

ПИТАННЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ І ЗАВАДОСТІЙКОСТІ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ

У статті розглянуто питання підвищення точності і завадостійкості систем зв'язку, заснованих на використанні умовних імовірнісних характеристик і взаємозв'язків обвідної і фази адитивної суміші сигналів, що використовуються для обміну інформацією в системах зв'язку. Запропоновані імовірнісні характеристики сигналів і отримані оцінки дисперсій дають можливість підвищити стійкість і надійність роботи систем зв'язку. Системи зв'язку, часто працюють в умовах підвищеного шуму зі змінною інтенсивністю діючих перешкод. Отримані результати дозволяють створити режими аналізу і обробки сигналів, що забезпечують підвищення завадостійкої роботи систем зв'язку. Запропонований підхід дозволить оцінити реальне відношення сигнал/шум у даному каналі зв'язку і підвищити надійність його роботи.

Ключові слова: система зв'язку, щільність, широкосмуговий сигнал, часо-частотна область, гаусівський процес.

Вступ та постановка задачі. У теорії зв'язку, навігації, радіо- і гідролокації та при вирішенні багатьох інших завдань необхідно отримувати і використовувати оцінки частотно-часових параметрів прийнятих сигналів і, отже, вимірювати їх частоту, період або фазове зміщення. При цьому точність і завадостійкість роботи всієї системи залежить від ефективності використовуваних алгоритмів під час обробки прийнятих сигналів, мінімізації похибок оцінок частотно-часових параметрів. Теоретично потенційно найкращими є оцінки, отримані на основі методу максимуму функції правдоподібності, але його реалізація значно ускладнює структуру кореляційних і багатоканальних пристроїв [1–3]. Тому на практиці поширені пристрої, які використовують спрощені алгоритми роботи, підвищення ефективності яких і є основним предметом дослідження. Найчастіше частотно-часові

параметри сигналів на практиці оцінюють цифровими пристроями, які фільтрують досліджуваній сигнал і формують інтегральну оцінку результату усереднення. Підвищення точності та завадостійкості таких пристроїв за різних умов роботи є важливим завданням подальших досліджень.

Практична робота систем зв'язку виконується в умовах апріорної невизначеності характеру діючих завад і сформованого співвідношення сигнал/завада. Обмін інформацією між певним апаратом і наземною станцією забезпечує вимірювальна система, використовуючи радіолінію. Для підвищення точності і завадостійкості обробки результатів обміну інформацією, а також при оцінці характеристик сигналів слід додатково використовувати різні імовірнісні взаємозв'язки параметрів адитивної суміші. У даній роботі досліджуються ймовірні характеристики частотно-часових параметрів адитивної суміші гармонійного сигналу і вузькосмугового випадкового процесу. Ця частина теорії випадкових процесів є найменш вивченою, так як для опису характеру поведінки випадкової фази і випадкової частоти адитивної суміші, знаходження, зокрема, спектрально-кореляційних характеристик похідної випадкової фази потрібно оперувати з восьмимірною нормальною щільністю ймовірностей квадратурних складових квазігармонійного випадкового процесу і їх перших похідних.

Практика виконання подібних обчислень [4] показує, що навіть в окремих випадках вони виявляються трудомісткими, складними і не дозволяють розкрити фізичну сутність різних взаємозв'язків.

Загальна характеристика досліджуваних моделей випадкових процесів і статистичні характеристики випадкової фази. Вихідною моделлю досліджуваних випадкових процесів є адитивна суміш гармонійного сигналу і вузькосмугового випадкового процесу, центральна частота енергетичного спектра якого широко поширена на практиці, збігається з частотою гармонійного сигналу:

$$\begin{aligned} x(t) = s(t) + \xi(t) &= U_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + A(t) \cos[\omega_0 t + \theta(t)] = \\ &= U(t) \cos[\omega_0 t + \varphi(t)] = U(t) \cos \Phi(t) \end{aligned} \quad (1)$$

де U_m , ω_0 і φ_0 – амплітуда, кутова частота та початкова фаза сигналу, які в загальному випадку можуть бути модульовані корисним повідомленням, а $A(t)$ і $\theta(t)$ – обвідна і фаза випадкового процесу $\xi(t)$, $U(t)$, $\varphi(t)$ і $\Phi(t)$ – обвідна, випадкова фаза і повна фаза адитивної суміші. Найчастіше в радіотехнічній практиці випадковий процес $\xi(t)$ – це гаусівський стаціонарний процес з нульовим математичним очікуванням. Обґрунтуванням цього є той факт, що пристрої обробки адитивної суміші зазвичай більш вузькосмугові, налаштовуються під характеристики сигналу $s(t)$ і в порівнянні з широкосмуговими впливають випадковими сигналами в силу відомих явищ нормалізації, що є вузькосмуговими гаусівськими процесами.

Дана модель адитивної суміші досить добре досліджена [4], а основою випадкової функції, що становить предмет дослідження при передачі інформації в системах зв'язку, є фаза і миттєва частота, що пов'язана з повною фазою адитивної суміші відомим співвідношенням $\omega(t) = d\Phi(t)/dt = \omega_0 + \Omega(t)$, де $\Omega(t) = \varphi'(t)$ – випадкова частота, яка визначається через похідну фази адитивної суміші і характеризує швидкість її зміни. Випадковий характер поведінки фази $\varphi(t)$ призводить до того, що моменти переходу $x(t)$ через нульовий рівень коливання, визначаючи тим самим складову похибки при оцінці параметрів, що обумовлені шумом.

У загальному випадку аналізу адитивної суміші (1) досить повний ймовірнісний опис характеру зміни випадкової фази і частоти може бути отримано на основі відомої інформації

про спільну багатовимірну щільності розподілу обвідної адитивної суміші, фази і їх похідних. Дуже часто зустрічається випадок відсутності розладу між частотою сигналу $s(t)$ і центральною частотою енергетичного спектра квазігармонійного диференційного гаусівського шуму $\xi(t)$ така щільність розподілу приведена в [4] і з урахуванням норм, має вигляд:

$$\omega(V, V', \varphi, \Omega) = \frac{V^2}{4\pi^2} \exp\left[-\frac{1}{2}\left[V^2 + V_m^2 - 2VV_m \cos(\varphi_0 - \varphi)\right] - \frac{1}{2}\left[(V'_k)^2 + V_k^2 \Omega^2\right]\right], \quad (2)$$

де $V = U / \sigma_\xi$; $V_m = U_m / \sigma_\xi$; $V_k = U / \sigma_{k\xi}$; $V'_k = U' / \sigma_{k\xi}$; σ_ξ^2 і $\sigma_{k\xi}^2$ – дисперсії процесу $\xi(t)$ і його квадратурних складових похідних.

З цієї формули можна отримати щільності розподілу, що дозволяють характеризувати випадкову частоту і фазу статистично, визначаючи найбільш імовірні значення і інтенсивність їх розкиду, а також дослідити залежності від різних параметрів. Так з (2) можна отримати щільність розподілу фази, яка при стаціонарних флуктуаціях представляється рядом Фур'є

$$\omega(\varphi) = \frac{1}{2\pi} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} C_k \cos k(\varphi - \varphi_0) \right], \quad (3)$$

де $C_k = \frac{\Gamma(1+k/2)}{k! 2^{k/2}} V^k {}_1F_1\left(\frac{k}{2}; k+1; -\frac{V_m^2}{2}\right)$; $\Gamma(\cdot)$ – гамма-функція; ${}_1F_1(\cdot)$ – вироджена

гіпергеометрична функція. Імовірнісні характеристики фази використовуються при обробці і оцінці інформаційних параметрів сигналів в системах зв'язку.

Однією з можливостей підвищення точності оцінки параметрів є використання статистичного зв'язку фази або похідної фази з обвідної адитивної суміші, тому найбільший інтерес представляє дослідження статистичного зв'язку між обвідною і фазою сигналу.

Спільна щільність розподілу обвідної і фази суміші гармонійного сигналу і вузькосмугового шуму (1) визначається виразом [1]:

$$\omega(U, \varphi) = \frac{U}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{U^2 + U_m^2}{2\sigma^2}\right) \exp\left[\frac{UU_m}{\sigma^2} \cos(\varphi - \varphi_0)\right],$$

де U – амплітуда обвідної адитивної суміші з щільністю розподілу, що описана узагальненою щільністю розподілу Релея:

$$\omega(U) = \frac{U}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{U^2 + U_m^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{UU_m}{\sigma^2}\right),$$

де $I_0\left(\frac{UU_m}{\sigma^2}\right)$ – модифікована функція Бесселя нульового порядку від уявного

аргументу. Порівнюючи ці співвідношення для нормованих значень, помічаємо, що $\omega(V, \varphi) \neq \omega(V)\omega(\varphi)$, тобто це означає, що обвідна містить деяку інформацію про фазі, яку можна використовувати для підвищення точності оцінки інформаційних частотно-часових параметрів в системах зв'язку.

На практиці, з міркувань доцільності побудови конкретних пристроїв оцінки параметрів сигналів часто використовують амплітудне обмеження. При цьому відбувається втрата інформації про фазу, що укладена в обвідній. Для обліку цієї інформації і кількісної оцінки даної залежності слід звернутися до умовної щільності розподілу фази:

$$\omega_y(\varphi/V_m) = \frac{\omega(V, \varphi)}{\omega(V)} \exp[V_0 V_m \cos(\varphi - \varphi_0)] / 2\pi I_0(V_0 V_m), \quad (4)$$

де $\omega_y(V, \varphi) = \frac{V}{2\pi\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}(V + V_m - 2VV_m \cos(\varphi - \varphi_0))\right]$ – спільна щільність розподілу обвідної і фази при $V = V_0$ – нормованому значенні обвідної суміші на заданому рівні; $\omega(V) = V \exp[-\frac{1}{2}(V^2 + V_m^2)] I_0(V, V_m)$ – узагальнена щільність розподілу обвідної при $V = V_0$, бере участь у формуванні умовної щільності розподілу (4), в залежності від розглянутих змінних.

При аналізі $\omega_y(\varphi)$ і знаходженні числових характеристик, що визначають стійкість систем зв'язку при оцінці параметрів сигналів, скористаємося формулою складання функцій Бесселя [5]:

$$\exp[V_0 V_m \cos(\varphi - \varphi_0)] = 2 \sum_{k=1}^{\infty} I_k(V_0, V_m) \cos k(\varphi - \varphi_0),$$

де $I_k(x)$ – функція Бесселя k -го порядку від уявного аргументу, і представимо умовну щільність розподілу фази рядом Фур'є аналогічного (3):

$$\omega_y(\varphi) = \frac{1}{2\pi} [1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} C_{ky} \cos k(\varphi - \varphi_0)], \quad (5)$$

де $C_{ky} = I_k(V_0 V_m) / I(V_0 V)$.

За формою вираз (5) збігається з безумовним розподілом фази суміші (3), а відмінність полягає в вигляді коефіцієнтів C_{ky} , які в даному випадку визначаються двома параметрами V_0 і V_m . Звичайно, що і числові характеристики мають однаковий аналітичний вигляд. Умовна щільність розподілу фази суміші є асиметричною функцією в інтервалі $[\varphi_0 - \pi, \varphi_0 + \pi]$ і істотно залежить від V_0 . Введення амплітудних вибірок V_0 призводить до нової щільності розподілу фази з характеристиками, що позбавлені недоліків безумовного розподілу. При $V_m = 0$ $\omega_y(\varphi/V = V_0) = \omega(\varphi)$, тобто (5) переходить в рівномірну щільність розподілу фази адитивного шуму.

Для кількісної оцінки інтенсивності фазових флуктуації обчислимо умовну дисперсію:

$$\sigma_{\varphi y}^2 = \int_{\varphi_0 - \pi}^{\varphi_0 + \pi} (\varphi - \varphi_0)^2 \omega_y(\varphi/V) d\varphi = \frac{\pi^2}{3} + 4 \sum_{k=2}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k^2} C_{ky}, \quad (6)$$

яка відрізняється від безумовної лише видом коефіцієнтів C_{ky} . Графіки, розраховані по (6), представлені на рис. 1. З рис. 1 випливає, що, в залежності від заданого рівня обвідної і амплітуди сигналу, спостерігається зменшення середньоквадратичного значення фазових флуктуації, а отримавши практичне значення умовної дисперсії можна знайти відношення сигнал/шум.

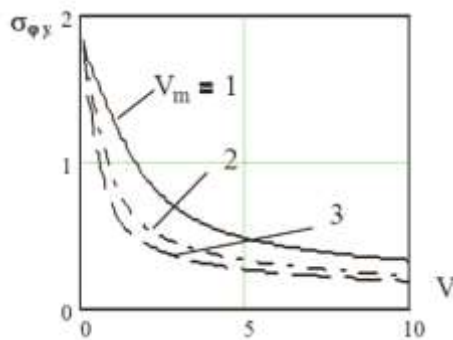


Рис. 1. Умовне середньоквадратичне значення фазових флуктуацій

Підвищення точності вимірювання за рахунок введення амплітудних вибірок оцінимо аналітично, склавши і дослідивши ставлення безумовної та умовної дисперсії:

$$Q = \frac{\sigma_{\phi}^2}{\sigma_{\phi y}^2} = \frac{1 + \frac{12}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k^2} C_k}{1 + \frac{12}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k^2} C_{ky}}, \quad (7)$$

що в кінцевому рахунку зводиться до аналізу поведінки відношення коефіцієнтів C_k / C_{ky} . Графік, що характеризує результати розрахунків за формулою (7), представлений на рис. 2.

З аналізу графіка можна зробити висновки, що введення амплітудних вибірок призводить до збільшення точності лише при малих відносинах сигнал/шум, тобто в області значень $V_m < 5$, коли проявляється нестационарний характер фазових флуктуацій.

Цей виграв становить більш ніж 3 рази, в залежності від величини порога, і супроводжується неминучою втратою ряду відліків значень фази в ті моменти часу, коли амплітуда адитивної суміші не перевищує пороговий рівень, а всі відліки фази протягом часу перебування безрозмірною обвідної суміші V нижче порога відкидаються.

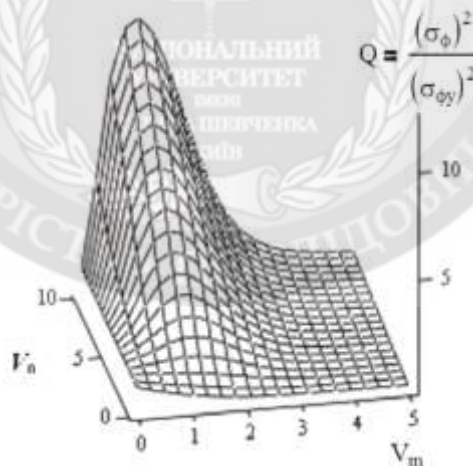


Рис. 2. Динаміка зміни ставлення дисперсій фазових флуктуацій при введенні амплітудних вибірок

Висновки. У статті досліджені імовірнісні характеристики сигналів і отримані оцінки дисперсій дають можливість підвищити стійкість і надійність роботи систем зв'язку Системи зв'язку, часто працюють в умовах підвищеного шуму зі змінною інтенсивністю діючих перешкод. Отримані нові результати дозволяють створити режими аналізу і обробки

сигналів, що забезпечують підвищення завадостійкої роботи систем зв'язку, оцінити реальне відношення сигнал/шум у використаному каналі зв'язку і підвищити надійність його роботи.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Куликов Е.И., Трифонов А.П. Оценка параметров сигналов на фоне помех. – М.: Сов. радио, 1978. – 296 с.
2. Тихонов В.И. Оптимальный приём сигналов. – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.
3. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. – М.: Радио и связь, 1991. – 608 с.
4. Тихонов В.И. Нелинейные преобразования случайных процессов. - М.: Радио и связь, 1986. - 259 с.
5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. - М.: Наука, 1978. - 831 с.

REFERENCES:

1. Kulikov E. I., Trifonov A. P. Ocenka parametrov signalov na fone pomeh. – М.: Sov. radio, 1978. – 296 s.
2. Tihonov V. I. Optimal'nyj prijom signalov. – М.: Radio i svjaz', 1983. – 320 s.
3. Tihonov V. I., Harisov V. N. Statisticheskij analiz i sintez radiotekhnicheskikh ustrojstv i sistem. – М.: Radio i svjaz', 1991. – 608 s.
4. Tihonov V. I. Nelinejnye preobrazovanija sluchajnyh processov. - М.: Radio i svjaz', 1986. -259 s.
5. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike dlja nauchnyh rabotnikov i inzhenerov. - М.: Nauka, 1978. - 831 s.

Рецензент: д.т.н., професор Мартинюк В.В., завідувач кафедри телекомунікацій та комп'ютерно-інтегрованих технологій Хмельницького національного університету.

к.т.н., доц. Карпова Л.В.

ВОПРОС ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ И ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ СВЯЗИ

В статье рассмотрены вопросы повышения точности и помехоустойчивости систем связи, основанных на использовании условных вероятностных характеристик и взаимосвязей огибающей и фазы аддитивной смеси сигналов, используемых для обмена информацией в системах связи. Предложенные вероятностные характеристики сигналов и полученные оценки дисперсий дают возможность повысить устойчивость и надежность работы систем связи. Системы связи, часто работают в условиях повышенной зашумленности с переменной интенсивностью воздействующих помех. Полученные результаты позволяют создать режимы анализа и обработки сигналов, обеспечивающих повышение помехоустойчивого работы систем связи. Предложенный подход позволит оценить реальное отношение сигнал/шум в используемом канале связи и повысить надежность его работы.

Ключевые слова: система связи, плотность, широкополосный сигнал, время-частотная область, гауссовской процесс.

Ph.D. Karpova L.V.

THE QUESTIONS OF IMPROVING THE ACCURACY AND NOISE IMMUNITY OF COMMUNICATION SYSTEMS

The article examines the questions of improving the accuracy and noise immunity of communication systems, based on the use of conditional probable characteristics and relationships of the circumflex phase and phase of the additive mixture of signals that are used for the exchange of information in communication systems. The proposed probable characteristics of the signals and the

obtained estimates of the variances provide an opportunity to improve the stability and reliability of communication systems. Communications systems often operate in conditions of high noise with variable intensity of influenced obstacles. The obtained results allow us to create modes of analysis and signal processing, providing improved error-correcting communication system. The proposed approach will allow to assess the actual signal/noise in the used communication channel and increase the reliability of its work.

Keywords: communication system, density, broadband signal, the time-frequency area, gaussi process.