

УГЛОВАЯ РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ И СКАНИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ПАКЕТА В СИСТЕМАХ РАЗ

ПАНЧЕНКО А.Ю., ИБРАИМОВ И.К.

Рассматривается необходимость получить сигнал с отдельных участков зондирующего пакета для извлечения информации о динамических и структурных параметрах турбулентности атмосферы. Обосновывается актуальность теоретической оценки разрешающей способности радиолокационной части систем зондирования.

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

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

1. Введение

Метод радиоакустического зондирования атмосферы (РАЗ), который появился несколько десятилетий тому назад, в настоящее время по-прежнему является объектом интереса многих исследователей [1-3]. Основным фактором, поддерживающим интерес, является высокая чувствительность акустических волн к любым изменениям параметров и свойств атмосферного воздуха. Ряд фирм и университетов создают акустические локаторы – содары (SODAR – SONic Detection And Ranging) и системы радиоакустического зондирования (Radio Acoustic Sounding System – RASS) [4]. Принцип работы содаров полностью соответствует принципу работы радиолокаторов. Системы РАЗ используют посылку акустических волн как сенсор, изменяющий свои характеристики в зависимости от параметров воздушной массы. Затем облучают эту посылку электромагнитными волнами (ЭМВ), которые, отражаясь, переносят информацию к приемному устройству RASS.

Методики метеоизмерений в RASS основаны на том, что скорость акустических волн в воздухе зависит от температуры, затухание – от влажности. Ветер, смещающий акустическую посылку, изменяет геометрические условия дифракционной задачи. Параметры турбулентности оценивают по косвенным признакам. Теоретические модели динамики атмосферного пограничного слоя позволяют расширить область применения этих данных [5].

Современный уровень развития компьютерной техники и СВЧ устройств позволяет ставить вопрос о создании RASS, способных существенно повысить достоверность измерений динамических и структурных параметров атмосферной турбулентности [6].

В неоднородной, турбулентной среде участки зондирующего пакета могут находиться в областях, имеющих различные параметры, причем их различие содержит информацию о характеристиках турбулентности.

Особенностью метода РАЗ является фокусирование отраженных волн сферической поверхностью акустической посылки [7]. Поскольку коэффициент отражения от посылки невелик, то сигнал слишком мал, и достаточный уровень он достигает только вблизи фокуса [8]. Существенной проблемой метода являются ветровые сдвиги фокуса отраженных электромагнитных волн за границы апертуры приемной антенны. Современный технический уровень позволяет решить эту проблему, используя поле приемопередающих антенных модулей (ППАМ), которые управляются автоматизированной системой с гибким программным обеспечением [9,10]. Такая система, даже при относительно недорогих микроконтроллерах и компьютерах, позволит формировать любые зондирующие излучения и использовать все известные способы обработки принятых сигналов. Если атмосфера неоднородна и участки зондирующего пакета находятся в областях с различными свойствами, то для оценки возможности системы получать информацию о распределениях параметров среды необходимо оценить разрешающую способность систем зондирования. Поэтому оценка возможностей выделения полезной информации на данном этапе будет актуальной.

Целью данной работы является разработка методологии определения пространственного разрешения метода РАЗ. Задачей работы будет исследование и анализ результатов при аналитическом представлении сигнала для указанных выше условий.

1. Условия постановки задачи

Технические возможности допускают адаптацию метода обработки принятого сигнала в процессе движения посылки по трассе. Поэтому задачу работы RASS в турбулентной атмосфере можно сформулировать как задачу определения угловой разрешающей способности при сканировании зондирующей звуковой посылки. Саму звуковую посылку, которая формирует зондирующий пакет акустических волн, можно взять в традиционном виде, поскольку ее трансформация при движении по трассе зондирования априори неизвестна.

Геометрическая схема задачи формирования зондирующих излучений, приема сигналов и дифракции ЭМВ на неоднородностях диэлектрической проницаемости воздуха, вызванных прохождением акустических волн, показана на рис. 1.

В центре системы координат $(x, y, z, 0)$ помещен акустический излучатель (АИ) радиусом R_a . Звуковая посылка формирует пакет акустических волн (I). Толстыми линиями показано движение акустических волн, тонкими – движение и границы потока ЭМВ: излученных (II) антенной радиуса R_e , и отраженных (III). Отраженные ЭМВ фокусируются в «освещенном» пятне (IV), радиус которого соизмерим с радиусами АИ (R_a) и излучающей радиоантенны (R_e). При

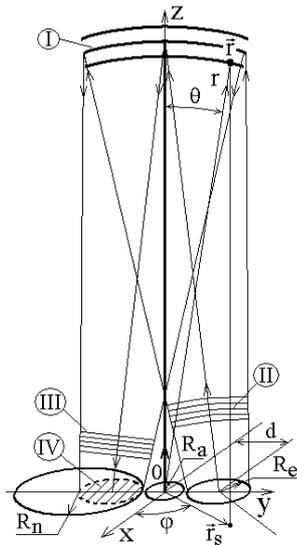


Рис. 1. Геометрическая схема бистатического РАЗ

этом приемная антенна может иметь произвольный радиус – R_n .

Очевидно, RASS с полем управляемых приемопередающих антенных модулей позволяет сформировать эквивалентные апертуры R_e и R_n , с произвольным соотношением. Единственным ограничением является невозможность их перекрытия, поскольку технически сложно сделать ППАМ, одновременно работающий на прием и на излучение и имеющий высокий энергетический потенциал. Поэтому дифракционная задача должна быть сформулирована для бистатической RASS [11]. Однако ее решение можно ограничить случаем моностатического приближения, где ДН сформировались и перекрывают друг друга [7,8]. В этом случае бистатичность проявится только в симметричном смещении пятна IV относительно проекции центра пакета. В бистатической зоне анализ более сложный [12-17]. Его целесообразно перенести на следующий этап.

2. Модельная задача отражения

При использовании функции Грина в виде $\exp(-ikr)/r$ решение представляет собой кратный интеграл [7]. Интегрирование по апертурам АИ и излучающей радиоантенны определяют зондирующий пакет и интенсивность его облучения. Результатом является отраженное ЭМП, интегрирование которого по апертуре приемной антенны дает принимаемый сигнал:

$$U = \int_{S_n} \int_{V} \int_{S_e} \int_{S_a} \frac{\exp[-ik_e(|\vec{r}-\vec{r}_n|+|\vec{r}-\vec{r}_e|)+ik_a|\vec{r}-\vec{r}_a|]}{|\vec{r}-\vec{r}_n| \cdot |\vec{r}-\vec{r}_e| \cdot |\vec{r}-\vec{r}_a|} \times p_a(\vec{r}_a) \cdot \vec{E}_e(\vec{r}_e) \cdot K(\vec{r}) \cdot \vec{e}_n(\vec{r}_n) d^2r_a d^2r_e d^3r d^2r_n \cdot (1)$$

где S_e, S_n, S_a – апертуры радиоантенн и АИ; V – объем, занятый зондирующим пакетом; r_e, r_n, r_a – точки интегрирования на апертурах; \vec{r} – точка интегрирования

в объеме пакета; k_a, k_e – коэффициенты распространения; $k_a=2\pi/\lambda_a, k_e=2\pi/\lambda_e$; λ_a, λ_e – длины акустических и электромагнитных волн; E_e, e_n, p_a – интенсивности возбуждения; $K(\vec{r})$ – коэффициент отражения ЭМВ в точке \vec{r} .

Последовательность интегралов в (1) соответствует описанию, представленному выше.

Элементарный сигнал при отражении от точки $\vec{r}(r, \theta, \phi)$, выбранной в зондируемом объеме и имеющей проекцию \vec{r}_s в плоскости xOy , является результатом действия возбуждения всех апертур.

Для дальнейшего анализа этот процесс нужно разделить на две части. Первая относится к интегрированию по объему зондирующего пакета, вторая – к интегрированию по апертурам.

Меняя порядок интегрирования в (1) и вводя ветровой сдвиг \vec{r}_v , получаем

$$U(\vec{r}_{np}) = \int_{S_e} \int_{S_n} \int_{S_a} I_0(\vec{r}_e + \vec{r}_v + \vec{r}_n - 2\vec{r}_a) \times p_a(\vec{r}_a) \cdot \vec{E}_e(\vec{r}_e) \cdot \vec{e}_n(\vec{r}_n) d^2r_e d^2r_n d^2r_a \cdot (2)$$

Здесь $I_0(\vec{r}_e + \vec{r}_v + \vec{r}_n - 2\vec{r}_a)$ – результат интегрирования по объему зондирующего пакета. Для симметричной бистатической антенны системы RASS [18] \vec{r}_v будет определять смещение центра освещенного пятна относительно центра приемной антенны – \vec{r}_{np} .

Пространственная разрешающая способность включает разрешение по радиусу и по углам θ и ϕ . По радиусу разрешение зависит от длительности звуковой посылки. Поэтому далее подробно рассмотрим разрешающую способность по углу.

Взаимное соответствие ширины главного лепестка, радиуса апертуры и размеров пятна сфокусированного поля основывается на общих законах волновой оптики. Это позволило при использовании весьма упрощенной модели получить физически правильные выводы [11]. Для оценки разрешающей способности необходимо ограничить интегрирование по сфере.

Интегрировать отраженное поле имеет смысл только вблизи главных максимумов. Анализ сигнала, отраженного конечным участком пакета, угловые размеры которого соизмеримы с шириной ДН радиоантенн и АИ, иллюстрирует схема, показанная на рис.2.

Интеграл по объему пакета ограничим предположением, что в радиальном направлении он однороден. Опуская постоянный коэффициент, имеем

$$I_1(\theta, \Delta\theta) = \int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} \exp(ik_e z_n \cos \theta) \times \left\{ \int_{\phi_{min}}^{\phi_{max}} \exp[ik_e r_{n0} \sin \theta \cos(\phi - \phi_{n0})] d\phi \right\} \sin \theta d\theta, (3)$$

где z_n – смещение точки приема по вертикали; r_{n0} и φ_{n0} – проекция аргумента I_0 на xOy ; $\theta_{\max}=\theta_0+\Delta\theta/2$, $\theta_{\min}=\theta_0-\Delta\theta/2$.

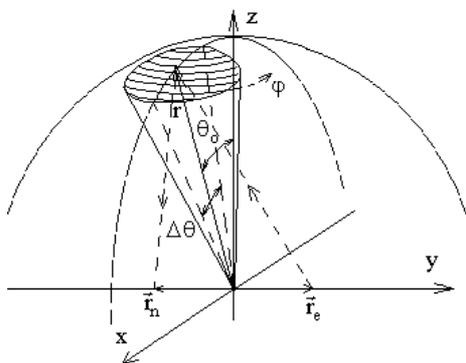


Рис. 2. Интегрирование поля, отраженного ограниченным участком пакета

Пределы интегрирования по φ симметричны и определяются на основании несложных, но громоздких преобразований. Далее будем считать, что антенны находятся в одной плоскости, тогда $z_n=0$. Это обеспечит максимальный поток мощности через апертуру приемной антенны. Тогда величина I_1 будет зависеть от размеров и положения окружности участка интегрирования – $\theta_0, \Delta\theta$.

Рассмотрим зависимости между размерами и положением отражающего участка при равномерном его возбуждении, наклоном ДН и размерами приемной радиоантенны. Это пока не позволяет увидеть действие фокусировки, но дает возможность проверить правильность предыдущих преобразований.

На рис. 3 представлены нормированные зависимости уровня принимаемого сигнала при сканировании приемной антенной с квадратичным распределением возбуждающего поля и апертурой $R_n=8\lambda_c$ по поверхности отражателя с равномерным возбуждением при четырех значениях $\Delta\theta$ при $\theta_0=0$.

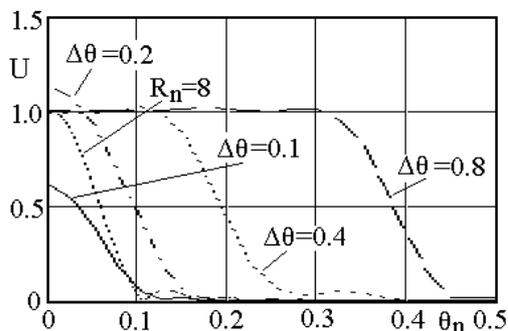


Рис. 3. Взаимодействие поля кругового отражателя и приемной антенны

Здесь и далее нормировка интенсивности сигнала проведена относительно подводимой мощности, или максимума снимаемого сигнала. Размеры апертур нормированы к длине волны: радиоантенн к λ_c , АИ – к λ_a . Заметим, что здесь результат будет одинаковый

для обеих радиоантенн. Для сравнения приведена ДН приемной антенны при $R_n=8$.

Небольшое превышение единичного уровня сигналом при соответствии ширины ДН радиоантенны и угловых размеров отражающего круга ($R_n=8, \Delta\theta=0.2$) имеет ту же природу, что и увеличение интенсивности поля в ближней зоне антенн. Этот фактор косвенно указывает на соотношение размеров антенн для оптимизации разрешающей способности по углу. Уменьшение размеров отражателя ($\Delta\theta=0.1$) делает задачу радиолокационной, увеличение – задачу отражения от экрана.

Действие фокусировки начнет проявляться при изменении размеров приемной антенны R_n . Зависимости принимаемого сигнала при сканировании антеннами с различными апертурами отражающего круга с $\Delta\theta=0.2$ представлены на рис. 4.

Увеличение апертуры приемной антенны не приводит к увеличению крутизны ската зависимостей. Она определяется размером апертуры, а в сфокусированном поле эффективно работает только освещенный участок антенны.

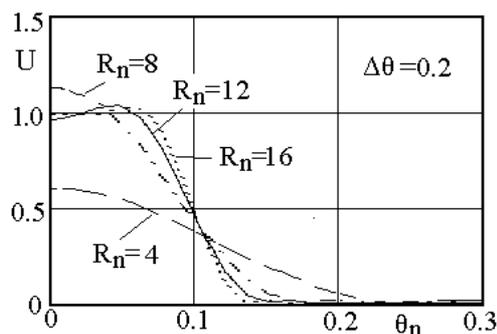


Рис. 4. Сканирование кругового отражателя

В этом случае эквивалентность антенн еще будет проявляться, поскольку вторая радиоантенна и АИ считаются точечными с соответствующими ДН, а выделение отражающего круга искусственное.

3. Анализ результатов для бистатической RASS

В общем случае сигнал при РАЗ необходимо рассматривать с учетом конструкции применяемых антенн. Широко распространены два типа направленных антенн: апертурные и антенны бегущих волн. Несложно показать, что применение обоих типов антенн в RASS приведет к близким результатам. Но, учитывая более широкое распространение апертурных антенн, при анализе ограничимся этим типом.

Расчеты уровней принимаемого сигнала будем проводить согласно (2). Для сокращения времени машинных расчетов использовано (3), в котором $\Delta\theta$ выбиралось так, чтобы перекрыть поток мощности акустического излучения.

Чтобы оценить влияние антенн, рассмотрим совместное действие акустического и электромагнитного из-

лучателей. Изменяя порядок интегрирования в (2) и опуская весьма громоздкие преобразования, получаем

$$U_1(\vec{r}_n) = \int_V I_0(\vec{r}_i) \left[\int_{S_e} p_a \left(\frac{\vec{r}_e + \vec{r}_n - \vec{r}_i}{2} \right) \cdot E_e(\vec{r}_e) d^2 r_e \right] d^2 r_i. \quad (4)$$

Здесь выбрано $\vec{r}_v = 0$, и аргумент p_a представлен через точки излучения и приема ЭМВ и точку отражения.

Таким образом, размеры пятна определяются размерами обоих излучателей. При этом, если волновые размеры равны, то пятно превышает их незначительно.

Угловое разрешение определяется шириной главных лепестков ДН, однако при РАЗ разрешение по углу отличается от аналогичного механизма в радиолокации. На рис. 5, а,б представлены зависимости относительной амплитуды принимаемого сигнала U при сканировании поверхности пакета наклоном ДН приемными радиоантеннами разных диаметров и при разных диаметрах излучающей радиоантенны. Для сравнения пунктирной линией показаны ДН акустического излучателя и излучающей радиоантенны.

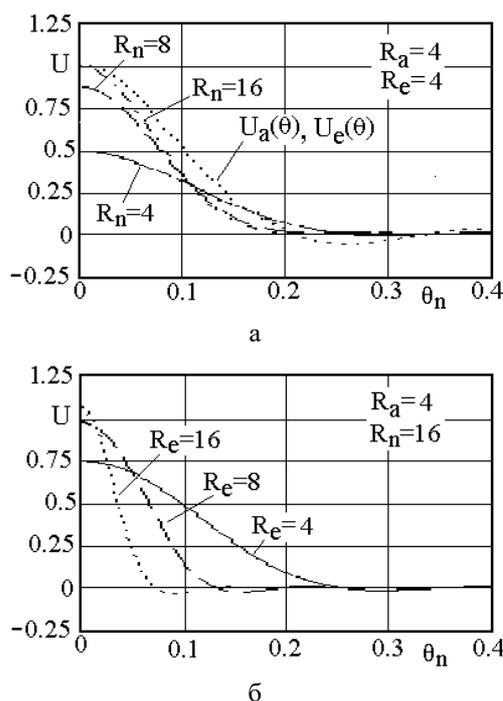


Рис. 5. Зависимости принимаемого сигнала при наклоне приемной радиоантенны при $r_a = 4\lambda_a$: а – $r_e = 4\lambda_e$; б – $r_e = 16\lambda_e$

При увеличении размеров антенны она перехватывает весь поток отраженной мощности, но эффективно работает только участок, который освещен пятном, поэтому зависимость от угла меняется слабо (рис. 5, а). По сути, угловая зависимость определяется ДН эффективно работающего участка, как показано на рис. 1. Соответствие достигается при одинаковых размерах радиоантенн. Эффективно работающий уча-

сток будет изменяться вместе с изменением радиуса излучающей антенны (рис. 5, б).

Возможности RASS определять состояние различных участков зондирующего пакета покажем с помощью графиков, на которых представлено изменение принимаемого сигнала при совместном наклоне ДН обеих радиоантенн (рис. 6).

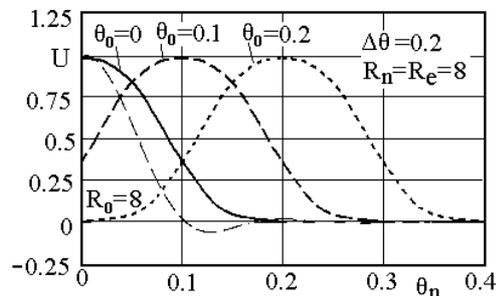


Рис. 6. Модельная задача отражения от круга при наклоне обеих радиоантенн

На этом рисунке показан результат расчетов модельного случая, при котором отражателем является круг на сфере, охватывающей антенную систему, как это изображено на рис.2. Угловой размер круга выбран равным $\Delta\theta = 0.2$, сигнал нормирован к максимуму. Радиусы апертур излучающей и приемной радиоантенны выбраны равными $R_0 = 8\lambda_e$. При квадратичном возбуждении угловой размер основного потока мощности ЭМВ, излучаемого такой антенной, соответствует выбранному размеру отражающего круга. Для сравнения на рис. 6 тонкой штриховой линией показана ДН такой антенны. Расширение графиков относительно ДН вызвано волновыми эффектами на отражающем круге и сверткой ДН радиоантенн. Последнее утверждение основано на весьма громоздких преобразованиях, которые приводят к выражению, аналогичному (4). Достоверность этого легко подтверждается идентичностью вхождения положения точек излучения и приема в общее выражение для сигнала RASS (1). Это позволяет говорить о том, что вклад каждой из апертур в результирующую разрешающую способность RASS одинаков.

На рис. 7 представлены результаты расчета уровня сигнала при сканировании наклоном обеих радиоантенн зондирующего пакета, излученного апертурным излучателем.

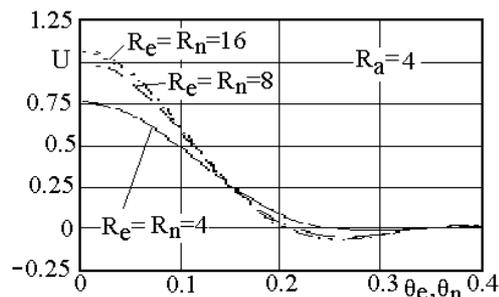


Рис. 7. Принимаемый сигнал при сканировании зондирующего пакета наклоном обеих радиоантенн

Эти расчеты показывают уменьшение влияния волновых эффектов на краях апертур и отражающего пакета при увеличении направленности радиоантенн, вызванной соответствующим увеличением радиусов апертур и «освещенного» пятна.

Использование управляемого поля приемопередающих антенных модулей в большей степени соответствует анализу при равномерно возбужденных апертурах. Полученные результаты легко экстраполировать на этот случай. Достаточно несколько уменьшить размеры апертуры, примерно на 25% по радиусу. При равномерном возбуждении увеличивается уровень боковых лепестков апертур. Но для РАЗ это несущественно, поскольку в формировании сигнала с этого направления будут участвовать ДН двух, а в некоторых случаях трех антенн.

Выводы

Распределение свойств среды в турбулентном потоке случайно и изменения происходят сравнительно быстро. Оно может меняться за период движения акустического пакета по трассе. Результаты работы позволяют сделать ряд выводов.

1. Наибольшую ценность представляют данные с разных участков пакета, которые получены одновременно. Для этого необходимо управлять диаграммой направленности излучателя и приемника ЭМВ.

2. Задачи создания антенной системы для РАЗ с локализацией направления сводятся к выбору и оптимизации антенной системы, работающей со сфокусированным полем. Результаты решения задач могут служить основой для создания практических алгоритмов и программ управления полем приемопередающих антенных моделей.

3. Ширину главных лепестков ДН излучателей РАЗ необходимо выбирать на основании требований углового разрешения, которые формируются задачами определения параметров турбулентных неоднородностей.

Представленные в данной работе результаты позволят существенно улучшить аппаратуру и методики радиоакустического зондирования, что позволит получить принципиально новую информацию о состоянии атмосферной турбулентности.

Литература:

1. *Каллистратова М.А., Кон А.И.* Радиоакустическое зондирование атмосферы. М.: Наука, 1985. 198 с.
2. *Карташов В. М.* Пассивная локация пятна рассеянных сигналов при радиоакустическом зондировании атмосферы / В. М. Карташов, С. И. Бабкин, Е. Г. Толстых // Прикладная радиоэлектроника. 2015. Т. 14, № 1. С. 58–63.
3. *Ульянов Ю.Н., Мисайлов В.Л., Мартыненко Г.Ю.* Горизонтальное радиоакустическое зондирование для измерения скорости ветра для ветроэнергетических установок / Системы обработки информации. 2011. № 2(92). С. 168–172.
4. *Chandrasekhar Sarma T. V., Narayana Rao D., Jun-Ichi Furumoto, Toshitaka Tsuda.* Development of radio acoustic sounding system (RASS) with Gadanki MST radar – First results /

Annales Geophysicae 26(9) · September. 2008 DOI: 10.5194/angeo-26-2531-2008

5. *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. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v65.i15.10

6. *Chag L., Panchenko A. Yu., Slipchenko N.I.* Estimation of efficiency of PAA application to reducing of lower boundary of sounding with rass // CriMiCo 2014 - 2014 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings 6959774, p. 1089-1090.

7. *Панченко А.Ю.* Дифракция электромагнитных волн на акустических при радиоакустическом зондировании атмосферы // Электромагнитные волны. 1997. Т.2, №5. С.37–42.

8. *Панченко А.Ю.* Анализ пространственного распределения отраженного поля при радиоакустическом зондировании // Прикладная электроника. 2004. №2, Т.3. С. 23-29.

9. *Ch. Liu, A. Yu. Panchenko, Mykola I. Slipchenko, Ulyanov Y.N.* Atmospheric radio acoustic sounding systems with controlled array antennas. Part 1. Performance evaluation of controlled AA // Telecommunication and Radio Engineering. 2015. №74(17). P. 1545-1552.

DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v74.i17.50

10. *Ch. Liu, A. Yu. Panchenko, Mykola I. Slipchenko.* Atmospheric radio acoustic sounding systems with controlled array antennas. Part 2: Diffraction problem // Telecommunication and Radio Engineering. 2015. №74(19). P.1745-1753. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v74.i19.70

11. *Кон А.И.* Бистатическая система радиоакустического зондирования // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1981. Т.1, №6. С.657–660.

12. *Панченко А.Ю.* Дифракционная модель ближнего радиоакустического зондирования // Радиоэлектроника и информатика. 2005. № 1(30). С. 35-39.

13. *Slipchenko, N.I., Chang, L., Panchenko, A.Yu.* Diffraction problem in bistatic zone of radio acoustic sounding systems / 8th International Conference on Antenna Theory and Techniques, ICATT'11. 2011. P. 112-114.

14. *Slipchenko, N.I., Chang, L., Panchenko, A.Yu.* On the issue of solving the diffraction problem of radioacoustic atmospheric sounding by bistatic systems / CriMiCo 2011 - 2011 21st International Crimean Conference: Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings. P. 1075-1076.

15. *Liu, C., Panchenko, A.Y., Slipchenko, N.I.* Radio acoustic sounding systems: Part 1. The diffraction problem for a bistatic zone / Telecommunications and Radio Engineering. 2013. N72, iss.14. P. 1289-1296. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v72.i14.30

16. *Chang, L., Panchenko, A.Yu., Slipchenko, N.I.* Radio acoustic sounding systems: Part 2. Use of the fresnel approximation concept for a received signal notation / Telecommunications and Radio Engineering. 2013. N72, iss.15. P. 1399-1409. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v72.i15.40

17. *Panchenko, A.Yu.* Radio acoustic sounding systems: Part 3. parameters of received signal at the low sounding path / Telecommunications and Radio Engineering. 2013. N72, iss.16. P. 1487-1496. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v72.i16.40

18. *Ульянов Ю.Н.* Точность определения влажности воздуха двухчастотным радиоакустическим зондированием // Труды X Всесоюз. симп. по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Томск, 1987. Ч.2. С.107-112.

Транслитерированный список литературы:

1. *Kallistratova M.A., Kon A.I.* Radioakusticheskoe zondirovanie atmosfery. M.: Nauka, 1985. 198 s.
2. *Kartashov V. M.* Passivnaya lokacziya pyatna rasseyanny`kh signalov pri radioakusticheskom zondirovanii atmosfery` / V. M. Kartashov, S. I. Babkin, E. G. Tolsty`kh // Prikladnaya radioelektronika. Kh. : KhNURE`, 2015. T. 14, № 1. С. 58–63.

3. *Ul'yanov Yu.N., Misajlov V.L., Marty'nenko G.Yu.* Horizontal'noe radioakusticheskoe zondirovanie dlya izmereniya skorosti vetra dlya vetroe'nergeticheskikh ustanovok / Sistemi obrabki i' nformaczi'yi. 2011. № 2(92). S. 168-172.
 4. *Chandrasekhar Sarma T. V., Narayana Rao D., Jun-Ichi Furumoto, Toshitaka Tsuda.* Development of radio acoustic sounding system (RASS) with Gadanki MST radar – First results / *Annales Geophysicae* 26(9). September 2008. DOI: 10.5194/angeo-26-2531-2008
 5. *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. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v65.i15.10
 6. *Chag L., Panchenko A. Yu., Slipchenko N.I.* Estimation of efficiency of PAA application to reducing of lower boundary of sounding with rass // *CriMiCo 2014 - 2014 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings* 6959774, p. 1089-1090.
 7. *Panchenko A.Yu.* Difpakcziya e'lektromagnitny'kh voln na akusticheskikh ppi radioakusticheskom zondirovanii atmosfery' // *E'lektromagnitny'e volny' (M)*. 1997. T.2, №5. S.37-42.
 8. *Panchenko A.Yu.* Analiz prostranstvennogo raspredeleniya otrazhenogo polya pri radioakusticheskom zondirovanii // *Prikladnaya e'lektronika*. 2004. #2, T.3. S. 23-29.
 9. *Ch. Liu, A. Yu. Panchenko, Mykola I. Slipchenko, Ulyanov Y.N.* Atmospheric radio acoustic sounding systems with controlled array antennas. Part 1. Performance evaluation of controlled AA // *Telecommunication and Radio Engineering*. 2015. №74(17). P. 1545-1552. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v74.i17.50
 10. *Ch. Liu, A. Yu. Panchenko, Mykola I. Slipchenko.* Atmospheric radio acoustic sounding systems with controlled array antennas. Part 2: Diffraction problem // *Telecommunication and Radio Engineering*. 2015. №74(19). P.1745-1753. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v74.i19.70
 11. *Kon A.I.* Bistaticheskaya sistema radioakusticheskogo zondirovaniya // *Izv. AN SSSR. Fizika atmosfery' i okeana*. 1981, T.1., №6. S.657-660.
 12. *Panchenko A.Yu.* Difrakzionnaya model' blizhnego radioakusticheskogo zondirovaniya // *Radioe'lektronika i informatika*. 2005. №1(30). S. 35-39.
 13. *Slipchenko, N.I., Chang, L., Panchenko, A.Yu.* Diffraction problem in bistatic zone of radio acoustic sounding systems / 8th International Conference on Antenna Theory and Techniques, ICATT'11 2011. 6170722. P. 112-114.
 14. *Slipchenko, N.I., Chang, L., Panchenko, A.Yu.* On the issue of solving the diffraction problem of radioacoustic atmospheric sounding by bistatic systems / *CriMiCo 2011 - 2011 21st International Crimean Conference: Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings* 6068832. P. 1075-1076.
 15. *Liu, C., Panchenko, A.Y., Slipchenko, N.I.* Radio acoustic sounding systems: Part 1. The diffraction problem for a bistatic zone / *Telecommunications and Radio Engineering*. 2013. N72, iss.14. P. 1289-1296. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v72.i14.30
 16. *Chang, L., Panchenko, A.Yu., Slipchenko, N.I.* Radio acoustic sounding systems: Part 2. Use of the fresnel approximation concept for a received signal notation / *Telecommunications and Radio Engineering*. 2013. N72, iss.15. P. 1399-1409. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v72.i15.40
 17. *Panchenko, A.Yu.* Radio acoustic sounding systems: Part 3. parameters of received signal at the low sounding path / *Telecommunications and Radio Engineering*. 2013. N72, iss.16. P. 1487-1496. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v72.i16.40
 18. *Ul'yanov Yu.N.* Tochnost' opredeleniya vlazhnosti vozdukh dvukhchastotny'm radioakusticheskim zondirovaniem // *Trudy' Kh Vsesoyuzn. simp. po lazernomu i akusticheskomu zondirovaniyu atmosfery'*. Tomsk, 1987. Ch.2. S.107-112.
- Поступила в редколлегию 21.11.2019
- Рецензент:** д-р физ.-мат. наук, проф. Бондаренко И.Н.
- 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, тел. 7021494.
- Ибраимов Ильвер Казимович**, аспирант кафедры проектирования и эксплуатации электронных аппаратов ХНУРЭ. Научные интересы: электродинамика, акустика атмосферы. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Науки, 14, тел. 7021494.
- Alexander Panchenko**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of Department of Design and Operation of Electronic Devices, 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
- Ilyver Ibraimov**, Post graduate student of Department of Design and Operation of Electronic Devices, Kharkov National University of Radio Electronics. Scientific interests: electrodynamics, atmospheric acoustics. Address: Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauka Ave., 14, Phone/fax: +380577021494, e-mail: ilyver.ibraimov@nure.ua