

А.В. ПАРШУТКИН, П.А. МАСЛАКОВ
**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ
СОВРЕМЕННЫХ СТАНДАРТОВ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ К
ВОЗДЕЙСТВИЮ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПОМЕХ**

Паршуткин А.В., Маслаков П.А. Исследование помехоустойчивости современных стандартов спутниковой связи к воздействию нестационарных помех.

Аннотация. В статье рассматривается модель воздействия нестационарных помех на каналы спутниковой связи стандартов DVB-S2 и DVB-RCS, а также на каналы с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Проведено сравнение результатов воздействия непреднамеренных нестационарных помех на каналы спутниковой связи, возникающих от стационарных и нестационарных источников помех с одинаковой средней мощностью. В качестве показателя помехоустойчивости каналов спутниковой связи используется вероятность битовой ошибки. В статье введен показатель — коэффициент времени существования нестационарной помехи, который характеризует величину концентрации энергии при фиксированной средней мощности помехи в некоторой ограниченной временной области полезного сигнала. Показано, что при определенных значениях коэффициента времени существования нестационарных помех для низкого отношения помеха/сигнал они могут оказывать более опасное воздействие на каналы связи, чем непрерывная шумовая помеха, повышая вероятность битовой ошибки.

Ключевые слова: DVB-S2, DVB-RCS, псевдослучайная перестройка рабочей частоты, нестационарная помеха, помехоустойчивость, коэффициент времени существования помехи.

1. Введение. Современный этап развития телекоммуникационных систем в России характеризуется активным повсеместным применением технологий спутниковой связи. Данный факт обусловлен не только новыми возможностями и услугами связи, но и ограниченным развитием на значительной части территории страны инфраструктуры наземных телекоммуникационных систем. В этих условиях важнейшими задачами поставщика услуг связи становится оптимальное использование спектрального ресурса спутникового канала при заданных соотношениях «скорость передачи – помехоустойчивость», а также необходимость обеспечения требуемого уровня качества обслуживания абонентов сети в любых условиях погодной и помеховой обстановки [1-4]. Эффективное использование ресурса ретранслятора с возможностью передачи разнородного трафика дает возможность применять единую сетевую инфраструктуру и общие стандарты в процедуре сигналообразования, а также уменьшить разнообразие типов оборудования. В настоящее время технологией, позволяющей организовывать такие мультисервисные сети, стал режим многочастотного множественного доступа с разделением во времени и основанный на данном режиме стандарт спутниковой связи DVB-RCS (Digital Video Broadcasting – Return Channel via Satellite) [5]. Еще одним компромиссным

вариантом обеспечения высокой помехозащищенности каналов спутниковой связи при максимальном использовании частотного ресурса ретранслятора, является режим псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ), что позволяет сохранять высокие скорости передачи данных с возможностью поддержания многостанционного доступа абонентов в пакетных радиосетях [6].

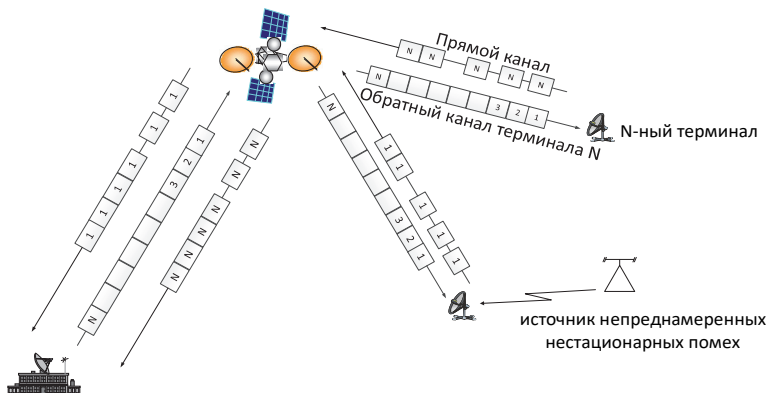
В то же время большинство исследований в этой области проведены с использованием модели канала с аддитивным «белым» гауссовским шумом. Такая модель не применима в случае воздействия нестационарных помех (НП) с изменяющейся во времени мощностью, которые могут возникать, например, при расположении земной спутниковой станции вблизи радиолокационной станции кругового обзора или при расположении источников помех на движущемся транспорте [7-9].

На станцию спутниковой связи могут воздействовать как непрерывные стационарные, так и нестационарные, в том числе импульсные, помехи той же средней мощности. При этом, несмотря на отличия в эффекте воздействия таких помех на приемное устройство, на окне индикации анализатора спектра, имеющего достаточно большие интервалы осреднения накапливаемых сигналов, отобразится одинаковый уровень средней мощности помехи. Данное обстоятельство затрудняет оценивание степени влияния непреднамеренных помех на функционирование земных станций спутниковой связи и должно быть учтено в ходе решения задачи обеспечения их электромагнитной совместимости, а также в процессе проектирования и поддержания условий их устойчивого функционирования.

Целью статьи является сравнительный анализ помехоустойчивости отдельных каналов спутниковой связи, использующих различные сочетания сигнально-кодовых конструкций при воздействии на них НП. В качестве ограничений исследования в статье принято следующее: тип трафика сети — видеоданные, каналы спутниковой связи — на основе стандартов DVB-RCS, DVB-S2 и с ППРЧ.

2. Модели каналов спутниковой связи стандартов DVB-RCS и DVB-S2 в условиях воздействия нестационарных помех. Стандарт DVB-RCS предлагает прямой канал, основанный на формате данных DVB/MPEG-2, и обратный канал на основе режима MF-TDMA (Multi-Frequency Time-Division Multiple Access — многочастотного множественного доступа с разделением по времени). Использование еще одного стандарта DVB-S2 для прямого канала оправдывается экономическими соображениями ввиду наличия большого количества уже готовых терминалов данного стандарта [10]. Таким образом, необходимо проводить исследование помехоустойчивости каналов спутниковой связи, использующих оба стандарта.

При организации сети связи с технологией MF-TDMA по топологии «звезда» центральная станция является необходимым элементом на протяжении всего сеанса связи (рисунок 1). Она осуществляет организацию вхождения в связь, поддерживает соединение в течение всего сеанса связи и осуществляет передачу данных в прямом канале на земную станцию в течение всего сеанса связи, осуществляет разрыв соединения по запросу одного из пользователей.



Центральная земная станция

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

Состояние частотно-временного ресурса 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 [11]:

$$E_{[L,K]} = \begin{bmatrix} e_{1,1} & \dots & e_{1,K} \\ \dots & \dots & \dots \\ e_{L,1} & \dots & e_{L,K} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где — 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, представляющая собой совокупность 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 $\Delta f^{\text{ЧВИ}}$:

$$\Gamma_{[L,K]} = \begin{bmatrix} \gamma_{1,1} & \dots & \gamma_{1,K} \\ \dots & \dots & \dots \\ \gamma_{L,1} & \dots & \gamma_{L,K} \end{bmatrix}, \text{ где } \gamma_{l,k} = \begin{cases} 0 & | e_{l,k} = 0, \\ 1 & | e_{l,k} > 0. \end{cases} \quad (2)$$

Схема образования кадра являет собой частотно-временную матрицу MF-TDMA $\Gamma_{[L,K]}$. В качестве примера рассмотрим передачу данных в виде отдельных информационных блоков от четырех различных пользователей с разным уровнем приоритета (рисунок 2). При этом принимается, что $\Delta T^{(\text{кад})}$ — максимальный интервал времени, через который осуществляется последовательная передача ЧВП от одного терминала, $\Delta f^{(\text{кад})}$ — полоса из частотных интервалов $\Delta f^{\text{ЧВИ}}$.

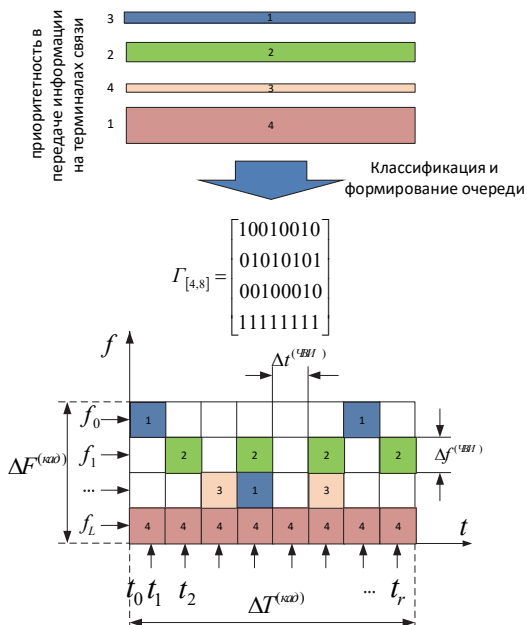


Рис. 2. Схема образования кадра MF-TDMA для пользователей с разным уровнем приоритета

Следует подчеркнуть, что для передачи видеоданных в режиме реального времени необходимы информационные скорости не менее 350 кБит/с и постоянная поддержка соединения [12]. Данное требование может быть выполнено за счет закрепления на канале MF-TDMA определенного количества ЧВИ за терминалом связи, которому необходимо осуществлять передачу такого типа данных (в рассматриваемом случае для четвертого пользователя). Стандарт DVB-RCS предусматривает возможность выбора типа пакетов трафика в обратном канале, поскольку IP-пакеты могут передаваться как в ячейках ATM, так и в MPEG2 пакетах, однако для передачи видеоданных последние предпочтительнее ввиду большей спектральной эффективности.

Принципы функционирования и математические выражения для описания всего радиоканала стандарта DVB-RCS детально описаны в технической документации [5]. 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 больше повышают эти характеристики, обеспечивая снижение требований к отношению сигнал/шум более чем на 1 дБ [13]. Кроме того, стандарт предусматривает режим адаптивного кодирования и модуляции, при котором параметры кода и вид модуляции могут меняться от кадра к кадру.

Для построения блочных турбокодов применяются различные блочные коды, такие как Хемминга, Рида — Соломона, Боуза — Чоудхури — Хоквингема (БЧХ). Однако в спутниковых линиях связи в настоящее время применяются в основном блочные турбокоды, построенные на базе кодов Хемминга. Этот факт объясняется, в первую очередь, сложностью декодирования кодов Рида — Соломона, кодов БЧХ, и как следствие, увеличением времени, затраченного на одну итерацию.

Принцип построения блочных турбокодов на базе кодов Хемминга заключается в следующем: поток передаваемой информации разделяется на блоки по N бит, каждый блок записывается в матрицу размером $m \times n$, где m — количество строк, а n — количество столбцов матрицы [14]. Производится кодирование по строкам и столбцам матрицы кодом Хемминга.

Результат кодирования — матрица размерностью $m=i+p$ строк и $n=i+p$ столбцов (рисунок 3), где i — информационные биты, p — проверочные биты.

i	i	i	i	p	p	p
i	i	i	i	p	p	p
i	i	i	i	p	p	p
i	i	i	i	p	p	p
p	p	p	p	p	p	p
p	p	p	p	p	p	p
p	p	p	p	p	p	p

Рис. 3. Принцип построения блочного турбокода $[7,4] \times [7,4]$ на базе кода Хемминга $[7,4]$

Таким образом, период кодового слова блочного турбокода:

$$T = SK + [i + p] \times [i + p], \quad (3)$$

где SK — длина синхрослова (синхрокомбинации), которая добавляется вначале кодированного блока.

Из матрицы, полученной в результате кодирования, биты считываются построчно, начиная с первого информационного.

Кодовое слово образует кадровую структуру потока. Кадровая структура для блочного турбокода $[7,4] \times [7,4]$ при добавлении к нему синхрокомбинации представлена на рисунке 4, где i — информационные биты, p — проверочные биты, SK — синхрослово (синхрокомбинация).

SK	iiii	ppp	iiii	ppp	iiii	ppp	iiii	ppp	pppp	ppp	pppp	ppp	pppp	ppp
SK	iiii	ppp	iiii	ppp	iiii	ppp	iiii	ppp	pppp	ppp	pppp	ppp	pppp	ppp
SK	iiii	ppp	iiii	ppp	iiii	ppp	iiii	ppp	pppp	ppp	pppp	ppp	pppp	ppp
.
.
.
SK	iiii	ppp	iiii	ppp	iiii	ppp	iiii	ppp	pppp	ppp	pppp	ppp	pppp	ppp

Рис. 4. Кадровая структура блочного турбокода на базе кода Хемминга $[7,4]$

Рассмотрим модель нестационарной помехи $\xi_{\text{НП}}$, которую можно представить в виде последовательности импульсов шума (рисунок 5), определяемых двумя основными параметрами — их длительностью $\tau_{\text{имп}}$ и паузами Δt между ними:

$$\xi_{\text{НП}}(t) = \begin{cases} \frac{1}{\rho} \chi(t), & j(\tau_{\text{имп}} + \Delta t) \leq t \leq [(j+1)\tau_{\text{имп}} + j\Delta t], \\ 0, & \text{при } [(j+1)\tau_{\text{имп}} + j\Delta t] \leq t \leq [(j+1)\tau_{\text{имп}} + j\Delta t]. \end{cases} \quad (4)$$

где $j=0 \dots J$; $\chi(t)$ — шумовой случайный процесс с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратичным отклонением σ ; ρ — коэф-

коэффициент времени существования помехи, определяемый в соответствии с выражением:

$$\rho = \frac{\tau_{\text{шмп}}}{\tau_{\text{шмп}} + \Delta t}. \quad (5)$$

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

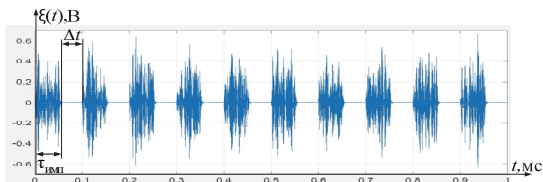


Рис. 5. Пример периодической нестационарной помехи

Отличия в воздействии шумовых непрерывных и нестационарных помех на канал связи показаны на временных диаграммах исходной и детектированных информационных последовательностей (рисунок 6). Для нормированного отношения сигнал/помеха (отношения энергии бита E_b к спектральной плотности мощности шума Z) 13 дБ и вида модуляции BPSK при значении $\rho=0.66$ в случае воздействия шумовой непрерывной помехи (ШНП) искаженным оказался 21 символ, а НП — 17.

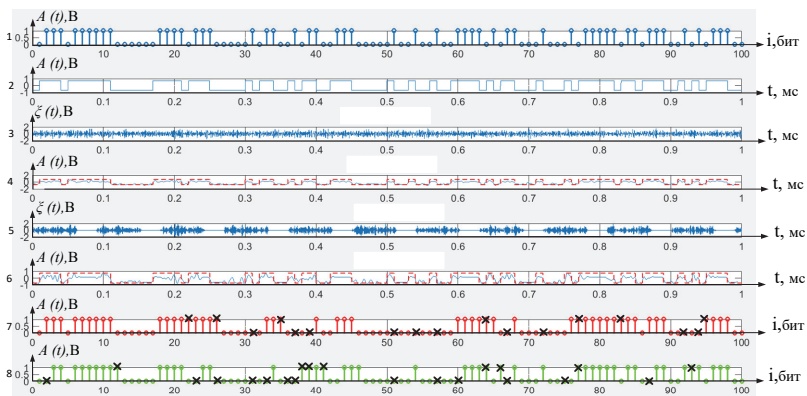


Рис. 6. Временные диаграммы исходной и детектированных информационных последовательностей при воздействии ШНП и НП: 1) Значения передаваемых информационных бит; 2) импульсный центрированный информационный сигнал; 3) шумовая непрерывная помеха; 4) импульсный центрированный информационный сигнал при воздействии ШНП; 5) НП; 6) импульсный центрированный информационный сигнал при воздействии НП; 7) значения принятых информационных бит при ШНП; 8) значения принятых информационных бит при НП

При этом спектральная плотность мощности нестационарной помехи определяется в соответствии с выражением:

$$Z = \frac{P_{\text{ср}}}{\rho \Delta f}, \quad (6)$$

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

На основании математической модели в программной среде Matlab была построена имитационная модель функционирования канала спутниковой связи DVB-RCS с возможностью перехода в стандарт DVB-S2 в условиях воздействия НП, структурная схема которой показана на рисунке 7. Модель включает в себя следующие элементы:

- модель наземной передающей станции;
- модель наземной приемной станции;
- модель спутникового ретранслятора;
- модели источников нестационарных непрерывных шумовых помех, а также «белого» гауссовского шума.

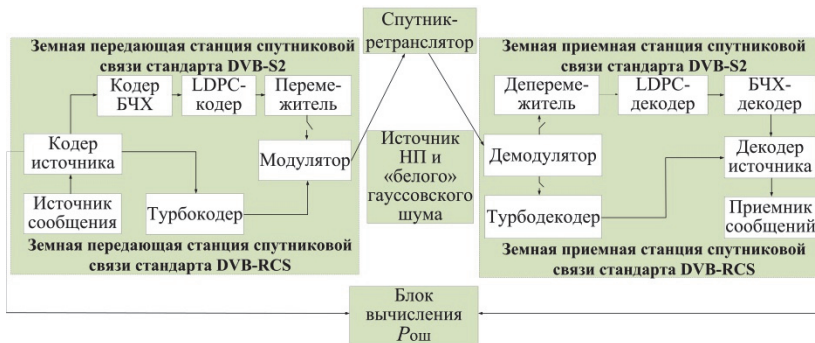


Рис. 7. Схема функционирования канала спутниковой связи DVB-RCS в условиях воздействия шумовых непрерывных или нестационарных с возможностью переключения в режим DVB-S2

Исходными данными при моделировании канала связи стандарта DVB-RCS приняты виды модуляции QPSK и 8PSK и помехоустойчивый турбокод со скоростью помехоустойчивого кодирования $2/3$. При этом предполагается, что синхронизация обеспечена, скорость передачи данных составляет 2048 кбит/с, шифрования трафика не производится, а в качестве пакетной структуры используется кадр MPEG, размером 188 байт.

Информационное сообщение, проходя через канал сигналообразования, преобразуется в полезный сигнал $S(t)$. С учетом воздействия

«белого» гауссовского шума $n(t)$ и помех $\xi_{\text{шп}}(t)$ на вход приемника поступает аддитивная смесь:

$$U(t) = S(t) + \xi_{\text{шп}}(t) + n(t). \quad (7)$$

Одним из основных показателей помехоустойчивости цифровых систем спутниковой связи является вероятность битовой ошибки $P_{\text{ош}}$, которая рассчитывается как отношение между средним количеством неправильно принятых информационных бит и их общим количеством по результатам проведения 100 экспериментов при передаче информационного сообщения размером 10 млн. бит, разбитом на блоки данных в соответствии со стандартами. При этом коэффициент ρ , максимизирующий вероятность битовой ошибки, определяется методом перебора всех возможных значений $\tau_{\text{шп}}$ и Δt . Так, в качестве примера на рисунке 8 показаны значения ρ , полученные в ходе имитационного моделирования воздействия НП на сигнално-кодировую конструкцию DVB-RCS с видом модуляции 8PSK и скоростью помехоустойчивого кодирования 2/3. На полученном графике виден перегиб, в котором достигается максимальное значение $P_{\text{ош}}$ в точке, где $\rho=0.2$ (при отношении сигнал/помеха 3 дБ).

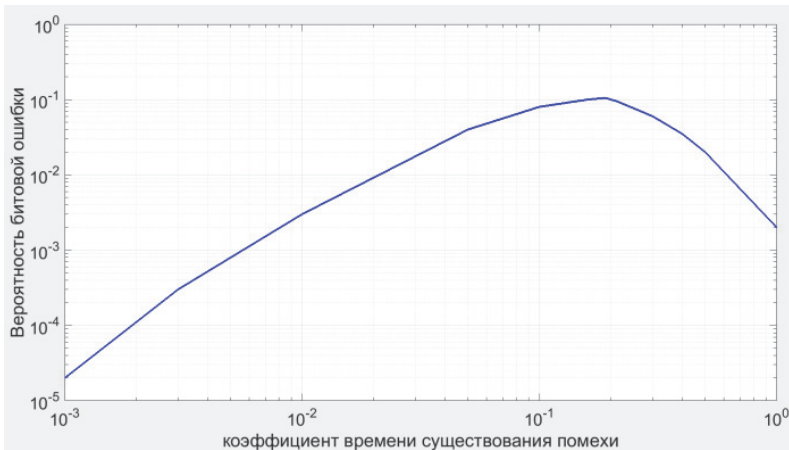


Рис. 8. Поиск значения ρ , максимизирующего $P_{\text{ош}}$ для случая сигнално-кодировой конструкции DVB-RCS с модуляцией 8PSK

На рисунке 9 представлен график зависимости $P_{\text{ош}}$ от отношения сигнал/помеха для стандарта DVB-RCS.

Анализ данных зависимостей позволяет сделать вывод о большей опасности НП по сравнению с ШНП для модуляции более высокого порядка.

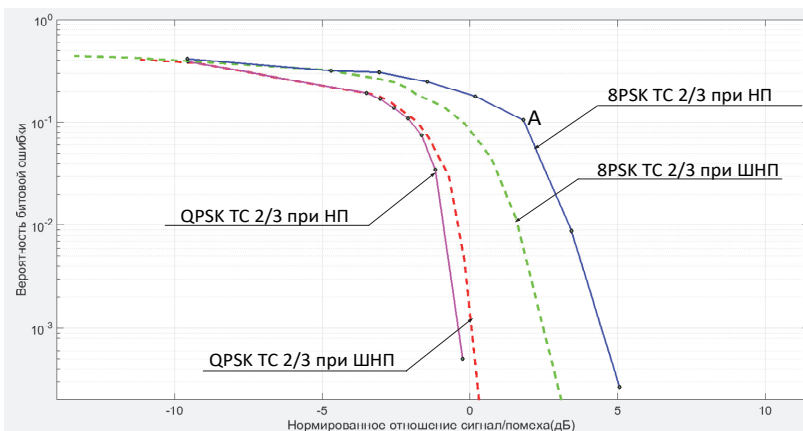


Рис. 9. График $P_{\text{ош}}$ стандарта DVB-RCS со скоростью помехоустойчивого кодирования TC 2/3 и видами модуляции QPSK и 8-PSK к воздействию шумовых непрерывных и нестационарных помех

Аналогичные исследования проведены для стандарта DVB-S2 (рисунок 10) [7, 15-17]. При этом в качестве исходных данных принято следующее: кадр нормальный (длиной 64800 бит), виды модуляции QPSK и 8PSK, скорости кодирования (1/4, 1/3, 2/5, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9 и 9/10).

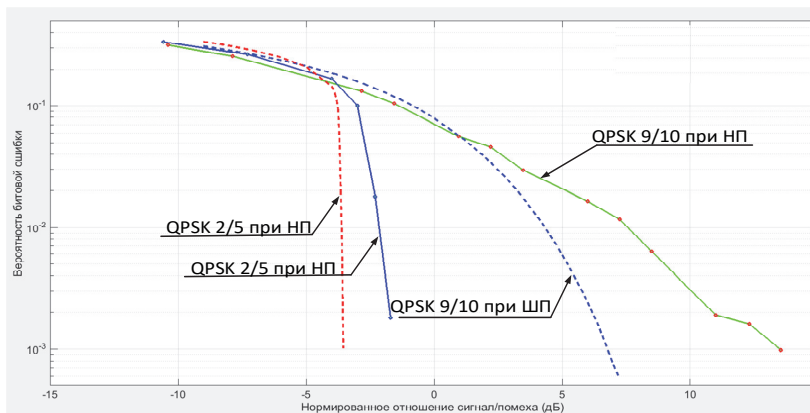


Рис. 10. График вероятности битовой ошибки для сигналов с видом модуляции QPSK и скоростью помехоустойчивого кодирования 2/5 и 9/10 стандарта DVB-S2 к воздействию шумовых непрерывных и нестационарных помех

В ходе исследования определено, что каскадное помехоустойчивое кодирование, применяемое в стандарте DVB-S2, позволяет успешно

исправлять возникающие ошибки при воздействии НП для низких (1/4, 1/3) скоростей кодирования и представляет опасность для более высоких (2/5, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9 и 9/10) скоростей кодирования, увеличивая $P_{\text{ош}}$.

Большой эффект от воздействия прерывистой во времени НП при определенных значениях ρ по сравнению с ШНП той же средней мощности объясняется концентрацией энергии помехи в некоторой временной области сигнала, что приводит к искажению некоторого количества информационных символов, которые не могут быть исправлены декодером. При этом средняя мощность помехи определяется ее дисперсией.

3. Модель канала спутниковой связи с псевдослучайной перестройки рабочей частоты. Одним из наиболее известных способов повышения помехозащищенности спутникового ретранслятора является использование расширения спектра за счет псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ) в заданной полосе частот. В данном режиме происходит скачкообразное изменение номинала несущей частоты, одновременной на всех средствах радиосети по априорно известному абонентам псевдослучайному закону [18]. В зависимости от способа использования элементов информационной символьной последовательности (ИСП) можно выделить сигналы с неинформационной ППРЧ, где очередной номинал рабочей частоты определяется только символами исходной псевдослучайной последовательности (ПСП) и сигналы с информационной ППРЧ, в которых очередной номинал рабочей частоты определяется как символами ПСП, так и символами ИСП. Кроме того, в зависимости от соотношения длительности ИСП номиналов частот различают сигналы с быстрой и медленной ППРЧ. При быстрой ППРЧ каждый информационный символ передается одним или несколькими частотными элементами. При медленной ППРЧ каждый частотный элемент переносит более одного информационного символа.

Аналитически сигналы при медленной информационной ППРЧ, которые рассматриваются в работе, могут быть записаны в соответствии с выражением [18]:

$$S_{\text{ми}}(t) = \sum_l \sum_m S \cdot \text{rect} \left[t - (l-1) \cdot T_{\text{ц}} - (m-1) \cdot \tau_{\text{и}} \right] \cdot \sin \left[\left(\omega(n_l + s_q) \cdot t + \Theta_0 \right) \right], \quad (8)$$

где $\text{rect} \left[t^* \right] = \begin{cases} 1, & \text{при } (m-1) \cdot \tau_{\text{и}} \leq t^* \leq m\tau_{\text{и}} \\ 0, & \text{при } (t^* < (m-1) \cdot \tau_{\text{и}}, t^* > m\tau_{\text{и}}) \end{cases}$ — функция прямо-

угольного импульса; l — номер шага программы, $l=1 \dots L$, L — количество символов последовательности номиналов частот, составляющих период; $m=1 \dots M$, M — количество символов ИСП, передаваемых на очередном шаге программы; q — номер текущего символа $q=1 \dots Q$,

Q — количество передаваемых символов ИСП (при медленной ППРЧ $q=(M-1)l+m$); $\tau_{и}$ — длительность элементарного импульса (посылки), соответствующего единичному символу ИСП; $T_{ц}$ — цикл ППРЧ; S — амплитуда сигнала; Θ_0 — начальная фаза сигнала; ω — частота сигнала; n_l — символы последовательности номеров частотных каналов, определяющих значение несущей частоты сигнала на l -ом шаге программы; s_q — значение q -го символа ИСП.

На основании математической модели в программной среде Matlab была построена имитационная модель функционирования, структурная схема канала спутниковой связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты в условиях воздействия нестационарных помех которой показана на рисунке 11.

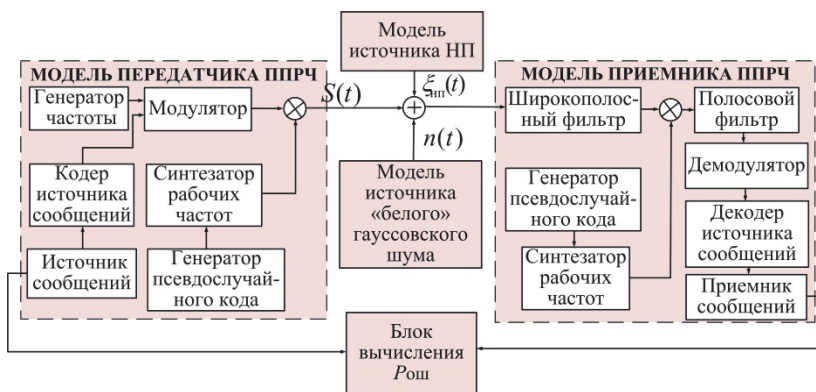


Рис. 11. Структурная схема модели канала связи с ППРЧ в условиях воздействия нестационарных помех

Данная схема при цифровой одноканальной модуляции включает в себя следующие основные элементы: модель передатчика ППРЧ, модель приемника ППРЧ, модель источника нестационарных помех. В качестве исходных данных при моделировании принято следующее: в канале связи осуществляется медленная информационная ППРЧ с видами модуляции BPSK, QPSK, 8-PSK.

Принцип работы представленной схемы состоит в следующем. На один вход умножителя подается сигнал на промежуточной частоте с выхода модулятора, на второй вход — частота с выхода синтезатора рабочих частот, при этом синтезатор рабочих частот вырабатывает ряд частот, которые по определенному закону, определяемому генератором псевдослучайного кода, подаются на вход умножителя. Частота

сигнала в радиолинии будет изменяться в соответствии с этим законом. На приемной стороне осуществляется обратная операция за счет синхронной работы синтезатора рабочих частот приемника и передатчика. Так, на рисунке 12 представлены передаваемые (белым цветом) и принимаемые символы (темная область) в виде сигнальных созвездий для соотношения помеха/сигнал 12 дБ.

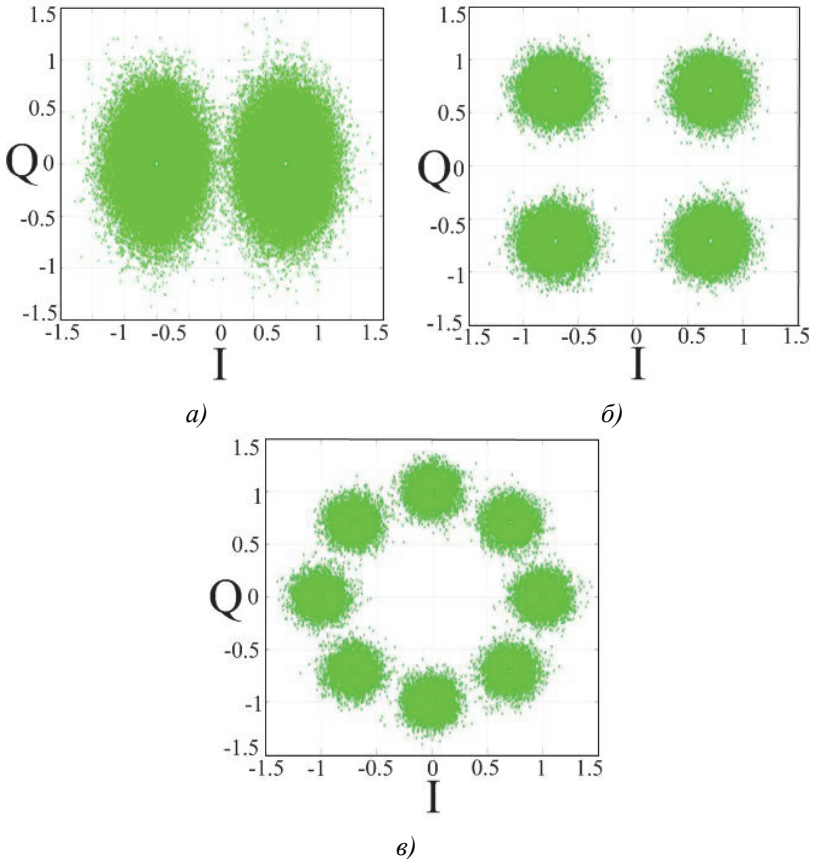


Рис. 12. Сигнальные созвездия для модуляции: а) BPSK, б) QPSK, в) 8-PSK

В качестве примера работы разработанной модели передатчика в соответствии с описанной схемой на рисунках 13 и 14 показано временное и частотное представление сигналов канала с ППРЧ и видом моду-

ляции BPSK. При этом сетка несущих частот расположена в диапазоне 100-120 кГц, а число возможных изменений частотных позиций — 6.

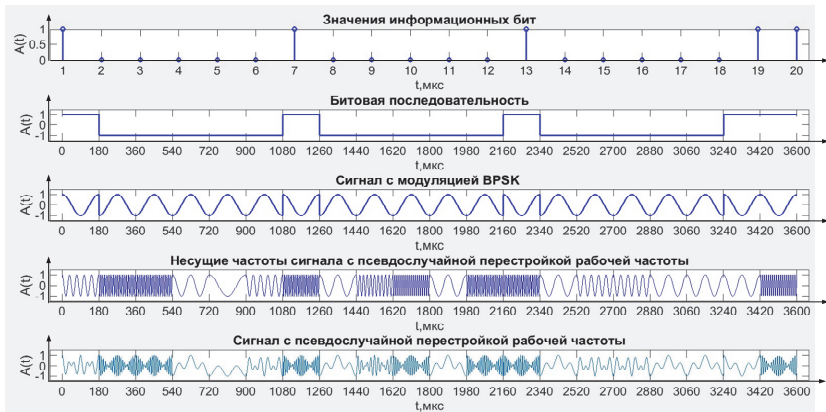


Рис. 13. Временные диаграммы работы передатчика ППРЧ

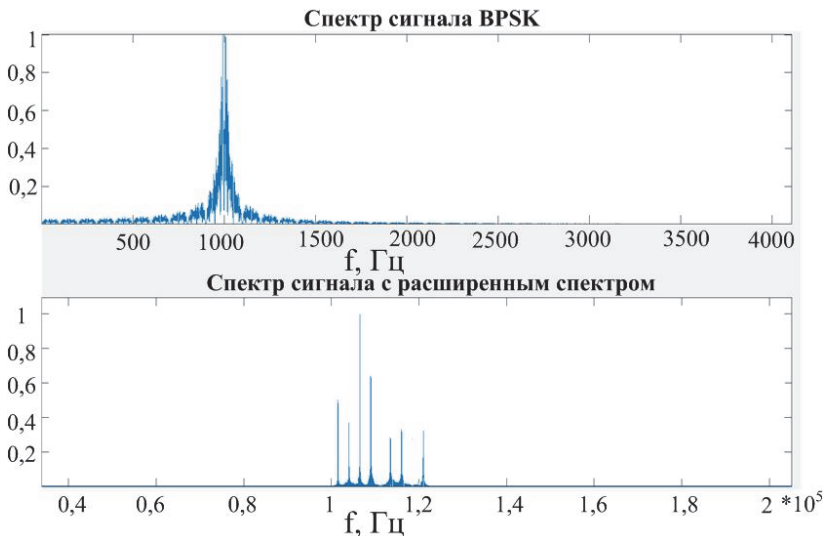


Рис. 14. Спектр исходного сигнала и сигнала с ППРЧ

4. Сравнительная характеристика помехоустойчивости современных каналов спутниковой связи к воздействию нестационарных помех. С помощью разработанных имитационных моделей каналов спутниковой связи проведены исследования помехоустойчивости стандартов DVB-RCS, DVB-S2 с наибольшей скоростью поме-

хоустойчивого кодирования и каналов с ППРЧ к воздействию нестационарных помех и получены графические зависимости вероятностей битовой ошибки от отношения сигнал/помеха (рисунок 15). Кроме того, на данном рисунке приведены те же зависимости в условиях воздействия НП со значениями коэффициента ρ , максимизирующими $P_{\text{ош}}$.

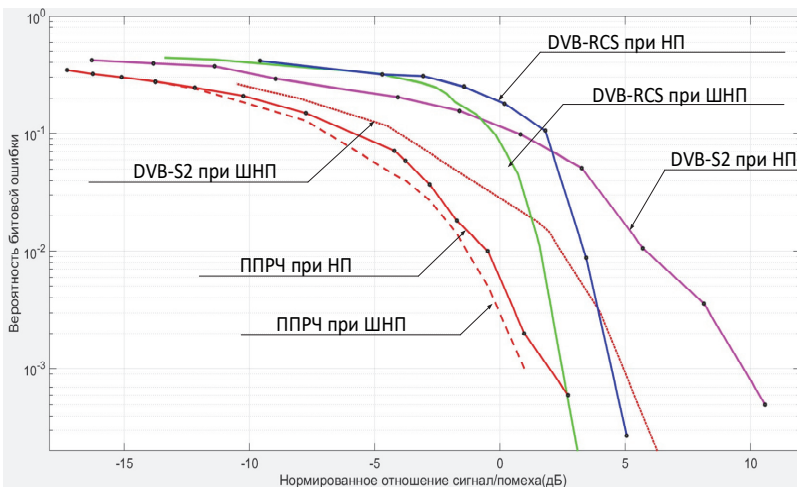


Рис. 15. Сравнительная характеристика помехоустойчивости стандартов DVB-RCS (8PSK, 6/7), DVB-S2 (8PSK, 9/10) и ППРЧ/8PSK к воздействию НП и ШНП

Анализ данных зависимостей для стандарта DVB-RCS показывает, что при низких уровнях отношений сигнал/помехи (от -10 до 3 дБ) НП оказывают меньше вреда, нежели обычные шумовые. В то же время, если отношение сигнал/помеха достаточно высоко (>3 дБ), помехи такого класса при определенных значениях ρ могут быть более опасными, чем шумовые, увеличивая вероятность битовой ошибки с 10^{-4} до 10^{-1} (для случая 3.7 дБ). Стандарт DVB-S2 обладает меньшей помехоустойчивостью, по сравнению с DVB-RCS.

Для канала с ППРЧ серьезных отличий в воздействии НП и обычных шумовых помех не выявлено. В то же время увеличение вероятности битовой ошибки, вызванное воздействием НП с коэффициентами $\rho=0.3 \dots 0.5$, соотносится с известными результатами о требованиях к характеристикам средств подавления по обеспечению «накрытия» сигнала помехой на 45-50 % независимо от того, каким способом это было достигнуто [18].

5. Заключение. Приемные устройства современных систем спутниковой связи могут функционировать в условиях воздействия

непреднамеренных НП. Помехоустойчивость известных стандартов DVB-RCS и DVB-S2 в случае воздействия непрерывной шумовой и нестационарной помех существенно различается. Степень этого различия зависит от выбранных параметров информационных и временных параметров помехи. Показано, что с ростом отношения сигнал/помеха НП оказывают более опасное воздействие на канал связи по сравнению с ШНП той же мощности.

В ходе исследования определено, что каскадное помехоустойчивое кодирование, применяемое в стандарте DVB-S2, позволяет успешно исправлять возникающие ошибки при воздействии НП для низких (1/4, 1/3) скоростей кодирования и представляет опасность для более высоких (2/5, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9 и 9/10) скоростей кодирования увеличивая вероятность битовой ошибки.

В целом стандарт DVB-RCS является более устойчивым к воздействию НП по сравнению с DVB-S2. Наиболее помехоустойчив к воздействию данных помех — канал связи с ППРЧ, однако он обладает меньшей эффективностью использования частотного ресурса ретранслятора.

Таким образом, в целях обеспечения электромагнитной совместимости современных земных станций спутниковой связи необходимо учитывать выявленные особенности стандартов связи при организации их эксплуатации.

Литература

1. *Новиков Е.А.* Применение моделей структурной динамики при решении задачи распределения частотно-временного ресурса сети спутниковой связи на основе стандарта DVB-RCS // Информационно-управляющие системы. 2013. № 3. С.78–83.
2. *Кащеев А.А.* Повышение частотной эффективности сети спутниковой связи передачи данных // Системы, сети и устройства телекоммуникаций. 2013. № 1. С. 37–42.
3. *Генов А.А., Решетников В.Н.* Адаптивное управление частотно-временным ресурсом космических аппаратов в сетях спутниковой связи // Информационные технологии и вычислительные системы. 2008. №3. С. 55–62.
4. *Генов А.А., Осипов В.В., Савилкин С.Б.* Принципы реализации сети спутниковой связи стандарта DVB-RCS с пространственно-частотно-временным разделением ресурса на основе многолучевых АФАР X-диапазона // Труды МАИ. Вып. № 87.
5. ESTI EN 301 790 V1.4.1. Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for Satellite Distribution Systems // European Standard (Telecommunications series). 2005. 117 p.
6. *Сатдинов А.И. и др.* Повышение частотно-энергетической эффективности радиолиний спутниковой связи в режиме псевдослучайной перестройки рабочей частоты // Альманах современной науки и образования. 2016. №4 (106). С. 109–112.
7. *Паршуткин А.В и др.* Исследование помехоустойчивости канала спутниковой связи стандарта DVB-S2 к воздействию нестационарных помех // Вопросы оборонной техники. Технические средства противодействия терроризму. Серия 16. 2016. Вып. 9–10. С. 89–95.

8. *Маслаков П.А., Париуткин А.В., Фомин А.В.* Модель функционирования канала спутниковой связи при воздействии нестационарных помех // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2016. Вып. 651. С. 78–83.
9. *Маслаков П.А, Пилков А.В., Швецов А.В.* Модель функционирования канала связи с прямым расширением спектра в условиях воздействия непреднамеренных нестационарных помех // Технологии ЭМС. 2016. №3(58). С 51–56.
10. ETSI EN 302 307 V1.2.1. Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2) // European Standard (Telecommunications series). 2009. 78 p.
11. *Семенов К.В.* Описательная модель спутниковых сетей связи на базе технологии многочастотного множественного доступа с временным разделением // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2010. Вып. 628. С. 98–110.
12. *Макаренко С.И.* Динамическая модель системы связи в условиях функционально-разно-уровневого информационного конфликта наблюдения и подавления // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 3. С. 122–184.
13. *Surekha T.P., Ananthapadmanabha T., Puttamadappa C.* C-Band VSAT Data Communication System and RF Impairments // International Journal of Distributed and Parallel Systems (IJDPSS). 2012. vol.3. pp. 339–355.
14. *Balta H., Lucaciu R., Gajitzki P., Isar A.* QPP Interleaver Based Turbo-code For DVB-RCS Standard// 4th International Conference on Computer Modeling and Simulation (ICCMS 2012). 2012. pp. 108–113.
15. *Будьлодина Н.В., Трухин М.П.* Компьютерный генератор моделей помех в телекоммуникациях // Т-Comm – Телекоммуникации и Транспорт. 2014. № 8. С. 8–13.
16. *Савищенко Н.В. и др.* Расчет вероятности битовой и символической ошибок для канала связи при приеме сигнальных конструкций стандарта DVB-S2 // Информатика и космос. 2015. № 1. С. 9–15.
17. *Крецуц А.А., Зяблов В.В., Потанов В.Г.* Сигнально-кодовые конструкции для работы в условиях мощных полосовых помех // Труды СПИИРАН. 2016. Вып. 3(46). С. 14–26.
18. *Обухов А.Н.* Частотно-временные аспекты защиты информации в системах радиосвязи // М.: Экслибрис-Пресс. 2008. 212 с.

Паршуткин Андрей Викторович — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры систем и средств радиоэлектронной борьбы космического назначения, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: радиоэлектронная защита радиоэлектронных средств и систем, методы оценивания результативности помех и радиоэлектронных воздействий, методы создания интеллектуальных помех и защиты от них, методы и средства технической защиты информации. Число научных публикаций — 86. andydc2010@mail.ru; ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198; п.т.: +7(812)347-95-35, Факс: +7(812) 237-12-49.

Маслаков Павел Андреевич — адъюнкт кафедры систем и средств радиоэлектронной борьбы космического назначения, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: радиоэлектронная защита радиоэлектронных средств и систем, методы создания интеллектуальных помех, помехоустойчивость систем спутниковой связи. Число научных публикаций — 17. maslakov345@yandex.ru; ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198; п.т.: +7(812)347-95-35, Факс: +7(812) 237-12-49.

A.V. PARSHUTKIN, P.A. MASLAKOV
**STUDY OF THE NOISE IMMUNITY OF MODERN STANDARDS
 OF SATELLITE COMMUNICATIONS TO THE IMPACT OF NON-
 STATIONARY INTERFERENCE**

Parshutkin A.V., Maslakov P.A. Study of the Noise Immunity of Modern Standards of Satellite Communications to the Impact of Non-Stationary Interference.

Abstract. This article considers the model of impact of non-stationary interference on the satellite communications channels of standard DVB-S and DVB-RCS, and also on the channels with frequency-hopping spread spectrum. The results of the impact of unintentional non-stationary interference on the satellite communications channels, which occurs from stationary and mobile sources of interference with the same average power, were compared. The bit error probability is used as a measure of noise immunity of satellite communications channels. In the article the term time coefficient of the disturbance noise existence was introduced. Its essence is to substantiate the degree of noise energy concentration in some time area of the desired signal. As an indication, characterizing noise immunity of data lines to the influence of unsteady noises the bit-error probability was chosen. It depends on the time coefficient of the disturbance noise existence. In the definite period of time coefficient of the unsteady noise existence for low signal-to-noise ratio they can have a more dangerous effect on data lines with FHSS than the continuous disturbance noise increasing the bit-error possibility.

Keywords: DVB-S2, DVB-RCS, frequency-hopping spread spectrum, non-stationary interference, noise immunity, lifetime of interference factor.

Parshutkin Andrey Viktorovich — Ph.D., Dr. Sci., professor, professor of systems and electronic warfare systems for space applications department, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: electronic protection of electronic equipment and systems, methods of estimating the impact of noise and electronic influences, methods of creation of intellectual interference and protection, methods and means of technical protection of information. The number of publications — 86. andydc2010@mail.ru; 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7(812)347-95-35, Fax: +7(812) 237-12-49.

Maslakov Pavel Andreevich — Ph.D. student of systems and electronic warfare systems for space applications department, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: electronic protection of electronic equipment and systems, methods of estimating the impact of noise and electronic influences, methods of creation of intellectual interference and protection, immunity of satellite communication systems. The number of publications — 17. maslakov345@yandex.ru; 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7(812)347-95-35, Fax: +7(812) 237-12-49.

Reference

1. Novikov E.A. [Application of models of structural dynamics in solving the problem of distribution of the frequency-time resource of a satellite communication network based on the DVB-RCS standard]. *Informacionno-upravljajushhie sistemy – Information and Control Systems*. 2013. vol. 3. pp. 78–83. (In Russ.).
2. Kashheev A.A. [Increase the frequency efficiency of the satellite data communication network]. *Sistemy, seti i ustrojstva telekommunikacij – Systems, networks and telecommunications devices*. 2013. vol. 1. pp. 37–42. (In Russ.).
3. Genov A.A., Reshetnikov V.N. [Adaptive management of time-frequency resources of space vehicles in satellite communication networks]. *Informacionnye tehnologii i*

- vychislitel'nye sistemy – Information technologies and computer systems*. 2008. vol. 3. pp. 55–62. (In Russ.).
4. Genov A.A., Osipov V.V., Savilkin S.B. [Principles for the implementation of the DVB-RCS satellite communication network with space-time-frequency resource sharing based on X-band multi-path active phased array antenna]. *Trudy MAI – Trudy MAI*. vol. 87. (In Russ.).
 5. ESTI EN 301 790 V1.4.1. Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for Satellite Distribution Systems. European Standard (Telecommunications series). 2005. 117 p.
 6. Satdinov A.I et al. [Increase in the frequency-energy efficiency of satellite communications radio links in the mode of pseudo-random tuning of the operating frequency]. *Al'manah sovremennoj nauki i obrazovanija – Almanac of Modern Science and Education*. 2016. vol. 4(106). pp. 109–112. (In Russ.).
 7. Parshutkin A.V. et al. [Study of noise immunity of the satellite communication channel of the DVB-S2 standard to the effect of non-stationary interference]. *Voprosy obozromnoj tehniki. Tehnicheskie sredstva protivodejstvija terrorizmu. Serija 16 – Engineering Problems. Scientific and Technical Journal. Series 16. Anti-Terrorist Engineering Means*. 2016. vol. 9–10. pp. 89–95. (In Russ.).
 8. Maslakov P.A., Parshutkin A.V., Fomin A.V. [The model of the functioning of the satellite communication channel under the influence of non-stationary interference]. *Trudy Voенno-kosmicheskoy akademii im. A.F.Mozhajskogo – Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*. 2016. vol. 651. pp. 78–83. (In Russ.).
 9. Maslakov P.A., Pilkov A.V., Shvecov A.V. [The model of the functioning of a communication channel with direct spreading in the presence of unintended non-stationary interference]. *Tehnologii JeMS – Technologies of electromagnetic compatibility*. 2016. vol. 3(58). pp. 51–56. (In Russ.).
 10. ETSI EN 302 307 V1.2.1. Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2). European Standard (Telecommunications series). 2009. 78 p.
 11. Semenov K.V. [A descriptive model of satellite communication networks based on the multi-frequency multiple-access technology with time division]. *Trudy Voенno-kosmicheskoy akademii imeni A.F.Mozhajskogo – Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*. 2010. vol. 628. pp. 98–110. (In Russ.).
 12. Makarenko S.I. [Dynamic model of the communication system in conditions of a functionally different-level information conflict of observation and suppression]. *Sistemy upravlenija, svyazi i bezopasnosti – Systems of Control, Communication and Security*. 2015. vol. 3. pp. 122–184. (In Russ.).
 13. Surekha T.P., Ananthapadmanabha T., Puttamadappa C. C-Band VSAT Data Communication System and RF Impairments. *International Journal of Distributed and Parallel Systems (IJDPDS)*. 2012. vol. 3. pp. 339–355.
 14. Balta H., Lucaciu R., Gajitzki P., Isar A. QPP Interleaver Based Turbo-code For DVB-RCS Standard. 4th International Conference on Computer Modeling and Simulation (ICCMS 2012). 2012. pp. 108–113.
 15. Budyldina N.V., Trukhin M.P. [Computer generator of interference models in tele-communications]. *T-Comm – Telekomunikacii i Transport – T-Comm – Telecommunications and Transport*. 2014. vol. 8. pp. 8–13. (In Russ.).
 16. Savishhenko N.V. et al. [Calculation of the probability of bit and symbol errors for the communication channel when receiving signal structures of the DVB-S2 standard]. *Informacija i kosmos – Information and Space*. 2015. vol. 1. pp. 9–15. (In Russ.).
 17. Kreshhuk A.A., Zjablov V.V., Potapov V.G. [Signal-code constructions for operation under conditions of high-band-pass interference]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2016. vol. 3(46). pp. 14–26. (In Russ.).
 18. Obuhov A.N. *Chastotno-vremennye aspekty zashchity informatsii v sistemakh radio-svyazi* [Time-frequency aspects of information protection in radio communication systems], M.: Jekslibris-Press. 2008. 212 p. (In Russ.).