

ОБРАБОТКА ОТРАЖЕННЫХ СИГНАЛОВ В РЛС ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

Традиционные методы исследования динамических процессов в тропосфере и стратосфере — радиозондовые и самолетные, а также измерения на метеорологических мачтах и башнях — уже не удовлетворяют требованиям к качеству получаемых данных, пространственному и временному разрешению. Это обуславливает быстрое развитие новых дистанционных методов зондирования атмосферы — лазерного (лидарного), акустического и радиолокационного. Согласно анализу [1], проведенному в NOAA (Национальное управление по исследованию атмосферы и океана США), атмосферные РЛС вертикального зондирования (РЛС ВЗ) являются на сегодняшний день техническим средством, обеспечивающим наилучшие точность, высотное и временное разрешение, вертикальный диапазон высот при измерении скорости ветра. К преимуществам РЛС ВЗ относятся: способность функционировать вне зависимости от погодных условий и в необслуживаемом режиме; возможность проводить с их помощью мониторинг состояния атмосферы.

РЛС ВЗ представляет собой высокопотенциальную доплеровскую когерентную импульсную РЛС метрового или дециметрового диапазона. Она позволяет измерять профиль полного вектора скорости ветра на высотах от 500 м до 13...18 км непосредственно над местом расположения РЛС. Высотное разрешение составляет 150...300 м, а время получения одного профиля — от нескольких минут до одного часа. РЛС ВЗ отличается невысокой стоимостью измерений, составляющей около 7 долл. США в час [1].

Основные принципы функционирования РЛС ВЗ заключаются в следующем. Излучаемая РЛС когерентная пачка зондирующих импульсов (чаще всего это простые радиопульсы) отражается от флуктуаций диэлектрической проницаемости атмосферы, которые вызваны турбулентным перемешиванием объемов воздуха с различными температурами и влажностью. Отметим, что флуктуации очень мало отличаются от среднего значения. Возможно также формирование сигнала в результате френелевского отражения от тонких горизонтальных слоев с резко меняющимся преломлением радиоволн. Согласно гипотезе Дж. Тейлора о «замороженной турбулентности» [2], отражающие неоднородности переносятся как целое преобладающим ветром, который выражается вектором скорости \vec{V} . В

результате этого движения отраженный сигнал получает доплеровский сдвиг

$$F_d = 2V_r/\lambda, \quad (1)$$

где V_r — проекция \vec{V} на ось диаграммы направленности (ДН); λ — длина волны РЛС. Измерив этот доплеровский сдвиг, можно найти оценку V_r , соответствующую используемой ориентации ДН антенны. Для измерения полного вектора скорости ветра \vec{V} (трех его ортогональных компонент: W — вертикальной, U — зональной и V — меридиональной) требуется использование трех попеременно устанавливаемых фиксированных положений ДН антенны — вертикального и двух наклонных, направленных на запад и на север под углом $\beta = 7...20^\circ$ к зениту (рис. 1).

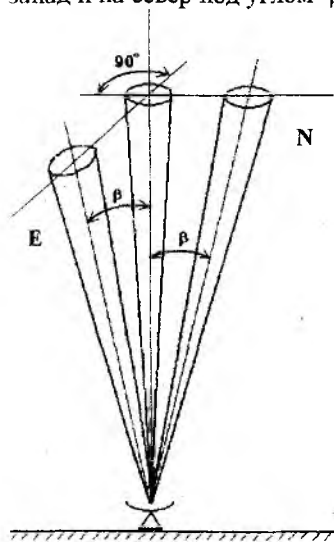


Рис. 1

При такой ориентации лучей длины проекций V_{re}, V_{rn}, V_{rz} вектора \vec{V} на оси ДН антенны при зондировании в восточном, северном и вертикальном направлениях соответственно составят:

$$V_{re} = U \sin(\beta) + W \cos(\beta); \quad (2)$$

$$V_{rn} = V \sin(\beta) + W \cos(\beta); \quad (3)$$

$$V_{rz} = W. \quad (4)$$

Полученные при зондировании радиальные составляющие преобразуются в компоненты скорости ветра с помощью выражений, следующих из (2) — (4):

$$U = V_{re} \csc(\beta) - W \operatorname{ctg}(\beta); \quad (5)$$

$$V = V_{rn} \csc(\beta) - W \operatorname{ctg}(\beta); \quad (6)$$

$$W = V_{rz}. \quad (7)$$

Особенности реализации аппаратуры РЛС ВЗ и методов обработки вытекают из особенностей отраженного сигнала. Прежде всего, необходимо отметить низкое соотношение сигнал-шум (с-ш) на входе приемного устройства (менее единицы на высотах более 4...5 км), что обусловлено слабой отражающей способностью флуктуаций диэлектрической проницаемости атмосферы, имеющих в тропосфере объемную удельную ЭПР в пределах $\sigma_v \approx 10^{-17}...10^{-13} \text{ м}^{-1}$ для дециметрового диапазона длин волн [3].

Уровень отраженного сигнала падает в тропосфере со скоростью около 6 дБ/км, так что динамический диапазон отраженных сигналов для диапазона рабочих высот составляет 60...80 дБ. Доплеровский сдвиг для реально существующих в тропосфере и нижней стратосфере скоростей ветра (обычно не более 50 м/с) составляет несколько герц. Еще одной особенностью отраженных сигналов является наличие в их спектре помеховых компонентов, иногда на один-два порядка превышающих по мощности полезную составляющую. Эти помеховые компоненты образуются в результате:

- приема отражений от побочных целей по главному и боковым лепесткам ДН антенны;
- приема отражений от полезных целей по боковым лепесткам ДН антенны;
- внутрисистемных электромагнитных помех;
- межсистемных электромагнитных помех.

Формирование помеховых компонентов спектра отраженных сигналов иллюстрируется рис. 2 [4].

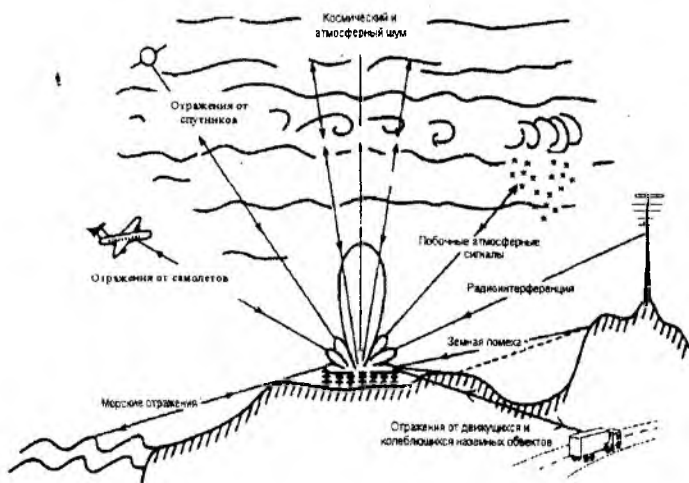


Рис. 2

Сложный характер отраженного сигнала и низкое соотношение с-ш на входе системы вызывают необходимость полного использования априорной информации о статистических и спектральных характеристиках отражений при обработке. Известно [5], что отраженный сигнал имеет

время корреляции, определяемое временем существования неоднородностей в атмосфере:

$$T_k = 0,2\lambda/\sigma, \quad (8)$$

где σ^2 — дисперсия турбулентных скоростей ветра в разрешаемом объеме РЛС, обычно $\sigma^2 \approx 1$ м/с. Для РЛС ВЗ метрового диапазона время корреляции составляет несколько секунд. При достаточной фазовой стабильности системы формирования опорных частот РЛС выборки отраженного сигнала от i последовательных зондирующих импульсов можно просуммировать. При этом происходит увеличение соотношения с-ш в i раз. Однако увеличение i приводит к уменьшению однозначно определяемой доплеровской частоты:

$$f_{d\max} = 1/(2T_n i), \quad (9)$$

где T_n — период повторения зондирующих импульсов РЛС.

Оценка доплеровского сдвига частоты отраженного сигнала после его накопления производится в РЛС ВЗ с помощью спектрального анализа. Спектр отраженного сигнала вычисляется по реализации из N точек. При этом длительность реализации

$$T_p = T_n i N. \quad (10)$$

Она не должна превышать времени когерентности сигнала (8), что достигается выбором i и N при заданном T_n .

Число точек N определяет разрешающую способность при спектральном анализе и должно выбираться исходя из соотношения

$$N \geq 2V_{r\max}/\Delta V_r, \quad (11)$$

где ΔV_r — требуемое разрешение по радиальной скорости; $V_{r\max}$ — максимальная однозначно определяемая радиальная скорость, получаемая из соотношения Найквиста и (1):

$$V_{r\max} = \lambda T_n i / 4. \quad (12)$$

С другой стороны, возможное увеличение N ограничено, что вытекает из следующих соображений. При спектральном анализе коэффициент увеличения соотношения с-ш определяется [5] выражением

$$k = N F \left(\frac{\Delta V_r}{2\sqrt{2}\sigma} \right), \quad (13)$$

где F — функция ошибок. Из анализа поведения (13) следует, что при увеличении N более

$$N_1 = \lambda / (2\sigma T_n i) \quad (14)$$

соотношение с-ш практически не увеличивается. Кроме того, при длительном анализе возникает возможность выхода отражающей неоднородности, переносимой ветром, за пределы разрешаемого объема РЛС. Это происходит при

$$N_2 = L / V_{\max} i T_n, \quad (15)$$

где L — линейный размер разрешаемого объема в горизонтальной плоскости; V_{\max} — максимально возможная горизонтальная скорость ветра.

В результате N должно быть выбрано таким, чтобы не превышать меньшую из величин N_1 и N_2 .

Вычисление спектра традиционно производится с помощью процедуры быстрого преобразования Фурье (БПФ). При дальнейшей обработке из спектра отраженного сигнала удаляются помеховые компоненты. Наиболее часто встречающаяся из них — так называемая земная помеха, обусловленная приемом по боковым лепесткам ДН отражений зондирующих сигналов от земной поверхности. Она выражена рядом спектральных составляющих, расположенных симметрично вокруг нулевой частоты и быстро спадающих по мере удаления от нее. При квадратурной схеме обработки сигналов ширина компонентов земной помехи в спектре значительно меньше, чем при использовании одного канала, вследствие устранения неоднозначности определения фазы принимаемого сигнала. Удаление земной помехи может производиться несколькими методами. Согласно наиболее простому из них отсчеты частоты, прилегающие к нулю, отбрасываются. В случае наличия медленно затухающих спектральных компонентов земной помехи необходимо применять более сложные методы. Так, применяется вычисление шаблона земной помехи по результатам предварительных сеансов зондирования, и затем шаблоны вычитаются из обрабатываемого спектра. Вопросы удаления помеховых компонентов подробно рассмотрены в [6].

В некоторых случаях при малых i или N перед оценкой параметров спектра проводится некогерентное суммирование M спектров от нескольких смежных сеансов зондирования. При отсутствии вариаций параметров спектров от сеанса к сеансу соотношение с-ш в суммарном спектре увеличивается в \sqrt{M} раз. Однако следует отметить, что если изменение скорости ветра от сеанса к сеансу зондирования превышает σ , то увеличения соотношения с-ш при усреднении спектров не происходит.

Форма полезной составляющей спектра, обусловленная отражением зондирующего сигнала от неоднородностей преломления атмосферы, при отсутствии шума может быть описана с помощью функции Гаусса [7]:

$$S(\omega) = \frac{P}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(\omega - \Omega)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (16)$$

Эта форма полностью определяется первыми тремя моментами: P — мощности, Ω — центральной частоты и σ — спектральной ширины сигнала. Величины P , Ω и σ содержат информацию об отражающей среде и являются оценками интенсивности турбулентности, доплеровского сдвига частоты и дисперсии скорости ветра. В соответствии с определением моментов они могут быть вычислены по формулам

$$P = \int S(\omega) d\omega; \quad (17)$$

$$\Omega = \frac{1}{P} \int \omega S(\omega) d\omega; \quad (18)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{P} \int (\omega - \Omega)^2 S(\omega) d\omega, \quad (19)$$

которые в случае наличия дискретного спектра, получаемого по процедуре БПФ, переходят в формулы

$$P' = \sum_{j=1}^N S(\omega_j); \quad (20)$$

$$\Omega' = \frac{1}{P'} \sum_{j=1}^N \omega_j S(\omega_j); \quad (21)$$

$$\sigma'^2 = \frac{1}{P'} \sum_{j=1}^N (\omega_j - \Omega')^2 S(\omega_j). \quad (22)$$

Перед вычислениями по формулам (20) — (22) из спектра необходимо удалить смещение, обусловленное наличием шума,

$$S(\omega_j) = S(\omega_j) - N_0, \quad (23)$$

где N_0 — спектральная плотность шума, принимаемая равномерной. Уровень шума N_0 определяется по результатам анализа отраженного сигнала на больших высотах, где отражения заведомо отсутствуют.

При использовании высокопроизводительных компьютеров появляется возможность применить вместо оценок (20) — (22) оценки, основанные на априорных данных о гауссовой форме спектра, отраженного от неодно-

родностей сигнала. Такие оценки отыскиваются по методу наименьших квадратов [7; 8] с аппроксимирующей функцией в виде кривой Гаусса. Суть метода состоит в минимизации выражения погрешности

$$\Delta^2 = \sum_{j=1}^N [S'(\omega_j) - S(\omega_j, P, \Omega, \sigma)]^2 \quad (24)$$

путем вариации параметров P , Ω и σ . Соответствующий алгоритм обеспечивает оценку максимального правдоподобия [8]. Дисперсии полученных при этом оценок для малых соотношений с-ш могут быть установлены с помощью выражений [7]

$$\sigma_P^2 = \frac{3}{2\sqrt{\pi}} (\sigma_{T_p}) \frac{n^2}{M}; \quad (25)$$

$$\sigma_\Omega^2 = \frac{2\sigma^2}{M\sqrt{\pi}} (\sigma_{T_p}) \left(\frac{n}{s}\right)^2; \quad (26)$$

$$\sigma_\sigma^2 = \frac{2\sigma^2}{M\sqrt{\pi}} (\sigma_{T_p}) \left(\frac{n}{s}\right)^2, \quad (27)$$

где σ_P^2 , σ_Ω^2 , σ_σ^2 — вариации оценок P , Ω и σ соответственно; T_p — время наблюдения сигнала; n^2 — энергия шума; M — количество оценок; s^2 — энергия сигнала.

Найденные по описанному алгоритму оценки доплеровского сдвига со всех исследуемых дальностей образуют после пересчета по формулам (5) — (7) профиль скорости ветра. На стадии вторичной обработки профили редактируются, сглаживаются и усредняются для получения среднечасовых и среднесуточных оценок.

Алгоритмы первичной и вторичной обработки обсуждаются в большом количестве статей, посвященных обработке отраженных сигналов и интерпретации результатов зондирования РЛС ВЗ. Анализ этих работ показал: система обработки сигналов в общем случае разрабатывается в предположении, что в сигналах присутствует только полезный компонент. Это приводит к некорректной обработке спектра отраженного сигнала при наличии коррелированных помех и, как результат, — к значительным погрешностям измерений, а в некоторых случаях — к полному искажению реальных значений [9]. На основе анализа многолетнего использования РЛС ВЗ в США в составе Демонстрационной сети, имеющей около 30 станций, определены слабые стороны применяемых сейчас алгоритмов обработки и контроля качества данных [1]. Отмечена необходимость мо-

дернизации алгоритмов. Показано, что хотя предельная практическая обеспеченность измерений ветра (число случаев, при которых РЛС ВЗ с безошибочной системой обработки сигналов корректно измеряет скорость и направление ветра) в тропосфере составляет около 98 %, реальное значение, полученное при годичной эксплуатации экспериментальных РЛС ВЗ, составило лишь 84 %. Таким образом, до 14 % данных зондирования искажается на различных стадиях обработки. Кроме того, применяемые алгоритмы обработки ограничивают временное разрешение таких данных (около 1 ч), в то время как требуемое значение, позволяющее изучать короткопериодические атмосферные процессы, составляет около 6 мин.

Повышение точности данных, получаемых на РЛС ВЗ, а также их временного разрешения может быть достигнуто несколькими путями. Так, повышение энергетического потенциала станции (произведения средней мощности и эффективной апертуры антенны) приведет к увеличению соотношения с-ш и соответственно к повышению точности. При этом временное разрешение также улучшится вследствие сокращения требуемого времени накопления. Однако этот путь оказывается дорогостоящим. Предпочтительным является совершенствование алгоритмов обработки сигналов и редактирования данных. Работам в этом направлении в последнее время уделяется большое внимание. Так, разрабатывается система обработки сигналов CASPER (Control, Acquisition, and Signal Processing Engine for Radar) для национальной сети РЛС ВЗ США [9], в которой планируется нейтрализовать упомянутые выше недостатки.

Создание аппаратуры для исследования динамических характеристик тропо-стратосферы ведется и в Харьковском государственном техническом университете радиоэлектроники (ХТУРЭ). При разработке алгоритмов обработки сигналов для системы СТ РЛС (стратосферно-тропосферная РЛС проблемной НИЛ радиотехники ХТУРЭ) внимание было уделено следующим вопросам:

- повышению достоверности и точности измерений при получении оценок P , Ω и σ ;
- обнаружению сигналов, искаженных межсистемными электромагнитными помехами, до вычисления спектров и их параметризации;
- учету наличия помеховых компонентов спектра при параметризации.

Отличительные черты разработанных алгоритмов заключаются в следующем:

1. При обработке сигналов используются временные реализации увеличенной длины (128 или 256 точек вместо 64, обычно используемых в зарубежных РЛС ВЗ).

2. Введены процедуры фильтрации накопленных реализаций принимаемого сигнала перед вычислением их спектральной плотности мощности. Параметры фильтрации выбраны на основе анализа статистических характеристик отраженных сигналов, освещенных в литературе [10; 11]. Эти процедуры позволили устранить выбросы в принимаемых реализациях сигнала, возникающие в результате воздействия импульсных электромагнитных помех и сбоев аппаратуры.

3. Принятая реализация отраженного сигнала проверяется на наличие межсистемных радиопомех (непрерывных узкополосных фазоманипулированных сигналов), характерных для помеховой обстановки места расположения СТ РЛС.

4. Использовано некогерентное накопление спектров перед параметризацией. Кратность накопления составляет 2...4 в зависимости от текущего состояния атмосферы.

5. Перед параметризацией спектров определяется их тип, на основании чего выбирается метод удаления помеховых компонентов

6. Для параметризации спектров применен метод наименьших квадратов с аппроксимирующей функцией типа гауссианы.

7. Редактирование профилей скорости ветра производится с учетом непрерывности изменения измеряемой величины и значений ее градиентов, реально существующих в атмосфере.

8. Анализ достоверности получаемых профилей скорости ветра выполняется с учетом спектральной ширины отраженного сигнала, что позволяет отсеивать ошибочные значения скоростей, возникающие при отражении от гидрометеоров (имеющих широкие спектры) и точечных целей (имеющих узкие спектры).

Экспериментальные измерения на СТ РЛС, выполненные при использовании этих алгоритмов обработки сигнала, показали, что максимальная высота зондирования комплекса повысилась с 13 до 15...16 км. При этом время получения одного профиля скорости ветра составило 2 мин. Экспериментальные сеансы зондирования позволили определить уточненные значения параметров обработки — кратности накопления i , числа точек в реализации сигнала N и кратности накопления спектров M , а также значения пороговых величин, используемых при редактировании профилей и анализе наличия межсистемных электромагнитных помех. В результате получены профили скорости ветра с малым разбросом от сеанса к сеансу, без пропусков данных и без выбросов. Правильность примененных решений и оценка точности измерений подтверждена совместными измерениями СТ РЛС и радиозонда. Сравнение результатов было проведено с использованием данных станции аэрологического зондирования

Харьковского аэропорта. Результаты описаны в [12], поэтому здесь достаточно отметить, что погрешности значений скорости ветра находятся в пределах погрешностей метода, с учетом пространственно-временных вариаций поля скорости ветра между точками измерений.

Список литературы: 1. *Wind profiler assessment report* / NOAA. Silver Spring, Maryland, 1994. 141 p. 2. *Татарский В.И.* Распространение радиоволн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с. 3. *Черников А.А.* Радиолокационные отражения от ясного неба. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 148 с. 4. *Rottger J.* The instrumental principles of MST radars and incoherent scatter radar and the configuration of radar system hardware // *Handbook for MAP*. Urbana, Illinois, 1989. Vol. 30. P. 54 — 113. 5. *Strauch R.G.* Data analyses techniques : spectral processing // *Handbook for MAP*. Urbana, Illinois, 1983. Vol. 9. P. 528 — 531. 6. *Rottger J.* Interpretation of radar returns from clear air — discrimination against clutter // *Handbook for MAP*. Urbana, Illinois, 1983. Vol. 9. P. 114 — 119. 7. *Woodman R.F.* Spectral moment estimation in MST radars // *Handbook for MAP*. Urbana, Illinois, 1983. Vol. 9. P. 548 — 562. 8. *Estimation of spectral parameters of MST radar obtained by least squares fitting method* / M. Yamamoto, T. Sato, P.T. May et al. // *Handbook for MAP*. Urbana, Illinois, 1989. Vol. 28. P. 628 — 633. 9. *Wind Profilers: Next Generation* / T.L. Wilfong, D.A. David, D.A. Merrit et al. // *COST-76 profiler workshop 1997 extended abstracts*. Engelberg, 1997. Vol. 1. P. 59 — 65. 10. *Фельдман Ю.И., Мандуровский И.А.* Теория флуктуаций локационных сигналов, отраженных распределенными целями. М.: Радио и связь, 1988. 270 с. 11. *Liu C.H.* Interpretation of MST radar returns from clear air // *Handbook for MAP*. Urbana, Illinois, 1983. Vol. 9. P. 49 — 56. 12. *Карабанов А.Г.* Некоторые результаты модернизации радиолокационной станции вертикального зондирования атмосферы — См. статью в настоящем сборнике.

Харьковский государственный технический университет радиозлектроники

Поступила в редколлегию 07.09.98