

Расчет тонкой структуры спектра радиолокационного сигнала от множественных целей

М.А.Кононов, В.В.Стерлядкин

Московский технологический университет. МИРЭА, 119454, г. Москва, Пр-кт Вернадского 78, e-mail address: m.kononov79@mail.ru sterlyadkin@mail.ru

Рассмотрены задачи доплеровской томографии при решении метеорологических задач восстановления профиля ветра. Анализируются вопросы формирования тонкой структуры спектра радиосигнала при работе импульсно когерентной РЛС по метеорологической цели. Учитывается различие весовых вкладов рассеивателей, находящихся в различных частях рассеивающего объема. Оценивается влияние профиля ветрового поля и длительности времени усреднения на форму доплеровских спектров.

The problem of wind profile recovery by means of Doppler tomography methods is considered. The issues of formation of the fine structure of the pulse coherent meteorological radar spectrum are analyzed. The weight differences between the contributions of the scatterers located in different parts of the scattering volume are taken into account. The influences of the profile of the wind field and the duration of the averaging time on the shape of the Doppler spectrum are estimated.

Задача дистанционного определения ветрового профиля в атмосфере до настоящего времени является одной из самых сложных задач метеорологии. Ни одно известное средство дистанционных измерений не является универсальным. Это относится как к диапазону высот зондирования, так и к метеусловиям, в которых возможно проводить измерения. В научной группе МГУПИ (МИРЭА) на протяжении многих лет проводятся исследования и разработка новых средств и методов ветрового зондирования атмосферы. В частности, впервые в мире (в том числе первая математическая постановка) была сформулирована и частично решена задача Доплеровской томографии, которая родилась при решении задачи восстановления профиля ветра на базе использования доплеровских систем с непрерывным немодулированным излучением [1]. Методы доплеровской томографии (ДТ) имеют существенные энергетические преимущества перед традиционными импульсно когерентными методами. На основе данной работы Стерлядкиным В.В. была защищена докторская диссертация [2]. В нашей группе были разработаны методы корреляционно-доплеровской реконструкции поля ветра [3]. Были разработаны и запатентованы принципиально новые методы однозначного определения скоростей рассеивателей на больших дальностях, методы повышения пространственного разрешения при внутриимпульсной когерентной обработке сигналов [4,5].

В настоящей работе рассматривается новый метод восстановления профиля ветра на базе импульсно когерентных РЛС, которые используют длинные импульсы зондирующего излучения и соответственно такие же длинные по времени времена усреднения сигналов. Увеличение длительности импульса позволяет повысить энергетический потенциал станции на 10-15дБ, как за счет многократного увеличения средней излучаемой мощности, так и за счет уменьшения полосы приемника и, соответственно уменьшения шумов приемной системы. Увеличение потенциала радиолокатора имеет принципиально важное значение, поскольку позволяет проводить измерения в более широком диапазоне метеусловий, в том числе в условиях ясного неба. В предлагаемом методе ухудшение пространственного разрешения компенсируется методами томографической обработки сигналов, которые позволяют повысить разрешение по высоте до традиционных значений в 30-60м. Таким образом,

предлагаемый метод использует комбинацию метода ДТ и импульсно когерентное зондирование длинными импульсами.

В рассмотренном ранее методе реконструкции профиля ветра на основе доплеровской томографии (ДТ) излучается непрерывное немодулированное излучение и при различных направлениях зондирования регистрируются доплеровские спектры сигнала, рассеянного в обратном направлении [1]. С точки зрения математической постановки задачи доплеровские спектры являются интегральными доплеровскими проекциями, получаемыми вдоль многообразия прямых. В методе ДТ информацию о высоте H и соответствующей скорости V получают из полной формы доплеровских спектров, в том числе из сравнения мощности излучения, пришедшего от определенного слоя рассеивателей. Недостатком этого способа является неточность привязки по высоте, особенно сильно проявляющаяся при немонотонных профилях ветра.

Импульсно когерентный метод, основан на излучении серии когерентных импульсов малой длительности. В данном методе по времени задержки отраженного излучения определяют дальность до селектируемого объема, а по средней доплеровской частоте отраженного сигнала определяют проекцию скорости рассеивателей на направление зондирования. На основе проекций скорости, полученных для различных направлений зондирования, вычисляется скорость и направление ветра на каждой высоте. Недостатком этого способа является широкая полоса приема, требуемая для неискаженной регистрации коротких отраженных импульсов, длительностью $\tau_{и}$, что снижает отношение сигнал/шум, ухудшает потенциал радиолокатора и возможности измерения при слабых сигналах.

Далее мы рассмотрим суть метода, который заключается в комбинации импульсно когерентного зондирования длинными импульсами и томографического подхода к реконструкции поля ветра.

Сначала рассмотрим условия формирования отраженного сигнала от множественной цели более детально. Пусть импульсная система работает в режиме излучения пачки импульсов длительностью $\tau_{и}$ и периодичностью повторения $\tau_{повт}$. На рис. 1 представлена диаграмма, иллюстрирующая распространение излучения в пространство, рассеяние излучения на наборе рассеивателей, расположенных на различных дальностях, и распространение рассеянного излучения в обратном направлении. Будем полагать, что приемная система работает в классическом режиме, при котором отдельный отсчет на приемнике усредняется за время равное $\tau_{и}$.

Начало отсчета времени на графике совпадает с началом излучения импульса. Передний фронт излучаемого импульса на рис.1 распространяется со скоростью c и удаляется от приемо-передатчика по закону $R_{п. фр} = ct$, в задний фронт $R_{з. фр} = c(t - \tau_{и})$. Рассеянное излучение распространяется в обратном направлении с той же скоростью (линии распространения направлены обратно).

Рассмотрим на рисунке отдельный рассеиватель, находящийся на дальности R_i . Передний фронт достигает рассеиватель в момент времени R_i/c , а передний фронт рассеянного цуга вернется к приемнику через время $t_i = 2R_i/c$. Длительность рассеянного цуга равна длительность излученного импульса $\tau_{и}$.

На следующем шаге рассмотрим, какие рассеиватели дают вклад в сигнал приемника в некоторый момент времени t_0 . Из рисунка видно, что сигнал одновременно приходит от слоя протяженностью $c\tau_{и}/2$, который расположен в интервале дальностей $(ct_0/2 - c\tau_{и}/2, ct_0/2)$.

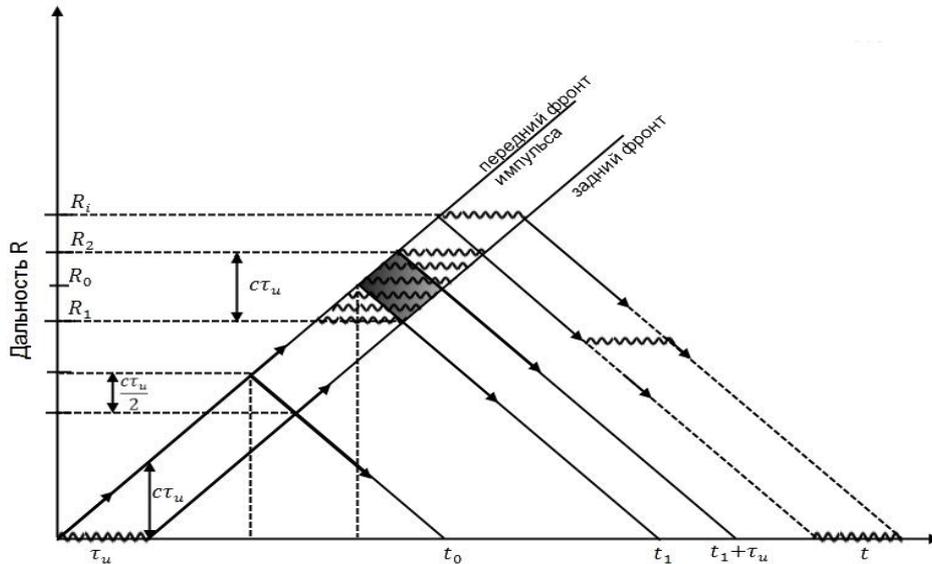


Рис.1. Показано положение переднего и заднего фронта $R(t)$ излучаемого импульса. В момент времени t_0 на приемник приходит сигнал от слоя $c\tau_u/2$. За интервал времени усреднения одного отсчета приемника ($t_1, t_1+\tau_u$) вклады дает слой рассеивателей толщиной $R_2-R_1=c\tau_u$. При усреднении сигнала на приемнике за время τ_u усредняются цуги, заштрихованные на рисунке

Из рисунка видно, что за время усреднения сигнала на приемнике τ_u интегральный сигнал формируется различными рассеивателями, которые имеют различную длительность цуга, линейно нарастающую с высотой, а затем также линейно уменьшающуюся с высотой. В результате, весовой вклад $G(R)$ рассеивателей с различных дальностей в энергетику усредненного сигнала имеет вид треугольника, представленный на рис.2. Пунктиром на том же рисунке показаны весовые функции для последующих двух отсчетов по дальности.

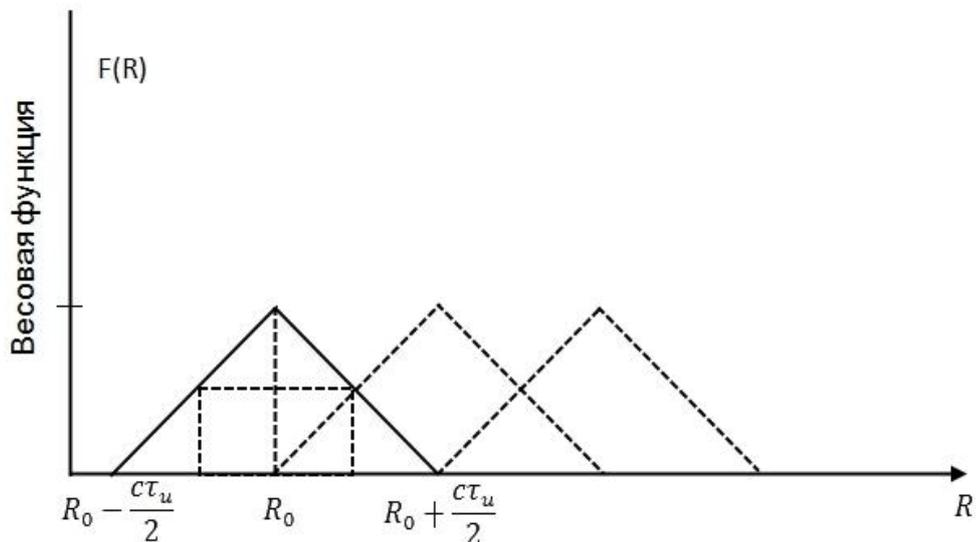


Рис.2. Весовая функция $G(R)$ вклада рассеивателей, находящихся на различных дальностях для трех соседних отсчетов приемника. Два соседних отсчета приемника частично формируются общими рассеивателями

При импульсном зондировании используют излучение с длинными импульсами, протяженность которых во много раз больше, чем требуемое пространственное разрешение. По времени задержки импульса определяют расположение импульса в пространстве, в частности, высоту начала и высоту конца импульса. Затем проводится вычисление профиля скорости рассеивателей по высоте в пределах протяженности импульса по формуле (1), в которой учитывается закон изменения мощности принимаемого сигнала от высоты

$$\int_{H_i}^H F(h)dh = A \int_{v_i}^V S(v)dv, \quad (1)$$

где H – текущая высота,

H_i – высота, соответствующая началу импульса,

V – текущая проекция скорости ветра, соответствующая текущей высоте H ,

v_i – проекция скорости ветра на высоте, соответствующей началу импульса,

$F(h)$ – известная для конкретной измерительной системы зависимость принимаемой мощности сигнала от высоты h , которая связана с дальностью R и местным углом зондирования β соотношением $h=R \sin(\beta)$,

A – коэффициент пропорциональности, зависящий от параметров измерительной системы и отражаемости рассеивателей,

$S(v)$ – спектральная плотность мощности регистрируемого доплеровского сигнала,

В данном соотношении коэффициент A определяется из условия нормировки по мощности сигнала вдоль протяженности всего импульса зондирования.

Подынтегральную функцию $F(H)$ для волновой зоны передатчика и множественной цели, каковыми являются отражения от неоднородностей атмосферы или осадков, можно представить в виде

$$F(H, H_i) = \frac{G(H - H_i)}{R^2(H)} \exp[-2\gamma R(H)] = \frac{\sin^2(\beta)G(H - H_i)}{H^2} \exp\left[-2\gamma \frac{H}{\sin \beta}\right] \quad (2)$$

где γ – линейный коэффициент ослабления.

В пределах одного элемента пространственного усреднения, например для участка высот $H_4 \dots H_5$ проводят уточнение профиля скоростей на основе зависимости мощности сигнала от дальности до станции.

$$\int_{H_4}^H F(h)dh = A \int_{v_4}^v S(v')dv', \quad (3)$$

где $S(v')$ – это доплеровский спектр, полученный на участке высот $H_4 - H_5$.

Коэффициент A вычисляется из сравнения полной мощности сигнала на всем участке с мощностью, вычисленной по общему доплеровскому спектру на данном участке:

$$\int_{H_4}^{H_5} F(h)dh = A \int_{v_4}^{v_5} S(v')dv', \quad (4)$$

Из соотношений (3) и (4) можно проводить уточнение профиля ветра на данном участке высот. Применение томографического метода восстановления для каждого участка высот позволяет вычислить профиль ветра во всем слое зондирования с высокой пространственно частотной подробностью.

В заключение отметим, что достоинством метода, по сравнению с традиционными импульсно когерентными системами, является работа с длинными импульсами, что позволяет сузить полосу приема, повысить отношение сигнал/шум и, тем самым, повысить чувствительность радиолокатора к слабым сигналам. Внимательная оценка тонкой структуры спектра показывает, что при расчетах следует учитывать весовой вклад рассеивателей, расположенных на различных дальностях в пределах объема зондирования. Кроме того, в расчете тонкой структуры спектров следует учитывать и спектральные характеристики приемного тракта.

Литература

1. Горелик А.Г., Стерлядкин В.В. Доплеровская томография в радиолокационной метеорологии. Известия АН СССР, сер. ФАО, т.26, №1, с.47-54.
2. Стерлядкин В.В. Микроволновые и оптические измерения параметров ветра и исследование микроструктуры дождя. Диссертация на соискание уч. степени доктора физ.-мат. наук. НИРФИ, Н.Новгород, 1992.
3. Стерлядкин В.В. Корреляционно-доплеровская реконструкция поля скоростей. Известия РАН, сер.ФАО N 5, т. 30, 1994.
4. Стерлядкин В.В. Способ снятия неоднозначности измерения дальности и скорости для импульсных доплеровских систем. Патент РФ № 2515253, Оpubл. 10.05.2014, бюл.№13.
5. Стерлядкин В.В. Корреляционный способ повышения разрешения по скорости и дальности для импульсных доплеровских систем с внутриимпульсной когерентной обработкой. Патент РФ № 2518009, Оpubл. 10.06.2014, бюл.№16.