

УДК: 534.6.08, 551.508.5

OECD: 1.03.AA

DOI: 10.56408/2412-8627.2026.12.2.001

Методы шумоподавления в акустических доплеровских содарах для зондирования атмосферы

Красненко Н.П.^{1*}, Рыбаков И.А.²

¹Д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией геофизических исследований и технологий, главный научный сотрудник

²Аспирант, младший научный сотрудник лаборатории геофизических исследований и технологий

^{1,2}Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия

Аннотация

Представлен обзор современных методов шумоподавления, применяемых в акустических доплеровских содарах, используемых для дистанционного зондирования атмосферы. Рассмотрены основные источники помех при измерениях и методы компенсации их влияния. Проведен анализ алгоритмов цифровой обработки сигналов, применяемых в коммерческих содарах различных производителей, таких как Metek, Remtech, Scintec, Atmospheric Research & Technology, Vaisala. Особое внимание уделено спектральным методам обработки доплеровского сигнала, многочастотным режимам измерений, пространственной фильтрации с использованием антенных решеток, временному и частотному усреднению, а также адаптивным процедурам контроля качества данных. Проведено сравнительное обобщение применяемых подходов, выявлены тенденции перехода от классических методов обработки к более сложным методам. Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых методов шумоподавления и оптимизации обработки данных в акустических атмосферных системах различного назначения.

Ключевые слова: содар, шумоподавление, цифровая обработка сигналов, доплеровский спектр, отношение сигнал/шум, антенные решетки

Noise Reduction Methods in Acoustic Doppler SODARs for Atmospheric Sensing

Krasnenko N.P.^{1}, Rybakov I.A.²*

¹*D.Sc., Professor, Head of the Laboratory of Geophysical Researches and Technologies, Chief Researcher*

²*Ph.D., Junior Researcher of the Laboratory of Geophysical Researches and Technologies*

^{1,2}*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IMCES SB RAS), Tomsk, Russia*

Abstract

An overview is presented of modern noise-suppression methods employed in acoustic Doppler sodars used for the remote sensing of the atmosphere. The primary sources of interference encountered during measurements

*E-mail: krasnenko@imces.ru (Красненко Н.П.)

are examined, along with methods for compensating for their effects. An analysis is provided of the digital signal processing algorithms implemented in commercial sodars from various manufacturers, including Metek, Remtech, Scintec, Atmospheric Research & Technology, and Vaisala. Particular attention is devoted to spectral methods for Doppler signal processing, multi-frequency measurement modes, spatial filtering using antenna arrays, temporal and frequency averaging, and adaptive data quality control procedures. A comparative summary of the applied approaches is conducted, revealing trends toward a transition from classical processing techniques to more sophisticated methods. The results obtained may be utilized in the development of new noise-reduction techniques and the optimization of data processing in acoustic atmospheric sensing systems for various applications.

Keywords: SODAR, noise reduction, digital signal processing, Doppler spectrum, signal-to-noise ratio, antenna arrays

Введение

Акустическое зондирование атмосферы с использованием доплеровских локаторов (содаров) – занимает особое место среди дистанционных методов исследования атмосферы [1], [2]. Содары [1]-[3] позволяют получать сведения о скорости и направлении ветра, характеристиках турбулентности и термической стратификации в атмосферном пограничном слое (АПС), что делает их важным инструментом для экологического мониторинга, оценки ветроэнергетического потенциала, обеспечения безопасности авиационных полетов и изучения физических процессов в АПС.

Вместе с тем практическое применение содаров существенно осложняется низким отношением сигнал/шум (ОСШ), характерным для акустического зондирования атмосферы. Это связано с тем, что принимаемые сигналы, рассеянные естественными турбулентными неоднородностями, обладают малой интенсивностью и на фоне шумов и помех антропогенного и природного происхождения нередко оказываются близкими к порогу обнаружения. Промышленные объекты, транспорт, ветер и иные источники формируют сложную помеховую обстановку, в которой полезный сигнал может быть частично или полностью замаскирован [1], [2], [4]. В этих условиях достоверность содарных измерений определяется как эффективностью алгоритмов шумоподавления и цифровой обработки сигналов, так и характеристиками аппаратной реализации системы. При этом, несмотря на высокую практическую значимость данной задачи, систематизированное сопоставление инженерных решений, используемых в коммерческих содарных системах ведущих мировых производителей, до настоящего времени остается недостаточно представленным. В настоящей работе выполнен обзор и сравнительный анализ современных методов шумоподавления и обработки сигналов, применяемых в содарах компаний Metek, Remtech, Scintec, Atmospheric Research & Technology и Vaisala. Особое внимание уделено конструктивным решениям, спектральному анализу доплеровских сдвигов, многочастотным режимам работы, пространственной фильтрации с использованием антенных решеток, а также современным процедурам контроля качества данных.

Существующее разнообразие инженерных и алгоритмических решений, направленных на повышение помехоустойчивости содаров, целесообразно классифицировать по уровню воздействия на отношение сигнал/шум. В рамках настоящего обзора сравнительный анализ проводится по трем основным категориям: аппаратные (конструктивные) методы, обеспечивающие минимизацию боковых лепестков диаграммы направленности антенны (фазированные антенные решетки, звукозащитные экраны); алгоритмические методы цифровой обработки, направленные

на выделение полезного доплеровского сигнала из шума (спектральный анализ, многочастотное зондирование, фильтрация) и процедуры контроля качества и валидации данных, отбраковывающие недостоверные измерения на основе пороговых критериев и статистического анализа. Такой подход позволяет системно сопоставить эффективность применяемых технических решений различных производителей.

1 Шумоподавление в содарах компании Metek

Германская компания МЕТЕК GmbH [5] является одним из ведущих производителей акустических локаторов для исследования и мониторинга характеристик атмосферы [6]-[12]. Среди наиболее распространенных приборов компании следует отметить доплеровские содара серии PCS.2000 Doppler Sodar, которые представлены в различных модификациях и активно используются в международных измерительных кампаниях и долгосрочных проектах. Один цикл измерения профиля скорости ветра включает в себя последовательное импульсное зондирование в пяти направлениях (вертикальном и четырех наклонных в противоположных ортогональных направлениях).

По данным производителя, максимальная дальность (высота) зондирования содаров серии PCS может достигать порядка 1–1,5 км в благоприятных метеорологических и шумовых условиях. В то же время при работе в других условиях реальная высота зондирования может существенно уменьшаться [13].

Для повышения качества измерений в содарах Metek реализован ряд инженерных решений, направленных на повышение ОСШ и устойчивости работы прибора. Одним из таких решений является использование многочастотного режима зондирования [13]. В этом режиме в пределах одного цикла измерений содар последовательно осуществляет зондирование на нескольких несущих частотах в каждом из направлений. Как правило, рабочие частоты находятся в интервале 1,4–2,6 кГц, а конкретные наборы частот зависят от модели и конфигурации содара (например, используются комбинации 1386, 1612, 1862, 2087 Гц для модификации PCS.2000-64MF). Применение нескольких частот в одном цикле зондирования обусловлено особенностями распространения акустических волн в атмосфере: низкочастотные волны испытывают меньшее затухание и лучше подходят для зондирования верхних слоев атмосферы, тогда как волны более высоких частот сильнее рассеиваются на мелкомасштабных неоднородностях атмосферы и обеспечивают более высокий уровень обратно рассеянного сигнала на малых высотах. Комбинирование частот в одном измерительном цикле расширяет динамический диапазон при профилировании атмосферы и повышает стабильность измерений на разных высотах. Кроме того, разнесение рабочих частот уменьшает неоднозначности в спектральном анализе и снижает влияние шумов.

Особенностью содаров Metek, как и других зарубежных производителей в последние годы, является использование антенных массивов, состоящих из большого числа акустических излучателей и приемников (рупорных громкоговорителей), объединенных в фазированную антенную решетку. Формирование пяти последовательных направлений зондирования атмосферы осуществляется путем задания определенных фазовых сдвигов между элементами массива. Такой принцип позволяет формировать вертикальный и наклонные лучи без механического сканирования антенны.

В частности, в содаре PCS.2000-64 используется массив из 64 элементов (8 x 8), представленный на рисунке 1. Содар обеспечивает вертикальное разрешение 5–50 м. Диапазон измерения горизонтальной скорости ветра составляет от 0 до 50 м/с, при этом погрешность ее определения находится в пределах 0,1–0,3 м/с или не превышает 5% от измеряемого значения. Вертикальная составляющая скорости ветра измеряется в диапазоне ± 10 м/с с погрешностью 0,03–0,1 м/с либо до 5%. Погрешность определения

направления ветра составляет $1-3^\circ$ при скорости ветра свыше 5 м/с и возрастает до $3-5^\circ$ при скоростях менее 5 м/с [5].

Значительную роль в повышении качества измерений играет конструктивное подавление внешних шумов и переотражений от местных предметов. Конструкция антенн содаров включает специальные защитные экраны (акустические бленды) вокруг них с жесткой внешней оболочкой и мягкой, поглощающей звук, внутри. У содаров фирмы Metek, в отличие от других, даже применяется двойная бленда (внешняя и внутренняя) (рисунок 1). Также интересной особенностью является использование треугольных клиньев на верхней кромке корпуса внешней бленды. Общая высота внешней бленды составляет $2,15 \text{ м}$. Поперечное сечение бленды имеет форму квадрата со стороной $1,65 \text{ м}$ и над верхней кромкой по всему периметру имеются по двенадцать клиновидных элементами вдоль каждой из его сторон. Высота клиньев составляет 35 см , ширина у основания – 15 см . К сожалению, ни в документации, ни в публикациях компании не приводятся формулы для расчета и результаты исследований по шумоподавлению в данной конструкции.



Рисунок 1 – Антенная система содара PCS.2000-64 с антенной решеткой внутри двух звукозащитных бленд

Однако в работе [2] рассмотрено влияние клиньев бленды работу акустического локатора. Край бленды можно рассматривать как совокупность вторичных точечных источников, формирующих сферические волновые фронты, как показано на рисунке 2. В соответствии с принципом взаимности антенн данный эффект может быть рассмотрен в равной степени как для режима приема, так и для режима излучения сигнала. Суперпозиция излучений вторичных источников приводит к образованию интерференционной картины и увеличению рассеяния энергии в боковых направлениях, что проявляется в виде дополнительных боковых лепестков антенны. Поэтому для снижения влияния дифракции на кромке экрана и применяют специальные конструктивные элементы – акустические клинья. Утверждается, что использование клиньев позволяет уменьшить когерентность излучения вдоль края и в итоге снизить интенсивность дифрагированной волны в среднем на $6-7 \text{ дБ}$. Хотя это должно зависеть как от рабочей частоты содара, так и геометрии экрана. Наверное, независимый от этого и лучший результат даст случайный характер расположения и размеров клиньев. В этом

случае применение клиньев приведет к тому, что излучение от различных участков кромки станет некогерентным. В результате нарушится согласованность фазового сложения дифрагированных волн, что приведет к уменьшению суммарной интенсивности дифрагированного звукового поля и повышению эффективности шумозащитного экрана [14].

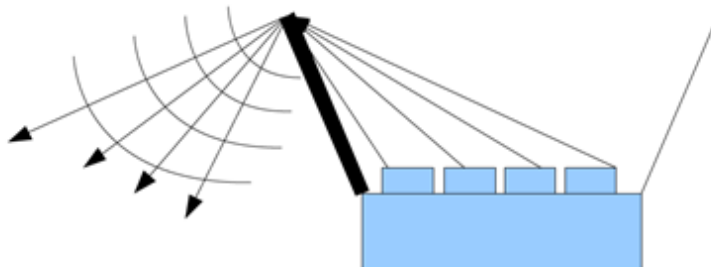
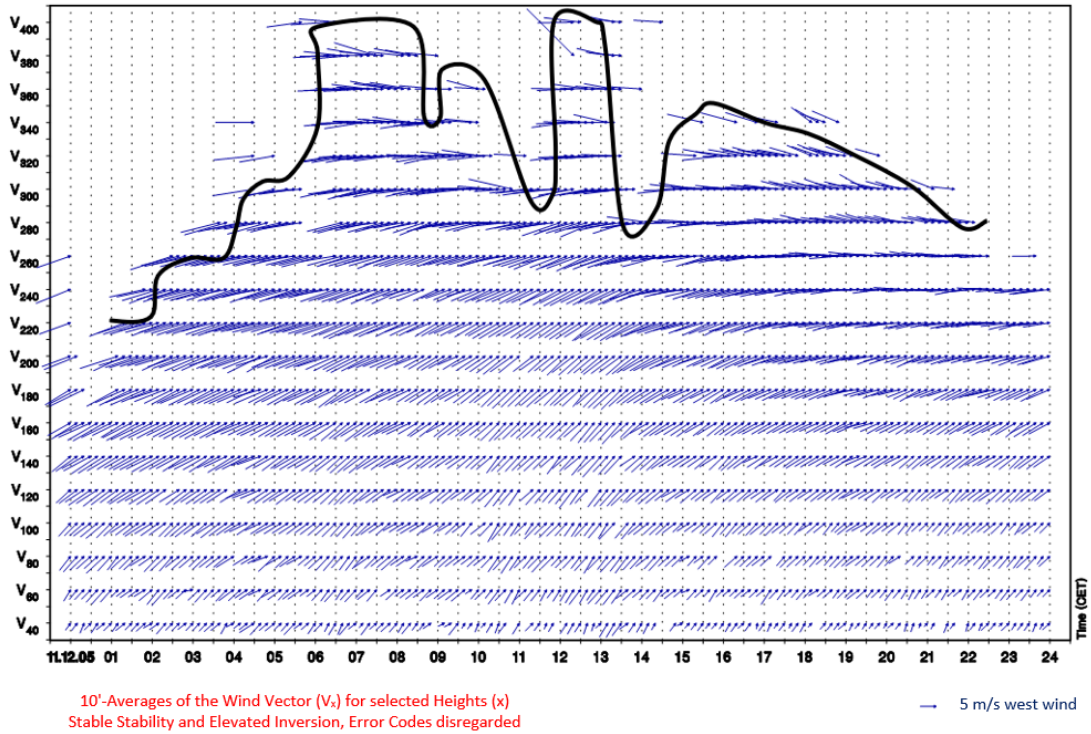


Рисунок 2 – Дифракционная картина на краю перегородки бленды, излучающей антенной решеткой

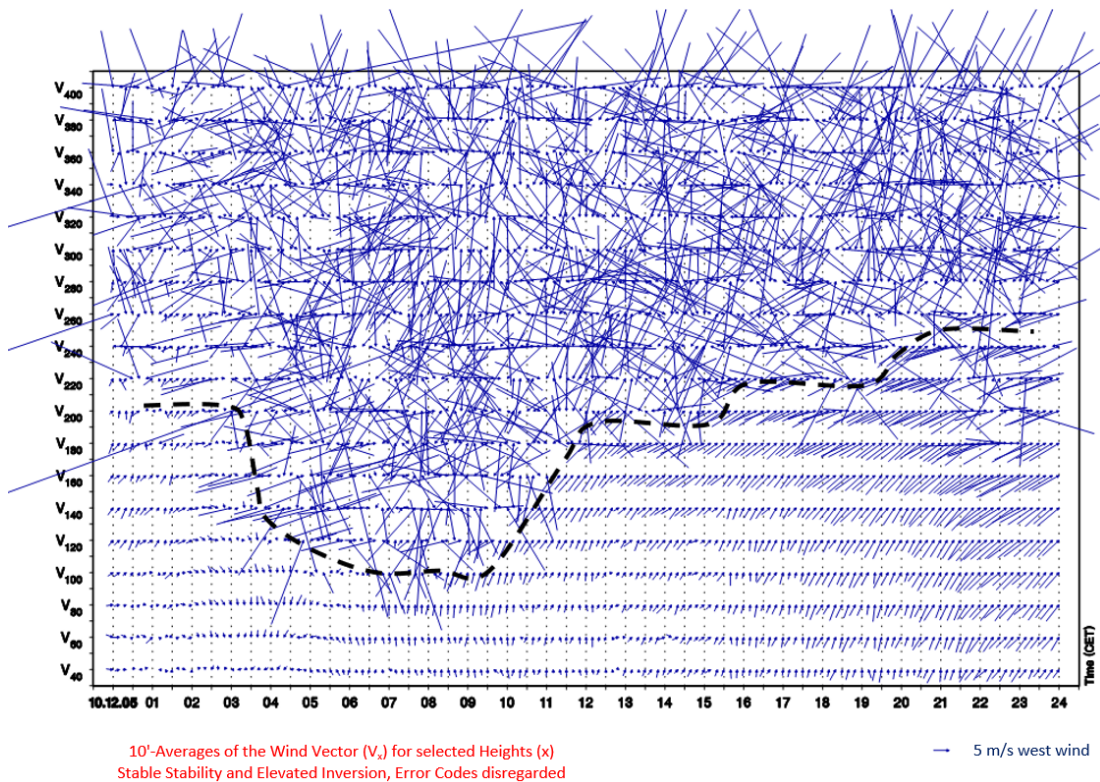
Основным методом обработки данных в доплеровских содарах, применяемых в содарах Metek, является спектральный анализ принимаемого рассеянного акустического сигнала. Поскольку зондирование является импульсным, то после приема сигнала выполняется его дискретизация и разделение по высотным интервалам (стробирование по времени прихода рассеянного акустического сигнала). Для каждого высотного интервала вычисляется спектр мощности сигнала с использованием быстрого преобразования Фурье [15]. По положению максимума спектра определяется доплеровская частота и радиальная компонента скорости ветра (скорости движения воздушных масс) в направлении луча зондирования. На основе измеренных радиальных скоростей для нескольких лучей в одном цикле зондирования рассчитываются ортогональные компоненты вертикального профиля вектора скорости ветра. По величине мощности сигнала определяют сечение рассеяния, интенсивность турбулентности и в конечном итоге термическую структуру АПС.

Поскольку принимаемый сигнал, как и последующие определяемые параметры атмосферы, является случайным, то важным этапом обработки является оценка отношения сигнал/шум - ОСШ. Обычно вычисляется отношение мощности спектрального пика к среднему уровню фонового шума в спектре. Если полученное значение ОСШ оказывается ниже заданного порога, соответствующая высотная ячейка признается недостоверной и исключается из дальнейшего анализа [13]. Рисунок 3а демонстрирует результат отбраковки шумовых данных. Процедура позволяет избежать появления ошибочных значений ветровых параметров в условиях низкого отношения сигнал/шум. Также имеется возможность просмотра изначальных данных, без применения алгоритма отбраковки некачественных данных (рисунок 3б).

Для повышения устойчивости измерений применяется временное накопление и усреднение данных. В содарах усреднение реализуется на нескольких уровнях обработки. Во-первых, выполняется накопление спектров, полученных от последовательных посылок зондирующих импульсов в одном направлении, что позволяет повысить устойчивость оценки доплеровского сдвига [15]. Во-вторых, при формировании итоговых профилей компонентов скорости ветра применяется временное усреднение. Оно варьируется от 10 до 30 минут. Данная процедура обеспечивает повышение устойчивости оценок и снижение влияния случайных флуктуаций измеряемых параметров.



a)



б)

Рисунок 3 – Высотно-временная (до 400 м) суточная запись распределения горизонтальной скорости ветра с отбраковкой «зашумленных» данных. Линией показана реальная граница высоты измерений. Усреднение 10 минут. Ориентация стрелок соответствует направлению ветра, масштаб стрелок - величине скорости ветра

Несмотря на высокую эффективность, метод усреднения имеет ограничения. Увеличение числа накоплений приводит к снижению временного разрешения измерений и может вызывать сглаживание реальных вариаций атмосферных параметров. Кроме того, при резком изменении ветрового поля нарушается когерентность сигнала между реализациями, что снижает эффективность усреднения.

Дополнительно в настройках аппаратуры и программного обеспечения содаров Metek реализованы средства подавления так называемых фиксированных эхо-сигналов, возникающих вследствие отражений от окружающих антенну объектов – от «местников». Они характеризуются нулевым доплеровским сдвигом частоты и в записях термической структуры АПС (эхোগраммы сигнала) выделяются горизонтальными полосами, искажая картину структуры. В программном обеспечении систем используется алгоритм, автоматически выявляющий спектральные максимумы, находящиеся в области нулевого доплеровского смещения и устойчиво проявляющиеся в серии последовательных измерений. После их обнаружения выполняется оценка вклада нулевой доплеровской составляющей сигнала в спектр. Полученная оценка затем используется для коррекции текущего спектра мощности путем вычитания из него соответствующей компоненты.

2 Шумоподавление в содарах компании Remtech

Французская компания Remtech [16], как она себя позиционирует, один из ведущих производителей доплеровских акустических локаторов для дистанционного зондирования атмосферы. По данным компании, на 23 августа 2019 года было установлено более 600 содаров в 55 странах.

В содарах Remtech в качестве антенн используются фазированные антенные решетки. В типичной конфигурации формируются пять лучей: один вертикальный и четыре наклонных. Наклонные лучи отклонены от вертикали примерно на 20-25° и разнесены по азимуту на 90°. По доплеровскому сдвигу сигналов, принимаемых по наклонным лучам, определяются радиальные компоненты скорости ветра, а вертикальный луч используется для измерения вертикальной скорости воздушных перемещений.

Максимальные высоты зондирования варьируются в широком диапазоне: от порядка 400 м для наиболее компактных моделей и до 3000 м для наиболее мощных и габаритных систем. Содары Remtech используют частоты зондирования в диапазоне 1-5,5 кГц, что обеспечивает оптимальный компромисс между дальностью распространения акустических волн и размером антенной системы [17].

К примеру наиболее компактная модель PA-XS использует зондирующую частоту 5,5 кГц (рисунок 4). Антенна данной системы имеет размеры порядка 24 × 24 × 4 см и массу 1,85 кг, а вес всей конструкции – 7,3 кг, что делает ее компактным и мобильным устройством [16].

Инженерные решения, разработанные компанией Remtech для обработки доплеровских сигналов, нашли применение в многочисленных метеорологических исследованиях атмосферного пограничного слоя [18]-[21].

Одним из важных направлений развития содаров Remtech стало внедрение цифровых методов обработки сигналов. Уже на ранних этапах разработки систем компания начала использовать программную реализацию спектрального анализа на основе быстрого преобразования Фурье [17]. Применение цифровой обработки позволило отказаться от специализированных аппаратных спектральных анализаторов и обеспечить более гибкую настройку алгоритмов обработки сигналов.



Рисунок 4 – Внешний вид содара Remtech PA-XS

В техническом описании PA-XS указано, что вычисления осуществляются на ARM Quad Core процессоре при подключенном 16-битном аналого-цифровом преобразователе. Аналогично, в описании PA-5 также фигурирует ARM-четырёхъядерный CPU с Linux и 16-битный АЦП. Для систем радиоакустического зондирования атмосферы обработка осуществляется с помощью быстрого преобразования Фурье сигнала после понижения радиочастоты в приемном устройстве [16].

Компания Remtech применяет в своих доплеровских содарах технологию сложнокодированного зондирующего сигнала (multi-frequency coding), описанную в патенте [22]. Данный метод является одним из ключевых элементов обработки сигналов в содарах и предназначен для повышения достоверности измерений профиля ветра в условиях низкого ОСШ. Его принцип основан на использовании зондирующего импульса, содержащего набор дискретных несущих частот, излучаемых в составе одного пакета, как правило, из 7-9 частот.

На этапе цифровой обработки для каждой зондирующей частоты отдельно выполняется спектральный анализ принятого сигнала. По положению максимумов спектров определяются доплеровские сдвиги частоты, которые затем преобразуются в оценки радиальной скорости ветра. В результате для каждой пространственной ячейки атмосферы формируется несколько независимых оценок скорости, соответствующих различным несущим частотам зондирующего сигнала. Ключевым этапом метода является процедура согласования полученных оценок: алгоритм сопоставляет значения скорости, определенные по разным частотам, и проверяет их взаимную согласованность. Если оценка скорости появляется только на одной частоте или существенно отличается от результатов, полученных на остальных частотах, она интерпретируется как результат шумового артефакта, акустической помехи или случайного спектрального максимума и исключается из дальнейшей обработки. В итоговые данные включаются только те значения скорости, которые подтверждаются несколькими частотными каналами. Таким

образом реализуется принцип многократной валидации измерения.

Согласно описанию патента, применение нескольких несущих частот позволяет получать достоверные оценки скорости ветра при значительно более низком ОСШ по сравнению с одночастотными методами зондирования. В частности, указывается, что при использовании пяти частот достигается выигрыш в ОСШ порядка 15–20 дБ [22]. Этот эффект объясняется тем, что вероятность случайного появления одинакового ложного доплеровского максимума одновременно на нескольких независимых частотах крайне мала.

В содарах Remtech данный принцип реализован программно. Приемник непрерывно формирует спектры отраженного сигнала для всех используемых частотных каналов, после чего алгоритмы обработки сравнивают полученные доплеровские оценки между собой и применяют набор пороговых критериев. В системе используется большое количество порогов ОСШ, распределенных по зондирующим лучам, высотным интервалам и частотным каналам [17]. Эти пороги позволяют автоматически отсекал слабые или нестабильные спектральные пики. Если количество подтверждений для конкретной оценки скорости оказывается недостаточным, соответствующее значение автоматически помечается как недостоверное и не выводится в результирующий профиль ветра.

Такая технология применяется во всей современной линейке содаров Remtech, включая модели РА-XS, РА-0, РА-2 и РА-5. В этих системах она рассматривается как один из основных элементов повышения качества данных. На практике использование нескольких несущих частот позволяет не только повысить устойчивость измерений к помехам, но и увеличить энергетический потенциал зондирующего импульса без ухудшения пространственного разрешения.

Одним из применяемых методов подавления шума является также спектральное вычитание шума. В рамках данного подхода принимаемый сигнал рассматривается как сумма полезной компоненты и шумовой составляющей. После вычисления спектра принимаемого сигнала выполняется также оценка спектральной плотности шума по временным интервалам между зондирующими импульсами. Полученная оценка спектра шума вычитается из спектра принимаемого сигнала, что позволяет снизить влияние широкополосных шумов и повысить вероятность корректного обнаружения доплеровского пика [17].

Для повышения достоверности измерений в содарах реализуются алгоритмы автоматического обнаружения и подавления фиксированных отражений. В программном обеспечении содаров Remtech применяется процедура автоматической идентификации спектральных пиков, расположенных вблизи нулевого доплеровского сдвига и сохраняющихся в последовательности измерений. После их обнаружения формируется оценка спектрального вклада фиксированного сигнала, которая затем вычитается из текущего спектра мощности. В случаях, когда корректное восстановление спектра невозможно, соответствующие высотные ячейки могут автоматически помечаться как недостоверные и исключаться из дальнейшего расчета ветрового профиля.

Для повышения устойчивости измерений применяется временное накопление и усреднение результатов по множеству зондирующих импульсов и временных интервалов наблюдения, что позволяет уменьшить дисперсию оценки доплеровской частоты и снизить влияние случайных шумовых всплесков. Время усреднения варьируется в диапазоне от 2 до 60 минут, в зависимости от требуемой точности и условий проведения измерений [16].

Разрешающая способность по высоте определяется аппаратными особенностями и режимами работы конкретной модели. В частности, для высокочастотных систем характерно более высокое вертикальное разрешение, достигающее порядка 10 м, тогда

как для низкочастотных модификаций данный параметр, как правило, находится на уровне до 100 м.

Диапазон измерения горизонтальной скорости ветра составляет от 0 до 50 м/с. Погрешность определения горизонтальной компоненты скорости V не превышает 0,2 м/с или 3% от измеряемого значения при скоростях ветра выше 6 м/с. Диапазон измерения вертикальной скорости ветра в стандартной конфигурации составляет ± 4 м/с (с возможностью расширения в отдельных режимах). Погрешность измерения вертикальной компоненты скорости не превышает 0,05 м/с. Погрешность определения направления скорости ветра составляет не более 3° при скорости ветра выше 2 м/с [16].

3 Шумоподавление в содарах компании Scintec

Германская компания Scintec AG также является одним из ведущих мировых производителей акустических локаторов и радиоакустических систем дистанционного зондирования атмосферы [23]-[26].

Доплеровские содара семейства FAS (Flat Array Sodar) используют плоскую фазированную акустическую антенную решетку пьезоэлектрических акустических преобразователей оригинальной конструкции (рисунок 5). Управляя фазами сигналов отдельных элементов решетки формируют несколько направленных акустических лучей под различными углами к вертикали. Наиболее распространенная схема включает вертикальный луч и несколько наклонных лучей (обычно четыре пары симметричных лучей) [23], что позволяет определять три компоненты скорости ветра.

Многочувствительный режим зондирования позволяет выполнять взаимную проверку измерений по различным направлениям и повышать надежность оценки параметров ветра.



Рисунок 5 – Антенная решетка содара фирмы Scintec

Количество зондирований на различных частотах в одном направлении может достигать десяти [23]. Диапазоны рабочих частот определяются конструктивными особенностями конкретной системы и составляют 2525-4850 Гц, 1650-2750 Гц и 825-1375 Гц.

После приема эхосигнала выполняется его цифровая обработка с использованием быстрого преобразование Фурье. На этапе предварительной обработки в программном обеспечении Scintec выполняется оценка уровня фонового шума на участках спектра,

свободных от полезной составляющей, после чего ОСШ определяется как отношение мощности полезной спектральной компоненты к оцененному уровню шума. Полученные спектры накапливаются и усредняются по серии акустических импульсов. Время усреднения может составлять от 1 до 180 мин. Это позволяет уменьшить влияние случайных флуктуаций шума и повысить устойчивость оценок спектральных моментов.

Кроме того, система обработки включает процедуры автоматического контроля качества измерений. В качестве основных критериев используются минимально допустимое ОСШ, при котором данные признаются достоверными, а также проверки согласованности результатов, полученных по различным частотам и направлениям зондирования. Поскольку системы данного типа работают с несколькими частотами и лучами, выполняется сопоставление данных между каналами, что позволяет выявлять выбросы и некорректные измерения. Если измеренные параметры оказываются взаимно противоречивыми, соответствующие данные могут быть автоматически исключены из дальнейшей обработки. На рисунке 6 представлены результаты измерений, где в интервале времени 18-19 часов наблюдалось существенное увеличение уровня шума. В связи с этим данные, полученные на данном временном участке, были признаны некорректными для дальнейшего анализа и исключены из рассмотрения. При необходимости возможна повторная обработка исходных временных рядов и спектров.

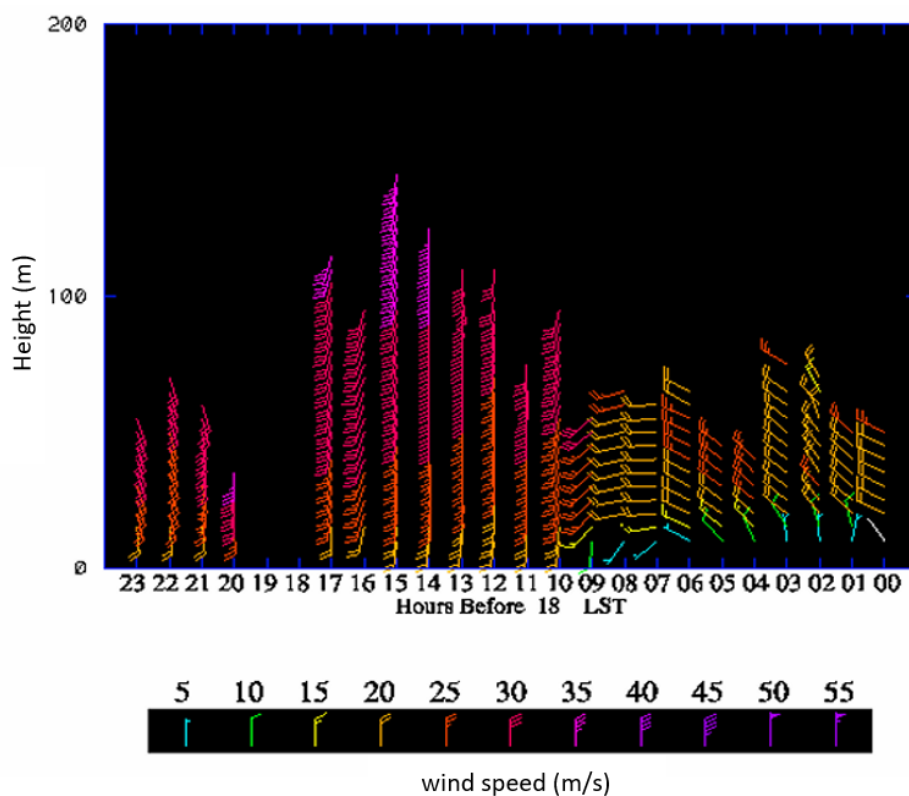


Рисунок 6 – Высотно-временная (до 200 м) суточная почасовая запись распределения горизонтальной скорости ветра с отбраковкой «зашумленных» данных. Ориентация стрелок соответствует направлению ветра, масштаб стрелок - величине скорости ветра

Также в программном обеспечении реализовано автоматическое обнаружение и коррекция отражений от «местников» на этапе спектральной обработки сигнала. После их обнаружения алгоритмы обработки выполняют коррекцию спектра, что позволяет исключить влияние фиксированных отражений при определении доплеровского сдвига и расчете скорости ветра.

Помимо алгоритмических методов, в содарах Scintec применяются и конструктивные способы снижения шумов. Антенная система может устанавливаться внутри защитного экрана, уменьшающего влияние шума ветра и турбулентных потоков воздуха вблизи поверхности [27]. На рисунке 7 представлены различные звукозащитные экраны. Также применяются специально разработанные инверсные рупорные акустические преобразователи, обеспечивающие эффективное согласование акустического импеданса излучателя с атмосферой и, что очень важно, защиту от осадков (рисунок 8 [23]).

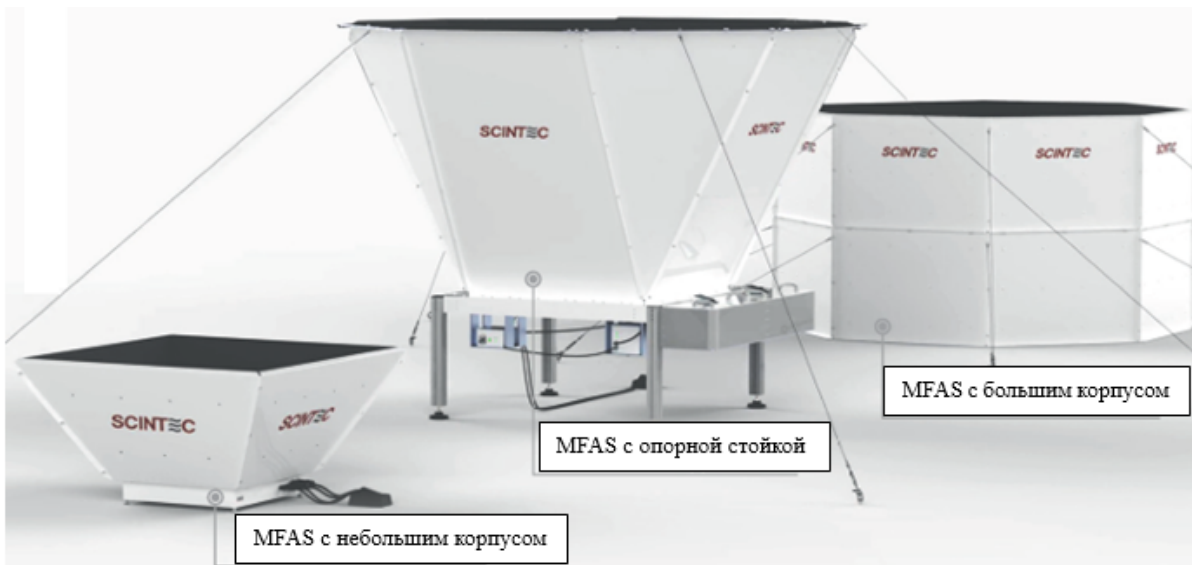


Рисунок 7 – Звукозащитные экраны антенн содаров Scintec

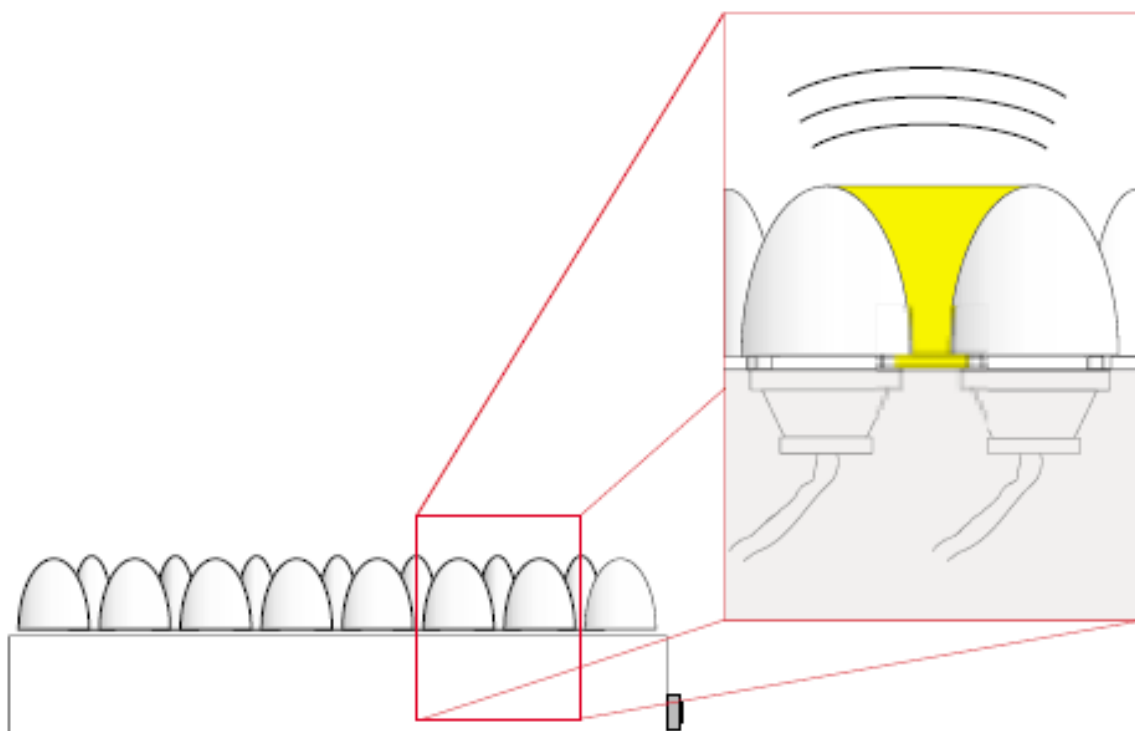


Рисунок 8 – Инверсный акустический рупор в антенной решетке

Программное обеспечение приборов предоставляет доступ ко всем уровням данных – от необработанных или, как их еще называют, “сырых” данных до обработанных профилей ветра, что позволяет пользователям дополнительно применять собственные методы и алгоритмы обработки и подавления шума.

Содары серии FAS обладают возможностью проведения полностью автоматизированной процедуры самодиагностики. Данная процедура включает контроль фазовых и амплитудных характеристик каждого отдельного акустического элемента антенной решетки. Реализация такого функционала обеспечивается архитектурой устройства, в которой каждый элемент решетки управляется индивидуально. Благодаря этому программное обеспечение системы способно выполнять детальный анализ параметров излучения и, в частности, определять точные характеристики направленности всех девяти акустических лучей.

Вертикальное разрешение содаров по высоте составляет от 5 до 20 м, при этом минимальное значение характерно для систем с более высокой пространственной дискретизацией (серия SFAS), а максимальное – для конфигураций с увеличенным диапазоном зондирования (серия XFAS). Диапазон измерения горизонтальной скорости ветра лежит в пределах от 0 до 50 м/с. Погрешность определения горизонтальной составляющей скорости ветра составляет порядка 0,1–0,3 м/с и может варьироваться в зависимости от условий наблюдения и параметров усреднения сигнала. Диапазон измерения вертикальной скорости ветра ограничен значениями от минус 10 до +10 м/с. Погрешность измерения вертикальной скорости находится на уровне 0,025–0,1 м/с. Точность определения направления скорости ветра менее 1,5° [23].

4 Шумоподавление в содарах компании Atmospheric Research & Technology

Американская компания Atmospheric Research & Technology (ART) основана в 2000 году и специализируется на разработке компактных и мобильных систем акустического зондирования атмосферы, применяемых в задачах метеорологических исследований, ветроэнергетики и экологического мониторинга [28], [29].

Одной из наиболее известных систем компании является содар VT-1, представляющий собой монопозиционную доплеровскую систему с фазированной антенной решеткой. Данный содар работает на одной частоте зондирования 4600 Гц [30] и обеспечивает измерение профиля скорости ветра на высотах от 15 до 300 м. Антенная система построена на основе фазированной акустической решетки, отклоненной на 20° от вертикали. Используется массив из 48 элементов, объединенных в единую структуру, как показано на рисунке 9 [31]. Управление фазами сигналов отдельных преобразователей позволяет формировать направленные акустические лучи и осуществлять зондирование в нескольких направлениях.

Антенная система включает рефлекторную плату, установленную под углом 35° к горизонтали, как показано на рисунке 10. Рефлекторная плата является ключевым элементом конструкции. Ее наклон обеспечивает направленность фазированной решетки слегка вниз, что препятствует попаданию дождя, снега и мусора на антенные элементы. Такая ориентация допускает применение стандартных пьезоизлучателей и повышает эксплуатационную надежность в неблагоприятных погодных условиях. В холодном климате электрический нагрев выполняют на отражающей плате, а не на самой решетке. Это предотвращает образование снега и льда, поглощающих акустический сигнал и ухудшающих работу содара.



Рисунок 9 – Антенная система содара VT-1

Внутренняя поверхность корпуса защитного экрана облицована ячеистым поглощающим пенополиуретаном, что снижает переотражения и уровень боковых лепестков антенны, ослабляет воздействие внешнего шума [30]. В совокупности конструкция рефлектора и корпус делают VT-1 устойчивым к помехам и позволяют системе эффективно формировать один вертикальный луч и два наклонных в ортогональных горизонтальных направлениях.



Рисунок 10 – Рефлекторная панель содара VT-1 в корпусе антенны

После приема эхо-сигнала по каждому каналу зондирования производится стандартная цифровая обработка с помощью быстрого преобразования Фурье. При сложной структуре частотного спектра принимаемого сигнала (значительная ширина спектра или наличие нескольких максимумов) определение доплеровской частоты и, соответственно, скорости ветра требует применения дополнительных процедур оценки центральной частоты. Для повышения устойчивости измерений используется накопление и последующее усреднение по серии зондирующих импульсов, что позволяет уменьшить влияние случайных шумовых флуктуаций и повысить точность выделения доплеровского максимума. Интервал усреднения, как правило, варьируется в диапазоне от 1 до 60 минут.

Важным этапом обработки является оценка отношения сигнал/шум (ОСШ). Для этого в спектре принимаемого сигнала определяется уровень фонового шума и рассчитывается отношение мощности спектрального максимума к шумовой составляющей. При снижении ОСШ ниже установленного порогового значения соответствующая высотная ячейка считается недостоверной и исключается из последующей обработки параметров ветра [31].

В содаре VT-1 дополнительно реализована функция автономного самотестирования, обеспечивающая регулярный контроль работоспособности антенной системы и позволяющая своевременно выявлять деградацию элементов антенной решетки [30]. Полная последовательность проверки занимает примерно 3 минуты. При обнаружении более пяти плохих элементов производится их своевременная замена, что обеспечивает восстановление энергетике содара и устойчивость измерений.

Пространственная разрешающая способность содара находится в диапазоне от 10 до 40 м, в зависимости от режима работы. Диапазон измерения скорости горизонтального ветра составляет от 0 до 25 м/с, при этом точность определения находится на уровне $\pm 0,25$ м/с. Погрешность определения направления ветра не превышает $\pm 2^\circ$ [30].

5 Шумоподавление в содарах компаний Vaisala и Second Wind

Содар Triton, разработанный компаниями Vaisala и Second Wind [32], представляет собой промышленную доплеровскую акустическую систему дистанционного зондирования атмосферы, предназначенную прежде всего для задач ветроэнергетики и долговременного мониторинга ветрового режима. Система ориентирована на измерение вертикального профиля скорости и направления ветра на высотах, превышающих уровень современных ветротурбин, что делает ее востребованной при выборе площадок для ветропарков и при оценке ветроэнергетического потенциала [33]-[35]. В типовой конфигурации устройство обеспечивает надежные измерения ветрового профиля до высоты не более 200 м.

Конструктивно система оснащена специализированной акустической антенной с запатентованной гексагональной конфигурацией излучателей и трехлепестковой формой антенного корпуса (рисунок 11). В рабочем режиме содар использует трехлучевую схему зондирования атмосферы. Один из лучей направлен вертикально вверх, а два других имеют наклон относительно вертикали в ортогональные стороны. Излучение и прием осуществляются последовательно по каждому из направлений зондирования. Один полный цикл зондирования по всем трем направлениям занимает порядка шести секунд. Работа системы осуществляется на частоте 4500 Гц [36]. В конструкции предусмотрена отражающая панель, устанавливаемая под углом порядка 45° к вертикали. Такое конструктивное решение обеспечивает эффективное перенаправление акустического излучения и формирование наклонных зондирующих лучей.

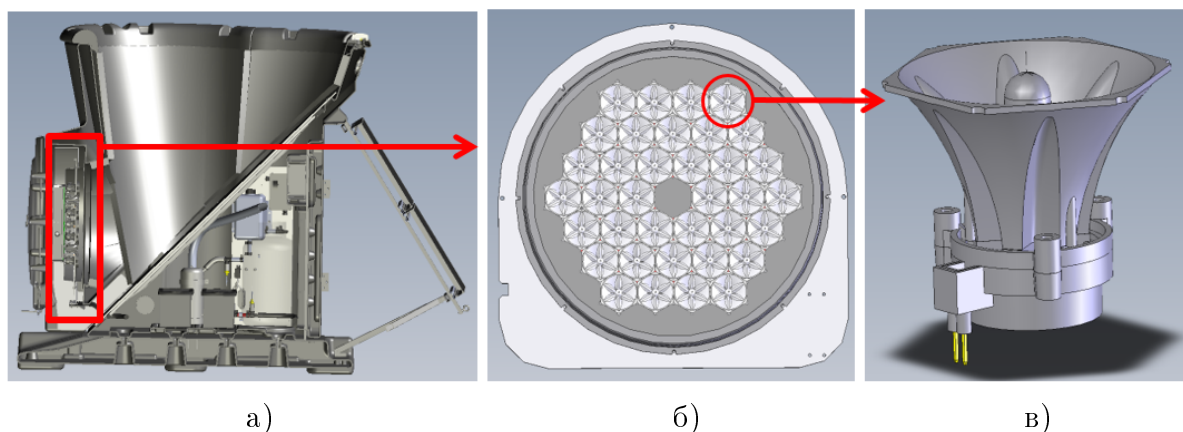


Рисунок 11 – Корпус антенны содара Triton (а), антенная решетка (б) и ее отдельный элемент (в)

Конструкция содара рассчитана на эксплуатацию в автономных полевых условиях. Герметичный ударопрочный корпус антенны защищает от атмосферных воздействий, включая осадки, пыль и перепады температуры. Для обеспечения работоспособности в холодном климате применяются системы обогрева и защиты от образования льда и инея. В частности, возможна установка каталитического пропанового нагревателя, предотвращающего обледенение акустической антенны. Конструкция также имеет элементы виброизоляции и акустического экранирования, снижающие влияние внешних шумов [37], [38].

Отраженный атмосферой акустический сигнал принимается антенной системой, усиливается и оцифровывается. Далее сигнал разбивается на временные интервалы, соответствующие различным расстояниям от источника излучения. Каждому временному интервалу соответствует определенная высотная ячейка зондирования, что позволяет формировать дискретный вертикальный профиль атмосферы.

После оцифровки сигнала для каждой высотной ячейки идет стандартная спектральная обработка с использованием быстрого преобразования Фурье. Спектры мощности, полученные от множества последовательных зондирующих импульсов, усредняются, что позволяет снизить уровень случайного шума. Дополнительно используются процедуры временного и вертикального сглаживания результатов. Сравниваются значения доплеровских сдвигов в соседних высотных ячейках и в последовательных интервалах усреднения, после чего результаты, противоречащие физически допустимым изменениям ветрового профиля, могут классифицироваться как выбросы и исключаться из итогового набора данных.

На этапе цифровой обработки данных выполняется оценка отношения ОСШ и формирование показателя качества измерения. Используется адаптивный порог обнаружения эхо-сигнала [39]. Если значение ОСШ в высотной ячейке оказывается ниже установленного порога, измерение считается недостоверным и исключается из итогового профиля скорости ветра.

Измерения выполняются в десяти фиксированных слоях, расположенных на высотах 40, 50, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180 и 200 м. Диапазон измеряемых значений горизонтальной скорости ветра составляет от 0 до 25 м/с, при этом погрешность ее определения не превышает $\pm 0,5$ м/с [32].

6 Сравнение методов шумоподавления в зарубежных содарах

В таблице 1 обобщены сведения об используемых аппаратных и алгоритмических методах защиты, а также о критериях валидации и отбраковки данных.

Таблица 1 – Сравнение технических решений для повышения помехоустойчивости содаров

Производитель	Аппаратные (конструктивные) методы защиты	Алгоритмические методы шумоподавления	Критерии валидации и отбраковки данных
Metek	<ul style="list-style-type: none"> Фазированная антенная решетка, подавление боковых лепестков. Двойные звукозащитные экраны с треугольными-ми клиньями по периметру верхней кромки. Частотные фильтры. 	<ul style="list-style-type: none"> Многочастотное зондирование. Временное усреднение и сглаживание. Подавление фиксированного эха (помех с нулевым доплеровским сдвигом). 	<ul style="list-style-type: none"> Порог по ОСШ. Доступен просмотр «сырых» данных (без отбраковки). Вычисление спектральных моментов (положение максимума, ширина спектра) с помощью БПФ.
Remtech	<ul style="list-style-type: none"> Фазированная антенная решетка, подавление боковых лепестков. Звукозащитные экраны. Частотная фильтрация. 	<ul style="list-style-type: none"> Сложнокодированный частотный зондирующий сигнал. Спектральное вычитание шума. Временное усреднение. Подавление фиксированного эха (помех с нулевым доплеровским сдвигом). 	<ul style="list-style-type: none"> Принцип многократной валидации: скорость ветра учитывается, если она подтверждена на нескольких зондирующих частотах. Вычисление спектральных моментов (положение максимума, ширина спектра) с помощью БПФ. Обнаружение пиков с порогом ОСШ для разных частот и лучей.
Scintec	<ul style="list-style-type: none"> Фазированная антенная решетка, подавление боковых лепестков. Формирование до 9 направлений зондирования. Звукозащитные экраны. Инверсные акустические рупоры – согласование импеданса, защита от осадков. Автоматическая самодиагностика каждого элемента решетки 	<ul style="list-style-type: none"> Многочастотное зондирование. Подавление фиксированного эха (помех с нулевым доплеровским сдвигом). Временное усреднение. 	<ul style="list-style-type: none"> Сравнение согласованности результатов между разными зондирующими частотами и направлениями лучей. Порог по ОСШ. Если отношение сигнал/шум ниже заданного уровня, высотная ячейка признается недостоверной и исключается. Доступен просмотр "сырых" данных (без отбраковки). Вычисление спектральных моментов (положение максимума, ширина спектра) с помощью БПФ.
Atmospheric Research Technology	<ul style="list-style-type: none"> Наклоненная фазированная антенная решетка – защита от дождя, снега, мусора. Автономное самотестирование. Звукозащитный экран. 	<ul style="list-style-type: none"> Временное усреднение – подавление случайных флуктуаций. 	<ul style="list-style-type: none"> Порог по ОСШ. Если отношение сигнал/шум ниже заданного уровня, высотная ячейка признается недостоверной и исключается. Вычисление спектральных моментов (положение максимума, ширина спектра) с помощью БПФ.
Vaisala (Triton)	<ul style="list-style-type: none"> Наклоненная фазированная решетка – защита от дождя, снега, мусора Звукозащитный экран. 	<ul style="list-style-type: none"> Временное усреднение и сглаживание 	<ul style="list-style-type: none"> Порог по ОСШ. Если отношение сигнал/шум ниже заданного уровня, высотная ячейка признается недостоверной и исключается. Вычисление спектральных моментов (положение максимума, ширина спектра) с помощью БПФ.

7 Шумоподавление в отечественных содарах

У нас в стране исследования и разработки в области акустического зондирования атмосферы были начаты с 1974 года практически одновременно в нескольких научных

институтах и ведутся до сих пор [1], [40], [41]. Был создан целый ряд моделей содаров и с первых же опытов их применения исследователи и разработчики столкнулись как с положительными, так и отрицательными моментами использования акустических волн для измерительных задач в атмосфере. С одной стороны, сильное взаимодействие звуковых волн с атмосферой обеспечивает успех измерительных метеорологических задач, с другой стороны это приводит к случайному характеру сигнала в месте приема и его сильному ослаблению, а также всегда присутствуют внешние акустические шумы и помехи. Поэтому, как описано выше, приходится бороться за повышение энергетики принимаемого содаром сигнала, применяя различные методы. Так вопросы анализа и синтеза построения звукозащитных экранов для антенн содаров были разработаны и изложены в [42], [43], а другие применяемые алгоритмические методы оптимизации приема и шумоподавления описаны в [1].

Заключение

Проведенный сравнительный анализ позволяет не только оценить текущее состояние технологий, но и определить пути дальнейшего развития шумоподавления в содарах. Современный тренд заключается в переходе от пассивной частотной фильтрации к цифровым и алгоритмическим методам анализа сигнала. Если на заре развития содаров основная борьба с шумом сводилась к аппаратным методам (частотной фильтрации, звукозащитным экранам), то сегодня акцент смещается в сторону алгоритмической цифровой обработки. Развитие идет в трех направлениях:

1. В развитии комбинированного подхода, где используется не только аппаратная защита (фазированные антенные решетки, защитные экраны), но и алгоритмическая (многочастотное зондирование и кодирование, спектральная компенсация шума и др.).

2. В адаптивности и машинном обучении, где будущее за алгоритмами, способными адаптироваться к шумовой обстановке. Вместо жестких пороговых критериев (ОСШ) желательно использовать статистические методы, а в перспективе – нейросетевые модели, способные отличать полезный атмосферный сигнал от шума (помехи) по сложным спектральным признакам.

3. В повышении вычислительной мощности, где переход на современные процессоры (ARM, FPGA) позволит перенести сложную математику (многочастотное БПФ, корреляционный и спектральный анализ) непосредственно в аппаратуру содара. Это откроет путь к использованию методов, которые ранее считались слишком ресурсоемкими для полевых измерителей.

Анализ стратегий ведущих производителей позволяет выделить два принципиально разных подхода к достижению помехоустойчивости, в рамках которых сформировались явные лидеры. В области аппаратных (конструктивных) решений лидером несомненно является компания Scintec. Она выделяется комплексным подходом к проектированию антенной системы содара, который включает использование инверсных рупоров для оптимального акустического согласования с атмосферой, разработку эффективных звукозащитных экранов различной конфигурации и, что особенно важно, внедрение системы самодиагностики каждого элемента фазированной решетки. Это позволяет поддерживать близкую к теоретическому пределу диаграмму направленности содара в течение всего срока эксплуатации, что является ключевым фактором аппаратного подавления помех.

В области алгоритмических методов шумоподавления бесспорным лидером выступает компания Remtech, которая сделала ставку на математические методы, как на основной инструмент выделения сигнала. Ключевая технология Remtech – сложнокодированный зондирующий сигнал (multi-frequency coding) с последующей

валидацией данных. Реализованный принцип «одна скорость, подтвержденная несколькими частотами зондирования» позволяет получать достоверные оценки при экстремально низком отношении сигнал/шум (производителем заявляется выигрыш до 20 дБ), в условиях, где аппаратные методы других производителей оказываются бессильны. Кроме того, Remtech активно развивает методы спектральной компенсации шума, оценивая шумовую обстановку в паузах между зондирующими импульсами, что повышает эффективность работы содаров.

Реализация всех описанных методов в содарах позволит создавать и применять надежные стационарные и мобильные измерительные средства для зондирования атмосферы.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН по проекту № FWRG-2026-0006.

Список использованных источников

1. Красненко Н. П. Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя. Томск: Водолей, 2001. – 278 с.
2. Bradley S. Atmospheric Acoustic Remote Sensing: Principles and Applications. - Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2007. - 296 p.
3. Красненко Н.П. Содары для зондирования атмосферного пограничного слоя // Научное приборостроение. 2018. Т. 28. № 4. С. 82-89.
4. Crescenti G.H. The degradation of doppler sodar performance due to noise // Atmospheric Environment. - 1998. - Vol. 32, N 9. - P. 1499-1509.
5. Metek GmbH Germany. URL: <https://metek.de> (дата обращения 01.04.2026)
6. Krajny E.A., Ośródko L., Wojtylak M. Application of Doppler sodar in short-term forecasting of PM10 concentration in the air in Krakow (Poland) // Atmospheric Measurement Techniques. - 2024. - Vol. 17. - P. 2451-2464.
7. de Haij M. On the use of SODAR reflectivity data during low visibility conditions at Schiphol Airport. - De Bilt: Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI), 2010. - Report No. IR2010-02.
8. Sree Brahmanandam P., Gouthu U., Tarakeswara Rao K. [et al.] Doppler Sodar Measured Winds and Sea Breeze Intrusions over Gadanki (13.5° N, 79.2° E), India // Sustainability. - 2023. - Vol. 15, N 15. - P. 12167.
9. Probst O., Cárdenas D. State of the Art and Trends in Wind Resource Assessment // Energies. - 2010. - Vol. 3, N 6. - P. 1087-1141.
10. Lokoshchenko M.A., Yavlyayeva E.A. Wind profiles in Moscow city by the sodar data // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2008. - Vol. 1. - P. 012045.
11. Локощенко М.А. О высоте приземного слоя воздуха по содарным данным // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. - 2024. - Т. 60, N 1. - С. 65-72.
12. Hansen K.S. Validation of Sodar Measurements for Wind Power // Proceedings of the European Wind Energy Conference & Exhibition (EWEC 2006) (Athens, 2006). - Athens, 2006. - P. 1-10.
13. Acoustic Sounder SODAR PCS2000-64 Product Description. - Elmshorn: METEK GmbH. - 19 p.
14. Penelope Menounou, Ilene J. Busch-Vishniac, David T. Blackstock; Jagged-edge noise barriers. J. Acoust. Soc. Am. 1 May 1998; 103: P. 2759–2770. <https://doi.org/10.1121/1.421452>.

15. Signal Analysis Doppler-SODAR MODOS DSDR3x7 DSDPA.90-24/-64 PCS-2000/-24/-64. - Elmshorn: METEK GmbH. - 96 p.
16. Remtech Inc. [Электронный ресурс]. - URL: <https://remtechinc.com/> (дата обращения 12.03.2026).
17. Remtech Sodar Technical Description [Электронный ресурс]. - URL: https://remtechinc.com/wp-content/uploads/DC02012_SODAR_TECHNICAL_DESCRIPTION_0.pdf (дата обращения 12.03.2026).
18. Freitas E.D., Dias M.A.F.S., Nair K.S., Silva Dias P.L. Using of Doppler Sodar in Atmospheric Measurements // Hybrid Methods in Engineering. - 2000. - Vol. 2, N 4. - P. 543-558.
19. Haggagy M.E.-N. A Sodar-based Investigation of the Atmospheric Boundary Layer. - Freiburg: Meteorologisches Institut der Universität Freiburg, 2003. - 263 p.
20. Baumann-Stanzer K., Piringer M. Two-years of boundary layer measurements with a sodar - Statistics and applications // Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere. - 2001. - Vol. 26, N 3. - P. 205-211.
21. Baumann-Stanzer K., Piringer M. Foehn signals detected by sodar wind and turbulence measurements in the Rhine Valley, Austria, during the MAP field phase // Meteorology and Atmospheric Physics. - 2004. - Vol. 85, N 1. - P. 125-139.
22. USA патент N 5,521,883, от 28.05.1996 г. Method of Remotely Determining the Three-Dimensional Velocity of a Fluid Such as Air or Water / J.-M. Fage, R. Tasso, A. Donzier; патентообладатель Remtech (Velizy) // Justia Patents. - URL: <https://patents.justia.com/patent/5521883> (дата обращения 28.02.2026).
23. Scintec AG [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.scintec.com/> (дата обращения 12.03.2026).
24. Berg L.K., Reynolds R.M., Allwine K.J., Blumberg A. Comparisons of Measurements Made Using Two Sodars in an Urban Environment // 86th AMS Annual Meeting. Paper No. JP2.9. - Boston: American Meteorological Society, 2006. - 3 p.
25. SODAR Calibration for Wind Energy Applications: Final Reporting on WP3, EU WISE Project NNE5-2001-297. - Отчет. - 2005. - 69 p.
26. Anderson P.S., Ladkin R.S., Renfrew I.A. An Autonomous Doppler Sodar Wind Profiling System // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. - 2005. - Vol. 22, N 9. - P. 1301-1310.
27. Scintec Flat Array Sodars Installation and Operation Manual: SFAS, MFAS, XFAS. - Rottenburg: Scintec AG, 2011. - 33 p.
28. Rogers A.L., Manwell J.F. Investigation of the Applicability of SODAR for Wind Resource Measurements in Complex and Inhomogeneous Terrain. - Amherst: University of Massachusetts, Renewable Energy Research Laboratory, 2003. - 11 p.
29. Draxl C., Worsnop R.P., Xia G. [et al.] Mountain waves can impact wind power generation // Wind Energy Science. - 2021. - Vol. 6, N 1. - P. 45-60.
30. Atmospheric Research & Technology [Электронный ресурс]. - URL: <https://sodar.com/> (дата обращения 12.03.2026).
31. Walls E., Rogers A., Manwell J. Eastham, MA: SODAR-Based Wind Resource Assessment // Proceedings of the American Wind Energy Association (AWEA) Windpower 2007 Conference (Los Angeles, 2007). - Los Angeles, 2007. - 80 p.
32. Vaisala [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.vaisala.com/> (дата обращения 17.03.2026).
33. SoDAR Verification Test Triton SoDAR at Test Site Lelystad. - Отчет. - 2008. - 47 p.
34. Yuechun Y., Jixue W., Hongfang W. [et al.] Comparison of Triton SODAR Data to Meteorological Tower Wind Measurement Data in Hebei Province, China. - Golden: National

Renewable Energy Laboratory (NREL), 2012. - 38 p.

35. Accuracy Test of a Sodar of Type Triton Wind Profiler Serial No.: 225. - Отчет о калибровке. - 2010. - 98 p.

36. Triton SODAR Brochure [Электронный ресурс]. - Vaisala Oyj. - URL: https://www.sartelco.it/contenuti/download/EOLICO_WIND/Triton-Brochure.pdf (дата обращения 12.03.2026).

37. Pat. WO2008108894A2, от 2008 г. Transducer Array Arrangement and Operation for Sodar Applications. Pat. WO2008108894A2, от 18.09.2008 г. Transducer Array Arrangement and Operation for Sodar Applications; патентообладатель WIPO Patentscope. - URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2008108894> (дата обращения 18.03.2026).

38. Pat. US8456955B2 USA, от 2013 г. Housings for Phased Array Monostatic Sodar Systems. Pat. US8456955B2, USA, от 04.06.2013 г. Housings for Phased Array Monostatic Sodar Systems / (Remtech, по патенту US); патентообладатель Remtech // USPTO / Justia Patents. - URL: <https://patents.justia.com/patent/8456955> (дата обращения 18.03.2026).

39. TRITON® SONIC WIND PROFILER Siting Guidelines. - Vaisala Oyj, 2012. - 38 p.

40. Красненко Н.П. Развитие дистанционных методов и средств изучения нижней атмосферы в ИМКЭС СО РАН // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 2. С. 98-104.

41. Красненко Н.П., Раков А.С., Рыбаков И.А. Состояние и тенденции развития систем акустического зондирования атмосферы // Сборник Трудов XXXVII сессии Российского акустического общества (Москва, 20-24 октября 2025 г.) [Электронный ресурс]. - М.: ГЕОС, 2025. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - С. 115-123.

42. Красненко Н.П., Мананко Е.Е. Анализ и синтез защищенных акустических антенн для атмосферных исследований // Труды XV сессии Российского акустического общества «Акустические измерения. Ультразвук и ультразвуковые технологии. Атмосферная акустика. Акустика океана». Т. II. - М.: ГЕОС, 2004. - С. 102-106.

43. 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.

References

1. Krasnenko N.P. Acoustic sounding of the atmospheric boundary layer. - Tomsk: Vodolay, 2001. - 278 p.

2. Bradley S. Atmospheric Acoustic Remote Sensing: Principles and Applications. - Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2007. - 296 p.

3. Krasnenko N.P. Sodars for Atmospheric Boundary Layer Sounding // Nauchnoe Priborostroenie. - 2018. - Vol. 28, N 4. - P. 82-89.

4. Crescenti G.H. The degradation of doppler sodar performance due to noise // Atmospheric Environment. - 1998. - Vol. 32, N 9. - P. 1499-1509.

5. Metek GmbH Germany. URL: <https://metek.de> (date of reference 01.04.2026)

6. Krajny E.A., Ośródko L., Wojtylak M. Application of Doppler sodar in short-term forecasting of PM10 concentration in the air in Krakow (Poland) // Atmospheric Measurement Techniques. - 2024. - Vol. 17. - P. 2451-2464.

7. de Haij M. On the use of SODAR reflectivity data during low visibility conditions at Schiphol Airport. - De Bilt: Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI), 2010. - Report No. IR2010-02.

8. Sree Brahmanandam P., Gouthu U., Tarakeswara Rao K. [et al.] Doppler Sodar Measured Winds and Sea Breeze Intrusions over Gadanki (13.5° N, 79.2° E), India // Sustainability. - 2023. - Vol. 15, N 15. - P. 12167.
9. Probst O., Cárdenas D. State of the Art and Trends in Wind Resource Assessment // Energies. - 2010. - Vol. 3, N 6. - P. 1087-1141.
10. Lokoshchenko M.A., Yavlyayeva E.A. Wind profiles in Moscow city by the sodar data // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2008. - Vol. 1. - P. 012045.
11. Lokoshchenko M.A. On the height of the surface air layer according to sodar data // Izvestiya of the Russian Academy of Sciences. Physics of the Atmosphere and Ocean. - 2024. - Vol. 60, N 1. - P. 65-72.
12. Hansen K.S. Validation of Sodar Measurements for Wind Power // Proceedings of the European Wind Energy Conference & Exhibition (EWEC 2006) (Athens, 2006). - Athens, 2006. - P. 1-10.
13. Acoustic Sounder SODAR PCS2000-64 Product Description. - Elmshorn: METEK GmbH. - 19 p.
14. Penelope Menounou, Ilene J. Busch-Vishniac, David T. Blackstock; Jagged-edge noise barriers. J. Acoust. Soc. Am. 1 May 1998; 103: P. 2759-2770. <https://doi.org/10.1121/1.421452>.
15. Signal Analysis Doppler-SODAR MODOS DSDR3x7 DSDPA.90-24/-64 PCS-2000/-24/-64. - Elmshorn: METEK GmbH. - 96 p.
16. Remtech Inc. [Electronic resource]. - URL: <https://remtechinc.com/> (date of reference 12.03.2026).
17. Remtech Sodar Technical Description [Electronic resource]. - URL: https://remtechinc.com/wp-content/uploads/DC02012_SODAR_TECHNICAL_DESCRIPTION_0.pdf (date of reference 12.03.2026).
18. Freitas E.D., Dias M.A.F.S., Nair K.S., Silva Dias P.L. Using of Doppler Sodar in Atmospheric Measurements // Hybrid Methods in Engineering. - 2000. - Vol. 2, N 4. - P. 543-558.
19. Haggagy M.E.-N. A Sodar-based Investigation of the Atmospheric Boundary Layer. - Freiburg: Meteorologisches Institut der Universität Freiburg, 2003. - 263 p.
20. Baumann-Stanzer K., Piringer M. Two-years of boundary layer measurements with a sodar - Statistics and applications // Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere. - 2001. - Vol. 26, N 3. - P. 205-211.
21. Baumann-Stanzer K., Piringer M. Foehn signals detected by sodar wind and turbulence measurements in the Rhine Valley, Austria, during the MAP field phase // Meteorology and Atmospheric Physics. - 2004. - Vol. 85, N 1. - P. 125-139.
22. USA patent N 5,521,883, or 28.05.1996 г. Method of Remotely Determining the Three-Dimensional Velocity of a Fluid Such as Air or Water / J.-M. Fage, R. Tasso, A. Donzier; patent holder of Remtech (Velizy) // Justia Patents. - URL: <https://patents.justia.com/patent/5521883> (date of reference 28.02.2026).
23. Scintec AG [Electronic resource]. - URL: <https://www.scintec.com/> (date of reference 12.03.2026).
24. Berg L.K., Reynolds R.M., Allwine K.J., Blumberg A. Comparisons of Measurements Made Using Two Sodars in an Urban Environment // 86th AMS Annual Meeting. Paper No. JP2.9. - Boston: American Meteorological Society, 2006. - 3 p.
25. SODAR Calibration for Wind Energy Applications: Final Reporting on WP3, EU WISE Project NNE5-2001-297. - Report. - 2005. - 69 p.
26. Anderson P.S., Ladkin R.S., Renfrew I.A. An Autonomous Doppler Sodar Wind Profiling System // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. - 2005. - Vol. 22, N

9. - P. 1301-1310.

27. Scintec Flat Array Sodars Installation and Operation Manual: SFAS, MFAS, XFAS. - Rottenburg: Scintec AG, 2011. - 33 p.

28. Rogers A.L., Manwell J.F. Investigation of the Applicability of SODAR for Wind Resource Measurements in Complex and Inhomogeneous Terrain. - Amherst: University of Massachusetts, Renewable Energy Research Laboratory, 2003. - 11 p.

29. Draxl C., Worsnop R.P., Xia G. [et al.] Mountain waves can impact wind power generation // Wind Energy Science. - 2021. - Vol. 6, N 1. - P. 45-60.

30. Atmospheric Research & Technology [Electronic resource]. - URL: <https://sodar.com/> (date of reference 12.03.2026).

31. Walls E., Rogers A., Manwell J. Eastham, MA: SODAR-Based Wind Resource Assessment // Proceedings of the American Wind Energy Association (AWEA) Windpower 2007 Conference (Los Angeles, 2007). - Los Angeles, 2007. - 80 p.

32. Vaisala [Electronic resource]. - URL: <https://www.vaisala.com/> (date of reference 17.03.2026)

33. SoDAR Verification Test Triton SoDAR at Test Site Lelystad. - Report. - 2008. - 47 p.

34. Yuechun Y., Jixue W., Hongfang W. [et al.] Comparison of Triton SODAR Data to Meteorological Tower Wind Measurement Data in Hebei Province, China. - Golden: National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2012. - 38 p.

35. Accuracy Test of a Sodar of Type Triton Wind Profiler Serial No.: 225. - Calibration report. - 2010. - 98 p.

36. Triton SODAR Brochure [Electronic resource]. - Vaisala Oyj. - URL: https://www.sartelco.it/contenuti/download/EOLICO_WIND/Triton-Brochure.pdf (date of reference 12.03.2026).

37. Pat. WO2008108894A2, от 2008 г. Transducer Array Arrangement and Operation for Sodar Applications. Pat. WO2008108894A2, dated 18.09.2008 г. Transducer Array Arrangement and Operation for Sodar Applications; patent holder of WIPO Patentscope. - URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2008108894> (date of reference 18.03.2026).

38. Pat. US8456955B2 USA, dated 2013 г. Housings for Phased Array Monostatic Sodar Systems. Pat. US8456955B2, USA, от 04.06.2013 г. Housings for Phased Array Monostatic Sodar Systems; patent holder of Remtech // USPTO / Justia Patents. - URL: <https://patents.justia.com/patent/8456955> (date of reference 18.03.2026).

39. TRITON® SONIC WIND PROFILER Siting Guidelines. - Vaisala Oyj, 2012. - 38 p.

40. Krasnenko N.P. Development of remote methods and means for studying the lower atmosphere at IMKES SB RAS // Optika Atmosfery i Okeana. - 2022. - Vol. 35, N 2. - P. 98-104

41. Krasnenko N.P., Rakov A.S., Rybakov I.A. State and trends in the development of acoustic sounding systems for the atmosphere // Proceedings of the XXXVII Session of the Russian Acoustical Society (Moscow, October 20-24, 2025) [Electronic resource]. - Moscow: GEOS, 2025. - 1 electronic optical disc (CD-ROM). - P. 115-123

42. Krasnenko N.P., Mananko E.E. Analysis and synthesis of shielded acoustic antennas for atmospheric research // Proceedings of the XY Session of the Russian Acoustical Society "Acoustic Measurements. Ultrasound and Ultrasonic Technologies. Atmospheric Acoustics. Ocean Acoustics". Vol. II. - Moscow: GEOS, 2004. - P. 102-106

43. Krasnenko N.P., Mananko E.E. Mirror-parabolic acoustic antennas for atmospheric sounding // Methods and Devices for Information Transmission and Processing: Interuniversity collection of scientific papers. Issue 5 / Ed. by V.V. Romashev, V.V. Bulkin. - St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2004. - P. 83-98