

УДК 681.883.67.001:621.396.677

# ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК НАПРАВЛЕННОСТИ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ГИДРОЛОКАТОРА БОКОВОГО ОБЗОРА

**В.В. Золотарёв**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем  
морских технологий<sup>1</sup>

При разработке высокочастотных гидролокаторов бокового обзора (ГБО) большое значение помимо главных параметров – дальности действия и разрешающей способности по углу и по дистанции – имеют свойства диаграммы направленности (ДН) в вертикальной плоскости. Для формирования диаграммы направленности при ГБО-съёмке для расширения зоны обзора обычно используются главный лепесток диаграммы и один-два боковых лепестка. Глубокие «нули» диаграммы направленности, разделяющие главный лепесток и боковые лепестки, приводят к потере эхо-сигнала на небольших участках ближней зоны обзора. Визуально это проявляется на эхограмме в виде тёмных вертикальных полос, тянущихся вдоль донной линии. Расширение главного лепестка вертикальной ДН можно осуществить уменьшением поперечной апертуры антенны. Таким путем можно устранить «нули» ДН, однако при этом снижается дальность действия ГБО. Проблема может быть решена построением гидролокационных антенн со специфической формой диаграммы направленности в вертикальной плоскости, в частности, «косекансных» антенн. По сравнению с радиолокационными разработками в гидролокации помимо законов обратного рассеяния необходимо учитывать гидрологические факторы. К ним относится прежде всего затухание звука в воде в зависимости от частоты и дистанции до цели. Для разработки антенн с требуемыми характеристиками используются методы численного моделирования. Модель антенны с диаграммой направленности, подобной «косекансной», выполнена в среде MATLAB. На основе модели изготовлен рабочий макет в виде экспериментальной антенной секции. Положительные результаты, полученные в процессе испытаний макета, могут быть положены в основу создания эффективных антенн ГБО.

## 1. Зависимость качества гидролокационного обзора от свойств диаграмм направленности антенн ГБО

Наиболее ответственным узлом, определяющим характеристики гидролокатора бокового обзора, является приёмопередающая антенна. Она должна обладать специфической веерообразной диаграммой направленности с широким (до 90°) углом раскрыва  $\varphi_V$  в вертикальной плоскости, но очень узким ( $<1^\circ$ ) азимутальным углом раскрыва  $\varphi_A$ , который и определяет разрешающую способность ГБО. Антенна ГБО размещается на подвижном носителе таким образом, чтобы её

ДН пересекалась с поверхностью дна по линии, перпендикулярной примыкающей слева (или справа) к проекции траектории движения носителя. Узкий азимутальный угол раскрыва  $\varphi_A$  реализуется путём увеличения длины антенны ГБО. Сложнее получить 90-градусную форму диаграммы направленности в вертикальной плоскости, и этому вопросу посвящено дальнейшее изложение.

На рис. 1, а показана диаграмма направленности простой синфазной антенны высокочастотного (ВЧ) ГБО в вертикальной плоскости (далее – «вертикальная ДН»), в которой близкая к требуемой большая ширина раскрыва  $\varphi_V$  получена традиционным способом,

путём уменьшения ширины пьезоэлементов до величины  $\lambda/2$  (где  $\lambda$  – длина звуковой волны в воде).

На практике такая приёмопередающая антенна оказалась малопригодной, поскольку ГБО, построенный на её базе, обладал недостаточной дальностью действия (чувствительность антенны как в режиме приёма, так и в режиме излучения существенно зависит от массы использованной в её конструкции пьезокерамики). Увеличивая ширину керамики, удаётся повысить эффективность антенны и дальность действия ГБО.

<sup>1</sup> 690950, Владивосток, ул. Суханова, 5а.  
Тел/факс: (4232) 432416. E-mail: lab32imtp@marine.febras.ru .

На рис. 1, б показана диаграмма направленности такой антенны. Дальность действия ГБО, построенного на базе этой антенны, оказалась приемлемой для практической работы при условии, что основным лепестком покрывалась дальняя и средняя зоны бокового обзора, в то время как обзор в самой ближней зоне, непосредственно под антенной, происходил за счёт боковых лепестков. ВЧ ГБО с такой антенной в целом обладал неплохими характеристиками, обеспечивая высокую разрешающую способность и достаточную дальность действия.

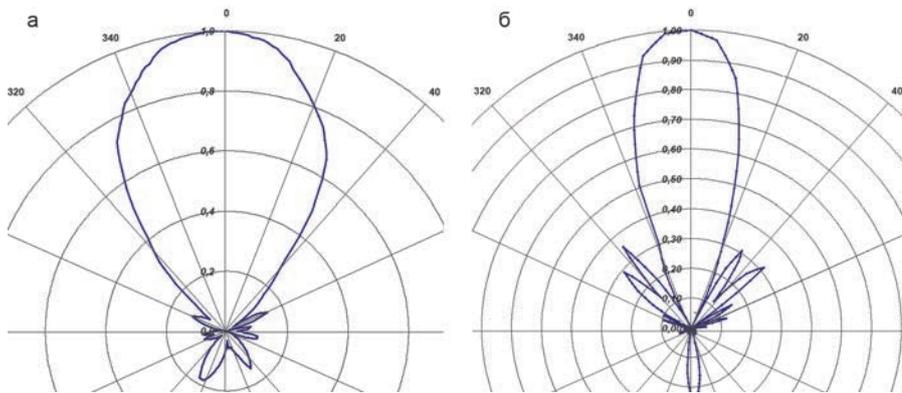


Рис. 1. Нормированные ДН антенн ГБО в вертикальной плоскости: а – для керамики шириной  $\sim \lambda/2$ ; б – для керамики шириной  $\sim \lambda$

На рис. 2 показан образец эхограммы подобного ГБО. Однако в таких эхограммах наблюдаются тёмные почти вертикальные полосы в ближней зоне обзора, тянущиеся вблизи эхо-изображений линий дна. Это, безусловно, снижает общее визуальное восприятие эхо-изображения. Полосы обусловлены глубокими «нулями» диаграммы направленности антенны, и их не удаётся полностью устранить ни временными автоматическими регулировками усиления (ВАРУ), ни последующей вторичной обработкой.

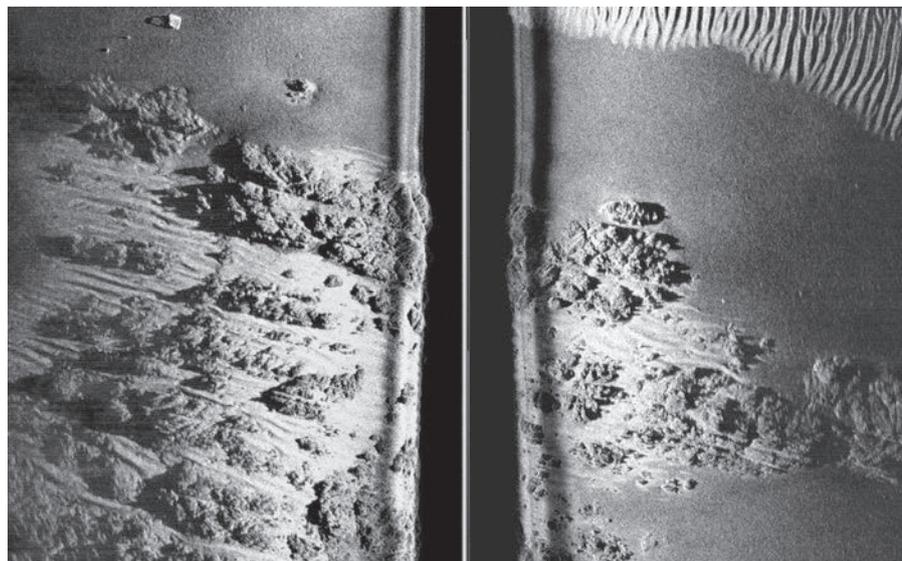


Рис. 2. Фрагмент эхограммы ВЧ ГБО. Боковой обзор на максимальных и средних дальностях обеспечивается главным лепестком ДН антенны. Обзор в ближней зоне и непосредственно под антенной реализуется за счёт боковых лепестков. Темные почти вертикальные полосы вблизи линий дна обусловлены глубокими «нулями», разделяющими лепестки ДН

## 2. Радиолокационные аналогии и варианты решения проблемы

Попытки устранить «нули» диаграммы направленности, не потеряв при этом чувствительности, с неизбежностью ведут к усложнению конструкции антенн. В радиолокации удачным решением было создание т.н. «косекансных» антенн [1]. На рис. 3 пунктиром схематично показана идеализированная форма ДН косекансной антенны, а сплошной линией – форма ДН реальной микроволновой антенны. Аналогичные решения предлагались и для гидролокационных устройств [2].

Несимметричность «косекансной» диаграммы направленности относительно её оси является важным достоинством. Эта диаграмма более выгодна в энергетическом отношении, поскольку она позволяет скомпенсировать зависимость мощности эхолокационного отклика от дальности до цели, увеличивая отклик от слабых дальних целей и устраняя перегрузку приёмного тракта сильными эхо-сигналами от ближних целей. Однако из-за особенностей распространения звука в морской среде проектирование гидролокационных антенн сложнее, чем радиолокационных.

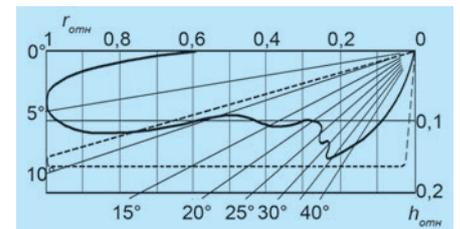


Рис. 3. Типичная «косекансная» диаграмма направленности радиолокационной антенны. Сплошной линией показана ДН реальной антенны [1], пунктиром – более желательная идеализированная ДН

### 3. Влияние гидрологических факторов

Известна [4] гидролокационная зависимость интенсивности обратно-рассеянного эхосигнала  $J_3$  от дальности до цели  $r$ , от излучаемой мощности  $P_a$  и от коэффициента осевой концентрации  $\gamma$  приёмопередающей антенны:

$$J_3 = \frac{P_a \cdot \gamma \cdot R_3^2}{16\pi \cdot r^4} \cdot 10^{-0,2\beta r}, \quad (1)$$

где  $R_3$  – определяемый экспериментально радиус некоторой эквивалентной (по отражающей способности) придонной цели.

Множитель  $10^{-0,2\beta r}$  характеризует затухание звука в водной среде. Аналогичная радиолокационная формула не содержит подобного множителя ввиду практического отсутствия затухания радиоволн в воздухе. Между тем, этот множитель вносит существенное отличие в задачу проектирования гидролокационной антенны. На рис. 4 показаны обобщённые частотные зависимости коэффициента затухания звука в морской и пресной воде [3]. Точками обозначены экспериментальные данные для морской воды, полученные в различных местах океана. Кривая 1 аппроксимирует

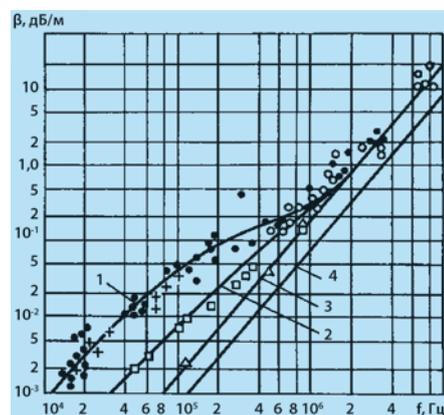


Рис. 4. Зависимость коэффициента затухания звука в воде  $\beta$  от частоты  $f$ . Кривая 1 аппроксимирует многочисленные экспериментальные данные для морской воды [3]. Кривые 2–3 аппроксимируют результаты экспериментов для пресной воды

эти значения и хорошо соответствует известной полуэмпирической формуле Шулкина–Марша. Квадратиками и треугольниками с соответствующими линиями 2 и 3 обозначены данные, полученные для пресной воды с различной степенью загрязнения. Прямая 4 представляет собой чисто теоретическую зависимость коэффициента затухания  $\beta$  от частоты  $f$  при отсутствии объёмной вязкости.

Анализируя эти зависимости с учётом особенностей геометрии бокового обзора становится очевидно, что наличие затухания, особенно сильно проявляющегося на высоких звуковых частотах, требует для «косекансной» гидролокационной антенны большего сужения вертикальной диаграммы направленности, чем для антенны радиолокационной.

Ещё один фактор, с которым приходится считаться при разработке антенн гидролокатора бокового обзора, связан с зависимостью силы обратного донного рассеяния от изменяющегося угла скольжения. Многочисленные эксперименты по изучению таких зависимостей для разных типов подводных грунтов на мелководье и в глубоком море выполнялись [5] преимущественно на частотах, не превышающих 100 кГц (рис. 5, а). Эти данные весьма полезны для разработки низкочастотных ГБО, но недостаточны для ГБО высокочастотного.

Экспериментальных результатов для более высоких звуковых частот, представляющих особый интерес для проектирования ВЧ ГБО, немного. В [6] приведены зависимости силы обратного рассеяния звуковой волны, измеренные для частоты 0,5 мГц (рис. 5, б). Однако эти результаты были получены не для реальной поверхности морского дна, а в ходе лабораторных экспериментов и только для

песчаной поверхности двух типов. В целом они подтверждают общую тенденцию к значительному падению силы обратного рассеяния при уменьшении угла скольжения, многократно подтверждённую экспериментами на более низких частотах и с иными типами подводных грунтов [3, 5, 7, 8].

### 4. Требования к характеристикам направленности антенны ГБО

Значительный разброс значений затухания (см. рис. 4), и особенно силы обратного рассеяния (рис. 5), не позволяет сформулировать однозначных (пригодных к любым условиям гидролокационной съёмки) требований к количественным характеристикам вертикальной составляющей ДН приёмопередающей антенны ГБО. Однако некоторые очевидные требования качественного характера вырисовываются достаточно чётко. Перечислим их:

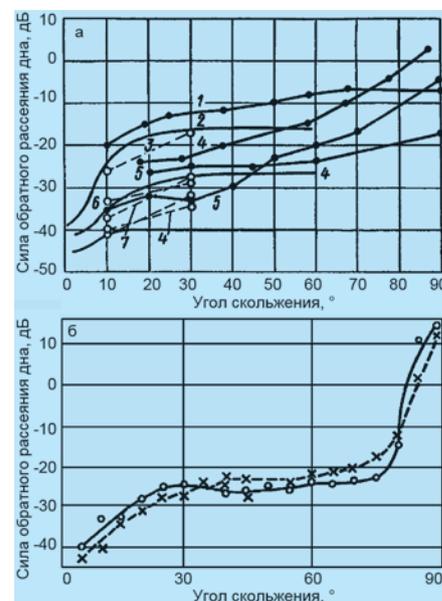


Рис. 5. Зависимость силы обратного рассеяния звуковой волны от угла скольжения для различных грунтов: а – рассеяние на частотах от 24 до 100 кГц для морского дна с илистыми, гравийными и скальными типами грунтов [5]; б – рассеяние на частоте 500 кГц для песчаной поверхности дна двух типов [6]

1. В пределах полного диапазона дальностей действия ГБО (от зондирования ближних целей по нормали вниз до почти горизонтального бокового обзора для дальних целей) вертикальная составляющая диаграммы направленности антенны не должна содержать «нулей».

2. Форма вертикальной диаграммы направленности антенны ГБО должна быть существенно несимметричной, по возможности близкой к «косекансной».

3. Уровень боковых лепестков в верхней и задней полусферах должен быть минимальным.

4. Коэффициент концентрации приёмопередающей антенны ГБО в направлении дальней зоны обзора (условно – в «осевом» направлении) должен быть максимально возможным.

5. Чувствительность антенны в направлении по нормали вниз может принимать значения не более 5–10% от чувствительности в «осевом» направлении как в режиме передачи, так и в режиме приёма.

6. В соответствии с п.п. 2–5 и с учётом множителя  $10^{-0,2\beta r}$  в формуле (1) вертикальная диаграмма направленности антенны ГБО должна быть более узкой, чем ДН «косекансных» микроволновых антенн.

### 5. Моделирование вертикальной диаграммы направленности

Исходя из перечисленных требований средствами пакета прикладных программ MATLAB была смоделирована антенна гидролокатора бокового обзора с диаграммой направленности, похожей на «косекансную». В основу модели лег метод подбора амплитудно-фазового распределения давления по вертикальной апертуре антенны. Проводя аналогию с разложе-

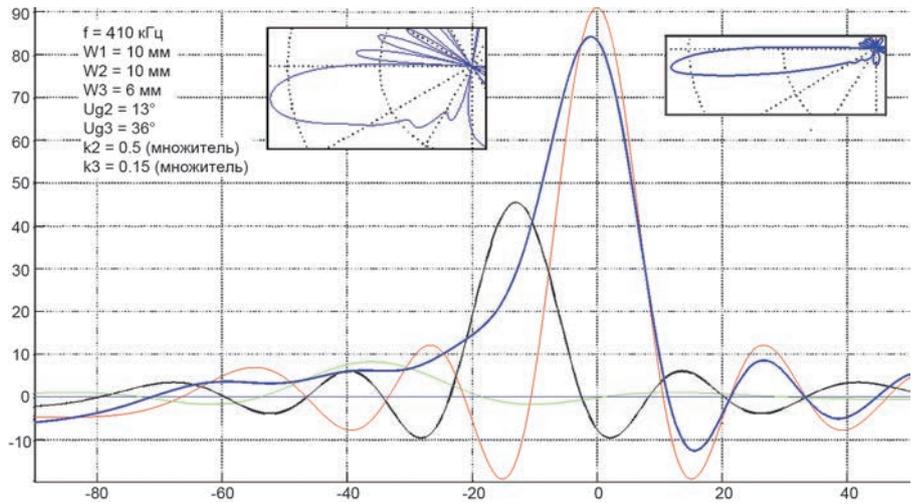


Рис. 6. Результат численного моделирования вертикальной ДН антенны ВЧ ГБО

нием произвольной функции в ряд, любую наперед заданную форму диаграммы направленности можно было бы составить путём суммирования множества элементарных составляющих, описываемых классическими функциями типа  $\sin(x)/x$ , каждая из которых представляет собой поле элементарного излучателя, например, простого пьезоэлектрического излучателя поршневого типа. Однако излишне большое число составляющих привело бы на стадии создания изделия к технологическим трудностям. Поэтому наибольшее внимание было уделено изучению возможности синтезировать приемлемую ДН из минимально необходимого количества элементарных составляющих. Двух составляющих оказалось недостаточно, но уже три дали ощутимый положительный эффект.

На рис. 6 представлен результат численного моделирования вертикальной диаграммы направленности антенны высокочастотного ГБО для трёх элементарных слагаемых. На главной части рисунка все диаграммы направленности представлены в прямоугольных координатах. Синяя кривая иллюстрирует ДН, полученную в результате сложения полей от трёх элементарных источников.

Вклад каждого из них обозначен красной, чёрной и зелёной тонкими линиями. По оси абсцисс отложены углы от  $-90^\circ$  до  $+50^\circ$ , по оси ординат – парциальные «веса» каждого из элементарных компонентов в относительных единицах и результат суммирования. Вверху результат суммирования показан фрагментарно в виде двух диаграмм направленности, представленных в полярных координатах (справа – ДН в линейном масштабе, слева – она же в масштабе логарифмическом, причём для устранения неоднозначного восприятия за счёт наложения лепестков значения амплитуд ДН взяты по модулю).

### 6. Оценка результатов моделирования и макетирование антенны ГБО

Главным достоинством полученного результата является полное отсутствие «нулей» вертикальной составляющей диаграммы направленности в диапазоне углов от  $-72^\circ$  до  $+12^\circ$  при вполне приемлемой неравномерности и очень небольших отклонениях от монотонности в этом же диапазоне углов. В верхней и задней полусферах суммарной ДН при-

сутствуют боковые лепестки ДН, однако их уровень ниже уровня боковых лепестков, по крайней мере, первого слагаемого.

На основе результатов моделирования был изготовлен макетный образец в виде укороченной экспериментальной антенной секции (рис. 7). Полная приёмопередающая антенна может быть составлена из нескольких таких секций. Секция состоит из трёх пьезоэлементов, каждый из которых выполнен и пространственно ориентирован таким образом, чтобы его вклад в дальнее поле соответствовал описанной численной модели как по фазе, так и по амплитуде.

Экспериментальная секция была испытана в бассейне в эхолокационном режиме с использованием в качестве стенда прецизионного поворотного устройства, сопряженного с полуавтоматическим узлом регистрации данных. В процессе измерений использовалось вспомогательное акустическое зеркало в виде плоского алюминиевого листа толщиной  $\lambda/4$ , вывешенное в бассейне на подвесе строго вертикально и перпендикулярно направлению на испытываемую антенную секцию. Это позволило увеличить измерительную трассу вдвое и более строго выдержать условия дальнего поля при измерении вертикальной составляющей диаграммы направленности. Условия свободного пространства соблюдались выбором импульсного режима работы и надлежащим удалением от поверхности воды, стенок и дна бассейна как испытываемой антенной секции, так и акустического зеркала.



Рис. 7. Экспериментальная антенная секция в макетном исполнении

На рис. 8 показан результат измерения вертикальной составляющей диаграммы направленности экспериментальной антенной секции. Форма главного лепестка этой ДН во многом повторяет форму, изображённую на рис. 6, но при этом главный лепесток макета заметно шире главного лепестка модели, что в приложении к ГБО-обзору можно назвать недостатком. Несмотря на хорошую, близкую к «косекансной» асимметрию ДН для ближней зоны в направлении дальней зоны обзора степень асимметрии ДН экспериментальной антенной секции явно недостаточна. В диаграммах направленности численной модели и испытанного макета несколько различаются угловые расположения локальных минимумов и максимумов в диапазоне углов  $35\text{--}80^\circ$ , но этот фактор был отмечен как несущественный.

Вышеназванные недостатки численной модели, обусловленные наличием боковых лепестков в задней и верхней полусферах, свойственны и испытанному макету. При необходимости путём увеличения числа пьезоэлементов в антенне (т.е. числа элементарных

слагаемых, формирующих результирующее поле) уровень этих лепестков мог бы быть снижен. Однако на практике эта мера, скорее всего, избыточна, поскольку вредное влияние верхних боковых лепестков заметно лишь в процессе ГБО-съёмки на мелководье, но уже на глубинах более 20–30 метров их влияние становится незначительным. Влияние задних лепестков ДН может быть уменьшено путём рационального размещения антенн ГБО на корпусе АНПА или иного носителя благодаря экранирующему действию корпуса. Весьма серьёзным недостатком является почти двукратное снижение чувствительности испытанного макета по оси главного лепестка вертикальной диаграммы направленности. Сравнение чувствительности проводилось относительно макета ГБО-антенны более ранней разработки, в котором пьезоэлементы возбуждались синфазно, и при этом размеры активных частей обоих макетов (по пьезокерамике) были практически одинаковыми.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кюн Р. Микроволновые антенны / пер. с нем. под ред. М.П. Долуханова. Л.: Судостроение, 1967. 518 с.
2. Богородский А.В., Яковлев Г.В., Корепин Е.А., Должиков А.К. Гидроакустическая техника исследования и освоения океана / под ред. А.В. Богородского. Л.: Гидрометеониздат, 1984. 264 с.
3. Акустика океана / под ред. Л.М. Бреховских. М.: Наука, 1974.
4. Тюрин А.М., Сташкевич А.П., Таранов Э.С. Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1966. 296 с.
5. Урик Р. Дж. Основы гидроакустики: пер. с англ. Л.: Судостроение, 1978. 448 с.
6. Nolle A.W., Hoyer W.A., Mifsud J.R., Runyan W.R., Ward M.B. Acoustical properties of water-filled sands // J. Acoust. Soc. America. 1963. V. 35, N 9. P. 1394–1408.
7. Urick R.J. Side scattering of sound in shallow water // J. Acoust. Soc. America. 1960. V. 32, N 3. P. 351–355.
8. McKinney C. Mc., Anderson C.D. Measurements of backscattering of sound from the ocean bottom // J. Acoust. Soc. America. 1964. V. 36, N 1. P. 158–163.

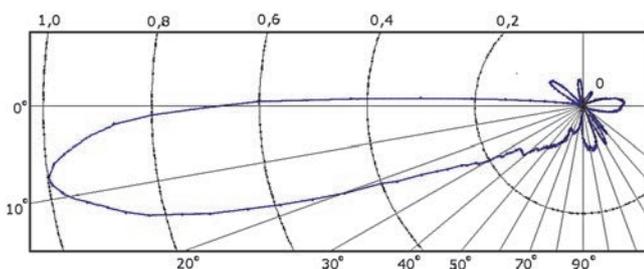


Рис. 8. Вертикальная составляющая ДН экспериментальной антенной секции