

УДК 551.501.8

ВЕТРОВОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ МЕТОДАМИ ДОПЛЕРОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ

А.Г. ГОРЕЛИК, В.В. СТЕРЛЯДКИН, А.В. ЖЕЛТОВ

В работе рассмотрены возможности ветрового зондирования нижнего слоя атмосферы с помощью непрерывных доплеровских систем без модуляции. Представлены результаты компьютерного моделирования томографической задачи при зондировании атмосферы излучением, которое испытывает известное ослабление газами атмосферы.

Ключевые слова: измерения ветра, пограничный слой атмосферы, радиометеорология, доплеровская томография.

Задача доплеровской томографии заключается в восстановлении поля скоростей в пространстве на основе многообразия доплеровских спектров, полученных при отражении непрерывного немодулированного излучения в различных направлениях зондирования.

По нашим данным, впервые задача доплеровской томографии была сформулирована в наших работах в 1982 году в приложении к задаче восстановления профиля ветра по доплеровским спектрам, полученным при зондировании атмосферы непрерывными доплеровскими системами (НДС) [1-3]. В этих работах была отмечена сильная зависимость формы доплеровских спектров от направления зондирования. Исследованы закономерности изменения формы спектров от вида ветрового профиля. Использование этих закономерностей позволило перейти к решению обратной задачи – реконструкции профиля ветра по многообразию доплеровских спектров.

В работе [4] была представлена строгая математическая постановка задачи доплеровской томографии и предложено ее решение для конкретных моделей ветрового поля. Недостатком предложенного метода решения являются трудности восстановления профиля ветра на немонокотных участках, там, где одна и та же проекция скорости регистрируется на нескольких различных высотах.

В данной статье рассмотрены пути повышения надежности и точности решения обратной задачи, основанные на использовании излучения, которое испытывает известное ослабление газами атмосферы. Например, зондирование в полосе поглощения атмосферного кислорода в окрестности 5 мм диапазона длин волн, где коэффициент ослабления может достигать 14 Дб/км.

При большом значении коэффициента ослабления вклад верхних слоев атмосферы в регистрируемый сигнал пренебрежимо мал, и можно провести томографическое определение ветра в нижнем слое. Затем, используя сигналы при меньшем коэффициенте ослабления, в спектр добавляются все более высокие слои атмосферы, и можно восстановить следующие участки высотного профиля $V(H)$ с учетом информации о профиле ветра в нижнем слое.

С помощью моделирования мы покажем, как ослабление газами атмосферы изменяет вклад различных слоев в доплеровский спектр, опишем процедуру решения прямой задачи – получение доплеровских спектров по заданному профилю ветра $V(H)$ и ослаблению $\gamma(H)$, а также рассмотрим процедуру решения обратной задачи – восстановление исходного профиля на основе доплеровских спектров, полученных при различных коэффициентах ослабления.

Прямая задача. При решении прямой задачи требуется по известному профилю ветра, заданным моделям формирования метеорологического сигнала, с учетом параметров турбулентности, коэффициента линейного ослабления в атмосфере γ и параметров метеорадиолокатора проводить расчет доплеровских спектров, получаемых при использовании доплеровской РЛС с непрерывным немодулированным излучением.

В задаче ветрового зондирования с большой степенью достоверности можно использовать модель горизонтально однородного профиля ветра, который мы будем задавать двумя скаляр-

ными функциями: зависимостью модуля скорости ветра от высоты H и зависимостью азимута ветра от высоты. Если направление зондирования радиолокатора задано азимутальным углом α и углом места β , то однозначно определяется зависимость проекции скорости ветра на направление зондирования $V(H)$. В данной работе основное внимание уделяется восстановлению именно проекции $V(H)$, поскольку по двум проекциям, полученным в различных направлениях зондирования, можно однозначно восстановить поле ветра.

В предположении узкой диаграммы направленности антенны спектральную плотность доплеровского спектра можно представить следующим интегральным уравнением

$$S_{\lambda}(v) = c \int_L \sigma_{\lambda}(R) P_{\lambda}(R) f[v, V(R), \sigma_{\tau 0}] dR, \quad (1)$$

где интегрирование проводится вдоль траектории распространения излучения L ; c – определяется параметрами РЛС и системы обработки; $v = f_d \lambda / 2$ – проекция скорости частиц на направление зондирования; f_d – доплеровская частота; $\sigma_{\lambda}(R)$ – скалярное поле удельной отражаемости на дальности R ; $f[v, V(R), \sigma_{\tau 0}]$ – функция распределения рассеивателей по проекциям скоростей v с дисперсией $\sigma_{\tau 0}^2$, центрированная вокруг среднего значения проекции скорости ветра в заданной точке зондирования $V(R)$. Будем полагать, что влияние турбулентности можно описать нормальной функцией

$$f(v, V(H), \sigma_{\tau 0}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\tau 0}^2}} \exp\left(-\frac{(V(H) - v)^2}{2\sigma_{\tau 0}^2}\right) \quad (2)$$

$P_{\lambda}(R)$ – зависимость регистрируемой радиолокатором мощности от дальности R до рассеивающего объема при единичном значении удельной отражаемости единицы объема. В волновой зоне для множественных отражателей величина $P_{\lambda}(R)$ может быть представлена в виде

$$P_{\lambda}(R) = \frac{1}{R^2} \exp\left[-2 \int_0^R \gamma_{\lambda}(r) dr\right], \quad (3)$$

где $\gamma_{\lambda}(R)$ – линейный коэффициент ослабления, а экспонента описывает ослабления сигнала при двукратном прохождении трассы до дальности R . В ближней зоне РЛС эта зависимость иная, однако для конкретного радиолокатора она может быть измерена и определяется параметрами радиолокатора антенной системы.

Используя наклонное зондирование с переменным углом места β , можно удалять или сокращать расстояние $R = H/\sin\beta$ до заданного ветрового слоя в интервале высот $(H, H+dH)$. В этом случае вклад слоя можно выразить соотношением

$$dS(v, \beta) = \frac{c \sin\beta \sigma_{\lambda}(H/\sin\beta)}{H^2} \exp\left(\frac{-2\gamma_{\lambda}H}{\sin\beta}\right) * \left|\left(\frac{dV(H)}{dH}\right)^{-1}\right|, \quad (4)$$

где $V(H)$ – проекция искомого профиля ветра на направление зондирования.

Из данного соотношения видно, что уменьшение угла зондирования эквивалентно работе радиолокатора с излучением, которое испытывает большее ослабление газами атмосферы.

С учетом угломестной зависимости доплеровские спектры выражаются следующим образом

$$S_{\lambda}(v, \beta) = c \sin\beta \int_0^{\infty} \frac{\sigma(H/\sin\beta) \exp(-2\gamma_{\lambda}H/\sin\beta)}{H^2} f(v, V(H), \sigma_{\tau 0}) dH. \quad (5)$$

По смыслу $S_{\lambda}(v, \beta)$ является интегральной доплеровской проекцией векторного поля скоростей $\mathbf{V}(\mathbf{R})$ на траекторию луча L , в которой учитывается распределение отражателей в пространстве и зависимость мощности от дальности R . В прямой задаче по заданным подынтегральным функциям мы находим спектры. В обратной задаче требуется найти поле $\mathbf{V}(\mathbf{R})$ по набору доплеровских спектров.

На рис. 1 представлен пример немонотонной зависимости проекции скорости ветра на направление зондирования от высоты $V(H)$. Сплошной линией показан исходный профиль, используемый в прямой задаче.

На рис. 2 представлены результаты расчета доплеровских спектров на основе уравнения (5) для представленного профиля при условии $\gamma_1 = 0$, $\gamma_2 = 0.003 \text{ м}^{-1}$, $\gamma_3 = 0.006 \text{ м}^{-1}$, уровне турбулентности $\sigma_{тб} = 0.3 \text{ м/с}$ и угле места $\beta = 30^\circ$.

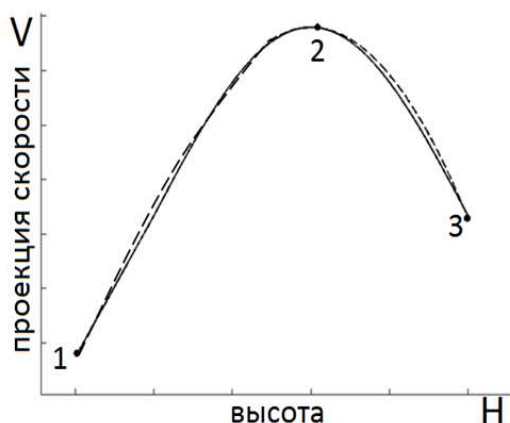


Рис. 1. Профиль ветра
(исходный и восстановленный)

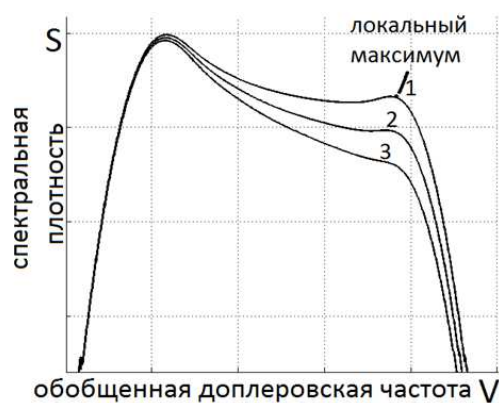


Рис. 2. Формы спектров профиля ветра

Локальный экстремум на спектре 1 на рис. 2 обусловлен особой точкой спектра, в которой производная $dV(H)/dH = 0$. В этом случае относительно широкий слой рассеивателей дает вклад в спектр практически на одной и той же доплеровской частоте.

Моделирование решения обратной задачи. В работе [4] было показано, что наиболее информативным при решении обратной задачи является проведение доплеровских измерений при фиксированном угле места и различных азимутах зондирования α_s (азимутальный разрез). Показано, что использование особых точек спектров, в которых регистрируются локальные экстремумы в доплеровских спектрах и зависимостей положения границ доплеровских спектров $V_{\min}(\alpha_s)$ и $V_{\max}(\alpha_s)$ от азимута зондирования позволяет в полярных координатах V, α определить годограф ветрового поля в виде $V(\alpha)$. Дальнейшая привязка годографа по высоте H в работе [4] основывается на использовании формы огибающей спектра и сравнении энергии, приходящей от заданного слоя атмосферы $(0, H)$.

С одной стороны, мощность, приходящую от слоя $(0, H)$, можно оценить интегралом

$$c \int_0^{R/\sin(\beta)} P(R) \sigma(R) \exp(-2\gamma R) dR, \quad (6)$$

где коэффициент c обусловлен параметрами радиолокатора и режимом зондирования.

С другой стороны, при монотонной зависимости $V(H)$ эта же мощность соответствует интегралу от доплеровского спектра в диапазоне от $V_{\min}(H_{\min})$ до $V(H)$

$$c \int_0^{R/\sin(\beta)} \sigma(R) P(R) \exp(-2\gamma R) dR = \int_{V_{\min}}^V S(v) dv, \quad (7)$$

где текущее значение проекции ветра V соответствует текущему значению высоты слоя $H = R/\sin\beta$. Нормировка данного уравнения и определение коэффициента c осуществляется по интегралу от всего спектра, который равен мощности принимаемого сигнала.

Данный метод неплохо проявил себя в большинстве практических применений, в том числе при проведении натурных измерений ветра в пограничном слое атмосферы [4, 5].

Однако в случае немонотонного профиля данная методика может приводить к дополнительным ошибкам, т. к. немонотонная часть профиля в данном методе заменяется монотонным участком.

В настоящей работе мы предлагаем метод повышения точности томографического восстановления ветрового профиля за счет выявления немонотонных участков и уточнения профилей именно в этих проблемных зонах за счет использования дополнительных возможностей ослабления.

При моделировании решения обратной задачи будем исходить из предположения горизонтально однородного поля ветра и будем считать искомой функцию $V(H)$ – проекцию искомого профиля ветра на направление зондирования. В нашей задаче нас интересует возможность восстановления немонотонных участков профиля. Известными (измеренными) являются доплеровские спектры, полученные при заданных значениях ослабления излучения газами атмосферы или при различных углах места, что, в принципе, является эквивалентным.

Важным элементом решения обратной задачи является поиск признаков, указывающих на немонотонность профиля, отыскание границ немонотонных участков, параметризация профиля на немонотонных участках и оптимизация решения обратной задачи.

Зондирование при малых углах места позволяет убрать вклад верхних слоев и томографически восстановить нижнюю часть профиля. С ростом угла места β добавляется вклад все более высоких слоев, которые восстанавливаются с учетом известных профилей для низлежащих слоев.

Данная процедура была проверена методами математического моделирования и показала сходимость даже при высоком уровне погрешностей измерения первичных данных.

Анализ показал, что если исходный профиль монотонный, то восстановленные по формуле (7) профили даже при различных γ не дают различия в функции $V(H)$, т. е. различие профилей $\Delta V = V(H, \gamma_1) - V(H, \gamma_2)$ определяется только шумами аппаратуры. Однако другая ситуация возникает при появлении немонотонности. При различных значениях γ вклад верхних слоев с нисходящей ветвью в спектр различается, что приводит к различию в восстанавливаемых профилях и может служить индикатором наличия неоднозначности в профиле $V(H)$.

На рис. 3 представлены профили $V(H, \gamma_1)$, $V(H, \gamma_2)$, $V(H, \gamma_3)$, восстановленные по спектрам, полученным при различных значениях ослабления γ , в предположении, что профиль монотонный. Из рисунка видно, что различие в профилях возникает, начиная с тех высот, на которых возникает неоднозначность, где одну и ту же проекцию скорости имеют два или более участка высот. При этом наиболее точное восстановление профиля происходит на нижней ветви зависимости $V(H, \gamma_3)$, которая соответствует спектру с самым большим ослаблением.

На рис. 4 показана разность $\Delta V(H) = V(H, \gamma_1) - V(H, \gamma_3)$ между профилями, восстановленными при значениях ослабления $\gamma_1 = 0$ и $\gamma_3 = 0.006$. Пунктир соответствует величине ΔV в случае восстановления монотонных профилей различного вида. Сплошная линия соответствует немонотонному профилю, заданному в рассматриваемой прямой задаче. Видно, что на монотонном участке профиля разность ΔV также невелика, однако на диапазоне высот с немонотонностью данная разность $\Delta V(H)$ существенно возрастает. С помощью полученного графика можно оценить диапазон высот с немонотонностью.

Из проведенного анализа следует, что, используя спектр с наибольшим регистрируемым ослаблением, мы можем восстановить нижнюю часть профиля, которая представлена на рис. 1 пунктирным участком 1-2. Кроме того, по характеру области неоднозначности на рис. 4 можно указать область скоростей, которую занимает обратная ветвь профиля – участок между точками 2 и 3.

Исходя из того, что известна область немонотонности профиля, можно оценить значение $V(H)$, с которого начинается немонотонность, следовательно, найти значение V в точке 3 (рис. 1).

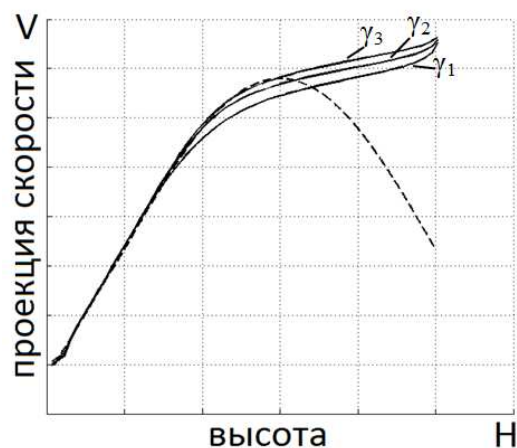


Рис. 3. Восстановленные профили ветра при соответствующих значениях γ

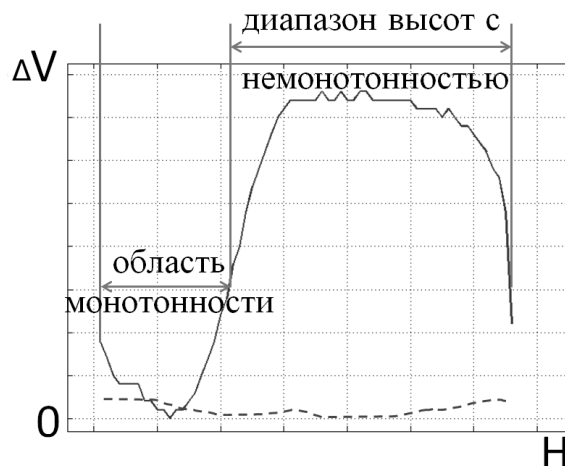


Рис. 4. Разность между профилями $\Delta V(H)$, восстановленными при γ_1 и γ_3 .

Последним шагом решения обратной задачи является восстановление оставшейся части искомого профиля (участка 2-3) на основе полученной информации. Часть профиля 1-2 считается восстановленной по методике, описанной ранее. Часть 2-3 аппроксимируется некоторой параметрически задаваемой кривой $V_{23}(H, \mathbf{t})$ с вектором параметров $\mathbf{t} = [t_1, t_2, \dots, t_n]$. Такой кривой может быть любая параметрическая функция, имеющая начальное значение в точке 2 и конечное значение в точке 3. На основе выбранной аппроксимирующей функции $V_{23}(H, \mathbf{t})$ рассчитываются доплеровские спектры $S_i^{\text{расч}}(v)$ и формируется невязка между экспериментальными и расчетными спектрами. Решение по выбору модели основывается на минимизации невязки N по вектору параметров \mathbf{t}

$$N(t_1, t_2, \dots, t_n) = \sum_i \int [S_i(v) - S_i^{\text{расч}}(v)]^2 dv, \quad (8)$$

В нашей модели минимизация невязки проводилась по высоте H_2 , соответствующей точке 2, и по положению точки 3. Отметим, что при использовании невязки мы привлекаем весь объем информации, полученный в результате доплеровских измерений. Особенно информативными и соответственно полезными при минимизации являются спектры, полученные при различных коэффициентах ослабления или различных углах места. Результат восстановления всего профиля представлен на рис. 1 пунктирной линией.

В этой работе возможности задачи минимизации невязки были исследованы не полностью. В частности, не были смоделированы варианты профилей с тремя и большим количеством ветвей у функции $V(H)$. Это будет являться темой следующих исследований.

В целом, проведенное компьютерное моделирование подтвердило возможности томографического восстановления немонотонных профилей ветра на базе использования длин волн с поглощением атмосферными газами.

Таким образом, использование методов доплеровской томографии с изменяемым ядром за счет ослабления газами атмосферы позволяет повысить надежность и точность решения обратной задачи, позволяет регистрировать скорость ветра, начиная с самых нижних слоев. Томографический метод, в отличие от импульсно-когерентного, не имеет ограничений по длинам волн, он может использоваться в миллиметровом и в оптическом диапазонах. Это открывает широкие перспективы для создания технически простых, малогабаритных систем для измерения ветра в тропосфере.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и педагогические кадры России».

ЛИТЕРАТУРА

1. Горелик А.Г., Стерлядкин В.В. Определение ветра в пограничном слое атмосферы с помощью непрерывных доплеровских систем // Метрология и гидрология. – 1984. – № 4. – С. 46-52.
2. Горелик А.Г., Стерлядкин В.В. Ветровое зондирование атмосферы с помощью непрерывных доплеровских систем // Известия, Физика атмосферы и океана. – 1986. – Т. 22. – № 7. – С. 556-561.
3. Стерлядкин В.В. Определение ветра в осадках при помощи доплеровских систем с непрерывным излучением: дисс. ... на соискание учёной степени канд. физ.-мат.наук. –Нижний Новгород. – 1982. – С. 160-195.
4. Горелик А.Г., Стерлядкин В.В. Доплеровская томография в радиометеорологии // Известия, Физика атмосферы и океана. – 1990. – Т. 26. – № 1. – С. 28-33.
5. Стерлядкин В.В. Микроволновые и оптические измерения параметров ветра и исследование микроструктуры дождя: дисс. ... на соискание ученой степени д-ра физ.-мат.наук. – Нижний Новгород, НИРФИ, 1992.

WIND SOUNDING OF THE BOUNDARY LAYER OF ATMOSPHERE
BY DOPPLER TOMOGRAPHY METHODS

Gorelik A.G., Sterlyadkin V.V., Zheltov A.V.

The possibilities of wind measurements of the atmosphere boundary layer by means of non-modulated continuous wave Doppler system are considered. The results of computer modeling of a tomography problem of atmosphere sounding by radiation attenuated by atmosphere gases are presented.

Key words: wind measurements, atmosphere boundary layer, meteorological radar, Doppler tomography.

Сведения об авторах

Горелик Андрей Габриэлович, 1931 г.р., окончил ГГУ (1954), доктор физико-математических наук, профессор МФТИ, заведующий лабораторией ФГУП “Зонд-поставка”, автор более 150 научных работ, область научных интересов - дистанционное зондирование атмосферы методами пассивной и активной радиолокации, оптическое приборостроение и обработка сложных сигналов.

Стерлядкин Виктор Вячеславович, 1953 г.р., окончил МФТИ (1976), доктор физико-математических наук, профессор кафедры ИТ-3 “Физика” МГУПИ, автор более 100 научных работ, область научных интересов - радиолокация, радиофизика, метеорология, дистанционное исследование окружающей среды.

Желтов Андрей Владимирович, 1988 г.р., окончил МГУПИ (2005), аспирант кафедры ИТ-3 “Физика” МГУПИ, область научных интересов - метеорологическая радиолокация, радиофизика, цифровая обработка сигналов, доплеровская томография, методы математического моделирования в задачах радиофизики.