УДК 681.393.3

ИНВАРИАНТНАЯ КОГЕРЕНТНАЯ СИСТЕМА ПРИ КОМПЛЕКСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОМЕХ

Е.И. Алгазин[1], А.П. Ковалевский[1], Е.Г. Касаткина[1], В.Б. Малинкин[2]

ГОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет» (1); Root_lukos@koe.ref.nstu.ru;
ГОУ ВПО «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» (2), г. Новосибирск

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: вероятность попарного перехода; коэффициент корреляции; отношение сигнал/шум; помехоустойчивость.

Аннотация: Разработан метод борьбы с мультипликативной помехой, основанный на формировании сигнала передачи, где модулирующим параметром является отношение энергии информационного сигнала к энергии обучающего сигнала.

Сигнал передачи сформирован в виде блоков, в которых перемежаются информационные и обучающие сигналы.

Произведена оценка вероятности попарного перехода при полной коррелированности отсчетов аддитивного шума.

Введение

Для борьбы с мультипликативной помехой в современных телекоммуникационных системах используются сложные комплексы, которые малоэффективны. Одним из методов борьбы с таким видом помех является использование инвариантов [1–5]. Суть этого метода заключается в том, что модулирующий параметр является составляющим звеном в отношении энергии информационного сигнала к энергии обучающего сигнала. Произведен качественный анализ при различных способах обработки принимаемого сигнала и коррелированности отсчетов шума.

Во всех указанных выше работах принималось, что отсчеты аддитивного шума либо совсем некоррелированы [1–4], либо имеют слабую корреляцию [5].

Данная работа посвящена оценке качественных показателей инвариантной системы обработки информации при полной коррелированности отсчетов шума.

1. Постановка задачи

Имеется канал связи, ограниченный частотами $f_{\text{н}}$ и $f_{\text{в}}$. Состояние канала связи определяется интервалом стационарности, внутри которого действие мультипликативной помехи описывается постоянством коэффициента передачи $k(t)$ на определенной частоте.

Алгоритм приема определяется несущей частотой, задаваемой как средняя частота канала и огибающей, которой модулируется несущая.

Структуру блока определим, для простоты, как элементы информационной последовательности на нечетных местах в блоке, а обучающие сигналы, равные единице, – на четных местах в блоке.

На приемной стороне сумма отсчетов обучающих сигналов, зашумленных помехой, усредняется и используется для демодуляции информационной части блока. При этом из-за изменения параметров канала связи информационные и обучающие сигналы зашумлены аддитивной помехой.

В данном исследовании предполагается, что отсчеты аддитивной помехи коррелированны между собой. Необходимо произвести расчет вероятности попарного перехода инвариантов в такой системе. Для этого надо найти аналитическое выражение плотности вероятности оценки инварианта.

2. Решение поставленной задачи

Рассмотрим процесс передачи. На каждом шаге передается либо обучающий сигнал, амплитуда которого равна единице, либо информационный сигнал, принимающий значения 1, 2, …, M, где M – объем алфавита инвариантной системы.

Информационный и обучающий сигналы передаются с защитным временным интервалом. Это означает, что между соседними сигналами предусмотрена пассивная пауза. Совокупность информационных и обучающих сигналов сформирована в виде блоков. На рис. 1, к примеру, блок содержит семь элементов.

Длительность сигналов блока определяется как $T_{\text{бл}} = 2TL$, где T – длительность сигнала; L – количество сигналов.

Информационный сигнал на приемной стороне имеет вид

$$Y(t) = x(t)k + \xi(t),$$

где $x(t)$ – сигнал передачи, принимающий значения, равные 1, 2, …, M, сигнал передачи $x(t)$ в дальнейшем модулирует несущую частоту; k – коэффициент передачи канала; $\xi(t)$ – аддитивная помеха.

При приеме каждый сигнал в блоке считывается N раз через интервал времени Δt.

Для каждого информационного сигнала $Y(t)$ отсчеты берутся в моменты времени

$$t_{l,n} = 2T(l-1) + \frac{n}{N}T,$$

где $1 \le l \le L$; $1 \le n \le N$; N – количество отсчетов.

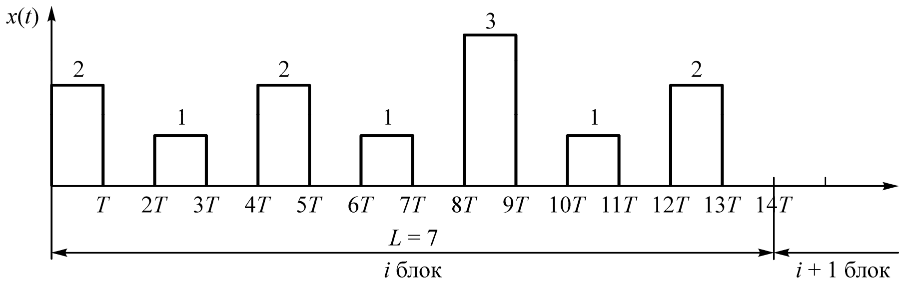

Рис. 1. Структура блока передаваемой информации

Рассмотрим прием при наличии аддитивной и мультипликативной помех.

Шум канала связи $\xi(t)$ является стационарным гауссовским случайным процессом с нулевым математическим ожиданием, дисперсией σ^2 и корреляционной функцией, подчиняющейся закону

$$E\left(\frac{\xi(t)\xi(0)}{\sigma^2}\right)=R(t)=E\left(\frac{\xi(t+\tau)\xi(\tau)}{\sigma^2}\right),$$

где τ – любое число в силу стационарности [6].

Оценка инварианта с учетом вышеописанных ограничений при воздействии мультипликативной и аддитивной помех может быть вычислена следующим образом:

$$\mathrm{INV}_l^*=\frac{\sum\limits_{n=1}^{N}\left(k\,\mathrm{INV}_l+\xi\left(t_{l,n}\right)\right)}{\frac{1}{\#(G)}\sum\limits_{j\in G}\sum\limits_{n=1}^{N}\left(k+\xi\left(t_{j,n}\right)\right)}=\frac{A}{B},\tag{1}$$

где INV_l – l-й передаваемый инвариант; $t(l, n)$ – момент времени, когда берется n-й отсчет в l-м сигнале; $\xi(t_{l,n})$ – помеха в l-м сигнале на n-м отсчете; $\#(G)$ – число элементов множества G; G – множество номеров шагов, на которых передается обучающий сигнал.

При вычислении качественных характеристик, таких как вероятность попарного перехода, необходимо знать выражение плотности распределения оценки инварианта.

Воспользуемся известным подходом оценки вероятности попарного перехода, описанным в литературе [7],

$$P_{\text{пер}}=P_1\int\limits_0^{Z_{\text{п}}}W_2(z)dz+P_2\int\limits_{Z_{\text{п}}}^{\infty}W_1(z)dz,\tag{2}$$

где $P_{\text{пер}}$ – вероятность перехода INV_1 в INV_2 и наоборот; P_1 – вероятность появления INV_1; P_2 – вероятность появления INV_2. Первый интеграл – вероятность появления INV_2, когда послан INV_1. Второй интеграл – вероятность появления INV_1, когда послан INV_2; $Z_{\text{п}}$ – пороговое значение, необходимое для вычисления $P_{\text{пер}}$; при известных P_1 и P_2 оно определяется с помощью наилучшей байесовской оценки путем минимизации $P_{\text{пер}}$ по $Z_{\text{п}}$. При неизвестных P_1 и P_2 выбираем $P_1 = P_2 = 0{,}5$.

На основании выражения (1) вычислим математические ожидания и дисперсии случайных величин A и B.

Математические ожидания числителя и знаменателя соответственно [6]

$$m_A=E(A)=N\,k\,\mathrm{INV}_l;\tag{3}$$

$$m_B=E(B)=N\,k.\tag{4}$$

Дисперсия числителя

$$\sigma_A^2=\sum_{n=1}^{N}\sum_{n'=1}^{N}\operatorname{cov}\left(\xi\left(t_{l,n}\right);\xi\left(t_{l,n'}\right)\right)=\sum_{n=1}^{N}\sum_{n'=1}^{N}\sigma^2R\left(\frac{(n-n')T}{N}\right),\tag{5}$$

где $R(t)=\mathrm{e}^{-\alpha|t|}$ – коэффициент корреляции; α – коэффициент затухания, экспериментально определенный как α = 1700; $\operatorname{cov}(\xi(t_{l,n});\xi(t_{l,n'}))$ – ковариация случайных величин $\xi(t_{l,n})$ и $\xi(t_{l,n'})$.

Дисперсия знаменателя

$$\sigma_B^2=\left(\frac{1}{\#(G)}\right)^2\sum_{j\in G}\sum_{j'\in G}\sum_{n=1}^{N}\sum_{n'=1}^{N}\sigma^2 R\left(\left(2(j-j')+\frac{n-n'}{N}\right)T\right), \tag{6}$$

так как

$$t_{l,n}=2T(l-1)+\frac{n}{N}T \text{ и } t_{j,n}=2T(j-1)+\frac{n}{N}T.$$

Будем полагать, что функция корреляции числителя и знаменателя подчиняется следующему закону [6]

$$\rho=\operatorname{corr}(A,B)=\frac{\operatorname{cov}(A;B)}{\sigma_A\sigma_B}, \tag{7}$$

где

$$\operatorname{cov}(A,B)=\frac{1}{\#(G)}\sum_{n=1}^{N}\sum_{j\in G}\sum_{n'=1}^{N}\sigma^2\operatorname{corr}\left(\xi(t_{l,n})\xi(t_{j,n})\right)=$$

$$=\frac{\sigma^2}{\#(G)}\sum_{n=1}^{N}\sum_{j\in G}\sum_{n'=1}^{N}R\left(\left(2(l-j)+\frac{n-n'}{N}\right)T\right).$$

С учетом вышеприведенных данных выражение оценки инварианта запишем в виде

$$\mathrm{INV}_l^*=\frac{m_A+\sigma_A\left(\rho\eta_1+\sqrt{1-\rho^2}\,\eta_2\right)}{m_B+\sigma_B\eta_1},$$

где η_1 и η_2 являются независимыми случайными величинами, имеющими стандартное нормальное распределение.

Для описания плотности распределения $W(z)$ оценки инварианта и удобства дальнейших вычислений положим $\eta_1 = x$.

Тогда

$$z=\frac{m_A+\sigma_A\left(\rho x+\sqrt{1-\rho^2}\,\eta_2\right)}{m_B+\sigma_B x};$$

$$z(m_B+\sigma_B x)=m_A+\sigma_A\rho x+\sigma_A\sqrt{1-\rho^2}\,\eta_2;$$

$$\eta_2=\frac{z(m_B+\sigma_B x)-m_A-\sigma_A\rho x}{\sigma_A\sqrt{1-\rho^2}};$$

$$\eta_2'=\frac{m_B+\sigma_B x}{\sigma_A\sqrt{1-\rho^2}}.$$

Аналитическое выражение плотности вероятности оценки инварианта будет равно

$$W(z)=\int_{-\infty}^{\infty}\varphi(x)\varphi\left(\frac{z(m_B+\sigma_B x)-m_A-\sigma_A\rho x}{\sigma_A\sqrt{1-\rho^2}}\right)\frac{|m_B+\sigma_B x|}{\sigma_A\sqrt{1-\rho^2}}dx, \qquad (8)$$

где $\varphi(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{-x^2/2}$.

При расчете плотности вероятности оценки инварианта $W(z)$ величины σ_A и σ_B определяются выражениями (5) и (6), а величины m_A и m_B определяются выражениями (3) и (4).

3. Результаты машинного моделирования

Расчет $P_{\text{пер}}$ производится численно по выражению (2) аппроксимацией формулы (8). В классических системах с амплитудной модуляцией аналогом вероятности попарного перехода является вероятность ошибки, которая рассчитывается по известным формулам [7].

Вероятность попарного перехода и вероятность ошибки вычисляются для одинаковых значений отношения сигнал/шум h, которое определяется по формуле [7]

$$h=\frac{k\,\text{INV}_l}{\sigma},$$

где σ – дисперсия аддитивной помехи.

Пороговые значения $Z_\text{п}$ рассчитываются путем минимизации $P_{\text{пер}}$ в формуле (2). Полученные результаты при разных значениях k и σ, $\text{INV}_1 = 1$, а $\text{INV}_2 = 2, \ldots, 6$ представлены ниже.

Значения $Z_\text{п}$ при $k = 1$, $\sigma = 1$

$Z_\text{п}$ ……………	1,52	2,00	2,53	3,04	3,55

Значения $Z_\text{п}$ при $k = 0{,}7$, $\sigma = 1$

$Z_\text{п}$ ……………	1,52	1,97	2,50	2,96	3,56

Результаты моделирования приведены на рис. 2.

Передача амплитудно-модулированных сигналов, образованных инвариантом и обучающим сигналом, обеспечивает на основе классических алгоритмов обработки информации, как правило, невысокую помехоустойчивость [7]. И только после обработки этих сигналов в соответствии с алгоритмом частного по выражению (1) получаем оценку инварианта, по сути, являющуюся числом, а не сигналом.

Как видно из рис. 2 вероятность попарного перехода одного инварианта в другой при больших отношениях сигнал/шум определяется величинами $10^{-3}\ldots10^{-30}$. При пересчете указанных выше величин вероятность ошибочного приема единичного символа в классических системах находится в пределах $10^{-1}\ldots10^{-10}$.

При таком способе модулирующий сигнал вкладывается в отношение энергии информационного сигнала к энергии обучающего сигнала. Эта величина, как указано в [1–5], остается неизменной при работе по каналам связи с переменными параметрами, и этим объясняется высокая помехоустойчивость сигналов приема.

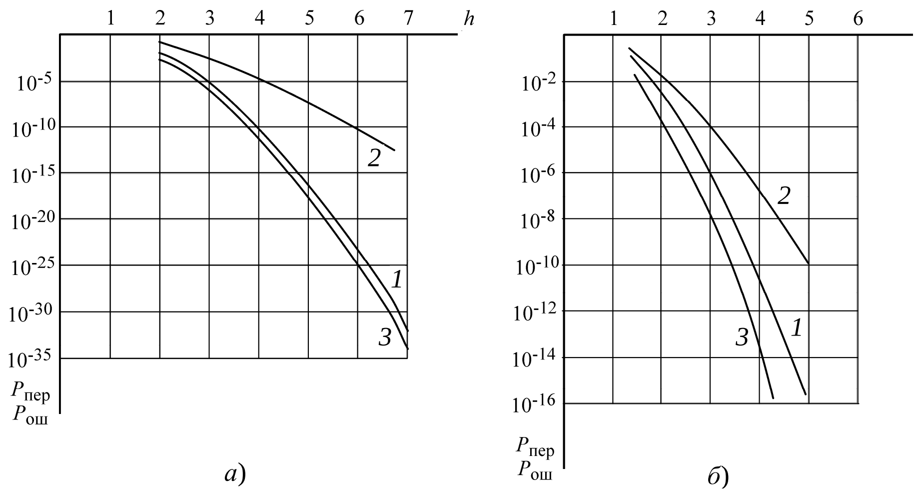

Рис. 2. Кривые помехоустойчивости инвариантной системы при отсутствии (*а*) и наличии (*б*) мультипликативной помехи:
1, *3* – вероятности попарного перехода одного инварианта в другой при следующих заданных условиях: $k = 1$ (*а*) и $k = 0,7$ (*б*), $INV_1 = 1$, $INV_2 = 2, 3, \ldots, 6$ (и некоррелированных отсчетах шума для кривой *3*); *2* – вероятность ошибки при классической амплитудной модуляции и когерентном приеме

Выводы

Как показали проведенные исследования, инвариантная система с полной коррелированностью отсчетов аддитивного шума и наличие мультипликативной помехи имеют высокую помехоустойчивость.

Выигрыш по помехоустойчивости по сравнению с классическими алгоритмами обработки амплитудно-модулированных сигналов составляет не менее двух порядков. При этом наблюдается увеличение вероятности ошибки в инвариантных системах [1–5] при указанных выше допущениях.

Это позволяет использовать предложенную инвариантную систему в условиях повышенных требований к помехоустойчивости.

Список литературы

1. Алгазин, Е.И. Оценка помехоустойчивости инвариантной системы обработки информации при некогерентном приеме / Е.И. Алгазин, А.П. Ковалевский, В.Б. Малинкин // Вестн. СибГАУ. – 2008. – Вып. 2 (19). – С. 38–41.

2. Алгазин, Е.И. Сравнительный анализ способов повышения помехоустойчивости инвариантной системы обработки информации / Е.И. Алгазин, А.П. Ковалевский, В.Б. Малинкин // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП – 2008) : материалы IX междунар. конф., Новосибирск, 24–26 сент., 2008. – Новосибирск, 2008. – Т. 4. – С. 17–19.

3. Алгазин, Е.И. Помехоустойчивость инвариантной относительной амплитудной модуляции / Е.И. Алгазин, А.П. Ковалевский, В.Б. Малинкин // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП – 2008) : материалы IX междунар. конф., Новосибирск, 24–26 сент., 2008. – Новосибирск, 2008. – Т. 4. – С. 20–23.

4. Алгазин, Е.И. Инвариантная система обработки информации при некогерентном приеме и ее количественные характеристики / Е.И. Алгазин, А.П. Ковалевский, В.Б. Малинкин // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП – 2008) : материалы IX междунар. конф., Новосибирск, 24–26 сент., 2008. – Новосибирск, 2008. – Т. 4. – С. 13–16.

5. Алгазин, Е.И. Помехоустойчивость инвариантной системы передачи информации при наличии слабых корреляционных связей и собственных шумов генераторного оборудования / Е.И. Алгазин, А.П. Ковалевский, В.Б. Малинкин // Омский науч. вестн. – 2008. – № 3 (70). – С. 122–126.

6. Левин, Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Б.Р. Левин. – 3-е изд. – М. : Радио и связь, 1989. – 656 с.

7. Теплов, Н.Л. Помехоустойчивость систем передачи дискретной информации / Н.Л. Теплов. – М. : Связь, 1964. – 360 с.

Stable Coherent System under Complex Disturbance Effect

E.I. Algazin[1], A.P. Kovalevsky[1], E.G. Kasatkina[1], V.B. Malinkin[2]

Novosibirsk State Technical University (1); Root_lukos@koe.ref.nstu.ru;
Sibirsk State University of Telecommunication and Computing (2), Novosibirsk

Key words and phrases: correlation coefficient; noise immunity; probability of pairwise transition; signal/noise relation.

Abstract: The paper presents the technique for control over multiplicative disturbance based on the gear light forming where modulating parameter is the ratio between the information signal energy and the training signal. Transmission signal consists of units which contain information and training signals. The estimation of pairwise transition under complete correlation of additive noise metering is carried out.

Invariantes kohärentes System bei der komplexen Störungeneinwirkung

Zusammenfassung: Es ist die auf der Formierung des Übertragssignals gegründete Methode des Kampfes mit der multiplikativen Störung erarbeitet. Der Modulationsparameter ist das Verhältnis der Energie des Informatiossignals zu der Energie des Lehrsignals. Das Übertragssignal besteht aus den Blöcken, in denen die Informations- und Lehrsignale abwechseln. Es ist die Einschätzung der Wahrscheinlichkeit des paarweisen Übergangs bei der vollen Korrelation der Abzählen des additiven Geräusch durchgeführt.

Système cohérent sans variants lors de l'action complexe des erreurs

Résumé: Est élaborée la méthode de la lutte contre une erreur multiplicative fondée sur une formation du signal de la transmission où le paramètre modulant est la relation entre l'énergie du signal d'information et de signal enseignant.

Le signal de la transmission est formé en vue des blocs dans lesquels se mêlent les signaux d'information et ceux d'enseignement.

Est effectuée l'évaluation de la probabilité du transfert par pairs lors de la corrélation complète pour compter le bruit additif.

Авторы: ***Алгазин Евгений Игоревич*** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры общей электротехники; ***Ковалевский Артем Павлович*** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики; ***Касаткина Елена Геннадьевна*** – кандидат технических наук, доцент кафедры общей электротехники, ГОУ ВПО «НГТУ»; ***Малинкин Виталий Борисович*** – доктор технических наук, профессор кафедры многоканальной электросвязи и оптических систем ГОУ ВПО «СибГУТИ»;

Рецензент: ***Муромцев Дмитрий Юрьевич*** – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» ГОУ ВПО «ТГТУ».
