

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СОВРЕМЕННЫХ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ И СВЯЗИ

В. И. Филатов¹, А. В. Сухов², М. А. Зайцев³, А. А. Генев⁴

¹ Московский Государственный Технический Университет имени Н.Э. Баумана
105055, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

² Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)
125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4

³ Московский университет имени С. Ю. Витте
115432, Москва, 2-й Кожуховский проезд, д. 12, стр. 1

⁴ Научно-исследовательский институт системных исследований РАН
117218, Москва, Нахимовский просп., 36, к.1

Статья поступила в редакцию 23 сентября 2020 г.

Аннотация. В статье рассмотрен радиоканал передачи данных на основе сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ), а также проведен расчет и оценка показателей комплексной помехоустойчивости. Рассмотрены результаты моделирования передачи данных в среде Simulink, определены значения вероятности ошибки в условиях шумов и определены частные оценки временной, пространственной и энергетической скрытности передачи данных. Были проведены расчеты и сравнение качественных характеристик разработанного программно-аппаратного комплекса, имитационных моделей системы передачи защищаемой информации с повышенной помехоустойчивостью и скрытностью и существующего изделия, данные о котором находятся в открытых источниках. При этом в общем случае под помехоустойчивостью систем радиосвязи (СРС) с ППРЧ понимается способность нормально функционировать, выполняя задачи по передаче и приему информации в условиях действия радиопомех. Полученные данные об исследуемых объектах говорят о высокой помехоустойчивости и скрытности радиочастотного канала связи разработанного программно-аппаратного комплекса. Для обеспечения статистической независимости ошибок при приеме

символов в режиме с ППРЧ на передающей стороне осуществляется временное перемежение, при котором каждый символ кодового слова передается по отдельному частотному каналу. В результате перемежения сигнал во временной области представляется бесструктурной формой, существенно затрудняющей эффективную постановку оптимальных помех. При приеме, путем операции деперемежения, возвращают исходное представление символов. Применяя виды модуляции с расширением спектра, обеспечивающие значительное расширение полосы частот сигнала, можно добиться существенного повышения помехоустойчивости передачи. Помехоустойчивость и скрытность являются двумя важнейшими составляющими помехозащищенности СРС.

Ключевые слова: помехоустойчивость, скрытность, вероятность ошибки, псевдослучайная перестройка рабочей частоты, радиоканал.

Abstract. The article reviews a radio data transmission channel based on signals with frequency-hopping spread spectrum (FHSS). Calculation and evaluation of the complex noise immunity parameters were carried out. The results of modeling data transmission in the Simulink environment were analysed, the error probability parameters in noise conditions were determined, and partial estimates of the time, space, and energy secrecy of data transmission were determined. Calculations and comparison of the quality characteristics of the developed hardware and software complex, simulation models of the protected information transmission system with increased noise immunity and secrecy were carried out. At the same time, in general, the noise immunity of the extended spectral signal (ESS) with the FHSS is the normal function, performing tasks for transmitting and receiving data in the conditions of radio interference. The received data on the research objects indicates the high noise immunity and secrecy of the radio frequency communication channel of the developed hardware and software complex. To ensure the statistical independence of errors when receiving characters in the mode with the FHSS, a time interleaving is performed on the transmitting side, in which each character of the code word is transmitted over independent frequency channel. As a result of

interleaving, the signal in the time area is presented as a unstructured form, which significantly complicates the effective formulation of optimal interference. On receipt, the original representation of characters is returned by the de-interleaving operation. By applying the types of modulation with spectrum expansion that provides a significant expansion of the signal frequency band, a significant increase in the noise immunity of the transmission can be achieved. Noise immunity and secrecy are the two most important components of the noise immunity of extended-spectrum signals (ESS).

Keywords: noise immunity, stealth, error probability, pseudo-random restructuring of the operating frequency, radio channel.

В настоящее время известно большое число способов повышения помехоустойчивости систем радиосвязи (СРС). Рассмотрению этих вопросов положено начало в конце 20-го века и продолжается в настоящее время [1-5]. Эти способы в общем разделяют на две группы:

- с помощью выбора метода передачи сообщений;
- с помощью совершенствования помехоустойчивых приемников.

Простым и применяемым способом повышения помехоустойчивости является увеличение отношения сигнал/помеха за счет увеличения мощности передатчика. Но этот метод может оказаться экономически не выгодным, так как связан с существенным ростом сложности и стоимости оборудования. Кроме того, увеличение мощности передачи сопровождается усилением мешающего действия данного канала на соседние в условиях высокой плотности загруженности полосы радиочастот. Другим способом повышения помехоустойчивости передачи сигналов является рациональный выбор вида модуляции. Применяя виды модуляции с расширением спектра, обеспечивающие значительное расширение полосы частот сигнала, можно добиться существенного повышения помехоустойчивости передачи. Помехоустойчивость и скрытность являются двумя важнейшими составляющими помехозащищенности СРС. При этом в общем случае под

помехоустойчивостью СРС с ППРЧ (впрочем, как и любых других СРС) понимается способность нормально функционировать, выполняя задачи по передаче и приему информации в условиях действия радиопомех. Следовательно, помехоустойчивость СРС – это способность противостоять вредному воздействию различного вида радиопомех, включая, в первую очередь, организованные помехи.

Радиоканалы с ППРЧ. Для обеспечения статистической независимости ошибок при приеме символов в режиме с ППРЧ на передающей стороне осуществляется временное перемежение, при котором каждый символ кодового слова передается по отдельному частотному каналу. В результате перемежения сигнал во временной области представляется бесструктурной формой, существенно затрудняющей эффективную постановку оптимальных помех. При приеме, путем операции деперемежения, возвращают исходное представление символов.

Применение операций перемежения и деперемежения символов, как с медленной, так и с быстрой ППРЧ позволяет корректировать пакеты ошибок, вызываемые помехами при квазинепрерывном режиме радиоподавления. Вместе с тем, техническая реализация режима ППРЧ представляет собой достаточно сложный процесс, поэтому его выбор может быть обусловлен только повышенными требованиями к помехозащите, а также высокими затратами на разработку. Кроме того, системы с ППРЧ не позволяют достигать высокой скорости передачи данных в силу ряда трудностей, связанных с синтезаторами когерентных частот.

Обобщенная структурная схема системы связи, использующей сигналы с программной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ-сигналы) представлена на рис.1.

Шаг перестройки, или расстояние между соседними частотами, определяется скоростью модуляции, то есть видом ППРЧ. В частности, при $R_c=R_s$ и использовании ППРЧ в сочетании с многопозиционной частотной модуляцией шаг перестройки равен расстоянию между соседними частотами

сигнала с многопозиционной частотной модуляцией. В случае некогерентной демодуляции, а именно этот алгоритм чаще всего используется в системах ППРЧ/М-ЧМ, для соблюдения условия ортогональности сигналов в усиленном смысле расстояние между соседними частотами выбирается кратным R_S . При минимальном частотном разnose, равном R_S , в пределах всей полосы частот W_{PC} размещаются $M = W_{PC}/R_S$ рабочих частот или частотных каналов с равномерным шагом. Эти рабочие частоты в одном из вариантов можно разбить на M_C неперекрывающихся частотных групп, каждая из которых занимает полосу шириной $mR_S = mR_C$ (m – кратность частотной модуляции).

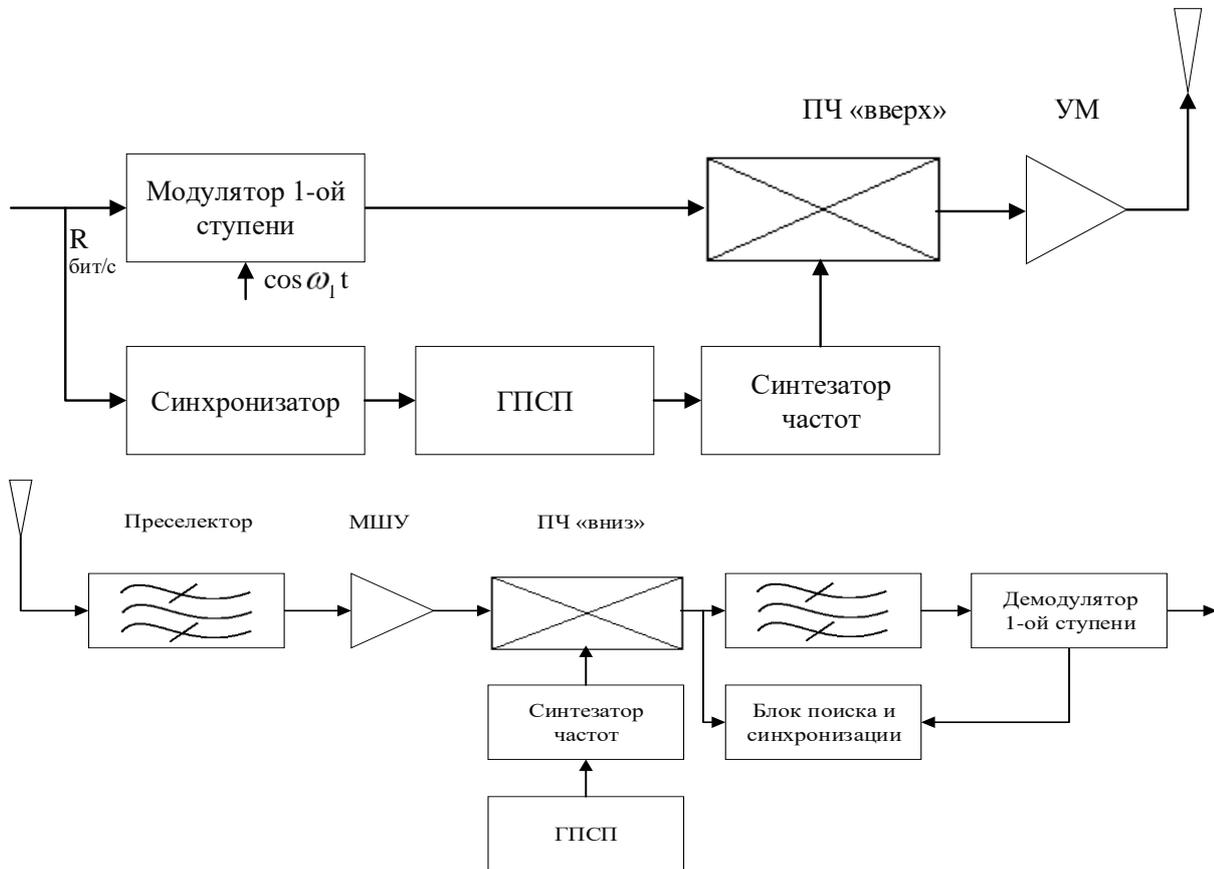


Рис. 1. Структурная схема связи, использующей сигналы с ППРЧ.

Пусть частоты, отображающие символы передаваемого сообщения, располагаются симметрично относительно текущей частоты несущей. Тогда центральные частоты $M_C = 2^k$ частотных групп будут определять множество псевдослучайно перестраиваемых рабочих частот. Перестройка осуществляется

с помощью цифрового синтезатора частот, управляемого с помощью k -разрядных сегментов ПСП, формируемой генератором ПСП. Частота передаваемого сигнала в интервале времени T_s определяется комбинацией текущей частоты несущей и частоты, отображающей символ передаваемого сообщения. В другом варианте допускается перекрытие соседних частотных групп, содержащих t частот, при минимальном расстоянии между ними равном R_c .

Пусть, как и в предыдущем варианте, центральные частоты частотных групп определяют множество псевдослучайно перестраиваемых рабочих частот. Количество частот в множестве в этом случае увеличивается с $M_c = \frac{M}{m}$ до $M - (m-1)$, то есть при $M \gg m$ приблизительно в m раз. Определим величину выигрыша при обработке, обеспечиваемого сигналом с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Если в синтезаторе формируется M частот с шагом Δf , то ширина полосы частот, занимаемая сигналом с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты, равна для медленной ППРЧ:

$$W_{pc} = (M - 1) * \Delta f + 2 * R_s \quad (1)$$

для быстрой ППРЧ:

$$W_{pc} = (M - 1) * \Delta f + 2 * R_c \quad (2)$$

В случае медленной перестройки $\Delta f = R_s$ и $W_c = R_s$, поэтому получаем

$$G_{МПРЧ} = \frac{W_{PC}}{W_c} = \frac{(M - 1) * \Delta f + 2 * R_s}{R_s} = (M + 1) \approx M \quad (3)$$

В случае быстрой перестройки один и тот же символ сообщения передается на N различных частотах (кратность повторения равна N), поэтому $\Delta f = R_c = R_s N$ и выигрыш будет равен

$$G_{БПРЧ} = \frac{W_{PC}}{W_c} = \frac{(M - 1) * \Delta f + 2 * R_c * N}{R_c} = (M * N + 1) \approx M * N \quad (4)$$

Таким образом, для сигналов с быстрой ППРЧ выигрыш при обработке определяется не только количеством используемых частот M , но и кратностью повторения частотных элементов.

Теоретической основой для разработки СРС с расширенным спектром сигналов является фундаментальная теорема К.Е.Шеннона, которая объединяет пропускную способность гауссовского канала C (бит/с), ширину полосы W_s , мощность сигнала P_s и мощность ограниченного по полосе аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ) P_i согласно выражению:

$$C = W_s * \log_2\left(1 + \frac{P_s}{P_i}\right) \quad (5)$$

В соответствии с выражением (5) наиболее целесообразным является «обмен» мощности сигнала P_s на полосу пропускания канала W_s , а при заданном отношении сигнал-шум в канале радиосвязи с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ) пропускная способность C может быть увеличена путем соответствующего расширения спектра сигнала. Если пропускная способность C равна требуемой скорости передачи информации R_b , то из (5) видно, что при $W_s > R_b$, канал радиосвязи может работать при значительном превышении мощности шума P_i над мощностью полезного сигнала P_s . Ширина занимаемой полосы частот при этом принципиальных ограничений не имеет с точки зрения параметров разрабатываемой СРС.

Модель комплексной помехоустойчивости радиоканала. Оценка комплексной помехозащищенности систем радиосвязи в условиях их подавления со стороны автоматизированной станции помех является одной из приоритетных задач в обеспечении устойчивости каналов и должна учитывать энергетические возможности и временную динамику изменения ситуации. Рассмотрим вероятностно-временную модель функционирования систем радиосвязи в условиях постановки помех. Известно общее выражение для среднего значения вероятности ошибки на бит информации P_E , позволяющее оценивать помехоустойчивость различных линий радиосвязи:

$$P_E(N) = P_{E_0} + P_{об}(T) * \left[1 - \frac{K_0}{N}\right] * (P_{E_{\Pi}} - P_{E_0}) \quad (6)$$

где $P_{E_{\Pi}} = P_E(q_{\Pi}^2)$, $P_{E_0} = P_E(q_0^2)$ – средние вероятности ошибки на бит при наличии и отсутствии помех соответственно;

$P_E(N)$ – вероятность правильного обнаружения источника радиоизлучения на одной частоте (для ППРЧ в частотном канале);

K_0 – среднее количество шагов поиска длительного T_0 , затрачиваемое при обнаружении сигнала;

N – количество сигналов, передаваемых за время T_0 .

Другая сторона помехоустойчивости характеризуется скрытностью СРС. Скрытность сигналов в системах радиосвязи, в зависимости от решаемых задач, предложено классифицировать на энергетическую, структурную, информационную, временную и пространственную. Вместе с тем, анализ такой классификации показал, что в рассматриваемом контексте интерес представляют энергетическая, временная и пространственная скрытности. При этом наиболее существенной в дуэльной ситуации противостояния систем радиосвязи и автоматизированной станции помех является именно энергетическая скрытность сигналов, так как начало функционирования большинства режимов постановки помех происходит сразу после энергетического обнаружения сигналов источников радиоподавления. Для процесса радиоподавления систем радиосвязи с ШПС существенным является факт излучения помехи именно в период нахождения сигнала на обнаруженной частоте несущей. Способность СРС противостоять действиям РТР, направленным на обнаружение сигналов, измерение параметров и определение направления их прихода, характеризуется понятием скрытность СРС. В зависимости от решаемых радиотехнической разведкой (РТР) задач скрытность сигналов СРС в общем случае может быть классифицирована на энергетическую, структурную, информационную, временную и пространственную виды скрытности.

Эффективное воздействие организованных помех на СРС с ППРЧ (впрочем, как и на СРС с другими видами сигналов) может быть обеспечено при условии, что постановщик помех, используя станцию РТР, успешно осуществляет перехват сигналов с ППРЧ. Под перехватом сигналов в общем случае понимается обнаружение, измерение соответствующих параметров сигналов СРС, например, мощности сигнала, рабочей частоты, ширины спектра, длительности скачка частоты, а также пеленгование (или определение местоположения) СРС.

Энергетическая скрытность направлена на исключение (существенное затруднение) обнаружения сигналов систем радиосвязи. В качестве показателей ее оценки могут быть использованы: вероятность обнаружения сигналов P_D при заданной вероятности ложной тревоги P_F ; отношение сигнал-шум (ОСШ) на входе приемного тракта q^2_0 , обеспечивающее заданные значения P_D и P_F , и дальность обнаружения D при заданном q^2 .

Временная скрытность систем радиосвязи определяется возможностью решения задач автоматизированной станцией помех за время существования сигнала в частотном радиоканале, то есть она зависит от условий применения автоматизированной станции помех и ее тактико-технических возможностей. Временную скрытность можно оценить необходимым временем для сбора сведений о параметрах сигналов систем радиосвязи с заданной вероятностью. С этих позиций анализ временной скрытности может быть основан на представлении временного режима работы систем радиосвязи на излучение и моментов их пребывания в зоне энергетической и электромагнитной доступностей автоматизированной станции помех.

Имитационное моделирование СРС с ППРЧ в среде Simulink.

Компьютерная имитационная модель в среде Simulink представляется в виде схемы, содержащей типовые функциональные блоки систем управления и управляемых объектов. В блоки включены компьютерные программы, вычисляющие математические функции. В ходе проведения моделирования были получены количественные оценки качества связи с помощью утилиты

подсчета средней вероятности ошибки, проанализирована форма сигнала с использованием анализатора спектра реального времени.

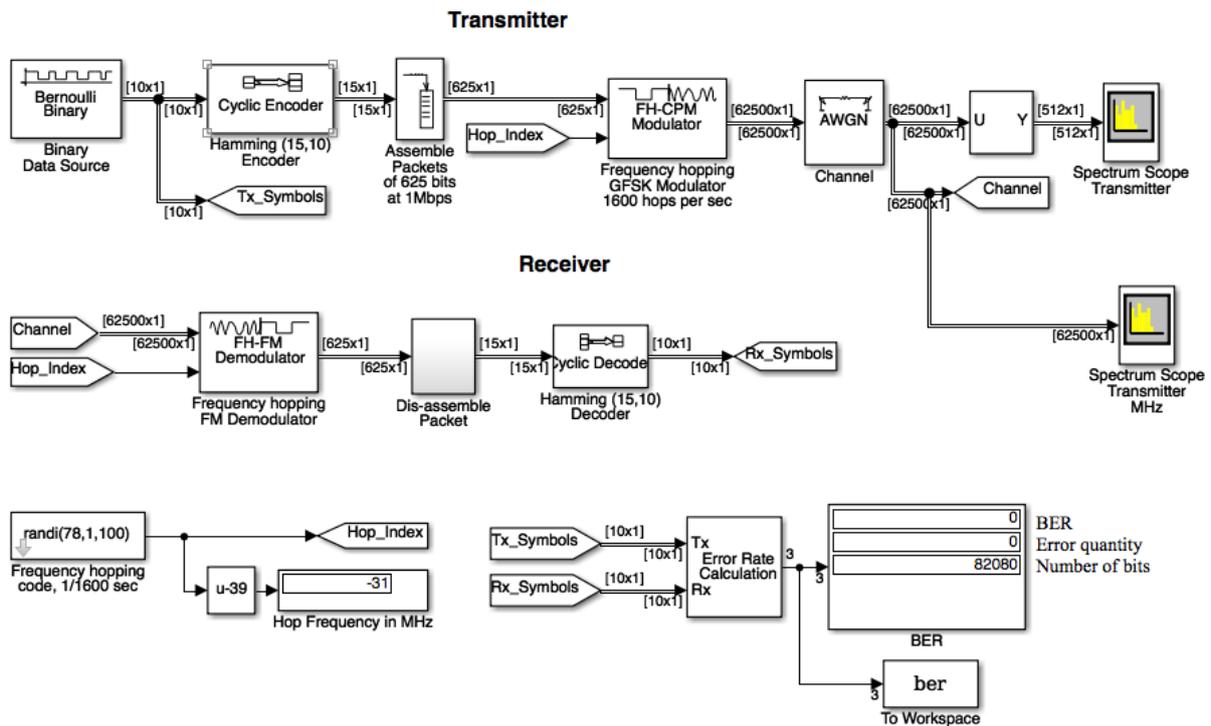


Рис. 2. Построение имитационной модели в среде MATLAB.

Модель ППРЧ радиочастотного канала в Simulink показана на рис. 2, входные данные генерируются с использованием двоичного генератора Бернулли. Двоичный генератор Бернулли генерирует двоичные значения, т.е. 0 и 1, используя выражение Бернулли. Выходной сигнал двоичного генератора кодируется с использованием циклического кодировщика и формы двоичных 0 и 1 для кадра, чтобы облегчить передачу. Бинарные значения модулируются с использованием ЧМн, которая использует сигнал скачкообразной перестройки частоты в качестве несущей, затем сигнал передается по каналу с АБГШ. На стороне приемника синхронизация обеспечивается с использованием одного и того же сигнала скачкообразной перестройки частоты. Для декодирования сигнала используется циклический декодер, BER рассчитывается с использованием калькулятора ошибок и отображается на дисплее BER. Пример отображения сигнала на анализаторе спектра в режиме Waterfall представлен на рис. 3, ширина спектра на анализаторе спектра представлена на рис. 4. Вид сигнала в режиме накопления и в режиме водопада представлен на рис. 5.

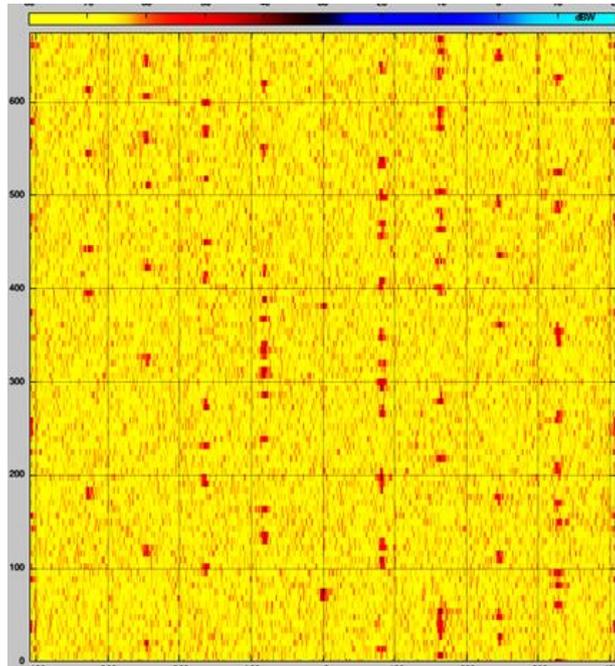


Рис. 3 Отображение сигнала на анализаторе спектра в режиме Waterfall.

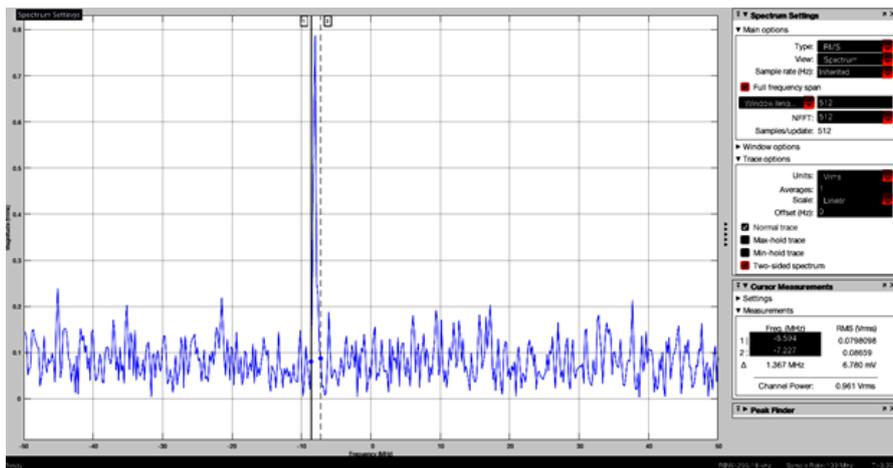


Рис. 4 Ширина спектра передаваемого сигнала.

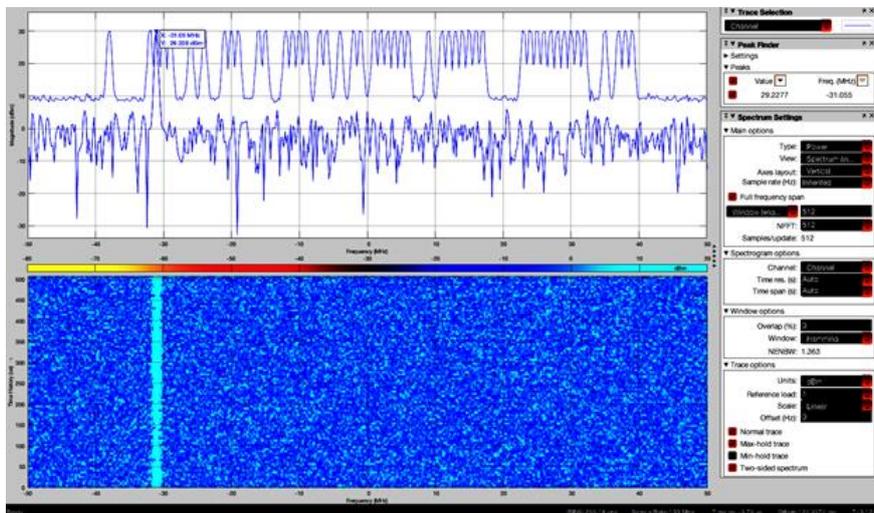


Рис. 5 Вид сигнала в режиме накопления и в режиме водопада.

Анализ средней вероятности ошибки (СВО) на бит P_E проводится в условиях действия гауссовских шумов приемного устройства системы радиосвязи (СРС) и аддитивных организованных помех, в основном, применительно к каноническим (типовым) системам с ЧМН, которые являются базовой основой более сложных СРС. При этом, E_b/N_0 — отношение энергии сигнала, приходящейся на 1 бит принимаемого сообщения (E_b), к энергетической спектральной плотности шума (N_0), BER – количество ошибок за единицу времени.

Данная концепция вероятностно-временной модели функционирования СРС в условиях РЭП позволяет производить оценку СВО на бит, учитывающую энергетические и временные возможности СРС и станции РТР по поиску и обнаружению сигналов со случайным временем запаздывания.

С использованием вероятностно-временной модели получено общее выражение для СВО на бит информации P_E , позволяющее оценивать помехоустойчивость различных линий радиосвязи

$$P_E(N) = P_{E_0} + P_{об}(N) * \left[1 - \frac{K_0}{N} \right] * (P_{E_1} - P_{E_0}) \quad (7)$$

где $P_{E_0} = P_E(q_0^2)$, $P_{E_1} = P_E(q_1^2)$ – средние вероятности ошибки на бит информации при отсутствии и наличии помех РЭП;

$P_{об}(N)$ – вероятность правильного обнаружения факта передачи сигналов СРС станцией РТР на одной из частот;

K_0 – среднее число шагов поиска длительностью T_0 , затрачиваемое на правильное обнаружение сигнала СРС станцией РТР за время $T = N * T_0$;

N – число сигналов, передаваемых за время T ;

q_0^2 – отношение сигнал-шум;

q_1^2 – отношение сигнал-помеха.

На рис. 6 наглядно показана средняя вероятность ошибки на бит переданной информации в зависимости от соотношения энергии полезного сигнала к энергии помехи, что позволяет оценить помехоустойчивость системы.

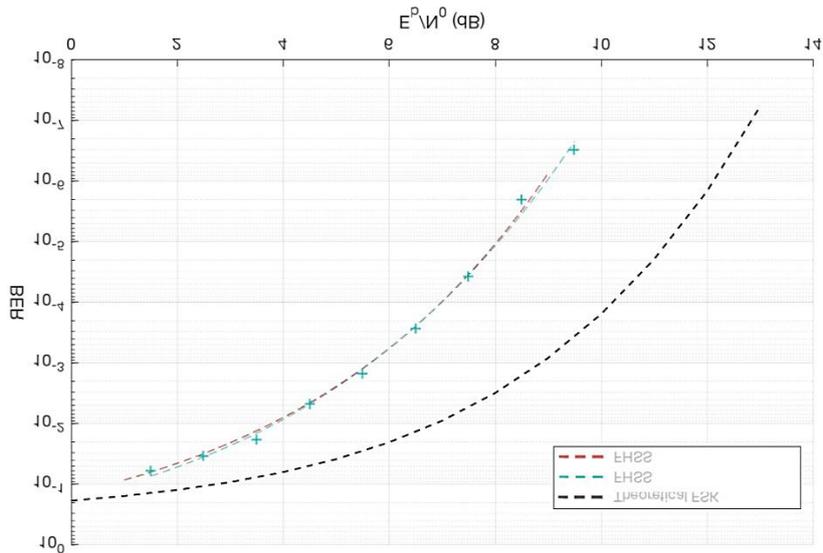


Рис. 6. Коэффициент ошибок по битам проведенной симуляции в сравнении с теоретическими показателями сигнала с модуляцией FSK.

Проведение измерительных испытаний и расчетов. При решении задачи обнаружения в качестве модели используем сигнал с ППРЧ и двоичной ЧМ, представляющий собой последовательность радиоимпульсов со случайной начальной фазой, частоты которых перестраиваются в соответствии с заданным псевдослучайным кодом в диапазоне W_s . Модель такого сигнала за время j -го скачка частоты длительностью T_h может быть представлена в виде:

$$s(t) = \sqrt{2 * P_s} * \cos[(\omega_j + i * \Omega) * t + \varphi_i] * g(t - jT_h) \quad (8)$$

где P_s – мощность сигнала;

$\omega_j = \overline{1, M_f}$, M_f – число рабочих частот;

Ω – частота модуляции;

$i = 0.1$;

φ_i – начальная фаза скачка частоты, от 0 до 2π ;

$g(t)$ – единичная функция.

Независимо от стратегии постановки помех с ограниченной мощностью, отношение сигнал-помеха в результате обработки увеличивается на величину $\frac{N}{n}$, которая и определяет коэффициент расширения спектра сигнала. Параметр N

представляет собой размерность расширенного радиосигнала с длительностью T и шириной полосы частот W_s [1]:

$$N = 2 * W_s * T = 2 * 126\,000\,000 * \frac{1}{1600} = 157\,500 \quad (8)$$

а параметр n - размерность информационного сигнала с длительностью T и минимальной шириной полосы F_s

$$n = 2 * F_s * T = 1 * 1\,000\,000 * \frac{1}{1600} = 1\,250 \quad (9)$$

Отсюда следует

$$\frac{N}{n} = \frac{2 * W_s * T}{2 * F_s * T} = \frac{W_s}{F_s} = \frac{157\,500}{1\,250} = 126 \quad (10)$$

Таким образом, коэффициент расширения спектра характеризует, с одной стороны, меру увеличения отношения сигнал-помеха в результате сжатия расширенной полосы частот радиосигнала и приведения ее к полосе частот информационного сигнала. С другой стороны, коэффициент расширения спектра определяет число степеней свободы расширенного сигнала $2 * W_s * T$, которыми вынужден оперировать постановщик помех при организации подавления СРС с расширением спектра.

Применительно к СРС с ППРЧ полученный выше коэффициент расширения спектра можно конкретизировать. При расширении спектра за счет перестройки частоты общая полоса частот СРС $W_s \geq \frac{a * M_f}{T_h}$, где $\frac{a}{T_h}$ - частотный интервал, значение которого выбирается из условия обеспечения ортогональности информационных сигналов, т.е. более полного исключения влияния смежных каналов друг на друга. Значение параметра, учитывая коэффициент расширения спектра сигнала для СРС с ППРЧ, можно записать в виде:

$$K_s = 10 * \log_{10} \left(\frac{a * M_f}{T_h * F_s} \right) = 10 * \log_{10} \left(\frac{625 * 126}{\frac{1}{1600} * 1\,000\,000} \right) = 10 * \log_{10} 126 = 21 \text{дБ} \quad (11)$$

Коэффициент расширения спектра K_s непосредственно связан с другим важным в теории и технике СРС понятием: база сигнала B_s , которую принято

определять отношением ширины общей полосы частот радиосигнала W_s к скорости передачи информации R_b

$$B_s = \frac{W_s}{R_b} = \frac{126\,000\,000}{1\,000\,000} = 126 \quad (12)$$

Наиболее полно положительные свойства СРС с ППРЧ в условиях РЭП проявляются при использовании сигналов с большой базой. Однако увеличение базы сигналов приводит к некоторым негативным последствиям. В частности, на входе приемника данной СРС увеличивается число взаимных помех от различных СРС, работающих в одном и том же диапазоне частот, появляются дополнительные составляющие сигнала, вызванные эффектом многолучевости, и др.

При проектировании и разработке СРС, кроме коэффициента расширения спектра сигнала K_s , используется и такой критерий, как запас помехоустойчивости M_j , измеряемый в децибелах и определяемый выражением $M_j = K_s - \left(\frac{E_s}{G_j}\right)_{\min} - L_E$, где $\left(\frac{E_s}{G_j}\right)_{\min}$ - минимальное отношение сигнал-помеха на выходе приемного устройства, обеспечивающее заданное значение вероятности ошибочного приема информационного символа; L_E - энергетические потери, обусловленные реализацией аппаратуры.

$$M_j = K_s - \left(\frac{E_s}{G_j}\right)_{\min} - L_E = 21 - 8 - 2 = 11\text{дБ} \quad (13)$$

Стратегия борьбы с организованными помехами СРС с ППРЧ заключается, как правило, в «уходе» сигналов СРС от воздействия помех, а не в «противоборстве» с ними. Поэтому в СРС с ППРЧ при защите от помех важной характеристикой является фактическое время работы на одной частоте. Чем меньше это время, тем выше вероятность того, что сигналы СРС с ППРЧ не будут подвержены воздействию организованных помех.

Помехоустойчивость СРС с ППРЧ зависит не только от времени работы на одной частоте, но и от других важных параметров СП и СРС, например, от

вида помехи и ее мощности, мощности полезного сигнала, структуры приемного устройства и заложенных в СРС способов помехоустойчивости.

Эффективное воздействие помех на СРС с ППРЧ может быть достигнуто лишь при условии знания постановщиком помех соответствующих параметров сигналов СРС, например, центральных частот каналов, скорости скачков частоты, ширины информационной полосы частот, мощности сигнала и помехи в точке нахождения приемного устройства СРС. Указанные параметры СРС постановщик помех добывает, как правило, непосредственно с помощью станции радиотехнической разведки (РТР), а также путем пересчета измеренных параметров СРС в другие, функционально связанные с ними, характеристики СРС. Например, измерив длительность скачка частоты, можно рассчитать ширину полосы частотного канала приемника СРС.

При РТР обнаружение сигналов усложняется тем, что структура и ряд характеристик и параметров сигналов СРС, как правило, неизвестны постановщику помех. Это лишает возможности использования в станциях РТР согласованных способов приема сигналов. Поэтому в станциях РТР применяются такие алгоритмы приема и обработки сигналов, которые, с одной стороны, для своей реализации требуют минимальной априорной информации о сигналах СРС, с другой стороны, должны обеспечивать высокую вероятность обнаружения и низкую вероятность ложной тревоги, обусловленную собственными шумами обнаружителя.

Шумы обнаружителя представим в виде АБГШ с односторонней спектральной плотностью G_0 , значение которой известно. Типовыми значениями вероятностей обнаружения P_d и ложной тревоги P_F при перехвате сигналов СРС являются: $P_d = 0.5 \dots 0.9$; $P_F = 10^{-3} \dots 10^{-6}$.

Проектируя СРС для работы в условиях РЭП, следует обеспечить высокую энергетическую скрытность сигналов СРС, или малую вероятность их перехвата станцией РТР в течение заданного интервала времени.

Энергетическая скрытность направлена на исключение или существенное затруднение обнаружения сигналов СРС станцией РТР. Энергетическая

скрытность может быть оценена различными показателями, например, вероятностью обнаружения сигналов СРС P_D при заданной вероятности ложной тревоги P_F ; отношением сигнал-шум на входе станции РТР q^2 , обеспечивающим заданные вероятности обнаружения P_D и ложной тревоги P_F ; наконец, дальностью обнаружения (разведки) D_p сигналов СРС при заданном отношении сигнал-шум q^2 . Последний показатель (дальность обнаружения) находит широкое применение при решении многих практических задач.

Энергетическая скрытность. Дальность разведки сигналов передатчика СРС D_p станцией РТР с некоторой степенью приближения может быть найдена из выражения

$$D_{p\max} = \frac{\lambda}{2 * (4 * \pi)} \sqrt{\frac{P_{\text{пер}} * G_{\text{пер}} * G_{\text{пр}}}{P_{\text{пр}}}} \quad (14)$$

$$= \frac{0.13}{2 * (4 * \pi)} \sqrt{\frac{0.1 * 10 * 5}{10^{-10}}} = 1156.6 \text{ [м]}$$

$$\lambda = \frac{c}{F} = \frac{299\,792\,458}{2\,400\,000\,000} \approx 0.13 \text{ [м]} \quad (15)$$

Где λ – длина волны разведываемого сигнала, м;

c – скорость света, м/с;

F – несущая частота разведываемого сигнала, Гц.

$P_{\text{пер}}$ – мощность передатчика, Вт;

$P_{\text{пр}}$ – чувствительность приемника, ведущего РТР;

$G_{\text{пер}}$ – коэффициент усиления антенны передатчика в дБ;

$G_{\text{пр}}$ – коэффициент усиления антенны приемника, ведущего РТР.

Структурная скрытность. Структурная скрытность направлена на исключение или существенное затруднение вскрытия структуры (вида) сигналов СРС. Структура сигнала определяется характером его кодирования и модуляции. Показателем структурной скрытности может служить вероятность раскрытия структуры сигнала при условии, что этот сигнал обнаружен.

Изложен метод определения структурной скрытности сигналов, для которого не требуется знания алгоритмов обработки в станции РТР. При данном методе определяется потенциальная структурная скрытность, выражаемая числом двоичных измерений (ДИЗ), которые необходимо осуществить для раскрытия структуры сигнала [2].

Для сигналов с ППРЧ структурная скрытность

$$S_{\text{пп}} = 0.693 \times B_s \times \log_2 B_s = 0.693 \times 126 \times \log_2 126 = 609 [\text{д.из.}] \quad (16)$$

Временная скрытность. Временная скрытность СРС определяется возможностью РТР по сбору необходимой информации о СРС (виде и параметрах сигналов, назначении СРС и т.п.) за определенное время и зависит от условий, в которых используется СРС, ее временных режимов работы на излучение, тактико-технических характеристик станции РТР и характера ведения разведки. Временную скрытность можно оценить временем сбора РТР данных о СРС с заданной вероятностью. Анализ временной скрытности может быть основан на представлении временного режима работы СРС на излучение и моментов пребывания СРС в диаграмме направленности антенны станции РТР в виде потоков случайных импульсов. Для передачи 100 кбит с учетом совпадения диапазона полосы мгновенного приема средства РТР с используемым диапазоном частот СРС, скоростью вращения антенны вокруг вертикальной оси приближенной к 180° и диаграммой направленности, равной 20° [2]:

$$\bar{\Omega} = \bar{\Omega}_p * \bar{\Omega}_c * (\bar{t}_p + \bar{t}_c) = \frac{1}{18} * 1 * \left(\frac{1}{6} + 0.01 \right) = 9.8148 * 10^{-3} \quad (17)$$

$$\bar{t}_d = \frac{1}{\bar{\Omega}_p * \bar{\Omega}_c * (\bar{t}_p + \bar{t}_c)} = \frac{1}{\frac{1}{18} * 1 * \left(\frac{1}{6} + 0.01 \right)} = 111.111 \quad (18)$$

где $\bar{\Omega}$ – средняя частота совпадения потоков;

$\bar{\Omega}_p$ – средняя частота пребывания СРС в диаграмме направленности антенны станции РТР;

\bar{t}_p – средняя длительность пребывания СРС в диаграмме направленности антенны станции РТР;

$\bar{\Omega}_c$ – средняя частота включения СРС на излучение;

\bar{t}_c – средняя длительность включения СРС на излучения;

t_d – среднее время, за которое происходит совпадение двух импульсов потоков.

Для существующих режимов работы СРС с ППРЧ и функционирования подвижных станций РТР суммарный поток можно считать пуассоновским, т.е. имеет место экспоненциальный закон распределения интервалов времени между импульсами совпадения потоков.

Пространственная скрытность. Пространственная скрытность СРС характеризует способность препятствовать станции РТР с необходимой точностью определять направление прихода сигналов (или местоположение) СРС. Пространственная скрытность СРС, как и другие виды скрытности, кроме энергетической, является условным событием и зависит от ряда параметров СРС, например, мощности сигнала, вида и параметров ДНА. Пространственную скрытность СРС можно характеризовать точностью определения направления прихода сигналов (или местоположения) СРС при заданном отношении сигнал-шум. Пространственная скрытность СРС может быть оценена радиусом зоны R_M , в пределах которой с заданной вероятностью P_M может находиться разведываемая СРС [2].

$$R_M = D_{p\ max} * \sqrt{-\ln(1 - P_M)} = 1156 * \sqrt{-\ln\left(1 - \frac{176\ 326}{4.198 * 10^6}\right)} = 239 \quad (19)$$

$$P_M = \frac{S_{\text{дна}}}{S_{\text{поверх}}} = \frac{176\ 326}{4.198 * 10^6} = 0.042 \quad (20)$$

где $D_{p\ max}$ – дальность разведки сигналов передатчика СРС DP станцией РТР с некоторой степенью приближения;

P_M – вероятность нахождения СРС в зоне R_M .

Априорная скрытность

Априорная скрытность характеризует способность препятствовать станции РТР:

$$S_{\text{ап}} = \frac{N_{\text{пер}} t}{N_{\text{кан}}} * 10 * \lg(P_{\text{сиг}}) = \frac{1600}{126} * 10 * \lg 100 \approx 254 \text{ [д. из]} \quad (21)$$

Где $N_{\text{пер}} t$ – количество перестроек за секунду;

$N_{\text{кан}}$ – количество каналов, используемых при перестройке;

$P_{\text{сиг}}$ – мощность сигнала, мВт.

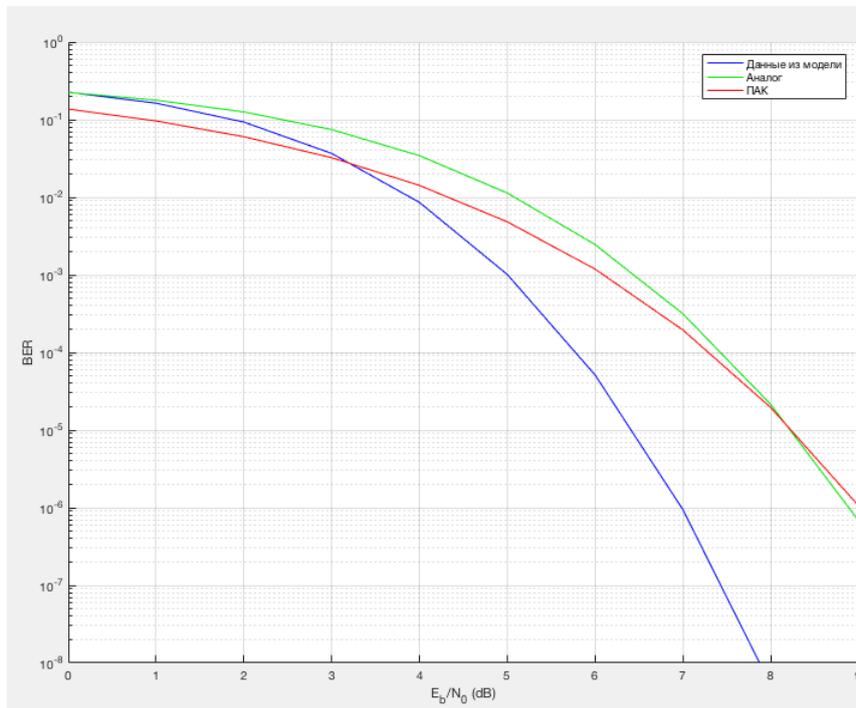


Рис. 8 Сравнение СВО СРС.

Было произведено сравнение характеристик помехоустойчивости средств радиосвязи, полученных в имитационной среде, что наглядно изображено на рис. 8.

Вывод. Были проведены расчеты и сравнение качественных характеристик разработанного программно-аппаратного комплекса, имитационных моделей системы передачи защищаемой информации с повышенной помехоустойчивостью и скрытностью и существующего изделия, данные о котором находятся в открытых источниках. Полученные данные об исследуемых объектах говорят о высокой помехоустойчивости и скрытности

радиочастотного канала связи разработанного программно-аппаратного комплекса.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН (выполнение фундаментальных научных исследований 47 ГП) по теме № 0065-2019-0001 "Математическое обеспечение и инструментальные средства для моделирования, проектирования и разработки элементов сложных технических систем, программных комплексов и телекоммуникационных сетей в различных проблемно-ориентированных областях" (АААА-А19-119011790077-1).

Литература

1. Диксон Р.К. Широкополосные системы: Пер. с англ. / Под ред. В.И. Журавлева. - М.: Связь, 1979. - 304 с.
2. Борисов В.И. и др. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты. - М.: Радио и связь, 2000. - 384 с.
3. Модельно-алгоритмическое обеспечение информационных систем управления: монография / Зайцев М.А., Сухов А.В.; Моск. ун-т им. С.Ю. Витте. – М.: изд. «МУ им. С.Ю. Витте», 2016.
4. Кларк Дж., Кейн Дж. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи: Пер. с англ. / Под ред. Б.С. Цыбакова. - М.: Радио и связь, 1987. - 392 с.
5. Кловский Д.Д. Теория передачи сигналов. - М.: Связь, 1973. - 376 с.

Для цитирования:

Филатов В.И., Сухов А.В., Зайцев М.А., Генев А.А. Комплексная оценка показателей помехоустойчивости современных и перспективных систем передачи информации и связи. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.9.13>