

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ НА СИСТЕМУ СВЯЗИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИМПЛЕКСНЫХ КОДОВ

DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-7-13-19

**Кузнецов Виталий Степанович,**  
Национальный исследовательский университет "МИЭТ",  
Москва, Зеленоград, Россия, [vitaliy\\_kuznetsov@hotmail.com](mailto:vitaliy_kuznetsov@hotmail.com)

**Волков Алексей Станиславович,**  
Национальный исследовательский университет "МИЭТ",  
Москва, Зеленоград, Россия, [leshvol@mail.ru](mailto:leshvol@mail.ru)

**Солодков Алексей Викторович,**  
Национальный исследовательский университет "МИЭТ",  
Москва, Зеленоград, Россия, [solodkov\\_aw@mail.ru](mailto:solodkov_aw@mail.ru)

**Чугунов Илья Владимирович,**  
Национальный исследовательский университет "МИЭТ",  
Москва, Зеленоград, Россия, [ivchugunov2016@gmail.com](mailto:ivchugunov2016@gmail.com)

Результаты данной работы получены в рамках выполнения прикладных научных исследований (Грант №14.578.21.0215 RFMEFI57816X0215) при запланированной финансовой поддержке Министерства Образования и Науки Российской Федерации.

**Ключевые слова:** многостанционный доступ, ad hoc сети, MANET, МДКР, РЭБ, DSSS, CDMA

Существующие средства радиосвязи, используемые в государственных и специальных структурах, представляют собой совокупность разнородных средств, не предоставляющих возможности их использования в качестве единой системы радиосвязи. Основным недостатком данных систем связи является обязательное наличие базовой станции, что подразумевает централизованную структуру беспроводной сети с управляющей базовой станцией. Данное замечание верно в условиях естественно ограниченной радиовидимости, так как при потере связи с базовой станцией отдельные абоненты теряют возможность передачи сообщений другим абонентам данной радиосети. Также стоит отметить возможность создания условий искусственного ограничения доступа абонентов к среде, вызванных преднамеренным воздействием на базовую станцию радиосети постановщиком помех. Предложена реализация многопользовательской системы без статической базовой станции в топологии сети предложенной системы. Приведено описание исследуемой многопользовательской системы связи с прямым расширением спектра с временным разделением множественного доступа и ее структуры кадра и пакета данных, а также рассмотрено воздействие широкополосных, узкополосных и импульсных помех на характеристики данной системы связи. Получены зависимости вероятности ошибки на выходе декодера при воздействии на сигнал узкополосной помехи с разной амплитудой и импульсных помех разной скважности от отношения энергии элементарного бита псевдослучайной последовательности, используемой для расширения спектра, к энергии шума. Предложены рекомендации при реализации подобного рода систем для повышения помехозащищенности при описанных типах помех.

#### Информация об авторах:

**Волков Алексей Станиславович**, к.т.н., доцент кафедры "Телекоммуникационные системы" федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники", Москва, г. Зеленоград, Россия

**Солодков Алексей Викторович**, преподаватель кафедры "Телекоммуникационные системы" федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники", Москва, г. Зеленоград, Россия

**Чугунов Илья Владимирович**, магистрант кафедры "Телекоммуникационные системы" федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники", Москва, г. Зеленоград, Россия

#### Для цитирования:

Кузнецов В.С., Волков А.С., Солодков А.В., Чугунов И.В. Исследование воздействия преднамеренных помех на систему связи с применением симплексных кодов // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Том 14. №7. С. 13-19.

#### For citation:

Kuznetsov V.S., Volkov A.S., Solodkov A.V., Chugunov I.V. (2020) An impact of the effect of intentional jamming on a communication system based on simplex codes. T-Comm, vol. 14, no.7, pp. 13-19. (in Russian)

## СВЯЗЬ

### Многостанционный доступ на основе ШПС в сети без базовых станций

При работе системы связи в условиях преднамеренных помех в режиме временного разделения абонентов наиболее уязвимым к воздействию помех звеном становиться базовая станция, поскольку она организует сетку временного разделения, обеспечивает синхронизацию, управление мощностью, процедуры входа новых абонентов в сеть и так далее.

При её утрате или подавлении организуется сеть с топологией «звезда» (рис. 1) с временным разделением, где каждая из станций может быть т.н. центральной станцией (ЦС), т.е. определять синхронизацию и прочие служебные данные только в своем таймслоте [1].

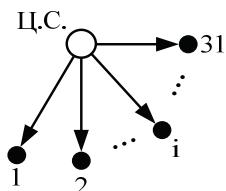


Рис. 1. Сеть с топологией «звезда» при отключенной базовой станции

В зависимости от метода расширения спектра, выбранного расширяющего ансамбля и числа абонентов возможно различные конфигурации такой сети. В рассматриваемом примере в качестве сигналов выбраны шумоподобные сигналы (ШПС) на основе симплексных кодов, а число абонентов зафиксировано равным 31. Такой выбор параметров привел к выбору базы ШПС равно 1023. Тогда в прямой радиолинии (от ЦС к абонентам) возможно одновременная передача 31 разных каналов по 2 ШПС на каждый канал, как будет показано далее. Если мощность передатчика ЦС недостаточна для организации указанного режима, то в прямой радиолинии возможно организовать режим MANET.

В обратной радиолинии (от абонентов к ЦС) устанавливается режим асинхронной CDMA с использованием 2 разных ШПС из общего объема ансамбля на абонента. Чтобы избежать подавления слабого сигнала на входе принимающего абонента сильным сигналом от близко расположенного передатчика соседнего абонента, в обратной радиолинии следует выбрать на передачу направленные антенны в сторону к ЦС [1].

#### Организация кадра

Максимальное число пар абонентов выбрано равным 30 (один абонент вещает в сторону сразу всех других абонентов).

Всего в сети будет  $n_{ab_{max}} = n_{nap_{max}} + 1 = n_{BH} = 31$  абонент ( $n_{BH}$  – количество временных интервалов). За каждым абонентом должны быть закреплены  $\frac{V}{31} = \left\lceil \frac{1024}{31} \right\rceil = 32$  псевдослучайных последовательностей (ПСП). Каждый из этих ШПС является адресом  $i$ -го абонента,  $1 \leq i \leq 31$ .

Длительность одного кадра, структура которого представлена на рис. 2:

$$T_k = n_{BH} \cdot (t_{zapas} + D_{10} \cdot \tau_{ch})$$

С другой стороны, для разборчивой речи необходимо обеспечить скорость передачи данных не менее  $R_{min} = \frac{k_{ab}}{T_k} = 2,4 \cdot 10^3$  бит/с.

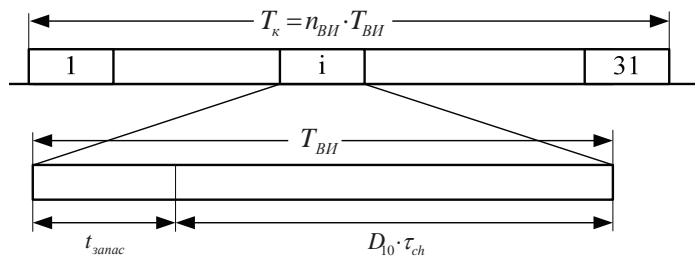


Рис. 2. Структура кадра

$$t_{zapas} = \frac{r_{max}}{c} = \frac{4 \cdot 10^3 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^8} = 13,33 \text{ мкс}$$

Тогда полоса частот будет определена как:

$$W = \frac{1,2 \cdot D_{10}}{\frac{k_{ab}}{R_{min} \cdot n_{BH}} - t_{zapas}} = \frac{1,2 \cdot 1023}{\frac{4}{2,4 \cdot 10^3 \cdot 31} - 1,35 \cdot 10^{-6}} = 26 \cdot 10^6 Гц,$$

$$\text{где } \tau_{ch} = \frac{1,2}{W} = 0,0923 \text{ мкс},$$

$$T_{BH} = (13,5 \cdot 10^{-6} + 1023 \cdot \tau_{ch}) = 1169 \cdot \tau_{ch} = 107,9 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$$

$$\text{Длительность кадра } T_k = 31 \cdot T_{BH} = 3,34 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Выигрыш обработки от расширения спектра методом прямой последовательности равен [2-5]

$$\frac{W}{R_1} = \frac{26 \cdot 10^6}{(4,8 \div 48,0) \cdot 10^3} = 31,33 \div 21,33 \text{ дБ,}$$

$$\text{где } R_1 = R_{min ab} \cdot n_{nap_{ab}} \cdot n_{BH/ab}.$$

Таким образом, при передаче в каждом временном интервале только в два адреса максимальная скорость передачи снизилась только в  $\frac{72,0 \cdot 10^3}{48,0 \cdot 10^3} = 1,5$  раз, но требуемая мощность передачи в каждом временном интервале при этом снизилась в  $\frac{30}{2} = 15$  раз.

#### Структура пакета

В начале пакета выбранная среди всех абонентских станций (АС) станция привязки передает для всех абонентов сигнал цикловой синхронизации, указанный как  $T_c$  на рис. 3.

Кадр содержит 31 временной интервал. Согласно возможностям разделяющего ансамбля сигналов, в каждом временном интервале может быть организована сеть типа «каждый абонент со всеми абонентами».

Максимально возможное число принимающих абонентов в каждом временном интервале равно 30.

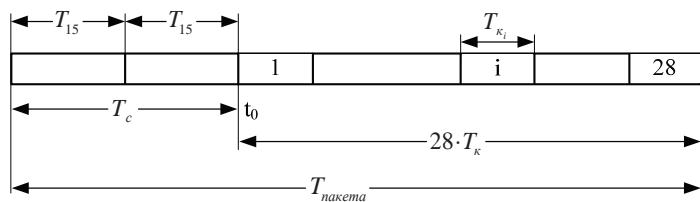


Рис. 3. Структура пакета данных

Определим допустимое число кадров в пакете при допустимой нестабильности тактовой частоты  $\frac{\Delta\tau_{ch}}{\tau_{ch}} = 1 \cdot 10^{-7}$  при

условии отсчета времени от момента  $t_0$ , задаваемом сигналом синхронизации.

$$\Delta\tau_{ch} \cdot 1169 \cdot x_{BI} = 0,1 \cdot \tau_{ch}$$

$$x_{BI} = \frac{0,1 \cdot \tau_{ch}}{\tau_{ch} \cdot 1169} = \frac{0,1 \cdot \tau_{ch}}{1 \cdot 10^{-7} \cdot 1169} = 855,43 \text{ ВИ}$$

или  $\frac{855,43}{31} = 27,6$  кадров.

Примем 28 кадров/пакет.

$$T_{пакет} = T_c + 28 \cdot T_k = 2 \cdot T_{15} + 28 \cdot T_k$$

$$T_c = 2 \cdot T_{15} = 2 \cdot D_7 \cdot D_8 \cdot \tau_{ch} = 2 \cdot 127 \cdot 255 \cdot \tau_{ch} = 64770 \cdot \tau_{ch} = 5,98 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Тогда,

$$T_{пакет} = 5,98 \cdot 10^{-3} + 93,52 \cdot 10^{-3} = 99,5 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Удельный объем времени, выделяемого под цели кадровой синхронизации, составит  $\frac{T_c}{T_{пакет}} = 0,06$ , т.е. 6%.

### Расчет помехозащищенности (ПЗ)

Расчет выполняется в предположении, что в течение каждого временного интервала (ВИ,  $1 \leq i \leq 31$ ) кадра временного разделения каждый  $i$ -ый абонент одновременно передает данные для двух разных абонентов.

Принимаем также, что для разделяющего ансамбля декодер каждого абонента содержит 2 группы по 16 согласованных фильтров (показано на рисунке 4) в каждой, что соответствует передаче двух ШПС на канал и обеспечивает, таким образом, передачу  $2 \cdot 4 = 8$  бит/канал за время текущего временного интервала.

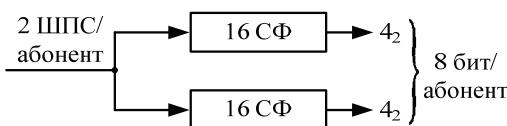


Рис. 4. Структурная схема разделяющего ансамбля декодера

Это означает, что в каждом ВИ одновременно передаются один ШПС из общего объема с длиной 1023 чипа, т.е. 8 бита информации в сторону каждого абонента. Вероятность блоковой ошибки в декодере оценивается выражением

$$Q_{ou.} \leq 31 \cdot (1 - \Phi(\sqrt{\frac{P_c}{\sigma^2} \cdot d_x})) + 3 \cdot (1 - \Phi(\sqrt{\frac{P_c}{\sigma^2} \cdot d_x})) =$$

$$= 34 \cdot (1 - \Phi(\sqrt{\frac{P_c}{\sigma^2} \cdot d_x})),$$

где  $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$  – интеграл вероятности.

Для симплексного (или ортогонального) кода

$$q_{bit} = \frac{Q_{ou.}}{2} \leq 17 \cdot (1 - \Phi(\sqrt{\frac{P_c}{\sigma^2} \cdot d_x})) = 10^{-3}$$

При длине ШПС 1023, целевой вероятности битовой ошибки для передачи голоса  $q_{bit} = 10^{-3}$  и помехозащищенности (ПЗ), определяемым выбором расширяющего ансамбля [6-10],

$$ПЗ = \frac{2 \cdot d_x}{x^2} = \frac{2 \cdot 512}{3,851^2} = 69,05 = 18,4 \text{ дБ.}$$

можно получить требуемое отношение

$$\frac{E_{bit}}{N_0} = \frac{W/R_1}{ПЗ} = \frac{26 \cdot 10^6}{(4,8 \div 48,0) \cdot 10^3 \cdot 69,05} = 18,95 \div 8,95 \text{ дБ.}$$

Как было сказано, система связи может быть подвержена воздействию преднамеренного радиоэлектронного противодействия. Следует рассмотреть возможные типы помех и их влияние на систему связи с использованием ШПС сигналов.

### Рассматриваемые типы помех

#### Широкополосная помеха

Рассмотрим создание одного типа преднамеренных помех, которые могут быть смоделированы с помощью стационарного гауссовского шума [11] с нулевым средним и равномерным распределением спектральной плотности мощности (по крайней мере, в рассматриваемой области частот). Тогда при постоянной мощности полученного сигнала  $J$  спектральная плотность мощности сигнала помех  $J_0$  равна  $J/W$ , где  $W$  – ширина полосы частот диапазона, в которой создаются помехи. Если генератор, используя свою мощность, создает помехи во всем диапазоне расширенного спектра  $W_{ss}$ , его называют широкополосным постановщиком помех [11].

Известно, что вероятность битовой ошибки  $P_B$  в когерентной системе связи *BPSK* при наличии широкополосного шума равна

$$P_B = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0 + J_0}}\right) = Q\left[\sqrt{\frac{2E_b / N_0}{1 + (E_b / N_0)(J / S) / G_p}}\right] \quad (1)$$

При заданном отношении мощностей сигнал/шум всегда будет существовать неснижаемая вероятность возникновения ошибки, вызванной наличием помех. Единственная возможность снизить эту вероятность состоит в увеличении коэффициента расширения спектра сигнала [11].

Графики зависимостей  $P_B$  от  $E_b/N_0$  при заданном значении  $J/S$  приведены на рис. 5.

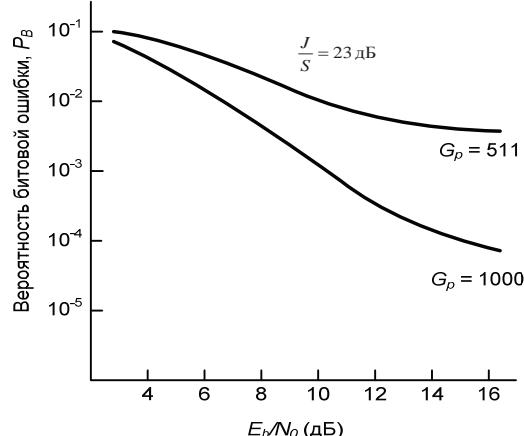


Рис. 5. Вероятность битовой ошибки в зависимости от  $E_b/N_0$  при заданном значении  $J/S$

### Узкополосная помеха

Другой тип помех, противоположный рассмотренной выше, это узкополосная помеха, и её частный случай – гармонической помехой на несущей (ГПН, англ. *CW jamming signal*). Для соблюдения единства обозначений можно фиксировать суммарную (среднюю) мощность помехи  $J_{cp} = J_0 \cdot W$ , где  $J_0$  – величина спектральной плотности мощности эквивалентной широкополосной интерференции (сигнал гашения) [11].

Вероятность ошибки кодового слова для ГПН имеет верхнюю границу

$$P_b \leq \sum_{m=2}^M Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{J_0}} R_c w_m\right), \quad (2)$$

что совпадает с результатом, эквивалентным воздействию широкополосной помехи. Это означает, что с точки зрения борьбы с помехами и статистическом моделировании достаточно рассматривать только один тип помех, поэтому мы остановимся на узкополосной помехе [11].

### Импульсная помеха

Существует мешающий сигнал, который имеет весьма существенное влияние на качество широкополосных систем. Такой мешающий сигнал состоит из импульсов с равномерным частотным спектром, который покрывает полностью полосу частот сигнала  $W$ . Их обычно называют импульсной интерференцией или парциально-временным мешающим сигналом (ПВМС) [11].

Предположим, что мешающий сигнал имеет среднюю мощность  $J_{cp}$  в полосе частот сигнала  $W$ . Тогда  $J_0 = J_{cp}/W$ . Вместо непрерывной передачи источник мешающего сигнала передает импульсы повышенной мощности  $J_{cp}/\alpha$  за долю времени  $\alpha = s/D$ , т.е. вероятность, того, что источник мешающего сигнала создает в данный момент времени помеху, равна  $\alpha$ . Для простоты мы предположим, что импульсы интерференции простираются на целое число сигнальных интервалов и, таким образом, влияют на целое число  $s$  символов.

Если источник мешающего сигнала не выдает помеху, то переданный сигнальный бит предполагается принятым без ошибки, а когда он работает, вероятность ошибки для некодированной широкополосной системы равна  $Q\left(\sqrt{2\alpha E_b / J_0}\right)$ .

Таким образом, средняя вероятность ошибки на бит равна [11]:

$$\begin{aligned} P_2(\alpha) &= \alpha \cdot Q\left(\sqrt{2\alpha E_b / J_0}\right) + (1-\alpha)Q\left(\sqrt{2E_b / N_0}\right) \approx \\ &\approx \alpha \cdot Q\left(\sqrt{\frac{2\alpha \cdot W / R}{J_{cp} / P_{cp}}}\right). \end{aligned} \quad (3)$$

### Оценка воздействия импульсной помехи на ПСП

Искажение элементарных символов переводят расчет АКФ в СФ в расчет ВКФ искаженного сигнала и опорной ПСП. Положим, что ПСП считается верно принятой, если отклик СФ или результат интегрирования коррелятором в конце ПСП больше, чем уровень максимального бокового выброса. Считая, что вычисление корреляции ведется в символах  $[+1, -1]$ , каждый ошибочно принятый символ ПСП приводит к уменьшению значения главного пика на 2 (до его нормировки к общей длине ПСП) и увеличению в худшем

случае бокового пика на 2. Максимальное число неверно принятых символов ПСП, при которых исправление ошибок произойдет, будет равно

$$t_{max} = \left\lfloor \frac{N - k_{max}(\tau \neq 0) - 1}{4} \right\rfloor, \quad (4)$$

где  $k_{max}(\tau \neq 0)$  – величина максимального бокового лепестка АКФ. Для хороших последовательностей величина  $k_{max}(\tau \neq 0)$  близка к  $\sqrt{N}$ .

Если на длине внутренней ПСП ( $N$ ) произошло не более  $t_{max}$  ошибок, то ошибки будут считаться исправленными. Таким образом, вероятность ошибочного декодирования равна:

$$Q_{out} \leq \sum_{i=t+1}^N C_N^i \cdot q^i \cdot (1-q)^{N-i}, \quad (5)$$

где  $q$  – вероятность ошибки элементарного символа (чипа) для внутренней ПСП.

Исходя из оценок (6) и (7) можно предположить, что при поражении импульсной помехой, покрывающей не более 1/4 чипов в таймслоте, помехоустойчивость системы не должна ухудшиться, в то же время при превышении этой длительности (т.е. при оптимальном с точки зрения постановщика помех  $\alpha_{opt}$ ) вероятность битовой ошибки приема информационных сигналов будет определяться выражением (5) и резко ухудшится.

### Цифровое моделирование воздействие преднамеренных помех

В качестве модели узкополосной помехи рассмотрен синусоидальный сигнал с частотой 60 кГц (случай ГПН) и амплитудой, связанной с амплитудной информационного сигнала коэффициентом  $K_{har}$ . Помеха складывается с информационным сигналом в каждом таймслоте.

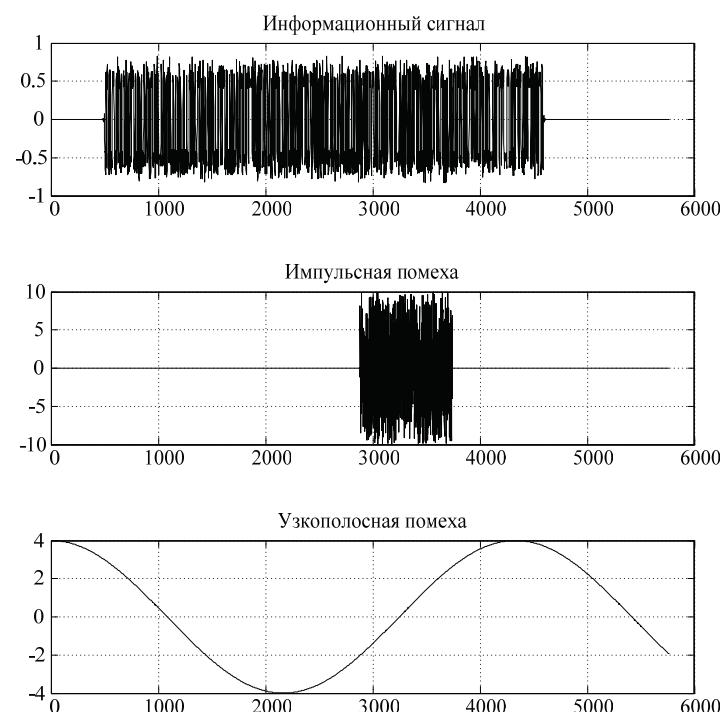


Рис. 8. Общий вид информационного сигнала и сигналов помех

Модель импульсной помехи – имеющий заданную скважность псевдослучайный сигнал с амплитудой, равной половине полного размаха АЦП выбранной разрядности. Осциллограмма сигналов обоих типов помех и информационного сигнала на длительности таймслота приведена на рис. 8. Амплитуды даны в условных величинах, по оси абсцисс – номера отсчетов сигнала. Нулевые значения в начале и конце информационного сигнала – имитация времени распространения.

Вероятность битовой ошибки, при воздействии узкополосной и импульсной помехах, приведены на рис. 9 и 10 соответственно.

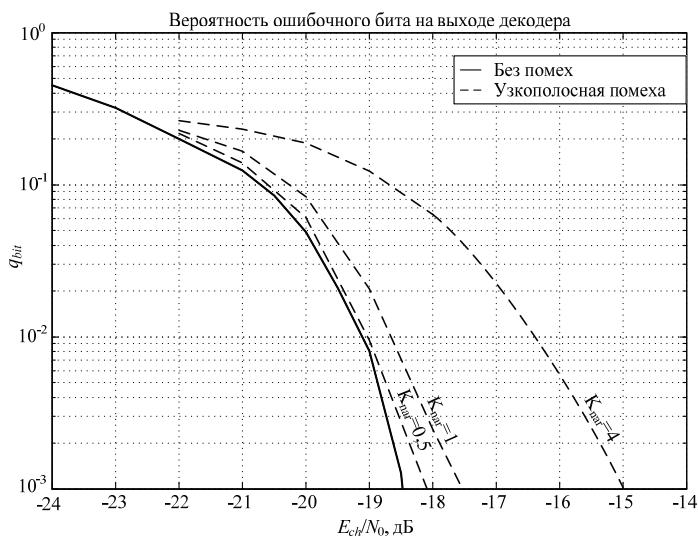


Рис. 9. Вероятность ошибки на бит для узкополосной помехи различной амплитуды

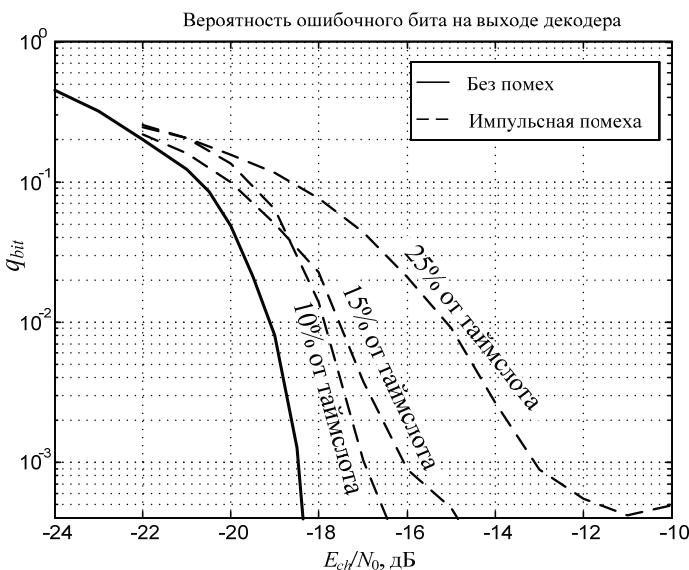


Рис. 10. Вероятность ошибки на бит для импульсной помехи различной скважности

Видно, что для узкополосной помехи со значением  $K_{nar} = 4$ , ухудшение по энергетике равно 3,5 дБ для достоверности  $q_{bit} = 10^{-3}$  (это соответствует мощности помехи на 12 дБ больше, чем мощность информационного сигнала в точке приема) и не превосходит 1 дБ, при равной мощности помехи и сигнала. А для импульсной помехи при неопти-

мальном с точки зрения постановщика помех значения  $\alpha$  ухудшение характеристик не превосходит 1,2 дБ. При оптимальном значении  $\alpha$  ухудшение достигает 3 дБ, а достигнутая вероятность ошибки на бит ограничивается границей  $q_{bit} = 10^{-4}$ .

Следует обратить внимание, что при узкополосной помехе [12] при больших соотношениях сигнал/шум (более -10 дБ) следует увеличить инертность АРУ, поскольку в ином случае помеха может смодулировать коэффициент усиления СВЧ части и значительно деградировать достоверность приема. Одновременно с этим следует перейти на принятие решений по откликам СФ с фиксированным порогом, поскольку при использовании адаптивного порога и наличии узкополосной помехи средний уровень сигнала будет определяться неверно.

Воздействие импульсной помехи добавляется до блока АРУ и импульсная помеха имеет мощность на 10 дБ большую, чем сигнал. Вместе с тем, при выборе схемы и алгоритма АРУ следует учитывать возможность появления еще более мощных помеховых сигналов, а в проведенном исследовании цифровой модели длительность импульсной помехи следует интерпретировать как собственно длительность помехи плюс среднее время срабатывания АРУ по окончанию воздействия помехи.

Взаимодействие аналоговой части с выбранными типами помех при их значительной энергии и сценарий силового поражения СВЧ тракта не рассматривалось.

#### Использование помехоустойчивого кодирования

Можно дополнительно увеличить стойкость к помехам, введя помехоустойчивое кодирование.

За время кадра абоненту можно передать блок максимальной длины  $8 \cdot 31 = 248$  двоичных символов.

Выберем для защиты от помех двоичный код БЧХ( $n, k, d$ )= $\text{БЧХ}(255, 215, 11)$  и укоротим его на  $i=7$  позиций.

В итоге получим укороченный циклический код БЧХ(248, 208, 11), исправляющий пять или менее независимых ошибок на длине кадра. Согласно исходным требованиям при передаче цифровых данных должна быть вероятность  $q_{bit} \approx \frac{Q_{out} \cdot d_x}{n} = 10^{-6}$ ; блоковая вероятность ошибки

$$Q_{out} \leq I(nq_c, t+1), \text{ где } I(x, m) = \frac{1}{\Gamma(m)} \int_0^x e^{-t} \cdot t^{m-1} \cdot dt - \text{неполная Г-функция}, x \text{ и } m - \text{ положительные параметры, а } \Gamma() - \text{ полная Г-функция [1].}$$

Например, при вероятности неверного приема символа ПСП  $q_c = 2 \cdot 10^{-3}$  вероятность ошибки на выходе кодера равна  $Q_{out} \leq I(0, 496, 6) = 1,42 \cdot 10^{-5}$ , а вероятность в пересчете на бит не превосходит  $q_{bit} \leq \frac{1,42 \cdot 10^{-5} \cdot 11}{248} = 6,3 \cdot 10^{-7}$ , что удовлетворяет требованиями для передачи речи. Данный код может исправлять также пакет ошибок  $b \leq \frac{n-k}{2} = 20$ , т.е., как минимум, один пакет ошибок  $b=8$  бит (полностью искаженный один или два временных интервала подряд). Такое решение позволяет получить выигрыш еще 1-2 дБ [13].

При практической реализации должны одновременно работать оба декодера, как показано на рис. 11.

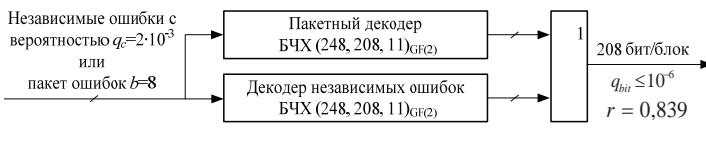


Рис. 11. Декодер кода БЧХ

### Повышение скрытности системы

От радиоэлектронного подавления можно уклониться, если обеспечить наибольшую скрытность системы при наличии систем радиотехнической разведки.

Структурную скрытность можно считать обратно пропорциональной общему объему  $V_{tot}$  выбранных для использования ПСП в системе связи (этот параметр называется также вариантность). Следует учитывать, что при использовании какого-либо ансамбля ПСП вариантность равна произведению объема ансамбля  $V$  на количество способов генерации ансамбля.

Предлагаемый в качестве расширяющего симплексный код с  $m = 10$ , имеет общее число эмпирически отобранных ансамблей 435, объем каждого ансамбля равен 1024, что дает общий объем кодовых комбинаций  $4,4 \cdot 10^5$ .

Достигнуть, например, значения не менее  $10^8$  при выбранной изначально базе сигнала почти возможно, перейдя на использование большого семейства Касами. Для него число ансамблей равно 6·435, причем объем каждого равен 32·1023. Общая вариантность в таком случае будет равна  $0,8 \cdot 10^8$ . Переход к другой базе сигнала, скажем, 2048, потребует дополнительную процедуру отбора порождающих последовательностей для симплексного кода. Другие последовательности при этой базе покажут ухудшение характеристик системы. Объем симплексного кода для такой базы будет не более  $3,6 \cdot 10^5$ . Наконец, для базы 4096 возможно построение большого семейства Касами, для которого объем кодовых комбинаций равен  $2,2 \cdot 10^8$ .

Энергетическую скрытность можно определить как отношение мощности чипа к мощности шума в полосе сигнала, и для предложенного изначально варианта оно составляет  $-17,54$  дБ. Переход, например, к базе сигнала  $D = 2048$  позволит увеличить её до  $-20$  дБ.

### Заключение

Предложена структура кадра, при которой максимальная скорость передачи снизилась только в 1,5 раза, а требуемая мощность передачи в каждом временном интервале снизилась в 15 раз.

Для увеличения скорости передачи предложено использование синхронной передачи данных абонентами в режиме «каждый со всеми» и использование нескольких ШПС из выделенного абоненту набора, а для избегания асинхронного режима передачи и проблемы «ближний- дальний» использовано временное разделение и выдача таймслота.

Рассмотрена помехоустойчивость предложенной системы связи к аддитивному тепловому шуму.

Рассмотрены основные типы преднамеренных помех и их влияние на помехоустойчивость системы связи с расширением спектра методом прямой последовательности. Определено, что наихудшим воздействием является парциально-временная помеха и ГПН. Для этих типов помех определены параметры.

Построена модель наиболее опасных типов преднамеренных помех и исследовано их влияние на вероятность синхронизации и вероятность битовой ошибки при передаче данных. Ухудшение достоверности приема информации при воздействии узкополосной помехи составило до 3,5 дБ при превышении сигналом помехи полезного сигнала на 12 дБ по мощности. Ухудшение достоверности приема информации при воздействии импульсной помехи составило до 1,2 дБ при поражении 15% длины расширяющей ПСП, что определено как предельный случай. Добавление помехоустойчивого кода с высокой относительной скоростью позволит снизить эти воздействия на 1-2 дБ.

Показано, что еще один способ повышения помехоустойчивости при преднамеренных помехах – повышение общей скрытности системы,

### Литература

1. Волков А.С. и др. Применение протокола TCP в мобильных самоорганизующихся сетях ad hoc, основанных на широкополосных сигналах // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2019. Т. 10. №. 1. С. 4-10.
2. Макаренко С.И., Иванов М.С., Попов С.А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Монография. СПб.: Свое издательство, 2013. 166 с.
3. Ипатов В.П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. Принципы и приложения. М.: Техносфера, 2007. 488 с.
4. Simon M.K. et al. Spread spectrum communications handbook. New York: McGraw-Hill, 1994. 1226 с.
5. Torrieri D. Principles of spread-spectrum communication systems. Springer, 2015. 641 с.
6. Баринов В.В., Лебедев М.В., Кузнецов В.С. Анализ корреляционных характеристик расширяющих ансамблей // Электросвязь. 2006. № 3. С. 38-39.
7. Barinov V.V., Kuznetsov V.S., Lebedev M.V. Spreading ensembles with improved correlation properties for multiple access // 2005 IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. IEEE, 2005. Т. 2. С. 1081-1085.
8. Кузнецов, В.С., Волков, А.С., Солодков, А.В., Баскаков, А.Е. Разработка гетерогенной помехозащищенной системы радиосвязи с временным кодово-адресным разделением // Т-Comm: Телекоммуникации и Транспорт. 2018. Т. 12. №. 9.
9. Кузнецов В.С., Шевченко И.В., Волков А.С., Солодков А.В. Генерация ансамблей кодов Голда для систем прямого расширения спектра // Труды МАИ. 2017. №. 96. С. 17-17.
10. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1989. 653 с.
11. Прокис Дж. Цифровая связь / Пер. с англ. под ред. Кловского Д.Д. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.
12. Куприянов А.В. Радиоэлектронная борьба. М.: Вузовская книга, 2013. 360 с.
13. Кларк Дж., мл., Кейн Дж. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи / Пер. с англ. С.И. Гельфанд; Под ред. Б.С. Цыбакова. М.: Радио и связь, 1987. 391 с.

## AN IMPACT OF THE EFFECT OF INTENTIONAL JAMMING ON A COMMUNICATION SYSTEM BASED ON SIMPLEX CODES

**Vitaliy S. Kuznetsov**, National Research University of Electronic Technology, National Research University of Electronic Technology,  
Moscow, Zelenograd, Russia, [vitaliy\\_kuznetsov@hotmail.com](mailto:vitaliy_kuznetsov@hotmail.com)

**Alexey S. Volkov**, National Research University of Electronic Technology, National Research University of Electronic Technology,  
Moscow, Zelenograd, Russia, [leshvol@mail.ru](mailto:leshvol@mail.ru)

**Alexey V. Solodkov**, National Research University of Electronic Technology, National Research University of Electronic Technology,  
Moscow, Zelenograd, Russia, [solodkov\\_aw@mail.ru](mailto:solodkov_aw@mail.ru)

**Ilia V. Chugunov**, National Research University of Electronic Technology, National Research University of Electronic Technology,  
Moscow, Zelenograd, Russia, [ivchugunov2016@gmail.com](mailto:ivchugunov2016@gmail.com)

### Abstract

Existing radiocommunication systems, used in government structures and special area, constitute a set of disparate systems, which cannot be used as a unified radiocommunication system. The main disadvantage of these systems is a requirement of the base station, which implies a need of centralized structure of wireless network with a base station. This point is true in the context of naturally limited radio visibility, because in the event of loss of connection with a base station individual subscribers lose the opportunity to transmit messages to other subscribers of this radio network. It is also worth mentioning that it is possible to create conditions for the artificially restricted access for subscribers to the radio environment, caused by a jammer's intentional impacts on the base station. This article features implementation of a multiuser system without static base station in the topology of the proposed system's network. It contains a description of the frame structure and the data packet of the proposed communication system with the direct spread spectrum and the time division multiple access. Impact of broadband, narrowband and pulse jamming on characteristics of the communication system was evaluated. As a result we managed to establish the relationship between the error probability out of decoder and the correlation of the chip's energy pseudorandom sequence to noise energy under the influence of a narrowband jamming with various amplitudes and pulse jamming of different duty cycle on the signal. We also suggested some recommendations for the implementation of such systems to increase the antijamming ability of described types of jamming.

**Keywords:** multi-station access, mobile ad hoc networks, MANET, DSSS, CDMA.

### References

1. Makarenko S.I., Ivanov M.S., Popov S.A., (2013), *Pomekhozashchishchennost' sistem svyazi s psevdosluchajnoj perestrojkoj rabochej chastoty* [Interference immunity of communication systems with pseudorandom adjustment of the operating frequency], Monografija, St. Petersburg, Russia.
2. Ipatov V.P., (2007), *Shirokopolosnye sistemy i kodovoe razdelenie signalov* [Wideband and code division systems], Tekhnosfera, Moscow, Russia.
3. Simon M.K., Omura J. K., Scholtz R.A. and Levitt B.K., *Spread Spectrum Communication Handbook.*, McGraw-Hill, New York, USA.
4. Torrieri D., *Principles of spread-spectrum communication systems*, Springer, Switzerland
5. Barinov V.V., Lebedev M.V., Kuznetsov B.C., (2006), Analysis of correlation characteristics of expanding ensembles. *Electrosvyaz.* No. 3, pp. 38-39.
6. Barinov V.V., Kuznetsov V.S., Lebedev M.V., (2005), Spreading ensembles with improved correlation properties for multiple access, *2005 IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications.* IEEE, vol. 2, pp. 1081-1085.
7. Kuznetsov V.S., Volkov A.S., Solodkov A.V., Baskakov A.E., (2018), Development of a heterogeneous anti-jam radio communication system with a time and code division multiple access. *T-Comm.* vol. 12, no. 9, pp. 4-9.
8. Volkov A.S., Bakhtin A.A., Ugrovatov A.V., Volkova E.A. et al., (2019), Application of the TCP protocol in mobile self-organizing ad hoc networks based on broadband signals. *Sistemy sinhronizacii, formirovaniya i obrabotki signalov*, vol. 10, no. 1, pp. 4-10.
9. Kuznetsov V.S., Shevchenko I.V., Volkov A.S., Solodkov AV., (2017), Generation of gold code ensembles for systems of direct spectrum expansion, no. 96, pp. 17-17.
10. Levin B.R. (1989), *Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radiotekhniki* [Theoretical foundations of statistical radio engineering], Moscow: Radio i svyaz'.
11. Proakis J. (2000), *Tsifrovaya svyaz'* [Digital communication], Translated by Kolovsky D.D., Nikolaev B.I. Moscow: Radio i svyaz'.
12. Kupriyanov A.V. (2013), *Radioelektronnaya bor'ba* [Electronic warfare], Vuzovskaya kniga.
13. Clark, George C., Jr., and J. Bibb Cain., (1987), *[Error-Correction Coding For Digital Communication]*, Kodirovaniye s ispravleniem oshibok v sisteme tsifrovoy svyazi, Translated by Gelfand S.I. Moscow: Radio i svyaz'.

### Information about authors:

**Vitaliy S. Kuznetsov**, Professor of the Department of Telecommunications, National Research University of Electronic Technology, Moscow, Zelenograd, Russia  
**Alexey S. Volkov**, assistant professor of the Department of Telecommunications, National Research University of Electronic Technology, Moscow, Zelenograd, Russia

**Alexey V. Solodkov**, associated professor of the Department of Telecommunications, National Research University of Electronic Technology, Moscow, Zelenograd, Russia

**Ilia V. Chugunov**, graduate student of the Department of Telecommunications, National Research University of Electronic Technology, Moscow, Zelenograd, Russia