

Усередині однорідних груп були сформовані дрібніші однорідні групи (по два КО по близькості сукупності впливу чинників на зміну якісних показників). Це дозволило зменшити усереднення результатів моделювання і підвищити таким чином його точність. Кожному КО в просторі чинників відповідає точка. Критерієм схожості може бути відстань між точками КО, які порівнюються між собою.

Якщо продовжити дослідження, то можна для кожного класу об'єктів знайти відповідну математичну модель і аналогічним чином отримати подальше ділення об'єктів на підкласи.

Література

1. Ивахненко А.Г. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным / А.Г. Ивахненко, А.А. Юрачковский. – М.: Радио и связь, 1981. – 120 с.
2. Кривуца В.Г. Імітаційне моделювання та прогнозування : підручник для ВНЗ / В.Г. Кривуца. – К.: НАУ, 2000. – 205 с.
3. Управління телекомунікаціями із застосуванням новітніх технологій : – підручник для ВНЗ / [В.Г. Кривуца, В.К. Стеклов, Л.Н. Беркман та інші.]. – К.: Техніка, 2007. – 384 с.

УДК 621.376.43

Хахлюк О.А. (Алкатель-Луцент),

Щербина І.С. к.т.н.; Зінченко О.В.; Єфремов О.С. (ДУІКТ)

ДО ПИТАННЯ ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ДЕМОДУЛЯТОРІВ БАГАТОПОЗИЦІЙНИХ СИГНАЛІВ ІЗ ФРМ-2

Хахлюк О.А., Щербина І.С., Зінченко О.В., Єфремов О.С. До питання підвищення завадостійкості демодуляторів багатопозиційних сигналів із ФРМ-2. Розглянуто поєднання високої стійкості по відношенню до флуктуаційного шуму і нечутливості до неузгодження частоти несучого коливання, що представляє значний практичний інтерес автокореляційної обробки сигналів ФРМ другого порядку.

Ключові слова: ДЕМОДУЛЯТОР, БАГАТОПОЗИЦІЙНИЙ СИГНАЛ, ФЛУКТУАЦІЙНИЙ ШУМ, АВТОКОРЕЛЯЦІЙНА ОБРОБКА СИГНАЛІВ

Хахлюк А.А., Щербина И.С., Зинченко О.В., Ефремов А.С. К вопросу повышения помехоустойчивости демодуляторов многопозиционных сигналов из ФРМ- 2. Рассмотрено сочетание высокой стойкости по отношению к флуктуационному шуму и нечувствительности к розогласованию частоты несущего колебания, которое представляет значительный практический интерес автокорреляционной обработки сигналов ФРМ второго порядка.

Ключевые слова: ДЕМОДУЛЯТОР, МНОГОПОЗИЦИОННЫЙ СИГНАЛ, ФЛУКТУАЦИОННЫЙ ШУМ, АВТОКОРРЕЛЯЦИОННАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

Khakhliuk O.A., Shcherbyna I.S., Zinchenko O.V., Iefremov O.S. To the question of increase of antijammingness of demodulators of multiposition signals from FRM- 2. Combination of high firmness is considered in relation to fluctuation noise and insensitivity to mismatched frequencies of bearing oscillation that envisages considerable practical interest of autocorrelation treatment of signals of FRM the second order.

Keywords: DEMODULATOR, MULTIPPOSITION SIGNAL, FLUCTUATION NOISE, AUTOCORRELATION TREATMENT OF SIGNALS

При аналізі завадостійкості автокореляційних демодуляторів сигналів із ФРМ-2 виникає ряд труднощів, пов'язаних з наявністю декількох нелінійних перетворень у відповідних алгоритмах обробки. Тому в теоретичних дослідженнях з цього питання, як правило, обмежуються одержанням оцінок імовірностей помилки [1].

Оцінку для ймовірності помилки абсолютно інваріантного автокореляційного демодулятора сигналів із ФРМ-2 є формула ймовірності помилки некогерентного демодулятора цих сигналів. Цей демодулятор призначений для роботи в каналі з відомою частотою сигналу, а його алгоритм базується на обчисленні тригонометричних функцій

другої різниці фаз через проєкції прийнятого сигналу на ортогональні опорні коливання. Завадостійкість даного субоптимального демодулятора можна розрахувати по отриманій у свій час Ю.А. Судаковим формулі для ймовірності відхилення більш ніж на $\pi/2$ другої різниці фази суміші гармонійного сигналу з відомою частотою і гауссівського білого шуму[1]:

$$p_{\text{н.о}} = \frac{1}{2} - \frac{\sqrt{\pi} h^3}{4} e^{-\frac{3}{2}h^3} \sum_{i=0}^{\infty} \left[I_i \left(\frac{h^2}{2} \right) + I_{i+1} \left(\frac{h^2}{2} \right) \right]^2 \times \left[I_{2i+0,5} \left(\frac{h^2}{2} \right) + I_{2i+1,5} \left(\frac{h^2}{2} \right) \right] \left[\frac{(-1)^i}{2i+1} \right]. \quad (1)$$

Оскільки алгоритм автокореляційного прийому із сигналів ФРМ-2 зі зменшенням бази $2FT$ вироджується в алгоритм некогерентного прийому сигналів із ФРМ-2 формула (1) може служити оцінкою знизу для завадостійкості абсолютно інваріантного демодулятора сигналів із ФРМ-2 при будь-якій базі $2FT$ (нижня оцінка). Крім того, по цій же причині очікується, що при малих базах ця оцінка буде досить точною для практичних задач.

Знайдемо наближений вираз для завадостійкості інваріантного до частоти сигналу автокореляційного демодулятора ФРМ-2 при довільній базі $2FT$ і порівняємо його з нижньою оцінкою (1).

Вихідним алгоритмом при аналізі є в даному випадку співвідношення у відповідності з яким у демодуляторі обчислюється величина

$$I = X_n X_{n-1} + Y_n Y_{n-1}, \quad (2)$$

де

$$\begin{aligned} X_n &= \int_0^T x_n(t) x_{n-1}(t) dt; & X_{n-1} &= \int_0^T x_{n-1}(t) x_{n-2}(t) dt; \\ Y_n &= \int_0^T x_n(t) x_{n-1}^*(t) dt; & Y_{n-1} &= \int_0^T x_{n-1}(t) x_{n-2}^*(t) dt. \end{aligned} \quad (3)$$

Аналогічні (3) випадкові величини вже розглядалися при вивченні завадостійкості автокореляційного демодулятора ФРМ-1. Якщо корисні сигнали на трьох сусідніх посилках однакові, тобто передана друга різниця фаз $\Delta^2\varphi=0$, і база системи досить велика, то випадкові величини (3) можна приблизно вважати незалежними нормальними випадковими величинами із середніми значеннями, рівними енергії сигналу, і з дисперсіями рівними $D=EN_0+N_0^2FT/2$. Для подальшого розрахунку представимо, як і раніш, квадратичну форму (2) у виді суми квадратів:

$$I = 0,25 \left[(X_n + X_{n-1})^2 + (Y_n + Y_{n-1})^2 - (X_n - X_{n-1})^2 - (Y_n - Y_{n-1})^2 \right] \quad (4)$$

Випадкова величина, аналогічна величині у квадратних дужках, розглядалася при дослідженні завадостійкості оптимального некогерентного демодулятора сигналів з однократною ФРМ-1. Повторюючи ті ж викладення, одержуємо, що шукана ймовірність помилки :

$$p_1^{(2)} \approx 0,5 \exp(-B^2/4D), \quad (5)$$

де

$$B = \sqrt{m^2(X_n + X_{n-1}) + m^2(Y_n + Y_{n-1})} = 2F; \quad D = 2EN_0 + N_0^2FT. \quad (6)$$

Підставивши (6) у (5), одержимо

$$p_1^{(2)} \approx \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{h^2}{2 + FT/h^2}\right). \quad (7)$$

Як видно, при $FT=2$ формула (7) дає занижені значення імовірностей помилки. Однак відмінність між ними не дуже значна. Моделювання автокореляційного прийому сигналів з однократною ФРМ-2 показало, що (7) дає наближене значення для ймовірності помилки абсолютно інваріантного до частоти несучого коливання демодулятора сигналів із ФРМ при різних базах від $FT=2$ до $FT=10$. Як видно, (7) дає вірогідну оцінку принаймні в діапазоні ймовірностей помилки $10^{-1} \dots 10^{-3}$ [2].

Розглянемо властивість абсолютної інваріантності до частоти несучого коливання, що досягається при автокореляційному прийомі сигналів із ФРМ-2. Порівняємо завадостійкість цього методу прийому з завадостійкістю автокореляційного прийому сигналів із ФРМ-1 при однаковій базі $2FT$ і відсутності частотного розлагодження. Для найбільш характерного значення $FT=2$ таке порівняння легко зробити. Як бачимо з порівняння, при відомій частоті сигналу ФРМ-2 програє ФРМ-1 приблизно 3дБ по енергії. Цей програш, однак, швидко знижується і перетворюється у виграш при відхиленні частоти від несучого коливання або тривалості затримки в автокореляторі від номінального значення. Наприклад, при відхиленні Δf несучого коливання на чверть частоти маніпуляції $\Delta f=1/4T$ автокореляційний демодулятор ФРМ-1 взагалі стає непрацездатним, а при відхиленні частоти на $\Delta f=1/6T$ його завадостійкість знижується приблизно на 3 дБ. У той же час автокореляційний демодулятор сигналів із ФРМ-2 абсолютно нечутливий до подібних розлагоджень частоти або еквівалентних їм змін тривалості затримки. Таким чином, при відхиленні частоти несучого коливання більше, ніж на $1/6T$, де T – тривалість послідовності сигналів, автокореляційний демодулятор ФРМ-2 перевершує автокореляційний демодулятор ФРМ-1 по параметрам завадостійкості [1].

Для детального аналізу порівняної завадостійкості автокореляційних демодуляторів ФРМ-2 і ФРМ-1 необхідно знати залежності ймовірностей помилок демодулятора ФРМ-1 від розстроювання частоти несучого коливання. Ці залежності виявляються, доволі громіздкими. Разом з тим достатньо для практики наближені співвідношення, які можна отримати, якщо у відомі формули для ймовірності помилки за відсутності розстроювання підставити замість відношення сигналу енергії до щільності шуму h^2 еквівалентне відношення $h_{\text{екв}}^2 = h^2 \cos^2 \Delta\omega T$, де $\Delta\omega$ – розстроювання частоти; T – тривалість елементарного сигналу.

Наприклад, при автокореляційному прийомі сигналів з однократною ФРМ-1 енергетична похибка такої оцінки не перебільшує 1 дБ при $FT < 10$, $h^2 \geq 4$ і $\Delta\omega T \leq \pi/4$.

Доволі значним виявляється також виграш ФРМ-2 в порівнянні з ЧМ. При ЧМ нечутливість до частоти несучого коливання досягається за допомогою так званого вузькосмугового прийому по огибаючій, яка представляє собою модифікацію автокореляційного прийому. Ймовірність помилки при цьому методі прийому

$$p_{\text{ЧМ}} \approx 0,5 \exp(-h^2/4). \quad (8)$$

Енергетичний виграш ФРМ-2 порівняно з ЧМ при невизначеній частоті несучого коливання складає близько 2,3 дБ. Це є серйозною перевагою ФРМ-2.

Ще більшого ефекту можна досягнути при використанні відносно інваріантних автокореляційних демодуляторів сигналів з ФРМ-2. Ймовірність помилки таких демодуляторів залежить від частоти несучого коливання, але в середньому виявляється менше ніж ймовірність помилки абсолютно інваріантних демодуляторів.

Найдемо середню ймовірність помилки $p_{\text{лсп}}^{(2)}$ багатозафазового автокореляційного демодулятора сигналів з ФРМ. В цьому демодуляторі відбувається автовибір сигналу на виході із n автокореляторів. Так як після автовибору автокорелятора з найбільшим вихідним значенням сигналу і визначення знаку цього сигналу додаткові помилки можуть з'явитися тільки в наслідок вихідних помилок які є на виході автокорелятора, шукана ймовірність дорівнює

$$p_{\text{лсп}}^{(2)} = 2p_{\text{авт}}(1 - p_{\text{авт}}), \quad (9)$$

де

$$p_{\text{авт}} = \int_0^{2\pi} p_1^{(1)}(\varphi)W(\varphi)d\varphi; \quad (10)$$

$p_1^{(1)}(\varphi)$ - ймовірність помилки автокореляційного прийому сигналів з однократною ФРМ-1 як функція відхилення різниці фаз φ між прямим і затриманим сигналами на вході

автокорелятора в результаті дії завад; $W(\varphi)$ – щільність імовірності відхилення різниці фаз φ .

По (9) і (10) можна розрахувати ймовірність помилки при будь-якій кількості автокореляторів і будь-якій базі системи. Від бази системи залежить $p_1^{(1)}(\varphi)$, а від числа автокорелятора – функція $W(\varphi)$ в (10).

Як видно рівень сигналу на виході автокорелятора при зміні частоти змінюється за косинусоїдальним законом, тому еквівалентне відношення сигнал/шум для автокорелятора пов'язане з відношенням сигнал/шум на вході демодулятора наступним чином

$$h_{\text{авт}}^2 = h^2 \cos^2 \varphi. \quad (11)$$

Таким чином, для знаходження функції у випадку $FT=2$ отримаємо

$$p_1^{(1)}(\varphi) = 0,5(1 + 0,25h^2 \cos^2 \varphi) \exp(-h^2 \cos^2 \varphi). \quad (12)$$

Будемо вважати далі, що відхилення фаз в результаті дії завад, рівне $\varphi = \Delta\omega T$, де $\Delta\omega$ – відхилення частоти сигналу від номінального, розподілено рівномірно на інтервалі $[0, 2\pi]$:

$$W(\varphi) = 1/2\pi. \quad (13)$$

При використанні n автокореляторів інтервал зміни відхилення фази в результаті дії завад $[0, 2\pi]$ складається з $2n$ однакових інтервалів довжиною π/n , всередині яких відношення сигнал/шум змінюється за законом (11). Із врахуванням цього, підставивши (12) і (13) в (10), отримаємо наступні вирази для середньої імовірності помилки на виході автокорелятора в n -канальному демодуляторі сигналів з однократною ФРМ-2 при базі $FT=2$:

$$p_{\text{авт}} = \frac{n}{2\pi} \int_{-\pi/2n}^{\pi/2n} \exp(-h^2 \cos^2 \varphi) \left(1 + \frac{h^2 \cos^2 \varphi}{4} \right) d\varphi. \quad (14)$$

Підставивши (14) в (9) отримаємо загальний вираз для шуканої ймовірності помилки. При числі каналів обробки $n > 3$ відносно інваріантний демодулятор сигналів з ФРМ-2 незначно відрізняється по завадостійкості від оптимального некогерентного і автокореляційного демодулятора сигналів з ФРМ-1.

Таким чином, якщо абсолютно інваріантний до частоти несучої коливання демодулятора сигналів з ФРМ-2 має майже таку ж завадостійкість, як оптимальний когерентний демодулятор сигналів ЧМ при точно відомій частоті, то відносно інваріантний демодулятор сигналів з ФРМ-2 наближається по завадостійкості до оптимального некогерентного демодулятора сигналів з ФРМ-1.

Висновок. Незвичайне поєднання високої стійкості по відношенню до флуктуаційного шуму і нечутливості до розстроювання частоти несучого коливання представляє значний практичний інтерес до автокореляційної обробки сигналів з ФРМ другого порядку.

Література

1. Окунев Ю. Б. Цифровая передача информации фазомодулированными сигналами / Ю.Б. Окунев. – М.: Радио и связь. – 1991. – 296 с.
2. Управління телекомунікаціями із застосуванням новітніх технологій : підручник для ВНЗ / [В.Г. Кривуца, В.К. Стеклов, Л.Н. Беркман та інші]. – К.: Техніка, 2007. – 384 с.