

Эффективность использования частотно-энергетического ресурса в перспективных высокоскоростных спутниковых системах связи

В. А. Жиров, начальник научно-исследовательского отдела систем радиосвязи филиала ФГУП НИИР – ЛОНИИР, профессор,

д.т.н.; vzhspb@loniir.ru

С. Г. Зайцев, начальник научно-исследовательской лаборатории спутниковых систем радиосвязи филиала ФГУП НИИР –

ЛОНИИР, доцент, к.т.н.; zsg@loniir.ru

А. Е. Орлов, преподаватель кафедры организации связи Военной академии связи им. Маршала Советского Союза

С.М. Буденного; vorl-2210@mail.ru

УДК 621.391

Аннотация. Рассмотрена высокоскоростная спутниковая система связи, функционирующая в Ka/Q-диапазонах частот. В таких системах крайне важным является эффективное использование частотно-энергетического ресурса центральных земных станций и бортовых ретрансляционных комплексов. Эффективное использование ресурса достигается его распределением, соответствующим условиям применения. Предлагается методика распределения ресурса, отличающаяся упорядоченным направленным поиском решения. Важным аспектом методики является выявление максимума пропускной способности по используемой сигнально-кодовой конструкции. Представлены результаты реализации методики в прикладных задачах, связанных с планированием спутниковой связи.

Ключевые слова: центральная земная станция, абонентская земная станция, бортовой ретрансляционный комплекс, частотно-энергетический ресурс, готовность, достоверность, пропускная способность, высокоскоростная спутниковая система.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в России и во всем мире создаются высокоскоростные спутниковые системы (ВССпС) связи в Ka/Q-диапазонах частот с использованием космических аппаратов (КА) на геостационарной орбите. Эти системы обслуживают обширные территории, предоставляя абонентам сервисы широкополосного доступа к удаленным инфокоммуникационным ресурсам. Достигается это за счет применения на КА многолучевых антенн, что обеспечивает высокую эквивалентную изотропно-излучаемую мощность (ЭИИМ) и добротность приемных систем КА в зонах обслуживания абонентов, и тем самым создаются условия для использования абонентами относительно простых терминалов. Сети строятся по топологии «звезда» с центральной земной станцией (ЦЗС), имеющей антенну диаметром до 13 м. Доступный частотный ресурс позволяет поддерживать высокую скорость передачи данных в направлении от ЦЗС к абонентским земным станциям (АЗС). Необходимость обслуживания больших территорий с разными физико-географическими и климатическими условиями и с разной плотностью пользователей, чьи потребности в пропускной способности могут варьироваться в широких пределах, предопределяет различные требования к частотно-энергетическому ресурсу (ЧЭР) в интересах абонентских групп, объединяемых в сетевые сегменты.

При большой территории обслуживания доступный ЧЭР накладывает ограничения на пропускную способность системы, и актуальной является задача его эффективного использования, а также рационального распределения между сетевыми сегментами. Эффективное использование ресурса подразумевает максимизацию пропускной способности отдельных сетевых сегментов на выделенном ресурсе. В общем случае может потребоваться решение более сложной задачи максимального удовлетворения требований по пропускной способности сетевых сегментов с учетом приоритетов. При этом необходимо проанализировать большое количество разных вариантов распределения, т.е. задача является переборной. В статье предлагается ее упрощение на основе модели спутниковой радиолинии, которая дает значения пропускной способности, гарантированные для заданных требований по достоверности и готовности дуплексного направления связи [1]. Использование модели позволяет находить области решений с максимальной пропускной способностью, в том числе и по сигнально-кодовой конструкции (СКК). Найденная граница может использоваться для решения широкого круга задач распределения ресурсов системы.

Таблица 1
Сигнально-кодовые конструкции для прямого направления

СКК	QPSK			8PSK			16APSK			32APSK		
	1/4	3/5	5/6	3/5	3/4	9/10	2/3	5/6	8/9	3/4	5/6	9/10
γ_f , (бит/с)/Гц	0,48	1,16	1,62	1,74	2,18	2,62	2,58	3,22	3,44	3,62	4,03	4,36
$\gamma_e = (E_b/N_0)^*$, дБ	1,1	1,9	3,3	3,7	4,8	7,1	5,4	5,4	7,8	7,6	8,7	10,1

ДОСТОВЕРНОСТЬ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ И ГОТОВНОСТЬ НАПРАВЛЕНИЯ СВЯЗИ В УСЛОВИЯХ ОСАДКОВ

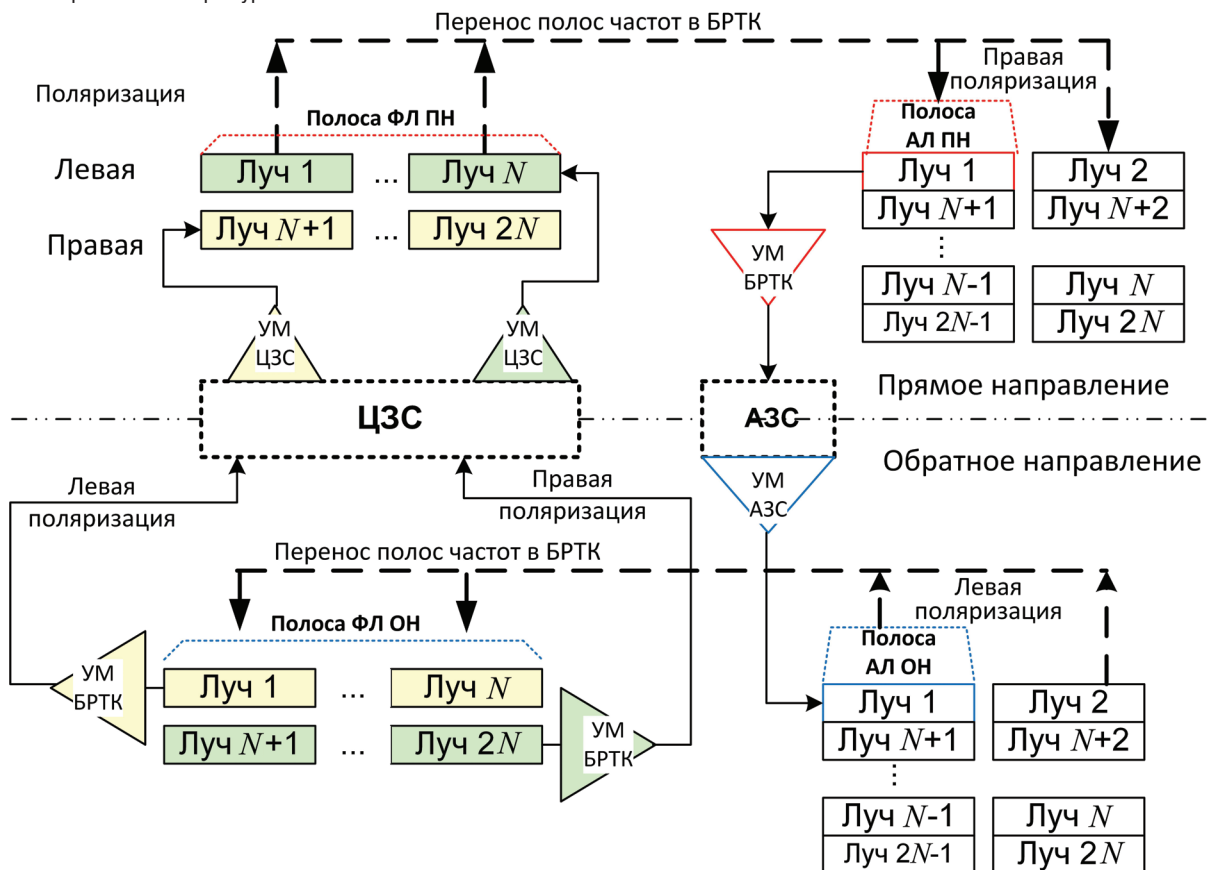
Достоверность передачи информации в системах спутникового доступа характеризуется вероятностью ошибочного приема бита P_b или информационного пакета P_n . Требования к достоверности задаются условиями $P_b \leq P_b^*$ или $P_n \leq P_n^*$, где P_b^* и P_n^* – максимально допустимые значения вероятности ошибочного приема бита и информационного пакета соответственно. Их выполнение обеспечивается достижением требуемого отношения энергии сигнала на бит к спектральной плотности мощности шума $(E_b/N_0)^*$ для конкретной СКК.

В системах рассматриваемого класса широко используются стандартизованные форматы сигналов в прямом (ПН) и обратном направлениях (ОН) DVB-S2 и DVB-

RCS, предполагающие использование определенных наборов СКК. В качестве примера применительно к прямому направлению (от ЦЗС к АЗС) можно ориентироваться на набор СКК, соответствующий стандарту DVB-S2, приведенный в описании модема CDM-760 компании Comtech [2] (табл. 1). В табл. 1 перечислены сами СКК и для каждой из них указаны значения спектральной γ_f и энергетической γ_e эффективности (приведенные значения γ_e соответствуют $P_n^* = 10^{-7}$).

Неготовность, вызываемая выпадением дождя, является существенным фактором, влияющим на построение и функционирование систем в Ka/Q-диапазонах частот, особенно для России при ее удаленности от экватора. Неготовность будем трактовать в соответствии с [3] как состояние системы передачи продолжительностью не менее 10 с, когда наблюдаются сильно пораженные

Рисунок 1
Частотно-энергетический ресурс



ошибками секунды, при этом переход в состояние готовности предполагает наличие периода с несильно пораженными секундами продолжительностью более 10 с.

Будем рассматривать дуплексное направление связи ЦЗС–АЗС. К неготовности по дождю может приводить превышение некоторых предельно допустимых величин его интенсивности на стороне ЦЗС или/и АЗС, следствием которого является уменьшение отношения сигнал/шум ниже допустимого в прямом или/и обратном направлении передачи. Предполагая, что нарушение работы из-за одновременного воздействия дождя в районах ЦЗС и АЗС маловероятно, значение показателя неготовности для дуплексного направления связи можно выразить следующим образом:

$$T\% = \max(T_{1\text{ПН}}, T_{2\text{ОН}}) + \max(T_{2\text{ПН}}, T_{1\text{ОН}}),$$

где $T_{1\text{ПН}}$ и $T_{2\text{ПН}}$ – процентные неготовности ПН для восходящего и нисходящего его участков соответственно; $T_{1\text{ОН}}$ и $T_{2\text{ОН}}$ – процентные неготовности ОН для восходящего и нисходящего его участков соответственно. Очевидно, должно выполняться условие $T^* \geq T\%$, где T^* – максимально допустимая неготовность по дождю. Далее все неготовности рассматриваются как среднегодовые.

Определение процентных вероятностей выполняется с использованием моделей прогнозирования потерь сигнала при распространении на трассах «Земля–Космос» [4].

ЧАСТОТНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РЕСУРС И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

Поясним используемое в статье понятие частотно-энергетического ресурса с помощью рис. 1. Будем придерживаться упрощенной для наглядности, но в то же время достаточно общей модели построения системы.

На рис. 1 показано использование мощности и полос частот в прямом (верхняя половина рисунка) и обратном (нижняя половина рисунка) направлениях в рамках принятой упрощенной модели.

В прямом направлении на ЦЗС используются два усилителя мощности (УМ ЦЗС) – по одному на каждую поляризацию. Сигналы, направляемые в абонентские линии прямого направления (АЛ ПН), перед передачей по фидерной линии прямого направления (ФЛ ПН) мультиплексируются по частоте, и каждый УМ одновременно усиливает все сигналы, которые потом попадут в N лучей. Таким образом, энергетический ресурс ЦЗС в фидерной линии по одной поляризации – это максимально допустимая рабочая мощность УМ для данной поляризации в рабочей точке. Частотный ресурс ЦЗС в фидерной линии по одной поляризации (полоса ФЛ ПН) – это сумма полос частот N лучей (полос АЛ ПН).

Композитный сигнал из фидерной линии в бортовом ретрансляционном комплексе (БРТК) демультиплексируется, и каждая полоса переносится по определенной

схеме в свой луч. Схема переноса определяется построением БРТК, особенностями повторного использования частот и т.д. В нашей модели принято повторное использование частот с четырехцветной раскраской. Абонентские линии от КА до АЗС в пределах одного луча обслуживаются одним УМ (на рис. 1 УМ для других лучей не показаны), т.е. в нашей модели принята схема с отдельными транспондерами.

В обратном направлении сигналы абонентских линий обратного направления (АЛ ОН) от АЗС в пределах одного луча попадают в полосу данного луча. Полосы приемных лучей для АЛ ОН в БРТК переносятся по определенной схеме и мультиплексируются по частоте для передачи по фидерной линии в сторону ЦЗС. В нашем случае один групповой сигнал, образованный N полосами из абонентских лучей, усиливается одним усилителем мощности БРТК и передается в одной поляризации. Второй групповой сигнал образуется аналогично и передается на ортогональной поляризации.

Поясним некоторые особенности разделения энергетического и частотного ресурса в используемой модели.

Прямое направление. Мощность выходного усилителя ЦЗС (УМ ЦЗС) делится между несущими для всех лу-

чей $\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} P_{ij} \leq P_{\text{рЦЗС}}$, где $P_{\text{рЦЗС}}$ – максимально допустимая

рабочая мощность усилителя ЦЗС; P_{ij} – мощность j -й несущей в i -ом луче; N – количество лучей, обслуживаемых усилителем; n_i – количество несущих в i -ом луче (в общем случае оно может быть разным в разных лучах). Таким образом, $P_{\text{рЦЗС}}$ – это энергетический ресурс ЦЗС в ФЛ ПН. Заметим, что он может разделяться как между несущими сетевого сегмента одной группы, так и между группами сетевых сегментов (ГрСС) или лучами.

В данной упрощенной модели парциальные полосы ФЛ ПН для всех лучей одинаковы и совпадают с полосами в лучах, доступных для АЛ ПН: $B_{i\text{ФЛПН}} = B_{i\text{АЛПН}}$, $i = 1, \dots, N$, где $B_{i\text{ФЛПН}}$ и $B_{i\text{АЛПН}}$ – парциальные полосы i -го луча в фидерной и абонентской линиях прямого направления соответственно. Это справедливо и для обратного направления: $B_{i\text{ФЛОН}} = B_{i\text{АЛОН}}$, $i = 1, \dots, N$. Более того, будем полагать, что все парциальные полосы одинаковы: $B_{i\text{ФЛПН}} = B_{i\text{АЛПН}} = B_{i\text{ФЛОН}} = B_{i\text{АЛОН}}$, $i = 1, \dots, N$.

Частотный ресурс ЦЗС в ФЛ ПН, т.е. вся полоса $B_{\text{ФЛПН}}$ также разделяется между несущими для всех лучей

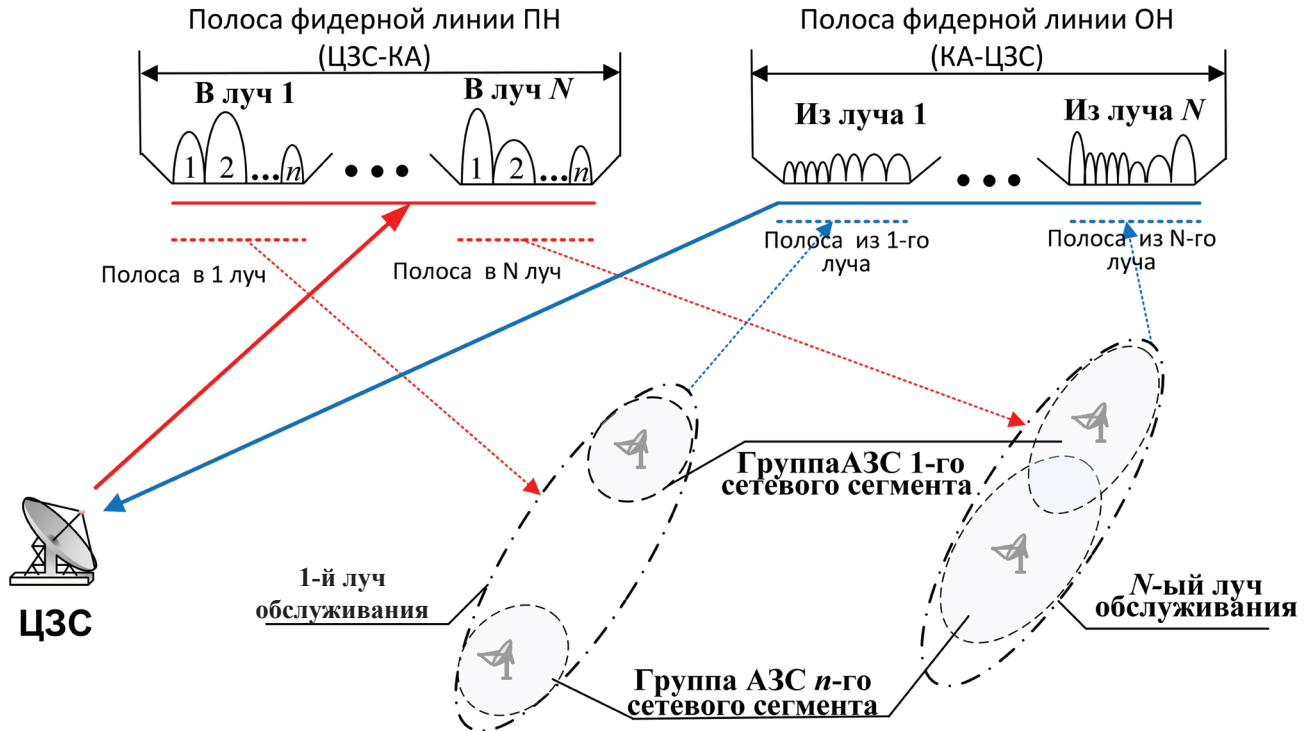
$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} B_{ij} \leq B_{\text{ФЛПН}}$, где B_{ij} – парциальная полоса, занимаемая

j -й несущей ЦЗС в i -ом луче, но с более существенными ограничениями, так как несущие для одного луча должны укладываться в соответствующую парциальную

полосу, т.е. $\sum_{j=1}^{n_i} B_{ij} \leq B_{i\text{ФЛПН}}$ для каждого $i = 1, \dots, N$.

В абонентской линии прямого направления энергетический ресурс определяется мощностью выходного

Рисунок 2
Распределение частотно-энергетического ресурса



усилителя транспондера ПН (УМ БРТК) $P_{i\text{тр ПН}}$, которая делится между несущими группы сетевых сегментов

луча $\sum_{j=1}^{n_i} P'_{ij} \leq P_{i\text{тр ПН}}, i = 1, \dots, N$, где P'_{ij} – мощность, приходя-

щаяся на j -ю несущую в пределах i -й группы (луча). Она пропорциональна мощности P_{ij} , выделяемой для этой несущей на ЦЗС, но также зависит от параметров линии ЦЗС–КА и коэффициента усиления транспондера.

Частотный ресурс для АЛ ПН одного луча равен соответствующей парциальной полосе фидерной линии: $B_{i\text{ АЛ ПН}} = B_{i\text{ ФЛ ПН}}, i = 1, \dots, N$. Он распределяется между несущими с полосами B_{ij} на ЦЗС, причем обязательно

должно выполняться условие $\sum_{j=1}^{n_i} B_{ij} \leq B_{i\text{ АЛ ПН}}, i = 1, \dots, N$.

Весь частотный ресурс АЛ ПН равен $\sum_{i=1}^N B_{i\text{ АЛ ПН}}$.

Обратное направление. Обычно АЗС работают на передачу в односигнальном режиме. Мощность излучения $p_{ij}, i = 1, \dots, N$, где j – номер АЗС без учета деления на абонентские группы, ограничивается максимально допустимой рабочей мощностью УМ АЗС в односигнальном режиме $p_{p\text{ АЗС}}$.

Частотный ресурс для АЗС одного луча – это полоса частот, разрешенная для использования всеми АЗС в зоне обслуживания луча. В одном луче работает группа сетевых сегментов, а каждый сетевой сегмент включа-

ет свою абонентскую группу. С учетом этого варианты использования частотного ресурса могут быть разными: использование всего ресурса всеми абонентскими группами (групповое использование) или фиксированное разделение его между группами. В любом случае частотные назначения для АЗС выполняет ЦЗС с учетом приведенного выше ограничения.

Если АЗС работают в режиме предоставления ресурса по требованию, то загрузка транспондера обратного направления меняется во времени, поэтому условие $\sum_{j=1}^{n_i} b_{ij} \leq B_{i\text{ АЛ ОН}}, i = 1, \dots, N$, где b_{ij} – полоса j -й несущей в i -м

луче, а m_i – количество несущих в i -м луче, относится к определенному моменту времени, но с течением времени меняется.

Энергетический ресурс ФЛ ОН по одной поляризации определяется мощностью выходного усилителя транспондера ОН $P_{\text{тр ОН}}$, которая делится между всеми несущими АЗС из всех лучей, закрепленных за данным

транспондером: $\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{m_i} p'_{ij} \leq P_{\text{тр ОН}}$, где p'_{ij} – мощность, при-

ходящаяся на j -ю несущую в i -м луче, которая прямо пропорциональна мощности j -й АЗС p_{ij} . Она также зависит от параметров линии АЗС–КА и коэффициента усиления транспондера ОН.

Частотный ресурс ФЛ ОН по одной поляризации равен сумме полос абонентских лучей: $\sum_{i=1}^N B_{i\text{ АЛ ОН}}$. Загрузка

Таблица 2

Исходные данные для расчетов

ЭИИМ ЦЗС для группы сетевых сегментов, дБВт	до 86
ЭИИМ АЗС, дБВт	до 64
Информационная скорость в ОН, Мбит/с	до 2
СКК для ОН	QPSK 5/6
Допустимая вероятность ошибочного приема информационного пакета	10^{-7}
Допустимая неготовность дуплексного направления, %	1,3

парциальных полос определяется загрузкой полос абонентских лучей.

В общем случае рассмотренный ЧЭР необходимо распределять между сетевыми сегментами с учетом целого ряда факторов, таких как требования к сервисам со стороны абонентских групп, обслуживаемых каждым сетевым сегментом, емкости абонентских групп, приоритетности, достоверности передачи информации, готовности по дождю и др. Частные случаи задачи распределения ЧЭР поясняет рис. 2, на котором показаны две группы сетевых сегментов: одна работает в 1-м луче, другая — в N -м.

Сценарий для 1-го луча следующий: имеется несколько регионов с разными климатическими условиями и разной абонентской емкостью. Тогда для этого луча необходимо иметь соответствующее количество сетевых сегментов и несущих в ПН с разной мощностью и полосой частот, отвечающих этим различиям.

Сценарий для N -го луча: имеется несколько типов разноприоритетных абонентских групп, распределенных на пересекающихся территориях в пределах луча и предъявляющих разные требования к телекоммуникационным сервисам. В этом случае для данного луча также необходимо иметь соответствующее количество сетевых сегментов и несущих в ПН с разной мощностью и полосой частот.

В обоих случаях выделяемый энергетический ресурс в интересах каждого сегмента должен включать запас на выполнение требований готовности по дождю.

Рассмотрим два примера распределения ЧЭР.

Первый сценарий простейший: в луче можно выделить четыре отличающиеся по климатическим условиям зоны. Формируем четыре сетевых сегмента в пределах

луча для абонентских групп в этих зонах. Требования к пропускной способности для каждого сетевого сегмента одинаковые (указаны в табл. 3). Выделяемые для каждого сегмента полосы и СКК также одинаковые. В этом случае, очевидно, требования к запасу мощности для каждой несущей на обеспечение готовности по дождю разные. Требуется определить минимально достаточную для выполнения требований мощность ЦЗС на каждую несущую. Решим задачу простым подбором мощности на несущую путем ее наращивания до момента, когда будет выполнено требование к пропускной способности и готовности. На каждом шаге наращивания мощности проверяем условие непревышения ресурса суммарной мощностью всех сетевых сегментов. Это пример индивидуального использования ресурса, когда задача решается по каждому сегменту относительно независимо (за исключением указанного ограничения).

Второй сценарий: в луче имеются четыре абонентские группы, формирующие разные требования к пропускной способности для сетевых сегментов (указаны в табл. 3). Формируем четыре сетевых сегмента в пределах луча для этих абонентских групп. Допускаются разные полосы и мощности для каждого сетевого сегмента, но так, чтобы суммарная мощность и суммарная полоса не превысили доступный ресурс. Предполагается выбор СКК из имеющегося набора (см. табл. 1). Для каждого сетевого сегмента требуется подобрать тройку «мощность–полоса–СКК», для которой выполняются требования к пропускной способности и готовности. Здесь речь идет именно о подборе, иллюстрирующем трудоемкость задачи. Значения мощности и полосы должны быть по возможности «минимально достаточными». Кавычки здесь поставлены, чтобы подчеркнуть условность этого понятия. Поясним его смысл алгоритмом подбора.

На первом шаге образуем начальное распределение мощности и полосы поровну между всеми несущими. Проверяем выполнение требований к пропускной способности и готовности по дождю по каждому сегменту. Они в данном случае выполняются для сегментов с номерами 1, 3 и 4 и не выполняются для сегмента 2. Начинаем процедуру перераспределения ресурса. Уменьшаем мощность и полосу для несущей сегмента 1 шагами с перебором всех СКК и проверкой на выполнение тре-

Таблица 3

Результаты распределения ЧЭР

Значения функциональных характеристик	Требования к пропускной способности одинаковые				Требования к пропускной способности отличаются			
	Номер сетевого сегмента				Номер сетевого сегмента			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Требования к пропускной способности, Мбит/с	25	25	25	25	20	48	25	45
Мощность несущей $P_{\text{нес}}$, Вт	4,3	4,2	1,5	1,2	10	24,9	6,2	8,8
Полоса сетевого сегмента, МГц	18				9,6	32	11,1	18
СКК	QPSK-5/6				8PSK-5/6	8PSK-3/5	8PSK-9/10	32APSK-3/5

бований к пропускной способности и готовности. Шаг, на котором обнаруживается невыполнение какого-либо требования, является сигналом к остановке процедуры. Фиксируем пару необходимой мощности и полосы, излишки перераспределяем в общий пул. Так же поступаем с сегментами 3 и 4. Высвободившуюся мощность и полосу используем для пошагового наращивания мощности и полосы в интересах сегмента 2. На каждом шаге наращивания выполняем перебор СКК и проверку на выполнение требований к пропускной способности и готовности. Шаг, на котором обнаруживается выполнение требований — сигнал остановки.

Общим для обоих сценариев является то, что требуемая информационная скорость в обратном направлении фиксируется (2 Мбит/с). Технические характеристики БРТК, ЦЗС и АЗС соответствуют рекомендации ITU-R [5]. Исходные данные для расчетов представлены в табл. 2.

Результаты решения задач по обоим сценариям представлены в табл. 3. Расчеты проводились с использованием САПР «Балтика-СМ» [6].

По первому сценарию назначение одинаковой мощности для несущих всех сетевых сегментов нерационально, различия требуемой мощности между первой и четвертой несущей составляет более 3,5 раз. Этот пример подчеркивает актуальность задачи распределения, адекватного климатическим условиям.

По второму сценарию назначение одинаковой мощности и полосы для всех сегментов нерационально по причине невыполнения требований к пропускной способности вторым сегментом и излишках мощности и полосы в остальных трех сегментах. Для выполнения всех требований приходится искать решение, перебирая множество вариантов. По мере увеличения числа групп сетевых сегментов и количества сегментов в группах наблюдается экспоненциальный рост числа возможных вариантов.

Поэтому для упрощения решения задачи в общем случае разработана методика, реализующая направленный поиск. Ее основой является модель радиолинии, кратко представленная ниже (ее подробное изложение приведено в [1]).

МОДЕЛЬ СПУТНИКОВОЙ РАДИОЛИНИИ

Модель спутниковой радиолинии в составе ВССП связи представляет собой систему из двух связанных функционалов для пропускной способности в прямом и обратном направлениях, достигаемой при выполнении требований к достоверности передачи информации и готовности дуплексного направления связи.

Выражение для пропускной способности в ПН имеет вид

$$R_{\text{ПН}, T^{*\%}} = \left[Z_{\text{ПН}, T^{*\%}}^{-1} + Z_{\text{2ПН}, T^{*\%}}^{-1} + \sum_{i=1}^4 Z_{\text{ПН}i}^{-1} \right]^{-1} / \gamma_{\text{ПН}}, \quad (1)$$

где $Z_{\text{ПН}, T^{*\%}}$, $Z_{\text{2ПН}, T^{*\%}}$ — отношение мощности сигнала к спектральной плотности мощности шума (ОСШ) соответственно для восходящего и нисходящего участков в ПН, удовлетворяющие условию $T^{*\%} \geq \max(T_{\text{ПН}}; T_{\text{2ОН}}) + \max(T_{\text{2ПН}}; T_{\text{1ОН}})$, $T^{*\%}$ — допустимая неготовность дуплексного направления;

$\gamma_{\text{ПН}} = \gamma_e$ — требуемое отношение энергии сигнала на бит к спектральной плотности шума и помех в ПН (см. табл. 1);

$Z_{\text{ПН}i}$, $i = 1, 2, 3, 4$ — отношение мощности сигнала к спектральной плотности помех для составляющей: $Z_{\text{ПН1}}$ — отношение мощности сигнала к спектральной плотности помехи интермодуляции на выходе передатчика ЦЗС, $Z_{\text{ПН2}}$ — отношение мощности сигнала к спектральной плотности помехи интермодуляции на выходе усилителя мощности транспондера, $Z_{\text{ПН3}}$ — отношение мощности сигнала к спектральной плотности помехи кросс-поляризации на восходящем участке ПН, $Z_{\text{ПН4}}$ — отношение мощности сигнала к спектральной плотности помехи повторного использования частот.

$$R_{\text{бОН}, T^{*\%}} = \left[Z_{\text{1ОН}, T^{*\%}}^{-1} + Z_{\text{2ОН}, T^{*\%}}^{-1} + \sum_{i=1}^3 Z_{\text{ОН}i}^{-1} \right]^{-1} / \gamma_{\text{бОН}}, \quad (2)$$

где $Z_{\text{1ОН}, T^{*\%}}$, $Z_{\text{2ОН}, T^{*\%}}$ — ОСШ для восходящего и нисходящего участков в ОН соответственно, удовлетворяющие условию $T^{*\%} \geq \max(T_{\text{1ПН}}; T_{\text{2ОН}}) + \max(T_{\text{2ПН}}; T_{\text{1ОН}})$;

$\gamma_{\text{бОН}}$ — требуемое отношение энергии сигнала на бит к спектральной плотности шума и помех в ОН;

$Z_{\text{ОН}i}$, $i = 1, 2, 3$ — отношение мощности сигнала к спектральной плотности помех для составляющей: $Z_{\text{ОН1}}$ — отношение мощности сигнала к спектральной плотности помехи интермодуляции на выходе усилителя мощности транспондера в ОН, $Z_{\text{ОН2}}$ — отношение мощности сигнала к спектральной плотности помехи кросс-поляризации в фидерной линии ОН, $Z_{\text{ОН3}}$ — отношение мощности сигнала к спектральной плотности помехи повторного использования частот абонентской линии ОН.

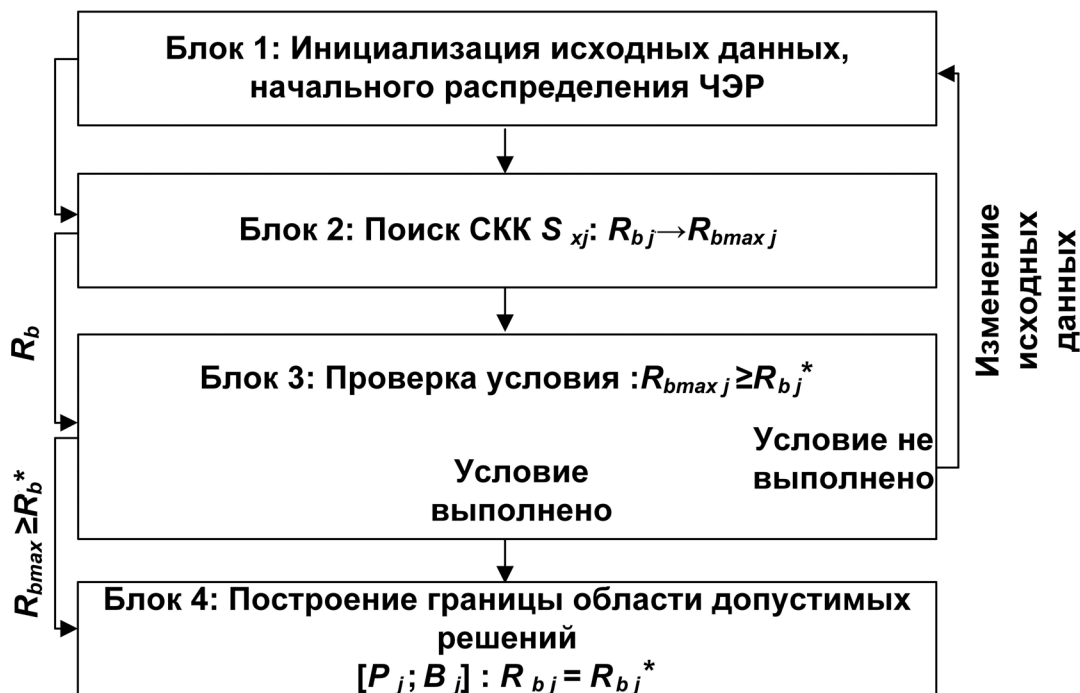
Значения $Z_{\text{ПН}, T^{*\%}}$, $Z_{\text{2ПН}, T^{*\%}}$, $Z_{\text{1ОН}, T^{*\%}}$ и $Z_{\text{2ОН}, T^{*\%}}$ вычисляются стандартным образом с использованием моделей шумов и помех при прямой ретрансляции. Они определяются функциональными характеристиками ЦЗС, АЗС и БРТК для рассматриваемого режима работы, в том числе мощностью ЦЗС, БРТК и режимом транспондера.

Модель предполагает алгоритмическую реализацию процедуры поиска значений функционалов, соответствующих выполнению условия $T\% = T^{*\%}$.

МЕТОДИКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕСУРСА

Постановка задачи распределения ЧЭР в пределах одной ГрСС предполагает нахождение значений «мощность–полоса–СКК» $\{P_j \leq P_{\text{max}}, B_j \leq B_{\text{max}}, S_{xy}; j = \overline{1, N}\}$, где P_j

Рисунок 3
Методика распределение ЧЭР



и P_{maxj} — соответственно распределенная и максимально допустимая мощности на выходе ЦЗС для j -го сетевого сегмента; B_j и B_{maxj} — соответственно распределенная и максимально доступная полосы для j -го сегмента; S_{xj} — СКК из множества $x \in X$, которая максимизирует пропускную способность $R_{бпн, T^* \%}$ на выделенном ресурсе для каждого сетевого сегмента при условии, что $R_{бпн, T^* \%} \geq R_{бпн, T^* \%}^*$, где $R_{бпн, T^* \%}^*$ — требуемая пропускная способность в ПН. Требование к пропускной способности ОН фиксируется $R_{бон, T^* \%} \geq R_{бон, T^* \%}^*$, где $R_{бон, T^* \%}^*$ — требуемая пропускная способность в ОН.

Схема предлагаемой методики показана на рис. 3.

Порядок использования методики заключается в следующем. В Блоке 1 (см. рис. 3) производится инициализация исходных данных: мощности несущей сетевого сегмента, доступной полосы, требований к пропускной способности, достоверности информационного обмена, готовности, множества СКК. В Блоке 2 из разрешенного множества осуществляется поиск СКК, при

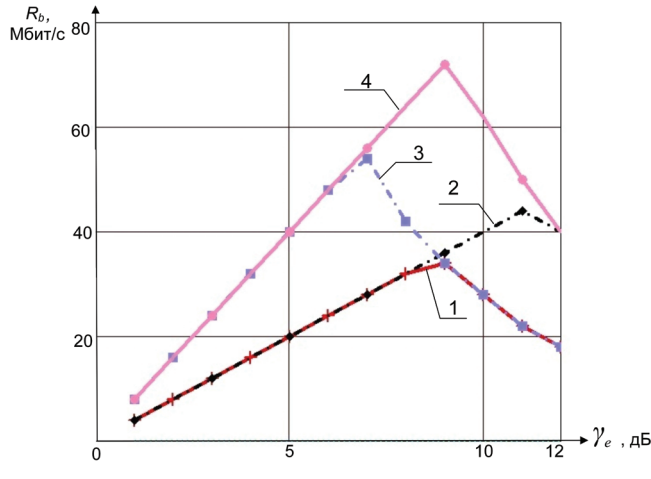
которой достигается максимальная пропускная способность. В Блоке 3 проверяется выполнение требований к пропускной способности для каждого сегмента. При невыполнении требований производится: а) при индивидуальном использовании — изменение требований; б) при групповом использовании — перераспределение ресурса между сетевыми сегментами одной группы. При выполнении требований в Блоке 3 реализуется построение границы области допустимых решений в Блоке 4.

Структура методики и порядок нахождения решения обосновываются тем, что при использовании модели радиолинии в виде функционалов (1) и (2) зависимость пропускной способности от γ_e , соответствующей выбираемой СКК, имеет максимум. Исходные данные для моделирования и значения максимально достижимой пропускной способности направлений связи представлены в табл. 4. На рис. 4 в графическом виде для различных типов СКК показаны зависимости достижимой пропускной способности направления связи от

Таблица 4
Исходные данные и результаты моделирования

Номер направления	Характеристики направления			R_{bmax} , Мбит/с	Номер графика на рис. 4
	T^* , %	$P_{пн}$, Вт	$B_{пн}$, МГц		
1	0,5	12,4	9	36	1
2	3	12,4	9	44	2
3	0,5	12,4	18	54	3
4	3	12,4	18	72	4

Рисунок 4
Зависимость пропускной способности от γ_e (СКК)



требуемого отношения сигнал/шум.

Графики на рис. 4 иллюстрируют рост пропускной способности при переходе к более частотно-эффективному СКК до того момента, когда начинается нехватка мощности (точки перегиба в графиках). Зависимость пропускной способности от γ_e показывает, что ее максимум достигается в случае, когда имеет место баланс ресурса по полосе и мощности. Изменения допустимой неготовности «высвобождают» или «удерживают» энергетический ресурс, необходимый для выполнения требований к пропускной способности.

Для наглядности представим изменение пропускной способности в координатах «мощность—полоса» (рис. 5). Максимальная пропускная способность R_{bmax} достигается при балансе мощности и полосы, а при частотном и энергетическом ограничении пропускная способность ниже. Это определяется видом используемой СКК для каждого рассматриваемого случая. Для выбора пары «мощность—полоса» можно определить область решений, удовлетворяющих требованиям по

Таблица 5
Результаты расчета максимальной пропускной способности

Характеристики	Баланс ресурса	Ограничение по полосе	Ограничение по мощности
R_{bmax} , Мбит/с	52	48	44
СКК	16APSK-5/6	QPSK-3/4	32APSK-9/10

Таблица 6
Исходные данные для реализации алгоритма индивидуального использования ЧЭР

Максимальная мощность несущей сетевого сегмента P_{max} , Вт	12,4
Максимальная выделяемая полоса B_{max} , МГц	18
Требование к пропускной способности R_b^* , Мбит/с	40
Допустимая неготовность дуплексного направления, %	0,5

пропускной способности, при $R_b^* \geq 40$ Мбит/с (рис. 5). На рис. 5 область допустимых решений при балансе ресурса имеет белую окраску (граница области обозначена зеленой пунктирной линией), синим цветом выделена область допустимых решений при ограничении по полосе (граница области — синий пунктир), красный цвет соответствует области допустимых решений при ограничении по мощности.

Результаты расчетов максимальной пропускной способности R_{bmax} при заданном ограничении ЧЭР для каждого случая приведены в табл. 5.

Методика реализована в компьютерных алгоритмах. Были рассмотрены два варианта распределения, которые интересны с практической точки зрения: при индивидуальном и групповом использовании общего ресурса сетевыми сегментами. Для упрощения представления материала приведем примеры для пропускной способности в ПН, так как именно она определяет суммарную пропускную способность дуплексного соединения; скорость в ОН будем считать постоянной и равной 2 Мбит/с.

В первом варианте индивидуального использования ресурса каждому сетевому сегменту независимо от других сегментов назначается предельное значение «мощность—полоса» и решается задача максимизации пропускной способности при этом ограничении. Найденная в пределах границ пара «мощность—полоса» вместе с отобранной СКК образуют искомое решение.

Упрощенно алгоритм выглядит следующим образом:

Блок 1. Инициализация исходных данных, необходимых для использования в последующих блоках.

Initialize: максимальная мощность P_{max} , максимальная полоса B_{max} , требования к пропускной способности R_b^* , достоверности обмена информацией P_n^* и готовности T^* %, перечень СКК $S[x]$, $x \in X$, в соответствии со стандартом DVB-S2.

Блок 2. Поиск СКК, максимизирующей пропускную способность.

Procedure поиск СКК $S_i \in S[i]$
for $x = 1 \dots X$ **step** $R_b = R_{bmax}$ **do** $R_b \leftarrow R_{bmax}$
end for

Блок 3. Проверка выполнения требований к пропускной способности.

if $R_b \geq R_b^*$ **then** поиск области допустимых решений **else** изменение требований **and goto** Блок 1

end if

Блок 4. Построение границы области допустимых решений $[P, B]$.

Procedure построение границы области допустимых решений $[P, B]$.

return $[P, B]$: $R_b = R_b^*$

Рассмотрим пример реализации алгоритма. Исходные данные представлены в табл. 6.

В заданном пределе «мощность—полоса» подбором осуществляется поиск СКК, при которой достигается максимальная пропускная способность. При превы-

Рисунок 5
Пропускная способность при балансе ресурса, ограничениях по полосе и ограничениях по мощности

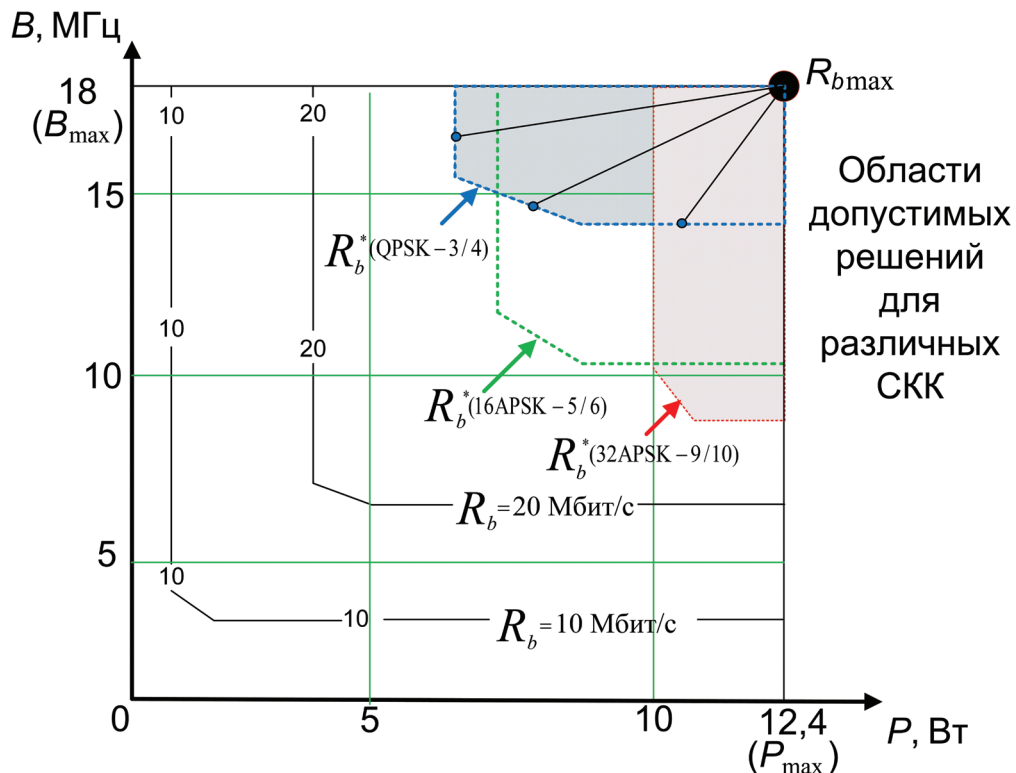


Таблица 7
Результаты применения алгоритма индивидуального использования ЧЭР

СКК, максимизирующая пропускную способность	16 APSK-5/6
Максимальная пропускная способность, Мбит/с	52
Пара значений «мощность–полоса», соответствующая максимальной пропускной способности [Вт; МГц]	[12,4; 18]
Выбранная пара значений «мощность–полоса», соответствующая границе области допустимых решений [Вт; МГц]	[9; 12,9]
Пропускная способность, Мбит/с	40
Эффективность использования энергетического ресурса/выигрыш, %	72,6/27,4
Эффективность использования частотного ресурса/выигрыш, %	71,7/28,3

Таблица 8
Исходные данные для реализации алгоритма перераспределения ЧЭР при его групповом использовании

Характеристики и требования	Номер сетевого сегмента	
	1	2
Максимальная мощность несущей сетевого сегмента P_{max} , Вт	12,4	
Максимальная выделяемая полоса B_{max} , МГц	18	
Требование к пропускной способности R_b^* , Мбит/с	40	65
Допустимая неготовность дуплексного направления, %	0,5	

шении требуемого значения пропускной способности определяется граница области допустимых решений. Граница области характеризуется набором пар «мощность–полоса» $[P, B]$. Значения пар «мощность–полоса» определяются с помощью радиус-векторов, проведенных из точки R_{bmax} под определенным углом к осям «мощность» и «полоса». Величина угла зависит от необходимого количества пар $[P, B]$. Передвигаясь с заданным шагом вдоль радиус-вектора находим пару $[P, B]$, при которой $R_b = R_b^*$ (см. рис. 5). Из полученного набора можно выбрать любую пару значений, в зависимости от того, какого ресурса не хватает другим сетевым сегментам.

Результаты применения алгоритма индивидуального использования ЧЭР представлены в табл. 7.

При групповом использовании ресурса он распределяется одновременно между всеми сегментами группы с учетом их приоритетности и требований к пропускной способности каждого. В этом случае упрощенно алгоритм выглядит следующим образом:

Блок 1. Инициализация исходных данных для каждого сетевого сегмента.

Initialize: максимальная мощность P_{max} , максимальная полоса B_{max} , требования к пропускной способности R_{bj}^* , достоверности передачи информационных пакетов P_{nj}^* и готовности $T_j^%$, перечень СКК $S[x]$, $x \in X$, в соответствии стандартом DVB-S2.

Блок 2. Поиск СКК, максимизирующей пропускную способность.

Procedure поиск СКК

Таблица 9

Результаты применения алгоритма распределения ЧЭР при его групповом использовании

	Номер сетевого сегмента	
	1	2
Первоначальное распределение		
Пара значений «полоса–мощность», соответствующая максимальной пропускной способности, [Вт; МГц]	[12,4; 18]	[12,4; 18]
СКК, максимизирующая пропускную способность	16APSK-5/6	32 APSK-4/5
Достижимая максимальная пропускная способность, Мбит/с	52	60
Требуемая пропускная способность, Мбит/с	40	65
Выигрыш (+) или проигрыш (–) по пропускной способности на выделенном ресурсе, Мбит/с	+12	–5
Выбранная пара значений «полоса–мощность», соответствующая достигнутой максимальной (требуемой) пропускной способности, [Вт; МГц]	[(9; 12,4)]	[12,4; 18]
Значения «мощность–полоса», используемые для перераспределения	[3,4; 5,1]	[0; 0]
Результаты перераспределения		
СКК, максимизирующая пропускную способность	16APSK-5/6	32 APSK-4/5
Максимальная мощность несущей сетевого сегмента P_{max} , Вт	9	15,8
Максимальная выделяемая полоса B_{max} , МГц	12,9	23,1
Максимальная пропускная способность, Мбит/с	40	72
Избытки мощности и полосы при выполнении требований к пропускной способности, [Вт; МГц]	[0; 0]	[2,2; 4,9]

for $x = 1 \dots X$ *step* $R_{bj} = R_{b_{maxj}}$ *do* $R_{bj} \leftarrow R_{b_{maxj}}$
end for

Блок 3. Проверка выполнения требований к пропускной способности.

if $R_{bj} \geq R_{b_{maxj}}$ *then* поиск области допустимых решений
else перераспределение частотно-энергетического ресурса $P_{maxj} \leftarrow P_{maxj} + \Delta P$, $B_{maxj} = B_{maxj} + \Delta B$ *and goto* Блок 1.

Блок 4. Построение границы области допустимых решений $[P_j, B_j]$:

Procedure построение области допустимых решений $[P_j, B_j]$:

Compute $\Delta P = P_{max}(j \pm 1) - P(j \pm 1)$, $\Delta B = B_{max}(j \pm 1) - B(j \pm 1)$
return $[P_j, B_j]$; $R_{bj} = R_{bj}^*$, $[\Delta P, \Delta B]$

Рассмотрим пример реализации алгоритма для двух сегментов. Исходные данные для реализации алгоритма представлены в табл. 8.

В данном случае поиск СКК осуществляется для каждого сетевого сегмента. Граница области допустимых решений так же определяется при превышении требования к пропускной способности. Далее вычисляются значения пар «мощность–полоса», необходимые для перераспределения в другой сетевой сегмент в случае невыполнения требования к пропускной способности для него.

Результаты применения алгоритма представлены в табл. 9.

Главный достигаемый эффект распределения при групповом использовании ресурса: появляется возможность выполнить требования по пропускной способности для всех сетевых сегментов на ограниченном ресурсе. При этом обеспечивается его эффективное использование, что в ряде случаев позволяет высвободить его в интересах других групп пользователей.

ВЫВОДЫ

1. Эффективное использование частотно-энергетического ресурса в высокоскоростных спутниковых системах связи может быть достигнуто его рациональным распределением, отвечающим условиям применения сетевых сегментов.
2. Распределение частотно-энергетического ресурса представляет собой сложную переборную задачу. Предлагаемая методика позволяет упростить ее решение и использовать в практике планирования связи.
3. Разработанные в рамках методики алгоритмы распределения ресурса позволяют определить сигнально-кодированную конструкцию для каждого сетевого сегмента, мощность и полосу, которые необходимы для выполнения требований к пропускной способности при ограничениях на доступный ресурс.
4. При реализации алгоритмов и методики в целом могут быть учтены различные требования не только к пропускной способности, но и к показателям качества и готовности радиолиний для разных сетевых сегментов, а также приоритеты объединяемых ими абонентских групп.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жиров, В.А. Модель радиолинии спутниковой связи в составе высокоскоростной спутниковой системы // В.А. Жиров, А.Е. Орлов, А.А. Смирнов // Труды учебных заведений связи. – 2018. – Т. 4, № 3. – С. 45-53.
2. CDM-760 Advanced High-Speed Trunking and Broadcast Modem. Описание характеристик // <http://www.Comtechefdata.com>.
3. Рекомендации ITU-T Rec. G.821

(12/2002).

4. Рекомендация ITU-R P.618-13 (12/2017). Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, необходимые для проектирования систем связи Земля-космос.
5. Рекомендация ITU-R S.1782 (2007). Возможности для глобального широкополосного доступа в интернет для систем фиксированной спутниковой службы.

6. «Балтика-СМ». Программный комплекс проектирования (планирования) систем спутниковой связи, дистанционного зондирования Земли и систем спутникового мониторинга для защищенных и незащищенных операционных систем. ФГУП НИИР – ЛОНИИР. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017662668.

Получено 02.11.18