

А.В. ПАРШУТКИН, Д.И. БУЧИНСКИЙ
**МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КАНАЛА СПУТНИКОВОЙ
СВЯЗИ В УСЛОВИЯХ ИСКАЖЕНИЙ СЛУЖЕБНОЙ ЧАСТИ
КАДРОВ НЕСТАЦИОНАРНЫМИ ПОМЕХАМИ**

Паршуткин А.В., Бучинский Д.И. Модель функционирования канала спутниковой связи в условиях искажений служебной части кадров нестационарными помехами.

Аннотация. Рассмотрены основные способы организации современных спутниковых систем связи и используемые в них способы синхронизации и передачи служебной информации, а также механизм кадровой синхронизации с точки зрения помехоустойчивости. На основании проведенного анализа предложена структурная схема имитационной модели для исследования влияния непреднамеренных помех на каналы современных спутниковых систем связи. Предлагаемая модель воздействия нестационарных помех на канал спутниковой связи учитывает влияние помех на символьную и кадровую синхронизации, механизмы выделения границ кадра, а также действие современных кодов исправления ошибок. Модель позволяет оценить влияние нестационарных помех как на информационную, так и на служебную части кадра современных систем широкополосной спутниковой связи. В качестве показателя помехоустойчивости канала спутниковой связи используется вероятность потери кадра, то есть пропуска кадра ввиду нарушения в системе кадровой синхронизации, неверного выделения границ кадра либо наличия в кадре ошибок, которые не были исправлены корректирующими кодами. С использованием указанной модели проведено исследование влияния нестационарных помех различной длительности на информационную и служебную части кадра, сравнение результатов воздействия нестационарных помех различной длительности с воздействием белого гауссовского шума. Показано, что нестационарные помехи, представляющие собой короткие шумовые импульсы, которые не влияют на информационную часть кадра, из-за исправления кодами коррекции могут снижать качество приема ввиду нарушения работы кадровой синхронизации и искажения служебной информации о сигнально-кодовой конструкции и длине кадра.

Ключевые слова: *DVB-S2, DVB-RCS, кадровая синхронизация, нестационарная помеха, помехоустойчивость, широкополосная спутниковая связь*

1. Введение. В настоящее время возрастают требования пользователей к объемам передаваемых данных и скорости передачи информации через спутниковые системы связи. Эффективное использование ограниченного частотного ресурса обеспечивается созданием сетей широкополосной спутниковой связи с применением временного и частотного разделения каналов, а также протоколов, адаптивных к условиям распространения *DVB-S2X* и *DVB-RCS (Digital Video Broadcasting – Return Channel via Satellite)* [1–4].

Широко известны исследования помехозащищенности каналов спутниковой связи для стационарных помех [5–10], в то время как для нестационарных помех такие исследования проведены только для частных случаев [11–15]. Процесс влияния импульсных и структурных помех на процессы синхронизации при передаче данных описан в [11, 12], однако влияние помех на служебную часть кадра современных систем широкополосной спутниковой связи не исследовалось.

В [14, 15] описано воздействие нестационарных помех на каналы спутниковой связи, использующие протоколы *DVB-S2* и *DVB-RCS*, исследованы результаты воздействия непреднамеренных стационарных и нестационарных помех с равной средней мощностью. Однако в работе не рассматривалось влияние нестационарных помех на процессы синхронизации и демультимплексирования кадров физического уровня. Описанная в [14] модель не позволяет исследовать влияние согласованности повторения импульсных помех и длительности кадра на характеристики помехоустойчивости.

Целью статьи является исследование помехозащищенности канала спутниковой связи при воздействии нестационарных помех с учетом их влияния на подсистему кадровой и символьной синхронизаций и передачи служебной информации.

2. Способы синхронизации и передачи служебной информации в сетях широкополосной спутниковой связи с коммутацией пакетов. Как известно, свод правил, определяющих взаимодействие функциональных блоков одного уровня в сети связи, называется протоколом [3]. Анализ различных протоколов спутниковой связи показывает, что в достаточно общем случае служебная информация передаваемого кадра включает:

- синхросигнал, обеспечивающий канал подстройки частоты, канал временной синхронизации;
- адресную часть с информацией о параметрах системы, идентификатор отправителя и назначение;
- блок контроля достоверности кадра;
- блок управления;
- элементы внутреннего и иного (расширенного) взаимодействия, относящиеся к фирменной части оборудования, как правило, их назначение не разглашается даже при применении открытых стандартов связи [3].

Блок управления, в свою очередь, может включать следующие элементы:

- каналы управления общие (поиска и запроса доступа на связь);
- каналы управления качеством канала связи (управления мощностью передатчика, сигнально-кодовой конструкцией, видом кодирования);
- выделенные каналы управления, в которых в зависимости от напряженности трафика и вида используемого протокола могут формироваться подканалы, обеспечивающие требуемый вид обслуживания [2].

Рассмотрим, как реализуются процессы синхронизации и передачи служебной информации физического и канального

уровней в современных сетях широкополосной спутниковой связи на примере сетей, использующих протоколы *DVB-S2*, *DVB-S2X*, *DVB-RCS*, *DVB-RCS2*.

Особенностью протоколов *DVB-S2*, *DVB-S2X* является механизм адаптации к помеховой обстановке и меняющимся условиям распространения сигнала, что особенно актуально, так как данные протоколы рассчитаны на использование в диапазонах K_u и K_a , для которых характерно существенное влияние погодных условий на величину затухания сигнала. Адаптация достигается введением режимов переменного кодирования и модуляции (англ. *Variable Coding and Modulation*) и адаптивного кодирования и модуляции (англ. *Adaptive Coding and Modulation*) [16]. Суть первого режима состоит в использовании различных видов модуляции и кодирования для передачи информации, имеющей разный приоритет. Второй режим предполагает выбор оптимального режима кодирования и модуляции в зависимости от условий на трассе распространения сигнала и приема. Оба режима реализованы посредством введения кадров физического уровня с заголовками, включающими информацию о режиме использованного в кадре кодирования и модуляции, а также синхроинформации. Введение в протоколы кадров физического уровня обусловлено тем, что служебная информация, содержащаяся в этих кадрах, необходима для выполнения функций, свойственных физическому уровню модели *OSI* (*Open System Interconnection*). Несмотря на фиксированный размер кадра в битах, за счет возможности изменения модуляции меняется и длительность кадра, что обуславливает использование старт-стопной кадровой синхронизации.

Протоколы *DVB-S2*, *DVB-S2X*, *DVB-RCS*, *DVB-RCS2* предполагают возможность организации сетей с топологией звезда (рис. 1а) и ячеистой топологией (рис. 1б). В первом случае все абоненты ($A_1, A_2 \dots A_m$) связаны между собой через центральную земную станцию (ЦЗС).

Прямой канал, то есть канал от ЦЗС до абонентов представляет собой непрерывный широкополосный поток, состоящий из кадров физического уровня с заголовками (ЗГ). В прямом канале применяется временное разделение. Пакеты и кадры протоколов более высоких уровней передаются с помощью непрерывного сигнала с использованием инкапсуляции общего потока (англ. *Generic Stream Encapsulation*). Абоненты принимают весь поток прямого канала, осуществляют его анализ и демультиплексирование. Данные от абонентов до ЦЗС передается по обратному каналу, который в указанных протоколах организуется по технологии *MF-TDMA* (*Multi-Frequency Time-Division Multiple Access*), обеспечивающей

эффективное использование доступного частотного ресурса [16-19]. Таким образом, обратный канал представляет собой совокупность частотных каналов ($f_1 \dots f_n$) и временных слотов (BC1, BC2 и т.д.), которые динамически распределяются между абонентами. Причем одному абоненту выделяются в различные временные слоты различные частоты, как показано на рисунке 1в. В каждый временной интервал, который может состоять из нескольких временных слотов, на одной частоте излучается отдельная посылка.

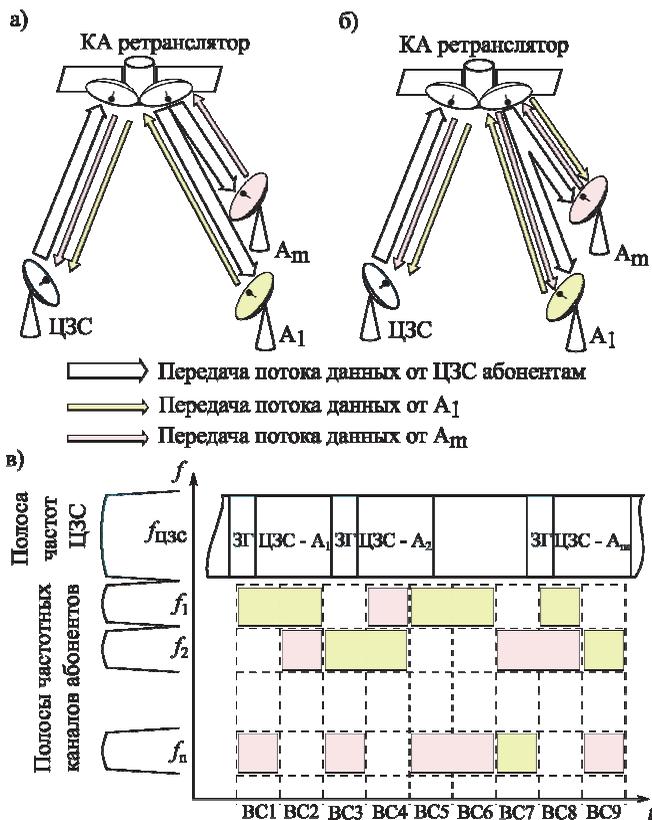


Рис. 1. Топологии сетей спутниковой связи и каналы передачи данных: а) топология звезда; б) ячеистая топология; в) частотно-временная структура каналов передачи данных

Очевидным недостатком такой топологии является двойная передача части трафика и существенная задержка сигнала при двойной ретрансляции сигнала спутником в случае связи абонентов между собой.

Например, для передачи данных от абонента A_1 абоненту A_m необходимо сначала передать их по обратному каналу на ЦЗС, где они будут включены в общий поток и переданы по прямому каналу. Однако такая организация сети позволяет обойтись абонентам лишь *DVB-S2* совместимыми приемниками, которые значительно проще приемников *DVB-RCS2*. Кроме того, нередко случаи, когда трафик между отдельными абонентами незначителен, а обмен информацией происходит в основном между абонентом и ЦЗС. Это уменьшает количество информации, которую необходимо передавать через спутник дважды.

Другой предусмотренной стандартом *DVB-RCS2* топологией спутниковой сети связи является ячеистая топология [2]. В данном случае абоненты также используют обратный канал, организованный по технологии *MF-TDMA*, а ЦЗС – прямой канал, представляющий собой непрерывный *DVB-S2* поток. Основным отличием является возможность прямой передачи данных от одного абонента другому, минуя центральную земную станцию. Это требует от абонентов возможности принимать обратный канал, а значит, использовать более сложные *DVB-RCS2* приемники.

Важно отметить, что во всех рассмотренных топологиях для корректной реализации технологии *MF-TDMA* необходимо, чтобы каждая земная станция излучала посылки в строго отведенных временных слотах и на определенных частотах. При этом необходимо учитывать тот факт, что ввиду различного пути распространения задержка сигнала от разных земных станций будет отличаться. Для того чтобы не происходило наложения посылок из соседних тайм слотов, необходимо их излучать с определенными задержками. Кроме того, важное значение имеет оптимальное распределение имеющегося частотного ресурса между земными станциями с учетом их приоритета. Поэтому необходима синхронизация всей сети. В обоих рассмотренных случаях функцию синхронизации и согласования сети выполняет центральная земная станция путем передачи пакетов синхронизации сети (*Network Clock Reference*), пакетов и таблиц со специальной информацией. Причем как пакеты синхронизации сети, так и служебная информация передается в виде *DVB-S2* или *DVB-S2X* потока. На рисунке 2 показан принцип формирования и передачи пакета синхронизации [2].

Заголовок кадра физического уровня состоит из последовательности начала кадра (ПНК), называемой в стандарте [1] *SOF (Start of Frame)* и информационной части заголовка (ИЧЗ) соответственно – *PLSCODE (Physical Layer Signaling Code)*. В определенные ЦЗС моменты времени заголовок кадра физического уровня формирует пусковой сигнал. Регистр-защелка по этому сигналу запоминает значение счетчика опорного генератора сети и записывает

его в специальное поле пакета синхронизации сети, который передается в теле $n + 2$ -го кадра физического уровня. Поэтому синхронизация всей системы зависит от возможности абонентов корректно принимать *DVB-S2* сигнал.

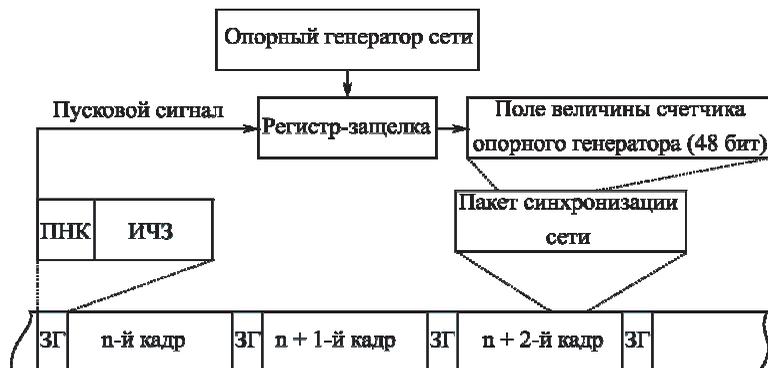


Рис. 2. Порядок формирования пакетов синхронизации сети и передачи их в *DVB-S2* потоке

Синхронизация абонентов в сетях широкополосной спутниковой связи обеспечивается как по элементам сигнала (тактовая, символьная синхронизация), так и по различным блокам (группам) этих элементов (кадровая синхронизация) [1, 3, 14]. Для непрерывного контроля за состоянием системы синхронизации синхросигналы передаются в каждом кадре. Рассмотрим порядок работы блока кадровой синхронизации (рис. 3) [1].

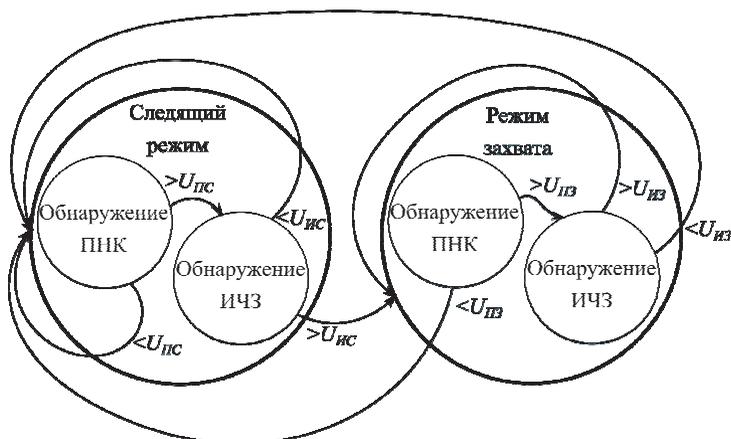


Рис. 3. Структурно-логическая схема кадровой синхронизации

Сначала блок кадровой синхронизации, находясь в следящем режиме, ищет последовательность начала кадра путем корреляционной свертки со всеми поступающими отсчетами. Сразу после превышения порога обнаружения ПНК в следящем режиме $U_{ЛС}$ (0,61) производится корреляционное сравнение последующих 64 символов со всеми 128 возможными вариантами ИЧЗ. Если при этом будет превышен порог для ИЧЗ в следящем режиме $U_{ЛС}$ (0,88), то принимается решение об обнаружении кадра, а блок кадровой синхронизации переходит в режим захвата.

В режиме захвата блок кадровой синхронизации не производит корреляционной свертки со всеми поступающими отсчетами, а на основании информации, полученной из ИЧЗ, вычисляет, где должна появиться следующая последовательность начала кадра. Начиная с предполагаемого места производится вычисление величины корреляции с последовательностью начала кадра. Если порог обнаружения ПНК в режиме захвата $U_{ЛЗ}$ (0,36) не превышен, то блок возвращается в режим слежения, если же порог превышен, то производится проверка следующих 64 символов на наличие в них ИЧЗ аналогично тому, как это происходило в режиме слежения, но с использованием порога для ИЧЗ в режиме захвата $U_{ЛЗ}$ (0,65). Если принимается решение, что обнаружен кадр, то блок остается в режиме захвата, в противном случае блок переходит в режим слежения [2]. Относительно высокие пороги в следящем режиме позволяют достичь малых величин ложной тревоги, и в то же время относительно малые пороги в режиме захвата обеспечивают низкую вероятность пропуска кадра.

Известно, что в сетях широкополосной спутниковой связи используется синхронный метод обеспечения кадровой синхронизации, при котором синхροинформация, заложенная в принимаемом сигнале, играет корректирующую роль для запуска приемника. С позиций помехоустойчивости спутниковой системы связи это означает, что искажение элемента синхронизации не сразу приводит к выходу из синхронизма и искажению сообщения, что обеспечивает относительно высокую помехозащищенность системы кадровой синхронизации [10].

В отличие от синхросигнала, остальные элементы служебной части кадра необходимы для корректного восстановления принятой информации и ошибки при ее приеме могут приводить к потере переданной информации с необходимостью ее повторной передачи. А в ряде случаев при использовании в протоколе кадров переменной длины эта информация необходима и для поддержания кадровой синхронизации [20, 21].

Наличие выделенных элементов синхронизации и иных блоков служебной информации в структуре кадра приводит к возможности возникновения сбоев в выделении границ кадра при воздействии помех на эти элементы. Причем качество приема информации существенно зависит от того, в какую часть передаваемого кадра попадает помеха. Для исследования данной зависимости разработана имитационная модель функционирования канала спутниковой связи в условиях воздействия нестационарных помех.

3. Модель канала спутниковой связи в условиях воздействия нестационарных помех. Для исследования влияния нестационарных помех на канал передачи информации от ЦЗС абонентам была использована имитационная модель, схема которой показана рисунке 4.

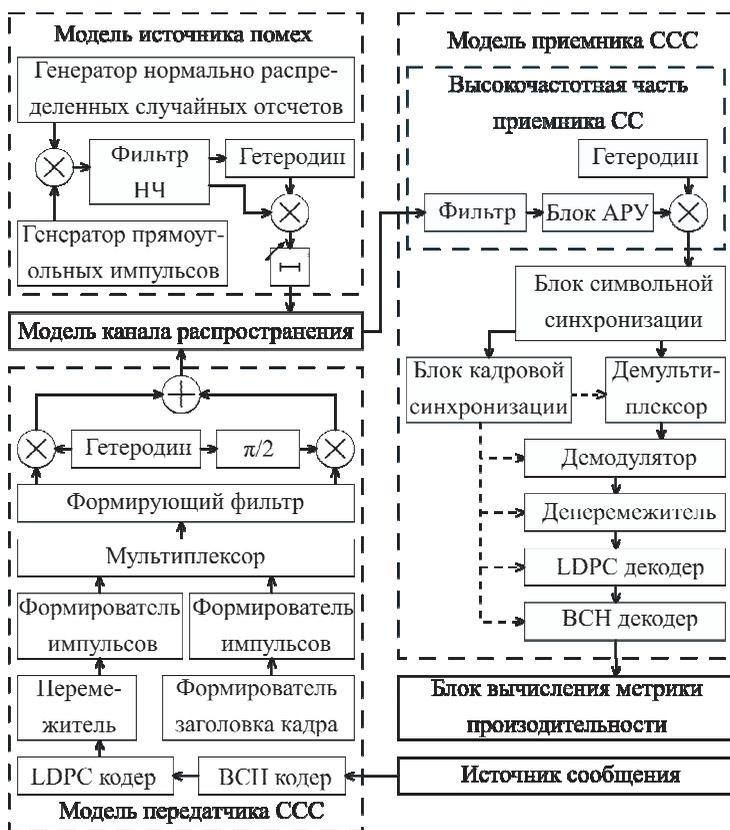


Рис. 4. Структурная схема имитационной модели спутникового канала связи

Модель предусматривает внутреннее и внешнее кодирование источника сообщения с использованием *LDPC* (*Low Density Parity Check*) кодов и кодов Боуза – Чодхури – Хоквингема (БЧХ), а также перемежение. Добавление заголовка кадра физического уровня в зависимости от выбранного вида модуляции и режима кодирования, состоящего из последовательности начала кадра длиной 26 бит и семи битов служебной информации, которые закодированы в 64 бита ИЧЗ. Из битов заголовка и информационной части кадра получают каналные символы, соответствующие используемой модуляции, с последующей повышающей передискретизацией. Недостающие отсчеты заполняют нулями, и получается последовательность каналных импульсов. Они сглаживаются формирующим фильтром с амплитудно-частотной характеристикой $H(f)$ типа корень квадратный из приподнятого косинуса [1]:

$$H(f) = \begin{cases} 1.0 & , |f| \leq \frac{1-\alpha}{2T}; \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \cos\left(\frac{\pi T}{\alpha} \left[|f| - \frac{1-\alpha}{2T}\right]\right)} & , \frac{1-\alpha}{2T} < |f| \leq \frac{1+\alpha}{2T}; \\ 0 & , \text{в других случаях,} \end{cases} \quad (1)$$

где f – частота; α – фактор сглаживания фильтра; T – период следования каналных импульсов.

Импульсная характеристика $h(t)$ такого фильтра имеет вид:

$$h(t) = \begin{cases} \frac{1}{T} \left(1 + \alpha \left(\frac{4}{\pi} - 1\right)\right) & , t = 0; \\ \frac{\alpha}{T\sqrt{2}} \left[\left(1 + \frac{2}{\pi}\right) \sin\left(\frac{2}{4\alpha}\right) + \left(1 - \frac{2}{\pi}\right) \cos\left(\frac{2}{4\alpha}\right) \right] & , t = \pm \frac{T}{4\alpha}; \\ \frac{1}{T} \frac{\sin[\pi(t/T)(1-\alpha) + 4\alpha(t/T)\cos[\pi(t/T)(1+\alpha)]]}{\pi(t/T)[1-(4\alpha(t/T))^2]} & , \text{в других случаях.} \end{cases} \quad (2)$$

В качестве фактора сглаживания фильтра использовался $\alpha = 0,35$, поскольку в этом случае сигнал наиболее устойчив к выбранному типу помех, а период следования каналных импульсов выбран $T = 1$ мкс. Выбор параметра сглаживания обусловлен тем, что

такой параметр сглаживания обеспечивает наибольшую устойчивость к используемому типу непреднамеренных помех. Полученные импульсы поступают в квадратурный модулятор, который формирует сигнал на промежуточной частоте.

Применение таких фильтров обусловлено необходимостью предотвращения межсимвольного искажения при ограничении полосы излучения. Однако, как видно из формулы (2), импульсная характеристика фильтра в моменты времени $t = nT$, $n \in \mathbb{N}$ не равна нулю, то есть такой фильтр не обеспечивает отсутствие межсимвольного искажения в моменты дискретизации. Это связано с тем, что на приемной стороне сигнал будет подвергнут обработке согласованным фильтром, то есть фильтром с такой же импульсной и амплитудно-частотной характеристиками. Такой подход позволяет повысить отношение сигнал-шум за счет использования согласованного фильтра и избежать межсимвольного искажения в моменты дискретизации при ограниченной полосе излучения.

Синфазная $I_{ix}(t)$ и квадратурная $Q_{ix}(t)$ составляющие видеосигнала после формирующего фильтра представляют собой:

$$I_{ix}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \int_{-\infty}^{+\infty} I_n \delta(\tau - nT) h(t - \tau) d\tau; \quad (3)$$

$$Q_{ix}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \int_{-\infty}^{+\infty} Q_n \delta(\tau - nT) h(t - \tau) d\tau, \quad (4)$$

где I_n – n -й канальный символ синфазного канала; Q_n – n -й канальный символ квадратурного канала; $h(\tau)$ – импульсная характеристика формирующего фильтра, связанная с $H(f)$ преобразованием Фурье; N – количество символов в кадре.

Затем для получения сигнала на промежуточной частоте $S(t)$ синфазная и квадратурная составляющие умножаются на гармонические колебания промежуточной частоты f_{np} , сдвинутые на $\pi/2$, и складываются:

$$S(t) = I_{ix}(t) \cos(2\pi f_{np} t) - Q_{ix}(t) \sin(2\pi f_{np} t). \quad (5)$$

В модели канала распространения формируется аддитивная смесь сигнала $S(t)$, нестационарной помехи $\zeta(t)$ в виде помехового импульса длительностью τ_n и белого гауссовского шума $\eta(t)$,

соответствующего приведенным ко входу собственным шумам приемника. Полученная смесь обрабатывается моделью приемника спутникового канала связи. В высокочастотной части производится обработка полученного сигнала блоком автоматической регулировки усиления (АРУ) и перенос на видеочастоту с получением синфазной $I_{rx}(t)$ и квадратурной $Q_{rx}(t)$ составляющих принятой реализации.

Затем сигнал поступает в блок символьной синхронизации, схема которого представлена на рисунке 5.

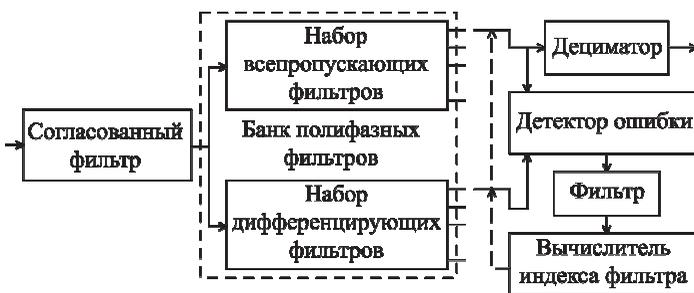


Рис. 5. Структурная схема блока символьной синхронизации

В блоке символьной синхронизации поступающий сигнал подвергается обработке согласованным фильтром. Таким образом, каналные импульсы в спутниковом канале подвергаются последовательной обработке двумя фильтрами с импульсной характеристикой (2). Один раз при формировании видеосигнала на стороне передатчика и один раз на приемной стороне, что эквивалентно обработке их одним фильтром импульсная характеристика которого $h_{\Sigma}(t)$ представляет собой свертку импульсных характеристик формирующего и согласованного фильтров:

$$h_{\Sigma}(t) = \sin\left(\frac{t}{T}\right) \frac{\cos\left(\frac{\pi\alpha t}{T}\right)}{1 - \frac{4\alpha^2 t^2}{T^2}}. \quad (6)$$

Как видно из формулы (6), отклик фильтров на каждый каналный импульс равен амплитуде импульса в момент времени $t = 0$ и равен нулю в моменты времени, кратные периоду повторения

импульсов T . Поскольку формирующий и согласованный фильтры являются линейными элементами, то отклик от последовательности канальных импульсов равен сумме откликов от каждого импульса в последовательности. Поэтому импульсы не будут влиять друг на друга в моменты времени $t = nT$, $n \in \mathbb{N}$ и могут быть точно восстановлены на принимающей стороне. При этом полоса частот, занимаемая сигналом, ограничена, и сигнал не оказывает помехового воздействия на соседние каналы.

В реальном приемнике тактовая частота опорного генератора может отличаться от таковой частоты опорного генератора передатчика, время распространения сигнала неизвестно и может меняться, а для корректного восстановления исходного сигнала необходимо выбрать значения отсчетов в моменты времени, когда отсутствует межсимвольное искажение. Для этого сигнал после согласованного фильтра поступает в банк полифазных фильтров, который состоит из двух наборов фильтров. Первый представляет собой набор всепропускающих параллельных фильтров с различными постоянными групповыми временами задержки $\tau_{ГВ3i}$, второй – набор дифференцирующих параллельных фильтров с такими же постоянными групповыми временами задержки. То есть в банке для каждого значения группового времени задержки присутствует пара фильтров – всепропускающий и дифференцирующий. Сигнал с одной из таких пар поступает в блок вычисления ошибки, где формируется сигнал ошибки дискретизации. Сглаживаемый фильтром сигнал ошибки служит для вычисления номера пары фильтров, отсчеты которых наилучшим образом соответствуют моментам дискретизации в передатчике.

На рисунке 6 приведены примеры сигналов на выходах трех пар фильтров. Сигналы на выходе всепропускающих фильтров $S_{ap}(t, \tau_{ГВ3i})$ показаны сплошными линиями, а их значения в моменты дискретизации – точками. Жирными точками обозначены отсчеты, которые будут оставлены для дальнейшей обработки после децимации. Сигналы, обработанные дифференцирующими фильтрами $S_{dif}(t, \tau_{ГВ3i})$, показаны пунктиром, а их значения в моменты дискретизации – квадратами. Как видно из рисунка 6, сигналы на выходе дифференцирующего фильтра с нулевым значением отсчета в момент времени $t = 3$ мкс соответствует интерполирующий фильтр с идеальными моментами дискретизации.

Затем в блоке символьной синхронизации сигнал, обработанный выбранным фильтром, время групповой задержки которого обеспечивает наилучшую символьную синхронизацию, поступает в

дециматор, где осуществляется понижающая дискретизация путем оставления отсчета, который соответствует моменту времени с отсутствием межсимвольных искажений. Остальные отсчеты отбрасываются. За счет выбора способа формирования сигнала ошибки такой алгоритм символьной синхронизации соответствует алгоритму Гарднера [22].

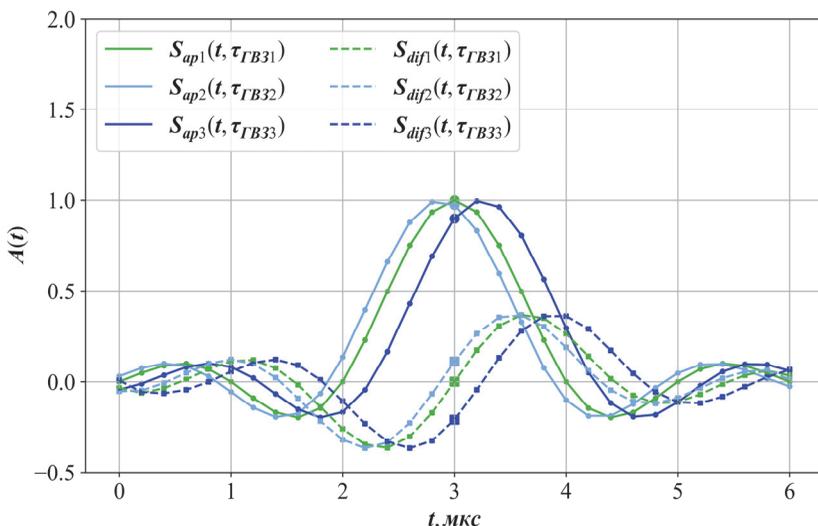


Рис. 6. Пример сигналов на выходах интерполирующих и дифференцирующих фильтров блока символьной синхронизации

После обработки блоком символьной синхронизации сигнал, представленный одним отсчетом на символ, поступает в блок кадровой синхронизации, который формирует кадровые синхроимпульсы. С их помощью в демультимплексе определяются границы кадра и выделяется информационная часть кадра. Последняя подвергается демодуляции, депережежению, декодированию LDPC и BCH декодерами и передается в блок вычисления метрики производительности. В этом блоке происходит сравнение переданной и принятой информации для вычисления метрики производительности спутникового канала передачи данных.

Временные диаграммы полученных сигналов и помех представлены на рисунке 7.

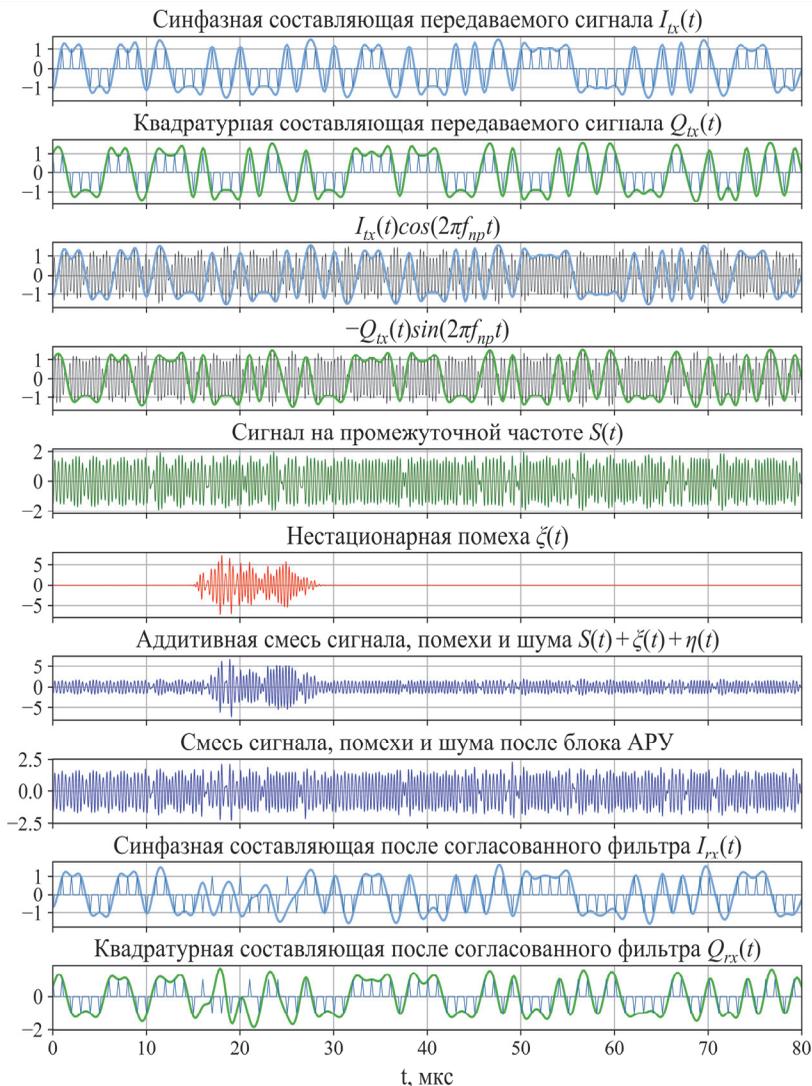


Рис. 7. Временные диаграммы передаваемого и принятого сигналов и помехи

4. Анализ устойчивости каналов спутниковой связи к воздействию нестационарных помех. С помощью описанной выше имитационной модели было проведено исследование устойчивости каналов спутниковой связи к воздействию нестационарных помех. Моделировалось воздействие импульсной помехи, период следования

помеховых импульсов которой в какие-то моменты времени может совпадать с периодом следования кадров физического уровня, а ширина спектра равна ширине спектра полезного сигнала. В качестве показателя качества функционирования спутниковой связи использовалась вероятность потери кадра физического уровня. Кадр считался потерянным, если после применения кодов исправления ошибок кадр содержал неисправленные ошибки либо если кадр не был корректно выделен блоком кадровой синхронизации. Моделировался канал с периодом повторения канальных символов в 1 мкс, различными кодовыми скоростями и видами модуляции (*QPSK* 1/4, *QPSK* 1/3, *QPSK* 2/5, *QPSK* 3/4, *QPSK* 1/2, *8PSK* 3/5, *8PSK* 2/3, *8PSK* 3/4).

На рисунке 8 изображена зависимость вероятности потери кадра P_0 от длительности помехового импульса τ_n и времени задержки начала помехового импульса относительно начала заголовка кадра физического уровня τ_3 . При этом фиксировалось отношение мгновенной мощности помехи к мощности сигнала $Q = 10$ дБ. Как видно из рисунка 8, зависимость вероятности потери кадра $P_0(\tau_3)$ имеет несимметричный вид, что свидетельствует о различной помехоустойчивости информационной части заголовка и последовательности начала кадра. Поверхности, образованные зависимостью вероятности пропуска кадра физического уровня от длительности помехового импульса и задержки, имеют два выраженных плато. Первое образуется, когда помеха начинает воздействовать на последовательность начала кадра. Причем первое плато ниже, то есть помехоустойчивость последовательности начала кадра выше, чем информационной части заголовка, хотя длина ПНК, составляющая 26 символов (26 мкс), меньше длины ИЧЗ, составляющей 64 символа (64 мкс). Это объясняется меньшим порогом для принятия решения о наличии ПНК в принятой реализации.

Кроме того, из семейства графиков видно, что для помех с длительностью 40 мкс и менее наблюдается снижение вероятности потери кадра P_0 при попадании помехи на стык ПНК и ИЧЗ. При этом энергия помехи распределяется между двумя частями заголовка, ПНК и ИЧЗ. Помехи, длительность которых не превышает 15 мкс, не влияют на процесс кадровой синхронизации и выделения границ кадра, так как такие помехи не могут вызвать достаточного количества ошибок для перехода одного кодового слова в другое либо достаточного количества ошибок для того, чтобы порог обнаружения ИЧЗ не был превышен.

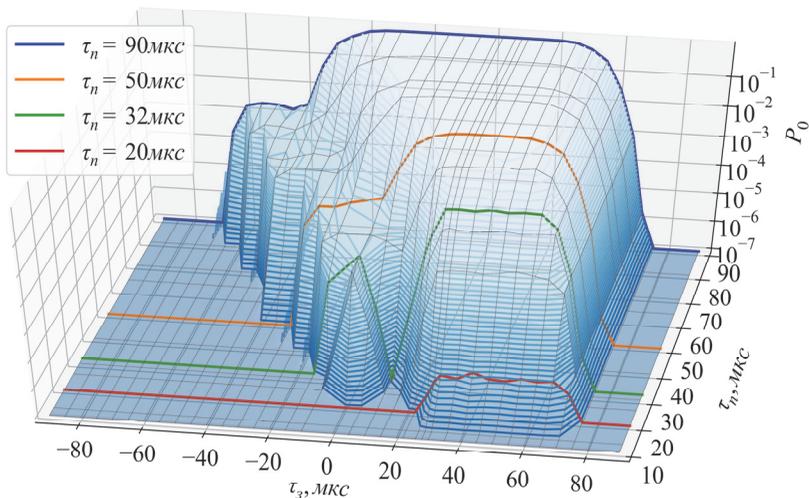


Рис. 8. Зависимость вероятности потери кадра P_0 от длительности помехового импульса τ_n и времени задержки начала помехового импульса относительно начала заголовка кадра физического уровня τ_3 при фиксированном отношении мгновенной мощности помехи к мощности сигнала $Q = 10$ дБ

Для тех же исходных данных была построена зависимость вероятности потери кадра физического уровня P_0 от отношения мгновенной мощности помехи к мощности сигнала Q и времени задержки начала помехового импульса от начала заголовка кадра физического уровня τ_3 при фиксированной длительности помехи $\tau_n = 32$ мкс. Полученная зависимость изображена на рисунке 9.

Данная зависимость иллюстрирует наличие снижения вероятности потери кадра физического уровня при попадании помехи между частями заголовка кадра. Существование данного провала при высоких мгновенных мощностях обусловлено в том числе ограниченным временем воздействия помехи, а значит, и ограниченным количеством искажаемых символов. Это приводит как к снижению вероятности пропуска информационной части заголовка, так и к невозможности возникновения ошибки в распознавании сообщения в информационной части заголовка вследствие того, что количество искаженных символов не может превысить половины минимального расстояния Хэмминга для используемого кода.

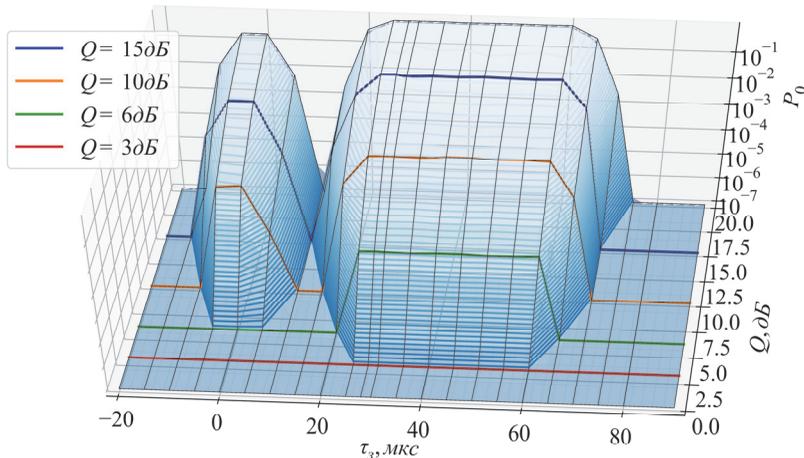


Рис. 9. Зависимость вероятности потери кадра P_0 от отношения мгновенной мощности помехи к мощности сигнала Q и времени задержки начала помехового импульса от начала заголовка кадра физического уровня τ_3 при фиксированной длительности помехи τ_n

Была исследована зависимость вероятности потери кадра физического уровня P_0 от длительности задержки начала воздействия нестационарной помехи τ_3 относительно начала кадра физического уровня. Моделировались различные длительности нестационарной помехи τ_n . Мгновенная мощность помехи выбиралась исходя из обеспечения постоянной средней мощности помехи, соответствующей отношению сигнал-шум 16,05 дБ [1]. Такое отношение сигнал-шум обеспечивает квазибезошибочный прием, то есть прием с вероятностью кадровой ошибки менее 10^{-7} для режима с использованием модуляции *32APSK (Amplitude Phase Shift Keying)* и скорости кодирования 9/10 [1, 7]. Это наименее помехоустойчивый режим функционирования, предусмотренный стандартом *DVB-S2*. Результаты моделирования представлены на рисунке 10.

Как видно из графиков, такая помеха обладает средней мощностью, обеспечивающей квазибезошибочную работу в наименее помехоустойчивом режиме, и способна существенно негативно повлиять на работу приемника спутниковой связи. Причем наибольшую опасность представляет помеха, длительность которой совпадает с длительностью информационной части заголовка, так как она приводит к наибольшим вероятностям потери кадров физического уровня и действует в достаточно широком интервале временных задержек.

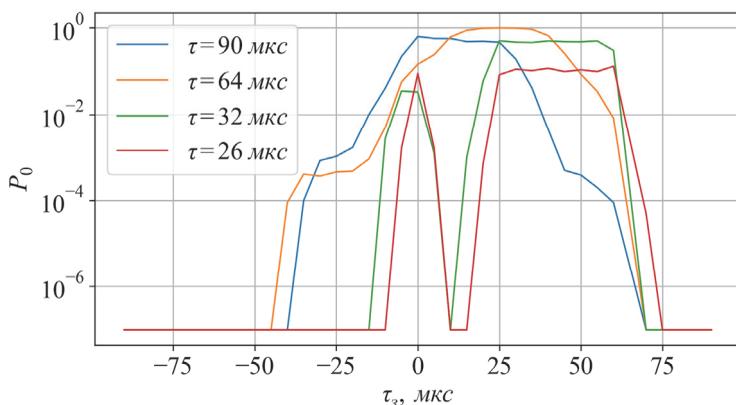


Рис. 10. Зависимость вероятности потери кадра физического уровня P_0 от времени задержки начала воздействия помехи τ_3 для различных длительностей помехового воздействия τ_n при фиксированной средней мощности

Для всех рассмотренных длительностей помеховых импульсов воздействие помех на информационную часть кадра не приводит к потере пакетов. Это обусловлено тем, что применяемые в стандартах *DVB-S2*, *DVB-S2X* декодеры полностью исправляют ошибки, возникающие в результате коротких помеховых воздействий. Эти результаты согласуются с ранее полученными результатами исследования воздействия нестационарных помех на информационную часть кадра широкополосных систем спутниковой связи [14].

Адекватность разработанной модели и достоверность полученных результатов подтверждается совпадением в частных случаях с ранее полученными результатами и известными аналитическими выражениями. При значениях времени задержки помехового воздействия, превышающего длительность заголовка кадра физического уровня, результаты совпадают с результатами, полученными в [14]. В случае, когда длительность помехи равна длительности кадра, а задержка равна нулю, то есть когда помеха превращается в непрерывную шумовую, полученные результаты согласуются с данными по кадровой ошибке, которые приведены в [1], а вероятность битовой ошибки согласуется с аналитическими выражениями, которые были представлены в [23].

5. Заключение. Разработана модель канала спутниковой связи в условиях воздействия нестационарных помех. Особенностью модели является учет влияния применяемых в современных спутниковых системах связи модуляции, демодуляции и фильтрации сигналов,

символьной и кадровой синхронизации, кодов исправления ошибок. Это позволило исследовать влияние помех на различные фрагменты заголовка и сравнить это воздействие с воздействием на информационную часть кадра.

Результаты моделирования показали, что информационная часть заголовка обладает меньшей помехоустойчивостью по сравнению с последовательностью начала кадра, несмотря на меньший размер. Этот факт объясняется как существенно меньшим порогом обнаружения последовательности начала кадра, так и возможностью ошибочного распознавания информационной части, обусловленной случайными изменениями символов, вызванных помеховым воздействием. Существенное значение имеют длительность помехового воздействия и положение начала помехового воздействия относительно начала заголовка. Показано, что нестационарные помехи, обладающие незначительной средней мощностью, способны существенно нарушить процесс кадровой синхронизации и выделения кадров физического уровня при условии их попадания в заголовок кадра за счет нарушения приема служебной информации.

Полученные результаты могут использоваться при уточнении оценок помехоустойчивости каналов спутниковой связи, использующих протоколы *DVB-S2*, *DVB-S2X* в условиях нестационарных помех.

Литература

1. ETSI EN 302 307 V1.2.1 Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2). 2009-04.
2. ETSI EN 301 545-2 V1.1.1 Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation DVB Interactive Satellite System (DVB-RCS2); Part 2: Lower layers for Satellite standard. 2012-01.
3. *Чельшев В.Д., Якимовец В.В.* Зарубежные радиоэлектронные системы наземного и спутникового мобильного радиосервиса // СПб: ВАС. 2012. 388 с.
4. *Bejarano J.R., Miguel N.C., Ruiz P.F.J.* MF-TDMA Scheduling Algorithm for Multi-Spot Beam Satellite Systems Based on Co-Channel Interference Evaluation // IEEE Access. 2019. vol. 7. pp. 4391–4399.
5. *Черноусов А.В.* Анализ воздействия аддитивных помех на широкополосный сигнал // Решетневские чтения. 2016. Т. 1 С. 306–308.
6. *Дворников С.В., Пиеничников А.В., Манаенко С.С., Глухих И.Н.* Интегральная модель помехозащищенных линий радиосвязи // Радиопромышленность. 2018. № 4(28). С. 8–14.
7. *Sormunen L., Puttonen J., Kurjenniemi J.* System level modelling of DVB-S2X in high throughput satellite system // 36th International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC 2018). 2018. pp. 1–4.
8. *Wang G. et al.* Performance Evaluation of SATCOM Link in the Presence of Radio Frequency Interference // 2016 IEEE Aerospace Conference. 2016. pp. 1–10.

9. *Кантор Л.Я.* Электромагнитная совместимость систем спутниковой связи // М.: НИИР. 2009. 280 с.
10. *Puzko D. et al.* Evaluation of Finite Discrete RRC-Pulse Parameters to Simulate DVB-S2 with LDM // 2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). 2019. pp. 140–143.
11. *Агиевич С.Н., Борисов В.В., Дворников С.В., Луценко С.А.* Предложения по оценке эффективности преднамеренных помех элементам синхронизации сигналов спутниковых систем // Вопросы оборонной техники. 2019. № 5-6. С. 114–120.
12. *Луценко С.А.* Подход к расчету энергетического выигрыша при постановке помех системе синхронизации спутниковых линий связи // Журнал радиоэлектроники. 2019. № 3. 15 р.
13. *Перегудов М.А., Семченко И.А.* Оценка эффективности случайного множественного доступа к среде типа ALOHA при голосовых соединениях, передаче служебных команд, текстовых сообщений и мультимедийных файлов в условиях деструктивных воздействий // Труды СПИИРАН. 2019. Вып. 18. С. 887–911.
14. *Паршуткин А.В., Маслаков П.А.* Исследование помехоустойчивости современных стандартов спутниковой связи к воздействию нестационарных помех // Труды СПИИРАН. 2017. Вып. 53. С. 159–177.
15. *Маслаков П.А., Паршуткин А.В., Фомин А.В.* Модель функционирования канала спутниковой связи при воздействии нестационарных помех // Труды Военно-космической академии им. А.Ф.Можайского. 2016. Вып. 651. С. 78–83.
16. *Kim P., Lee I., Oh D., Ryu J.* Robust initial access technique of spread spectrum based on DVB-RCS2 standard for mobile application // 36th International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC 2018). 2018. pp. 1–5.
17. *He R., Yang D., Wang H., Kuang J.* Adaptive hierarchical coding and modulation scheme over satellite channels // IET Communications. 2018. vol. 13. no. 17. pp. 2834–2839.
18. *Joudeh H., Clerckx B.* Robust transmission in downlink multiuser miso systems: A rate-splitting approach // IEEE Transactions on Signal Processing. 2016. vol. 64. pp. 6227–6242.
19. *Perez-Neira A. et al.* Signal Processing for High Throughput Satellite Systems: Challenges in New Interference-Limited Scenarios // 2018. arXiv preprint arXiv:1802.03958.
20. *Ali B.A.B., Zhou M., Ahmed M.* Modeling and Design of a DVB-S2X system // 2019 5th International Conference on Optimization and Applications (ICOA). 2019. pp. 1–5.
21. *Hao H., Chen J., Zhou Y.* An irregular row weight problem resolution for DVB-S2 LDPC short frame // 2017 7th IEEE International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC). 2017. pp. 45–48.
22. *Floyd M.G.* Interpolation in Digital Modems – Part I: Fundamentals // IEEE Transactions on Communications. 1993. vol. 41. No. 3. pp. 501–507.
23. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: пер. с англ. // М.: Вильямс. 2003. 1104 с.

Паршуткин Андрей Викторович — д-р техн. наук, профессор, профессор, кафедра систем и средств радиоэлектронной борьбы космического назначения, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: радиоэлектронная защита радиоэлектронных средств и систем, методы оценивания результативности помех и радиоэлектронных воздействий, методы создания интеллектуальных помех и защиты от них, методы и средства технической

защиты информации. Число научных публикаций — 97. andydc2010@mail.ru; ул. Ждановская, 13, 197198, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)347-95-35; факс: +7(812) 237-12-49.

Бучинский Дмитрий Игоревич — адъюнкт, кафедры систем и средств радиоэлектронной борьбы космического назначения, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: радиоэлектронная защита радиоэлектронных средств и систем, методы создания интеллектуальных помех, помехоустойчивость систем спутниковой связи. Число научных публикаций — 3. reys-rd@ya.ru; ул. Ждановская, 13, 197198, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(926)015-82-74; факс: +7(812) 237-12-49.

A. PARSHUTKIN, D. BUCHINSKIY

**MODEL OF SATELLITE COMMUNICATION CHANNEL
FUNCTIONING UNDER CONDITIONS OF DISTURBANCES OF
SERVICE PART OF FRAMES BY UNSTEADY INTERFERENCE**

Parshutkin A., Buchinsky D. Model of Satellite Communication Channel Functioning under Conditions of Disturbances of Service Part of Frames by Unsteady Interference.

Abstract. The paper describes the main ways of organizing modern satellite communication systems and the methods of synchronization and transmission of service information used in them, the frame synchronization mechanism from the view point of noise immunity. Based on the analysis, a block diagram of a simulation model is proposed for studying the influence of unintentional interference on the channels of modern satellite communication systems. The proposed model of the impact of non-stationary interference on a satellite communication channel takes into account the effect of interference on symbolic, frame synchronization, mechanisms for extracting frame boundaries, as well as the effect of modern error correction codes. The model allows evaluating the impact of non-stationary interference on both the information and the service side of the frame of modern systems of broadband satellite communications. As an indicator of the noise immunity of a satellite communication channel, there was used probability of frame loss, i.e. frame skipping due to a violation in the frame synchronization system, incorrect allocation of frame boundaries, or the presence of errors in the frame that were not repaired by corrective codes. Using this model, we studied the effect of non-stationary interference of various durations on the information and service parts of the frame, compared the results of the impact of non-stationary interferences of various durations with the effect of white Gaussian noise. It is shown that non-stationary interference, which are short noise pulses that do not affect the information part of the frame due to reparation by correction codes, can significantly reduce the reception quality due to disruption of frame synchronization and distortion of service information about the signal-code structure and frame length.

Keywords: DVB-S2, DVB-RCS, Frame Synchronization, Non-stationary Interference, Noise Immunity, Satellite Broadband

Parshutkin Andrey — Ph.D., Dr.Sci., Professor, Professor, Department of Systems and Electronic Warfare Systems for Space Applications, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: electronic protection of electronic equipment and systems, methods of estimating the impact of noise and electronic influences, methods of creation of intellectual interference and protection, methods and means of technical protection of information. The number of publications — 97. andydc2010@mail.ru; 13, Zhdanovskaya str., 197198, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)347-95-35; fax: +7(812) 237-12-49.

Buchinskiy Dmitriy — Ph.D. Student, Department of Systems and Electronic Warfare Systems for Space Applications, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: electronic protection of electronic equipment and systems, methods of estimating the impact of noise and electronic influences, methods of creation of intellectual interference and protection, immunity of satellite communication systems. The number of publications — 3. reys-rd@ya.ru; 13, Zhdanovskaya str., 197198, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(926)015-82-74; fax: +7(812) 237-12-49.

References

1. ETSI EN 302 307 V1.2.1 Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2). 2009-04.
2. ETSI EN 301 545-2 V1.1.1 Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation DVB Interactive Satellite System (DVB-RCS2); Part 2: Lower layers for Satellite standard. 2012-01.
3. Chelyshev V.D., Yakimovec V.V. *Zarubezhnye radioelektronnye sistemy nazemnogo i sputnikovogo mobilnogo radioservisa* [Foreign radio electronic systems of terrestrial and satellite mobile radio service]. SPb.: VAS. 2012. 388 p. (In Russ.).
4. Bejarano J.R., Miguel N.C., Ruiz P.F.J. MF-TDMA Scheduling Algorithm for Multi-Spot Beam Satellite Systems Based on Co-Channel Interference Evaluation. *IEEE Access*. 2019. vol. 7. pp. 4391–4399.
5. Chernousov A.V. [Analysis of the impact of additive interference on a broadband signal]. *Reshetnevskie chteniya* [Reshetnev readings]. 2016. Issue 1. pp. 306–308. (In Russ.).
6. Dvornikov S.V., Pshenichnikov A.V., Manaenko S.S., Gluhih I.N. [Integral model of noise-immune radio communication lines]. *Radiopromyshlennost – Radio industry*. 2018. vol. 4(28). pp. 8–14. (In Russ.).
7. Sormunen L., Puttonen J., Kurjenniemi J. System level modelling of DVB-S2X in high throughput satellite system. 36th International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC 2018). 2018. pp. 1–4.
8. Wang G. et al. Performance Evaluation of SATCOM Link in the Presence of Radio Frequency Interference. 2016 IEEE Aerospace Conference. 2016. pp. 1–10.
9. Kantor L.Ya. *Elektromagnitnaya sovместimost sistem sputnikovoy svyazi* [Electromagnetic compatibility of satellite communication systems]. M.: NIIR. 2009. 280 p. (In Russ.).
10. Puzko D. et al. Evaluation of Finite Discrete RRC-Pulse Parameters to Simulate DVB-S2 with LDM. 2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). 2019. pp. 140–143.
11. Agievich S.N., Borisov V.V., Dvornikov S.V., Lucenko S.A. [Proposals for evaluating the effectiveness of intentional interference to synchronization elements of satellite systems]. *Voprosy oboronnoy tekhniki – Military Enginery*. 2019. vol. 5-6. pp. 114–120. (In Russ.).
12. Lucenko S.A. [Approach to calculating the energy gain when jamming the system of cyclic synchronization of satellite communication lines]. *Zhurnal radioelektroniki – Journal of Radio Electronics*. 2019. vol. 3. (In Russ.).
13. Peregodov M.A., Semchenko I.A. [Evaluation of Efficiency of Random Multiple Access to ALOHA Type Environment with Voice Connections, Transfer of Service Commands, Text Messages and Multimedia Files in Destructive Impact Conditions]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2019. vol. 18. pp. 887–911. (In Russ.).
14. Parshutkin A.V., Maslakov P.A. [Study of the Noise Immunity of Modern Standards of Sat-ellite Communications to the Impact of Non-Stationary Interference]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2017. vol. 53. pp. 159–177. (In Russ.).
15. Maslakov P.A., Parshutkin A.V., Fomin A.V. [A model of the functioning of a satellite communication channel under the influence of non-stationary interference]. *Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii im. A.F.Mozhayskogo – Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*. 2016. vol. 651. pp.78–83. (In Russ.).

16. Kim P., Lee I., Oh D., Ryu J. Robust initial access technique of spread spectrum based on DVB-RCS2 standard for mobile application. 36th International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC 2018). 2018. pp. 1–5.
17. He R., Yang D., Wang H., Kuang J. Adaptive hierarchical coding and modulation scheme over satellite channels. *IET Communications*. 2018. vol. 13. no. 17. pp. 2834–2839.
18. Joudeh H., Clerckx B. Robust transmission in downlink multiuser mimo systems: A rate-splitting approach. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2016. vol. 64. pp. 6227–6242.
19. Perez-Neira A. et al. Signal Processing for High Throughput Satellite Systems: Challenges in New Interference-Limited Scenarios. 2018. arXiv preprint arXiv:1802.03958.
20. Ali B.A.B., Zhou M., Ahmed M. Modeling and Design of a DVB-S2X system. 2019 5th International Conference on Optimization and Applications (ICOA). 2019. pp. 1–5.
21. Hao H., Chen J., Zhou Y. An irregular row weight problem resolution for DVB-S2 LDPC short frame. 2017 7th IEEE International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC). 2017. pp. 45–48.
22. Floyd M.G. Interpolation in Digital Modems – Part I: Fundamentals. *IEEE Transactions on Communications*. 1993. vol. 41. no. 3. pp. 501–507.
23. Sklar B. *Digital communications* // Prentice Hall. 2001. pp. 1093–1099. (Russ. ed.: Sklyar B. Tsifrovaya svyaz. *Teoreticheskiye osnovy i prakticheskoye primeneniye*. M.: Viliams. 2003. 1104 p.).