

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ЧАСТОТ СОДАРА ПРИ АКУСТИЧЕСКОМ ЗОНДИРОВАНИИ АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

О.В. ЗУБКОВ, Г.И. СИДОРОВ

Решается задача нахождения оптимальных акустических частот содара при измерении параметров атмосферного пограничного слоя. Учтена частотная зависимость затухания акустических волн в атмосфере, параметры излученного сигнала, аналитическое описание спектральной плотности мощности внешних помех. Доказана необходимость учета внешних помех при определении оптимальных частот. Предложена методика оценки основных технических характеристик акустического локатора.

*Ключевые слова:* содар, атмосферный пограничный слой, оптимальная частота, акустические помехи

Одним из современных средств дистанционного зондирования атмосферного пограничного слоя являются содары, которые используются для определения параметров турбулентностей, профилей температуры, скорости ветра, загрязнения воздуха. В основу их работы положено отражение акустических волн, излученных содаром в виде периодической последовательности импульсов с синусоидальным заполнением, от неоднородностей волнового сопротивления атмосферы. В диапазоне частот акустического зондирования уровень внешних помех существенно превышает мощность собственных шумов. Следовательно, точность измерений и дальность зондирования определяются не только параметрами атмосферы, но и помеховой обстановкой. Если учесть места установки содаров – аэропорты, промышленные объекты с высоким уровнем выбросов вредных веществ, города, то всем этим объектам свойственен высокий уровень промышленных шумов в рабочем диапазоне содаров, что требует на входе приемного устройства содара высокого отношения сигнал-шум и специальных алгоритмов обработки принятых сигналов. Данный факт подтверждается результатами анализа работы множества содаров метеорологической сети NOAA. Высоты зондирования используемых в этой сети содаров компаний Bigal, Remtech и др. составляют 500, 1000, 1500 м. Однако, практические результаты доказывают, что заявленная дальность зондирования не всегда обеспечивается при неблагоприятных условиях, то есть отношение сигнал-шум на входе приемника оказывается слишком мало для выделения и обработки полезного акустического сигнала с заданной достоверностью. В [1] предложен способ повышения мощности входного сигнала или, что эквивалентно, увеличению дальности зондирования. Суть метода заключается в использовании оптимальных частот зондирования, на которых достигается наилучшее рассеяние звуковых волн на неоднородностях волнового сопротивления атмосферы. Однако,

если учесть, что выбор оптимальной частоты зондирования связан с изменяющейся окружающей помеховой обстановкой, то в аппаратуру содара не могут быть заложены заранее рассчитанные значения частот зондирования. Они должны оперативно оцениваться и изменяться в процессе работы содара.

Для построения систем, адаптивных к внешним помехам, следует разработать методику определения оптимальных частот зондирования в зависимости от распределения спектральной плотности шумов в диапазоне акустических частот.

Воспользуемся сходством систем акустического зондирования с радиолокационными, математический аппарат анализа которых хорошо разработан. В содарах рассеяние и поглощение акустических волн аналогично электромагнитным, но методы расчета количественных характеристик несколько отличаются.

Коэффициент затухания акустических волн в атмосфере при температуре 20 °С и скорости распространения звука  $c = 343$  м/с определяется выражением из [2]

$$\alpha = 4,96 \cdot f^2 \cdot 10^{-11}, \text{ м}^{-1}, \quad (1)$$

где  $f$  – рабочая частота содара, Гц.

Эффективную площадь рассеяния отражающего объема  $V$  можно рассчитать по формуле

$$S_{\text{эф}} = 4\pi V\sigma, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – удельное отражение атмосферы, м<sup>-1</sup>;  $V$  – отражающий объем, м<sup>3</sup>.

Для случая обратного рассеяния решающее значение имеют неоднородности температуры  $T$  [3], которые позволяют оценить удельное отражение атмосферы

$$\sigma = 4 \cdot 10^{-3} (2\pi/\lambda)^{1/3} (C_T/T)^2, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – длина акустической волны, м;  $C_T$  – среднеквадратическая разность температур в двух точках, находящихся на единичном расстоянии, К/м<sup>1/3</sup>;  $T$  – температура, К.

Отражающий объем  $V$  определяется длительностью импульса  $\tau$  и шириной диаграммы направленности антенны

$$V = \frac{c\tau}{2} R^2 \frac{\lambda^2}{S_{пер}}, \quad (4)$$

где  $S_{пер}$  – эффективная площадь передающей антенны, м<sup>2</sup>;  $R$  – дальность зондирования, м.

На основании (1)-(4) для стандартной атмосферы мощность принимаемого акустического сигнала определяется выражением

$$P_{пр}(f) = 3,7 \cdot 10^{-3} \frac{C_T^2}{T^2} c^{2/3} \tau \times \quad (5)$$

$$\times f^{1/3} P_{и} \frac{S_{пр}}{R^2} e^{-4,96 \cdot f^2 \cdot 10^{-11} R^2},$$

где  $P_{и}$  – импульсная мощность акустического передатчика, Вт.

Если продифференцировать (5) по  $f$ , можно найти выражение для величины оптимальной частоты, которая зависит от дальности зондирования  $R$

$$f_{опт} = 5,8 \cdot 10^4 / \sqrt{R}. \quad (6)$$

Наличие внешних шумов, СПМ которых существенно зависит от частоты, требует уточнения зависимости значений оптимальной частоты от дальности зондирования, поскольку мощность шумов входит в выражение отношения сигнал-шум на входе приемника, определяющее точность измерения метеопараметров. В [3] приведено обобщенное выражение для спектральной плотности мощности (СПМ) внешних акустических шумов

$$N(f) = 8,4 \cdot 10^{-21} + 0,13 \cdot f^{-4,67}. \quad (7)$$

В [1] приведены альтернативные выражения для СПМ помех от автомобильного транспорта в городе и авиационного в зоне аэропорта. Эти зависимости представлены выражениями (8) и (9) соответственно

$$N(f) = 10^{-13} \cdot f^{-2}, \text{ Вт/Гц}; \quad (8)$$

$$N(f) = 7 \cdot 10^{-11} \cdot f^{-3}, \text{ Вт/Гц}. \quad (9)$$

В случае описания СПМ помех выражением (7) отношение сигнал/шум на входе приемника содара принимает вид

$$q(f) = \frac{P_{пр}(f)}{f \cdot \int_{f-\Delta f/2}^{f+\Delta f/2} N(f) df} = \quad (10)$$

$$= 3,7 \cdot 10^{-3} \frac{C_T^2}{T^2} c^{2/3} \tau \cdot P_{и} \cdot S_{пр} \cdot Q(f, R),$$

где  $\Delta f$  – ширина полосы пропускания приемника, Гц.

В этом выражении выделен множитель  $Q(f, R)$ , который зависит от частоты зондирования и дальности

$$Q(f, R) = \frac{f^{1/3} \frac{1}{R^2} e^{-4,96 \cdot f^2 \cdot 10^{-11} R^2}}{8,4 \cdot 10^{-21} \cdot 2 \cdot \Delta f + 0,0354} \times \frac{1}{\left[ \left( f - \frac{\Delta f}{2} \right)^{-3,67} - \left( f + \frac{\Delta f}{2} \right)^{-3,67} \right]}. \quad (11)$$

Графический или численный анализ сомножителя (11) из выражения (10) позволяет определить оптимальные значения акустической частоты для различных высот зондирования. Аналогичные частотные сомножители получаются при подстановке в выражение (10) функций описания СПМ помех (8) и (9).

$$Q_{трансп}(f, R) = \frac{f^{1/3} e^{-4,96 \cdot f^2 \cdot 10^{-11} R^2}}{R^2 \cdot \left[ \left( f - \frac{\Delta f}{2} \right)^{-1} - \left( f + \frac{\Delta f}{2} \right)^{-1} \right]}, \quad (12)$$

$$Q_{ав}(f, R) = \frac{2 \cdot f^{1/3} e^{-4,96 \cdot f^2 \cdot 10^{-11} R^2}}{R^2 \cdot \left[ \left( f + \frac{\Delta f}{2} \right)^{-2} - \left( f - \frac{\Delta f}{2} \right)^{-2} \right]}. \quad (13)$$

График зависимостей  $Q(f, R)$  с учетом СПМ помех, описываемого выражением (7), представлен на рис. 1, а значения оптимальных частот зондирования представлены в табл. 1. При проведении расчетов ширина полосы пропускания приемника содара принималась равной 100Гц.

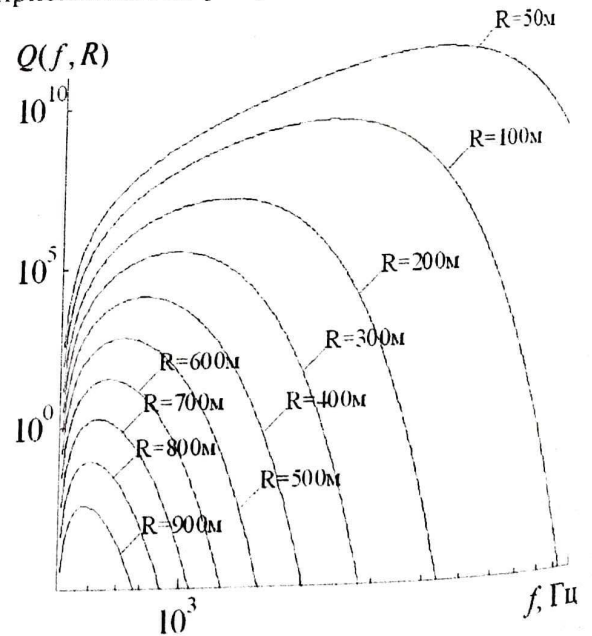


Рис. 1. Частотная зависимость отношения сигнал/шум на входе содара при условии обобщенного описания акустических помех

Также в табл. 1 приведены результаты расчета оптимальных частот для случая помех транспорта  $f_{опт. тр}$  и авиации  $f_{опт. ав}$ . Анализ зависимостей рис. 1 и табл. 1 показывает, что значение оптимальной частоты уменьшается с увеличением дальности. Сравнение различных вариантов аналитического описания помех (7-9) позволяет сделать вывод, что значения оптимальных частот в этих слу-

чаях могут отличаться до 45 %. Практически это отличие может оказаться и больше, так как авторы [1] на основании экспериментальных исследований утверждают, что значение показателя степени в выражении (8) может находиться в пределах 1,4...3,5, а в выражении (9) – в пределах 2.1...4.2.

**Таблица 1**

Значения оптимальных частот зондирования

R, м	f <sub>опт. общ.</sub> , Гц	f <sub>опт. тр.</sub> , Гц	f <sub>опт. ав.</sub> , Гц
50	4510	3108	3710
100	2342	1615	1915
200	1281	907	934
300	963	713	638
400	807	622	473
500	716	586	386
600	664	457	324
700	619	443	272
800	587	384	154
900	571	321	126
1000	542	247	84

На значение оптимальной частоты также влияет форма зондирующего импульса. Если импульс прямоугольный, его СПМ с точностью до постоянного множителя определяется функцией  $\sin^2(\pi f \tau) / (\pi f)^2$  и частотнозависимые множители  $Q(f, R, \tau)$ ,  $Q_{\text{трансп}}(f, R)$ ,  $Q_{\text{ав}}(f, R)$  становятся зависимыми от частоты, дальности и длительности импульса.

$$Q(f, R, \tau) = \frac{f^{1/3} e^{-4.96 \cdot f^2 \cdot 10^{-11} R^2}}{0,0354 \cdot (\pi f)^2} \times \frac{\sin^2(\pi f \tau)}{4,74 \cdot 10^{-19} \cdot \Delta f + \left[ \left( \frac{2f - \Delta f}{2} \right)^{-3.67} - \left( \frac{2f + \Delta f}{2} \right)^{-3.67} \right]}, \quad (14)$$

$$Q_{\text{трансп}}(f, R) = \frac{f^{1/3} e^{-4.96 \cdot f^2 \cdot 10^{-11} R^2}}{R^2} \times \frac{\sin^2(\pi f \tau)}{(\pi f)^2 \cdot \left[ \left( f - \frac{\Delta f}{2} \right)^{-1} - \left( f + \frac{\Delta f}{2} \right)^{-1} \right]}, \quad (15)$$

$$Q_{\text{ав}}(f, R) = \frac{2 \cdot f^{1/3} e^{-4.96 \cdot f^2 \cdot 10^{-11} R^2}}{\left[ \left( f - \frac{\Delta f}{2} \right)^{-2} - \left( f + \frac{\Delta f}{2} \right)^{-2} \right]} \times \frac{\sin^2(\pi f \tau)}{(\pi f)^2 \cdot R^2}. \quad (16)$$

На рис. 2 представлена совокупность зависимостей множителя  $Q(f, R, \tau)$ , соответствующая высоте зондирования  $R = 400$  м при трех длительностях импульса  $\tau = 0,88, 1,76, 52,8$  мс.

Анализ зависимостей рис. 2 показывает, что наилучшими частотно-энергетическими характеристиками будет обладать локатор, у которого выбраны оптимальные значения рабочей частоты и длительности импульса, обеспечивающие максимизацию коэффициента  $Q(f, R, \tau)$ . При  $\tau = 0,88$  мс за счет

низкой энергии импульса значение коэффициента  $Q(f, R, \tau)$  меньше максимального. При  $\tau = 1,76$  мс и длительностях кратных 1,76 мс достигается максимальное значение коэффициента  $Q(f, R, \tau)$ . Однако, в практических случаях для обеспечения необходимой энергии отраженного акустического сигнала, в пределах длительности импульса должно укладываться не менее 20 длин волн.

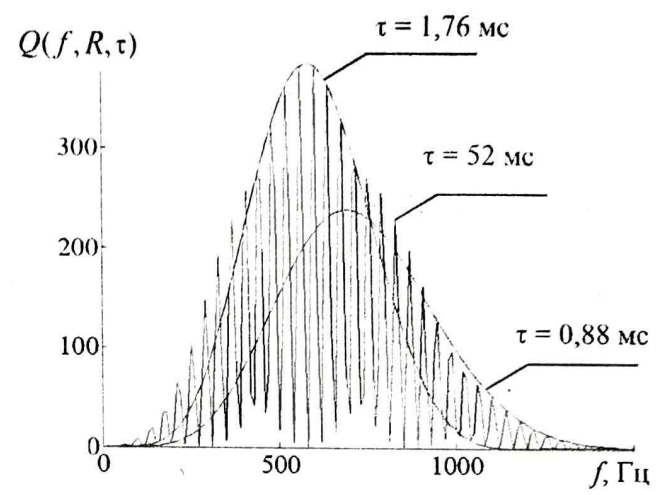


Рис. 2. Частотная зависимость отношения сигнал-шум на входе приемника при фиксированной дальности  $R = 400$  м и разных длительностях импульса

Длительности импульса  $\tau = 52$  мс (30 длин волн) соответствует изрезанная частотная характеристика  $Q(f, R, \tau)$ .

Существование множества значений длительности импульса, при которых достигается одинаковое максимальное значение коэффициента  $Q(f, R, \tau)$  следует из выражения, связывающего значения оптимальной длительности импульса с оптимальной частотой. Для его нахождения выражения (14)-(16) были продифференцированы по  $\tau$

$$\tau = \tau_{\text{опт}} = n / f_{\text{опт}}, \text{ с,}$$

где  $n$  – число длин волн в пределах длительности импульса.

Графики зависимостей  $Q(f, R, \tau)$ , соответствующие оптимальной длительности импульса, представлены на рис. 3.

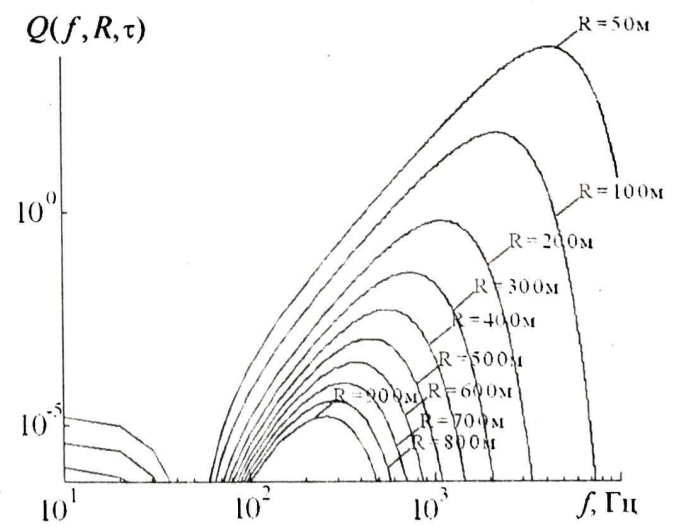


Рис. 3. Частотные зависимости отношения сигнал-шум на входе приемника с учетом формы зондирующего импульса и обобщенной СПМ помех

Результаты расчета значений оптимальных частот для дальностей зондирования от 50 м до 1000 м сведены в таблицах 2-4.

Таблица 2

Значения оптимальных частот для случая описания акустических помех выражением (7)

R, м	$f_{\text{опт}}$ , Гц	$\tau_{\text{опт}}$ , мс	$\Delta F$ , Гц
50	4365	6,87	2380
100	2238	13,40	1210
200	1047	28,65	610
300	744	40,32	410
400	568	52,81	310
500	446	67,26	250
600	380	78,94	210
700	331	90,63	180
800	281	106,76	160
900	251	119,52	140
1000	230	130,4	130

Таблица 3

Значения оптимальных частот для случая описания акустических помех выражением (8)

R, м	$f_{\text{опт}}$ , Гц	$\tau_{\text{опт}}$ , мкс	$\Delta F$ , Гц
50	1177	25,48	2270
100	591	50,76	1140
200	313	95,84	570
300	227	136,15	380
400	182	164,83	290
500	154	194,80	240
600	142	211,26	190
700	126	238,09	170
800	111	270,27	150
900	102	294,11	130
1000	68	441,17	120

Таблица 4

Значения оптимальных частот для случая описания акустических помех выражением (9)

R, м	$f_{\text{опт}}$ , Гц	$\tau_{\text{опт}}$ , мкс	$\Delta F$ , Гц
50	2320	12,931	2370
100	1176	25,51	1190
200	554	54,152	600
300	315	95,23	410
400	267	112,36	310
500	164	182,92	250
600	104	209,7	210
700	89	234,37	180
800	67	256,41	160
900	48	277,77	150
1000	46	309,27	130

В таблицах 2-4 также приведены результаты определения полосы частот  $\Delta F$ , в пределах которой достигается максимальное значение отношения сигнал/шум на входе акустического приемника.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что при учете формы излучаемого акустического импульса отличия оптимальных частот для различной помеховой обстановки существенно увеличиваются. Согласно таблиц 2-4 они могут достигать 3,7 раз, а если учесть, что показатель степени в выражениях СПМ помех (8) и (9) может изменяться от 1,4 до 4,2, то отличия значений оптимальной частоты может изменяться до 4,1 раз. Также следует отметить, что для аэропортов, промышленных зон свойственны существенные изменения помеховой обстановки при смене числа и характеристик источников помех (смена интенсивности движения автотранспорта в городе, числа и типов самолетов в аэропорте). Поэтому, процесс оптимизации рабочей частоты содара должен носить адаптивный характер не только на этапе установки системы, но и непрерывно с течением времени. Данный результат еще раз подтверждает неэффективность использования заранее определенных рабочих акустических частот.

Реализовать перестройку полосы пропускания приемника и оптимальную фильтрацию принимаемых сигналов можно, применив методы цифровой фильтрации сигналов.

Проведенный анализ полученных зависимостей позволяет предложить следующий порядок расчета важнейших характеристик акустического локатора: 1) с использованием экспериментальных выборочных реализаций шума в точке установки содара рассчитываем совокупность кривых  $Q(f, R, \tau)$  при фиксированной дальности  $R$ ; 2) по совокупности кривых  $Q(f, R, \tau)$  определяем  $f_{\text{опт}}$  и  $\tau_{\text{опт}}$ , соответствующие наибольшему значению  $Q$ ; 3) на основании зависимостей  $Q(f, R, \tau)$  определяем полосу пропускания приемника  $\Delta F$  и требования к частотной характеристике цифрового фильтра приемника; 4) периодически адаптируемся к изменениям в помеховой обстановке, повторяя действия 1-3.

Литература

- [1] Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферы. Новосибирск: Наука, 1986. – 166 с.
- [2] Красненко Н.П., Раков Д.С. Характеристики фонового окружающего шума в атмосфере и их взаимосвязь с параметрами среды. Сборник трудов XVI сессии Российского акустического общества. Т.2. – М.: ГОЕС 2005. – 357 с.
- [3] Литл К.Г. Акустические методы дистанционного зондирования нижней атмосферы. – ТИИЭР, 1969, т.57, №4, с. 22-230.

Поступила в редколлегию 11.01.2011.



**Зубков Олег Викторович**, канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных систем ХНУРЭ. Область научных интересов: цифровая обработка сигналов в системах дистанционного зондирования атмосферы, автоматизированные системы управления.



**Сидоров Геннадий Иванович**, канд. техн. наук, профессор кафедры радиоэлектронных систем ХНУРЭ. Область научных интересов: методы и средства акустического и радиоакустического зондирования атмосферы.

УДК 551.501.793

**Визначення оптимальних частот содара при акустичному зондуванні атмосферного прикордонного шару** / О.В. Зубков, Г.І. Сідоров // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. – 2011. Том 10. № 1. – С. 3-7.

Вирішується задача знаходження оптимальних акустичних частот содара при вимірюванні параметрів атмосферного прикордонного шару. Врахована частотна залежність затухання акустичних хвиль в атмосфері, параметри сигналу, що випромінюється, аналітичний опис спектральної щільності потужності зовнішніх завад. Доказана необхідність врахування зовнішніх завад при визначенні оптимальних частот.

Запропонована методика оцінювання основних технічних характеристик акустичного локатору.

*Ключові слова:* содар, атмосферний прикордонний шар, оптимальна частота, акустична завада.

Табл. 04. Іл.03. Бібліогр.: 02 найм.

UDC 551.501.793

**Determination of sodar optimum frequencies at the acoustic sounding of atmospheric boundary layer** / O.V. Zubkov, G.I. Sidorov // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2011. Vol. 10. № 1. – P. 3-7.

The paper solves the problem of finding sodar optimal acoustic frequencies with measuring atmospheric boundary layer parameters. Frequency fading dependence of acoustic waves in the atmosphere, parameters of a radiated signal, analytical description of external noise power spectrum is taken into account. The necessity of taking into accounting external noises is well-proved in determining optimum frequencies. A methodology of estimating basic technical characteristics of an acoustic radar is offered.

*Keywords:* sodar, atmospheric boundary layer, optimal frequency, acoustic noise.

Tab. 04. Fig. 03. Ref.: 03 items.