

# Помехоустойчивость систем передачи информации с быстрой псевдослучайной перестройкой рабочей частоты в условиях гармонических помех

В. В. Елишев<sup>1</sup>, С. Г. Почивалов, В. В. Джумков<sup>2</sup>  
Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского  
<sup>1</sup>elishev\_v\_v@mail.ru, <sup>2</sup>valentin32k@mail.ru

**Аннотация.** The increasing role of information transmission systems in various parts of various-control systems is noted. Noise immunity analysis of information transmission systems with fast incoherent pseudorandom frequency hopping in conditions of jamming is performed. To study noise immunity the most dangerous signal similar handicaps-like noise in the form of multitone jamming was selected. Receiving signals method with using additional communication channel information and quasi-optimal time diversity is proposed, which improves information transmission system noise immunity in conditions of multitone jamming. The analytical relationships for evaluating noise immunity of the systems with fast pseudorandom frequency hopping in conditions of multitone jamming was obtained. Graphs of noise immunity characteristics for various system parameters are given and conclusions about a possible gain when using the proposed method of receiving signals in conditions of multitone jamming are made.

**Ключевые слова:** control system; information transmission systems; noise immunity; pseudorandom frequency hopping; bit error rate; multitone jamming

## I. ВВЕДЕНИЕ

В развитии систем управления различного целевого назначения всё большую роль играют космические системы связи. Так космические системы передачи информации обеспечивают непрерывность, глобальность и высокую скорость доставки сообщений абонентам, находящимся в любой точке околоземного пространства. Постоянное увеличение объёмов передаваемой информации с одновременным повышением требований к достоверности и скорости передачи делает особенно актуальным рассмотрение вопросов обеспечения помехоустойчивости космических систем передачи информации при воздействии преднамеренных помех.

## II. ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ С БЫСТРОЙ ПСЕВДОСЛУЧАЙНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ В УСЛОВИЯХ ГАРМОНИЧЕСКИХ ПОМЕХ

Псевдослучайная перестройка рабочей частоты (ППРЧ) представляет собой способ расширения спектра сигнала в

пределах полосы частот космической системы передачи информации (КСПИ) путём скачкообразного изменения несущей частоты сигнала по псевдослучайному закону [1–4]. В зависимости от соотношения между скоростью перестройки частоты и скоростью передачи информационных символов различают быструю и медленную ППРЧ. При медленной ППРЧ на каждой частотной составляющей передаётся более одного информационного символа. При быстрой ППРЧ каждый символ информации переносится одной или поочередно несколькими частотными составляющими сигнала. При быстрой ППРЧ, как правило, происходят разрывы фазы формируемого высокочастотного колебания и образованный сигнал становится некогерентным.

КСПИ в составе систем управления различного целевого назначения должны устойчиво функционировать в любых условиях и обстановке, в том числе при воздействии преднамеренных помех. Перспективным методом обеспечения помехоустойчивости КСПИ является применение быстрой некогерентной ППРЧ с  $M$ -ичной частотной манипуляцией в сочетании с временным разнесением (ВР) и помехоустойчивым кодированием [2, 4–9].

Особенностью КСПИ с быстрой ППРЧ является возможность использования полосы частотного спектра до нескольких гигагерц, что сильно затрудняет постановку широкополосных заградительных помех [4]. Кроме того такие КСПИ обладают возможностью за счёт перестройки частоты бороться с различными преднамеренными помехами, которые поражают отдельный участок (участки) частотного спектра системы.

Модели возможных помех и различные стратегии подавления КСПИ с быстрой ППРЧ приведены в работах [2–4, 9]. Наиболее вероятной помехой для КСПИ с быстрой ППРЧ является шумовая помеха, сосредоточенная в части рабочей полосы частот системы, в дальнейшем называемая – шумовая помеха в части полосы (ШПЧП) [2–9]. Постановка такой помехи требует минимальной осведомлённости постановщика помех о характеристиках и параметрах КСПИ. Помехоустойчивость приема сигналов с быстрой ППРЧ в условиях ШПЧП для жестких

методов принятия решений по каждому субсимволу сигнала без использования информации о радиоканале подробно рассматривается в работах [2, 4–9]. При этом можно получить достаточно высокие показатели помехоустойчивости КСПИ.

Более опасной, чем ШПЧП, для КСПИ с быстрой ППРЧ является полигармоническая помеха (ПГП), которая является сигналоподобной с коэффициентом взаимной корреляции с сигналом близким к единице [2–4, 7, 9]. Эффективная постановка такой помехи требует высокой осведомлённости постановщика помех о характеристиках и параметрах КСПИ, а также дополнительного согласования некоторых параметров помехи с параметрами системы. Предполагаем, что постановщик помех знает основные параметры КСПИ и обеспечивает оптимальное согласование с полезным сигналом по времени, частоте и мощности каждого тона ПГП, но не имеет сведений о последовательности перестройки рабочих частот. Воздействие такой ПГП может серьёзно ухудшить характеристики помехоустойчивости КСПИ и нарушить функционирование системы управления [2, 7, 9].

Для получения требуемой помехоустойчивости КСПИ с быстрой ППРЧ в условиях воздействия ПГП предлагается использовать дополнительную информацию о канале. Приёмник сигналов с быстрой ППРЧ будет осуществлять некогерентное линейное сложение субсимволов сигнала до принятия решения в решающем устройстве приемника.

Произведем оценку помехоустойчивости приема сигналов с быстрой ППРЧ для самой опасной стратегии постановки ПГП, описанной в работе [9]. Цель постановщика помех – максимизировать вероятность ошибки на бит (ВОБ)  $P_b$  информации, поступающей абонентам КСПИ [1–3]. Передатчик помех на входе приемника должен поставить  $N$  равных по мощности гармонических помех (ГП) со случайной фазой, исходя из имеющейся мощности РГП, так, чтобы мощность каждой ГП была чуть больше мощности сигнала  $P_c$ , и распределить ГП по всей полосе частот системы  $W$  таким образом, чтобы ровно одна ГП попадала в  $M$ -ичные информационные полосы частот. Число поражённых помехой  $M$ -ичных полос во всей полосе частот системы будет равно  $N$ . При анализе помехоустойчивости полагалось, что система синхронизации не вносит дополнительных потерь, ГП точно совпадают по частоте с частотными позициями сигнала с ППРЧ, а тепловой шум системы пренебрежимо мал.

Мощность каждой гармонической помехи –

$$P_{ГП} / N = P_c / \alpha, \quad (1)$$

где  $\alpha$  выбирается так, чтобы ВОБ была максимальной (для рассматриваемого случая  $\alpha = 1$ ). Если информационный символ не подавляется, а любая из других  $M - 1$  частотных позиций подавляется ГП, то ошибка будет всегда, если  $\alpha < 1$ , и никогда для  $\alpha > 1$ . При совпадении символа сигнала и ГП ошибки не будет, вероятность этого события для подавляемого  $M$ -ичного канала будет  $1 / M$ . Используя

методику работы [10], легко получить формулы для оценки помехоустойчивости данного случая:

$$P_b = \begin{cases} 0.5, \alpha_{xc} = \frac{k \cdot q_b}{M}; q_b \leq \frac{M}{k} \\ \frac{M}{2 \cdot k \cdot q_b}, \alpha_{xc} = 1; q_b > \frac{M}{k} \end{cases} \quad (2)$$

где  $q_b = E_b / N_{ГП}$  – отношение сигнал/помеха (ОСП);

$k = \log_2 M$  – число информационных бит на  $M$ -ичный символ без кодирования;

$E_b = P_c / R_b$  – принимаемая энергия на бит, когда скорость передачи двоичной информации  $R_b$ ;

$N_{ГП} = P_{ГП} / W$  – эффективная спектральная плотность мощности ГП, абстрактная величина, определяемая по аналогии с ШПЧП [4, 9].

На рис. 1 показаны зависимости вероятности ошибки на бит от ОСП при  $M = 2$  и  $M = 16$  для худшего случая ПГП (сплошная линия). Сокращениями  $xc$  обозначены худшие случаи для различных помех. Для сравнения характеристик помехоустойчивости представлены штрихпунктиром зависимость ВОБ от ОСП при ШПЧП и штрихами зависимость ВОБ от отношения сигнал/шум (потенциальная помехоустойчивость) при тех же значениях  $M$ , вычисленные по формулам работы [5]. При  $q_b$  ниже порога (2) вся полоса частот системы  $W$  заполняется в точности одной ГП на каждую  $M$ -ичную полосу и мощность ГП выше  $P_c$  обратно пропорционально ОСП, тогда как ВОБ поддерживается равной 0,5.

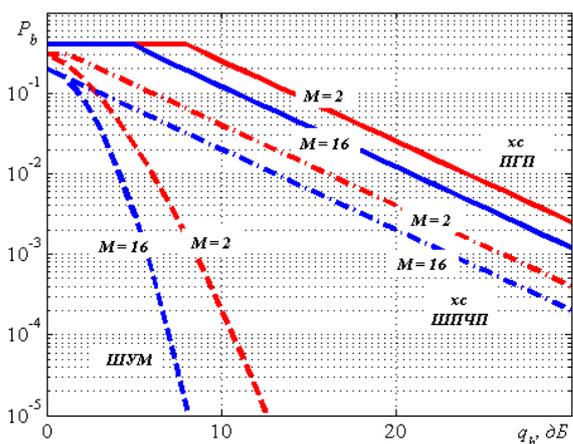


Рис. 1. Зависимость вероятности ошибки на бит от отношения сигнал/помеха для полигармонических помех, шумовых помех в части полосы пропускания и шума

Радиоканал с быстрой ППРЧ оказывается полностью подавленным, а достоверная передача информации абонентам КСПИ невозможной. При  $q_b$  выше порога (2) зависимость ВОБ от ОСП будет линейной вместо экспоненциальной для шума во всей полосе. Очевидно, что помеха ПГП значительно более эффективна, чем ШПЧП, особенно при возрастании  $M$ . Можно сделать вывод, что помехоустойчивость приема сигналов с быстрой ППРЧ в

условиях ППП ухудшается с увеличением  $M$  в отличие от ШПЧП и является очень низкой.

Эффективным и простым способом повышения помехоустойчивости рассматриваемых систем с быстрой ППРЧ является применение временного разнесения с уровнем разнесения равным  $L$ , что соответствует простейшему коду с повторением символов [2–9]. При ВР каждый информационный символ передается  $L$  раз, то есть энергия субсимвола –  $E_c = kE_b / L$ . Все субсимволы передаются на разных частотах с использованием быстрой ППРЧ со скоростью  $R_c$  равной  $R_h$  – скорости перестройки частоты (скачков частоты). Причем  $R_c = LP_s = LR_b / k$ , где  $R_s$  – скорость передачи информации в  $M$ -ичных символах.

При анализе помехоустойчивости допустим, что приемник КСПИ использует идеальную дополнительную информацию о канале, то есть определяет, подавляется ли данный скачок частоты. Скачок частоты считается подавляемым, когда на двух или более выходах энергетических детекторов фиксируется высокое напряжение. Будем считать, что приемник использует некогерентное линейное сложение субсимволов сигнала с ППРЧ до вынесения решения об  $M$ -ичном символе в решающем устройстве [10]. Если хотя бы один из  $L$  субсимволов не подавляется, то принимается решение об  $M$ -ичном символе без ошибки. Если все  $L$  субсимволов подавляются ГП, тогда необходимо выбрать самую большую из символьных метрик:

$$\left\{ x_i = \sum_{j=1}^L y_{ij}; 1 \leq i \leq M \right\}, \quad (3)$$

где  $y_{ij}$  – выходное напряжение энергетического детектора для  $i$ -го  $M$ -ичного субсимвола, на  $j$ -й передаче с разнесением. Такие решения называются мягкими. На основе этих субоптимальных метрик в общем случае нельзя получить выражения законченной формы для вычисления ВОБ, поэтому использовался метод границ Чернова [10].

Для ВОБ и произвольного разнесения  $L$  можно записать верхнюю границу:

$$P_b \leq \begin{cases} \frac{M}{2} [\beta L / q_b]^L, & \alpha_{xc} = \alpha_0; \quad q_b \geq \zeta L, \quad \alpha_{xc} = \frac{kq_b}{LM} \\ \frac{M}{2} \left[ \frac{((M-2)\alpha_{xc} / (1-\alpha_{xc}))^{1-\alpha_{xc}}}{\alpha_{xc} M} \right]^L, & \frac{LM}{k(M-1)} \leq q_b \leq \zeta L \end{cases}, \quad (4)$$

где  $\alpha_0$ ,  $\beta$  и  $\zeta = \alpha_0 M / k$  представлены в работе [10, табл. 3].

Далее для уравнения (4) был получен квазиоптимальный параметр  $L$ , который минимизирует первую строку:

$$P_b \leq \frac{M}{2} \exp(-L_{opt}), \quad \alpha_{xc} = \alpha_0, \quad L_{opt} = \delta q_b; \quad q_b \geq \gamma, \quad (5)$$

где  $\delta = \frac{1}{\beta e}$  и  $\gamma = \frac{1}{\delta}$  (это предел  $q_b$ , гарантирующий что  $L_{opt} \geq 1$ ) представлены также в работе [10, табл. 3]. Для значений  $q_b < \gamma$ ,  $L_{opt} = 1$ .

Оптимальный уровень ВР  $L$  позволяет вновь получить экспоненциальную зависимость ВОБ от ОСП, что показано на рис. 2 для  $M = 2$ ,  $M = 4$  и  $M = 16$ . Из рис. 2 видно, что происходит значительное улучшение характеристик помехоустойчивости систем с ППРЧ в условиях ППП относительно случая без разнесения. Выигрыш для  $P_b = 10^{-5}$  достигает 35 дБ при  $M = 2$  и 37,5 дБ при  $M = 16$ . С точки зрения показателей помехоустойчивости систем с ППРЧ наилучшие характеристики КСПИ достигаются при  $M = 4$ .

Необходимо отметить, что  $L_{opt}$  представляет собой непрерывный численный параметр, способный принимать любые положительные значения равные или большие единицы. На практике уровень ВР  $L$  может принимать только целочисленные значения, следовательно, реальные характеристики помехоустойчивости КСПИ всегда будут хуже, чем зависимости, изображенные на графиках. Тем не менее, приведённые в статье результаты полезны как предельные значения показателей помехоустойчивости систем с быстрой ППРЧ и ВР в условиях помех типа ППП, оптимизированных за постановщика помех.

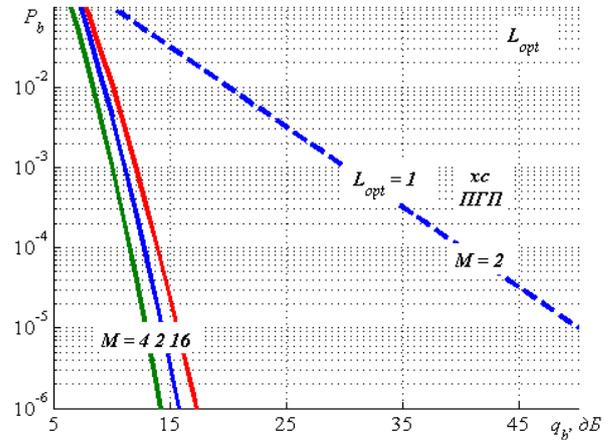


Рис. 2. Зависимость вероятности ошибки на бит от отношения сигнал/помеха для полигармонических помех при оптимальном временном разнесении

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в статье результаты позволяют сделать некоторые важные выводы о помехоустойчивости КСПИ с быстрой ППРЧ в условиях воздействия преднамеренных помех.

В том случае, когда постановщик помех обладает высокой осведомлённостью о характеристиках и параметрах КСПИ, он способен подавить радиоканалы КСПИ наиболее опасными помехами типа ППП, которые рассмотрены в данной статье.

Для обеспечения помехоустойчивости КСПИ необходимо применять ППРЧ с широкой общей полосой частот в сочетании с временным разнесением и использовать мягкие решения с дополнительной информацией о канале.

Применение оптимального временного разнесения с дополнительной информацией о канале сильно снижает эффективность передатчика помех и восстанавливает экспоненциальную зависимость ВОБ от ОСП. Для дальнейшего повышения помехоустойчивости рекомендуются более сложные схемы помехоустойчивого кодирования [2, 5, 9], например, коды Рида-Соломона совместно с временным разнесением.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Борисов В.И., Зинчук В.М. Помехозащищённость систем радиосвязи. Вероятностно-временной подход. Изд. 2-е, испр. М.: РадиоСофт, 2008. 260 с.
- [2] Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е. Помехозащищённость систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / под ред. В.И. Борисова. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: РадиоСофт, 2011. 512 с.
- [3] Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е., Немчилов А.В., Чаплыгин А.А. Пространственные и вероятностно-временные характеристики эффективности станций ответных помех при подавлении систем радиосвязи / под ред. В.И. Борисова. М.: РадиоСофт, 2008. 360 с.
- [4] Склад Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение изд. 2-е, испр., пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2016. 1104 с.
- [5] Стогов Г.В., Елишев В.В. Помехоустойчивость систем связи с быстрой ППРЧ и кодированием в условиях шумовых помех в части полосы // Техника средств связи. Сер. Техника радиосвязи. 1991. Вып.1. С. 57–63.
- [6] Елишев В.В., Почивалов С.Г. Метод повышения помехоустойчивости космических систем связи с быстрой псевдослучайной перестройкой рабочей частоты в условиях радиоэлектронного подавления. // Сборник трудов Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2016. С. 297–301.
- [7] Torrieri D.J. Principles of secure communications systems. Dedham, MA: Artech House, 1985. 433 p.
- [8] Torrieri D.J. Frequency hopping with multiple frequency-shift keying and hard decisions //IEEE Trans. Commun. 1984. v.COM-32. №5 Pp. 574–582.
- [9] Bird J.S., Felstead E.B. Antijam performance of fast frequency-hopped M-ary NCFSK – an overview // IEEE J. Select. Areas Commun. 1986. v. SAC-4. №2. Pp. 216–233.
- [10] Levitt V.K. FH/MFSK performance in multitone jamming // IEEE J. Select. Areas Commun. 1985. v.SAC-3. №5. Pp.627–643.