

УДК 621.391.81

А.М. Захаров

Академія Військово-морських Сил імені П.С. Нахімова, Севастополь

МОДЕЛЬ ВИПАДКОВИХ ФАЗОВИХ ПЕРЕКРУЧУВАНЬ ДЛЯ ГІДРОАКУСТИЧНОГО ШИРОКОСМУГОВОГО СИГНАЛУ

Запропонована модель випадкових фазових перекручувань для широкосмугового сигналу, яка є процесом з незалежними випадковими природженнями. Розглядається оцінка впливу випадкових міжканальних відхилень в антенних решітках активних гідроакустичних станцій на відношення сигнал/перешкода. Визначені параметри випадкового процесу. Показано, що збільшення випадкових перекручувань приведе до суттєвого погіршення відношення сигнал/перешкода на виході кореляційного пристрою.

Ключові слова: широкосмуговий сигнал, фазове перекручування.

Вступ

Частотно-модульовані сигнали знаходять все більш широке застосування в радіолокаційних та в активних гідроакустичних станціях (ГАС). Одним з перспективних напрямків підвищення ефективності функціонування радіотехнічних систем є використання широкосмугових сигналів, розробка та застосування цифрових антенних решіток (АР) а також спеціалізованих електронно-обчислювальних систем. В зв'язку з цим, розробка цифрових методів формування складних частотно-модульованих сигналів та дослідження їх кореляційно-спектральних властивостей має актуальне значення як в гідроакустиці, так у інших радіотехнічних системах.

Постановка завдання дослідження

Відомо, що при некогерентній обробці сигналів з'являються втрати у вихідному відношенні сигнал/перешкода, що безпосередньо впливає на

ефективність роботи ГАС. Однією з причин цього є вплив випадкових фазових перекручувань, які виникають за рахунок випадкових відхилень аналогової частини тракту ГАС, розкиду амплітудно-частотних характеристик гідрофонів та ін.

В роботі [1] дана оцінка зниження вихідного відношення сигнал/перешкода при узгоджувальній фільтрації прийнятого вузькосмугового сигналу з зондувальним імпульсом відомої форми.

Показано, що в вузькосмуговому сигналі $s(t) = A(t) \cdot \cos[\omega_0 t + \psi(t)]$ огибаюча $A(t)$ та фаза $\psi(t)$ змінюється повільно у рівнянні з фазою $\omega_0 t$ на несучій частоті. Випадкові зміни фази такого сигналу на вході приводять до програшу по потужності вихідної напруги узгоджувального фільтру рівного $P_{ig} = \exp[-\sigma^2]$, де σ^2 - дисперсія сигналу. Програш складає $P_{ig} = (1,1; 1,2; 1,5)$ відповідно для середньоквадратичного значення фази $\sigma_\psi = (0,31; 0,43; 0,64)$.

Тому, припустимі випадкові перекручування фази не повинні перевищувати половини радіана або $\sigma_\psi \leq 30^\circ$.

Ефективна обробка широкосмугових гідроакустичних сигналів в таких умовах є актуальним завданням. Стаття присвячена розробці моделі випадкових міжканальних перекручувань у широкосмуговому сигналі та оцінки ступеня їх впливу на відношення сигнал/перешкода.

Результати досліджень

Зонduючий ЛЧМ-імпульс на інтервалі $t = \overline{0, T}$ з довільною огинаючою $U(t)$ формується [1 – 3] за співвідношенням:

$$s_{zd}(t) = U(t) \cdot \cos[2\pi f_0 t + \phi_{md}(t)]; \phi_{md}(t) = 2\pi \cdot \mu \cdot t; \quad (1)$$

$$f_{md}(t) = \frac{\phi'_{md}(t)}{2\pi} = 2\mu \cdot t,$$

де γ – коефіцієнт який приймає значення 2...3; f_0 –

несуча частота $\phi_{md}(t) = 2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot \left(\frac{t}{T}\right)^\gamma$;

$$f_{md}(t) = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \phi'_{md}(t) = \frac{\gamma}{T} \cdot \mu \cdot \left(\frac{t}{T}\right)^{\gamma-1};$$

Частота сигналу (1) змінюється за лінійним законом. Параметр μ визначається девіацією частоти f_{dv} з умов: $f_{md}(0) = 0$; $f_{md}(T) = f_{dv}$, тому сигнал (1) з девіацією частоти яка збільшується запишемо в вигляді:

$$s_{zd}(t) = U(t) \cdot \cos\left[2\pi\left(f_0 t + \frac{f_{dv}}{T} \cdot t^2\right)\right]; \quad (2)$$

$$\mu = \frac{f_{dv}}{T}; \quad t = \overline{0, T}.$$

В зв'язку з широким використанням засобів обчислювальної техніки в системах обробки сигналів доцільно ввести безрозмірний час $\varepsilon = \frac{t}{T}$ та час-

тоту $F = \frac{f}{f_{dk}}$, що дозволяє коректно виконувати перетворення параметрів та аргументів за різними законами. Частота дискретизації f_{dk} дорівнює подвійному значенню верхньої частоти f_{mx} , тому що гармонійні коливання на частотах $f \geq f_{mx}$ в дискретному вигляді не відрізняються від відповідних гармонік в діапазоні $f = (0 \div f_{mx})$.

При довільному законі модуляції фази $\phi_{md}(\varepsilon)$ з використанням безрозмірного часу та частоти складний сигнал (1) запишемо в вигляді:

$$s(\varepsilon) = U(\varepsilon) \cdot \cos[2\pi f_0 T \cdot \varepsilon + \phi_{md}(\varepsilon)]; \quad (3)$$

$$f_{md}(\varepsilon) = \frac{\phi'_{md}(\varepsilon)}{2\pi \cdot T}; \quad \varepsilon = \overline{0, 1}.$$

В якості основних параметрів випадкових процесів та сигналів, спектрів та кореляційних функцій доцільно використовувати частоту дискретизації f_{dk} та тривалість $N = T \cdot f_{dk}$ в відліках, і для переходу до цифрової форми відображення сигналів в моменти часу $t_n = n \cdot \Delta t = \frac{n}{f_{dk}}$ достатньо зробити заміну $\varepsilon_n = n / N$. Тому сигнал (3) в цифровому вигляді буде представлений співвідношеннями:

$$s(n) = U(n) \cdot \cos[2\pi F_0 \cdot n + \phi_{md}(n)]; \quad (4)$$

$$F_0 = \frac{f_0}{f_{dk}}; \quad n = \overline{0, N-1}.$$

Відповідно до принципу безперервності фазового спектру [4] випадкові зміни фази певним образом залежать від частоти. Достатньо зручною моделлю фазових перекручувань яка добре враховує фізичну природу сигналів є випадковий процес з незалежними прирощуваннями:

$$\Delta\phi(k) = \Delta\phi(k-1) + \Delta\phi_1; \quad \Delta\phi(0) = 0. \quad (5)$$

Основна ідея моделі є в тому, що на найбільшому інтервалі частоти фаза змінюється незначно. Розглянемо вказаний процес на прикладі цифрових сигналів $s(n)$ з частотою дискретизації $f_{dk} = 2 \cdot f_{mx}$, тривалості $N = T \cdot f_{dk}$ в відліках на інтервалі спостереження $t = \overline{0, T}$. Тоді спектр сигналу обмежується верхньою частотою $f_{ht} = \frac{1}{2} f_{dk}$ з інтервалом дискретизації $\Delta f_1 = f_{dk} / N$, при цьому фаза на нульовій частоті $\Phi(0) = 0$.

Дискретне перетворення Фур'є являє собою спектр $S(k)$ сигналу $s(n)$ з кроком дискретизації по частоті Δf_1 :

$$S(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \cdot e^{-j \frac{2\pi}{N} k \cdot n}; \quad f = (0 \div f_{mx}); \quad \Delta f_1 = \frac{f_{dk}}{N}; \quad (6)$$

$$f_k = k \cdot \Delta f_1 = \frac{k}{N} \cdot f_{dk}.$$

Випадкові фазові перекручування в каналах АР є незалежними випадковими прирощуваннями. Якщо прирощування $\Delta F(\omega)$ випадкових значень функції $\Phi(\omega + \Delta\omega) = \Phi(\omega) + \Delta\phi(\omega)$ розподілені по нормальному закону з нульовим математичним очікуванням, то в такому випадку отримуємо процес с незалежними випадковими прирощуваннями [5] (процес Н.Вінера). Фазові перекручування $\Phi(k)$ для довільної частоти $f_k = \frac{k}{N} f_{dk}$ має нормальне розподілення $N(0, \sigma_{\phi k})$, де $\sigma_{\phi k}$ - середньоквадратичне значення випадкової величини.

Визначимо фазові відхилення через помилки затримки Δn_k в відліках:

$$\Phi(f_0) = 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot \Delta n_0 \cdot \frac{1}{f_{dk}} = \frac{\pi}{2} \cdot \Delta n_0,$$

$$\sigma_{\Delta\phi 0} = \frac{\pi}{2} \cdot \sigma_{\Delta n 0}; \quad \sigma_{\Delta n 0} = \frac{2 \cdot \sigma_{\Delta\phi 0}}{\pi}. \quad (7)$$

Тоді можливо знайти параметри нормального розподілення випадкових прирощувань фази на інтервалі $\Delta\phi_1 = f_{dk} / N$, так як значення $\Phi(f_0)$ являє собою суму $N/4$ величин $\Delta\phi_1$. Дисперсія відхилення фази на частоті $f_0 = \frac{1}{4} f_{dk}$ обчислюється за співвідношенням:

$$D[f_0] = \frac{N}{4} D[\Delta\phi_1]; \quad D[\Delta\phi_1] = \frac{4 \cdot D[f_0]}{N};$$

$$\sigma_{\Delta\phi 0} = \frac{2 \cdot \sigma_{\Delta\phi 0}}{\sqrt{N}}. \quad (8)$$

Для імітаційного моделювання випадкових фазових перекручувань ширококутового сигналу зручно задатися помилками часових затримок $\sigma_{\Delta n 0}$ на частоті f_0 [6]. При довжині вибірки в N відліків отримуємо параметри нормального розподілення прирощувань. Використовуючи співвідношення (7) та (8) отримуємо параметри нормального розподілення прирощувань $N(0, \sigma_{\Delta\phi 1})$:

$$\sigma_{\Delta\phi 1} = \frac{2 \cdot \sigma_{\Delta\phi 0}}{\sqrt{N}} = \frac{\pi \cdot \sigma_{\Delta n 0}}{\sqrt{N}}. \quad (9)$$

З (9) видно, що використовуючи середньоквадратичне значення $\sigma_{\Delta n 0}$ помилки затримки на частоті $f_0 = f_{dk} / 4$ отримуємо середньоквадратичне значення прирощування фази $\sigma_{\Delta\phi 1}$ для одиничної смуги частот $\Delta f_1 = f_{dk} / N$. Для довільної частоти f_k фазові відхилення визначаються співвідношенням:

$$\Phi(k) = \Phi(k-1) + \Delta\phi_1; \quad \Delta\phi_1 = N(0, \sigma_{\Delta\phi 1}). \quad (10)$$

З (10) видно, що зі збільшенням частоти f_k фазові відхилення збільшуються за законом

$$\sigma_{\Delta\phi k} = \sigma_{\Delta\phi 0} \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot \Delta k}{N}},$$

але помилки затримок $\sigma_{\Delta n k}$ спадають за співвідношеннями $\frac{\sigma_{\Delta\phi k}}{\sigma_{\Delta n 0}} = \frac{\sqrt{N}}{2\sqrt{\Delta k}}$; $\Delta k = \left(k - \frac{N}{4}\right)$. На рис. 1 приведені графіки середньоквадратичних відхилень затримок $\frac{\sigma_{\Delta n k}}{\sigma_{\Delta n 0}}$ та фази $\frac{\sigma_{\Delta\phi k}}{\sigma_{\Delta\phi 0}}$ в залежності від відносної частоти $F_k = \frac{f_k}{f_0} = \frac{4 \cdot f_k}{f_{dk}}$ для робочої смуги сигналів $f_{wk} = \left(\frac{2}{8} \div \frac{3}{8}\right) f_{dk}$ яка використовується в ГАС.

Ехо-сигнали, які поступають в канали АР, відрізняються від зондуючого сигналу $s_{zd}(n)$ часовою затримкою η та випадковим набігом фази для кожної гармоніки ϕ_k .

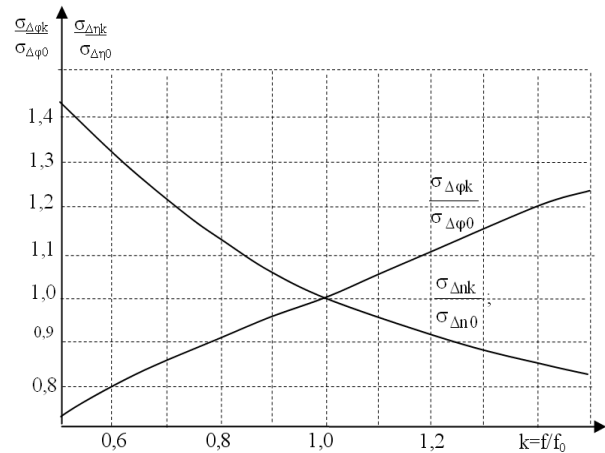


Рис. 1. Середньоквадратичні відхилення затримок

Прийнятий окремим гідрофоном АР сигнал $s(n)$; $n=0, N-1$ має спектр $S(k) = S_d(k) + j \cdot S_m(k)$. Тоді реалізацію вибірки сигналу можливо представити у вигляді суми гармонійних коливань з амплітудою $A(k)$ та початковою фазою $\phi_p(k)$ для частотних складових $f_k = (k/N) \cdot f_{dk}$:

$$s(n) = \sum_{k=0}^{N/2} A(k) \cdot \cos\left[2\pi \cdot \frac{k}{N} \cdot n + \phi_p(k)\right]; \quad (11)$$

$$A(k) = \sqrt{S_d^2(k) + S_m^2(k)}; \quad \phi_p(k) = \arctg \frac{S_m(k)}{S_d(k)}.$$

Сформуємо фазові перекручування [7] по випадковому процесу (5) з урахуванням співвідношень (8) та (9). Ці перекручування внесемо в спектр відомого сигналу $s(n)$ по співвідношенням:

$$S_d^{\Delta\phi}(k) = A(k) \cdot \cos[\phi_p(k) + \Delta\phi(k)] = S_d(k) \cdot \cos[\Delta\phi(k)] - S_m(k) \cdot \sin[\Delta\phi(k)]; \quad (12)$$

$$S_m^{\Delta\phi}(k) = A(k) \cdot \sin[\phi_p(k) + \Delta\phi(k)] = S_d(k) \cdot \sin[\Delta\phi(k)] + S_m(k) \cdot \cos[\Delta\phi(k)].$$

Спектр (12) шляхом обчислення зворотного перетворення Фур'є перетворюються до часової області ширококутового сигналу $s^{\Delta\phi}(n)$ з випадковими фазовими перекручуваннями.

Для оцінки впливу фазових перекручувань на модельні сигнали багатоканальної антенної решітки активної ГАС формувались ширококутові ЛЧМ-сигнали згідно (4) в діапазоні частот 12...18 кГц, з шириною смуги частот $f_{wk} = 6$ кГц та $\gamma = 2$ що відповідає смузі для безрозмірних частот $f_{wk} = (2f_{dk} / 8 \div 3f_{dk} / 8)$.

При моделюванні відбитого ехо-сигналу було враховано зміна масштабу часу що виникає за рахунок руху цілі (ефект Доплера), багатопроменевість розповсюдження акустичних хвиль в морському середовищі, накладалась шумова та ревербераційна перешкода (об'ємна реверберація). АР яка приймає ехо-сигнали являє собою мультиплікативну антену («внутриклассный» корелятор) [8] в якій виконується фазування прийнятих сигналів яке полягає у когерентному накопиченні КФ та компенсації часових затримок для усіх напрямків огляду простору).

Прийнятий ехо-сигнал приймається гідрофонами АР з відповідними затримками. На спектри відбитих сигналів в кожному каналі по співвідношенням (12) вводились фазові перекручування. По отриманим модельним сигналам здійснювалась попарна кореляційна обробка та оцінювалось відношення сигнал\перешкода на виході кореляційного пристрою.

Комп'ютерне моделювання методу попарної кореляційної обробки показало, що фазові перекручування приводять до розкореляції сумарної КФ (зниження відношення сигнал\перешкода на виході кореляційного пристрою) при випадковому відхиленні затримки $\sigma_{\Delta\eta_0} \geq 1/2$. Це пояснюється виходячи з характеру зміни кореляційної функції ЛЧМ-сигналу в указаній смузі частот, яка змінює знак між нульовим та першим відліками КФ.

Таким чином, враховуючі викладене в [1], оцінки впливу фазових перекручувань для вузькосмугових та широкосмугових сигналів в цілому співпадають, що підтверджує відповідність моделі фазових перекручувань реальним умовам функціонування радіотехнічних систем.

Висновки

1. В статті представлена модель випадкових фазових відхилень широкосмугового сигналу за ос-

нову якої обраний процес незалежних випадкових прирощувань які розподілені по нормальному закону з нульовим математичним очікуванням.

2. Попередні результати показують що втрати внаслідок випадкових відхилень КФ зі збільшенням кількості гідрофонів приводять до суттєвого зниження відношення сигнал\перешкода та можливої розкореляції сигналів.

3. Імітаційне моделювання показало, що фазові перекручування приводять до суттєвого зменшення викиду сумарної кореляційної функції при випадковому відхиленні затримки більш половини відліка.

Список літератури

1. Лезин Ю.С. Введение в теорию и технику радиотехнических систем / Ю.С. Лезин. – М.: РИИ, 1986. – 280 с.
2. Варакин Л.Е. Теория сложных сигналов / Л.Е. Варакин. – М.: Сов. радио, 1970. – 375 с.
3. Захаров А.Н. Спектральные та кореляційні властивості частотно-модульованих сигналів / А.Н. Захаров // Тези доповідей на IV-й науково-технічній конференції ВМС Збройних Сил України. – 2005. – С. 128–129.
4. Караваев В.В. Статистическая теория пассивной локации / В.В. Караваев, В.В. Сазонов. – М.: Радио и связь, 1987. – 240 с.
5. Боровков А.А. Теория вероятностей / А.А. Боровков. – М.: Главная редакция физико-математической литературы, изд-во "Наука", 1976. – 352 с.
6. Захаров А.Н. Моделирование случайных фазовых перекручувань широкополосных сигналов / А.Н. Захаров // Сборник научных работ. – Севастополь: СВМІ, 2007. – Вып. 2 (12). – С. 54–57.
7. Захаров А.Н. Широкополосные сигналы и моделирование фазовых искажений их спектров / А.Н. Захаров, И.Я. Миронов // Сборник научных работ. – Севастополь: СВМІ, 2008. – Вып. 1 (14). – С. 87–92.
8. Урик Р.Д. Основы гидроакустики: пер. с англ. / Р.Д. Урик. – Л.: Судостроение, 1978. – 445 с.

Надійшла до редколегії 6.02.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Д.Б. Кучер, Академія військово-морських сил імені П.С. Нахімова, Севастополь.

МОДЕЛЬ СЛУЧАЙНЫХ ФАЗОВЫХ ИСКАЖЕНИЙ ДЛЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО СИГНАЛА

А.Н. Захаров

Предложена модель случайных фазовых отклонений для широкополосного сигнала, которая является процессом с независимыми случайными приращениями. Рассматривается оценка влияния случайных межканальных искажений в антенных решетках активных ГАС на отношение сигнал/помеха. Определены параметры случайного процесса. Показано, что увеличение случайных искажений приводит к существенному ухудшению отношения сигнал/помеха на выходе корреляционного устройства.

Ключевые слова: широкополосный сигнал, фазовое искажение.

THE MODEL OF RANDOM PHASE DISTORTIONS FOR A HYDROAKOUSTIC BROADBAND SIGNAL

A.N. Zakharov

It's proposed a random phase declination model for a broadband signal which is a process with independent increments. The impact of random interlink distortions in active sonars arrays on signal-to-noise ratio is assessed. The random process parameters are defined. It is denoted that an increase in random distortions leads to essential deterioration of signal-to-noise ratio at the correlation device outlet.

Keywords: broadband signal, phase distortion.