

С. И. БАБКИН, канд. техн. наук, Г. В. ГРУША, канд. физ.-мат. наук,
Е. Г. ПРОШКИН, д-р техн. наук

РАДИОАКУСТИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ АНТЕННЫ

Введение

Существование в реальной атмосфере вертикальных градиентов скорости ветра и поворота вектора ветра с высотой приводят к искривлению траектории распространения акустических импульсов, излучаемых при радиоакустическом зондировании (РАЗ) пограничного слоя. След этой траектории на подстилающей поверхности – кривая движения фокального пятна, создаваемого отраженными электромагнитными волнами, параметры которой неизвестны и меняются во времени. Для зондирования в таких условиях в качестве нового метода РАЗ ранее было предложено применение поля радиоприемных антенн; результаты экспериментальных измерений приведены в [1,2].

При разработке профилеров радар-РАЗ наряду с методом качания луча также применялось вертикальное зондирование на основе многоэлементной антенны (SAD-методика). Многие исследователи считают, что SAD-методика имеет преимущества в точности измерения параметров ветра [3] и оценке профилей вертикальных турбулентных потоков [4]. Обработка сигналов, принимаемых такой антенной, основана на применимости корреляционного анализа в предположении гауссовой формы корреляционной функции [5].

Для измерения температуры воздуха, скорости и направления ветра во всем пограничном слое с точностью, требующейся экологами для диффузионных расчетов распространения загрязняющих примесей (0,1 – 0,3 К по температуре воздуха, 0,2 – 0,5 м/с по скорости горизонтального ветра, $(1-5)^0$ по направлению ветра) в ПНИЛ ЗА разрабатывалась система РАЗ с многоэлементной антенной, причем, в основу метода определения параметров ветра положено измерение амплитуд сигналов, одновременно принимаемых при прохождении фокального пятна по антенному полю [6].

В данной работе обсуждаются некоторые результаты разработки: специфика вторичной пространственной обработки принимаемых сигналов, достижения в моделировании антенного поля, обеспечивающие оптимальное соотношение максимальных высот зондирования и требуемой точности измерения атмосферных параметров.

Радиоакустическое зондирование в условиях влияния атмосферного ветра

Первые методы компенсации ветрового сноса акустического пакета, излучаемого системами радиоакустического зондирования, сводились к различным модификациям расположения антенн (вынос приемной радиоантенны, вынос передающей акустической антенны). При этом удавалось повысить предельную высоту как вертикального, так и наклонного зондирования до тех пор, пока отклонения акустического пакета были невелики и условие зеркальности отражения электромагнитных волн обеспечивало взаимное перекрытие фокального пятна и апертуры приемной антенны. Поэтому эффективность таких методов, реализованных в большом количестве экспериментальных систем РАЗ, оказалась ограниченной.

Принципы и опыт зондирования системами РАЗ с полем приемных радиоантенн

В системах с выносом одной из антенн было реализовано два способа: выдвигание приемной радиоантенны на расстояние $2D = 2V\Delta t$ в направлении приземного ветра и выдвигание акустической антенны на расстояние $D = V\Delta t$ в поперечном направлении, где D – смещение акустического импульса за время Δt , V – скорость горизонтального ветра.

Применение подвижного акустического излучателя, предложенное в разработках ПНИЛ ЗА в 1985 году, используется во многих современных температурно-ветровых профилерах. Однако точность амплитудных методов измерения скорости ветра такой системой РАЗ зависит от ряда факторов, связанных со структурой и расположением пятна сфокусированного электромагнитного излучения.

Установки РАЗ с полем радиоприемных антенн являются стационарными и смещение фокального пятна в этом случае равно $2D = 2V\Delta t$. С учетом этого для зондирования верхней границы атмосферного пограничного слоя $z_{\max} \approx 1-2$ км требуется площадка для поля приемных антенн с линейным размером $L = 2V \frac{z_{\max}}{C}$, то есть от $6V$ до $12V$ (скорость звука $C \approx 340$ м×с⁻¹). При таких оценках пренебрегают вертикальным градиентом скорости ветра;

более строго, смещение фокального пятна на высоте z_{\max} равно $L = \frac{2}{C} \int_0^{z_{\max}} V(z) dz$ (в реальных

условиях $z \frac{dC}{dz} \ll C$). Таким образом, при одинаковой скорости ветра в системах с полем радиоприемных антенн могут достигаться в два раза меньшие высоты за одинаковый период времени Δt , чем в системах с выдвигной акустической антенной. Однако несомненным преимуществом в применении поля приемных антенн являются: 1) возможность перехвата фокального пятна при очень больших сносах ветром акустического пакета; 2) возможность вести одновременное измерение температуры воздуха и компонент горизонтального ветра в одном и том же зондируемом объеме; 3) стационарность системы, в результате чего не требуется перемещение антенн, приводящее к снижению оперативности метода РАЗ.

В зависимости от используемого информационного параметра сигнала различают частотные (многолучевые) и амплитудные измерения скорости ветра методом РАЗ. В системах вертикального зондирования с антенным полем, которое может считаться многоэлементной радиоприемной антенной, информационным параметром является либо непосредственно принимаемая амплитуда сигнала, либо скорость дрейфа фокального пятна по антенному полю, определяемая корреляционным анализом. Экспериментальные системы РАЗ с обработкой первым методом имели 36 [1] и 475 [2] зеркальных параболических антенн, размещенных на квадратных площадках. По нормали к каждой из сторон размещались акустическая и радиопередающая антенны. По данным [1] расчетная погрешность определения горизонтальной скорости ветра – около $0,1$ м×с⁻¹, а его направления около 1° , высота регистрации – около 1 км. При измерениях предельная высота зондирования значительно снижалась с ростом скорости ветра. Опыт работы с многоэлементной антенной, состоящей из 64 рупоров, системы радар-РАЗ с частотно-модулированным непрерывным излучением (FMCW) описан, например, в [4,5]. Основные результаты, полученные в этих работах: сравнительные измерения скорости ветра – корреляционные и доплеровским содаром – показали хорошее согласие до высот 400 м, а погрешность измерения вертикальных потоков вертикальным зондированием антенной, разделенной на 4 секции, содержащей 4×4 антенных рупора, – в два раза меньше в сравнении со сканирующими измерениями.

Определение параметров ветра по координатам истинного максимума фокального пятна

В зависимости от размеров передающих и приемных антенн возможны случаи, когда фокальное пятно перекрывает апертуру одной антенны или апертуры нескольких антенн одновременно, хотя бы и частично. При этом координаты истинного максимума фокального пятна $\{x, y\}$ чаще всего не совпадают с координатами определенной антенны сети $\{x, y\}$,

принявшей сигнал максимальной амплитуды. Два разработанных для такой модели антенного поля алгоритма расчета координат истинного максимума, отличающихся от предложенного в [1], даны в следующих пунктах. Для перехода к параметрам горизонтального ветра (абсолютная величина $V = |\vec{V}|$ и угол $\psi = \arctg \frac{V_y}{V_x}$ относительно заданного направления на площадке антенной сети OX) нами введена поправка на разнос передающих антенн l_0 , важная при определении вертикальных профилей скорости ветра в случае небольших значений сноса фокального пятна:

$$V = \frac{C(z)}{2z} \sqrt{\tilde{y}^2 + (\tilde{x} - l_0)}, \quad \text{tg}\Psi = \frac{\tilde{y}}{\tilde{x} - l_0}. \quad (1)$$

Интерполяционная обработка амплитудной информации

При температурном зондировании основная функция антенного поля – простое перехватывание фокального пятна для того, чтобы на входе радиоприемного устройства был создан сигнал, который после усиления и фильтрации в приемнике оказался достаточным для регистрации доплеровского сдвига частоты по всему интервалу зондирования.

При измерении параметров ветры после аналого-цифрового преобразования входных данных может проводиться интерполяционная обработка амплитуд сигналов, одновременно принятых в течение некоторого периода усреднения. При этом достаточно малым должно быть отношение шага сети d к радиусу фокального пятна на подстилающей поверхности ρ , для которого в теории формирования сигналов РАЗ [7] предложено соотношение:

$$\rho = \left(a_t^2 + 4a_s^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где a_t и a_s – радиусы апертуры передающих радио- и акустической антенн. Формула (2) соответствует гауссовому распределению интенсивности поля в плоскости апертуры. Ранее квадратичная интерполяция (аппроксимация распределения интенсивности параболой) применялась в [1]. В ходе нашего исследования изучалась возможность применения двумерной квадратичной интерполяции многочленами Лагранжа и Бесселя в процессе оптимизации топологии антенного поля для повышения точности регистрации центра фокального пятна. Рассмотрены возможные структуры ячеек поля, определяемых положением фокального пятна относительно узлов сети $N \times N$ антенн с координатами $\{x_m, y_n\}$, где $m, n = 1 \dots N$.

Применение априорной информации для пространственной обработки сигналов

Другой алгоритм определения координат истинного максимума фокального пятна был разработан на основе гауссового распределения интенсивности фокусируемого излучения [8]:

$$I = I_0 \exp \left\{ - \frac{(x - \tilde{x})^2 + (y - \tilde{y})^2}{\rho^2} \right\}. \quad (3)$$

В результате точного решения системы нелинейных алгебраических уравнений относительно неизвестных \tilde{x} , \tilde{y}, I_0 вида:

$$(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 = \rho^2 \ln \frac{I_0}{I}$$

в трех узлах ячейки сети ($j = 1, 2, 3$) с экспериментально измеренными интенсивностями принятых сигналов I_j для координат истинного максимума получены выражения:

$$\bar{x} = A_{23}^{-1} \left\{ \rho^2 \ln \left[\frac{b}{I^3} \frac{2}{a} I^c \right] - A_{13} \right\}, \quad \bar{y} = A_{32}^{-1} \left\{ \rho^2 \ln \left[\frac{b}{I^2} \frac{2}{a} I^e \right] - A_{12} \right\}, \quad (4)$$

где $A_{ij} = a_i b_j - b_i a_j$; параметры a_i, b_j, c, e – линейные комбинации координат регистрирующих антенн. Применение априорной информации позволяет избавиться от методической погрешности интерполяционной процедуры и требования малости параметра d/ρ .

Аналитическое исследование погрешности измерения скорости ветра

При обработке амплитудных измерений в многоэлементной антенне погрешность измерения скорости ветра равна:

$$\sigma_V = \frac{\sqrt{\sigma_{\Delta R}^2 + 4V^2 \sigma_{\Delta t}^2}}{2\Delta t}, \quad \sigma_\psi = \frac{C}{2Vz} \sigma_{\Delta R}, \quad (5)$$

где $\Delta R = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}$ – снос центра сфокусированного излучения. Учитывая, что при квадратичной интерполяции $\sigma_{\Delta R} \approx d\varepsilon$, фактором, определяющим методическую погрешность, является мажоранта ε остаточного члена интерполяционной формулы. Аппаратурная погрешность σ измерения интенсивности создает дополнительную ошибку измерения:

$$\sigma = \frac{1}{|I_m|^2} \sqrt{|I_{m+1} - 1|^2 \sigma_{m+1}^2 + |I_{m-1} - 1|^2 \sigma_{m-1}^2}$$

Приближенно аппаратурная компонента погрешности $\sigma_{\Delta R} \approx d\sigma$. При выборе алгоритма пространственной обработки на основе априорной информации аппаратурная компонента погрешности аппроксимируется выражением: $\sigma_{\Delta R} \approx \frac{\rho^2}{\sqrt{2d}} \frac{\sigma_I}{I}$.

Особенности температурного зондирования

Особенностью при температурном зондировании системами РАЗ с многоэлементной антенной является разнос между передающей и приемной антеннами радиоканала, меняющийся при распространении зондирующего пакета по трассе регистрации метеовеличин. Наличие разноса антенн радиоканала бистатических систем создает дополнительную погрешность измерения температуры воздуха на небольших высотах. Действительно, между направлением излучения электромагнитных и акустических волн возникает небольшой угол, вследствие чего измеряется не скорость движения зондирующего акустического пакета, а ее

проекция на направление распространения радиоволн. При зондировании с многоэлементной антенной, кроме того, фокальное пятно может перемещаться по подстилающей поверхности от одной антенны к другой под действием сноса акустического пакета ветром на большие расстояния. В реальной атмосфере постоянство скорости ветра и неизменность его направления в слое зондирования крайне редки. Поэтому и усиление скорости ветра с ростом высоты, и поворот ветра приводят к необходимости определения конкретных значений возникшего разноса (путем идентификации одной или нескольких радиоантенн сети, принявших сигнал с заданной высоты измерения). Значение разноса антенн радиоканала B , поправку на которое необходимо вводить в алгоритм расчета скорости звука по доплеровскому сдвигу радиочастоты, фактически равно длине вектора, равного сумме векторов между передающими радио- и акустической антеннами и между акустической антенной и центром фокального пятна, координаты которого определяются пространственной обработкой согласно одному из приведенных в данной статье алгоритмов. В явном виде связь значения разноса с координатами центра фокального пятна $\{\tilde{x}, \tilde{y}\}$ и расстоянием между передающими антеннами l_0 можно выразить следующим образом:

$$B = \sqrt{\tilde{y}^2 + (l_0 + \tilde{x})^2}.$$

В данном случае, как и при определении параметров ветра по координатам центра фокального пятна, не учитываются повороты и деформации акустических волновых фронтов в реальной атмосфере.

Оптимизация технических параметров антенной сети системы РАЗ экологического мониторинга АПС

При моделировании параметров антенной сети проводилось согласование энергетического потенциала системы и коэффициентов усиления антенн для охвата высотного диапазона 1-2 км. Для системы РАЗ была принята частота 440 МГц. В соответствии с требованиями подгонки под условие Брэгга акустическая частота должна быть близкой к 1 кГц.

Согласование значений излучаемых мощностей, коэффициентов усиления антенн, количества длин волн в акустическом импульсе велось на основе формулы Маршалла. При вариировании излучаемой акустической мощности для компенсации возможного ослабления турбулентностью атмосферы принимаемой мощности сигнала РАЗ предел ее роста определялся появлением эффекта нелинейного поглощения энергии акустических волн [7].

Если в схеме с равными коэффициентами усиления (КУ) всех радиоантенн при чувствительности радиоприемного устройства $(0,33 - 1,3) \times 10^{-14}$ Вт выбрать следующие значения технических параметров акустического канала системы РАЗ:

- излучаемая акустическая мощность 10 Вт,
- количество длин волн в импульсе 100 – 300,
- КУ акустической антенны 23 дБ,

то для радиоканала при моделировании воздействия турбулентности и вариировании КУ радиоантенн до 23 дБ получают значения излучаемой радиомощности:

- 1) в условиях слабой (термической) турбулентности..... 10 Вт,
- 2) в условиях сильной (динамической) турбулентности..... 1-10 кВт.

Разрешающая способность измерений температуры и скорости ветра по высоте такой системы РАЗ 34 – 100 м.

Минимальная высота зондирования определяется пересечением диаграмм направленности антенн (около 20 м при небольшом ветре).

Приведем краткие результаты моделирования для экологического мониторинга атмосферы. Размещение поля радиоприемных антенн на площадке 30×30 м² может обеспечить регистрацию скоростей ветра в диапазоне от $30 \text{ м} \times \text{с}^{-1}$ до $5 \text{ м} \times \text{с}^{-1}$ в зависимости от высоты в

слое 100 ...1000м. На больших высотах (от 1000 м до 2000 м) может регистрироваться диапазон скоростей ветра от 5 мкс^{-1} до $2,5 \text{ мкс}^{-1}$. Численным анализом показано, что приемлемая точность измерения скорости ветра ($\sigma_V < 0,2 \text{ мкс}^{-1}$) и направления ветра ($\sigma_\psi < 3^\circ$) обеспечиваются точностью измерения сноса пятна $\sigma_{\Delta R} \leq 0,1$ м при $V > C/z$ и погрешности измерения интенсивности поля около 10%.

Выбор диаметра фокального пятна $2\rho = 4,8$ м согласно (3) соответствует уровню 0,6 интенсивности электромагнитного поля в плоскости апертуры многоэлементной антенны при диаметре передающих антенн 3 м (ширина диаграммы направленности по мощности $2\theta_a = 7,5^\circ$ и $2\theta_t = 15^\circ$). В результате было предложено радиоприемное поле с количеством антенн 15×15 ($d = 2,1$ м; $d/\rho = 0,87$; $\sigma_{\Delta R} < 0,5$ м) и 21×21 ($d = 1,4$ м; $d/\rho = 0,6$; $\sigma_{\Delta R} < 0,1$ м).

При обработке с априорной информацией фактически требуется только появление сигнала достаточного уровня в любых трех антеннах, что позволяет снизить количество элементов сети до 8×8 ... 10×10 и создает возможность уменьшения числа каналов приемника, обрабатывающих одновременно перехватываемые сигналы.

Приведенные результаты оптимизации и первый из предложенных алгоритмов пространственной обработки сигнала учитывались при разработке структурной схемы и аппаратуры установки РАЗ в ПНИЛ ЗА.

Заключение

На основе проведенных теоретических исследований применение вертикального зондирования системой РАЗ выбранных технических характеристик с многоэлементной радиоприемной антенной эффективно при измерении температуры, скорости и направления ветра в АПС. При разработке оптимальной конструкции многоэлементной антенны для экологического мониторинга согласование технических задач с выбором одного из приведенных алгоритмов обработки позволяют сочетать требования практичности (уменьшения количества элементов сети) и повышения точности измерений.

Список литературы: 1. Исии Е, Ямасаки Я., Кодзима Ю. и др. Система дистанционного измерения высотных профилей ветра и температуры // Нихон мусэн гихо (яп.). 1984. № 22. С. 37 – 41. 2. Tanahashi K., Masuda I. and Inuki H. et al. Analysis of an acoustic wave front in the atmosphere to profile the temperature and wind // Proc. 5th int. conf. antennas and propag. (ICAP 87). 1987. Hestington, March 30 Apr. 2, P. 2, London. P. 339 – 342. 3. R.I. Doviak, S.A. Cohn, C.I. Holloway and Latatis R.I. The Theory of Spaced Antenna Profilers; Theoretical Calculation of their Performance and Comparison with Doppler Beam Swinging Profilers // COST-76 Profiler Workshop. 1997. Engelberg, May 12-16, Ext. Abstracts, V.1, P. 102 – 105. 4. Hirsch L., Peters G. Estimation of momentum-flux profiles using the Doppler-Beam-Swinging technique and the Multiple-Receiver technique a Radar – RASS wind profiler // Там же, С. 115 – 118. 5. Hirsch L. Spaced -Antenna-Drift measurements of the horizontal wind speed using a FMCW-Radar-RASS // Proc. 8th Int. Symp. on Acoustic Remote Sens. (ISARS' 96) .1996. May 27 – 31, Moscow , P. 3.23 – 3.28. 6. Бабкин С.И., Груша Г.В., Прошкин Е.Г. Оптимизированное антенное устройство для системы радиоакустического зондирования пограничного слоя атмосферы // Межд. конф. «Теория и техника антенн»:Тез.докл.1995. 21 – 23 ноября, Харьков. С. 116. 7. Каллистратова М.А., Кон А.И. Радиоакустическое зондирование атмосферы. М.: Наука,1985. 187 с. 8. Бабкин С.И., Груша Г.В. Применение параметрической априорной информации для пространственной обработки сигналов // 3-я Межд. конф. «Теория и техника передачи, приема и обработки информации»:Тез.докл. 1997. 16 – 18 сент., Харьков-Туапсе., С. 63.