

РАСЧЕТ ДИАМЕТРА РЕФЛЕКТОРА SAT АНТЕННЫ ПРИ ЦИФРОВОМ ПРИЕМЕ

Песков С.Н., директор МВКПК, к.т.н.,

В статье рассматривается инженерный способ расчета диаметра рефлектора параболической SAT антенны при известной эквивалентной излучаемой мощности и принимаемой вероятности ошибки (BER)

Диаметр рефлектора параболической антенны D выбирается из условия формирования требуемого отношения мощности полезного сигнала P_S к мощности шума P_N ($S/N = P_S/P_N$). Исходя из известного уравнения радиосвязи искомое отношение записывается в виде:

$$\frac{S}{N} = \frac{P_{пер} G_{пер} G_A b}{k T_c ПМ}, \quad (1)$$

где: $P_{пер}$ – мощность ретранслятора на ИСЗ;

$G_{пер}$ – коэффициент усиления бортовой антенны МСЗ;

G_A – коэффициент усиления антенны в направлении к точке приема;

b – потери на распространение сигнала по линии «вниз» (от ИСЗ до приемной антенны) на рассматриваемой длине волны λ ;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж / К⁰ - постоянная Больцмана;

T_c – шумовая температура приемной системы, выражаемая в градусах Кельвина:

$$T_c = T_A + T_0 (10^{(F+\alpha)/10} - 1); \quad (2)$$

T_A – шумовая температура SAT антенны, обычно составляющая 30-60 К⁰ в К-и диапазоне;

F – коэффициент шума малошумящего конвертера (LNC - Low Noise Converter);

α - потери между облучателем и входом конвертера (поляризатора) при нормальной температуре $T_0 = 293$ К⁰. Типовое значение 0,1-0,2 дБ;

Π – эффективная сквозная полоса пропускания приемника до входа демодулятора. Для современных цифровых традиционных SAT каналов принята полоса в 36 МГц (27 Мсим/с);

M – коэффициент, учитывающий влияние шумов Земли.

Уравнение (1) удобнее записать в логарифмическом виде с учетом следующих определений и дополнений:

$$P_{ЭИИМ} = 10 \lg(P_{пер} G_{пер}) - \text{эквивалентная изотропно-излучаемая мощность}; \quad (3)$$

$$10 \lg(k) = -228,6 \text{ дБ} \cdot \text{Вт/К} \cdot \text{Гц}; \quad (4)$$

$$10 \lg(\Pi) = 75,6 + 10 \lg\left(\frac{\Pi}{36}\right), \quad (5)$$

где полоса пропускания Π выражается в мегагерцах;

$$10 \lg\left(\frac{G_A}{T_c}\right) - \text{добротность приемной системы}; \quad (6)$$

$$M = 10 \lg(16,2 / \varphi + 0,82), \quad (7)$$

где φ - угол возвышения приемной антенны, определяемой как:

$$\varphi = \operatorname{arctg}[(\cos \psi - 0,15 / \sin \psi)], \text{ где} \quad (8)$$

$$\psi = \arccos(\cos \theta \cos \beta). \quad (9)$$

Азимут ориентации SAT приемной антенны находится из выражения:

$$\alpha = 180 \pm \arccos(\operatorname{tg} \beta / \operatorname{tg} \psi). \quad (10)$$

здесь: θ - разница между географическим местом приема и положением ИСЗ по долготе;

β - географическая широта точки приема.

Потери на распространение b определяются по формуле:

$$b = \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2, \quad (11)$$

где

$$R = 42644 \sqrt{1 - 0,3 \cos \psi} \quad (12)$$

- расстояние от ИСЗ до точки приема.

В логарифмическом виде потери на распространение записываются в виде:

$$10 \lg(b) = -185 - 20 \lg(f) - 10 \lg(1 - 0,3 \cos \psi), \quad (13)$$

где несущая частота f выражается в гигагерцах, а R - в километрах.

Решив уравнение (1) относительно добротности приемной системы Q в логарифмическом виде путем подстановки (3–13), получим расчетное соотношение¹

$$Q_{\text{[дБ]}} = C / N - P_{\text{ЭИИМ}} + M + 20 \lg(f) + 10 \lg(1 - 0,3 \cos \psi) + 10 \lg(\Pi / 36) + 32. \quad (14)$$

Коэффициент усиления SAT антенны зависит от диаметра рефлектора D рабочей длины волны λ :

$$G_A = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2, \quad (15)$$

где $\eta = 0,55 \dots 0,85$ – коэффициент использования поверхности (КИП). Для прямофокусных антенн рекомендуется принимать $\eta = 0,65$, а для Off-Set-ных антенн – $0,75$.

Выражение (15) удобно выразить в логарифмической форме:

$$G_A = 20,4 + 20 \lg(f) + 20 \lg(D) + 10 \lg(\eta). \quad (16)$$

В формуле (16) частота f выражается в гигагерцах, а диаметр рефлектора D – в метрах.

Теперь, проведя обычные арифметические действия, можно получить соотношение по расчету диаметра рефлектора SAT параболической антенны:

$$20 \lg(D) = S / N + T_C - \eta - P_{\text{ЭИИМ}} + M + 10 \lg(1 - 0,3 \cos \psi) + 10 \lg(\Pi / 36) + 11,6. \quad (17)$$

В свою очередь, мощностное отношение сигнал/шум - S/N , целесообразно выразить в энергетических параметрах, используемых в цифровой технике:

¹ В выражении (12) учтены потери на распространение в атмосфере ($\approx 1,3$ дБ) и поляризационные потери ($\approx 0,3$ дБ) для наихудших условий распространения

$$\frac{S}{N} = \frac{E_b}{N_0} + 10\lg\left(1 - \frac{a}{4}\right) - 10\lg(204/188) + 10\lg(m) - 10\lg(1/RC), \quad (18)$$

здесь E_b/N_0 – отношение энергии сигнала, приходящейся на бит информации E_b к спектральной мощности шума N_0 ;

a – коэффициент скругления спектра. Для DVB-S $a = 0,35$;

m – коэффициент мапинга (число бит на символ информации). Для DVB-S сигналов (QPSK) $m = 2$.

RC – скорость внутреннего кодирования (от 1/2 до 7/8).

Для вероятности ошибки $BER = 2 \cdot 10^{-4}$ нормированный эквивалентный шумовой параметр $E_b/N_0 = 8$ дБ. Тогда, подставив численные значения, получим:

$$\frac{S}{N} = 10,26 - 10\lg(1/RC). \quad (19)$$

Выполнив соответствующие математические преобразования и подстановки, получим конечной выражение по расчету диаметра рефлектора SAT антенны через известное (справочное) значение $P_{ЭИИМ}$:

$$20\lg(D) = A - P_{ЭИИМ}, \quad (20)$$

где:

$$A = T_C - P_{ЭИИМ} - \eta + M + 10\lg(1 - 0,3 \cos \psi) + 10\lg(\Pi/36) + K_3 + 16,3. \quad (21)$$

В формуле (21) K_3 представляет собой коэффициент запаса на всепогодные условия, некоторые не учитываемые факторы (например, шумы гетеродина, его энергетическую перегрузку, поляризационную ошибку и т.п.) старение. Для индивидуального приема рекомендуется принимать K_3 величиной порядка 2-3 дБ, а для коллективных СКТ – порядка 5 дБ.

Искомый диаметр рефлектора SAT антенны находится из выражения:

$$D_{[м]} \geq 10^{A/20}, \quad (22)$$

На практике, при выборе шумовой температуры антенны удобно воспользоваться эмпирической формулой:

$$T_A = \left(45 + \frac{180}{\varphi}\right) \cdot \frac{\pi}{\sqrt{f}}. \quad (23)$$

На практике часто приходится без высокой точности, но оперативно рассчитать требуемый диаметр рефлектора параболической антенны. В этом случае, введя усредненные параметры может быть записано простое выражение (для $K_3 = 2$ дБ):

$$D_{[м]} \geq \frac{(45 - P_{ЭИИМ})}{20}. \quad (24)$$

Пример. Рассчитать требуемый диаметр рефлектора параболической антенны на частоте 11,2 ГГц при использовании конвертера с коэффициентом шума 0,5 дБ (совместно с поляризатором). Принять $\eta = 0,65$. Антенна ориентирована на спутник в позиции 13^0 в.д., $P_{ЭИИМ} = 42$ дБ·Вт, а приемная SAT антенна установлена с географическими координатами $\theta_0 = 38^0$ в.д. и $\beta = 56^0$ с.ш., $CR = 3/4$.

Решение.

1. Вычисляем азимут и угол возвышения приемной SAT антенны из выражений (8-10):

$$\theta = 38 - 13 = 25^{\circ}, \quad a = 209,4^{\circ}, \quad \varphi = 22,5^{\circ}.$$

2. Шумовая температура антенны из (23):

$$T_A = \left(45 + \frac{180}{\varphi}\right) \cdot \frac{\pi}{\sqrt{f}} = \left(45 + \frac{180}{22,5}\right) \cdot \frac{\pi}{\sqrt{11,2}} = 49,7.$$

3. Рассчитываем шумовую температуру приемной системы по формуле (2):

$$T_c = T_A + T_0 \left(10^{(F+\alpha)/10} - 1\right) = 49,7 + 293 \left(10^{(0,5)/10} - 1\right) = 87,0 \text{ K}^0 (19,4 \text{ дБ}).$$

4. Величина коэффициента M , учитывающего влияние шумов Земли из (7):

$$M = 10 \lg(16,2 / \varphi + 0,82) = 10 \lg\left(\frac{16,2}{22,5 + 0,82}\right) = 1,88 \text{ дБ}.$$

5. Подставляя найденные промежуточные численные значения в (21), вычисляем энергетический коэффициент A , задаваясь коэффициентом запаса в 2 дБ:

$$\begin{aligned} A &= T_c - P_{\text{ЭИИМ}} - \eta + M + 10 \lg(1 - 0,3 \cos \psi) + 10 \lg(\Pi / 36) + K_3 + 16,3 = \\ &= 19,4 - 42 - 10 \lg(0,65) + 1,88 + 10 \lg(1 - 0,3 \cos(56) \cdot \cos(25)) + 10 \lg(36 / 36) + 2 + 16,3 = 3,04 \text{ дБ}. \end{aligned}$$

6. По формуле (22) находим искомое значение диаметра рефлектора SAT антенны:

$$D_{[м]} \geq 10^{A/20} = 10^{3,04/20} = 1,42 \text{ м}.$$

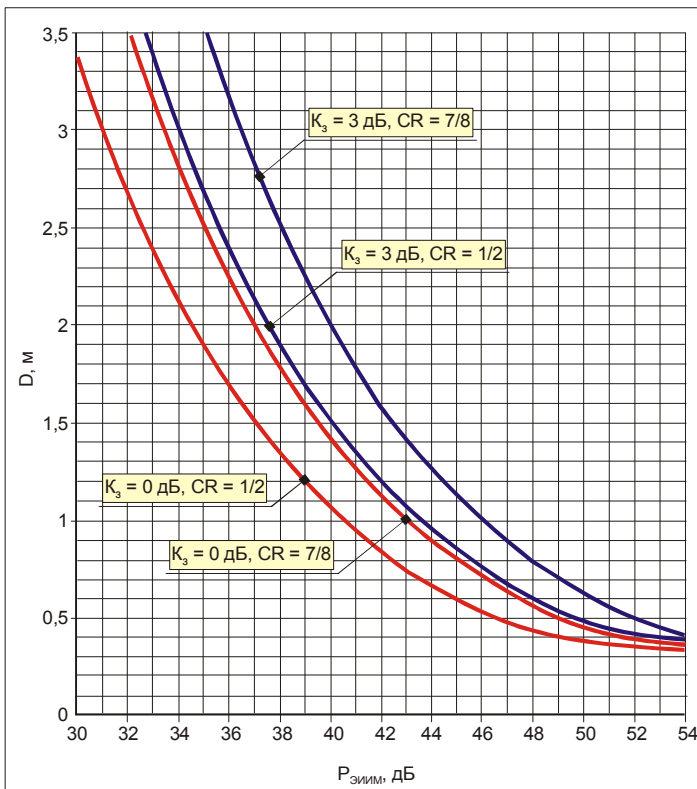


Рис. 1

7. Только информативно рассчитаем коэффициент усиления антенны и добротность приемной системы при заданных параметрах (выражения 6 и 16):

$$\begin{aligned} G_A &= 20,4 + 20 \lg(f) + 20 \lg(D) + 10 \lg(\eta) = \\ &= 20,4 + 20 \lg(11,2) + 20 \lg(1,42) + 10 \lg(0,65) = \\ &= 42,6 \text{ дБ} \end{aligned}$$

$$Q = G_A - T_c = 42,6 - 19,4 = 23,2 \text{ дБ}.$$

В заключение напомним читателям, что не следует увлекаться увеличением диаметра рефлектора SAT антенны, т.к. с увеличением диаметра увеличивается ее коэффициент усиления (см. формулы 15 и 16), а диаграмма направленности обужается. Ширина диаграммы направленности φ_0 (в градусах) параболической антенны выражается известной зависимостью:

$$\varphi_o = \frac{70\lambda}{D} = \frac{21}{f \cdot D}, \text{ град.} \quad (25)$$

В (25) частота f в ГГц и диаметр, как обычно, в метрах.

Зависимости ширины ДН от диаметра рефлектора SAT антенны на частотах 12 ГГц и 4 ГГц представлена на рис.2. Так, при $D = 3,5$ м ширина ДН составляет в диапазоне Ku-band $0,5^\circ$. Физически это означает, что изменение ориентации приемной антенны на $0,25^\circ$ (довольно жесткое требование) приводит к снижению отношения S/N на 3 dB (весьма ощутимая величина), что эквивалентно уменьшению диаметра рефлектора антенны до 2,5 метра.

2008г.

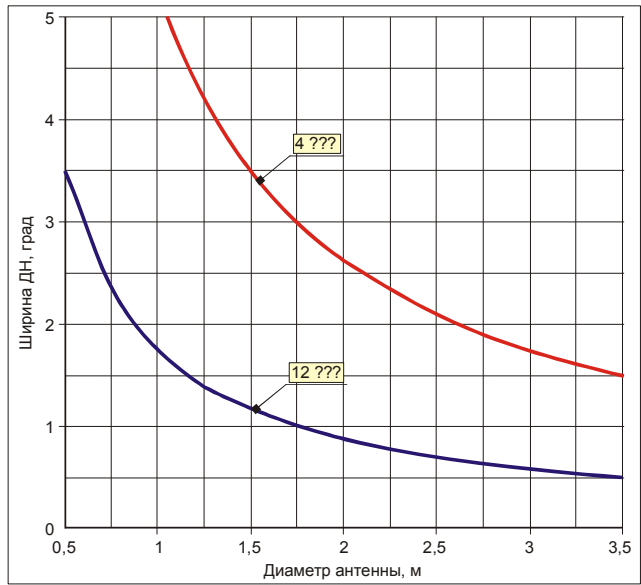


Рис.2