

## Антенный букварь

### Предисловие

По моим наблюдениям около 90% радиолюбителей знает принцип работы и устройство двигателя внутреннего сгорания и менее 10% понимает процессы, происходящие в антенно-фидерных системах. В чем дело? Ведь антенна гораздо проще. При желании понять работу антенны это объясняется рядом причин, основными из которых являются отсутствие специального образования и акцентирование внимания в литературе, посвященной антеннам, на технических решениях в ущерб теории, разъясняющей, почему принято то или иное решение. В результате радиолюбитель, нахватавшись верхов, зачастую не может эффективно реализовать предложенную конструкцию или тратит силы и время на повторение малограмотных разработок.

Я тоже не имею специального образования по данной теме, но, работая в эфире второй десяток лет, всегда интересовался ею и пытался систематизировать полученные знания. Многое мне дали встречи с радиолюбителями – антенщиками и участие в работе дискуссионного клуба "1853 кгц." под руководством УТ 4 IX. Последним толчком к систематизации и обнародованию полученных знаний стала шумиха вокруг ЕН-антенн.

Системное изложение теоретических основ мне видится в следующей логической последовательности:

- "механизм" работы антенны,
- резонанс,
- ток смещения,
- распределение тока и напряжения в линии питания и по полотну антенны,
- диаграмма направленности ( ДН ) синфазных и противофазных элементов антенн,
- примеры анализа распределения тока и напряжения и ДН антенны без учета влияния земли,
- влияние земли на ДН,
- согласование генератора и нагрузки,
- принципы работы многоэлементных антенн.

По возможности я избегал формул и расчетов, концентрируя внимание на сути процессов.

### 1. "Механизм" работы антенны

Лучшее описание работы антенны, по моему мнению, приведено в [1, стр.124-126]. Питающие антенну ток и напряжение смещены по фазе на  $90^\circ$ . Известно, что при этом никакого расходования мощности не происходит. А антенна излучает. Почему?

В основе работы антенны лежат явления электрической и магнитной индукций. Если кто-то забыл что это такое, вспомните опыт на уроке физики, когда собиралась цепь из источника постоянного тока, катушки индуктивности и лампочки накаливания. При замыкании цепи лампочка не сразу вспыхивала и не сразу гасла при размыкании. "Вспыхивающее" или "гаснущее" магнитное поле наводило в витках катушки э.д.с., противоположную по фазе току в цепи при включении и совпадающую по фазе при размыкании. Поскольку явление индукции в этом опыте порождалось собственным магнитным полем катушки и не требовало расходования мощности, оно получило название - самоиндукции.

Похожие процессы происходят в антенне. Ток по длине антенны меняется одновременно и создает переменное магнитное поле.. Одни элементарные участки антенны

наводят в других элементарных участках э.д.с. индукции. Э.д.с. индукции отстает от изменения магнитного поля на  $90^\circ$ . Вследствие того, что магнитному и электрическому полям необходимо пройти некоторое расстояние от одного участка антенны до другого, происходит еще большее отставание. Чем длиннее антенна, тем больше угол между током и э.д.с. Суммарный вектор э.д.с. можно разложить на две составляющие. Одну под углом  $90^\circ$  к току. Эта составляющая характеризует явление самоиндукции. И вторую составляющую под углом  $180^\circ$  к току. Эта составляющая противоположна по фазе питающему току, что эквивалентно появлению в полотне антенны активного сопротивления, на котором рассеивается (излучается) часть подводимой мощности. Это сопротивление получило название сопротивление излучения ( $R$ ).

Вблизи антенны образуется два вида электромагнитного поля. Одно – реактивное, вызванное явлением самоиндукции. Оно излучается и поглощается антенной. Второе – активное поле излучения пропорциональное  $R$ .

Основным параметром, определяющим  $R$ , является длина антенны. Чем ближе она к половине длины возбуждающей волны ( $\lambda/2$ ), тем больше эффект индукции: больше угол между током и э.д.с., меньше составляющая самоиндукции и больше составляющая, определяющая величину  $R$ . При длине антенны больше  $\lambda/2$  на ее отдельных участках наблюдается противофазное движение токов, приводящее к частичной компенсации электрического и магнитного полей. Так, при симметричной и несимметричной запитке волнового вибратора  $R$  будет разным. Но об этом далее.

## 2.Резонанс

Явление резонанса в антенне лучше всего рассмотреть в векторной форме на примере резонанса в параллельном колебательном контуре. На рис.1 представлена векторная диаграмма условия резонанса. Горизонтально расположен вектор питающего напряжения ( $V$ ), равный 10 ед. С ним по фазе совпадает вектор тока, проходящего через активное сопротивление контура ( $I_a$ ), равный 5 ед. Вертикально вверх, опережая на  $90^\circ$  питающее напряжение, отложен вектор тока, проходящего через емкость ( $I_c$ ), равный 5 ед. Вертикально вниз, отставая на  $90^\circ$  от напряжения, отложен вектор тока, проходящего через индуктивность ( $I_l$ ), равный 5 ед. Резонанс возникает при равенстве токов, проходящих через емкость и индуктивность. При этом к контуру подводится мощность равная 50 ед., которая полностью выделяется на активном сопротивлении.

Изменим частоту питающего напряжения. Предположим, что сопротивления емкост-

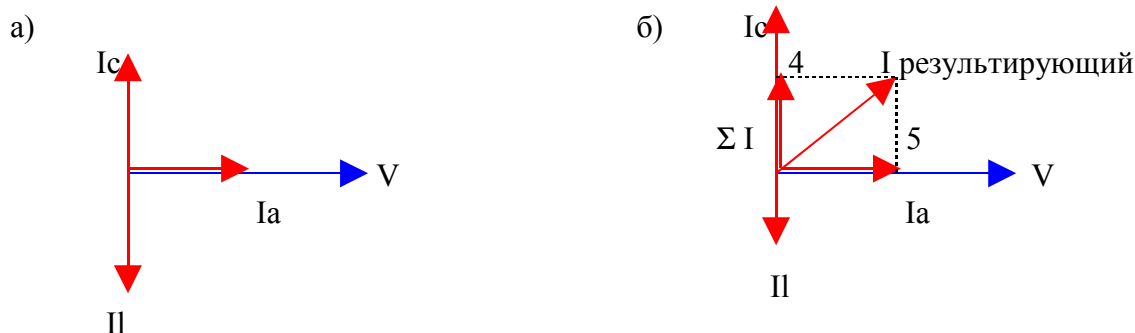


Рис.1. Векторные диаграммы токов и напряжения в контуре (а) при резонансе и (б) при уходе с резонансной частоты.

ной ветви уменьшилось и ток через нее увеличился на 2 ед., а индуктивной – увеличилось и ток через нее уменьшился на 2 ед. Таким образом, в контуре появиться емкостной ток ( $\Sigma I$ ) величиной 4 ед. Результирующий ток, потребляемый от источника питания, будет

равен  $\sqrt{\frac{2^2}{4} + \frac{2^2}{5}} = 6,4$  ед. Подводимая к контуру мощность будет равна 64 ед. Из нее только 50 ед. будут поглощены активной нагрузкой, т.е. мощность будет использована на  $50 * 100 / 64 = 78\%$ .

Из вышеприведенного следует два вывода.

1. При резонансе нагрузка потребляет 100% подводимой мощности.
2. Емкостная и индуктивная составляющие тока в антенне уравниваются друг друга только при определенной ее длине. При возбуждении антенны другими частотами этот баланс изменяется, что используется в многовибраторных антеннах, когда длины пассивных элементов антенны выбираются такими, чтобы переизлучаемые ими волны компенсировали или усиливали излучение активного элемента.

То, что антенна должна быть в резонансе, знают все радиолюбители. Но, если антенна не подключена непосредственно к выходу передатчика, а используются линия питания, согласующие, симметрирующие устройства, то "вгонять" в резонанс нужно всю антенно – фидерную цепочку начиная с колебательной системы усилителя мощности передатчика.

### 3. Ток смещения

Радиолюбитель в своей практике, как правило, имеет дело с током проводимости, вызванным наличием свободных электронов в проводниках. Поэтому вопрос: "Откуда в диполе, запитанном посередине, появляется ток, ведь цепь питания антенны видимым образом не замкнута?" - ставит многих в тупик. Разберемся подробнее.

Запитаем диполь источником постоянного тока. Одна половинка диполя будет заряжена положительными зарядами, другая – отрицательными. Естественно, что никакого тока в диполе не будет. Вокруг диполя образуется постоянное электрическое поле.

Если питать диполь переменным током, электрическое поле вокруг него будет пульсирующим с изменяющейся полярностью. Заряженные частицы материи ( ионы, катионы, пыль, соляные и щелочные растворы и т.д. ) будут совершать колебательные движения в такт с изменением поля, что равнозначно появлению в среде, окружающей антенну, переменного тока, получившего название – тока смещения.

Таким образом, цепь питания антенны замыкается через среду: клемма источника питания – левая половинка диполя – ток смещения – правая половинка диполя – клемма источника питания.

Ток смещения – переменный ток. Он сопровождается переменным магнитным полем. То есть, переменное электрическое поле неразрывно связано с переменным магнитным. Как сказал один из участников форума на QRZ.RU, посвященного ЕН – антеннам: "В нашей вселенной невозможно получить по отдельности переменное электрическое или магнитное поле".

Токи смещения и проводимости формируют ДН антенны. Поэтому радиолюбителю важно иметь ясное представление об их природе.

### 4. Распределение тока и напряжения в линии питания и по полотну антенны

Знание распределения тока и напряжения по полотну антенны позволяет определить соответствие длины антенны диапазону рабочих частот, выбрать рациональное место ее запитки и оценить ДН. Знание распределения тока и напряжения в линии питания позволяет выбрать ее длину и использовать отрезки линии в качестве согласующих и компенсирующих элементов.

Ключ к пониманию распределения тока и напряжения в антенне лежит в идентичности этого распределения с распределением в линиях питания [ 2, стр.28 ].

Представим себе линию питания, один конец которой запитывается генератором переменного тока, а ко второму подключена нагрузка. Все многообразие изменений этой схемы сводится к трем характерным случаям:

- сопротивление нагрузки равно волновому сопротивлению линии,
- линия разомкнута на конце ( т.е. нагружена на бесконечно большое сопротивление),
- линия замкнута на конце.

Если линия питания нагружена на сопротивление, равное ее волновому сопротивлению, то в ней устанавливается режим бегущих волн тока и напряжения. Вся мощность, отдаваемая генератором в линию, поглощается нагрузкой. Величины тока и напряжения по длине линии постоянны. Такой режим работы линии наилучший для передачи мощности в нагрузку.

Если линия питания разомкнута на конце, то в ней устанавливается режим стоячих волн тока и напряжения. Волна напряжения, отражаясь от конца линии, складывается с приходящей волной и образует пучности напряжения на концах линии. Ток, сдвинутый по фазе на  $90^\circ$  от напряжения, образует пучности на расстоянии четверти питающей волны от пучностей напряжения. Таким образом, ток и напряжение в линии сдвинуты на  $90^\circ$  в пространстве и во времени.

Если линия замкнута на конце, то в ней также устанавливается режим стоячих волн. Причем пучность тока образуется на замкнутом конце. На расстоянии четверти волны от нее образуются пучности напряжения.

При длине линии равной четверти длины возбуждающей волны и длинах, кратных четверти волны, в разомкнутых и короткозамкнутых линиях возникает резонанс. Входное сопротивление линии при этом активное. Это используется при трансформации входного сопротивления антенны. При длине линии меньше или больше резонансной длины входное сопротивление линии комплексное. В зависимости от длины линии и сопротивления нагрузки будет проявляться либо емкостная, либо индуктивная составляющая входного сопротивления.

При сопротивлении нагрузки больше волнового сопротивления в линии устанавливается режим смешанных волн – бегущей и стоячей с распределением тока и напряжения аналогичному в линии разомкнутой на конце. Если сопротивление нагрузки меньше волнового, в линии также будет режим смешанных волн с распределением тока и напряжения аналогичному в линии замкнутой на конце.

Провода линии, расположенные вблизи друг друга, создают противофазные магнитные поля. Электрическое поле в основном заключено между проводами линии. Поэтому линии питания теоретически не излучают электромагнитные волны, а служат для передачи энергии. Но что будет, если провода линии разнести в пространстве? Противофазность магнитных полей будет нарушена, а значительная часть силовых линий электрического поля будет замыкаться через окружающее пространство. Но распределение тока и напряжения по проводам разнесенной в пространстве линии останется прежним. Линия превратится в антенну.

Если представить, что один провод линии с бегущей волной тока разместить над землей, а второй – земля, получим простейшую антенну бегущей волны. Если два провода линии разнесены в пространстве соответствующим образом, можно получить ромбичес-

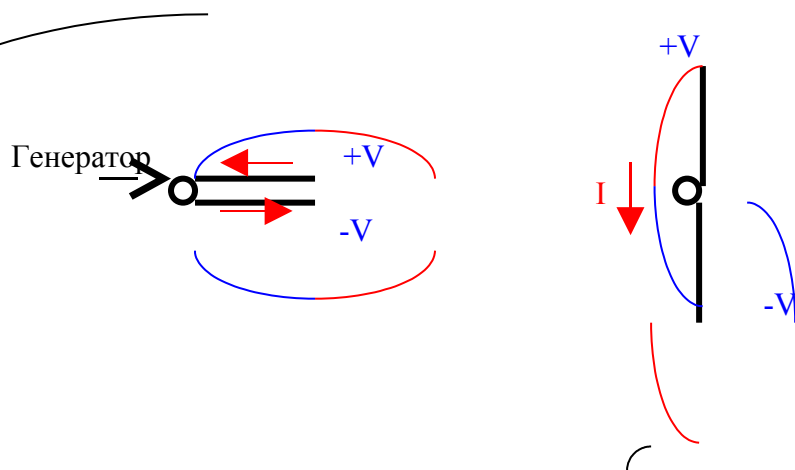


Рис.2. Распределение  $I$  и  $V$  вдоль линии и по полотно антенны

кую или другую фигурную антенну. В любом случае в антенне будут бегущие волны тока и напряжения. То есть этот класс антенн не имеет резонанса.

На рис.2 представлено распределение тока и напряжения в четверть волновой линии, разомкнутой на конце. Если верхний провод повернуть вверх на  $90^\circ$ , а нижний – вниз на  $90^\circ$ , получим полуволновой диполь с распределением тока и напряжения аналогичным в линии. Если такую же операцию провести с полуволновой линией – получим волновой диполь и соответствующее распределение тока и напряжения по его полотну.

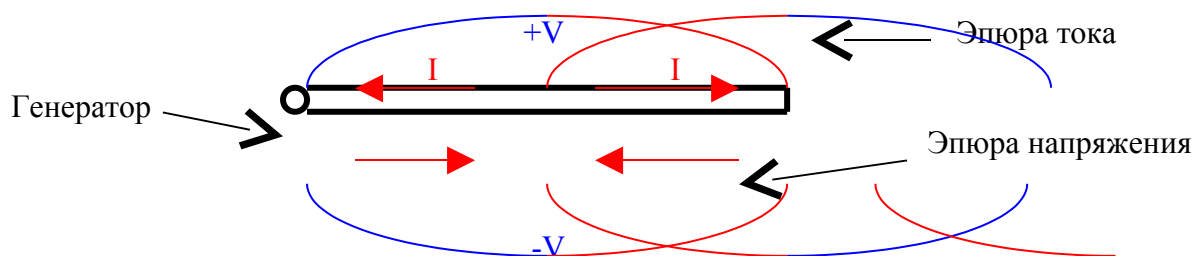


Рис.3. Распределение тока и напряжения в полуволновой линии, замкнутой на конце.

Если полуволновую линию, замкнутую на конце, растянуть в пространстве в виде квадрата, ромба, треугольника или окружности, распределение тока и напряжения ( рис. 3 ) по полотну полученной антенны не изменится.

## 5. Диаграмма направленности синфазных и противофазных элементов антенн

Токи в многоэлементных антеннах или отдельных элементах антенн могут протекать синфазно или противофазно. Многообразие вариантов может быть сведено к двум основным.

Предположим, что мы имеем две вертикальные антенны, отстоящие друг от друга на половину длины излучаемой волны. Если токи в этих антеннах противофазны, то излучение одной антенны, достигнув второй антенны, совпадет по фазе с ее излучением. То есть, по линии, соединяющей эти антенны, будет максимум излучения. Напротив, в направлении, перпендикулярном этой линии, излучения антенн будут складываться в противофазе. В итоге ДН в плане будет напоминать восьмерку.

Восьмерка получится также если эти антенны запитать синфазно, с той лишь разницей, что по линии, соединяющей антенны, будет минимум излучения, а по линии, перпендикулярной ей и проходящей через ее центр, - максимум.

На практике антенны или элементы одной антенны редко размещают на расстоянии большем половины длины волны. При уменьшении расстояния между антеннами восьмерка превращается в эллипс с сохранением направлений максимального и минимального излучений.

Полезно запомнить, что синфазные элементы антенн имеют максимальное излучение в направлении, перпендикулярном плоскости, в которой они находятся, а противофазные элементы в этом направлении имеют минимум излучения. И наоборот, там, где максимум излучения противофазных элементов, - минимум излучения синфазных.

## 6. Примеры анализа тока и напряжения и ДН антенны без учета влияния земли

На рис.4 приведена антенна в виде квадратной рамки с периметром, равным длине излучаемой волны, и с запиткой посередине нижней стороны. Обозначим углы квадрата и

середины сторон цифрами по направлению вращения часовой стрелки. Запитка антенны – в близко расположенных точках 9 и 8.

Распределение тока и напряжения по полотну антенны аналогично распределению тока и напряжения в линии, замкнутой на конце. Следовательно, в точке 4, равноудаленной от точек запитки, будет пучность тока. Отложив от этой точки четверть волны влево и вправо, найдем точки с пучностью напряжения. Это будут точки 2 и 6. В точках питания

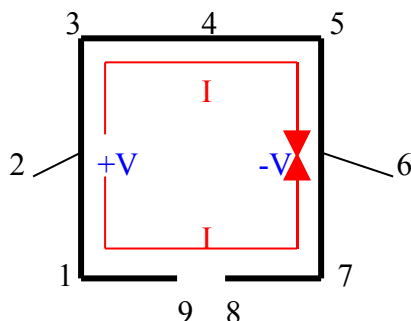


Рис.4. Распределение  $I$  и  $V$  при запитке квадрата посередине горизонтальной стороны

также будет пучность тока, следовательно, входное сопротивление антенны, определяемое отношением напряжения к току, будет низким.

Предположим, что в каком-то полупериоде излучаемой волны в точке 2 будет плюсовая пучность напряжения ( $+V$ ), а в точке 6 -  $-V$ . Тогда ток проводимости будет течь по двум ветвям квадрата:  $2 - 3 - 4 - 5 - 6$  и  $2 - 1 - 9(8) - 7 - 6$ . Токи на участках  $2 - 3$  и  $2 - 1$ , а также  $5 - 6$  и  $7 - 6$  противоположны по направлению и создаваемые ими поля для приемника, расположенного на расстоянии значительно большем, чем сторона квадрата, будут противофазны. Токи сторон  $3 - 5$  и  $1 - 7$  синфазны. Таким образом, только эти стороны являются рабочими. (Это не совсем верно. При несимметричной запитке волнового диполя токи в двух его половинах тоже противоположны по направлению.) Максимум ДН будет перпендикулярен плоскости, в которой находится квадрат. Поскольку расстояние между сторонами равно четверти волны излучение будет и в плоскости квадрата.

Если квадрат расположен вертикально – максимальное излучение горизонтально, если горизонтально – вертикально.

Поляризация излучения определяется преимущественным направлением движения токов или расположением пучностей напряжения. В данном случае она горизонтальна.

Попробуем запитать квадрат с угла (рис.5).

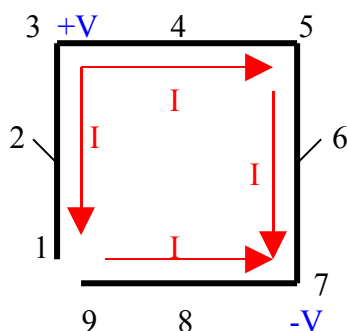


Рис.5. Распределение  $I$  и  $V$  при запитке квадрата с угла

Запитка в точках 1 и 9. Пучности тока в точке 5 и в точках запитки. Пучности напряжения в точках 3 и 7. Движение токов  $3 - 5 - 7$  и  $3 - 1 - 9 - 7$ . Токи в противоположных

сторонах квадрата синфазны, а в соседних – сдвинуты под  $90^\circ$ . Поля, создаваемые этими токами, не компенсируют друг друга, все стороны являются рабочими. Поляризация излучения наклонная. Чтобы получить вертикальную или горизонтальную, квадрат нужно повернуть по часовой или против часовой стрелки на  $45^\circ$ . Основной лепесток ДН – перпендикулярно плоскости квадрата. Поскольку расстояние между сторонами четверть волны – излучение будет также и в плоскости квадрата. Входное сопротивление антенны низкое.

Попробуем запитать квадрат длиной волны в два раза большей. Например, квадрат на 80 м использовать на диапазоне 160 м ( рис. 6 ).

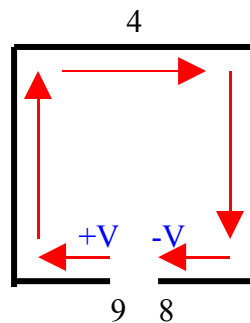


Рис.6. Распределение  $I$  и  $V$  при периметре квадрата, равном  $\lambda/2$

Пучность тока будет в точке 4. Пучности напряжения в точках запитки. Направления токов в сторонах квадрата противофазное, следовательно, основной лепесток ДН совпадает с плоскостью квадрата. При горизонтальном расположении квадрата – практически круговая ДН. Входное сопротивление высокое. Поляризация совпадает с расположением плоскости квадрата.

Попробуем использовать квадрат на 80 м на диапазоне 40 м ( рис. 7 ).

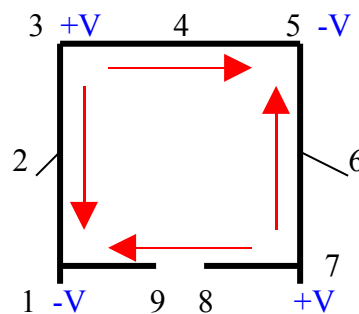


Рис. 7. Распределение  $I$  и  $V$  при периметре квадрата  $2\lambda$

В точке 4 будет пучность тока. В точках 3 и 5 будут пучности напряжений. Предположим, что в точке 3 -  $+V$ , а  $-V$  в точке 5. Через четверть волны от этих пучностей будут пучности тока – точки 2 и 6, а еще через четверть волны – пучности напряжений: в точке 1 -  $-V$ , в точке 7 -  $+V$ . Направление токов в противоположных сторонах противофазное, расстояние между ними – половина длины волны, следовательно, основные лепестки ДН будут лежать в плоскости квадрата и представлять собой фигуру похожую на георгиевский крест. То есть почти круговую. Входное сопротивление антенны невысокое. Поляризация такая же как и в предыдущем примере.

Рассмотрим примеры с антеннами, распределение тока и напряжения по полотну которых аналогично распределению в линиях разомкнутых на конце. На рис. 2 приведен случай симметричной запитки. Что будет, если антенна запитана не симметрично? Например, волновой диполь запитанный на расстоянии четверти волны от конца или с конца.

Если диполь запитан с конца, то вторым проводом линии будет земля (рис.8), и тогда распределение тока и напряжения будет аналогично распределению в симметричной волновой линии.

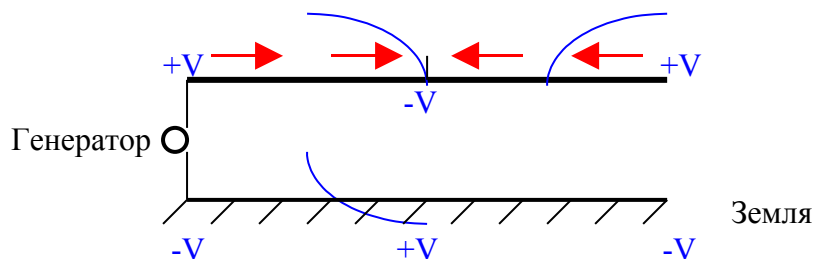


Рис.8. Распределение  $I$  и  $V$  в волновом диполе

Если волновой диполь запитан на расстоянии четверти волны от конца, эквивалентная линия приведена на рис.9.

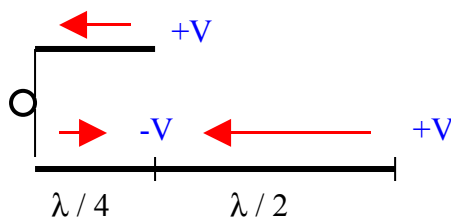


Рис.9. Распределение  $I$  и  $V$  в волновом диполе при запитке  $\lambda/4$  от конца

Если запитка разомкнутых антенн производится не в резонансных точках, то методика нахождения точек пучностей напряжений и токов остается прежней: на конце провода всегда пучность напряжения, от нее на расстоянии  $\lambda/4$  находится пучность тока, от которой на расстоянии  $\lambda/4$  находится пучность напряжения противоположная по знаку, и т.д.

Рассмотрим пример с более сложной антенной. На рис.10 приведена схема антенны MDX.

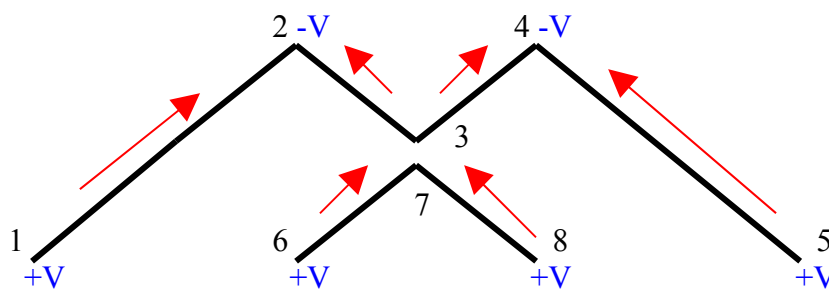


Рис.10. Распределение  $I$  и  $V$  по полотну антенны

Длина отрезков 1 – 2 и 4 – 5 равна  $\lambda/2$ . Длина отрезков 2 – 3, 3 – 4, 6 – 7 и 7 – 8 -  $\lambda/4$ . Питание антенны производится в точках 3 и 7. В конструкции антенны выдерживается равенство углов к горизонту отрезков 1 – 2 и 4 – 5, 6 – 7 и 2 – 3, 7 – 8 и 3 – 4. Распределение токов и напряжений по полотну антенны аналогично распределению в двух параллельно запитанных несимметричных волновых диполях. Предположим, что в каком-то полупериоде в точках 6 и 8 находятся положительные пучности напряжений, тогда в точках 2 и 4 будут отрицательные пучности напряжений, а в точках 1 и 5 положительные. Движение токов приведено на рисунке. Если разложить векторы токов на горизонтальные и



вертикальные составляющие, обнаружим, что излучение горизонтальных составляющих токов в отрезках 1–2 и 4–5, 6–7 и 2–3, 7–8 и 3–4 компенсируют друг друга. Таким образом, работа антенны MDX эквивалентна работе четырех вертикалов, запитанных синфазно. Максимум ДН будет в направлении перпендикулярном плоскости антенны. Поляризация – вертикальная. Входное сопротивление – низкое.

Как видим, методика анализа работы антенны проста и содержит следующую последовательность:

- отнесение антенны к классу замкнутых, разомкнутых или антенн с бегущими волнами тока и напряжения.
- определение точек пучностей тока и напряжения
- прорисовка движения токов проводимости, определяющих ДН, поляризацию и входное сопротивление.

## 7. Влияние земли

В теории радиотехники имеется термин – абсолютная проводящая поверхность. Это поверхность, сопротивление которой для токов смещения нулевое. Конфигурация электрического поля зарядов, находящихся вблизи этой поверхности, преобразуется так, словно за ней зеркально находятся копии этих зарядов с обратной полярностью. Земля может быть приравнена к абсолютной проводящей поверхности. Конечно, реально, сопротивление земли не нулевое. Но оно для токов смещения меньше, чем сопротивление пространства, в котором находится антенна. Рассмотрим влияние земли на ДН на следующем примере.

Пусть в пространстве горизонтально расположен полуволновой диполь. Он “окутан” силовыми линиями электрического поля, которые являются траекториями движения токов смещения. Выделим две силовые линии одинаковой напряженности, находящиеся в вертикальной плоскости сверху и снизу вибратора, и две линии в горизонтальной плоскости – справа и слева от него.

Если антенна находится высоко над землей, ее влияние на электрическое поле практически незаметно. При снижении антенны до высоты  $\lambda / 4$  нижняя траектория тока смещения вдоль антенны становится равной по сопротивлению среды траектории – “плюсовая” пучность напряжения на конце диполя – вертикально вниз к земле – земля с нулевым сопротивлением – вертикально вверх к минусовой пучности напряжения на конце диполя”. Чем ближе антенна будет к земле, тем больше силовых линий электрического поля будут замыкаться через нее. Земля будет “притягивать” как нижние, так и левые, и правые, и верхние силовые линии. При небольшом расстоянии до земли силовые линии будут преимущественно замыкаться через землю. Это значит, что цепь питания полуволнового диполя будет выглядеть следующим образом: “плюсовая” точка запитки – ток проводимости в левой половине диполя – токи смещения вниз к земле – земля – токи смещения вверх – ток проводимости в правой половине диполя – “минусовая” точка запитки. Поскольку большинство силовых линий при приближении антенны к земле замыкается через землю, а токи смещения под половинами антенны противофазны, ДН полуволнового диполя в горизонтальной плоскости из восьмерки, перпендикулярной полотну антенны, превращается в эллипс, вытянутый вдоль полотна. Отсюда выводы:

1. Наименьшему влиянию земли подвержены низко расположенные антенны, у которых цепь питания замыкается посредством тока проводимости (рамки) и которые имеют преимущественно вертикальное направление движения этих токов.

2. При оценке ДН низко расположенных антенн наряду с токами проводимости необходимо учитывать направления движения токов смещения.

## 8. Согласование генератора и нагрузки

Из электротехники известно, что наибольшая передача мощности от генератора в нагрузку происходит тогда, когда сопротивление нагрузки является активным и равным внутреннему сопротивлению генератора.

Применительно к передатчику рациональнее говорить не о внутреннем сопротивлении, а о выбранном режиме работы выходного каскада. Например, критическом. Тогда условия максимальной передачи мощности в антенну заключаются в достижении резонанса и согласовании входного сопротивления антенны или антенно-фидерной системы с выходом усилителя мощности при выбранном режиме его работы.

В общем случае, при передаче мощности в антенну мы имеем три объекта – антенну, линию питания и колебательную систему (КС) усилителя мощности (УМ). Согласование можно добиться изменением параметров этих объектов: изменением длины антенны, длины линии питания, емкостей и индуктивностей КС. Однако, это не всегда рационально при необходимости перекрытия широкого диапазона частот или эффективной работы антенны на нескольких диапазонах. Так "обрезание" антенны уменьшает R, удлинение может быть невозможно по условиям подвеса. Укоротить линию питания меньше, чем расстояние от трансивера до точки запитки нельзя, а ее удлинение увеличивает потери мощности и финансов. Наконец, изменение параметров КС может изменить режим работы УМ.

Проблему решают с помощью включения между антенной и линией питания или между КС и линией питания согласующих устройств. При включении согласующего устройства (СУ) между антенной и линией питания в ней стараются установить режим бегущих волн. При включении СУ на выходе передатчика в линии будет преимущественно режим стоячих волн.

По моему мнению, включение СУ на выходе передатчика целесообразно на низкочастотных диапазонах вследствие их большой "ширины" и существенного влияния земли. (Я наблюдал почасовое изменение КСВ в линии питания антенны 160 м диапазона.)

Кстати, о КСВ. КСВ-метр служит для оценки согласования. Но он может служить для оценки мощности, потребляемой антенной. Напомню, что мощность пропорциональна квадрату напряжения или тока. Измеряемые КСВ-метром напряжения или токи пропорциональны напряжениям и токам в линии. Поэтому при прямой волне в 100 ед. и отраженной в 20 ед.  $КСВ = (100 + 20) / (100 - 20) = 1,5$ . Отношение отраженной волны к прямой 1:5, отношение отраженной мощности к падающей – 1: 25 или 4 %. То есть при КСВ = 1,5 УМ недоиспользуется на 4 %. При КСВ = 3 (прямая 100, обратная 50, отношение напряжений 1:2, отношение мощностей 1:4) к усилителю возвращается 25 % мощности.

Описания конструкций СУ широко приведены в литературе. СУ, включенные на выходе передатчика (тюнер), производят согласование сопротивлений при вводе всей антенно-фидерной системы в резонанс. СУ, включенные между антенной и линией питания, зачастую только выравнивают сопротивления, не компенсируя реактивность. Поэтому имеет смысл обратить внимание на согласование с помощью короткозамкнутой четвертьволновой линии. Дело в том, что у многих антенн при уходе с резонансной частоты наблюдается появление реактивности, противоположной по знаку реактивности, возникающей в четвертьволновой линии. Характер реактивности замкнутых и разомкнутых линий питания (и что тоже самое – антенн) в зависимости от их длины приведены в литературе. Отметим, что реактивность линии, разомкнутой на конце, при длине меньше  $\lambda / 4$  имеет емкостной характер, а реактивность линии, замкнутой на конце, - индуктивный. При длине от  $\lambda / 4$  до  $\lambda / 2$  - разомкнутая – индуктивный, а замкнутая – емкостной. И так далее.

Выбор варианта согласования за радиолюбителем. Цель можно достичь разными способами. Важно, чтобы радиолюбитель не был заиклен на одном, а проводил оценку вариантов применительно к своим условиям.

## 9. Принципы работы многоэлементных антенн

Многоэлементные антенны делятся в основном на две группы: антенны с активным питанием и антенны с пассивными элементами. Целью создания этих антенн являлось получение однонаправленной ДН и повышение усиления.

При активной запитке антенн они могут запитываться синфазно, противофазно и через дополнительную линию задержки. Работа синфазно и противофазно запитанных антенн аналогична работе синфазно и противофазно запитанных элементов антенн, рассмотренных ранее. Поэтому рассмотрим принцип работы антенны с линией задержки на примере двух полуволновых вибраторов.

Основная идея заключается в запитке вибраторов таким образом, чтобы излучение каждого из них складывались в одном направлении и компенсировали друг друга в противоположном. Это достигается, если один вибратор запитывается непосредственно, а второй через линию задержки. Обычно это кабельная линия питания. Для подавления заднего лепестка ДН следует, чтобы длина линии задержки и расстояние между вибраторами в сумме были равны  $180^\circ$ . Классикой является длина линии и расстояние равные  $\lambda / 4$ . Хотя возможны и другие соотношения: расстояние -  $\lambda / 8$ , линия задержки -  $135^\circ$ .

Понять работу многоэлементных антенн и сделать их первоначальный анализ можно с помощью старого дедовского способа - замена динамичного процесса излучения пошаговым статичным. Шаг или промежуток времени выбирается обычно равным расстоянию между антеннами. Синусоида излучаемой волны описывается следующими знаками. Максимум "положительной" напряженности поля - "+". Нулевая напряженность - 0. Максимум "отрицательной" напряженности - "-". Изменение напряженности поля между "+" и "-" предполагается по линейному закону. Проиллюстрируем способ на примере классической запитки двух вибраторов: расстояние между вибраторами -  $\lambda / 4$ , линия задержки -  $90^\circ$  ( рис. 11 ). Мощности, подводимые к вибраторам, равны.

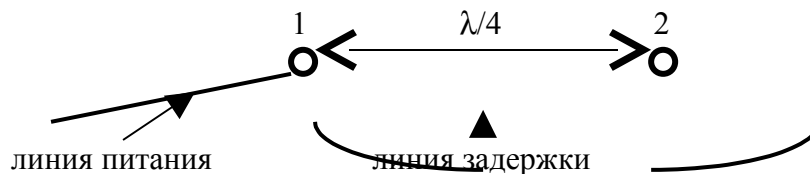


Рис.11. Схема активной запитки двух вибраторов

В таблице 1 приведены напряженности полей. В первой колонке - моменты времени, во второй - напряженность излучаемого поля первой антенны, в третьей - напряженность поля второй антенны в месте расположения первой, в четвертой - суммарная напряженность поля в месте расположения первой антенны, в пятой - напряженность излучаемого поля второй антенны, в шестой - напряженность поля первой антенны в месте расположения второй антенны, в седьмой - суммарная напряженность в месте расположения второй антенны.

Пусть в первый момент времени первая антенна будет излучать "+". Эта напряженность достигнет второй антенны через  $90^\circ$  одновременно с возбуждением, проходящим по линии задержки, и в направлении от первой антенны ко второй напряженности излучаемых полей сложатся. Излучение второй антенны придет к первой тогда, когда излучение первой антенны окажется в противофазе - "-". Таким образом, напряженности полей в одном направлении будут усиливать друг друга, а в другом ослаблять.

В таблице 2 приведены напряженности полей при расстоянии между вибраторами  $\lambda/8$ , длине линии задержки  $135^\circ$  и равенстве подводимых мощностей.

Возбуждение по линии задержки достигнет второй антенны в четвертый момент вре-

мени. Ее излучение достигнет первой антенны в пятый момент времени. Анализируя суммарные напряженности полей, видим, что в одном направлении излучение подавляется. А в другом, в отличие от предыдущего случая, напряженность поля не превышает напряженности, создаваемой одной из антенн. Есть ли здесь усиление?

Я думаю, что прописную истину, что антенна – это лучший усилитель, нужно воспринимать осторожно. Смотри с чем сравнивать. Диполь в сравнении с изотропным излуча-

Таблица 1

t	1	2→1	Σ	2	1→2	Σ
1	+					
2	0			+	+	2+
3	-	+	0	0	0	0
4	0	0	0	-	-	2-
5	+	-	0	0	0	0
6	0	0	0	+	+	2+
7	-	+	0	0	0	0
8	0	0	0	-	-	2-

Таблица 2

t	1	2→1	Σ	2	1→2	Σ
1	+					
2	+/2				+	
3	0				+/2	
4	-/2			+	0	+
5	-	+	0	+/2	-/2	0
6	-/2	+/2	0	0	-	-
7	0	0	0	-/2	-/2	-
8	+/2	-/2	0	-	0	-
9	+	-	0	-/2	+/2	0
10	+/2	-/2	0	0	+	+
11	0	0	0	+/2	+/2	+
12	-/2	+/2	0	+	0	+
13	-	+	0	+/2	-/2	0

телем обладает усилением. Напомню, что коэффициент усиления антенны равен произведению коэффициента направленного действия на к.п.д. антенны. Если сравнивать систему двух активно запитанных полуволновых вибраторов с таким же одиночным вибратором, то при равенстве подводимых мощностей напряженность поля у корреспондента в направлении "вперед" не изменится. Предположим, что излучения антенн происходят только по прямой, соединяющей антенны. Тогда, в случае одиночного вибратора, корреспондент получит половину излучаемой мощности. В случае активной системы и четвертьволнового расстояния между вибраторами он получит ту же половину излучаемой мощности. Поэтому выигрыш заключается только в улучшении отношения "сигнал"/ "помехи".

Проблема усиления решается в антеннах с пассивными элементами за счет переизлучения рефлектором части энергии в направлении корреспондента и создания при помощи директоров бегущей волны напряженности поля.

Понять работу антенны с пассивными элементами пошаговым методом трудно из-за взаимного влияния элементов друг на друга. Расчеты таких антенн ведут с помощью математических моделей. Лучше всего объяснить работу антенны, отталкиваясь от работы классической двухэлементной антенны с активным питанием. Первый вибратор, запитан-

ный непосредственно, выполняет роль рефлектора. Его излучение, а следовательно ток, опережает по фазе на  $90^\circ$  ток в элементе, запитанном через линию задержки. Если разместить пассивный элемент на расстоянии  $\lambda/4$  от активного, то э.д.с. в нем наведется через  $180^\circ$ : расстояние  $\lambda/4$  плюс  $90^\circ$  сдвиг по фазе между магнитным полем и наведенной э.д.с. Угол между э.д.с. и током в пассивном элементе зависит от его длины. Если длина резонансная, угол равен 0. Если длина меньше резонансной (емкостной характер реактивности), то ток будет опережать э.д.с. на какой-то угол. Если длина больше (индуктивный характер реактивности) – ток будет отставать. Предположим, что длина пассивного элемента такова, что ток отстает от э.д.с. практически на  $90^\circ$ , тогда общее отставание тока по фазе от тока в активном элементе составит  $270^\circ$  или, что тоже самое, – ток будет опережать ток в активном вибраторе на  $90^\circ$ . То есть, выполнено условие, при котором пассивный элемент стал рефлектором.

Если пассивный элемент укоротить так, чтобы ток в нем опережал э.д.с. на  $90^\circ$ , то ток в нем будет отставать от тока в активном элементе на  $90^\circ$ , и тогда активный элемент станет рефлектором.

Излучение активного элемента в сторону рефлектора попадает в противофазу с излучением рефлектора. Излучение рефлектора в сторону активного элемента совпадает по фазе с излучением активного элемента. Излучение директора в сторону активного элемента противофазно с его излучением, а в противоположную сторону совпадает по фазе. Во взаимодействии рефлектора, активного вибратора и директора возникает эффект бегущей волны напряженности поля – напряженность от элемента к элементу увеличивается, а ДН сужается.

На практике расстояния между элементами уменьшают, а длины рефлектора и директора, соответственно, удлиняют и укорачивают, выдерживая приведенные условия.

## Заключение

Я назвал эту работу антенным букварем. Азбука – это закрепление отдельных звуков речи в виде букв. Букварь – методика воспроизводства речи из букв. Надеюсь, что последовательность приведенных теоретических основ радиотехники углубит понимание читателя и позволит ему грамотно ориентироваться в антенной тематике. Вероятно, изложенный материал кому-то покажется неполным. Буду благодарен за замечания и дополнения.

Литература: 1. Изюмов Н.М. Курс радиотехники. 3-е изд. Военное изда-во МО СССР., М., 1958 г., с.688  
2. Белоцерковский Г.Б. Основы радиотехники и антенны. Часть 2. Антенны. М., Советское радио, 1969 г., с.328