

Рамочно-лучевая или настоящая ЕН антенна

В статье рассмотрены нестандартные идеи и способы построения эффективных антенн для относительно длинноволнового диапазона радиоволн.

Попытки создания эффективной электрически малой антенны с размерами, много меньшими длины волны, не прекращаются со времени зарождения радиотехники до наших дней. На заре беспроводной телеграфной связи Н. Тесла, А. С. Попов, Г. Маркони, Р. Фессенден и др. использовали длинные и сверхдлинные волны (ДВ и СДВ), на которых любая реальная антенна оказывалась электрически малой. Сразу же выяснилась недостаточная эффективность простого вертикального провода, и были предложены разновидности антенн с верхней емкостной нагрузкой. Ее делали в виде шара, горизонтальной части того же провода (Г- и Т-образные антенны), в виде ряда радиальных лучей (зонтичная антенна), либо в виде разветвленной «радиосети» из многих проводов, подвешенной на значительной высоте. Ввиду большой

емкостной нагрузки последний тип антенн иногда называли емкостными или конденсаторными.

Заметим, что в диапазоне СДВ земля — хороший проводник, и вдоль нее распространяется только волна с вертикальной поляризацией. Ее излучает лишь вертикальная часть. При большой емкостной нагрузке распределение тока равномерное, и действующая высота антенны h практически равна геометрической. Сопротивление излучения антенны R_s и КПД рассчитывают по формулам:

$$R_s = 1600(h/\lambda)^2,$$

$$\text{КПД} = R_s / (R_s + R_n) >$$

где λ — длина волны, R_n — сопротивление потерь.

В силу свойства обратимости формулы верны как для передающих, так

и для приемных антенн. Под КПД понимают отношение мощности, принятой реальной антенной, к мощности, которую могла бы принять «идеальная» антенна, не имеющая потерь. Для малых антенн сопротивление излучения R_s низкое, обычно единицы и даже доли ома, поэтому мал и КПД.

Десятилетиями усилия проектировщиков антенн были направлены на снижение потерь, т. е. сопротивление R_n . Наибольший вклад в R_n вносят удлиняющие катушки, настраивающие антенну в резонанс, и системы заземления. Все это стало ясно уже в самом начале прошлого века после фундаментальных работ Абрахама и Рюденберга. Были предложены антенны с несколькими настроенными снижениями (Александрсон) и разветвленными системами заземлений, в ряде случаев также настроенных (Мейсснер). Для приемных антенн эти решения слишком сложны и дороги.

Физически низкое сопротивление излучения можно объяснить так: ток и напряжение на концах малой антенны сдвинуты по фазе на 90° (стоячая волна), следовательно, электрическое E и магнитное H поля в ближней зоне квадратурны. Для формирования по-

тока излучения, описываемого вектором Пойнтинга $\Pi = E \times H$, нужны синфазные компоненты. Они появляются довольно далеко от антенны, где поля, распространяющиеся с конечной скоростью, приобретают дополнительный сдвиг фаз. Он мал при малых размерах антенны, поэтому и излучение неэффективно, а сопротивление излучения мало.

В конце 80-х годов прошлого века большой интерес вызвали разработки шотландских профессоров Б. Стюарта и М. Хейтли нового типа малой антенны на скрещенных полях, названной ими Crossed Field Antenna или CFA. Основная концепция этой антенны — раздельное формирование вблизи антенны электрического E и магнитного H полей соответствующими элементами конструкции. При синфазности полей уже около самой антенны формируется поток излучения (вектор Пойнтинга Π), направленный вовне. Концепция не была одобрена многими авторитетами в области антенн, дискуссии продолжаются и поныне.

Тем не менее, М. Хейтли и его студент Ф. Каббари получили патент [1], была образована компания CFA Ltd и построены несколько антенн для СВ радиостанций (рис. 1).

В Египте и во Франции (Сан-Ремо) CFA показали неплохие результаты, тогда как в Германии (Ганновер) и в Австралии (вблизи Сиднея) работали плохо.

Дальнейшая модернизация CFA американцем Т. Хартом (W5QJR) привела к разработке в 1998 г. EH антенны, вызвавшей еще больший шквал неприятия и критики. Т. Харт — инженер, изобретатель и ветеран радио — также организовал компанию EH Antenna Systems, продает свои антенны радиолюбителям и ведет переговоры



Рис. 1

с радиовещателями, впрочем, с переменным успехом. Отбрасывая заведомо восторженные и откровенно ругательные отзывы людей, построивших EH антенну, можно заключить, что она работает, но не так эффективно как хотелось бы. Большинство добросовестных исследователей отмечают ее проигрыш по сравнению с полуволновым диполем или четвертьволновым вертикалом в 10...20 дБ.

В концепции CFA и EH антенн есть еще один сомнительный момент — формирование поля H токами смещения, создаваемыми специальным элементом антенны — D-пластиной (рис. 2).

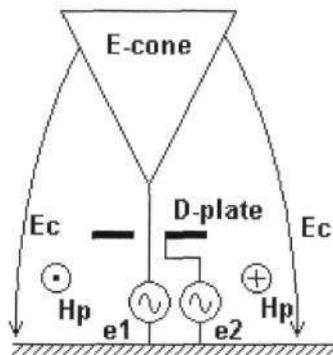


Рис. 2

По мысли авторов токи смещения между пластиной и землей создают кольцевое магнитное поле H_p . Взаимодействуя с электрическим полем верхнего цилиндра или конуса E_e , оно и создает поток Π , направленный радиально от антенны. Как отмечали критики из электронного журнала «AntenneX» эти рассуждения неполны и несколько наивны. В частности, они совершенно не учитывают полей проводов, подводящих энергию от квадратурных источников $e1$ и $e2$.

Рассмотрим более детально поле D-пластины (рис. 3).

Ток проводимости от источника $e2$ и токи смещения от пластины на землю образуют тороидальную систему токов, формирующих кольцевой магнитный поток H_p отнюдь не снаружи, как на рис. 2, а внутри под пластиной. По принципу непрерывности тока площадной интеграл (поток) от плотности тока смещения под пласти-

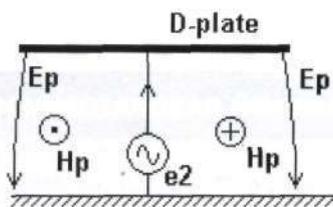


Рис. 3

ной в точности равен току источника $e2$, поэтому поле H вне этой системы токов если и будет, то очень малым.

Поле H_p под пластиной никак не может взаимодействовать с E_e , поскольку пластина же его и экранирует. Влияние D-пластины на работу CFA сводится к внесению в цепь питания E-конуса некоторого импеданса, зависящего от настройки цепи питания пластины. При настройке ее в резонанс вполне возможно увеличение импеданса антенны и расширение ее полосы, как в системе связанных контуров, что и отмечали авторы.

Таким образом, в CFA скорее всего излучает E-конус, как короткий толстый вертикал, противовесом которому служит крыша здания, покрытая медными листами (рис. 1), и система заземления, о которой авторы даже не упоминают, но которая, очевидно, имеется и увеличивает действующую высоту антенны вдвое, если не больше. Это приводит к росту сопротивления излучения вчетверо, что учитывая малое активное сопротивление объемных элементов CFA, значительно увеличивает КПД даже при малых по сравнению с длиной волны размерах антенны.

Теперь обратимся к обобщенному анализу двойных, двухэлементных или двухэлектродных (устоявшегося названия еще нет) малых антенн. Если две антенны $A1$ и $A2$, каждая со своим источником (которые когерентны), совмещены в пространстве, решающее значение приобретает соотношение фаз источников. Суммарная плотность потока энергии (вектор Умова-Пойнтинга Π) в каждой точке пространства может быть найден по принципу суперпозиции полей:

$$\begin{aligned} \Pi &= (E1 + E2) \times (H1 + H2) = \\ &= E1 \times H1 + E2 \times H2 + E1 \times H2 + \\ &\quad + E2 \times H1. \end{aligned}$$

Если первые два слагаемых в первой части описывают взаимодействие собственных полей каждой антенны, то последние два — взаимодействие электрического поля одной антенны с магнитным полем другой. Это и есть те скрещенные поля (Crossed Fields), которые хотели использовать авторы CFA с целью эффективного формирования вектора Пойнтинга. Однако для этого $E1$ должно быть синфазно (или противофазно) с $H2$, следовательно антенны $A1$ и $A2$ должны возбуждаться в квадратуре. Из фазовой диаграммы на рис. 4 видно, что если колебания $E1$ и $H2$ синфазны и дают вектор Π , направленный

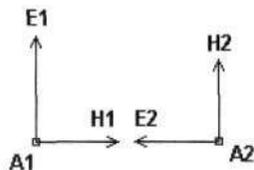


Рис. 4

от антенны, то E_2 и H_1 противофазны и дают вектор Π , направленный противоположно, т. е. к антенне.

Следовательно, для получения заметного результата от скрещенных полей, необходимо использовать существенно разные антенны A_1 и A_2 , такие, чтобы у одной преобладало электрическое поле, а у другой — магнитное.

Этот случай показан на рис. 5, где антенна A_1 магнитная, а A_2 — электрическая.

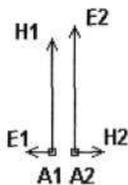


Рис. 5

Кстати, авторы [1] тоже начинают описание с комбинации рамочной и конденсаторной антенн (правда, с ошибками). Но подобная комбинация электрической и магнитной (штыревой и рамочной) антенн давно и хорошо известна. При очень малых по сравнению с длиной волны размерах антенной системы она дает направленный прием с кардиоидной диаграммой направленности (ДН), чего не предусмотрели авторы СФА. До сих пор эти антенны используют в радиопеленгации, в частности, в популярных соревнованиях «охота на лис». В диапазоне длин волн 80 м размеры антенн могут быть менее 1 м.

Обычно формирование кардиоидной ДН объясняют суммированием круговой ДН штыря и «восьмерочной» ДН рамки. Но возможно и другое объяснение (рис. 6).

Вертикальное электрическое поле штыря E_e взаимодействует с горизонтальным магнитным полем рамки H_p , создавая однонаправленный поток излучаемой мощности Π . При этом как раз эффективно действует кросс-поле $E_c \times H_p = \Pi$.

Для получения более равномерного распределения тока в штыре его следует оснастить емкостной нагрузкой C . Штырь настраивается в резонанс индуктивностью, включенной между ним и землей (противовесом), а рам-

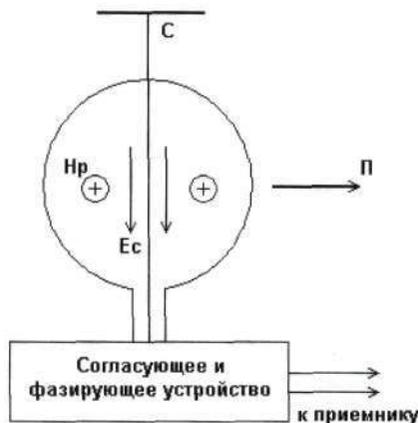


Рис. 6

ка — емкостью, включенной между ее выводами. Эти элементы расположены в согласующе-фазировующем устройстве. Его задача — сложить сигналы штыря и рамки со сдвигом фазы 90° и равными амплитудами для получения нуля в кардиоидной ДН. При выполнении этих задач в пеленгаторах обычно не считаются с потерями, компенсируя их усилением приемника.

Перед автором стояла несколько другая задача. Уже многие годы экспериментируя с громкоговорящим детекторным приемом в Москве и области, где есть мощные радиостанции ДВ и СВ диапазона, хотелось создать антенну, отдающую возможно большую мощность в приемник, не слишком усложняя и удорожая ее конструкцию. Прежние попытки использовать различные комбинации двух антенн по большей части не приводили к желаемому результату. Настройка второй антенны в резонанс чаще всего вызывала «отсос» мощности из первой, т. е. второй антенный контур работал как режекторный. Наконец, на базе описанных выше общих соображений, а также исследований ближнего поля антенн [2] удалось получить нечто полезное.

Дачная антенна представляет собой наклонный луч длиной около 12 м с гайкой на конце (рис. 7), заброшенный на соседнюю березу.

На этот луч громко принимают радиостанции «Маяк» на частоте 549 кГц и тише — «Радио Подмосковья» (846 кГц). Противовесом служит домашняя сеть водяного отопления. Сам приемник описан неоднократно, например в [3].

Замысел эксперимента был прост — повесить еще один луч с емкостной связью со стволом дерева и сравнить их работу, в качестве конденсатора

связи вокруг ствола намотать десяток витков мягкого алюминиевого провода от трансформатора питания лампового телевизора. Один конец провода был закреплен на окне. Из-за погодных условий не удалось поднять провод на самый верх, пришлось обернуть его вокруг ствола несколько ниже. Катушка с проводом выпала из рук и размоталась до земли. Было принято решение испытать получившуюся антенну, ведь уже готова верхняя половина большой рамки с размерами около 10×10 м! Остаток провода был проведен прямо по земле (точнее, по снегу) к окну.

Рамка принимала немного слабее, чем луч с противовесом, что и понятно, поскольку ее верхняя точка была ниже. Еще раз подтвердилась эквивалентность электрических и магнитных антенн, о которой автор писал уже давно. Но самым интересным оказался другой эффект. При обычном приеме на луч, как показано на рис. 7, настройка рамки в резонанс значительно улучшала прием. Напряжение на выходе детектора возрастало на 20...30% (с 5 до 6,5...7 В) а ток в усилителе, питаемый принятой энергией — в полтора раза (с 0,1 до 0,15 мА).

Подключать рамку куда-либо или заземлять не нужно — это только ухудшает прием. Повезло также и в том отношении, что радиостанция «Маяк» вещает с мощностью 75 кВт на частоте 549 кГц из п. Чкаловский, находящегося в 28 км к северу от места расположения приемника, а луч и рамка направлены от окна примерно на юг. Аналогичный эффект получен и при настройке на другую, хорошо слышимую станцию на частоте 846 кГц (ее мощность и расположение автору неизвестны). Простейшее объяснение эффекта таково — перед рамочной антенной ее собственное электрическое поле синфазно с проходящим и усиливает его [2]. Как раз здесь и расположена вертикальная часть лучевой антенны.

Таким образом, эксперименты привели к созданию «нового», а на самом деле «хорошо забытого старого» типа малой антенны, использующей энергию как электрической (луч), так и магнитной (рамка) компонент проходящего поля. Перекачка энергии из рамки в луч происходит также через поле — ведь луч проходит невысоко, около 1...1,5 м над верхней стороной рамки. Заметим, что при строгой симметрии антенн (рис. 6) электромагнитной связи между ними нет. При смещении же рамки в сторону от вер-

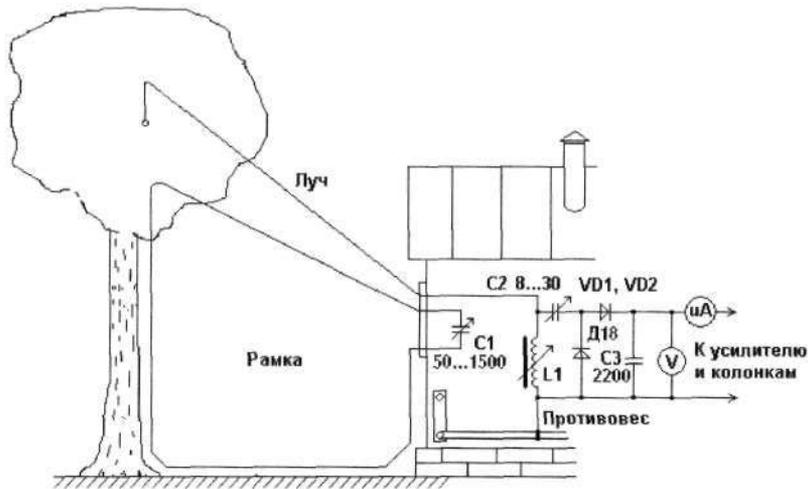


Рис. 7

тикальной части луча (рис. 7) появляется емкостная связь луча с верхней стороной рамки и индуктивная связь, поскольку часть магнитного поля снижения проходит сквозь рамку.

Необходимый фазовый сдвиг 90° получается естественным образом, как в двух связанных и настроенных на одну и ту же частоту колебательных контурах. Заметим, что объем, занимаемый в пространстве комбинированной рамочно-лучевой (РЛ) антенной, не больше, чем у луча или рамки, а КПД выше. Возможно, у нее больше прав называться Crossed Fields (CFA) или ЕН антенной, чем у малогабаритных конструкций из двух цилиндров или двух рамок.

Последующее компьютерное моделирование РЛ антенны с помощью программы MMANA полностью подтвердило эксперимент. Компьютерная модель РЛ антенны показана на рис. 8.

Длины вертикальной и наклонной части луча были выбраны по 10 м, размер рамки 8x8 м. Для настройки на среднюю частоту СВ диапазона 1 МГц потребовалась индуктивность L1 около 300 мкГн и емкость C1 около 450 пФ. Потери в катушке учитывались подбором ее добротности Q в диапазоне 30...50, потери в рамке — выбором материала и диаметра ее провода (A1 0

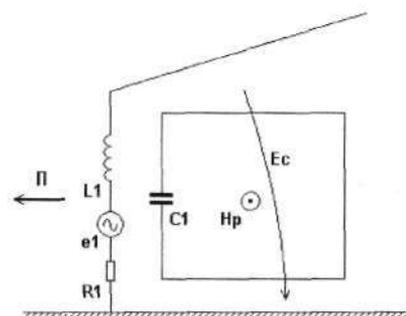


Рис. 8

0,8 мм), потери в заземлении и окружающих предметах — резистором R1 (50...200 ом). При точной настройке луча и рамки в резонанс получается близкая к кардиоидной ДН с отношением излучения вперед/назад (F/B) до 6...8 дБ. Если точку питания перенести из луча в рамку, направление излучения изменяется на противоположное, а входное сопротивление уменьшается в несколько раз при сохранении прочих особенностей.

Особенно интересно ведет себя входное сопротивление антенны в области резонанса. Активная часть значительно возрастает, в некоторых случаях в 5... 10 раз. Реактивная часть обращается в нуль трижды — на центральной частоте и при расстройках на $\pm 10...20$ кГц. Частотные характеристики входного импеданса приобретают вид, типичный для двухконтурного полосового фильтра, теория которого хорошо изложена в учебниках электро- и радиотехники, при этом полоса антенны расширяется.

Несколько слов о соотношении потерь в луче и рамке. Они должны быть примерно одинаковыми. Если взять «хороший» луч с малыми потерями (например $R1 = 0$, $Q = 300$), настройка рамки в резонанс приведет к ухудшению его работы из-за потерь в рамке. В противоположном случае «плохого» луча ($R1 > 200$ Ом, $Q < 30$) «хорошая» рамка улучшит его работу, что скажется на модели в существенном увеличении выигрыша всей антенны, но ДН станет такой же, как у рамки, т. е. с максимумом в зенит, что неблагоприятно для передачи или приема в направлении на горизонт. Реальный выигрыш от применения РЛ антенны представляется в пределах 2,5...3 дБ. Он обусловлен двумя факторами — появлением направлен-

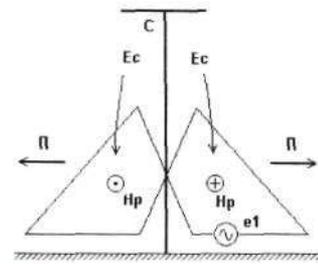


Рис. 9

ности и повышением КПД луча из-за роста его сопротивления излучения.

Описанную концепцию можно применить и к всенаправленным антеннам. В этом случае нужно несколько (3...4) рамок, расположенных симметрично относительно заземленного вертикала (рис. 9).

Рамки можно соединить как параллельно, так и последовательно. В последнем случае они образуют тороидальную обмотку, «надеют» на вертикал. Здесь тоже нет ничего нового, поскольку давно известен способ возбуждения заземленных вертикальных мачт малой тороидальной обмоткой у основания. Отличие в том, что здесь размер тора не мал, и его поле активно участвует в излучении.

Элементы настройки вертикала (индуктивность) и тора (емкость) не показаны — они такие же, как и в предыдущем случае. Эту антенну можно назвать тороидально-емкостной (ТЕ). Она может быть полезна для уменьшения потерь в недостаточно хорошей заземляющей структуре вертикала за счет роста его сопротивления излучения при настройке тора в резонанс. Известно, что для уменьшения потерь в заземлении вокруг основания вертикала закапывают до 120 радиальных проводов. Возможно, что аналогичного увеличения КПД удастся достичь значительно более дешевым способом, развесив 3...4 рамки на растяжках вертикала. ТЕ антенна нуждается в дальнейших исследованиях.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Hately M., Kabbary F. Radio Antennas. US Patent # 5 155 495.
2. В. Поляков. О ближнем поле приемной антенны. — Схемотехника, 2006, № 3, с. 35—37 и № 4, с. 38—40.
3. В. Т. Поляков. Техника радиоприема. Простые приемники АМ сигналов. — М.: ДМК Пресс, 2001.

Владимир Поляков, RA3AAE
г. Москва