

В.М. Котенко, к.т.н., доц.
Державний університет «Житомирська політехніка»
В.І. Коріненко, доц.
Ю.О. Кудряшов, ст. викладач
Житомирський військовий інститут імені С.П. Корольова

Аналіз спектрів багаточастотних фазоманіпульованих сигналів

Проведено спектральний аналіз багаточастотних радіосигналів, утворених шляхом фазової модуляції гармонічного коливання високої частоти фазоманіпульованим сигналом проміжної частоти. На основі отриманого виразу для спектра комплексної обвідної багаточастотного фазоманіпульованого сигналу на виході фазового модулятора проведено аналіз складових його спектра залежно від параметрів модуляції. Встановлено, що амплітуда складових спектра та їх кількість визначається параметрами функції Бесселя першого роду дійсного аргументу – індексу фазової модуляції. Величина індексу фазової модуляції залежить від амплітуди модулюючого фазоманіпульованого сигналу проміжної частоти та крутизни фазової модуляційної характеристики модулятора. Рознесення по частоті між суміжними складовими багаточастотного спектра однозначно визначаються проміжною частотою модулюючого фазоманіпульованого сигналу. Спектральні складові багаточастотного спектра становлять періодичні функції спектрів виду $\text{sinc}(x)$ та спектрів фазоманіпульованих сигналів, а ширина цих спектрів визначається тривалістю модулюючого фазоманіпульованого сигналу та тривалістю дискретності відповідно.

За характером зміни параметрів спектра від параметрів модуляції багаточастотний фазоманіпульований сигнал можна зарахувати до складних широкосмугових сигналів. Формування багаточастотних фазоманіпульованих сигналів здійснюється одноканальними пристроями. Практичне застосування досліджуваних сигналів надає можливість потенційно підвищити енергетичну та структурну скритності систем радіозв'язку, реалізовувати режими адаптації в системах радіолокації та визначити кратність фазової маніпуляції фазоманіпульованих сигналів телекомунікаційних систем під час організації технічного захисту інформації.

Ключові слова: *фазова маніпуляція; фазова модуляція; багаточастотний радіосигнал; енергетична та структурна скритність; технічний захист інформації.*

Актуальність теми. Використання складних широкосмугових радіосигналів з внутрішньо-імпульсною (внутрішньоперіодною) кутовою модуляцією (маніпуляцією) в телекомунікаційних системах, радіолокації та системах технічного захисту інформації, дослідження їх частотної та часової структури є складовою частиною загальної проблеми підвищення скритності, завадозахищеності та інформативності. Певну перевагу перед іншими видами складних сигналів з кутовою модуляцією має квазішумовий багаточастотний сигнал, утворений шляхом фазової модуляції гармонічного коливання високої частоти фазоманіпульованим сигналом проміжної частоти. Дослідженню частотної та часової структури, сформованому вказаним методом сигналу, в науково-технічній літературі приділялося мало уваги. Не висвітлюювані зв'язок параметрів спектра сформованого багаточастотного фазоманіпульованого сигналу з важливими практичними завданнями його застосування. Тому виникає завдання розробки математичного апарату дослідження спектра багаточастотного фазоманіпульованого сигналу, аналізу залежності складових багаточастотного спектра від параметрів модуляції та розробки пропозицій щодо практичного застосування.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Зокрема, принципам формування радіосигналів з кутовою модуляцією та адаптації режимів роботи радіотехнічних засобів присвячені роботи В.І. Гомозова [8], В.А. Таршина, В.С. Залевського [2] та ін. Задачі розпізнавання виду модуляції викладені в роботах В.О. Хорошко [7], О.А. Нагорнюка [5], М.В. Sabbar і А.Н. Rasool [11]. Задачі оцінки скритності каналів зв'язку та застосування складних широкосмугових радіосигналів у системах зв'язку досліджуються в роботах С.А. Макарова, О.В. Висоцького [4], П.Ю. Костенка [10] та ін.

Метою статті є дослідження спектра багаточастотного фазоманіпульованого сигналу, аналіз залежності складових багаточастотного спектра від параметрів модуляції та розробка пропозицій щодо практичного застосування.

Викладення основного матеріалу. Сигнали з фазовою маніпуляцією є коливаннями, які складаються із N елементарних радіоімпульсів однакової амплітуди U_c , довжини τ_c і частоти ω_c , примикаючи один до одного, причому фаза радіоімпульсів може приймати одне із можливих значень $\varphi_1, \dots, \varphi_N$ відносно фази

першого імпульсу або деякої опорної гармоніки тієї ж частоти [1]. У цьому випадку на одній несучій частоті під час використання фазової маніпуляції можливо передавати повідомлення від одного, двох, трьох і так далі джерел, підвищуючи суттєво швидкість передачі інформації в каналі зв'язку.

Якщо на одній несучій частоті дискретну інформацію передають від одного джерела інформації, то використовують однократну фазову маніпуляцію ($\varphi_k = 0, \pi$).

Для передачі інформації від двох джерел використовують двократну фазову маніпуляцію ($\varphi_k = 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$), при цьому від першого джерела фаза змінюється за законом $0, \pi$, а від другого – за законом $\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}$.

У загальному випадку на одній несучій частоті одночасно можна передати повідомлення від n джерел, використовуючи для цього n -кратну фазову маніпуляцію.

Процес формування багаточастотного фазоманіпульованого сигналу полягає у зазначеному далі. На вхід фазового модулятора подається гармонічне коливання високої частоти одиничної амплітуди вигляду

$$U_{\text{вх}}(t) = \exp j(2\pi f_0 t + \varphi_0), \quad (1)$$

де f_0, φ_0 – відповідно частота і початкова фаза високочастотного сигналу, а на модулюючий вхід подається фазоманіпульований сигнал одиничної амплітуди

$$U_M(t) = U_M \sum_{n=1}^N \sin(2\pi f_M(t - t_n) + \theta_n + \varphi_M), \quad (2)$$

де $U_M, f_M, \theta_n, \varphi_M$ – амплітуда, частота, початкова фаза дискрети фазоманіпульованого сигналу та початкова фаза фазоманіпульованого сигналу відповідно;

$t_n = (n-1)\tau_0$ – затримка в часі фазоманіпульованого сигналу на тривалість дискрети τ_0 ;

N – кількість дискрет фазоманіпульованого сигналу.

При взаємодії вхідного і модулюючого коливання у фазовому модуляторі на його виході сформується фазоманіпульований сигнал:

$$U_{\text{вих}}(t) = \exp j(2\pi f_0 t + \varphi_0) \sum_{n=1}^N \exp j(M_\varphi \sin(2\pi f_M(t - t_n) + \theta_n + \varphi_M)), \quad (3)$$

де $M_\varphi = S_\varphi U_M$ – індекс фазової модуляції;

$S_\varphi = \Delta u / \Delta \varphi$ – крутизна фазової модуляційної характеристики.

Для спрощення подальших розрахунків припустимо в (3), що $\varphi_0 = \varphi_M = 0$.

Розклавши (3) в ряд за функціями Бесселя першого роду $I_n(M_\varphi)$ n -порядку від дійсного аргументу M_φ і враховуючи, що [1]

$$e^{\pm jz \sin t} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} I_m(z) e^{\pm jmt}, \text{ а } -I_m(Z) = (-1)^m I_m(Z), \quad (4)$$

вираз (3) запишемо у вигляді:

$$U_{\text{вих}}(t) = I_0(M_\varphi) \exp\{j2\pi f_0 t\} + \sum_{m=-\infty}^{\infty} I_m(M_\varphi) \sum_{n=1}^N \exp jm(2\pi f_M(t - t_n) + \theta_n) + (-1)^m \sum_{m=-\infty}^{\infty} I_m(M_\varphi) \sum_{n=1}^N \exp -jm(2\pi f_M(t - t_n) + \theta_n). \quad (5)$$

Перетворимо вираз (5):

$$U_{\text{вих}}(t) = I_0(M_\varphi) \exp\{j2\pi f_0 t\} + \sum_{m=-\infty}^{\infty} I_m(M_\varphi) \exp j(2\pi m f_M t) \sum_{n=1}^N \exp -j(2\pi m f_M t_n - m\theta_n) + (-1)^m \sum_{m=-\infty}^{\infty} I_m(M_\varphi) \exp -j(2\pi m f_M t) \sum_{n=1}^N \exp j(2\pi m f_M t_n - m\theta_n). \quad (6)$$

Згідно з прямим перетворенням Фур'є спектр комплексної обвідної довільного сигналу визначається формулою:

$$\dot{G}(f) = \int_0^T \dot{U}_{\text{вих}}(t) \exp -j(2\pi f t) dt. \quad (7)$$

Застосувавши до кожної із трьох складових виразу (6) перетворення Фур'є, визначимо спектр комплексної обвідної багаточастотного фазоманіпульованого сигналу:

$$\begin{aligned}
\dot{G}(f) = & I_0(M_\varphi) \int_{-\frac{\tau_i}{2}}^{\frac{\tau_i}{2}} \exp\{j2\pi_0 f t\} \cdot \exp\{-j2\pi f t\} \cdot dt + \\
& + \sum_{m=-\infty}^{\infty} I_m(M_\varphi) \sum_{n=1}^N \exp\{-j(2\pi m f_M t_n - m\theta_n)\} \times \\
& \times \int_{-\frac{\tau_i}{2}}^{\frac{\tau_i}{2}} \exp\{j2\pi f_M t\} \cdot \exp\{-j2\pi f t\} dt + \\
& + \sum_{m=-\infty}^{\infty} I_m(M_\varphi) \sum_{n=1}^N \exp\{j(2\pi m f_M t_n - m\theta_n)\} \times \\
& \times \int_{-\frac{\tau_i}{2}}^{\frac{\tau_i}{2}} \exp\{-j2\pi f_M t\} \cdot \exp\{-j2\pi f t\} dt.
\end{aligned} \tag{8}$$

Провівши відповідні математичні перетворення, отримаємо кінцевий вираз для спектра комплексної обвідної багаточастотного фазоманіпульованого сигналу:

$$\begin{aligned}
\dot{G}(f) = & \tau_i I_0(M_\varphi) \operatorname{sinc}(\pi f \tau_i) + \\
& + \tau_i \sum_{m=1}^M I_m(M_\varphi) \operatorname{sinc}(\pi(mf_M - f)\tau_i) \sum_{n=1}^N \exp\{-j(2\pi m f_M (n-1)\tau_0 - m\theta_n)\} + \\
& + \tau_i \sum_{m=1}^M (-1)^m I_m(M_\varphi) \operatorname{sinc}(\pi(-mf_M - f)\tau_i) \sum_{n=1}^N \exp\{j(2\pi m f_M (n-1)\tau_0 - m\theta_n)\},
\end{aligned} \tag{9}$$

де $\operatorname{sinc}(x) = \sin x / x$.

Загальний наліз виразу (9) показує:

- амплітудно-частотний спектр багаточастотного фазоманіпульованого сигналу симетричний;
- амплітудно-частотний спектр складається з M спектральних складових, кількість яких визначається з виразу $M = 2(M_\varphi + \sqrt{M_\varphi}) + 1$;
- амплітудно-частотний спектр містить $(N-1)/2$ спектральних складових, розміщених симетрично відносно центральної спектральної складової;
- центральна складова АЧС розташована на частоті f_0 і являє собою функцію $\operatorname{sinc}(x)$;
- бокові спектральні складові розташовані на відстані від центральної складової на величину mf_M ;
- амплітуда спектральних складових для фіксованих величин M_φ визначається номером функції Бесселя;

Бесселя;

- загальна ширина спектра, багаточастотного фазоманіпульованого сигналу визначається з виразу $\Delta f_c \approx mf_M$.

З метою аналізу можливого практичного застосування багаточастотних фазоманіпульованих сигналів та способу їх формування проведено розрахунки за виразом (9) модулів спектрів комплексних обвідних багаточастотних сигналів на виході фазового модулятора, що наведено на рисунках 1–2 для вибраного початкового значення індексу модуляції M_φ та відповідного закону фазової маніпуляції.

На рисунку 1 наведено графіки розрахунків модуля спектра комплексної обвідної багаточастотного фазоманіпульованого сигналу з однократною фазовою маніпуляцією за законом зміни фази:

$$\theta_n \in [\pi, \pi, \pi, 0, 0, \pi, 0], \quad \tau_i = 4,9 \text{ мкс}, \quad f_M = 7,5 \text{ МГц}, \quad \tau_0 = 0,7 \text{ мкс}, \quad M_\varphi = 5 \text{ рад}.$$

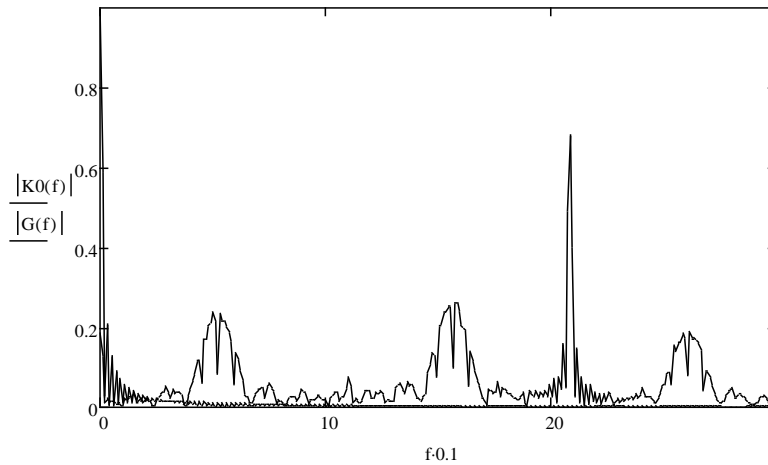


Рис. 1. Модуль спектра комплексної обвідної багаточастотного фазоманіпульованого сигналу при однократній фазовій маніпуляції

На рисунку 2 наведено графіки розрахунків модуля спектра комплексної обвідної багаточастотного фазоманіпульованого сигналу з двократною фазовою маніпуляцією для параметрів: $\tau_i = 10$ мкс, $f_M = 7,5$ МГц, $\tau_0 = 0,7$ мкс, $M_\varphi = 5$ рад. та при законі зміни початкової фази дискретного фазоманіпульованого сигналу $\theta_n \in [\pi/2, \pi, \pi/2, \pi, \pi/2, \pi, 3\pi/2, 0, 3\pi/2, 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2, 0]$.

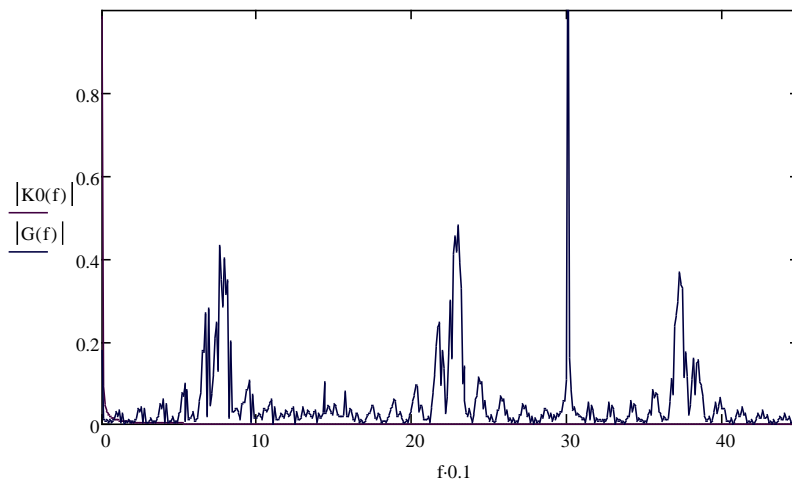


Рис. 2. Модуль спектра комплексної обвідної багаточастотного фазоманіпульованого сигналу на виході фазового модулятора при двократній фазовій маніпуляції

Аналіз спектра комплексної обвідної багаточастотного фазоманіпульованого сигналу, наведеного на рисунку 1, показує, що нульова, друга і четверта складові спектра становлять собою функцію виду $\text{sinc}(x)$. При цьому ширина спектра цих складових обернено пропорційна тривалості імпульсу τ_i фазоманіпульованого сигналу.

Перша та третя складові спектра комплексної обвідної фазоманіпульованого сигналу є спектр фазоманіпульованого сигналу, модульованого за законом $0, \pi$. При цьому ширина спектра визначається не тривалістю імпульсу τ_i , а тривалістю дискрети τ_0 і є обернено пропорційною її довжині.

Відстань між окремими складовими спектра на частотній осі визначається частотою модулюючої напруги f_M , а амплітуда спектральних складових залежить від величини індексу фазової модуляції M_φ .

Таким чином фазова маніпуляція при законі маніпуляції $0, \pi$ зникає в другій, четвертій та шостій складових спектра багаточастотного фазоманіпульованого сигналу, тобто в кожній парній складовій спектра.

Аналіз спектра комплексної обвідної багаточастотного фазоманіпульованого сигналу, наведеного на рисунку 2, показує, що нульова та четверта складові спектра багаточастотного фазоманіпульованого сигналу при законі маніпуляції $\theta_n \in [\pi/2, \pi, \pi/2, \pi, \pi/2, \pi, 3\pi/2, 0, 3\pi/2, 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2, 0]$ становлять собою функцію виду $\sin cx$. Це явище можна пояснити таким чином. Повна фаза четвертої складової спектра $\theta_4 = 4 * \pi/2 = 4 * \pi = 4 * 3\pi/2 = 2 * \pi = 4 * \pi = 6 * \pi = 0$. Таким чином, четверта складова спектра сигналу є згорнутим спектром фазоманіпульованого сигналу з двократною фазовою маніпуляцією, ширина якого обернено пропорційна тривалості сигналу τ_i .

З цієї ж причини перша, друга, третя, п'ята складові спектра багаточастотного фазоманіпульованого сигналу є спектром модулюючого фазоманіпульованого сигналу, ширина якого обернено пропорційна тривалості дискрет τ_0 і для заданих початкових даних становить $G_{fm}(f) = 1/\tau_0 = 1/0,7 = 1,43 \text{ МГц}$.

Відстань між боковими складовими та їх амплітуда визначаються середньою частотою модулюючого коливання f_M та індексом фазової маніпуляції M_ϕ відповідно.

Таким чином, аналізуючи другу та четверту складові спектра комплексної обвідної багаточастотного фазоманіпульованого сигналу, можна робити висновок про кратність фазової маніпуляції аналізованого повідомлення.

Нескладно математично показати, що якщо для передачі буде застосовуватися восьмикратна фазова маніпуляція, то згортка спектра проведитиметься у восьмій боковій складовій спектра комплексної обвідної багаточастотного фазоманіпульованого сигналу та на більш високих складових, кратних восьми.

Виявлені властивості згортки окремих складових спектру при зміні кратності фазової маніпуляції можна застосовувати в системах технічного захисту інформації для розпізнавання виду модуляції виявлених радіовипромінювань.

Відомо, що одним із показників, що визначає якість каналів зв'язку є їх скритність, яка включає енергетичну, структурну та інформаційну і залежить від виду модуляції радіосигналу, що переносить повідомлення [3, 6, 10].

Оціночний аналіз скритності при реалізації багаточастотних фазоманіпульованих сигналів для передачі цифрової інформації в системах зв'язку показує вказане далі.

Енергетична скритність багаточастотних фазоманіпульованих радіосигналів висока, оскільки енергія передачі одного біта інформації може бути відносно рівномірно розподілена між m -каналами, кількість яких визначається індексом фазової модуляції, а спектральна щільність корисного сигналу може не перевищувати рівень шумів у кожному каналі.

Структурна скритність багаточастотних фазомодульованих радіосигналів висока і визначається, по-перше, передачею інформації по m -каналам, кількість яких можна адаптивно змінювати, змінюючи індекс фазової модуляції, а по-друге, розносом по частоті частотних складових спектру при передачі логічного нуля та одиниці, яку також можливо адаптивно змінювати шляхом зсуву несучої частоти. Рознос по частоті спектральних складових групового спектра залежить від проміжної частоти модулюючого коливання. Амплітуда складових групового спектра визначається величиною індекса фазової модуляції.

Аналіз спектрів наведених на рисунках 1–2 показує, що груповий спектр сформованого сигналу утворений суперпозицією фазоманіпульованих і амплітудно модульованих радіосигналів, об'єднаних однією прямокутною огинаючою, що не призводить до фазових спотворень у трактах підсилення.

Інформаційна скритність радіосигналу може бути реалізована шляхом зсуву всього групового спектра на відповідну величину та передачею додаткової інформації шляхом кодування повідомлення в початковому модулюючому фазоманіпульованому сигналі. Кількість дискрет при цьому може бути довільною. Використання фазової модуляції гармонічного коливання надвисокої частоти простими або складними радіосигналами проміжної частоти є перспективним напрямом побудови уніфікованих пристроїв формування ансамблю простих і складних сигналів, необхідних для адаптації режиму зондування радіолокаційних станцій до радіочастотного стану і завдань, що вирішуються [2, 8].

Аналіз приведених спектрів багаточастотних фазоманіпульованих сигналів показує, що, використовуючи смугові фільтри, налаштовані на середню частоту складових групового спектра, є можливість отримати ансамбль простих радіоімпульсів та радіоімпульсів із внутрішньою фазовою маніпуляцією. При цьому зберігається принципова можливість оперативно змінювати їх параметри шляхом зміни величини індекса фазової модуляції та значення проміжної частоти початкового модулюючого радіосигналу. Технічно реалізувати формувачі багаточастотних фазоманіпульованих сигналів можливо аналоговими методами з використанням варакторів або цифровими методами, використовуючи цифрові технології SDR.

Висновки. На основі порівняльного аналізу відомих методів та пристроїв розпізнавання виду модуляції електромагнітного випромінювання та кратності фазової маніпуляції фазоманіпульованих сигналів, описаних у науково-технічній літературі, показано, що множення частоти довільного сигналу можливо здійснювати за допомогою фазових модуляторів, фізичні процеси в яких науково обґрунтовані, а технічна реалізація останніх є можливою.

На основі апробованого апарата математичного аналізу та теорії бesselевих функцій отримано аналітичний вираз для спектра комплексної обвідної фазоманіпульованого сигналу на виході фазового модулятора. Розроблено алгоритм розрахунків, розраховано і побудовано графіки модуля спектрів комплексної обвідної фазоманіпульованих сигналів для вибраного значення індексу фазової модуляції M_ϕ та закону фазової маніпуляції θ_n .

Проведений аналіз розрахованих спектрів комплексних обвідних фазоманіпульованих сигналів на виході фазового модулятора показав, що за різних законів фазової маніпуляції θ_n є суттєві відмінності в спектральній структурі сигналів, які можна використати для розпізнавання кратності фазової маніпуляції багатофазних фазоманіпульованих сигналів.

Висновки та перспективи подальших досліджень. На основі апробованого апарата математичного аналізу та теорії бesselевих функцій отримано аналітичний вираз для спектра комплексної обвідної багаточастотного фазоманіпульованого сигналу, розраховано і побудовано графіки модуля спектрів комплексної обвідної багаточастотних фазоманіпульованих сигналів для вибраного значення індексу фазової модуляції M_ϕ та закону фазової маніпуляції θ_n .

Проведений аналіз розрахованих спектрів комплексних обвідних багаточастотних фазоманіпульованих сигналів показав, що за різних законів фазової маніпуляції θ_n є суттєві відмінності в спектральній структурі сигналів, які можна використати для розпізнавання закону фазової маніпуляції багатофазних фазоманіпульованих сигналів, реалізовувати в технічних системах зв'язку та радіолокації для підвищення скритності та адаптації режимів випромінювання.

Список використаної літератури:

1. Технічний аналіз сигналів : навчальний посібник / В.М. Котенко, В.Д. Меленський, Ю.І. Запорожченко, Ю.О. Заєць. – Житомир : ЖВІ, 2018. – 412 с.
2. Дзідора О.М. Цифроаналоговий метод формування сигналів із адаптивно змінюваними параметрами / О.М. Дзідора, В.А. Таршин, Г.С. Залевський // Системи обробки інформації. – 2020. – № 2 (161). – С. 7–18.
3. Кувшинов О.В. Оцінка структурної скритності широкосмугових сигналів / О.В. Кувшинов, Р.М. Вознюк // Збірник наукових праць. – ВІПІ НТУУ «КПІ», 2011. – № 1. – С. 106–111.
4. Макаров С.А. Оцінка стійкості системи зв'язку та радіотехнічного забезпечення / С.А. Макаров, С.П. Бляк, О.В. Висоцький // Системи озброєння і військова техніка. – 2020. – № 1 (61). – С. 44–50.
5. Нагорнюк О.А. Метод розпізнавання виду модуляції радіосигналів космічних систем зв'язку в умовах апріорної невизначеності / О.А. Нагорнюк, Р.О. Авсієвич // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – 2023. – № 2 (47). – С. 19–24.
6. Організація військового зв'язку : навчальний посібник / В.Г. Шолудько, М.Ю. Єсаулов, О.В. Вакулєнко та ін. – Київ : Вид. дім «СКІФ», 2023. – 280 с.
7. Пошук та локалізація радіо закладних пристроїв : навчальний посібник / В.О. Хорошко, О.Д. Азаров, Г.О. Максименко, Ю.С. Яремчук. – Вінниця : ВНТУ, 2007. – 333 с.
8. Гомозов В.І. Експериментальне дослідження пристроїв формування і обробки БЧ ЛЧМ сигналів / В.І. Гомозов, В.Ф. Веселов, В.М. Котенко // НТ тематичний збірник. – Х. : ВІРТА, 1987. – Ч. 2. – С. 132–138.
9. Chen Z.A. Blind classification method of adaptive coding and modulation signals based on cumulants / Z.A. Chen // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – № 1738. DOI: 10.1088/1742-6596/1738/1/012015 10.
10. Kostenko P.Yu. Stealthiness of analytical chaotic signals / P.Yu. Kostenko, V.V. Slobodyanuk, A.N. Barsukov // Radioelectronics and Communications Systems. – 2017. – № 5. – P. 132–140.
11. Sabbar M.B. Automatic modulation classifier: review / M.B. Sabbar, A.H. Rasool // Iraqi Journal of Information and Communication Technology. – 2020. – № 3 (4). – P. 11–32. DOI: 10.31987/ijict.3.4.111.

References:

1. Kotenko, V.M., Melenskiy, V.D., Zaporozhchenko, Yu.I. and Zaiets, Yu.O. (2018), *Tekhnichniy analiz syhnaliv, navchalnyi posibnyk*, ZhVI, Zhytomyr, 412 p.
2. Dzihora, V.A., Tarshyn, H.S. and Zalevskiy, O.M. (2020), «Tsyfroanalogoviy metod formuvannia syhnaliv iz adaptivno zminiuvanymy parametramy», *Systemy obrobky informatsii*, No. 2 (161), pp. 7–18.
3. Kuvshynov, O.V. and Vozniuk, R.M. (2011), «Otsinka strukturnoi skrytnosti shyrokosmuhovykh syhnaliv», *Zbirnyk naukovykh prats*, VІPI NTUU «KPI», No. 1, pp. 106–111.
4. Makarov, S.A., Bieliak, S.P. and Vysotskiy, O.V. (2020), «Otsinka stiikosti systemy zviazku ta radiotekhnichnoho zabezpechennia», *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika*, No. 1 (61), pp. 44–50.

5. Nahorniuk, O.A. and Avsiievych, R.O. (2023), «Metod rozpoznavannia vydu moduliatsii radiosyhnaliv kosmichnykh system zviazku v umovakh apriornoї nevyznachenosti», *Suchasni informatsiini tekhnologii u sferi bezpeky ta oborony*, No. 2 (47), pp. 19–24.
6. Sholudko, V.H., Yesaulov, M.Yu., Vakulenko, O.V. et al. (2023), *Orhanizatsiia viiskovoho zviazku, navchalnyi posibnyk*, Vyd. dim «SKIF», Kyiv, 280 p.
7. Khoroshko, V.O., Azarov, O.D., Maksymenko, H.O. and Iaremchuk, Yu.Ie. (2007), *Poshuk ta lokalizatsiia radio zakladnykh prystroiv, navchalnyi posibnyk*, VNTU, Vinnytsia, 333 p.
8. Vesielov, V.F., Homozov, V.I. and Kotenko, V.M. (1987), «Eksperymentalne doslidzhennia prystroiv formuvannia i obrobky BCh LChM syhnaliv», *NT tematychnyi zbirnyk*, VIRTА, Kharkiv, Part 2, pp. 132–138.
9. Chen, Z. (2021), «A blind classification method of adaptive coding and modulation signals based on cumulants», *Journal of Physics: Conference Series*, No. 1738, doi: 10.1088/1742-6596/1738/1/012015.
10. Kostenko, P.Yu., Slobodyanuk, V.V. and Barsukov, A.N. (2017), «Stealthiness of analytical chaotic signals», *Radioelectronics and Communications Systems*, No. 5, pp. 132–140.
11. Sabbar, M.B. and Rasool, A.H. (2020), «Automatic modulation classifier: review», *Iraqi Journal of Information and Communication Technology*, No. 3 (4), pp. 11–32, doi: 10.31987/ijict.3.4.111.

Котенко Володимир Миколайович – кандидат технічних наук, доцент Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0009-0003-4177-6841>.

Наукові інтереси:

- підвищення інформативності, заводозахисності та скритності радіотехнічних систем на основі формування і обробки складних широкосмугових сигналів;
- системи технічного захисту інформації.

E-mail: kik_kvm@ztu.tdu.ua.

Коріненко Вячеслав Іванович – доцент Житомирського військового інституту.

Наукові інтереси:

- інформативність та заводозахисність систем зв'язку.

Кудряшов Юрій Олександрович – старший викладач Житомирського військового інституту.

Наукові інтереси:

- інформативність та заводозахисність систем зв'язку.

Kotenko V.M., Korinenko V.I., Kudriashov Yu.O.

Analysis of spectra of multi-frequency phase-manipulated signals

A spectral analysis of multi-frequency radio signals generated by phase modulation of a high-frequency harmonic oscillation by a phase-manipulated intermediate-frequency signal was performed. Based on the obtained expression for the spectrum of the complex contour of the multi-frequency phase-manipulated signal at the output of the phase modulator, the components of its spectrum were analyzed depending on the modulation parameters. It was established that the amplitude of the components of the spectrum and their number in the spectrum are determined by the parameters of the Bessel function of the first kind of the real argument – the phase modulation index. The value of the phase modulation index depends on the amplitude of the modulating phase-manipulated intermediate frequency signal and the steepness of the phase modulation characteristic of the modulator. The frequency difference between adjacent components of the multi-frequency spectrum is uniquely determined by the intermediate frequency of the modulating phase-manipulated signal. The spectral components of the multi-frequency spectrum are periodic functions of sinc(x) spectra and spectra of phase-manipulated signals, and the width of these spectra is determined by the duration of the modulating phase-manipulated signal and the duration of the discrete time, respectively.

According to the nature of the change of the spectrum parameters from the modulation parameters, the multi-frequency phase-manipulated signal can be classified as a complex broadband signal. Formation of multi-frequency phase-manipulated signals is carried out by single-channel devices. The practical application of the studied signals provides an opportunity to potentially increase the energy and structural stealth of radio communication systems, implement adaptation modes in radar systems, and determine the multiplicity of phase manipulation of phase-manipulated signals of telecommunication systems when organizing technical information protection.

Keywords: phase manipulation; phase modulation; multi-frequency radio signal; energy and structural stealth; technical information protection.

Стаття надійшла до редакції 17.10.2024.