

В.Ю. Иванов, Н.П. Красненко

## Исследование высокочастотных акустических зеркальных параболических антенн

Институт оптического мониторинга СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 6.11.99 г.

Антенная система, обеспечивающая излучение и прием звукового сигнала, является одной из важнейших составных частей акустического зондирования атмосферы. В настоящее время у нас в стране наибольшее распространение в силу относительной простоты конструкции получили зеркальные параболические антенны. Приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований высокочастотной акустической антенны, предназначенной для зондирования нижних слоев атмосферы до высоты 200 м.

### Введение

Использование звукового излучения для дистанционного акустического зондирования атмосферы имеет давнюю историю [1]. Оно основано на эффектах сильного взаимодействия этих волн с атмосферой, в частности на способности акустических волн рассеиваться на неоднородностях показателя преломления, образованных атмосферной турбулентностью. Оно оказывается намного сильнее, чем для электромагнитных волн большинства областей спектра, и поэтому для зондирования может быть использована относительно простая аппаратура.

Антенна акустического локатора является одной из наиболее важных его частей, в основном и определяющих эффективность работы локатора (дальность зондирования, защиту от внешних шумов и защиту окружающих от звукового излучения). Ее конструкция, размеры, примененные материалы полностью определяют ее эффективность, а в конечном итоге и энергетический потенциал локатора в целом. Основным требованием при разработке любых локационных систем является создание антенн с минимальным уровнем боковых лепестков. Это является особенно актуальным для систем акустического зондирования атмосферы, поскольку сигнал, рассеянный атмосферой, вследствие сильного взаимодействия с последней довольно слаб.

Поставленная задача может быть решена тремя путями. Во-первых, можно использовать антенны с большими эффективными площадями раскрытия, обеспечивающими уровень боковых лепестков  $-50 \dots -60$  дБ при малых углах места. Это требует применения громоздких антенн, что не всегда удобно при практическом использовании. Во-вторых, уровень боковых лепестков можно уменьшить с помощью специальных видов амплитудно-фазовых распределений по апертуре антенны, однако их реализация встречает значительные технические трудности. И, в-третьих, для уменьшения боковых лепестков можно применять звукозащитную бленду (рис. 1).

Целью нашей работы были исследование высокочастотной (частота более 4 кГц) зеркальной параболической акустической антенны и создание, на основе этих исследований, малогабаритной антенны для использования ее при зондировании нижних слоев атмосферы.

### 1. Теоретические исследования

К разрабатываемой антенне были предъявлены следующие требования: ширина диаграммы направленности по уровню половинной мощности в пределах  $7 \dots 15^\circ$ , уровень боковых лепестков в направлении, перпендикулярном акустической оси, не более  $-40$  дБ, под углом  $70^\circ$  от акустической оси – не более  $-35$  дБ. За основу конструкции был выбран наиболее простой – зеркальный тип антенны с параболическим отражателем, снабженной защитной блендой в виде усеченного конуса. Ее вид приведен на рис. 1. В качестве облучателя антенны использована высокочастотная акустическая головка с экспоненциальным рупором, имеющим диаметр раскрытия 76,5 мм.

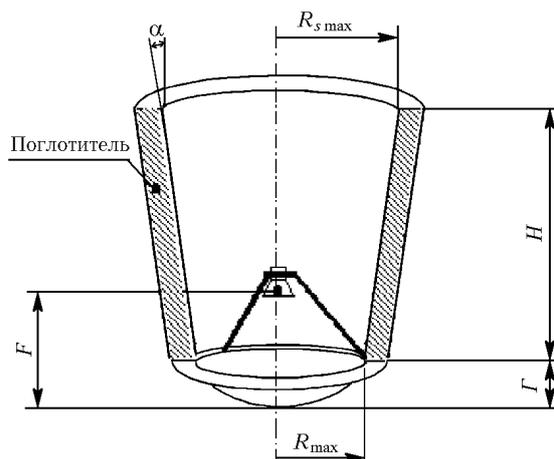


Рис. 1. Акустическая параболическая антенна с рупорным облучателем:  $\alpha$  – угол раскрытия защитной бленды антенны;  $F$  – фокус параболоида;  $\Gamma$  – глубина параболоида;  $H$  – высота защитной бленды;  $R_{\max}$  – максимальный радиус апертуры параболоида;  $R_{s \max}$  – максимальный радиус апертуры защитной бленды

Диаграмма направленности такой антенны (в дальней зоне) определяется модифицированным дифракционным интегралом Кирхгофа [2, 3]:

$$P(\theta) = \pi(1 + \cos\theta) \int_0^{R_s \max} A(R_s) e^{j\varphi(R_s)} J_0(kR_s \sin\theta) R_s dR_s,$$

где  $\theta$  – угол от акустической оси;  $A(R_s) e^{j\varphi(R_s)}$  – амплитудно-фазовое распределение акустического давления по верхней апертуре бленды;  $R_s$  – текущий радиус верхней апертуры;  $k$  – волновое число;  $J_0(\dots)$  – функция Бесселя нулевого порядка.

Распределение звукового давления по верхней (излучающей) апертуре антенны определяется выражением

$$A(R_s) e^{j\varphi(R_s)} = \int_0^{2\pi} \int_0^{R_s \max} A(R) e^{j\varphi(R)} e^{jk(D-H)} \gamma(D) R dR d\Phi,$$

где  $R$  – текущий радиус апертуры параболоида;  $H$  – высота защитной бленды;  $\Phi$  – угол в плоскости апертуры параболического зеркала;  $A(R) e^{j\varphi(R)}$  – распределение поля на апертуре ( $H = 0$ ) незащищенной антенны;

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

$$\gamma(D) = (1 - H/D)/(2D)$$

– коэффициент, учитывающий уменьшение амплитуды с расстоянием  $D$ ;  $RdRd\Phi$  – элемент площади на апертуре антенны.

Множитель  $e^{jk(D-H)}$  описывает изменение фазы акустического сигнала с расстоянием  $D$ . Величина  $A(R) e^{j\varphi(R)}$  описывает амплитудно-фазовое распределение звукового давления по апертуре параболоида. Можно показать, что если в качестве облучателя используется экспоненциальный рупор с диаметром раскрыва, превышающим критический для данной волны (реактивной составляющей излученной волны можно пренебречь), то распределение акустического давления по апертуре параболоида можно представить в виде [4]:

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

где  $\psi(R) = \arctan[R/(F - \Gamma)]$ ;  $e$  – эксцентриситет рупора;  $F$  – фокус параболоида;  $\Gamma$  – глубина параболоида.

Используемый экспоненциальный рупор имеет эксцентриситет  $e = 0,6$ . При расчете геометрических размеров параболического зеркала использовались формулы, связывающие коэффициент усиления параболоида с его геометрическими размерами [5].

Исследования параметров антенны проводились для частоты излучения 4,273 кГц, определяющей первую резонансную частоту используемой головки излучения, имеющей частотный диапазон от 3 до 40 кГц. Вторая резонансная частота рупора составляет 5,25 кГц. Были проведены исследования влияния геометрических размеров защищенной антенны на амплитудно-фазовое распределение (АФР) по верхней апертуре антенны. Размеры антенны менялись с небольшим шагом в области, являющейся оптимальной с точки зрения максимального коэффициента концентрации, требуемого уровня боковых лепестков и ширины диаграммы направленности антенны.

Графики, описывающие изменение АФР в зависимости от высоты звукозащитной бленды, угла раскрыва бленды и радиуса параболического зеркала, приведены ниже. С уменьшением высоты звукозащитной бленды (рис. 2) главный лепесток АФР сужается, а уровень поля на краях апертуры увеличивается, что приводит к росту уровня боковых лепестков и сужению главного лепестка диаграммы направленности антенны. С увеличением высоты звукозащитной бленды уровень поля на краях передающей апертуры уменьшается и, при высоте  $H$ , равной 60 см, становится минимальным, но при этом в районе главного лепестка АФР возникает неравномерность распределения в виде выброса. С увеличением размеров бленды величина выброса растет. Это приводит к увеличению уровня боковых лепестков диаграммы направленности антенны. Таким образом, наиболее оптимальной высотой бленды представляется высота, попадающая в диапазон от 0,532 до 0,545 м.

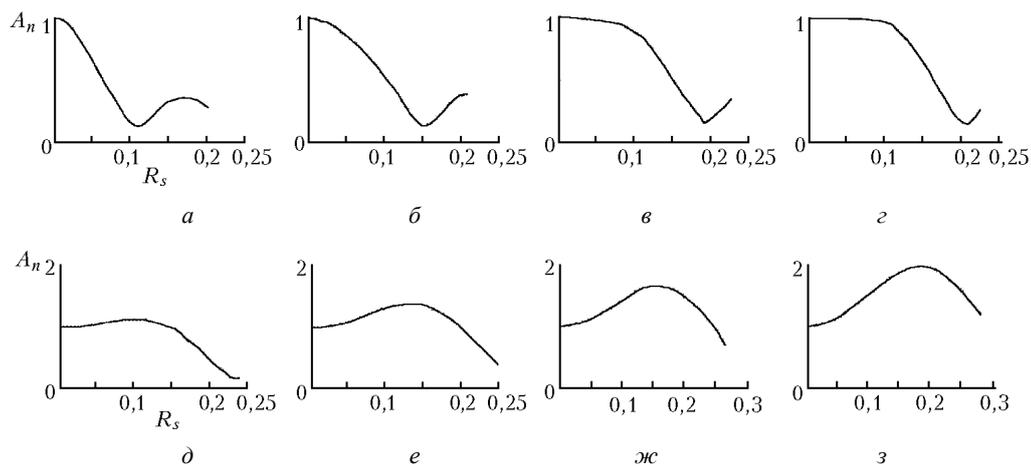


Рис. 2. Нормированная к  $A(0)$  зависимость амплитудного распределения звукового давления по верхней апертуре антенны от высоты бленды  $H$  при глубине зеркала  $\Gamma = 0,047$  м, радиусе зеркала  $R_{\max} = 0,161$  м, фокусном расстоянии 0,13 м и угле раскрыва бленды  $\alpha = 8^\circ$  для  $H = 0,3$  (а), 0,4 (б), 0,5 (в), 0,532 (г), 0,6 (д), 0,7 (е), 0,8 (ж), 0,9 м (з)

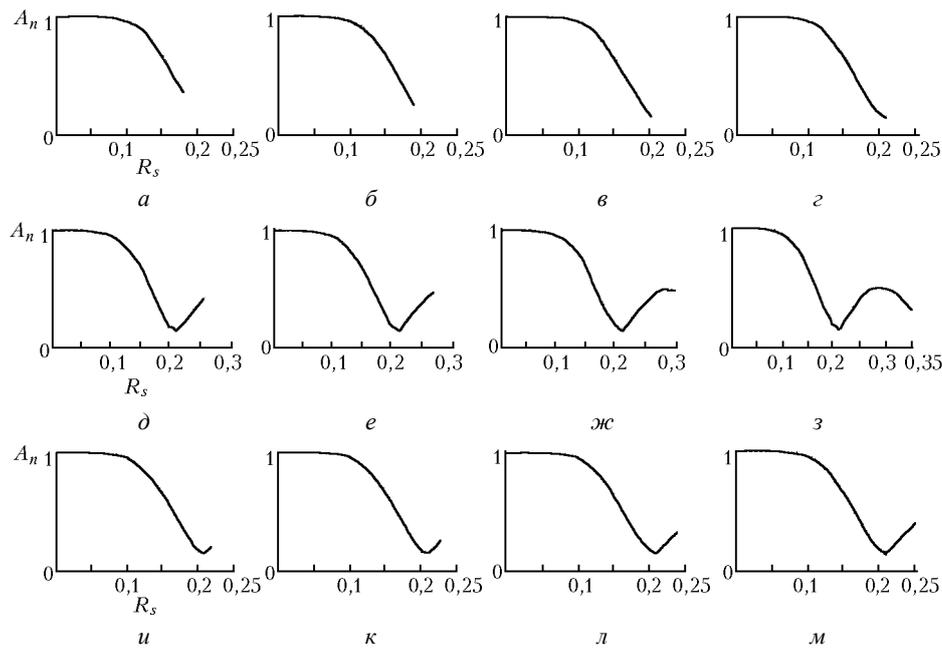


Рис. 3. Нормированная к  $A(0)$  зависимость амплитудного распределения звукового давления по верхней апертуре антенны от угла раскрыва бленды  $\alpha$  при радиусе зеркала  $R_{\max} = 0,161$  м, глубине зеркала  $\Gamma = 0,047$  м, фокусном расстоянии  $0,13$  м и высоте бленды  $H = 0,532$  м: для  $\alpha = 3$  (а), 4 (б), 5 (в), 6 (г), 7 (д), 8 (е), 9 (ж), 10 (з), 11 (и), 12 (к), 15 (л),  $20^\circ$  (м)

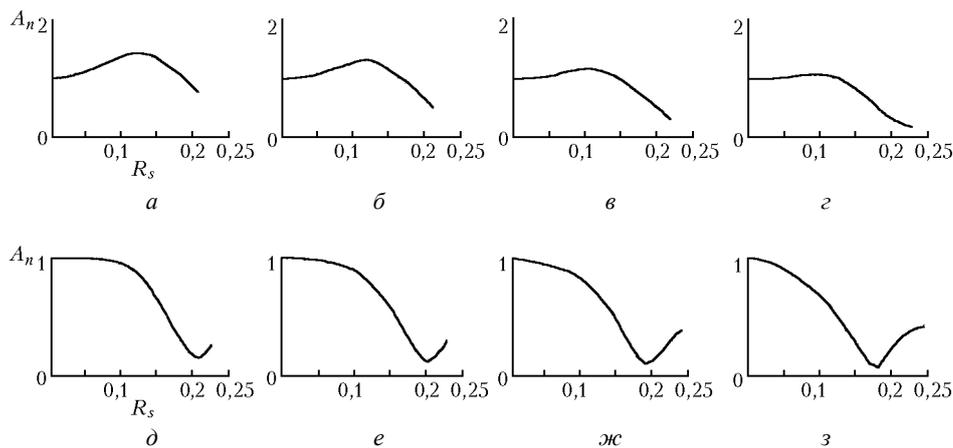


Рис. 4. Нормированная к  $A(0)$  зависимость амплитудного распределения звукового давления по верхней апертуре антенны от радиуса зеркала  $R_{\max}$  при угле раскрыва бленды  $\alpha = 8^\circ$ , глубине зеркала  $\Gamma = 0,047$  м, фокусном расстоянии  $0,13$  м и высоте бленды  $H = 0,532$  м: для  $R_{\max} = 0,14$  (а),  $0,145$  (б),  $0,15$  (в),  $0,155$  (г),  $0,161$  (д),  $0,165$  (е),  $0,17$  (ж),  $0,18$  м (з)

С уменьшением угла раскрыва звукозащитной бленды (рис. 3) уровень поля на краях передающей апертуры уменьшается, но при этом диаграмма направленности антенны приобретает игольчатый вид. С увеличением угла раскрыва уровень поля на краях передающей апертуры увеличивается и соответственно растет уровень боковых лепестков диаграммы направленности антенны. Оптимальной, с точки зрения ширины диаграммы направленности, является область углов раскрыва звукозащитной бленды от  $6$  до  $8^\circ$ .

Исследования по зависимости АФР (рис. 4) от размеров отражающего зеркала показали, что уменьшение размеров зеркала ведет к резкому увеличению уровня поля на краях передающей апертуры и появлению выброса. С увеличением размеров зеркала величина выброса вместе с уровнем поля на краях передающей апертуры

снижается. С дальнейшим увеличением размеров зеркала величина выброса становится равной нулю, но при этом происходит рост уровня поля на краях излучающей апертуры. Оптимальными, с точки зрения равномерности характеристики и уровня поля на краях излучающей апертуры, являются размеры зеркала, попадающие в диапазон от  $155$  до  $165$  мм.

В соответствии с вышеизложенными результатами исследований за основу при изготовлении антенны были приняты следующие параметры:

радиус параболического зеркала $R_{\max}$ , м . . . . .	0,161
глубина зеркала, м . . . . .	0,047
фокусное расстояние зеркала, м . . . . .	0,13
высота звукозащитной бленды $H$ , м . . . . .	0,532
угол раскрыва звукозащитной бленды $\alpha$ , град . . . . .	8

## 2. Экспериментальные исследования

По ходу изготовления антенны на частоте 4,273 кГц были сняты диаграммы направленности антенны на различных стадиях ее изготовления. Измерения проводились в дальней зоне антенны (на расстоянии 5 м) в безветренную погоду. Усредненные результаты измерений представлены ниже.

На рис. 5 показаны экспериментальные диаграммы направленности, снятые с двумя типами держателей облучающей головки, имеющих различные габариты.

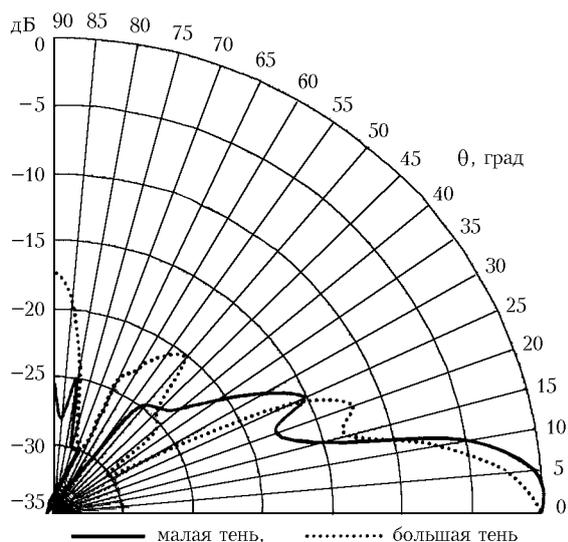


Рис. 5. Диаграммы направленности антенны при разных размерах затеняющей области

Таким образом, удалось оценить влияние затененности зеркала на вид диаграммы направленности. Из рис. 5 видно, что с уменьшением габаритов облучателя снижается уровень боковых лепестков и несколько расширяется главный лепесток диаграммы направленности антенны.

Для удобства сопоставления диаграмм направленности антенны на различных стадиях изготовления на рис. 6 показаны теоретическая диаграмма направленности защищенной антенны, экспериментальные диаграммы направленности параболического зеркала и защищенной антенны с применением поглотителя и без него. Одна экспериментальная диаграмма соответствует звукозащитной бленде без поглотителя, для второй в качестве поглощающего материала используются вспененный полиэтилен и поролон, и третья, для сравнения, соответствует диаграмме направленности параболического зеркала с малой областью затенения. Облицовка бленды была сделана из стеклопластика.

Как видно из рис. 6, применение поглотителя позволяет уменьшить боковые лепестки в среднем на 15–20 дБ.

Следует заметить, что при отсутствии поглотителя расширяется главный лепесток (ширина диаграммы направленности составляет 25°), уровень первого бокового лепестка также очень высок – 11,5 дБ. С применением поглотителя подавление первого бокового лепестка составляет 34,8 дБ, а ширина диаграммы направленности защищенной антенны с поглотителем по уровню половинной мощности совпадает со значением теоретической. В целом диаграмма направленности защищенной антенны с поглотителем довольно близко повторяет форму теоретической.

При этом уровень подавления первого бокового лепестка, по сравнению с теоретической диаграммой направленности, оказался значительно больше и составил примерно 25 дБ. Уровень подавления боковых лепестков реальной антенны под углом 70–75° также оказался немного выше теоретических расчетов (в среднем на 5–6 дБ). В направлении акустической оси на расстоянии 1 м от антенны уровень звукового давления составил 118,3 дБ, теоретический коэффициент усиления антенны  $K_y = 10,07$  и коэффициент концентрации  $K_k = 101,404$ .

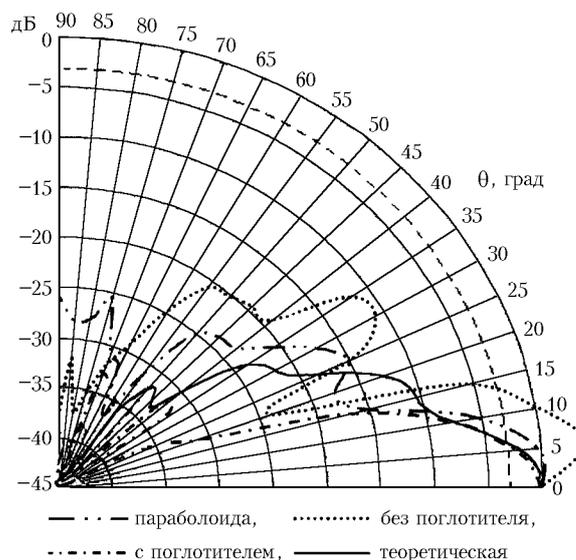


Рис. 6. Диаграммы направленности акустической антенны: параболического зеркала, защищенной антенны без поглотителя, защищенной антенны с поглотителем, теоретически защищенной антенны

Учитывая, что на облучатель подавалась мощность около 1 Вт, а максимально допустимая мощность в непрерывном режиме составляет 150 Вт (в импульсном 200 Вт), можно предположить, что максимальное звуковое давление в направлении акустической оси для данной антенны составит приблизительно 140...150 дБ при непрерывном излучении, что позволит использовать ее в атмосферных исследованиях.

### Заключение

Высокочастотная акустическая параболическая защищенная антенна прошла испытания и на частоте 4,273 кГц показала хорошие характеристики, отвечающие исходным требованиям, необходимым для работы ее в составе акустического локатора для зондирования атмосферы.

1. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферы. Новосибирск: Наука, 1986. 167 с.
2. Strand O.N. // J. Acoust. Soc. Am. 1971. V. 49. № 6. Part 1. P. 1698 – 1703.
3. Adecola S.A. // J. Acoust. Soc. Am. 1976. V. 60. № 1. P. 230 – 239.
4. Римский-Корсаков А.В. Электроакустика. М.: Связь, 1973. 272 с.
5. Красненко Н.П., Роом А.Г. Исследование защищенных параболических антенн акустических локаторов. Томск, 1989. 26 с. Деп. в ВИНТИ 06.02.1989, № 766-В89 ДЕП.

*V.Yu. Ivanov and N.P. Krasnenko. Investigation of high-frequency acoustic mirror parabolic antennas.*

The antenna system intended for emission and reception of acoustic signals is one of the main parts of an acoustic radar. At present, in our country the parabolic reflectors are gaining wide acceptance due to relative simplicity of their design. In the present report, the results of theoretical and experimental investigations of a high-frequency acoustic mirror parabolic antenna intended for sounding the lower atmospheric layers at altitudes up to 200 m are presented.