

УДК 621.396.67

КОМПАКТНЫЕ ПРИЗЕМНЫЕ АНТЕННЫ ДЛЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ИЗБИРАТЕЛЬНОГО ПРИЕМА В СОСТАВЕ СИСТЕМ РАДИОМОНИТОРИНГА

Д.В. Лучин, первый заместитель директора филиала ФГУП НИИР – СОНИИР, к.т.н.; dmyl@soniir.ru

А.М. Плотников, старший научный сотрудник НИЛ 21 НО-2 филиала ФГУП НИИР – СОНИИР, к.т.н.; plotnikov.am@soniir.ru

А.П. Трофимов, старший научный сотрудник НИЛ 21 НО-2 филиала ФГУП НИИР – СОНИИР, к.т.н.; tap@soniir.ru

В.В. Юдин, начальник НИЛ 22 НО-2 филиала ФГУП НИИР – СОНИИР, д.т.н.; uvv@soniir.ru

Радиопеленгация при электрически малой измерительной базе актуальна, в частности, в диапазоне ДКМВ. Ее осуществляют на основе квазиортогональных диаграмм направленности, формируемых антенными системами, реализация которых встречает ряд проблем. Анализ этих проблем, а также возможные пути их решения посвящена данная работа.

Ключевые слова: малогабаритные антенны, приземные антенны, поляризационно-избирательный прием, разделение сигналов, пеленгация.

Введение. Для радиопеленгации требуется система диаграмм направленности (ДН), ортогональная или близкая к таковой (квазиортогональные ДН). При большой измерительной базе (при разнесении антенных элементов на значительное электрическое расстояние) квазиортогональность обеспечивается за счет большой вариации фазовых ДН. При малой базе задача решается применением антенных элементов, рассчитанных на прием разных ортогональных компонент поля (поляризационно-избирательный прием). Использование малой базы весьма актуально, в частности, в диапазоне ДКМВ.

По такому принципу строятся известные вибраторные триортогональные антенны (примером может служить ДКМВ антенна НА230/403 фирмы Rohde & Schwarz). Антенна данного класса представляет собой систему из трех вибраторов, ортогональных друг другу. Ориентация системы относительно земли и опоры может быть различной: в основном применяются два варианта — один вертикальный вибратор и два горизонтальных (наиболее распространенный вариант); три вибратора, наклоненные к земной поверхности на одинаковый угол, примерно равный $35,3^\circ$.

Наряду с триортогональными могут использоваться также биортогональные антенны. В вибраторном варианте — это пара горизонтальных вибраторов, перпендикулярных друг относительно друга. Такая система позволяет определять азимут источника радиосигнала. В диапазоне ДКМВ двух подобных систем в принципе достаточно для полного решения задачи локации — определения географических координат источника радиосигнала. Каждая из систем вычисляет азимут источника из своей точки, место локализации источника определяется как точка пересечения соответствующих ортодромий. Для повышения точности (за счет устранения эффектов девиации и т.д.) обычно используют три пеленгатора на основе биортогональных антенн (так называемые триангуляционные системы [1]).

Между тем реализация вибраторных исполнений триортогональных и биортогональных антенн применительно к задачам радиопеленгации в диапазоне ДКМВ встречает

ряд серьезных проблем, так или иначе связанных с влиянием земли.

Проблемы реализации антенных систем. Прежде всего необходимо отметить электрическую асимметрию вертикального вибратора (либо всех трех вибраторов при одинаковом их наклоне), вызванную влиянием земли и сопутствующими обстоятельствами — влиянием вертикального или близкого к нему участка фидера и т.п. Коэффициент асимметрии может быть весьма значительным (по данным [2] до 30–40%), что делает достаточно проблематичным применение вибраторной антенны не только для пеленгации, но и в качестве элемента «обычной» связанной решетки [3].

Дело в том, что при этих условиях возникает сильный антенный эффект фидера, вызванный возбуждением (при работе на передачу) одноконтурной волны в симметричном воздушном фидере, либо волны в линии, образованной землей и внешней поверхностью экрана коаксиального фидера. В результате существенным образом искажается ДН антенны — элемента решетки, но главное из-за практической невозможности учесть все параметры «третьих цепей», по которым распространяются паразитные волны, ДН становится трудно предсказуемой (практически случайной). В таких условиях сформировать ДН решетки не представляется возможным.

К другим проблемам следует отнести:

- сильное различие импедансных свойств вертикального и горизонтальных вибраторов (только в системах с вертикальным вибратором), обусловленное разным характером влияния земли;

- относительно низкую энергетическую эффективность горизонтальных вибраторов, а также вибраторов, наклоненных на угол $35,3^\circ$ к земле (из-за противофазности «зеркального изображения», к наличию которого можно в первом приближении свести влияние земли);

- смещение фазовых центров вертикального вибратора, а также вибраторов, наклоненных на угол $35,3^\circ$ к земле, вплоть до исчезновения фазовых центров (из-за асимметрии);

- относительно низкий уровень поляризационной связки в системе с вибраторами, наклоненными на угол $35,3^\circ$ к земле, обусловленный электромагнитным взаимодействием вибраторов через опору и землю, которые не являются ортогональными ни одному из них.

Все указанные проблемы, как и первая, связаны с влиянием земли и относятся к приземным антеннам. Понятно, что при установке антенны на достаточной высоте асимметрия, различия параметров вертикальных и горизонтальных вибраторов и другие нежелательные явления будут проявляться в меньшей степени. Однако строительство громозд-

ких антенно-мачтовых сооружений не отвечает современным тенденциям развития антенно-фидерной техники диапазона ДКМВ, а во многих случаях вообще неприемлемо.

Все эффекты, обусловленные различиями характеристик вибраторов и смещениями фазовых центров, важны с точки зрения пеленгации. Эффекты, вызванные ухудшением энергетики и искажением ДН, существенны при решении задач как пеленгации, так и связанных. Следует также отметить, что применение биортогональных вибраторных антенн в составе триангуляционных систем позволяет исключить первую группу нежелательных эффектов, но не решает проблему полностью, так как плохая энергетика горизонтальных вибраторов ухудшает чувствительность радиопеленгаторов.

Исследования, результаты которых представлены в [3, 4], показали, что с антенным эффектом фидеров вертикальных вибраторов, по крайней мере, на уровне решения связанных задач, можно успешно бороться посредством известных технических мер. К ним относятся:

- устройство высокочастотных (ВЧ) заземлений экранов коаксиальных фидеров под антеннами (у оснований опор);
- установка на фидеры специальных фильтров, препятствующих распространению на внешних поверхностях экранов фидеров ВЧ-токов.

Высокочастотное заземление выполняется аналогично заземлению нагрузок V-образной и Λ -образной антенн — в виде системы радиально расходящихся по земной поверхности горизонтальных проводников [2]. При этом в линии, образованной землей и внешней поверхностью экрана фидера, возникает режим, близкий к короткому замыканию с «уводом» ВЧ-токов на землю. Фильтр выполняется в виде намотки (единицы витков) коаксиального фидера на тороидальный ферритовый магнитопровод. В линии возникает режим, близкий к режиму холостого хода с обрывом одного из проводников линии.

Экспериментальные исследования. Подтверждением достаточности указанных технических мер применительно к связным задачам являются результаты натурных испытаний 16-элементной кольцевой антенной решетки (КАР) диапазона ДКМВ, проведенных в рамках разработки Самарским филиалом ФГУП НИИР линейки решеток данного класса. КАР реализована на основе вертикальных приземных вибраторов (высота установки около 5 м).

В ходе испытаний проводились измерения азимутальных ДН, испытательные сеансы связи с удаленными корреспондентами одновременно с антеннами ЗБС2 (сравнительные испытания) и т.д. Измерения ДН выполняли путем сканирования по азимуту штатными средствами КАР в процессе приема определенного корреспондента (протяженность трассы около 1000 км). Такие измерения осуществляли и до установки ВЧ-заземлителей и фильтров на фидеры. В рамках сравнительных испытаний многократно измеряли отношения сигнал/шум (ОСШ) h^2 с последующей статистической обработкой и оценкой плотности вероятности случайной величины h^2 (при приеме большого числа корреспондентов в разное время суток и в разные дни). Мощности сигнала и шума измерялись на выходе промежуточной частоты приемника, что позволяло учесть его шум.

В качестве примера на рис. 1 приведена экспериментальная азимутальная ДН, формируемая КАР на частоте около 10 МГц. Там же для сравнения штриховой линией показана соответствующая расчетная ДН (расчетный про-

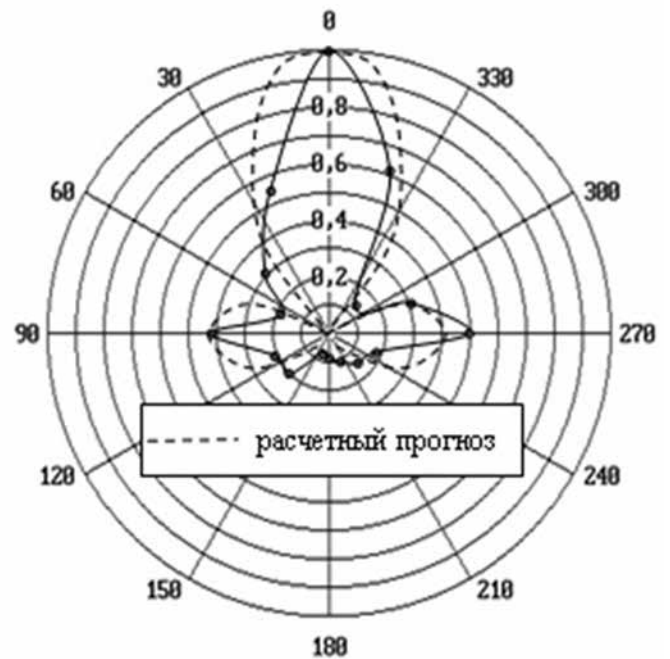


Рис. 1

гноз). На рис. 2 представлены гистограммы оценки плотности вероятности ОСШ для КАР (сплошная линия) и антенн ЗБС2. Как показали испытания, без принятия мер по подавлению антенного эффекта ДН решетки «разваливается».

Из представленных результатов видно, что предложенные и реализованные меры достаточно эффективны для связных антенн. Однако, как показали проведенные исследования (в том числе и экспериментальные), применительно к решению задач радиопеленгации их все-таки нельзя считать вполне достаточными. Поэтому наряду с рассмотренными выше причинами, следует указать специфическую особенность приземного горизонтального вибратора. Такой вибратор принимает вертикально поляризованные волны с торца, где ДН вибратора по основной поляризации имеет нуль. Это обусловлено влиянием земли, проявляющемся в появлении радиальной (сосной вибратору) компоненты вектора \vec{E} и в улучшении (по сравнению со свободным

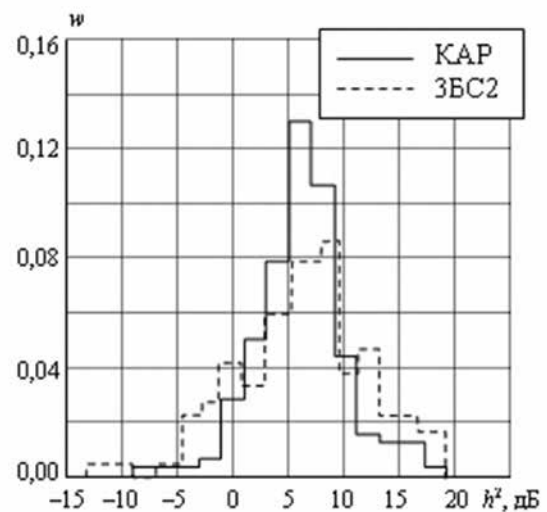


Рис. 2

пространством) условий распространения данного вида поляризации. В то же время прием основной горизонтальной поляризации, наоборот, ослаблен опять-таки из-за влияния земли, приводящего к почти противофазному сложению прямого и отраженного от земли «лучей» в точке приема.

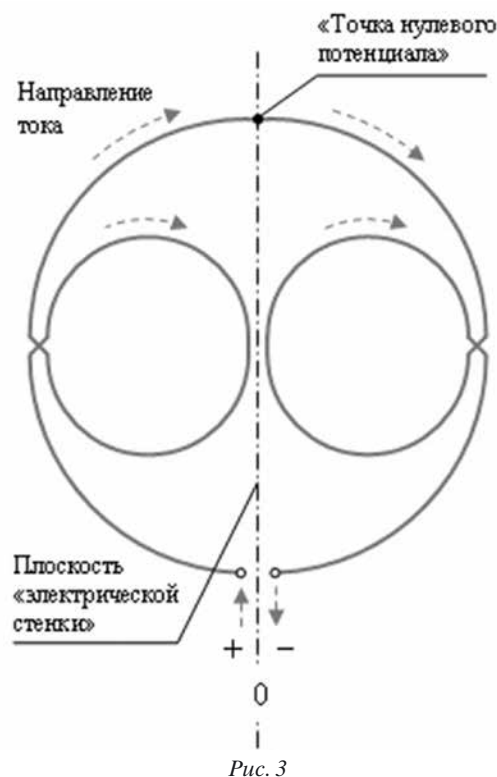
Кроме ослабления уровня принимаемого сигнала, возникает ситуация, известная в вычислительной математике как «малая разность», когда результат вычитания (т.е. сложения почти противофазных комплексных величин) существенно меньше самих величин. В этих условиях значительно возрастает чувствительность системы к влиянию различного рода факторов. Что же касается снижения уровня сигнала, то это приводит к уменьшению ОСШ и служит дополнительным фактором увеличения погрешности пеленгации.

Рамочные антенны. Существует альтернатива вибраторам. Это — рамочные антенны. На взгляд авторов, их применение позволяет в значительной степени преодолеть указанные трудности. Данный тезис подтверждается результатами исследований, проведенных в ходе работ, выполняемых филиалом ФГУП НИИР — СОНИИР.

Во-первых, одновитковая рамка (неважно вертикальная или горизонтальная) не подвержена электрической асимметрии, обусловленной влиянием земли. Это объясняется тем обстоятельством, что земля в абсолютном большинстве случаев — немагнитная среда, тогда как система электрических токов рамки, ориентированной надлежащим образом, обладает симметрией относительно земли. Кроме того, «надлежащая ориентация» относится только к вертикальной рамке (выходными клеммами либо вниз, либо вверх); горизонтальная — всегда симметрична. Данная специфическая особенность сразу снимает трудности, связанные с антенным эффектом, смещением (исчезновением) фазового центра и т.д. Она же обуславливает наличие «электрической стенки» и «точки нулевого потенциала», что существенно облегчает реализацию биортогональной рамочной системы.

Во-вторых, в рамочной триортогональной или биортогональной системе всегда имеются два элемента, находящиеся в благоприятных условиях в смысле улучшения энергетики из-за влияния земли. К ним относятся вертикальные рамки (с синфазным «зеркальным изображением»), образующие в совокупности биортогональную систему. В вибраторном варианте в аналогичных условиях находится вертикальный вибратор, т.е. только один элемент. Горизонтальные вибраторы, как уже отмечалось, пребывают в значительно худших условиях; условия для вибраторов, наклоненных на угол $35,3^\circ$ к земле, не намного лучше. Это означает, что при использовании рамочных антенн, по крайней мере, в триангуляционных системах на основе биортогональных антенн, определяющих только азимут, эффективно решаются проблемы, связанные с энергетикой.

Однако пока речь шла об одновитковых рамках. На практике из-за габаритных ограничений рамочные антенны зачастую приходится делать из нескольких витков. Для многовитковой рамки положение об электрической симметрии, строго говоря, неверно, а о наличии «электрической стенки» и «точки нулевого потенциала» — неверно в принципе. Данное допущение электрической симметрии правомерно на относительно низких частотах, где рамка с высокой точностью может рассматриваться как магнитный вибратор. Но использование только таких частот означало бы существенное ограничение рабочего диапазона сверху: он получался бы не более 1,5-кратного. Известно



[5, 6], что рамочные антенны без каких-либо особых проблем обеспечивают работу в 3-кратном и более широком диапазоне. Кроме того, результаты проведенных исследований дают определенные основания для предположений о возможности работы на частотах вплоть до первого резонанса и выше.

Но даже при таком частотном ограничении не снимается основная проблема — отсутствие «электрической стенки» и «точки нулевого потенциала», что крайне затрудняет реализацию даже биортогональной системы. Для преодоления этого предложено выполнять рамочную антенну из двух лежащих в одной плоскости и зеркально симметричных многовитковых половин, возбуждаемых противофазно по электрическому полю и, соответственно, синфазно по магнитному полю.

Схематично предложенное решение показано на рис. 3 (с указанием потенциалов и положительных направлений токов). В системе имеется «электрическая стенка», в плоскости которой может быть размещена металлическая опора. Есть и «точка нулевого потенциала», в которой возможен гальванический контакт с опорой. Все это существенным образом упрощает конструкцию. Но главное достоинство заключается в том, что в плоскости «электрической стенки» может быть размещена вторая такая же антенна (тоже с электрическим соединением и опорой в точке «нулевого потенциала»), которая будет полностью развязана с первой антенной.

В результате возникает биортогональная антенна с совмещенными фазовыми центрами, на основе которой могут строиться триангуляционные системы радиопеленгации. При этом обе рамки — вертикальные, т.е. они оптимально ориентированы по отношению к земле с точки зрения энергетики, что выгодно отличает такую антенну от аналогичных вибраторных антенн.

Отметим, что крайние полувитки на рис. 3 разведены по вертикали (с сохранением длины проводника, т.е. сопро-

тивления потерь). Благодаря этому достигается некоторое увеличение эффективной апертуры антенны, и, кроме того, улучшаются механические свойства.

Однако для построения триортогональной антенны требуется третья рамка, горизонтальная. Проблема заключается в том, что для достижения полной развязки вертикальными рамками она должна иметь две взаимно перпендикулярные плоские «электрические стенки». Система, представленная на рис. 3, эту задачу не решает. В связи с этим предложено вместо одной использовать четыре горизонтальные рамки, возбуждаемые синфазно по магнитному полю. При этом надлежащим взаимным расположением рамок можно добиться необходимой пары «электрических стенок» и, соответственно, высокого уровня развязки.

Но у такого решения есть недостаток, который заключается в трудности пространственного совмещения с вертикальными рамками, т.е. совмещения всех трех фазовых центров. К этому стоит также добавить и некоторое ухудшение энергетики вследствие использования четырех рамок вместо одной с такой же длиной проводника.

На основе этих принципов разработан, реализован и испытан опытный образец триортогональной рамочной антенны. Внешний вид антенны показан на рис. 4.

Вертикальные рамки выполнены в соответствии с рис. 3. Горизонтальные рамки подняты над вертикальными, т.е. фазовые центры триортогональной системы не совмещены. При этом имеет место совмещение фазовых центров вертикальных рамок (общий фазовый центр биортогональной подсистемы). Смещение фазового центра горизонтальных рамок учитывается алгоритмически на основе результатов компьютерного электродинамического моделирования.

В ходе испытаний осуществлялась пеленгация источников радиоизлучений во всем диапазоне ДКМВ. Источники

располагались в различных азимутальных направлениях и на разной высоте. В результате получена экспериментальная оценка среднеквадратического отклонения (СКО) пеленга (по азимуту и углу места), составившая 0,8–1,8°. Поскольку испытания проводились в «малозумном» районе, удаленном от промышленных центров, то при измерениях обеспечивались достаточно высокие значения отношения сигнал/шум (30 дБ и более). Поэтому данный показатель как фактор погрешности пеленгации можно исключить. Следовательно, приведенная оценка СКО относится к инструментальной погрешности радиопеленгации.

Следует отметить еще одну специфическую особенность рамочных антенн. Она заключается в том, что рамка имеет значительно более равномерную (по сравнению с вибратором) частотную характеристику эквивалентной апертуры — отношения мощности сигнала на входе приемника к плотности потока энергии сигнала в точке приема (в терминах метрологии это — калибровочный коэффициент по мощности). В соответствии с определением эквивалентная апертура антенны $S_{\text{экв}}$, м² связана с ее эффективной апертурой $S_{\text{эфф}} = D\lambda^2/(4\pi)$ (D — коэффициент направленного действия; λ — длина волны, м) равенством [7, 8]:

$$S_{\text{экв}} = S_{\text{эфф}}\eta a,$$

где $\eta = R_{\Sigma}/\text{Re}(Z_a)$ — коэффициент полезного действия антенны; R_{Σ} , Z_a — соответственно сопротивление излучения антенны и ее входной импеданс, Ом;

$$a = \frac{4 \text{Re}(Z_a)\text{Re}(Z_n)}{[\text{Re}(Z_a) + \text{Re}(Z_n)]^2 + [\text{Im}(Z_a) + \text{Im}(Z_n)]^2}$$

— коэффициент рассогласования (отношение мощности в нагрузке к максимальной мощности, которую данная антенна отдавала бы в согласованную нагрузку); Z_n — импеданс нагрузки, Ом.

Равномерность частотной характеристики $S_{\text{экв}}$ представляет интерес, в частности, при работе со сверхширокополосными цифровыми приемниками, осуществляющими оцифровку сигналов в очень широкой полосе с последующей обработкой (в том числе, частотной селекцией) уже в цифровом виде [9]. Дело в том, что при использовании таких приемников большая вариация по частоте $S_{\text{экв}}$ может значительно ухудшить динамические свойства радиосистемы.

Динамический диапазон приемной радиосистемы, включающей антенну, корректнее определять не по мощности на входе приемника (как это принято), а по плотности потока энергии, поскольку вход приемника является внутренней точкой системы. Если полоса преселектора относительно узкая, так что в ее пределах изменение $S_{\text{экв}}$ мало, способ определения динамического диапазона не имеет значения. Но если данная полоса достаточно широкая ($S_{\text{экв}}$ изменяется в значительной степени) возникает совсем иная ситуация. При этих условиях, определяя динамический диапазон, скажем, по блокированию, и ориентируясь при этом на наихудший случай, следует предполагать, что сигнал принимается на частоте, где величина $S_{\text{экв}}$ минимальна ($S_{\text{экв}} = S_{\text{min}}$), а блокирующая помеха — на частоте, где $S_{\text{экв}}$ максимальна ($S_{\text{экв}} = S_{\text{max}}$). Понятно, что при таком подходе динамический диапазон системы будет в $S_{\text{max}}/S_{\text{min}}$ раз меньше динамического диапазона приемника (в разгах по мощности, либо на $10\lg[S_{\text{max}}/S_{\text{min}}]$ дБ в логарифмическом масштабе). Следовательно, чем равномернее частотная характеристика $S_{\text{экв}}$, тем меньше отношение $S_{\text{max}}/S_{\text{min}}$ и тем меньше степень уменьшения динамического диапазона системы.



Рис. 4

В качестве иллюстрации заметим, что у изотропной согласованной антенны без потерь ($S_{\text{эkv}} = S_{\text{эфф}} = \lambda^2/4\pi$) в диапазоне 3...30 МГц эквивалентная апертура изменяется в 100 раз (на 20 дБ), а в диапазоне 1,5...30 МГц — в 400 раз (на 26 дБ).

Теоретические исследования показали, что рамочные антенны способны обеспечить весьма незначительную неравномерность частотной характеристики эквивалентной апертуры, порядка $\pm 1,5...2$ дБ, в 3-кратном диапазоне. Это говорит о возможности вести прием, например, в диапазоне 5...15 МГц практически без ухудшения динамических свойств радиосистемы.

Заключение. На основании проведенных исследований можно констатировать, что имеющиеся достаточно серьезные проблемы реализации антенных систем для радиопеленгации при малой электрической измерительной базе, хотя и не полностью, но в значительной степени решаются применением биортогональных и триортогональных рамочных антенн.

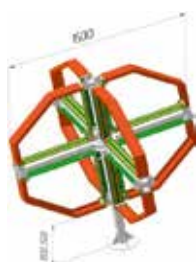
ЛИТЕРАТУРА

1. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. Радиомониторинг: задачи, методы, средства / Под ред. А.М. Рембовского. — М.: Горячая линия — Телеком, 2006. — 492 с.
2. Лавров Г.А., Князев А.С. Приземные и подземные антенны. — М.: Советское радио, 1965. — 472 с.
3. Трофимов А.П. Влияние антенного эффекта на характеристики направленности приземных кольцевых антенных решеток ДКМВ диапазона / XX Российская научная конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов ПГУТИ. Материалы конференции. — Самара, 2013. — С. 183.
4. Капишев А.Н., Скоробогатов Е.Г., Трофимов А.П. Способы устранения влияния антенного эффекта в элементах приземных антенных решеток // XX Российская научная конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов ПГУТИ. Материалы конференции. — Самара, 2013. — С. 184–185.
5. Barrick D.E. Miniloop antenna operation and equivalent circuit // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. — 1 January 1986. — Vol. AP-34.
6. Boswell A., Tyler A.J., White A. Performance of a small loop antenna in the 3–10 MHz band // IEEE Antennas and Propagation Magazine. — April 2005. — Vol. 27.
7. Лучин Д.В., Скоробогатов Е.Г., Юдин В.В. Особенности физических механизмов энергообмена в электрически малых вибраторных активных антеннах с высокоомными усилителями // Труды НИИР. — 2012. — № 3. — С. 24–33.
8. Плотников А.М., Трофимов А.П., Юдин В.В. Оценивание энергетической эффективности приемных активных антенн на основе сопоставления с пассивной согласованной антенной без потерь с учетом шума приемника // Труды НИИР. — 2014. — № 2. — С. 34–41.
9. Лучин Д.В., Юдин В.В. Конвергенция антенной и программно-аппаратной компонент как тенденция развития радиосистем диапазонов ВЧ, ОВЧ и УВЧ // Труды НИИР. — 2014. — № 3 — С. 18–25.

Получено 15.07.15



ПРИЕМНЫЕ МАЛОГАБАРИТНЫЕ РАМОЧНЫЕ АНТЕННЫ ДКМВ-ДИАПАЗОНА АПМ-РВ2 И АПМ-Р3

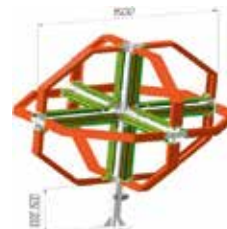


АПМ-РВ2

Антенна на базе двух вертикальных рамок обеспечивает малую неравномерность эквивалентной апертуры и расширение динамического диапазона при работе в составе с МШУ, а также со сверхширокополосными цифровыми приемниками. Обеспечивает работу как с удаленными корреспондентами при малых углах места, так и на трассах зенитного излучения. АПМ-РВ2 гарантирует надежное подавление антенного эффекта приема на кабель.

АПМ-Р3

Рамочная триортогональная антенна, как и АПМ-РВ2, может поставляться со встроенным МШУ.



Основные характеристики АПМ-РВ2 и АПМ-РВ3

| | |
|---|--------------------|
| Диапазон рабочих частот, МГц | 1,5–30 |
| Габаритные размеры на площадке (ВхДхШ)..... | 3000x1500x1500 |
| Номинальное выходное сопротивление, Ом | 50/75 |
| Динамический диапазон (с МШУ), дБ..... | 100 |
| Коэффициент усиления МШУ, не менее, дБ | 10 |
| Уровень выходного шума (с МШУ), не более, мкВ.... | 0,3 (полоса 9 кГц) |
| Потребляемая мощность (с МШУ), не более, Вт: | |
| для АПМ-Р2..... | 20 |
| для АПМ-Р3..... | 30 |

Антенны АПМ-РВ2 и АПМ-РВ3 рассчитаны на эксплуатацию во II ветровом и I гололедном районах по СНиП 2.01.07-85 при температуре окружающей среды от -50 до $+50^\circ\text{C}$ и атмосферных конденсированных осадках (иней, роса).

Филиал ФГУП НИИР – СониИР

443011, Самара, ул. Советской Армии, д. 217. Тел./Факс: +7 (846) 926-07-39, +7 (846) 926-15-11. www.soniir.ru; info@soniir.ru