

Алгоритм расчета показателя неготовности направления связи по дождевому фактору с учетом выполнения требований к пропускной способности, достоверности и ограничения частотно-энергетического ресурса

А.Е. Орлов¹, К.С. Новосадов¹, Д.В. Сальников¹, В.Н. Беженарь¹

¹Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного,
Санкт-Петербург, 194064, Российская Федерация

*Адрес для переписки: x-bruk@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 02.02.2021

Принята к публикации 11.05.2021

Ссылка для цитирования: Орлов А.Е., Новосадов К.С., Сальников Д.В., Беженарь В.Н. Алгоритм расчета показателя неготовности направления связи по дождевому фактору с учетом выполнения требований к пропускной способности, достоверности и ограничения частотно-энергетического ресурса // Труды учебных заведений связи. 2021. Т. 7. № 2. С. 44–50. DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-2-44-50

Аннотация: В статье представлен алгоритм расчета показателя неготовности по дождевому фактору участков спутниковой радиолинии с учетом выполнения требований к пропускной способности, достоверности и ограничения частотно-энергетического ресурса. В отличие от существующих подходов, в предлагаемом задаче решается на основе аналитического выражения, что позволяет снизить вычислительную емкость при приемлемых ограничениях.

Ключевые слова: земная станция, спутниковая радиолиния, сигнально-кодовая конструкция, неготовность.

Введение

В настоящее время в России и во всем мире создаются высокоскоростные спутниковые системы 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 многоручевых антенн, что обеспечивает высокую эквивалентную изотропно-излучаемую мощность 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). В отличие от спутниковых систем C - и X -диапазонов, одной из особенностей систем миллимет-

рового диапазона являются большие потери в гидрометеорах, которые в пределах России могут составлять от 3 до 20 дБ в зависимости от радиоклиматических параметров районов размещения земных станций.

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). Поэтому одной из основных задач является планирование спутниковой связи. Важнейшей задачей при планировании является определение готовности (неготовности), исходя из заданных требований к пропускной способности и достоверности с учетом ограничений ЧЭР.

В статье предлагается алгоритм, который позволяет упростить вычислительную процедуру определения показателя неготовности по дождевому фактору с учетом заданных требований и ограничений ЧЭР.

Постановка задачи

Известно множество работ, посвященных рассмотрению функционирования и особенностей спутниковых систем связи миллиметрового диапазона. Большинство из них посвящены рассмотрению энергетического расчета. Потери сигнала в гидрометеорах задаются как детерминированный фактор и в качестве дополнительных потерь.

В [1] представлен типовой подход к анализу бюджета спутникового канала – расчету энергетического запаса с учетом требований к отношению энергии сигнала на бит к спектральной плотности мощности шума. На основе полученных результатов возможно определение значения неготовности участка или спутниковой радиолонии. Однако данный расчет предполагает поиск приемлемого соотношения между всеми параметрами, в том числе посредством выбора сигнально-кодовой конструкции (СКК), что приводит к увеличению вычислительной сложности. Вторая проблема заключается в том, что при расчетах не учитывается ограничение ЧЭР.

Наиболее близким к решению поставленной задачи является метод, описанный в [2]. Оценка значения неготовности проводится с использованием зависимостей затухания сигнала от значения процента превышения времени среднего года. В данном методе не учитываются требования к пропускной способности, достоверности и используется итерационный подход, что значительно увеличивает вычислительную емкость.

Основываясь на вышеизложенном, необходима разработка алгоритма для решения задачи определения неготовности участков спутниковой радиолонии, который позволяет снизить вычислительную сложность и при этом позволяет учитывать требования к пропускной способности, достоверности и ограничение ЧЭР.

Неготовность участка спутниковой радиолонии по дождевому фактору

К неготовности спутниковой радиолонии могут приводить события превышения интенсивности выпадения осадков определенных величин в районе ЦЗС или АЗС, а также одновременно. Вероятность последнего события невелика, поэтому данное событие обычно не рассматривается [3, 4].

В [5] приведено выражение для расчета величины затухания радиосигнала в зависимости от процента превышения времени среднего года (процентной вероятности неготовности:

$$A(p) = A_{0,01} \left(\frac{p}{0,01} \right)^l, \quad (1)$$

$$l = -(0,655 + 0,0331 \ln(p) - 0,045 \ln(A_{0,01}) \times \beta(1 - p) \sin \theta),$$

где p – значение неготовности (можно рассматривать как процентную неготовность участка спутниковой радиолонии); $A_{0,01}$ – прогнозируемое значение затухания, превышаемое в течение 0,01 % времени среднего года; β – вспомогательный параметр, зависящий от угла места земной станции θ .

На основе выражения (1) проведем оценку значения неготовности путем перебора значений варьируемых параметров – мощности сигнала на выходе передатчика земной станции и пропускной способности с учетом выполнения требований к отношению энергии сигнала на бит к спектральной плотности шума при заданной вероятности ошибочного приема: $(E_b/N_0) = (E_b/N_0)^*$, где (E_b/N_0) , $(E_b/N_0)^*$ – получаемое и требуемое значение, соответственно. При шаге изменения мощности сигнала $P_i = 1$ Вт, пропускной способности $R_{bj} = 2$ Мбит/с (исходя из максимальной мощности передатчика ЦЗС при работе в многосигнальном режиме 50 Вт), использовании QPSK 1/4, полосе абонентского транспондера 72 МГц, вычислительная сложность может достигать: $\prod_{i=1, j=1}^{n, m} P_i R_{bj}$, т. е. порядка 750 итераций и увеличивается при варьировании СКК из разрешенного множества, соответствующего применяемому стандарту.

В связи с этим для решения поставленной задачи необходимо использование выражения, которое позволяет упростить решение задачи.

Введем следующие обозначения:

$$a = (0,655 - 0,045 \ln(A_{0,01}) \beta \sin \theta);$$

$$b = 0,0331; c = -\beta \sin \theta.$$

Разделив обе части выражения (1) на $A_{0,01}$ и, прологарифмировав, получим:

$$\ln \left(\frac{A(p)}{A_{0,01}} \right) = - \left(a + b \ln(p - cp) \ln \left(\frac{p}{0,01} \right) \right).$$

В результате преобразований и замены $x = \ln(p)$ получаем квадратное уравнение:

$$bx^2 + (a + 4,605b - cp)x + \left(4,605(a - cp) + \ln \left(\frac{A(p)}{A_{0,01}} \right) \right) = 0. \quad (2)$$

Рассматривая размещение АЗС на территории Российской Федерации, в соответствии с [3], коэффициент c (через параметр β) примет значение 0. Тогда одним из корней (2) является выражение:

$$p(A) = e^l.$$

$$l = \frac{-(a + 4,605b) + \sqrt{(a + 4,605b)^2 - 4b \left(4,605a + \ln \left(\frac{A}{A_{0,01}} \right) \right)}}{2b} \quad (3)$$

На рисунке 1 представлен график значения процентной неготовности $p(A)$ от прогнозируемых потерь сигнала в гидрометеорах A .

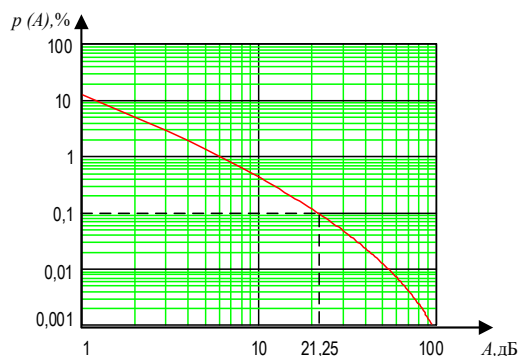


Рис. 1. Зависимость процентной неготовности от прогнозируемых потерь сигнала в гидрометеорах
Fig. 1. Unavailability Percentage in Terms of the Predicted Signal Losses in Hydrometeors

Далее приводятся разработанные алгоритмы оценки неготовности на восходящем и нисходящем участках (рисунки 2, 3).

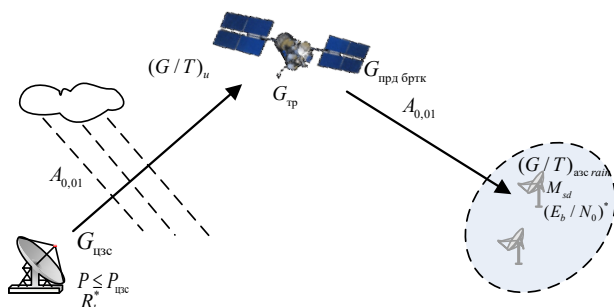


Рис. 2. Модель спутниковой радиосвязи (выпадение осадков в районе ЦЗС)
Fig. 2. Satellite Radio Link Model (the Rain Factor in the Hub Region)

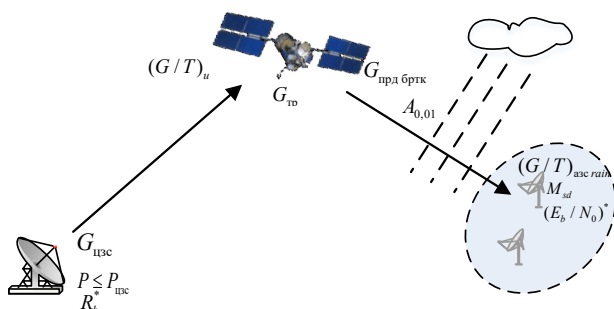


Рис. 3. Модель спутниковой радиосвязи (выпадение осадков в районе АЗС)
Fig. 3. Satellite Radio Link Model (the Rain Factor in the Mobile Terminal Region)

Алгоритм расчета показателя неготовности участков спутниковой радиосвязи

В модели спутниковой радиосвязи, представленной на рисунках 2, 3, рассматривается прямое направление: ЦЗС – АЗС. Энергетический ресурс ЦЗС ограничивается максимальной мощностью передатчика $P \leq P_{цс}$, где P – мощность несущей на выходе усилителя мощности ЦЗС; частотным ресурсом выделенной полосы $\Delta f \leq B$, где Δf – полоса, занимаемая сигналом. Выполнение требований к до-

стоверности обеспечивается достижением необходимого значения отношения энергии сигнала на бит к спектральной плотности шума $(E_b/N_0)^*$ при заданной пропускной способности R_b^* , для используемой СКК S_i в соответствии с применяемым стандартом. Значения радиоклиматических параметров районов размещения земных станций в соответствии с [5–15].

Упрощенная структура алгоритма оценки показателей неготовности участков спутниковой радиосвязи представлена на рисунке 4. Расчет показателя неготовности производится по наихудшей точке зоны обслуживания рассматриваемого луча.

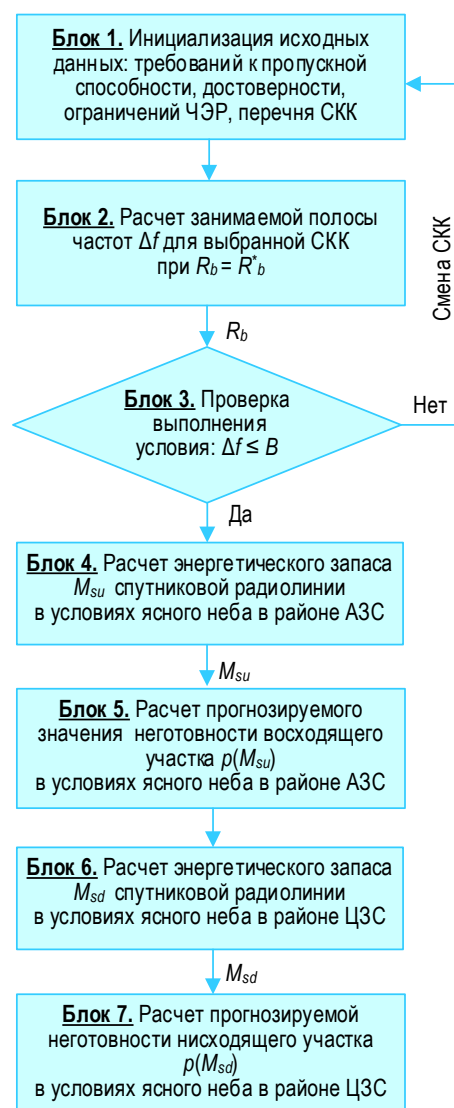


Рис. 4. Упрощенная структура алгоритма оценки показателей неготовности участков спутниковой радиосвязи

Fig. 4. The Simplified Structure of Evaluating Unavailability Algorithm of the Satellite Link Sections

Порядок использования алгоритма заключается в следующем.

В блоке 1 производится инициализация исходных данных: максимальной мощности несущей $P_{цс}$ (энергетический ресурс); выделенной полосы ча-

стот B (частотный ресурс); перечня СКК в соответствии с применяемым стандартом S_i ; требований к достоверности: P_n^* или P_b^* – вероятности ошибочного приема информационного пакета или бита, соответственно; требований к пропускной способности R_b^* .

В блоке 2 для выбранной СКК при $R_b = R_b^*$ производится расчет полосы частот, занимаемой сигналом [16] $\Delta f = \frac{R_b^*}{\log_2 M R_c} (1 + \alpha)$, где M – размерность созвездия выбранной СКК, R_c – скорость кодирования, α – ролл-офф фактор (для расчетов принят равным 0,25).

Проверка выполнения критерия $\Delta f \leq B$ производится в блоке 3. При выполнении условия блока осуществляется расчет энергетического запаса M_{su} в условиях ясного неба в районе АЗС (см. рисунок 2) с использованием выражения [16]:

$$M_{su} = \left(\frac{C/N_0}{(E_b/N_0) \cdot R_b} \right) - \left(\frac{\frac{C}{N_0}}{\left(\frac{C}{N_0} \right)_d} \right),$$

где C/N_0 – отношения мощности сигнала к спектральной плотности шума (ОСШ) на входе приемной системы АЗС без учета потерь сигнала в гидрометеорах; $(C/N_0)_d$ – ОСШ на нисходящем участке производится расчет энергетического запаса при заданных ограничениях энергетического ресурса (максимальной мощности несущей).

В противном случае производится смена СКК и повторяются операция в блоках 2, 3.

Расчет прогнозируемого показателя неготовности восходящего участка $p(M_{su})$ с использованием выражения (3) производится в блоке 5.

Операции для расчетов энергетического запаса M_{sd} и показателя неготовности $p(M_{sd})$ нисходящей линии в условиях ясного неба в районе ЦЗС (рисунок 3) осуществляются в блоках 6, 7, соответственно. При расчете данных параметров имеются некоторые особенности, которые рассматриваются в следующем разделе.

Для проведения расчетов используются технические характеристики земных станций и бортового ретрансляционного комплекса современных высокоскоростных спутниковых систем (таблица 1). Основные характеристики некоторых СКК для стандарта DVB-S2 представлены в таблице 2.

Результаты применения алгоритма для расчета показателя неготовности восходящего участка

представлены в графическом виде на рисунках 5а и 5б. При использовании частотно эффективных СКК максимально достижимая пропускная способность на выделенном частотном ресурсе выше (рисунок 5а). Однако необходимо учитывать, что требование к отношению энергии сигнала на бит к спектральной плотности шума ужесточаются при заданном требовании к достоверности, следовательно, и значение показателя неготовности также выше (рисунок 5б).

Требование к пропускной способности выполняется для QPSK 3/4 при использовании выделенного частотного ресурса равного 18,8 МГц, а, например, для 8 PSK 3/4 при $B = 11,1$ МГц (см. рисунок 5а). Однако и показатель неготовности восходящего участка при использовании 8 PSK 3/4 выше и составляет 0,121 % по сравнению с QPSK 3/4 (0,082 %) (см. рисунок 5б). Поэтому при планировании спутниковой связи необходимо учитывать важность предъявляемых требований.

Результаты, представленные на рисунках 5а и 5б, также показывают адекватность работы алгоритма, а его применение в рамках решения задач планирования позволяет упростить процедуру получения необходимых данных.

ТАБЛИЦА 1. Исходные данные

TABLE 1. Initial Data

Технические характеристики, требования и ограничения	Значение
Максимальная мощность несущей (ограничение энергетического ресурса), Вт	12
Выделенная полоса частот (ограничение частотного ресурса), МГц	20
Перечень СКК	согласно стандарта DVB-S2
Требование к пропускной способности, Мбит/с	20
Требование к достоверности, $P_{ош}$	10^{-7}
Требование к отношению энергии сигнала на бит к спектральной плотности шума	технические данные модема CDM-760
Коэффициент недоиспользования мощности по выходу, дБ	ЦЗС – 7; БРТК – 3
Коэффициент усиления антенны, дБ	ЦЗС – 71,4; БРТК – 49,6
Добротность приемной системы, дБ/К	БРТК – 9; АЗС – 23,4
Частота несущей, ГГц	40

ТАБЛИЦА 2. Основные характеристики СКК

TABLE 2. ModCod General Characteristics

СКК	QPSK			8 PSK			16 APSK			32 APSK		
	1/4	2/3	4/5	3/5	3/4	9/10	3/4	5/6	8/9	3/4	5/6	9/10
γ_f , (бит/с)/ Гц	0,48	2,2	1,55	1,74	2,18	2,62	2,9	3,22	3,44	3,62	4,03	4,36
$\gamma_e(E_b/N_0)$, дБ	1,1	1,29	3,0	3,7	4,8	7,1	6,0	6,9	7,8	7,6	8,7	10,1

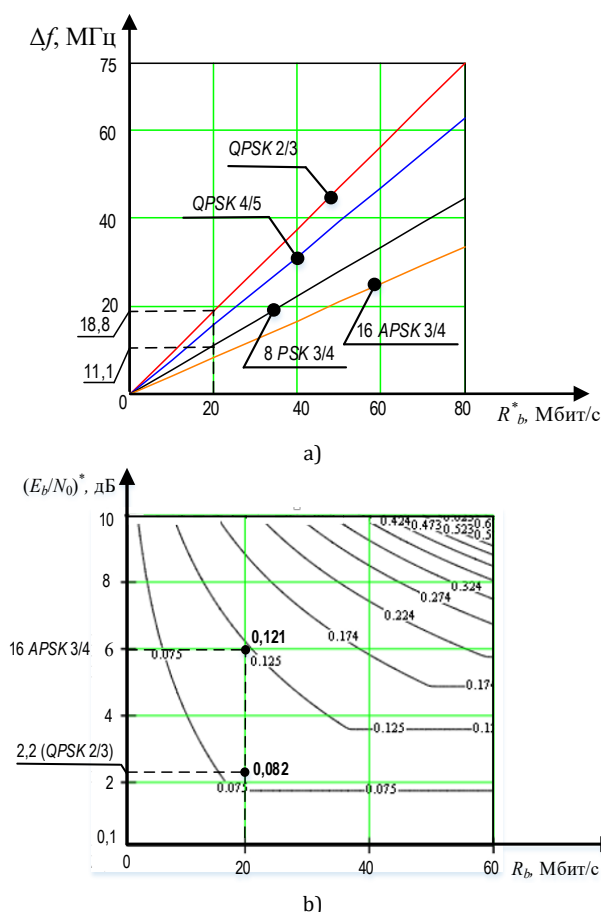


Рис. 5. Зависимость занимаемой полосы от требования к пропускной способности (а) и прогнозируемого значения показателя неготовности от выбранной СКК и требования к пропускной способности (б)

Fig. 5. Occupied Bandwidth in Terms of the Throughput Capacity (a) and Predictable Value of the Unavailability in Terms of the ModCod and Throughput Capacity Requirements (b)

Особенности оценки показателя неготовности нисходящей линии

Отличие процедуры расчета показателя неготовности при выпадении осадков в районе ЦЗС заключается в том, что необходимо учитывать снижение добротности $(G/T)_{\text{азс rain}}$ приемной системы АЗС за счет повышения мощности шумов (шумовой температуры). В некоторых источниках используется термин «мокрая антенна».

Выражение для расчета добротности приемной системы АЗС представляется в следующем виде [16]:

$$(G/T)_{\text{азс rain}} = (G/T)_{\text{азс}} \frac{T_{\text{азс}}}{(T_{\text{азс}} + 273(1 - 1/A(p))), \quad (4)$$

где $(G/T)_{\text{азс}}$ – добротность приемной системы АЗС в условиях ясного неба; $T_{\text{азс}}$ – температура теплового шума приемной системы АЗС.

Выражение для определения энергетического запаса с учетом выражения (4):

$$M_s = \frac{\left(\frac{(C/N_0)_u}{(E_b/N_0)^* R_b} - 1 \right) T_{\text{азс}}}{T_{\text{азс}} + 273}, \quad (5)$$

где $(C/N_0)_u$ – отношение мощности сигнала к спектральной плотности мощности шума на восходящем участке.

Результаты расчета с использованием исходных данных из таблицы 1 представлены в графическом виде на рисунке 6. Анализ расчетов показал, что значение показателя неготовности нисходящей линии выше в 1,75 раза при использовании QPSK 3/4 и в 1,85 раза при использовании 8 PSK 3/4. Следовательно, при планировании спутниковой связи для обеспечения требований к готовности необходимо учитывать энергетический запас для компенсации потерь сигнала при выпадении осадков в районе АЗС.

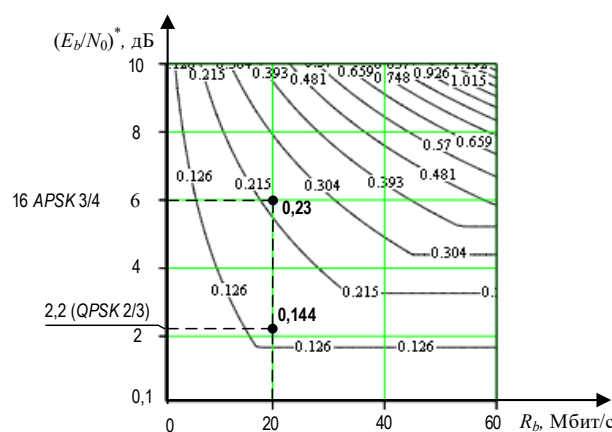


Рис. 6. Зависимость прогнозируемого значения показателя неготовности нисходящего участка от используемой СКК и требования к пропускной способности

Fig. 6. Predictable Value of the Downlink Unavailability in Terms of the ModCod and Throughput Capacity Requirements

Заключение

Разработанный алгоритм может быть использован для оценки показателя неготовности спутниковой радиосвязи в целом, а также при рассмотрении дуплексного направления спутниковой связи. Это позволяет осуществлять планирование спутниковой связи, в том числе и при предъявлении требований к готовности как в прямом, так и обратном направлениях, а также при рассмотрении их взаимосвязи. Кроме того, разработанный алгоритм предлагается использовать при проектировании спутниковых систем, в частности, при разработке и обосновании технических требований к наземному сегменту – максимальной мощности передатчика абонентских станций или максимального диаметра антенны с учетом выполнения требования к готовности.

В дальнейшем разработанный алгоритм предлагается использовать при решении задач перераспределения энергетического ресурса – мощности передатчика центральной земной станции между лучами обслуживания с учетом выполнения требований к пропускной способности и достоверности передачи информации.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы статьи выражают благодарность профессору Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, доктору технических наук, профессору В.А. Жирову, профессору Военной академии связи, доктору технических наук, профессору С.О. Бурлакову за консультации в процессе обобщения и предоставления материалов для опубликования.

Список используемых источников

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: Вильямс, 2003. 1089 с.
2. Sujimol M.R., Rajat A., Gajendra S., Ravikumar G. Rain Attenuation using Ka and Ku-band frequency beacons at Delhi Earth Station // NISCAIR-CSIR. 2015. Т. 44. № 1. С. 45–50. URL: <http://nopr.niscair.res.in/handle/123456789/31326> (дата обращения 02.02.2021)
3. 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.
4. Рекомендация МСЭ-R P.1815-1. Дифференциальное ослабление в дожде.
5. Рекомендация МСЭ-R P.618-12. Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, необходимые для проектирования систем связи Земля – космос.
6. Рекомендация МСЭ-R P.372-11. Радишум.
7. Рекомендация МСЭ-R P.452-12. Процедура прогнозирования для оценки микроволновых помех между станциями, находящимися на поверхности Земли, на частотах выше приблизительно 0,7 ГГц.
8. Рекомендация МСЭ-R P.531-12. Данные об ионосферном распространении радиоволн и методы прогнозирования, необходимые для проектирования спутниковых служб и систем.
9. Рекомендация МСЭ-R P.676-9. Затухание в атмосферных газах.
10. Рекомендация МСЭ-R P.678-3. Оценка изменчивости явлений распространения радиоволн и оценка риска, связанного с запасом на распространение.
11. Рекомендация МСЭ-R P.679-4. Данные о распространении радиоволн, необходимые для проектирования спутниковых радиовещательных систем.
12. Рекомендация МСЭ-R P.681-10. Данные о распространении радиоволн, необходимые для проектирования сухопутных подвижных систем связи Земля-космос.
13. Рекомендация МСЭ-R P.834-8. Влияние тропосферной рефракции на распространение радиоволн.
14. Рекомендация МСЭ-R P.838-3. Модель погонного ослабления в дожде, используемая в методах прогнозирования.
15. Рекомендация МСЭ-R P.840-6. Ослабление из-за облачности и тумана.
16. Tri T.Ha. Digital satellite communication. 2nd ed. Singapore: McGraw-Hill; 1990.

* * *

Evaluating Unavailability Algorithm of the Satellite Link Based on the Rain Factor, Taking into Account the Requirements for Bandwidth, Reliability and Limitation of the Frequency and Energy Resource

A. Orlov¹, K. Novosadov¹, D. Salnikov¹, V. Bezhenar¹

¹Military Signal Academy,
St. Petersburg, 194064, Russian Federation

Article info

DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-2-44-50

Received 2nd February 2021

Accepted 11st May 2021

For citation: Orlov A., Novosadov K., Salnikov D., Bezhenar V. Evaluating Unavailability Algorithm of the Satellite Link Based on the Rain Factor, Taking into Account the Requirements for Bandwidth, Reliability and Limitation of the Frequency and Energy Resource. *Proc. of Telecom. Universities*. 2021;7(2):44–50. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-2-44-50

Abstract: The article presents an algorithm for evaluating the indicator of unavailability for the rain factor of satellite radio link sections, taking into account the requirements for throughput, reliability and limitation of the frequency and energy resource. In contrast to the existing approaches, the proposed problem is based on an analytical expression, which reduces the computational complexity under acceptable constraints.

Keywords: earth station, satellite radio link, signal-code design, unavailability.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors of the article express their gratitude to the professor of the St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Doctor of Technical Sciences, Professor V.A. Zhiron, Professor of the Military Academy of Communications, Doctor of Technical Sciences, Professor S.O. Burlakov for consulting in the process of summarizing and providing materials for publication.

References

1. Sklar B. *Digital communications: Fundamentals and Applications*. 2nd ed. Los Angeles: Prentice Hall PTR; 2001.
2. Sujimol M.R., Rajat A., Gajendra S., Ravikumar G. Rain Attenuation using Ka and Ku-band frequency beacons at Delhi Earth Station. *NISCAIR-CSIR*. 2015;44(1):45–50. Available from: <http://nopr.niscair.res.in/handle/123456789/31326> [Accessed 02.02.2021]
3. Zhiron V., Orlov A., Smirnov A. The Model of the Satellite Communication Radio Link in the High-Speed Satellite System. *Proc. of Telecom. Universities*. 2018;4(3):45–53. (in Russ)
4. ITU. Recommendation ITU-R P.1815-1. *Differential rain attenuation*. Geneva: ITU-R; 2009.
5. ITU. Recommendation ITU-R P.618-12. *Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems*. Geneva: ITU-R; 2015.
6. ITU. Recommendation ITU-R P.372-11. *Radio noise*. Geneva: ITU-R; 2013.
7. ITU. Recommendation ITU-R P.452-12. *Prediction procedure for the evaluation of microwave interference between stations on the surface of the Earth at frequencies above about 0.7 GHz*. Geneva: ITU-R; 2005.
8. ITU. Recommendation ITU-R P.531-12. *Ionospheric propagation data and prediction methods required for the design of satellite services and systems*. Geneva: ITU-R; 2013.
9. ITU. Recommendation ITU-R P.676-9. *Attenuation by atmospheric gases*. Geneva: ITU-R; 2012.
10. ITU. Recommendation ITU-R P.678-3. *Characterization of the variability of propagation phenomena and estimation of the risk associated with propagation margin*. Geneva: ITU-R; 2016.
11. ITU. Recommendation ITU-R P.679-4. *Propagation data required for the design of broadcasting-satellite systems*. Geneva: ITU-R; 2016.
12. ITU. Recommendation ITU-R P.681-10. *Propagation data required for the design of Earth-space land mobile telecommunication systems*. Geneva: ITU-R; 2017.
13. ITU. Recommendation ITU-R P.834-8. *Effects of tropospheric refraction on radiowave propagation*. Geneva: ITU-R; 2016.
14. ITU. Recommendation ITU-R P.838-3. *Specific attenuation model for rain for use in prediction methods*. Geneva: ITU-R; 2005.
15. ITU. Recommendation ITU-R P.840-6. *Attenuation due to clouds and fog*. Geneva: ITU-R; 2013.
16. Tri T.Ha. *Digital satellite communication*. 2nd ed. Singapore: McGraw-Hill; 1990.

Сведения об авторах:

**ОРЛОВ
Алексей Евгеньевич**

кандидат технических наук, преподаватель кафедры военных систем космической, радиорелейной, тропосферной связи и навигации Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, vorl-2210@mail.ru

**НОВОСАДОВ
Кирилл Сергеевич**

адъюнкт кафедры военных систем космической, радиорелейной, тропосферной связи и навигации Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, x-bruk@mail.ru

**САЛЬНИКОВ
Денис Владимирович**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры военных систем космической, радиорелейной, тропосферной связи и навигации Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, denis_salnikov@mail.ru

**БЕЖЕНАРЬ
Вячеслав Николаевич**

преподаватель кафедры военных систем космической, радиорелейной, тропосферной связи и навигации Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, 5551541@mail.ru