



**В. Е. Чеботарев, О. Б. Грицан, А. М. Бадертдинов,  
В. А. Анжина**

*ОАО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнёва»,  
г. Железногорск, Красноярский край, Россия*

## РАСЧЁТ ЭНЕРГЕТИКИ РАДИОЛИНИИ «ЗЕМЛЯ–ЛУНА»

*Рассматривается радиоканал между базовой лунной станцией связи и наземной станцией связи. Формируются требования к ширине диаграммы направленности антенной системы базовой лунной станции в зависимости от используемых средств слежения.*

*На основании анализа номенклатуры наземных станций спутниковой связи определяются частотный план, структура и скорости передаваемой информации. Проводится расчёт радиолинии и выбор основных характеристик аппаратуры базовой лунной станции наземной станции связи и их антенных систем.*

*Ключевые слова: спутниковая связь, базовая лунная станция связи, наземная станция связи, параметры радиолинии, антенная система.*

**V. E. Chebotarev, O. B. Gritsan, A. M. Badertdinov,  
V. A. Anzhina**

*JCS «Academician M. F. Reshetnev» Information Satellite Systems»,  
Zheleznogorsk, Russia*

## EARTH-MOON LINK BUDGET

*It is studied the radio link between base lunar communication station and ground link station. Requirements for base lunar station antenna beamwidth are formulated depending on used tracking means.*

*Based on analysis of existing ground link stations the frequency plan as well as data structure and rates were defined. Radio link calculation and basic characteristics selection were performed for equipment of base lunar station, ground link station and their antenna systems.*

*Key words: satellite communication, base lunar communication station, ground link station, radio link parameters, antenna system.*

В концепции лунной системы спутниковой связи базовая лунная станция связи (БЛСС) должна размещаться на видимой с Земли стороне Луны в зоне, обеспечивающей непрерывную связь с Землёй при наличии либрации Луны по долготе ( $7,9^\circ$ ) и широте ( $6,9^\circ$ ) [1].

Таким образом, антенная система БЛСС для связи с наземной станцией может быть ре-

ализована без системы слежения, если ширина диаграммы будет превышать сумму составляющих: по либрации ( $2 \times 7,9^\circ$ ), угловому размеру Земли ( $2,05^\circ$ ) и погрешности установки ( $2 \times 1,0^\circ$ ), то есть не менее  $20^\circ$ .

Если антенную систему БЛСС оснастить двухступенным поворотным устройством: по углу места и азимуту, то ширина диаграммы антенны может быть сужена. Так, при компенсации только либраций Луны за счёт организации слежения антенн ширина

диаграммы антенны должна быть не менее  $5^\circ$ . Если учитывать изменения углового положения наземной станции в системе координат БЛСС, обусловленных вращением Земли, то ширину диаграммы антенны БЛСС можно далее сужать до разумного предела.

Для условий безатмосферной Луны в радиолинии «Луна–Земля» целесообразно применить Ку-частотный диапазон (11/14 ГГц), используемый в коммерческих спутниковых сетях связи. Преимущества этого частотного диапазона очевидны: распространённая элементная база, малые диаметры приёмопередающих антенн (в сравнении с С- и Х-диапазонами) при достаточно высоких коэффициентах усиления. Также в этом случае желательно использовать протокол DVB-S2, широко распространённый в коммерческой спутниковой связи, с сигнально-кодовой конструкцией QPSK+LDPC и необходимым отношением энергии бита к спектральной плотности мощности шума ( $E_b/N_0 = 8$  дБ) [2–6].

В этом случае расчет порогового энергopotенциала  $(C/N_0)_{\text{пор}}$  проводится по следующей формуле [2]:

$$(C/N_0)_{\text{пор}} = E_b/N_0 + 10 \log(V), \quad (1)$$

где  $V$  – пропускная способность, бит/с;  $E_b/N_0$  – отношение энергии бита к спектральной плотности мощности шума, дБ.

Для случая с максимальной пропускной способностью ( $V = 512$  кбит/с) получаем  $(C/N_0)_{\text{пор}} = 65,1$  дБ.

Исходя из выбранного частотного диапазона радиолинии и ограничений на ширину диаграммы сформулируем требования к усилению антенны и её геометрическим размерам.

Диаметр параболической антенны  $D_A$ , ширина луча по уровню половинной мощности  $\varphi_{0,5}$  и максимальный коэффициент усиления антенны  $G$  рассчитываются по следующим формулам [3; 4; 6; 7]:

$$\varphi_{0,5} = \frac{60 \cdot \lambda}{D_A}; \quad \lambda = \frac{c}{f}; \quad G = K_{\text{И}} \left( \frac{\pi D_A}{\lambda} \right)^2, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – длина волны радиосигнала;  $c$  – скорость света;  $f$  – частота радиосигнала;  $K_{\text{И}}$  – коэффициент использования поверхности антенны,  $K_{\text{И}} = 0,5–0,7$ .

При одновременном использовании антенны БЛСС на приём и передачу диаметр антенны выбирается из условия обеспечения

требуемой ширины диаграммы направленности для максимальной рабочей частоты. Расчетные значения антенны БЛСС для различных значений  $\varphi_{0,5}$  приведены в табл. 1.

Таблица 1

Расчётные значения антенны БЛСС на приём

Ширина диаграммы, град	20	10	5	3
Частота, ГГц	14	14	14	14
Длина волны, м	0,0214	0,0214	0,0214	0,0214
Диаметр антенны, м	0,064	0,128	0,256	0,428
Коэффициент усиления, дБ	17,3	23,3	29,3	33,7

Базовое уравнение для расчета радиолинии может быть представлено следующим образом [2; 3]:

$$(C/N_0)_{\text{пор}} = \frac{E G_{\text{прм}}}{L_{\text{св}} \cdot L \cdot k}; \quad E = P_{\text{прд}} \cdot G_{\text{прд}}; \quad L_{\text{св}} = \frac{(4\pi D)^2}{\lambda^2}, \quad (3)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана, равная  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Вт/К·Гц;  $P_{\text{прд}}$  – передаваемая мощность;  $D$  – расстояние между передающей и приёмной станциями;  $E$  – эффективная изотропная излучающая мощность;  $G_{\text{прм}}$ ,  $G_{\text{прд}}$  – коэффициенты усиления антенн приёмника и передатчика;  $L_{\text{св}}$  – затухание энергии при распространении сигнала в свободном пространстве;  $L$  – потери в радиоканале (складываются из потерь в атмосфере, потерь в гидрометеорах и для принятого частотного диапазона не превышают 5 дБ).

Используем уравнения (2) и (3) для расчета параметров радиолинии «Луна–Земля» (длина волны  $\lambda_{11} = 0,0273$  м, частота  $f_{11} = 11$  ГГц) и радиолинии «Земля–Луна» (длина волны  $\lambda_{14} = 0,0214$  м, частота  $f_{14} = 14$  ГГц).

В результате получим систему двух уравнений, в которых общими являются диаметры антенн БЛСС и наземной станции связи:

– радиолиния «Луна–Земля»:

$$P_{\text{БЛС}} \cdot K_{\text{И}}^2 \left( \frac{\pi}{\lambda_{11}} \right)^2 \cdot D_{\text{БЛС}}^2 \cdot D_{\text{НСС}}^2 = (C/N_0)_{\text{пор}} \cdot L \cdot k \cdot T(4D)^2; \quad (4)$$

– радиолиния «Земля–Луна»:

$$P_{\text{НСС}} \cdot K_{\text{И}}^2 \left( \frac{\pi}{\lambda_{14}} \right)^2 \cdot D_{\text{НСС}}^2 \cdot D_{\text{БЛС}}^2 = (C/N_0)_{\text{пор}} \cdot L \cdot k \cdot T(4D)^2. \quad (5)$$

Из совместного решения уравнений (4) и (5) получаем соотношение между мощностями передатчиков, пропорциональное квадрату отношения длин волн:

$$\frac{P_{\text{БЛС}}}{P_{\text{НСС}}} \approx \left( \frac{\lambda_{11}}{\lambda_{14}} \right)^2 = 1,63. \quad (6)$$

Наличие функциональной связи (уравнение 6) уменьшает количество выбираемых независимых параметров до двух:  $D_{\text{НСС}}$ ,  $P_{\text{БЛС}}$  ( $P_{\text{НСС}}$ ) в зависимости от предлагаемых вариантов ширины диаграммы антенны БЛС и эквивалентных им диаметров  $D_{\text{БЛС}}$ .

Расчетные данные параметров радиолинии для случая  $D = 384\,400$  км приведены в табл. 2.

Таблица 2

Мощность передатчика БЛС, Вт	Требуемый диаметр антенны наземной станции связи, м			
	БЛС – 0,06	БЛС – 0,13	БЛС – 0,26	БЛС – 0,43
5	29,2	14,6	7,3	4,4
10	20,6	10,3	5,2	3,1
15	16,8	8,4	4,2	2,5
20	14,6	7,3	3,6	2,2
25	13,0	6,5	3,3	2,0
30	11,9	6,0	3,0	1,8

На основании данных табл. 2 построены графики (рис. 1), позволяющие осуществить плавный выбор параметров:

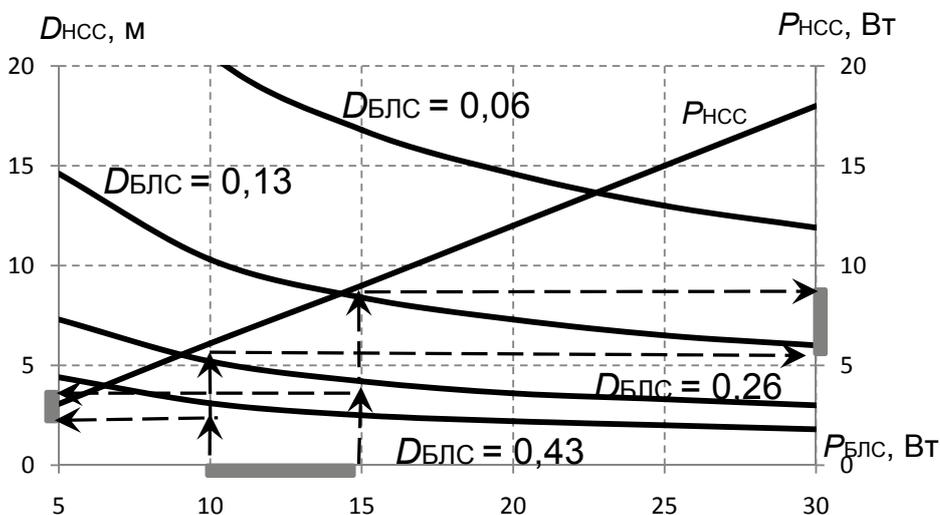


Рис. 1. Зависимость диаметра антенны наземной станции от мощности передатчика БЛС при различных диаметрах антенны БЛС

$P_{\text{БЛС}}$  ( $P_{\text{НСС}}$ ),  $D_{\text{НСС}}$  для каждого дискретного значения диаметра антенны БЛС.

В настоящее время много фирм, в том числе отечественных, предлагают станции спутниковой связи с различными характеристиками антенн и приемопередатчиков. В данном случае в качестве антенны наземной станции связи предлагается использовать антенну диаметром 5,0 м с системой двухстепенного слежения (ЗАО «Сатис-ТЛ-94») и наземный передатчик с мощностью 10 Вт (ОАО «НПП «Радиосвязь»). Для БЛС предлагается применить антенну диаметром 0,26 м с системой двухстепенного слежения и передатчик с мощностью 15 Вт (табл. 3).

Таблица 3

Основные параметры станций связи

№	Наименование параметра	Значение	Примечания
1	Наземная станция связи		
	– диаметр антенны, м	5	
	– мощность передатчика на частоте f14, Вт	10	
2	БЛС		
	– диаметр антенны, м	0,26	
	– мощность передатчика на частоте f11, Вт	15	
3	Максимальная пропускная способность, кбит/с	512	

Приведённый в настоящей статье расчёт энергетики радиолинии показывает возможность организации скоростной линии связи «Луна–Земля–Луна» с приемлемыми характеристиками оборудования для БЛС и наземной станции связи. В последующих расчетах

необходимо предусмотреть обоснованные запасы по параметрам оборудования с перспективой повышения пропускной способности радиоканала «Луна–Земля».

### Библиографические ссылки

1. Чеботарев В. Е., Шмаков Д. Н., Анжина В. А. Концепция лунной системы спутниковой связи // Исследования наукограда. 2014. № 1(7) (январь-март). С. 26–31.
2. Скляр Бернанд. Цифровая связь. Теоретическое и практическое применение : пер. с англ. 2-е изд., испр. М. : Издательский дом «Вильямс», 2003. 1104 с. : Парал. тит. англ.
3. Спилкер Дж. Цифровая спутниковая связь : пер. с англ. / под ред. В. В. Маркова. М. : Связь, 1979. 592 с., ил.
4. Камнев В. Е., Черкасов В. В., Чечин Г. В. Спутниковые сети связи : учеб. пособие. М. : Альпина Паблишер, 2004. 536 с.: ил.
5. Кресснер Г. Н., Михаелс Д. В. Введение в системы космической связи. М. : Связь, 1967. 392 с.
6. Основы технического проектирования систем связи через ИСЗ / А. Д. Фортюшенко, Г. Б. Аскенази, В. Л. Быков, О. С. Крапотин. М. : Связь, 1970. 331 с.
7. Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения : учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосм. ун-т. Красноярск, 2011. 488 с., [24] с ил.

*Статья поступила в редакцию  
20.05.2014 г.*