

УДК 539.143.539.183

В. Е. Пониматкин, А. А. Кужелев, А. А. Шпилевой

ПРИЕМНАЯ АНТЕННАЯ СИСТЕМА ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА

30

Разрабатываются структура и функциональные узлы приемной антенной системы коротковолнового диапазона для использования на подвижных объектах. Определены пути решения проблемы улучшения диапазонных свойств, повышения чувствительности радиоприема и обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств, расположенных ограниченном объеме подвижного объекта и интеграции антенны в элементы корпуса.

The article describes the development of the structure and functional nodes of the receiving antenna of the short-wave range for moving objects. The authors define the ways to solve the problem of improving the range properties, increasing the sensitivity of the radio reception and ensuring the electromagnetic compatibility of radio electronic means located within limited space of the mobile object and integrating the antenna into the object's housing elements.

Ключевые слова: антенная система, диаграмма направленности, несимметричный вибратор, электромагнитная совместимость, фазированная антенная решетка.

Keywords: antenna system, radiation pattern, asymmetrical vibrator, electromagnetic compatibility, phased array antenna.

На подвижных транспортных средствах, в том числе на морских судах, в качестве приемных систем коротковолнового (КВ) диапазона преимущественно используются штыревые антенны с относительно низкими рабочими характеристиками [1–3], что приводит к следующим недостаткам:

– неравномерность согласования антенны с фидером на некоторых участках рабочих частот, в связи с чем требования по согласованию (коэффициент бегущей волны – КБВ от 0,2 до 0,4) не обеспечиваются, КПД систем очень низкий;

– низкие массогабаритные характеристики (МГХ) штыревых антенно-фидерных устройств (АФУ);

– сложность в выполнении требований электромагнитной совместимости (ЭМС) – непреднамеренные помехи в виде паразитных наводок на приемные АФУ от первичных и вторичных источников электромагнитного излучения.

Несимметричный вибратор (штырь), как приемный, так и передающий, занимает малую площадь при размещении, поэтому повсемест-



но используется на транспортных средствах [4]. На рисунке 1 представлена физическая модель классического несимметричного вибратора, расположенного вдоль оси X . Вариант (а) имеет приемную часть 1 в виде проводящего прямолинейного проводника, соединенного через коаксиальный кабель 2 с входом радиоприемного устройства 3, и размещенного на изоляторе 4, закрепленного на корпусе транспортного средства. Данный вариант (а) применяется для рабочих частот КВ-диапазона в пределах от 5 до 30 МГц.

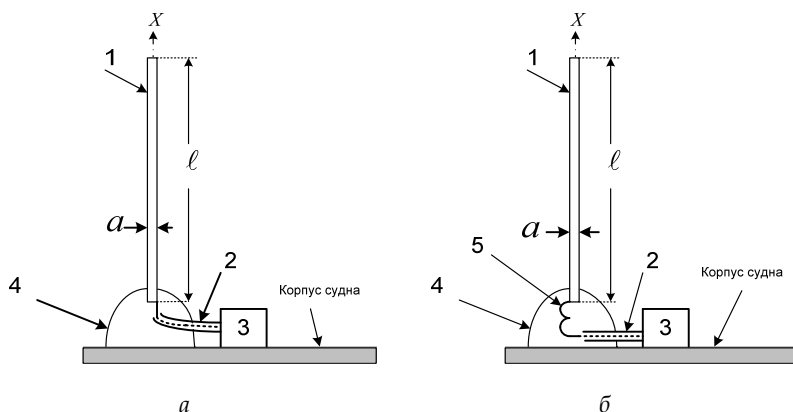


Рис. 1. Несимметричный вибратор в качестве приемной антенны

Вариант (б) позволяет расширить диапазон рабочих частот в нижнюю часть спектра в низкочастотную область до 100 кГц и отличается от предыдущего варианта тем, что дополнительно между приемной частью 1 и коаксиальным кабелем 2 включена индуктивность 5, которая обеспечивает удлинение антенны.

Длина вибратора ℓ оказывает существенное влияние на приемные свойства штыря. Резонансная частота f_0 или частота настройки $f_{\text{НАС}} = f_0$ антенны связана с резонансной длиной волны λ_0 и длиной вибратора следующими соотношениями:

$$4\ell = \lambda_0, \quad f_0 = C/\lambda_0,$$

где C — скорость света ($3 \cdot 10^8$ м/с). Режим работы с параметрами

$$4\ell = \lambda_0, \quad f_0 = C/\lambda_0$$

называется режимом *собственной длины волны*. Коэффициент перекрытия диапазона частот для передающего штыря равен 1,2. Поэтому передающий несимметричный вибратор работает в узкой полосе частот. Например, передающий штырь для работы в режиме собственной длины волны или в диапазоне близком к данному режиму при длине:

$\ell = 4$ м настраивается на частоты от 17 до 24 МГц;

$\ell = 5$ м — на частоты от 13 до 17 МГц;

$\ell = 7$ м — на частоты от 9 до 12 МГц;

$\ell = 8$ м — на частоты от 7,5 до 10 МГц;

$\ell = 10$ м — на частоты от 5 до 8 МГц.



Так как КПД приемной антенны может быть много ниже КПД передающей антенны, коэффициент перекрытия по диапазону использования частот может достигать 5–7. Исходя из этого, 6-метровый приемный штырь, выполненный по варианту (а), используется в диапазоне от 5 до 30 МГц; выполненный по варианту (б) с индуктивной нагрузкой 5 – в диапазоне от 100 кГц до 5 МГц. В конструкциях, как правило, установлен переключатель для включения и выключения индуктивной нагрузки.

Стандартная приемная антенна типа АПС-6 представляет собой вертикальный конусообразный стеклопластиковый 6-метровый штырь, внутри которого по центру проходит бронзовый многожильный провод. Штырь закреплен в изоляторе, выполненном из стеклопластика. Штырь соединен через согласующее устройство коаксиальным кабелем с радиоприемным устройством. Согласующее устройство представляет собой удлинительную катушку или индуктивную нагрузку [1]. В условиях малоразмерных транспортных средств, в том числе судов, используют малогабаритные активные приемные антенны: штыревая антенна высотой 1 м, с подключением усилителя непосредственно к штырю. Примером может служить приемная активная антенна типа STA 10A 2440/0,01-30 [1].

Рассмотренные варианты типовых конструкций допускают возможность внесения технических изменений, позволяющих оптимизировать диапазонные свойства и размеры, с целью улучшения эксплуатационных характеристик антенной системы.

Анализ выражений соотношений горизонтальной и вертикальной составляющими в воздушной и морской среде позволяет сделать следующие выводы в отношении структуры поля на границе раздела двух сред «воздух – вода» [2].

1. В воздухе амплитуда вертикальной составляющей поля E_{m1z} больше горизонтальной E_{m1x} в $\sqrt[4]{(\epsilon'_2)^2 + (60\sigma_2\lambda)^2}$ раз. В воде, наоборот, горизонтальная составляющая E_{m2x} во столько же раз больше вертикальной E_{m2z} . Для морской воды эта разница может составлять от 49 до 155 раз в КВ-диапазоне в зависимости от длины волны. Следовательно, в морской среде (под водой) целесообразно вести прием на антенну с горизонтальной поляризацией.

2. Горизонтальные составляющие E_{m1x} , E_{m2x} тем больше, чем короче длина волны, меньше относительная диэлектрическая проницаемость и проводимость подстилающей поверхности.

3. На границе раздела существует фазовый сдвиг между \vec{E}_{1x} и \vec{E}_{1z} , равный $\alpha/2$, и такой же сдвиг (с противоположным знаком) – между \vec{E}_{2x} и \vec{E}_{2z} .

4. За счет неравенства составляющих и сдвига по фазе на угол $\alpha/2$ возникает эллиптическая поляризация волны в направлении распространения. Вектор электрического поля за период высокочастотного колебания описывает своим концом эллипс, лежащий в плоскости распространения волны.



В реальной ионосфере происходят непрерывные изменения физических параметров, поэтому большая ось эллипса поляризации имеет случайное положение в произвольный момент времени. Это приводит в итоге к флуктуации результирующего поля — поляризационным замираниям в случае приема на линейную антенну. Для борьбы с поляризационными замираниями необходимо использовать антенны с круговой поляризацией или две взаимно перпендикулярные линейные антенны, однако такие антенны в условиях ограниченного пространства не используются.

Одним из эффективных методов борьбы с искажениями сигналов радиосвязи, вызванными замираниями в диапазоне КВ, является разнесенный прием. По мере увеличения разнесения приема в пространстве, по частоте, по времени, по углу прихода радиоволн, по поляризации степень корреляции между разнесенными каналами приема будет ослабевать, и при определенном разнесении флуктуации (замирания) поля в этих каналах станут независимыми. Тогда, если вероятность искажений сигналов в одном из независимых каналов равна S_1 , то при использовании n таких разнесенных каналов приема она будет равна $S_n = S_1^n$. С учетом того что $S_1 < 0$, при возрастании n величина S_n будет уменьшаться, а вероятность неискаженного приема $P_n = 1 - S_n$ увеличиваться. Разнесенный прием в настоящее время используется на береговых приемных центрах. На судах этот метод сложно реализуем и в условиях ограниченности пространства не применяется. Так, пространственный разнос затруднен из-за ограниченности количества приемных антенн и места их размещения, разнос по частоте или времени влечет за собой серьезные изменения в организационно-техническом обеспечении связи корреспондентов, разнос по углу прихода радиоволн возможен только с использованием узконаправленных антенн (например, многолепестковых фазированных антенных решеток — ФАР). Поляризационная корреляция замираний может быть сведена к минимуму, если прием осуществлять на горизонтальную и вертикальную антенны. Это возможно на основании одновременного использования вертикальных и горизонтальных несимметричных вибраторов, а также на основе построения антенной системы в виде ФАР [5].

С этой целью в базовую конструкцию предлагается ввести N групп приемных антенн, каждая из которых содержит три секции горизонтальных и вертикальных коаксиальных вибраторов, опорный генератор, N фазовых детекторов, N фазовращателей, N сборительных линий.

Рисунок 2 поясняет работу коаксиального кабеля при воздействии на него падающей электромагнитной волны. Введенные обозначения:

6 — экранирующая оболочка коаксиального кабеля;

7 — центральная жила коаксиального кабеля;

$I_{об}$ — наведенный ток в экранирующей оболочке, возбуждаемый энергией падающей электромагнитной волны. Очевидно, что $I_{цен. жилы} = 0$ — наведенного тока в центральной жиле нет за счет экранирования электромагнитного поля экранирующей оболочкой.

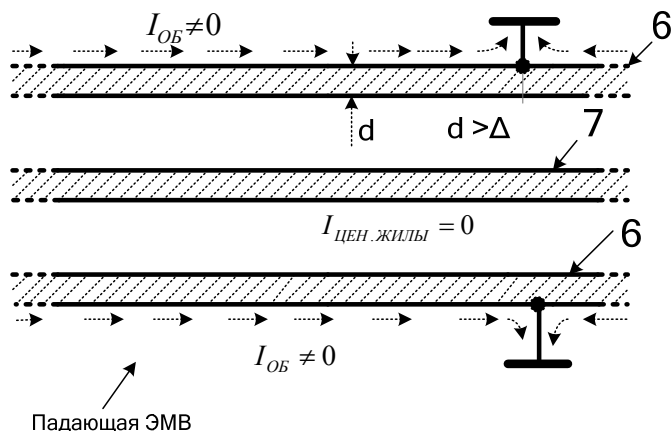


Рис. 2. Принцип действия коаксиального кабеля при воздействии на него падающей электромагнитной волны (ЭМВ)

На рисунке 3 поясняется принцип действия коаксиального кабеля с секционированной разрезной экранной оболочкой при воздействии на него падающей электромагнитной волны. Введены следующие обозначения:

6 – разрезанная на секции экранирующая оболочка (секционированная экранная оболочка) коаксиального кабеля;

7 – центральная жила коаксиального кабеля;

I_{OB} – наведенный ток в секциях экранной оболочки, возбуждаемый энергией падающей электромагнитной волны. В данном случае $I_{ЦЕН. ЖИЛЫ} \neq 0$ – наведенный ток в центральной жиле за счет тока по внутренней поверхности экранной оболочки возбуждаемый энергией падающей электромагнитной волны. Толщина экранной оболочки коаксиального кабеля больше скин-слоя ($d > \Delta$),

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}},$$

где μ – магнитная проницаемость металла, σ – проводимость металла, f – наименьшая частота диапазона принимаемых частот (100 кГц);

l – длина секционированной разрезной экранной оболочки кабеля.

Данный вариант коаксиального кабеля отличается от случая, представленного на рисунке 2, наличием разрезов секционированной экранной оболочки. Длина секции определяется диапазоном рабочих частот приемной антенны. В этом варианте падающая электромагнитная волна (ЭМВ) возбуждает поверхностные токи I_{OB} в каждой секции. Цепь разряда поверхностным токам I_{OB} через внутреннюю поверхность каждой секции. Ток, протекаемый по внутренней поверхности экранной оболочки коаксиального кабеля, возбуждает ток $I_{ЦЕН. ЖИЛЫ}$ в центральной жиле кабеля. Таким образом, коаксиальный кабель с секционированной разрезной экранной оболочкой можно использовать в качестве приемной антенны. Причем использование подобных антенн в



коротковолновом диапазоне создаст режим фильтрации спектру ультракоротких волн. Большое значение для радиоприема имеет сечение коаксиального кабеля: чем толще кабель, тем больше коэффициент укорочения принимаемой длины волны. Таким образом, экранная оболочка в присутствии центральной жилы создаст условия увеличения диапазонных свойств антенн, выполненных на основе коаксиальных кабелей.

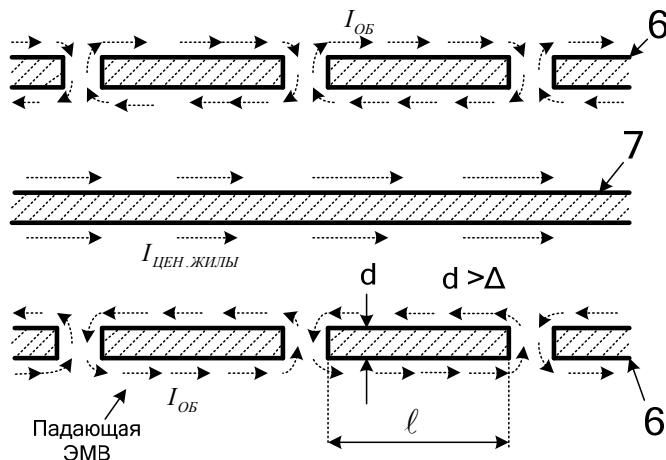


Рис. 3. Коаксиальный кабель с секционированной разрезной экранной оболочкой при воздействии на него падающей электромагнитной волны

На рисунке 4 представлена предлагаемая структура формирования антенных групп. Обозначения на рисунке:

8_1^1 — один из N корпусов крепления горизонтальных и вертикальных коаксиальных вибраторов приемной антенной системы (по три в каждой группе);

9_1^1 — одна из N групп горизонтальных вибраторов из коаксиального кабеля с секционированной разрезной экранной оболочкой (по три вибратора в каждой группе);

10_1^1 — одна из N групп вертикальных вибраторов из коаксиального кабеля с секционированной разрезной экранной оболочкой (по три вибратора в каждой группе);

11_1^1 — один из N корпусов крепления вертикальных вибраторов приемной антенной системы к корпусу транспортного средства;

12 — многожильный кабель из N проводников;

13 — корпус транспортного средства;

a_N — N клемм соединения с N проводниками в многожильном кабеле 12. При этом каждая группа из трех секций соединена с одним проводником кабеля 12; например, первая группа содержит три секции горизонтально-вертикальных вибраторов.

Каждая антенная группа состоит из трех секций приемных антенн и соответствует дипольному источнику ввиду их малых размеров. Поэтому три секции в каждой группе работают как одна. Наведенная ЭДС в горизонтальном и вертикальном вибраторах каждой секции представляет собой результат воздействия горизонтальной и вертикальной составляющих разложения эллиптически поляризованной падающей электромагнитной волны [6]. Использование на приеме двух поляризаций увеличивает наведенную ЭДС и исключает поляризационные замирания ионосферных сигналов [7].

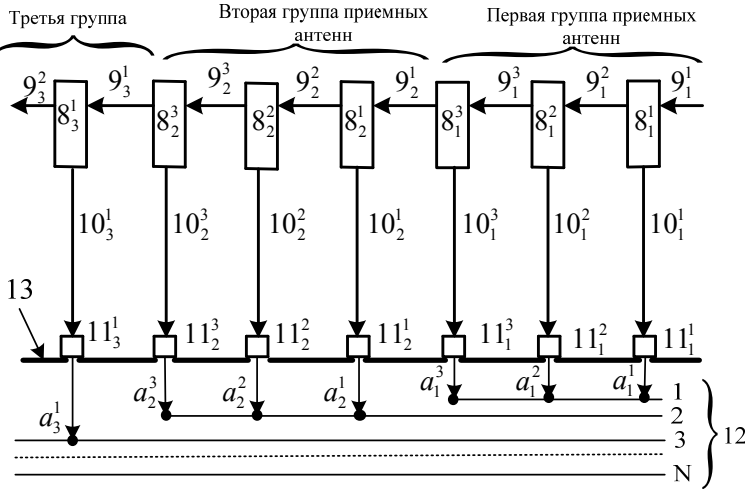


Рис. 4. Антенные группы приемной антенной системы

На рисунке 5 представлена схема первой секции первой группы судовой приемной антенной системы. Обозначения на схеме:

- 8_0 – корпус крепления горизонтального вибратора;
- 8_N – стеклопластиковый корпус крепления в верхней части приемной антенной системы;
- 10_1^1 – вертикальный вибратор из коаксиального кабеля с секционированной разрезной экранной оболочкой первой секции;
- $R_{\text{НАГ}}$ – высокоомное сопротивление нагрузки первой секции горизонтально-вертикальной приемной антенны;
- 11_1^1 – корпус крепления вертикального вибратора приемной антенны к корпусу судна, судна 13;
- 12 – многожильный кабель;
- 13 – корпус транспортного средства;
- $I_{\text{Об}}$ – наведенный ток в секциях экранной оболочки возбуждаемый энергией падающей электромагнитной волны и циркулирующий по внешней и внутренней поверхности секционированного, разрезного экрана коаксиального антенного вибратора;
- $I_{\text{ЦЕН.ЖИЛЫ}}$ – наведенный ток в центральной жиле за счет тока $I_{\text{Об}}$ по внутренней поверхности секционированной экранной оболочки, возбуждаемый энергией падающей электромагнитной волны.

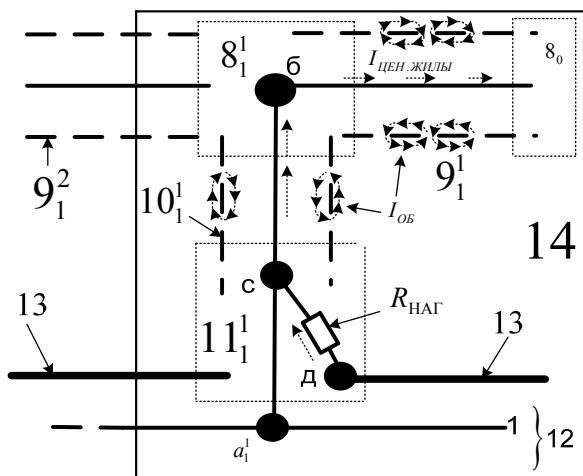


Рис. 5. Первая секция первой группы судовой приемной антенной системы

На рисунке 6 представлена общая структурная схема приемной антенной системы:

- 14 – идентичные секции горизонтально-вертикальных вибраторов в каждой группе приемных антенн;
- 15 – опорный генератор;
- 16₁, 16₂, ..., 16_N – один из фазовых детекторов в каждой группе приемных антенн;
- 17₁, 17₂, ..., 17_N – один из фазовращателей в каждой группе приемных антенн;
- 18 – сумматор;
- 3 – радиоприемное устройство.

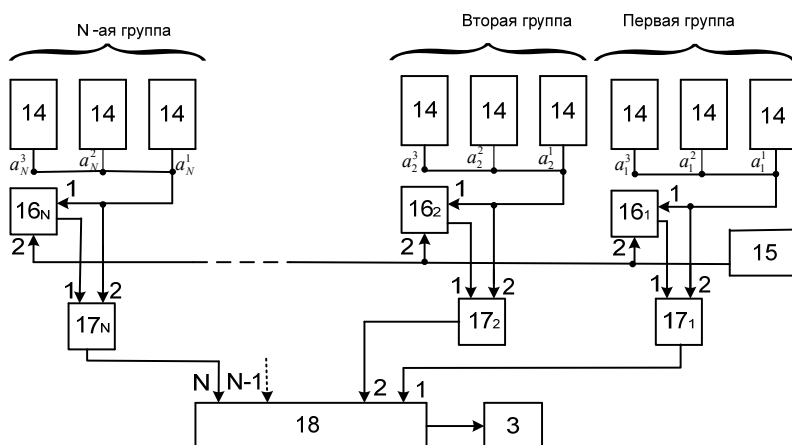


Рис. 6. Структурная схема приемной антенной системы



Построение антенных групп данным способом позволит обеспечить прием сигналов в диапазоне частот от 100 кГц до 30 МГц при наименьшей длине волны $\lambda_0 = 10$ м. Наилучший режим работы антенны реализуется при ее длине $l_{\text{антенны}} = \lambda_0 / 4$ (2,5 м). Синфазность приема достигается построением групп в пределах заданных размеров для самой верхней частоты диапазона. Следовательно, предельные размеры групп антенных устройств могут быть больше размера 2,5 м. Применительно к антенной группе, интегрированной в корпус судна, выбирается леерная система ограждения обслуживающего персонала верхнепалубных устройств. Размеры леерных устройств в пределах: вертикальные стойки высотой от 1,2 до 1,5 м; горизонтальный трос между стойками — от 0,7 до 1 м. На основании этого целесообразно выбрать следующие размеры антенных групп: высота вертикального вибратора в виде коаксиального кабеля с секционированной разрезной экранированной оболочкой (см. рис. 3) — 1,2 м; длина горизонтального вибратора в виде коаксиального кабеля с секционированной разрезной экранированной оболочкой — 0,8 м.

Предложенная антенная система позволит:

- реализовать диаграмму направленности, постоянную в направлении береговой радиостанции независимо от маневра транспортного средства;
- интегрировать антенную систему в корпус подвижного средства, например, в условиях судна использовать антенную систему вместо леерного ограждения;
- увеличить чувствительность радиоприема за счет совместного использования горизонтальных и вертикальных вибраторов в каждой секции;
- повысить надежность и достоверность радиоприема одновременным приемом вертикальной и горизонтальной составляющих электромагнитного поля падающей волны.

Список литературы

1. *Вершков М. В., Миротворский О. Б.* Судовые антенны. Л., 1990.
2. *Виниченко А. И.* Теория тракта распространения радиоволн линий радиосвязи. Л., 1984.
3. *Гончаренко И. В.* Антенны КВ и УКВ. М., 2005. Ч. 2 : Основы и практика.
4. *Пистолькорс А. А.* Антенны. М., 1947.
5. *Патент №167704 по заявке №2016107852 от 03.03.2016г. (H01Q 21/06).*
6. *Пониматкин В. Е., Шпилевой А. А., Кужелев А. А., Типикин А. А.* Антенный модуль коротковолнового диапазона // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2015. Вып. 4. С. 74—81.
7. *Balanis C. A.* Modern antenna handbook. N. Y., 2008.

Об авторах

Виктор Ефимович Пониматкин — канд. техн. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: VPonimatkin@kantiana.ru



Александр Александрович Кужелев — канд. техн. наук, преп., филиал ВУНЦ
ВМФ «ВМА», Россия.

E-mail: alkuzh007@yandex.ru

Андрей Алексеевич Шpileвой — канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский
федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: AShpilevoi@kantiana.ru

The authors

Dr Viktor Ponimatkin, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal Uni-
versity, Russia.

E-mail: VPonimatkin@kantiana.ru

Dr Aleksandr Kuzelev, lecturer, MESC MMF «VMF», Russia.

E-mail: alkuzh007@yandex.ru

Dr Andrey Shpilevoy, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal Uni-
versity, Russia.

E-mail: AShpilevoi@kantiana.ru