

УДК551.501.8

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ДОПЛЕРОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ ПРИ ВЕТРОВОМ ЗОНДИРОВАНИИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ <sup>1</sup>**

**В. В. Стерлядкин, А. В. Желтов**

**Московский Государственный Университет Приборостроения и Информатики**

Получена 29 ноября 2012 г.

**Аннотация.** В работе рассмотрены возможности восстановления профиля ветра в атмосфере на базе доплеровских систем с непрерывным немодулированным излучением, в которых используются новые методы доплеровской томографии. Обсуждаются достоинства и недостатки таких систем в сравнении с традиционными методами ветрового зондирования. Исследованы методы повышения точности решения обратной томографической задачи при использовании излучения, имеющего известное поглощение газами атмосферы. Представлены результаты численного моделирования прямой и обратной задач, исследована зависимость качества решения от сложности профиля ветра и неоднородности поля отражаемости. Обсуждаются требования к параметрам радиолокатора, обеспечивающего решение томографической задачи в различных метеоусловиях.

**Ключевые слова:** радарная метеорология, профиль ветра, доплеровская томография, обратные задачи.

**Abstract.** The paper discusses the possibility of recovery of the wind profile in the atmosphere based on Doppler systems with continuous unmodulated radiation, which uses new methods of Doppler tomography. The advantages and disadvantages of such systems in comparison with traditional methods of wind sounding are discussed.

---

<sup>1</sup> Материал статьи докладывался на 6-й Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь»

Methods for increasing the accuracy of solving the inverse tomography problem using the radiation with a known absorption in the atmosphere gas are considered. The results of numerical modeling of direct and inverse problems, the dependence of the quality of solutions on the complexity of the wind profile and the inhomogeneity of reflectivity are presented. The requirements for the parameters of radar, which provides a solution tomography problem in different weather conditions, are discussed.

**Key words:** radar meteorology, wind profile, Doppler tomography, inverse problems.

## **Введение**

Задача дистанционного определения профиля ветра в пограничном слое атмосферы в настоящее время может быть решена различными средствами. К ним относятся акустические [1,2], радиоакустические [2-4], лидарные [5-7] системы, радиолокационные когерентно-импульсные радары [8-13]. Ни одно из перечисленных средств зондирования не является универсальным. Каждое имеет свой оптимальный диапазон применения, свои достоинства и недостатки. В частности, широко распространенные содары трудно использовать в городской застройке, как по причине излучения звуковых импульсов, так и из-за высокого шумового фона в городе. Недостатками содаров и радиоакустических систем являются также сложности или невозможность работы в экстремальных погодных условиях – при сильном ветре и осадках. Оптические системы зондирования, лидары, не могут использоваться в туманах и сильных осадках, сильный ветер и турбулентность также ухудшают возможности когерентных оптических лидаров по причине искажения волнового фронта при двукратном прохождении через атмосферу и резкого уменьшения радиуса когерентности принимаемого сигнала.

В настоящее время ветровые измерения в тропосфере в основном проводятся на базе использования импульсно-когерентных радаров. Первые работы начались в 60 годах прошлого столетия одновременно как в нашей стране [11, 12], так и в

США [13]. Первоначально измерения ветра проводились в основном при выпадении осадков. В те же годы на основе 3-х см. ИКР с высоким энергетическим потенциалом ветровые измерения были выполнены и в условиях «ясного неба» [12]. Измерение ветра осуществлялось методом VAD [13], который в отечественной литературе получил название метод «круговых диаграмм».

Развитие импульсно-когерентных ветровых радаров (профайлеров) в последнее время развивалось по пути увеличения высоты зондирования за счет использования более длинных волн. Эта тенденция действительно приводит к получению профиля ветра до высот **10-15** км, однако при этом антенные системы становятся громоздкими (до **5000** кв. м. при  $f = 50$  МГц) и полностью теряются данные о нижнем слое атмосферы [15]. Наиболее коротковолновые ветровые профайлеры используют частоты **950-1300** МГц, но и они теряют нижний слой **150-300** м, и не могут являться всепогодными, т.к. при устойчивой и слабо турбулентной атмосфере возникают проблемы с регистрацией очень слабых сигналов [9].

Следует отметить общую особенность существующих ветровых профайлеров, заключающуюся в том, что селекция по дальности осуществляется за счет импульсного или частотно модулированного сигнала. Это свойство исключает или резко ограничивает возможность перехода к коротким или оптическим длинам волн, для которых взаимодействие излучения с аэрозольными рассеивателями наиболее эффективно.

Учитывая недостатки существующих средств ветрового зондирования, авторы исследовали возможности непрерывных доплеровских систем с немодулированным сигналом, которые снимают ограничение на длину волны и более эффективно используют энергию излучения. В практическом приложении использование НДС для определения ветрового профиля имеет ряд неоспоримых

достоинств. Это возможность измерений от самых нижних слоев, без «мертвой зоны», отсутствие ограничений на величину измеряемых скоростей и дальности, возможности регистрации торнадо, отсутствие любых принципиальных ограничений на длину волны зондирующего излучения. Это позволяет работать в миллиметровом (субмиллиметровом) диапазоне длин волн, снизить размер антенной системы. Возможен и переход в оптический диапазон. Однако ко всем этим достоинствам добавляется один существенный недостаток – отсутствие прямой селекции по дальности. Решение этой проблемы, на наш взгляд, лежит в томографическом подходе и использовании двух или многоволновой доплеровской томографии.

На 13 конференции по распространению радиоволн, которая проходила в Горьком в 1981 г. был описан метод, позволяющий применить сантиметровый доплеровский радиолокатор с непрерывным монохроматическим излучением для оценки ветрового режима в нижних слоях атмосферы при выпадении осадков. В основу метода положена зависимость формы доплеровских спектров от направления зондирования [14].

В дальнейшем В.В. Стерлядкиным был проведен большой объем работ, показывающий, как изменяется форма доплеровских спектров при различных профилях ветра и при изменении направления зондирования. Анализ результатов численных экспериментов, полученных для различных профилей ветра, указал на возможность решения и обратной задачи, т.е. восстановление вертикальных профилей ветра, на основе информации об изменении параметров спектров радиоэха, полученных при различных направлениях зондирования [16, 17].

Решение прямых задач для непрерывных немодулированных доплеровских систем (НДС) показало сильную зависимость формы доплеровских спектров от ветрового профиля и направления зондирования. Это свойство позволило рассмотреть возможность решения обратной задачи – восстановления высотного профиля

ветра по набору доплеровских спектров, полученных при различных направлениях зондирования [16-18]. Возникающая при этом математическая задача по своей сути была аналогична известным задачам реконструктивной томографии, в которых требовалось восстановить скалярное поле по набору скалярных интегральных проекций этого поля на некоторое многообразие прямых [19]. Отличие заключалось в том, что требовалось восстановить не скалярное, а векторное поле  $V(\mathbf{R})$ , а интегральные проекции представляли собой не одно скалярное число, а функционал – доплеровский спектр, полученный вдоль каждого направления измерений. На момент анализа возникшей задачи в 1986 - 1990 годах мы не нашли публикаций, описывающих математическую или физическую постановку аналогичной задачи, поэтому мы назвали данный класс обратных задач доплеровской томографией [20, 21].

В настоящей работе суммируется опыт решения задач доплеровской томографии при восстановлении ветрового поля на базе непрерывных немодулированных доплеровских систем. Показана возможность повышения точности решения задачи для сложных профилей за счет использования двух или нескольких длин волн, испытывающих ослабление газами атмосферы. Представлены как результаты сравнительных натурных измерений, так и модельные расчеты задачи для различных профилей ветра.

### **Постановка задачи доплеровской томографии при зондировании атмосферы**

Первоначальная постановка задачи проводилась в [16-18], однако здесь мы рассмотрим формулировку, адаптированную к зондированию из одной точки. Пусть  $V(\mathbf{R})$  векторное поле скоростей рассеивателей в зондируемом трехмерном пространстве  $\mathbf{R} = (x, y, z)$ , усредненное по объему, определяемому поперечными размерами зондирующего луча. Если рассеиватели полностью увлекаются

воздушными потоками (например, мелкие аэрозольные частицы), то  $V(\mathbf{R})$  представляет собой искомое векторное поле ветра, которое не учитывает турбулентные пульсации и является усредненным. Если же рассеивателями являются капли, то к ветровому переносу добавляется гравитационное падение капель.

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

$$S_A(v) = c \int_L \sigma_A(\mathbf{R}) P_A(\mathbf{R}) f[v, V(\mathbf{R}), \sigma_{\tau\delta}] d\mathbf{R}, \quad (1)$$

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;

$\sigma_A(\mathbf{R})$  – скалярное поле удельной отражаемости на дальности  $\mathbf{R}$ ;

$f[v, V(\mathbf{R}), \sigma_{\tau\delta}]$  – функция распределения рассеивателей по проекциям скоростей  $v$  с дисперсией  $\sigma_{\tau\delta}^2$ , центрированная вокруг среднего значения проекции скорости ветра в заданной точке зондирования  $V(\mathbf{R})$ . Будем полагать, что влияние турбулентности можно описать нормальной функцией:

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

$P_A(\mathbf{R})$  – зависимость регистрируемой радиолокатором мощности от дальности  $\mathbf{R}$  до рассеивающего объема при единичном значении удельной отражаемости единицы объема. В волновой зоне для множественных отражателей величина  $P_A(\mathbf{R})$  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 ослабление 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  $\beta$  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:

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

где  $V(H)$  – проекция искомого профиля ветра на направления 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:

$$S_{\lambda}(v, \beta) = c \sin \beta \int_0^{\infty} \frac{\sigma \left( \frac{H}{\sin \beta} \right) \exp \left( -\frac{2\gamma H}{\sin \beta} \right)}{H^2} f(v, V(H), \sigma_{\tau\delta}) dH \quad (5)$$

По смыслу  $S_{\lambda}(v, \beta)$  является интегральной доплеровской проекцией векторного поля скоростей  $V(R)$  на траекторию луча  $L$ , в которой учитывается распределение отражателей в пространстве и зависимость мощности от дальности  $R$ . Это уравнение является основным уравнением доплеровской томографии. В общем случае такая задача является нелинейной обратной задачей, корректное по

Тихонову решение которой может быть найдено далеко не во всех случаях [19, 22].

### **Анализ прямой задачи**

В прямой задаче по заданным подынтегральным функциям: профилю ветра и функции распределения рассеивателей по проекциям скоростей, мы рассчитываем доплеровские спектры. Решение прямых задач необходимо для понимания физики формирования доплеровских спектров, для анализа влияния профиля ветра на форму спектров, на закономерности изменения формы при изменении направления зондирования. В работах [20, 23] проводился анализ прямой задачи, при которой рассчитывались доплеровские спектры при различных заданных профилях ветра. Методика доплеровских измерений предполагала проведение конического азимутального разреза и получения спектров для набора различных азимутов зондирования  $\alpha_i$  при постоянном угле места  $\beta$ . Проведенный анализ прямых задач показал, что использование минимальной  $V_{min}(\alpha_i)$  и максимальной  $V_{max}(\alpha_i)$  частот доплеровских спектров позволяет в полярных координатах  $V, \alpha$  локализовать область возможных скоростей и направлений ветра, которые формируют такие спектры. Кроме того, выпуклые границы данной области с необходимостью принадлежат годографу ветрового профиля  $V(\alpha)$ .

В настоящей работе мы дополнительно рассчитывали вклад ослабления излучения газами атмосферы и анализировали возможности использования этого фактора для восстановления сложных немонотонных профилей ветра.

### **Решение обратной задачи**

При решении обратной задачи требуется найти поле скоростей  $V(R)$ , по набору известных доплеровских спектров, полученных при различных направлениях



зондирования. Проведенный анализ прямой задачи, выполненный в работе [20, 21], показал, что использование зависимостей положения границ доплеровских спектров  $V_{min}(\alpha_z)$  и  $V_{max}(\alpha_z)$  от азимута зондирования  $\alpha_z$  и особых точек спектров, в которых регистрируются локальные экстремумы в доплеровских спектрах, позволяют в полярных координатах  $V, \alpha$  определить годограф ветрового поля в виде  $V(\alpha)$ . Дальнейшая привязка годографа по высоте  $H$  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 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 полной мощности принимаемого сигнала.

Данный метод неплохо проявил себя в большинстве практических применений, в том числе при проведении натуральных измерений ветра в пограничном слое атмосферы [18, 21].

В 1981 – 1982 гг. проводилось сравнение профилей, восстановленных описанным радиолокационным методом с данными измерений на метеовышке в Останкино, а также с одновременными шаропилотными измерениями в пункте зондирования [16]. Оказалось, что среднеквадратичное различие по скорости при сравнении с данными Останкино составляет около 1.2 м/с, а по направлению – около  $17^\circ$ ; те же величины при сопоставлении с шарпилотными измерениями составляют 0.7 м/с и  $15^\circ$ , соответственно.

На рис. 1а представлены ветровые данные, полученные с помощью НДС при прохождении фронта, а на рис. 1б – показаны ветровые профили, полученные по данным метеовышки в Останкино. Даже в условиях быстрого изменения ветра данные по скорости не отличались более чем на 30%, а по направлению находились в пределах  $25^\circ$ . При более стабильной ситуации (рис. 2) профили, полученные с помощью непрерывной РЛС и по данным метеовышки, отличаются менее, чем на 1,5 м/с по скорости ветра, и не более  $9^\circ$  по направлению.

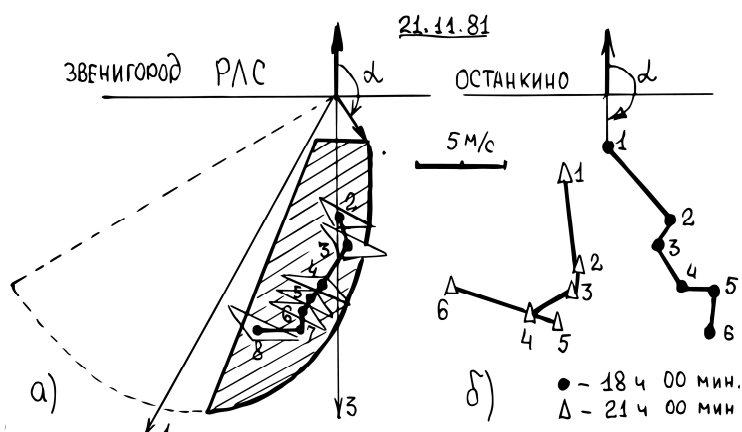


Рис. 1. Профиль ветра в полярных координатах – скорость ветра, а) восстановленные по спектрам, полученным с помощью непрерывной РЛС, б) по данным Останкинской телебашни [16].

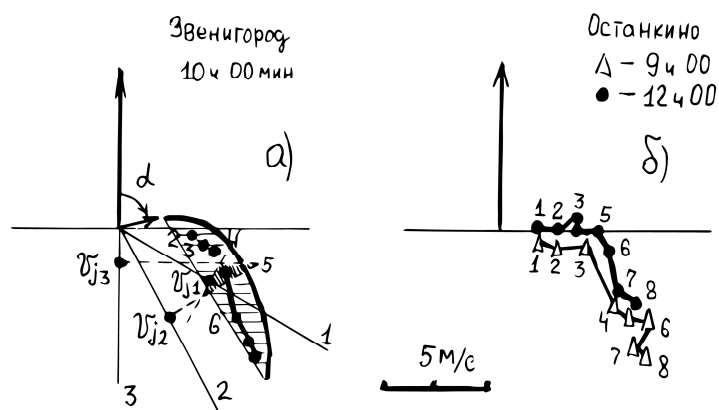


Рис. 2 Профиль ветра в полярных координатах азимут  $\alpha$  – скорость ветра  $V$ , а) восстановленный по спектрам, полученным в направлениях 1, 2, 3, б) по данным Останкинской башни [16].

Проведенные натурные измерения подтвердили возможности непрерывных доплеровских систем в качестве эффективного инструмента для определения профиля ветра в пограничном слое атмосферы.

Однако в случае немонотонного профиля описанная 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. Зондирование при малых углах места позволяет убрать вклад верхних слоев и томографически восстановить нижнюю часть профиля. С ростом угла места  $\beta$  добавляется вклад все более высоких слоев, которые восстанавливаются с учетом известных профилей для низлежащих слоев.

## Результаты моделирования задачи доплеровской томографии при наличии 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 постановке задачи 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.

Пусть зависимость проекций скорости ветра на направление зондирования от высоты  $V(H)$  при решении прямой задачи задана сплошной кривой, представленной на рис. 3.

На рис. 4 представлены результаты расчета доплеровских спектров на основе уравнения (5) для исходного профиля при условии  $\gamma_1 = 0$ ,  $\gamma_2 = 0.003 \text{ м}^{-1}$ ,  $\gamma_3 = 0.006 \text{ м}^{-1}$ , уровне турбулентности  $\sigma_{\tau, \delta} = 0.3 \text{ м/с}$  и угле места  $\beta = 30^\circ$ .

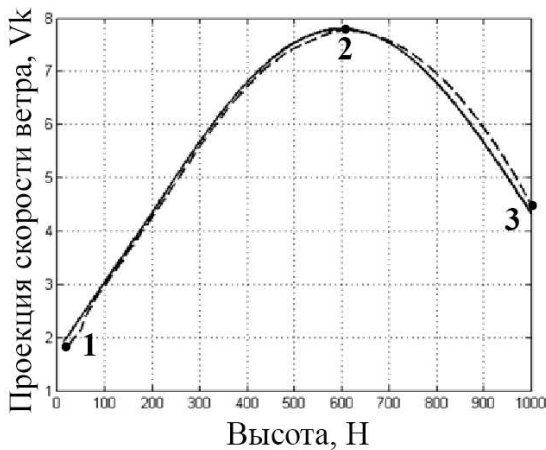


Рис. 3. Исходный профиль ветра представлен сплошной линией. Восстановленный профиль представлен пунктирной линией.

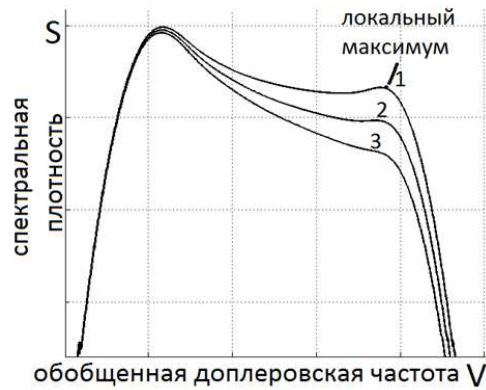


Рис. 4. Формы спектров, рассчитанных для профиля, показанного на рис. 3. Спектры 1, 2, 3 соответствуют ослаблению  $\gamma_1 = 0$ ,  $\gamma_2 = 0.003$ ,  $\gamma_3 = 0.006 \text{ м}^{-1}$  соответственно.

Локальный экстремум на спектре 1 на рис. 4 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.

На рис. 5 представлены профили  $V(H, \gamma_1)$ ,  $V(H, \gamma_2)$ ,  $V(H, \gamma_3)$ , восстановленные по спектрам, полученным при различных значениях ослабления  $\gamma$ , в предположении, что восстанавливаемый 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. 6 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  $\Delta V$  в случае восстановления монотонных профилей различного вида. Сплошная линия соответствует немонотонному профилю, заданному в рассматриваемой прямой задаче. Видно, что на монотонном участке профиля разность  $\Delta V$  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.

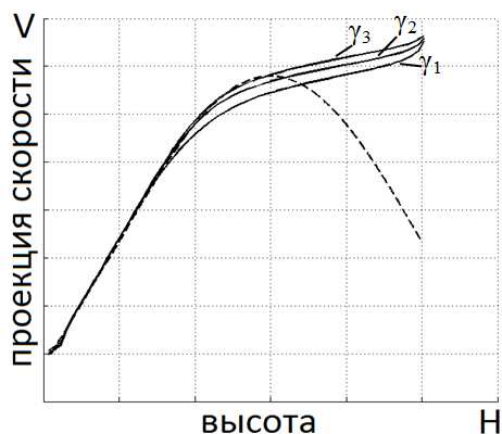


Рис. 5. На рисунке представлены три восстановленных по формуле 7 профили при соответствующих значениях  $\gamma$ .

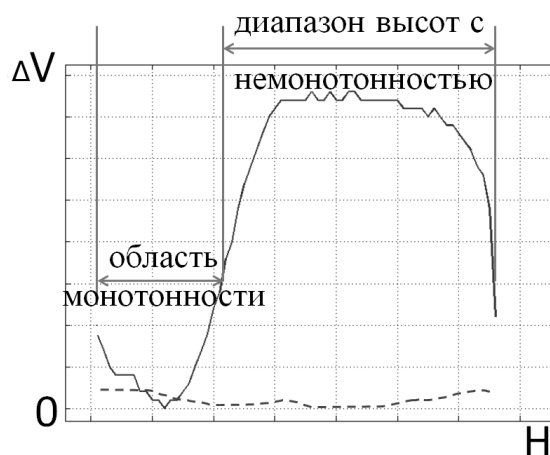


Рис. 6. Разность между профилями  $\Delta V(H)$ , восстановленными при  $\gamma_1$  и  $\gamma_3$ .

Из проведенного анализа следует, что, используя спектр с наибольшим регистрируемым ослаблением, мы можем восстановить нижнюю часть профиля, которая представлена на рис. 3 пунктирным участком 1-2. Кроме того, по

характеру функции  $\Delta V(H)$  на рис. 6 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. 3).

Последним шагом решения обратной задачи является восстановление оставшейся части искомого профиля на основе полученной информации. Часть профиля 1-2 считается восстановленной по методике, описанной ранее. Часть 2-3 аппроксимируется некоторой параметрически задаваемой кривой  $V_{23}(H, t)$  с вектором параметров  $t = [t_1, t_2, \dots, t_n]$ . Такой кривой может быть любая параметрическая функция, имеющая начальное значение в точке 2 и конечное значение в точке 3. На основе выбранной аппроксимирующей функции  $V_{23}(H, t)$  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  $t$ :

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

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. 3 пунктирной линией.

Результаты моделирования для более сложных моделей представлены на рис. 7. Были исследованы различные типы профилей: монотонный и три немонотонных с

различной степенью сложности, которую можно характеризовать количеством ветвей, соответствующих одному и тому же диапазону доплеровских скоростей. Другими словами, сложность восстановления определяется количеством дальностей, которые имеют одно и то же значение проекции доплеровской скорости, и дают вклады в спектр на одной доплеровской частоте.

На рисунке слева изображены различные профили ветра, которые использовались в качестве модели при решении прямой задачи. Справа пунктиром представлены результаты восстановления профиля на основе решения обратной задачи по описанной выше методике. На рис. 7,а представлен монотонный профиль, который надежно и однозначно восстанавливается при использовании любой длины волны, будь она с ослаблением или без.

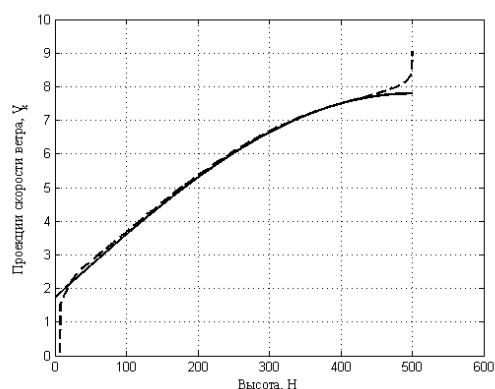
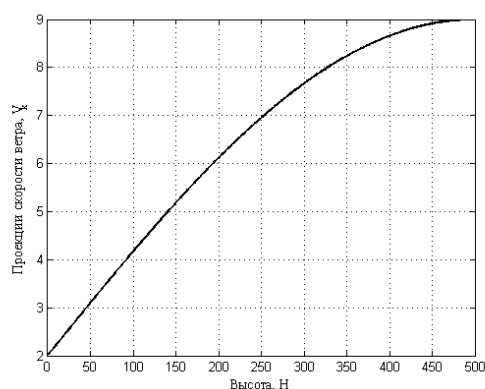
На рис. 7,б исходный профиль имеет один экстремум, и появляется участок спектра, образованный сигналами на двух дальностях. Использование двух длин волн при решении обратной задачи позволяет выделить участок неоднозначного соответствия  $V(H) \leftrightarrow H$ , а дальнейшее восстановление основывается на минимизации невязки между «экспериментальными» и расчетными спектрами, вычисленными при заданных параметрах профиля. Эта процедура позволяет достаточно надежно восстановить профиль такого вида.

Для профиля с большей степенью немонотонности, рис. 7,в,г, возникают трудности при определении участка немонотонности. На восстановленных профилях справа видно, что монотонная часть восстановлена успешно. Там, где начинается участок немонотонности, возникает разность решений для различных коэффициентов ослабления. По этому признаку можно оценить необходимые параметры и, используя алгоритмы математического моделирования, свести задачу к поиску минимума невязки (8).

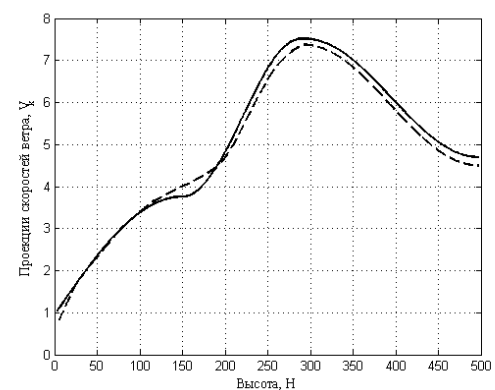
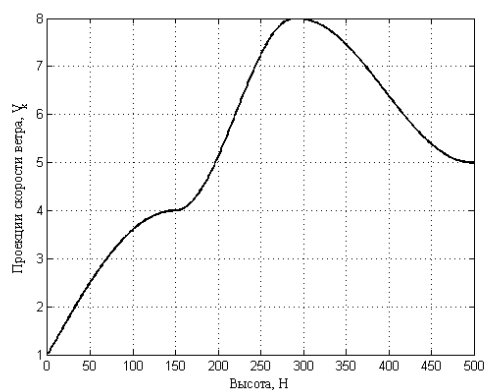


Отметим, что чем больше ветвей у профиля и выше степень неоднозначности  $V(H) \leftrightarrow H$ , тем менее устойчивым становится решение обратной задачи. В частности, для примера, показанного на рисунке 7, в погрешности восстановления на больших высотах довольно велики, в то же время, профиль на рис. 7,г показывает, что если после немонотонного участка вновь следует монотонный профиль, то точность восстановления на монотонном участке вновь становится высокой.

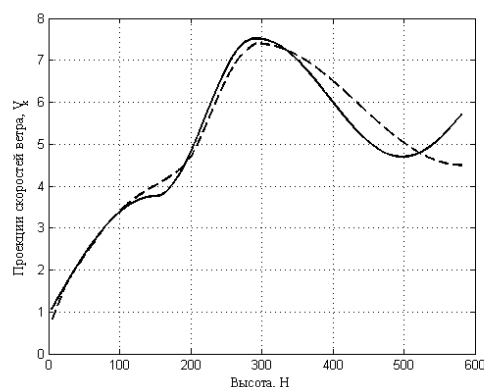
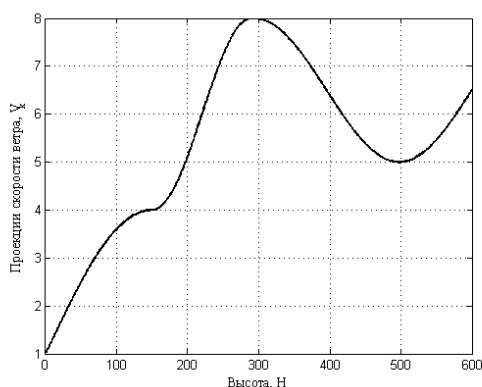
В целом, проведенное компьютерное моделирование подтвердило возможности томографического восстановления немонотонных профилей ветра на базе использования длин волн с поглощением атмосферными газами.



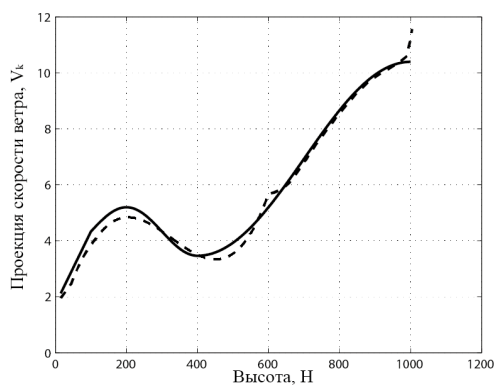
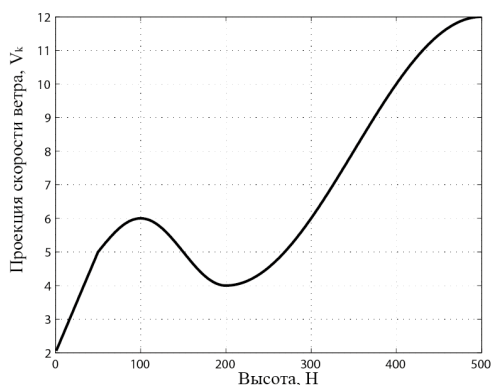
а)



б)



в)



г)

Рис 7. Слева заданы различные исходные профили, используемые при решении прямой задачи. На правых рисунках пунктир – результаты восстановления проекций соответствующих профилей при решении обратной задачи.

В дополнение к томографическому методу восстановления профиля ветра можно использовать привязку по дальности, основанную на сравнении спектральных плотностей, полученных на различных длинах волн, испытывающих ослабление газами атмосферы [18, 24, 25].

Важное замечание относится к требованиям, которые предъявляются к техническим параметрам доплеровского радиолокатора. Из спектров на рис. 4

видно, что при решении задачи доплеровской томографии используется тонкая структура спектра в широком динамическом диапазоне. Поэтому первое требование относится к динамическому диапазону радиолокатора, который должен превышать 58 dB при дальности зондирования до 1000 м, что для современных радиолокаторов не представляет технических проблем. Второе требование относится к линейности приемно-передающего тракта. Если некоторые рассеиватели на близких расстояниях от радиолокатора будут формировать мощный сигнал, то их гармоники не должны превышать уровень в -50-60 dB. В противном случае эти гармонические компоненты могут исказить часть спектров, сформированных от дальних рассеивателей на трассе распространения излучения.

### **Заключение**

Проведенные теоретические исследования и накопленный опыт использования непрерывных доплеровских систем для ветрового зондирования показывает возможность и эффективность их применения практически в любых метеорологических условиях.

Так в сложных метеоусловиях при выпадении осадков, облачности, «тяжелой дымки» или тумане целесообразно использовать непрерывные доплеровские системы, работающие в миллиметровом диапазоне, а в ясную погоду при хорошей видимости – оптический доплеровский лидар. Такая комбинация позволит создать малогабаритную всепогодную систему ветрового зондирования в пограничном слое атмосферы, что представляется важной и актуальной задачей прикладной радиометеорологии.

Показано, что применение методов доплеровской томографии с изменяемым ядром за счет ослабления газами атмосферы позволяет повысить надежность и

точность решения обратной задачи восстановления ветрового профиля даже в самых неблагоприятных условиях.

В заключение отметим, что использование непрерывных доплеровских систем позволяет создавать новый класс малогабаритных недорогих приборов, позволяющих проводить измерения ветра в нижнем **500** метровом слое атмосферы, который наиболее изменчив и наиболее важен для потребителей.

### Литература

1. Каллистратова М.А., Кон А.И. Радиоакустическое зондирование атмосферы. Москва, Наука, 1985, с.198.
2. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя.// 2001, Томск, СО РАН, с.280.
3. North, E.M., A.M. Peterson, H.D., 1973: RASS, a remote sensing system for measuring low-level temperature profiles. Bull. Amer. Meteor. Soc., **54**, No 9, 912-918.
4. Strauch, R.G., K.P. Moran, P.T. May, A.J. Bedard, and W.L. Ecklund, 1988: RASS temperature sounding techniques. NOAA Tech. Memo, ERL WPL-158.
5. Gordienko V.M., Kormakov A.A., Kosovsky L. A., Kurochkin N. N. Pogosov G.A., Priezzhev A.V., Putivskii Y.Y. Coherent CO<sub>2</sub> lidars for measuring wind velocity and atmospheric turbulence // Optical Engineering. 1994. V. 33. N 10. P. 3206-3213.
6. Kameyama S., Ando T., Asaka K., Hirano Y., Wadaka S. Compact all-fiber pulsed coherent Doppler lidar system for wind sensing // Applied Optics. 2007. V. 46. N 11. P. 1953 – 1962.
7. Kane T.J., Kozlovsky W.J., Byer R.L., Byvik C.E. Coherent laser radar at 1.06  $\mu\text{m}$  using Nd:YAG lasers // Optics Letters. 1987. V. 12. P. 232-241.
8. Lehmann V. Use of radar wind profilers in operational networks. 2011.

9. Ishihara, M., and al. Characteristics and performance of the operational wind profiler network of the Japan Meteorological Agency, J. Meteor. Soc. Japan, 84, 1085-1096, 2006.
10. Стерлядкин В.В. Кононов М.А., Быковский С.С. Оценка погрешности измерения профиля ветра методом круговых диаграмм с применением метеорологической радиолокационной станции миллиметрового диапазона длин волн. Научный вестник МГТУГА, сер. Радиотехника, № 176, 25-30.
11. Горелик А.Г., Черников А.А. Некоторые результаты радиолокационного исследования структуры ветра на высотах 50-700 м. Труды ЦАО, вып. 57, 1964.
12. Горелик А.Г., Пацаева В.А. Измерение ветра в пограничном слое по радиолокационным отражениям от «ясного неба». Метеорология и Гидрология. Н. 3. 1967.
13. David Atlas, Radar in Meteorology: Battan Memorial and 40th Anniversary Radar Meteorology Conference, published by the American Meteorological Society, Boston, 1990, 806 pages, ISBN 0-933876-86-6, AMS Code RADMET.
14. Горелик А.Г., Князев Л.В. Систем с непрерывным излучением в метеорологии. Труды XIII Всесоюзной конференции по распространению радиоволн. Горький. 1981.
15. Kadygrov E.N. Operational aspects of different ground-based remote sensing observing techniques for vertical profiling of temperature, wind, humidity and cloud structure: a review. WMO, IOM Report N 89, WMO/TD N 1309, Geneva, Switzerland, 2006, pp. 39.
16. Стерлядкин В.В. Определение ветра в осадках при помощи доплеровских систем с непрерывным излучением. Диссертация на соискание учёной степени к.ф.-м.н. -Н. 1982.. 195 с.

17. Горелик А.Г., Стерлядкин В.В. Определение ветра в пограничном слое атмосферы с помощью непрерывных доплеровских систем. – Метеорология и гидрология, 1984, №4 с. 46-52.
18. Горелик А.Г., Стерлядкин В.В. Ветровое зондирование атмосферы с помощью непрерывных доплеровских систем. Известия, Физика атмосферы и океана. Т. 22, №7, 1986, с. 556-561.
19. Тихонов, А.Н., Арсенин В.Я., Методы решения некорректных задач, Наука, 1979.
20. Горелик А.Г., Стерлядкин В.В. Доплеровская томография в радиометеорологии. Известия АН, Физика атмосферы и океана, т. 26, №1, 1990, с. 28-33.
21. Стерлядкин В.В. Микроволновые и оптические измерения параметров ветра и исследование микроструктуры дождя. Диссертация на соискание ученой степени д.ф.-м.н. – Нижний Новгород, НИРФИ, 1992.
22. Денисов А.М., Попов А.А., Стерлядкин В.В. Задача доплеровской томографии в случае двумерного векторного поля. Вестник Московского Университета. Сер. 15. Вычислительная математика и кибернетика, 1995. №1, с. 20-23.
23. Горелик А.Г., Стерлядкин В.В., Желтов А.В. Ветровое зондирование пограничного слоя атмосферы методами доплеровской томографии, НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК МГТУ ГА, № 168 (6), Москва, 2011
24. Стерлядкин В.В. Способ определения векторного поля скоростей. А.с. N1795372. 1993. 4с.
25. Стерлядкин В.В. Способ определения поля скоростей. Патент РФ N2032180 от 27.03.95. 4с.