
РАДИОТЕХНИКА

УДК 621.371.3:551.510.52

ПОСТАНОВКА ДИФРАКЦИОННОЙ ЗАДАЧИ РАДИОАКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЫ

ИБРАИМОВ И.К., ПАНЧЕНКО А.Ю.

Рассматриваются причины деформаций и изменений зондирующего пакета акустических волн и новые возможности создания систем зондирования. Эти две группы факторов определяют условия решения задачи рассеяния электромагнитных волн, которая в настоящее время приобретает актуальность.

Ключевые слова: турбулентность, атмосферный пограничный слой, радиоантенна, акустический излучатель, апертура, скорость ветра, фокус, диаграмма направленности.

Key words: turbulence, atmospheric boundary layer, aperture, radio antenna, acoustic emitter, wind speed, focus, radiation pattern.

Введение

Радиоакустический метод зондирования атмосферы основан на отражении электромагнитных волн от неоднородностей диэлектрической проницаемости воздуха, которые возникают под действием проходящего акустического излучения. Радиоакустическое зондирование (РАЗ) атмосферы может служить примером того, как комплексное использование волн различной физической природы позволило создать эффективный метод зондирования окружающей среды [1]. Раздельное использование акустических и электромагнитных волн допускало наблюдение за динамическими процессами в атмосфере, однако получить количественную информацию о метеопараметрах было затруднительно [2-7]. Метод РАЗ позволяет получить значительный объем количественной информации.

Ограниченное применение систем РАЗ (Radio Acoustic Sounding System – RASS) обусловлено техническими трудностями. Необходимо компенсировать сдвиг зондирующего пакета акустических волн под действием ветра и учесть разрушение регулярной структуры пакета под действием турбулентности.

Развитие микроэлектронной техники, микроконтроллерных средств обработки информации, СВЧ устройств позволяет выйти на качественно новый технический уровень. В настоящее время возможно при приемлемых затратах создать поле приемопередающих радиоантенн, которое управляется автоматически. Такая RASS может следить за флуктуациями движения зондирующего пакета акустических волн. Это делает актуальным уточнение решения дифракционной за-

дачи РАЗ с учетом новых физических факторов. Ранее условия решения дифракционной задачи рассеяния электромагнитных волн на неоднородностях диэлектрической проницаемости воздуха, вызванных прохождением акустических волн, ограничивались рассмотрением регулярной структуры зондирующего пакета [8-10]. Это позволяло оценить распределение поля в области приема отраженного сигнала при использовании апертурных радиоантенн и акустического излучателя и учесть действие горизонтального сдвига пакета, влияние бистатичности системы [11-14]. Теперь условия задачи значительно усложняются. Более того, они требуют отдельного анализа, поскольку динамика турбулентных потоков в настоящее время не имеет строгого теоретического описания, и это затрудняет решение задач акустики [15-20].

Цель данной работы – анализ условий решения дифракционной задачи РАЗ турбулентной атмосферы с учетом современных технических возможностей реализации RASS. Задачами данного этапа является выделение наиболее важных физических факторов, обеспечивающих адекватность решения дифракционной задачи РАЗ турбулентной атмосферы.

1. Необходимые сведения о турбулентной динамике атмосферы

Одним из главных свойств атмосферы является ее большая неоднородность как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях. Разнообразно движение воздушных масс, температурные условия, неоднороден ее состав [21]. Имеющийся опыт создания RASS указывает, что эти системы наиболее эффективны для мониторинга нижней части атмосферы – атмосферного пограничного слоя (АПС). Выше зондирование затруднительно, поскольку акустические волны быстро затухают, а мощность излучения ограничивается образованием ударных волн [22]. В ударных волнах энергия перетекает в высшие гармоники, которые имеют большее затухание.

Различают два основных состояния АПС. Первое состояние устойчивое. Оно наблюдается при температурных инверсиях, когда температура увеличивается с высотой ($\partial T/\partial z > 0$), а сила ветра невелика [23]. Это состояние наблюдается обычно в ночной период при ясном небе, когда поверхность выхолаживается за счет излучения.

Второе состояние АПС – турбулентное. Турбулентность может иметь два источника – термический и динамический. Термическая турбулентность обусловлена нагреванием поверхности в дневной период при ясном небе. Неустойчивость развивается из-за прогревания прилегающего к поверхности слоя воздуха. Динамическая турбулентность вызвана трением воздушной

массы о подстилающую поверхность. При этом движение воздушной массы обусловлено синоптическими процессами. В дневное время динамической неустойчивости способствует прогрев поверхности. Влияние температуры, силы Кориолиса и гравитационного поля Земли отличает АПС от обычного пограничного слоя.

Наибольшее развитие теория атмосферной турбулентности получила на рубеже 50-х годов прошлого века [24]. К тому времени в основном сформировалось описание неустойчивого течения вблизи неподвижной стенки. Добавление к этому температурного фактора, оценка энергетических и размерных характеристик случайных флуктуаций потоков связано с именами А.Н.Колмогорова и А.М.Обухова [25].

Согласно представлениям турбулентность формируется с образования больших вихрей, размер которых удовлетворяет числу Рейнольдса:

$$Re = Lv\rho\mu^{-1}, \quad (1)$$

где L – расстояние до границы потока; μ – динамическая вязкость; ρ – плотность; v – скорость.

Градиенты скорости на границах вихря приводят к неустойчивости более мелких масштабов. Поэтому ближе к границе формируются вихри меньшего размера (рис. 1).

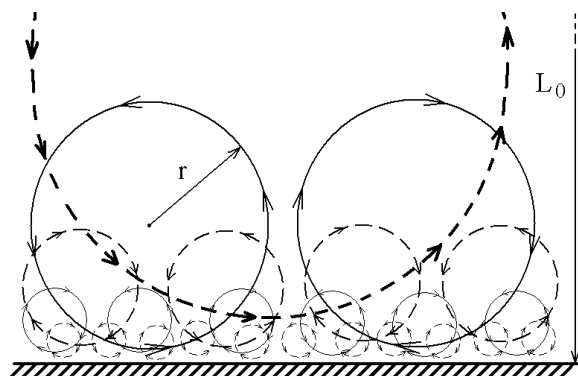


Рис. 1. Структура динамической турбулентности

Из экспериментальных данных известно, что средняя кинетическая энергия вихрей, приходящаяся на единицу массы, $E(k)$, где k – пространственная спектральная плотность, имеет максимальное значение в области малых k (вихри крупных масштабов). При увеличении k (уменьшении масштабов) она довольно быстро спадает. В области вблизи некоторого максимального числа $k=k_m$ функция $E(k)$ вследствие вязкости начинает убывать сильнее и быстро стремится к нулю. Соответственно спектральная плотность скорости диссипации энергии турбулентности $2\nu k^2 E(k)$, где ν – кинематическая вязкость: $\nu=\mu/\rho$,

в этой области максимальная. Функции $E(k)$ и $2\nu k^2 E(k)$ представлены на рис. 2.

Участок I соответствует энергетическому интервалу, участок II – вязкому. Между ними расположен инерционный интервал. Совокупность инерционного и вязкого интервалов носит название интервала равновесия. Внешний (максимальный) масштаб турбулентности (L_0) имеет порядок расстояния, на котором заметно меняется средняя скорость потока. Масштабы вихрей, принадлежащие интервалу равновесия, малы по сравнению с L_0 , т.е. $r \ll L_0$.

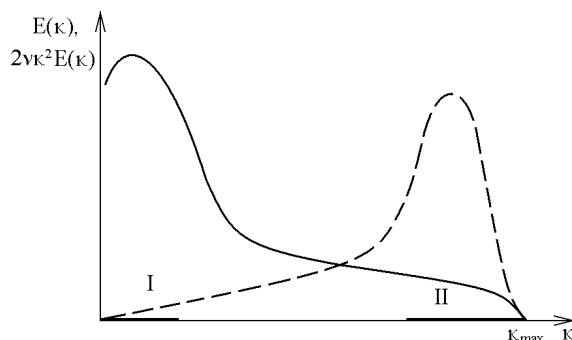


Рис. 2. Спектральная плотность кинетической энергии $E(k)$ (сплошная линия) и скорости ее диссипации $2\nu k^2 E(k)$ (штриховая линия)

Отсутствие строгой теории турбулентности вынуждает пользоваться эмпирическими данными. Количественные значения пространственно-временных масштабов турбулентности оценивают, пользуясь общепризнанными результатами. На рис. 3 показан спектр кинетической энергии ветра $E_v(k)$ [17].

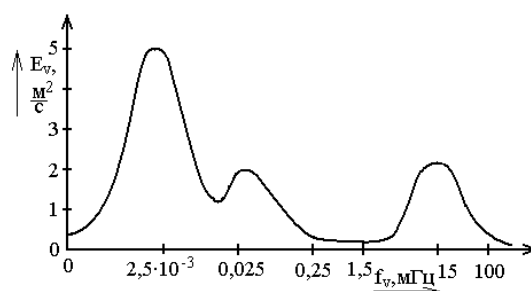


Рис. 3. Спектр кинетической энергии ветра (Ван-дер Ховен, 1957)

Здесь частота дана в миллигерцах. Низкочастотный максимум соответствует периоду нескольких суток. Он обусловлен синоптическими процессами, такими как прохождение атмосферных фронтов, чередование циклонов и антициклонов, прочими. Среднечастотный максимум описывает суточные изменения. Высокочастотный максимум соответствует интервалу около 1 мин. Более современные исследования с применением но-

вейших метеодатчиков показали, что спектр простирается примерно еще на полпорядка выше, до значений $0,2-0,3 \text{ с}^{-1}$ [26].

Мезомасштабный минимум в суточном ходе позволяет рассматривать изменение скорости в турбулентном потоке воздуха как сумму двух функций $v_{\Sigma}(t) = v_{\approx}(t) + v_{\equiv}(t)$. Первая $v_{\approx}(t)$ – случайная с интервалами корреляции около 1 мин. Вторая $v_{\equiv}(t)$ – медленно меняющаяся. На небольшом интервале, на котором $v_{\equiv}(t)$ аппроксимируется линейным изменением $v_{\equiv}(t) = a \cdot t$, можно считать $v_{\approx}(t)$ стационарной функцией. Тогда вместо корреляционной функции более удобно рассматривать структурную функцию $D(t_1, t_2)$, которая определяется как среднее значение квадрата разности $\langle [v_{\approx}(t_2) - v_{\approx}(t_1)]^2 \rangle$. С учетом мезомасштабного минимума она упрощается до

$$D(\tau) = \langle [v_{\approx}(t + \tau) - v_{\approx}(t)]^2 \rangle.$$

Далее эти рассуждения приводят к оценке изменений размеров вихря по высоте АПС в виде «закона 2/3» Колмогорова–Обухова, который справедлив для интервала равновесия [25]. Согласно этому закону структурная функция случайного поля турбулентных пульсаций скорости ветра пропорциональна $K_c r^{2/3}$. Текущее значение K_c определяется из условия равенства числа Рейнольдса своему критическому значению Re_{cr} . Согласно эмпирическим данным для воздуха возникновение турбулентности начинается при $Re_{cr} = 10^7$. На основании (1) и, используя значения вязкости и плотности воздуха, по превышению Re_{cr} получим размер минимального турбулентного вихря:

$$r_{\min} = 70 \cdot v^{-1} [\text{м}],$$

где v – скорость ветра, м/с.

В нормальных дневных условиях флуктуационные составляющие скорости ветра непосредственно у поверхности составляют около 3-5 м/с. Тогда размеры вихрей имеют диапазон от $r_{\min}(z=0) \approx 15 \text{ м}$ вблизи поверхности до высоты верхней границы АПС. При этом коэффициент пропорциональности K_c лежит в диапазоне 2...3. На верхней границе АПС ($z \approx 1 \text{ км}$) минимальный размер вихря равен $r_{\min}(z=1 \text{ км}) \approx 15 \text{ м}$. Зависимость $r_{\min}(z)$ показана на рис. 4.

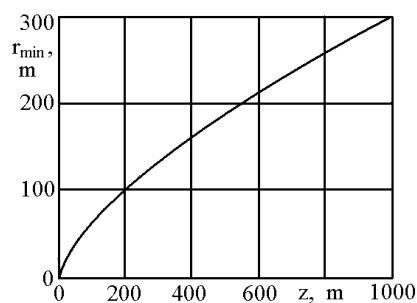


Рис. 4. Оценка размера минимального вихря

Ширину ДН антенн RASS можно оценить на основании предположения о том, что для получения информации о вихре достаточно измерить параметры воздуха в трех точках: на краях и в его центре. Тогда зависимость минимальной ширины ДН от высоты зондирования имеет следующий вид (рис. 5).

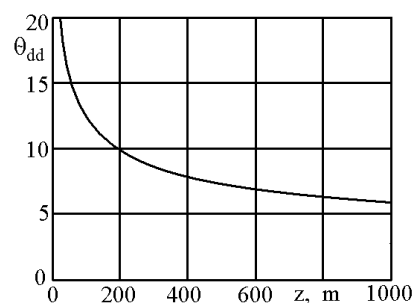


Рис. 5. Оценка минимальной ДН RASS

В реальных RASS ДН может быть несколько шире.

Проведенный анализ позволяет констатировать следующее. Инерционный интервал своими границами захватывает с одной стороны размеры трассы, с другой – размеры пакета. Высокочастотный максимум своей верхней границей захватывает время нахождения пакета на трассе. Таким образом, в первом приближении можно ограничиться оценкой деформаций пакета по их асимптотическим зависимостям.

2. Оценка возможностей построения RASS

Следующей группой факторов, определяющих условия постановки дифракционной задачи РАЗ, являются возможности построения систем.

В RASS используется вертикальное и наклонное зондирование. Большинство систем имеют вертикально направленные лучи. Для решения дифракционной задачи принципиальных отличий эти варианты не имеют, поэтому ограничимся случаем вертикального зондирования.

Сферическая поверхность пакета акустических волн фокусирует отраженное электромагнитное поле (ОЭМП) в некоторой области фокусировки (ОФ), размеры которой соизмеримы с раскрытием передающей антенны и акустического излучателя [8]. За пределами ОФ интенсивность отраженного поля резко падает. Но и внутри ОФ интенсивность тоже крайне мала. При использовании одной радиоантенны (РА) для излучения и приема трудно разделить излучаемый и принимаемый сигнал. Поэтому будем считать основной схемой построения RASS бистатическую, с отдельными антеннами. Геометрическая схема отражения и фокусировки ОЭМП зондирующим пакетом акустических волн показана на рис. 6, а.

Горизонтальный сдвиг затрудняет РАЗ даже при слабом ветре. На рис. 6, б изображено действие ветрового сдвига и работа механизма его компенсации. Радиоантенны перемещаются вслед за проекцией центра пакета на поверхность. Такая конструкция RASS сложна в эксплуатации [27]. Поэтому для компенсации сдвига с 80-х годов стало перспективным создание RASS с распределенным полем радиоантенн или акустических излучателей [28-30].

Управляемое поле радиоантенн (УПР) может следить за сложными движениями ОФ на поверхности и, соответственно, давать информацию о движениях и деформациях зондирующего пакета. При этом отдельность излучения и приема должна сохраниться, а УПР должно покрывать всю площадь возможного перемещения ОФ.

Геометрическая схема одного из возможных вариантов RASS с УПР показана на рис. 7. Полигональные УПР по сравнению с квадратными той же площади обеспечат увеличение высоты зондирования на 12-15% [28-30]. Это потребует использования шести акустических излучателей. Такое решение обеспечит захват сигнала и сопровождение пакета по трассе.

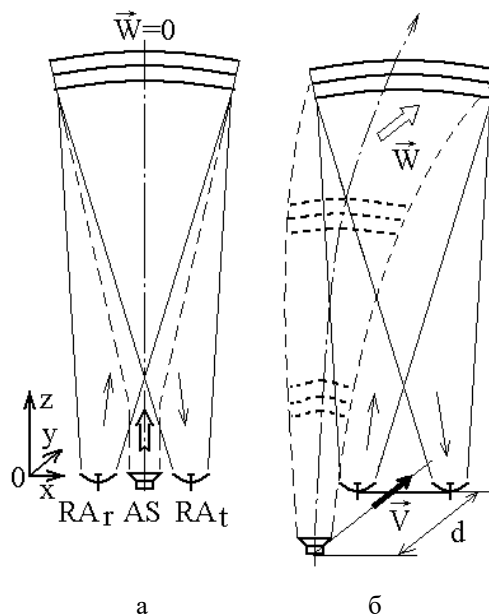


Рис. 6. Схемы фокусировки (а) и сопровождения (б) сфокусированного поля электромагнитных волн

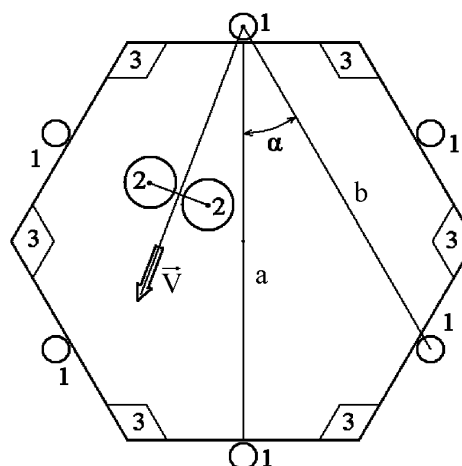


Рис. 7. Схема RASS с шестигранным УПР. На схеме обозначено: 1 – акустические излучатели; 2 – активированные элементы УПР; 3 – недействующие области; V – проекция движения ветра

3. Простейшие схемы деформаций пакета

Условия решения прямой задачи отражения ЭМП необходимо формулировать с учетом последующего решения обратной задачи – определения движения и деформаций зондирующего пакета.

В турбулентной атмосфере зондирующий пакет может испытывать весьма сложные преобразования. Несмотря на развитую теорию распространения волн в случайной среде, для решения обратных задач ее недостаточно [16-20]. Поэтому для достижения цели данной работы строгого учета представленных выше сведений о турбулентных потоках и возможностях построения RASS будет недостаточно. Необходимо привлечь некоторые эвристические представления.

На рис. 8, а, б, в показаны геометрические схемы простейших воздействий турбулентности на зондирующий пакет акустических волн. Траектория движения зондирующего пакета показана сплошной линией, вихревая компонента движения воздушной массы – штриховой.

На рис. 8, а представлена динамическая схема поворота зондирующего пакета вокруг горизонтальной оси. Заметим, что в этом случае вихрь окажет сдвиговое влияние на траекторию движения пакета.

Фазовый центр (обозначен малым кружком) при повороте пакета смещается вдоль горизонтальной плоскости на Δd . При неподвижной излучающей радиоантенне ОФ переместится на $2\Delta d$.

При этом в первом приближении длина звуковых волн λ_a не изменяется.

При восходящем потоке (рис. 8, б) из-за того, что скорость движения воздуха в середине выше, чем по бокам, пакет деформируется, его кривизна увеличивается, и фазовый центр смещается вверх на Δz_h . За счет боковых притоков массы воздуха, окружающей пакет, λ_a увеличивается.

При нисходящем потоке (рис. 8, в) происходит обратное: из-за изменения скорости кривизна пакета уменьшается, фазовый центр смещается вниз на Δz_d , а за счет оттока воздушной массы λ_a уменьшается.

Можно предположить, что поворот пакета (рис. 8, а) действует во всех случаях совместно с любым изменением его кривизны. Кроме того, можно предположить, что во всех случаях происходит изменение длины волны за счет неоднородностей температуры. Как известно [2], скорость звука в газах c_a зависит от абсолютной температуры T , как

$$c_a(T) = a\sqrt{T},$$

где a – коэффициент, зависящий от состава.

Можно отметить, что эти изменения c_a будут коррелировать с указанными выше изменениями за счет движения. Восходящий поток связан с более высокой температурой в потоке, чем у окружающего воздуха, нисходящий – с более низкой.

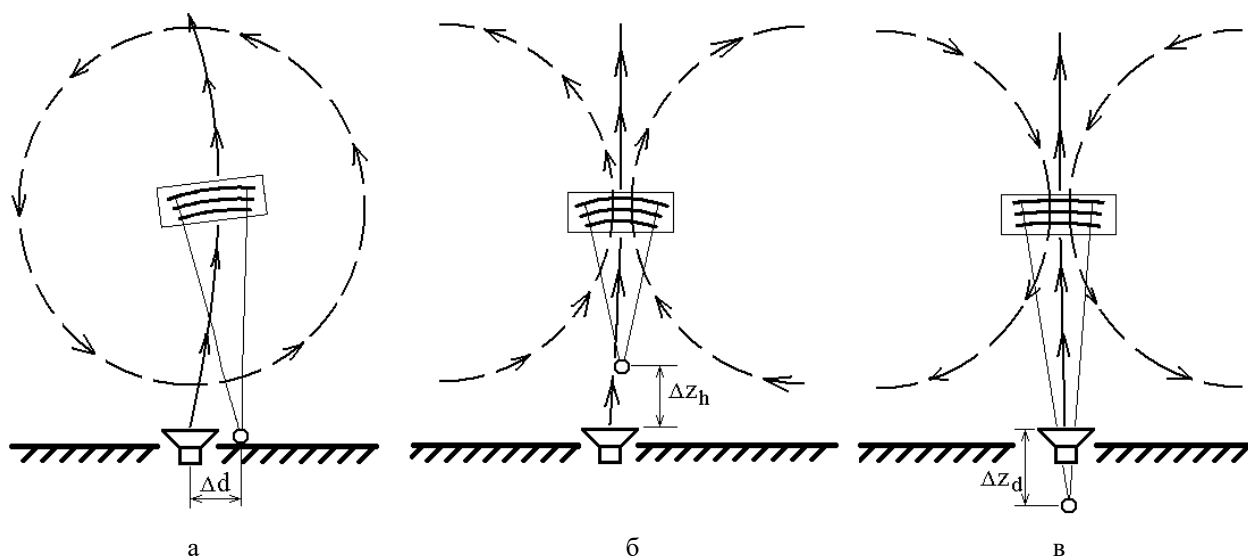


Рис. 8. Зондирующий пакет акустических волн в турбулентном АПС: а – поворот пакета центральной областью турбулентного вихря; б – движение в восходящем потоке; в – движение в нисходящем потоке

Учитывая эвристичность такого описания, не будем здесь обсуждать величину вклада физических факторов в суммарную деформацию пакета. Для решения дифракционной задачи электромагнитных волн на этом этапе можно ограничиться тем, что указанные изменения, происходящие с пакетом, представляют все возможные изменения первого порядка, а именно: горизонтальный сдвиг, поворот вокруг горизонтальной оси, изменение кривизны пакета и длины акустических волн во всем пакете. Изменения длины волны, скорости движения, деформации, которые происходят внутри самого пакета, будем считать деформациями второго порядка. Они могут быть условиями для решения на следующем этапе.

Выводы

Проведенный анализ представлений о турбулентности в АПС и технических возможностей создания систем РАЗ является основой для решения дифракционной задачи ОЭМП с учетом первого порядка изменений, которые происходят с зондирующим пакетом акустических волн.

Нужно отметить, что в настоящее время развиваются подходы к теоретическому описанию турбулентных потоков, основанные на фрактальных представлениях и с применением вейвлет разложений. Эти подходы здесь не рассматривались, поскольку использованные выше более ранние представления и результаты, полученные с их помощью, прошли значительную экспериментальную проверку [31]. Кроме того, их достаточно для формулировки дифракционной задачи с учетом изменений первого порядка.

Более поздние представления потребуются при дальнейшем совершенствовании описания ОЭМП, поскольку современный уровень развития техники создания RASS сделает эту задачу актуальной уже в настоящее время. Тем не менее, сложность дифракционной задачи требует последовательного прохождения всех этапов с тщательным анализом результатов на каждом из них.

Литература:

1. *Каллистратова М.А., Кон А.И.* Радиоакустическое зондирование атмосферы. М.: Наука, 1985. 198 с.
2. *Красненко Н.П.* Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя [Текст] / Н.П. Красненко. Томск. Изд. СО РАН, 2001. С. 274–277.
3. *Neff B.* New Studies of the Summertime Boundary Layer at the South Pole Using a High-Resolution Acoustic Sounder // Proc.ISARS-2004: Cambridge, 12-16 Jul., 2004. P.8-16.
4. *Peters Gerhard, Fischer Bernd, Kirtzel Hans-Juergen.* Sodar Turbulence-Profiles Versus Surface Measurements // Proc. of the 9th International Symposium on Acoustic Remote Sensing and Associated Techniques of the At-

- mosphere and Oceans (ISARS-9). Austria, Vienna. 1998. P. 123-126.
5. *Белов Е.Н., Войтович О.А., Кабанов В.И., Линкова А.М., Руднев Г.А., Ткачева Т.А., Хлопов Г.И., Хоменко С.И.* Применение активно-пассивного зондирования для исследования профиля водности облаков // Радиотехника. 2013. Вып.174. С.32-42.
6. *Ефимов В.С., Вовшин Б.М., Вылегжанин И.С., Лаврукевич В.В., Седлецкий Р.М.* Поляризаационный доплеровский метеорологический радиолокатор С-диапазона со сжатием импульсов // Журнал радиоэлектроники. 2009. №10. С.27-36.
7. *Панченко А.Ю., Марюх В.А.* Влияние волновых свойств направленных звуковых пучков содаров при формировании поля отраженных волн в АПС // Системы управления навигации и связи. 2009. Вып. 4(12) С.42-46.
8. *Панченко А.Ю.* Дифракция электромагнитных волн на акустических при радиоакустическом зондировании атмосферы // Электромагнитные волны и электронные системы. 1997. Т.2, №5. С. 37-42.
9. *Liu Chang, Panchenko A. Yu., Slipchenko M.I.* Radio acoustic sounding systems: part 2. Use of the Fresnel approximation concept for a received signal notation // Telecommunication and Radio Engeneering. 2013. №72(15). P. 1399-1409.
10. *Панченко А.Ю.* Анализ пространственного распределения отраженного поля при радиоакустическом зондировании // Прикладная электроника. 2004. №2, Т.3. С.23-28.
11. *Liu Chang, Panchenko A. Yu., Mykola I. Slipchenko.* Radio acoustic sounding systems: part 1. The diffraction problem for a bistatic zone // Telecommunication and Radio Engeneering. 2013. №72(14). P. 1289-1296.
12. *Панченко А.Ю.* Дифракционная модель ближнего радиоакустического зондирования // Радиоэлектроника и информатика. 2005. № 1(30). С. 35-39.
13. *Slipchenko N.I., Liu Chang, Panchenko A. Yu.* On the issue of solving the diffraction problem of radioacoustic atmospheric sounding by bistatic systems // Proceedings 21st International Crimean Conference: Microwave and Telecommunication Technology “CriMiCo 2011”. P. 1075-1076.
14. *Panchenko A. Yu.* Radio acoustic sounding systems: part 3. Parameters of received signal at the low sounding path // Telecommunication and Radio Engeneering. 2013. №72(16). P. 1487-1496.
15. *Chorin Alexandre.* Theories of Turbulence. Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag, 1977.
16. *Блохинцев Д.И.* Акустика неоднородной движущейся среды [Текст] / Д.И. Блохинцев. М.: Наука, 1981. 208 с.
17. *Осташев В.Е.* Распространение звука в движущихся средах [Текст] / В.Е. Осташев. М.: Наука, 1992. – 208 с.
18. *Исмару А.* Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Т.1. [Текст] / А. Исмару. М.: Мир, 1981. 280 с.
19. *Panchenko A. Yu.* Intensity of scattered acoustic waves in the atmospheric boundary layer in the absence of heat sources on a surface // Telecommunication and Radio Engeneering. 2013. №72(9). P. 759-765.

20. Liu Chang, Panchenko A. Yu., Slipchenko M.I. Analysis of physical factors forming the received signal at sodar sounding of ABL // Proc. of the 16th International Symposium for the Advancement of Boundary-Layer Remote Sensing (ISARS-16). USA, Boulder, Colorado. 2012. P. 161-164.
21. Хргиан А.Х. Физика атмосферы [Текст] / А.Х. Хргиан. Л.: Гидрометеониздат, 1969. 647 с.
22. Зарембо Л.К., Красильников В.А. Введение в нелинейную акустику. М.: Наука, 1966. 510 с.
23. Лайхтман Д.Л. Физика пограничного слоя атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1970. 342 с.
24. Монин А.С. Статистическая гидромеханика [Текст] / А.С. Монин, А.М. Яглом. М.: Наука, 1965. 640 с. Ч. 2. 1967. 720 с.
25. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
26. Бызова Н.Л., Гаргер Е.Л., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. Л.: Гидрометеониздат, 1991. 262 с.
27. Ulyanov Yu.G., Maksymova Nina, Panchenko A. Yu. On the Use of Acoustic and Radioacoustic Methods of PBL Remote Sensing for Assessment of Radiowave Propagation Conditions // Telecommunications and Radio Engineering. 2006. №15. P. 1357-1369.
28. Ina Juaeni, Hiraku Tabata, Noersomadi, Halimurrahman, Hiroyuki Hashiguchi and Toshitaka Tsuda. Retrieval of temperature profiles using radio acoustic sounding system (RASS) with the equatorial atmosphere radar (EAR) in West Sumatra, Indonesia // Juaeni et al. Earth, Planets and Space. 2018. 70:22. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0784-x>
29. Slipchenko N.I., Liu Chang, Panchenko A. Yu. Estimation of efficiency of PAA application to reducing of lower boundary of sounding with rass // Proceedings 24th International Crimean Conference: Microwave and Telecommunication Technology "CriMiCo 2014". P. 1089-1090.
30. Ch. Liu, A. Yu. Panchenko, Mykola I. Slipchenko, Y. N. Ulyanov. Atmospheric radio acoustic sounding systems with controlled array antennas. Part 1. Performance evaluation of controlled AA // Telecommunication and Radio Engineering. 2015. №17. P.1545-1552.
31. Ульянов Ю.Н., Панченко А.Ю., Максимова Н.Г. Об использовании акустического и радиоакустического методов дистанционного зондирования АПС при получении метеоданных для оценки условий РРВ // Радиотехника. 2005. № 143. С. 170-177.
- Транслитерированный список литературы:**
1. Kallistratova M.A., Kon A.I. Radioakusticheskoe zondirovanie atmosfery. М.: Nauka, 1985. 198 s.
 2. Krasnenko N.P. Akusticheskoe zondirovanie atmosfernogo pogranichnogo sloya [Tekst] / N.P. Krasnenko. – Tomsk. Izd. SO RAN, 2001. 277 s.
 3. Neff B. New Studies of the Summertime Boundary Layer at the South Pole Using a High-Resolution Acoustic Sounder // Proc. ISARS-2004: Cambridge, 12-16 Jul., 2004. P.8-16.
 4. Peters Gerhard, Fischer Bernd, Kirtzel Hans-Juergen. Sodar Turbulence-Profiles Versus Surface Measurements // Proc. of the 9th International Symposium on Acoustic Remote Sensing and Associated Techniques of the Atmosphere and Oceans (ISARS-9). Austria, Vienna. 1998. P. 123-126.
 5. Belov E.N., Vojtovich O.A., Kabanov V.I., Linkova A.M., Rudnev G.A., Tkacheva T.A., Khlopov G.I., Khomenko S.I. Pri-menenie aktivno-passivnogo zondirovaniya dlya issledovaniya profilya vodnosti oblakov // Radiotekhnika. 2013. Vy`p.174.S.32-42.
 6. Efimov V.S., Vovshin B.M., Vy`legzhanin I.S., Lavrukevich V.V., Sedleczkij R.M. Polyarizacziorny`j doplerovskij meteorologicheskij radiolokator S-diapazona so szhatiem impul`sov // Zhurnal radioe`lektroniki. – 2009. №10. S.27-36.
 7. Panchenko A.Yu., Maryuh V.A. Vliyanie volnovyh svojstv napravlennyh zvukovyh puchkov sodarov pri formirovaniy polya otrazhennyh voln v APS // Sistemy upravleniya navigacii i svyazi. 2009. Vyp. 4(12). S.42-46.
 8. Panchenko A.Yu. Difrakciya e`lektromagnitny`kh voln na akusticheskikh pri radioakusticheskom zondirovanii atmo-sfery` // E`lektromagnitny`e volny` i e`lektronny`e sistemy`. 1997. T.2, №5. S. 37-42.
 9. Liu Chang, Panchenko A. Yu., Slipchenko M.I. Radio acoustic sounding systems: part 2. Use of the Fresnel approximation concept for a received signal notation // Telecommunication and Radio Engineering. 2013. №72(15). P. 1399-1409.
 10. Panchenko A.Yu. Analiz prostranstvennogo raspredeleniya otrazhennogo polya pri radioakusticheskom zondirovanii // Prikladnaya elektronika. 2004. №2, T.3. S. 23-29.
 11. Liu Chang, Panchenko A. Yu., Mykola I. Slipchenko. Radio acoustic sounding systems: part 1. The diffraction problem for a bistatic zone // Telecommunication and Radio Engineering. 2013. №72(14). P. 1289-1296.
 12. Panchenko A.Yu. Difrakcionnaya model blizhnego radioakusticheskogo zondirovaniya // Radioelektronika i informatika. 2005. № 1(30). S. 35-39.
 13. Slipchenko N.I., Liu Chang, Panchenko A. Yu. On the issue of solving the diffraction problem of radioacoustic atmospheric sounding by bistatic systems // Proc. of the 21st International Crimean Conference: Microwave and Telecommunication Technology "CriMiCo 2011". P. 1075-1076.
 14. Panchenko A. Yu. Radio acoustic sounding systems: part 3. Parameters of received signal at the low sounding path // Telecommunication and Radio Engineering. 2013. №72(16). P. 1487-1496.
 15. Chorin Alexandre. Theories of Turbulence. Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag, 1977.
 16. Blokhinczev D.I. Akustika neodnorodnoj dvizhushhejsya sredy` [Tekst] / D.I. Blokhinczev. М.: Nauka, 1981. 208 s.
 17. Ostashev V.E. Rasprostranenie zvuka v dvizhushhikh sredakh [Tekst] / V.E. Ostashev. М.: Nauka, 1992. 208 s.
 18. Isimaru A. Rasprostranenie i rasseyaniye voln v sluchajno-neodnorodny`kh sredakh. T.1. [Tekst] / A. Isimaru. М.: Mir, 1981. 280 s.
 19. Panchenko A. Yu. Intensity of scattered acoustic waves in the atmospheric boundary layer in the absence of heat sources on a surface // Telecommunication and Radio Engineering. 2013. №72(9). P.759-765.

20. Liu Chang, Panchenko A. Yu., Slipchenko M.I. Analysis of physical factors forming the received signal at sodar sounding of ABL // Proc. of the 16th International Symposium for the Advancement of Boundary-Layer Remote Sensing (ISARS-16). USA, Boulder, Colorado. 2012. P. 161-164.
21. Khragian A.Kh. Fizika atmosfery` [Tekst] / A.Kh Khragian. L.: Gidrometeoizdat, 1969. 647s.
22. Zarembo L.K., Krasil'nikov V.A. Vvedenie v nelinejnyu akustiku. M.: Nauka, 1966. 510 s.
23. Lajkhtman D.L. Fizika pograničnogo sloya atmosfery`. L.: Gidrometeoizdat, 1970. 342s.
24. Monin A.S. Statističeskaya gidromekhanika [Tekst] / A.S. Monin, A.M. Yaglom. M.: Nauka, 1965. 640s. Ch. 2. 1967. 720s.
25. Tatarskij V.I. Rasprostranenie voln v turbulentnoj atmosfere. M.: Nauka, 1967. 548 s.
26. By'zova H.L., Garger E.L., Ivanov V.H. E'ksperimental'ny'e issledovaniya atmosfernoj diffuzii i rasčety` rasseyaniya primesi. L.: Gidrometeoizdat, 1991. 262 s.
27. Ulyanov Yu.G., Maksymova Nina, Panchenko A. Yu. On the Use of Acoustic and Radioacoustic Methods of PBL Remote Sensing for Assessment of Radiowave Propagation Conditions // Telecommunications and Radio Engineering. 2006. №15. P. 1357-1369.
28. Ina Juaeni, Hiraku Tabata, Noersomadi, Halimurrahman, Hiroyuki Hashiguchi and Toshitaka Tsuda. Retrieval of temperature profiles using radio acoustic sounding system (RASS) with the equatorial atmosphere radar (EAR) in West Sumatra, Indonesia // Juaeni et al. Earth, Planets and Space. 2018. 70:22. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0784-x>
29. Slipchenko N.I., Liu Chang, Panchenko A. Yu. Estimation of efficiency of PAA application to reducing of lower boundary of sounding with rass // Proc. 24th International Crimean Conference: Microwave and Telecommunication Technology "CriMiCo 2014". P. 1089-1090.
30. Ch. Liu, A. Yu. Panchenko, Mykola I. Slipchenko, Y. N. Ulyanov. Atmospheric radio acoustic sounding systems with controlled array antennas. Part 1. Performance evaluation of controlled AA // Telecommunication and Radio Engineering. 2015. №17. P.1545-1552.
31. Ulyanov Yu.N., Panchenko A.Yu., Maksimova N.G. Ob is-polzovanii akustičeskogo i radioakustičeskogo metodov distancionnogo zondirovaniya APS pri poluchenii meteo-dannyh dlya ocenki uslovij RRV // Radiotekhnika. 2005. № 143. S. 170-177.

Поступила в редколлегию 19.09.2019

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. Бондаренко И.Н.

Ибраимов Ильвер Казимович, аспирант кафедры проектирования и эксплуатации электронных аппаратов ХНУРЭ. Научные интересы: электродинамика, акустика атмосферы. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Науки, 14.

Панченко Александр Юрьевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой проектирования и эксплуатации электронных аппаратов ХНУРЭ. Научные интересы: электродинамика, акустика атмосферы. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Науки, 14.

Iver Ibrahimov, Post graduate student of the Department of Design and Operation of Electronic Devices of the Kharkov National University of Radio Electronics. Scientific interests: electrodynamics, atmospheric acoustics. Address: Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauka Ave., 14, Phone/fax: +380577021494.

Alexander Panchenko, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Design and Operation of Electronic Devices of the Kharkov National University of Radio Electronics. Scientific interests: electrodynamics, atmospheric acoustics. Address: Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauka Ave., 14, Phone/fax: +380577021494, e-mail: oleksandr.panchenko@nure.ua