

УДК 629.056.8

Модель и условия возникновения аномалий в демодулированном трафике абонентских терминалов VSAT

Жданова И. М., Дворников С. С., Дворников С. В.

Постановка задачи: существенным технологическим прорывом в передаче данных посредством спутниковой связи явился переход на протоколы нового поколения стандарта DVB-S2X, которые позволили не только увеличить пропускную способность сетей спутниковой связи, но и существенно снизить требования к уровню канальных шумов. На практике применение стандарта DVB-S2X, обеспечило возможность организации устойчивой работы оборудования VSAT при значении отношения сигнал шум (ОСШ) в канале на уровне -10 дБ с вероятностью битовой ошибки порядка 10^{-5} . Однако реализация новых технических решений на основе процедур переменного кодирования и модуляции, а также режимов сегментации по времени, в условиях нарушения требований электромагнитной совместимости (ЭМС) могут привести к эффекту возникновения скрытного деструктивного воздействия (СДВ), приводящего к искажению информационного контента, без явного нарушения работы линии спутниковой связи. **Целью работы** является повышение помехозащиты спутниковых линий радиосвязи, организованных с использованием оборудования VSAT, за счет своевременного выявления факта СДВ в результате нарушения условий ЭМС по результатам выявления аномалий в демодулированном информационном трафике. Предлагается учесть особенности кодирования многоуровневых сигнальных конструкций на основе модуляции 16APSK и 32APSK, используемых в стандарте DVB-S2X. **Используемые методы:** при решении задачи выявления факта СДВ используется аналитический аппарат оценки помехоустойчивости приема по показателю заданной вероятности битовой ошибки в канале. При прогнозировании текущего соотношения ОСШ на входе приемных трактов использовались методики расчета энергетического потенциала спутниковых линий связи. Для оценки допустимого уровня помех, приводящего к нарушению работы радиолинии, использовались элементы теории радиоэлектронного подавления. **Новизна:** элементами новизны являются новые аналитические выражения, позволяющие оценить зависимость вероятности битовой ошибки в канале от отношения мощности помехи к мощности сигнала при заданном уровне ОСШ; выявление аномалий в демодулированном трафике с позиций оценки особенностей кодирования многоуровневых сигнально-кодовых конструкций; выявление условий, при которых в линиях спутниковой связи на основе VSAT возникает эффект СДВ при нарушении условий ЭМС. **Результат:** выявлена структура трафика демодулированного потока данных, позволяющая своевременно выявлять факт СДВ. Обоснованы и рассчитаны энергетические соотношения сигнала, шума и помех, при которых наступает нарушение (искажение) структуры передаваемой информации, без явных признаков СДВ, т.е. при сохранении функциональной работоспособности линии спутниковой связи с использованием оборудования VSAT, реализующего передачи на основе 16APSK и 32APSK стандарта DVB-S2X. **Практическая значимость:** обоснованы условия нарушений требований ЭМС, приводящие к искажению принимаемого информационного контента без явных признаков нарушения работы линии спутниковой связи, аналогичного эффекту, возникающему при СДВ. Представленные научно-технические решения предлагается реализовать в виде программно-аппаратных модулей в абонентских терминалах VSAT. Выявление признаков указанного эффекта позволит повысить своевременность принятия мер, направленных на повышения коэффициента исправной работы спутниковых линий связи.

Библиографическая ссылка на статью:

Жданова И. М., Дворников С. С., Дворников С. В. Модель и условия возникновения аномалий в демодулированном трафике абонентских терминалов VSAT // Системы управления, связи и безопасности. 2025. № 1. С. 105-130. DOI: 10.24412/2410-9916-2025-1-105-130

Reference for citation:

Zhdanova I.M., Dvornikov S. S., Dvornikov S. V Model and conditions of occurrence of anomalies in demodulated traffic of VSAT subscriber terminals. *Systems of Control, Communication and Security*, 2025, no. 1, pp. 105-130 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2025-1-105-130

Ключевые слова: системы спутниковой связи, модель, аномалии, оборудование VSAT, стандарт DVB-S2X, энергетический потенциал.

Актуальность

Развитие сегмента спутниковой связи обусловлено возможностью передачи информационного контента на большие расстояния посредством использования относительно недорогих абонентских терминалов малых размеров (VSAT – Very Small Aperture Terminal) [1-7]. В настоящее время VSAT активно используют для связи на удаленных территориях Восточной и Западной Сибири, а также с морскими судами [8-11]. Достаточно низкая стоимость эксплуатационного оборудования VSAT определяет доступность, организованной на его основе связи для широкого круга абонентов [12-13].

Следует отметить, что особая привлекательность VSAT связана с возможностью организации спутникового Internet [14-16], что делает такую технологию особенно привлекательной для пользователей, не имеющих возможность подключиться к региональным сетям. Именно поэтому по состоянию на 2023 г. в мире только официально было зафиксировано более 2,5 млн активных пользователей терминалов VSAT [15]. И если первоначально оборудование VSAT было ориентировано только на речевой контент, то современный пользователь в большей степени заинтересован в Internet услугах. В связи с этим в модемах спутниковой связи реализуют протоколы стандартов цифрового телевидения (DVB – Digital Video Broadcasting) [17-19]. Возможности такого оборудования VSAT достаточно подробно описаны в [20].

Существенным прорывом в передаче данных посредством спутниковой связи явился переход на технологии нового поколения протоколов DVB-S2X [21, 22], которые позволили не только увеличить пропускную способность сетей спутниковой связи, но и существенно снизить требования к уровню канальных шумов. В результате новая технология на основе стандарта DVB-S2X, обеспечила возможность организации устойчивой работы оборудования VSAT при значении отношения сигнал шум (ОСШ) в канале на уровне -10 дБ с вероятностью битовой ошибки порядка 10^{-5} [23].

Среди наиболее значимых технических решений, используемых в протоколах DVB-S2X, следует выделить технологию адаптивного кодирования и модуляции ACM (Adaptive Coding and Modulation), технологию переменного кодирования и модуляции VCM (Variable Coding and Modulation), а также режимы сегментации по времени [24].

Реализация указанных технических решений позволила значительно повысить достоверность передачи данных в каналах с нестабильными параметрами. Однако при этом, именно реализация технологий VCM, ACM и сегментации по времени, способствовали возможности создания негативного эффекта в виде непреднамеренного деструктивного воздействия, проявляющегося в возникновении аномального информационного трафика в приемных трактах оборудования VSAT при нарушении условий электромагнитной совместимости (ЭМС) размещения радиоэлектронной аппаратуры [25-27].

Целью статьи является анализ условий возникновения указанного эффекта и характер его проявления в демодулированном трафике терминалов VSAT.

Анализ технологий стандарта DVB-S2X, приводящих к возникновению аномального трафика

Стандарт DVB-S2X, как дополнение к существующему стандарту DVB-S2, был официально принят еще в марте 2014 г. С тех пор стандарт уверенно зарекомендовал себя на рынке коммерческого оборудования, что обеспечило ему широкую финансовую поддержку в дальнейшем продвижении заложенных в нем технологий [28].

Так, согласно [29], технологии стандарта DVB-S2X обеспечили повышение эффективности связи и качества передаваемого контента более чем на 50 % по отношению к предшествующей версии протоколов DVB-S2.

В основу технических процедур, заложенных в протоколах стандарта DVB-S2X, положены технологии, успешно зарекомендовавшие себя в стандартах серии DVB.

В первую очередь, к таковым следует отнести способы прямой коррекции ошибок FEC (Forward Error Correction) [30] и эффективное кодирование посредством применения кода с малой плотностью проверок на чётность LDPC (Low-Density Parity-Check).

Так совместное применение LDPC кодов с кодом БЧХ (BCH – Bose-Chaudhuri-Nocquenghem codes), используемого в качестве внешнего кода, обеспечивает высокую достоверность приема данных при достаточно низком уровне ОСШ 1 дБ [30, 31].

Реализация технических решений DVB-S2X позволила обеспечить дополнительное повышение помехоустойчивости приема до 10 %, 20 %, 25 % и 35 %, к уже обеспечиваемой помехозащите технологиями стандарта DVB-S2 [32, 33]. Наиболее значимым техническим решением, обеспечиваемым стандартом DVB-S2X, является реализация широкой номенклатуры выбора градаций, характеризующих сочетание скорости кодирования и вида модуляции.

В частности, в стандарт DVB-S2X дополнительно введены такие сигнально-кодовые конструкции (СКК) высоких порядков, как 64/128/256APSK (APSK – Amplitude and Phase-Shift Keying) [23].

Так, согласно ГОСТ Р 59807–2021 [33], в протоколах стандарта DVB-S2X только при формировании информационного FECFRAME (Forward Error Correction Frame) длительностью 64 800 битов предусмотрено 39 градаций совместного использования, а также скорости кодирования и вида модуляции. А также 18 различных сочетаний вида модуляции и скорости кодирования для передачи FECFRAME, содержащих служебную информацию, размером 16 200 битов [34].

Предложенный выбор технологий, обеспечивающих повышение помехоустойчивости приема, позволил реализовать устойчивую передачу данных на линиях спутниковой связи при уровне ОСШ в канале около –2,85 дБ, при выборе сочетания вида модуляции QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) и скорости

кодирования 2/9 (здесь и далее, сочетание вида модуляции и скорости кодирования определено как вид передачи, для рассмотренной ситуации – это передача QPSK 2/9).

В тоже время при наличии качественных каналов с уровнем ОСШ свыше 19,57 дБ, стандартом DVB-S2X предусмотрена высокоскоростной вид передачи – 256APSK 3/4. [35-37].

Как уже отмечалось, важной особенностью стандарта DVB-S2X является реализация подход на основе на технологии ACM. Такой подход позволил объединять совместно нескольких каналов на различных рабочих частотах [38], что обеспечило повышение эффективности совместной передачи в приложениях статистического мультиплексирования (DTH – Direct-To-Home) [39, 40]. При этом протоколы стандарта DVB-S2X позволяют объединять служебные и информационные фреймы с различными видами передач, по аналогии с DVB-T2, когда служебный фрейм с адресной частью и синхронизирующими последовательностями кодируются более помехоустойчивым кодом, чем остальной информационный контент. В результате служебные и информационные фреймы при одинаковой технической скорости передачи получают различный уровень помехозащиты [39, 41].

Следует отметить, что именно такая технология как раз и может привести к возникновению эффекта непреднамеренного деструктивного воздействия скрытого характера при нарушении условий ЭМС работы оборудования VSAT [27].

Это объясняется следующим. Различия в кодировании служебного и информационного фреймов в стандарте DVB-S2X используют для того, чтобы минимизировать задержки при передаче информационных данных. Учитывая, что информационные фреймы имеют достаточно большую длительность, а обычно возникающие в канале непреднамеренные помехи, например, обусловленные атмосферными явлениями, не продолжительны, то поражение части информации будет не столь критична, как потеря фрейма служебных данных.

Однако, именно различия в помехоустойчивости приема служебных и информационных фреймов не исключают ситуацию, когда уровень помехи такой, что обеспечит безошибочный прием служебного фрейма, но не позволит без ошибок демодулировать информационный фрейм. В результате, возникнет эффект, аналогичный скрытому деструктивному воздействию, при котором нет общих признаков нарушения связи, но при этом прием полезной информации происходит с ошибками, исключающими ее достоверное восприятие.

Такой эффект вполне возможен в результате нарушения условий ЭМС, обусловленных совместной работой оборудования VSAT и других излучающий радиоэлектронных средств, на ограниченной территории [42, 43].

Деструктивное воздействие в рассмотренной ситуации носит энергетический характер, поскольку помехи, возникающие в результате нарушения условий ЭМС, как правило, будут представлять собой сигналы, аналогичные по своей структуре сигналам оборудования VSAT. Следовательно, на демодулятор будут всегда поступать только излучения с максимально возможными значениями амплитуд при различных фазовых сдвигах несмотря на то, что СКК на ос-

нове модуляции APSK являются многоуровневыми (например, у сигнальных конструкций 16APSK два уровня амплитуд, а у 32APSK – три уровня, и т.д.) [35, 39]. При таком раскладе на выходе демодулятора будут проявляться только комбинации битов, соответствующих векторам сигнальных созвездий последнего уровня. То есть передаваемые данные будут демодулированы, но их структура и содержание будут искажены и недостоверны.

Поскольку формального нарушения работы радиолинии при таком деструктивном воздействии не происходит, то для неподготовленного пользователя сложно будет его идентифицировать.

Вместе с тем, можно выдвинуть гипотезу, согласно которой идентификацию факта такого деструктивного воздействия скрытного характера, не приводящего к разрушению данных служебного фрейма, можно выявить по частоте проявления битовых комбинаций [44], соответствующих кодировке векторов сигнальных созвездий на последнем уровне их фазовых диаграмм.

Такие периодически повторяющиеся комбинации битов, проявление которых в демодулированных последовательностях обусловлено скрытным характером деструктивного воздействия, не приводящего к энергетическому разрушению служебного фрейма [45], определим как аномалии информационного трафика [25], вызванные наличием помех на входе демодулятора.

Очевидно, что аномалии трафика будут уникальны для каждого вида модуляции, что позволяет их идентифицировать и своевременно принимать меры для исключения нарушения условий ЭМС, приводящих к их возникновению.

Таким образом, знание вида модуляции в канале позволяет по результатам анализа структуры аномалий трафика, проявляющегося в демодулированном потоке, вывить факт деструктивного воздействия скрытного характера, приводящего к разрушению только полезных передаваемых данных.

В качестве примера на рис. 1 показаны сигнальные созвездия QPSK, 8PSK, 16APSK и 32APSK, используемые в протоколах стандарта DVB-S2X [39].

Следует отметить, что фазовые диаграммы QPSK и 8PSK, представленные на рис. 1, имеют лишь один уровень сигнальных точек. Следовательно, в результате скрытного деструктивного воздействия в равной степени случайным образом будут проявляться все допустимые комбинации битов, что исключает возможность самого факта проявления аномалий.

Вместе с тем, сигнальное созвездие 16APSK имеет два уровня, следовательно, для передач на его основе, структуру аномалий будут определять следующие комбинации битов: 1010, 1000, 0000, 0100, 0101, 0001, 1001, 1011, 0011, 0111, 0110, 0010.

Для передач на основе модуляции 32APSK структура аномалий будет определяться комбинациями битов третьего уровня фазовых диаграмм.

Таковыми будут являться: 01101, 01001, 11001, 01000, 11000, 110010, 11010, 01010, 11011, 01111, 11111, 01110, 11110, 11100, 01100, 11101.

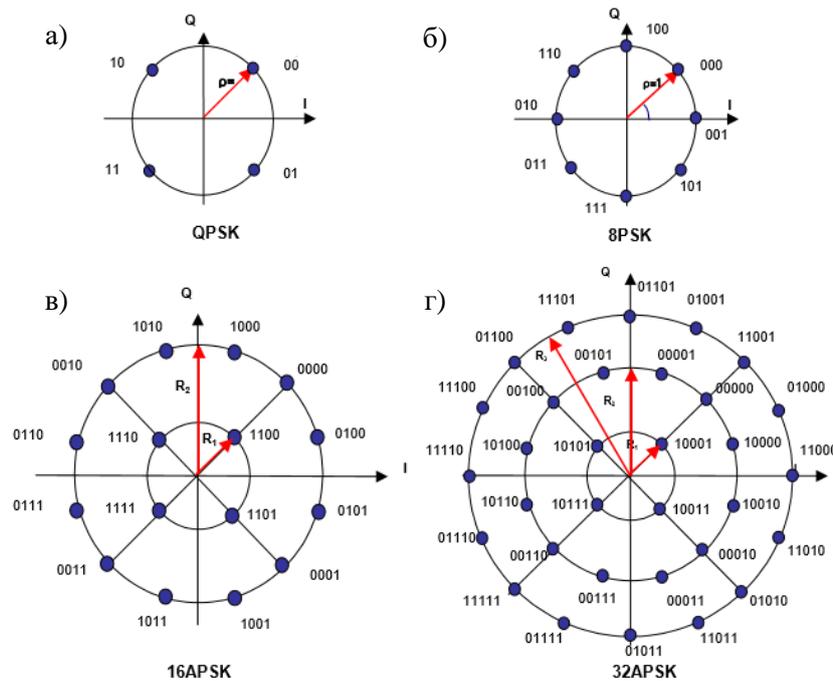


Рис. 1. Сигнальные созвездия стандарта DVB-S2X

Фазовые диаграммы передач на основе вида модуляции 64APSK имеют четыре амплитудных уровня. Поэтому структура аномалий, возникающих в передачах на основе сигналов 64APSK, будет определяться кодировкой сигнальных точек последнего уровня: 100010, 100011, 100001, 100000, 101000, 101001, 101011, 101010, 101110, 101111, 101101, 101100, 100100, 100101, 100111, 100110.

Следует отметить, что для сигнальных созвездий 128APSK и 256APSK не существует единой системы кодирования сигнальных точек фазовых диаграмм, поэтому для указанных видов модуляции структура возникающих аномалий будет определяться конкретным видом используемого протокола.

Для дальнейшего анализа условий, приводящих к возникновению аномалий, целесообразно рассмотреть энергетические соотношения в канал систем спутниковой связи, организованных на основе оборудования VSAT.

Оценка энергетического потенциала оборудования VSAT

Энергетический потенциал приемо-передающего оборудования VSAT определяется величиной излучаемой мощности, коэффициентом усиления антенн, чувствительностью приемного тракта и уровнем канальных шумов.

В общем случае, мощность канальных шумов зависит от полосы пропускания приемного тракта $\Delta f_{ш}$, суммарной шумовой температуры тракта приема $T_э$, постоянной величины Больцмана k и рассчитывается в соответствии с формулой [6]:

$$P_{ш} = kT_э \Delta f_{ш}, \quad (1)$$

где: $\Delta f_{ш}$ – шумовые полосы частот приёмных устройств; k – постоянная величина Больцмана $1,38 \cdot 10^{-23}$ [Дж/К]; $T_э$ – эффективная температура, характери-

зующая полную мощность шумов, воздействующих на вход приемного тракта (270 К или 24,3 дБК).

Для расчета значения T_{Σ} можно воспользоваться следующим выражением:

$$T_{\Sigma} = T_a \eta_{\text{пра}} + T_B + T_{\text{ш}}, \quad (2)$$

где: T_a – значение эквивалентной шумовой температуры приемной антенны; T_B – эквивалентная шумовая температура антенно-волноводного тракта; $\eta_{\text{пра}}$ – коэффициент полезного действия приемной антенны.

В свою очередь шумовая температура приемника $T_{\text{ш}}$ характеризуется уровнем внутренних шумов, пересчитанных ко входу, и определяется посредством коэффициента шума $n_{\text{ш}}$, который рассчитывается как:

$$T_{\text{ш}} = T_0 (n_{\text{ш}} - 1), \quad (3)$$

где: $T_0 = 290$ [К] – абсолютная температура среды, в которой работает приёмник VSAT.

Значение эквивалентной шумовой температуры антенны T_B определяется такими факторами, как угол места, уровень приема космических излучений, излучений атмосферы и излучений Земли. Кроме того, он зависит от уровня собственных шумов и коэффициента, учитывающего прием излучений по задним лепесткам. Величина T_B составляет около 15 К (11,8 дБ).

Таким образом, результирующий уровень спектральной плотности шума может достигать порядка $N_0 = -204,3$ дБВт/Гц.

Согласно норме 19-02 «Нормы на ширину полосы радиочастот и внеполосные излучения», значение шумовой полосы частот $\Delta f_{\text{ш}}$ зависит от вида модуляции, скорости передачи в канале, и для передач на основе амплитудно-фазовой манипуляции рассчитывается по формуле:

$$\Delta f_{\text{ш}} = (1,25 - 2)R, \quad (4)$$

где: R – информационная скорость передачи.

Тогда для скорости $R = 1$ Мбит/с, и наихудшего случая, получим $\Delta f_{\text{ш}} = 2$ МГц (63,0 дБГц). А для скорости $R = 8$ Мбит/с, соответственно, $\Delta f_{\text{ш}} = 16$ МГц (72,0 дБГц).

В итоге, суммарный уровень мощности шума в приемном тракте терминалов VSAT может достигать величины $P_{\text{ш}} = -139,3 \dots -134,3$ дБВт.

Далее полагая, что в соответствии с ГОСТ Р 59807-2021 оборудование VSAT, реализующее передачу данных по протоколам DVB-S2X, должно обеспечивать качества видеосервиса с высокой четкостью разрешения (HD – High Definition), посредством кодека MPEG-4 (MPEG – Moving Picture Experts Group) со средней требуемой скоростью передачи 8 Мбит/с. А также потоком более низкого качества со скоростью 1 Мбит/с, то учитывая спектральную плотность наиболее помехоустойчивой передачи QPSK 2/9, равную $\gamma = 0,434841$, и наименее помехоустойчивой передачи 256APSK 3/4 равную $\gamma = 5,900855$ [33], для расчета потребной полосы пропускания воспользуемся нормами 19-02 «Нормы на ширину полосы радиочастот и внеполосные излучения», утвержденными и введенными в действие с 01.06.2003 г. решением Государственной комиссии по радиочастотам от 28.10.2002 г.

В соответствии с указанными нормами, для модуляции QPSK, формируемой методом квадратурного синтеза, а также многопозиционных видов модуляции, в том числе многопозиционных сигналов PSK и APSK, необходимая полоса частот передающего тракта может быть рассчитанной по формуле:

$$\Delta f_{cQPSK} = K_R R / \log_2 S, \quad (5)$$

где: R – информационная скорость передачи; S – число позиций модуляционного кода; K_R – коэффициент избыточности кодирования при исправлении ошибок.

В таблице 1 представлены результаты расчета необходимой полосы частот передающего тракта для различных видов модуляции.

Таблица 1 – Значения величины необходимой полосы частот передающего тракта Δf_c

Вид модуляции и скорость кодирования	Информационная скорость передачи R	Число позиций модуляционного кода S	Коэффициент избыточности кодирования при исправлении ошибок K_R	Потребная полоса частот передающего тракта Δf_c
QPSK 2/9	8	4	9/2	18,0 МГц (73 дБГц)
	1	4	9/2	2,25 МГц (64 дБГц)
8PSK 5/9	8	8	9/5	4,8 МГц (67 дБГц)
	1	8	9/5	0,6 МГц (58 дБГц)
16APSK 1/2	8	16	2/1	4,0 МГц (66 дБГц)
	1	16	2/1	0,5 МГц (57 дБГц).
32APSK 2/3	8	32	3/2	2,4 МГц (64 дБГц)
	1	32	3/2	0,4 МГц (56 дБГц)
64APSK 32/45	8	64	45/32	1,87 МГц (63 дБГц)
	1	64	45/32	0,23 МГц (54 дБГц)
128APSK 3/4	8	64	4/3	1,52 МГц (62 дБГц)
	1	64	4/3	0,19 МГц (53 дБГц)
256APSK 29/45	8	64	45/29	1,55 МГц (62 дБГц)
	1	64	45/29	0,19 МГц (53 дБГц)

На практике в цифровых модемах достаточно часто используют формирующие фильтры для сглаживания формы информационных импульсов, среди которых наибольшее распространение получил фильтр, АЧХ которого аппроксимируется функцией «корень из приподнятого косинуса». Такой подход обеспечивает дополнительное сужение потребной для передачи сигналов полосы частот. Расчетные значения коэффициента спада $K(\alpha)$ для различных значений коэффициента α (показатель скругления), в соответствии с нормами 19-02 «Нормы...», представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения величины коэффициента спада $K(\alpha)$ для различных α

α	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$K(\alpha)$	0,51	0,537	0,6	0,669	0,742	0,816

В соответствии с данными таблицы 2, ГОСТ допускает сужение полосы частот почти в 2 раза. Очевидно, что такое решение оправдано в радиорелейных линиях связи, характеризующихся высоким энергетическим потенциалом канала. Для линий спутников радиосвязи выбор значения α более чем 0,8 не целесообразно, так как согласно [24], уменьшение параметра α ведет к увеличению пик-фактора для амплитудно-фазовых сигнальных конструкций, что негативно сказывается на снижении энергетического потенциала радиолиний.

В частности, в таблице 3 приведена величина пик-фактора сигнала Π , в зависимости от параметра α [46].

Таблица 3 – Величины пик-фактора Π от коэффициента скругления α

α	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Π , дБ	6,5	5,6	3,5	2,6	1,8	0

Помимо величины пик-фактора, вносимой коэффициентом α , амплитудно-фазовые сигнальные конструкции 16APSK, 32APSK, 64APSK, 128APSK, 256APSK, характеризуются своим значением Π , поэтому целесообразно оценить результирующий пик-фактор, присущий тому или иному виду передачи.

Так, в таблице 4 представлены значения пик-фактора исследуемых видов передач при различных величинах показателя α , полученных по результатам проведенного моделирования.

Результаты, представленные в таблицах 3 и 4 указывают на существенную зависимость сигнально-кодовой конструкции от значения коэффициента скругления. При этом следует понимать, что протоколы стандарта DVB-S2X являются общими для систем спутниковой связи, среди которых оборудование VSAT занимает лишь незначительное место.

С учетом полученных расчетов можно полагать, что для модемов VSAT, выбор параметра сглаживания менее чем $\alpha = 0,8$ нецелесообразно, что подтверждается анализом работ по этой тематике [14-16, 20, 21, 32]. Вместе с тем даже для значения $\alpha = 0,8$ коэффициент спада АЧХ фильтра составит

$K(\alpha) = 0,75$. В этом случае потребное для передачи значение полосы частот уменьшается в 1,25 раз, т.е. примерное снижение составит 1 дБГц.

Таблица 4 – Зависимость результирующей величины пик-фактора [дБ] для различных сигнально-кодовых конструкций

α	16APSK 1/2	32APSK 2/3	64APSK 32/45	128APSK 3/4	256APSK 29/45
0,1	6,9	8,4	10,3	12,5	14,7
0,2	6,2	7,8	9,9	11,8	13,9
0,4	4,3	5,7	7,5	9,7	11,7
0,6	3,6	5,1	7,0	8,9	11,0
0,8	2,8	4,2	6,3	8,3	10,4

С учетом полученного уточнения, в таблице 5 представлены расчетные значения потребной полосы канала на линиях спутниковой связи, организованных на основе VSAT, для скорости передачи данных $R_1 = 8$ Мбит/с и $R_2 = 1$ Мбит/с.

Таблица 5 – Значения потребной полосы частот, пересчитанное в [дБГц]

Скорость передачи	СКК						
	QPSK 2/9	8PSK 5/9	16APSK 1/2	32APSK 2/3	64APSK 32/45	128APSK 3/4	256APSK 29/45
R_1 , дБГц	72	66	65	63	62	62	61
R_2 , дБГц	63	57	56	55	53	52	52

Поскольку в радиолиниях VSAT реализуется нерегенеративная ретрансляция сигналов [16], то при проведении энергетических расчетов на практике, как правило, используют научно-методический аппарат, основанный на учете пространственного распространения радиоволн [40].

Тогда для участка радиолинии спутник-ретранслятор (СР) абонентский терминал (АТ), расчет мощности сигнала на входе приемника производят согласно следующего выражения:

$$P_{\text{ПРМ}} = \frac{P_{\text{ПРД}} G_{\text{ПРД}} G_{\text{ПРМ}} \eta_{\text{ПРД}} \eta_{\text{ПРМ}} \lambda^2}{16\pi^2 d^2 a_{\text{доп}}} b_{\text{АТ-СР}}, \quad (6)$$

где: d – наклонная дальность (расстояние между антеннами передатчика (ПРД) и приемника (ПРМ)); $a_{\text{доп}}$ – дополнительные потери в трактах передачи и обработки (3-8 дБ); $P_{\text{ПРД}}$ – эффективная мощность на выходе ПРД; λ – длина волны; $G_{\text{ПРМ}}$, $G_{\text{ПРД}}$ – коэффициент усиления приемной и передающей антенны относительно изотропного излучателя; $\eta_{\text{ПРМ}}$, $\eta_{\text{ПРД}}$ – коэффициент передачи (по мощности) волноводного тракта (КПД тракта), соответственно ПРМ и ПРД; $b_{\text{АТ-СР}}$ и $b_{\text{СР-АТ}}$ – заданные превышения ОСШ.

При этом значения $b_{\text{АТ-СР}}$ и $b_{\text{СР-АТ}}$ связаны между собой соотношением:

$$b_{\text{СР-АТ}} = \frac{b_{\text{АТ-СР}}}{(b_{\text{АТ-СР}} - 1)}, b_{\text{АТ-СР}} = \frac{b_{\text{СР-АТ}}}{(b_{\text{СР-АТ}} - 1)} \quad (7)$$

Для расчета значений $b_{\text{АТ-СР}}$ и $b_{\text{СР-АТ}}$ необходимо задать превышение ОСШ на участке СР-АТ, равным 1 дБ ($b_{\text{СР-АТ}} = 1,25$ раза). Тогда необходимое превышение на участке АТ-СР должно составлять 7 дБ ($b_{\text{АТ-СР}} = 5$ раз).

Согласно [47], к оборудованию VSAT принято относить абонентские терминалы с антеннами диаметром до 2,5 м.

В настоящее время в С-диапазоне типовые размеры антенн терминалов VSAT составляют порядка 1,8-2,4 м. В Ku-диапазоне их размер лежит в пределах от 0,9 до 1,8 м. А в Ka-диапазоне размер антенн варьируется от 1 м до 1,2 м. При этом в недорогих версиях оборудования VSAT размеры антенн могут быть уменьшены до 0,75 м [48].

Мощность зарубежных пользовательских терминалов VSAT может достигать 5-20 Вт. В РФ оборудованию класса VSAT относят терминалы с антенной не более 2,4 м при мощности излучения передатчика до 2 Вт, что согласуется с требованиями МСЭ-R S.725, S.729. При таком комплексировании эквивалентная изотропная излучаемая мощность (ЭИИМ) АТ VSAT не превысит 50 дБВт [47].

Далее, полагая, например, высоту геостационарной орбиты СК $H = 35786$ км, при среднем значении радиуса Земли $r_3 = 6371$ км, наклонная дальность d для абонентов Европейской зоны России будет составлять порядка $d = 37...9$ тыс. км. Тогда значение мощности сигнала в канале приема VSAT будет обеспечено на уровне $P_{\text{ПРМ}} = -126,2...-121,0$ дБВт, что подтверждается результатами, представленными в [6].

С учетом суммарного уровня мощности шума на входе приемного тракта $P_{\text{ш}} = -139,3...-134,3$ дБВт, результирующее значение ОСШ на входе демодуляторов оборудования VSAT может достигать $h^2 = 13,3...13,1$ дБВт.

Это позволяет определить виды передач из набора, представленного в протоколах стандарта DVB-S2X, которые могут быть использованы в АТ VSAT.

Обоснование видов передач стандарта DVB-S2X, используемых в сетях VSAT

Полученные расчетные значения ОСШ позволяют определиться с выбором тех видов передач из предоставляемых стандартом DVB-S2X, которые позволят с требуемой достоверностью обеспечить устойчивую работу спутниковой линии радиосвязи. Поскольку предварительный анализ показал, что при модуляции QPSK и 8PSK возникающие аномалии сложно идентифицировать, то в дальнейшем исследовании рассмотрим лишь сигналы амплитудно-фазовой манипуляции.

В таблице 6 представлены значения ОСШ, при которых рассматриваемые виды передач по стандарту DVB-S2X [33] обеспечивают квазибезошибочный прием [49] с вероятностью битовой ошибки $p_b = 10^{-5}$ при приеме информационного фрейма из 64 800 бит.

Таблица 6 – Допустимое значение ОСШ в канале приема различных видов передач информационного фрейма

Скорость кода	СКК					
	16APSK 1/2	16APSK 77/99	32APSK 2/3	32APSK 7/9	64APSK 32/45	64APSK 5/6
h^2 , дБ	5,97	11,99	11,1	13,05	13,98	16,55

А в таблице 7 представлены значения ОСШ, обеспечивают квазибезошибочный прием с вероятностью битовой ошибки $p_b = 10^{-5}$ при приеме фрейма служебной информации, объемом 16 200 бит.

Таблица 7 – Допустимое значение ОСШ в канале приема различных видов передач служебного фрейма

Скорость кода	СКК			
	16APSK 7/15	16APSK 32/45	32APSK 2/3	32APSK 32/45
h^2 , дБ	5,99	9,45	11,41	12,18

Согласно данным таблиц 5 и 6, обеспечиваемые значения ОСШ на входе терминалов VSAT позволяют использовать лишь СКК с такими видами модуляции как 16APSK и 32APSK для информационных фреймов.

Для оценки энергетического потенциала радиолинии, использующих для передачи данных сигналы модуляции 16APSK и 32APSK, проанализируем зависимости их вероятностей битовой ошибки от ОСШ.

Вероятность битовой ошибки для сигналов 16APSK [35]:

$$p_{16APSK} \approx \frac{1}{4} \Phi \left(\sqrt{\frac{b^2 - b + 1}{2a_0}} h^2 \right) + \frac{1}{4} \Phi \left(\sqrt{\frac{(b-1)^2}{2a_0}} h^2 \right) + \frac{1}{8} \Phi \left(\sqrt{\frac{1}{a_0}} h^2 \right) + \frac{3}{8} \Phi \left(\sqrt{\frac{2b^2 \sin^2(\pi/12)}{a_0}} h^2 \right), \quad (8)$$

где $b = R_2/R_1$ – коэффициент, определяющий соотношение внешнего R_2 и внутреннего R_1 радиусов сигнального созвездия 16APSK (рис. 1); Φ – гауссов интеграл ошибок; a_0 – коэффициент пропорциональности 16APSK.

$$a_0 = 0,25(1 + 3b^2). \quad (9)$$

Вероятность битовой ошибки для сигналов 32APSK [35]:

$$p_{32APSK} \approx \frac{1}{2} \Phi \left(\sqrt{\frac{c^2 - c + 1}{2a_1}} h^2 \right) + \frac{1}{4} \Phi \left(\sqrt{\frac{(c-1)^2}{2a_1}} h^2 \right) + \frac{1}{4} \Phi \left(\sqrt{\frac{1}{a_1}} h^2 \right) + \frac{3}{4} \Phi \left(\sqrt{\frac{2c^2 \sin^2(\pi/12)}{a_1}} h^2 \right) +$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1}{2} \Phi \left(\sqrt{\frac{c^2 + e^2 - 2ce \cos(\pi / 24)}{2a_1}} h^2 \right) + \frac{1}{4} \Phi \left(\sqrt{\frac{(e - b)^2}{2a_1}} h^2 \right) + \\
 & + \frac{1}{2} \Phi \left(\sqrt{\frac{c^2 + e^2 - 2ce \sin(\pi / 12)}{2a_1}} h^2 \right) + \Phi \left(\sqrt{\frac{e^2(1 - \cos(\pi / 8))}{a_1}} h^2 \right),
 \end{aligned} \tag{10}$$

где $c = R_2/R_1$ и $e = R_2/R_1$ – коэффициенты, определяющие соотношение внешнего R_3 , среднего R_2 и внутреннего радиуса R_1 сигнального созвездия 32APSK (рис. 1); a_1 – коэффициент пропорциональности 32APSK.

$$a_1 = 0,125(1 + 3c^2 + 4e^2). \tag{11}$$

Далее, будем полагать, что в спутниковой радиолинии используют самые высокоскоростные передачи для информационных данных и самые помехозащищенные – для служебных фреймов.

Тогда, в соответствии с предположениями используя выражение (8) и данные таблиц 5 и 6, построим графики зависимости вероятности битовой ошибки от ОСШ для различных видов передач на основе сигналов 16APSK, при $b = 2,57$, используемых для передачи служебных и информационных фреймов, рис. 2.

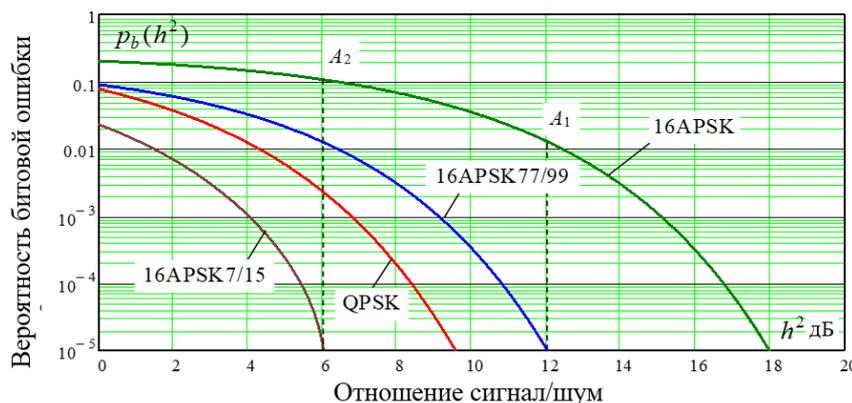


Рис. 2. График зависимости вероятности битовой ошибки от ОСШ для передач на основе сигнала 16APSK

Анализ графиков, представленных на рис. 2 показывает, что взаимная помехоустойчивость СКК 16APSK со скоростью кода 7/15 и СКК 16APSK со скоростью кода 77/99 вариативна в зависимости от требований к вероятности битовой ошибки. И в наиболее неблагоприятных условиях приема для СКК 16APSK со скоростью кода 77/99 при ОСШ 12 дБ (точка A_1 на рис. 2), различия по отношению к аналогичной передаче без помехоустойчивого кодирования различия в значении вероятности битовой ошибки составляют 10^{-3} .

Вместе с тем при ОСШ 6 дБ (точка A_2 на рис. 2), что соответствует допустимому значению для СКК 16APSK со скоростью кода 7/15, различия по отношению к СКК 16APSK со скоростью кода 77/99 при том же уровне зашумленности канала в значении вероятности ошибки достигают более 4-х порядков.

При этом разница в помехоустойчивости приема для СКК 16APSK со скоростью кода 7/15, по отношению к СКК 16APSK со скоростью кода 77/99 составляют 6 дБ, что открывает широкие возможности для нанесения скрытного деструктивного воздействия при нарушении условий ЭМС.

На рис. 3 показан график зависимости вероятности битовой ошибки от ОСШ для СКК на основе сигналов 32APSK, при значениях $c = 2,53$ и $e = 4,30$, см. рис. 1.

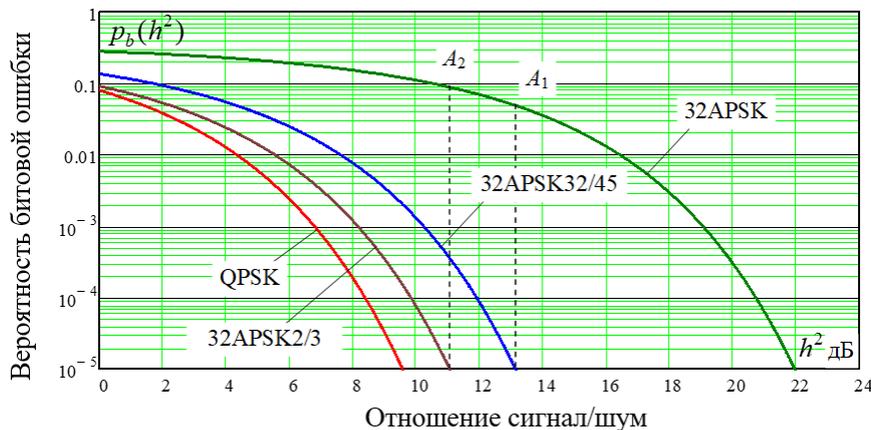


Рис. 3. График зависимости вероятности битовой ошибки от ОСШ для передач на основе сигнала 32APSK

На рис. 2 и 3 дополнительно представлены графики помехоустойчивости приема сигналов QPSK при кодировании кодом Грея.

Для передач на основе СКК 32APSK различия в помехоустойчивости приема для различного типа кодирования не столь значимые. Пределы в помехоустойчивости составляют всего лишь в 2 дБ. При этом в наиболее сложных условиях для СКК 32APSK со скоростью кода 32/45 различия в значении вероятности битовой ошибки по отношению к передаче без кодирования составляют $5 \cdot 10^{-4}$ (точка A_1 на рис. 3). А для СКК 32APSK со скоростью кода 2/3 указанные различия достигают величины $4 \cdot 10^{-2}$ (точка A_2 на рис. 3).

В интересах оценки энергетического потенциала деструктивного воздействия, приводящего к возникновению аномалий, перепишем выражения (8) и (10) к виду:

$$P_{16APSK} \approx \frac{1}{4} \Phi \left(\sqrt{\frac{b^2 - b + 1}{2a_0} \frac{h^2}{1 + h^2 h^2}} \right) + \frac{1}{4} \Phi \left(\sqrt{\frac{(b-1)^2 + 1}{2a_0} \frac{h^2}{1 + h^2 h^2}} \right) + \frac{1}{8} \Phi \left(\sqrt{\frac{1}{a_0} \frac{h^2}{1 + h^2 h^2}} \right) + \frac{3}{8} \Phi \left(\sqrt{\frac{2b^2 \sin^2(\pi/12)}{a_0} \frac{h^2}{1 + h^2 h^2}} \right). \quad (12)$$

Здесь и далее $h^2 = P_n / P_c$ есть величина, характеризующая отношение помеха/сигнал (ОПС) на входе приемного устройства.

$$\begin{aligned}
 p_{32\text{APSK}} \approx & \frac{1}{2} \Phi \left(\sqrt{\frac{c^2 - c + 1}{2a_1} \frac{h^2}{1 + h^2 \hbar^2}} \right) + \frac{1}{4} \Phi \left(\sqrt{\frac{(c-1)^2}{2a_1} \frac{h^2}{1 + h^2 \hbar^2}} \right) + \\
 & + \frac{1}{4} \Phi \left(\sqrt{\frac{1}{a_1} \frac{h^2}{1 + h^2 \hbar^2}} \right) + \frac{3}{4} \Phi \left(\sqrt{\frac{2c^2 \sin^2(\pi/12)}{a_1} \frac{h^2}{1 + h^2 \hbar^2}} \right) + \\
 & + \frac{1}{2} \Phi \left(\sqrt{\frac{c^2 + e^2 - 2ce \cos(\pi/24)}{2a_1} \frac{h^2}{1 + h^2 \hbar^2}} \right) + \\
 & + \frac{1}{4} \Phi \left(\sqrt{\frac{(e-b)^2}{2a_1} \frac{h^2}{1 + h^2 \hbar^2}} \right) + \Phi \left(\sqrt{\frac{e^2(1 - \cos(\pi/8))}{a_1} \frac{h^2}{1 + h^2 \hbar^2}} \right) + \\
 & + \frac{1}{2} \Phi \left(\sqrt{\frac{c^2 + e^2 - 2ce \sin(\pi/12)}{2a_1} \frac{h^2}{1 + h^2 \hbar^2}} \right)
 \end{aligned} \tag{13}$$

Полученные выражения позволяют построить графические зависимости вероятности битовой ошибки от ОПС при предельно допустимых значениях ОСШ в канале в соответствии с таблицами 5 и 6.

Так, на рис. 4 показан график зависимости вероятности битовой ошибки в канале от ОПС на входе приемного терминала VSAT для передач на основе сигналов 16APSK.

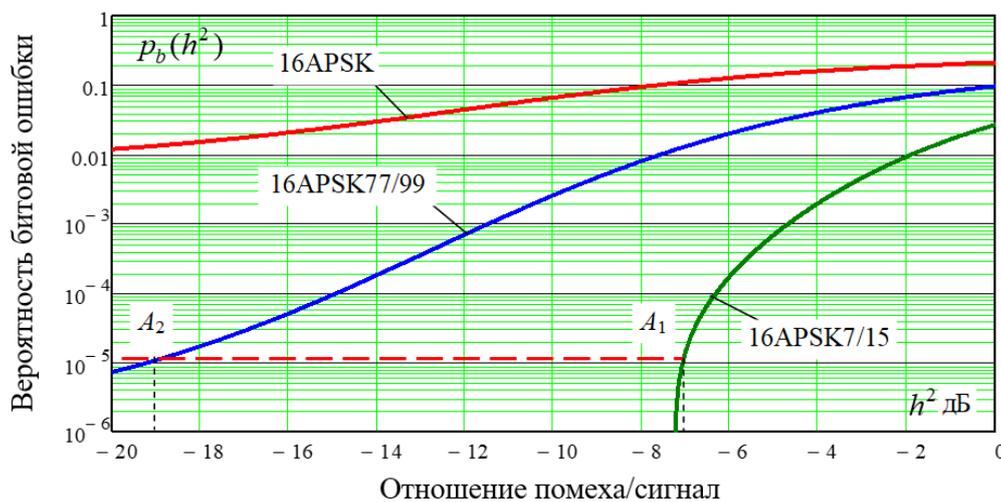


Рис. 4. График зависимости вероятности битовой ошибки в зависимости от ОПС для передач на основе сигнала 16APSK

Графики, представленные на рис. 4 получены при ОСШ в канале 13 дБ, что позволяет оценить текущее соотношение ОПС, при котором качество связи в канале не снизится ниже вероятности битовой ошибки $p_b = 10^{-5}$ (на рис. 4 заданный уровень достоверности приема показан пунктиром).

Точками A_1 и A_2 , соответственно, указаны допустимые значения ОПС для СКК 16APSK со скоростью кода 7/15 и 16APSK со скоростью кода 77/99.

Так, в точке A_1 ОПС $\bar{h}^2 = -7$ дБ (т.е. мощность помехи $P_{\text{п}}$ составляет 0,2 от мощности сигнала $P_{\text{с}}$). В точке A_2 ОПС $\bar{h}^2 = -19$ дБ (т.е. мощность помехи $P_{\text{п}}$ составляет всего 0,013 от мощности сигнала $P_{\text{с}}$).

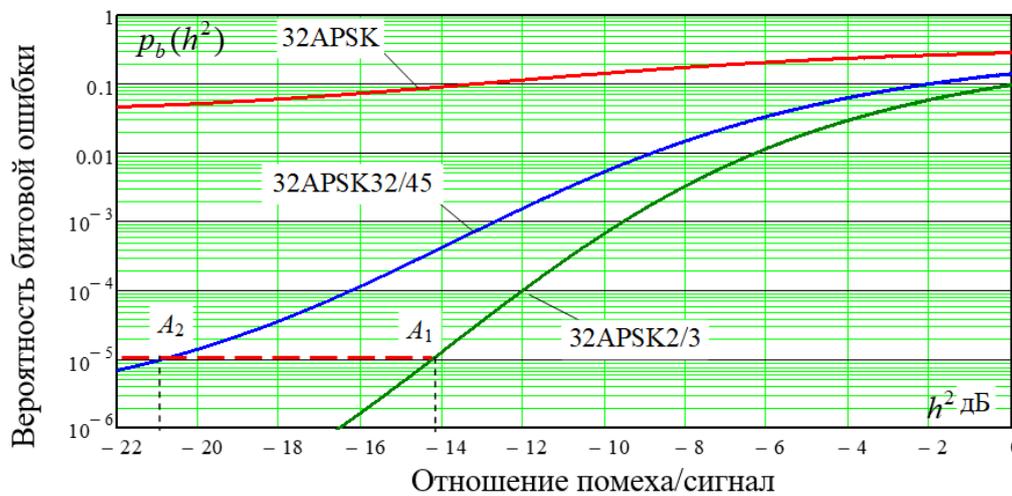


Рисунок 5. График вероятности битовой ошибки в зависимости от ОПС для передач на основе сигнала 32APSK

Графики, представленные на рис. 5 получены при ОСШ в канале 14 дБ. На графиках пунктирная линия соответствует уровню вероятности битовой ошибки $p_b = 10^{-5}$ (на рис. 5 уровень достоверности приема показан пунктиром). Точками A_1 и A_2 , соответственно, указаны допустимые значения ОПС для СКК 32APSK со скоростью кода 2/3 и 16APSK со скоростью кода 32/45.

Так, в точке A_1 ОПС $\bar{h}^2 = -14$ дБ (т.е. уровень мощности помехи $P_{\text{п}}$ составляет всего 3% от уровня мощности сигнала $P_{\text{с}}$). В точке A_2 ОПС $\bar{h}^2 = -19$ дБ (т.е. мощность помехи $P_{\text{п}}$ составляет всего 0,008 от мощности сигнала $P_{\text{с}}$).

Выводы

Полученные результаты позволяют сделать следующий вывод. В результате нарушения условий ЭМС при работе радиолиний спутниковой связи с оборудованием VSAT на ограниченной территории возможно проявление эффекта скрытого характера деструктивного воздействия. Такой эффект будет проявляться в том, что при сохранении общей работоспособности оборудования на радиолинии VSAT, принимаемая информация будет искажена.

Эффект будет наблюдаться для режима работы передачи данных на основе сигналов 16APSK при условии, что мощность мешающего сигнала, выступающего как помеха, будет составлять от 1,3 % до 20 % от мощности полезного сигнала на входе приемного тракта VSAT.

Характерным признаком возникновения указанного эффекта является возникновение аномалий в демодулированном трафике, в структуре которого будут наблюдаться битовые комбинации, соответствующие кодированию внешних точек сигнального созвездия 16APSK (см. рис. 1). Но учитывая, что на внешнем диаметре созвездия отображается 12 комбинаций сигнальных точек, а

на внутреннем всего четыре. То в качестве признака наличия аномалий в трафике целесообразно рассматривать отсутствие следующих комбинаций битов: 1110, 1100, 1101, 1111.

Рассмотренный эффект может возникать и при передаче данных с использованием сигналов 32APSK. Но, учитывая, что условием его возникновения является необходимость соответствия уровня мощности помехи в пределах от 0,8% до 3% от уровня мощности полезного сигнала, то вероятность наступления такого исхода достаточно мала. Однако, такой эффект может быть вызван при преднамеренном подавлении линий спутниковой радиосвязи на основе VSAT.

В качестве признака скрытого характера деструктивного воздействия в этом случае также выступают аномалии трафика, которые можно выявить по отсутствию демодулированных комбинаций, соответствующих внутреннему диаметру сигнального созвездия: 10001, 10011, 10111, 10101.

Дальнейшее исследование авторы связывают с решением задач автоматического выявления аномалий в демодулированном трафике на основе методов машинного обучения, используя за основу результаты, полученные в [50-54].

Литература

1. VSAT services // Data Communications. 1994. Vol. 23. No 15. P. 205.
2. VSAT for Russia // Data Communications. 1995. Vol. 24. No 15. P. 48.
3. Cosper A. C., Gifford J. M. VSAT holdouts: Come out, we've got you surrounded // Satellite Communications. 1997. Vol. 21. No 8. P. 26-28.
4. Бессарабский А. Ю. Услуги на базе сетей VSAT // Технологии и средства связи. 2007. № 4. С. 87-88.
5. Типугина В. Зачем оператору VSAT нужен DVB-S2 с АКМ? // Технологии и средства связи. 2008. № 3. С. 71.
6. Дворников С. В., Селиванов С. В., Дворников С. С., Ибрагимов А. Р., Энергетическая защищенность линий радиосвязи абонентских терминалов VSAT // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2024. № 2. С. 56-61.
7. Благов В. В. Российский VSAT для нужд государственных // Электросвязь. 2009. № 6. С. 54-55.
8. Луценко А. Е. Развитие спутниковых сетей VSAT в Сибири: опыт ОАО "КБ "Искра" // Электросвязь. 2007. № 9. С. 16-20.
9. Шестаков М. Ш. Корабельные станции спутниковой связи SHARK-K // Технологии и средства связи. 2018. № 1. С. 47.
10. Якушенко С. А., Дворников С. В. Обоснование требований к показателю доступности глобальной навигационной спутниковой системе для потребителей бассейнов внутренних водных путей // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Т. 18. № 4. С. 22-29. doi: 10.36724/2072-8735-2024-18-4-22-29.
11. Демченко А. В. Технологии VSAT - для обеспечения связи в условиях Русского // Электросвязь. 2017. № 11. С. 82-83.

12. Станет ли VSAT общедоступной технологией? // Первая миля. 2014. № 6 (45). С. 32-33.
13. Аничкин С. Перспективы развития VSAT-сетей "Ростелекома" // Технологии и средства связи. 2012. № 6-2 (93). С. 48-49.
14. Atmaka E. W., Respati Ja., Wisnu H. A., Luthfia L. Comparison of Usage between Voice Switching Communication System (Vscs) Direct Speech (Ds) Vsat (Very Small Aperture Terminal) System and Voip (Voice Over Internet Protocol) // Indonesian Journal of Interdisciplinary Research in Science and Technology. 2024. Vol. 2. No. 3. P. 349-358. doi: 10.55927/marcopolo.v2i3.8493.
15. Akhyar Lubis, Rio Septian Hardinata, Muhammad Seger. Based internet network design VSAT Ku-Band at Jangga Dolok village office // The International Conference on Education, Social Sciences and Technology (ICESST). 2022. Vol. 1. No 1. P. 113-122. doi: 10.55606/icesst.v1i1.214.
16. Макаренко С. И. Описательная модель системы спутниковой связи Inmarsat // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 4. С. 64-91. doi: 10.24411/2410-9916-2018-10404.
17. Кислов К. В. Связь и информационный обмен на морском транспорте // Вестник Морского государственного университета им. Адмирала Г.И. Невельского. 2013. № 58. С. 24-28.
18. Смоленцев С. В., Шахнов С. Ф., Буцанец А. А. Сетевые аспекты передачи данных из морского автономного надводного судна в центр дистанционного управления и обратно // Электронные информационные системы. 2024. № 1 (40). С. 5-18.
19. Дворников С. В. Цифровой синтез спектрально-эффективных сигналов телевидения // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2015. № 6. С. 168-173.
20. Быховский М. А. Анализ международного стандарта DVB-S2, определяющего параметры современных систем спутниковой связи // Цифровая обработка сигналов. 2020. № 1. С. 18-25.
21. Диптан П. А., Гринев Е. М. О функционировании спутникового канала связи с замираниями по протоколу DVB-S2X // Актуальные вопросы развития систем и сетей связи: Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции, Ставрополь, 10–20 ноября 2023 года. – Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2023. – С. 177-180.
22. Захаров А. А., Лаврентьев М. В., Волгаткин К. М. Реализация технологии коммутации лучей в рамках стандарта DVB-S2X Annex E для VSAT-сетей нового поколения // Электросвязь. 2022. № 8. С. 18-24. doi: 10.34832/ELSV2022.33.8.002.
23. Куликов Г. В., Ханг Д. С., Стариковский А. И. Помехоустойчивость приема сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией на фоне частотно-манипулированной помехи // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2022. № 4. С. 44-51.
24. Jie He., Lei Sh., Wei Q. Research and Implementation of the Transmission Efficiency of LEO Remote Sensing Satellite Based on Variable Coding Modulation // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2289. No 1. P. 012005. doi:10.1088/1742-6596/2289/1/012005.

25. Жданова И. М., Дворников С. С., Дворников С. В. Обнаружение аномалий трафика на основе обработки их фреймовых вейвлет-преобразований. // Труды учебных заведений связи. 2024. № 10 (5). С. 14-23.

26. Васильева Д. В., Дворников С. С., Толстуха Ю. Е. Формирование векторов признаков для систем видеонаблюдения // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2023. № 4. С. 62-68.

27. Харитонов Н. И., Ермилов В. Т., Масайлов Г. И. Оценка ЭМС VSAT и радиорелейных станций прямой видимости в Ku-диапазоне // Электросвязь. 2010. № 5. С. 25-29.

28. Коломенский К. Ю., Демидова А. Ю., Казаринов А. С. От DVB-S к DVB-S2X: прогресс в стандартизации систем цифрового спутникового вещания // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27. № 2. С. 68-78. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-2-68-78.

29. Newtec M6100 Broadcast Satellite Modulator (R2.6). Rev.1 02/2015.

30. Вдовин С. Алгоритмы прямой коррекции ошибок и особенности их применения. Турбокод // Компоненты и технологии. 2016. № 11 (184). С. 76-79.

31. Дворников С. В., Устинов А. А., Дворников С. С., Ишин Д. М. Анализ эффективности блоковых кодов // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2011. № 1. С. 63-73.

32. Белов А. С., Алдошин А. И., Абакумова А. Ю. Отечественные модемы земных станций спутниковой связи // Электросвязь. 2020. № 1. С. 27-36. doi: 10.34832/ELSV.2020.2.1.004.

33. ГОСТ Р 59807–2021 Телевидение вещательное цифровое. Приемник-декодер расширенной системы второго поколения спутникового вещания (DVB-S2X). Основные параметры. – М.: Российский институт стандартизации. 2021. – 15 с.

34. ETSI EN 302 307 V1.2.1 (2009-08). 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). 650 Route des Lucioles F-06921 Sophia Antipolis Cedex – FRANCE.

35. Новосадов К. С. Анализ спектрально эффективных схем модуляции, применяемых в высокоскоростных системах радиосвязи // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2021. Т. 9. № 1 (32). doi: 10.26102/2310-6018/2021.32.1.008.

36. Дворников С. В., Овчинников Г. Р., Балыков А. А. Программный симулятор ионосферного радиоканала декаметрового диапазона // Информация и космос. 2019. № 3. С. 6-12.

37. Бондаренко В. Н., Луферчик А. В., Овчинников Н. Н. Анализ влияния фазового шума гетеродина на помехоустойчивость приема сигналов с амплитудно-фазовой модуляцией // Успехи современной радиоэлектроники. 2023. Т. 77. № 12. С. 124-130. doi: 10.18127/j20700784-202312-15.

38. Дворников С. В., Жеглов К. Д., Дворников С. С. Проактивный контроль пригодности радиоканалов в режиме ППРЧ // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16. № 11. С. 15-20. doi: 10.36724/2072-8735-2022-16-11-15-20.

39. ETSI EN 302 307-2: "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 (DVBS2X)".

40. Дворников С. В. Упрощенное представление модели Nata для расчета затухания сигнала на открытых трассах // Информация и космос. 2017. № 3. С. 6-10.

41. Бестугин А. Р., Дворников С. В., Крячко А. Ф. Исследование субканальных шумов сигналов, сформированных по технологии ортогонального частотного мультиплексирования // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2018. № 3. С. 123-129.

42. Скрынников В. Г., Пальцин Д. А., Девяткин Е. Е. Особенности оценки условий ЭМС для сетей 5G/IMT-2020 // Электросвязь. 2019. № 5. С. 22-27.

43. Дворников С. В., Степынин Д. В., Дворников А. С., Букарева А. П. Формирование векторов признаков сигналов из вейвлет-коэффициентов их фреймовых преобразований // Информационные технологии. 2013. № 5. С. 46-49.

44. Дворников С. В. Метод обнаружения сигналов диапазона ВЧ на основе двухэтапного алгоритма принятия решения // Научное приборостроение. 2005. Т. 15. № 3. С. 114-119.

45. Дворников С. В., Пшеничников А. В. Помехозащищенная модель радиолинии в условиях динамического преднамеренного воздействия // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2017. № 2. С. 16-22.

46. RF signal processing, June 2002, Output Back-Off Requirements for Root Raised, Cosine-Filtered Digital Signals. – URL:<http://defenseelectronicsmag.com/sitefiles/defenseelectronicsmag.com/files/archive/rfdesign.com/images/archive/0602Seybold50.pdf>. (дата обращения: 05.12.2024)

47. Замарин А. И., Тавалинский Д. А., Гришин М. В. Спутниковые сети VSAT: топология, состав, форматы представления мультимедиа данных (обзор, часть 2) // Информация и космос. 2004. № 4. С. 46-56.

48. Колюбакин В. Что такое VSAT // Телеспутник. 2015. С. 6–8.

49. Дворников С. В., Дворников С. С. Эмпирический подход к оценке помехоустойчивости сигналов фазовой модуляции // Информатика и автоматизация. 2020. Т. 19, № 6. С. 1280-1306. doi: 10.15622/ia.2020.19.6.6.

50. Макаров Д. А., Байкалов А. А. Обнаружение аномалий в сетевом трафике с помощью метода «Случайный лес» // Научный аспект. 2023. Т. 15. № 6. С. 1987-1991.

51. Федорова В. С., Стригунов В. В. Решение одной задачи обнаружения аномалий сетевого трафика с помощью сверточной нейронной сети // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2024. № 2 (73). С. 71-82. doi: 10.38161/1996-3440-2024-2-71-82.

52. Жданова И. М., Дворников С. С., Дворников С. В. Обработка бинарных потоков на основе кратномасштабных преобразований // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2024. № 4. С. 69-76.

53. Орехов А. В., Орехов А. А. Автоматическое обнаружение аномалий сетевого трафика при DDoS-атаках // Вестник Санкт-Петербургского

университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2023. Т. 19. № 2. С. 251-263. doi: 10.21638/11701/spbu10.2023.210.

54. Агеев С. А., Гладких А. А., Курносов В. И., Привалов А. А. Адаптивный метод обнаружения аномалий трафика в высокоскоростных мультисервисных сетях связи // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 5. С. 4-13. doi 10.24411/2409-5419-2018-10282.

References

1. VSAT services. *Data Communications*, 1994, vol. 23, no. 15. P. 205.
2. VSAT for Russia. *Data Communications*, 1995, vol. 24, no. 15, P. 48.
3. Cospser A. C., Gifford J. M. VSAT holdouts: Come out, we've got you surrounded. *Satellite Communications*, 1997, vol. 21, no. 8, pp. 26-28.
4. Bessarabskiy A. Y. Uslugi na baze setej VSAT [Services based on VSAT networks]. *Communication technologies & equipment magazine*, 2007, no. 4, pp. 87-88 (in Russian).
5. Tipugina V. Zachem operatoru VSAT nuzhen DVB-S2 s AKM? [Why does a VSAT operator need DVB-S2 with ACM?]. *Communication technologies & equipment magazine*, 2008, no. 3, p. 71 (in Russian).
6. Dvornikov S. V., Selivanov S. V., Dvornikov S. S., Ibragimov A. R. Energy security of radio communication lines of VSAT subscriber terminals. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya*, 2024, no. 2, pp. 56-61 (in Russian).
7. Blagov V. V. Rossijskij VSAT dlya nuzhd gosudarstvennyh [Russian VSAT for government needs]. *Electrosvyaz*, 2009, no. 6, pp. 54-55 (in Russian).
8. Lutzenko A. E. VSAT-networks development in Siberia: experience of JSC "Iskra" R&D. *Electrosvyaz*, 2007, no. 9, pp. 16-20 (in Russian).
9. Shestakov M. Sh. 3-axis stabilized maritime VSAT station SNARK-K. *Communication technologies & equipment magazine*, 2018, no. S1, P. 47 (in Russian).
10. An approach to substantiating the requirements for the indicator of accessibility of the global navigation satellite system for consumers of inland waterway basins. *T-Comm*, 2024, vol. 18, no. 4, pp. 22-29 (in Russian).
11. Demchenko A. V. Tekhnologii VSAT - dlya obespecheniya svyazi v usloviyah Russkogo [VSAT technologies - for providing communication in Russian conditions]. *Electrosvyaz*, 2017, no. 11, pp. 82-83 (in Russian).
12. Stanet li VSAT obshchedostupnoj tekhnologiej? [Will VSAT become a publicly available technology?]. *Last mile*, 2014, no. 6 (45), pp. 32-33 (in Russian).
13. Anichkin S. Development prospects of "Rostelecom" VSAT-networks. *Communication technologies & equipment magazine*, 2012, no. 6-2 (93), pp. 48-49 (in Russian).
14. Atmaka E. W., Respati Ja., Wisnu H. A., Luthfia L. Comparison of Usage between Voice Switching Communication System (Vscs) Direct Speech (Ds) Vsat (Very Small Aperture Terminal) System and Voip (Voice Over Internet Protocol). *Indonesian Journal of Interdisciplinary Research in Science and Technology*, 2024, vol. 2, no. 3. pp. 349-358.

15. Akhyar Lubis, Rio Septian Hardinata, Muhammad Seger. Based internet network design VSAT Ku-Band at Jangga Dolok village office. *The International Conference on Education, Social Sciences and Technology (ICESST)*, 2022, vol. 1, no. 1, pp. 113-122.

16. Makarenko S. I. Descriptive model of INMARSAT satellite communication system. *Systems of Control, Communication and Security*, 2018, no. 4, pp. 64-91 (in Russian).

17. Kislov K. V. Svyaz' i informacionnyj obmen na morskoy transporte [Communication and information exchange in maritime transport]. *Vestnik Morskogo gosudarstvennogo universiteta im. admirala G.I. Nevelskogo*, 2013, no. 58, pp. 24-28 (in Russian).

18. Smolentsev S. V., Shakhnov S. F., Butsanets A. A. Network aspects of data transmission from a marine autonomous surface ship to the remote control center and back. *Electronic Information Systems*, 2024, no. 1 (40), pp. 5-18 (in Russian).

19. Dvornikov S. V. Digital synthesis of spectral-effective television signals. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya*, 2015, no. 6, pp. 168-173 (in Russian).

20. Bykhovskiy M. A. Analysis of the international standard DVB-S2, defining parameters modern satellite communications systems. *Digital Signal Processing*, 2020, no. 1, pp. 18-25 (in Russian).

21. Diptan P. A. On the functioning of the satellite communication channel with fading via the DVB-S2X protocol. *Aktual'nye voprosy razvitiya sistem i setej svyazi: Sbornik materialov Vserossiyskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii* [Actual issues of the development of communication systems and networks: Collection of materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference], Stavropol, North Caucasus Federal University, 2023, pp. 177-180 (in Russian).

22. Zakharov A. A., Lavrentiev M. V., Volgatkin K. M. Beam hopping technology implementation according DVB-S2X Annex E standard for new generation VSAT networks. *Electrosvyaz*, 2022, no. 8, pp. 18-24 (in Russian).

23. Kulikov G. V., Hang D. S., Starikovskiy A. I. Noise immunity of signal reception with amplitude-phase shift keying in the background of frequency shift keying interference. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya*, 2022, no. 4, pp. 44-51 (in Russian).

24. Jie He., Lei Sh., Wei Q. Research and Implementation of the Transmission Efficiency of LEO Remote Sensing Satellite Based on Variable Coding Modulation. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, vol. 2289, no. 1, P. 012005.

25. Zhdanova I. M., Dvornikov S. S., Dvornikov S. V. Detection of traffic anomalies based on their frame wavelet transformations processing. *Proceedings of Telecommunication Universities*, 2024, no. 10 (5), pp. 14-23 (in Russian).

26. Vasilyeva D. V., Dvornikov S. S., Tolstukha Yu. E. Formation of feature vectors for video surveillance systems. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya*, 2023, no. 4, pp. 62-68 (in Russian).

27. Kharitonov N. I., Ermilov V. T., Masajlov G. I. Assessment of electromagnetic compatibility between VSAT and direct relay Ku-band stations. *Electrosvyaz*. 2010. no. 5. pp. 25-29 (in Russian).

28. Kolomenskiy K. Yu., Demidova A. Yu., Kazarinov A. S. From DVB-S to DVB-S2X: progress in standardization of digital satellite broadcasting systems.

Radioelectronics and Communications Systems, 2024, vol. 27, no. 2, pp. 68-78. (in Russian).

29. Newtec M6100 Broadcast Satellite Modulator (R2.6). Rev.1 02/2015.

30. Vdovin S. Algoritmy pryamoj korrekcii oshibok i osobennosti ih primeneniya. Turbokod [Algorithms of direct error correction and features of their application. Turbo code]. *Components & Technologies*, 2016, no. 11 (184), pp. 76-79 (in Russian).

31. Dvornikov S. V., Ustinov A. A., Dvornikov S. S., Ishin D. M. Analysis of block codes efficiency. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya*, 2011, no. 1, pp. 63-73 (in Russian).

32. Belov A. S., Aldoshin A. I., Abakumova A. Yu. Domestic modems of satellite earth stations. *Electrosvyaz*, 2020, no. 1, pp. 27-36 (in Russian).

33. State standard 59807–2021. Broadcast digital television. Receiver-decoder of the extended system of the second generation of satellite broadcasting (DVB-S2X). Basic parameters. Moscow: Russian Institute of Standardization. 2021. 15 p.

34. Etsi en 302 307 V1.2.1 (2009-08). 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).

35. Novosadov K. S. Analysis of spectrally efficient modulation schemes used in high-speed radio communication systems. *Modeling, Optimization and Information Technology*, 2021, vol. 9, no. 1 (32) (in Russian).

36. Dvornikov S. V., Ovchinnikov G. R., Balykov A. A. Programmnyj simulyator ionosfernogo radiokanala dekametrovogo diapazona [A software simulator of an ionospheric radio channel in the decameter range]. *Information and space*, 2019, no. 3, pp. 6-12 (in Russian).

37. Bondarenko V. N., Luferschik A. V., Ovchinnikov N. N. Analysis influence phase noise of the heterodyne on noise stability of reception signals from multiposition APSK. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, 2023, vol. 77, no. 12, pp. 124-130 (in Russian).

38. Dvornikov S. V., Zheglov K. D., Dvornikov S. S. Proactive suitability control of radio channels in IFB mode. *T-Comm*, 2022, vol. 16, no. 11, pp. 15-20 (in Russian).

39. Etsi en 302 307-2. 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 (DVBS2X).

40. Dvornikov S. V. Uproshchennoe predstavlenie modeli Hata dlya rascheta zatuhaniya signala na otkrytyh trassah [Simplified representation of the Hata model for calculating signal attenuation on open routes]. *Information and Space*, 2017, no. 3, pp. 6-10 (in Russian).

41. Bestugin A. R., Dvornikov S. V., Kryachko A. F. Investigation of subchannel noises of signals formed by technology of orthogonal frequency multiplexing. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya*, 2018, no. 3, pp. 123-129 (in Russian).

42. Skrynnikov V. G., Paltsin D. A., Devyatkin E. E. Specifics of the assessment of EMC conditions for 5G networks. *Electrosvyaz*, 2019, no. 5, pp. 22-27 (in Russian).

43. Dvornikov S. V., Stepynin D. V., Dvornikov A. S., Bukareva A. P. Formatoin of vectors signs signals from wavelet-coefficients of their frame transforms. *Informatsionnyye tekhnologii*, 2013, no. 5, pp. 46-49 (in Russian).

44. Dvornikov S. V. Metod obnaruzheniya signalov diapazona VCH na osnove dvukhetapnogo algoritma prinyatiya resheniya [A method for detecting RF range signals based on a two-step decision algorithm]. *Scientific instrument making*. 2005. vol. 15. no. 3. pp. 114-119 (in Russian).

45. Dvornikov S. V., Pshenichnikov A. V. Noise immunity radio link model in dynamic intentional exposure. *Radioelectronics and Communications Systems*, 2017, no. 2, pp. 16-22 (in Russian).

46. RF signal processing, June 2002, Output Back-Off Requirements for Root Raised, Cosine-Filtered Digital Signals. Available at: <http://defenseelectronicsmag.com/sitefiles/defenseelectronicsmag.com/files/archive/rfdesign.com/images/archive/0602Seybold50.pdf> (accessed 05 December 2024).

47. Zamarin A. I., Tavalinsky D. A., Grishin M. V. Sputnikovye seti VSAT: topologiya, sostav, formaty predstavleniya mul'timedia dannyh (obzor, chast' 2) [VSAT satellite networks: topology, composition, multimedia data presentation formats (review, part 2)]. *Information and Space*, 2004, no. 4, pp. 46-56 (in Russian).

48. Kolyubakin V. Chto takoe VSAT [What is VSAT?]. *Telesputnik*, 2015, July, pp. 6-8 (in Russian).

49. Dvornikov S. V., Dvornikov S. S. Empirical approach to estimating the immunity of phase modulation signals with a continuous phase. *Informatics and Automation*, 2020, vol. 19, no. 6, pp. 1280-1306 (in Russian).

50. Makarov D. A., Baykalov A. A. Obnaruzhenie anomalij v setevom trafike s pomoshch'yu metoda «Sluchajnyj les» [Detection of anomalies in network traffic using the «Random Forest» method]. *Scientific aspect*, 2023, vol. 15, no. 6, pp. 1987-1991 (in Russian).

51. Fedorova V. S., Strigunov V. V. SOLVING ONE Problem of network traffic anomaly detection using a convolutional neural network. *Bulletin of the Pacific State University*, 2024, no. 2 (73), pp. 71-82 (in Russian).

52. Zhdanova I. M., Dvornikov S. S., Dvornikov S. V. Processing binary streams based on multiple-scale transformations. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya*. 2024. no. 4. pp. 69-76 (in Russian).

53. Orekhov A. V., Orekhov A. A. Network traffic anomalies automatic detection in DDoS attacks. *Vestnik of Saint Petersburg university. Applied mathematics. Computer science. Control processes*, 2023, vol. 19, no. 2, pp. 251-263 (in Russian).

54. Ageev S. A., Gladkikh A. A., Kurnosov V. I., Privalov A. A. Adaptive method of detecting traffic anomalies in high-speed multiservice communication networks. *H&ES Research*, 2019, vol. 11, no. 5, pp. 4-13 (in Russian).

Статья поступила 24 декабря 2024 г.

Информация об авторах

Жданова Инна Михайловна – адъюнкт научно-исследовательского центра. Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного. Область научных интересов: мониторинг информационных ресурсов; сбор и обработка информации. E-mail: zhdanova.im@mail.ru

Дворников Сергей Сергеевич – кандидат технических наук. Доцент кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Научный сотрудник научно-исследовательского центра. Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного. Область научных интересов: моделирование радиотехнических систем; прием и обработка сигналов в условиях помех; системы управления связью. E-mail: dvornik.92@mail.ru

Дворников Сергей Викторович – доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Профессор 11 кафедры (радиосвязи). Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного. Область научных интересов: цифровая обработка сигналов, помехозащищенность сетей и линий радиосвязи. E-mail: practicsv@yandex.ru

Адрес: 194064, Россия, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3.

Model and conditions of occurrence of anomalies in demodulated traffic of VSAT subscriber terminals

I. M. Zhdanova, S. S. Dvornikov, S. V. Dvornikov

Problem statement. A significant technological breakthrough in data transmission via satellite communications was the transition to a new generation of DVB-S2X digital television protocols, which allowed not only to increase the bandwidth of satellite communications networks, but also significantly reduce the requirements for channel noise levels. In practice, the application of the DVB-S2X standard made it possible to organize the stable operation of VSAT technology equipment with a signal-to-noise ratio (SNR) in the channel at -10 dB with a bit error probability of about 10^{-5} . However, the implementation of new technical solutions based on alternating coding and modulation procedures, as well as time segmentation modes, in conditions of violation of electromagnetic compatibility (EMC) requirements, can lead to the effect of covert destructive effects (SDV), leading to distortion of information content, without an obvious disruption of the satellite communication line. **The aim of the work** is to increase the noise immunity of satellite radio communication lines organized using VSAT equipment by timely detecting the fact of a shift as a result of a violation of EMC conditions based on the results of detecting anomalies in demodulated information traffic. It is proposed to take into account the coding features of multilevel signal structures based on 16APSK and 32APSK modulation used in the DVB-S2X standard. **Methods used:** when solving the problem of detecting the fact of shift, an analytical apparatus is used to assess the noise immunity of reception based on the indicator of a given probability of a bit error in the channel. When predicting the current SNR ratio at the input of the receiving paths, methods for calculating the energy potential of satellite communication lines were used. Elements of the theory of electronic suppression were used to assess the permissible level of interference leading to disruption of the radio link. **Novelty:** the novelty elements are new analytical expressions that make it possible to estimate the dependence of the probability of a bit error in a channel on the ratio of interference power to signal power at a given SNR level; identification of anomalies in demodulated traffic from the perspective of evaluating the encoding features of multilevel signal-code structures; identification of conditions under which an effect occurs in VSAT-based satellite communication lines ADD in case of violation of the EMC conditions. **Result:** the traffic structure of the demodulated data stream has been identified, which makes it possible to detect the fact of a shift in a timely manner. The energy ratios of the signal,

noise and interference are substantiated and calculated, which result in a violation (distortion) of the structure of the transmitted information, without obvious signs of a shift, i.e. while maintaining the functional operability of the satellite communication line using VSAT equipment that implements transmissions based on 16APSK and 32APSK of the DVB-S2X standard. **Practical significance:** The conditions of violation of EMC requirements leading to distortion of the received information content without obvious signs of disruption of the satellite communication line, similar to the effect occurring with VLF, are substantiated. The presented scientific and technical solutions are proposed to be implemented in the form of software and hardware modules in VSAT subscriber terminals. Identification of signs of the specified effect will improve the timeliness of taking measures aimed at increasing the coefficient of proper operation of satellite communication lines.

Key words: VSAT equipment, DVB-S2X standard technologies, demodulated traffic anomalies, energy potential of the satellite communication line.

Information about Authors

Inna Mikhailovna Zhdanova – The Postgraduate Student of Scientific Research Center. Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny. Research interests: monitoring of information resources; collection and processing of information. E-mail: zhdanova.im@mail.ru

Sergey Sergeevich Dvornikov – Ph.D. of Engineering Sciences. Associate Professor of the Department of Design and Technology of Electronic and Laser Equipment. Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. Researcher. Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny. Research interests: modeling of radio engineering systems; reception and processing of signals in interference conditions; communication control systems. E-mail: dvornik.92@mail.ru

Sergey Viktorovich Dvornikov – Dr. habil. of Engineering Sciences, Professor. Professor of the Department of Design and Technology of Electronic and Laser Equipment. Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; Professor of the 11th Department (Radio Communications). Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny. Research interests: digital signal processing, noise immunity of networks and radio communication lines. E-mail: practcdsv@yandex.ru

Address: Russia, 194064, Saint-Petersburg, Tihoreckiy prospekt, 3.