ФИЗИКА ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

УДК 551.501.7+621.396.67
EDN: RHNXDM

©И. А. Рыбаков, Н. П. Красненко, 2026

АДАПТИВНЫЕ ЗЕРКАЛЬНО-ПАРАБОЛИЧЕСКИЕ АНТЕННЫ ДЛЯ СИСТЕМ АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

Рассматривается метод повышения помехоустойчивости зеркально-параболических антенн содаров на основе применения дополнительных парциальных каналов (ДПК) приема. Метод основан на принципе адаптивной компенсации боковых лепестков диаграммы направленности антенны. Основной облучатель выполняет функции излучения зондирующего импульса и приема полезного сигнала, тогда как дополнительные приемные элементы, смещенные из фокуса параболоида, принимают только помеховые составляющие, проникающие через боковые лепестки. На основе уравнения локации, дифракционного интеграла Кирхгофа и условий пространственно-временно́й адаптации проведены аналитические оценки выигрыша в отношении сигнал/шум. Показано, что введение ДПК-канала обеспечивает дополнительное подавление помех, теоретический верхний предел которого составляет от 14 до 36 дБ в зависимости от углового положения источника помехи, и транслируется в увеличение максимальной дальности зондирования до 1.5 раз. Отмечено, что реально достижимый выигрыш ограничен собственным шумом приемных каналов и погрешностью адаптации, а также пространственной когерентностью источника помехи: метод эффективен для локально когерентных (точечных) помех и требует дополнительного исследования для диффузных источников, таких как ветровой шум и осадки. Предложенный подход не требует перехода к полноценной антенной решетке и может быть реализован на базе существующих зеркально-параболических антенн содаров.

Ключевые слова: содар, акустическое зондирование, параболическая антенна, дополнительные парциальные каналы, адаптивная компенсация, боковые лепестки, атмосферный пограничный слой

ВВЕДЕНИЕ

Акустические локаторы (содары) являются одним из основных средств дистанционного зондирования атмосферного пограничного слоя (АПС). Они позволяют в реальном времени получать профили скорости ветра, температурную стратификацию и характеристики турбулентности в диапазоне высот от нескольких десятков до 1000–1500 м [1–3]. Принцип работы основан на рассеянии акустических волн на неоднородностях показателя преломления, образуемых атмосферной турбулентностью, — сечение рассеяния для акустических волн примерно на шесть порядков величины превосходит соответствующую характеристику для электромагнитных волн оптического диапазона [2].

Антенная система содара является одним из ключевых элементов, определяющих энергетический потенциал прибора, дальность зондирования и защищенность от внешних акустических помех. В отечественных разработках — приборах серии "Звук" (Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Приложение, рис. П1, П2), МАЛ-1, МАЛ-2 и др. — традиционно применяются зеркально-параболические антенны с рупорными облучателями и звукозащитными блендами [3, 4–6].

Несмотря на широкое распространение антенных решеток в существующих содарах [7–11], зеркальные параболические антенны сохраняют преимущества в части простоты конструкции, высокого коэффициента усиления и совместимости с существующим парком оборудования. Параболические антенны получили широкое распространение не только в научно-исследовательских разработках [4–6, 12–15], но и в современных коммерческих системах [16]. Системы акустического зондирования с параболическими антеннами представлены в Приложении на рис. П3, П4.

Существенным фактором, ограничивающим помехоустойчивость моностатических содаров, является наличие боковых лепестков диаграммы направленности, через которые в приемный тракт поступают сигналы от источников помех. К таким источникам относятся транспортные средства, местные объекты, аэродинамические шумы, возникающие при воздействии ветра на элементы конструкции, а также шумы, обусловленные атмосферными осадками. Согласно данным эксплуатации, эти помехи являются главной причиной снижения доступности данных, особенно в условиях

городской среды и на площадках ветроэнергетических установок [12, 13].

В настоящей работе предлагается метод адаптивной компенсации боковых помех путем введения дополнительных парциальных каналов (ДПК) приема, реализованных на базе приемных элементов, смещенных из фокуса параболоида. Основной облучатель выполняет функции излучения и приема полезного сигнала и помех; дополнительные приемные элементы осуществляют только прием помеховых компонент [14–15].

ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАБОЛИЧЕСКИХ АНТЕНН В СИСТЕМАХ АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Зеркально-параболические антенны с рупорными облучателями и звукозащитными блендами широко применяются в содарах со времен первых разработок. Теоретические и экспериментальные исследования высокочастотных параболических антенн для зондирования нижних слоев атмосферы, проведенные в Институте оптического мониторинга СО РАН, показали возможность достижения уровня боковых лепестков –34.8 дБ при использовании звукопоглощающих вкладышей из вспененного полиэтилена и поролона [4].

Диаграмма направленности рассчитывается посредством модифицированного дифракционного интеграла Кирхгофа [4, 6]:

$$P(\theta)=\pi(1+\cos\theta)\times \times \int_0^{R_{s,\max}} A(R_s)\exp\left[\mathrm{j}\varphi(R_s)\right]J_0(k R_s \sin\theta) R_s \,\mathrm{d}R_s, \quad (1)$$

где θ — угол от акустической оси; $A(R_s) = \exp[\mathrm{j}\varphi(R_s)]$ — амплитудно-фазовое распределение (АФР) по верхней апертуре бленды; R_s — текущий радиус; $k = 2\pi / \lambda$ — волновое число; J_0 — функция Бесселя; φ — фазовое распределение по верхней апертуре бленды.

АФР по верхней (излучающей) апертуре защищенной антенны определяется с использованием дифракционного интеграла Кирхгофа с учетом поглощающих свойств стенок бленды:

$$A(R_s)\exp\left[\mathrm{j}\varphi(R_s)\right] = (\mathrm{j}/\pi)\int_0^{2\pi}\int_0^{R_{s,\max}} A(R)\exp\left[\mathrm{j}\varphi(R)\right]\times \times \exp\left(-\mathrm{j}k\left[D-H\right]\right)\gamma(D) R \,\mathrm{d}R\,\mathrm{d}\Phi, \quad (2)$$

где R — текущий радиус апертуры параболоида; H — высота бленды; Ф — угол в плоскости апертуры; $D=\sqrt{R^2\sin^2\Phi+\left(R_s-R\cos\Phi\right)^2+H^2}$; $\gamma(D)=(1+H/D)/(2D)$ — коэффициент уменьшения амплитуды с расстоянием D.

Амплитудное распределение по апертуре параболоида от рупорного облучателя с эксцентриситетом e записывается как [4, 6]:

$$A(R)\exp\left[\mathrm{j}\varphi(R)\right] = \frac{(1-e^2)\cos(\psi(R))}{1-e^2\cos^2(\psi(R))}\times\left[1+\cos(\psi(R))\right]/2, \quad (3)$$

где $\psi(R)=2\,\mathrm{arctg}\left[R/(2F)\right]$ — угол раскрыва параболоида; F — фокусное расстояние зеркала.

Для содара "Звук-4" с параметрами: диаметр зеркала 1.5 м, F = 0.6 м, высота бленды 1.75 м, угол раскрыва бленды 5°, несущая частота 1800 Гц [6] — экспериментально подтверждено хорошее соответствие теоретических расчетов и измеренных диаграмм направленности (ДН) как по главному лепестку, так и по уровню бокового излучения. Аналогичный подход применялся при разработке высокочастотной антенны для зондирования нижних слоев атмосферы с частотой 4273 Гц и параметрами зеркала $R_{\max}$ = 0.161 м, F = 0.13 м, H = 0.532 м [4].

ПРИНЦИП АДАПТИВНОЙ КОМПЕНСАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДПК

Важно подчеркнуть, что предлагаемый метод не изменяет физическую диаграмму направленности основного зеркально-параболического рефлектора и, соответственно, не снижает уровень его боковых лепестков как таковых. Подавление помех достигается на этапе последующей цифровой обработки принятых сигналов — путем когерентного вычитания оценки помеховой компоненты, полученной по дополнительным каналам, из сигнала основного канала. В предлагаемой схеме основной рупорный облучатель, расположенный в фокусе параболоида, выполняет функции излучения зондирующего акустического импульса и приема рассеянного атмосферой сигнала. N дополнительных каналов, смещенных из фокуса в поперечном ($L_{x,i}$) и продольном ($L_{z,i}$) направлениях, работают только в режиме приема. Адаптивный фильтр формирует оценку помеховой компоненты и затем вычитает ее из основного канала:

$$y(t)=x_0(t)-\sum_{i=1}^{N} w_i \cdot x_i(t), \quad (4)$$

где $x_0(t)$ — сигнал основного канала; $x_i(t)$ — сигнал i-го ДПК-канала; w_i — комплексные адаптивные веса.

Расстояние L_0 между фазовыми центрами основного и i-го ДПК-облучателей ограничивает полосу частот, в которой возможна эффективная адаптивная компенсация. Физическая причина этого ограничения состоит в следующем: помеха, приходящая под углом $\Theta_{\text{помех}}$ к нормали апертуры, достигает основного и ДПК-облучателей с разностью хода $L_0\sin\Theta$, что порождает временну́ю задержку:

$$\Delta\tau = L_0 \sin\Theta_{\text{помех}} / c. \quad (5)$$

Адаптивный фильтр осуществляет когерентное вычитание взвешенного сигнала ДПК-канала из основного канала. Это вычитание эффективно лишь при высокой взаимной корреляции помеховых сигналов в двух каналах. Функция взаимной корреляции широкополосного сигнала с полосой Δf имеет характерную ширину порядка $1/\Delta f$, поэтому необходимым условием высокой корреляции является:

$$\Delta\tau \ll 1 / \Delta f \quad (6)$$

или в развернутой форме:

$$L_0 \sin\Theta_{\text{помех}} / c \ll 1 / \Delta f, \quad (7)$$

где c = 343 м/с — скорость звука; Δf — ширина спектра сигнала помехи.

По данным экспериментальных исследований, для антенны содара "Звук-4" на частоте 1800 Гц уровень ближних боковых лепестков составляет порядка –25…–35 дБ относительно максимума главного лепестка. На частоте 2500 Гц достигается подавление –30…–40 дБ. Для эффективной адаптивной компенсации ДН ДПК-канала в направлении k-го бокового лепестка должна превышать уровень этого лепестка основной ДН:

$$G_{\{\text{ДПК}\}}(\theta_k) > G_0(\theta_k), \quad (8)$$

где $G_0(\theta_k)$ — усиление основной антенны в направлении θ_k бокового лепестка (в абсолютных единицах). Для смещенного облучателя максимум ДПК-канала направлен в $\theta_k \approx \delta\theta$, поэтому вблизи первого бокового лепестка ($\theta_1 \approx 10$–$15°$) необходимо обеспечить смещение ДПК-облучателя:

$$L_x \approx F\ \text{tg}(\theta_1) = 0.6\ \text{tg}(12°) \approx 0.12\,\text{м}. \quad (9)$$

Левая часть неравенства (7) характеризует геометрическую задержку между каналами, правая — время корреляции помехового сигнала. При нарушении условия (7) задержка $\Delta\tau$ становится сравнимой с периодом корреляции помехи, взаимная корреляция сигналов в каналах стремится к нулю, адаптивная компенсация утрачивает эффективность.

Для содара "Звук-4" при f_0 = 1800 Гц, смещении ДПК-облучателя из (9) L_x = 0.12 м, θ_1 = 12° и Δf = = 300 Гц: $\Delta\tau = L_0 \sin\Theta_{\text{помех}} / c = 0.12\,(\sin 12°) / 343 \approx$ $\approx$ 0.07 мс $\ll$ 3.5 мс, что подтверждает выполнение условия (7) с запасом более чем на порядок.

АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ АДАПТИВНОЙ АНТЕННЫ

Рассмотрим сценарий, при котором источник помехи, расположенный в направлении $\Theta_{\text{помех}}$ = = 12° от оси, создает на входе основного канала мощность помехи $P_{\text{п}}$. Аналогичный сигнал принимается i-м ДПК-каналом с мощностью $P_{\text{п}i}$. После оптимальной весовой компенсации (4) остаточная помеха на выходе адаптивного фильтра:

$$P_{\{\text{п,ост}\}} = P_{\text{п}} \cdot \left(1 - |\rho|^2\right), \quad (10)$$

где ρ — коэффициент корреляции помеховых сигналов в основном и ДПК-каналах.

При высокой корреляции ($|\rho| \to 1$), достигаемой при выполнении условия (7), теоретический выигрыш по отношению сигнал/шум (SNR), обеспечиваемый адаптивным компенсатором, определяется выражением:

$$\Delta\text{SNR}_{\{\text{адапт}\}} = -10\ \lg\left(1 - |\rho|^2\right)[\text{дБ}]. \quad (11)$$

Выражение (11) задает теоретический верхний предел выигрыша, достижимый при идеальной оценке весов w_i и бесконечном времени усреднения адаптивного фильтра. На практике данный предел не достигается по двум причинам. Во-первых, дополнительные ДПК-каналы вместе со своими малошумящими предусилителями вносят собственный электронный шум, который присутствует на выходе компенсатора независимо от качества адаптации и не входит в модель (10), (11). Во-вторых, при конечном времени усреднения и конечном шаге адаптации оценка весов w_i всегда содержит ошибку, приводящую к дополнительной остаточной помехе — т.н. шуму рассогласования [19], — которая складывается с остаточной помехой (10). Совокупность этих факторов означает, что реально достижимый выигрыш ΔSNR всегда ниже теоретического предела (11) и приведенные далее численные оценки следует трактовать, как верхнюю границу, а не как гарантированный практический результат. Количественная оценка вклада собственного шума каналов и шума рассогласования требует данных о конкретной реализации адаптивного алгоритма и предусилительного тракта и выходит за рамки настоящей работы.

Табл. 1. Оценка Δ SNR (дБ) в зависимости от угла прихода помехи $\Theta_{\text{помех}}$ при $\Delta f = 300$ Гц

Параметры сигнал-помеха	$\Theta_{\text{помех}}$							
	5°	15°	20°	30°	40°	50°	70°	90°
ρ	0.99986	0.99879	0.99788	0.99547	0.99252	0.98940	0.98407	0.98198
Δ SNR, дБ	35.6	26.2	23.7	20.4	18.3	16.8	15.0	14.5

Оценим $|\rho|$ при смещении ДПК-элемента $L_0 = 0.12$ м для помехи с шириной спектра $\Delta f = 300$ Гц. Нормированная функция взаимной корреляции гармонического сигнала с шириной полосы Δf:

$$|\rho| = \operatorname{sinc}(\pi \Delta f \Delta\tau) = \\ = \operatorname{sinc}(\pi \cdot 300 \cdot 0.07 \cdot 10^{-3}) \approx 0.99921. \qquad (12)$$

Тогда

$$\Delta \text{SNR}_{\{\text{адапт}\}} = -10 \lg(1-0.99921^2) = \\ = -10 \lg(0.001579) \approx 28 \text{ дБ}.$$

Выигрыш по помехозащищенности относительно одноканальной системы с блендой оценивается в 28 дБ для рассмотренного сценария помехи и зависит от ее угловой структуры.

Приведенная оценка выполнена для угла прихода помехи $\Theta_{\text{помех}} = 12°$. Поскольку в общем случае угол прихода помехи относительно акустической оси заранее не известен и может изменяться в диапазоне от 0° (помеха вблизи главного лепестка) до 90° (помеха со стороны, перпендикулярной оси антенны), была выполнена оценка $\Delta \text{SNR}(\theta)$ во всем этом диапазоне при фиксированной полосе $\Delta f = 300$ Гц (табл. 1). Расчет показывает, что выигрыш монотонно убывает с ростом $\Theta_{\text{помех}}$ — от ≈35.6 дБ при $\Theta_{\text{помех}} = 5°$ до ≈14.5 дБ при $\Theta_{\text{помех}} = 90°$ — вследствие роста геометрической задержки $\Delta\tau = L_0 \sin\Theta_{\text{помех}} / c$ и соответствующего снижения корреляции ρ между каналами. Даже в наихудшем случае ($\Theta_{\text{помех}} \to 90°$) выигрыш остается практически значимым и составляет не менее 14 дБ.

Принятая мощность основного канала содара P_r, в соответствии с уравнением локации, составляет:

$$P_r = P_t \sigma(\theta)(c\tau/2) A_r L R_{\text{з}}^{-2} \exp(-2\alpha R_{\text{з}}), \qquad (13)$$

где P_t — мощность излучаемого импульса; $\sigma(\theta)$ — сечение рассеяния атмосферы; τ — длительность импульса; $A_r = \pi D^2/4$ — эффективная площадь апертуры; L — комплексный коэффициент, учитывающий коэффициент усиления антенны и эффективность тракта; $R_{\text{з}}$ — высота зондирования; α — коэффициент акустического поглощения [Нп/м].

Коэффициент акустического поглощения a рассчитывался по методике ISO 9613-1 [20]. Для температуры воздуха 20 °C, относительной влажности 70 % и частоты 1800 Гц — получено значение $\alpha \approx 2.8 \cdot 10^{-3}$ Нп/м (0.024 дБ/м).

Показанный выигрыш в отношении сигнал / шум (ОСШ) на 28 дБ непосредственно транслируется в увеличение максимальной дальности зондирования. В соответствии с уравнением локации (13) принятая мощность убывает по закону $R_{\text{з}}^{-2}$ (при пренебрежении поглощением), поэтому теоретический предел выигрыша по дальности K_0 составляет

$$K_0 = \sqrt{10^{(\Delta\text{SNR}/10)}} \approx 25.1. \qquad (14)$$

Однако на рабочей частоте 1800 Гц акустическое поглощение $\alpha \approx 2.8 \cdot 10^{-3}$ Нп/м (0.024 дБ/м), что создает значительные двухпутевые потери $-2\alpha R_{\text{з}} \approx 48.6$ дБ уже на дальности 1000 м. Этот фактор доминирует и существенно ограничивает достижимый выигрыш.

С учетом указанного фактора для содара "Звук-4" с базовой дальностью зондирования $R_{\text{з},0} = 1000$ м расчетная дальность после адаптации составляет $R_{\text{з,а}} \approx 1503$ м, то есть выигрыш по дальности составляет $\Delta R_{\text{з}} \approx 503$ м (коэффициент $K \approx 1.50$). Для других угловых положений помехи (табл. 1) значение K будет соответственно изменяться в диапазоне от ≈1.15 (при $\Theta_{\text{помех}} \to 90°$, $\Delta \text{SNR} \approx 14.5$ дБ) до ≈2.0 (при $\Theta_{\text{помех}} = 5°$, $\Delta \text{SNR} \approx 35.6$ дБ). Результаты численного расчета приведены на рис. 1 и 2.

КОНСТРУКТИВНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ДПК В СОСТАВЕ СОДАРА

Конструкция предполагаемой системы строится на базе антенны содара "Звук-4" с параметрами, приведенными в табл. 2, без изменения основного параболического рефлектора и звукозащитной бленды. Три ДПК располагаются на общей стойкедержателе основного облучателя со смещением из фокуса на величины $L_{x,i} = 0.12$ м (поперечное) и $L_{z,i} = 0.05$ м (вдоль оси).



Рис. 1. Зависимость ОСШ от высоты зондирования для базовой и адаптивной антенн содара.
Нормировка: ОСШ = 0 дБ при $R_з = R_0 = 1000$ м для базовой системы

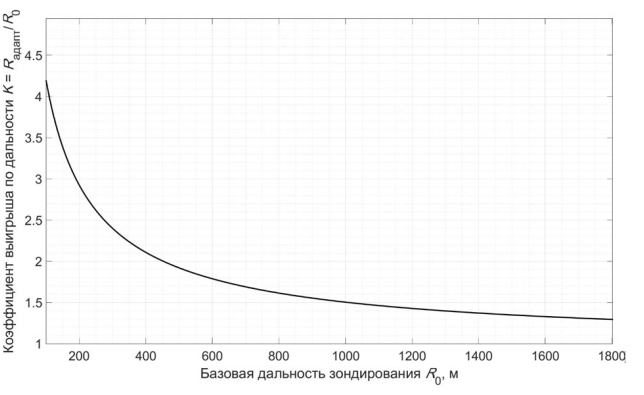

Рис. 2. Коэффициент выигрыша по дальности K в зависимости от базовой дальности зондирования при Δ ОСШ = 28 дБ

Табл. 2. Технические характеристики базового содара "Звук-4"

Параметр	Значение
Диаметр параболического зеркала, м	1.5
Фокусное расстояние зеркала, м	0.6
Высота звукозащитной бленды, м	1.75
Угол раскрыва бленды, °	5
Несущая частота, Гц	1800
Длина волны, м	0.191
Максимальная высота зондирования, м	1000
Минимальная высота зондирования, м	34
Разрешение по высоте, м	17

Азимутальные углы смещений: $\varphi_1 = 0°$, $\varphi_2 = 120°$, $\varphi_3 = 240°$. В качестве ДПК могут использоваться широкополосные микрофоны с чувствительностью не хуже –30 дБ / Па в диапазоне 500–5000 Гц.

На рис. 3 показана конфигурация защищенной зеркально-параболической антенны, в фокусе которой находится микрофон с рупорным облучателем, а на расстоянии $L_{x,i} = 0.12$ м и $L_{z,i} = 0.05$ м относительно основного облучателя дополнительный канал приема.

При смещении ДПК из фокуса на величину L_x поперек оси в раскрыве параболоида возникает линейная фазовая добавка, пропорциональная R, что приводит к отклонению максимума ДН дополнительного канала от акустической оси на угол

$$\delta\theta_i = \operatorname{arctg}\left(L_{x,i} / F\right). \qquad (15)$$

Для $F = 0.6$ м и $L_x = 0.12$ м получаем $\delta\theta = \operatorname{arctg}(0.12/0.6) \approx 11.3°$. Таким образом, ДПК-канал формирует ДН, максимум которой направлен в область ближних боковых лепестков основной антенны. Дополнительное продольное смещение L_z приводит к квадратичной фазовой добавке по апертуре, что расширяет ДПК-лепесток и обеспечивает более равномерное перекрытие зоны боковых лепестков.

Это значение соответствует угловому положению ближайших боковых лепестков основной ДН на частоте 1800 Гц ($\lambda = 0.191$ м, $D = 1.5$ м), первый нуль которой находится приблизительно при $\theta_1 \approx \approx 1.22\lambda / D \approx 8.9°$.

Для оценки возможности применения дополнительных парциальных каналов была выполнена численная модель диаграмм направленности основного и компенсационного каналов адаптивной зеркально-параболической антенны содара. Расчет проводился на основе дифракционного интеграла Кирхгофа с использованием амплитудного распределения по апертуре параболоида, соответствующего рупорному облучателю с эксцентриситетом ($e = 0.5$). Параметры антенной системы принимались равными параметрам содара "Звук-4": диаметр зеркала $D = 1.5$ м, фокусное расстояние $F = 0.6$ м, рабочая частота $f_0 = 1800$ Гц.

Для формирования компенсационного канала использовался дополнительный приемный элемент, смещенный относительно фокуса параболоида на величины $L_x = 0.12$ м в поперечном направлении и $L_z = 0.05$ м вдоль акустической оси.

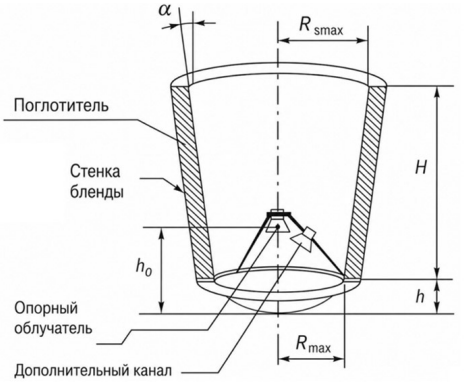

Рис. 3. Акустическая параболическая защищенная антенна с дополнительным каналом приема.
α — угол раскрыва защитной бленды антенны; h_0 — фокус параболоида; h — глубина параболоида; H— высота защитной бленды; R_{max} — максимальный радиус апертуры параболоида; R_{smax} — максимальный радиус апертуры защитной бленды

Такое смещение приводит к отклонению максимума ДН ДПК относительно оси антенны и расширению его углового сектора за счет дефокусировки.

На рис. 4 представлены рассчитанные диаграммы направленности основного и компенсационного каналов. Из представленных результатов следует, что максимум диаграммы направленности дополнительного канала смещен относительно акустической оси примерно на 11°. При этом максимум ДПК располагается в промежуточной области между первым нулем диаграммы направленности основной антенны и ближайшими боковыми лепестками.

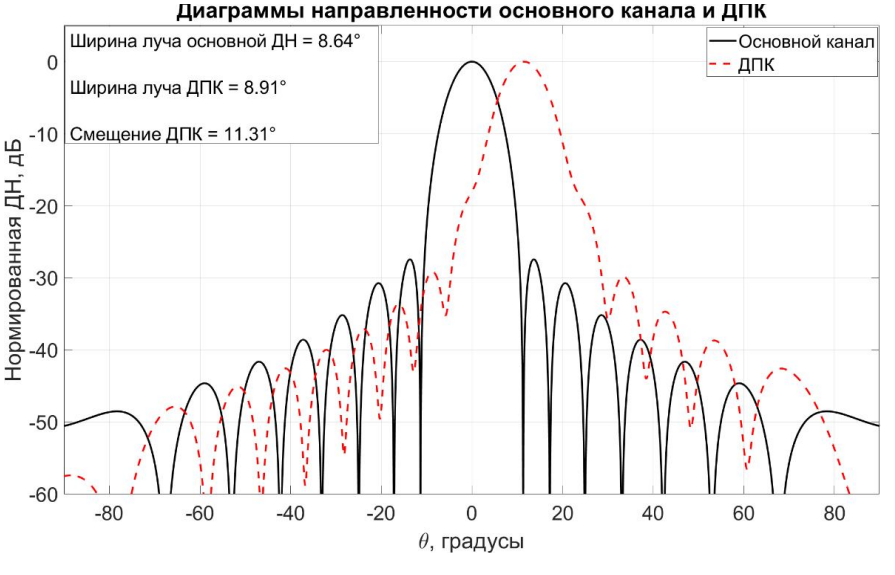

Рис. 4. Диаграммы направленности основного и дополнительного каналов

Такое положение обеспечивает повышенную чувствительность дополнительного канала к помеховым сигналам, поступающим через боковые лепестки, при одновременном снижении чувствительности к полезному сигналу, принимаемому по главному лучу. Дополнительная продольная дефокусировка $L_z = 0.05$ м приводит к расширению диаграммы направленности ДПК, благодаря чему увеличивается угловая область контроля помеховых источников.

Таким образом, выбранная конфигурация дополнительного канала обеспечивает пространственное разделение полезного сигнала и помеховых составляющих, что создает предпосылки для эффективной адаптивной компенсации помех, поступающих через боковые лепестки диаграммы направленности основной антенны.

Размещение микрофонов ДПК не требует изменения конструкции бленды. Кабели для питания ДПК выводятся через уплотненные отверстия в основании бленды и подключаются к отдельным малошумящим предусилителям с полосой 500–5000 Гц, после чего сигналы оцифровываются с частотой дискретизации не менее 12 кГц и поступают в цифровой адаптивный процессор.

Предлагаемая адаптивная конфигурация не изменяет физическую диаграмму направленности основной антенны, но за счет последующей адаптивной обработки сигналов ДПК-канала обеспечивает эквивалентное подавление помех, поступающих через боковые лепестки, на величину от ≈14 до ≈36 дБ в зависимости от углового положения источника помехи (табл. 1) по сравнению с базовым вариантом "Звук-4". По результирующей помехоустойчивости это приближает содар к характеристикам коммерческих приборов с антенными решетками при сохранении простоты конструкции параболической антенны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен и теоретически обоснован метод повышения помехоустойчивости зеркально-параболических антенн содаров за счет введения дополнительных приемных каналов, смещенных из фокуса параболоида, и последующей адаптивной компенсации коррелированной помеховой составляющей. Метод не изменяет физическую диаграмму направленности основной антенны, а обеспечивает эквивалентное электронное подавление помех, поступающих через боковые лепестки, на этапе цифровой обработки принятых сигналов.

На примере содара "Звук-4" показано, что теоретический выигрыш по отношению сигнал/шум $\Delta\,\mathrm{SNR}$ составляет от ≈14.5 дБ (при угле прихода помехи $\Theta_{\text{помех}} \to 90°$) до ≈35.6 дБ (при $\Theta_{\text{помех}} = 5°$) и зависит от геометрической задержки между основным и ДПК-каналами. Для базового сценария ($\Theta_{\text{помех}} = 12°$, $\Delta f = 300$ Гц) выигрыш оценивается в 28 дБ, что с учетом атмосферного поглощения на частоте 1800 Гц транслируется в увеличение максимальной дальности зондирования с 1000 до ≈1500 м (коэффициент выигрыша $K \approx 1.50$).

Приведенные оценки представляют собой теоретический верхний предел, при идеальной оценке весов адаптивного фильтра и бесконечном времени усреднения. Реально достижимый выигрыш будет ниже вследствие собственного шума приемных каналов и шума рассогласования, возникающего при конечном времени адаптации. Кроме того, модель компенсации предполагает высокую пространственную корреляцию помехового сигнала между каналами, что справедливо для локально когерентных источников помех, таких как проезжающий транспорт, но не всегда выполняется для диффузных источников — аэродинамического шума обтекания элементов конструкции ветром и шума осадков, — являющихся одними из основных факторов, ограничивающих помехоустойчивость содаров в реальных условиях эксплуатации.

Таким образом, предложенный метод демонстрирует значительный теоретический потенциал повышения помехоустойчивости и дальности действия содаров при относительно простой конструктивной реализации, не требующей перехода к полноценной антенной решетке.

ПРИЛОЖЕНИЕ

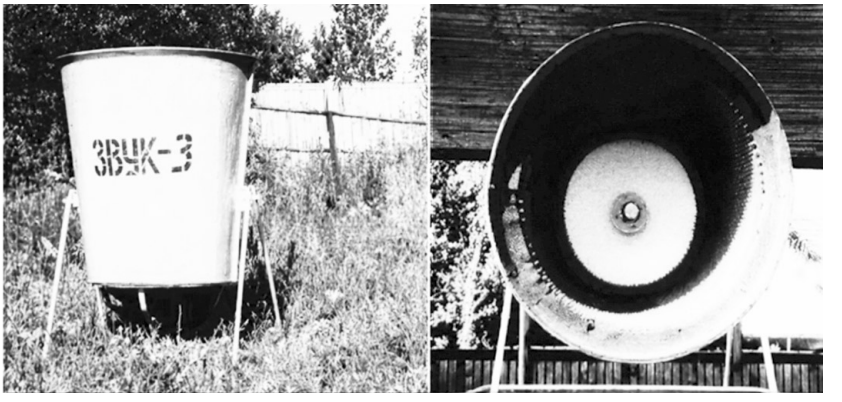

Рис. П1. Отечественный акустический локатор "Звук-3"

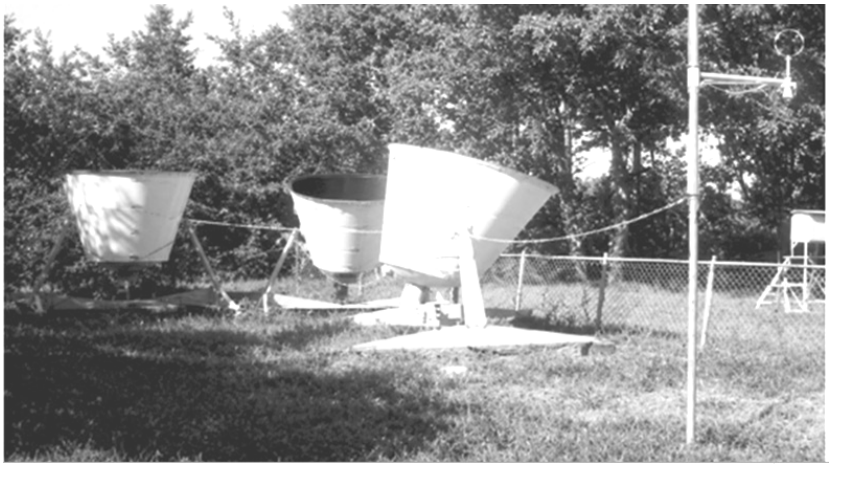

Рис. П2. Отечественный акустический локатор "Звук-2"

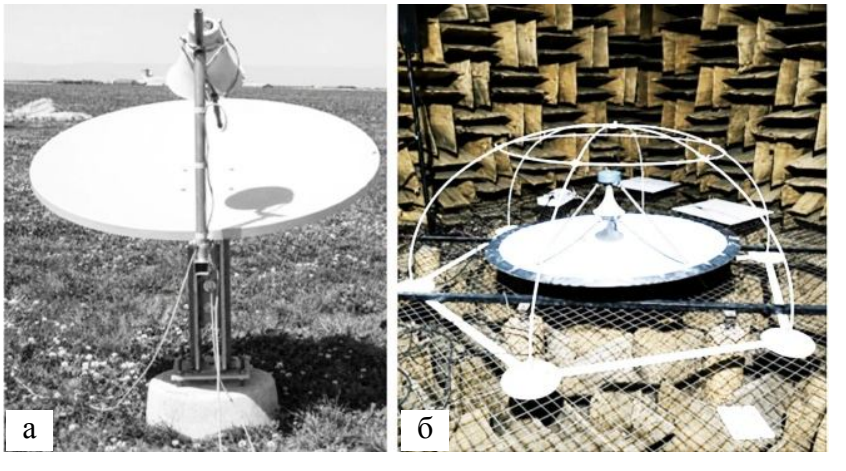

Рис. П3. Акустические локаторы (а), (б), использующие параболические антенны, иностранных исследователей и производителей



Рис. П4. Акустические локаторы, использующие параболические антенны, иностранных исследователей и производителей.
а — Snodar, б — Ammonit AQ510 Windfinder

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Bradley S.* Atmospheric Acoustic Remote Sensing: Principles and Applications. CRC Press, 2007. 296 p. DOI: 10.1201/9781420005288
2. *Красненко Н.П.* Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя. Томск: Водолей, 2001. 278 с.
3. *Красненко Н.П.* Содары для зондирования атмосферного пограничного слоя // Научное приборостроение. 2018. Т. 28, № 4. С. 82–89. URL: https://iairas.ru/mag/2018/full4/Art14.pdf
4. *Иванов В.Ю.*, *Красненко Н.П.* Исследование высокочастотных акустических зеркальных параболических антенн // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13, № 11. С. 1044–1048. URL:. https://ao.iao.ru/ru/content/text?vol=13&issue=11&num=13
5. *Красненко Н.П.*, *Мананко Е.Е.* Зеркально-параболические акустические антенны для зондирования атмосферы // Методы и устройства передачи и обработки информации: Межвузовский сборник научных трудов. СПб.: Гидрометеоиздат, 2004. Вып. 5. С. 83–98.
6. *Красненко Н.П., Раков А.С., Раков Д.С.* Исследование защищенной зеркально-параболической антенны акустического локатора // Материалы Всероссийской научной конференции по проблемам радиофизики и дистанционного зондирования сред (Муром, 27–29 июня 2017 г.). Владимир: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2017. С. 444–454. URL: https://www.mivlgu.ru/conf/armand2017/rmdzs-2017/pdf/S4_6.pdf
7. MetekGmbH [Электронный ресурс]. URL: https://metek.de (дата обращения 01.04.2026).
8. REMTECH Sodar. Technical Description: Doc. DC 02/012. REMTECH Inc., 2026. 11 p.
9. ScintecAG [Электронный ресурс]. URL: https://www.scintec.com/ (дата обращения 12.03.2026).
10. Vaisala [Электронный ресурс]. URL: https://www.vaisala.com/ (дата обращения 17.03.2026).
11. Atmospheric Research & Technology [Электронный ресурс]. URL: https://sodar.com/ (датаобращения 12.03.2026).
12. *Bradley S., von Hunerbein S.* Comparisons of new technologies for wind profile measurements associated with wind energy applications // Proc. European Wind Energy Conference (EWEC) and Exhibition (Milan, Italy, 7–10 May 2007).
13. *Bradley S., von Hunerbein S., Mikkelsen T.* A bistatic sodar for precision wind profiling in complex terrain // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2012. Vol. 29, № 8. P. 1052–1061.
14. *Ганзий Д.Д., Русаков П.В., Трошин Г.И.* Адаптивные антенные системы. М.: Радиотехника, 2019. 272 с.
15. *Ганзий Д.Д., Ганцевич М.М., Касаткин В.В., Матюшин П.П.* Антенна Кассегрена с дополнительными облучателями для парциальных адаптивных каналов // Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49, № 5. С. 580–586. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=17647269
16. *Kumar N., Soni K., Agarwal R.* Design and development of SODAR antenna structure // MAPAN — Journal of Metrology Society of India. 2021. Vol. 36, № 4. P. 785–793. DOI: 10.1007/s12647-021-00477-7
17. *Bonner C.S., Ashley M.C.V., Lawrence J.S., Storey J.W.V., Luong-Van D.M., Bradley S.* Snodar: a new instrument to measure the height of the boundary layer on the Antarctic plateau // SPIE Conference on Astronomical Telescopes and Instrumentation, (Marseille, France, June 23−28, 2008). Proc. SPIE. 2008. Vol. 7014. Id. 70146I. DOI: 10.1117/12.788154

18. Ammonit AQ510 Windfinder. Technical Specification. Berlin: Ammonit Measurement GmbH, 2014. URL: https://www.sartelco.it/contenuti/download/EOLICO_WIND/AQSystem_AQ510.pdf
19. *Уидроу Б., Стирнз С.* Адаптивная обработка сигналов: Пер. с англ. / Под ред. В.В. Шахгильдяна. М.: Радио и связь, 1989. 440 с. URL: https://djvu.online/file/tE653pVsTzQrU
20. ISO 9613-1:1993. Acoustics — Attenuation of sound during propagation outdoors — Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere. Geneva: ISO, 1993. URL: https://www.iso.org/ru/standard/17426.html

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Российская Федерация (*Рыбаков И.А.*)

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск, Российская Федерация (*Красненко Н.П.*)

Контакты:*Рыбаков Иван Андреевич,*
vaniarybakov98@gmail.com

Материал поступил в редакцию 28.08.2026

ADAPTIVE PARABOLIC REFLECTOR ANTENNAS FOR ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER ACOUSTIC SOUNDING SYSTEMS

I. A. Rybakov[1], N. P. Krasnenko[2]

[1]*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia*
[2]*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia*

A method for improving the noise immunity of parabolic reflector antennas used in sodars is considered, based on additional partial reception channels (APRC). The method relies on adaptive compensation of the antenna radiation-pattern sidelobes: the main feedhorn both transmits the probing pulse and receives the useful signal, while additional receiving elements, offset from the paraboloid focus, receive predominantly interference components penetrating the sidelobes. Using the range equation, the Kirchhoff diffraction integral, and spatio-temporal correlation conditions, analytical estimates of the signal-to-noise ratio gain were obtained for the Zvuk-4 sodar antenna. It is shown that introducing an APRC channel provides additional interference suppression which theoretical upper bound ranges from 14 to 36 dB depending on the angular position of the interference source, translating into up to a 1.5-fold increase in maximum sounding range. The practically achievable gain is limited by the intrinsic noise of the receiving channels and by adaptation error, as well as by the spatial coherence of the interference source: the method is effective against locally coherent (point-like) interference and requires further study for diffuse sources such as wind noise and precipitation. The proposed approach does not require a full antenna array and can be implemented on the basis of existing parabolic reflector sodar antennas.

Keywords: sodar, acoustic sounding, parabolic antenna, additional partial channels, adaptive compensation, sidelobes, atmospheric boundary layer

REFERENCES

1. Bradley S. *Atmospheric Acoustic Remote Sensing*: *Principles and Applications*. CRC Press, 2007, 296 p. DOI: 10.1201/9781420005288
2. Krasnenko N.P. *Akusticheskoe zondirovanie atmosfernogo pogranichnogo sloya* [Acoustic sounding of the atmospheric boundary layer]. Tomsk, Vodoley Publ., 2001, 278 p. (In Russ.).
3. Krasnenko N.P. [Sodars for sensing of the atmospheric boundary layer]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific

Instrumentation], 2018, vol. 28, no. 4, pp. 81−89. (In Russ.). URL: https://iairas.ru/mag/2018/full4/Art14.pdf
4. Ivanov V.Yu., Krasnenko N.P. [Study of high-frequency acoustic reflector-type parabolic antennas]. *Optika atmosfery i okeana* [Atmos. oceanic opt.], 2000, vol. 13, no. 11, pp. 970–974. (In Russ.). URL: https://ao.iao.ru/en/content/text?vol=13&issue=11&num=13
5. Krasnenko N.P., Mananko E.E. [Parabolic-Reflector Acoustic Antennas for Atmospheric Sounding]. *Methods and Devices for Information Transmission and Processing*: *Inter-University Collection of Scientific Papers* [Methods and devices for information transmission and processing: Interuniversity Collection of Scientific Works], St. Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 2004, no. 5, pp. 83–98. (In Russ.).
6. Krasnenko N.P., Rakov A.S., Rakov D.S. [Study of protected mirror-parabolic antenna of acoustic locator]. *Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferenzii po problemam radiofiziki i distanzionnogo zondirovaniya sred (Murom, 27–29 iyunya 2017 g.)* [Proc.All-Russian Scientific Conference on Radiophysics and Remote Sensing of Media (Murom, June 27–29, 2017)], Vladimir, Publishing-Poligraphic Center MI VlGU, 2017, pp. 444–454. (In Russ.).
7. *MetekGmbH* [Electronic resource]. URL: https://metek.de (date of access:01.04.2026).
8. *REMTECH Sodar*. Technical Description: Doc. DC 02/012. REMTECH Inc., 2026, 11 p.
9. *Scintec AG* [Electronic resource]. URL: https://www.scintec.com/ date of access: 12.03.2026).
10. *Vaisala* [Electronic resource]. URL: https://www.vaisala.com/ (date of access: 17.03.2026).
11. *Atmospheric Research & Technology* [Electronic resource]. URL: https://sodar.com/ (date of access: 12.03.2026).
12. Bradley S., von Hunerbein S. Comparisons of new technologies for wind profile measurements associated with wind energy applications. *Proc. European Wind Energy Conference (EWEC) (Milan, Italy, 7–10 May 2007)*. URL: https://www.researchgate.net/publication/237532938_Comparisons_of_New_Technologies_for_Wind_Profile_Measurements_Associated_with_Wind_Energy_Applications
13. Bradley S., von Hunerbein S., Mikkelsen T. A bistatic sodar for precision wind profiling in complex terrain. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2012, vol. 29, no. 8, pp. 1052–1061. DOI: 10.1175/JTECH-D-11-00035.1
14. Ganzii D.D., Rusakov P.V., Troshin G.I. *Adaptivnyye antennyye sistemy* [Adaptive antenna systems]. Moskow, Radiotekhnika Publ., 2019, 272 p. (In Russ.).
15. Ganzii D.D., Gantsevich M.M., Kasatkin V.V., Matyushin P.P. [A Cassegrain antenna with additional feedsfor partial adaptive channels]. *Radiotehnika i elektron*ika [Journal of Communications Technology and Electronics], 2004, vol. 49, no 5, pp. 580–586. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=17647269
16. Kumar N., Soni K., Agarwal R. Design and development of SODAR antenna structure. *MAPAN — Journal of Metrology Society of India*, 2021, vol. 36, no. 4, pp. 785–793. DOI: 10.1007/s12647-021-00477-7
17. Bonner C.S., Ashley M.C.V., Lawrence J.S., Storey J.W.V., Luong-Van D.M., Bradley S. Snodar: a new instrument to measure the height of the boundary layer on the Antarctic plateau. *SPIE Conference on Astronomical Telescopes and Instrumentation (Marseille, France, June 23−28, 2008), Proc. SPIE*, 2008, vol. 7014, id. 70146I. DOI: 10.1117/12.788154
18. Ammonit AQ510 Windfinder. Technical Specification. Berlin: Ammonit Measurement GmbH, 2014. URL: https://www.sartelco.it/contenuti/download/EOLICO_WIND/AQSystem_AQ510.pdf
19. Widrow B., Stearns S.D. *Adaptive Signal Processing*., NY: Prentice-Hall Inc., 1989, 474 p. URL: https://libcats.org/book/612654
20. *ISO 9613-1:1993*. *Acoustics — Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere*. Geneva: ISO, 1993. URL: https://www.iso.org/ru/standard/17426.html (In Russ.).

Contacts: *Rybakov Ivan Andreevich,*
vaniarybakov98@gmail.com

The article was received by the editorial office on 28.08.2026