

## АДАПТАЦИЯ РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ СОДАРА В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ПОМЕХОВОЙ ОБСТАНОВКИ

### Введение

Широкий спектр современных научных и практических задач связан с оперативным оцениванием параметров атмосферного пограничного слоя (АПС). К одной из таких задач относится определение высотных профилей скорости ветра и турбулентности атмосферы в зоне аэропорта и в зоне подлета самолета к аэропорту. Перечень современных технических средств, используемых для решения этой задачи, включает: контактные датчики, метеозонды, радиопрофилеры, а также содары, активное применение которых началось в последние десятилетия. Радиопрофилеры позволяют оценить профили скорости и направления ветра с высот 1–2 км, метеорологические датчики оценивают скорость ветра, его направление, температуру в приземном слое до высот, ограниченных высотой метеорологических вышек, на которых они расположены (максимально до 150 м). Однако, согласно требованиям международной организации гражданской авиации ICAO, для обеспечения безопасности взлетов и посадок самолетов наиболее важны измерения скорости ветра, инверсий на высотах до 500 м, где изменение сдвигов ветра и температуры имеет нелинейный характер и высокие градиенты [1]. По оценкам ICAO самым эффективным средством определения метеопараметров в этом слое являются доплеровские содары. Например, в аэропорту Амстердама они применяются как для определения профилей скорости ветра, так и оценки прозрачности атмосферы над взлетно-посадочной полосой при появлении тумана [2]. В основу работы содаров положен метод акустического зондирования, заключающийся в отражении излученных содаром акустических волн от атмосферных турбулентностей, вызываемых температурной стратификацией атмосферы и действием ветра. Диапазон рабочих частот современных содаров широк – от сотен герц до ультразвуковых волн. Сильное затухание акустических волн в атмосфере ограничивает высоты зондирования содаров диапазоном до 100 – 1500 м. Высокая влажность, туман, осадки в виде дождя и снега могут существенно снижать заявленную в технических характеристиках дальность зондирования содара. Сопоставительный анализ результатов зондирования содаров метеорологической сети NOAA подтверждают, что при одинаковых значениях длительности импульса и излучаемой мощности дальность зондирования существенно отличается. Данный факт объясняется сильной частотной зависимостью отражения акустической волны от неоднородностей ее волнового фронта и описан во многих научных публикациях [3 – 5]. Кроме этого низкое отношение сигнал-шум влияет на точность оценивания основных метеорологических и физических параметров АПС. Одним из способов повышения отношения сигнал/шум является применение оптимальных частот зондирования содара. Однако обобщенного аналитического решения для нахождения оптимальных частот зондирования не существует. Причина данного факта – это влияние на отношение сигнал-шум принимаемого акустического сигнала внешних акустических помех, интенсивность которых велика.

### Теоретические расчеты

Используя сходство методов акустического и радиозондирования можно получить выражение, связывающее отношение сигнал-шум на входе приемника с коэффициентом затухания  $\alpha$  акустических волн, удельным отражением атмосферы  $\sigma$  и отражающим объемом  $V$  на фиксированной высоте зондирования  $R$ .

Коэффициент затухания акустических волн  $\alpha$  для стандартной атмосферы и скорости распространения звука  $c = 343$  м/с определяется выражением из [3]

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

где  $f$  – рабочая частота содара, Гц.

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

$$S_{эф} = 4\pi V\sigma, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – удельное отражение атмосферы,  $\text{м}^{-1}$ ;  $V$  – отражающий объем,  $\text{м}^3$ ;

Основной вклад в обратное рассеяние акустических волн вносят неоднородности температуры  $T$  [3], значение которых связано с удельным отражением атмосферы выражением

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

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

Для системы, в которой передающая и приемная антенны совмещены, отражающий объем  $V$  определяется эффективной площадью приемо-передающей антенны  $S_{ант}$  и длительностью зондирующего импульса  $\tau$ :

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

где  $R$  – дальность зондирования, м;  $S_{ант}$  – эффективная площадь приемо-передающей антенны,  $\text{м}^2$ ;  $\tau$  – длительность зондирующего импульса, с.

На основании (1) – (4) для стандартной атмосферы при отсутствии промышленных шумов мощность принимаемого акустического сигнала определяется выражением

$$P_{пр}(f) = 3,7 \cdot 10^{-3} \frac{C_T^2}{T^2} c^{2/3} \tau \cdot f^{1/3} P \frac{S_{ант}}{R^2} e^{-4,96 \cdot f^2 \cdot 10^{-11} R^2}, \quad (5)$$

где  $P$  – импульсная мощность акустического передатчика, Вт.

В работах [5, 6] приводятся примеры аналитических выражений, описывающие зависимость спектральной плотности мощности (СПМ) шумов от частоты для зоны аэропорта, городского транспорта и пример обобщенного варианта аналитического описания:

$$N_{трансп}(f) = 10^{-13} \cdot f^{-2}, \text{ Вт}/\text{Гц}, \quad (6)$$

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

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

На основании (5) – (8) можно рассчитать отношение сигнал-шум на входе акустического приемника:

$$q(f) = \frac{P_{пр}(f)}{\int_{f-\Delta f/2}^{f+\Delta f/2} N(f) df} = 3,7 \cdot 10^{-3} \frac{C_T^2}{T^2} c^{2/3} \tau \cdot P_u \cdot S_{пр} \cdot Q(f, R), \quad (9)$$

где  $Q(f, R)$  – коэффициент, который зависит от рабочей частоты содара и дальности зондирования;  $\Delta f$  – полоса пропускания акустического приемника, Гц.

Выражения частотно зависимого коэффициента  $Q(f, R)$  для случаев описания СПМ формулами (6) – (8) имеют вид

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

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

$$Q(f, R) = \frac{f^{1/3} \frac{1}{R^2} e^{-4,96 \cdot f^2 \cdot 10^{-11} R^2}}{8,4 \cdot 10^{-21} \cdot 2 \cdot \Delta f + 0,0354 \cdot \left[ (f - \Delta f/2)^{-3,67} - (f + \Delta f/2)^{-3,67} \right]}. \quad (12)$$

Если учесть прямоугольную форму зондирующего импульса, то в выражения частотно-коэффициента  $Q(f, R)$  добавляется частотный множитель  $\sin^2(\pi f \tau) / (\pi f)^2$ , зависящий от длительности импульса  $\tau$ , а частотно-зависимый коэффициент становится функцией трех переменных  $Q(f, R, \tau)$ .

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

$$Q_{\text{ав}}(f, R, \tau) = \frac{2 \cdot f^{1/3} e^{-4,96 \cdot f^2 \cdot 10^{-11} R^2}}{R^2 \cdot \left[ (f - \Delta f/2)^{-2} - (f + \Delta f/2)^{-2} \right]} \cdot \frac{\sin^2(\pi f \tau)}{(\pi f)^2}, \quad (14)$$

$$Q(f, R, \tau) = \frac{f^{1/3} e^{-4,96 \cdot f^2 \cdot 10^{-11} R^2} \cdot \sin^2(\pi f \tau)}{(\pi f)^2 \left( 8,4 \cdot 10^{-21} \cdot 2 \cdot \Delta f + 0,0354 \cdot \left[ (f + \Delta f/2)^{-3,67} - (f - \Delta f/2)^{-3,67} \right] \right)}. \quad (15)$$

Длительность импульса  $\tau$  выбирается кратной целому числу периодов рабочей частоты. Функции зависимостей коэффициентов  $Q(f, R)$  и  $Q(f, R, \tau)$  от частоты для ряда фиксированных высот  $R$  и длительности импульса равной 30 периодам рабочей частоты приведены на рис. 1, а результаты расчета оптимальных частот по формулам (10) – (14) сведены в табл. 1.

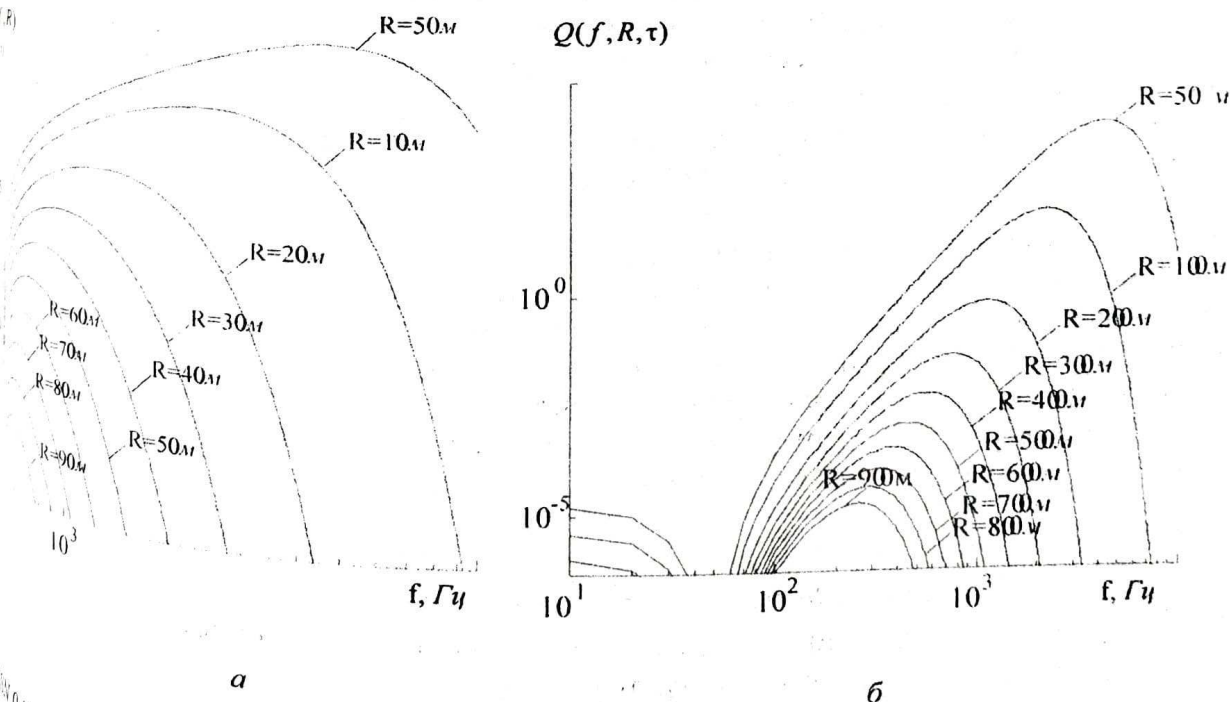


Рис. 1

Представленная на рис. 1 совокупность зависимостей соответствует обобщенному аналитическому описанию акустических помех.

Таблица 1

R, м	Без учета формы импульса			С учетом формы импульса		
	$f_{\text{опт. общ.}} \text{ Гц}$	$f_{\text{опт. тр.}} \text{ Гц}$	$f_{\text{опт. ав.}} \text{ Гц}$	$f_{\text{опт. общ.}} \text{ Гц}$	$f_{\text{опт. тр.}} \text{ Гц}$	$f_{\text{опт. ав.}} \text{ Гц}$
50	4510	3108	3710	4365	1177	2320
100	2342	1615	1915	2238	591	1176
200	1281	907	934	1047	313	554
300	963	713	638	744	227	315
400	807	622	473	568	182	267
500	716	586	386	446	154	164
600	664	457	324	380	142	104
700	619	443	272	331	126	89
800	587	384	154	281	111	67
900	571	321	126	251	102	48
1000	542	247	84	230	68	46

Анализ полученных данных свидетельствует о сильной зависимости величины оптимальной частоты содара от окружающей помеховой обстановки. Для выражений (6) – (8), не учитывающих форму излученного импульса, значения оптимальных частот для каждого из аналитических описаний СПМ шума отличаются не менее чем на 30 %. Такое существенное отличие подтверждает необходимость проведения адаптационной подстройки рабочей частоты содара по его месту установки и в процессе работы. При учете влияния прямоугольной формы излученного содаром импульса длительностью  $\tau$  отличия оценок оптимальной частоты зондирования для аналитических описаний СПМ выражениями (13) – (15) достигают 3,6 раз.

В выражениях (10) – (15) СПМ внешних акустических помех описывается аналитическим выражением. Оптимальная частота содара определяется в результате нахождения максимума частотно зависимого коэффициента  $Q(f, R, \tau)$ . Для его нахождения используются соответствующие математические методы (например, градиентный). Несмотря на возможность обеспечения высокой точности нахождения оптимальной частоты аналитическими методами, практически целесообразно ограничиться точностью от 1 до 10 Гц. Она определяется возможностями аппаратуры. Такая точность оценки оптимальной частоты содара достижима без аналитического представления СПМ акустических шумов. При практических измерениях производится запись временной реализации внешних акустических помех, по которой вычисляется выборочная СПМ, аналитического описания которой мы не имеем. Полученная таким образом выборочная СПМ представляет собой распределение мощности шума на совокупности дискретных значений частоты. Если для записи временной реализации использовать устройство с параметрами звуковой карты компьютера (частота дискретизации 44 кГц), то временная реализация длительностью 1 с даст возможность рассчитать СПМ в частотной сетке с разрешением 1 Гц. Практически анализ временных реализаций шумов выполняется за интервал времени 10 или более секунд. Следовательно, нет необходимости получения аналитического выражения СПМ помехи, а достаточно значений ее выборочного представления.

Тогда можно сформулировать алгоритм нахождения оптимальной рабочей частоты содара:

- 1) произвести запись временной реализации внешних шумов длительностью не менее 1–10 с и вычислить по ней выборочную СПМ  $S_{\text{выб}}(f) = \int N(f) df$ ;
- 2) задаться совокупностью высот зондирования, для которых необходимо определить оптимальные рабочие частоты содара;

определить оптимальные частоты из ряда, соответствующего выборочной СПМ, как те, на которых достигается максимум функции, описываемой выражением

$$Q(f_i, R) = f_i^{1/3} \frac{1}{R^2} e^{-4,96 \cdot f_i^2 \cdot 10^{-11} R^2} / S_{\text{выб}}(f_i), \quad i = 1 \dots N, \quad (16)$$

4)  $N$  – длина выборки шума.

периодически действия 1)–3) повторять с целью автоподстройки под изменяющуюся со временем помеховую обстановку.

### Экспериментальная проверка и выводы

Для проверки работоспособности разработанного алгоритма расчета оптимальной частоты содара были произведены записи временных реализаций шумов автотранспорта в условиях индустриальных районов города, дизельных двигателей и шумов авиатранспорта в зоне аэропорта. На основании временных реализаций рассчитаны выборочные СПМ, примеры которых представлены на рис. 2. Кривым 1 и 2 рис. 2, а соответствуют временные выборки шума автотранспорта в различных местах проведения эксперимента. Кривой 3 на этом же рисунке соответствует запись шумов при работе дизельных двигателей электрогенераторов. Кривым 4–6 рис. 2, б соответствует запись шумов в центре взлетно-посадочной полосы и на расстояниях 100 и 500 м на подлете самолета к полосе.

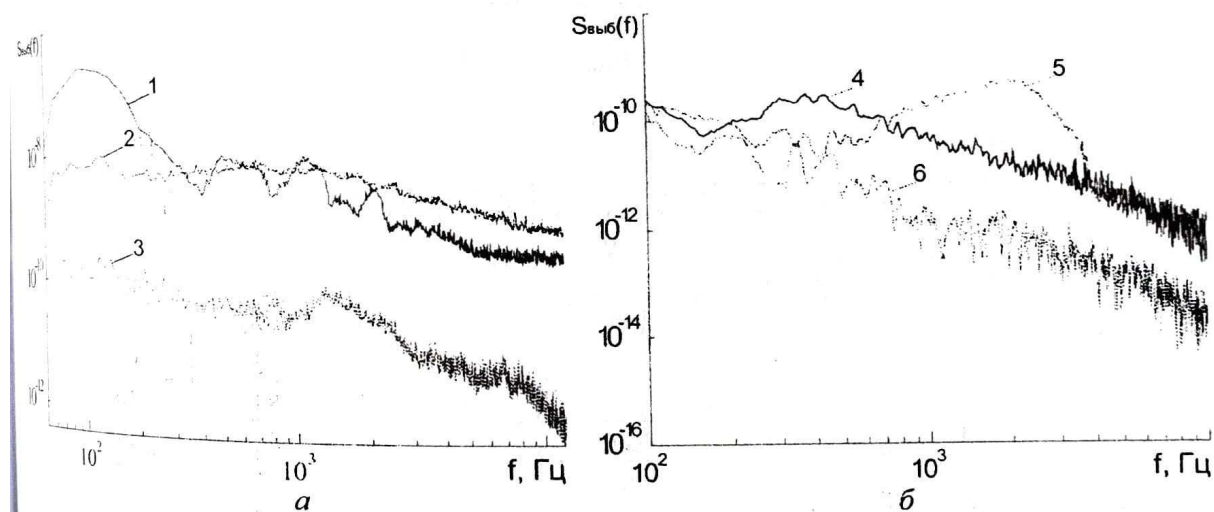


Рис. 2

В результате подстановки выборочных значений СПМ шумов в выражения (13) – (15) для совокупности фиксированных высот зондирования были построены зависимости коэффициента  $Q(f, R, \tau)$  и определены значения оптимальных частот зондирования. На рис. 3, а приведена совокупность зависимостей коэффициента  $Q(f, R, \tau)$  для СПМ шумов автотранспорта, соответствующей кривой 1 рис. 2, а. На рис. 3, б приведена совокупность зависимостей коэффициента  $Q(f, R, \tau)$  для СПМ шумов авиатранспорта, соответствующих кривой 4 рис. 2, б. Рассчитанные значения оптимальных частот, соответствующие выборочным реализациям шумов автотранспорта и авиатранспорта, представлены в табл. 2. Анализ данных, приведенных в табл. 2, показывает, что в основном с увеличением высоты зондирования наблюдается монотонное уменьшение значения оптимальной частоты. Данный факт подтверждается рядом публикаций [3, 4, 6] и соответствует теоретическим результатам, приведенным в табл. 1. Однако изменения значений оптимальной частоты с ростом высоты могут иметь значительные градиенты на высотах до 300 м. С ростом высоты эти изменения оказываются менее значительны и абсолютное значение оптимальной рабочей час-

тоты содара не превышает 400 Гц. Экспериментальные результаты также показывают, что малым высотам характерны более высокие абсолютные значения рабочей частоты содара, по сравнению с теоретическими, приведенными в табл. 1. На высотах свыше 500 м наблюдается обратная ситуация, то есть значения оптимальных частот меньше, чем теоретические, приведенные в табл. 1.

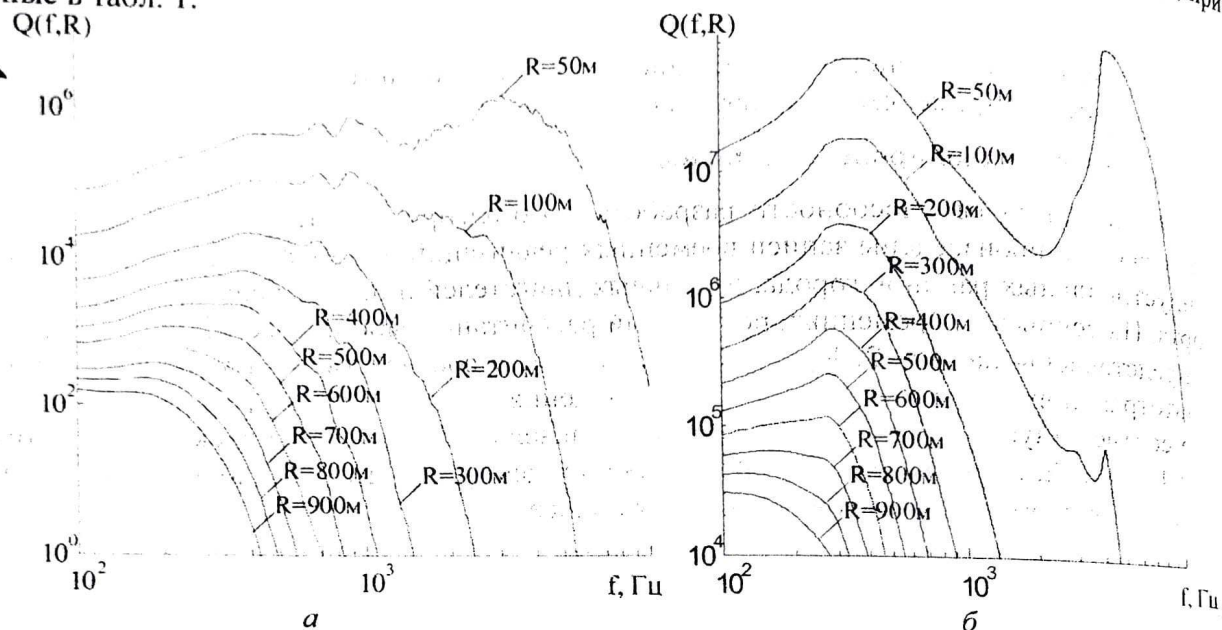


Рис. 3

Таблица 2

R, м						
	$f_{\text{опт. тр1}}, \text{Гц}$	$f_{\text{опт. тр2}}, \text{Гц}$	$f_{\text{опт. диз. ген.}}, \text{Гц}$	$f_{\text{опт. ав1.}}, \text{Гц}$	$f_{\text{опт. ав2.}}, \text{Гц}$	$f_{\text{опт. ав3.}}, \text{Гц}$
50	3090	2400	2200	4090	2355	3240
100	900	800	250	350	1490	1210
200	390	400	220	310	195	980
300	380	390	200	300	181	300
400	340	390	200	285	168	280
500	220	380	190	275	166	275
600	200	360	180	270	165	270
700	190	280	180	160	83	245
800	170	240	160	125	71	225
900	130	210	130	80	55	200
1000	111	200	124	76	52	195

Для различных мест установки содара, а значит и различной помеховой обстановки, отличия оптимальных частот зондирования могут достигать четырех раз, что наглядно подтверждают данные табл. 2 для высот 50 – 300 м. Такая ситуация наблюдается как для шумов автотранспорта, так и шумов авиации. Из табл. 2 также очевидно, что влияние шумов авиатранспорта на величину оптимальной частоты значительно больше по абсолютной величине, чем автомобильных. Данный факт можно объяснить отличиями спектральных характеристик шумов авиатранспорта, которые обусловлены различиями реактивных двигателей и взаимной ориентацией содара и самолета.

Таким образом, доказана работоспособность алгоритма оценки оптимальной частоты содара в изменяющейся окружающей помеховой обстановке.

Библиографический список литературы: 1. Doc 9817 AN/449. Руководство по сдвигу ветра на малых высотах. ИКАО, 1985. – 285 с. 2. Jan Sondij The meteorological observation infrastructure at Amsterdam airport schiphol. Melbourne 2010. – 18 p. 3. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферы. Новосибирск: Наука, 1986. – 166 с. 4. Ioannis Antoniou, Hans E. Jørgensen On the Theory of SODAR Measurement Techniques (final reporting on WP1, EU WISE project NNE5-2001-297 Risø National Laboratory), Denmark 2003. – 60 p. 5. Литл К.Г. Акустические методы дистанционного зондирования атмосферы. – ТИИЭР. – 1969. – Т.57, №4. – С. 22-230. 6. Красненко Н.П., Раков Д.С. Характеристики фонового окружающего шума в атмосфере и их взаимосвязь с параметрами среды // сб. докладов XVI сессии Российского акустического общества. Т.2. – М. : ГОЕС, 2005. – 357 с.

Поступила в редколлегию 23.06.2011

Санкт-Петербургский национальный университет радиотехники