

УДК 621.391.825

Метод формирования структурных помех для подавления систем радиосвязи с шумоподобными сигналами

А.Н. КУБРАК, П.С. БОРИСОВ

Предлагается метод формирования структурных помех, благодаря которому повышается эффективность воздействия систем радиоэлектронной борьбы на системы радиосвязи с шумоподобными сигналами.

Ключевые слова: шумоподобный сигнал, вероятность ошибки на бит информации, псевдослучайная последовательность, радиоподавление, структурная помеха.

The method of structure barrier forming, which increase the efficient of the jamming systems influence on the wireless systems with noise-like signals is proposed

Keywords: noise-like signal, bit error rate, pseudorandom sequence, jamming, structure barrier.

Введение. Повышение эффективности вооружения и маневренности войск, появление новых форм и методов ведения вооруженной борьбы привели к резкому росту роли систем управления войсками и оружием при ведении боевых действий [1].

Важной частью типичной системы управления войсками и оружием ведущих стран мира являются системы радиосвязи (СРС). Для улучшения показателей функционирования СРС в последние десятилетия начали широко применяться шумоподобные сигналы (ШПС). Одним из способов создания таких сигналов является модуляция несущей частоты псевдослучайной последовательностью (ПСП). Системы радиосвязи, использующие такие сигналы, называют СРС с ШПС [1].

Воздействие на информационные каналы СРС средствами радиоэлектронного подавления (РЭП) может нарушить функционирование систем управления и поэтому является одной из основных задач при дезорганизации управления войск и оружия противника [1]. Однако качество подавления СРС с ШПС современными средствами РЭП остается достаточно низким.

Анализ последних достижений и публикаций. В работах [2], [6]–[8] проведена оценка эффективности воздействия различных типов радиопомех на СРС с ШПС. Анализируя [2], [6], [7], можно сделать вывод, что узкополосная, заградительная и импульсная помехи приводят к нарушению работы указанных СРС только при достаточно высоком значении мощности помехи. Воздействие повторяющей помехи может быть эффективным, если передатчик помех размещен на линии (или рядом с ней), соединяющей радиопередатчик с радиоприемником [8]. Наиболее эффективной помехой для СРС с ШПС считается помеха, коррелирующая с ПСП, используемой в шумоподобном сигнале и синхронизированная с ней по времени [2], [6], [7]. Однако использование такой помехи будет эффективным, если постановщику помех известны места расположения радиопередатчика и радиоприемника, а также функция, расширяющая спектр.

Анализ работы систем радиосвязи CDMA (code division multiple access), использующие ШПС, показывает, что существует влияние взаимных помех на эффективность функционирования этих систем [2], [5], [6]. Однако возможность использования взаимных помех для радиоподавления СРС с ШПС в указанных работах не рассматривается. При этом взаимные помехи представляют собой сигналы однотипных СРС, имеющих различные амплитуды, временные задержки и фазы в точке приема, а также разные функции, расширяющие спектр.

Перекрываясь в точке приема по времени и частоте, эти сигналы создают совокупность взаимных помех [2]. С точки зрения постановки помех, нет необходимости точной синхронизации таких помех с ПСП, используемой в ШПС.

Постановка задачи. В работе [5] приведена методика оценки эффективности радиоподавления СРС, где в качестве показателя эффективности используется коэффициент подавления. Этот показатель определяет минимально необходимое отношение мощности помехи к мощности сигнала на входе приемника, при котором обеспечивается заданный критерий подавления. Для цифровых систем связи в качестве такого критерия выступает вероятность ошибки на бит информации P_{ou} [9]. Максимально допустимая вероятность ошибки на бит информации для цифровых систем передачи речевых сообщений составляет 10^{-2} , поэтому критерием эффективности подавления СРС с ШПС будет [5], [6]

$$P_{ou} > 10^{-2}, \tag{1}$$

В случае, когда ПСП неизвестна постановщику помех, наиболее эффективным видом помехи для СРС с ШПС является гармоническая помеха на центральной частоте расширенного спектра сигнала [2], [6]. С целью сравнения произведен расчет зависимости вероятности ошибки на бит информации для указанной СРС с учетом воздействия гармонической помехи при условии точного совмещения несущих частот полезного и помехового сигналов по выражению [2]:

$$P_{ou} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\left(\frac{N_0}{E_c} + \frac{P_n}{L \cdot P_c} \right)^{-1/2} \right], \tag{2}$$

где $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty \exp(-t^2) dt$ – дополнительный интеграл ошибок;

$\frac{E_c}{N_0}$ – отношение сигнал/шум;

L – длина ПСП;

P_n – мощность помехи на входе приемника;

P_c – мощность сигнала на входе приемника.

Результаты расчета показателя эффективности СРС с ШПС согласно выражению (2) для $L = 1000$ и $E_c/N_0 = 10$ и 15 дБ приведены на рисунке 1.



Рисунок 1 – Зависимость вероятности ошибки на бит информации от отношения помеха/сигнал при воздействии на СРС с ШПС гармонической помехи для отношения сигнал/шум 10 дБ (сплошная линия) и 15 дБ (пунктирная линия)

Из графиков на рисунке 1 видно, что для выполнения условия (1) путем формирования гармонической помехи для СРС с ШПС необходимо, чтобы мощность помехи превышала мощность сигнала на входе приемника для заданных начальных условий на 27,5 и 28,5 дБ, что зачастую невозможно достичь на практике.

Таким образом, возникает задача формирования радиопомехи, при воздействии которой на СРС с ШПС условие (1) выполняется при отношении помеха/сигнал на входе приемника меньше, чем при воздействии гармонической помехи.

Основной материал. С целью упрощения дальнейшего анализа ограничимся рассмотрением ШПС с двоичной фазовой манипуляцией (ФМ). При прямоугольной форме импульсов информационной последовательности $b_c(t)$ сигнал СРС с ФМ ШПС можно представить выражением [2]:

$$S_c(t) = A_c \cdot b_c(t) \cdot a_c(t) \cdot \cos(2\pi ft + \phi_c), \quad (3)$$

где A_c – амплитуда сигнала ($A_c = \sqrt{2P_c}$, P_c – мощность сигнала);

$a_c(t)$ – псевдослучайная последовательность;

f – несущая частота;

ϕ_c – значение начальной фазы сигнала.

При проведении анализа функционирования СРС с ШПС примем, что длительность информационного символа τ_b в целое число L раз больше длительности импульса ПСП τ_i , $\tau_b = L\tau_i$.

Допустим, что оптимальный прием ФМ ШПС на фоне аддитивного белого гауссовского шума $n(t)$ обеспечивается при помощи когерентного корреляционного приемника. На рисунке 2 приведена структурная схема такого приемника с вариантом приема полезного сигнала $S_c(t)$ и K сигналов взаимных помех [2].

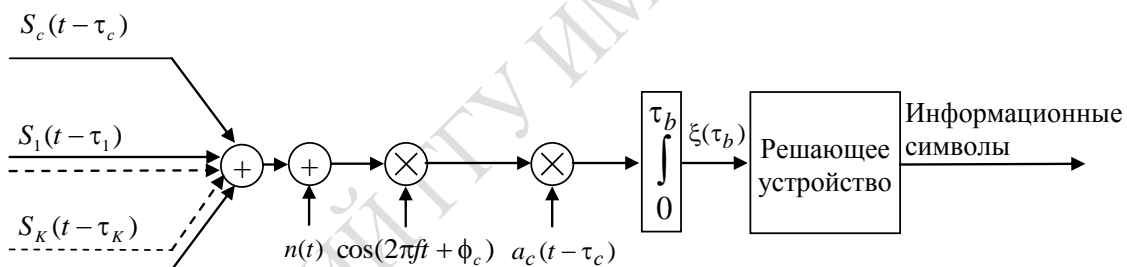


Рисунок 2 – Структурная схема когерентного корреляционного приемника СРС с ШПС

Суммарный сигнал взаимных помех $S_n(t)$, поступающий на вход приемника выглядит так [2]:

$$S_n(t) = \sum_{k=1}^K A_k \cdot b_k(t - \tau_k) \cdot a_k(t - \tau_k) \cdot \cos(2\pi ft + \phi_k) = \sum_{k=1}^K S_k(t - \tau_k), \quad (4)$$

где K – количество источников ШПС, составляющих взаимные помехи;

τ_k и ϕ_k – случайные время задержки и фаза k -го сигнала, по отношению к полезному сигналу $S_c(t)$.

Сигналы других абонентов по отношению к сигналу $S_c(t)$ являются непреднамеренными помехами и представляют собой структурную помеху. Предлагается формировать аналогичный сигнал $S_n(t)$ согласно с выражением (4) с целью создания преднамеренных структурных помех системам радиосвязи с ШПС.

Таким образом, предлагается метод формирования структурных помех для подавления СРС с ШПС, состоящий из следующих шагов:

1. Априорной информацией для формирования структурной помехи является длительность импульса ПСП τ_i и ее длина L . Оценку этих параметров можно осуществлять при помощи алгоритмов, предложенных в [10] и [11].

2. Значение K выбирается как максимальное количество порождающих многочленов для определенной длины ПСП L .

3. Формируется сигнал структурной помехи по выражению (4).

Для анализа эффективности воздействия структурной помехи, сформированной предложенным методом, на СРС с ШПС воспользуемся выражением для расчета вероятности ошибки на бит информации при воздействии взаимных помех, приведенном в [2]. Рассмотрим случай, когда между полезным сигналом $S_c(t)$ и k -й взаимной помехой $S_k(t)$ отсутствует синхронизация как по фазе, так и по времени задержки. Допуская, что мощности сигналов взаимных помех равны между собой $P_1 = P_2 = \dots = P_K$, получим [2]:

$$P_{ou} = \frac{\Lambda(\beta)}{\sqrt{2\pi\beta\sigma}} \exp\left[-\frac{\sigma^2\beta}{2}(\beta-2)\right], \quad (5)$$

где $\sigma = \sqrt{\frac{2E_s}{N_0}}$;

$$\beta = \frac{L \cdot N_0}{L \cdot N_0 + 4 \cdot K \cdot E_n};$$

E_n – энергия помехи на входе приемника;

$\Lambda(\beta) = \prod_{i=1}^K I_0\left(\frac{\beta \cdot A_i \cdot \tau_b}{\sqrt{L}}\right)$ – порождающая функция моментов случайной величины;

I_0 – модифицированная функция Бесселя нулевого порядка.

Используя выражение (5), были проведены расчеты по определению вероятности ошибки на бит информации в зависимости от отношения помеха/шум для СРС с ШПС с учетом воздействия структурных помех, сформированных предложенным методом. Начальные условия для расчетов: $K = 20, 30$ и 40 , длина ПСП $L = 1000$, отношение сигнал/шум $E_c/N_0 = 10$ и 15 дБ. Результаты расчетов в виде графиков изображены на рисунке 3.

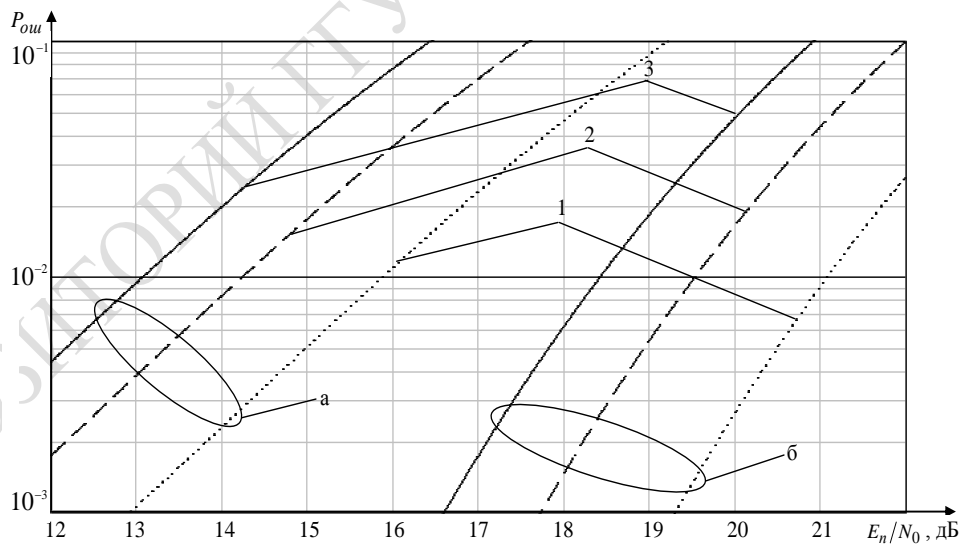


Рисунок 3 – Зависимость вероятности ошибки на бит информации для СРС с ШПС от отношения помеха/шум при учете воздействия взаимных помех для $E_c/N_0 = 10$ дБ (а) и $E_c/N_0 = 15$ дБ (б) при количестве взаимных помех 20 (кривые 1), 30 (кривые 2) та 40 (кривые 3).

Из полученного графика можно сделать вывод, что для достижения установленного критерия эффективности подавления (1) предложенным методом необходимо, чтобы мощность помехи превышала мощность полезного сигнала в точке приема для $K = 20$ на 6 дБ, для $K = 30$ на 4,5 дБ и для $K = 40$ на 3 дБ. Таким образом, увеличение K приводит к уменьшению мощности помехи, необходимой для достижения нужной вероятности ошибки на бит информации.

Заключение. Сравнивая результаты моделирования на рисунке 1 и рисунке 3, можно сделать вывод, что выигрыш по мощности излучения при использовании структурной помехи, сформированной предложенным методом, в сравнении с наиболее эффективной помехой для выше указанных условий составляет 21–25 дБ. С увеличением K , мощность помехи, необходимая для достижения критерия (1) уменьшается.

Для формирования помехи предложенным методом необходимо иметь априорную информацию о длительности импульса псевдослучайной последовательности и ее длине.

Число K можно выбирать как максимальное количество порождающих многочленов для определенного значения степени задающего полинома, используемого для формирования ПСП полезного сигнала.

Предложенный метод позволяет сформировать помеху СРС с ШПС с меньшим значением отношения помеха/сигнал, чем наиболее эффективная неструктурная помеха.

Литература

1. Кириллов, В.А. Средства создания радиоэлектронных помех и основы их боевого применения в сухопутных войсках: учебное пособие / Кириллов В.А., Тезюничев В.Ж. – Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет) – М., 2002. – 64 с.
2. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью / В.И. Борисов, В.М. Зинчук, А.Е. Лимарев [и др.] ; под. ред. В.И. Борисова. – 1-е изд. – М. : Радио и связь, 2003. – 635 с.
3. Ziemer, R.E. Fundamentals of Spread Spectrum Modulation / R.E. Ziemer. – 2nd ed. – Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall, 2007. – 86 p.
4. Torrieri, D.J. Principles of Secure Communication Systems / D.J. Torrieri. – Norwood, MA : Artech House, 1992. – 600 p.
5. Poisel, R.A. Introduction to Communications Electronic Warfare Systems / R.A. Poisel. – Norwood, MA : Artech House, 2008. – 641 p.
6. Poisel, R.A. Modern Communications Jamming Principles and Techniques, Norwood / R.A. Poisel. – MA : Artech House, 2011. – 870 p.
7. Прокис, Дж. Цифровая связь / Дж. Прокис. – Пер. с англ. / Под ред. Д.Д. Кловского. – М. : Радио и связь, 2000. – 800 с.
8. Wang, H. Performance of DSSS against Repeater Jamming / H. Wang, Z.J. Wang, J.B. Guo // IEEE Electronics, Circuits and Systems, 2006. – P. 858–861.
9. Варакин, Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами / Л.Е. Варакин. – М. : Радио и связь, 1985. – 384 с.
10. Burel, G. Detection of Spread Spectrum Transmissions using fluctuations of correlation estimators / G. Burel // IEEE Int. Symp. on Intelligent Signal Processing and Communication Systems. – 2000. – P. 358–363.
11. Zhanqi DONG The Detection, Symbol Period and Chip Width Estimation of DSSS Signals Based on Delay-Multiply, Correlation and Spectrum Analysis / Zhanqi DONG, Hanying HU // IEEE Electronics, Circuits and Systems. – 2007. – P. 140–144.

Житомирский военный институт
им. С.П. Королева Государственного
университета телекоммуникаций

Поступила в редакцию 11.11.2014