

## К РАСЧЕТУ ПАРАБОЛИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ ДЛЯ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИСТЕМ РАДИОДОСТУПА

Дубровин В.С., Колесникова И.В.

ГОУВПО НИ «Мордовский государственный университет им. Н.П.Огарева», г. Саранск

E-mail: dvs8937@saransk.ru

**Аннотация.** Рассматриваются особенности расчета зеркальных рупорных антенн, работающих в системах радиодоступа со сверхширокополосными сигналами по технологии UWB.

**Ключевые слова.** Сверхширокополосные сигналы, антенна, рупорный облучатель, плотность потока энергии, апертурная составляющая, диаграмма направленности.

### Постановка задачи

Применение сверхширокополосных (СШП) сигналов в системах радиодоступа имеет ряд преимуществ [1–5]: возможность повторного использования выбранной части радиодиапазона; большая потенциальная пропускная способность; слабая чувствительность к многолучевому распространению, которая особенно важна в условиях городской застройки и при распространении сигналов внутри помещения; высокая потенциальная удельная плотность передачи данных.

Один из важнейших элементов СШП системы – антенная система. Параболические антенны являются одним из наиболее распространенных типов антенн, используемых в современных радиотехнических системах различного назначения. Наибольшее распространение получили антенны с зеркалами в виде параболоида вращения, усеченного параболоида, параболического цилиндра и вырезки из параболоида вращения (обычно с контуром овальной формы). Такое широкое распространение этих антенн объясняется возможностью формирования самых разнообразных диаграмм направленности при относительной простоте конструкции, достаточно высоком КПД, малой шумовой температуре.

Параболическая антенна состоит из двух элементов: металлического зеркала параболического профиля (рис.1а) и облучателя (рис. 1б) помещенного в фокусе зеркала. Принцип работы антенны основан на том, что сумма расстояний от фокуса  $F$  до зеркала и от зеркала до апертуры является величиной постоянной ( $FA+AA'=FB+BB'$ ). Следовательно, если в фокусе расположен источник сферической волны, то после отражения от зеркала волна преобразуется в плоскую, и излучающий раскрыв антенны возбуждается синфазно.

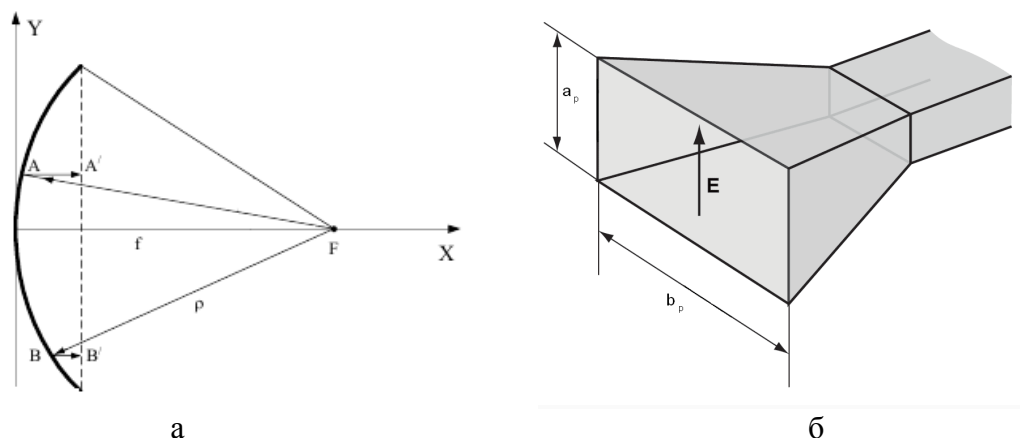


Рис. 1а – Схема параболической антенны; Рис.1б – Рупорный облучатель

При расчетах в качестве зеркала выберем параболоид вращения, с помощью которого можно достичь такой диаграммы направленности (ДН) у которого ширина главного лепестка по уровню половинной мощности равна в Е - и Н-плоскостях и которая характеризуется высокой степенью направленности. При этом облучатель антенны должен иметь ДН в виде тела вращения и возможность соединения с волноводным трактом.

Облучатель является важнейшим элементов зеркальной антенны, в значительной степени определяющим ее характеристики. Облучатели должны удовлетворять следующие основные требования:

- 1) диаграмма направленности должна обеспечивать необходимое амплитудное распределение поля на излучающем раскрыве зеркала;
- 2) облучатель должен иметь фазовый центр, совмещенный с фокусом зеркала;
- 3) рабочая полоса частот должна соответствовать заданной;
- 4) электрическая прочность облучателя должна быть достаточной для пропускания без пробоя полной мощности излучения антенны;
- 5) поперечные размеры облучателя должны быть минимальными для уменьшения затенения зеркала;
- 6) конструкция облучателя должна быть механически прочной.

Наибольшее применение на практике нашли [6] облучатели следующих типов: вибраторные; волноводно-рупорные; щелевые.

Вибраторные и щелевые облучатели широко применяются в сантиметровом диапазоне, но основным их недостатком является узкая полоса рабочих частот.

Облучатели в виде открытого конца волновода или рупора удобно использовать при больших мощностях излучения. Они обладают также хорошими диапазонными свойствами. Однако открытый конец прямоугольного волновода обладает разными диаграммами направленности в плоскостях Е и Н. От этого недостатка свободны рупорные облучатели, где имеется возможность почти независимой регулировки диаграмм направленности в плоскостях Е и Н путем подбора размеров раскрыва рупора  $a_p$  и  $b_p$  (рис. 16).

Согласно СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383-03, уровни электромагнитных полей, создаваемые антеннами передающих радиотехнических объектов на территории жилой застройки, внутри жилых, общественных и производственных помещений, не должны превышать предельно допустимых значений. Необходимо рассчитать плотности потока энергии (ППЭ) для различных значений мощности приемопередатчика и на основе этих расчетов выбрать то значение ППЭ, при котором не требуется лицензирование проектируемой сети.

При выборе рабочего диапазона частот будем исходить из того, что в соответствии с частотным планом России для СШП–системы связи отведен открытый для свободного использования диапазон частот 5,1-7,1 ГГц. Этот диапазон удовлетворяет требованию сверхширокополосности, так как к сверхширокополосным (СШП) сигналам относятся сигналы [7] с центральной частотой  $f_u$  и полосой  $\Delta f$ , имеющие относительную полосу  $D = (\Delta f / f_u) > 0,2...0,25$ .

### Метод решения

**Мощность передатчика.** Для расчета энергетического потенциала системы радиосвязи, а, следовательно, для расчета антенной системы, необходимо рассчитать пиковую мощность передатчика  $P_{\text{пик.пер}}$ .

В соответствии с уравнением дальности связи [4]

$$P_{\text{пик.пер}} = \frac{16\pi^2 P_{\text{АП}} R^2 \eta_{\text{пер}} \eta_{\text{пр}} U}{G_{\text{пр}} G_{\text{пер}} \lambda^2}, \quad (1)$$

где  $P_{пик.пер}$  – пиковая мощность на выходе передатчика;

$P_{АП}$  – мощность на входе приемника;

$R$  – дальность действия или расстояние, на котором измерена мощность;

$\eta_{пер}$   $\eta_{пр}$  – потери в антенно-фидерном тракте;

$G_{пр}$ ,  $G_{пер}$  – коэффициент усиления приемной и передающей антенн соответственно;

$U$  – затухание сигнала в осадках;

$\lambda$  – длина волны,  $\lambda = c/f_c$ ,  $f_c$  – средняя частота.

Рассчитаем длину волны:

$$\lambda = \frac{c}{f_c} = \frac{2,99 \cdot 10^8}{6,1 \cdot 10^9} = 0,05 \text{ м.}$$

Усиление антенн на передачу и приём можно определить [8] по диаметру зеркала и длине волны на участке передачи:

$$G_{\underset{пер}{пр}} = 10 \lg \left( \left( \frac{\pi \cdot D}{\lambda} \right)^2 \cdot \gamma_A \right), \quad (2)$$

где  $G_{\underset{пер}{пр}}$  – коэффициент усиления приемной и передающей антенн;

$D$  – диаметр зеркала антенно-фидерного устройства;

$\gamma_A$  — коэффициент использования поверхности зеркала (КИП).

Численное значение коэффициента использования поверхности раскрыва определяется [9] не только законом распределения амплитуды поля по раскрыву антенны, но и рядом других факторов, обусловленных конструкцией антенны (утечка части мощности облучателя за края зеркала, затенение части раскрыва антенны облучателем, интерференция поля антенны и поля облучателя, неточность совмещения фазового центра облучателя с фокусом зеркала и т.д.). Полный коэффициент использования параболической антенны с обычным, например, рупорным облучателем на практике не превосходит 0,5 – 0,6 [10].

Примем КИП  $\gamma_A = 0,6$  (однозеркальная антенна), диаметр зеркала  $D=0,6$  м. Тогда коэффициент усиление антенн на передачу и приём по формуле (2):

$$G_{\underset{пер}{пр}} = 10 \lg \left( \left( \frac{3,14 \cdot 0,6}{0,05} \right)^2 \cdot 1,3 \right) = 32,7 \text{ (дБ)}.$$

Потери в антенно-фидерном тракте зависят от его конструкции и диапазона рабочих частот. Обычно при расчетах принимают  $\eta_{пер} = 2...3 \text{ дБ}$ ,  $\eta_{пр} = 0,5...1 \text{ дБ}$  [8].

Затухание сигнала в осадках зависит от вида гидрометеоров (дождь, снег, туман), размеров зоны их выпадения, интенсивности осадков в зоне и т.д. Как указано в [11] расчёты показывают, что в диапазонах частот  $f \leq 10$  ГГц величина затухания радиосигнала в осадках составляет  $U = 1,5...3$  дБ. Поэтому примем  $U = 3$  дБ.

По формуле (1) рассчитаны пиковые значения мощности передатчика для  $R=1000$  м,  $R=500$  м,  $R=100$  м, которые соответственно составили 1,61 Вт, 0,4 Вт и 0,016 Вт.

Зная пиковую мощность передатчика [12] (среднюю за один период высокочастотного колебания мощность, которую передатчик подводит к фидеру антенны на пике огибающей сигнала при нормальных рабочих условиях) можно определить [4] его среднюю мощность:  $P_{пер} = P_{пик.пер} \cdot Q$ , где  $P_{пер}$  – средняя мощность передатчика;  $Q$  – скважность сигнала.

**Расчет плотности потока энергии антенны.** Значение плотности потока энергии апертурной антенны в произвольной точке пространства (в рамках энергетического подхода к решению задачи) определяется [13] по формуле:

$$P_{\Sigma} = P_a + P_{обл} + P_{оиф} + P_{пр}, \quad (3)$$

где  $P_a$  – апертурная составляющая;

$P_{обл}$  - составляющая, определяемая излучением облучателя;

$P_{диф}$  - составляющая, обусловленная токами, протекающими вблизи кромки зеркала (дифракционными токами);

$P_{пр}$  - составляющая, возникающая в результате прохождения энергии сквозь основное зеркало антенны, если оно имеет решетчатую структуру.

Все пространство вблизи антенны условно делится [13] на ряд характерных областей (рис. 4), которые ввиду симметрии показаны на рисунке 4 только в секторе углов  $0 \leq \theta \leq \pi$ .

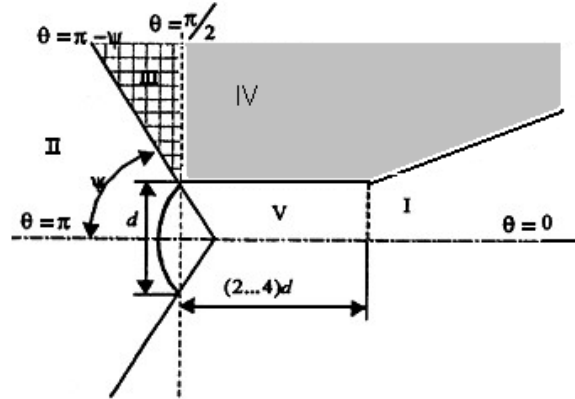


Рис. 4 – Области анализа ППЭ

Значение ППЭ в области I определяется апертурной составляющей  $P_a$  и составляющей облучателя  $P_{обл}$ .

В области II - заднем полупространстве антенны - ППЭ определяется составляющей  $P_{диф}$ . Если зеркало выполнено в виде решетчатой структуры, то к дифракционному полю добавится поле, прошедшее в область II сквозь ячейки решетки - составляющая  $P_{пр}$ .

В области III необходимо учитывать составляющие  $P_{обл}$  и  $P_{диф}$ . Область III в заднем полупространстве существует только для длиннофокусных антенн, когда  $\psi \leq \pi/2$ .

В области IV ППЭ определяется в основном составляющими  $P_{обл}$  и  $P_{диф}$ , но следует учитывать и  $P_a$  (особенно вблизи границы раздела областей I и IV).

Область V является областью конструкции антенны и находится внутри гипотетического цилиндра [13] с площадью основания, равной площади апертуры и высотой 2...4 диаметра апертуры (эту область иногда называют областью прожекторного луча).

Рассчитаем ППЭ в точке M (рис. 5) для трех значений мощности передатчика (1,61 Вт; 0,4 Вт; 0,016 Вт) и сравним полученное значение с ПДУ ППЭ.

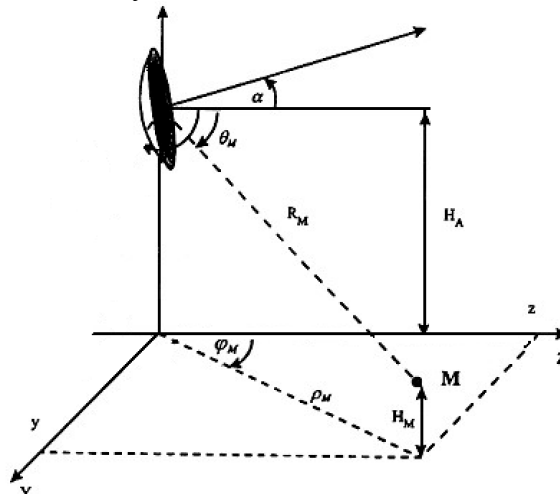


Рис.5 – Расположение точки M

Точка М расположена на высоте 1 м от поверхности крыши, удаление от основания мачты – 1,2 м, диаметр апертуры  $D = 0,6$  м, КНД  $D_0 = 40,8$  дБ,  $\varphi_M = 5^\circ$ . Направление максимального излучения составляет с плоскостью горизонта угол  $\alpha = 0^\circ$ .

Точка М принадлежит к области I, поэтому значение ППЭ будет определяться апертурной составляющей  $\Pi_a$  и составляющей облучателя  $\Pi_{обл}$ . Рассчитаем ППЭ в точке М для  $P = 1,61$  Вт.

Находим расстояние  $R_M$  – «центр апертуры - точка М» и угол  $\theta_M$  :

$$R_M = \sqrt{(H_A - H_M)^2 + \rho_M^2} = 1,3 \text{ м}, \quad (4)$$

$$\theta_M = \arccos \left\{ \left[ \rho_M \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha - (H_A - H_M) \cdot \sin \alpha \right] / R_M \right\} = 23^\circ. \quad (5)$$

Находим граничное расстояние  $R_{зр}$ :

$$R_{зр} = \frac{2d^2}{\lambda} = 14,4 \text{ м}. \quad (6)$$

Определяем координаты  $x$  и  $u$ :

$$x = \frac{R_M}{R_{зр}} = 0,09, \quad (7)$$

$$u = \frac{\pi d \sin \theta_M}{\lambda} = 14,7 \quad (8)$$

Используя методические указания [13] рассчитаем следующие значения: функция  $20 \lg F(u, x) = -21,9$  дБ, где  $F(u, x)$  - нормированная характеристика направленности апертуры в обобщенных координатах  $u$  и  $x$ ; функция  $20 \lg(B(x)/x) = 14,5$  (дБ), где  $B(x)$  - функция, учитывающая изменение КНД в зависимости от относительного расстояния.

Рассчитаем апертурную составляющую  $\Pi_A$ :

$$\Pi_A = 10 \lg \frac{P \lambda^2}{d^4} + 10 \lg D_0 + 20 \lg \left( \frac{B(x)}{x} \right) + 20 \lg F(x, u) + 3 = 21,3 \text{ (дБ)}. \quad (9)$$

По графику [13] определяется значение  $D_{обл}$  - КНД антенны в направлении максимального излучения в дальней зоне:  $D_{обл} = 2,4$  дБ.

Рассчитаем составляющую ППЭ, определяемую непосредственно излучением облучателя  $\Pi_{обл}$ :

$$\Pi_{обл} = 10 \lg \frac{P}{4\pi R_M^2} + 10 \lg D_{обл} + 10 = 1,2 \text{ (дБ)}. \quad (10)$$

Рассчитаем суммарную ППЭ в точке М:

$$\Pi = 10^{\Pi_A, \text{дБ}/10} + 10^{\Pi_{обл}, \text{дБ}/10} = 136,2 \text{ (мкВт/см}^2\text{)}. \quad (11)$$

Вывод: ППЭ в точке М превышает ПДУ ( $10$  мкВт/см<sup>2</sup>) при мощности передатчика  $P = 1,61$  Вт.

Аналогичные расчеты, проведенные для мощности передатчика  $0,4$  Вт позволили сделать вывод, что суммарная ППЭ  $\Pi = 34$  (мкВт/см<sup>2</sup>) в точке М, рассчитанная по формуле (11) также превышает ПДУ. Для мощности передатчика  $P = 0,016$  Вт суммарная ППЭ в точке М составит  $\Pi = 1,4$  (мкВт/см<sup>2</sup>), что меньше предельно допустимого уровня.

На основании расчетных данных, построен график зависимости ППЭ от дальности действия радиолинии (рис. б).

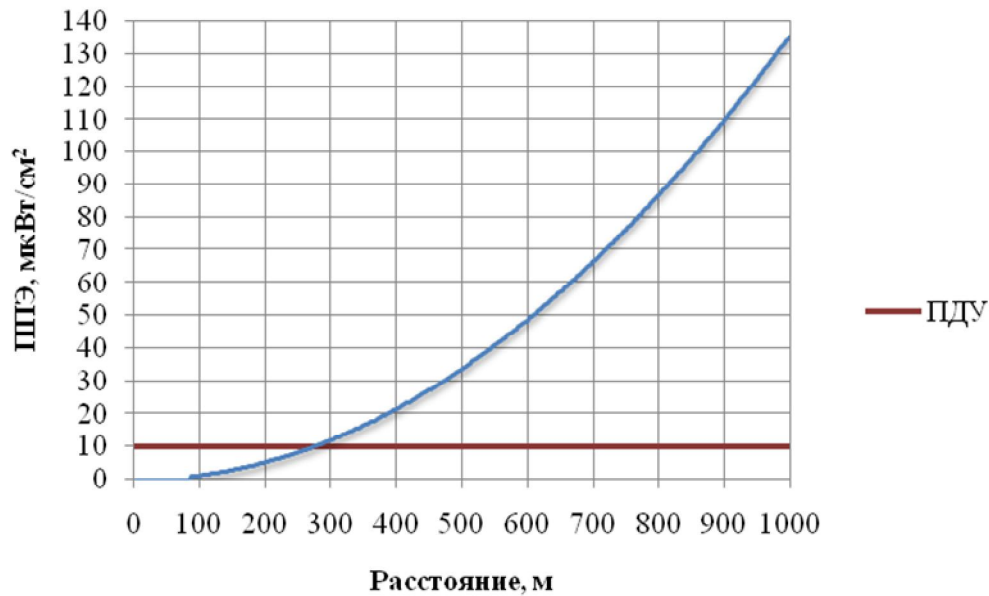


Рис. 6 – График зависимости ППЭ от дальности действия радиолинии

Как видно из рисунка, технология UWB имеет допустимые значения плотности потока энергии на расстоянии меньшем 300 м. Расчетное расстояние между зданиями равно 100 м, следовательно, мощность передатчика не подлежит лицензированию.

**Расчет облучателя.** Нормированное распределение поля на раскрыве зеркала связано с диаграммой направленности облучателя и параметрами параболоида соотношением:

$$F(\rho) = \frac{f}{\rho'} \cdot F(\Psi) = \frac{1 + \cos \Psi_0}{2} \cdot F(\Psi), \quad (12)$$

где  $f$  – фокусное расстояние,

$\rho'$  – расстояние от фокуса до точки на поверхности зеркала.

Анализ, приведенный в [10], показывает, что для большинства облучателей антенна получается оптимальной, когда уровень облучения края зеркала на 10 дБ ниже уровня его центра (0,316 по напряженности поля), тогда диаграмма направленности облучателя должна удовлетворять соотношению:

$$0,316 = \frac{1 + \cos \Psi_0}{2} \cdot F(\Psi), \quad (13)$$

где  $\Psi_0$  – угол раскрыва параболоида.

Диаграмму направленности небольшого рупора можно рассчитать при помощи следующих приближенных соотношений:

$$\left. \begin{aligned} F_E(\Psi) &= \frac{1 + \cos \Psi_0}{2} \cdot \frac{\sin\left(\frac{k \cdot b_p}{2} \cdot \sin \Psi_0\right)}{\frac{k \cdot b_p}{2} \cdot \sin \Psi}, \\ F_H(\Psi) &= \frac{1 + \cos \Psi_0}{2} \cdot \frac{\cos\left(\frac{k \cdot a_p}{2} \cdot \sin \Psi_0\right)}{1 - \left(\frac{k \cdot a_p \cdot 2}{2 \cdot \pi} \cdot \sin \Psi_0\right)^2} \end{aligned} \right\}; \quad (14)$$

где  $F_E(\Psi), F_H(\Psi)$  – нормированные диаграммы направленности по напряженности поля в плоскостях Е и Н соответственно;

$\Psi$  – угол, отсчитываемый от направления максимума диаграммы направленности;

$a_p$  – размер раскрыва рупора в плоскости Н;

$b_p$  – размер раскрыва рупора в плоскости Е;

$k$  – волновое число,  $k = 2 \cdot \pi \cdot \lambda$ .

**Определение угла раскрыва параболоида.** В направлении зеркала нормированная амплитудная диаграмма направленности облучателя приближенно может быть описана выражением:

$$F_{обл}(\Psi) = \cos^m \Psi, m \geq 1. \quad (15)$$

Для рупорного облучателя [7]  $m \geq 3$ .

Фокусное расстояние  $f$  антенны зависит от диаметра раскрыва зеркала  $D = 2R_{\Pi}$  и диаграммы направленности облучателя  $F_{обл}(\Psi)$ . Для рупорного облучателя при  $m = 3$  отношение  $f/D = 0,5 \dots 0,625$  [14]. Примем его равным 0,5.

Диаметр раскрыва  $D$ , полный угол раскрыва  $\Psi_0$  и фокусное расстояние  $f$  антенны (рис. 7) связаны между собой соотношением:

$$D = 4f \cdot \operatorname{tg}(\Psi_0/2). \quad (16)$$

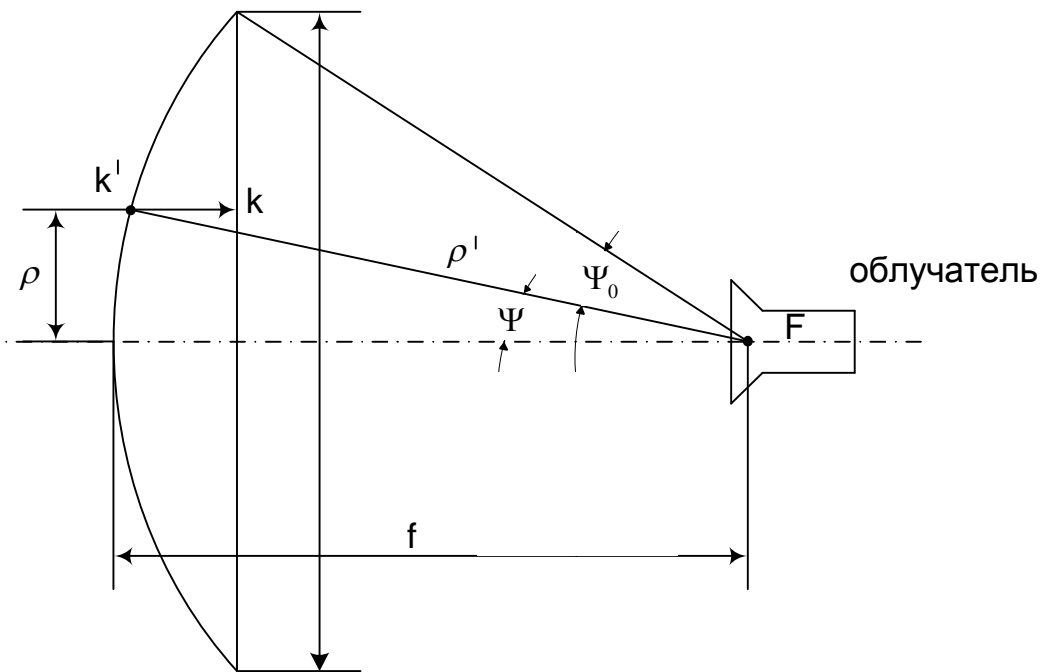


Рис. 7 – Профиль параболоида

Используя (16) найдем угол раскрыва  $\Psi_0 = 2 \cdot \operatorname{arctg}(D/4f)$ , значение которого составит 53,2°.

Решение трансцендентных уравнений (14) удобно проводить графическим способом (рис. 8) с помощью вспомогательных функций  $S_1 = \sin(u_1)/u_1$  и  $S_2 = \cos(u_2)/1 - \left(\frac{2}{\pi} \cdot u_2\right)^2$ ,

где  $u_1 = \frac{kb_p}{2} \sin(\Psi_0)$  для плоскости Е и  $u_2 = \frac{ka_p}{2} \sin(\Psi_0)$  для плоскости Н.

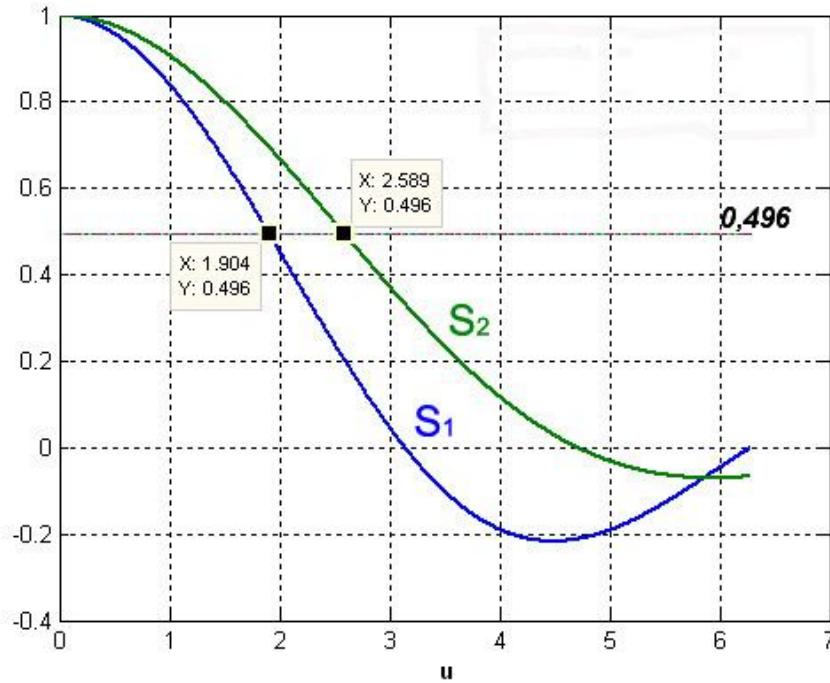


Рис. 8 – Графики функций  $S_1$  и  $S_2$

По графикам (рис. 8) найдем значения  $u_1$  и  $u_2$ , проведя прямую  $F(\Psi) = 0,496$ . Для функции  $S_1$  значение  $u_1 = 1,9$ . Для функции  $S_2$  значение  $u_2 = 2,6$ .

Используя систему уравнений (14) найдем коэффициенты  $b_p$  и  $a_p$ :

$$\frac{k \cdot b_p}{2} \sin \Psi_0 = 1,9, \quad b_p = \frac{1,9 \cdot 2}{k \cdot \sin \Psi_0} = 0,04 \text{ (м)},$$

$$\frac{k \cdot a_p}{2} \sin \Psi_0 = 2,6, \quad a_p = \frac{2,6 \cdot 2}{k \cdot \sin \Psi_0} = 0,052 \text{ (м)}.$$

Фокусное расстояние антенны можно определить из формулы (16):

$$f = \frac{D}{4} \cdot \operatorname{ctg} \left( \frac{\Psi_0}{2} \right) = 0,3 \text{ (м)}. \quad (17)$$

Поскольку рекомендуемый коэффициент использования поверхности зеркала (КИП) для однозеркальных антенн  $\gamma_A = 0,6$ , то ему соответствует степень спада  $n=2$ . При  $n=2$  диаметр параболоида  $D$  связан с заданной длиной волны  $\lambda$  приближенной зависимостью [6]:

$$2\theta_{0,5}^E = 2\theta_{0,5}^H = 84,2 \frac{\lambda}{D}, \quad (18)$$

где  $2\theta_{0,5}^E$ ,  $2\theta_{0,5}^H$  - углом раствора диаграммы направленности на уровне половинной мощности в Е - и Н - плоскости соответственно.

Ширина диаграммы направленности оценивается по ее главному лепестку и отсчитывается на некотором условном уровне относительно его максимума.

Обычно ширина ДНА указывается для координатной плоскости ( $\theta$  и  $\varphi$ ) и определяется [15] как угол между направлениями, в которых плотность потока мощности уменьшается в 2 раза или до нуля по сравнению с направлением главного максимума.

Рассчитаем угол раствора диаграммы направленности на уровне половинной мощности ( $2\theta_{0,5}$ ):



$$2\theta_{0.5}^E = 2\theta_{0.5}^H = 84,2 \frac{0,05}{0,6} = 7 \text{ (град)}.$$

На рис. 9 построены нормированные диаграммы направленности облучателя в плоскости Е и Н.

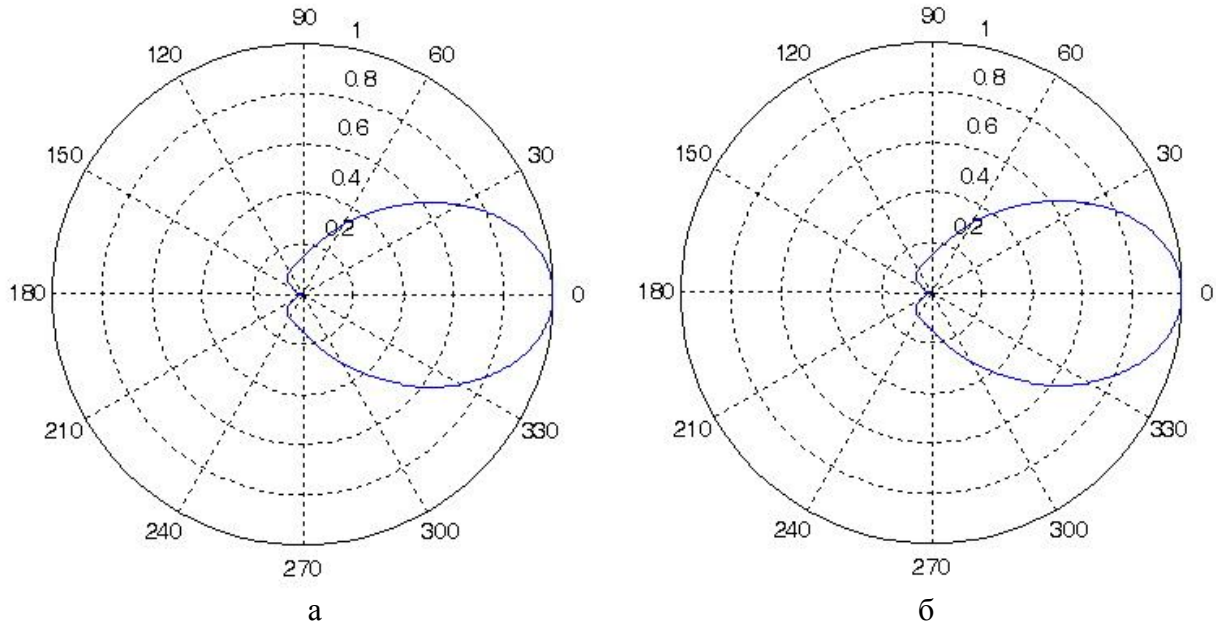


Рис. 9 – Диаграммы направленности антенны в полярной системе координат в Н-плоскости (а) и Е-плоскости (б)

### Полученные результаты

1. В качестве приемопередающей выбрана параболическая антенна с рупорным облучателем.
2. Определен диапазон частот работы сети на основе UWB – технологии, исходя из условий лицензируемости системы радиодоступа.
3. Рассчитаны основные характеристики приемопередатчика (мощность) и параметры антенны (коэффициент усиления на прием и передачу, угол раскрыва параболоида и его фокусное расстояние).
4. Показано, что на заданном расстоянии излучаемая антенной мощность лежит в допустимых санитарными нормами пределах.
5. Построены нормированные диаграммы направленности облучателя в Н-плоскости и Е-плоскости.

### Литература

1. Дмитриев В. Технологии передачи информации с использованием сверхширокополосных сигналов / Владимир Дмитриев // КиТ – 2004. – №1.
2. Шахнович И. Сверхширокополосная связь. Второе рождение? / И. Шахнович // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2001. – №4.
3. Ассанович Б.А. UWB: на большой скорости по сверхширокой полосе / Б.А. Ассанович // Технологии и средства связи. – 2007. – №5.
4. Иммореев И. Сверхширокополосные и узкополосные системы связи / И.Иммореев, А.Судаков // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. – 2003. – №2.
5. Дубровин В. С. Сверхширокополосные системы связи. Особенности и возможности применения. / Дубровин, В. С., Колесникова И. В. - Режим доступа: [http://www.fetmag.mrsu.ru/2009-3/pdf/UWB\\_communication\\_systems.pdf](http://www.fetmag.mrsu.ru/2009-3/pdf/UWB_communication_systems.pdf) – Загл. с экрана.
6. Лобкова Л.М. Проектирование антенн и устройств СВЧ: Учебное пособие для вузов / Л.М. Лобкова . – Севастополь.: СевНТУ, 2002. – 178с.

7. Дмитриев А.С. Сверхширокополосная беспроводная связь и сенсорные сети / А.С. Дмитриев, Е.В. Ефремова, А.В. Клецов, Л.В. Кузьмин, А.М.Лактюшкин, В.Ю. Юркин // Радиотехника и электроника. – 2008. – т. 53 – №10. – С. 1278-1289.
8. Методология оптимального проектирования сетей спутниковой связи. – Режим доступа:  
<http://www.masters.donntu.edu.ua/2005/kita/sedki/lib/index1.htm>. – Загл. с экрана.
9. Спутниковое телевизионное вещание. Общие принципы построения. – Режим доступа: <http://www.arstel.su/ru/articles/art1p4.php>. – Загл. с экрана.
10. Айзенберг Г.З. Антенны УКВ. В 2-х частях / Айзенберг Г.З., Ямпольский В.Г., Терешин О.Н. – М.: Связь, 1977. – Ч.1.
11. Проектирование радиоприемных устройств. Учебное пособие для вузов. / Под ред. А.П. Сиверса. М.: Советское радио. – 1976.
12. Балтин Ю. Заметки об RST, передатчиках / Ю. Балтин. – Режим доступа: [http://dxx.narod.ru/RST\\_TX.html](http://dxx.narod.ru/RST_TX.html). – Загл. с экрана.
13. МУК 4.3.1167-02. Определение плотности потока энергии электромагнитного поля в местах размещения радиосредств, работающих в диапазоне частот 300 МГц-300 ГГц.
14. Гошин Г.Г. Устройства СВЧ и антенны: Учебное методическое пособие. В 2-х частях. / Г.Г. Гошин. – Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2003. – Часть 2: Антенны. – 130с.
15. Долбик А.И. Устройства СВЧ и антенны: учебное пособие. В 3-х частях / А.И. Долбик . – 2004. – Ч.1. – 104с.