

УДК 621.372

А. П. Бондарев, д. т. н., доц.;

Б. А. Мандзій, д. т. н., проф.;

І. П. Максимів, асп.

ДЕТЕКТУВАННЯ БАГАТОПОЗИЦІЙНИХ ФМ СИГНАЛІВ ЗА НИЗЬКОГО ВІДНОШЕННЯ СИГНАЛ/ШУМ

Розглянуто можливість інженерної реалізації приймання радіосигналів з багатопозиційною фазовою маніпуляцією за низького значення відношення сигнал/шум.

Вступ

Безпровідний зв'язок є на сьогоднішній день однією з найдинамічніших областей у галузі телекомунікацій. Протягом останнього десятиріччя зросла інтенсивність науково-дослідницької діяльності у цій галузі, яка прискорила її розвиток. Результати досліджень останнього десятиріччя демонструють значні перспективи розвитку бездротових каналів зв'язку.

Стрімке зростання попиту на цифрові канали передавання інформації спонукає до використання спектрально-ефективних методів модуляції, призначених для зменшення спектрального перевантаження каналів зв'язку.

Сигнали з багатопозиційною фазовою маніпуляцією (ФМ) широко застосовують у сучасних безпровідних системах передавання інформації, таких як CDMA, EDGE і транкінгові мережі (система TETRA).

Для детектування ФМ сигналу в сучасних цифрових приймачах широко застосовують пристрій фазового автоматичного підстроювання частоти (ФАПЧ), який визначає якість приймання та працездатність приймача. Проте, коректне детектування сигналів можливе тільки за високого відношення сигнал/шум (ВСШ) на вході приймача.

Якщо зменшити необхідний мінімальний рівень відношення сигнал/шум, то збільшиться місткість системи. Методи зменшення необхідного мінімального відношення сигнал/шум зі збереженням задовільної якості приймання сигналу є важливим науково-технічним завданням. Наукові роботи з нелінійного аналізу пристрою ФАПЧ [1, 2] та побудова на його основі демодуляторів свідчать про актуальність цього напрямку досліджень для забезпечення сучасних вимог щодо зв'язку з рухомими об'єктами та зменшення потужності радіосигналів.

У статті досліджено спосіб забезпечення задовільної якості передавання ФМ сигналів навіть за недопустимо малих для звичайних систем відношень сигнал/шум.

Постановка проблеми

Особливістю суміші гармонічного сигналу з шумом є те, що розподіл густини імовірності фази такої суміші, який за великих значень відношення сигнал/шум є наближеним до нормального, а зі зменшенням значення наближається до рівномірного (рис. 1). Це призводить до виникнення аномальних стрибків фази в моменти комутації у приймачі (рис. 2). Під час стрибка фази сигналу на величину $\Delta\varphi$ стрибок миттєвого значення фази суміші у різних реалізаціях може набувати довільних значень, приклад, менших ($\Delta\varphi_1$), або навіть протилежно спрямованих ($\Delta\varphi_2$). Такі аномальні стрибки фази в моменти комутації неможливо усунути жодною фільтрацією після фазового детектора (ФД), що становить одну з проблем приймання ФМ сигналів за низького ВСШ.

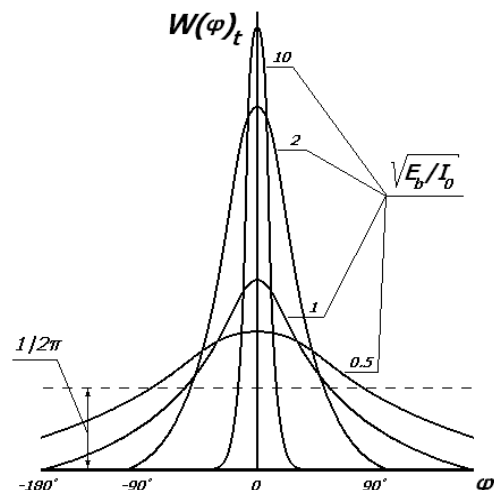


Рис. 1. Графік залежності зміни розподілу густини ймовірності фази суміші сигнал/завада в залежності від значення ВСШ (E_b/I_0)

Основним джерелом порогового обмеження завадостійкості є обмеженість робочої ділянки детекторної характеристики ФД. Зрив синхронного режиму, який унеможливує детектування, відбувається внаслідок того, що сумарна похибка синхронізації (статична, динамічна і шумова) виходить за межі цієї робочої ділянки ($\pm\pi/2$). У класичному пристрої ФАПЧ це викликає необхідність пошуку компромісу між завадостійкістю (статистична складова похибки) та динамічними властивостями пристрою (динамічна складова).

Модифікований пристрій ФАПЧ

Підвищення стійкості ФАПЧ до шуму та детермінованих завад без зміни динамічних властивостей може бути реалізовано за допомогою модифікованого пристрою, описаного в роботі [3] (рис. 3). У цьому пристрої, вузькосмуговий фільтр (ВСФ) зменшує різницю фаз коливань на входах фазового детектора (ФД). Після проходження сигналу через ФД у межах робочої ділянки детекторної характеристики його рівень відтворюється з допомогою активного фільтра верхніх частот (ФВЧ). Запропонована схема модифікованого пристрою ФАПЧ відрізняється від класичного аналогу тим, що перед фазовим детектором в ньому розташовується вузькосмуговий фільтр, а після ФД — фільтр верхніх частот.

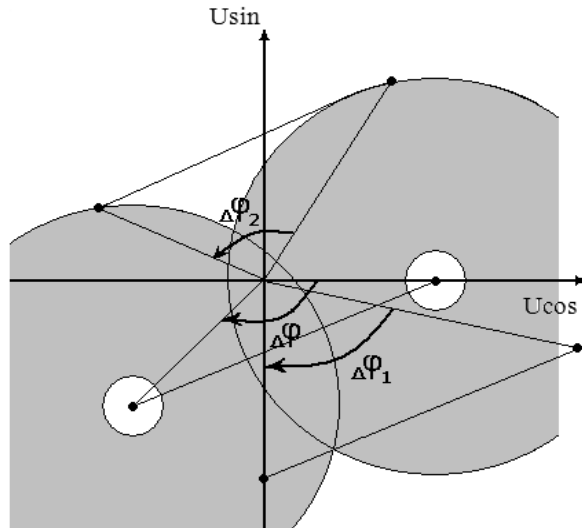


Рис. 2. Зміна квадратурних складових 8PSK сигналу на вході вузькосмугового фільтра у момент комутації за низького ВСШ

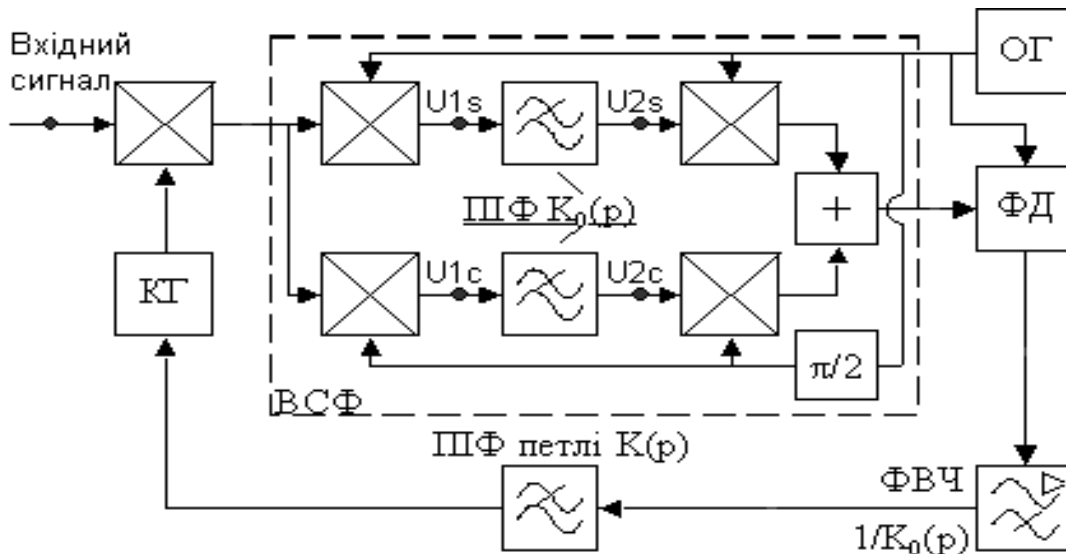


Рис. 3. Структурна схема модифікованого синхронного фазового детектора:

U_s і U_c — синфазна та квадратурна складові напруги біполярного сигналу

ВСФ має задовольняти такі умови: резонансна частота збігається із частотою опорного генератора (ОГ); смуга пропускання значно вужча від смуги входних пристроїв (зокрема вужча спектральної смуги входного сигналу); коефіцієнт передавання на частотах, далеких від резонансної, не дорівнює нулеві.

За виконання цих умов у моменти комутації фази входного сигналу, на виході ВСФ спостерігається зменшений стрибок фази з подальшим повільним наростанням (рис. 4). Зменшений вузькою смугою ВСФ, шум не виводить фазу сигналу за межі одного октанту. За таким самим законом змінюється напруга на виході ФД.

Такий ВСФ реалізовано як синхронно-фазовий фільтр, у квадратурних каналах якого

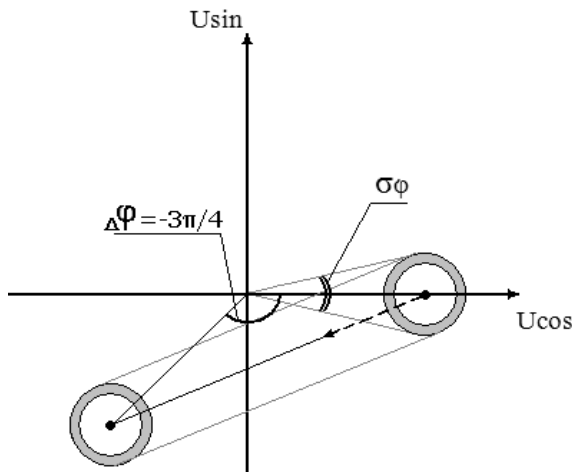


Рис. 4. Зміна квадратурних складових 8PSK сигналу на виході вузькосмугового фільтра у момент комутації

діл навіть за великих значень інтенсивності шуму, а, отже, напруги у точках 1с та 1s (рис. 3) також розподілені за законом Гауса.

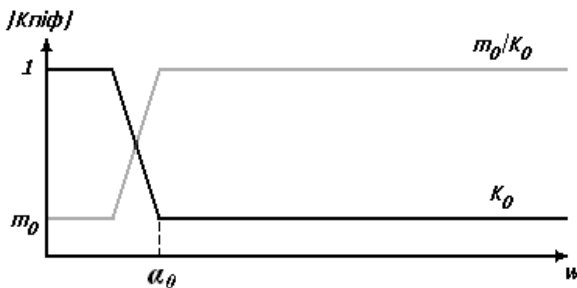


Рис. 5. Передавальні характеристики ВСФ (темний) та корегувального ФВЧ (світлий)

використані однакові пропорційно-інтегрувальні фільтри (ПФ) з комплексною частотною характеристикою (КЧХ)

$$K_0 j\omega = \frac{1 + j\omega m_0 T_0}{1 + j\omega T_0} \quad (1)$$

і, відповідно, з перехідною характеристикою

$$g_0 t = 1 - 1 - m_0 e^{-\alpha_0 t}, \quad (2)$$

де $\alpha_0 = 1/T_0$ — смуга пропускання ПФ, m_0 — коефіцієнт пропорційності ПФ.

Модуль КЧХ (1) є близьким до одиниці у діапазоні частот від 0 до α_0 та близьким до m_0 на частотах, вищих від α_0/m_0 . Частота α_0 обирається у декілька разів меншою від частоти маніпуляції фази.

Важливою особливістю вхідної суміші є те, що її квадратурні складові мають нормальний розподіл навіть за великих значень інтенсивності шуму, а, отже, напруги у точках 1с та 1s (рис. 3) також розподілені за законом Гауса.

Передавальна характеристика корегувального ФВЧ є оберненою до характеристики фільтрів у квадратурних каналах ВСФ (рис. 5). Внаслідок цього напруга на виході майже точно відтворює зміни фази вхідного сигналу навіть за малого відношення сигнал/шум.

Для дослідження та кількісної оцінки впливу нелінійних явищ на динамічні характеристики модифікованого пристрою ФАПЧ та обмежень на його параметри і можливості підвищення завадостійкості розроблено його математичну модель у вигляді такої системи алгебраїчних та диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} u_{1S} = \sin \phi t + \phi_0 t + \phi_n t ; & u_{1C} = \cos \phi t + \phi_0 t + \phi_n t ; \\ dy_{2S}/dt = \alpha_0 [1 - m_0 u_{1S} - y_{2S}] ; & u_{2S} = y_{2S} + m_0 u_{1S} ; \\ dy_{2C}/dt = \alpha_0 [1 - m_0 u_{1C} - y_{2C}] ; & u_{2C} = y_{2C} + m_0 u_{1C} ; \\ \phi_2 = \arctg u_{2S}/u_{2C} ; & u_3 = F \phi_2 ; \\ dy_4/dt = -\alpha_0 [y_4 + 1 - m_0 u_3] / m_0 ; & u_4 = y_4 + u_3 / m_0 ; \\ dy_5/dt = \alpha [1 - m u_4 - y_5] ; & u_5 = y_5 + m \cdot u_4 ; \\ d\phi/dt = \Omega_{II} - \Omega_{YA} u_5. \end{cases} \quad (3)$$

У системі рівнянь (3) індекси змінних відповідають точкам на схемі (рис. 3), всі напруги нормовані до максимально можливої напруги на виході ФД. Впроваджені змінні

$$y_{2S} = u_{2S} - m_0 u_{1S}; \quad y_{2C} = u_{2C} - m_0 u_{1C}; \quad y_4 = m_0 u_4 - u_3; \quad y_5 = u_5 - m_0 u_4$$

є визначальними змінними лінійних фільтрів, які описують стан реактивних елементів цих фільтрів. Параметри $\alpha = 1/T$ та $\alpha_0 = 1/T_0$ — смуги пропускання ПФ петлі та каналів ВСФ відповідно; $F(\phi_2)$ — детекторна характеристика ФД; Ω_{YA} — смуга утримання пристрою за відсутності збурень; $\phi(t)$ — миттєва фазова похибка синхронізації з носійним сигналом; $\phi_0(t)$ — змінна у відповідності до інформаційних посилок фаза сигналу; $\phi_n(t)$ — перерахована у фазовий шум канална шумова завада; $\phi_2(t)$ — різниця фаз сигналів на входах ФД.

Систему рівнянь (3) було розв'язано числовим методом для розімкнутої петлі ФАПЧ, тобто для випадку від'єданого входу керованого генератора, якому відповідає відсутність останнього рівняння в (3).

Імітаційне моделювання

Імітаційне моделювання проведено для випадків моделювання сигналу QPSK, OQPSK та 8PSK маніпуляцією. З результатів моделювання, показаних на рис. 6, випливає, що закон зміни фази сигналу на вході ФД у вигляді невеликого стрибка та повільного наростання (темні лінії) залишається незмінним навіть за таких високих рівнів шуму, за яких реалізації, що відповідають різним значенням фази вхідного сигналу практично неможливо розрізнити.

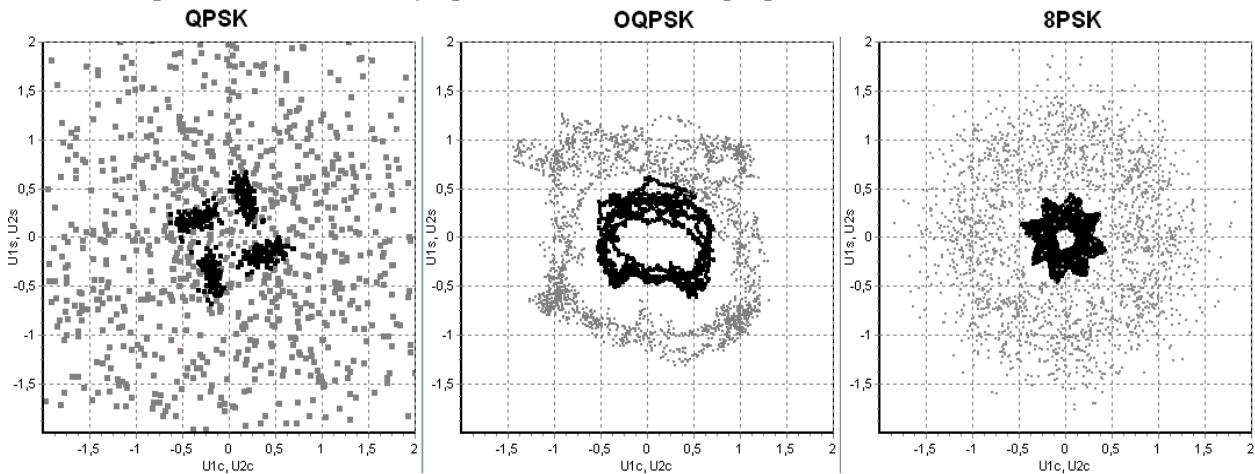


Рис. 6. Фазові портрети вхідного (світлі) та вихідного(темні) сигналів ВСФ за умов низького відношення сигнал/шум

Аналіз процесу детектування великої кількості тривалих реалізацій за однакових низьких ВСШ на входах класичного та модифікованого пристроїв ФАПЧ показав, що для QPSK і OQPSK модуляції класичний пристрій помилково приймає біля 25 % послань, а модифікований — біля 8 %, для 8PSK модуляції імовірність бітових помилок у класичному пристрої становить біля 35 % послань, а у модифікованому — менше 7 %.

Висновки

Показано можливість інженерної реалізації детектування ФМ-сигналів за умов низького відношення сигнал/шум.

Проведене імітаційне моделювання модифікованого СФД виявило можливість збільшення завадостійкості приймання сигналів з фазовою маніпуляцією та здатність модифікованого ФАПЧ до детектування ФМ сигналів навіть у випадку, коли потужність сигналу є меншою від потужності завади.

Імітаційне моделювання проведено для таких видів фазової маніпуляції, як QPSK, OQPSK та 8PSK.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Стеклов В. К. Системы фазовой автоподстройки с дифференциальными связями / С. Н. Скляренко, Б. Я. Костик. — К. : Техніка, 2003. — 328 с.
2. Бондарев А. П. Теоретичні засади аналізу завадостійкості пристроїв синхронізації / А. П. Бондарев. — Львів. : Вісник НУ «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації, 2004. — № 508. — С. 3—18.
3. Пристрій фазового автопідстроювання частоти / Бондарев А. П., Мартинів М. С. // Патент України на винахід № 66435. — Бюл. № 5, 2004.

Надійшла до редакції 27.01.10
Рекомендована до друку 12.02.10

Бондарев Андрій Петрович — доцент, **Мандзій Богдан Андрійович** — професор, **Максимів Іван Петрович** — аспірант.

Кафедра теоретичної радіотехніки та радіовимірювань, НУ «Львівська політехніка»