

ЗВУКОВЫЕ АНТЕННЫ ДЛЯ АКУСТИЧЕСКОГО И РАДИОАКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

На основе интегрирования физических принципов методов акустического (содарного) и радиоакустического зондирования (РАЗ) исследована специфика их звуковых антенных систем. В результате анализа основных типов звуковых содарных антенн предложена рупорно–рефлекторная акустическая антенна с повышенной помехоустойчивостью. Звуковые РАЗ антенны рассмотрены для четырех основных методов РАЗ. Представлена комбинированная кольцевая звуковая–электромагнитная антенна для метода наклонного РАЗ

звуковые антенны, акустическое (содарное) зондирование, радиоакустическое зондирование, рупорно–рефлекторная акустическая антенна, помехоустойчивость, звуковая–электромагнитная антенна

1. Базисная физическая общность содар–РАЗ техники

Акустическое зондирование основано на принципе приема обратного рассеяния звука в атмосфере акустическим локатором (содаром). При радиоакустическом зондировании (РАЗ) используется резонансное отражение радиоволн (по закону Брэгга) от периодических неоднородностей атмосферы, обусловленных посылкой акустических волн. В РАЗ используется известное физическое соотношение между скоростью звука и температурой воздуха. Таким образом, содар получает эхо сигналы от естественных рассеивателей, а в РАЗ искусственная цель создается акустической посылкой. Это отражается в уравнениях локации для содара и РАЗ, согласно которым мощность эхо сигнала P_r в большей мере зависит от параметров акустической антенны [1,2].

Частота акустического излучения для большинства коммерческих содаров и систем РАЗ обычно лежит в диапазоне от 1000 до 5000 Гц (длины волн: акустическая $\lambda_a=34\div 7$ см и электромагнитная $\lambda_e=68\div 14$ см). Некоторые системы РАЗ работают на таких низких частотах как 84 Гц [3]. Длительность

акустического импульса (τ), связанная с длиной волны соотношением $N = c\tau/\lambda_a$, где c – скорость звука в воздухе, может варьироваться от 20 до 300 мс.

Выходная акустическая мощность находится в пределах от 2 до 300 Вт [4]. Увеличение акустической мощности имеет определенный физический предел. Распространение звуковой волны с большой амплитудой приводит к эффекту нелинейного взаимодействия звука с атмосферным воздухом. Это обуславливает дополнительные акустические потери, превосходящие потери за счет механизма поглощения для малых амплитуд звука в воздухе. В результате основная энергия волны расходуется на создание гармоник, которые интенсивно затухают в атмосфере. Для инженерной оценки полагают, что акустическая мощность не должна превышать величины P_s [5]

$$P_s \approx 1.88 \cdot 10^4 \lambda_a / R_{nonl},$$

где $R_{nonl} = 16S_a / \lambda_a$ [2],

S_a – площадь антенны.

Требования к стабильности акустической частоты запишем в виде

- для содара $\frac{\Delta f_a}{f_a} = \frac{2\Delta v_w}{c}$,

- для РАЗ
$$\frac{\Delta f_a}{f_a} = \tau \sqrt{\frac{\Delta T}{T}},$$

где Δv_w – абсолютная ошибка измерений ветра, ΔT – абсолютная ошибка измерений температуры.

Эти соотношения показывают, что относительная нестабильность в обоих случаях при погрешностях измерений ветра и температуры 0,1 м/с и 0,1 К находится на уровне $4 \cdot 10^{-4} \div 6 \cdot 10^{-4}$. Поэтому в этих видах зондирования непригодны в качестве акустического источника свистки или сирены.

Содары, работающие на частоте около 1 кГц, как правило, имеют максимальную высоту зондирования до 2 км. Но обычная высота большинства коммерческих содаров не более 600–800 м. С учетом эффекта увеличения молекулярного затухания звука высота зондирования содаров на частотах 4–6 кГц не превышает 150–200 м [6].

Системы РАЗ работают на близких высотах зондирования.

Акустические волны затухают, распространяясь через атмосферу. В нормальных атмосферных условиях коэффициент затухания звука $\alpha_m \approx 6$ и 32 дБ/км для частот 1 и 5 кГц [7]. Избыточное затухание (α_e) из-за потерь акустического сигнала за счет ветровой рефракции и турбулентного расширения луча акустической антенны является обычно много меньше, чем α_m , за исключением некоторых условий интенсивной турбулентности, когда α_e может быть больше половины величины α_m [8].

В приповерхностном атмосферном слое, где работает аппаратура зондирования, существуют различные акустические шумы естественной и техногенной природы. Максимальные уровни шума в частотном диапазоне 1–5 кГц относительно порога слышимости показаны на рис. 1 [9]. По нашим наблюдениям, уровни эхо сигнала моностатического содара с площадью антенной апертуры $S_a=1$ кв.м при излученной мощности 10 Вт и рабочей частоте 2,6 кГц лежали в интервале от 30 дБ до 60 дБ (за-

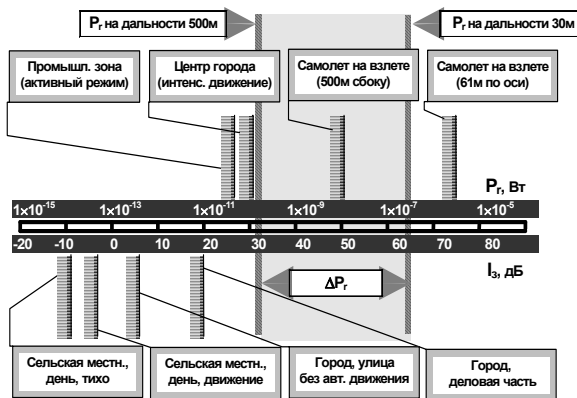


Рис. 1. Типичные уровни акустических шумов вокруг содара

темненная область на рис. 1).

2. Специфические требования к акустическим антеннам содаров и систем РАЗ

Громкие зондирующие акустические импульсы, излучаемые содаром или системой РАЗ, могут быть раздражающим воздействием для человека. Следовательно, это оборудование, используемое для изучения загрязнения среды, само может стать источником шумового загрязнения. Из-за этого мы должны были ограничить ночные работы по атмосферному зондированию [10].

Другие исследователи, например, [11], были вынуждены снизить уровень излучаемой звуковой мощности на 12 дБ, чтобы уменьшить влияние звуковых импульсов на персонал. При работе мобильной станции РАЗ на улицах Токио после нескольких посылок на одном месте исследователи быстро перевозили установку на другое место, не дожидаясь возмущенной реакции жителей [12].

С другой стороны замечено, что качество содарных данных ухудшается вблизи оживленных магистралей, аэродромов и подобных шумных объектов. Ветер производит шум на поверхности акустической антенны и на растяжках.

Поэтому важно, чтобы акустические антенны

содара и системы РАЗ имели жестко направленный акустический луч с низким уровнем боковых лепестков, особенно это важно для боковых лепестков в направлении $80-90^\circ$ от главного максимума. Важность этой характеристики акустической антенны отмечена на начальном этапе техники зондирования с использованием акустических волн [13, 14].

В радиотехнике пути создания антенн с низким уровнем дальних боковых лепестков, во многом схожие с акустикой, имеют более длительную историю и напрямую связаны с проблемой электромагнитной совместимости и помехоустойчивости антенн. Поэтому будет достаточно корректно рассмотреть применительно к акустическим антеннам такие важные параметры, как помехозащищенность и акустическая совместимость аппаратуры зондирования атмосферы. Имеется практически полная аналогия в основных мерах по повышению электромагнитной и акустической шумозащиты антенн:

- размещение по кромке апертуры тубуса с импедансным внутренним покрытием;
- расфазировка кромок апертуры;
- уменьшение дифракции на кромках;
- использованием поглощающих материалов;
- создание специальных распределений в апертуре.

Главными элементами любой акустической антенной конструкции, обеспечивающей эффективное акустическое экранирование, являются звукоизолирующий тубус (ограждение, экран, бленда) и дифракционный козырек или расфазированные зубчатые края апертуры. Эффективность этих элементов иллюстрируется представленной на рис. 2а комбинационной акусто-электромагнитной антенной и ее экспериментальными диаграммами направленности (рис. 2б) [15]. Результирующие данные свидетельствуют об одинаковой эффективности импедансного тубуса и дифракционного козырька в проблеме подавления дальних боковых лепестков для акустических и электромагнитных волн. На звуко-

вых волнах уровень боковых лепестков под углом 90° от главного лепестка при наличии тубуса уменьшается до 30 дБ, а козырек дает до 10 дБ.

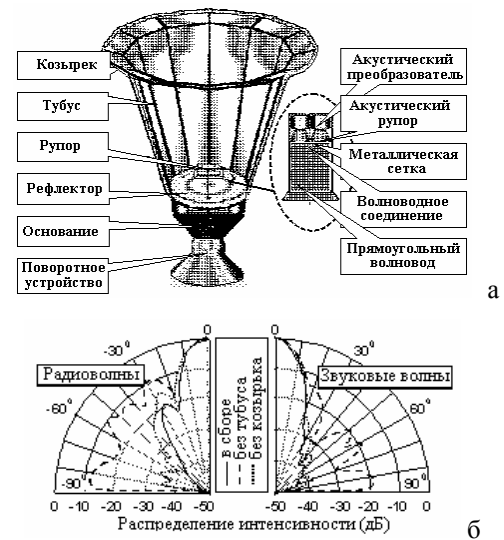


Рис. 2. Комбинированная акусто-электромагнитная антенна (а) и ее экспериментальные диаграммы направленности (б)

Экспериментальные [16] и численные [17] исследования по оптимизации конструкции поглощающей акустической бленды (рис. 3 и 4) показали, что угол раскрытия должен быть в пределах $(0.8 \div 1.1)\theta_{0.5}$, а высота бленды – в пределах $(1.8 \div 2.0)D_0$, где $\theta_{0.5}$ – ширина диаграммы направленности, D_0 – диаметр апертуры.

3. Сравнительная характеристика антенн содаров и систем РАЗ

Первая в истории антенна акустических волн, использованная для зондирования нижней атмосферы, известна как рупорный излучатель Тиндаля (рис. 5). Он первым экспериментально обнаружил атмосферные неоднородности, рассеивающие падающее звуковое излучение. [18].

С конца 1960-х годов наиболее широко распространены были рефлекторные акустические антенны с параболическим зеркалом и возбудителем в фокусе зеркала – мембранным электроакустическим преобразователем. В начале 1990-х появились аку-

стические фазированные решетки. В последнее время рекламных листовках лидирующих мировых фирм–производителей акустической и радиоаппаратуры (Remtech, Metek, Scintec, Kaijo, Radian, AeroVironment, Atmospheric Research) описаны также гибридные сканирующие акустические антенны. Некоторые такие антенны показаны на рис. 6.

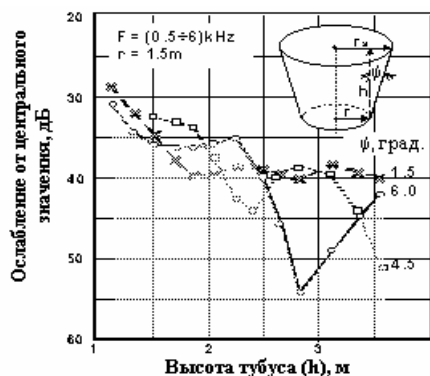


Рис. 3. Коэффициент усиления под углом 90° при различных углах конуса ψ

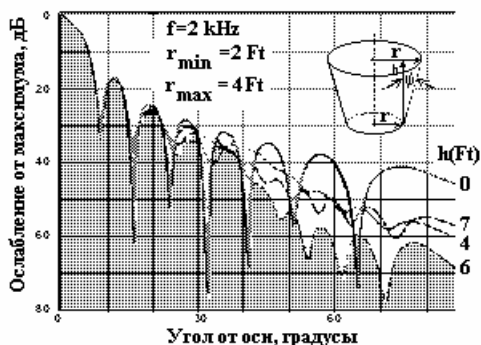


Рис. 4. Диаграммы направленности при различных высотах ограждения h и равноамплитудном возбуждении апертуры

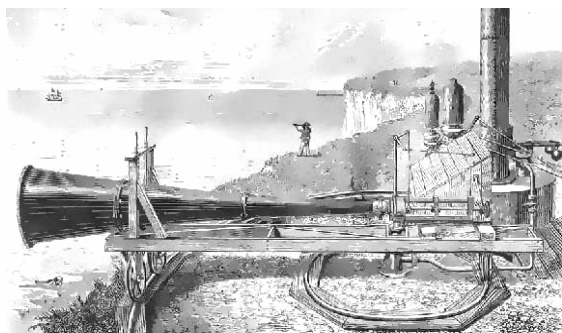


Рис. 5. Рупорная антенна Тиндаля (1867)

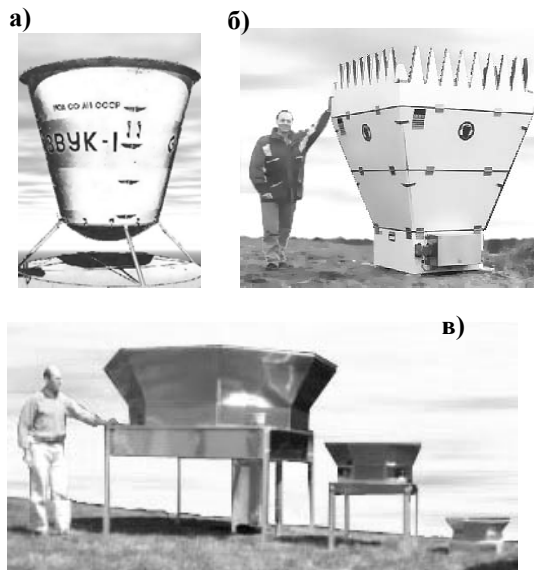


Рис. 6. Акустические антенны (а) с механическим (Россия) и (б) электронным сканированием (Metek); (в) семейство антенн на разные частоты (Remtech)

Имеются два основных типа геометрии содарного зондирования: моностатический содар включает совмещенный передатчик и приемник, бистатическая система имеет отдельные передатчик и приемник. Для определения полного ветрового вектора необходимы минимум три комбинации передатчик–приемник. В такой системе используются три приемо–передающие антенны. Две радиальных скорости ветра получают с помощью двух антенн, наклоненных под углом $15^\circ \div 30^\circ$ к вертикали и под прямым углом к друг другу, третью радиальную скорость — при помощи вертикальной антенны (рис. 7).

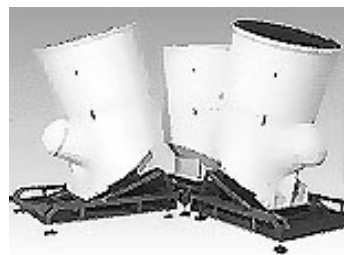


Рис. 7. Трехлучевая содарная антенна (Kaijo corp.)

Фазированная антенная решетка содара является трехосевой моностатической системой. Вместо ис-

пользования трех различных антенн применяют сканирующую решетку вертикально ориентированных приеме-передающих преобразователей (рис. 8).

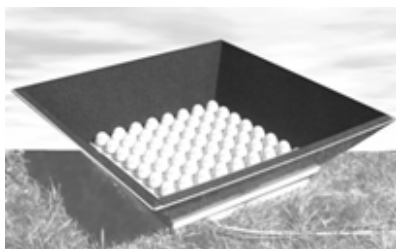


Рис. 8. Фазированная антенная решетка с 64 вертикально направленными пьезоэлектрическими преобразователями (Scintec corp.)

Основной недостаток акустических антенных решеток – высокий уровень боковых лепестков, что связано с большими углами электронного сканирования. В гибридных звуковых акустических антеннах (рис. 9) уровень дальних боковых лепестков уменьшен за счет использования дополнительного звукового рефлектора между вертикальной антенной решеткой и стенкой пирамидального вертикального рупора. Наш опыт использования акустических антенных решеток в структуре РАЗ свидетельствует, что непостоянство фазовых характеристик электроакустических преобразователей в решетках является причиной отсутствия точного фазирования.

Преобразователи решетки изменяют свой период звуковых колебаний при изменении влажности и температуры воздуха, попадании гидрометеоров и пыли в преобразователи, накоплении насекомых внутри преобразователей. Суточные изменения фазы некоторых преобразователей составляют $5^{\circ} \div 10^{\circ}$.

4. Специфические характеристики звуковых антенн систем РАЗ

Основной ограничивающий фактор эффективности радиоакустического зондирования атмосферы –

влияние ветра на звуковой пакет, вызывающее уход отраженного электромагнитного пятна из апертуры приемной антенны.

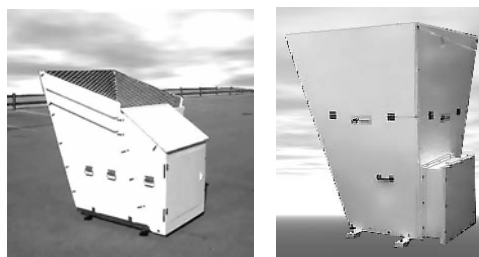


Рис. 9. Современные акустические гибридные антенны: слева – ART (частное владение), справа – AeroVironment корпорации

Минимизация бокового уровня излучения достигнута в симметричной антенной конструкции (рис. 10) [19], где скомбинированы пирамидальный рупор с дифракционным козырьком, промежуточный наклонный рефлектор, и экспоненциальный согласующий рупор.

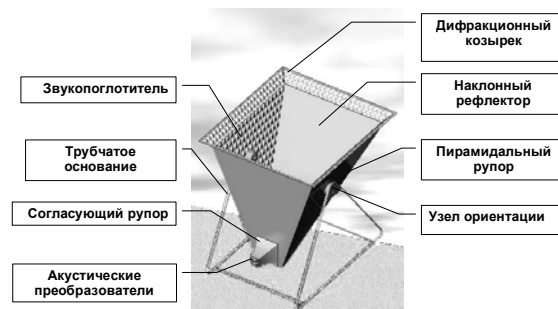


Рис. 10. Однолучевая акустическая антенна с минимизированным уровнем боковых лепестков

Имеются четыре основных метода компенсации влияния ветра. В первом методе предусмотрен блок поворачивающихся антенн с перемещением приемной радиоантенны [20]. В альтернативном варианте используется приемно-передающая радиоантенна и перемещаемая звуковая антенна [фирмы Metek (начало 1990-х)]. Не столь громоздкой является аппаратура РАЗ с перемещением акустического источника (рис. 11), разработанная в ХИРЭ, Харьков, научной группой под руководством Прошкина (1982)

[21].

Третий метод основан на использовании поля радиоантенн с несколькими акустическими источниками вокруг него (рис. 12, Япония) [22].



Рис. 11. Система РАЗ с подвижной звуковой антенной (ХИРЭ)



Рис. 12. Система РАЗ: поле радиоантенн с акустическими источниками вокруг (CRIEPI)

В настоящее время акустические антенны часто помещают по направлению господствующих ветров [23]. Четвертый метод наклонного радиоакустического зондирования [24] основан на физическом эффекте деформации фронта акустической волны ветром при распространении в атмосфере. Адаптация к ветру достигается наклонным зондированием по и против ветра в диапазоне углов места приблизительно 20÷45 градусов [25].

Для реализации метода наклонного РАЗ разработана комбинированная акусто-электромагнитная кольцевая антенна (рис. 13). Она включает 18 шумозащищенных рупорно-рефлекторных комбинированных акусто-электромагнитных антенн, расположенных по кругу под углом около 45 градусов к вертикальной стойке [26].

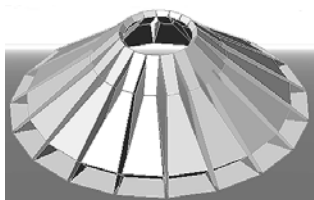


Рис. 13. Антенная решетка для наклонного РАЗ

Во всех радиоакустических методах из энергетических соображений недопустима изрезанность диа-

грамм направленности звуковых антенн, которая возникает в решетках как результат атмосферных воздействий. В аппаратуре РАЗ не применяются акустические антенны с электронным сканированием. Поэтому в системах РАЗ более широко используются акустические зеркальные антенны, а фазированные решетки применяются для получения значительных мощностей акустического излучения.

Заключение

Показаны основные современные типы звуковых антенн для содаров и систем РАЗ на базе общих принципов взаимодействия звука с атмосферой. Эти антенны во многих отношениях являются похожими. Главным, что присуще всем звуковым антеннам, является обязательное использование звукоизолирующих ограждений. Только при их применении можно говорить о звуковой совместимости акустического и радиоакустического оборудования с окружающей средой.

Литература

1. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя. - Томск: Водолей, 2001. - 278 с.
2. Каллистратова М.А., Кон А.И. Радиоакустическое зондирование атмосферы. - М.: Наука, 1985. - 197 с.
3. North E.M. et al. Bull. AMER. Meteor. Soc., 1973, v.54, N9, p.912-919.
4. Clifford, S. F. et al. Proc. IEEE, 1994, № 82, p.313-355.
5. Руденко О.В. Основы нелинейной акустики. - М.: Наука, 1982. - 176 с.
6. Coulter R.L. Proc. 8th ISARS, Moscow, p. G.25-G.26.
7. Harris C.M. J. Acoust. Soc. Amer., 1966, № 40, p. 788-802.
8. Brown E.H. and Clifford S.F. J. Acoust. Soc.

Amer., 1976, № 60, p. 148-159.

9. Красненко Н.П., Одинцов С.Л. Труды IV Всесоюз. симпозиума по лазерному и акустическому атмосферному зондированию. - Томск, 1976. - С. 229-231.

10. Ульянов и др. Совмещенное акустическое и радиоакустическое атмосферное зондирование в прибрежной зоне // Препринт ИФА. №7, часть 1., 1990. - С.47-54.

11. Vogt, S. and Thomas P. J. Atmos. Oceanic Technol. N11, 1994, p. 94-102.

12. Akai Y. and Kanzaki T. Proc. 9th ISARS, 1998, Vienna, p. 200-203.

13. Simmons W.R. et al. NOAA TR ERL 216-WPL, Boulder, 1971, 77 pp.

14. Hall, F.F., Jr.; Wescott, J.W. J. Acoust. Soc. Amer. 1974, N 56, p. 1376-1382.

15. Патент Российской Федерации № 2168818 от 10 июня 2001. Комбинированная радио- и акустическая антенна/Ульянов Ю.Н., Бутакова С.В., др.

16. Красненко Н.П., Роот А.Т. Труды IX Всесоюзного симпозиума по лазерному и акустическому атмосферному зондированию. - Томск, 1987. - часть 1, с. 225-229.

17. Strand O.N. J. Acoust. Soc. Amer., 1971, N49, p. 1698-1703.

18. Tyndall J. The science of sound (3rd Edition.) Longman, Green & Co. London 1875 (Reprinted by Phil. Lib., New York, 1964: first edition, Sound. Publ., 1867).

19. Ulyanov Y.N. and Butakova S.V. Proc. 13th CRIMICO, 2003, Sevastopol.

20. Frankel M.S. et al. Bull. Am. Meteorol. Soc., 1977, N58, p. 928-934.

21. Прошкин Е.Г. Труды VI Всесоюзного совещания по радиометеорологии. - Таллинн, 1982. - С. 330-332.

22. Matuura N.Y. et al. Nature, 1986, N323, p. 426-428.

23. Coulter R.L. Proc. 10th Symp. On Meteorol. Observ. & Instr., Boston, 11-16 Jan. 1998, p. 223-227.

24. Ulyanov Y.N. et al. Potentialities of the monostatic inclined RAA for PBL temperature and wind profiling. Proc. 9th ISARS, 1998, Vienna, p. 179-182.

25. Патент Российской Федерации №2152055 от 27.06.2000. Способ радиоакустического наклонного зондирования атмосферы / Ульянов Ю.Н., Ветров В.И., Скворцов В.С., Бутакова С.В.

26. Патент Украины № 46150 від 15.05.2002. Пристрій для радіоакустичного зондування атмосфери/ Ульянов Ю.Н., Бутакова С.В., Бедин В.С., Бусловський С.Ф.

Поступила в редакцию 17.10.03

Рецензент: д-р техн. наук, профессор Волосяк В.К., Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского „ХАИ”, г. Харьков