



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИСТАНЦИОННЫХ СРЕДСТВ ЗОНДИРОВАНИЯ АПС И МЕТОДОВ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ УСЛОВИЙ РРВ

ПАНЧЕНКО А.Ю., МАРЮХ В.А.

Оценка условий РРВ на приземных трассах требует определения метеопараметров над большими территориями. Дистанционные методы зондирования, например, радиолокационные или радиометрические позволяют частично решить эту задачу. Но более полный результат дает комплексное использование текщих метеоданных и прогностических моделей, основанных на теории турбулентной диффузии АПС.

Введение

Использование приземных радиотрасс для связи, радиолокационных систем наблюдения за объектами, несмотря на развитие альтернативных методов и средств, по-прежнему является актуальным. Совершенствование аппаратуры требует адекватного улучшения методик оценки условий распространения радиоволн (РРВ). Значительная протяженность радиотрасс, неопределенность положения технических средств в мобильных системах требует применения дистанционных средств зондирования, способных контролировать большие пространства.

Неконтактные средства метеозмерений основаны на взаимодействии волн с атмосферным воздухом. Наиболее полную информацию может дать радиоакустическое зондирование (РАЗ), использующее акустические и электромагнитные волны. Но и этот метод не позволяет измерить диэлектрическую проницаемость воздуха непосредственно. Кроме того, он существенно ограничен сдвиговым действием ветра. Использование компенсации усложняет систему, а методы компенсации воздействия турбулентности пока в состоянии разработки. Однако метод РАЗ позволяет автономно определять основные метеопараметры: температуру T , влажность H , необходимые для расчета индекса показателя преломления N [1], и ветер V . Это дает возможность считать, что в настоящее время РАЗ является одним из самых перспективных методов для создания систем непрерывного мониторинга нижнего слоя тропосферы – атмосферного пограничного слоя (АПС) и составления краткосрочных прогнозов параметров приземных радиотрасс.

1. Особенности метода РАЗ

Метеоданные, полученные с помощью РАЗ, имеют ряд специфических особенностей. Косвенный характер измерений приводит к неоднозначности полученной информации. Но к достоинствам РАЗ можно отнести и то, что этот метод согласован по параметрическому критерию с моделью турбулентной диффузии. На основании эвристических оценок, опирающихся на анализ результатов многолетнего опыта работы ПНИЛ зондирования атмосферы ХНУРЭ с дистанционным РАЗ, можно представить соотношения между погрешностями измерений температуры ΔT , ветра ΔV и влажности ΔH и погрешностью восстановления высотных значений индекса коэффициента преломления ΔN , полученных на основании модели турбулентной диффузии в зависимости от значения коэффициента турбулентной диффузии k следующим образом (рис.1).

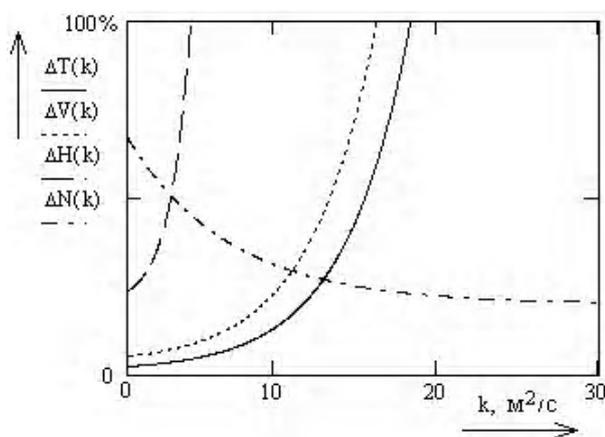


Рис. 1. Эвристическая оценка погрешностей

Первичная информация при РАЗ заключена в параметрах принимаемого сигнала. Этот сигнал формируется рядом факторов – самими метеопараметрами, видом зондирующих акустических посылок, способом излучения и приема электромагнитных волн. Не останавливаясь на систематических и аппаратурных погрешностях, зависящих от конкретной реализации системы РАЗ и адекватности используемой модели взаимодействия волн с атмосферным воздухом и между собой, отметим, что случайную ошибку вносит, прежде всего, турбулентное движение атмосферы.

Не обсуждая здесь численные значения, которые зависят не только от k , но и от интервала восстановления, времени процесса и прочих параметров, остановимся на качественном поведении представленных зависимостей.

Первоначально метод РАЗ предполагался для измерения скорости ветра [2]. Прибор должен был располагаться внутри потока и ориентирован вдоль направления потока. Но при вынесении прибора за пределы исследуемого участка потока (для обеспечения дистанционности измерений) функциональная зависимость резко ослабевает.

Эксперименты по измерению температуры оказались более успешными. Для ее вычисления нужна скорость звука c_a , определяемая по доплеровскому сдвигу частоты принимаемого сигнала Δf_D . Простой вид связи между Δf_D и c_a , сравнительно небольшой диапазон изменения скорости Δc_a в реальной атмосфере обуславливает практически линейную зависимость Δf_D от Δc_a . Поэтому температура методом РАЗ измеряется наилучшим образом. Наибольший вклад в ее погрешность вносит радиальная составляющая турбулентного течения. В устойчивой атмосфере эта составляющая погрешности может уменьшаться до десятых долей градуса. Тогда больший вклад в погрешность Δc_a вносит изменение влажности [2].

Для измерения ветра по первоначальному замыслу требовалось два измерения Δf_D , которые также имели простую связь с V . При дистанционном измерении вклад в погрешность вносят радиальная и касательная составляющая турбулентного потока, его пространственная изменчивость, флуктуации температуры. Хорошие результаты показал амплитудный метод измерения V [3], но в целом качественные показатели измерения ветра хуже.

Еще слабее выражены функциональные зависимости параметров принимаемого сигнала от влажности воздуха. В этом случае также требуется измерение значительного числа исходных параметров [4].

Все сказанное выше характерно для любых видов реализации РАЗ и методик определения влажности.

2. Современные теоретические модели АПС

В настоящее время удовлетворительное для практических нужд описание имеют только процессы рассеяния свойств и примесей в турбулентных потоках [5]. Вопросы синергетики развиты недостаточно [6].

Для описания процессов рассеяния используют теории турбулентной диффузии и гауссовых струй [7]. В нашей стране традиционно отдают предпочтение первой.

3. Обоснование методов решения задачи

Использование диффузионной модели требует знание коэффициента турбулентной диффузии – k . Прямой, общепризнанной методики его определения в современной метеорологии не существует. Существуют эвристические методики его определения на основании знания общей метеобстановки [8]. Но чаще его определяют по флуктуационным характеристикам ветра, реже температуры [9]. Несмотря на значительное влияние турбулентности на все параметры принимаемого сигнала, методика прямого, непосредственного определения k с помощью РАЗ пока не создана. В настоящее время не преодолены трудности теоретических этапов, таких как определение связи динамических характеристик турбулентного потока с величиной k и их связи с параметрами принимаемого сигнала. Поэтому при РАЗ целесообразно использовать методики определения k , которые эксперимен-

тально подтверждены в ряде приложений микрометеорологических теорий, в частности, при оценке загрязнений воздуха [9].

С другой стороны, при использовании модели турбулентной диффузии, альтернативой сказанному выше является тот факт, что погрешность восстановления будет наибольшей в бестурбулентной атмосфере и будет уменьшаться при усилении турбулентности (см. рис. 1). При этом погрешность в спокойной атмосфере обусловлена в основном отсутствием информации о начальных условиях решения задачи. Восполнение этой информации метеоданными РАЗ позволяет создать комплексный подход, который в настоящее время является наиболее эффективным.

В качестве примера, подтверждающего данный вывод, может быть представлена известная методика восстановления высотных профилей $N(z)$ в АПС по приземным градиентным метеоизмерениям [10].

4. Процедура определения $N(z,t)$

Процедура и алгоритм восстановления $N(z,t)$, использованные ранее в экспериментах [11], претерпела ряд изменений, связанных с существенным прогрессом в области вычислительной техники. В частности, алгоритм дополнен блоком определения результирующих характеристик приземных радиотрасс. Но наиболее подробного описания требует блок вычисления $N(z,t)$. Он содержит следующие этапы.

Методом РАЗ определяют высотный ход температуры и ветра. Если позволяют метеорологические условия, измеряют влажность во всем высотном диапазоне или на отдельных уровнях. С помощью контактных измерителей определяют приземные и/или градиентные значения температуры, ветра и влажности. Затем вычисляют высотные значения коэффициента турбулентной диффузии и граничные условия для рассчитываемых метеопараметров, после чего для них решается уравнение турбулентной диффузии. Восстановленная метеоинформация в сочетании с информацией, полученной в результате прямых измерений, является исходной для расчета распределения показателя преломления.

Математическая формулировка задачи восстановления следующая. Уравнение турбулентной диффузии в общем случае имеет вид [12]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (\vec{v} \text{ grad } u) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \alpha_u u, \quad (1)$$

где α_u – коэффициент, учитывающий изменение концентрации за счет превращения примеси.

При решении этого уравнения можно провести ряд упрощений. Скорость ветра, как правило, в решении не рассматривается, при необходимости ее влияние можно учесть непосредственно. Вертикальные гради-

енты метеовеличин при любых условиях в атмосфере превосходят горизонтальные. Поэтому в пределах некоторой территории атмосферу можно считать горизонтально однородной и решать уравнение диффузии только для рассеяния по вертикали. Тогда (1) упрощается до:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) . \quad (2)$$

Если на некоторых высотных уровнях значения параметра известны, задача восстановления формулируется следующим образом (рис.2). Имеется полуограниченная прямая $z > 0$, на которой для u справедливо (2). Известно нижнее граничное условие для u , его значение непрерывно контролируется приземными метеодатчиками.

Временная изменчивость метеоусловий по высоте предполагает возникновение и исчезновение зон достоверного измерения u (на рис.2 заштрихованные области). В остальной части значение u находится решением (2) для которого граничными условиями являются значения u на краях заштрихованных зон. В области 1 решение (2), необходимо искать на полуограниченной прямой. В области 2 – на ограниченной прямой, у которой координата верхнего края изменяется во времени. Область 3 – полуограниченная прямая при переменной координате нижней границы. Область 4 – ограниченная с двух сторон и координаты обеих границ изменяются во времени. Граничное условие при $z = \infty$ можно, как и в [10], определить постоянством градиента.

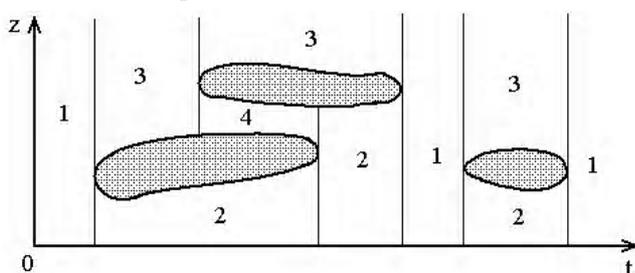


Рис. 2. Схема граничных условий в задаче восстановления

Методика восстановления включает практическое определение всех необходимых для вычисления N метеопараметров [1]: температуры – T , влажности – H и давления – p .

5. Выделение консервативной компоненты

Давление можно вычислить по барометрической формуле для изотропной атмосферы [13]:

$$p(z) = p_{np} e^{-\frac{gZ}{R_c T}} , \quad (3)$$

где p_{np} – приземное давление.

Этой формулой можно пользоваться по всей высоте АПС. Ошибка, обусловленная градиентами метеове-

личин, приведет к результирующей погрешности не более 0,3 N-ед.

В том случае, когда РАЗ позволяет получить данные о T и H с высотных уровней, значения $N(z)$ можно вычислить непосредственно. В иных случаях необходимо дополнить недостающие данные, используя решение уравнения турбулентной диффузии. Однако адиабатический перенос по вертикали приводит к одновременному изменению всех трех параметров – T , H и p . Поэтому их нужно выразить через те параметры, которые сохраняются при турбулентном переносе. Такими параметрами являются потенциальная температура $\theta = T + \gamma_a z + 0,08(1000 - p_0)$, где γ_a – адиабатический градиент температуры, равный 0,01 град/м, p_0 – давление на поверхности и удельная влажность s , которая определяется через парциальное давление водяного пара e как $s = 0,622e p^{-1}$ [13]. Для s и θ справедливы уравнения турбулентной диффузии, причем при строгой постановке задачи коэффициенты k для температуры, влажности и момента движения различны. Но на практике этим обычно пренебрегают [12].

Алгоритм восстановления профилей N адаптивен к объему и качеству получаемой метеоинформации. При увеличении турбулентности быстрее всего возрастает погрешность измерения влажности ΔH (см. рис.1), [4]. Уже при $\Delta H = 10\%$ это приводит к ошибке вычисления N около 4 N-ед. Погрешность измерения температуры в меньшей степени зависит от турбулентности, поэтому температурные данные могут еще длительное время оставаться приемлемыми для определения N . В этом случае методика восстановления должна включать решение уравнения турбулентной диффузии только для s .

При дальнейшем увеличении турбулентности погрешность измерения температуры также возрастает до неприемлемых значений (2...3°C). Тогда задача диффузии может решаться как для s и θ отдельно, так и для потенциального модуля показателя преломления Π , который введен в [10], и включает только те члены, которые содержат диффундирующие параметры:

$$\Pi(z, t) = N(s_0, T_0, p_0) + \frac{\partial N}{\partial s} (s - s_0) + \frac{\partial N}{\partial T} (\theta - \theta_0) . \quad (4)$$

Решение этого уравнения позволяет вычислить N на основании известных добавок:

$$N(z, t) = \Pi(z, t) + \frac{\partial N}{\partial p} (p - p_0) + \frac{\partial N}{\partial T} \gamma_a z . \quad (5)$$

Таким образом, выбирая параметр, для которого производится решение уравнения турбулентной диффузии, можно производить восстановление высотных профилей показателя преломления в широком диапазоне метеоусловий.

6. Определение коэффициента диффузии k

Определение пространственно-временного распределения коэффициента турбулентной диффузии производится следующим образом. В приземном слое до высот менее 20м, где измерения с помощью системы РАЗ провести невозможно, вычисления k производятся по градиентным метеоданным по схеме, основанной на теории подобия Монина-Обухова и изложенной в [14]. На больших высотах можно вычислять k на основании дистанционных измерений флуктуационных характеристик скорости вертикальных потоков, горизонтального ветра или температуры. В первом случае можно ограничиться существенно более простой системой дистанционного акустического зондирования (АЗ). При этом АЗ является эффективным средством контроля общего состояния атмосферы [15].

В настоящее время не существует единого общепризнанного подхода к определению k [5], [12]. Поэтому алгоритм должен включать в себя выбор метода определения k . На высотах 20..30м выбор методики вычислений производится по наилучшему совпадению с приземной частью профиля k . Выше используются другие критерии, а именно: наличие и достоверность получаемой метеоинформации, анализ общей метеобстановки и характерных для района измерений метеоситуаций и их параметров, например, высоты и интенсивности ночных инверсий, уровня поворота ветра при бризовой циркуляции, иных факторов.

Если в наличии есть только система АЗ, то расчет k производится по формулам, используемым в аэрологических исследованиях [8]. Одна из них, полученная Гессельбергом в 1927г.:

$$k = \frac{\bar{\omega}^2 t_{\omega}}{2}, \quad (6)$$

где $\bar{\omega}$ – среднее значение скорости вертикальных потоков; t_{ω} – среднее время существования скорости одного знака.

Другая формула получена Ляпиным в 1948г.:

$$k = \frac{\bar{\omega}'^2 t_{\omega} \bar{v}}{2\bar{v}'}, \quad (7)$$

здесь $\bar{\omega}'$ – среднее значение пульсаций вертикальной скорости; \bar{v} – средняя скорость воздушного потока; \bar{v}' – среднее значение пульсаций скорости.

Значение $\bar{\omega}'$ можно определить по эмпирическим соотношениям среднеквадратических пульсаций вертикальной и горизонтальной скоростей для различных сезонов, которые приведены там же [8].

В экспериментах, проводившихся в ПНИЛ ЗА ХНУРЭ в ряде случаев расчет k производился с использованием соотношения полученного Сэттоном в рамках статистической теории турбулентности [16]:

$$k = \sqrt{-\frac{g}{T} \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial z} + \gamma_a \right)}. \quad (8)$$

В сеансах, проводившихся в 1990г. и позже, расчет k был сделан по Бызовой [9]:

$$k = \frac{\langle v_{\max} \rangle}{\bar{v}}. \quad (9)$$

В этой формуле величина v_{\max} определялась на основании измеренного значения дисперсии v с коэффициентом, лежащим в пределах 2...2,5, что, согласно [9], соответствует 2-х и 10-минутному интервалу осреднения при нормальном законе распределения флуктуаций скорости ветра.

Анализ результатов проведенных в ПНИЛ ЗА ХНУРЭ экспериментов конца 80-х начала 90-х годов показал, что последняя из представленных формул наилучшим образом соответствует метеорологической информации, полученной с помощью РАЗ, так как при использовании метода измерений скорости ветра [3] возможно оперативное в течение 1...2 мин получение информации о скорости ветра, его дисперсии σ_v и о законе распределения его флуктуаций.

7. Интегрирование в реальном времени

Численное интегрирование уравнения турбулентной диффузии (2) можно провести с использованием асимметричной схемы [17]. Для интегрирования уравнений диффузии (при $k \neq \text{const}$) необходимо использовать разностные уравнения [18], которые также позволяют построить асимметричные схемы, схемы с опережением и проч. Вывод уравнений численного интегрирования основан на известном методе баланса.

Достоинство асимметричной схемы состоит в том, что, являясь схемой с опережением, она обладает безусловной устойчивостью, в то же время в ней отсутствует решение системы алгебраических уравнений, что в 1,5...2 раза сокращает количество вычислительных операций. Оценка точности асимметричных схем для параболических уравнений при использовании двух симметричных видов шагов и малых значениях параметра $\sigma = k\Delta t \Delta z^2$, где Δt и Δz – размеры сетки соответственно по времени и высоте, дана в [17] и составляет $o(\Delta z^2) + o(\Delta t^2)$. Оценка точности для случая интегрирования уравнения диффузии сделана в [19].

Выводы

Непрерывная работа измерительного комплекса и расчет в режиме реального времени позволит строить пространственно-временные поля $N(z,t)$, которые позволят давать краткосрочный, от нескольких минут до нескольких часов, прогноз условий РРВ, что достаточно для большинства практических применений.

Наиболее перспективным в ближайшее время будет комплексный подход, сочетающий применение новейших средств метеоизмерений и математических

моделей динамики атмосферы, которые также требуют дальнейшего развития.

Представленная методика и реализующий ее алгоритм восстановления высотных профилей показателя преломления адаптированы к особенностям высотных метеоданных, полученных с помощью РАЗ.

Литература: 1. *Бин Б.П., Даттон Е.Дж.* Радиометеорология: Пер. с англ. / Под ред. А.А.Семенова. Л.: Гидрометеоиздат, 1971. 362 с. 2. *Каллистратова М.А., Кон А.И.* Радиоакустическое зондирование атмосферы. М.: Наука, 1985. 198с. 3. *Панченко А.Ю.* Радиоакустический способ определения модуля скорости ветра / А.с. № 1545781 22.10.89. 4. *Ульянов Ю.Н.* Точность определения влажности воздуха двухчастотным радиоакустическим зондированием // Труды X Всесоюзн. симп. по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Томск, 1988. Ч.2. С.107-112. 5. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей / Под ред. Ф.Т.М. Ньистадта и Х. Ван Допа. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 325 с. 6. *Сеидов Д.Г.* Синергетика океанических процессов. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 288 с. 7. *Берлянд М.Е.* Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 448 с. 8. *Воронцов П.А.* Турбулентность и вертикальные токи в пограничном слое атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1966. 296 с. 9. *Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Гаргер Е.К.* Турбулентность в пограничном слое атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 262 с. 10. *Андреанов В.А., Ракитин Б.В.* Восстановление высотных профилей показателя преломления радиоволн в пограничном слое атмосферы / Радиотехника и электроника (М). 1978. Т.23, №10. С. 2031-2038.

11. *Андреанов В.А., Панченко А.Ю.* Восстановление высотных профилей метеопараметров по результатам акустического и радиоакустического зондирования / Радиотехника и электроника (М). 1990. Т.35. №12. С. 2518-2526. 12. *Лайхтман Д.Л.* Физика пограничного слоя атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 342 с. 13. *Матвеев Л.Т.* Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 640 с. 14. *Монин А.С., Яглом А.М.* Статистическая гидромеханика. Ч.1. М.: Наука, 1965. 640 с. 15. *Красненко Н.П.* Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя. Томск: Изд.СО РАН, 2001. 278с. 16. *Сэттон О.Г.* Микрометеорология. Л.: Гидрометеоиздат, 1958. 356 с. 17. *Саульев В.К.* Интегрирование уравнений параболического типа методом сеток. М.: Физматгиз, 1960. 324 с. 18. *Тихонов А.Н., Самарский А.А.* Уравнения математической физики. М.: Наука, 1972. 736 с. 19. *Рихтмайер Р., Мортон К.* Разностные методы решения краевых задач. М.: Мир, 1972. 418 с.

Поступила в редколлегию 12.06.2010

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. Дорошенко В.А.

Панченко Александр Юрьевич, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры радиоэлектронных устройств ХНУРЭ. Научные интересы: радиофизика, дистанционные методы измерений, акустика, неразрушающий контроль. Адрес: Украина, 61736, Харьков, пр. Ленина, 14, тел.: (057) 7021-444.

Марюх Виталий Александрович, кафедра радиоэлектронных устройств ХНУРЭ. Научные интересы: дистанционные методы измерений, неразрушающий контроль. Адрес: Украина, 61736, Харьков, пр. Ленина, 14, тел.: (057) 7021-444.