

# Метод автоматизованого визначення модуляційних параметрів короткотривалих радіосигналів з двопозиційною частотною маніпуляцією

Нагорнюк О. А.

Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова, м. Житомир, Україна

E-mail: [Nahorniuk@i.ua](mailto:Nahorniuk@i.ua)

У статті запропоновано метод автоматичного визначення несучої частоти, символної швидкості, частоти рознесення піднесучих, індексу маніпуляції та ширини спектра короткотривалих радіосигналів із двопозиційною частотною маніпуляцією. Метод об'єднує чотири способи визначення параметрів радіосигналів із частотною маніпуляцією. Для визначення несучої частоти та частоти рознесення піднесучих використовується два відомі способи, які ґрунтуються на аналізі характеристик амплітудно-частотних спектрів радіосигналу та гістограми миттєвої частоти. Для визначення символної швидкості – удосконалено спосіб, який ґрунтується на аналізі циклостационарних властивостей випадкової функції миттєвої частоти та запропоновано новий спосіб на основі аналізу пікових значень періодограми. Удосконалення першого способу визначення символної швидкості полягає в підвищенні ймовірності правильної ідентифікації домінуючих гармонік в амплітудно-частотному спектрі центрованої нормованої миттєвої частоти шляхом попередньої низькочастотної фільтрації миттєвої частоти, збільшення розмірності масиву її значень та обмеження смуги пошуку. Другий спосіб визначення символної швидкості ґрунтується на пошуку пікових значень періодограми сигналу, які виникають за рахунок наявності в модуляційних бітових послідовностях ділянок з чергуванням одиниць та нулів. Показано, що в аналізованих характеристиках наявні пікові значення, частоти (або різниця частот) яких кратні символній швидкості та девіації частоти. Запропоновано підхід до розрахунку параметрів частотної маніпуляції шляхом об'єднання даних отриманих чотирьома способами. Працездатність методу перевірена шляхом аналізу радіосигналів отриманих в процесі комп'ютерного моделювання, а також реальних сигналів командно-телеметричних радіоліній безпілотних авіаційних комплексів.

*Ключові слова:* радіосигнал; частотна маніпуляція; символна швидкість; символний період; девіація; спектр; періодограма; автоматизація; миттєва частота

DOI: [10.20535/RADAR.2023.93.31-38](https://doi.org/10.20535/RADAR.2023.93.31-38)

## Постановка проблеми в загальному вигляді

В теперішній час широко використовуються безпілотні авіаційні комплекси (БпАК) різного призначення. Виявлення фактів застосування БпАК є важливим завданням, вирішення якого дозволяє своєчасно вживати необхідних заходів із протидії [1]. Одним із ефективних варіантів виявлення БпАК є радіоперехоплення та технічний аналіз їх радіосигналів. Оскільки кожен тип БпАК має унікальний набір параметрів радіосигналів, то визначивши їх значення та порівнявши із відомими можна встановити тип БпАК і загрозу, яку він представляє. Аналіз структури радіосигналів відомих БпАК показав, що в більшості радіоканалів ручного керування, передачі команд та телеметрії БпАК діапазонів

433 МГц, 868 МГц, 915 МГц використовуються радіосигнали із різновидами двопозиційної частотної маніпуляції (ЧМн-2) та розширенням спектра методом псевдовипадкового перестроювання робочої частоти (ППРЧ). Обчислення модуляційних параметрів таких радіосигналів ускладнено малою тривалістю їх частотних елементів, широким діапазоном можливих значень параметрів, одночасною присутністю декількох радіосигналів в аналізованій ділянці частотного діапазону, низьким відношенням сигнал/шум. Застосування відомих підходів до визначення модуляційних параметрів радіосигналів із ЧМн в таких умовах призводить до значних похибок обчислення і, як результат, неправильної ідентифікації типу БпАК за їх радіосигналами. Тому актуальним науково-практичним завданням є

удосконалення методів автоматизованого визначення параметрів радіосигналів із ЧМн.

## 1 Аналіз останніх досліджень і публікацій

Відомі підходи до визначення параметрів ЧМн радіосигналів ґрунтуються на аналізі характеристик переходу радіосигналу через «нуль» [2], характеристик амплітудно-частотного спектру (АЧС) [3, 4], параметрів функції миттєвої частоти [4–6], гістограми миттєвої частоти [7], циклостационарних властивостей сигналу, що з'являються внаслідок ЧМн [8, 9], характеристик складових розкладеного сигналу [10], вейвлет-перетворення сигналу [11]. Більшість запропонованих методів розроблені для визначення окремих параметрів ЧМн, а деякі з них потребують апріорної інформації. Загальним недоліком вказаних методів є значні похибки визначення параметрів короткотривалих сигналів в умовах низьких значень відношення сигнал/шум (ВСШ) та широкого діапазону можливої зміни параметрів ЧМн.

## 2 Формулювання завдання дослідження

Метою досліджень є удосконалення методу автоматизованого визначення параметрів короткотривалих радіосигналів із ЧМн-2.

Вхідними даними є комплексні відліки сигнальної суміші, отримані на виході широкопasmового радіоприймального пристрою. Вважається, що сигнал на передавальній стороні сформовано відповідно до визначених вимог [12] та він має ЧМн-2. Параметри маніпуляції на ділянці сигналу, що аналізується, постійні, а попередня інформація про їх можливі значення відсутня, що відповідає умовам апріорної параметричної невизначеності. При розповсюдженні сигнал зазнає впливу каналу, що описується гаусівською моделлю [7].

Математичну модель радіосигналу із ЧМн-2 на виході радіоприймального пристрою можна записати у вигляді комплексної функції  $r(t)$ , що характеризує зміну його параметрів у часі:

$$r(t) = ae^{j\left(2\pi f_c t + \theta + j \sum_{k=1}^K 2\pi f_k g(t-kT)\right)} + \xi(t), \quad (1)$$

де  $f_k \in \{-\Delta f, \Delta f\}$ ,  $k = 1, \dots, K$ ;

$\Delta f$  – девіація частоти;

$f_r = 2\Delta f$  – частота рознесення піднесучих;

$g(t)$  – імпульсна характеристика формувального фільтра;

$a$  – амплітуда сигналу;

$f_c$  – несуча частота;

$T$  – символний період;

$R = 1/T$  – символна швидкість;

$h = \Delta f T = f_r / 2R$  – індекс маніпуляції;

$\theta$  – початкова фаза несучого коливання;

$\xi(t)$  – адитивний гаусівський шум.

При значенні  $h = 0,5$  отримуємо ЧМн-2 із мінімальним частотним зсувом (МЧЗ). Якщо характеристика  $g(t)$  є гаусівською, то отримуємо гаусівську маніпуляцію з мінімальним частотним зсувом (ГМЧЗ) [12].

Після здійснення операції аналого-цифрового перетворення з частотою дискретизації  $F_s$  отримуємо масив комплексних відліків сигналу  $r[i]$ . Необхідно визначити несучу частоту  $f_c$ , частоту рознесення піднесучих  $f_r$ , символну швидкість  $R$  та індекс маніпуляції  $h$ .

Показником ефективності методу буде ймовірність правильного визначення параметрів ЧМн.

## 3 Виклад основного матеріалу

Особливістю запропонованого методу є об'єднання чотирьох способів визначення параметрів ЧМн радіосигналів, що дозволило зменшити похибку обчислення параметрів за рахунок підвищення ймовірності правильної ідентифікації домінуючих гармонік у характеристиках радіосигналу, та виключення із розрахунків даних, які не відповідають параметрам визначеним іншими способами.

Для визначення частоти рознесення піднесучих  $f_r$  використовується два відомі способи, які ґрунтуються на аналізі характеристик АЧС радіосигналу та гістограми миттєвої частоти.

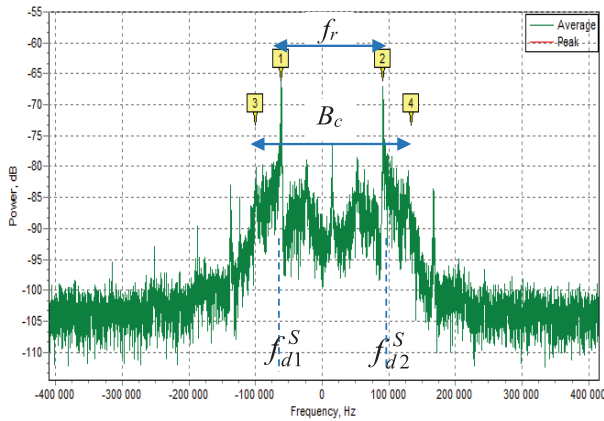
На Рис. 1 зображено АЧС та гістограму миттєвої частоти радіосигналу із ЧМн-2.

З Рис. 1 видно, що представлені характеристики мають два піки, різниця частот яких дорівнює частоті рознесення піднесучих, а їх середнє значення – несучій частоті:

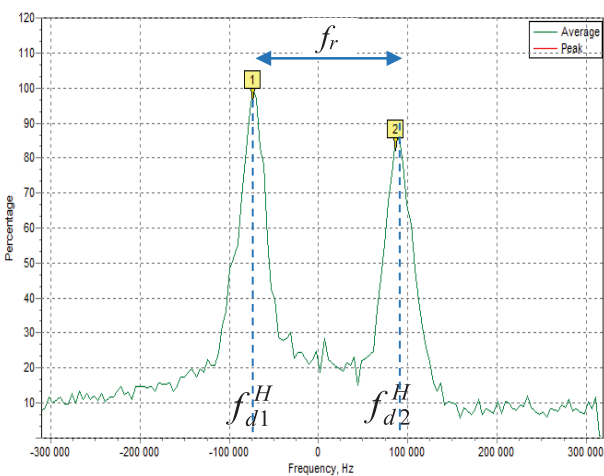
$$\begin{aligned} f_r &= |f_{d1}^S - f_{d2}^S|; \quad f_r = |f_{d1}^H - f_{d2}^H|; \\ f_c &= \frac{f_{d1}^S + f_{d2}^S}{2}; \quad f_c = \frac{f_{d1}^H + f_{d2}^H}{2}, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $f_{d1}^S, f_{d2}^S$  – частоти 2-х піків з максимальною амплітудою АЧС радіосигналу;

$f_{d1}^H, f_{d2}^H$  – частоти 2-х піків з максимальною амплітудою гістограми миттєвої частоти.



а)



б)

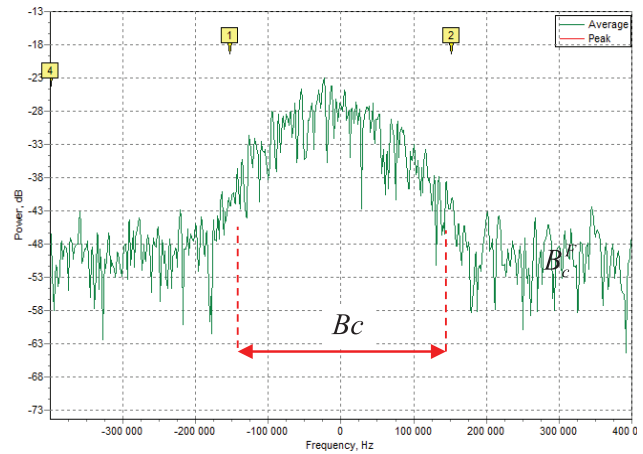
Рис. 1. Радіосигнал із ЧМн-2: а) АЧС; б) гістограма миттєвої частоти

Для радіосигналів із мінімальним частотним зсувом спосіб визначення частоти рознесення піднесучих на основі аналізу АЧС є непрацездатним, оскільки за рахунок малого індексу маніпуляції ( $h = 0,5$ ) енергія сигналу буде сконцентрована навколо несучої частоти (Рис. 2, а). Для таких радіосигналів частота рознесення піднесучих визначається шляхом аналізу АЧС радіосигналу на виході нелінійного оператора (НО) другого порядку (Рис. 2, б) [7].

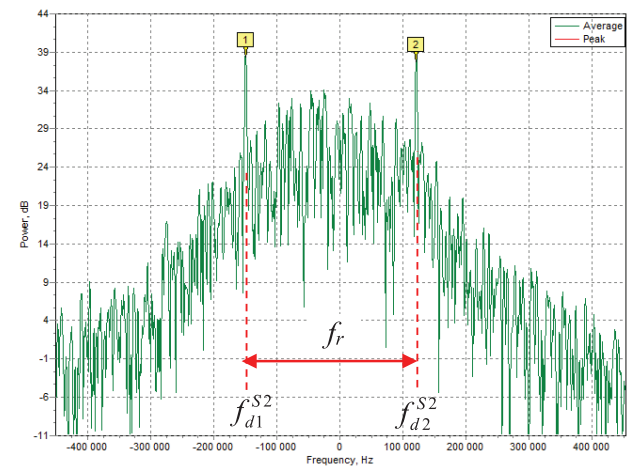
З Рис. 2, б видно, що застосування НО другого порядку до відліків МЧЗ радіосигналу приводить до появи в його АЧС двох домінантних гармонік, різниця частот яких дорівнює половині частоти рознесення піднесучих та символічній швидкості:

$$R = 0,5f_r = |f_{d1}^{S2} - f_{d2}^{S2}|, \quad (3)$$

де  $f_{d1}^{S2}, f_{d2}^{S2}$  – частоти 2-х піків з максимальною амплітудою в АЧС радіосигналу на виході НО другого порядку.



а)



б)

Рис. 2. АЧС: а) МЧЗ сигналу; б) МЧЗ сигналу на виході НО 2-го порядку

Для визначення символічної швидкості використовуються два способи: аналіз АЧС центрованого нормованого модуля миттєвої частоти та аналіз періодограми радіосигналу.

Перший підхід визначення символічної швидкості ґрунтується на аналізі циклостационарних властивостей випадкової функції миттєвої частоти [4]. Його суть полягає в пошуку спектральних гармонік в АЧС комплексної центрованої нормованої функції миттєвої частоти, що відповідають циклостационарним процесам, пов'язаним із ЧМн.

Застосування НО у вигляді модуля комплексної амплітуди до центрованої нормованої миттєвої частоти (4) приводить до появи в її АЧС домінантних гармонік, частоти яких кратні символічній швидкості  $f_{di}^F = iR, i = 1, 2, \dots, N_F$ , де  $N_F = F_s / (2R)$  – максимальна можлива кількість домінантних гармонік:

$$f_{NC}(n) = FFT(|f_{NC}(k)|); \quad (4)$$

$$f_{NC}(k) = \frac{f_{NA}(k)}{E(f_{NA}(k))} - 1,$$

де  $S_{NC}(n)$  – АЧС центрованої нормованої миттєвої частоти;

$f_{NC}(k)$  – центрована нормована миттєва частота;

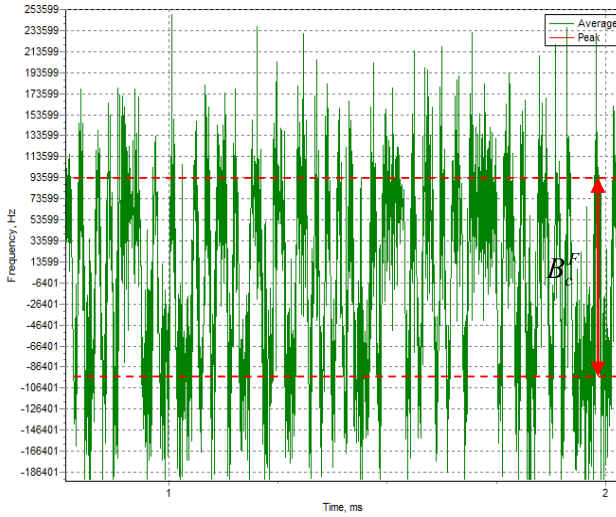
$f_{NA}(k) = f_N(k) + f_N(k) \otimes h_H(k)$  – комплексне значення миттєвої частоти  $f_N(k)$ ;

$h_H(k)$  – імпульсна характеристика цифрового фільтра Гілберта;

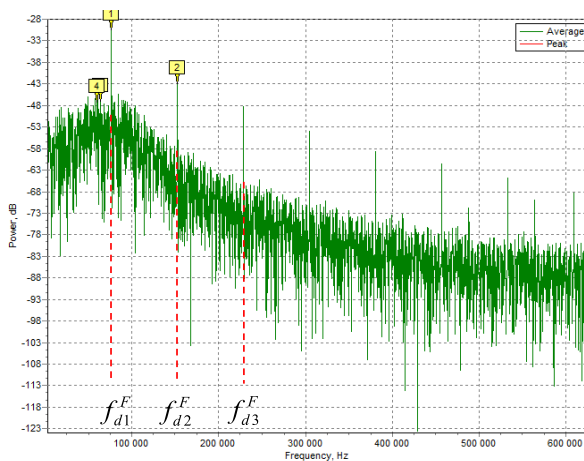
$FFT(\cdot)$  – операція швидкого перетворення Фур'є [13];

$E(\cdot)$  – операція статистичного усереднення.

Осцилограма миттєвої частоти та АЧС комплексної нормованої центрованої функції миттєвої частоти зображено на Рис. 3. Для сигналів з високим ВСШ частота домінантної гармоніки із максимальною амплітудою дорівнює символічній швидкості  $R = f_{d1}^F$ .



а)



б)

Рис. 3. а) Осцилограма миттєвої частоти; б) АЧС модуля центрованої нормованої миттєвої частоти

Відношення амплітуди домінантних гармонік, частоти яких кратні символічній швидкості до середнього значення амплітуди АЧС  $S_{Di}$  (5), залежить

від ВСШ сигналу та його тривалості:

$$S_{Di} = \frac{S_{NC}(nf_{di}^F)}{E(S_{NC}(n))}, \quad (5)$$

де  $nf_{di}^F$  – номер масиву  $S_{NC}(n)$ , що відповідає частоті  $f_{di}^F$ .

При низькому значенні  $S_{Di}$  знижується ймовірність правильної ідентифікації домінантних гармонік і підвищується похибка визначення символічної швидкості. Для підвищення  $S_{Di}$  пропонується здійснювати фільтрацію миттєвої частоти фільтром низьких частот із частотою зрізу, яка дорівнює оціненій ширині спектра миттєвої частоти (6), підвищувати розмірність масиву значень миттєвої частоти шляхом повторення аналізованого фрагменту сигналу та обмежувати смугу пошуку домінантних гармонік величиною  $f_T$ :

$$f_N = LPF(f_N, B_c^F), \quad (6)$$

де  $B_c^F$  – ширина спектра миттєвої частоти;  $LPF(\cdot)$  – операція обробки сигналу фільтром низьких частот із частотою зрізу  $B_c^F$  [13].

Таким чином, удосконалений спосіб визначення символічної швидкості шляхом аналізу циклостационарних властивостей випадкової функції миттєвої частоти відрізняється від відомих наявністю додаткових операцій оцінювання ширини АЧС миттєвої частоти, низькочастотної фільтрації, збільшенням розмірності масиву значень миттєвої частоти та обмеженням смуги пошуку домінантних гармонік.

Другий підхід до визначення символічної швидкості ґрунтується на аналізі властивостей періодограми ЧМн-2 сигналу та працює лише для сигналів, в модуляційних бітових послідовностях яких присутні ділянки з меандром (чергування одиниць та нулів). Періодограми таких сигналів мають піки, різниці частот яких кратні символічній швидкості.

АЧС радіосигналів із ЧМн-2 можна представити сумою двох АЧС послідовностей імпульсів:

$$S(f) = S_L(f - \Delta f) + S_H(f + \Delta f), \quad (7)$$

де  $S_L(f)$ ,  $S_H(f)$  – АЧС послідовностей імпульсів прямокутної форми  $b_L(t)$  та  $b_H(t)$ , які визначаються як

$$b_H(t) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } b_0(t) > 0 \\ 0, & \text{якщо } b_0(t) \leq 0 \end{cases}; \quad (8)$$

$$b_L(t) = \begin{cases} -1, & \text{якщо } b_0(t) \leq 0 \\ 0, & \text{якщо } b_0(t) > 0 \end{cases},$$

де  $b_0(t)$  – модулююча функція.

На ділянках радіосигналу, де передається бітова послідовність, яка являє собою чергування одиниць та нулів,  $b_L(t)$  та  $b_H(t)$  будуть мати вигляд періодичних послідовностей імпульсів зі шпаруватістю

$q = 2$  та періодом слідування  $T_p$ , АЧС яких є дискретним та описується формулою:

$$S_P(f_n) = U_m \frac{\sin(0,5\pi f_n T_p)}{\pi f_n T_p}, \quad (9)$$

де  $f_n = n/T_p$ ,  $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \pm \infty$ ;

$T_p = 2 * T$  – період періодичної послідовності прямокутних імпульсів;

$S_P(f_n)$  – АЧС періодичної послідовності прямокутних імпульсів;

$U_m$  – амплітуда сигналу.

З виразу (8) видно, що в головній пелюстці спектра  $S_P(f_n)$  присутні три гармоніки, частоти яких дорівнюють:  $f_0 = 0$ ;  $f_{\pm 1} = \pm 1/T_p$ , а їх амплітуди –  $S_{p0} = U_m/q$ ;  $S_{p\pm 1} = U_m/\pi$ .

Врахувавши формулу (9) та  $\Delta f = h/T$ , вираз (7) можна записати у вигляді:

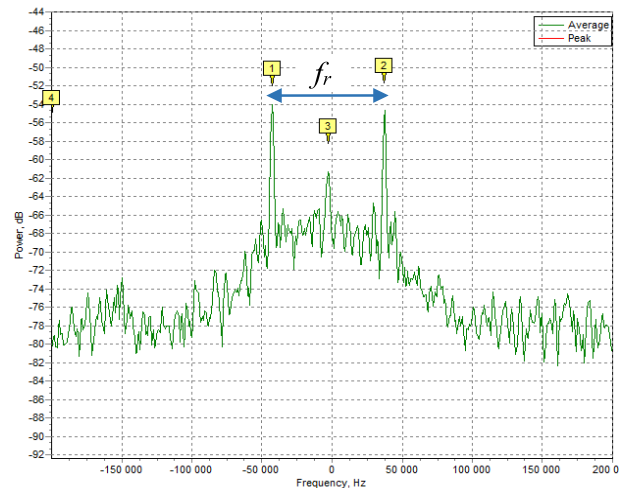
$$S_P(n) = U_m \left( \frac{\sin(0.5\pi(n-h))}{\pi(n-h)} + \frac{\sin(0.5\pi(n+h))}{\pi(n+h)} \right). \quad (10)$$

З (10) видно, що АЧС ЧМн-2 радіосигналу модульованого бітовою послідовністю у вигляді меандру буде дискретним та міститиме гармоніки на частотах кратних  $1/2T = R/2$ . При індексах маніпуляції від 1, аналіз положення таких гармонік дозволяє визначити як символну швидкість, так і частоту рознесення піднесучих.

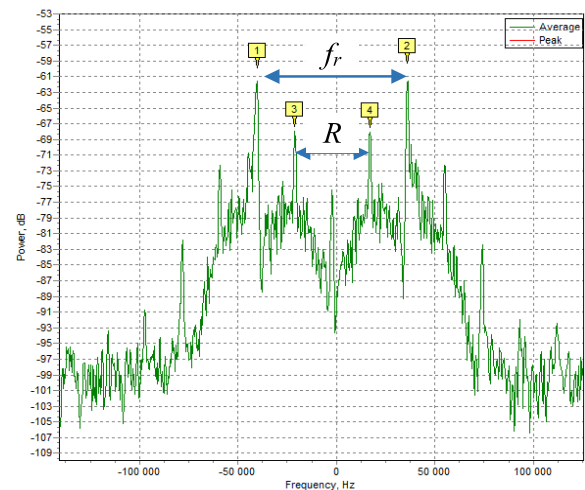
Періодограми ЧМн-2 радіосигналів, в модуляційній послідовності яких є ділянки з меандром, зображено на Рис. 4.

З Рис. 4 видно, що в періодограмі радіосигналів є піки, частоти яких пов'язані із значенням  $f_c$ ,  $R$  та  $f_r$ , а їх кількість залежить від індексу маніпуляції. Дана особливість використовується для визначення параметрів ЧМн-2.

Таким чином, запропоновано новий спосіб визначення символної швидкості шляхом аналізу періодограми ЧМн-2 радіосигналів, в модуляційних бітових послідовностях яких присутні ділянки з чергуванням одиниць та нулів.



a)



b)

Рис. 4. Періодограми ЧМн-2, в модуляційній послідовності яких є ділянки з меандром: а)  $h=1$ ; б)  $h=2$

Блок-схема методу автоматизованого визначення параметрів ЧМн-2, що оснований на вище описаних способах, зображена на Рис. 5.

Першою операцією (блок 1) є автоматичне визначення ширини АЧС радіосигналу  $B_c$ . Порядок виконання даної операції описано в [4].

В блоці 2 реалізується фільтрація сигналу смуговим фільтром із шириною смуги, що дорівнює  $B_c$  [13]. Виконання даної операції дозволяє зменшити рівень сторонніх випромінювань, що підвищує точність розрахунку параметрів.

В блоці 3 розраховується та аналізується усереднений АЧС сигналу з метою відокремлення радіосигналів із МЧЗ та ГМЧЗ. Оскільки МЧЗ сигнали мають індекс маніпуляції  $h = 0,5$ , то енергія сигналу буде сконцентрована навколо несучої частоти, а усереднений АЧС матиме один пік (Рис. 2).

Коли в АЧС знайдено один пік, то приймається рішення, що індекс маніпуляції  $h = 0,5$ , в іншому разі –  $h \geq 1$  (блок 4).

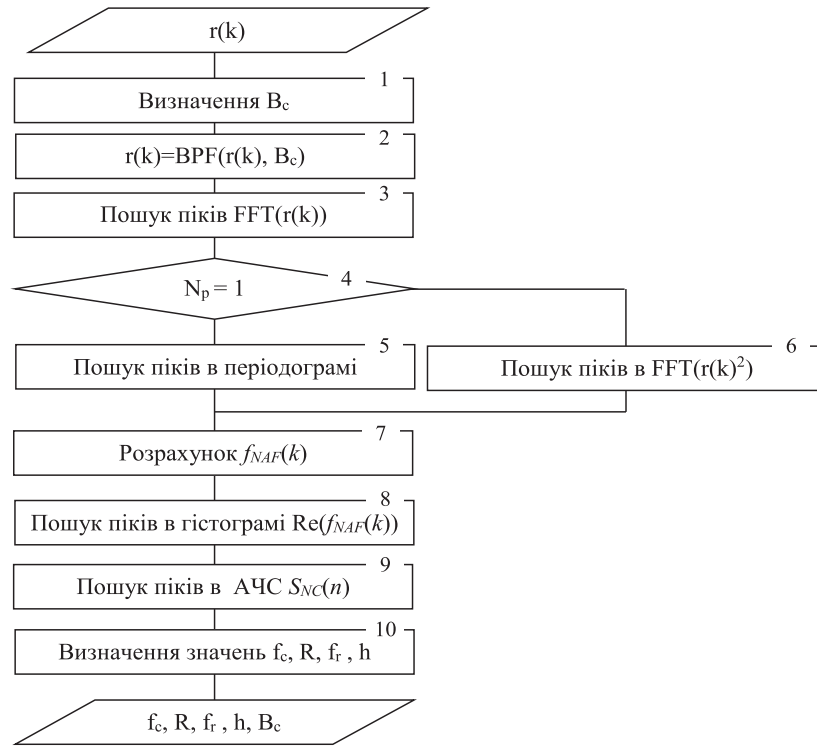


Рис. 5. Блок-схема методу автоматизованого визначення параметрів ЧМн-2

При  $h = 0,5$  в блоці 6 розраховується АЧС радіосигналу на виході НО другого порядку та здійснюється пошук піків, які перевищують заданий поріг. Різниця частот піків містить інформацію про символну швидкість, яка для МЧЗ сигналів дорівнює дев'яти частоти. Результатом є масив частот  $R_1(i)$ .

При  $h \geq 1$  в блоці 5 розраховується періодограма сигналу та здійснюється пошук піків, амплітуда яких перевищує пороговий рівень. У разі наявності в сигналі бітових послідовностей у вигляді меандру періодограма матиме більше 2-х піків, частоти яких пов'язані із несучою частотою, символною швидкістю та дев'ятию частоти. В іншому разі в періодограмі буде лише два піки, різниця частот яких дорівнює частоті рознесення піднесучих, а їх середнє значення несучій частоті. Результатом є масив частот  $R_2(i)$ .

В блоці 7 здійснюється розрахунок комплексного значення фільтрованої миттєвої частоти  $f_{NAF}$ , який складається із обчислення миттєвої частоти [7], визначення ширини спектру миттєвої частоти, низькочастотної фільтрації (6) та перетворення Гільберта.

В блоці 8 розраховується гістограма миттєвої частоти та визначаються частоти її двох пікових значень, різниця яких відповідає частоті рознесення піднесучих ЧМн, а їх середнє значення – несучій частоті. Результатом є масив частот  $R_3(i)$ .

В блоці 9 розраховується АЧС центрованої нормованої миттєвої частоти (4) та здійснюється пошук

домінантних гармонік, амплітуда яких перевищує значення порогу. Результатом є масив частот  $R_4(i)$ .

В блоці 10 шляхом аналізу масивів, отриманих на попередніх етапах, визначаються параметри ЧМн: несуча частота, символна швидкість, частота рознесення піднесучих, індекс модуляції. В процесі аналізу враховуються такі співвідношення:

$$\begin{aligned}
 0,5 |R_1(1) - R_1(2)| &\approx f_c; \\
 0,5 |R_2(1) - R_2(2)| &\approx f_c; \\
 0,5 |R_3(1) - R_3(2)| &\approx f_c; \\
 |R_1(1) - R_1(2)| &\approx R; \\
 |R_2(i) - R_2(i-j)| &: 0,5R; \\
 |R_3(1) - R_3(2)| &\approx f_r; \\
 |R_4(i) - R_4(i-j)| &: R,
 \end{aligned} \tag{11}$$

де  $:$  – оператор кратності.

Індекс маніпуляції визначається за виразом  $h = f_r/2R$ .

Як зазначалося вище пошук піків в характеристиках радіосигналу здійснюється шляхом порівняння їх значень із пороговими, які розраховуються автоматично за виразом:

$$T_h(k) = E(x(i)) + G_h STD(x(i)), \quad i = 1, 2, \dots, N_h, \tag{12}$$

де  $N_h$  – кількість відліків за якими розраховується поріг;  $G_h$  – коефіцієнт, який приймає значення в діапазоні від 1 до 3;  $STD()$  – оператор розрахунку середньоквадратичного відхилення.

Працездатність та ефективність розробленого методу перевірена шляхом аналізу радіосигналів отриманих в процесі комп'ютерного моделювання, а також реальних сигналів командно-телеметричних радіоліній БпАК (Орлан-10, Supercam, Zala та інші).

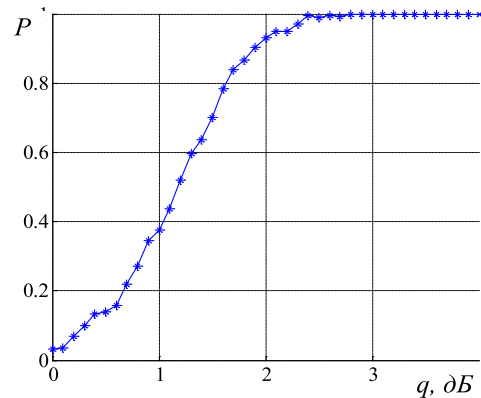
Комп'ютерне моделювання здійснювалось відповідно до вимог статистичного моделювання та методів Монте-Карло [14] в програмному середовищі MATLAB. Сигнальні суміші формувались шляхом генерування радіосигналів із ЧМн-2 та додавання до них шуму, ймовірнісна модель якого описувалась нормальним законом розподілу ймовірностей. Кожна модуляційна послідовність на початку містила бітову послідовність із чергуванням одиниць та нулів, що відповідає більшості командно-телеметричних радіоліній відомих БпАК. Частота рознесення піднесучих та символна швидкість ЧМн для кожної реалізації обирались за випадковим законом. Для кожного значення ВСШ проведено 500 розрахунків параметрів радіосигналів. У результаті статистичного моделювання отримано графічні залежності ймовірності правильного визначення символної швидкості та частоти рознесення піднесучих від ВСШ, які зображені на Рис. 6.

Ймовірність правильного визначення параметрів ЧМн на кожному етапі моделювання приймалася за 1, якщо визначене значення параметру відрізнялось від істинного не більше ніж на 5 відсотків. Як показує практичний досвід, такої точності визначення параметрів ЧМн достатньо для подальшої ідентифікації БпАК.

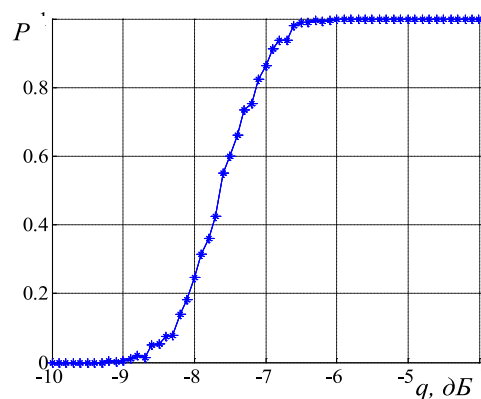
З Рис. 6 видно, що запропонований метод дозволяє правильно визначити символну швидкість із ймовірністю близькою до 1 при ВСШ від 2,3 дБ, а частоту рознесення піднесучих при ВСШ від -6,5 дБ.

На відміну від відомих підходів до визначення параметрів ЧМн запропонований має вищу ймовірність правильного визначення параметрів, що досягнуто за рахунок об'єднання інформації від декількох відомих способів та запропонованого нового способу, який ґрунтується на аналізі піків періодограми. Так у порівнянні із [4] виграш по ВСШ при визначенні символної швидкості дорівнює близько 2,5 дБ, а при визначенні частоти рознесення піднесучих – близько 2 дБ.

Запропонований метод автоматизованого визначення модуляційних параметрів радіосигналів із ЧМн-2 використано при розробленні методики розпізнавання типу БпАК за його радіосигналами та відповідного спеціалізованого програмного забезпечення (СПЗ). Застосування СПЗ для аналізу записів реальних сигналів командно-телеметричних радіоліній БпАК підтвердило працездатність запропонованого в даній роботі методу.



а)



б)

Рис. 6. Залежності ймовірності правильного визначення параметрів ЧМн-2 від ВСШ: а) символна швидкість; б) частота рознесення піднесучих

## Висновки

Об'єднання чотирьох способів визначення параметрів радіосигналів із ЧМн-2 дозволило підвищити ймовірність правильного обчислення параметрів за рахунок підвищення ймовірності правильної ідентифікації домінуючих гармонік у характеристиках радіосигналу.

Дослідження розробленого методу автоматизованого визначення параметрів радіосигналів із ЧМн-2 проведенні шляхом комп'ютерного моделювання показали, що ймовірність правильного визначення символної швидкості близька до 1 при ВСШ від 2,3 дБ, а частоти рознесення піднесучих – при ВСШ від -6,5 дБ.

Подальші дослідження в даному напрямку доцільно спрямувати на удосконалення підходів до пошуку піків в характеристиках радіосигналів із низьким значенням ВСШ, а також розроблення нових способів об'єднання даних, що містять інформацію про параметри ЧМн на основі методів штучного інтелекту.

## References

- [1] Yerilkin, A., Huriev, D., Karlov, D., Korobetskiy, O. and Shevchenko, Y. (2022). Review and analysis of world experience struggles with strike unmanned aviation. *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, Vol. 4, Iss. 49, pp. 15-22. doi: 10.30748/nitps.2022.49.02.
- [2] Su W., Kosinski J. (2003). Comparison and Simulation of Digital Modulation Recognition Algorithms. *Proceedings of the International Symposium on Advanced Radio Technologies*, pp. 81-87.
- [3] Technical identification of digital signals. Recommendation ITU-R SM.1600-3. Spectrum management (2017). *ITU-R*, Geneva, 32 p.
- [4] Nahorniuk O. A., and Pavliuk, V. V. (2016). Metodyka avtomatyzovanoho rozrakhunku parametriv chastotnoi manipuliatsii v umovakh apriornoj nevyznachenosti [Method of automated calculation of frequency shift keying parameters in conditions of a priori uncertainty]. *Modern information technologies in the sphere of security and defence*, Iss. 2(26), Kyiv, pp. 74-80.
- [5] Hui Xiong, De-Guo Zeng, Xiao-Dong He, Bin Tang (2010). Parameter Estimation Approach of FSK/PSK Radar Signal. *Journal of Electronic Science and Technology*, Vol. 8, Iss. 4, pp. 341-345. doi: 10.3969/j.issn.1674-862X.2010.04.009.
- [6] Grimaldi D., Palumbo A., Rapuano S. (2001). Automatic modulation classification and measurement of digitally modulated signals. *11 IMEKO TC-4 Symp. — Trends in Electrical Measurement and Instrumentation*, Lisbon, pp. 112-116.
- [7] Benvenuto N., Cherubini G., Tomasin S. (2021). *Algorithms for Communications Systems and their Applications*, 2nd edition. Wiley, 960 p.
- [8] Vito L., Dobro O. A. (2014). Joint Classification and Parameter Estimation of Compressive Sampled FSK Signals. *20th IMEKO TC4 International Symposium and 18th International Workshop on ADC Modelling and Testing*, pp. 473-477.
- [9] Zhang J. et al. (2020). Blind Parameter Estimation of M-FSK Signals in the Presence of Alpha-Stable Noise. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 68, No. 12, pp. 7647-7659, doi: 10.1109/TCOMM.2020.3022348.
- [10] Jian-fei Xu, Fu-ping Wang, Zhanji Wang (2011). Algorithm for symbol rate estimation of MFSK. *International Conference on Graphic and Image Processing (ICGIP 2011)*, Vol. 8285, doi:10.1117/12.913362.
- [11] Valieva I., Björkman M., Åkerberg J., Ekström M., Voitenko I. (2022). Blind symbol rate estimation for cognitive radio using wavelet transform and deep learning for FSK modulated digital signals. *International Conference on Advanced Technologies for Communications*.
- [12] Sergienko A. (2012). *Digital Communications*, Saint Petersburg, 164 p.
- [13] Lyons, R. G. (2011). *Understanding digital signal processing*, 3d ed., Prentice Hall, Boston, 858 p.
- [14] Mikhalov G. A. (1999). *Parametric estimates by the Monte Carlo method*, Utrecht, 376 p.

## Method of Automatic Modulation Parameters Estimation of Short Duration Radio Signals With Binary Frequency Shift Keying

Nahorniuk O. A.

Method of automatically determining the carrier frequency, symbol rate, subcarrier separation frequency, manipulation index, and spectrum width of short duration radio signals with binary frequency manipulation are proposed in the article. The method combines four methods of frequency manipulation radio signals parameters estimation. To estimate the carrier frequency and the subcarrier spacing frequency, two well-known methods are used, which are based on the analysis of the characteristics of the amplitude-frequency spectrum of the radio signal and the instantaneous frequency histogram. To estimate the symbol rate, the method based on the analysis of the cyclostationary properties of the random function of the instantaneous frequency has been improved, and a new method based on the analysis of the peak values of the periodogram has been proposed. The improvement of the first method of symbol rate estimation consists in increasing the probability of correct identification of dominant harmonics in the amplitude-frequency spectrum of the centered normalized instantaneous frequency by preliminary low-pass filtering of the instantaneous frequency, increasing the dimension of the array of its values, and limiting the search band. The second method of symbol rate estimation is based on the search for peak values of the signal periodogram, which arise due to the presence of sections with alternating ones and zeros in the modulation bit sequences. It is shown that the analyzed characteristics have peak values whose frequencies (or frequency difference) are multiples of the symbol rate and frequency deviation. An approach to calculating parameters of frequency shift keying by combining data obtained in four ways is proposed. The efficiency of the method was verified by analyzing the radio signals obtained in the process of computer simulation, as well as real signals of command-telemetry radio lines of the unmanned aerial vehicle.

**Keywords:** radio signal; frequency shift keying; symbol rate; symbol period; deviation; spectrum; periodogram; automation; instantaneous frequency