

**В. Е. Пониматкин, А. А. Шпилевой
А. А. Кужелев, В. Л. Евстратов**

ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩАЯ АНТЕННАЯ СИСТЕМА ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА

Разрабатываются структура и функциональные узлы приемно-передающей антенной системы коротковолнового диапазона с управляемой диаграммой направленности. Определены пути решения проблемы электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств, расположенных в ограниченном объеме на поверхности подвижного объекта и интеграции антенны в плоские поверхности корпуса.

The article is devoted to the development of the structure and functional nodes of a short-wave range of a transmit-receive antenna with a controlled radiation pattern. The ways of solving the problem of electromagnetic compatibility of radio electronic means located in a limited volume on the surface of the mobile object and integrating the antenna into the flat surfaces of the hull are determined.

Ключевые слова: антенная система, диаграмма направленности, взаимное сопротивление, электромагнитная обстановка, фазированная антенная решетка.

Key words: antenna system, radiation pattern, mutual resistance, electromagnetic environment, phased array antenna.

Целью разработки стало создание фазированной антенной решетки с управляемой диаграммой направленности, предназначенной для размещения на плоской поверхности подвижного объекта, например судна, и обладающей пониженным влиянием на электромагнитную обстановку (ЭМО) в режиме передачи. В работе [1] предложена судовая передающая антенная система, которая не в полной мере реализует возможность управления диаграммой направленности антенной решетки.

Функциональная схема приемно-передающей антенной системы с управляемой диаграммой направленности представлена на рисунке 1.

Антенная система содержит: высокочастотный генератор 3; усилитель мощности 4; согласующее устройство антенной системы 5; фидерные линии 6; N широкополосных усилителей $7_1, 7_2, \dots, 7_{N-1}, 7_N$; опорный генератор 8; сумматор на N входов 9; приемное устройство 10; N фазовых детекторов $11_1, 11_2, \dots, 11_{N-1}, 11_N$; N фазовращателей $12_1, 12_2, \dots, 12_{N-1}, 12_N$; расположенные внутри корпуса судна 2; N плоских модулей $1_1, 1_2, 1_3, 1_4, \dots, 1_{N-1}, 1_N$, расположенные на плоской поверхности корпуса судна 2 [2].

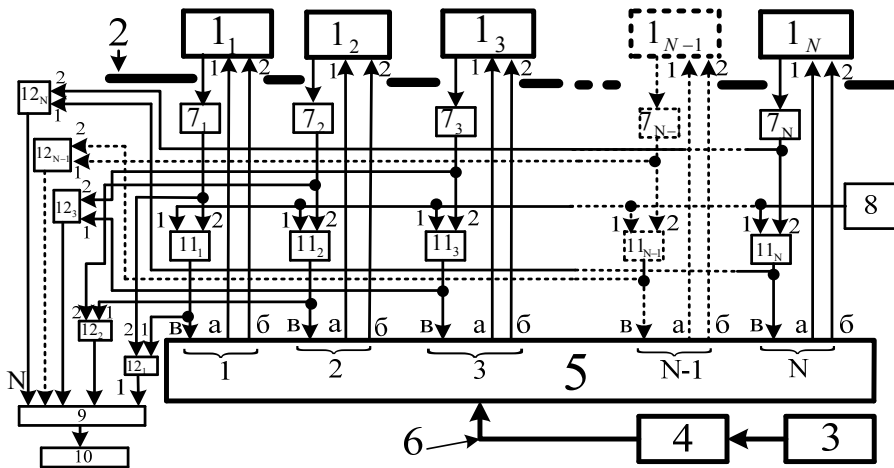


Рис. 1. Приемно-передающая антенная система с управляемой диаграммой направленности

На рисунке 2 дано согласующее устройство антенной системы 5, содержащее: согласующий трансформатор $Tr. 1$ с одной первичной обмоткой I и N вторичными обмотками II с 1 по N , разделенных на две секции; каждая вторичная обмотка образует собственный канал, соединенный с двумя выходами согласующего устройства 5 «а» и «б» и один — со входом «в» в виде фидерных линий; N фазовращателей $12_{свi}$ с 1 по N в каждой вторичной обмотке трансформатора $Tr. 1$.

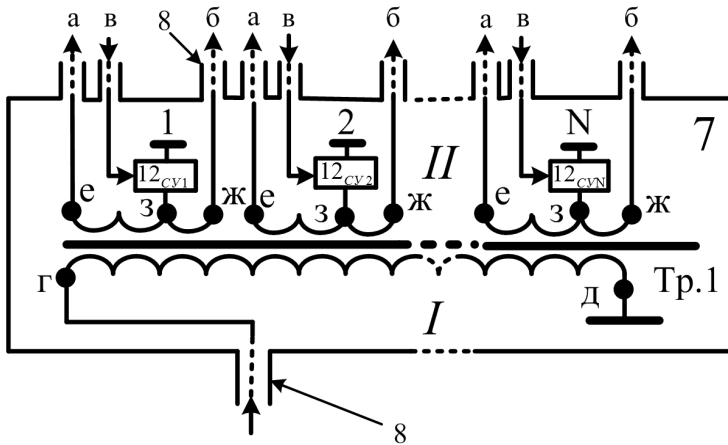


Рис. 2. Согласующее устройство антенной системы

На рисунке 3 — сечение одного из N приемно-передающего антенного плоского модуля 1_N , где: 2 — поверхность корпуса подвижного объекта; 6 — фидерные линии; 13 — проволочный излучатель плоского модуля 1_N ; 14 — нагрузочное сопротивление; 15 — плоский металлический экран для проволочного излучателя 13 плоского модуля 1_N ; 16 —



проволочная приемная антенна плоского модуля 1_N ; 17 – нагрузочное сопротивление приемной антенны 16; 18 – плоский металлический экран приемной антенны 16 плоского модуля 1_N ; область «Б» – изолятор. Над каждым из элементов проволочных приемной антенны и излучателя плоского модуля 1_N , в области «А» размещен поглотитель электромагнитного поля, расположенный за и между проволочными элементами 13 и 16 плоского модуля 1_N ; $I_{изл}$ – суммарный ток излучателя плоского модуля 1_N , $I_{ЭКР}$ – ток плоского экрана [2].

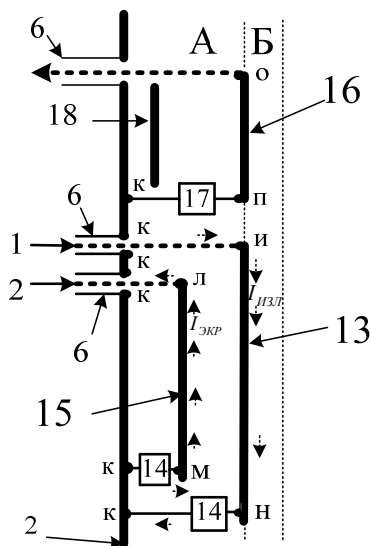


Рис. 3. Приемо-передающий антенный плоский модуль

На рисунке 4 – приемная антенна и проволочный излучатель плоского модуля 1_N (одного из N), где: 13 – проволочный излучатель; 16 – проволочная приемная антенна; $\ell_{изл}$ – длина проволочного излучателя 13; $\ell_{ш}$ – ширина проволочного излучателя 13. Проволочный излучатель 13 выполнен в виде сетки из N вертикальных проводников соединенных в верхней и нижней частях излучателя. $\ell_{пр}$, $\ell_{ш}$ – длина и ширина приемной антенны 16 соответственно. Область «А» между проводниками и за проводниками заполнена поглотителем электромагнитного поля как для проволочной приемной антенны 16, так и излучателя 13. При этом каждый проводник приемной антенны и излучателя в системе покрывается радиопрозрачным изолятором – область «Б».

Работа антенной системы осуществляется следующим образом. Настроенный на заданную частоту $f_{ген}$ высокочастотный генератор 3 (см. рис. 1) возбуждает усилитель мощности 4 на рабочей частоте $f_{ген}$. Усилитель 4 усиливает колебания до заданной выходной мощности. Эта мощность поступает на вход согласующего устройства приемо-передающей антенной системы 5. Согласующее устройство антенной системы 5 обеспечивает передачу по N выходам равной мощности. Ра-

венство мощности на каждом выходе согласующего устройства антенной системы 5 достигается за счет установленного равного отношения (K) числа витков в каждой вторичной обмотки ($n_{ВТ}$) к виткам первичной обмотки ($n_{ПР}$) [4], другими словами постоянства отношения для всех N выходов $K = (n_{ВТ}) / (n_{ПР})$. Каждый из N выходов согласующего устройства антенной системы 5 подключен к собственному плоскому модулю 1_N с помощью двух фидерных линий 6. Высокочастотный генератор 3, усилитель мощности 4, согласующее устройство антенной системы 5, N усилителей 7_N , опорный генератор 8, N фазовых детекторов 11_N , N фазовращателей 12_N , сумматор 9 и приемное устройство 10 располагаются внутри корпуса судна, в целях обеспечения высокой степени живучести устройств. Поэтому для подключения плоских модулей 1_N в корпусе предусмотрены отверстия для прохождения питающих фидерных линий 6. Фидерные линии 6 на выходе согласующего устройства антенной системы 5 находятся под низким напряжением, поскольку входное сопротивление плоского модуля не превышает 10 Ом. N фидерных линий 6 соединены с входом каждого из N плоских модулей 1_N таким образом, что на каждый плоский модуль 1_N подается электрическая энергия с частотой $f_{ген.}$ (см. рис. 1). Сложение мощности от N плоских модулей создает необходимый уровень излучения в рабочем диапазоне частот.

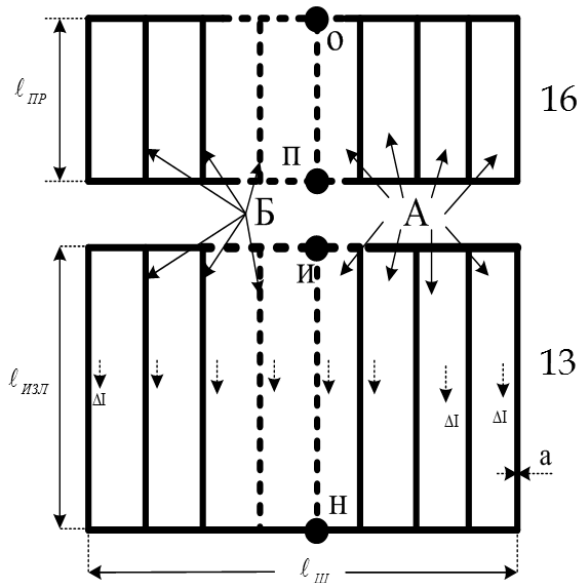


Рис. 4. Приемная антенна и излучатель антенного плоского модуля

Принцип формирования ФАР из плоских модулей 1_N на металлической поверхности корпуса 2 показан на рисунке 3. Плоский модуль 1_N находится под напряжением, поэтому он изолирован от металлической поверхности корпуса 2. Размещение модулей произвольное, в удобных для подвижного объекта местах. Количество плоских антенных моду-



лей 1_N определено необходимой мощностью излучения, полученного на основе сложения мощности в пространстве за пределами объекта, на котором расположены РЭС. Для обеспечения фазирования мощности модулей 1_N используется ФАР, причем фазирование осуществляется установлением одинаковой длины для питания плоских модулей в случае излучения нормального для диаграммы направленности к линии размещения излучателей. Для отклонения, или сканирования, диаграммы направленности излучателей плоских модулей относительно нормали к линии их размещения предлагается использовать совмещенные в каждом плоском модуле 1_N приемную антенну. Данная приемная антенна плоского модуля 1_N осуществляет прием сигналов береговой радиостанции, которая размещается вблизи берегового центра, принимающего сигналы надводного судна. Таким образом, пеленг на приемный береговой центр и передающий береговой центр будут одинаковыми для ФАР, образованной приемными антеннами и излучателями плоских модулей.

Для управления диаграммой направленности приемной антенны используется принцип самофокусировки, основанный на сравнении фазы принимаемых сигналов с фазой опорного генератора. В приемной антенной решетке фаза принимаемых сигналов сравнивается с фазой опорного генератора 8. В сумматоре сигналы синфазно складываются. Таким образом, приемо-передающая система позволяет осуществлять радиоприем с определением фазовых углов от расположенных совместно приемных антенн, путем сравнения с фазой опорного генератора 8.

Полученные разности углов прихода волны на приемные антенны передаются в фазовые углы тока излучателей на передающую часть плоских модулей 1_1 следующим образом. Приемная антенна, например, первого плоского модуля 1_1 принимает сигналы передающего берегового центра. Принятый уровень сигнала с выхода первого плоского модуля 1_1 поступает через усилитель 7_1 параллельно в приемный канал на второй вход фазовращателя 12_1 и на второй вход фазового детектора 11_1 . На первый вход этого фазового детектора 11_1 поступает сигнал опорного генератора 8. Частота $f_{\text{ГЕН}}$ опорного генератора 8 совпадает с частотой $f_{\text{ПР}}$ принимаемого сигнала, но частоты не совпадают по фазе. Полученная разность фаз на выходе фазового детектора 11_1 поступает через «в»-вход первого канала управления согласующего устройства приемо-передающей антенной системы 5. Вход «в» первого канала управления согласующего устройства приемо-передающей антенной системы 5 (рис. 1) соединен с входом фазовращателя $12_{\text{СУ1}}$. Первая секция обмотки образована между заземленной клеммой «з» через фазовращатель $12_{\text{СУ1}}$ и клеммой «е», причем возбуждаемая ЭДС в этой секции через клемму «е» поступает на выход «а» согласующего устройства антенной системы 5 и далее на первый вход первого плоского модуля 1_1 . Вторая секция первой вторичной обмотки 1 трансформатора Тр. 1 образована между заземленной клеммой «з» через фазовращатель $12_{\text{СУ1}}$ и клеммой «ж», причем возбуждаемая ЭДС в этой секции через клемму «ж»



поступает на выход «б» согласующего устройства приемно-передающей антенной системы 5 и далее на второй вход первого плоского модуля 1_1 . Следовательно, фазовращатель $12_{СУ1}$ оказывает влияние на фазу тока, поступающего через выходы «а» и «б» согласующего устройства приемно-передающей антенной системы 5 на первый и второй входы первого плоского модуля 1_1 .

Одновременно, как показано выше, выход усилителя 7_1 параллельно соединен со вторым входом фазовращателя 12_1 канала радиоприема (см. рис. 1), а первый вход этого фазовращателя 12_1 соединен с выходом фазового детектора 11_1 , выход фазовращателя 12_1 соединен через первый вход сумматора 9 с входом приемного устройства 10. Приемное устройство 10 фиксирует частоты приема с целью сравнения с частотой передачи. Это необходимо для фазирования диаграммы направленности передающей ФАР. Если длины волн приемной и передающей ФАР будут отличаться более чем на десять процентов, то значения фазовых углов, установленных для токов излучателей передающей ФАР, не обеспечат равенства диаграммы направленности приема приемной ФАР и ФАР, образованной N излучателями плоских модулей 1_N .

Первый вход плоского модуля любого из 1_N соединен фидерной линией 6, ее центральной жилой, к клемме «и» проволочного излучателя 13, клемма «н» которого через нагрузочное сопротивление 14 заземлена на корпус через клемму «к». Таким образом, возбуждаемые токи первой секции вторичной обмотки трансформатора Тр. 1, фазированные фазовращателем $12_{СУ1}$, протекают по проволочному излучателю 13 в виде тока излучения $I_{ИЗЛ}$.

Второй вход плоского модуля любого из 1_N соединен фидерной линией 6, ее центральной жилой, к клемме «л» плоского экрана 15, клемма «м» которого через нагрузочное сопротивление 14 заземлена на корпус 2 через клемму «к». Таким образом, возбуждаемые токи во второй секции вторичной обмотки трансформатора Тр. 1, фазированные фазовращателем $12_{СУ1}$, протекают по плоскому экрану 15 в виде тока экрана $I_{ЭКР}$, причем оказываются противофазными току излучения $I_{ИЗЛ}$. Этот ток экрана $I_{ЭКР}$ наводит ЭДС в излучателе 13 в фазе току излучателя $I_{ИЗЛ}$, чем снижает экранирующее действие корпуса судна 2 на излучатель 13.

Каждый из N выходов согласующего устройства антенной системы 5 образован двумя выходами: выходом «а» и выходом «б». Таким образом, два выхода для каждого из N выходов согласующего устройства приемно-передающей антенной системы 5 фидерными линиями 6 одинаковой длины соединены с первым и вторым входами для каждого из N плоских модулей, начиная с 1_1 по 1_N , при этом кабели 6 соединены через отверстия в металлической поверхности 2. А через входы «в» поступает управляющее напряжение на фазовращатели $12_{СУ1}$ с 1 по N для формирования фазы тока в секциях вторичных обмоток трансформатора Тр. 1 для каждого из N плоских модулей, начиная с 1_1 по 1_N .

Таким образом, согласующее устройство антенной системы 5 через вторичные обмотки, имеющие заземленную точку «з» через фазовращатель $12_{СУ1}$ в каждой из N вторичной обмотке трансформатора Тр. 1 питают противоположными токами: излучатель 13 — током $I_{ИЗЛ}$ и эк-



ран 15 — током $I_{ЭКР}$. Причем ток $I_{ЭКР}$ плоского экрана 15 экранирует и исключает потери тока излучателя 13 из-за близости металлической поверхности 2 к излучателю. Учитывая, что количество витков во вторичных обмотках трансформатора Тр.1 согласующего устройства 5 между клеммами «е» и «з» и клеммами «ж» и «з» различно, то на выход «а» подается значительно большая мощность, чем по выходу «б», причем ток $I_{ИЗЛ}$ противоположен по фазе с током $I_{ЭКР}$. Протекаемый ток $I_{ЭКР}$ в экране 15 наводит ЭДС в излучателе 13, таким образом, увеличивая мощность в излучателе 13. В то же время наведенная током излучателя $I_{ИЗЛ}$ ЭДС синфазна с током в экране $I_{ЭКР}$. Тем самым увеличивается экранирующее действие экрана 15 от влияния близкорасположенной металлической поверхности борта объекта 2. Действительно, если убрать металлическую поверхность экрана 15, то из-за очень малого расстояния (не более 2 сантиметров) от металлической поверхности расположения излучателя 13 вся его энергия будет поглощаться поверхностью борта 2.

Проволочный излучатель 13 (см. рис. 4) плоского модуля 1_N , выполнен в виде сетки из N вертикальных проводников, соединенных в верхней и нижней частях излучателя «а» — сечение проводника каждого из N вертикальных проводников излучателя 13. В каждом вертикальном проводнике протекает ток ΔI , причем суммарное значение тока во всех проводниках излучателя 13 равно току излучателя, т. е. $I_{ИЗЛ} = \Sigma \Delta I$. Область «А», или область между проводниками излучателя, заполнена поглотителем электромагнитного поля, применяемым на судах для создания их невидимости радиолокационными станциями. В тоже время сам излучающий проводник в излучателе 13 имеет необходимые изолирующие свойства (область Б), учитывая присутствие обслуживающего персонала и возможное покрытие водой при волнении моря. Количество проводников в излучателе 13, или ширина излучателя ℓ_{III} , их длина $\ell_{ИЗЛ}$ устанавливаются в процессе проектирования. Расчеты показывают, что размеры приемлемые и достаточные для плоского излучателя будут 50 на 50 см [3]. В качестве нагрузочного сопротивления 14 для излучателя 13 используется проволочная цилиндрическая спираль, помещенная в среду с параметрами $\mu = 10, \varepsilon = 10$, что позволяет обеспечить протекание тока генератора равного для частотного спектра передачи. А в качестве нагрузочного сопротивления 14 для экрана 15 используется также проволочная цилиндрическая спираль, помещенная в среду с аналогичными параметрами, также позволяющая обеспечить протекание тока генератора равного независимо от его рабочей частоты.

Проволочная приемная антенна 16 (см. рис. 4) плоского модуля 1_N (ℓ_{II} — длина проволочной приемной антенны 16, ℓ_{III} — ширина проволочной приемной антенны 16) также выполнена в виде сетки из N вертикальных проводников соединенных в верхней и нижней частях приемной антенны. В каждом вертикальном проводнике протекает наведенный ток ΔI . Область «А», или область между проводниками, заполнена поглотителем электромагнитного поля. В тоже время сам проводник в



приемной антенне 16 имеет необходимые изолирующие свойства (область Б). Количество проводников, их ширина и длина устанавливаются в процессе проектирования.

Известно большое количество конструкций фазовращателей, однако наиболее применимым в заявляемом устройстве является микрополосковый ферритовый фазовращатель, вносящий наименьшее ослабление и обладающий малыми размерами и массой, например по патенту № 132918 по заявке № 2013123209 от 21.05.2013 (H01P1/185).

Для равномерного распределения излучаемой мощности вдоль корпуса судна необходимо распределить ее на несколько модулей, при этом актуален вопрос о направленных свойствах системы. На рисунках 5–7 представлены диаграммы направленности восьмиэлементной антенной решетки из антенных плоских модулей на частоте 15 МГц при различных расстояниях между элементами, полученные с помощью пакета расширения Antenna Toolbox программного обеспечения Matlab.

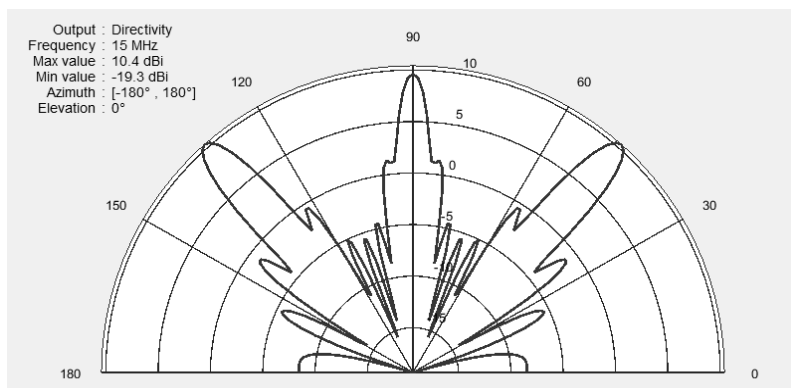


Рис. 5. ДН АР с межэлементным расстоянием $3\lambda/2$ (30 метров)

Наблюдаются дополнительные главные лепестки, которые с уменьшением межэлементного расстояния до λ исчезают, однако число боковых лепестков велико (рис. 6).

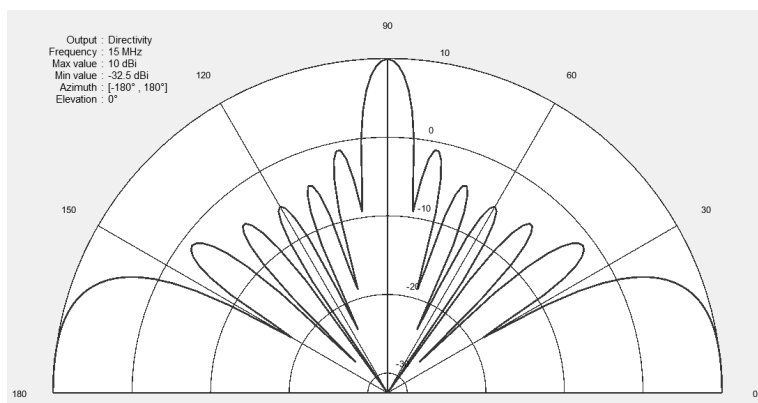


Рис. 6. ДН АР с межэлементным расстоянием λ (20 метров)



С уменьшением межэлементного расстояния до $\lambda/2$ антенная решетка имеет ярко выраженный единственный главный лепесток (рис. 7).

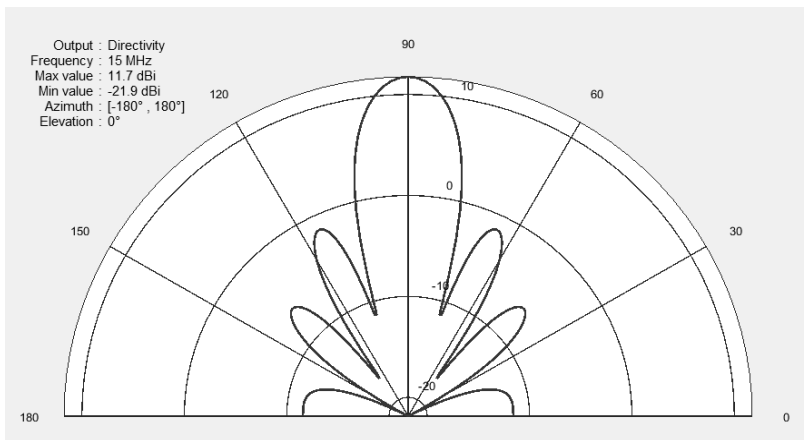


Рис. 7. ДН AP с межэлементным расстоянием $\lambda/2$ (10 метров)

Таким образом, предложенная разработка позволит:

- управлять диаграммой направленности судовой передающей антенной системы в виде фазированной антенной решетки в условиях ее размещения на плоской поверхности подвижного объекта;
- уменьшить мощность передающей антенны с целью исключения влияния излучения системы на ЭМО объекта, на котором функционирует большое число РЭС, за счет снижения взаимного сопротивления между разрабатываемой антенной системой, и остальными приемными антеннами;
- интегрировать антенну в плоские поверхности корпуса.

Список литературы

1. Патент № 156521 по заявке № 2014154421 от 30.12.2014 (H01Q 9/04).
2. Патент № 168461 по заявке № 2016128456 от 12.07.2016 (H01Q 9/00).
3. Balanis C. A. Modern antenna handbook. N. Y., 2008.
4. 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.

Об авторах

Виктор Ефимович Пониматкин – канд. тех. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: VPonimatkin@kantiana.ru

Александр Александрович Кужелев – канд. тех. 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

Вячеслав Леонидович Евстратов — ст. преп., филиал ВУНЦ ВМФ «ВМА», Россия.

E-mail: VPonimatkin@kantiana.ru

The authors

Dr Viktor Ponimatkin, ass. prof., I. Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: VPonimatkin@kantiana.ru

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

E-mail: alkuzh007@yandex.ru

Dr Andrey Shpilevoy, ass. prof., I. Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: AShpilevoi@kantiana.ru

Vjatcheslav Evstratov, lecturer, MESC MMF «VMF», Russia.

E-mail: VPonimatkin@kantiana.ru