійснити частотну та тактову синхронізацію [11].

Визначення несучої частоти f_c (блок 23) здійснюється шляхом пошуку домінуючих гармонік в спектрі сигналу на виході нелінійностей для АМн – нелінійності другого порядку, для ФМн – нелінійності восьмого порядку, для КАМн з класичними формами фазових сузір'їв, а також зі спеціальними типами сузір'їв КАМн-8-v29, КАМн-16-v29, КАМн-8-star – нелінійності четвертого порядку. Розрахунок значення несучої частоти сигналів з іншими типами фазових сузір'їв реалізується відповідно до способу оснований на аналізі взаємної кореляції символів фазового сузір'я [3].

Досягнення необхідної точності визначення частоти здійснюється для сигналів великої тривалості розрахунком першої похідної

спектральної щільності та ітераційним методом хибного положення пошуку нуля отриманої функції [6]. Для сигналів короткої тривалості точність покращується шляхом застосування схеми штучного збільшення тривалості сигналу та кола адаптивного фазового автопідстроювання частоти [4].

Корекція розрахованого значення несучої частоти здійснюється за формулою:

$$r_{\varepsilon}(k) = r(k)e^{\frac{j2\pi f_{\varepsilon}k}{F_s}}, \quad (10)$$

де $r_{\varepsilon}(k)$ – скоректований за несучою частотою масив відліків сигналу,

Для реалізації тактової синхронізації (блок 35) використовується значення символної частоти, та метод Гарднера, який забезпечує похибку тактової синхронізації близьку до нуля уже після обробки 40 відліків сигналу [8]. Перевагою метода Гарднера також є його нечутливість до фази несучого коливання, що дозволяє реалізувати тактову синхронізацію при наявності незначного частотного зсуву [8].

Після реалізації всіх операцій синхронізації за несучою та тактовою частотами отримуються комплексні відліки, значення яких відповідає точкам фазового сузір'я. Застосували метод кумулянтного аналізу та знайшовши мінімальну метрику між розрахованими та відомими кумулянтами для звичайних та модифікованих фазових сузір'їв, розпізнається тип фазового сузір'я, а отже і вид модуляції сигналу [11] (блоки 36-56).

Ефективність застосування запропонованої методики характеризується відносною точністю визначення сигнальних параметрів та ймовірністю (середньою ймовірністю) правильного розпізнавання виду (видів) модуляції.

Відносна точність визначення параметрів сигналу залежить від тривалості сигналу, виду модуляції, розрядності швидкого перетворення Фур'є, ВСШ та обраного алгоритму розрахунку [5]. З врахуванням застосованих у методиці алгоритмів та способів [3-5] відносна точність визначення несучої та символної частот знаходиться в межах $\delta f = 10^{-7} - 10^{-4}$, що достатньо для вирішення більшості задач технічного аналізу сигналу [1].

Ймовірність правильного розпізнавання сигналу залежить від ВСШ сигнальної суміші, тривалості та виду модуляції сигналу, типу фазового сузір'я, а також ефективності обраних модуляційних ознак. Дослідження ймовірності правильного розпізнавання для застосованих у методиці алгоритмів та способів розпізнавання

виду модуляції проведено в [7 - 11]. Узагальнивши результати даних досліджень можна зробити висновок, що при ВСШ більше 10 дБ статистична ймовірність правильного розпізнавання видів модуляцій з складними типами фазових сузір'їв (КАМн-64, КАМн-64в тощо) дорівнює близько 0.90 [10, 11], оскільки наявність високого рівня шумів призводить до сильного спотворення фазового сузір'я. Для більш простих видів модуляцій (ФМн-2, АМн-4 тощо) статистична ймовірність правильного розпізнавання близька до одиниці. Так як сигнал рахується ідентифікованим коли ймовірність його правильного розпізнавання не нижче 0.9 [2], а більшість цифрових видів модуляцій обробляються при ВСШ не менше 10 дБ, то запропонована методика задовольняє цим вимогам.

Висновки

Таким чином, методика автоматизованого розпізнавання виду модуляції та визначення параметрів сигналу засобами радіомоніторингу в умовах параметричної апріорної невизначеності складається із п'яти основних етапів: перетворення сигналу в цифровий код, оцінювання якості сигналу, попередня обробка, визначення сигнальних параметрів та розпізнавання виду модуляції. Отримання аналітичного подання сигналу має здійснюватися у відповідності до вимог теореми Котельникова (2), енергетичних критеріїв (3 - 4), мінімуму шумів квантування (6) та, за необхідності, отримання уявної частини сигналу за допомогою перетворення Гільберта (7). Оцінка якості сигналу та його попередня обробка дозволяють зменшити вплив сторонніх випромінювань та шумів на результати технічного аналізу сигналу, а також спростити вимоги до обчислювальних ресурсів засобів ЦОС. Запропонований порядок застосування алгоритмів і способів визначення параметрів сигналу та розпізнавання виду модуляції дозволив реалізувати автоматизований процес технічного аналізу сигналу в умовах апріорної параметричної невизначеності за рахунок застосування параметронезалежних модуляційних ознак для розділення сигналів на окремі класи, визначення параметрів сигналів розрізнених класів та подальше розпізнавання видів модуляції. Ефективність розробленої методики характеризується неухильним виконанням вимог до отримання аналітичного подання сигналу (2 - 6), відносною точністю розрахунку сигнальних параметрів та ймовірністю правильного розпізнавання використаних алгоритмів і способів визначення параметрів сигналу та розпізнавання виду модуляції.

Література

1. Слободянюк П. В. Радиомониторинг: вчера, сегодня, завтра (Теория и практика построения системы радиомониторинга) / П. В. Слободянюк П. В., В. Г. Благодарный. – Прилуки: ООО «Издательство «Аир-полиграф». – 2010. – 296 с.
2. Рембовский А. М. Радиомониторинг: задачи, методы, средства / Рембовский А. М., Ашихмин А. В., Козьмин В. А. 3-е изд., перераб. и доп. – М: Горячая линия – Телеком. – 2012. – 640 с.
3. Алгоритм оцінювання несучої частоти та параметрів імпульсів тактової синхронізації демодуляторів сигналів з фазовою маніпуляцією / О. А. Нагорнюк, Р. В. Дзюбчук, В. В. Павлюк, М. С. Поляков // Проблеми створення, випробування,

- застосування та експлуатації складних інформаційних систем: зб. наук. пр. – Житомир: ЖВІ НАУ. 2009. – Вип. 2. – С. 131–139.
4. Нагорнюк О. А. Спосіб оцінювання параметрів сигналів обмеженої тривалості з мінімальним частотним зсувом в умовах невизначеності / О. А. Нагорнюк, О. О. Писарчук, В. В. Павлюк // Труды університету / Київ: НУОУ. – 2013. – Вип. №5(119). С. 156–161.
5. Нагорнюк О. А. Алгоритм попереднього оцінювання символної частоти сигналів з цифровою лінійною модуляцією / О. А. Нагорнюк // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем: зб. наук. пр. – Житомир: ЖВІ НАУ. – 2011р. – Вип. 2. – С. 46-56.

6. Нагорнюк О. А. Покращення точності оцінювання несучої та символічної частоти сигналів з цифровою модуляцією / О. А. Нагорнюк // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем: зб. наук. пр. – Житомир: ЖВІ НАУ – 2013. – Вип. 8. – С. 116-127. **7. Нагорнюк О. А.** Алгоритм автоматичного виявлення та класифікації сигналів з цифровими видами модуляції / О. А. Нагорнюк, В. В. Павлюк // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Технічні науки: зб. наук. пр. – Житомир: ЖДТУ. – 2011. – Вип. 4 (59) – С. 71-80. **8. Нагорнюк О. А.** Алгоритм автоматизованого визначення кратності маніпуляції фазоманіпульованих сигналів з невідомими параметрами / О. А. Нагорнюк // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Технічні науки: зб. наук. пр. – Житомир: ЖДТУ. – 2011. – Вип. 2 (61) – С. 91-98. **9. Нагорнюк О. А.** Алгоритм автоматизованого розпізнавання виду модуляції сигналів з постійною амплітудою при невідомих апіорних значеннях параметрів / О. А. Нагорнюк, І. Г. Грабар // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем: зб. наук. пр. – Житомир: ЖВІ НАУ. – 2012. – Спецвипуск. 2. – С. 46-56. **10. Нагорнюк О. А.** Спосіб автоматизованого розпізнавання виду модуляції сигналів зі змінною амплітудою в умовах параметричної невизначеності / О. А. Нагорнюк // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем: зб. наук. пр. – Житомир: ЖВІ

НАУ. – 2013. – Вип. 7. – С. 116-127. **11. Нагорнюк О. А.** Спосіб автоматизованого розпізнавання виду цифрової лінійної модуляції оснований на кумулянтному аналізі сигналів / О. А. Нагорнюк, О. О. Писарчук, В. П. Манойлов // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Технічні науки: зб. наук. пр. – Житомир: ЖДТУ. – 2013. – Вип. 3 (59) – С. 71-80. **12. Dobre A. A.** Survey of Automatic Modulation Classification Techniques: Classical Approaches and New Trends. Octavia / A. Dobre, A. Abdi, Y. Bar-Ness, W. Su. – Princeton, USA, 2005. – 63 p. **13. Su W.** Comparison and Simulation of Digital Modulation Recognition Algorithms / W. Su, J. Kosinski // Annual Joint Electronic Warfare Conference, 2003. – 7 p. **14. Горячкин О. В.** Вскрытие модуляционных параметров радиосигналов с неизвестной структурой / О. В. Горячкин, А. А. Харитонова // Инфокоммуникационные технологии Том 8, № 2 – Самара, 2010. – с.65-72. **15. Скляр Б.** Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр. :Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003.-1104с. **16. Doyle L.** The Essentials of Cognitive Radio / L. Doyle. – Cambridge University Press, 2009. – 240 p. **17. Кестер У.** Проектирование систем цифровой и смешанной обработки сигналов / У. Кестер У. Перевод с английского под ред. А. А. Власенко. – М: Техносфера – 2010. – 326 с. **18. Баскаков С. И.** Радиотехнические цепи и сигналы / С. И. Баскаков – М.: Высш. шк. – 1988 – 448. **19. Сергиенко А.** Цифровая обработка сигналов/А. Сергиенко – СПб.: Питер, 2003. – 604с.

МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛА И РАСПОЗНАВАНИЯ ВИДА МОДУЛЯЦИИ СРЕДСТВАМИ РАДИОМОНИТОРИНГА В УСЛОВИЯХ АПРИОРНОЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Александр Анатолієвич Нагорнюк (научный сотрудник)

Алексей Александрович Писарчук (д-р техн. наук, с.н.с., начальник кафедры)

Владимир Владимирович Павлюк (канд. техн. наук, с.н.с., начальник научно-исследовательской лаборатории)

Житомирский военный институт имени С. П. Королёва Государственного университета телекоммуникаций, Житомир

В статье предложена методика автоматизированного распознавания вида модуляции и определения параметров сигнала средствами радиомониторинга, которая устанавливает содержание и порядок применения подходов к получению аналитического представления сигнала, оценивания качества сигнала, реализации операций его обработки, определения и коррекции сигнальных параметров, распознавания вида модуляции и типа фазового созвездия, при условии отсутствия априорной информации о параметрах анализируемого сигнала.

Ключевые слова: методика, автоматизация, радиосигнал, распознавание, модуляция, параметр, дискретизация, квантование, фазовое созвездие.

THE METHODS OF THE AUTOMATED DETERMINATION OF SIGNAL PARAMETERS AND MODULATION TYPE RECOGNITION BY RADIO MONITORING FACILITIES UNDER PARAMETRIC UNCERTAINTY

Olexander Nahorniuk (Research Fellow of a Research Section)

Oleksii Pysarchuk (Doctor of Technical Sciences, Senior Research Fellow, Chief of a Department)

Volodymyr Pavliuk (Candidate of Technical Sciences, Senior Research Fellow, Chief of a Research Laboratory)

Zhytomyr military institute named after S. P. Korolyov of State University of Telecommunications, Zhytomyr

The method of automated modulation type recognition and determination of signal parameters by radiomonitoring facilities is offered in the article. The method establishes an procedure of application of the approaches to the definition of signal analytic representation, signal quality estimation, the realization of preprocessing operations, the determination and correction of signal parameters, the recognition of modulation type and phase constellation shape on conditions of lack of any a priori information about the analyzing signal parameters.

The main attention is paid to the realization of the sampling and quantization operations, obtaining of signal analytic representation taking into account practical problems connected with time and frequency signal limitation, imperfect technical features of radio receivers.

Proposed practical approaches to signal quality estimation are based on the determination of the noise power in the signalless time periods or adjacent frequencies and allow to make a decision on reasonability of further signal processing.

Signal parameters determination and modulation type recognition on conditions of lack of any a priori parametric information is implemented by using parameter free modulation features to separate all signal in general modulation classes, signal parameters estimation of identified classes, modulation type recognition and refining defined parameters. This approach allowed to increase the number of automated processing radio signals.

Key words: method, automatization, radio signal, recognition, modulation, parameter, sampling, quantization, phase constellation.