

УДК 621.391

doi: 10.53816/23061456_2024_11-12_112

**ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМЫ ЦИФРОВОГО СПУТНИКОВОГО
ТЕЛЕВИЗИОННОГО ВЕЩАНИЯ С ОБРАТНЫМ КАНАЛОМ В УСЛОВИЯХ
ВОЗДЕЙСТВИЯ НЕПРЕДНАМЕРЕННЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПОМЕХ**

**NOISE IMMUNITY OF A DIGITAL SATELLITE TELEVISION BROADCASTING
SYSTEM WITH A RETURN CHANNEL UNDER THE INFLUENCE
OF UNINTENTIONAL NON-STATIONARY INTERFERENCE**

Канд. техн. наук П.А. Маслаков, канд. воен. наук М.В. Гриднев, Ф.И. Агеев

Ph.D. P.A. Maslakov, Ph.D. M.V. Gridnev, F.I. Ageev

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского

В статье рассматривается модель воздействия нестационарных помех (НСП) на канал спутниковой связи стандарта DVB-RCS. Предложенная модель позволяет исследовать помехоустойчивость канала с разными видами модуляции и помехоустойчивого кодирования. Проведено сравнение результатов воздействия непреднамеренных помех на канал спутниковой связи, возникающих от стационарных и нестационарных источников помех с одинаковой средней мощностью. В качестве показателя помехоустойчивости каналов спутниковой связи используется вероятность битовой ошибки. Показано, что при высоких соотношениях средних мощностей сигнал/помеха нестационарные помехи могут оказывать более негативное влияние на канал связи по сравнению со стационарными, увеличивая вероятность битовой ошибки. Особо опасное воздействие НСП оказывает на передаваемые видео и фото данные, что связано с особенностями сжатия информации.

Ключевые слова: нестационарная помеха, помехоустойчивость, DVB-RCS, коэффициент заполнения импульса помехи, MF-TDMA.

The paper considers the model of non-stationary interference (NSE) impact on the DVB-RCS standard satellite communication channel. The proposed model allows to study the noise immunity of the channel with different types of modulation and noise-immune coding. The comparison of the results of the impact of unintentional interference on the satellite communication channel, arising from stationary and non-stationary sources of interference with the same average power is carried out. The bit error probability is used as an indicator of noise immunity of satellite communication channels. It is shown that at high ratios of average signal-to-interference power non-stationary interference can have a more negative impact on the communication channel compared to stationary, increasing the probability of bit error. Particularly dangerous impact NRS has on transmitted video and photo data, which is associated with the peculiarities of data compression.

Keywords: non-stationary interference, noise immunity, DVB-RCS, duty cycle of the interference pulse, MF-TDMA.

Введение

В 2019 году завершился переход России к цифровому телевизионному вещанию (в том числе спутниковому), поскольку оно обладает несомненными преимуществами перед аналоговым: более высокой помехоустойчивостью и качеством воспроизведения, широкими возможностями частотного мультиплексирования. Ввиду огромной территории нашей страны и ограниченности частотного ресурса ретранслятора возникает потребность в его эффективном использовании за счет передачи разнородного трафика. Данная задача является одной из главных в организации спутниковой связи (СпС), что дает возможность применять единую сетевую инфраструктуру и общие стандарты в процедуре сигналообразования, а также уменьшить разнообразие типов оборудования. Одной из передовых технологий, позволяющих организовывать такие мультисервисные сети, в настоящее время стал режим многочастотного множественного доступа с разделением во времени (MF-TDMA — Multi-Frequency Time-Devision Multiple Access) и базирующийся на нем стандарт спутниковой связи DVB-RCS (Digital Video Broadcasting — Return Channel Satellite) [1–4].

Вместе с тем земные станции СпС, в том числе использующие технологию DVB-RCS, зачастую вынуждены функционировать в условиях воздействия непреднамеренных как непрерывных стационарных, так и нестационарных (в том числе импульсных) помех, той же средней мощности. При этом, несмотря на отличия в эффекте воздействия таких помех на приемное устройство, при оценивании их параметров анализатор спектра, имеющий достаточно большие интервалы осреднения накапливаемых сигналов, покажет одинаковый уровень средней мощности помехи. Данное обстоятельство затрудняет оценивание степени влияния нестационарных помех (НСП) на функционирование земных станций СпС и должно быть учтено как в ходе решения задачи обеспечения электромагнитной совместимости, так и в процессе проектирования и поддержания условий их устойчивого функционирования.

Целью статьи является оценивание помехоустойчивости цифрового спутникового вещания с обратным каналом, использующего стандарт DVB-RCS при воздействии нестационарных помех.

Аналитико-имитационная модель функционирования канала спутниковой связи стандарта DVB-RCS в условиях воздействия нестационарных помех

Топология сети на базе мультисервисной DVB-RCS, как правило, строится по типу «звезда» и предусматривает наличие прямого канала — от Центральной земной станции (ЦЗС) до удаленных спутниковых терминалов, и обратного канала, — от терминала до ЦЗС, использующего стандарт DVB-RCS на основе MF-TDMA (рис. 1). Стандарт DVB-RCS, применяемый на обратной линии, реализует многостанционный доступ с частотным и временным разделением каналов и адаптивное кодирование. Обратный канал MF-TDMA позволяет использовать двумерное кадрирование, в котором каждое частотно-временное окно разделено на несущие, суперкадры, кадры и интервалы. Задача организации вхождения в связь поддерживает соединение в течение всего сеанса связи и осуществляет передачу данных в прямом канале на земную станцию, а также осуществляет разрыв соединения по запросу одного из пользователей.

Состояние частотно-временного ресурса сети может быть описано таблицей частотно-временного плана, представляющей собой формализованную запись закрепления части общего частотно-временного ресурса на заданном интервале за конкретными терминалами. Такая таблица может быть записана матрицей следующего вида [2]:

$$\mathbf{E}_{[L,K]} = \begin{bmatrix} e_{1,1} & \dots & e_{1,K} \\ \dots & \dots & \dots \\ e_{L,1} & \dots & e_{L,K} \end{bmatrix},$$

где $e_{l,k}$ — условный положительный номер терминала сети связи, занимающего k -й по времени и l -й по частоте частотно-временной интервал (ЧВИ), $l = 1, \dots, L$; $k = 1, \dots, K$. При этом $e_{l,k} = 0$ если ЧВИ не используется для передачи.

Одним из вариантов представления частотно-временной структуры сигнала по стандарту DVB-RCS, является частотно-временная матрица, являющаяся совокупностью частотно-временных посылок (ЧВП) $\gamma_{L,K}$. При этом каждая ЧВП образована из временных интервалов работы отдельных терминалов связи длительностью $\Delta t^{\text{ЧВИ}}$ и частотных интервалов шириной $\Delta f^{\text{ЧВИ}}$:

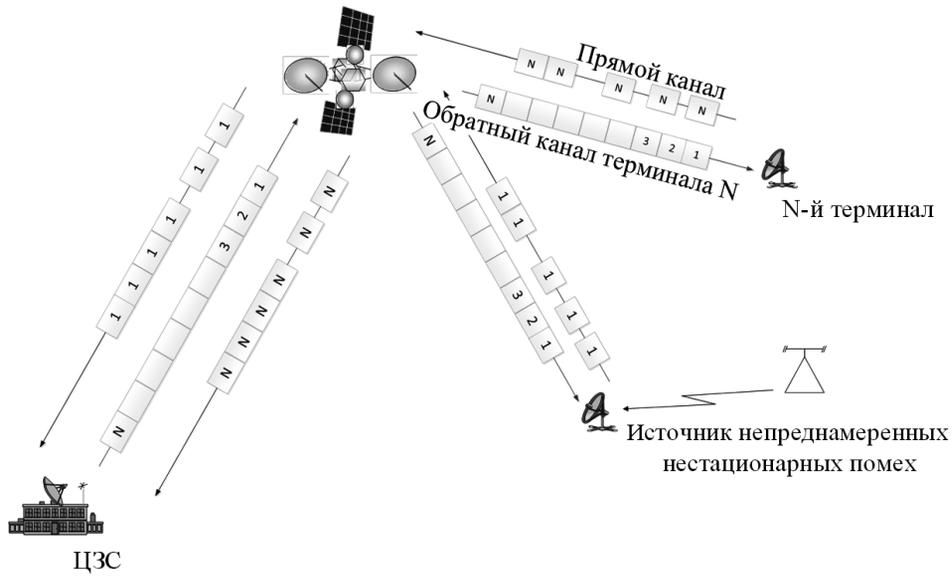


Рис. 1. Схема воздействия источника непреднамеренных нестационарных помех на земную станцию C_nC , использующую технологию MF-TDMA

$$\Gamma_{[L,K]} = \begin{bmatrix} \gamma_{1,1} & \dots & \gamma_{1,K} \\ \dots & \dots & \dots \\ \gamma_{L,1} & \dots & \gamma_{L,K} \end{bmatrix},$$

где $\gamma_{L,K} = \begin{cases} 0 & |e_{L,K} = 0, \\ 1 & |e_{L,K} > 0. \end{cases}$

Кадр MF-TDMA также представляет собой частотно-временную матрицу $\Gamma_{[L,K]}$. В качестве примера рассмотрим схему формирования кадра для четырех различных пользователей с разным уровнем приоритета, представленную на рис. 2. При этом принимается, что $\Delta T^{(кад)}$ — максимальный интервал времени, через который осуществляется последовательная передача ЧВП от одного терминала, $\Delta F^{(кад)}$ — полоса из частотных интервалов $\Delta f^{ЧВП}$.

Следует подчеркнуть, что для передачи видеоданных в режиме реального времени необходимы информационные скорости не менее 350 кБит/с и постоянное поддержание соединения [2]. Данное требование может быть выполнено за счет закрепления на кадре MF-TDMA определенного количества ЧВИ за терминалом связи, которому необходимо осуществлять передачу такого типа данных (применительно к случаю на рис. 2 — для четвертого пользователя). Известно, что стандарт DVB-RCS предусматривает возможность выбора типа пакетов трафика в обратном канале, поскольку

ку IP-пакеты могут передаваться как в ячейках Asynchronous Transfer Mode (ATM), так и в MPEG-2 пакетах, однако для передачи видеоданных последние предпочтительнее ввиду большей спектральной эффективности. Кроме того, в нем предусмотрена возможность адаптивного кодирования

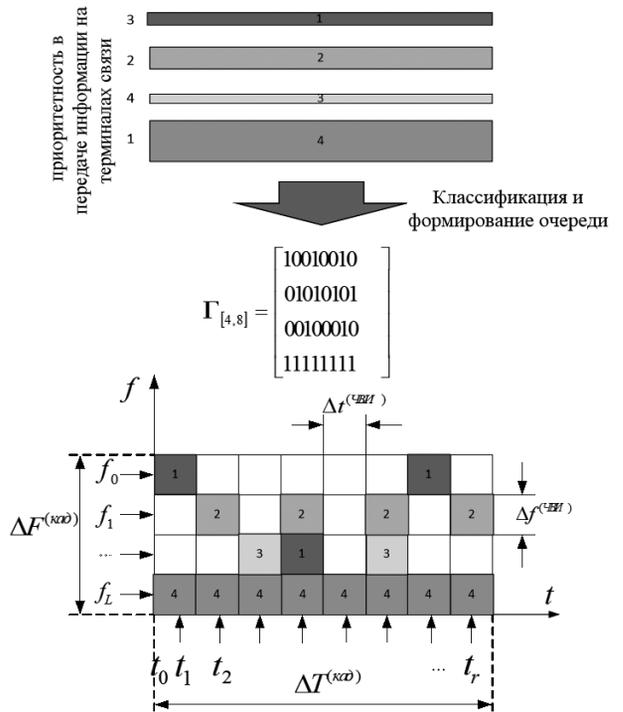


Рис. 2. Схема образования кадра MF-TDMA для пользователей с разным уровнем приоритета

и модуляции, при котором параметры кода и вид модуляции могут меняться от кадра к кадру.

Принципы функционирования и математические выражения для описания всего радиоканала стандарта DVB-RCS детально описаны в технической документации [1]. Однако для решения поставленных задач следует построить модель не всех блоков, а только тех из них, которые определяют помехоустойчивость системы связи: блоков модуляции и помехоустойчивого кодирования.

Особенностью помехоустойчивого кодирования стандарта DVB-RCS является каскадное применение кодов Рида — Соломона и Витерби, что не только повышает корректирующую способность кода, но и обеспечивает более высокую эффективность использования полосы частот спутникового канала при заданных требованиях к вероятности битовой ошибки. А используемые в современных терминалах турбокоды еще более повышают эти характеристики, обеспечивая снижение требований к отношению сигнал/шум более чем на 1 дБ.

Рассмотрим модель нестационарной помехи $\xi(t)$, которую можно представить в виде последовательности импульсов шума, определяемых двумя основными параметрами — их длительностью $\tau_{\text{имп}}$ и паузами Δt между ними (рис. 3) [5–7]:

$$\xi(t) = \begin{cases} \frac{1}{\rho} \chi(t), & m(\tau_{\text{имп}} + \Delta t) \leq t \leq [(m+1)\tau_{\text{имп}} + m\Delta t]; \\ 0, & \text{при } [(m+1)\tau_{\text{имп}} + m\Delta t] \leq t < (m+1)(\tau_{\text{имп}} + \Delta t), \end{cases}$$

где $m = 0 \dots M$;

$\chi(t)$ — шумовой случайный процесс с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратичным отклонением σ ;

ρ — коэффициент заполнения импульса помехи (величина обратная скважности), определяемый в соответствии с выражением:

$$\rho = \frac{\tau_{\text{имп}}}{\tau_{\text{имп}} + \Delta t}.$$

Для случая $\rho = 1$ нестационарная помеха становится стационарной.

Спектральная плотность мощности нестационарной помехи может определяться в соответствии с выражением:

$$J_0 = \frac{P_{\text{ср}}}{\rho \Delta f},$$

где $P_{\text{ср}}$ — средняя мощность источника помех;
 Δf — полоса частот, занимаемая помехой.

Различия в воздействии нестационарной и стационарной помехи (СП) на канал связи показаны на временных диаграммах исходной и детектированных информационных последовательностей (рис. 4).

В отличие от обычных стационарных помех, распределенных по всей полосе частот радиоприемного устройства, прерывистая во времени импульсная помеха той же средней мощности, определяемая коэффициентом заполнения ρ ($0 < \rho < 1$), может оказывать значительно более сильное воздействие на прием сигналов. Данный факт объясняется тем, что ее пиковая мощность $P_{\text{пик}} = P_{\text{ср.п}} / \rho$ возрастает обратно пропорционально этому коэффициенту, что приводит к увеличению вероятности возникновения ошибки из-за концентрации энергии нестационарной помехи в некоторой временной области сигнала [8].

Для современных систем связи, использующих методы помехоустойчивого кодирования, скремблирования, перемежения и спектрально-эффективные виды модуляции, аналитическое определение наиболее опасных значений коэффициентов заполнения импульсов помехи

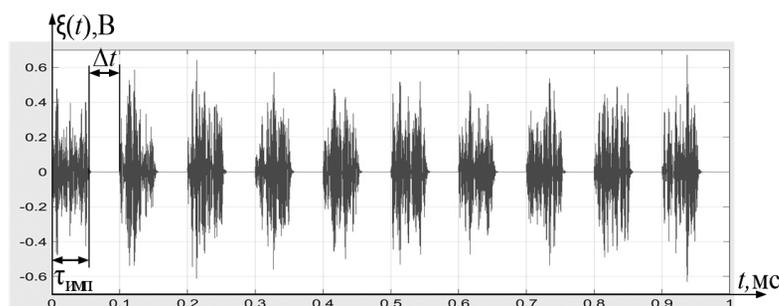


Рис. 3. Пример периодической нестационарной помехи

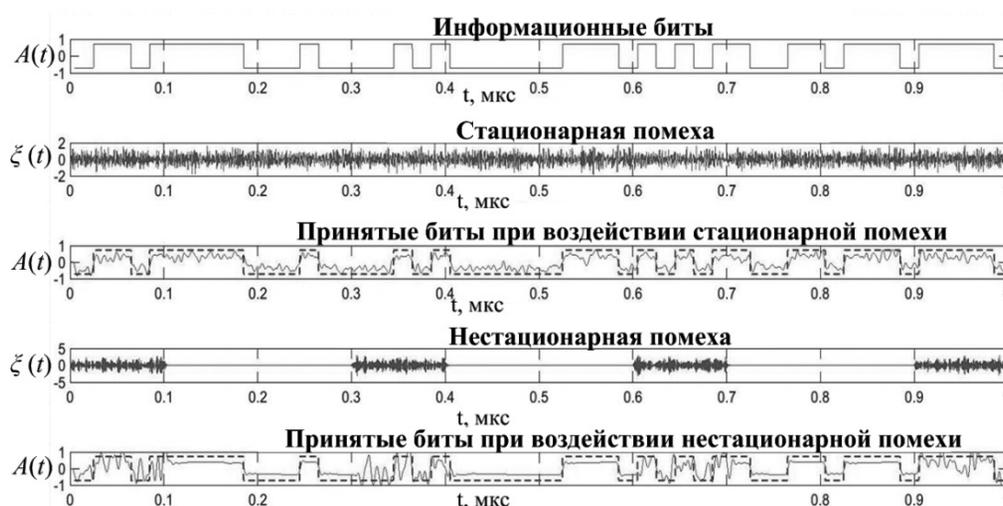


Рис. 4. Временные диаграммы исходной и детектированных информационных последовательностей при воздействии стационарной и нестационарной помех

вызывает ряд сложностей, которые могут быть решены путем имитационного моделирования [8, 9]. На основании математической модели в пакете прикладных программ Matlab была построена имитационная модель функционирования канала СпС DVB-RCS в условиях воздействия НСП, структурная схема которой показана на рис. 5. Модель включает в себя следующие элементы: модель наземной передающей станции, модель наземной приемной станции, модель спутникового ретранслятора и модели источников нестационарных шумовых помех, а также «белого» гауссовского шума.

При этом предполагается, что программно-аппаратная платформа, позволяющая реализовать данный стандарт и выполняющая функции Центральной земной станции, находится на борту спутника-ретранслятора. В качестве исходных

данных при моделировании принято, что используются виды модуляции QPSK, 8-PSK, 16-APSK, а в качестве помехоустойчивого кода — турбокод.

Информационное сообщение i , проходя через канал сигналообразования, преобразуется в полезный сигнал $S(i, t)$. С учетом воздействия гауссовского шума $n(t)$ и нестационарных помех $\xi(t)$ на вход приемника поступает аддитивная смесь

$$U(t) = S(i, t) + \xi(t) + n(t).$$

Исходные i и принятые i^* информационные биты сравниваются в блоке, вычисляющем вероятность битовой ошибки $P_{\text{ош}}$.

Для поиска значений коэффициента ρ , максимизирующего $P_{\text{ош}}$, использовался метод направленного перебора, для чего бралась матрица

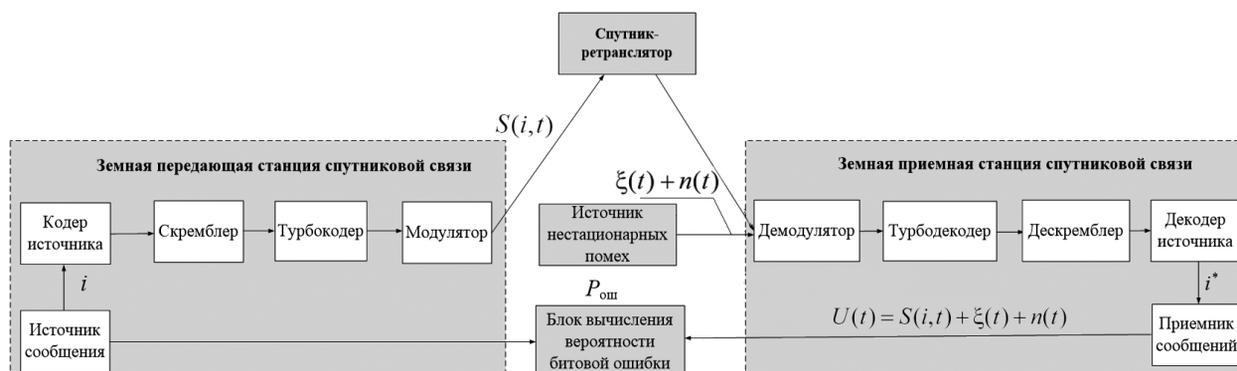


Рис. 5. Структурная схема модели функционирования канала СпС стандарта DVB-RCS в условиях воздействия нестационарных помех

значений $\tau_{\text{имп}}$ от $\tau_{\text{имп min}}$ (равной длительности канального бита) до $\tau_{\text{имп max}}$ (равной длительности кадра) с шагом, равным длительности канального бита. Аналогичным образом составлялась матрица значений Δt .

Оценивание помехоустойчивости видеоданных, передаваемых по каналу спутниковой связи стандарта DVB-RCS в условиях воздействия нестационарных помех

С помощью разработанной имитационной модели канала СПС проведены исследования помехоустойчивости стандарта DVB-RCS к воздействию СП и получены графические зависимости вероятностей битовой ошибки от отно-

шения сигнал/помеха (рис. 6–7). Кроме того, на данных рисунках приведены те же зависимости в условиях воздействия НСП со значениями коэффициента ρ , максимизирующими $P_{\text{ош}}$.

Анализ данных зависимостей показывает, что при высоком уровне отношений сигнал/помеха НСП оказывают более негативное воздействие на канал, по сравнению с СП. Так, применительно к сигнально-кодовой конструкции с модуляцией QPSK и скоростью помехоустойчивого кодирования 2/3 для отношения сигнал/помеха 6,5 дБ при некотором значении коэффициента ρ , вероятность битовой ошибки $P_{\text{ош}}$ возрастает с $5 \cdot 10^{-6}$ до $5 \cdot 10^{-4}$.

Рассмотрим некоторые особенности технологии MPEG-4, важные для оценивания

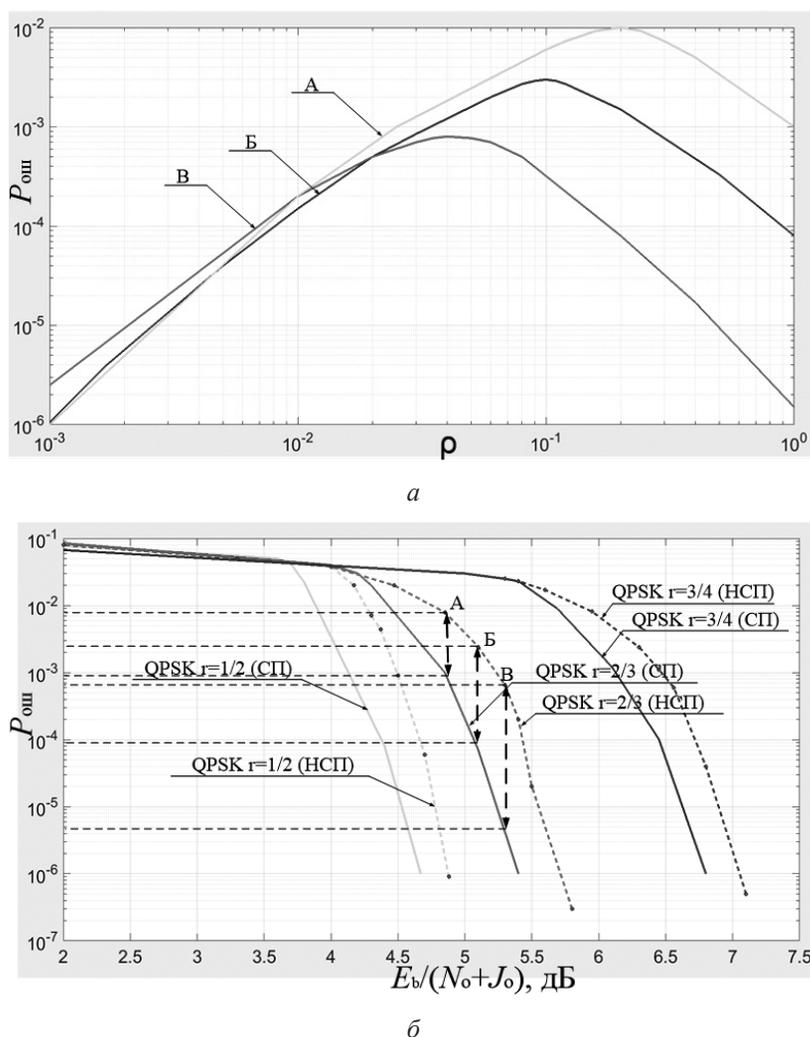


Рис. 6. Поиск значений коэффициента заполнения импульсной помехи ρ , максимизирующей $P_{\text{ош}}$ на примере сигнально-кодовой конструкции QPSK 2/3 стандарта DVB-RCS (а) и сравнение помехоустойчивости канала при воздействии СП и НСП (б)

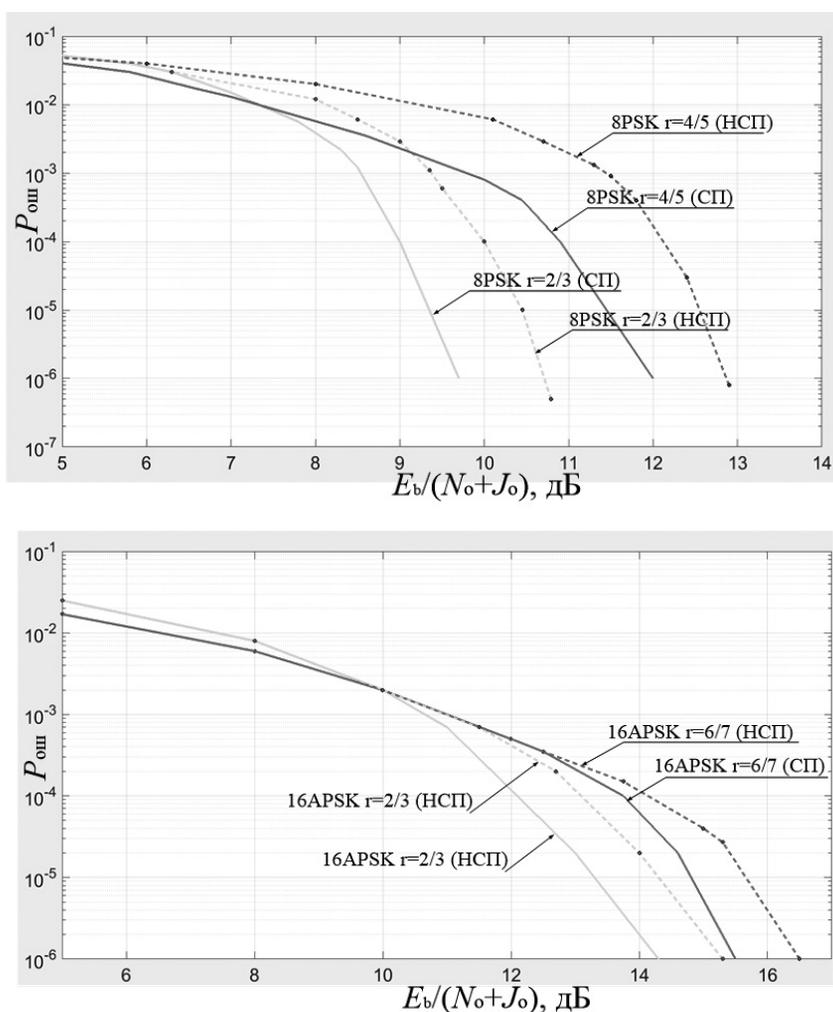


Рис. 7. Помехоустойчивость различных сигнально-кодовых конструкций стандарта DVB-RCS

помехоустойчивости. При передаче видеоданных видеопоток имеет иерархическую структуру вложенных элементов, называющихся Video Object Plane (VOP, далее «кадры»). Существует три типа кадров: intra-coded I , predictive-coded P и bidirectionally predictive-coded B . Последовательность кадров, начинающаяся с I -кадров, называется Group of VOPs (GoV), при этом I -кадр содержит информацию только о самом себе. Кодирование P -кадров осуществляется с использованием опорных I -кадров благодаря алгоритмам компенсации движения. B -кадры кодируются с использованием P -кадров с двунаправленным предсказанием, а для компенсации движения используется не только предыдущий кадр, но и последующий [10]. При трансляции видеопотока в канале передачи данных, вследствие воздействия помех, некоторые пакеты могут быть потеряны и

соответствующие кадры будут повреждены, однако различные типы кадров вносят неодинаковый вклад в качество видеобразия. Более того, различные части одного кадра могут иметь разную ценность для всего изображения (рис. 8).

Например, потеря середины или конца кадра ведет только к искажению изображения, в то время как потеря начальной части кадра (I -кадр) вместе с начальной последовательностью ведет к потере целого кадра: он фактически не воспроизводится на приемнике, так как не может быть корректно декодирован. Так, на рис. 8 показано, что невозможно декодировать B - или P -кадры, которые ссылаются на потерянный кадр (заштрихован) или на тот, который еще не был декодирован. Как видно из рисунка, если потерян I -кадр (зачеркнут), то все последующие кадры, до очередного I -кадра не могут быть декодированы.

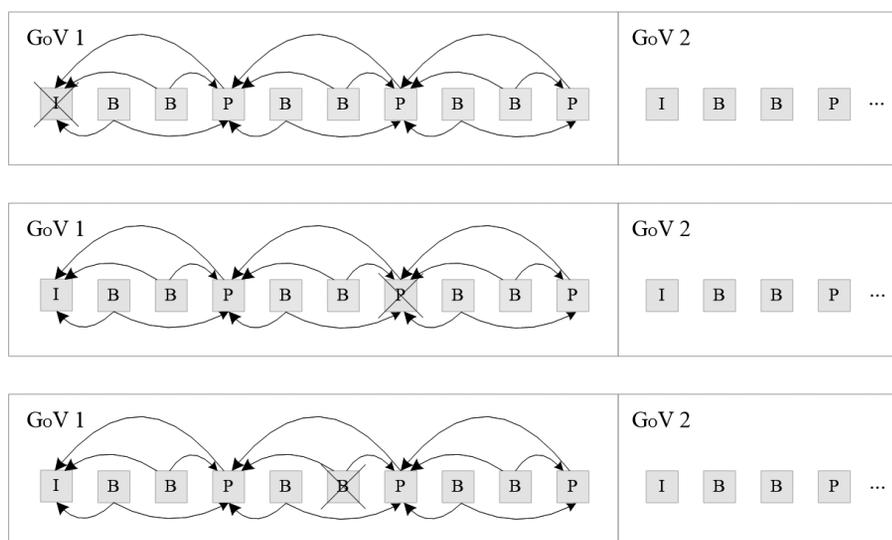


Рис. 8. Влияние различных случаев повреждения трех типов кадров в закодированном потоке на качество декодирования

В ходе имитационного моделирования установлено, что в процессе приема видеоизображений, использующих технологию MPEG-4, при достижении $P_{\text{ош}} \approx 3,5 \cdot 10^{-4}$ (для фотографий формата JPEG $P_{\text{ош}} \approx 5 \cdot 10^{-4}$) на приемной стороне невозможно идентифицировать передаваемые данные.

Заключение

Приемные устройства земных станций СпС, использующие стандарт DVB-RCS, могут функционировать в условиях воздействия непреднамеренных нестационарных помех. Помехоустойчивость данного стандарта в случае воздействия аддитивного белого гауссовского шума и нестационарных помех значительно различается. Степень этого различия зависит от выбранного типа помехоустойчивого кодирования и временных параметров помехи.

Высокий уровень непреднамеренных импульсных помех приводит к перегрузке внутреннего декодера Витерби и к размножению ошибок, поэтому даже краткосрочное воздействие таких помех приводит к сбою, связанному с восстановлением нормальной работы декодера.

В статье представлена модель функционирования канала СпС стандарта DVB-RCS в условиях воздействия НСП. Предложенная модель позволяет исследовать помехоустойчивость канала с разными видами модуляции и помехоустойчивого кодирования в реальных условиях воздействия

разных видов НСП. Показано, что при высоких соотношениях средних мощностей сигнал/помеха нестационарные помехи могут оказывать более негативное влияние на канал связи по сравнению со стационарными, увеличивая вероятность битовой ошибки. Особо опасное воздействие НСП оказывают на передаваемые видео и фото данные, что связано с особенностями сжатия информации. Показано, что для MPEG-4 при достижении $P_{\text{ош}} \approx 3,5 \cdot 10^{-4}$, а для фото формата JPEG $P_{\text{ош}} \approx 5 \cdot 10^{-4}$ на приемной стороне невозможно идентифицировать передаваемые данные.

Список источников

1. ESTI EN 301 790 (v1.4.1): Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for Satellite Distribution Systems.
2. Семенов К.В. Описательная модель спутниковых сетей связи на базе технологии многочастотного множественного доступа с временным разделением // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2010. Вып. 628. С. 98–110.
3. Миноли Д. Инновации в технологиях спутниковой связи. М.: Техносфера, 2019. 446 с.
4. Немировский М.С., Локшин Б.А., Аронов Д.А. Основы построения систем спутниковой связи. М.: Горячая линия–Телеком, 2019. 432 с.
5. Маслаков П.А., Паршуткин А.В. Исследование помехоустойчивости современных стан-

дартов спутниковой связи к воздействию нестационарных помех // Труды СПИИРАН. 2017. № 4 (53). С. 159–177.

6. Паршуткин А.В., Баранов В.М., Маслаков П.А., Сазыкин А.М. и др. Исследование помехоустойчивости канала спутниковой связи стандарта DVB-S2 к воздействию нестационарных помех // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2016. № 9–10. С. 89–95.

7. Красносельский И.Н., Канев С.А. Исследование помехоустойчивости систем цифрового вещания DVB-T модели канала с импульсными помехами // Электросвязь. 2010. № 7. С. 28–30.

8. Скляр Бернард. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение.: пер. с англ. 2-е изд. испр. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. 1103 с.

9. Дьяконов В.П. MATLAB и SIMULINK для радиоинженеров. М.: ДМК Пресс, 2016. 976 с.

10. Ян Ричардсон. Видеокодирование. H.264 и MPEG-4 — стандарты нового поколения. М.: Техносфера, 2005. 368 с.

References

1. ESTI EN 301 790 (v1.4.1): Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for Satellite Distribution Systems.

2. Semenov K.V. Descriptive model of satellite communication networks based on time division multiple access technology // Proceedings of the

A.F. Mozhaisky Military Space Academy. 2010. Issue. 628. Pp. 98–110.

3. Minoli D. Innovations in satellite communication technologies. M. Tekhnosphere, 2019. 446 p.

4. Nemirovsky M.S., Lokshin B.A., Aronov D.A. Fundamentals of building satellite communication systems. M.: Hotline–Telecom, 2019. 432 p.

5. Maslakov P.A., Parshutkin A.V. Study of the noise immunity of modern satellite communication standards to the effects of non-stationary interference // Proceedings of SPIIRAS. 2017. No 4(53). Pp. 159–177.

6. Parshutkin A.V., Baranov V.M., Maslakov P.A. Sazykin A.M. et al. Study of the noise immunity of a satellite communication channel of the DVB-S2 standard to the effects of non-stationary interference // Questions of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2016. Issue. 9–10. Pp. 89–95.

7. Krasnoselsky I.N., Kanev S.A. Study of the noise immunity of digital broadcasting systems DVB-T channel model with impulse noise Telecommunications. 2010. No 7. Pp. 28–30.

8. Sklyar Bernard. Digital communication. Theoretical foundations and practical application.: trans. from English – 2nd ed. rev. M.: Williams Publishing House, 2003. 1103 p.

9. Dyakonov V.P. MATLAB and SIMULINK for radio engineers. M.: DMK Press, 2016. 976 p.

10. Ian Richardson. Video coding. H.264 and MPEG-4 — new generation standards. M.: Tekhnosphere, 2005. 368 p.