

УДК 681.3 : 519.62

С.Б. ПРИХОДЬКО

*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна***УСТОЙЧИВОСТЬ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ПОМЕХ СИСТЕМЫ СВЯЗИ, ОСНОВАННОЙ НА ПЕРЕДАЧЕ СЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ**

Рассмотрена помехоустойчивость системы связи, основанной на применении в качестве носителя информации случайного сигнала, который генерируется стохастической дифференциальной системой. Получено, что детектирование информации из случайного сигнала может быть осуществлено до значений отношения энергии информационного сигнала к энергии белого шума, равных $-0,5$ дБ.

помехоустойчивость, система связи, случайный сигнал, широкополосная помеха

Введение

При разработке системы связи всегда стремятся обеспечить ее максимальную устойчивость к помехам, в том числе и к преднамеренным. При этом полагают, что передаваемый сигнал должен быть сформирован таким образом, чтобы единственной возможностью для его подавления было создание широкополосного гауссова шума [1]. Учитывая сравнительно высокую помехоустойчивость систем связи, основанных на методах расширенного спектра (отношение сигнал/шум равно 8 дБ [1]), можно предположить, что в качестве такого сигнала лучше всего применять случайный сигнал. В [2, 3] был предложен оригинальный способ передачи данных с помощью случайных сигналов, для создания которых применяются стохастические дифференциальные системы (СДС). Суть предложенного способа состоит в следующем. С помощью нелинейной СДС передатчика генерируется случайный сигнал, в который через параметры СДС подмешаны данные и синхросигнал. Извлечение данных в приемнике осуществляется по принятому случайному сигналу на основе двух основных процедур: процедуры детектирования синхросигнала (фиксации момента изменения параметров СДС, задающих информацию) и процедуры детектирования информации (оценки параметров СДС). В качестве первой процедуры предложено использовать дискриминантную

процедуру, которая основана на сравнении вероятностных характеристик случайного процесса в двух соседних временных окнах. Вторая процедура – процедура оценки параметров СДС или параметрической идентификации СДС, построена на основе метода моментов. В [2, 3] не была показана практическая реализация предложенного способа передачи данных в случае воздействия на случайный сигнал в канале связи помех.

Цель данной работы состоит в том, чтобы показать возможность создания помехоустойчивой системы связи, основанной на предложенном в [2, 3] способе передачи данных с помощью случайных сигналов, которая могла обеспечить передачу данных при воздействии на сигнал в канале связи широкополосных помех до значений отношения энергии сигнала к энергии шума, равных $-0,5$ дБ.

Результаты исследований

Теоретическое решение. Пусть случайный сигнал – компонента случайного процесса $\mathbf{x}(t)$ – генерируется СДС, поведение которой описывается стохастическим дифференциальным уравнением (СДУ) Ито вида

$$d\mathbf{x} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}, t)dt + \mathbf{G}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}, t)d\mathbf{W}(t), \quad (1)$$

где $d\mathbf{W}(t)$ – векторный процесс Винера; $\boldsymbol{\theta}$ – вектор управляющих параметров (параметров, через которые вводятся информационный сигнал и синхросигнал).

Последовательность значений компоненты случайного процесса $\mathbf{x}(t)$ можно получить, если для (1) записать разностные уравнения, используя один из методов численного решения СДУ, например, метод Эйлера. В общем виде эти уравнения можно представить как

$$\mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{x}_i + \mathbf{f}(\mathbf{x}_i, \boldsymbol{\theta}, t_i)\Delta t + \mathbf{G}(\mathbf{x}_i, \boldsymbol{\theta}, t_i)n(t_i)\Delta t, \quad (2)$$

где $n(t_i)$ – значение белого шума в момент времени t_i ; Δt – шаг дискретизации по времени.

Из (2) находят значения одной из компонент случайного процесса – случайного сигнала, который используется в качестве носителя информации. В дальнейшем этот сигнал будем обозначать через $x(t)$. Предположим, что сигнал $x(t)$ при прохождении зашумленного канала связи подвергается воздействию аддитивного белого гауссового шума $m(t)$. Тогда, в приемник поступает сигнал $y(t)$, последовательность значений которого можно записать как $y(t_i) = x(t_i) + m(t_i)$.

Задача приемника состоит в восстановлении компонент вектора $\boldsymbol{\theta}$ по значениям сигнала $y(t)$. При этом сначала должен быть восстановлен синхросигнал.

В данной работе, как и в [2, 3], для решения задачи восстановления синхросигнала, предлагается использовать дискриминантную процедуру [4], которая основана на сравнении вероятностных характеристик случайного процесса в двух соседних временных окнах и позволяет обнаруживать импульсные изменения управляющих параметров, наблюдая за изменениями значений величины:

$$H(i) = \frac{[\bar{d}_1(i) - \bar{d}_2(i)]^2}{S_1^2(i) + S_2^2(i)}, \quad (3)$$

где $\bar{d}_1(i)$, $\bar{d}_2(i)$ и $S_1^2(i)$, $S_2^2(i)$ – выборочные средние и выборочные дисперсии дискриминантной функции $d(j)$ в двух соседних временных окнах $(i - 2N_w + 1, i - N_w)$ и $(i - N_w + 1, i)$ длиной N_w ;

$$\bar{d}_1(i) = \frac{1}{N_w} \sum_{j=i-2N_w+1}^{i-N_w} d(j); \quad \bar{d}_2(i) = \frac{1}{N_w} \sum_{j=i-N_w+1}^i d(j);$$

$$S_1^2(i) = \frac{1}{N_w} \sum_{j=i-2N_w+1}^{i-N_w} [d(j) - \bar{d}_1(i)]^2;$$

$$S_2^2(i) = \frac{1}{N_w} \sum_{j=i-N_w+1}^i [d(j) - \bar{d}_2(i)]^2.$$

В качестве значений дискриминантной функции в i -ый момент времени в формуле (3) берутся значения сигнала $y(t)$ в этот же момент времени.

После восстановления синхросигнала переходим к решению второй задачи – детектирования информации из сигнала $y(t)$. Для детектирования информации из сигнала $y(t)$ можно предложить два способа. Первый способ – традиционный. Он основан на использовании корреляционного приемника [1], состоящего из M корреляторов, выполняющих преобразование принятого сигнала $y(t)$ в последовательность M чисел или выходов коррелятора $r_k(T)$ ($k = 1, \dots, M$). Каждый выход коррелятора описывается следующим интегралом или корреляцией с принятым сигналом:

$$r_k(T) = \int_0^T y(t) z_k(t) dt, \quad k = 1, \dots, M, \quad (4)$$

где $z_k(t)$ – k -ый опорный сигнал, поступающий в k -ый коррелятор. Далее значения $r_k(T)$ поступают в компаратор, который выбирает сигнал $z_k(t)$ с максимальным $r_k(T)$.

Сложность использования корреляционного приемника для детектирования информации из сигнала $y(t)$ состоит в формировании опорных сигналов. Опорный сигнал $z_k(t)$ предлагается формировать с помощью фильтра – СДС той же структуры, что СДС передатчика, и соответствующими управляющими параметрами. При этом последовательность значений сигнала $z_k(t)$ описывается как

$$z_{k\ i+1} = z_{k\ i} + f_k(z_{k\ i}, \boldsymbol{\theta}, t_i)\Delta t + g_k(z_{k\ i}, \boldsymbol{\theta}, t_i)y(t_i)\Delta t. \quad (5)$$

Заметим, данный способ детектирования информации основан на принятии решения лишь по максимальному значению одного статистического момента, что делает его менее помехоустойчивым по

сравнению с теми способами, в которых выбор осуществляется по большему числу моментов.

К таковым можно отнести предлагаемый здесь второй способ детектирования информации, основанный на решении задачи параметрической идентификации – оценки $\hat{\theta}$ компонент вектора θ СДС по принятому сигналу $y(t)$. Суть этого способа состоит в следующем. Из сигнала $y(t)$, как и в предыдущем случае на основе (5), формируют M сигналов $z_k(t)$. Значение M определяется числом комбинаций значений управляющих параметров, которые были использованы для передачи данных. Далее M раз решается задача параметрической идентификации СДС – находятся оценки $\hat{\theta}$ для возможных комбинаций компонент вектора θ . Для этого применяются обобщенный метод моментов или метод моментов [5]. Для каждого k -го варианта вычисляют норму соответствующих относительных погрешностей оценок $\hat{\theta}$:

$$\|\varepsilon_k\| = \sum_j \left| \frac{(\hat{\theta}_j - \theta_j)}{\theta_j} \right|_k. \quad (6)$$

По минимальному значению нормы $\|\varepsilon_k\|$ выбирают значения компонент вектора θ и переданные данные, которые им соответствуют.

Предложенный способ рассмотрим для случая, когда случайный сигнал $x(t)$ генерируется СДС, поведение которой описывается СДУ:

$$\ddot{x} + b_1\dot{x} + c_1x + c_3x^3 = n(t), \quad (7)$$

где $n(t)$ – белый шум с интенсивностью N_0 .

Обозначив $x_1 = x$, а $x_2 = \dot{x}$ и преобразовав уравнение (7) в систему уравнений 1-го порядка, применяя метод Эйлера для этой системы, получим разностные уравнения (2):

$$\begin{aligned} x_{1_{i+1}} &= x_{1_i} + x_{2_i} \Delta t; & x_{2_{i+1}} &= x_{2_i} - \\ & - (b_1 x_{2_i} + c_1 x_{1_i} + c_3 x_{1_i}^3) \Delta t + z_i \sqrt{N_0 \Delta t}, \end{aligned} \quad (8)$$

где ζ_i – i -ое значение нормально распределенной случайной величины с нулевым математическим ожиданием и дисперсией равной единице.

Уравнения (8) применяются для генерации случайного сигнала $x(t)$, в качестве которого выбрана компонента x_2 . При этом параметры c_1 и c_3 используются как управляющие: через параметр c_3 задают данные, а через параметр c_1 вводят синхросигнал – моменты времени изменения c_3 .

Сигнал x_2 при прохождении зашумленного канала связи подвергается воздействию аддитивного белого гауссового шума $m(t)$ с коэффициентом интенсивности N_m . Тогда, в приемник поступает сигнал $y(t)$, последовательность значений которого находятся как $y_i = x_{2_i} + \zeta_i \sqrt{N_m / \Delta t}$.

Формирование случайного сигнала $z_k(t)$ осуществляется с помощью следующих уравнений:

$$\begin{aligned} z_{1_{i+1}} &= z_{1_i} + z_{2_i} \Delta t; \\ z_{2_{i+1}} &= z_{2_i} - (b_1 z_{2_i} + c_1 z_{1_i} + c_3 z_{1_i}^3) \Delta t + y_i \Delta t. \end{aligned} \quad (9)$$

Оценка параметров СДУ (10) осуществляется по формулам, приведенным в [3]:

$$\begin{aligned} c_1 &= (\alpha_{6_1} \alpha_{2_2} - 3\alpha_{4_1} \alpha_{2_1 2_2}) / (\alpha_{6_1} \alpha_{2_1} - \alpha_{4_1}^2); \\ c_3 &= (3\alpha_{2_1} \alpha_{2_1 2_2} - \alpha_{4_1} \alpha_{2_2}) / (\alpha_{6_1} \alpha_{2_1} - \alpha_{4_1}^2), \end{aligned} \quad (10)$$

где α_{r_i} – начальные статистические моменты r -го порядка для z_i ($i=1,2$), $\alpha_{r_i} = \langle z_i^r \rangle$; $\alpha_{r_l j}$ – смешанные начальные статистические моменты $(r+s)$ -го порядка для z_i^r и x_j^s ($i, j=1,2$), $\alpha_{r_l j} = \langle x_i^r x_j^s \rangle$. Здесь $\langle \rangle$ обозначает усреднение по времени.

Практические результаты. На основе уравнений (8) осуществлялось компьютерное моделирование случайного сигнала $x(t)$ – компоненты x_2 . В формировании x_2 участвовал двоичный информационный сигнал, который вводился через параметр c_3 . Использовались четыре значения c_3 ($-0,5$; $-1,0$; $-1,5$; $-2,0$), которые определяли последовательность из двух бит (соответственно 00, 01, 10, 11). С помощью параметра c_1 задавался синхросигнал. Изменения параметров c_1 и c_3 в i -ые моменты времени приведены на рис. 1. Соответствующий им

случайный сигнал x_2 показан на рис. 2 ($b_1 = 0,02$; $N_0 = 4,44 \cdot 10^{-4}$), белый шум $m(t)$ – на рис. 3 ($N_m = 10^{-3}$).

Рис. 1. Изменения параметров c_1 и c_3

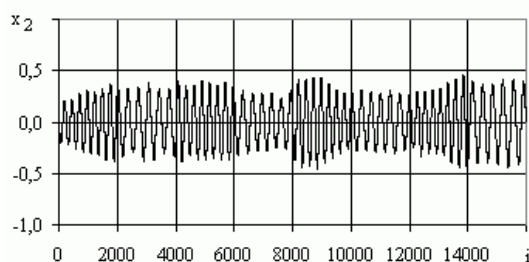


Рис. 2. Случайный сигнал x_2

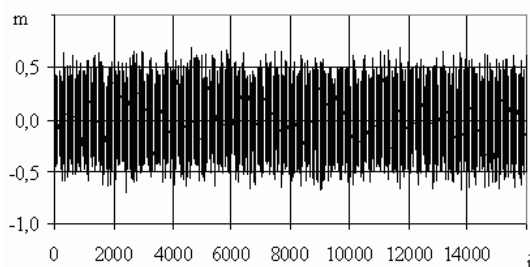


Рис. 3. Белый гауссовый шум m

На рис. 4 показан сигнал $y(t)$, полученный аддитивным наложением шума $m(t)$ на сигнал x_2 . В качестве значений дискриминантной функции в формуле (3) брались значения сигнала $y(t)$. При этом два соседних временных окна имели длину 200 отсчетов. Значения величины $H(i)$ в i -ые моменты времени приведены на рис. 5.

Для сравнения на рис. 6 приведены изменения $H(i)$ для случая, когда шум в канале связи отсутствует и в приемник поступает сигнал x_2 .

На основе сопоставления рис. 1 – 6 можно сделать следующее заключение: величина $H(i)$ реагирует на изменения параметра c_1 в СДС, что указывает на возможность применения дискриминантной процедуры для распознавания синхросигнала не

только при отсутствии шума (рис. 6), но и при его наличии, даже когда энергия шума превосходит энергию полезного сигнала (рис. 5). В приведенном варианте моделирования отношение дисперсии сигнала x_2 к дисперсии шума $m(t)$ составляло $-0,5$ дБ. Заметим, что предел Шеннона равен $-1,6$ дБ. При дальнейшем увеличении уровня шума $m(t)$ значения $H(i)$ для всех интервалов становятся одного порядка, что делает проблематичным выделение синхронизации.

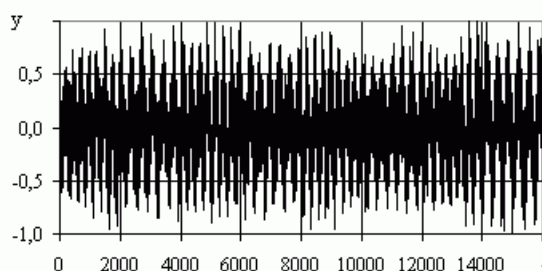


Рис. 4. Случайный сигнал y

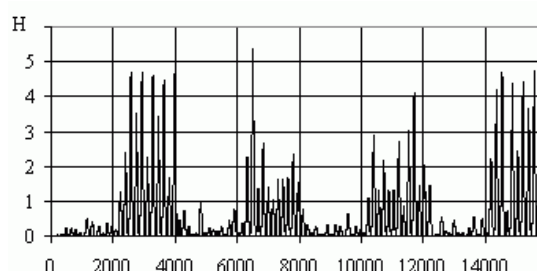


Рис. 5. Изменение $H(i)$ для сигнала y

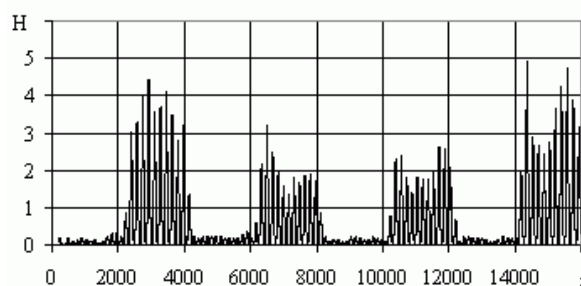


Рис. 6. Изменение $H(i)$ для сигнала x_2

После восстановления синхросигнала выполнялось детектирование данных. Для этого на основе (9) формировались сигналы $z_k(t)$, по которым находились оценки $\hat{\theta} = \{\hat{c}_1, \hat{c}_3\}$ компонент вектора $\theta = \{c_1, c_3\}$. Результаты оценки параметров по формулам (10) для временного интервала $[0, 2000]$ приведены в табл. 1.

В этой же таблице даны значения нормы $\|\varepsilon_k\|$, которые вычислялись по формуле (6), и – величины $\bar{r}_k(T)$ – отношения значения на выходе коррелятора $r_k(T)$, определяемого согласно (4), к произведению оценок среднеквадратических отклонений сигналов $y(t)$ и $z_k(t)$. Минимальному значению нормы $\|\varepsilon_k\|$, равному 0,23, соответствует второй вариант, для которого $c_1 = 1,5$ и $c_3 = -1,0$.

Таблица 1

Результаты оценки параметров

k	c_1	c_3	\hat{c}_1	\hat{c}_3	\bar{r}_k	$\ \varepsilon_k\ $
1	1,5	-0,5	1,594	-6,141	0,671	11,35
2	1,5	-1,0	1,454	-0,805	0,683	0,23
3	1,5	-1,5	1,300	5,353	0,684	4,70
4	1,5	-2,0	1,219	8,844	0,677	5,61
5	1,0	-0,5	0,956	0,622	0,049	2,29
6	1,0	-1,0	0,997	-1,813	0,023	0,82
7	1,0	-1,5	1,012	-2,750	0,003	0,85
8	1,0	-2,0	1,008	-2,527	0,029	0,27

Данные табл. 1 и их сопоставление с рис. 1 свидетельствуют о применимости предложенного способа детектирования информации, основанного на решении задачи параметрической идентификации. Использование корреляционного приемника позволяет определять лишь параметр синхронизации. Это позволяет разбить детектирование информации на два этапа: на первом – определять параметр синхронизации с использованием корреляционного приемника всего лишь с двумя корреляторами, а на втором выполнять детектирование данных предложенным в работе способом.

Выводы

В работе показана возможность создания помехоустойчивой системы связи, основанной на предложенном в [2, 3] способе передачи данных с помощью случайных сигналов, которая могла обеспечить передачу данных при воздействии на сигнал в канале связи широкополосных помех, представляющих собою аддитивный белый гауссовый шум. Предло-

жен способ детектирования информации, основанный на решении задачи параметрической идентификации. Компьютерное моделирование случайного сигнала генерируемого нелинейной СДС передатчика в случае описания ее состояния СДУ 2-го порядка, а также результаты восстановления данных с помощью дискриминантной процедуры и процедуры параметрической идентификации показали работоспособность предложенного способа детектирования информации. Получено, что детектирование данных на основе этого способа возможно до значений отношения энергии сигнала к энергии шума, равных -0,5 дБ. В дальнейшем исследования планируется вести в направлении совершенствования математической модели СДС для увеличения скорости передачи информации.

Литература

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – М.: Издательский дом “Вильямс”, 2003. – 1104 с.
2. Приходько С.Б. Применение случайных сигналов для передачи информации в системах связи // Вісник ХНУ. – Хмельницький: ХНУ. – 2005. – № 4, ч. 1, т. 1 (68) – С. 248-251.
3. Приходько С.Б. Применение случайных сигналов для передачи данных по каналам связи компьютерных сетей // Вестник ХНТУ. – 2005. – № 1 (21). – С. 427-431.
4. Обнаружение изменений свойств сигналов и динамических систем: Пер. с англ. / Под ред. М. Бассвиль, А. Банвениста. – М.: Мир, 1989. – 278 с.
5. Приходько С.Б. Параметрическая идентификация стохастических дифференциальных систем по статистическим моментам выходных сигналов // Наукові праці ДНТУ. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. – Донецьк: ДНТУ, 2002. – Вип. 48. – С.289-297.

Поступила в редакцию 13.03.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.М. Илюшко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.