

РАСЧЕТ ДОПУСТИМОЙ МОЩНОСТИ ЗЕМНОЙ СТАНЦИИ И ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ СЕТИ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

к.т.н. В.Н. Харченко, А.А. Лаврут, В.Н. Селевко
(представил д.т.н., проф. О. Н. Фоменко)

Предлагается расчетное соотношение для определения допустимой мощности передатчика земной станции, основанное на рекомендациях Союза по электро-связи. Проводится оценка пропускной способности сети спутниковой связи.

При увеличении мощности передатчика земной станции (ЗС) повышается помехоустойчивость и пропускная способность спутникового радиоканала. С другой стороны, при аренде частотно-энергетического ресурса бортового ретранслятора космического аппарата связи (БР КАС) необходимо, чтобы земная станция соответствовала всем требованиям и рекомендациям МККР по электромагнитной совместимости и стандартам данных организаций. В соответствии с рекомендацией Рек.455-2 и Рек. 580-1 МККР [1], при отсутствии экспериментально снятой диаграммы направленности (ДН) антенны земной станции спутниковой связи, для антенны с $D/\lambda \leq 100$ предлагается использовать следующую эталонную ДН:

$$\begin{aligned} G_A &= 52 - 10 \lg(D/\lambda) - 25 \lg(\varphi) \quad \text{при } 100\lambda/D \leq \varphi < 48^\circ; \\ G_A &= 10 - 10 \lg(D/\lambda) \quad \text{при } 48^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ. \end{aligned} \quad (1)$$

С другой стороны, в соответствии с Рекомендацией 524-2 МККР [1], максимально допустимые уровни плотности внеосевой эквивалентной изотропно-излучаемой мощности (ЭИИМ) земных станций, работающих на передачу в С-диапазоне, не должны превышать величину:

$$\text{ЭИИМ} = \begin{cases} 35 - 25 \lg(\varphi) \quad (\text{Вт}/4\text{кГц}) & 2,5^\circ \leq \varphi < 48^\circ; \\ -7 \text{ дБ} \quad (\text{Вт}/4\text{кГц}) & 48^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ. \end{cases} \quad (2)$$

Поскольку $\text{ЭИИМ} = P + G_A$, то для заданных класса излучений и скорости передачи можно вычислить соответствующую допустимую мощность передатчика ЗС. Эффективная ширина спектра сигнала при фазовой модуляции приблизительно равна [2]:

$$\Delta F_{\text{эфф}} \approx 1,4 * \beta * V_n, \quad (3)$$

где V_n – скорость передачи (бит/с); $\beta = 1$ для ФМ-2 и $\beta = 0,5$ для ФМ-4.

На основании соотношений (2) и (3), допустимые значения ЭИИМ ЗС:

$$\text{ЭИИМ} = \begin{cases} 35 - 25 \lg(\varphi) + 10 \lg(1,4 * \beta * V_n) - 10 \lg 4000, & 2,5^\circ \leq \varphi < 48^\circ; \\ -7 + 10 \lg(1,5 * \beta * V_n) - 10 \lg 4000, & 48^\circ \leq \varphi \leq 180 \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{или } \mathcal{E}\text{ИИМ} = \begin{cases} -1,02 - 25 \lg(\varphi) - 10 \lg(1,4 * \beta * V_{\text{н}}), & 2,5^\circ \leq \varphi < 48^\circ; \\ -43,02 + 10 \lg(1,4 * \beta * V_{\text{н}}), & 48^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ. \end{cases}$$

Учитывая (1) и (4), получаем расчетное соотношение для допустимой мощности передатчика земной станции

$$P_{\text{пддоп}} = \mathcal{E}\text{ССМ}_{\text{доп}} - G_{\text{А}} = -53,02 + 10 \lg(1,4 * \beta * V_{\text{н}}) + 10 \lg(D/\lambda). \quad (5)$$

Для антенны с $D = 2,5$ м и $\lambda = 0,05$ м ($f_{\text{пд}} = 6$ ГГц) выражение (5) преобразуется к виду

$$P_{\text{пддоп}} = -36,03 + 10 \lg(1,4 * \beta * V_{\text{н}}). \quad (6)$$

Результаты вычислений по формуле (6) сведены в табл. 1. Результаты расчета $P_{\text{пддоп}}$, приведенные в табл. 1, гарантируют выполнение рекомендаций МККР, однако являются несколько заниженными.

Выходная мощность усилителя также должна быть несколько выше, чтобы компенсировать потери в атмосфере и антенно-волноводном тракте, т.е. достаточно достоверной оценкой требуемой мощности усилителя, позволяющей выполнить рекомендации МККР, являются табличные значения, увеличенные в 1,2 ... 1,5 раза.

Таблица 1

Допустимая мощность передатчика ЗС

$V_{\text{н}}$, кбит/с	β	$P_{\text{пддоп}}$	
		дБВт	Вт
4,8	1	2,24	1,7
64	0,5	10,49	11,2
48	1	12,24	16,7
64	1	13,49	22,4

Пусть необходимо оценить пропускную способность сети спутниковой связи, если заданы характеристики ЗС, тип и орбитальная позиция БР КАС, известно количество станций в сети и задана требуемая вероятность ошибки при приеме одного бита информации. Решение данной задачи сводится к нахождению скорости передачи и избыточности помехоустойчивого кодирования, при которой отношение энергии сигнала к спектральной плотности мощности суммарных шумов обеспечивает требуемую вероятность ошибки на бит. Для полной оценки энергетического потенциала спутниковой радиолинии по методу, изложенному в [3 – 5], необходимы исходные данные, приведенные в табл. 2. Сущность расчета пропускной способности заключается в том, что выбирается определенная скорость передачи информации и для выбранных исходных данных (табл. 2) в соответствии с методом, изложенном [3 – 5], вычисляется отношение сигнал/шум на трассе "Земля-борт-Земля". Если для выбранного метода модуляции (например, ФМ-2) полученное отношение сигнал/шум больше требуемого для обеспечения заданной вероятности ошибки, то скорость передачи информации увеличивается и расчет отношения сигнал/шум на трассе "Земля-борт-Земля" повторяется.

Таблица 2

Исходные данные

<i>Передающая станция</i>		
Мощность передатчика		10 дБВт
Антенна	диаметр	2,5 м
	точность наведения на спутник	0,05°
	точность изготовления	5*10 ⁻⁴
	коэффициент использования площади антенны	0,6
Потери в фидере		0,4 дБ
Частота		6250 МГц
Географические координаты ЗС	широта	50,45° с.ш.
	долгота	30,6° в. д.
	высота над уровнем моря	0,1 км
Климатические условия	погонное ослабление сигнала в кислороде	0,007дБ/км
	погонное ослабление сигнала в дожде, превышаемое в течении 0,01 % времени	0,14 дБ/км
Спутник – ретранслятор ("Горизонт" 11 ствол)		
Мощность передатчика (с учетом снижения мощности на 3 дБ)		8,76 дБВт
Температура шумов, приведенная ко входу бортового приемника		2500° К
Ширина ДН приемной БА	α	6°
	β	12°
Ширина ДН передающей БА	α	6°
	β	12°
Геогр. координаты точки прицеливания бортовой антенны	широта	40° с.ш.
	долгота	53° в.д.
Долгота подспутниковой точки		53° в.д.
<i>Приемная станция</i>		
Антенна	диаметр	2,5 м
	точность наведения на спутник	0,00°
	точность изготовления	5*10 ⁻⁴
	коэффициент использования площади антенны	0,6
Потери в фидере на прием		0,2 дБ
Частота приема		3925 МГц
Шумовые характеристики приемного тракта	эффективная температура почвы вокруг станции	290 °К
	температура фонового излучения неба	3 °К
	эффективная температура среды затухания	280 °К
	температура волновода или линии передачи	290 °К
	"коэффициент наземного перехвата"	0,05
эффективная шумовая температура приемника (МШУ со всеми последующими каскадами)		75 °К
Географические координаты ЗС	широта	49,988° с.ш.
	долгота	36,234° в.д.
	высота над уровнем моря	0,2 км
Климатические условия	погонное ослабление сигнала в кислороде	0,0065 дБ/км
	погонное ослабление сигнала в дожде, превышаемое в течении 0,01 % времени	0,04 дБ/км

В противном случае скорость передачи информации уменьшается. После установки скорости передачи, при которой отношение сигнал/шум строго соответствует заданной помехоустойчивости, пропускная способность приближенно вычисляется по формуле

$$C = N \cdot V_{\max}(q_{TP}), \quad (7)$$

где $V_{\max}(q_{TP})$ – скорость передачи, при которой отношение сигнал/шум строго соответствует заданной вероятности ошибки (равно требуемому значению).

Требуемое качество передачи при использовании фазовой модуляции ФМ-2 (PSK) или ФМ-4 (QPSK) в отсутствии помехоустойчивого кодирования и при кодировании обеспечивается, если отношение энергии сигнала на один бит информации (E_b) к спектральной плотности мощности шума (N_0) превышает значения, приведенные в табл. 3 [6].

Полученное в результате расчета отношение сигнал/шум на трассе "Земля-борт-Земля", равное $E_b / N_0 = 10,681$ дБ, показывает, что обеспечивается вероятность ошибки на бит не хуже 10^{-6} . При этом реальная пропускная способность сети, вычисленная по формуле (7), будет равна

$$C = 100 \cdot 64 = 6400 \text{ кБит/с.} \quad (8)$$

При использовании помехоустойчивого кодирования со скоростью $R = 1/2$ для обеспечения вероятности ошибки на бит не хуже 10^{-6} требуемое отношение $E_b / N_0 = 6,1$ дБ (табл. 3).

Таблица 3

Зависимость помехоустойчивости приема от скорости кодирования и отношения энергии сигнала к спектральной плотности мощности шума

$P_{\text{ош}}$ на бит	Скорость кодирования		
	1 (без кодирования)	3/4	1/2
10^{-3}	6.8	5.3	4.2
10^{-4}	8.4	6.2	4.7
10^{-5}	9.6	7.0	5.4
10^{-6}	10.5	7.6	6.1
10^{-7}	11.3	8.3	6.7

Выполняя последовательное изменение количества станций и производя вычисления, аналогичные изложенным выше, можно показать, что требуемое значение E_b / N_0 обеспечивается при $N = 299$. Информационная скорость зависит от скорости кодирования и равна $V_{\text{и}} = V \cdot R$, а реальная пропускная способность сети может быть вычислена по формуле

$$C = N \cdot V \cdot R. \quad (9)$$

Таким образом, вычисленная реальная пропускная способность сети при использовании помехоустойчивого кодирования с $R = 1/2$ равна

$$C = 299 \cdot 64 \cdot 0,5 = 9568 \text{ кБит/с.} \quad (10)$$

Расчеты, проводимые по формулам 8, 10 с учетом табл. 1, 3, представле-

ны в табл. 4. На их основании можно сделать вывод о том, что использование помехоустойчивого кодирования является целесообразным, а кодирование со скоростью 3/4 обеспечивает большую пропускную способность по сравнению со скоростью 1/2.

Таблица 4

Результаты расчета пропускной способности

Скорость, $V_{п}$	$P_{пл доп}$	1 (без кодирования)		3/4		1/2	
		Макс. кол-во станций, N_{max}	Макс. пропускная способность, C_{max}	Макс. кол-во станций, N_{max}	Макс. пропускная способность, C_{max}	Макс. кол-во станций, N_{max}	Макс. пропускная способность, C_{max}
4,8	2,24	1507	7233	3010	10836	4280	10272
48	12,24	150	7200	301	10836	428	10272
64	13,49	113	7232	225	10800	321	10272

Таким образом, в статье предлагается новое расчетное соотношение для определения допустимой мощности передатчика земной станции. Предложенное соотношение позволяет рассчитать мощность земной станции, которая необходима при работе в сети спутниковой связи, обеспечивая требования МККР по электромагнитной совместимости. Проводится оценка пропускной способности сети спутниковой связи.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Рекомендации и отчеты МККР. Т. IV, ч. 1. Фиксированная спутниковая служба.* – Дубровник, 1986. – 560 с.
2. *Бородич С.В. ЭМС наземных и космических радиослужб. Критерии, условия и расчет.* – М.: Радио и связь, 1990. – 272 с.
3. *Харченко В.Н., Лаврут А.А. Особенности энергетического расчета спутниковых радиолиний // Космічна наука і технологія.* – 2001. – № 2/3. – С. 33 – 34.
4. *Харченко В.Н., Лаврут А.А., Кукушкин В.П. Методика энергетического расчета спутниковых радиолиний // Системи обробки інформації.* – Вип. 3(9). – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ, 2000. – С. 151 – 156.
5. *Харченко В.М., Лаврут О.О. Энергетичний розрахунок супутникових радіоліній. Навчальний посібник.* – Х.: ХВУ, 2000. – 47 с.
6. *Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации / Зюко А.Г., Фалько А.И., Панфилов И.П., Банкет В.Л., Иващенко П.В.* – М.: Радио и связь, 1985. – 271 с.

Поступила 15.07.2002

ХАРЧЕНКО Виктор Николаевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры Харьковского военного университета. В 1973 году окончил Харьковское ВВКИУ. Область научных интересов – системы спутниковой связи.

ЛАВРУТ Александр Александрович, адъюнкт кафедры Харьковского военного университета. В 1998 году окончил ХВУ. Область научных интересов – системы спутниковой связи.

СЕЛЕВКО Виктор Николаевич, нач. лаб. кафедры ХВУ. В 1983 году окончил КВВИУС. Область научных интересов – защита информации в компьютерных сетях и системах связи.