

Федеральное агентство связи

Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение высшего образования
Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики
(СибГУТИ)

Е.Р. Трубехин

РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН И АНТЕННО-ФИДЕРНЫЕ УСТРОЙСТВА

Контрольная работа для студентов факультета заочного обучения

Методические указания по выполнению

Новосибирск 2017

УДК 621.396.67

ББК 32.845.4

Т 77

к.т.н., доцент Е.Р. Трубехин. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства. Методические указания по выполнению контрольной работы для студентов факультета заочного обучения/ СибГУТИ – Новосибирск, 2017. - 14 с.

В методических указаниях предлагаются задания по расчету основных параметров антенн, используемых в системах мобильной связи, характеристик распространения радиоволн диапазона УКВ в свободном пространстве и условиях городской застройки, приводятся необходимые теоретические сведения по расчету конструктивных и электрических характеристик антенн дециметрового и сантиметрового диапазонов длин волн, соотношения для расчета напряженности электромагнитного поля и потерь при распространении радиоволн. Методические указания предназначены для студентов факультета заочного обучения, обучающихся по направлению подготовки «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», профиль «Системы мобильной связи», квалификация-бакалавр.

Для направления 11.03.02

Кафедра систем мобильной связи

Иллюстраций -5, таблиц-5, список литературы-5 названий.

Рецензент: Заведующий кафедрой систем радиосвязи СибГУТИ, д.т.н., профессор В.И. Носов

Утверждено редакционно-издательским советом СибГУТИ в качестве методических указаний.

Контрольная работа по дисциплине «Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства» предусматривает выполнение четырех заданий, номер варианта заданий соответствует порядковому номеру фамилии студента в журнале группы.

Задание №1. Распространение радиоволн в свободном пространстве.

Используя формулу идеальной радиопередачи, выполните расчеты, позволяющие сделать предварительную оценку физической реализуемости пролета радиорелейной линии (РРЛ) между двумя базовыми станциями для заданного варианта (таблица 1):

1. Для учета влияния кривизны Земли рассчитайте и постройте зависимость условного нулевого уровня профиля РРЛ.
2. Рассчитайте максимальное значение радиуса первой зоны Френеля.
3. Определите высоту подвеса антенн РРЛ из условия минимальной величины просвета, при котором напряженность электрического поля в точке приема равна напряженности электрического поля в свободном пространстве.
4. Для выбранных высот подвеса антенн рассчитайте расстояние прямой видимости при отсутствии рефракции, сделайте вывод о правильности выбранных высот подвеса антенн.
5. Вычислите коэффициенты усиления параболических антенн, установленных в пунктах А и В пролета РРЛ.
6. Рассчитайте потери при распространении радиоволны в свободном пространстве для пролета РРЛ.
7. Рассчитайте мощность на входе приемника и сделайте вывод о возможности строительства РРЛ, если пороговое значение мощности на входе приемника, при котором возможен прием составляет минус 60 дБм.

Таблица 1 - Варианты исходных данных для задания №1

Номер варианта	Центральная частота диапазона, ГГц	Расстояние между пунктами А и В, км	Высота строений в центральной части пролета, м	Диаметр параболической антенны в пункте А, м	Диаметр параболической антенны в пункте В, м	Коэффициент использования апертуры антенны	Мощность передатчика, дБм
1	3,9	40	0	2,5	2,0	0,55	32
2	4,6	30	12	2,0	1,5	0,6	30
3	5,7	40	5	3,5	2,0	0,6	32
4	8,0	35	9	2,5	2,0	0,5	32
5	10,8	25	21	2,0	1,5	0,55	30
6	12,8	30	0	1,5	1,8	0,6	28
7	14,6	20	8	1,8	1,2	0,5	28
8	15,3	15	13	1,8	0,6	0,6	26
9	17,8	10	6	1,2	0,6	0,55	26
10	19,6	15	31	1,2	0,6	0,5	26
11	21,3	10	14	0,6	0,3	0,6	24
12	23,4	10	25	1,2	0,6	0,55	24
13	25,4	10	9	0,6	0,3	0,5	22
14	26,8	8	19	1,2	0,6	0,55	26
15	27,6	10	7	1,2	0,6	0,5	26

Задание №2. Расчет среднего значения напряженности электрического поля в условиях городской застройки.

Для оценки влияния городской застройки на уровень напряженности электромагнитного поля для заданного варианта (таблица 2) выполните следующие расчеты:

1. Используя модель Окамура-Хата, рассчитайте зависимость среднего (медианного) значения напряженности электрического поля, создаваемого базовой станцией в районе городской застройки, от расстояния между базовой и мобильной станцией. Расчет провести в интервале расстояний между базовой и мобильной станцией от 1 км до половины расстояния прямой видимости.

2. Рассчитайте зависимость напряженности электрического поля, создаваемого базовой станцией, в условиях распространения радиоволны в свободном пространстве, от расстояния между базовой и мобильной станцией. Расчет провести в интервале расстояний между базовой и мобильной станцией от 1 км до половины расстояния прямой видимости.
3. Постройте рассчитанные зависимости на одном графике и сделайте выводы о характере влияния городской застройки на величину напряженности электрического поля.
4. Используя данные расчета напряженности среднего (медианного) значения напряженности электрического поля, создаваемого базовой станцией в районе городской застройки, рассчитайте мощность на входе приемника мобильной станции на расстояниях от базовой станции 1, 2, 4 и 8 км.

Таблица 2 - Варианты исходных данных для задания №2

Номер варианта	Рабочая частота, МГц	Высота подвеса передающей антенны базовой станции, м	Коэффициент усиления передающей антенны базовой станции, дБ	Мощность передатчика базовой станции, Вт
1	780	25	16	30
2	810	25	14	15
3	830	60	12	40
4	850	50	16	20
5	860	45	18	15
6	870	40	12	50
7	880	35	14	40
8	890	30	16	30
9	900	25	18	20
10	910	20	18	15
11	920	25	12	50
12	930	20	14	40
13	940	40	16	30
14	950	35	18	20
15	960	30	18	15

Для всех вариантов:

- Высота расположения антенны мобильной станции $h_{MC} = 1,5$ м;
- Коэффициент усиления антенны мобильной станции относительно изотропного излучателя

$G_{пр} = 1,64$.

Задание №3. Характеристики, определяющие степень согласования антенн.

Для полуволнового симметричного вибратора, обеспечивающего работу на центральной частоте диапазона f_0 , по заданному отношению радиуса вибратора к длине плеча вибратора r/l (таблица 3):

1. Рассчитайте и постройте графики зависимости от частоты:
 - 1.1 Активной и реактивной составляющих входного сопротивления симметричного вибратора;
 - 1.2 Модуля коэффициента отражения;
 - 1.3 Коэффициента стоячей волны (КСВ);
 - 1.4 Коэффициента бегущей волны (КБВ).
2. Определите полосу пропускания по уровню КСВ=1,22.
Волновое сопротивление фидера для всех вариантов 75 Ом. Расчет провести в диапазоне частот от $f_1 = f_0 - \frac{f_0}{10}$ до $f_2 = f_0 + \frac{f_0}{10}$.

Задание №4. Панельные антенны.

В соответствии с исходными данными варианта (таблица 3):

1. Рассчитайте габаритные размеры и укажите рассчитанные размеры в миллиметрах на эскизе панельной антенны.

2. Рассчитайте диаграммы направленности (ДН) панельной антенны по напряженности электрического поля в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Постройте графики ДН в полярной системе координат.
3. Рассчитайте ДН панельной антенны по мощности в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Постройте графики ДН в полярной и декартовой системе координат.
4. Определите ширину главного лепестка ДН по уровню половинной мощности в горизонтальной и вертикальной плоскостях и уровень первого бокового лепестка ДН.

Таблица 3 - Варианты исходных данных для заданий № 3 и 4

Номер варианта	Центральная частота диапазона, f_0 , МГц	Поляризация	Количество полуволновых вибраторов, n	Отношение радиуса вибратора к длине плеча, r/l
1	800	горизонтальная	4	0,03
2	800	вертикальная	8	0,05
3	900	горизонтальная	8	0,02
4	900	вертикальная	4	0,03
5	900	горизонтальная	16	0,05
6	1800	горизонтальная	4	0,02
7	1800	вертикальная	8	0,03
8	1800	горизонтальная	16	0,05
9	2100	вертикальная	4	0,01
10	2100	горизонтальная	4	0,02
11	2100	вертикальная	8	0,03
12	2100	горизонтальная	16	0,05
13	2600	вертикальная	8	0,03
14	2600	горизонтальная	8	0,04
15	2600	горизонтальная	16	0,05

Методические указания по выполнению

Задание № 1. Распространение радиоволн в свободном пространстве.

Радиоволны дециметрового и сантиметрового диапазонов не обладают свойством огибать препятствия и распространяются в пределах прямой видимости. Способность волн этих диапазонов проникать через ионосферу и тропосферу без существенных потерь определяет активное использование этих частотных диапазонов в системах спутниковой связи. В наземных телекоммуникационных системах эти диапазоны частот используются очень широко: в системах телевизионного вещания, мобильной связи, широкополосного радиодоступа, радиорелейной связи и радиолокации.

Формула идеальной радиопередачи позволяет рассчитать основные потери при распространении радиоволны в свободном пространстве и оценить мощность на входе приемника в предположении, что дополнительные потери в результате поглощения в реальной среде распространения и влияния других источников потерь равны нулю [1]. В этом случае результат определяется только протяженностью линии и используемыми техническими средствами. При выполнении инженерных расчетов с помощью формулы идеальной радиопередачи можно легко сделать предварительную оценку физической реализуемости проектов по созданию спутниковых и наземных систем связи и вещания.

В задаче № 1 такую оценку предлагается сделать для пролета радиорелейной линии (РРЛ) между двумя базовыми станциями:

1. Волны дециметрового и сантиметрового диапазона не обладают свойством огибать сферическую поверхность Земли, поэтому необходимо обязательно рассчитывать условный нулевой уровень профиля пролета $Z(x)$ (рисунок 1) [3].

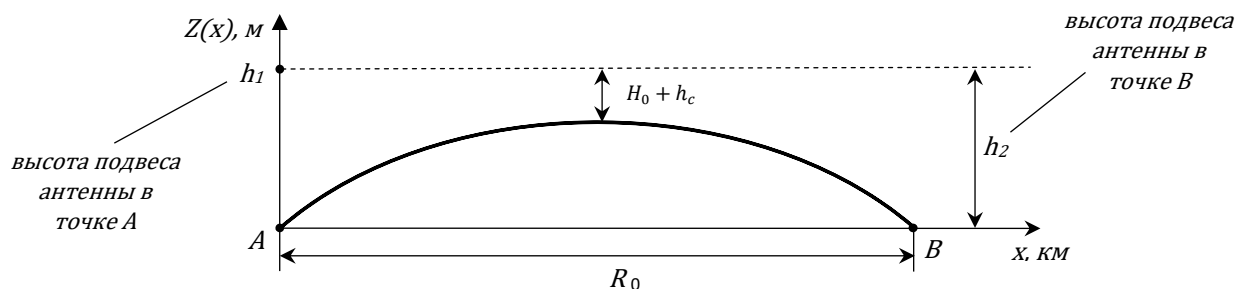


Рисунок 1 – Условный нулевой уровень профиля пролета

$$Z(x) = \frac{R_0^2}{2R_3} k(1 - k) \cdot 1000, \text{ м,}$$

где $k = \frac{x}{R_0}$, x – текущая координата, км

R_0 – протяженность пролета, км

R_3 – радиус Земли, равный 6370 км.

2. Область пространства, существенную для распространения радиоволны, на практике ограничивают первой зоной Френеля. Она представляет собою эллипсоид вращения с фокусами в точках А и В. Максимальное значение радиуса первой зоны Френеля b_1 :

$$b_1 = \sqrt{\frac{R_{0[M]}\lambda}{4}}, \quad \lambda - \text{длина волны на центральной частоте диапазона, м.}$$

3. Минимальная величина просвета H_0 между прямой, соединяющей центры антенн в конечных точках пролета А и В, и максимальным значением условного нулевого уровня $Z_{max}(x)$ в центре профиля пролета РРЛ (при отсутствии строений, леса, холмов и т.д.), при котором напряженность электрического поля в точке приема равна напряженности электрического поля в свободном пространстве, равна:

$$H_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot b_1.$$

Для выполнения этого условия высоты подвеса антенн h_1 и h_2 необходимо выбрать равными (рисунок 1) с учетом высоты строений в центральной части пролета h_c :

$$h_1 = h_2 = Z_{max}(x) + H_0 + h_c, \text{ м.}$$

4. Расстояние прямой видимости $R_{пр}$ при отсутствии рефракции в тропосфере:

$$R_{пр} = 3,57 \cdot (\sqrt{h_{1[м]}} + \sqrt{h_{2[м]}}), \text{ км.}$$

5. Коэффициенты усиления параболических антенн, обычно используемых в оборудовании РРЛ, G определяются диаметром антенны d , коэффициентом использования апертуры антенны $K_{исп}$ и рабочей частотой f :

$$G = 20,4 + 20 \cdot \lg(f_{[ГГц]}) + 20 \cdot \lg(d_{[м]}) + 10 \cdot \lg(K_{исп}), \text{ дБ}$$

6. Потери распространения в свободном пространстве $L_{сп}$ зависят от частоты f и протяженности пролета линии R_0

$$L_{сп} = 32,4 + 20 \cdot \lg(f_{[МГц]}) + 20 \cdot \lg(R_{0[км]}), \text{ дБ.}$$

7. Мощность на входе приемника $P_{вх}$ определяется мощностью на выходе передатчика $P_{пер}$, коэффициентами усиления передающей и приемной антенн ($G_{пер}$ и $G_{пр}$) относительно изотропного излучателя и потерями распространения в свободном пространстве $L_{сп}$:

$$P_{вх[дБм]} = 30 + P_{пер[дБВт]} + G_{пер[дБ]} + G_{пр[дБ]} - L_{сп[дБ]}$$

$$P_{пер[дБВт]} = 10 \cdot \lg(P_{пер[Вт]})$$

$$P_{пер[Вт]} = 10^{0,1P_{пер[дБм]}/1000}.$$

Задание № 2. Расчет среднего значения напряженности электрического поля в условиях городской застройки.

Электромагнитное поле в условиях городской застройки в силу наличия большого количества различных препятствий, расположенных случайным образом, имеет случайный характер. Оценку влияния городской застройки на распространение радиоволн делают на основании среднего (медианного) значения напряженности электрического поля в точке приема. Для расчета среднего (медианного) значения разработаны статистические модели распространения радиоволн, как на основе теоретического подхода, так и путем обработки результатов экспериментальных исследований. Одной из широко используемых моделей является модель Окамура-Хата, основанная на данных результатов измерения параметров радиосигнала в городских условиях [5]. Среднее (медианное) значения напряженности электрического поля в точке приема на расстоянии r от базовой станции по данной модели вычисляется по формуле, приведенной в [4]:

$$E_{\left[дБ\left(\frac{мкВ}{м}\right)\right]} = 37,67 + P_{БС[дБВт]} + G_{БС[дБ]} - 6,16 \lg(f_{[МГц]}) + \\ + 13,82 \lg(h_{БС[м]}) + \alpha(h_{МС}) - (44,9 - 6,55 \lg(h_{БС[м]})) \lg(r_{[км]}), \text{ дБ}\left(\frac{мкВ}{м}\right)$$

где:

$$\alpha(h_{МС}) = 3,2(\lg(11,75h_{МС[м]}))^2 - 4,97 \text{ (для частот выше 400 МГц)}$$

$P_{БС[дБВт]}$ - мощность передатчика базовой станции, дБВт,

$G_{\text{БС[дБ]}}$ - коэффициент усиления передающей антенны базовой станции относительно изотропного излучателя, дБ,

$f_{\text{[МГц]}}$ - рабочая частота, МГц,

$h_{\text{БС[м]}}$ - высота подвеса передающей антенны базовой станции, м,

$h_{\text{МС[м]}}$ - высота расположения приемо-передающей антенны мобильной станции, м,

$r_{\text{[км]}}$ - расстояние между базовой и мобильной станциями, км.

По среднему значению напряженности электрического поля в точке приема можно вычислить мощность на входе приемника мобильной станции

$$P_{\text{вх[Вт]}} = \Pi \cdot S_{\text{эфф}}, \text{ Вт}$$

где:

Π - плотность потока мощности радиоволны, $\Pi = \frac{E^2}{120\pi}$, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$

E – среднее значение напряженности электрического поля, $E = 10^{\frac{E_{\text{[дБ(МкВ/м)]}}}{20}} \cdot 10^{-6}$, В/м

$S_{\text{эфф}}$ – эффективная площадь приемной антенны, $S_{\text{эфф}} = G_{\text{пр}} \frac{\lambda^2}{4\pi}$, м^2

$G_{\text{пр}}$ – коэффициент усиления приемной антенны относительно изотропного излучателя.

При выполнении инженерных расчетов величину мощности обычно выражают в децибелах относительно милливатта

$$P_{\text{вх[дБм]}} = 10 \cdot \lg(P_{\text{вх[Вт]}} \cdot 1000), \text{ дБм.}$$

Задание № 3. Характеристики, определяющие степень согласования антенн.

К антеннам систем мобильной связи и телевизионного вещания предъявляются жесткие требования по согласованию антенны с фидером в широкой полосе частот, так как только при минимальном уровне отраженного сигнала от входа антенны возможно обеспечить передачу сигнала без искажений с требуемой мощностью и максимальной эффективностью. Характеристики согласования многоэлементных антенных решеток определяются свойствами излучателей таких антенн-симметричных полуволновых вибраторов. При анализе характеристик согласования антенну представляют в виде двухполюсника – комплексной нагрузки, реальная и мнимая часть которой, равны активной и реактивной составляющей входного сопротивления антенны.

В случае симметричного вибратора входное сопротивление $Z_{\text{вх}}(f)$ определяется конструктивными параметрами и рассчитывается следующим образом [1]:

$$Z_{\text{вх}}(f) = R_{\text{вх}}(f) + jX_{\text{вх}}(f)$$

$R_{\text{вх}}$ и $X_{\text{вх}}$ – активная и реактивная составляющие комплексного входного сопротивления.

$$R_{\text{вх}} = \frac{R_{\Sigma\Pi}}{\xi}; \quad X_{\text{вх}} = -\frac{W_{\text{в}} \cdot \sin(2kl)}{2\xi};$$

$R_{\Sigma\Pi} = 80 \cdot \pi^2 \left(\frac{l_{\text{д}}}{\lambda}\right)^2$ – сопротивление излучения симметричного вибратора, Ом;

$l_{\text{д}} = \frac{2}{k} \cdot \text{tg}\left(\frac{kl}{2}\right)$ – действующая длина симметричного вибратора, м;

λ – длина волны на частоте f , для которой производится расчет входного сопротивления, м;

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число;

$$\xi = \left(\frac{R_{\Sigma\Pi}}{W_B}\right)^2 + \sin^2(kl);$$

W_B – волновое сопротивление симметричного вибратора, Ом.

Волновое сопротивление симметричного вибратора W_B зависит от отношения $\frac{r}{l}$ (радиуса металлического стержня r , из которого изготовлен вибратор, к длине плеча l):

$$W_B = 276 \cdot \lg\left(\frac{l}{r}\right) - 120, \text{ Ом}$$

Зная расчетные значения $Z_{\text{вх}}(f)$ в заданном частотном диапазоне, можно определить частотную зависимость комплексного коэффициента отражения $\rho(f)$ на входе симметричного вибратора:

$$\rho(f) = \frac{Z_{\text{вх}}(f) - W_{\phi}}{Z_{\text{вх}}(f) + W_{\phi}},$$

где W_{ϕ} – волновое сопротивление фидера, Ом.

В процессе эксплуатации для оценки степени согласования антенны с фидером достаточно знать зависимость модуля комплексного коэффициента отражения от частоты:

$$|\rho(f)| = \sqrt{\frac{(R_{\text{вх}} - W_{\phi})^2 + X_{\text{вх}}^2}{(R_{\text{вх}} + W_{\phi})^2 + X_{\text{вх}}^2}}.$$

Коэффициент стоячей волны КСВ связан с модулем коэффициента отражения следующей зависимостью:

$$\text{КСВ} = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|}.$$

В диапазоне ДВ, СВ, КВ при настройке антенн применяют коэффициент бегущей волны КБВ:

$$\text{КБВ} = \frac{1}{\text{КСВ}}.$$

В диапазонах дециметровых и сантиметровых волн современные панорамные измерительные приборы позволяют измерить и получить на экране частотную зависимость КСВ антенны в интересующем диапазоне частот. Для широкополосных панельных антенн полосу пропускания обычно оценивают по уровню КСВ=1,22. При таком значении КСВ мощность отраженной от входа антенны волны $P_{\text{отр}}$ составляет менее 1% от мощности волны, падающей на вход антенны $P_{\text{пад}}$,

$$|P_{\text{отр}}| = |\rho|^2 \cdot |P_{\text{пад}}|.$$

Задание № 4. Панельные антенны.

Антенны базовых станций систем мобильной связи и телевизионного вещания дециметрового диапазона выполняются в виде синфазных антенных решеток, которые называют панельными антеннами [1]. Излучателями таких антенн являются полуволновые симметричные вибраторы в различных вариантах конструктивного исполнения. Каждый излучатель антенной решетки, состоящей из n полуволновых вибраторов, излучает $\frac{1}{n}$ часть подводимой к антенне мощности передатчика. Распределение мощности между излучателями обеспечивает схема деления мощности. Ориентация излучателей относительно поверхности земли определяет две базовые конструкции панельных антенн с вертикальной и горизонтальной поляризацией. Панельные антенны с горизонтальной поляризацией используются в качестве передающих антенн в системах телевизионного вещания. В системах

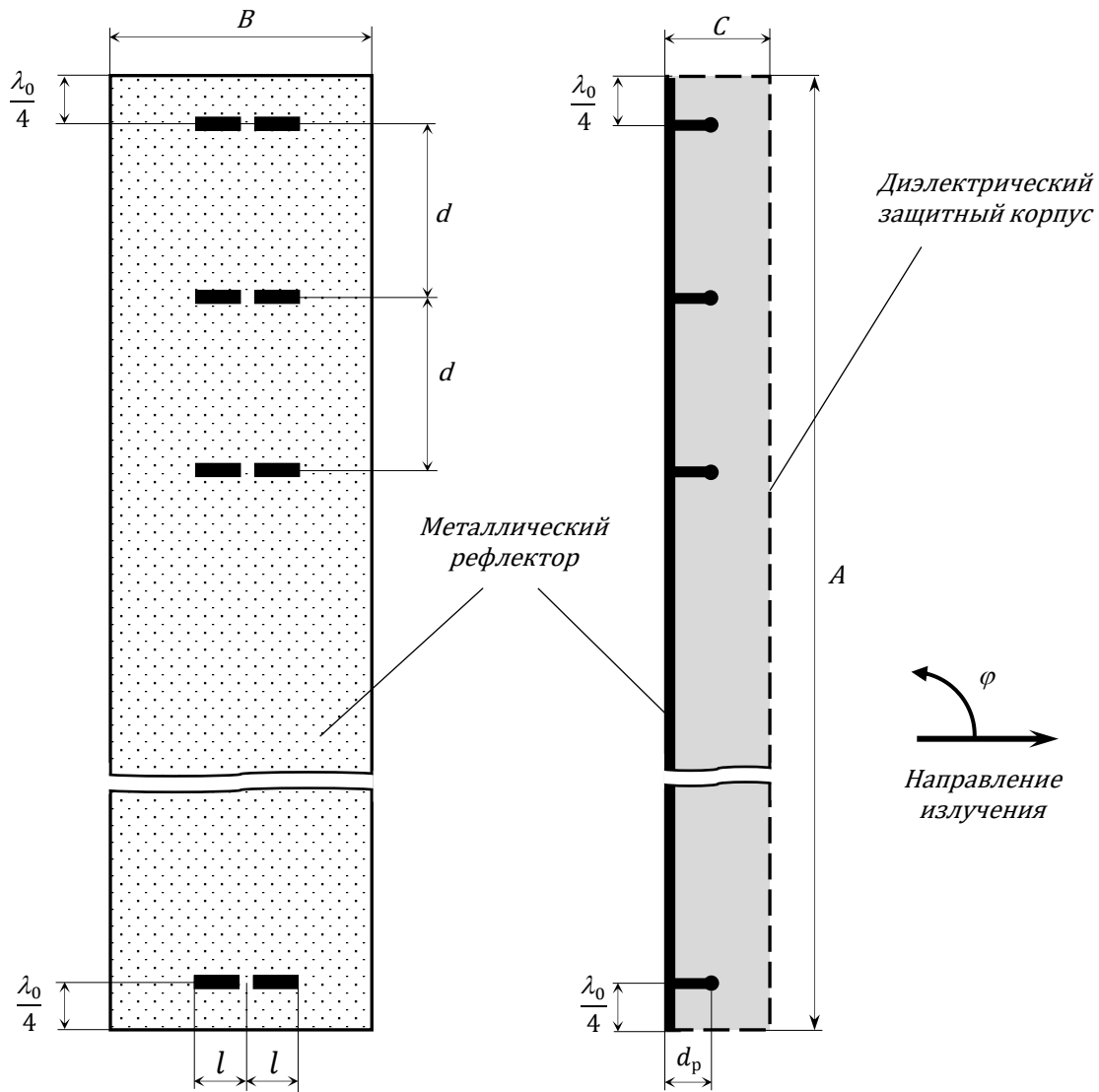


Рисунок 3 – Эскиз панельной антенны с горизонтальной поляризацией

На рисунках 2, 3 использовались следующие обозначения:

l - длина плеча симметричного вибратора, м.

Для полуволнового вибратора $l = \frac{\lambda_0}{4}$, где

$\lambda_0 = \frac{c}{f_0}$ – длина волны на центральной частоте диапазона, м;

$c = 3 \cdot 10^8$ – скорость света, м/с.

d_p – расстояние до рефлектора выбирается равным четверти длины волны $d_p = \frac{\lambda_0}{4}$;

d – шаг решетки, выбирается в пределах от $\frac{\lambda_0}{2}$ до λ_0 , в зависимости от требований к уровню боковых лепестков диаграммы направленности (ДН) в вертикальной плоскости;

A – вертикальный размер антенны, определяется количеством излучателей, шагом решетки;

B – горизонтальный размер антенны, обычно $B=0,8 \cdot \lambda_0$;

C – высота диэлектрического защитного корпуса антенны, $C=0,5 \cdot \lambda_0$.

ДН панельных антенн определяется направленными свойствами излучателя, влиянием рефлектора и множителем решетки [1].

В горизонтальной плоскости ДН определяется следующим выражением:

$$F(\theta) = |F_1(\theta) \cdot F_p(\theta) \cdot F_c(\theta)|$$

Значения $F_1(\theta)$; $F_p(\theta)$; $F_c(\theta)$ определяются в соответствии с таблицей 4.

Таблица 4 – Формулы расчета сомножителей ДН панельной антенны в горизонтальной плоскости

	Для антенны с вертикальной поляризацией	Для антенны с горизонтальной поляризацией
Нормированная ДН симметричного вибратора	$F_1(\theta) = 1$	$F_1(\theta) = \frac{\cos(kl \sin(\theta)) - \cos(kl)}{\cos(\theta) \cdot (1 - \cos(kl))}$
Множитель рефлектора	$F_p(\theta) = \sin(k d_p \cos(\theta))$	
Множитель решетки	$F_c(\theta) = 1$	

В вертикальной плоскости ДН определяется следующим выражением:

$$F(\varphi) = |F_1(\varphi) \cdot F_p(\varphi) \cdot F_c(\varphi)|$$

Значения $F_1(\varphi)$; $F_p(\varphi)$; $F_c(\varphi)$ определяются в соответствии с таблицей 5.

Таблица 5 – Формулы расчета сомножителей ДН панельной антенны в вертикальной плоскости

	Для антенны с вертикальной поляризацией	Для антенны с горизонтальной поляризацией
Нормированная ДН симметричного вибратора	$F_1(\varphi) = \frac{\cos(kl \sin(\varphi)) - \cos(kl)}{\cos(\varphi) \cdot (1 - \cos(kl))}$	$F_1(\varphi) = 1$
Множитель рефлектора	$F_p(\varphi) = \sin(k d_p \cos(\varphi))$	
Множитель решетки	$F_c(\varphi) = \frac{\sin(0,5nk d \sin(\varphi))}{n \cdot \sin(0,5k d \sin(\varphi))}$	

В формулах расчета сомножителей ДН использованы обозначения:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_0} - \text{волновое число;}$$

θ – угол в горизонтальной плоскости, отсчитываемый от нормали к защитному корпусу антенны;

φ – угол в вертикальной плоскости, отсчитываемый от нормали к защитному корпусу антенны.

ДН симметричны относительно направления основного излучения и в случае использования модели аперидического рефлектора не имеют излучения в обратном направлении, поэтому расчеты достаточно производить в интервале от 0 до 90 градусов (для исключения при вычислениях случаев деления на 0 рекомендуется использовать интервал от 1 до 89 градусов, при подстановке в формулы углы в градусах необходимо переводить в радианы).

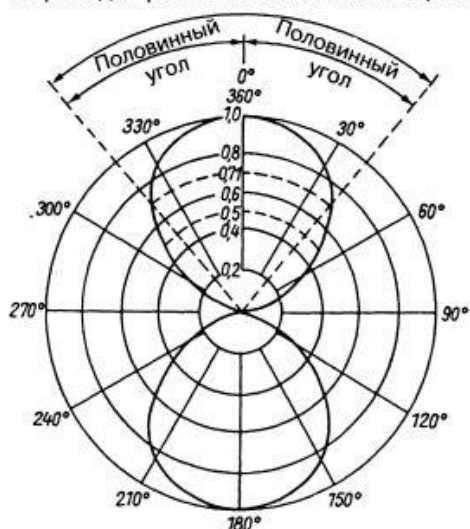
Нормированные к максимальному значению ДН по напряженности электрического поля могут быть построены в полярной или декартовой системе координат (рисунки 4а, 5а).

На практике удобно использовать ДН по мощности, наглядно показывающие насколько уменьшается плотность потока мощности в направлениях, отличных от основного направления излучения антенны, построенные в логарифмическом масштабе (рисунки 3б, 4б).

$$F_{дБ}(\varphi) = 10 \cdot \lg(F(\varphi)^2)$$

Ширина главного лепестка ДН по уровню уменьшения плотности потока мощности в два раза $\varphi_{0,5}$ определяется по уровню $F_{дБ}(\varphi) = -3$ дБ.

Ширина диаграммы по половинной мощности

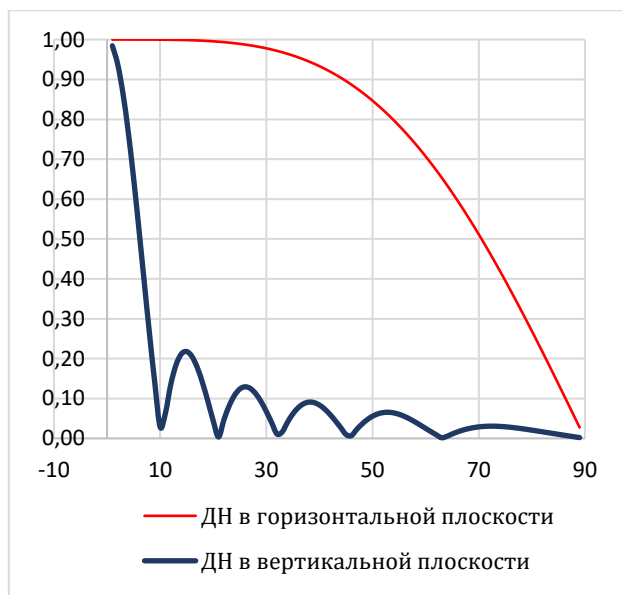


а)

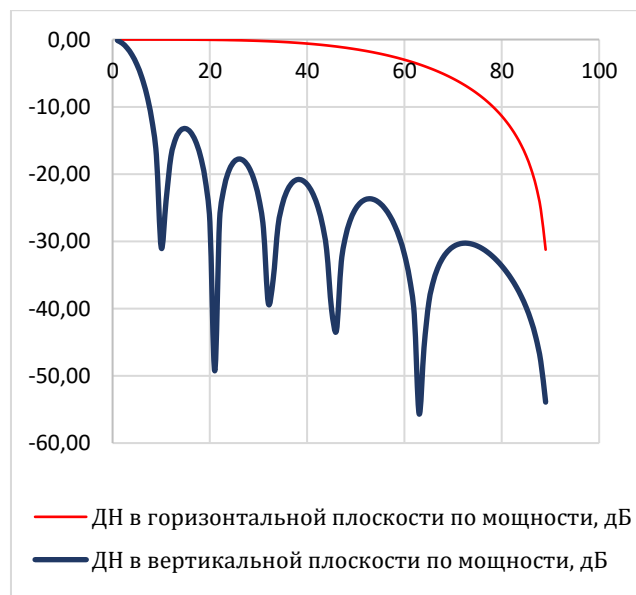


б)

Рисунок 4 – Диаграммы направленности антенны по напряженности электрического поля (а) и мощности (б) в полярной системе координат



а)



б)

Рисунок 5 – Диаграммы направленности антенны по напряженности электрического поля (а) и мощности (б) в декартовой системе координат

Список литературы

1. Андрусевич Л.К., Ищук А.А., Лайко К.А. Антенны и распространение радиоволн: Учебное пособие/СибГУТИ. Новосибирск, 2010.-424с.
2. Пономарев Л.И., Скородумов А.И., Ганициев А.Ю. Антенные системы сотовой связи.- М.: Вузовская книга, 2015.-320с.
3. Основы проектирования цифровых радиорелейных линий связи. Учебное пособие для вузов/М.А. Быховский, Ю.М. Кирик В.И. Носов и др.; Под ред. профессора М.А. Быховского.-М.: Горячая линия-Телеком, 2014.-332с.
4. Основы теории антенн и распространения радиоволн: учебное пособие/В.П. Кубанов , В.А. Ружников, М.Ю. Сподобаев, Ю.М. Сподобаев; Под ред. В.П. Кубанова.-Самара: ООО «Офорт», 2016.-258 с.
5. Бабков В.Ю., Цикин И.А. Сотовые системы мобильной связи: Учебное пособие/СПб.:БВХ-Перербург,2013.-432 с.