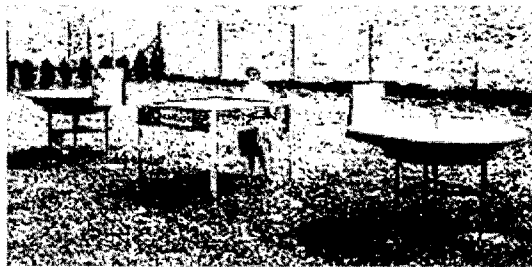


О ПОСТАНОВКЕ ДИФРАКЦИОННОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ БИСТАТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ СИСТЕМ РАДИОАКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

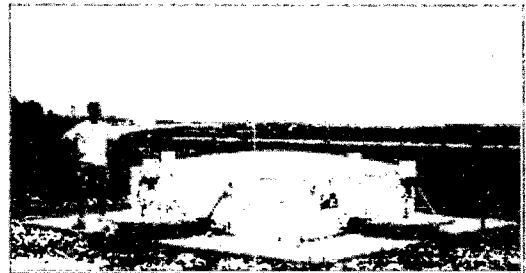
Введение

Радиоакустические системы зондирования (РАЗ) позволяют дистанционно, неконтактно измерять температуру воздуха и скорость ветра в атмосферном пограничном слое (АПС). Они находят применение как средство оценки условий распространения радиоволн, взлета и посадки самолетов, рассеяния загрязнений и прочих.

В своей более чем 50-летней истории метод РАЗ имел и периоды повышенного интереса и периоды полного отрицания [1]. Современный этап можно охарактеризовать, как стадию планомерного развития. В настоящее время в ряде развитых стран создано значительное количество систем РАЗ (рис. 1). В англоязычной литературе они именуются как RASS (Radio Acoustic Sounding System).



а



б

Рис. 1. Бистатические RASS:

а – фирмы Remtech (France, 1997), б – Radian Corporation (USA, 2003)

Однако их широкое внедрение ограничивают не решенные пока проблемы. Одной из них является отсутствие удовлетворительного решения дифракционной задачи.

Особенности современных систем РАЗ

Современное состояние определяется комплексом факторов, среди которых наиболее важными являются технические возможности, особенности объекта наблюдения и адекватность теоретического описания.

Многочисленные эксперименты позволили оптимизировать конструкцию систем РАЗ. Современные системы РАЗ создают, в основном, по бистатической схеме [2], и отличаются методами и реализациями систем компенсации ветрового сдвига. Альтернативный вариант, использовавшийся в более ранних конструкциях, дифракция в которых соответствует моностатической схеме, показан на рис. 2.

Апертуры антенн располагают в одной плоскости (рис. 3). Смещение по вертикали, как было сделано в RASS ИФА [1], сейчас не используется.

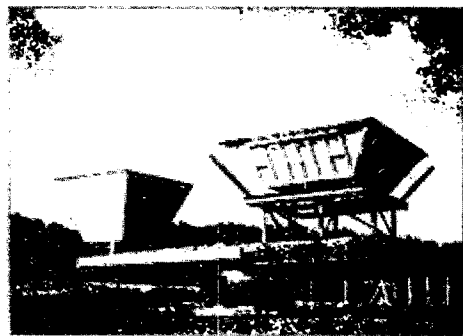


Рис. 2. Компенсация ветрового сдвига с помощью поворотной платформы (RASS фирмы Metech Germany, 1994)

Таким образом, наиболее актуальным является поиск решения дифракционной задачи для схемы, изображенной на рис. 3.

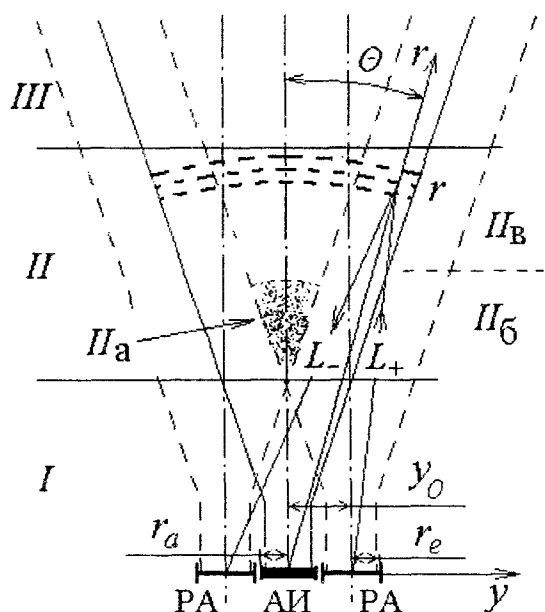


Рис. 3. Геометрическая схема взаимодействия полей в бистатических системах РАЗ

ее помощью невозможно получить данные с нижнего участка трассы зондирования. Этот участок особенно важен для сопоставления с данными наземных датчиков [3]. Следует заметить, что, конструкции, созданные по схеме аналогичной RASS, изображенной на рис.2, в этом отношении будут менее перспективны.

Особенности получения метеоинформации в бистатических системах РАЗ

На рис. 3 тонкими линиями показаны границы основных потоков мощности (ОПМ).

Внизу, в зоне нечувствительности (I), отраженный сигнал отсутствует. Вверху, на значительном удалении от антенн ($r \gg y_0$), разном y_0 можно пренебречь. Эту зону можно назвать зоной моностатического приближения (III), и для вычисления температуры и ветра достаточно использовать решение дифракционной задачи в одном измерении (вдоль радиуса r). В бистатической зоне (II) сигнал существует, однако вычисление метеопараметров затруднено. Зависимости существенно усложняются. В них включаются параметры системы: разнос антенн y_0 , ширина ДН, протяженность пакета и прочие.

Получение численного решения затрудняют значительные размеры области взаимодействия. Экспериментальная оценка требует значительных затрат. Таким образом, для решения этой задачи возможен только теоретический подход. Однако в настоящее время прогресс в этой области, к сожалению, замедлился.

Наиболее важные моменты в формировании теоретических представлений метода РАЗ подробно описаны еще в [1].

Основные моменты решения дифракционной задачи РАЗ

Ранее существовало несколько ошибочных суждений, которые задержали развитие метода. Среди них можно выделить представление об отражателе как о точечной цели – радиолокационный подход. Также можно отметить представление о стоксовском механизме сдвига частоты принимаемого сигнала, что исключает возможность измерения температуры.

Здесь остановимся только на наиболее важных для дальнейшего решения моментах.

В работе [4] обоснован ряд фундаментальных положений метода. Это, во-первых, фокусировка поля отраженных электромагнитных волн, что позволило обосновать требования к бистатическому расположению антенн; это же впоследствии позволило отойти от локационных представлений. Во-вторых, что сдвиг частоты обусловлен доплеровским механизмом. Однако в этой работе использовано приближение точечных антенн.

В работе [5] анализируется пространственное распределение параметров принимаемого сигнала для систем РАЗ с апертурными антеннами. Как и в [4], рассматривается моностатическая зона. Показано, что сигнал представляет собой свертку распределений интенсивности возбуждения всех трех антенн. Этот шаг потребовал существенного усложнения аналитической модели. Хотя в моностатической зоне можно допустить ряд упрощений. В частности, использовано приближение дальней зоны для излучателей. Предполагалось, что апертура приемной антенны расположена в фокальной плоскости, на промежуточных этапах использовалось приближение геометрической оптики.

В бистатической зоне ряд этих приближений недопустим. Строгое решение может быть основано на разложении полей всех антенн по спектрам их пространственных гармоник. Но оно, очевидно, будет чрезвычайно громоздким. Поэтому здесь необходим поэтапный подход. Особенно важен этап выбора и обоснования приближений.

Условия решения задачи

Решение необходимо искать, основываясь на анализе физических факторов и технических возможностей систем РАЗ.

Физические условия определяют пространственное разрешение системы и уровень принимаемого сигнала. Их нужно учитывать, ставя задачу повышения информативности измерений. Тогда требования к ДН антенн и протяженности зондирующего пакета определяются размерами вихрей для турбулентной атмосферы и условиями выделения информации о слоях при устойчивой стратификации.

Сферическая расходимость акустических волн в свободном пространстве приводит к фокусировке отраженного электромагнитного поля. Совместно с ветровым сдвигом акустического пакета это определяет уровень сигнала и требования к местоположению антенн в горизонтальной плоскости.

К основным техническим особенностям систем РАЗ, которые необходимо учитывать при решении задачи можно отнести следующие. Во-первых, взаимосвязь y_0 с размерами апертур (r_a и r_e) и необходимой шириной ДН. Поэтому область соприкосновения ДН радиоантенн (l_a) нельзя опустить ниже определенного значения. Во-вторых, влияние выполнения условия Брэгга, которое в бистатической зоне приводит к существенному усложнению задачи.

Методика решения задачи

При решении нужно учитывать, что отражающий акустический пакет также является виртуальной антенной, и его действие наиболее удобно рассматривать с позиций теории антенн.

Упрощение аналитического решения возможно при использовании соотношений геометрической оптики и дифракции Фраунгофера. Однако их применение требует обоснования.

Наиболее важной является зависимость амплитуды сигнала от высоты – функция радиального взаимодействия (ФРВ). Отсутствие сигнала или недостаточный его уровень полностью исключают возможность получения информации. Эти условия существуют ниже области соприкосновения (рис. 3).

Высоту области соприкосновения можно определить на основании известных соотношений теории антенн. Только в данном случае нужно несколько скорректировать их

вывод. В частности действующую ширину ДН можно определить по уровню 0,1...0,2, так как доплеровский локатор имеет большой динамический диапазон. По этой же причине расстояние дальней зоны радиопакета можно оценить по фазовому критерию для разности оптического хода равной $\pi/2$. Также на первом этапе можно считать фазовый фронт сферическим и предположить строгое выполнение условия Брэгга на всей поверхности пакета, что в первом приближении соответствует тонким пакетам.

В этом случае вид ФРВ определяется степенью перекрытия ОПМ (рис. 3). Она показывает, с какого уровня можно получить информацию. Качественно она определяется следующими факторами.

В нижней части трассы ФРВ равна нулю и измерения невозможны. Бистатическую зону можно разделить на две части. В нижней части (Иб), по мере увеличения перекрытия ОПМ радиопакета, сигнал будет возрастать. В этой части решение дифракционной задачи и определение соответствующих корректирующих функций (КФ) наиболее сложно. В спадающей части (Ив) эта задача несколько упрощается. И лишь в зоне моностатического приближения перекрытие можно считать полным, а КФ должна будет скомпенсировать только сферическую расходимость волновых полей (r^{-1}).

Наиболее важным информационным параметром является доплеровский сдвиг частоты принимаемого сигнала Δf_d . Поэтому важно получить КФ для сдвига частоты. Но эта задача наиболее сложна. Рассмотрим схематически только некоторые ее начальные этапы.

В однородной изотропной атмосфере, в которой скорость звука c_a постоянна, изменение сдвига частоты определяется геометрическими соотношениями волновых полей. Зависит Δf_d от величины угла θ (рис. 3) и требует интегрирования по объему пакета. И если для тонких пакетов можно пренебречь радиальной протяженностью, то угловыми размерами пренебречь нельзя. Эта зависимость является функцией коррекции для Δf_d .

На первом этапе можно считать, что $r = c_a t$, где t – время. Поэтому достаточно сделать только оценку зависимости производных оптического пути по r при движении волн вверх L_+ и вниз L_- для различных участков зондирующего пакета. Общее изменение оптического пути определяется суммой $\Delta L_\Sigma = \Delta L_+ + \Delta L_-$. Из геометрических соотношений в направлении оси y производная оптического пути по радиусу в первом приближении:

$$\frac{\partial L_\Sigma}{\partial r} = 2 - \frac{y_0^2}{r^2} \cos^2 \theta + \frac{3}{4} \frac{y_0^4}{r^4} . \quad (1)$$

При оценке малости составляющих учтено, что в бистатических системах $\theta_{\max} > y_0 r^{-1}$.

Локальное выполнение условия Брэгга изменяет соотношение вкладов сигнала, отраженного от различных участков пакета. Даже при тонких пакетах это приводит к погрешности измерения температуры (ΔT°) около $\pm 1...3^\circ\text{C}$.

Однако градиентные измерения, проводимые на нижних участках, требуют существенного снижения этой погрешности.

Предварительные результаты

Для апертурных антенн даже в зоне моностатического приближения выкладки становятся чрезвычайно громоздкими [5]. Поэтому здесь ограничимся представлением предварительных результатов, показывающих возможность снижения нижней границы получения информации.

Эти результаты получены при значительном числе приближений и ограничений, требующих отдельного описания. В частности, реальные антенны заменены точечными

излучателями, их ДН – гауссовскими кривыми ($U(\theta) = \exp(-a^2\theta^2)$), не учтена радиальная протяженность отражателя, но, тем не менее, учтена его сферичность.

В этом случае выражение для ФРВ имеет вид

$$F(r) = \frac{1 - 1.5(y_0/r)^2}{r} \exp\left[-2(a \cdot y_0/r)^2\right]. \quad (2)$$

Данная функция (рис. 4) показывает характер взаимодействия излучений, а ее поведение соответствует качественному описанию приведенному выше. Здесь обозначение зон преимущественно с обозначениями на рис. 3.

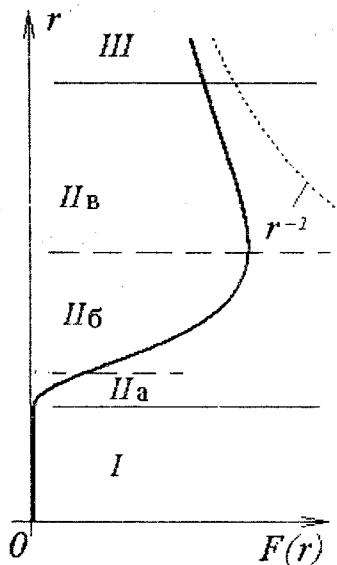


Рис. 4. Функция радиального взаимодействия полей в бистатических системах РАЗ

Представленная ФРВ соответствует результатам экспериментов, полученным на действующей системе РАЗ-10-20, созданной в ПНИЛ зондирования атмосферы ХИРЭ и в течение ряда лет использовавшейся для исследования условий РРВ в АПС вблизи границы суша-море [6].

Заметим только, что данная выше оценка ΔT также соответствует реальным значениям, а экспериментально полученная ФРВ располагалась несколько выше расчетной, что обусловлено сделанными приближениями.

Выводы

Соответствие экспериментальным данным позволяет говорить о правильности рассуждений и обоснованности всей методики использования приближений. Дальнейшее уточнение, в том числе и для доплеровского сдвига частоты принимаемого сигнала, потребует исключения тех приближений, которые не будут соответствовать поставленным задачам.

Решение дифракционной задачи в бистатической зоне систем РАЗ позволит снизить нижнюю границу измерения метеопараметров воздуха и существующими системами производить градиентные метеоизмерения в приземном слое (0...100 м) без метеорологических мачт.

Список литературы: 1. *Каллистратова М.А., Кон А.И.* Радиоакустическое зондирование атмосферы – М. : Наука, 1985. – 198с. 2. *Ульянов Ю.Н., Ветров В.И., Максимова Н.Г.* Радиоакустическое ветровое зондирование атмосферного пограничного слоя: история развития и перспективы // Вестник ХНУ. – №756. – С. 27-32. 3. *Gerhard Peters, Barabara Hennemuth, Hans-Jurgen Kirtzel* RASS Measured Temperature Gradients with a Bistatic Antenna Set-up, *Proc. 9th Intl. Symp. Acoust. Rem. Sens.*, Vienna 167-170. 4. *Кон А.И.* Бистатическая система радиоакустического зондирования // Изв. АН СССР Физика атмосферы и океана. – 1981. – Т.17. – №6. – С.657-660. 5. *Панченко А.Ю.* Дифракция электромагнитных волн на акустических при радиоакустическом зондировании атмосферы Электромагнитные волны и электронные системы. – 1997. – Т.2, №5. – С.37-42. 6. *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. – Вып. 143. – С. 188-195.

Харьковский национальный университет радиозлектроники

Поступила в редколлегию 05.06.2011