

А.В. ПАРШУТКИН, Д.И. БУЧИНСКИЙ, Ю.Н. КОПАЛОВ  
**МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КАНАЛА СПУТНИКОВОЙ  
СВЯЗИ В УСЛОВИЯХ ЭПИЗОДИЧЕСКОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ  
С ПОТОКАМИ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ**

*Паршуткин А.В., Бучинский Д.И., Копалов Ю.Н. Модель функционирования канала спутниковой связи в условиях эпизодической синхронизации с потоками импульсных помех.*

**Аннотация.** В статье исследуется влияние непреднамеренных импульсных помех на прием информации в условиях эпизодической синхронизации кадров физического уровня канала спутниковой связи с потоками импульсов помех. Предложена аналитическая модель влияния непреднамеренных импульсных помех на прием информации в спутниковом канале связи в условиях эпизодической синхронизации кадров физического уровня с потоками импульсных помех. На примере стандарта DVB-S2 показано совместное влияние шума и непреднамеренных импульсных помех на условные вероятности ошибок при приеме синхрогруппы, служебной части заголовка и информационной части кадра. Приведены оценки среднего числа кадров физического уровня на длительности интервала эпизодической синхронизации, числа интервалов эпизодической синхронизации и доли элементарных посылок в кадре, подвергшихся воздействию помехи, в зависимости от скважности импульсной помехи. Показано, что существуют такие соотношения между длительностью импульса помехи и скважностью ее следования, при которых явление эпизодической синхронизации кадров физического уровня с потоком импульсных помех оказывает существенное влияние на функционирование канала спутниковой связи. Получены зависимости вероятности ошибочного приема кадра физического уровня канала спутниковой связи от отношения сигнал/помеха при фиксированном отношении сигнал/шум и от длительности импульса помехи. Установлено, что при высоких отношениях сигнал/помеха и длительности помехи, соотносимой с длительностью служебной части кадра, но значительно меньше длительности кадра, вероятность ошибочного приема кадра может быть выше, чем при более низких отношениях сигнал/помеха за счет ошибок при приеме служебной части кадров.

**Ключевые слова:** эпизодическая синхронизация, непреднамеренные импульсные помехи, DVB, помехоустойчивость, широкополосная спутниковая связь.

**1. Введение.** Функционирование современных систем связи и передачи данных происходит в условиях воздействия естественных фоновых шумов окружающего пространства, промышленных помех и непреднамеренных помех, создаваемых передатчиками других радиоэлектронных средств и систем. Широкое распространение стационарных и подвижных радиолокационных систем приводит к тому, что импульсные сигналы высокой интенсивности остаются существенным фактором, влияющим на электромагнитную совместимость радиоэлектронных средств. Существующие радиолокационные системы обеспечения движения используют диапазоны частот от сотен МГц до сотен ГГц и могут размещаться на

подвижных носителях: воздушных, морских и даже на легковых автомобилях. Как правило, их передатчики имеют высокую среднюю мощность и импульсные режимы работы. Когда ширина спектра импульса помехи существенно превышает ширину спектра сигнала, помеха может быть рассмотрена как импульс шума с равномерным спектром в полосе частот сигнала.

Исследованию влияния импульсных помех на работу систем связи и передачи данных и разработке мер обеспечения защиты от подобных помех посвящено достаточно много теоретических и прикладных работ [1 – 8]. Традиционные подходы к борьбе с импульсными помехами описаны в классических трудах [1, 2]. Для обеспечения приема дискретных сообщений в каналах с сосредоточенными по спектру и импульсными помехами используются нелинейные ограничители и блокирование приемника, компенсация помех, разнесенный прием и помехоустойчивое кодирование.

В современных системах цифровой связи для ослабления влияния помех используется канальное кодирование. В работе [5] рассмотрена возможность применения помехоустойчивого кодирования с перемежением для борьбы с замираниями или другими причинами, приводящими к возникновению групповых ошибок при приеме.

В связи с тем, что методики оценки влияния непреднамеренных помех, как правило, ориентируются на средние значения мощностей помех, то в ряде случаев может возникать недооценка опасности импульсных помех. Данное свойство импульсных помех было отмечено в работе [9]. В работе [10] показано, как данный эффект проявляется в случае воздействия импульсных помех на информационную часть кадра, передаваемого в стандарте широкополосной передачи данных *DVB*.

В отличие от замираний сигнала, связанных с интерференцией электромагнитных волн при многолучевом распространении и возникающих в случайные моменты времени, импульсные помехи, как правило, представляют собой совокупность некоторого числа потоков радиопульсов. При этом поток радиопульсов, создаваемый каждой отдельной радиолокационной системой можно считать на ограниченном интервале времени периодическим. Поскольку при передаче информации используются кадры, которые даже в адаптивных протоколах передачи информации на достаточно протяженных интервалах времени имеют фиксированную длительность, то возможно возникновение интервалов времени, на

которых возникает синхронизация частот следования кадров и поступления помех на вход приемного устройства системы связи. В работах [11, 12] исследовано влияние помех на процесс приема заголовков кадров физического уровня стандарта широкополосной передачи данных *DVB* и показано, что синхронные с заголовками кадра помехи более опасны, чем исследованные ранее асинхронные помехи.

Параметры потоков радиолокационных сигналов имеют длительности импульсов от десятков наносекунд до сотен микросекунд и частоту повторения от 200 до 4000 Гц. Такие излучения, оказывая влияние на прием сигналов широкополосной спутниковой связи, не могут быть строго синхронными с заголовками кадров физического уровня, имеющими длительность от единиц микросекунд и до сотен микросекунд и период повторения от сотен микросекунд и до десятков миллисекунд. Поэтому модель синхронных помех [13] не вполне адекватно описывает реальную ситуацию воздействия радиолокационных импульсных излучений на прием сигналов широкополосной спутниковой связи. Более корректная модель должна предполагать не точную, а эпизодически возникающую синхронизацию.

Цель работы: исследование влияния импульсных помех на прием информации в условиях эпизодической синхронизации кадров физического уровня канала спутниковой связи с потоками радиоимпульсов непреднамеренных помех.

**2. Аналитическая оценка влияния импульсных помех на прием информации в спутниковом канале связи в условиях эпизодической синхронизации с потоками импульсных помех.** Под эпизодической синхронизацией кадров физического уровня канала спутниковой связи с потоками импульсных помех будем понимать такую ситуацию, когда воздействие импульсной помехи совпадает во времени с приемом служебной части кадра физического уровня в течение некоторого числа периодов повторения кадров.

В современных приемниках спутниковых систем связи предусмотрено два режима работы блока кадровой синхронизации – «режим поиска» и «режим захвата». В «режиме поиска» блок синхронизации осуществляет корреляционное сравнение всех поступающих отсчетов с синхрогруппой. Порог принятия решения об обнаружении синхрогруппы в этом режиме устанавливается относительно высоким для уменьшения вероятности ложной тревоги. После обнаружения и успешного приёма одного или нескольких кадров, блок кадровой синхронизации переходит в «режим захвата».

В этом режиме, за счет использования информации из принятых кадров о времени появления следующего кадра, производится корреляционное сравнение с синхрогруппой лишь тех отсчетов принимаемого сигнала, где ожидается её появление. Порог принятия решения о наличии в принятых отсчетах синхрогруппы в «режиме захвата» выбирается существенно меньшим. В случае если в проверяемых отсчетах не будет обнаружена синхрогруппа, блок кадровой синхронизации переходит обратно в «режим поиска» и снова начинает проверять все принимаемые отсчеты с установленным для данного режима порогом обнаружения. Относительно невысокий порог обнаружения синхрогруппы в «режиме захвата» снижает вероятность пропуска кадра, а корреляционная обработка лишь части поступающих отсчетов позволяет сохранить вероятность ложной тревоги не высокой.

Помехоустойчивость блока кадровой синхронизации существенно выше в «режиме захвата», так как низкий порог обнаружения синхрогруппы позволяет принять правильное решение при приеме достаточно большого количества искаженных непреднамеренными помехами символов. Поэтому импульсные помехи с эпизодической синхронизацией для приемников с вышеописанным алгоритмом работы блока кадровой синхронизации особенно опасны, так как потеря кадра при воздействии помехи за счет ошибки в приеме синхрогруппы переводит блок кадровой синхронизации в менее помехоустойчивый «режим поиска». Так потеря синхронизации за счет воздействия импульсной помехи из начала эпизодически синхронизированной пачки помеховых импульсов приведет к более высокой вероятности потери кадров при воздействии последующих помеховых импульсов, из-за снижения помехоустойчивости блока кадровой синхронизации в «режиме поиска».

Поэтому рассмотрим ситуацию, когда входная реализация  $y(t)$  приемника системы спутниковой связи представляет собой аддитивную смесь сигнала  $s(t)$ , импульсной помехи  $p(t)$  и совокупности канальных шумов и собственных шумов приемника  $n(t)$ :

$$y(t) = s(t) + p(t) + n(t). \quad (1)$$

Импульсную помеху представим периодической последовательностью импульсов шума длительностью  $\tau_p$  и периодом повторения  $T_p$ :

$$p(t) = \begin{cases} \chi(t), & \text{при } jT_p \leq t \leq (jT_p + \tau_p); \\ 0, & \text{при } (jT_p + \tau_p) < t < (j+1)T_p, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\chi(t)$  – шумовой случайный процесс с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратичным отклонением  $\sigma$ ,  $j=0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Информационный сигнал  $s(t)$  состоит из кадров длительностью  $T_k$  включающих  $N_k$  элементарных посылок длительностью  $\tau$ ,  $T_k = N_k \tau$ . В свою очередь, как было показано в [14], кадр стандарта *DVB-S2* включает части с разной помехоустойчивостью: синхрогруппу, служебную часть заголовка кадра и блок передаваемой информации из  $N_c$ ,  $N_3$  и  $N_n$  посылки соответственно:

$$N_k = N_c + N_3 + N_n. \quad (3)$$

При этом одно из допущений, принятых в исследовании, заключается в том, что на отдельный кадр сигнала воздействует не более одного импульса помехи.

Оценим некоторые параметры эпизодической синхронизации на ограниченном интервале следования  $L$  кадров с учетом случайного начального положения импульса помехи, а именно среднее число кадров физического уровня на отдельном интервале эпизодической синхронизации  $M_{cp}$ , число интервалов эпизодической синхронизации  $N_M$  и долю общего числа элементарных посылок, подвергшихся воздействию помехи  $N_{nL}$ :

$$N_{nL} = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^L N_{cni}}{N_c L} & \text{для синхрогруппы} \\ \frac{\sum_{i=1}^L N_{3ni}}{N_3 L} & \text{для служебной части заголовка кадра} \end{cases}, \quad (4)$$

где  $N_{cni}$  – число элементарных посылок синхрогруппы  $i$ -го кадра, а,  $N_{3ni}$  – число элементарных посылок служебной части заголовка  $i$ -го кадра, подвергшихся воздействию помехи.

Временная диаграмма огибающих помехи, синхрогрупп и служебных частей заголовков кадров с обозначением интервалов

эпизодической синхронизации помехи с кадрами физического уровня канала спутниковой связи показана на рисунке 1.

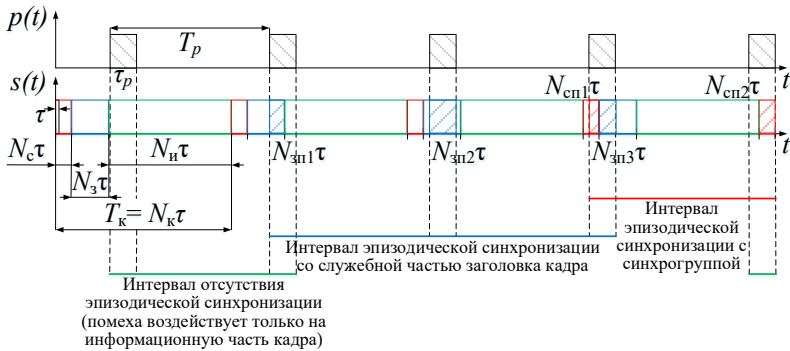


Рис. 1. Временная диаграмма огибающих помехи, синхрогрупп и служебных частей заголовков кадров

В структуре кадра на рисунке 1 обозначены красным цветом синхрогруппы, синим цветом служебные части заголовков кадра, зеленым цветом обозначен блок передаваемой информации. Таким же цветом обозначены интервалы эпизодической синхронизации помехи с соответствующей частью кадра. Обозначения на рисунке соответствуют выражениям (1) – (4). Под интервалом синхронизации понимается такой интервал времени следования кадров, в который служебные части каждого кадра сигнала подряд совпадают во временной области с импульсами помехи.

Рассмотрим *частный* пример возникновения условий эпизодической синхронизации помехи с различными частями кадра стандарта DVB-S2. Пусть на интервале, включающем  $L = 100$  кадров,  $\tau_p$  принимает значения  $(N_c + N_3)\tau$ ,  $0,125N_k\tau$ ,  $0,25N_k\tau$ .

Введем обозначения:  $\varphi$  – номер элементарной посылки первого кадра интервала, соответствующий началу первого импульса помехи,  $M_{н\varphi} = M_{ср}/L$  – нормированное значение среднего числа кадров физического уровня на отдельном интервале эпизодической

синхронизации,  $M_n = \frac{\sum_{\varphi=1}^{N_k} M_{н\varphi}}{N_k}$ ,  $N_{н\varphi} = N_M/L$  – нормированное значение числа интервалов эпизодической синхронизации на интервале,

включающем  $L$  кадров,  $N_n = \frac{\sum_{\varphi=1}^{N_k} N_{n\varphi}}{N_k}$ ,  $Q = T_p/\tau_p$  – скважность следования импульсов помехи.

На рисунках 2–7 представлены зависимости параметров эпизодической синхронизации от скважности следования импульсов помехи и ее начального положения для выбранных значений длительности импульса помехи. При этом сплошной линией обозначены значения параметров эпизодической синхронизации с синхрогруппой, а штриховой линией – эпизодической синхронизации с заголовком кадра (в тех случаях, когда данные значения совпадают для синхрогруппы и заголовка, приводится только один график).

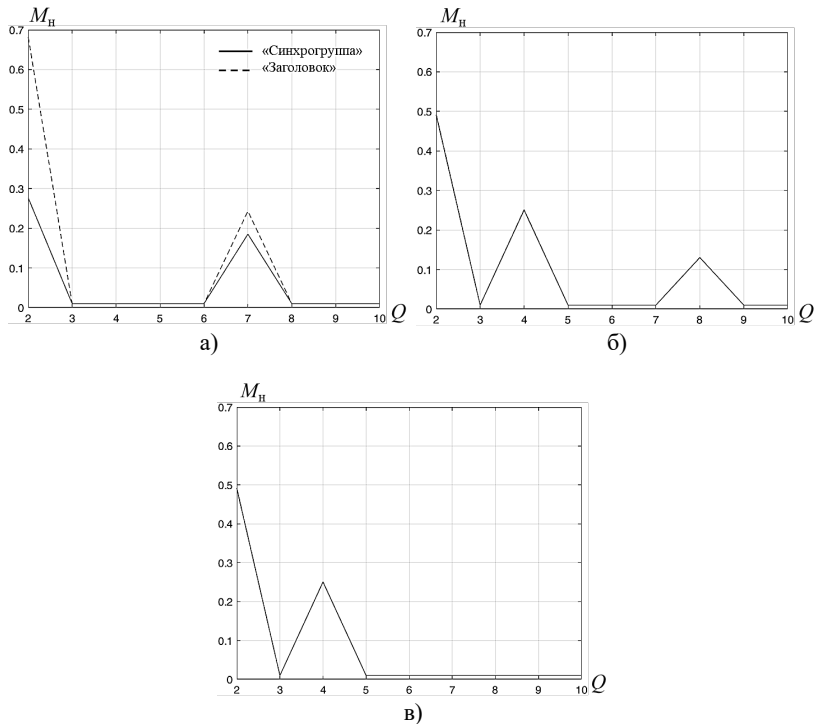


Рис. 2. Зависимости нормированного значения среднего числа кадров физического уровня на отдельном интервале эпизодической синхронизации от скважности импульсной помехи при: а)  $\tau_p = (N_c + N_3)\tau$ , б)  $\tau_p = 0,125N_k\tau$ , в)  $\tau_p = 0,25N_k\tau$

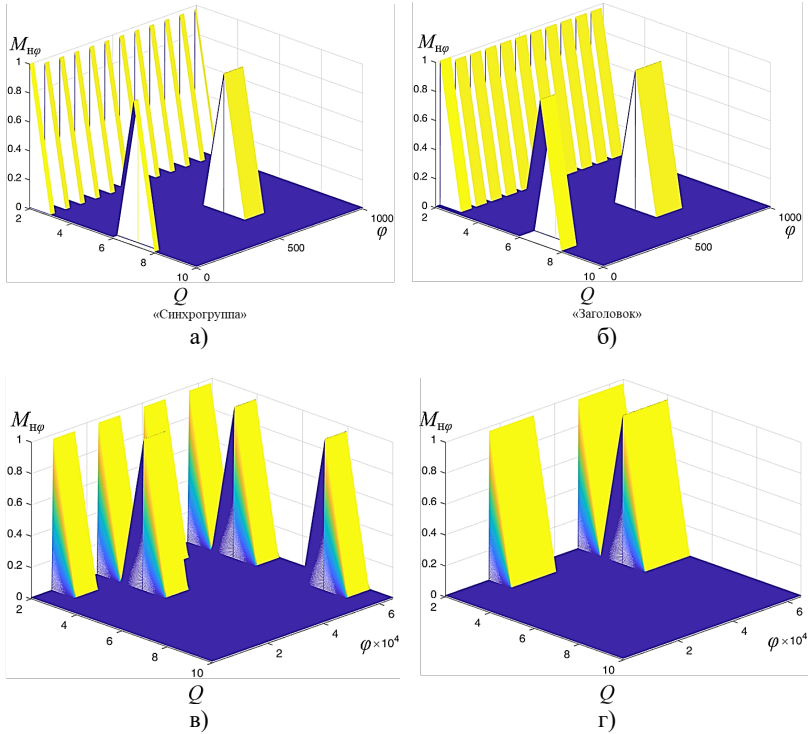


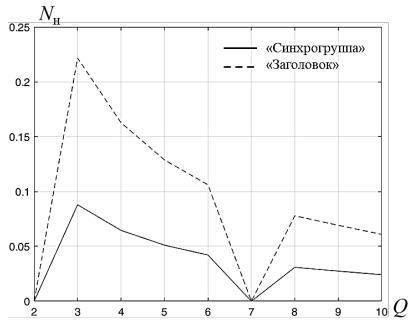
Рис. 3. Зависимости нормированного значения среднего числа кадров физического уровня на отдельном интервале эпизодической синхронизации от скважности импульсной помехи и начального положения помехи при:

- а)  $\tau_p = (N_c + N_3)\tau$  («синхрогруппа»); б)  $\tau_p = (N_c + N_3)\tau$  («заголовок»);  
 в)  $\tau_p = 0,125N_k\tau$ ; г)  $\tau_p = 0,25N_k\tau$

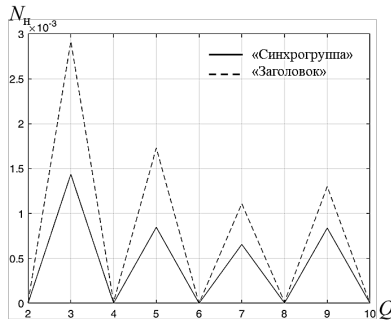
Полученные зависимости показывают, что среднее число кадров физического уровня на отдельном интервале эпизодической синхронизации с высокой вероятностью превышает единицу только при скважности импульсной помехи  $Q = 2$ , а для других значений скважности в значительной мере зависит от длительности импульса помехи. Для используемых исходных данных число интервалов эпизодической синхронизации выше для нечетных значений скважности импульсной помехи. При этом повышение числа интервалов эпизодической синхронизации сопровождается уменьшением среднего числа кадров на отдельном интервале синхронизации. Среднее значение доли элементарных посылок,



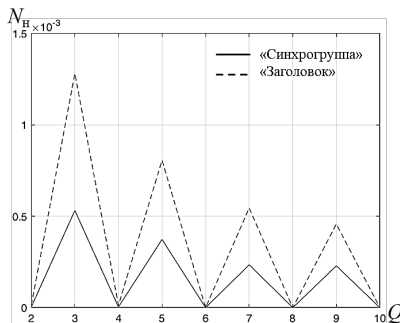
подвергшихся воздействию помехи, не зависит от длительности импульса помехи и определяется только значением скважности.



а)



б)



в)

Рис. 4. Зависимости нормированного значения числа интервалов эпизодической синхронизации от скважности импульсной помехи при:

а)  $\tau_p = (N_c + N_3) \tau$ , б)  $\tau_p = 0,125 N_k \tau$ , в)  $\tau_p = 0,25 N_k \tau$

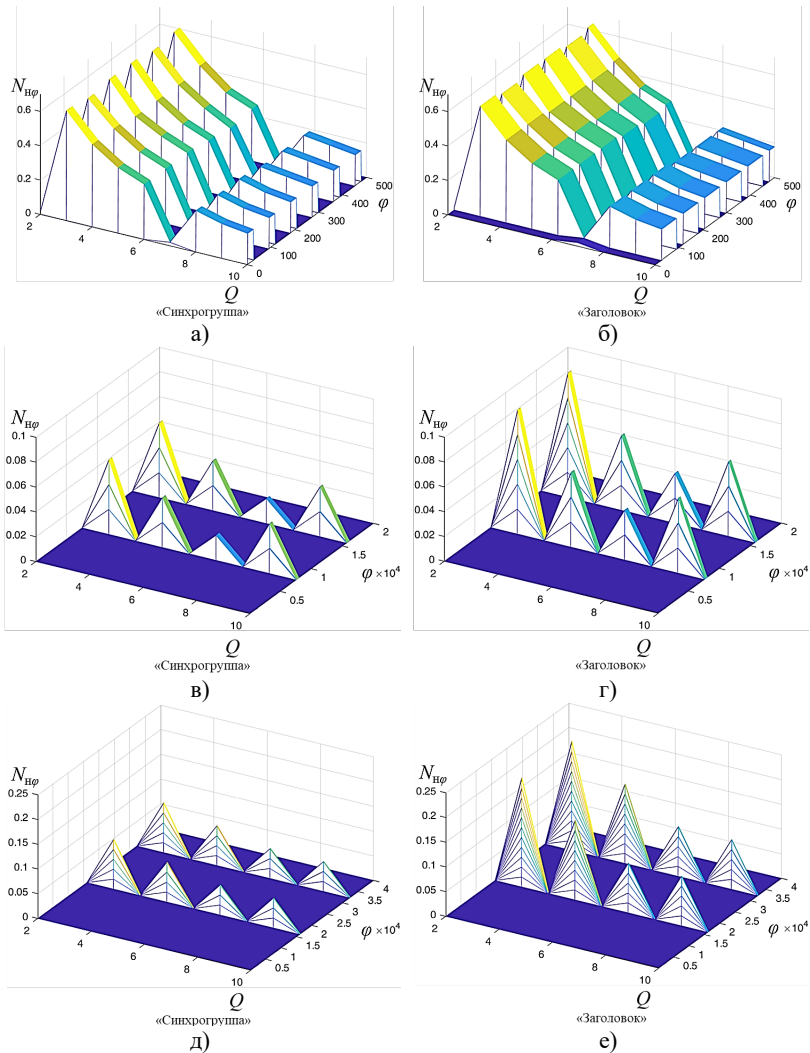


Рис. 5. Зависимости нормированного значения среднего числа интервалов эпизодической синхронизации от свкажности импульсной помехи и начального положения помехи при: а)  $\tau_p = (N_c + N_s)\tau$  («синхрогруппа»); б)  $\tau_p = N_c + N_s\tau$  («заголовок»); в)  $\tau_p = 0,125N_k\tau$  («синхрогруппа»); г)  $\tau_p = 0,125N_k\tau$  («заголовок»); д)  $\tau_p = 0,25N_k\tau$  («синхрогруппа»); е)  $\tau_p = 0,25N_k\tau$  («заголовок»)

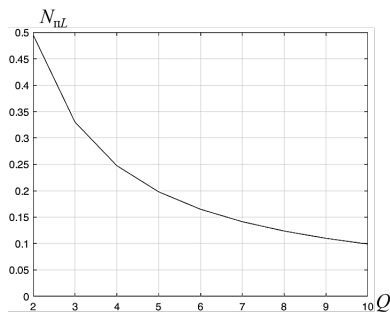


Рис. 6. Зависимости доли элементарных посылок, подвергшихся воздействию помехи на заданном интервале наблюдения от скважности импульсной помехи

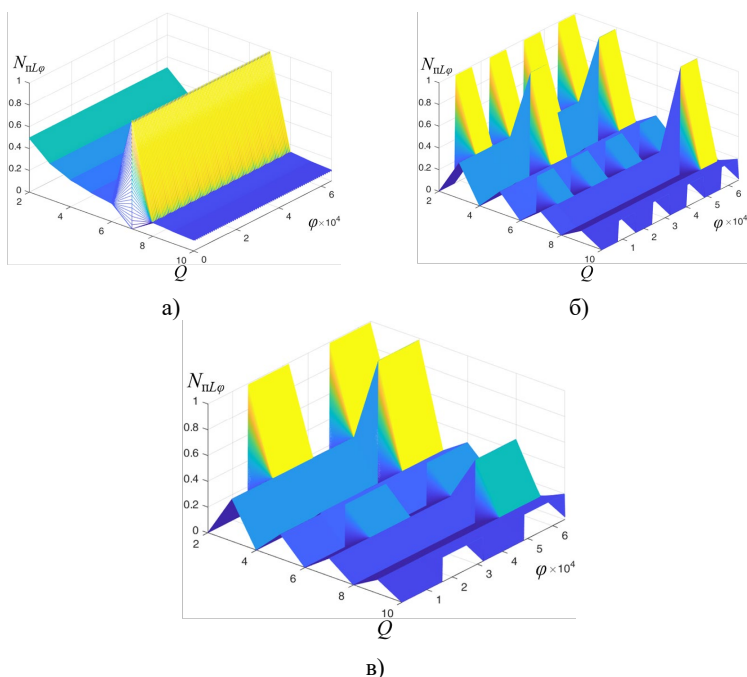


Рис. 7. Зависимости доли элементарных посылок, подвергшихся воздействию помехи на заданном интервале наблюдения от скважности импульсной помехи и начального положения помехи при: а)  $\tau_p = (N_c + N_3)\tau$ , б)  $\tau_p = 0,125N_k\tau$ , в)  $\tau_p = 0,25N_k\tau$

Значения рассмотренных параметров эпизодической синхронизации в значительной мере зависят от начального положения (начальной фазы) помехи. С увеличением длительности импульса помехи интервалы значений  $\varphi$ , при которых возможно возникновение эффекта эпизодической синхронизации, расширяются, однако их число сокращается. Максимальные значения вероятности возникновения эффекта эпизодической синхронизации достигаются при значениях  $Q = 2$  и  $Q = 3$ , однако для импульсов помех, имеющих длительность, равную длительности заголовка кадра, необходимо выделить значение  $Q = 7$ , при котором интервалы эпизодической синхронизации в зависимости от значения  $\varphi$  могут достигать максимальной длительности и максимального значения доли элементарных посылок в заголовке, подвергшихся воздействию помехи.

Теперь найдем вероятность потери кадра передаваемой информации при наличии собственных шумов приемника и непреднамеренных импульсных помех. Для этого рассмотрим модель функционирования канала спутниковой связи, структура которой представлена на рисунке 8.



Рис. 8. Структура модели функционирования канала спутниковой связи в условиях непреднамеренных импульсных помех

Будем считать, что кадр не принят корректно в случае наступления одного из следующих независимых событий:

- не обнаружена синхрогруппа и не выделены границы кадра, с вероятностью  $P_{oc}$ ;
- не корректно распознан заголовок кадра, с вероятностью  $P_{оз}$ ;
- канальное кодирование, включающее помехоустойчивое кодирование и перемежение, не обеспечили исправление ошибок возникающих при приеме информационной части кадра с вероятностью  $P_{ои}$ .

Полагая, что нарушений связи не происходит, если прием ведется на фоне только канальных шумов и собственных шумов приемника системы спутниковой связи, сбой в приеме может происходить только при попадании импульсной помехи в соответствующую часть кадра. Тогда, без учета краевых эффектов, связанных с попаданием помехи на стык разных частей кадра, вероятность ошибочного приема кадра может быть определена выражениями:

$$P_{ок} = 1 - (1 - P_{oc})(1 - P_{оз})(1 - P_{ои}); \quad (5)$$

$$P_{oc} = P_{пс} P_{ошс}, \quad P_{оз} = P_{пз} P_{ошз}, \quad P_{ои} = P_{пи} P_{оши}, \quad (6)$$

где  $P_{пс}$ ,  $P_{пз}$ ,  $P_{пи}$  – вероятности попадания импульсной помехи в синхрогруппу, в служебную часть заголовка кадра и в информационную часть кадра;

$P_{ошс}$ ,  $P_{ошз}$ ,  $P_{оши}$  – условные вероятности ошибок при приеме синхрогруппы, служебной части заголовка и информационной части кадра при условии воздействия импульсной помехи с учетом собственных шумов приемника и канальных шумов.

Полагая сдвиги импульсного потока помех и синхрогрупп кадра случайными и равновероятными, можно оценить вероятность попадания центра импульсной помехи в соответствующую часть кадра:

$$P_{пс} = P_{пк} N_c / N_k; \quad P_{пз} = P_{пк} N_z / N_k; \quad P_{пи} = P_{пк} N_i / N_k, \quad (7)$$

где  $P_{пк}$  – вероятность попадания импульсной помехи в кадр:

$$P_{\text{пк}} = \begin{cases} N_{\kappa} \tau / T_p, & \text{при } T_p > N_{\kappa} \tau; \\ 1, & \text{при } T_p \leq N_{\kappa} \tau. \end{cases} \quad (8)$$

Определим условные вероятности нарушения работы приемника при обработке синхрогруппы, служебной части заголовка кадра и блока передаваемой информации при наличии импульсной помехи.

Обнаружение синхрогруппы ведется устройством, схема которого представлена на рисунке 9. Оно состоит из согласованного фильтра с одиночным импульсом (СФОИ),  $N_c$  линий задержки, умножителей, на входы которых подаются отсчеты с линий задержки и коэффициенты соответствующие символам синхрогруппы  $C_k$ ,  $k=1 \dots N_c$ .

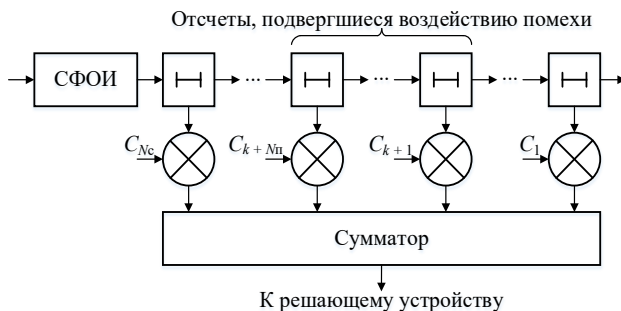


Рис. 9. Схема устройства обнаружения синхрогруппы

Для оценки условной вероятности ошибки  $P_{\text{оис}}$  при приеме синхрогруппы и импульсной помехи рассмотрим выход сумматора в момент, когда первый символ синхрогруппы достигнет последнего отвода устройства обнаружения. Поскольку шумы и помехи некоррелированы с сигналом, на выходе сумматора появится сигнал, случайная составляющая которого будет обусловлена воздействием шума и помехи и постоянная составляющая, определяемая накоплением символов синхрогруппы с амплитудой равной  $N_c w_m$ , где  $w_m$  – постоянная составляющая на выходе СФОИ при условии наличия синхрогруппы на входе СФОИ. Поскольку коэффициенты  $C_k$  по модулю равны единице, то случайная составляющая на выходе сумматора в следствии центральной предельной теоремы будет иметь нормальное распределение с математическим ожиданием, равным нулю, и дисперсией равной:

$$\sigma^2 = N_c \sigma_{ш}^2 + N_{сн} \sigma_{п}^2, \quad (9)$$

где  $\sigma_{ш}$  – среднеквадратическое отклонение амплитуды обусловленное шумом на выходе СФОИ,  $\sigma_{п}$  – среднеквадратическое отклонение амплитуды, обусловленное воздействием помехи на выходе СФОИ.

При этом при отсутствии помехи отношение сигнал/шум по амплитуде на выходе СФОИ равно:

$$\frac{w_m}{\sigma_{ш}} = \sqrt{\frac{2E_s}{N_0}}, \quad (10)$$

где  $E_s$  – энергия одного символа синхрогруппы,  $N_0$  – спектральная плотность мощности шума.

Поскольку сигнал при наличии помехи на выходе сумматора будет представлять собой случайную величину распределенную по нормальному закону с математическим ожиданием  $N_c w_m$  и дисперсией  $\sigma$ , то вероятность ошибки при обнаружении синхрогруппы будет равна:

$$P_{ошс} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{U_c} e^{-\frac{(x-N_c w_m)^2}{2\sigma^2}} dx, \quad (11)$$

где  $U_c$  – порог обнаружения синхрогруппы.

Используя замену  $y = (x - N_c w_m) / \sigma$ , выражение (11) можно представить в виде:

$$P_{ошс} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{(U_c - N_c w_m)}{\sigma}} e^{-\frac{y^2}{2}} dy. \quad (12)$$

Перепишем выражение (12) с использованием интеграла вероятности  $\Phi(x) = (1/\sqrt{2\pi}) \int_{-\infty}^x \exp(-y^2/2) dy$ :

$$P_{ошс} = \Phi\left(\frac{(U_c - N_c w_m)}{\sigma}\right). \quad (13)$$

Подставляя (9) в (13) и произведя несложные алгебраические преобразования, получим:

$$P_{\text{ошс}} = \Phi \left( \frac{N_c w_m}{\sigma_{\text{ш}} \sqrt{N_c + N_{\text{сп}} \frac{\sigma_{\text{ш}}^2}{\sigma_{\text{ш}}^2}}} (u_c - 1) \right), \quad (14)$$

где  $u_c = \frac{U_c}{N_c w_m}$  – нормированный порог обнаружения синхрогруппы.

Считая, что спектральная плотность мощности помехи  $D_0$  равномерна в полосе полезного сигнала, то отношение дисперсий помеховой и шумовой составляющей равно отношению их спектральных плотностей  $\sigma_{\text{ш}}^2 / \sigma_{\text{ш}}^2 = D_0 / N_0$ . Учитывая вышеизложенное и подставляя (10) в (14) получим:

$$P_{\text{ошс}} = \Phi \left( \frac{\sqrt{\frac{2E_s}{N_0}} \frac{N_c}{\sqrt{N_c + N_{\text{сп}} \frac{D_0}{N_0}}} (u_c - 1) \right). \quad (15)$$

Проведя несложные алгебраические преобразования в итоге получим:

$$P_{\text{ошс}} = \Phi \left( \sqrt{\frac{2N_c E_s}{N_0 + N_{\text{сп}} D_0 / N_c}} (u_c - 1) \right). \quad (16)$$

В статье, в том числе, рассматривается случай использования адаптивных протоколов. Например, протоколы DVB-S2, DVB-S2(X), CCSDS-131b. В этих протоколах вместо кадров канального уровня используется понятие кадров физического уровня. Введение кадров физического уровня обусловлено тем фактом, что эти кадры и информация в их заголовочных частях используется для решения задач в том числе физического уровня, т.е. синхронизации и демодуляции. Кадр физического уровня имеет несколько вариантов служебной части заголовка. Каждый вариант служебной части



заголовка соответствует конкретной сигнально-кодовой конструкции, используемой в информационной части кадра. Собственно это необходимо для реализации механизма адаптации. Приемник при получении большого количества ошибок по обратному каналу посылает сообщение о необходимости перехода на более помехоустойчивые сигнально-кодовые конструкции. Однако, точной информации о том, когда поступит кадр с более помехоустойчивой сигнально-кодовой конструкцией и какая именно сигнально-кодовая конструкция будет использована на стороне приемника нет. Поэтому в заголовке кадра такого протокола помимо синхрогруппы, необходимой для обнаружения заголовка имеется служебная часть, содержащая информацию об используемой сигнально-кодовой конструкции.

Одним из вариантов обработки таких заголовков может быть несколько параллельных корреляторов. Количество корреляторов равно количеству вариантов служебных частей заголовков  $N_{M_3}$  или используемых вариантов сигнально-кодовой конструкции, каждый из которых осуществляет выделение своей служебной части. В этом случае для правильного приема служебной части заголовка необходимо чтобы коррелятор, обнаруживающий служебную часть передаваемого заголовка успешно его обнаружил, то есть выход коррелятора превысил порог. Выходы остальных  $N_{M_3} - 1$  корреляторов, обнаруживающих другие виды служебных частей заголовков, не превысили порог обнаружения, то есть не произошло ложной тревоги. Для нахождения вероятности правильного приема служебной части заголовка  $P_{\text{пз}}$  необходимо найти многомерную плотность распределения вероятности. Однако, в первом приближении, можно полагать, что случайные величины на выходе корреляторов независимы, тогда вероятность правильного приема служебной части заголовка представим произведением вероятностей независимых событий:

$$P_{\text{пз}} = P_{\text{п}} P_{\text{т}}^{N_{M_3} - 1}, \quad (17)$$

где  $P_{\text{п}}$  – вероятность правильного приема заголовка коррелятором, настроенным на прием передаваемого заголовка,  $P_{\text{т}}$  – вероятность отсутствия ложной тревоги в корреляторах, настроенных на другие заголовки.

В процессе приема служебной части заголовка ошибка приема служебной части заголовка и ее правильный прием составляют

полную группу событий. Поэтому условная вероятность ошибки при приеме служебной части заголовка  $P_{\text{ошз}}$  равна:

$$P_{\text{ошз}} = 1 - P_{\text{tp}} P_{\text{tn}}^{N_{M3}-1}. \quad (18)$$

Аналогично условной вероятности ошибки при приеме синхрогруппы, используя свойство  $\Phi(x) = 1 - \Phi(-x)$ , запишем:

$$P_{\text{tp}} = \Phi \left( \sqrt{\frac{2N_3 E_s}{N_0 + N_{\text{зп}} D_0 / N_3}} (1 - u_3) \right), \quad (19)$$

где  $u_3 = \frac{U_3}{N_3 w_m}$  – нормированный порог обнаружения заголовка.

В свою очередь, сигнал на выходе корреляторов, настроенных на другие виды служебной части заголовка, будет представлять собой случайный процесс с нулевым математическим ожиданием и дисперсией  $\sigma$ , а вероятность отсутствия ложной тревоги будет равна:

$$P_{\text{tn}} = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{U_3} e^{-\frac{x^2}{\sigma^2}} dx = \Phi \left( \frac{U_3}{\sigma} \right) = \Phi \left( \sqrt{\frac{2N_3 E_s}{N_0 + N_{\text{зп}} D_0 / N_3}} u_3 \right). \quad (20)$$

Подставляя (19) и (20) в (18), получим:

$$P_{\text{ошз}} = 1 - \Phi \left( \sqrt{\frac{2N_3 E_s}{N_0 + N_{\text{зп}} D_0 / N_3}} (1 - u_3) \right) \Phi \left( \sqrt{\frac{2N_3 E_s}{N_0 + N_{\text{зп}} D_0 / N_3}} u_3 \right)^{N_{M3}-1}. \quad (21)$$

Необходимо отметить, что в формулах (16), (19), (21) учет времени воздействия помехи осуществляется за счет учета количества символов заголовка  $N_{\text{зп}}$  или синхрогруппы  $N_{\text{сп}}$ , соответствующих времени воздействия помехи.

Для нахождения вероятности ошибки приема информационной части кадра необходимо рассмотреть реализуемые в семействе стандартов *DVB* средства канального кодирования.

В современных широкополосных системах связи семейства стандартов *DVB* часто используется сочетание легко декодируемых кодов Боуза-Чоудхури-Хоквингема (БЧХ) и турбоподобного (*turbo-like*) кодирования низкоплотностным помехоустойчивым

(*Low Density Parity Check – LDPC*) кодом вместе с блоковыми или псевдослучайными перемежителями. Операции кодирования и декодирования обеспечивают исправление независимых (случайных) ошибок на относительно коротких интервалах кода. При этом перемежение и восстановление обеспечивают разбиение группирующихся в пакеты ошибок на случайные ошибки. На практике в случае длинных *LDPC* кодов часто применяются псевдослучайные перемежители [15, 16].

Рассмотрим влияние перемежения. Пусть перемежитель (блоковый или псевдослучайный) имеет глубину перемежения  $M$ , то есть обеспечивает достаточно равномерное распределение  $M$  интервалов кода длиной  $N_i$  каждый по кадру длиной  $N_k$ . Для этого перемежитель должен иметь фактор рассеивания (*spreading factor*)  $(N_i, r)$ , то есть любые два элемента исходной последовательности, находящиеся на расстоянии друг от друга в пределах длительности кодового интервала, после перемежения оказываются на расстоянии не меньшем  $r$  элементов.

Без учета последствия помехи можно считать, что импульсная помеха длительностью  $\tau_p$  приводит к росту вероятности ошибки при приеме последовательности из  $N_n$  символов, причем  $N_n = \tau_p/\tau$ .

При этом можно считать, что вся информационная часть кадра разделяется на две части: группу символов на фоне шума и помехи, имеющих одну вероятность ошибочного приема, и группу символов на фоне только шума, имеющих другую вероятность ошибочного приема. В условиях, когда длительность помехи пропорциональна длительности синхрогруппы или заголовка кадра, а также используется идеальный перемежитель (для которого  $N_i = r = \sqrt{N_k}$ ), вероятность ошибочного приема кадра будет определяться только соотношением длительности помехи с глубиной перемежения  $M$ . Если глубина перемежения не превышает исправляющую способность помехоустойчивого кода  $M \leq U_n$ , то очевидно, что при длительности помехи меньше  $M$  вероятность ошибочного приема кадра на фоне помехи будет сходиться к вероятности ошибочного приема кадра на фоне шума, а при длительности помехи больше  $M$  – стремиться к единице.

Поэтому для оценки условной вероятности потери кадра при воздействии помехи на его информационную часть следует сначала оценить исправляющую способность кодов коррекции ошибок. Для оценок исправляющей способности кодов коррекции ошибок, при условии большой длины кодового слова целесообразно использовать

асимптотические границы. Поэтому для оценки исправляющей способности кодов коррекции ошибок воспользуемся асимптотической границей Варшавова-Гильберта [17]:

$$R(\delta) \geq 1 - h(\delta), \quad (22)$$

где  $R$  – скорость кодирования,  $\delta = d/n$  – относительное кодовое расстояние,  $h(\delta)$  – бинарная функция информационной энтропии [18]:

$$h(\delta) = -\delta \log_2 \delta - (1 - \delta) \log_2 (1 - \delta). \quad (23)$$

Полагая, что современные алгоритмы декодирования *LDPC* кодов обеспечивают производительность, близкую к границе Варшавова-Гильберта [19, 20], запишем максимальное количество ошибочных битов, которое может быть исправлено кодом коррекции ошибок  $U_n$ :

$$U_n = \left\lfloor \frac{nh^{-1}(1-R) - 1}{2} \right\rfloor, \quad (24)$$

где  $h^{-1}$  – функция, обратная бинарной информационной энтропии, которая может быть аппроксимирована как [21]:

$$h^{-1}(1-R) = \left( 2^{0,6794(1-R)^{0,7244}} - 2^{-0,1357(1-R)^{2,8026}} \right)^{1,992}. \quad (25)$$

Теперь оценим вероятность того, что воздействие помехи во время приема информационной части кадра приведет к возникновению количества ошибочных битов  $N_n$ , превышающего  $U_n$ . Для этого рассмотрим пространство элементарных исходов приема информационной части кадра на фоне воздействия шумов и помехи, воздействовавшей, во время приема  $N_n$  битов. Графически такое пространство можно представить в виде таблицы изображенной на рисунке 10. Каждый элементарный исход такого «испытания», т.е. каждая ячейка таблицы соответствует количеству ошибок в информационной части кадра. При этом учитывается, что часть ошибок возникла во время приёма сигнала на фоне шума, а часть на фоне воздействия помехи и шума. Жирной линией обведено подмножество пространства элементарных исходов, которое

соответствует событию приема кадра с количеством ошибок, превышающем исправляющие возможности кода коррекции ошибок. Это и будет вероятность потери кадра при условии попадания помехи в информационную часть кадра  $P_{\text{оши}}$ . На рисунке  $P'_i$  – вероятность того, что в информационной части кадра, принятой во время отсутствия воздействия помехи возникнет  $i$  ошибок,  $P_j$  – вероятность того, что в информационной части кадра, принятой во время воздействия помехи возникнет  $j$  ошибок.

$P_{N_{\Pi}-N_{\Pi}}$	$N_{\Pi}-N_{\Pi}$	$N_{\Pi}-N_{\Pi}+1$	...	$N_{\Pi}-N_{\Pi}+U_{\Pi}$	$N_{\Pi}-N_{\Pi}+U_{\Pi}+1$	...	$N_{\Pi}$
...	...	...	...	...	...	...	...
$P_{U_{\Pi}+1}$	$U_{\Pi}+1$	$U_{\Pi}+2$	...	$U_{\Pi}+U_{\Pi}+1$	$U_{\Pi}+U_{\Pi}+2$	...	$N_{\Pi}+U_{\Pi}$
$P_{U_{\Pi}}$	$U_{\Pi}$	$U_{\Pi}+1$	...	$U_{\Pi}+U_{\Pi}$	$U_{\Pi}+U_{\Pi}+1$	...	$N_{\Pi}+U_{\Pi}-1$
...	...	...	...	...	...	...	...
$P_1$	1	2	...	$U_{\Pi}+1$	$U_{\Pi}+2$	...	$N_{\Pi}+1$
$P_0$	0	1	...	$U_{\Pi}$	$U_{\Pi}+1$	...	$N_{\Pi}$
	$P_0$	$P_1$	...	$P_{U_{\Pi}}$	$P_{U_{\Pi}+1}$	...	$P_{N_{\Pi}}$

Рис. 10. Варианты количества ошибок, обусловленные воздействием шума и помехи

Суммируя все элементы пространства элементарных исходов, обведенные на рисунке 10 жирной линией получим вероятность ошибки во время приема информационной части кадра:

$$P_{\text{оши}} = 1 - \sum_{i=0}^{\min(U_{\Pi}, N_{\Pi}-N_{\Pi})} \sum_{j=0}^{\min(U_{\Pi}-i, N_{\Pi})} P'_i P_j . \quad (26)$$

Считая воздействующую помеху на интервале ее существования стационарной, а вероятности ошибки при приеме каждого канального бита независимыми событиями положим, что вероятности  $P'_i$  и  $P_j$  распределены по биномиальному закону:

$$P'_i = C_{N_{\Pi}-N_{\Pi}}^i p_{\text{ber}}^{\text{ш } i} (1-p_{\text{ber}}^{\text{ш}})^{N_{\Pi}-N_{\Pi}-i} , \quad (27)$$

$$P_j = C_{N_{\Pi}}^j p_{\text{ber}}^{\text{п } j} (1-p_{\text{ber}}^{\text{п}})^{N_{\Pi}-j} , \quad (28)$$

где  $p_{ber}^{III}$ ,  $p_{ber}^{II}$  – вероятности битовой ошибки при приеме информационной части кадра на фоне шума и на фоне помехи и шума соответственно.

В семействе стандартов *DVB* реализовано четыре основных режима модуляции: *QPSK* и *8PSK*, являющиеся основными, и *16APSK* и *32APSK*, используемые при высоком уровне сигнал/шум.

Рассматривая *QPSK* в качестве основного режима модуляции, определим  $p_{ber}^{III}$  и  $p_{ber}^{II}$  с учетом того, что помеха представляет собой импульсы шума [22]:

$$p_{ber}^{II} = \Phi \left( \sqrt{\frac{2E_b}{D_0}} \right), \quad (29)$$

$$p_{ber}^{III} = \Phi \left( \sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} \right). \quad (30)$$

Например, для  $E_b/N_0 = 16,5$  дБ  $p_{ber}^{III} = 10^{-6}$ , и зависимость  $p_{ber}^{II}(E_b/N_0)$  приведена на рисунке 11.

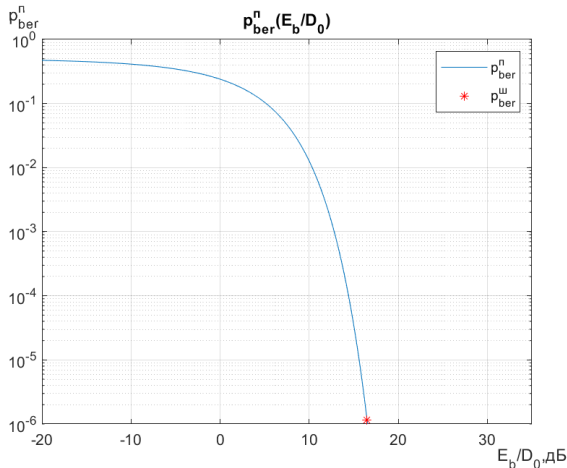


Рис. 11. Зависимость вероятности битовой ошибки при приеме информационной части кадра от отношения сигнал/помеха при фиксированном отношении сигнал/шум

В качестве примера рассмотрим воздействие импульсных помех на кадр, передаваемый в канале связи стандарта *DVB-S2*, когда уже возникли условия эпизодической синхронизации потока кадров с потоком импульсных помех.

**3. Результаты аналитической оценки влияния импульсных помех на прием информации в спутниковом канале связи стандарта *DVB-S2* в условиях эпизодической синхронизации с потоком импульсных помех.** Параметры заголовков и длительность информационной части кадров для указанного стандарта описаны в работах [10, 15, 16]. В качестве основного режима модуляции выберем *QPSK*.

Полученные выше значения  $p_{ber}^{III}$  и  $p_{ber}^I$  позволяют рассчитать вероятность ошибки во время приема синхрогруппы, служебной части заголовка кадра и информационной части кадра, а также вероятность ошибочного приема кадра (рисунки 12, 13, 14 и 15 соответственно). При этом рисунки 12(а), 13(а), 14(а) и 15(а) представляют собой зависимости вероятности ошибки приема соответствующей части кадра от отношения сигнал/помеха при фиксированном отношении сигнал/шум для различных значений длительности импульса помехи, а рисунки 12(б), 13(б), 14(б) – зависимости вероятности ошибки приема соответствующей части кадра от длительности импульса помехи при фиксированных отношениях сигнал/помеха. Вычисления производились в соответствии с выражениями (16), (21), (26) и (5) соответственно. При изменении скважности периодической последовательности импульсов шума была зафиксирована средняя мощность.

На рисунке 12(а) представлено семейство зависимостей вероятности ошибки во время приема синхрогруппы от отношения сигнал/помеха при фиксированном отношении сигнал/шум. Полученные зависимости показывают, что с увеличением длительности импульса помехи отношение сигнал/помеха, при котором обеспечивается заданный уровень вероятности ошибки, уменьшается. Это обусловлено снижением доли энергии помехи, приходящейся на синхрогруппу. При этом при низких отношениях сигнал/помеха вероятность ошибки при приеме синхрогруппы остается относительно высокой при любых длительностях импульса помехи, как показано на рисунке 12(б).

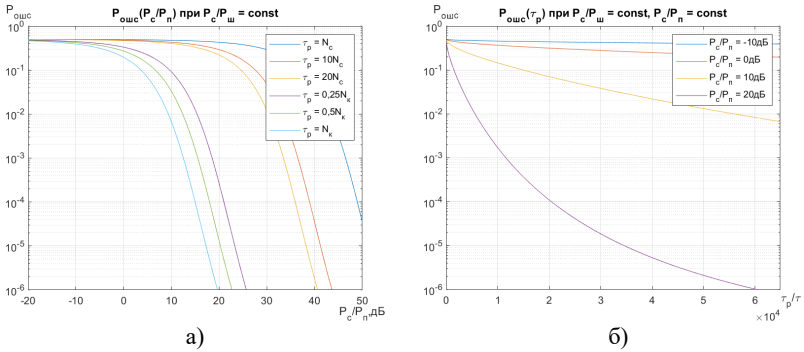


Рис. 12. Зависимость вероятности ошибки во время приема синхрогруппы от: а) отношения сигнал/помеха при фиксированном отношении сигнал/шум; б) от длительности импульса помехи

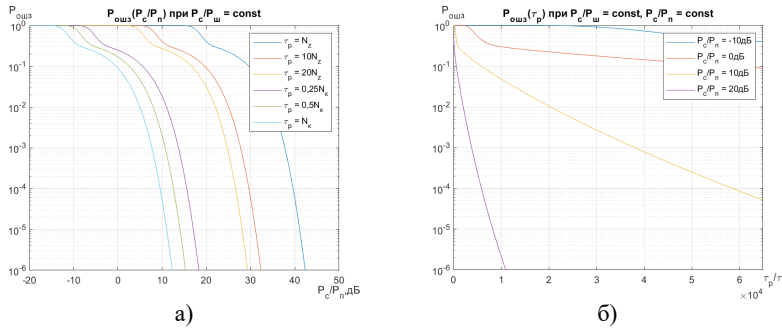


Рис. 13. Зависимость вероятности ошибки во время приема заголовка кадра от: а) отношения сигнал/помеха при фиксированном отношении сигнал/шум; б) от длительности импульса помехи

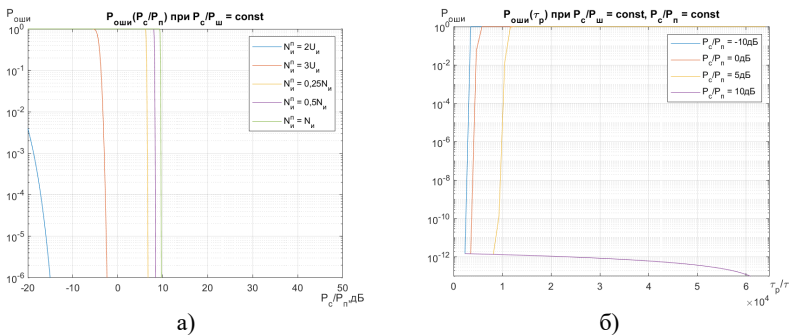


Рис. 14. Зависимость вероятности ошибки во время приема информационной части кадра от: а) отношения сигнал/помеха при фиксированном отношении сигнал/шум; б) от длительности импульса помехи



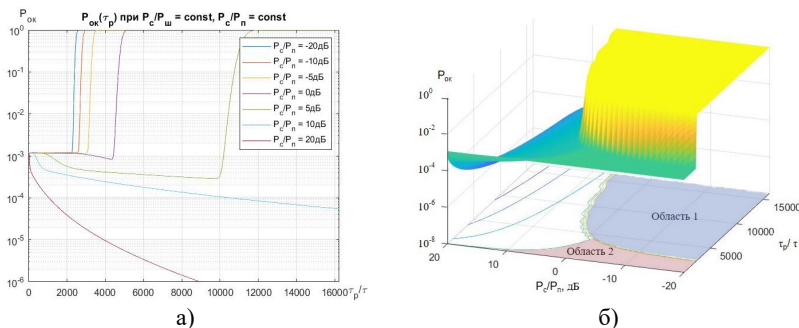


Рис. 15. Зависимость вероятности ошибочного приема кадра от:  
 а) длительности импульса помехи; б) от отношения сигнал/помеха при фиксированном отношении сигнал/шум и от длительности импульса помехи

Для служебной части заголовка кадра вероятность ошибочного приема уменьшается с увеличением длительности импульса помехи аналогично синхрогруппе (рисунок 13(а)), однако при низких отношениях сигнал/помеха и малой длительности импульса помехи можно наблюдать более высокую скорость убывания функции вероятности ошибочного приема служебной части заголовка кадра (рисунок 13(а, б)). Данное обстоятельство обусловлено применением многоканального коррелятора при приеме служебной части заголовка кадра.

Вероятность ошибочного приема информационной части кадра, в целом, носит пороговый характер, определяемый исправляющей способностью помехоустойчивого кодирования, и слабо зависит от длительности импульса помехи. При этом при высоком отношении сигнал/помеха вероятность ошибочного приема информационной части кадра стремится к вероятности ошибочного приема данной части кадра в условиях воздействия только шумов, как показано на рисунке 14(б).

Из зависимостей, представленных на рисунке 15(а) следует, что при низких отношениях сигнал/помеха вероятность потери кадра при воздействии коротких импульсных помех определяется, в основном, вероятностью ошибочного приема заголовка, а при воздействии импульсов помех большой длительности – только вероятностью ошибочного приема информационной части кадра. Однако при высоких отношениях сигнал/помеха вероятность потери информационной части кадра не оказывает существенного влияния на общую вероятность потери кадра. В таком случае вероятность потери кадра определяется, в основном, условными вероятностями ошибки

при приеме синхрогруппы и ошибочного приема служебной части заголовка кадра. Это доказывает тот факт, что именно воздействие коротких импульсов помех на служебную часть кадра может приводить к более высокой вероятности потери кадра.

Соответственно, на рисунке 15(б) область 1 (выделенная синим цветом), определяет диапазоны значений отношений сигнал/помеха и длительностей импульса помехи, при которых основной вклад в вероятность ошибочного приема кадра вносит вероятность ошибки при приеме информационной части кадра. Область 2 (выделенная красным цветом), определяет соответствующие диапазоны, при которых основной вклад в вероятность ошибочного приема кадра вносит вероятность ошибки при приеме заголовка кадра.

**4. Заключение.** В статье представлена аналитическая оценка влияния импульсных помех на прием информации в спутниковом канале связи в условиях эпизодической синхронизации кадров физического уровня канала спутниковой связи с потоками импульсных помех.

Результаты аналитической оценки вероятности ошибочного приема кадра стандарта DVB-S2 показывают, что при низких отношениях сигнал/помеха (не более 3 дБ) вероятность потери кадра при воздействии коротких импульсных помех, длительность которых не превышает 5% длительности кадра, определяется, в основном, вероятностью ошибочного приема заголовка, а при воздействии импульсов помех большой длительности – только вероятностью ошибочного приема информационной части кадра. При высоких отношениях сигнал/помеха (превышающих 3-5 дБ) вероятность потери информационной части кадра не оказывает существенного влияния на общую вероятность потери кадра, определяемую, в основном, условными вероятностями ошибки при приеме синхрогруппы и ошибочного приема служебной части заголовка кадра. При этом существенное значение имеет длительность импульса помехи.

При приеме синхрогруппы с увеличением длительности импульса помехи отношение сигнал/помеха, при котором обеспечивается заданный уровень вероятности ошибки, уменьшается. Это обусловлено снижением доли энергии помехи, приходящейся на синхрогруппу.

Для служебной части заголовка кадра вероятность ошибочного приема уменьшается с увеличением длительности импульса помехи аналогично синхрогруппе, однако применение многоканального коррелятора при низких отношениях сигнал/помеха и малой

длительности импульса помехи приводит к более высокой скорости убывания функции вероятности ошибочного приема служебной части заголовка кадра.

Вероятность ошибочного приема информационной части кадра, в целом, носит пороговый характер, определяемый исправляющей способностью помехоустойчивого кодирования и соотношением длительности импульса помехи с интервалом перемежения.

Таким образом, доказано, что существуют такие соотношения длительности импульса шумовой помехи с длительностью служебных частей кадра физического уровня канала спутниковой связи, при которых воздействие импульсной помехи на служебную часть кадра может приводить к более высокой вероятности ошибочного приема кадра, чем при воздействии на информационную часть кадра. Это происходит при сочетании двух условий: длительность помехи соизмерима с длительностью заголовка кадра или в несколько раз больше, и не обеспечивается достаточное превышение мощности сигнала над средней мощностью помехи.

### Литература

1. Зюко А.Г., Кловский Д.Д., Коржик В.И., Назаров М.В. Теория электрической связи. М.: Радио и связь. 1999. 432 с.
2. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью. М.: Радио и связь. 2003. 640 с.
3. Калинин В.С., Белов С.П. Обзор источников помех в спутниковых системах связи // Научный результат. Информационные технологии. 2022. Т. 7. № 3. С. 3–13.
4. Тяпкин П.С., Важенин Н.А. Повышение помехоустойчивости систем связи в условиях импульсных квазигармонических помех с использованием слепых методов обработки сигналов // Труды МАИ. 2023. № 128. DOI: 10.34759/trd-2023-128-13.
5. Puzko D., Batov Y., Gelgor A., Tkachenko D., Angueira P., Montalban J. Evaluation of Finite Discrete RRC-Pulse Parameters to Simulate DVB-S2 with LDM // IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). 2019. pp. 140–143.
6. Oh H., Nam H. Maximum Rate Scheduling With Adaptive Modulation in Mixed Impulsive Noise and Additive White Gaussian Noise Environments // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2021. vol. 20. no. 5. pp. 3308–3320.
7. He Y., Zou, Li D., Yao R., Yang F., Song J. Adaptive Impulsive Noise Suppression: A Deep Learning-Based Parameters Estimation Approach // IEEE Transactions on Broadcasting. 2023. vol. 69. no. 2. pp. 505–515. DOI: 10.1109/TBC.2022.3224249.
8. Bejarano J.M.R., Miguel N.C., Ruiz Pinar F.J. MF-TDMA Scheduling Algorithm for Multi-Spot Beam Satellite Systems Based on Co-Channel Interference Evaluation // IEEE Access. 2018. vol. 7. pp. 4391–4399.
9. Паршуткин А.В., Маслаков П.А. Исследование помехоустойчивости современных стандартов спутниковой связи к воздействию нестационарных помех. Труды СПИИРАН. 2017. № 4(53). С. 159–177.

10. Паршуткин А.В., Бучинский Д.И. Модель функционирования канала спутниковой связи в условиях искажений служебной части кадров нестационарными помехами. Информатика и автоматизация. 2020. Т. 19. № 5. С. 967–990.
11. Агневич 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. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2019. № 5–6. С. 114–120.
12. Луценко С.А. Подход к расчету энергетического выигрыша при постановке помех системе цикловой синхронизации спутниковых линий связи // Журнал радиоэлектроники. 2019. № 3. DOI: 10.30898/1684-1719.2019.3.14.
13. Бучинский Д.И., Паршуткин А.В. Модель воздействия нестационарных помех на кадровую синхронизацию спутниковой системы связи // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2019. № 671. С. 114–119.
14. 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. DOI: 10.1049/cp.2018.1709.
15. 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. Part 2: DVB-S2 Extensions (DVB-S2X). 2020-02.
16. 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. 195 p. Available at: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/301500\\_301599/30154502/01.01.01\\_60/en\\_30154502v010101p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301500_301599/30154502/01.01.01_60/en_30154502v010101p.pdf) (accessed 20.10.2023).
17. Касами Т., Токура Н., Ивадари Ё., Инагаки Я. Теория кодирования: Пер. с японского. М.: Мир, 1978. 576 с.
18. Madiman M., Marcus A., Tetali P. E Entropy and Set Cardinality Inequalities for Partition-Determined Functions and Application to Sumsets // Random Structures and Algorithms. 2012. pp. 399–424.
19. Gaborit P., Zemor G. Asymptotic improvement of the Gilbert-Varshamov bound for binary linear codes. IEEE Transactions on Information Theory. 2008. vol. 54. no. 9. pp. 3865–3872.
20. Hao H., Chen J., Zhou Y. An Irregular Row Weight Problem Resolution for DVB-S2 LDPC Short Frame // 7th IEEE International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC). 2017. pp. 45–48.
21. Zhou X., Cheng M., He X., Matsumoto T. Exact and Approximated Outage Probability Analyses for Decode-and-Forward Relaying System Allowing Intra-Link Errors. IEEE Transactions on Wireless Communications. 2014. vol. 13. no. 12. pp. 7062–7071. DOI: 10.1109/TWC.2014.2354337.
22. Lee P. Computation of the Bit Error Rate of Coherent M-ary PSK with Gray Code Bit Mapping. IEEE Transactions on Wireless Communications. 1986. vol. 34. no. 5. pp. 488–491.

**Паршуткин Андрей Викторович** — д-р техн. наук, профессор, доцент, кафедра систем и средств радиоэлектронной борьбы, 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 — 120. [andydc2010@mail.ru](mailto:andydc2010@mail.ru); улица Ждановская, 13, 197198, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)347-9535.

**Бучинский Дмитрий Игоревич** — канд. техн. наук, преподаватель, кафедра систем и средств радиоэлектронной борьбы, 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 — 7. reys-rd@ya.ru; улица Ждановская, 13, 197198, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(926)015-8274.

**Копалов Юрий Николаевич** — адъюнкт, 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 — 6. yury.kopalov.s@mail.ru; улица Ждановская, 13, 197198, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(999)200-1804.

A.V. PARSHUTKIN, D.I. BUCHINSKIY, YU.N. KOPALOV  
**MODEL OF SATELLITE COMMUNICATION CHANNEL  
FUNCTIONING UNDER CONDITIONS OF EPISODIC  
SYNCHRONIZATION WITH PULSE INTERFERENCE FLOWS**

*Parshutkin A.V., Buchinskiy D.I., Kopalov Yu.N. Model of Satellite Communication Channel Functioning under Conditions of Episodic Synchronization with Pulse Interference Flows.*

**Abstract.** The article investigates the effect of pulse interference on information reception in conditions of episodic synchronization of frames of the physical level of a satellite communication channel with streams of radio pulses of unintended interference. An analytical model of the influence of pulse interference on the reception of information in a satellite communication channel under conditions of episodic synchronization of physical-level frames with pulse interference streams is proposed. Using the example of the DVB family of standards, the combined effect of noise and unintended impulse interference on the conditional error probabilities when receiving a synchro group, the service part of the header and the information part of the frame is shown. Estimates of the average number of frames of the physical level for the duration of the interval of episodic synchronization, the number of intervals of episodic synchronization and the proportion of elementary parcels in the frame exposed to interference, depending on the duration of the pulse interference, are given. It is shown that there are such relations between the duration of the interference pulse and the continuity of the sequence, in which the phenomenon of the episodic synchronization of physical-level frames with the flow of pulse interference has a significant impact on the functioning of the satellite communication channel. The dependences of the probability of erroneous reception of a frame of the physical level of a satellite communication channel on the signal-to-interference ratio at the fixed signal-to-noise ratio and on the duration of the interference pulse are obtained. It has been found that at high signal-to-noise ratios and the duration of the interference correlated with the duration of the service part of the frame, but significantly less than the duration of the frame, the probability of erroneous reception of the frame may be higher than at lower signal-to-noise ratios due to errors when receiving the service part of the frames.

**Keywords:** episodic synchronization, unintentional pulse interference, DVB, noise immunity, broadband satellite communication.

## References

1. Zyuko A.G., Klovsikij D.D., Korzhik V.I., Nazarov M.V. *Teoriya elektricheskoy svyazi* [Theory of Electrical Communication]. M.: Radio I svyaz. 1999. 432 p. (In Russ.).
2. Pomexozashhishhenost system radiosvyazi s rasshireniem spectra signalov modulyaciej nesushhej psevdosluchajnoj posledovatelnostyu [Noise Immunity of Radio Communication Systems with the Expansion of the Signal Spectrum by Carrier Modulation Pseudorandom Sequence]. M.: Radio I svyaz. 2003. 640 p. (In Russ.).
3. Kalinin V.C., Belov C.P. [Overview of Interference Sources in Satellite Communication Systems]. Scientific result. Information Technology – Nauchnyj rezultat. Informaciiionnye tekhnologii. 2022. vol. 7. no. 3. pp. 3–13. (In Russ.).
4. Tyapkin P.C., Vazhenin N.A. [Improving the Noise Immunity of Communication Systems in Conditions of Pulsed Quasiharmonic Interference Using Blind Signal Processing Methods].

5. Proceedings of MAI – Trudy MAI. 2023. no. 128. DOI: 10.34759/trd-2023-128-13. (In Russ.).
6. Puzko D., Batov Y., Gelgor A., Tkachenko D., Angueira P., Montalban J. Evaluation of Finite Discrete RRC-Pulse Parameters to Simulate DVB-S2 with LDM. IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EEEPolytech). 2019. pp. 140–143.
7. Oh H., Nam H. Maximum Rate Scheduling With Adaptive Modulation in Mixed Impulsive Noise and Additive White Gaussian Noise Environments. IEEE Transactions on Wireless Communications. 2021. vol. 20. no. 5. pp. 3308–3320.
8. He Y., Zou, Li D., Yao R., Yang F., Song J. Adaptive Impulsive Noise Suppression: A Deep Learning-Based Parameters Estimation Approach. IEEE Transactions on Broadcasting. 2023. vol. 69. no. 2. pp. 505–515. DOI: 10.1109/TBC.2022.3224249.
9. Bejarano J.M.R., Miguel N.C., Ruiz Pinar F.J. MF-TDMA Scheduling Algorithm for Multi-Spot Beam Satellite Systems Based on Co-Channel Interference Evaluation // IEEE Access. 2018. vol. 7. pp. 4391–4399.
10. Parshutkin A.V., Maslakov P.A. [Study of the Noise Immunity of Modern Standards of Satellite Communications to the Impact of Non-Stationary Interference]. Informatika i avtomatizaciya – Informatics and Automation. 2017. no. 4(53). pp. 159–177. (In Russ.).
11. Parshutkin A.V., Buchinskiy D.I. [Model of Satellite Communication Channel Functioning under Conditions of Disturbances of Service Part of Frames by Unsteady Interference]. Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings. 2020. vol. 19. no. 5. pp. 967–990. (In Russ.).
12. 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 oboronnoj tekhniki.0 Seriya 16: Tehnicheskie sredstva protivodejstvija terrorizmu – Military Enginery. Episode 16: Technical means of Mixed countering terrorism. 2019. no. 5–6. pp. 114–120. (In Russ.).
13. 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. no. 3. DOI: 10.30898/1684-1719.2019.3.14. (In Russ.).
14. Parshutkin A.V., Buchinskiy D.I. [A Model of the Impact of Non-stationary Interference on the Frame Synchronization of a Satellite Communication System]. Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii im. A.F.Mozhajsikogo – Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy. 2019. № 671. С. 114–119. (In Russ.).
15. 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. DOI: 10.1049/cp.2018.1709.
16. 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. Part 2: DVB-S2 Extensions (DVB-S2X). 2020-02.
17. 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. 195 p. Available at: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/301500\\_301599/30154502/01.01.01\\_60/en\\_30154502v010101p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301500_301599/30154502/01.01.01_60/en_30154502v010101p.pdf) (accessed 20.10.2023).
18. Vu V., Wu L. Improving the Gilbert-Varshamov Bound for Q-ary Codes // IEEE Transactions on Information Theory. 2005. vol. 51. no. 9. pp. 3200–3208.

19. Madiman M., Marcus A., Tetali P. E Entropy and Set Cardinality Inequalities for Partition-Determined Functions and Application to Sumssets. *Random Structures and Algorithms*. 2012. pp. 399–424.
20. Gaborit P., Zemor G. Asymptotic improvement of the Gilbert-Varshamov bound for binary linear codes. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2008. vol. 54. no. 9. pp. 3865–3872.
21. Hao H., Chen J., Zhou Y. An Irregular Row Weight Problem Resolution for DVB-S2 LDPC Short Frame. 7th IEEE International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC). 2017. pp. 45–48.
22. Zhou X., Cheng M., He X., Matsumoto T. Exact and Approximated Outage Probability Analyses for Decode-and-Forward Relaying System Allowing Intra-Link Errors. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2014. vol. 13. no. 12. pp. 7062–7071. DOI: 10.1109/TWC.2014.2354337.
23. Lee P. Computation of the Bit Error Rate of Coherent M-ary PSK with Gray Code Bit Mapping. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 1986. vol. 34. no. 5. pp. 488–491.

**Parshutkin Andrey** — Ph.D., Dr.Sci., Professor, Associate professor, Department of electronic warfare systems, 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 — 120. andydc2010@mail.ru; 13, Zhdanovskaya St., 197198, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)347-9535.

**Buchinskiy Dmitriy** — Ph.D., Lecturer, Department of electronic warfare systems, 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 — 7. reys-rd@ya.ru; 13, Zhdanovskaya St., 197198, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(926)015-8274.

**Kopalov Yury** — Student, 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 — 6. yury.kopalov.s@mail.ru; 13, Zhdanovskaya St., 197198, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(999)200-1804.