

МОДЕЛЬ РАДИОЛИНИИ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ В СОСТАВЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ

В.А. Жиров¹, А.Е. Орлов², А.А. Смирнов²

¹Научно-исследовательский институт радио Санкт-Петербургский филиал (ЛОНИИР),

Санкт-Петербург, 192029, Российская Федерация

²Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Санкт-Петербург, 194064, Российская Федерация

*Адрес для переписки: vorl-2210@mail.ru

Информация о статье

УДК 621.396

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Жиров В.А., Орлов А.Е., Смирнов А.А. Модель радиолинии спутниковой связи в составе высокоскоростной спутниковой системы // Труды учебных заведений связи. 2018. Т. 4. № 3. С. 45–53.

Аннотация: В статье предлагается модель радиолинии спутниковой связи в составе высокоскоростной спутниковой системы связи. В отличие от существующих моделей, в которых учитываются тепловые шумы, внутрисистемные и межсистемные помехи, а выполнение требований к готовности по дождевому фактору контролируется после оценки системного запаса, в предлагаемой модели требования к готовности учитываются явно в виде ограничения. Это позволяет ставить и решать задачи оптимизации распределения частотно-энергетического ресурса центральных земных станций и бортовых ретрансляционных комплексов по критерию максимума пропускной способности при выполнении требований к достоверности передачи информации и готовности дуплексного направления спутниковой связи.

Ключевые слова: радиолиния спутниковой связи, частотно-энергетический ресурс, земная станция, бортовой ретрансляционный комплекс, высокоскоростная спутниковая система.

Введение

В настоящее время для предоставления пользователям высокоскоростного доступа к удаленным информационным ресурсам во всем мире создаются и развиваются высокоскоростные спутниковые системы (ВССпС) Ka и Q диапазонов частот [1, 2] с использованием космических аппаратов на геостационарной орбите. Общая архитектура, технические характеристики и ожидаемая пропускная способность таких систем определены в [3].

Развертывание подобных систем для России имеет специфику: обширные территории обслуживания, северное расположение абонентов обуславливают большие потери сигнала, особенно в гидрометеорах. Имеют место значительные различия потерь сигнала в гидрометеорах по территории обслуживания. Ограниченность частотно-энергетического ресурса (ЧЭР) центральных земных станций (ЦЗС) и бортовых ретрансляционных комплексов (БРТК) и необходимость вместе с тем обеспечивать приемлемый уровень готовности спутниковых радиолиний даже в условиях выпадения осадков определяют проблему его эффективного распределения.

Стандартные модели спутниковых радиолиний [4] позволяют решать задачи их анализа, но готовность оценивается по результатам оценки системного запаса. Поэтому в задачах распределения ЧЭР необходимо перебирать множество вариантов. Известны модели [5, 6] для нахождения прямого решения, но они имеют серьезные ограничения по условиям применения. В статье предлагается модель спутниковой радиолинии, которая позволяет решать задачи распределения ЧЭР в явном виде без ограничений на условия применения.

Стандартные модели спутниковых радиолиний [4] позволяют решать задачи их анализа, но готовность оценивается по результатам оценки системного запаса. Поэтому в задачах распределения ЧЭР необходимо перебирать множество вариантов. Известны модели [5, 6] для нахождения прямого решения, но они имеют серьезные ограничения по условиям применения. В статье предлагается модель спутниковой радиолинии, которая позволяет решать задачи распределения ЧЭР в явном виде без ограничений на условия применения.

Проблемы распределения частотно-энергетического ресурса высокоскоростных спутниковых систем

Особенности ВССпС заключаются в использовании на спутнике многоручевых антенн, обеспечивающих покрытие большой территории узкими лучами с высоким коэффициентом усиления, повторном использовании частот (ПИЧ) в лучах об-

служивания, режиме прямой ретрансляции (ПР). Благодаря этому ВССпС обладают высокой пропускной способностью и позволяют строить сети в составе тысяч абонентских земных станций (АЗС).

В системе организуются прямые направления (ЦЗС – АЗС) и обратные направления (АЗС – ЦЗС) передачи информации. Из-за технических ограничений и с учетом организационных соображений сети сегментируются путем образования сетевых сегментов. Сетевой сегмент (фрагмент сети) использует общий с другими сетевыми сегментами ЧЭР ЦЗС и БРТК. Все сетевые сегменты, использующие общий ЧЭР, будем называть группой сетевых сегментов (ГрСС). Обычно ЦЗС поддерживает работу нескольких ГрСС, ретранслируемых в свой луч в соответствие с частотно-поляризационным планом.

На каждый сетевой сегмент в прямом направлении (ПН) формируется несущая по стандарту DVB-S2 с временным мультиплексированием, которая ретранслируется транспондером одновременно с несущими других сетевых сегментов. Сетевой сегмент поддерживает работу группы АЗС, которые передают свои несущие по принципу многостанционного доступа с частотно-временным разделением через транспондер обратного направления (ОН). Несущие ОН формируются по стандарту DVB-RCS. Задача распределения ЧЭР заключается в делении ограниченной мощности и полосы ЦЗС и БРТК между ГрСС, а внутри группы – между сетевыми сегментами. Принцип распределения ЧЭР представлен на рисунке 1.

Мощность усилителя мощности ЦЗС делится между ГрСС, внутри группы между сетевыми сегментами:

$$P_{\text{цзс}} \geq \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n P_{ij}$$

где $P_{\text{цзс}}$ – мощность усилителя ЦЗС; P_{ij} – мощность несущей j -го сетевого сегмента i -ой ГрСС.

На рисунке 1 рассматривается N ГрСС и n сетевых сегментов в каждой группе. Суммарная полоса частот всех сетевых сегментов ограничивается полосой пропускания транспондера $B_{\text{пн}}$ и делится между ГрСС, внутри группы между сетевыми сегментами:

$$B_{\text{пн}} \geq \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n B_{ij}$$

где $B_{\text{пн}}$ – полоса пропускания транспондера в ПН; B_{ij} – полоса частот, занимаемая сигналом j -го сетевого сегмента i -ой ГрСС.

Эффективность использования полосы пропускания транспондера в ПН удваивается при использовании ортогональной (двойной) поляризации. Соотношение между полосами частот сетевых сегментов на выходе ЦЗС и транспондера сохраняется. В режиме линейного усиления мощность усилителя мощности транспондера ПН делится между несущими сетевых сегментов аналогично:

$$P_{\text{тр пн}} \geq \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n P'_{ij}$$

где $P_{\text{тр пн}}$ – максимальная мощность усилителя мощности транспондера; P'_{ij} – мощность несущей j -го сетевого сегмента i -ой ГрСС на выходе транспондера.

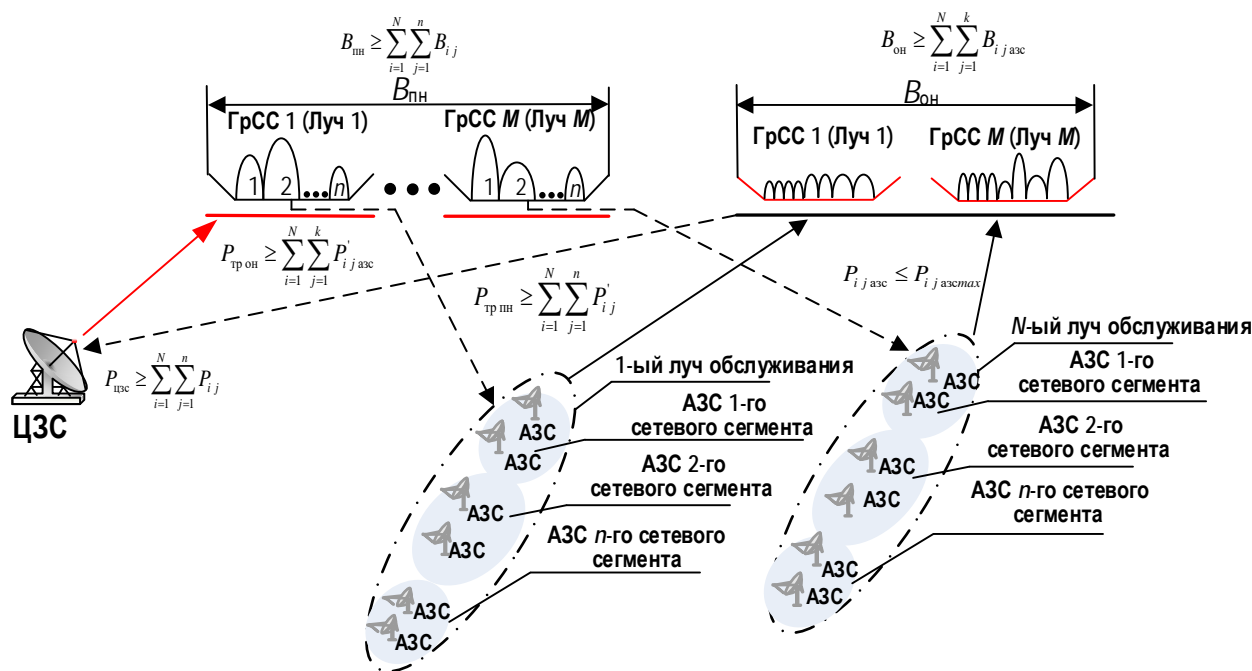


Рис. 1. Распределение ЧЭР ВССпС

Мощность несущей сетевого сегмента на входе и выходе транспондера связаны передаточной характеристикой. В обратном направлении мощность несущей АЗС ограничивается максимальной мощностью передатчика АЗС:

$$P_{i j \text{ азс}} \leq P_{i j \text{ азс max}},$$

где $P_{i j \text{ азс}}$, $P_{i j \text{ азс max}}$ – мощность несущей и максимальная мощность передатчика j -ой АЗС i -го сетевого сегмента, соответственно.

На выходе транспондера ОН мощность усилителя мощности делится между несущими АЗС:

$$P_{\text{тр он}} \geq \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^k P'_{i j \text{ азс}},$$

где $P_{\text{тр он}}$ – максимальная мощность усилителя мощности транспондера ОН; $P'_{i j \text{ азс}}$ – мощность несущей АЗС на выходе транспондера ОН; k – количество АЗС в сетевом сегменте.

Полоса пропускания транспондера ОН делится между сигналами несущих АЗС аналогично:

$$B_{\text{он}} \geq \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^k B_{i j \text{ азс}},$$

где $B_{\text{он}}$ – полоса пропускания транспондера ОН; $B_{i j \text{ азс}}$ – полоса частот, занимаемая сигналом j -ой АЗС i -го сетевого сегмента.

Таким образом, распределение ЧЭР ЦЗС и БРТК – это деление ограниченной мощности и полосы пропускания ЦЗС и БРТК между несущими сетевых сегментов для выполнения требований к пропускной способности каждого сетевого сегмента на выделенном ресурсе (с учетом возможности выбора сигнально-кодовой конструкции (СКК) из имеющегося множества). При этом необходимо учитывать требования к готовности дуплексного направления связи, образуемого любой парой ЦЗС – АЗС. Такая задача является переборной и достаточно трудоемкой.

Обеспечение требований к готовности предполагает учет радиоклиматических условий регионов обслуживания. ВССпС обслуживает обширные территории с существенно разными радиоклиматическими условиями, поэтому одна и та же готовность может обеспечиваться разной мощностью ЦЗС и БРТК. Неготовность будем трактовать в соответствии с [7] как состояние системы передачи продолжительностью не менее 10 с, когда наблюдаются сильно пораженные ошибками секунды, при этом переход в состояние готовности предполагает наличие периода с несильно пораженными секундами продолжительностью более 10 с.

Далее в статье раскрывается модель спутниковой радиолинии в виде функционала для пропускной способности, особенностью которой является явный учет требования к готовности, которая существенно упрощает решение задач распределения ЧЭР.

Модель радиолинии спутниковой связи в составе высокоскоростной спутниковой системы

Известно множество моделей спутниковых радиолиний и сетей спутниковой связи, отличающихся акцентами при постановке задачи. Условно их можно разделить на две группы.

К первой группе относятся модели анализа. Они ориентированы на анализ показателей функционирования линий и сетей спутниковой связи. Модели этой группы достаточно универсальны, но различаются степенью детализации факторов, влияющих на показатели функционирования, а также контролируемые параметрами. Самыми распространенными в данной группе являются модели, позволяющие оценивать отношение мощности сигнала к мощности шума, а также достоверность в радиолиниях, неготовность по дождю. Затем эти результаты можно использовать для оценки пропускной способности.

Базовый вариант модели данной группы рассматривается в [8]. В [3] предлагается развитие данной модели за счет учета всех составляющих внутрисистемных помех, при этом влияние среды рассматривается в вероятностном смысле, что позволяет ввести в рассмотрение показатели неготовности.

Ко второй группе относятся модели синтеза. Они направлены на получение в явном виде значений технических параметров (земных станций или БРТК) или параметров, характеризующих режимы функционирования. Модели этой группы нацелены на решение задач узкой направленности. Как правило, задачи синтеза удается решить благодаря серьезным ограничениям и допущениям, не позволяющим распространять результаты на другие случаи и условия. Модели данной группы рассматриваются в работах [4, 5].

Отправной точкой для предлагаемой модели служит модель ретрансляции с накоплением шумов и помех (рисунок 2) [4]. Стрелка вниз означает ПН, вверх – ОН.

В ПН информационный сигнал i -го сетевого сегмента с информационной скоростью R_{bi} , занимаемой полосой частот df_{ci} и использованием заданной СКК $S_{i\downarrow}$ поступает на вход усилителя мощности ЦЗС. P_i – мощность несущей сетевого сегмента на выходе усилителя мощности ЦЗС с учетом коэффициента недоиспользования мощности по выходу $OBo_{\text{цзс}}$. Сигнал, принимаемый БРТК, усиливается (с переносом частоты) и излучается в направлении группы АЗС рассматриваемого сетевого сегмента. $EIRP_i$ – значение эффективной изотропной излучаемой мощности на выходе ЦЗС. $G_{t\text{цзс}}$ – коэффициент усиления антенны ЦЗС. G_u – коэффициент усиления приемной антенны транспондера. $(G/T)_u$ и $(G/T)_{\text{азс}}$ – добротность приемной системы транспондера и АЗС, соответственно.

$G_{\text{тр}}$ – коэффициент усиления усилителя мощности транспондера. $OB_{\text{о,тр}\downarrow}$ – коэффициент недоиспользования мощности по выходу усилителя мощности транспондера в ПН. $L_{u\downarrow}, L_{d\downarrow}$ – потери сигнала в свободном пространстве восходящей и нисходящей линий, соответственно. $L_{ou\downarrow}(p_{\text{упн}}), L_{od\downarrow}(p_{\text{дпн}})$ – потери сигнала в гидрометеорах на восходящей и нисходящей линиях, определяемые процентом превышения времени среднего года $p_{\text{упн}}, p_{\text{дпн}}$.

Для ПН учитываются следующие виды помех:

– на ЦЗС: помехи интермодуляции $I_{01\downarrow}$, обусловленные совместным усилением нескольких несущих общим усилителем;

– в БРТК: помехи интермодуляции $I_{02\downarrow}$, обусловленные совместным усилением нескольких несущих общим усилителем мощности транспондера, кросс-поляризационной помехи (КПП) на входе приемной системы транспондера $I_{03\downarrow}$, спектральная плотность шума приемной системы транспондера $N_{\text{отр}\downarrow}$;

– на АЗС: помехи ПИЧ $I_{04\downarrow}$, спектральная плотность шумов приемной системы АЗС $N_{\text{оазс}\downarrow}$.

В ОН информационный сигнал с информационной скоростью $R_{bi\uparrow}$, занимаемой полосой частот $df_{ci\uparrow}$ и используемой СКК $S_{i\uparrow}$ поступает на вход усилителя мощности АЗС. Сигнал, принимаемый БРТК, усиливается усилителем мощности транспондера и излучается в направлении ЦЗС. $EIRP_{i\text{азс}}$ – эффективная изотропная излучаемая мощность i -ой АЗС, $G_{\text{азс}}$ – коэффициент усиления антенны АЗС, $OB_{\text{о,тр}\uparrow}$ – коэффициент недоиспользования мощности по выходу усилителя мощности транспондера в ОН, $(G/T)_{\text{цзс}}$ – добротность приемной системы ЦЗС, $L_{u\uparrow}, L_{d\uparrow}$ – потери сигнала в свободном пространстве восходящей и нисходящей

линий, соответственно, $L_{ou\uparrow}(p_{\text{уон}}), L_{od\uparrow}(p_{\text{дон}})$ – потери сигнала в гидрометеорах на восходящей и нисходящей линиях, определяемые процентом превышения времени среднего года $p_{\text{уон}}, p_{\text{дон}}$.

Для ОН учтены следующие виды помех:

– в БРТК: помехи интермодуляции $I_{01\uparrow}$, обусловленные совместным усилением нескольких несущих общим усилителем мощности транспондера, помехи ПИЧ $I_{03\uparrow}$, спектральная плотность мощности шумов приемной системы транспондера $N_{\text{отр}\uparrow}$;

– на ЦЗС: КПП $I_{02\uparrow}$ на входе приемной системы ЦЗС, спектральная плотность шумов приемной системы ЦЗС $N_{\text{оцзс}\uparrow}$.

Общее выражение для отношения мощности сигнала к спектральной плотности мощности шума и помех для спутниковой радиолинии известно [4], мы его представим в виде:

$$Z(\vec{X}) = \left[Z_{N,u}^{-1}(\vec{X}) + Z_{N,d}^{-1}(\vec{X}) + \sum_i Z_i^{-1}(\vec{X}) \right]^{-1}, \quad (1)$$

где $Z_{N,u}(\vec{X})$ – отношение мощности сигнала к спектральной плотности мощности шума на восходящем участке; $Z_{N,d}(\vec{X})$ – отношение мощности сигнала к спектральной плотности мощности шума на нисходящем участке; $Z_i(\vec{X})$ – отношение мощности сигнала к спектральной плотности мощности учитываемых помех (интермодуляции, КПП, ПИЧ, межсистемные и другие виды помех).

Вектор \vec{X}^T включает набор технических параметров оборудования космического и наземного сегментов, набор параметров, определяющих значение потерь сигнала в атмосфере, значения контролируемых параметров (мощность несущей, полоса, занимаемая сигналом).

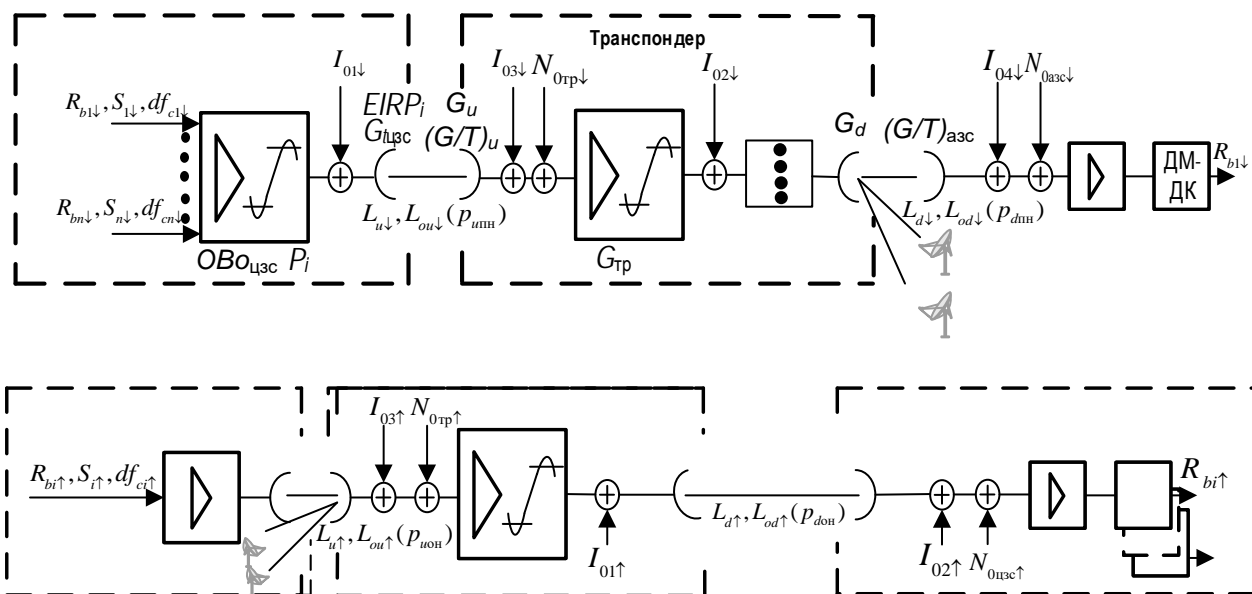


Рис. 2. Модель ретрансляции с накоплением шумов и помех

Формула (1) широко используется для расчета бюджета спутниковой радиолинии: при полностью известных технических параметрах наземной, бортовой аппаратуры и координат размещения станций. Она позволяет оценить ожидаемое отношение мощности сигнала к спектральной плотности шума и помех, а также выбрать СКК и скорость передачи информации. Однако, в задачах распределения ЧЭР использование данной модели неудобно, так как она не связана явным образом с требованиями к готовности и ограничениями по доступному ЧЭР. Для того, чтобы такую связь обеспечить, необходимо провести множество расчетов, чтобы подобрать вариант, удовлетворяющий требованиям.

Оценку пропускной способности симплексного направления связи можно производить с помощью формулы К. Шеннона, представленной в следующем виде [9]:

$$R_b = B_{тр} \left(1 + \gamma \frac{E_b}{N_0} \right), \quad (2)$$

где E_b/N_0 – отношение энергии сигнала на бит к спектральной плотности шума; γ – частотная эффективность используемой СКК.

Данная формула, определяя границу пропускной способности, будет использована для верификации предлагаемой в статье модели.

Выражение (1) может быть преобразовано в выражение для определения пропускной способности с учетом требований к достоверности информации:

$$R_b = \left[Z_{N,u}^{-1}(\vec{X}) + Z_{N,d}^{-1}(\vec{X}) + \sum_i Z_i^{-1}(\vec{X}) \right]^{-1} / (E_b/N_0)^*, \quad (3)$$

где $(E_b/N_0)^*$ – требуемое отношение энергии сигнала на бит к спектральной плотности шума, соответствующее используемой СКК.

Требование к готовности по дождю учтем следующим образом. К неготовности могут приводить события превышения интенсивности дождя определенных величин на стороне ЦЗС или АЗС (рисунок 3), а также одновременно. Вероятность последнего события обычно невелика, поэтому это событие учитывать не будем.

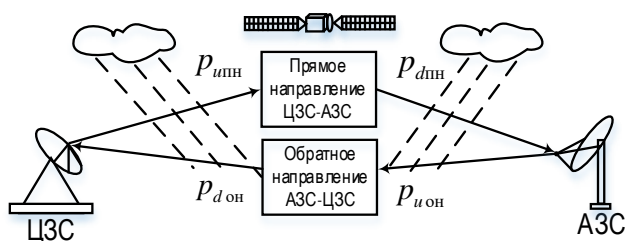


Рис. 3. Моделирование неготовности по дождевому фактору

На рисунке приняты следующие обозначения: $p_{ион}$ – процентная неготовность ПН по восходящему участку; $p_{дпн}$ – процентная неготовность ОН по

нисходящему участку; $p_{дпн}$ – процентная неготовность ПН по нисходящему участку; $p_{ион}$ – процентная неготовность ОН по восходящему участку. Перечисленные процентные неготовности по участкам определяют результирующую неготовность дуплексного направления:

$$T\% = \max(p_{ион}; p_{дон}) + \max(p_{дпн}; p_{ион}). \quad (4)$$

Определение процентных вероятностей может быть выполнено с использованием моделей прогнозирования потерь сигнала при распространении на трассах «Земля-космос» [10, 11].

Зоны обслуживания разных сетевых сегментов в пределах одного луча (одной группы сетевых сегментов) могут существенно отличаться значениями радиоклиматических параметров. Требования к готовности каждого сетевого сегмента также могут различаться.

Выражение (3) для пропускной способности ПН с учетом выполнения требований к готовности может быть представлено в виде:

$$R_{b,T^*\% \downarrow} = \frac{[Z_{N,p_{ион \downarrow}}^{-1}(\vec{X}) + Z_{N,p_{дпн \downarrow}}^{-1}(\vec{X}) + \sum_{i=1}^4 Z_{I,0i \downarrow}^{-1}(\vec{X})]^{-1}}{\left(\frac{E_b}{N_0}\right)^*}, \quad (5)$$

где $Z_{N,p_{ион \downarrow}}^{-1}(\vec{X})$ – отношение мощности сигнала к спектральной плотности шума с учетом неготовности на восходящем участке; $Z_{N,p_{дпн \downarrow}}^{-1}(\vec{X})$ – отношение мощности сигнала к спектральной плотности мощности шума с учетом неготовности на нисходящем участке; $Z_{I,0i \downarrow}^{-1}(\vec{X})$ – отношение мощности сигнала к спектральной плотности мощности учитываемой помехи; $T^*\%$ – допустимая неготовность.

Использование выражения (5) предполагает алгоритмическую реализацию процедуры поиска значения функционала, соответствующего выполнению условия $T\% = T^*\%$ для дуплексного направления. Эта процедура является базовой в предлагаемой модели. Аналогично для ОН:

$$R_{b,T^*\% \uparrow} = \frac{[Z_{N,p_{ион \uparrow}}^{-1}(\vec{X}) + Z_{N,p_{дон \uparrow}}^{-1}(\vec{X}) + \sum_{i=1}^3 Z_{I,0i \uparrow}^{-1}(\vec{X})]^{-1}}{\left(\frac{E_b}{N_0}\right)^*}, \quad (6)$$

где $Z_{N,p_{ион \uparrow}}^{-1}(\vec{X})$ – отношение мощности сигнала к спектральной плотности мощности шума с учетом неготовности на восходящем участке; $Z_{N,p_{дон \uparrow}}^{-1}(\vec{X})$ – отношение мощности сигнала к спектральной плотности мощности шума с учетом неготовности на нисходящем участке; $Z_{I,0i \uparrow}^{-1}(\vec{X})$ – отношение мощности сигнала к спектральной плотности мощности учитываемой помехи.

Заметим, что выражения (5) и (6) справедливы в пределах выполнения ограничений по доступ-

ному ресурсу. Ограничения по доступному частотному ресурсу для ПН представляется в виде:

$$df_{c\downarrow} = \frac{R_{b,T^*\% \downarrow}(1 + \alpha)}{(\log_2 M \cdot R_c)}, df_{c\downarrow} \leq B_{\downarrow}, \quad (8)$$

для ОН:

$$df_{c\uparrow} = \frac{R_{b,T^*\% \uparrow}(1 + \alpha)}{(\log_2 M \cdot R_c)}, df_{c\uparrow} \leq B_{\uparrow}, \quad (9)$$

где $df_{c\downarrow}$ и $df_{c\uparrow}$ – полосы частот, занимаемые сигналами в прямом и обратном направлении, соответственно; B_{\downarrow} и B_{\uparrow} – значения выделенного частотного ресурса в прямом и обратном направлении, соответственно; α – ролл-офф фактор; R_c – скорость кодирования; M – размерность созвездия сигналов для выбранной СКК.

Ограничения по доступному энергетическому ресурсу для ПН представляется в виде:

$$P_{\downarrow} \in [P_{\min\downarrow}; P_{\max\downarrow}], \quad (10)$$

для ОН:

$$P_{\uparrow} \in [P_{\min\uparrow}; P_{\max\uparrow}], \quad (11)$$

где P_{\downarrow} – мощность несущей сетевого сегмента в ПН; $P_{\min\downarrow}$, $P_{\max\downarrow}$ – максимальное и минимальное значения мощности несущей ПН (в зависимости от энергетического ресурса); P_{\uparrow} – мощность несущей на выходе АЗС; $P_{\min\uparrow}$, $P_{\max\uparrow}$ – минимальное и максимальное значение мощности несущей в ОН (определяется техническими характеристиками АЗС).

Перечень используемых СКК в соответствии со стандартом DVB-S2:

$$S \in \{S_i, \gamma_i, (E_b/N_0)_i^*\}, i = \overline{1, N}, \quad (12)$$

где S_i – вид используемой СКК; γ_i – спектральная эффективность используемой СКК.

Объединяя выражения (5–12) в общую систему уравнений, получим модель радиолинии спутниковой связи в виде функционала для гарантированной пропускной способности прямого и обратного направлений. Эта модель учитывает требования к готовности, достоверности, а также ограничения частотного и энергетического ресурса и связывает два направления показателем неготовности дуплексного направления.

Для оценки влияния помехи интермодуляции необходимо иметь в явном виде взаимосвязь показателей нелинейности и отношения сигнала к спектральной плотности мощности помехи нелинейности. Известны два показателя такого типа: в виде отношения мощности сигнала к мощности продуктов интермодуляции третьего порядка и в виде отношения спектральной плотности мощности сигнала к спектральной плотности мощности продуктов интермодуляции (в англоязычной литературе имеет название Noise Power Ratio). Первый пригоден для оценки помех по соседнему каналу для узкополосных сигналов. В модели рас-

сматривается второй показатель, так как он наилучшим образом соответствует условиям функционирования ВССпС и характеризует уровень продуктов нелинейности по всей полосе полностью загруженного транспондера [11].

Как ранее отмечалось, одной из особенностей ВССпС является ПИЧ на абонентской стороне (как в ПН, так и ОН), что позволяет увеличить пропускную способность. Помехи ПИЧ возникают между лучами с совпадающими частотами. Помехи обусловлены наличием у любого луча боковых лепестков. Гипотетическая модель для спутниковых систем высокоскоростного доступа различных диапазонов волн рассматривается в [3]. В предлагаемой модели ВССпС значение мощности сигнала к спектральной мощности помех от всех лучей с совпадающими частотами оценивается немногим более 90 дБ.

Для оценки влияния помех на значение пропускной способности суммарное значение плотности мощности помех рассматривается относительно спектральной плотности мощности тепловых шумов. В модели принято, что значение плотности всех внутрисистемных помех составляет 50 % относительно плотности мощности тепловых шумов.

При «жестких» требованиях к готовности по дождевому фактору сетевого сегмента ($T\%^* = 0,5 \%$) потери пропускной способности из-за внутрисистемных помех достигают 40 %, при более «мягких» ($T\%^* = 1 \%$) – до 50 %.

Результаты исследований на модели

Возможности модели иллюстрируются на рисунках 4–8, на которых для большей наглядности представлены расчетные значения пропускной способности только для ПН, а вклад ОН обусловлен его влиянием на неготовность дуплексного направления в целом.

Результаты оценки пропускной способности ПН в зависимости от выделенного частотного ресурса в соответствии с моделью (2, 5–12) представлены на рисунке 4.

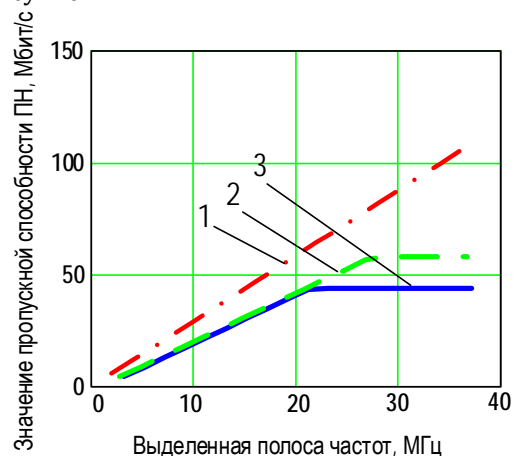


Рис. 4. Зависимость пропускной способности от выделенного частотного ресурса

Линия 1 отражает зависимость в соответствии с моделью (2). Увеличение пропускной способности возрастает при увеличении выделенного частотного ресурса. Линии 2, 3 – в соответствии с моделью (5–12). Линия 2 – при «жестких» требованиях к готовности $T^* = 0,5\%$, линия 3 – при более «мягких» требованиях $T^* = 0,75\%$. Приращение пропускной способности при увеличении доступной полосы ограничивается энергетическим ресурсом. Изменение требований к готовности приводит к изменению значения максимально достижимой пропускной способности. Так «смягчение» требований к готовности для данного примера способствует увеличению пропускной способности на 30 %.

Для проведения исследований на модели далее используются технические характеристики современных БРТК и земных станций: полоса пропускания транспондера ПН для ГрСС – 72 МГц. В ГрСС рассматривается четыре сетевых сегмента, мощность ЦЗС с учетом недоиспользования мощности по выходу в многосигнальном режиме – 50 Вт, соответственно, максимальная мощность на несущую составляет 12 Вт. Для ОН: максимальная мощность несущей на выходе усилителя мощности АЗС – 15 Вт, пропускная способность – 2 Мбит/с, используемая СКК QPSK 5/6. Требование к достоверности передачи информации для прямого и обратного направлений – $P_n = 10E - 7$.

Модель позволяет выявить ограничения по полосе и мощности, что очень важно в задачах распределения ресурса.

Рисунок 5 иллюстрирует ограничение по полосе, когда при увеличении мощности на несущую рост пропускной способности наблюдается до определенного предела, определяемого доступной полосой.

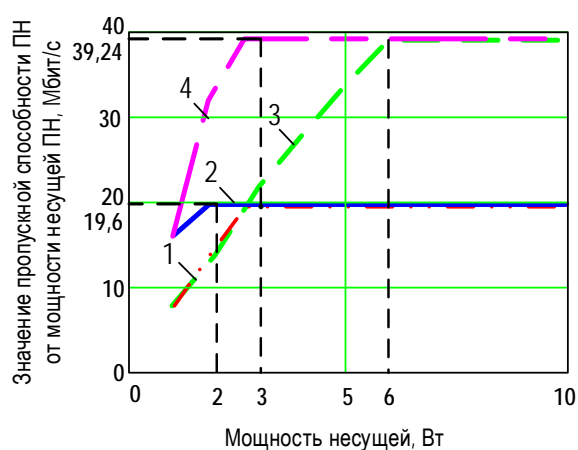


Рис. 5. Ограничение по полосе

Линии 1, 3 – для «жестких» требований к готовности ($T^* = 0,5\%$), линии 2, 4 – для «мягких» ($T^* = 3\%$). Затрат энергетического ресурса для достижения предельной пропускной способности при «мягких» требованиях нужно меньше. Прира-

щение пропускной способности ограничивается выделенным частотным ресурсом. Увеличение выделяемого частотного ресурса в 2 раза дает увеличение пропускной способности также в 2 раза. Так для сценариев 3, 4 предел пропускной способности выше, чем для сценариев 1, 2 в 2 раза.

Рисунок 6 иллюстрирует ограничение по мощности, когда при увеличении полосы на несущую рост пропускной способности наблюдается до определенного предела, определяемого доступной мощностью.

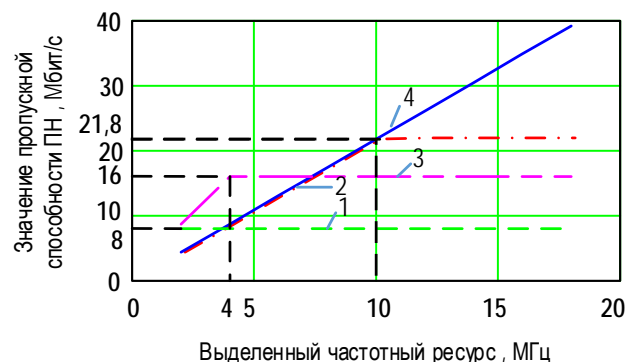


Рис. 6. Ограничение пропускной способности нехваткой энергетического ресурса

Применение энергетически эффективных СКК при «жестких» требованиях к готовности является более эффективным, чем частотно эффективных. Линия 1 при $T^* = 0,5\%$ и использовании 32 APSK 9/10, линия 2 при тех же требованиях к готовности и использовании 8 PSK 3/4. Поведение графика 1 «говорит» о недостаточности энергетического ресурса для приращения пропускной способности. Приращение частотного ресурса после определенного значения к приращению пропускной способности не приводит так как ее предел ограничивается выделенным энергетическим ресурсом. Даже при более «мягких» требованиях к готовности предел пропускной способности при применении частотно эффективных СКК ниже, чем при «жестких» требованиях и применении энергетически эффективных СКК. Для сравнения линия 2 – при $T^* = 0,5\%$ и СКК – 8 PSK 3/4, линия 3 – при $T^* = 3\%$ и СКК – 32 APSK 9/10. Очевидно, что применение СКК меньшего порядка является наиболее эффективным при достаточном частотном ресурсе, «мягких» требованиях к готовности: линия 4 при $T^* = 3\%$ и использовании 8 PSK 3/4.

Особенность предлагаемой модели подчеркивает зависимость пропускной способности от требований к готовности дуплексного направления, представлена на рисунке 7. Эта зависимость также отражает взаимосвязь прямого и обратного направлений.

Самое важное – резкое снижение пропускной способности при жестких требованиях к готовности ($T^* < 0,5\%$).

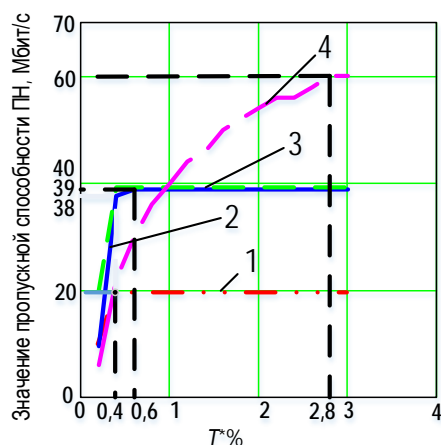


Рис. 7. Зависимость пропускной способности от требований к готовности

При умеренных требованиях к готовности увеличение доступного частотного ресурса в 2 раза способствует увеличению пропускной способности в 2 раза (линии 1, 2). При увеличении мощности несущей в 2 раза способствует достижению максимальной пропускной способности при более «жестких» требованиях к готовности (линии 2, 3). Использование СКК более высокого порядка требует «смягчения» требований к готовности (линии 3, 4).

Взаимосвязь ПН и ОН проявляется и в зависимости пропускной способности прямого направления от требований к пропускной способности обратного направления (рисунок 8).

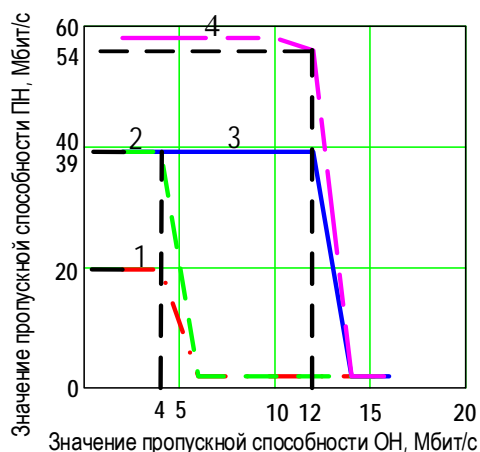


Рис. 8. Связь пропускной способности ПН с пропускной способностью ОН

Применение модели позволяет определить значение пропускной способности ОН, при котором значение пропускной способности ПН поддерживается на необходимом уровне с учетом выполне-

ния требований к готовности, а также «пороговое» значение пропускной способности ОН, при превышении которого значение пропускной способности ПН резко снижается.

Так «смягчение» требования к готовности без изменения выделенной полосы пропускания позволяют увеличить значение пропускной способности ПН: при использовании 8 PSK 3/4 в 2 раза (линии 1, 2) и при использовании 32 APSK 9/10 в 1,5 раза (линии 3, 4). Увеличение выделяемой полосы пропускания при одинаковых требованиях готовности способствует увеличению «порогового» значения пропускной способности ОН. Для сравнения линии 1, 3 при $T\%^* = 0,5\%$ и линии 2, 4 при $T\%^* = 3\%$. При увеличении полосы пропускания в 2 раза способствует увеличению «порогового» значения пропускной способности ОН в 3 раза.

Выводы

1. Предложенная модель радиолинии в составе ВССпС отличается включением в функционал для пропускной способности требования к готовности дуплексного направления спутниковой связи. В данной форме модель позволяет производить оценки не только пропускной способности линий связи и сетевых сегментов, но и решать задачи распределения ЧЭР для достижения целей обеспечения заданной пропускной способности и перераспределения ЧЭР.

2. Разработанная модель связывает варьируемые параметры – мощность несущей, полосу пропускания сетевого сегмента, вид используемой СКК и контролируемые параметры – пропускную способность прямого и обратного направлений спутниковой связи в виде функционала (5–12).

3. Включение в модель ограничивающих условий по допустимой неготовности направления связи предполагает алгоритмизацию расчетов максимальной пропускной способности прямого и обратного направлений связи.

4. Использование ограничивающих условий в явном виде позволяет реализовать наиболее полное использование выделяемого ЧЭР.

5. Результаты, полученные на основе разработанной модели, говорят об адекватности и возможности ее использования при решении задач распределения ЧЭР.

Список используемых источников

1. Inigo P., Vidal O., Roy B., Alberty E., Metzger N., Galinier D., Anzalchi J., Huggins G., Stirland S. Review of terabit/s satellite, the next generation of HTS systems // 7th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 13th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC). 2014. PP. 318–322. DOI:10.1109/ASMS-SPSC.2014.6934562.
2. Fenech H., Amos V., Hirsch A., Soumpholphakdy V. VHTS systems: Requirements and evolution // 11th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). 2017. PP. 2409–2412. DOI:10.23919/EuCAP.2017.7928175.

3. Рекомендации МСЭ-RS.1782 (2007). Возможности для глобального широкополосного доступа в интернет для систем фиксированной спутниковой службы.
4. Tri T. Ha. Digital Satellite Communications (2nd addition). New York: McGraw-Hill, 1990. 370 p.
5. Marshall J., Heissler J. Satcom loading analysis with heterogeneous gain states // Proceeding of MILCOM, Anaheim, CA. 2002. PP. 136–141. DOI:10.1109/MILCOM.2002.1180428.
6. Marshall J., Jo K. Y. Non-homogeneous gain state optimization for transponding satellite communications // IEEE Military Communications Conference (MILCOM–2003), Boston, US. 2003. PP. 517–522. DOI:10.1109/MILCOM.2003.1290156.
7. Рекомендации ИТУ-TRec. G.821 (12/2002).
8. Northrop G. M. Aids for the Gross Design of Satellite Communication Systems // Satellite communication systems. 1966.
9. Волков Л. Н., Немировский М. С., Шинаков Ю. С. Системы цифровой радиосвязи. Базовые методы и характеристики: учеб. пособие. М: Эко-Трендз, 2005. 392 с.
10. Рекомендация МСЭ-R P.618-12 (07/2015). Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, необходимые для проектирования систем связи Земля-космос.
11. Peters R., Woolner P., Ekelman E. Analytic Calculation of Noise Power Robbing, NPR and Polarization Isolation Degradation // 26th International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC), San Diego, CA. 2008. DOI:10.2514/6.2008-5509.

* * *

THE MODEL OF THE SATELLITE COMMUNICATION RADIO LINK IN THE HIGH-SPEED SATELLITE SYSTEM

V. Zhironov¹, A. Orlov², A. Smirnov²

¹Radio Research and Development Institute (LONHIR),
St. Petersburg, 192029, Russian Federation

²Telecommunications Military Academy,
St. Petersburg, 194064, Russian Federation

Article info

Article in Russian

For citation: Zhironov V., Orlov A., Smirnov A. The Model of the Satellite Communication Radio Link in the High-Speed Satellite System // Proceedings of Telecommunication Universities. 2018. Vol. 4. Iss. 3. PP. 45–53.

Abstract: *The article is devoted to the model of the satellite communication radio link in the high-speed satellite system. Unlike particular models, which take into account thermal noise, intersystem and adjacent interference, and meeting of readiness requirements with rainfall availability is controlled after the system reserve assessment, in the proposed model, the requirements for availability are explicitly taken into account in the form of a constraint. This makes it possible to set and solve the problems of optimizing the distribution of the frequency-energy resource of central earth stations and on-board retransmission complexes by the criterion of maximum bandwidth while meeting the requirements for the reliability of information transmission and the readiness of the duplex direction of satellite communications.*

Keywords: *satellite radio link, frequency-energy resource, earth station, on-board retransmission complex, high-speed satellite system.*