

Исследование защищенной зеркально-параболической антенны акустического локатора

Н.П. Красненко^{1,2}, А.С. Раков^{1,2}, Д.С. Раков¹

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
Россия 634055, Томск, пр. Академический, 10/3,

²Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Россия
634050, Томск, пр. Ленина, 40, E-mail: krasnenko@imces.ru, dipol@ngs.ru, rakov@imces.ru

Предложена методика расчета диаграмм направленности антенн акустических локаторов по измерениям амплитудного распределения поля на излучающей апертуре. На примере антенны локатора «Звук-4» приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований защищенной зеркально-параболической антенны. Проведено сравнение с характеристиками антенн других локаторов.

A method for calculating directivity patterns of acoustic radars based on measurements of amplitude distribution of the field on the transmitting aperture is suggested. On an example of the antenna of the Zvuk-4 sodar the results of theoretical and experimental investigations of shielded parabolic mirror antenna are presented. A comparison with the characteristics of antennas of other sodars is performed.

Введение

Для исследования атмосферного пограничного слоя широкое применение находят акустические локаторы – содары. Они позволяют в реальном времени непрерывно контролировать структуру и динамику атмосферы, определять тип термической стратификации, измерять профили скорости ветра и характеристик атмосферной турбулентности [1-3]. Антенна акустического локатора является одним из основных элементов, влияющим на энергетический потенциал локатора и эффективность его работы. Характеристики направленности антенны определяются её конструкцией, размерами, используемыми материалами. При проектировании акустических локаторов необходимо создание таких антенных систем, которые бы обеспечивали требуемые ширину диаграммы направленности (ДН), а также уровень бокового излучения. Широко применяются в акустических локаторах зеркально-параболические антенны, благодаря возможности получения большого коэффициента усиления и простоте конструкции.

Традиционно в доплеровских моностатических акустических локаторах, измеряющих профиль вектора скорости ветра, используются три (реже пять) антенн. Одна антенна направлена вертикально вверх, а оси направленности других отклонены от вертикали на небольшой угол (обычно $14^\circ \div 30^\circ$) и в горизонтальной плоскости разнесены на 90° . С помощью вертикально ориентированной антенны контролируется температурная стратификация атмосферы, измеряются профили вертикальной составляющей скорости ветра и характеристик турбулентности, а с помощью наклонных антенн измеряются радиальные составляющие скорости ветра в соответствующих каналах зондирования.

Исходя из построения антенной системы локатора формируются требования к диаграммам направленности антенн. Обычно ширина диаграммы направленности приемопередающих антенн должна быть около 10° (возможно расширение диапазона до 15°). Это обусловлено возможными потерями энергии принимаемого сигнала за счет сноса звукового пучка, возникающего за счет ветровой рефракции, а также за счет турбулентного ослабления звука при узких ДН, и полностью определяется геометрическими параметрами антенны и частотой излучения акустического локатора

[1-2]. Уровень боковых лепестков антенн должен быть максимально минимизирован, особенно в секторе углов $60^\circ \dots 90^\circ$, и зависит от угла наклона антенн. Степень подавления боковых лепестков определяется уровнем внешних акустических шумов и переотражениями от местных предметов.

Для выполнения указанных требований возможны следующие пути решения:

1. Использование антенн с большой площадью раскрыва, что позволит обеспечить заданный уровень боковых лепестков. Однако большие габариты не всегда приемлемы, даже для стационарных локаторов.

2. Создание специального вида амплитудно-фазового распределения поля по апертуре антенны. В данном случае можно столкнуться с техническими трудностями при реализации данного пути решения (например, из-за необходимости создания специального вида облучателей для параболической антенны.)

3. Использование звукозащитной бленды с требуемыми параметрами.

Остановимся на последнем пути решения проблемы более подробно.

Методика расчета диаграммы направленности защищенной антенны

Вид диаграммы направленности зеркальной параболической антенны определяется её диаметром, фокусным расстоянием, глубиной зеркала и типом облучателя. В антеннах акустических локаторов применяют однонаправленные рупорные облучатели с низким уровнем боковых лепестков. Они имеют размеры сравнимые с длиной волны или даже превосходящие её. Фокус параболоида совмещается с фазовым центром облучателя, под которым подразумевают центр излучаемой сферической волны. В качестве облучателя наиболее часто используют экспоненциальный рупор, подробный расчет параметров которого приведен в [4].

Для расчета используется апертурный метод, суть которого заключается в том, что по известному распределению возбуждающего поля на поверхности раскрыва зеркала, находится поле в зоне излучения. Таким образом, амплитудное распределение звукового давления в раскрыве зеркала будет определяться формой зеркала и характеристиками направленности облучателя:

$$A(R) = \frac{(1 + \cos(\psi))F(\psi)}{2} \quad (1)$$

где $F(\psi)$ – нормированная ДН направленности облучателя.

Согласно закону отражения и закону равенства энергии в трубке лучей, поле давления по апертуре параболы задается выражением

$$A(R)\exp(j\varphi[R]) = \frac{(1 - e^2) \cdot \cos(\psi[R])}{1 - e^2 \cdot \cos^2(\psi[R])} \cdot \frac{1 + \cos(\psi[R])}{2}, \quad (2)$$

где $\psi(R) = 2 \cdot \arctan\left(\frac{R}{2 \cdot F}\right)$ – угол раскрыва параболоида,

e – эксцентриситет рупора,

F – фокус параболоида.

На основе данного распределения определяется поле в дальней зоне антенны:

$$P(\theta) = \frac{j \cdot k \cdot (1 + \cos\theta)}{2 \cdot L} \cdot \exp(-j \cdot k \cdot L) \cdot \int_0^{R_{\max}} A(R) \cdot \exp(-j \cdot \varphi[R]) \cdot J_0(k \cdot R \cdot \sin\theta) \cdot R dR \quad (3)$$

где θ – угол от оси антенны,

$A(R)\exp(-j \cdot \varphi[R])$ - распределение поля звукового давления по излучающей апертуре защищенной антенны;

L – расстояние от центра излучающей апертуры до точки в дальней зоне,

$k = 2\pi/\lambda$ – волновое число,

λ - длина волны,

$J_0(\dots)$ – функция Бесселя нулевого порядка,

R_{max} – максимальный радиус излучающей апертуры.

Для уменьшения влияния шумов, приходящих не с осевого направления и уменьшения уровня боковых лепестков, целесообразно использование звукозащитных бленд. В основе метода расчета звукозащитных бленд лежит обобщенная методика синтеза защищенных зеркально-параболических акустических антенн [5]. На рис. 1 показана конфигурация защищенной зеркально-параболической антенны, в фокусе которой находится микрофон с рупорным облучателем.

Согласно [5-7], уровень подавления боковых лепестков определяется геометрическими размерами звукозащитной бленды и звукопоглощающими свойствами ее стенок. Диаграмма направленности такой защищенной антенны может быть численно определена путем применения дифракционного интеграла Кирхгофа для распределения поля давления по апертуре акустической антенны.

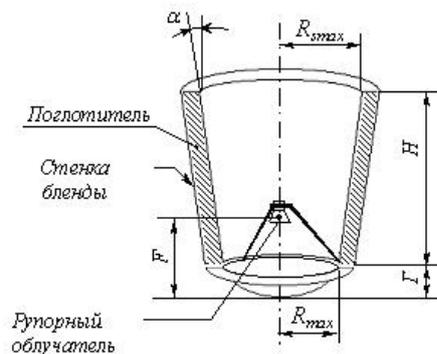


Рис. 1. Акустическая параболическая защищенная антенна с рупорным облучателем

При помощи модифицированного дифракционного интеграла Кирхгофа определяется распределение поля звукового давления на излучающей апертуре (при высоте бленды H) защищенной антенны. Затем, используя это распределение поля, при помощи интеграла Фраунгофера для раскрытий, обладающих круговой симметрией, определяется характеристика направленности антенны в ее дальней зоне:

$$P(\theta) = \frac{j \cdot k \cdot (1 + \cos \theta)}{2 \cdot L} \cdot \exp(-j \cdot k \cdot L) \cdot \int_0^{R_{Smax}} A(R_s) \cdot \exp(-j \cdot \varphi[R_s]) \cdot J_0(k \cdot R_s \cdot \sin \theta) \cdot R_s dR_s \quad (4)$$

где θ - угол от оси антенны,

$A(R_s)\exp(-j \cdot \varphi[R_s])$ - распределение поля звукового давления по излучающей апертуре защищенной антенны,

L – расстояние от центра излучающей апертуры до точки в дальней зоне,

$k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ - длина волны,

$J_0(\dots)$ – функция Бесселя нулевого порядка,

R_{Smax} – максимальный радиус излучающей апертуры защитной бленды, причем

$$R_{S_{\max}} = R_{\max} + H \cdot \operatorname{tg}(\alpha). \quad (5)$$

Предполагая, что поглотитель (см. рис. 1) обладает бесконечным коэффициентом поглощения, т.е. стенки бленды абсолютно поглощающие, распределение поля звукового давления по излучающей апертуре защищенной антенны определяется по формуле:

$$A(R_S) \cdot \exp(j\varphi[R_S]) = \frac{j}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{R_{S_{\max}}} A(R) \cdot \exp(j\varphi(R)) \cdot \exp(-j \cdot k \cdot [D - H]) \cdot \gamma(D) R dR d\Phi, \quad (6)$$

где $A(R)\exp(j\varphi[R])$ - распределение поля по апертуре незащищенной антенны,

H - высота защитной бленды,

Φ - угол в плоскости апертуры параболического зеркала,

$$D = \sqrt{R^2 \sin^2(\Phi) + (R_S - R \cos[\Phi])^2 + H^2},$$

$$\gamma(D) = \frac{1 + H/D}{2 \cdot D} \quad - \text{коэффициент, учитывающий уменьшение амплитуды}$$

акустического сигнала с расстоянием D ,

$R dR d\Phi$ - элемент площади на апертуре незащищенной антенны, множитель $\exp(-j \cdot k \cdot [D - H])$ описывает изменение фазы акустического сигнала с расстоянием D .

Диаграмма направленности антенны в дБ определяется из выражения (4), как

$$PdB(\theta) = 20 \log \left(\frac{P(\theta)}{P(0)} \right). \quad (7)$$

Экспериментальные исследования антенны

Исследования проводились на антенне одноканального содара «Звук-4». Содар «Звук-4» — это акустический локатор, состоящий из антенной системы, электронного блока, блока управления и обработки информации. Антенная система состоит из параболической антенны диаметром 1,5 метра, облучателя в виде экспоненциального рупора, звукозащитной бленды высотой 1,75 метра. Электронный блок включает в себя блок АЦП-ЦАП, усилитель мощности и приемно-передающий модуль. В блоке управления и обработки (персональный компьютер) специально разработанное программное обеспечение вполне понятным интерфейсом. Для управления настройками содара специально существует файл инициализации, в котором можно в режиме редактирования менять и настраивать нужные параметры. Характеристики содара приведены в табл. 1.

Таблица 1. Технические характеристики содара

Максимальная высота зондирования	1000 м
Минимальная высота зондирования	34 м
Разрешение по высоте	17 м
Диаметра используемого параболического зеркала	1,5 м
Высота используемой звукозащитной бленды	1,75 м
Угол раскрытия звукозащитной бленды	5°
Частота сигнала	1800 Гц
Длительность излучаемого сигнала	с, настраиваемая
Питание	220 В
Температура эксплуатации	-40°С — +50°С

Антенная система и приемно-передающий модуль (ППМ) располагаются на открытом воздухе. Антенна направлена вертикально вверх. Усилитель, блок АЦП-ЦАП и персональный компьютер с программным обеспечением располагаются в операторском помещении. Через программное обеспечение формируется излучаемый сигнал, который через АЦП-ЦАП, усилитель, ППМ передается на антенну. После излучения сигнала происходит переключение ППМ на прием рассеянного сигнала в течение заданного промежутка времени зондирования. Все это повторяется циклично в непрерывном режиме. Далее в компьютере производится обработка сигнала и визуализация получаемой информации. Внешний вид антенны содара на крыше здания показан на рис. 2. Бленда состоит из жесткого металлического каркаса, обшитого сотовым поликорбанатом. Внутри бленды обклеена листами вспененного пенополиэтилена (ППЭ) толщиной 8 мм, поверх ППЭ наклеен поролон толщиной 80 мм.



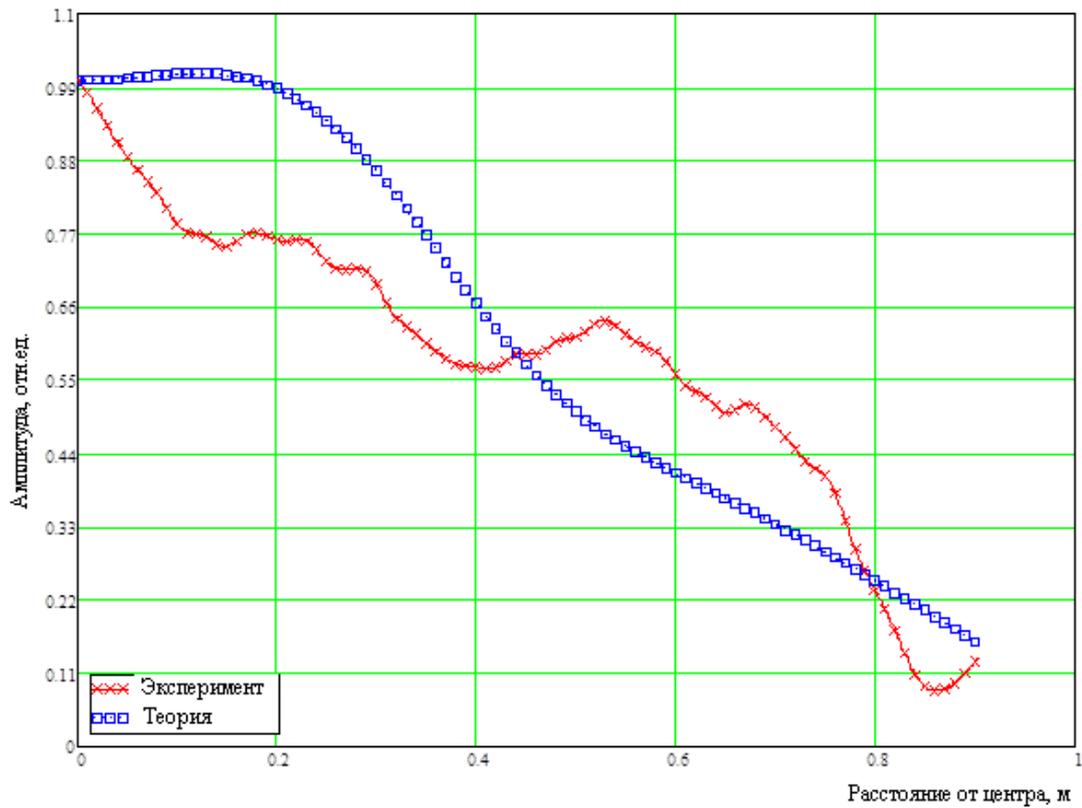
Рис. 2. Антенна содара «Звук-4»

Исследования характеристики направленности антенны содара было проведено на основе результатов измерения распределения поля звукового давления по излучающей апертуре. Выбор данного способа определения ДН обусловлен конструктивными особенностями антенны содара (большие габаритные размеры, а также отсутствие поворотного механизма). Измерения проводились по следующей схеме:

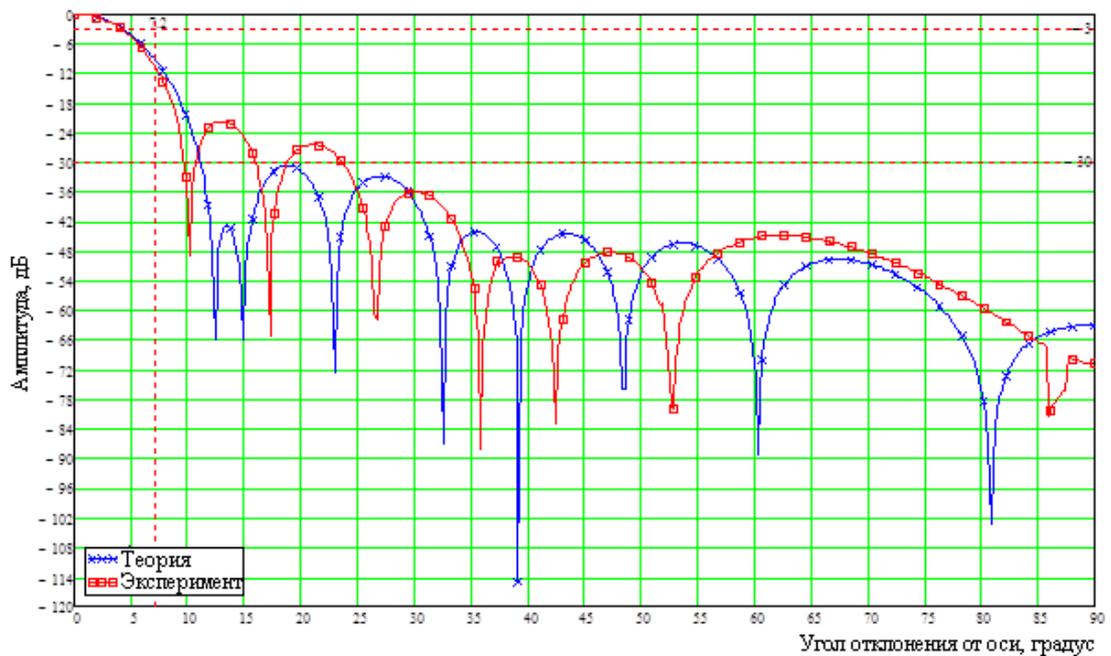
1. Микрофон закреплялся на специально разработанной рейке с возможностью перемещения по ней. Начальное положение микрофона совпадает с осью антенны.
2. С помощью программного обеспечения компьютера на вход усилителя подавался сигнал для излучения содаром.
3. Шумомером производилась запись передаваемого сигнала.
4. Микрофон перемещался по радиусу излучающей апертуры антенны (бленды) на следующую измерительную точку и повторялись действия по п. 2 и п. 3.

Далее с помощью специальных программных средств производилась дальнейшая обработка записанных файлов и построение амплитудного распределения поля для заданного диапазона частот. На основе выражения (4) рассчитывалась диаграмма направленности антенны и сравнивалась с теоретическим расчетом.

На рис. 4-6 показаны результаты исследований для следующих рабочих частот локатора: 1600 Гц (рис. 4), 2000 Гц (рис. 5), 2500 Гц (рис. 6).

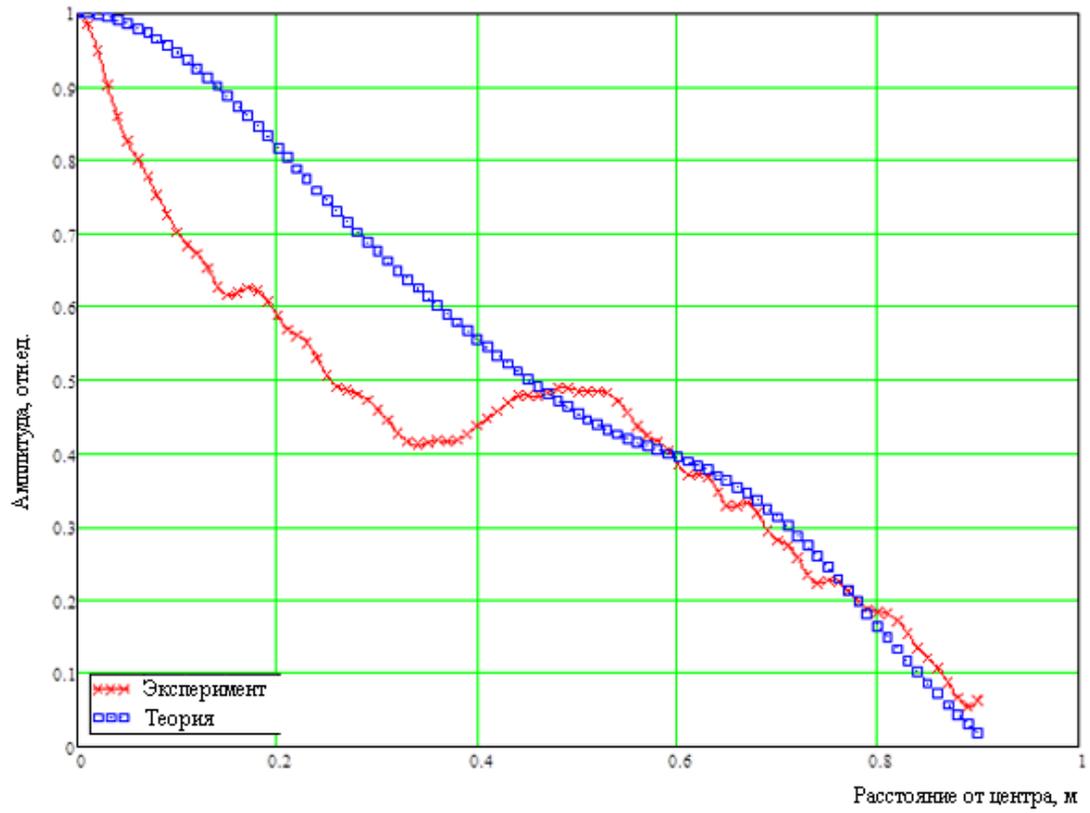


а

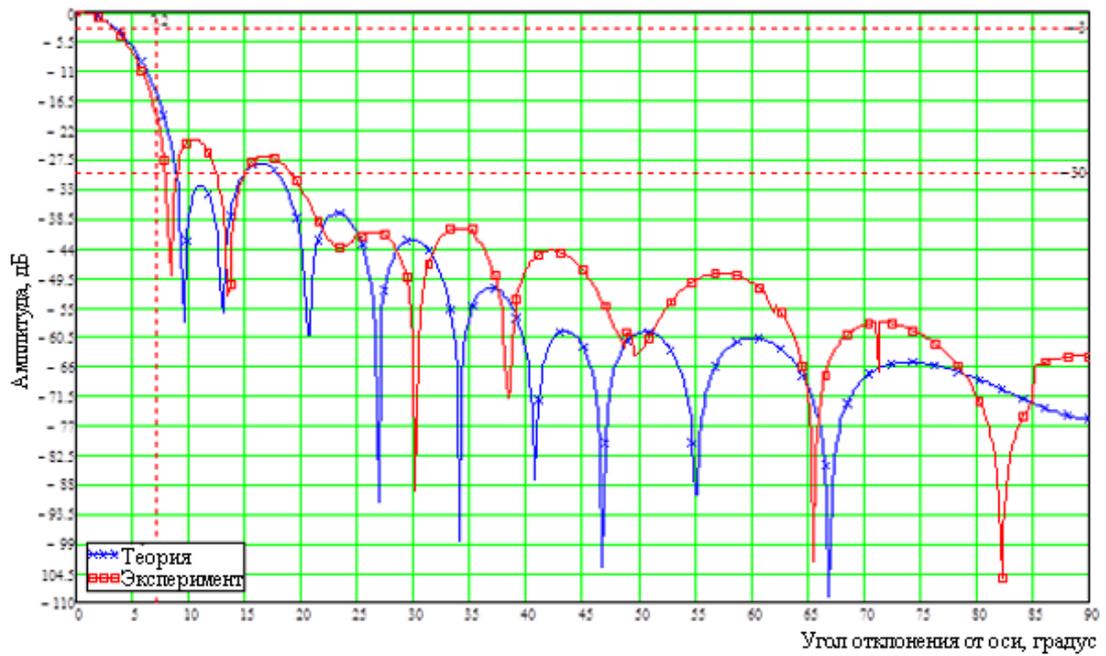


б

Рис. 4. Амплитудное распределение поля и диаграмма направленности антенны на частоте 1600 Гц

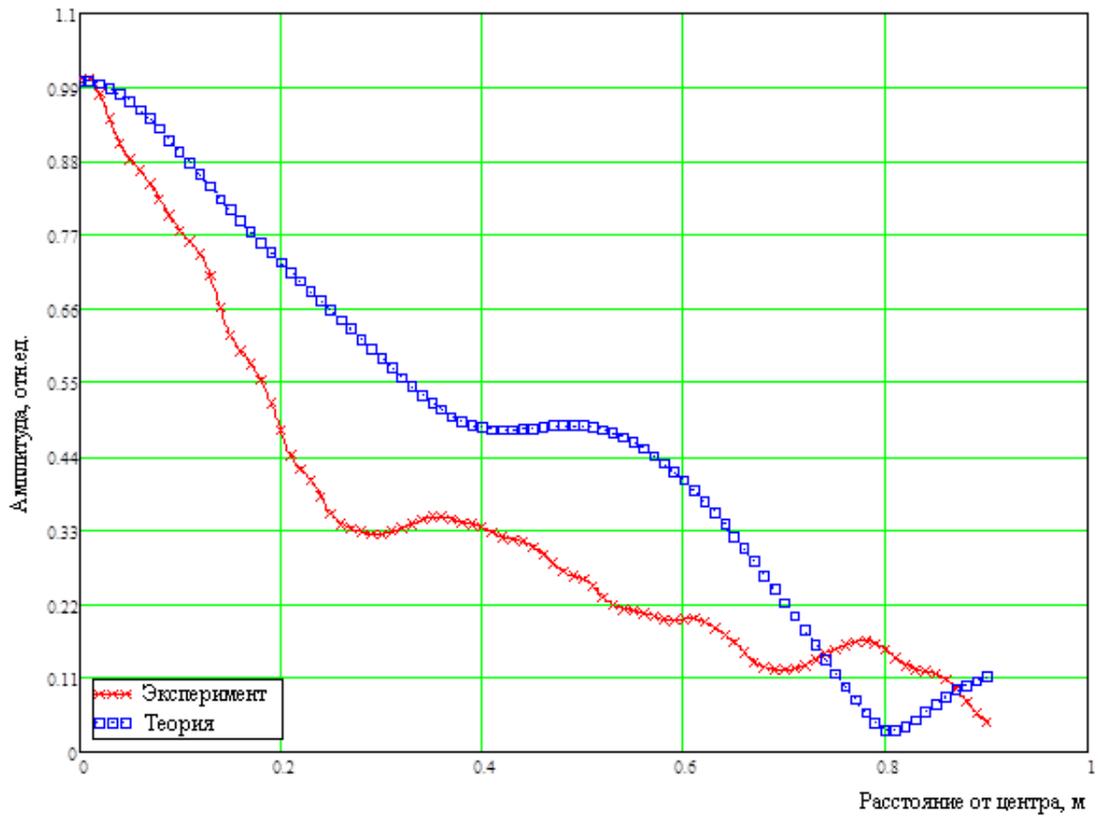


а

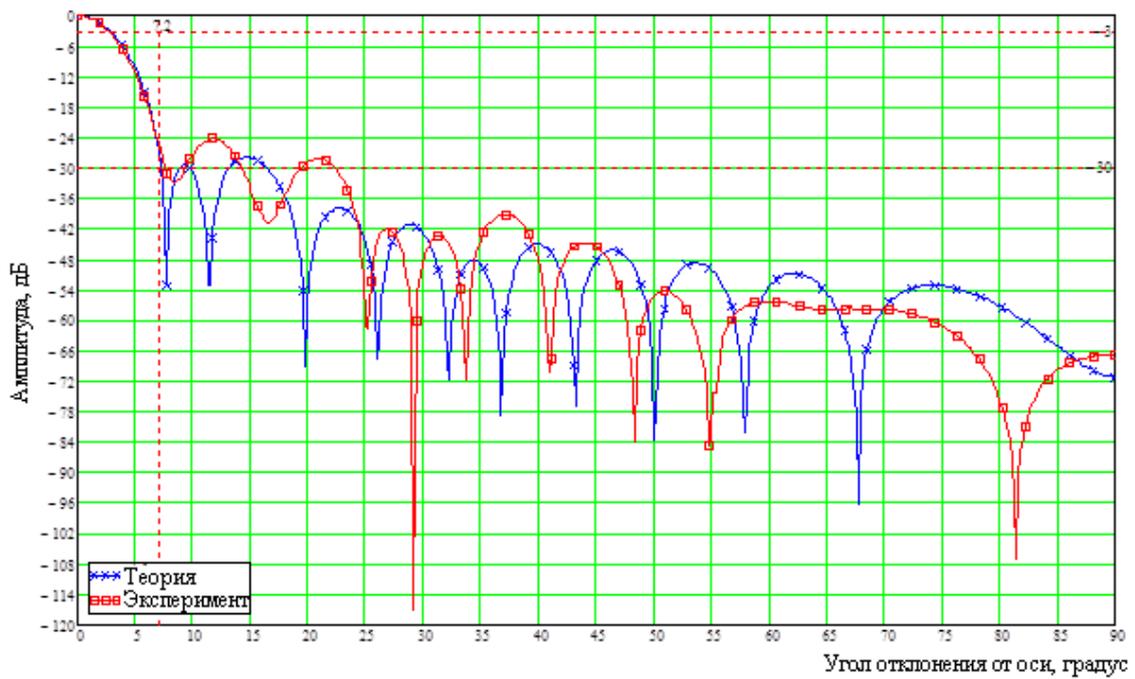


б

Рис. 5. Амплитудное распределение поля и диаграмма направленности антенны на частоте 2000 Гц



а



б

Рис. 6. Амплитудное распределение поля и диаграмма направленности антенны на частоте 2500 Гц

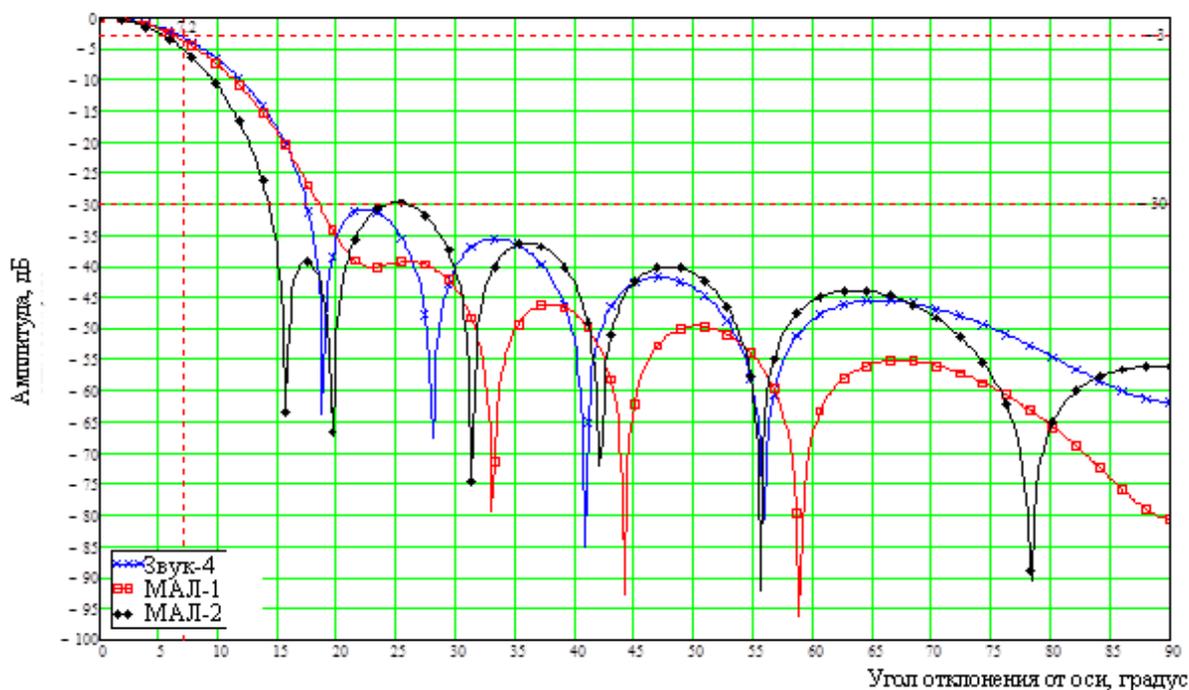


Рис. 7. Диаграммы направленности антенн локаторов «Звук-4», МАЛ-1, МАЛ-2 на частоте 1000 Гц. Теоретический расчет

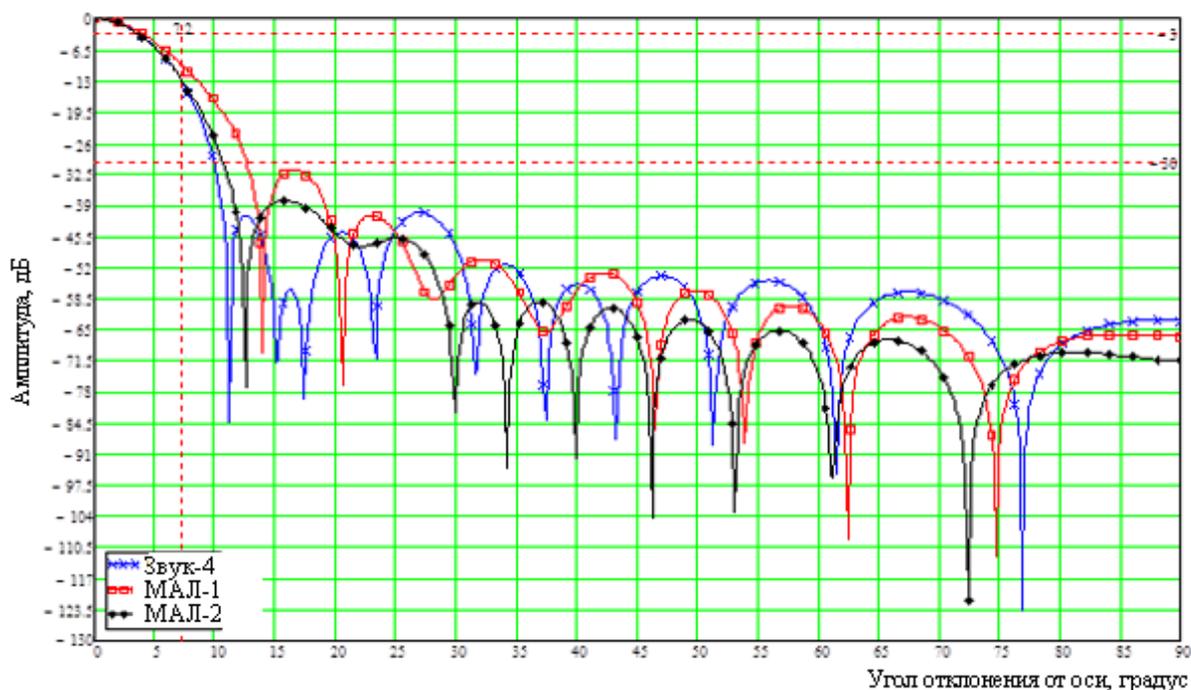


Рис. 8. Диаграммы направленности антенн локаторов «Звук-4», МАЛ-1, МАЛ-2 на частоте 2000 Гц. Теоретический расчет

Из приведенных на рис. 4–6 результатов видно расхождение теоретических и экспериментальных данных по амплитудному распределению поля на апертуре антенны. Возможно, это вызвано плохими звукопоглощающими свойствами материала бленды, что могло привести к дополнительным переотражениям звуковых волн,

которые повлияли на распределение поля по апертуре защищенной антенны, а также затенением зеркала облучателем. Несмотря на это, результаты сравнения теоретической и экспериментальной ДН в целом показали хорошее согласие.

Теоретические расчеты диаграммы направленности для разработанного содара «Звук-4» сравнивались с результатами расчета для антенн акустических локаторов МАЛ-1 и МАЛ-2 [1, 2, 5], использующих также параболические зеркала диаметром 1.5 метра. Геометрические параметры антенн трех содаров для сравнения приведены в табл. 2

Таблица 2. Геометрические параметры антенн

Параметр	Локатор	Звук-4	МАЛ-1	МАЛ-2
Диаметр зеркала, м		1,5	1,5	1,5
Фокусное расстояние, м		0,6	0,43	0,43
Угол раскрытия звукозащитной бленды, градус		5	12	8
Высота звукозащитной бленды, м		1,75	1,6	2,5

В качестве примера на рис. 7 и рис. 8 приведены теоретические расчеты ДН антенн для трех акустических локаторов на частоте 1000 и 2000 Гц. Мы видим, что полученные в результате расчета ДН имеют относительно неплохое совпадение в области главного лепестка и небольшие различия в области бокового излучения. Это объясняется тем, что во всех трех антеннах установлены параболические зеркала одинакового диаметра, и на конечный результат расчета оказывает только параметры звукозащитной бленды.

Заключение

В статье приведены результаты теоретических расчетов и экспериментальных исследований диаграммы направленности акустического локатора Звук-4, проведенные на основе измерений амплитудного распределения поля звукового давления по верхней излучающей апертуре антенны. Также для сравнения сделаны теоретические расчеты звукозащитных бленд для параболических антенн других локаторов.

Полученные результаты показали хорошую согласованность с теоретическими расчетами при построении диаграммы направленности, в области главного лепестка и по уровню бокового излучения. Однако расположение боковых лепестков по теоретическим и экспериментальным данным незначительно расходится. Данный факт скорее всего объясняется старением звукопоглощающего материала бленды, которое приводит к дополнительному переотражению звуковых волн вносящему вклад в амплитудное распределение поля на апертуре антенны.

Результаты получены при частичной финансовой поддержке по проекту ПЧ-14/17 (раздел 07.08) государственного задания Минобрнауки России.

Литература

1. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферы. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение. 1986. 167 с.
2. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя. Томск. 2001. 278 с.
3. Bradley S. Atmospheric Acoustic Remote Sensing: Principles and Applications. (CRC Press Taylor&Francis Group, LLC, London New York). 2008. 265 p.
4. Римский-Корсаков А.В. Электроакустика. М.: Связь, 1973. 272 с.

5. Красненко Н.П., Мананко Е.Е. *Зеркально-параболические акустические антенны для зондирования атмосферы*. Методы и устройства передачи и обработки информации: Межвуз. сб. науч. тр. – Вып.5 / Под ред. В.В. Ромашева, В.В. Булкина. – СПб.: Гидрометеиздат, 2004. – с. 83-98.
6. Adekola S.A. Toward a more general integral formulation of the pressure field of an echo-sonde aperture antenna – J. Acoust. Soc. Am. 1976, V. 60, №1, p. 230-239.
7. Красненко Н.П., Мананко Е.Е. Исследование защищенных зеркально-параболических антенн, «Известия ВУЗов «Физика», Деп. ВИНТИ №. 1406-В2003, 17 июля 2003 г., 78 с.