

УДК 654.1

ПЕРЕРЫВЫ СВЯЗИ В СПУТНИКОВЫХ КАНАЛАХ НА ПРИМЕРЕ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛОВ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

В.Т. Ермилов, заместитель начальника лаборатории ФГУП НИИР, к.т.н.; vladimir.ermilov@ties.itu.int

Ключевые слова: цифровое телевидение, мультиплекс, диапазон, рекомендации МСЭ-R, спутник, прерывание связи.

Введение. Как известно, основная причина замираний в каналах спутниковой связи обусловлена совместным воздействием затухания сигнала в газах, облаках, дожде и эффектами мерцания. Предполагается, что на линии «Земля-космос» компенсация затухания (хотя бы частично) на передающей станции может быть осуществлена путем использования устройства автоматической регулировки мощности передатчика земной станции спутниковой связи (ЗССС), обеспечивающего в условиях осадков поддержание примерно постоянного уровня сигнала на входе ретранслятора космического аппарата (КА). В статье рассматривается направление «космос-Земля». При анализе возможных перерывов связи необходимо учитывать конкретную задачу, для которой рассчитывается энергетика спутниковой радиолинии.

Перерывы в принимаемой информации по спутниковым каналам являются важным параметром в ряде служб, особенно в таких социально значимых, как цифровое телевидение (ЦТВ). Если в С-диапазоне дополнительная энергетика канала порядка 2 дБ может полностью компенсировать суммарное затухание сигнала в атмосфере при действии всех неблагоприятных факторов, то в Ku- и Ka-диапазонах такое затухание может достигать нескольких десятков децибел, что делает актуальным исследование законов распределения длительности замираний при различных запасах в энергетике спутниковых радиолиний (т.е. при достижении различных коэффициентов готовности радиолиний).

Нормативные требования на коэффициент готовности спутниковых каналов. Требования, предъявляемые к коэффициенту готовности (K_T) спутниковых каналов и отдельных элементов спутниковой сети (бортовые ретрансляторы – БР и ЗССС) записаны в проекте нормативно-правового акта (НПА) [1]. В соответствии с этим документом расчетные показатели надежности элементов сети спутникового цифрового ТВ-вещания должны иметь значения, показанные в табл. 1.

Приведенные значения K_T спутниковых участков включают три составляющие: K_T на линии «Земля-космос» ($K_{T3-к}$), K_T БР ($K_{TБР}$) и K_T на линии «космос-Земля» ($K_{Tк-З}$). Задавая

примерно одинаковые требования к K_T отдельных составляющих и предполагая, что вероятность одновременного выпадения интенсивных осадков на линиях «Земля-космос» и «космос-Земля» близка к нулю, получим следующие значения K_T :

- для распределения федеральных мультиплексов: $K_{T3-к} = K_{TБР} = K_{Tк-З} = 0,99997$;

- для распределения региональных мультиплексов: $K_{T3-к} = K_{TБР} = K_{Tк-З} = 0,99994$.

Различные требования к K_T распределения федеральных и региональных мультиплексов обусловлены некоторым смягчением требований для последних. При этом учитываются особенности доставки федеральных и региональных мультиплексов. Федеральные мультиплексы имеют наивысший приоритет. Предполагается, что они будут доставляться к региональным центрам вещания с использованием новых спутников из центров космической связи ФГУП «Космическая связь» на вещательные зоны России М и Г (через спутник в точке стояния (т.с.) 53° в.д.), на зону В (через спутник в т.с. 80° в.д.). С использованием этого спутника будет осуществляться перегон двух дублей программ трех мультиплексов на зоны А и Б, а через центр космической связи «Хабаровск» – прием со спутника в т.с. 80° в.д. и передача двух временных дублей программ трех мультиплексов на зоны А и Б через спутник в т.с. 140° в.д. (в связи с неудачным запуском КА «Экспресс-АМ4» представленная схема доставки цифровых мультиплексов может быть скорректирована).

Для передачи региональных мультиплексов сигнал федерального мультиплекса поступает со спутника на региональный центр вещания, где осуществляется его демультимплексирование на отдельные ТВ-программы, замена в этих программах части сюжетов на региональные, повторное мультиплексирование и доставка сформированного регионального мультиплекса в региональные пункты вещания. В случае потери регионального мультиплекса он может быть заменен на федеральный мультиплекс (при наличии на региональных пунктах эфирного вещания дополнительных спутниковых антенн и приемников). Все это позволяет снизить требования к готовности спутниковых каналов распределения региональных мультиплексов.

Учитывая пороговый характер цифровой связи, можно считать, что перерыв в канале связи наступает тогда, когда значение отношения сигнал/шум (C/N) опустится ниже порога в демодуляторе ЗССС, т.е. затухание сигнала превысит определенную величину.

Применительно к сети ЦТВ в соответствии с НПА [1] могут иметь место следующие нарушения нормальной работы сети передачи цифровых мультиплексов:

- технический брак – нарушение нормальной работы сети ЦТВ продолжительностью от 2 с до 20 с;
- техническая остановка – нарушение нормальной работы сети ЦТВ продолжительностью от 20 с до 10 мин;
- авария – нарушение нормальной работы сети ЦТВ продолжительностью свыше 10 мин.

Под нарушением нормальной работы сети ЦТВ понимается такое состояние сети, при котором наблюдается умень-

Таблица 1

Элементы сети	K_T (не менее)
Передающая ЗССС (федерального и регионального назначения)	0,9999
Спутниковый участок федерального назначения (линия «Земля-космос», БР КА федерального назначения, линия «космос-Земля»)	0,9999
Спутниковый участок регионального назначения (линия «Земля-космос», БР КА регионального назначения, линия «космос-Земля»)	0,9998
Региональная приемная ЗССС	0,9999
Местная приемная ЗССС	0,9998

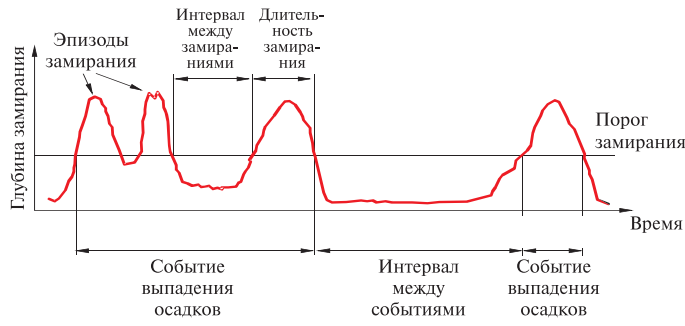


Рис. 1

шение субъективной оценки качества изображения или звукового сопровождения ниже нормируемой для данной сети величины в одном или нескольких каналах в составе мультиплекса или пропадание сигнала этих каналов, или сигнала мультиплекса в целом при отсутствии соответствующих нарушений нормальной работы на входе сети.

Таким образом, для обеспечения определенного качества доставки информации и анализа возможных нарушений нормальной работы сети ЦТВ должны быть известны значения продолжительности нарушений доставки мультиплекса.

Модель замираний. В Рекомендации МСЭ-R P.1623-1 [2] отмечено, что длительность замираний (или нарушений в спутниковых каналах доставки мультиплекса) представляет собой случайную величину, которая аппроксимируется двумя функциями распределения. Для длительного замирания модель представляет функцию логарифмически нормального распределения, а для кратковременного замирания – степенную функцию. В рамках модели рассчитывается граница между кратковременными и длительными замираниями.

Величины, характеризующие динамику событий замираний, показаны на рис. 1. Длительность замирания определяется как интервал времени между двумя пересечениями участка кривой, расположенного выше одного и того же порога замирания (затухания). Модель на базе степенной функции пригодна для замираний длительностью больше 1 с. Замирания меньшей длительности не оказывают значительного влияния на общее время нарушения связи.

В качестве исходных данных для расчета с использованием этой модели требуются следующие параметры: f – частота, ГГц (10–50 ГГц); ϕ – угол места, град. (5–60°); A – порог затухания, дБ.

Исходные формулы для расчета параметров модели:

1) Показатель γ степенной функции распределения доли времени замирания, обусловленной кратковременными замираниями:

$$\gamma = 0,055 f^{0,65} A^{-0,003};$$

2) Граница между длительностями кратковременного и долговременного замирания:

$$D_t = D_0 e^{p_1 \sigma^2 + p_2 \sigma - 0,39} c,$$

где $p_1 = 0,885\gamma - 0,814$; $p_2 = -1,05\gamma^2 + 2,23\gamma - 1,61$; $\sigma = 1,85 f^{-0,05} A^{-0,027}$ – стандартное отклонение логарифмически нормального распределения доли времени замирания, обусловленной замираниями большой длительности:

$$D_0 = 80 \phi^{-0,4} f^{1,4} A^{-0,39} c;$$

3) Средняя длительность логарифмически нормального распределения вероятности возникновения замираний большой длительности D_2 :

$$D_2 = D_0 e^{-\sigma^2} c;$$

4) Доля времени кратковременных замираний

$$k = \left[1 + \frac{\sqrt{D_0 D_2} (1 - \gamma) Q\left(\frac{\ln(D_t) - \ln(D_0)}{\sigma}\right)}{D_t \gamma Q\left(\frac{\ln(D_t) - \ln(D_2)}{\sigma}\right)} \right]^{-1};$$

5) Стандартная интегральная функция распределения для нормально распределенной переменной

$$Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^\infty e^{-\frac{1}{2}x^2} dx.$$

Кратковременные замирания сигналов влияют главным образом на вероятность ошибки на бит на входе приемника, т.е. на технический брак, а долговременные замирания характеризуют неготовность канала спутниковой связи и приводят к технической остановке передачи цифрового мультиплекса в сети ЦТВ.

По приведенным в Рекомендации МСЭ-R P.1623-1 формулам были рассчитаны характеристики замираний сигнала (перерывов в спутниковых каналах) в зависимости от различных параметров.

На рис. 2 и 3 показаны зависимости средней длительности замираний большой длительности (перерывов в каналах спутниковой связи) и границы между длительностями кратковременного и долговременного замираний от порога затухания (порога прерывания в канале) на частотах 11,4 ГГц и 20,0 ГГц соответственно.

На рис. 4 показаны зависимости характеристик замираний сигнала от угла места на частоте 11,4 ГГц, на рис. 5 и 6 – зависимости характеристик замираний сигнала от частоты для порога прерывания связи $A=10$ дБ, угла места $=10^\circ$.

Перерывы связи в направлении «космос-Земля» (Ku- и Ka-диапазоны). В качестве примера оценки характеристик возможных перерывов связи рассматривается процесс передачи нескольких мультиплексов ЦТВ в одном стволе перспектив-

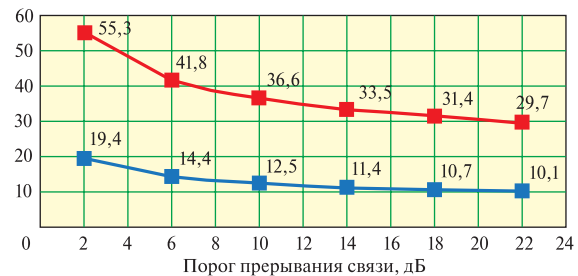


Рис. 2

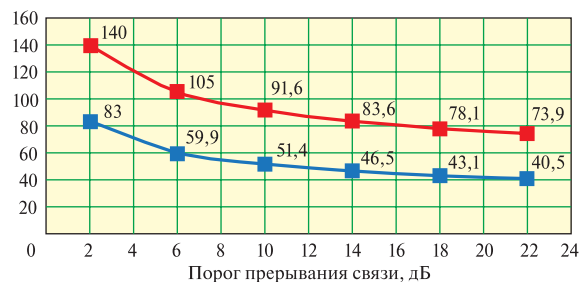


Рис. 3

ных КА «Экспресс-АМ5» и «Экспресс-АМ6». Исследовались характеристики прерывания канала связи при передаче нескольких (до трех) мультиплексов ЦТВ. Суммарная информационная скорость передачи одного мультиплекса равна 22,394 Мбит/с. При этом существенное улучшение ситуации достигается применением адаптивных методов передачи, предусмотренных стандартом DVB-S2, и выбором оптимальных сигнально-кодовых конструкций (СКК), включающих методы модуляции и кодирования сигналов. Диаметр антенны приемных ЗССС предполагается равным 2,4 м – в Ku-диапазоне и 1,2 м – в Ka-диапазоне.

Для расчетов были приняты следующие основные характеристики космических аппаратов «Экспресс-АМ5» и «Экспресс-АМ6»:

- в Ku-диапазоне: ЭИИМ ствола в режиме насыщения на краю зоны обслуживания – 50 дБВт; ширина полосы ствола – 54 МГц; добротность приемной системы – плюс 4 дБ/К; стволы линейаризованные;
- в Ka-диапазоне: ЭИИМ ствола в режиме насыщения на краю зоны обслуживания – 60 дБВт; ширина полосы ствола – 110 МГц; добротность приемной системы – плюс 12 дБ/К; стволы линейаризованные.

Порог прерывания связи $A_{пер}$ зависит от полученного отношения C/N на входе демодулятора ЗССС, суммарных потерь сигнала в атмосфере и запаса мощности сигнала относительно минимально необходимого уровня (максимального допустимого значения вероятности ошибки). Превышение значения $A_{пер}$ приводит к перерыву в канале связи.

Были проведены расчеты приема в одном стволе спутника двух-трех мультиплексов ЦТВ на ЗССС с указанными диаметрами антенн, расположенные в городах Анадырь (через КА «Экспресс-АМ5» в т.с. 140°в.д.), Москва и Сочи (через КА «Экспресс-АМ6» в т.с. 53°в.д.). Климатические зоны этих городов относятся соответственно к зонам I, II и III в соответствии с Рекомендацией МСЭ-R SM.1448 или к 22-му, 5-му и 11-му районам по карте районирования территории России по интенсивности дождей, приведенной в [3].

Расчеты проводились для условий работы каналов связи на линии «космос-Земля» при наличии осадков (дождей). При этом определялся K_r радиолинии «космос-Земля» при выбранных параметрах стволов КА и ЗССС.

Методика расчета энергетики спутниковых каналов основана на известных формулах, приведенных, например, в [4].

Некоторые параметры (спектральная эффективность СКК, символьная скорость, отношения E_b/N_0 и C/N) определялись по данным [5] для спутникового стандарта DVB-S2.

В качестве критерия выбора рабочей точки БР, согласно рекомендации ФГУП «Космическая связь», принимался уровень интермодуляционных продуктов – отношение мощности сигнала к мощности нелинейных продуктов третьего порядка.

В процессе расчетов определялись:

- суммарное затухание в атмосфере Земли;
- параметры БР (ЭИИМ БР на одну несущую, занимаемая ширина полосы (ЗШП) частот одной несущей, суммарная ЗШП всех несущих на спутнике для заданной СКК);
- параметры передающей ЗССС (угол места, ЭИИМ, мощность передатчика);
- параметры приемной ЗССС (угол места, эквивалентная шумовая температура приемника, коэффициент усиления приемной антенны, добротность приемной системы);
- требуемое и расчетное отношения C/N для заданной СКК.



Рис. 4



Рис. 5

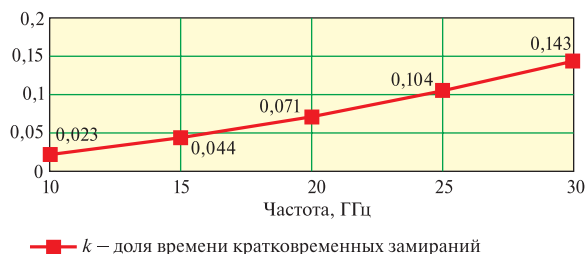


Рис. 6

Конечным результатом расчетов стали значения отношения C/N на входе демодулятора приемника ЗССС. Сравнение требуемого отношения C/N и расчетного позволяло определять работоспособность спутниковой радиолинии для заданной СКК (и, соответственно, выбрать оптимальную СКК) и максимально достижимый K_r спутникового участка радиолинии.

По полученным значениям отношения C/N , максимального K_r , суммарного затухания сигнала и запаса в модеме определялись следующие характеристики:

- порог прерывания связи ($A_{пер}$);
- граница между длительностями кратковременного и долговременного прерываний связи ($D_{tпер}, c$);
- средняя длительность долговременных прерываний канала связи ($D_{пер}, c$);
- доля времени кратковременных прерываний (k).

Исходные данные и полученные перерывы ($\Delta_{св}$) в каналах спутниковой связи на трассах «космос-Земля» в Ku-диапазоне приведены в табл. 2, для Ka-диапазона – в табл. 3. В таблицах показаны максимально достижимые K_r каналов спутниковой связи на указанных трассах.

Выводы. 1. В представленном материале сделана первая попытка оценить возможные перерывы в процессе приема мультиплексов ЦТВ при использовании стволов Ku-диапазона перспективных спутников «Экспресс-АМ5» и «Экспресс-АМ6». Для сравнения приведены аналогичные

Таблица 2

Характеристики спутникового канала	Исходные данные и перерывы в каналах спутниковой связи ($\Delta_{св}$), с, Ku-диапазон		
	г. Москва $K_{г-3} = 0,9995$ II климатическая зона	г. Сочи $K_{г-3} = 0,9995$ III климатическая зона	г. Анадырь $K_{г-3} = 0,9995$ I климатическая зона
Тип КА	«Экспресс-АМ6»	«Экспресс-АМ6»	«Экспресс-АМ5»
Ширина полосы ствола спутника, МГц	54	54	54
Число мультиплексов ЦТВ, передаваемых через один ствол спутника	3	3	3
Суммарная занимаемая ширина полосы ствола спутника, МГц	52,8	52,8	52,8
Сигнально-кодовая конструкция (СКК) мультиплекса. Стандарт	QPSK 5/6 DVB-S2	QPSK 5/6 DVB-S2	QPSK 5/6 DVB-S2
Угол места приемной ЗССС, град.	25,0	38,0	11,3
Диаметр антенны приемной ЗССС, м	2,4	2,4	2,4
$C/N_{расч}$ на входе демодулятора ЗССС, дБ	9,9	8,9	9,9
Затухание в атмосфере, дБ	4,5	6,0	4,2
Порог прерывания связи $A_{пер}$, дБ	15,9	16,4	15,6
Граница между длительностями кратковременного и долговременного прерываний связи $D_{пер}$, с	7,7	6,4	10,6
Средняя длительность прерываний канала связи $D_{пер}$, с	22,5	18,8	31,0
Доля времени кратковременных прерываний k	0,029	0,029	0,029

Таблица 3

Характеристики спутникового канала	Исходные данные и перерывы в каналах спутниковой связи ($\Delta_{св}$), с, Ka-диапазон		
	г. Москва $K_{г-3} = 0,999$ II климатическая зона	г. Сочи $K_{г-3} = 0,995$ III климатическая зона	г. Анадырь $K_{г-3} = 0,990$ I климатическая зона
Тип КА	Экспресс-АМ6	Экспресс-АМ6	Экспресс-АМ5
Ширина полосы ствола спутника, МГц	110	110	110
Число мультиплексов ЦТВ, передаваемых через один ствол спутника	3	3	3
Суммарная занимаемая ширина полосы ствола спутника, МГц	88,3	88,3	88,3
Сигнально-кодовая конструкция (СКК) мультиплекса. Стандарт	QPSK 1/2 DVB-S2	QPSK 1/2 DVB-S2	QPSK 1/2 DVB-S2
Угол места приемной ЗССС, град.	25,0	38,0	11,3
Диаметр антенны приемной ЗССС, м	1,2	1,2	1,2
$C/N_{расч}$ на входе демодулятора ЗССС, дБ	4,7	6,6	5,3
Затухание в атмосфере, дБ	10,4	6,0	9,5
Порог прерывания связи $A_{пер}$, дБ	16,6	14,1	16,3
Граница между длительностями кратковременного и долговременного прерываний связи $D_{пер}$, с	30,6	27,2	42,3
Средняя длительность прерываний канала связи $D_{пер}$, с	55,3	48,9	76,4
Доля времени кратковременных прерываний k	0,073	0,072	0,073

результаты при использовании стволов этих спутников в Ka-диапазоне, хотя задача передачи цифрового телевидения в этом диапазоне еще не ставилась.

2. Длительность перерывов в спутниковых каналах доставки мультиплекса определялась в соответствии с Рекомендацией МСЭ-R P.1623-1, по которой длительность замираний (перерывов связи в спутниковых каналах) аппроксимируется двумя различными функциями распределения – для кратковременных и для длительных замираний. Как показано в расчетах, доля времени кратковременных замираний для условий поставленной задачи составляет 2–7 % от общего времени замираний, поэтому рассматривались только замирания большой длительности.

3. Расчеты показали, что при передаче трех мультиплексов с суммарной информационной скоростью передачи од-

ного мультиплекса 22,394 Мбит/с через один ствол КА «Экспресс-АМ5» и «Экспресс-АМ6» (в стандарте DVB-S2) и их приеме на ЗССС с антеннами диаметром 2,4 м (в Ku-диапазоне) и 1,2 м (в Ka-диапазоне) можно достичь следующих $K_{г-3}$ на линии «космос-Земля»:

- в Ku-диапазоне во всех трех климатических зонах в соответствии с Рекомендацией МСЭ-R SM.1448 – $K_{г-3} = 0,9995$;
- в Ka-диапазоне: в климатической зоне I $K_{г-3} = 0,990$; в климатической зоне II $K_{г-3} = 0,999$; в климатической зоне III $K_{г-3} = 0,995$.

Приведенные данные для Ku-диапазона показали вполне приемлемые значения готовности спутниковой радиолинии для передачи цифровых мультиплексов, что позволяет рекомендовать этот диапазон для более широкого использования.

4. На частоте 11,4 ГГц значения средних длительностей ($D_{\text{пер}}$) прерывания связи находятся в пределах 19÷31 с (в зависимости от климатической зоны). На частоте 20,0 ГГц значения $D_{\text{пер}}$ составляют 49÷76 с (при использовании стандарта DVB-S2).

Если изменением характеристик спутниковых каналов и ЗССС (например, путем увеличения диаметра антенн приемных ЗССС) удастся обеспечить требуемый K_r на участке «космос-Земля», то можно достичь минимальных значений длительностей прерываний связи. При условии выполнения требований по K_r каналов связи $K_{r,к-з}=0,99995$ значения длительностей прерываний связи составят:

- в Ku-диапазоне:
для Зоны I (г. Анадырь) – 30,5 с; для Зоны II (г. Москва) – 22,0 с; для Зоны III (г. Сочи) – 17,8 с;
- в Ka-диапазоне:
для Зоны I (г. Анадырь) – 59,7 с; для Зоны II (г. Москва) – 42,7 с; для Зоны III (г. Сочи) – 37,5 с.

5. Приведенные результаты значений перерывов в до-ставке цифровых мультиплексов основаны только на теоретической модели прерываний связи. Анализ полученных данных после ввода в действие указанных спутников позволит определить реальные значения перерывов связи, а сравнение с расчетными данными позволит уточнить (при

необходимости) модель динамики замираний сигналов на спутниковых трассах.

Автор выражает благодарность сотруднику ФГУП «Космическая связь» Б.А. Локшину за полезные дискуссии и помощь при согласовании методики оценки энергетики спутниковых каналов и студенту МФТИ Г.И. Масайлову за программирование расчетных формул из Рекомендации МСЭ-Р Р.1623-1.

ЛИТЕРАТУРА

1. Требования к организационно-техническому обеспечению устойчивого функционирования сетей цифрового телевизионного вещания// Проект. – ФГУП НИИР. – 2011.
2. Рекомендация МСЭ-Р Р.1623-1 Метод прогнозирования динамики замирания сигнала на трассах Земля-космос.
3. Заключительный отчет по НИР «Чабрец-2»// ГосНИИ Радио. – 1994.
4. Электромагнитная совместимость систем спутниковой связи/ Под ред. Л.Я. Кантора и В.В. Ноздрина. – ФГУП НИИР. – 2009.
5. ETSI EN 302307 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).

Получено 02.06.11