

# Специальные антенны

На протяжении многих лет наибольшей популярностью среди радиолюбителей пользуются антенны типа «волновой канал», которые также известны под название «директорные антенны» и «антенны Уда-Яги». Эти антенны, относящиеся к классу антенн с осевым излучением, имеют наилучшее отношение усиления к массе и к тому же очень просты по конструкции.

Описания таких антенн широко распространены и, по моему мнению, имеются у каждого радиолюбителя. Поэтому в этой статье я приведу описания только специальных антенн, наиболее удобных для связи с ИСЗ.

## Спиральная антенна

Спиральная антенна образована проводником, расположенным в пространстве по цилиндрической винтовой линии с шагом  $s$  и числом витков  $n$ . Эти антенны являются широкополосными, их частотный диапазон (для цилиндрических спиралей) может достигать 30% средней частоты. Входное сопротивление спиральных антенн высоко (120 – 150 Ом), и для их питания следует применять широкополосные согласующие устройства или несимметричные фидеры с большим волновым сопротивлением.

Спиральные антенны имеют излучение с вращающейся поляризацией, что особенно важно при использовании такой антенны для радиосвязи с ИСЗ. Вращающаяся поляризация более выражена у многовитковых антенн.

Конструктивно спиральные антенны могут иметь цилиндрическую или коническую форму, иметь равный или изменяющийся шаг между витками, а также могут быть различными и другие параметры. В радиолюбительской практике наибольшее применение получили цилиндрические спиральные антенны с постоянным шагом.

Схематическое изображение цилиндрической спиральной антенны представлено на рис. 3.

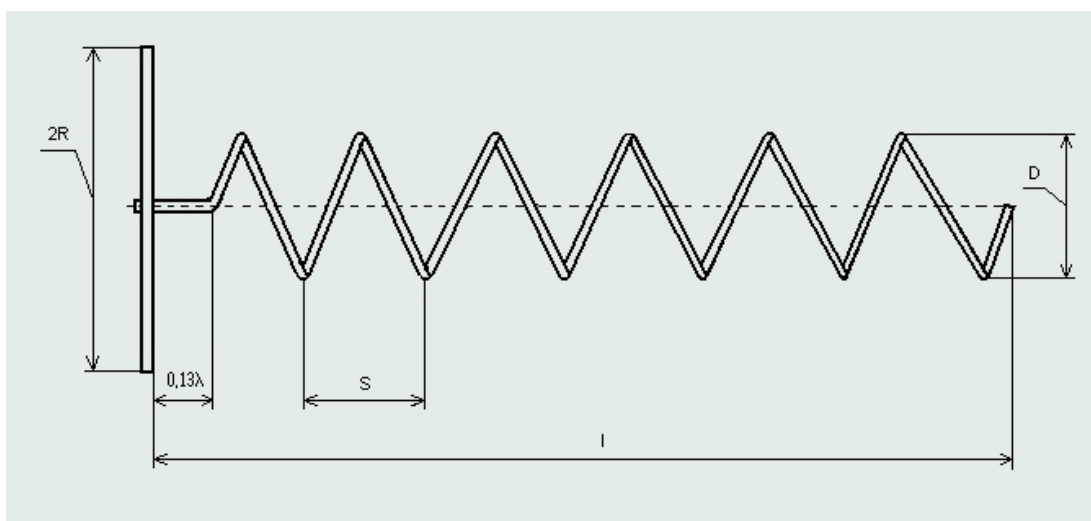


Рис. 3. Схема спиральной антенны

Антенна используется в режиме излучения вдоль оси спирали от точки питания к свободному концу, что имеет место при числе витков  $n \geq 3$ , длине каждого витка

1,3 L/ 0,75 и угле подъема спирали 12 16 . При этих условиях вдоль антенны устанавливается бегущая волна.

Для получения излучения в одном направлении применяют дисковый рефлектор квадратной или круглой формы, имеющий поперечное сечение  $2R$  (0,6 — 1,0) . Рефлектор может быть сплошным, сетчатым или сделан из радиальных стержней, или в форме «паутины». При этом наибольший размер ячейки в сетчатом рефлекторе не должен превышать 0,1 . При угле подъема спирали 14 , s/ 0,24 и  $n$  6 антенна имеет оптимальные параметры. Расстояние начала спирали от экрана выбирают равным 0,13 .

Для приема излучения с линейной поляризацией можно применять антенну, состоящую из двух близко расположенных спиралей с параллельными осями, намотанных в противоположные стороны. Если эти спирали расположить в горизонтальной плоскости, то возможен прием волн с горизонтальной поляризацией, а при вертикальном расположении — с вертикальной поляризацией. Антенна из двух параллельно расположенных спиралей дает возможность при соединении спиралей параллельно получать входное сопротивление  $R_{вх}$  (65—80) Ом, что удобно при питании ее обычным коаксиальным кабелем без согласующих устройств. Если одиночная спиральная антенна используется для приема радиоволн с горизонтальной или вертикальной поляризацией, то при расчете к.н.д. следует из полученного значения к.н.д. вычесть 3 дБ.

Спиральная антенна имеет меньшие размеры, чем антенна «волновой канал», и способна работать в значительно большей полосе частот. Расчет параметров спиральной антенны можно проводить по следующим эмпирическим формулам:

Входное сопротивление спиральной антенны, Ом:

$$R_{вх} = 140L/ ;$$

К.н.д. антенны:

$$G = 15(L/ )^2 n s/ ;$$

Ширина диаграммы направленности на уровне половинной мощности (на уровне 3 дБ), град.:

$$\theta_{0,5} = 52/(L/ ) \sqrt{n s/} ;$$

здесь  $s/$  — шаг спирали, отнесенной к длине волны;  $L/$  — относительная длина одного витка;  $n$  — количество витков спирали.

Длина спирали связана с ее шагом и числом витков:

$$n S/ = l/ .$$

$l/$  — относительная длина спирали.

При необходимости можно определить расположение «нулей» диаграммы направленности по формуле:

$$\theta_0 = 2,2 \theta_{0,5} .$$

В литературе [2] приведены следующие величины коэффициентов усиления цилиндрических спиральных антенн в зависимости от числа витков:

3 витка – 10,1дБ; 4 витка – 11,3; 5 – 12,3; 6 – 13,1; 7 – 13,8; 8 – 14,4; 9 – 14,9; 10 – 15,3дБ.

Примеры спиральных антенн.

1. Спиральная антенна для диапазона 70см имеет шаг  $s = 15,4\text{см}$ , число витков  $n = 7$  и длину витка  $L = 54,5\text{см}$  (диаметр спирали  $D = 16,7\text{см}$ ). Таким образом, отношение  $L/s = 0,78$ ,  $s/\lambda_0 = 0,22$ . По номограмме  $l/\lambda_0 = 1,54$  (т.е.  $l = 108\text{см}$ ).  $R_{\text{вх}} = 109\text{ Ом}$ ,  $G = 11,4\text{ дБ}$ ,  $\beta_{0,5} = 53,8$  (можно вычислить расположение нулей  $\beta_0 = 120^\circ$ ),  $R_{\text{вх}} = 109\text{ Ом}$ .

2. Одна из описываемых в любительской литературе спиральная антенна для диапазона  $\lambda = 200\text{см}$  имеет шаг  $s = 50\text{см}$ , число витков  $n = 3$  и длину витка  $L = 204\text{см}$  (диаметр спирали  $D = 65\text{см}$ ), расстояние от начала витка до рефлектора равно 41см. Дисковый рефлектор выполнен из металлического листа и имеет диаметр 120см. Антенна выполнена из металлической трубки диаметром 6мм.

## Спиральная антенна для 1296 МГц

В [1] и [2] описана спиральная антенна на 1295 МГц, предложенная U18AAD и U18ABW. Она имеет четыре спирали, установленные на общем щите-рефлекторе. Поляризация поля круговая. Такая антенна достаточно широкополосная и может применяться в диапазоне 1215—1300 МГц.

Поскольку описание антенны приводилось во многих источниках, в данной статье ограничусь только перечислением некоторых основных размеров антенны.

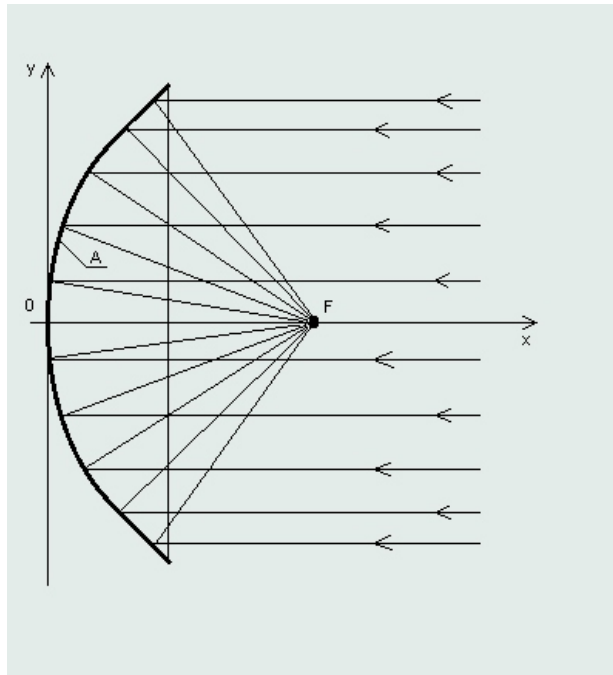
Диаметр витков спирали выбран (с учетом коэффициента укорочения)  $0,31\lambda$ . Угол подъема спирали  $14^\circ$ , что соответствует расстоянию между витками  $0,24\lambda$ ; при этом антенна имеет оптимальные электрические параметры.

Каждая из спиралей состоит из семи витков, выполнена из посеребренного медного провода диаметром 3,5 мм. Диаметр намотки 71,3 мм, намотка всех четырех спиралей в одну сторону. Щит-рефлектор имеет размеры 600 x 600мм и изготовлен из твердого дюралюминия толщиной 2 мм.

Следует отметить, что антенна остронаправленная в обеих плоскостях и требует при установлении связи с ИСЗ вращения как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях.

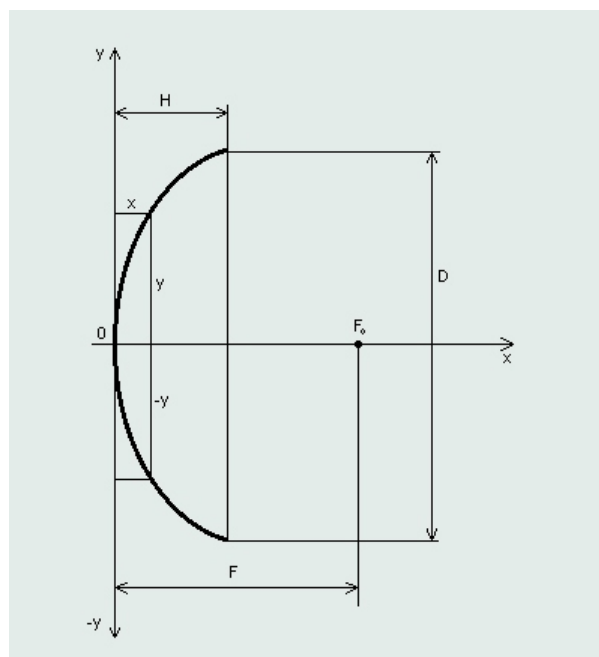
## Зеркально-параболическая антенна

Зеркально-параболическая антенна состоит из отражающего металлического зеркала в форме параболоида вращения и излучателя, помещенного в его фокусе. Антенны этого типа относятся к классу синфазных; в любой точке воображаемой плоскости раскрытия зеркала электромагнитное поле синфазно. Синфазность поля определяется свойствами параболы: сумма расстояния от фокуса до любой точки параболы и от этой точки до плоскости раскрытия всегда постоянна. Поступающий на зеркало антенны пучок электромагнитных колебаний за счет отражения от поверхности зеркала, имеющего форму параболоида вращения, концентрируется в точке фокуса. Схематически этот процесс изображен на рис. 4.



**Рис. 4.** Схема концентрации сигнала в фокусе зеркала

Схема зеркально – параболической антенны изображена на рис. 5.



**Рис. 5.** Схема параболической антенны

Чтобы построить параболическое зеркало, необходимо изготовить шаблон соответствующих размеров, связанных уравнением параболы

$$y^2 = 4Fx$$

(в прямоугольных координатах)

или

$$2F/(1+\cos \theta)$$

(в полярных координатах), где  $F$  – фокусное расстояние.

Глубина зеркала  $H$  (расстояние от его вершины до плоскости раскрыва), диаметр зеркала  $D$  и его фокусное расстояние  $F$  связаны следующей зависимостью:

$$H = D^2 / 16F.$$

При конструировании зеркально-параболических антенн важное значение имеет еще один параметр – угловая апертура  $\Phi$  – угол, под которым виден раскрыв зеркала из его фокуса. Знание этого угла необходимо для правильного расположения облучателя и выбора его диаграммы направленности. Если главный лепесток диаграммы направленности облучателя меньше угловой апертуры  $\Phi$ , то поверхность зеркала облучается не полностью, мал коэффициент использования поверхности (к.и.п.)  $Q$  и при одинаковых условиях антенна имеет меньший к.н.д. ( $G$ ). Если ширина главного лепестка диаграммы направленности облучателя больше  $\Phi$ , то часть энергии проходя мимо зеркала и к.п.д. антенны падает. Кроме того, у антенны появляются сильные боковые лепестки. Обычно стремятся сделать облучатель таким, чтобы на края раскрыва (на края зеркала) попадало 0,1 мощности, идущей в главном направлении.

Угловая апертура  $\Phi$  связана с фокусным расстоянием и диаметром зеркала на основании предыдущей формулы следующим образом:

$$\operatorname{tg}(\Phi_0/2) = (D/2F)/(1 - D^2/16F^2).$$

Пример 1. Параболическое зеркало должно иметь диаметр раскрыва  $D = 110$  см и фокусное расстояние  $F = 40$  см. Глубина параболоида  $H = 19$  см. При этом угловая апертура  $\Phi = 138^\circ$ .

При построении шаблона параболоида следует задавать значения  $x$  и определять по формуле соответствующие им значения  $y$ , а затем по полученным точкам строить параболу. Если используются полярные координаты, то по значениям угла находят соответствующие им значения  $r$ .

Если параболоид выполнен на проволоочном каркасе, то по значениям  $x$  и  $y$  определяют размеры и форму радиальных парабол и круговых поясов (т.е., кроме  $x$  и  $y$ , задают также  $D$ ). Каркас обтягивают хорошо пропаянной сеткой из медной проволоки.

Коэффициент направленного действия  $G$  зеркально-параболических антенн прямо пропорционален площади раскрыва  $S$ , коэффициенту использования поверхности  $Q$  и обратно пропорционален квадрату длины волны  $\lambda$ . Чем уже диаграмма направленности облучателя, помещенного в фокусе зеркала, тем большее значение  $G$  у зеркально-параболической антенны. При этом уровень боковых лепестков уменьшается.

Так, например, если в качестве облучателя использован полуволновой вибратор с рефлектором, то к. н. д.  $G$  будет меньше, а уровень боковых лепестков выше, чем при использовании в качестве облучателя более направленных антенн (типа «волновой канал», спиральных и др.).

Для определения к. н. д. зеркально-параболической антенны служит формула:

$$G = 4 \pi Q (S/\lambda^2).$$

При этом для антенны с круглым раскрывом

$$S = D^2/4.$$

Эти формулы дают возможность по заданным значениям **D** (или **S**) и определять к.н.д. **G** для различных значений к.и.п. **Q** (т.е. для различных распределений высокочастотных токов в раскрыве), что, как уже говорилось, зависит от типа облучателя.

Практически трудно получить **Q** (0,6—0,7). Для облучателя в форме полуволнового вибратора с рефлектором максимальное значение **Q** 0,56.

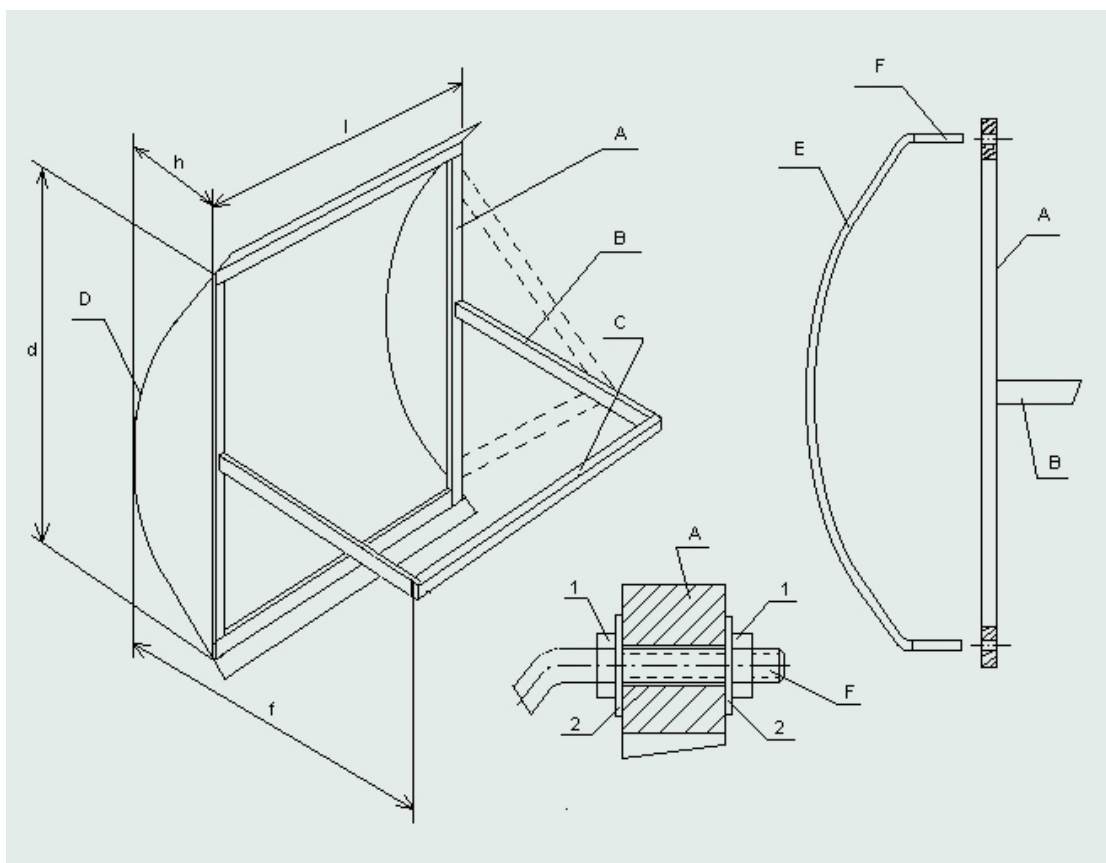
Пример 2. Для антенны **D** 110см на волне 24см при расчетах по формулам имеем к.н.д. **G** 20,5 дБ. При этом согласно отношению  $D/\lambda = 4,6$  ширина диаграммы направленности на уровне 3 дБ 20°.

## Параболоцилиндрическая антенна

Предлагаю вам для рассмотрения и использования разработанную мною конструкцию парабоцилиндрической зеркальной УКВ антенны. Принцип работы этой антенны аналогичен принципу описанной выше зеркально – параболической антенны. Антенна состоит из отражающего зеркального рефлектора и коллинеарного облучателя, размещенного на линии фокуса. Разница между зеркально – параболической и парабоцилиндрической антеннами заключается в конструкции отражающего зеркала – рефлектора. Такое сложное название – «парабоцилиндрическая» применено потому, что зеркало рефлектора выполнено в виде части цилиндра, у которого поперечное сечение имеет форму параболы, а не форму части окружности (дуги), как у обычного цилиндра. Такая конструкция рефлектора позволяет при очень узкой диаграмме направленности в вертикальной плоскости иметь довольно широкую диаграмму направленности в горизонтальной плоскости. Подобная форма переднего лепестка диаграммы направленности антенны очень удобна для радиостанций, не имеющих устройств точной ориентации антенны на ИСЗ.

Еще одно достоинство этой конструкции заключено в возможности реализовать работу антенны на нескольких частотах за счет одновременного применения нескольких облучателей. Других подобных конструкций мною нигде в литературе не встречалось, поэтому данную конструкцию для упрощения можно назвать «антенна RA3XB».

Схема антенны приведена на рис. 6.



**Рис. 6.** Схема антенны RA3XB

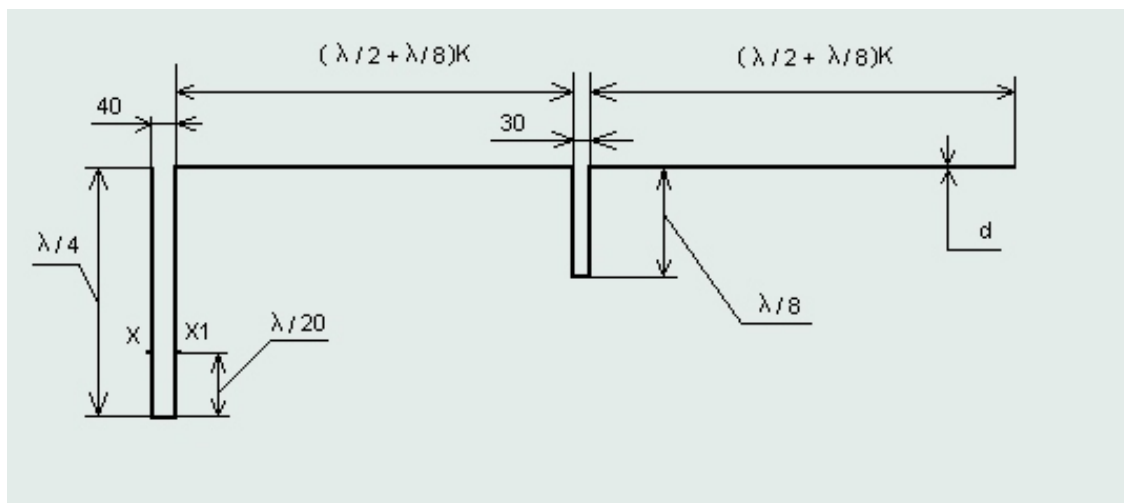
Конструктивно антенна выполнена в виде деревянного (или пластмассового) каркаса, состоящего из рамки А, двух стоек В и пластины для крепления облучателей С. К рамке А крепятся специальные скобы Е. Эти скобы выполнены из стальной проволоки, изогнутой точно по рассчитанной форме параболы, количество скоб может быть любое, но не менее трех. Концы скоб имеют нарезанную резьбу, которая служит для крепления скоб Е к рамке А. В рамке А для крепления скоб Е сверлятся специальные отверстия. Вариант крепления показан внизу, в центре. Для крепления каждого конца скобы используются по две гайки (деталь 1) и две шайбы (деталь 2). Диаметр проволоки для изготовления скоб следует выбирать в зависимости от габаритных размеров антенны, но не менее 4мм. При применении проволоки малого диаметра следует увеличить количество задействованных скоб.

К скобам Е и рамке А крепится зеркало рефлектора D. Крепление рефлектора к скобам может быть выполнено обычными скобочками из более тонкой проволоки, а к рамке А – шурупами. Рефлектор должен изготавливаться из металлического листа (лучший вариант – алюминиевый лист) или пластмассового листа, отражающая поверхность которого должна быть оклеена алюминиевой фольгой. В самом крайнем случае для временного варианта можно применить картон. При этом отражающая поверхность листа должна быть оклеена алюминиевой фольгой, а противоположная сторона картонного листа для защиты от влаги должна быть оклеена полиэтиленовой пленкой.

Многу специально не приводятся какие-то геометрические размеры конструкции. Дело в том, что все размеры зависят от выбора изготовителем размеров F и D, а все остальные размеры получаются в результате расчета. Для одного из вариантов можно взять эти размеры из конструкции описанной выше зеркально – параболической антенны (F = 400мм, D = 1100мм).



Горизонтальный размер  $l$  зависит от размера выбранного облучателя. Если в описанной выше зеркально – параболической антенне вся энергия принимаемых сигналов концентрируется в одной точке фокуса, то в данной конструкции антенны вся энергия концентрируется в *линии* фокуса. Поэтому самым удобным для применения может быть облучатель, составленный из нескольких коллинеарных диполей, т.е. диполей, расположенных на одной линии и соединенных друг с другом через согласующие устройства. Схема самого простого из таких облучателей приведена на рис. 7.

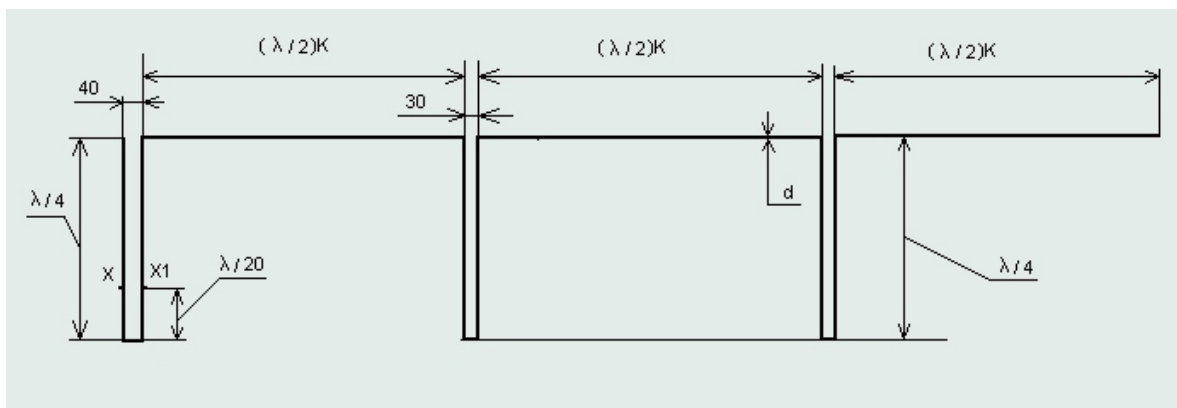


**Рис. 7.** Схема простого облучателя из двух коллинеарных диполей

Подобные конструкции часто используются радиолюбителями в виде вертикальных антенн с круговой диаграммой направленности на диапазоне 144 МГц. Такая антенна очень хорошо согласуется с кабелем и исключительно удобна для проведения местных радиосвязей. Антенна может быть изготовлена из медного провода диаметром 2 ... 3мм. Коаксиальный кабель подключается непосредственно к точкам X и X1, при этом к точке X подсоединяется оплетка кабеля, а к точке X1 – центральная жила. При желании можно выполнить более точную настройку антенны путем перемещения точек подключения кабеля вниз или вверх (по схеме) при одновременном контроле излучаемой мощности или коэффициента стоячей волны. Диполи антенны самого низкочастотного диапазона должны располагаться относительно рефлектора таким образом, чтобы между боковой кромкой рефлектора и проекциями на рефлектор концевых точек диполей оставалось пространство не менее  $\lambda/10$ . Следовательно, горизонтальный габаритный размер  $l$  должен быть равен сумме длин диполей плюс  $2 \lambda/10$ .

Если этот размер окажется слишком большим, то можно взять другую конструкцию облучателя, у которой каждый диполь имеет длину  $(\lambda/2) \cdot K$ , но при этом диполи связаны они между собой четвертьволновыми трансформаторами. Такая схема компоновки коллинеарной антенны является классической. На рис. 8 представлена схема классического варианта коллинеарной антенны, которую можно применить в качестве облучателя антенны RA3XB на любых УКВ диапазонах.





**Рис. 8.** Антенна из коллинеарных диполей

Кроме этих двух вариантов, имеются другие варианты конструкций коллинеарных антенн, состоящих из практически любого числа полуволновых диполей, связанных между собой посредством четвертьволновых короткозамкнутых шлейфов.

Так что выбор конструкции облучателя обширный, также возможны самые различные варианты совмещений и размещений. Поэтому и габаритный размер по горизонтали может иметь любое удобное для вас значение.

Для размещения облучателя в конструкции антенны RA3XB специально предназначена планка С, расположенная точно в линии фокуса. Изготовленный из медного провода облучатель крепится к планке С в нескольких местах капроновыми нитками или изолентой. На планке С можно расположить сразу несколько облучателей для работы в различных диапазонах. Например, сверху планки С располагается облучатель диапазона 435 МГц, а снизу – облучатели диапазона 1296 МГц и диапазона 2400 МГц.

При расчетах длин диполей облучателя следует учитывать величину укорочения длины диполя в зависимости от диаметра проводника, из которого предполагается изготавливать этот диполь. На УКВ диапазонах принято проводить расчет длины диполя с учетом коэффициента укорочения К, который находится в определенной зависимости от отношения  $l/d$ . В табл. 1 приведены величины коэффициента укорочения К для некоторых величин отношений  $l/d$ . Промежуточные значения К можно назначить примерно, исходя от размеров двух ближайших значений.

**Таблица1.** Коэффициенты укорочения диполя

$l/d$	30	40	50	60	80	100	200	300	400	900	2000	5000
К	0,85	0,87	0,88	0,89	0,9	0,907	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98

При изготовлении каркаса антенны следует обратить внимание на создание достаточной жесткости стоек В. Для этого можно будет установить дополнительные укосины, показанные на схеме антенны штриховыми линиями. На стойках В можно будет также разместить коробки с антенными усилителями. Коэффициент направленного действия антенны рассчитывается по формуле:

$$G = 4 S / \pi^2,$$

где **S** – площадь раскрыва антенны, **S = dl**; – длина волны. При расчетах длина волны и геометрические размеры должны быть в одних единицах измерения. Обычно используются сантиметры.

Проведем прикидочные расчеты величин к.н.д. антенны для различных диапазонов – диапазона 435 МГц (длина волны – 69см), диапазона 1296 МГц (длина волны – 24см) и диапазона 2400 МГц (длина волны 12см). Расчет проводим для величины площади раскрыва  $S = dl = 110 \cdot 140 = 15400 \text{ см}^2$ ,  $4 S = 193424 \text{ см}^2$ . Данные расчета приведены в таб. 2.

**Таблица 2. Результаты расчета для  $d = 110 \text{ см}$**

, см	<sup>2</sup> , см <sup>2</sup>	G	G, дБ
690	4761	40,6	16
24	576	335,8	22
12	144	1343,2	30

Увеличивая размер раскрыва антенны  $d$  до величины 150см, можно значительно увеличить к.н.д. Результаты расчета к.н.д. антенны RA3XB при величине  $d = 150 \text{ см}$  приведены в таб. 3. Площадь  $S = dl = 150 \cdot 140 = 21000 \text{ см}^2$ ,  $4 S = 263760 \text{ см}^2$ .

**Таблица 3. Результаты расчета для  $d = 150 \text{ см}$**

, см	<sup>2</sup> , см <sup>2</sup>	G	G, дБ
690	4761	55,4	19
24	576	457,9	25
12	144	1831,6	32

Выполненный расчет показывает, что даже небольшое увеличение раскрыва антенны значительно увеличивает направленные свойства, а значит и коэффициент усиления антенны.

Огромное преимущество этой антенны по сравнению с антенными решетками в том, что антенну RA3XB не нужно настраивать. Те, кто пытался получить хорошие результаты при настройке длинных директорных антенн или антенных решеток, оценят такое преимущество.

Прикидочными расчетами получено, что угол диаграммы направленности антенны в вертикальной плоскости на 435 МГц будет порядка 18 градусов, а угол в горизонтальной плоскости – порядка 45 градусов. Это говорит о том, что антенну можно использовать как стационарную для проведения связей через ИСЗ на многих из удаленных орбит. На более высокочастотных диапазонах угол в вертикальной плоскости будет значительно меньше, а угол в горизонтальной плоскости тоже уменьшится, но на меньшую величину.

Недостаток антенны заключается в её значительной парусности. Но если учесть возможности довольно простыми средствами достигнуть огромных величин коэффициента усиления, которые не могут быть достигнуты многими из обычных средств, то стоит задуматься об изготовлении этой антенны.

Если при изготовлении антенны точно соблюдены все расчетные данные, то никакой дальнейшей настройки не требуется.

Антенна не прошла достаточных испытаний, поэтому автору будут интересны любые данные об использовании антенны.

Изготовление антенны следует начать с построения линии параболы, по форме которой затем нужно будет изгибать проволочные скобы Е. Эта работа должна быть выполнена с возможно большой точностью. На листе миллиметровки (бумаги с миллиметровой разметкой) размером 2000 x 500мм следует сначала начертить осевые линии  $x$  и  $y$ . Ось  $x$  должна проходить посередине длиной стороны листа миллиметровки (поперек листа), а ось  $y$  должна располагаться у левой кромки листа. Для примера смотрите схему на рис. 5.

Решаем задачу построения параболы, имеющей расстояние фокуса  $f = 550\text{мм}$  и размер раскрыва отражающего зеркала  $d = 1500\text{мм}$ . Пересечение осевых линий  $x$  и  $y$  дает точку начала отсчета – точку 0 (ноль). Затем на оси  $x$  от точки 0 откладываем первое значение  $x = 2\text{мм}$ . Подставляем эту величину в формулу  $y^2 = 4fx$  и вычисляем сначала  $y^2 = 4 * 550 * 2 = 4400$ , затем извлекаем из полученного значения квадратный корень, тем самым вычисляем значение  $y$ . Полученное значение  $y$  откладываем вдоль оси  $y$  сначала в зоне положительных величин (выше оси  $x$ ), затем в зоне отрицательных величин (ниже оси  $x$ ). Таким образом мы имеем уже три точки необходимой параболы. Затем назначаем величину  $x = 5\text{мм}$  и по формулам определяем соответствующее значение величины  $y$ . Ставим на бумаге еще две точки, относящиеся к нашей параболы. Точно таким же образом определяем величины  $y$ , соответствующие значениям  $x = 10, 20, 30, 50, 100, 200$  и  $300\text{мм}$ . Откладываем полученные величины по обе стороны оси  $x$  и получаем полный профиль необходимой параболы. Все расчетные величины для этого примера приведены в табл. 4.

**Таблица 4. Расчетные величины параболы**

$x$	2	5	10	20	30	50	100	200	300
$y^2$	4400	11000	22000	44000	66000	110000	220000	440000	660000
$y$	66	105	148	210	257	332	469	663	812

Если теперь соединить все полученные точки, то получим кривую линию, которая называется параболой и форме которой должны точно соответствовать формы изгиба всех скоб Е. Раскрыв рефлектора должен ограничиваться размером 750мм выше оси  $x$  и размером –750мм, т.е. ниже оси  $x$ . В итоге величина раскрыва рефлектора будет соответственно  $d = 1500\text{мм}$ .

Следующим этапом следует назначить габариты рамки А и размеры прочих составных частей. Не вздумайте устанавливать облучатели чуть ближе или чуть дальше от рефлектора! Антенна работать не будет, если облучатели установлены не на линии фокуса! Проверьте размер  $f$  от центра рефлектора до облучателя после сборки всей конструкции еще раз.

=====

Литература:

1. С. Г. Жутяев «Любительская УКВ радиостанция», Москва, «Радио и связь», 1981 год.
2. К. Ротхаммель «Антенны», Москва, «Энергия», 1979год.
3. З. Беньковский, Э. Липинский "Любительские антенны коротких и ультракоротких волн", Москва, «Радио и связь», 1983 год.