

Д.А. Денисенков¹
В.Ю. Жуков²

D.A. Denisenkov
V.Yu. Zhukov

**ОБНАРУЖЕНИЕ СДВИГА ВЕТРА
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА КАРТ ШИРИНЫ
СПЕКТРА СИГНАЛА, ПРИНИМАЕМОГО
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМ
РАДИОЛОКАТОРОМ**

**THE DETECTION OF WIND SHEAR
ON THE BASIS OF THE ANALYSIS
MAPS SPECTRUM WIDTH
OF THE SIGNAL RECEIVED
BY THE WEATHER RADAR**

Разработана аналитическая модель пространственного распределения ширины спектра радиальных скоростей частиц метеорологических образований при его наблюдении метеорологическим радиолокатором под малыми углами места. Проанализировано несколько характерных вариантов структуры ветра. Представлены способы обнаружения наличия сдвига ветра и определения его параметров.

Ключевые слова: математическая модель, ширина спектра радиальных скоростей частиц, метеорологический радиолокатор, сдвиг ветра.

There has been developed a mathematical model of the spatial distribution spectral width of radial velocities particles of the meteorological formations in the time of observing by weather radar at low elevation angles. There has been analyzed some specific options surface of wind patterns. The way of detect the presence of wind shear has been presented for each option and has been determined its parameters.

Keywords: mathematical model, spectral width of radial velocities particles, weather radar, wind shear.

Для авиации большой интерес представляет информация о наличии такого опасного явления, как сдвиг ветра в пограничном слое атмосферы высотой до 500 м [1]. Современные метеорологические радиолокаторы предоставляют информацию о наличии данных явлений, но не с требуемым разрешением и не в указанном диапазоне высот [2]. В связи с этим большой интерес представляет исследование информации, которая может быть извлечена из поставляемых ими карт ширины спектра сигнала (рис. 1).

¹ Инженер кафедры технологий и средств геофизического обеспечения войск ФГКОУ ВПО «Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации (ВКА им. А.Ф. Можайского).

² Кандидат технических наук, старший научный сотрудник 32 отдела ВНИИ ФГКОУ ВПО «Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации (ВКА им. А.Ф. Можайского).

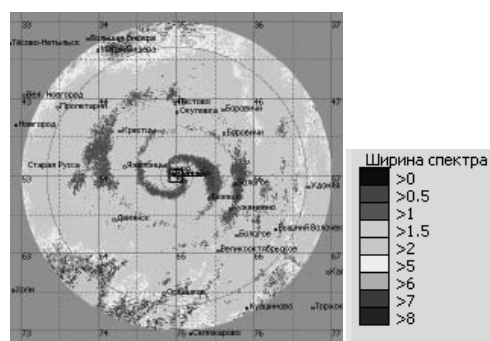


Рис. 1. Карта распределения ширины спектра по поверхности конического разреза

Авторами была выдвинута гипотеза о тесной связи вертикального профиля ветра с особенностями пространственного распределения параметра на указанных картах [3]. Для ее подтверждения была разработана аналитическая модель, с помощью которой получены карты для трех видов изменения ветра с высотой:

- 1) два слоя гидрометеоров с различными векторами скорости в каждом из них (рис. 2а);
- 2) два слоя, в одном из которых скорость ветра равномерно изменяется по величине (рис. 2б);
- 3) два слоя с равномерным изменением

скорости и направления ветра в одном из них (рис. 2в).

Достаточно сравнить рис. 1 и 2в, чтобы убедиться в том, что гипотеза хорошо согласуется с реальными результатами.

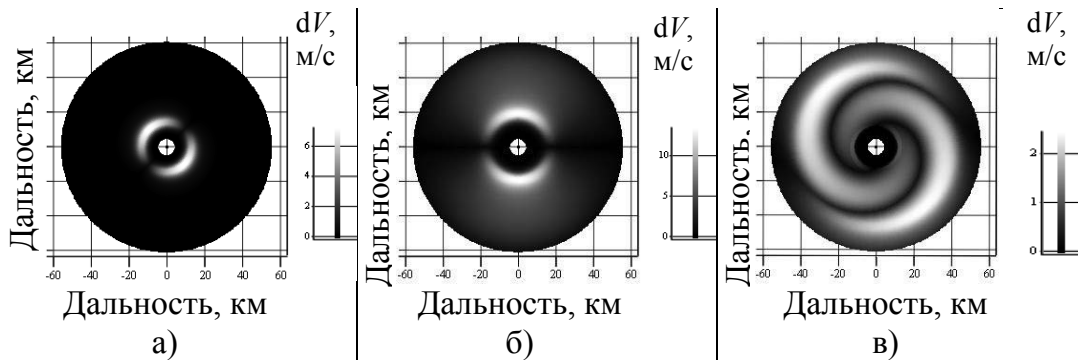


Рис. 2. Карты распределения ширины спектра по поверхности конического разреза

Следующий шаг – решение обратной задачи восстановления профиля ветра на основе анализа полученной карты. Для этого была разработана математическая модель пространственного распределения ширины спектра радиальных скоростей гидрометеоров, на основании которой возможно не только обнаружить сдвиг ветра, но и оценить его количественные характеристики.

В поставленной задаче было принято, что метеоцель состоит из двух смежных слоев с разными отражаемостью, направлением и скоростью ветра в каждом из них. Параметры слоев следующие:

– первый слой: диапазон высот – от 0 до h_1 , отражаемость слоя – Z_1 , скорость и направление ветра постоянны и равны соответственно V_1 и γ_1 , ширина спектра скоростей σ_1 ;

– второй слой: диапазон высот – от h_1 до бесконечности, отражаемость – Z_2 , скорость и направление ветра в общем случае изменяются с высотой в соответствии с функциями $V_2(h)$ и $\gamma_2(h)$, ширина спектра скоростей – σ_2 .

Ширина спектра суммарного сигнала $S(w)$, состоящего из двух составляющих $S_1(w)$ и $S_2(w)$, определяется формулой [4]

$$\sigma^2 = \frac{1}{P_1 + P_2} \left[P_1 \sigma_1^2 + P_2 \sigma_2^2 + \frac{P_1 P_2}{P_1 + P_2} (F_1 - F_2)^2 \right], \quad (1)$$

где F_1 и F_2 – средние частоты, а P_1 и P_2 – мощности сигналов от первого и второго слоев соответственно.

На основе созданной численной модели принимаемого радиолокатором сигнала исследовано пространственное распределение ширины

спектра для четырех характерных вариантов структуры приземного ветра.

Первый вариант метеообстановки – «скачок» вектора скорости – два слоя с разной отражаемостью и разным направлением ветра в каждом из них.

В этом случае наибольшего значения ширина спектра достигает при равенстве мощностей отражений от обоих слоев и при азимуте антенны, на котором значение разности $F_1 - F_2$ максимально и соответствует вектору разности скоростей $\vec{V}_1 - \vec{V}_2$ (рис. 3).

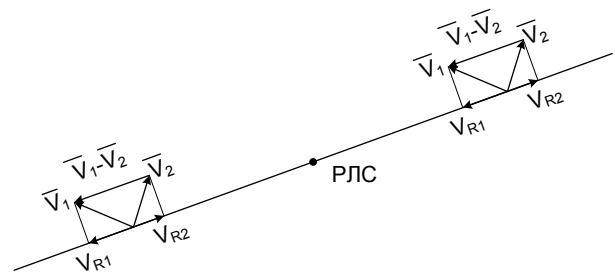


Рис. 3. Формирование максимума ширины спектра сигнала при «скачке» вектора скорости

Величины σ_1 и σ_2 можно оценить по отражениям от соседних элементов разрешения, в которых присутствует только один из слоев. Тогда сдвиг ветра ΔV определяется по формуле

$$\Delta V = V_1 - V_2 = \frac{\lambda}{2} \sqrt{4\tilde{\sigma}^2 - 2\tilde{\sigma}_1^2 - 2\tilde{\sigma}_2^2}, \quad (2)$$

где V_1 – скорость ветра в нижнем слое, V_2 – скорость ветра в верхнем слое, $\tilde{\sigma}$ – оценка величины σ , λ – длина волны.

Второй вариант метеобстановки – «сдвиг ветра без поворота».

Ветер во втором слое меняется с высотой по закону

$$V_2 = V_1 + W(h - h_1), \quad h \geq h_1. \quad (3)$$

Аппроксимируем поперечный разрез разрешаемого объема квадратом (рис. 4), равным по площади кругу с радиусом $r = \frac{R\theta}{2}$ (θ – ширина ДН антенны; R – наклонная дальность центра элемента разрешения).

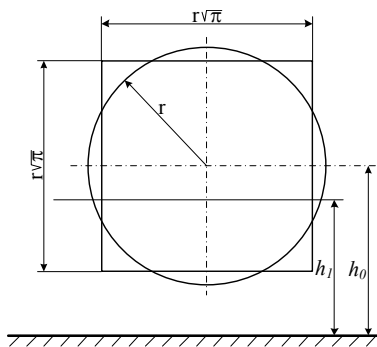


Рис. 4. Аппроксимация элемента разрешения

Средняя частота спектра сигнала, отраженного вторым слоем, вычисляется по формуле:

$$F_2 = \int_{h_1}^{h_0 + \frac{r\sqrt{\pi}}{2}} f(h) p(h) dh, \quad (4)$$

где $f(h)$ – доплеровский сдвиг частоты, $p(h)$ – распределение мощности отражений по высоте, принимаемое равномерным, r – радиус поперечного разреза разрешаемого объема, h_0 – высота центра элемента разрешения.

Ширина спектра сигнала, отраженного вторым слоем, вычисляется по формуле:

$$\sigma_2^2 = \int_{h_1}^{h_0 + \frac{r\sqrt{\pi}}{2}} (f(h) - F_2)^2 p(h) dh. \quad (5)$$

После вычисления формул (4), (5) и подстановки результатов в (1) получаем

$$\sigma^2 = \frac{1}{P_1 + P_2} \left[P_1 \sigma_1^2 + \frac{W^2 A^2 P_2 (P_2 + 4P_1)}{3\lambda^2 (P_1 + P_2)} \right], \quad (6)$$

где $A = h_0 + \frac{r\sqrt{\pi}}{2} - h_1$.

После ряда математических преобразований приходим к выражению

$$\sigma^2 = \frac{P_1 \sigma_1^2}{P_1 + P_2} + \frac{W^2 \pi r^2 x^2 (4\varepsilon + (1 - 4\varepsilon)x)}{3\lambda^2 (\varepsilon + (1 - \varepsilon)x)^2}, \quad (7)$$

где $x = \frac{A}{r\sqrt{\pi}}$, $\varepsilon = \frac{Z_1}{Z_2}$.

Второе слагаемое в формуле (7) имеет максимум только при условии $\varepsilon > 1$ (как правило, выполняемое), который достигается при нахождении x в интервале $0,95 \leq x < 1$, т.е. в случае, когда разрешаемый объем радиолокатора почти полностью «вышел» из нижнего слоя. Значение максимума невелико и не превышает 120% от той ширины спектра, которая обусловлена сдвигом ветра во втором слое. Следовательно, для оценивания величины W достаточно измерить ширину результирующего спектра на дальности, превышающей на 5% дальность расположения максимума. В этом случае $\varepsilon = 0$, $x = 1$ и из (7) получаем $W = \frac{\sqrt{3}\lambda\sigma}{r\sqrt{\pi}}$.

Третий вариант метеобстановки – «поворот ветра без сдвига».

Направление ветра во втором слое меняется с высотой по закону

$$\gamma_2 = \gamma_1 + \Delta(h - h_1), \quad h \geq h_1. \quad (8)$$

Как было показано в [3], показателем существования рассматриваемой метеобстановки служит появление на карте ширины спектра сигнала характерного распределения минимального значения измеряемого параметра в виде спирали. Следовательно, для оценивания скорости поворота ветра с высотой, надо найти формулу последней, т.е. зависимость дальности точки, в которой наблюдается минимум ширины спектра, от азимута антенны радиолокатора.

Используя принятую ранее аппроксимацию импульсного объема, находим среднюю частоту спектра сигнала, отраженного вторым слоем

$$F_2 = \int_{h_1}^{h_0 + \frac{r\sqrt{\pi}}{2}} f(h) p(h) dh = \frac{2V_1 \cos(\alpha)}{\Delta\lambda \left(h_0 + \frac{r\sqrt{\pi}}{2} - h_1 \right)} \times \left(\sin \left(\varphi - \gamma_1 - \Delta \left(h_0 + \frac{r\sqrt{\pi}}{2} - h_1 \right) \right) - \sin(\varphi - \gamma_1) \right). \quad (9)$$

Условием минимума σ^2 будет

$$F_2 = F_1 = \frac{2V_1}{\lambda} \cos(\varphi - \gamma_1) \cos(\alpha). \quad (10)$$

Обозначим

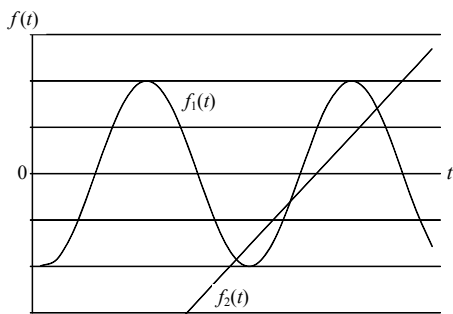
$$t = \Delta \left(h_0 + \frac{r\sqrt{\pi}}{2} - h_1 \right), \quad (11)$$

$$a = \varphi - \gamma_1 \quad (12)$$

и перепишем (9) с учетом (11) и (12). Получаем

$$\sin(a - t) = t \cos(a) + \sin(a). \quad (13)$$

Решить данное уравнение возможно только графическим способом [5]. Пример такого решения для $a = 0,5$ представлен на рис. 5.



$$f_1(t) = \sin(a-t), \quad f_2(t) = t \cos(a) + \sin(a)$$

Рис. 5. Пример решения уравнения (12)

Четвертый вариант метеобстановки – «сдвиг ветра с поворотом».

Ветер во втором слое меняется с высотой по закону

$$V_2 = (V_1 + W(h - h_1)) \cos(\gamma_1 + \Delta(h - h_1)), \quad h \geq h_1. \quad (14)$$

Средняя частота спектра сигнала, отраженного вторым слоем,

$$F_2 = \int_{h_1}^{h_0 + \frac{r\sqrt{\pi}}{2}} f(h) p(h) dh = \quad (15)$$

$$= \int_{h_1}^{h_0 + \frac{r\sqrt{\pi}}{2}} \frac{2(V_1 + W(h - h_1))}{\lambda \left(h_0 + \frac{r\sqrt{\pi}}{2} - h_1 \right)} \cos(\varphi - (\gamma_1 + \Delta(h - h_1))) dh.$$

Используя принятые ранее обозначения, получаем

$$F_2 = \frac{2V_1}{\Delta A \lambda} (\sin(a-t) - \sin(a)) + \frac{2W}{\Delta^2 A \lambda} (t \sin(a-t) + \cos(a) \cos(a-t)). \quad (16)$$

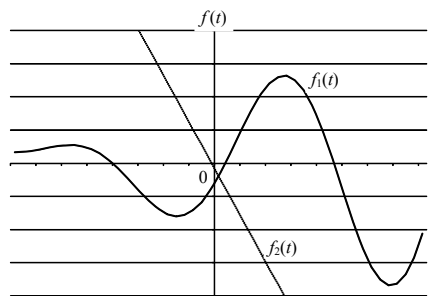
Минимум наступает при условии $F_2 = F_1$. В итоге приходим к выражению

$$\begin{aligned} \sin(a-t) + \frac{W}{V_1 \Delta} t \sin(a-t) - \frac{W}{V_1 \Delta} \cos(a-t) = \\ = t \cos(a) + \sin(a) - \frac{W}{V_1 \Delta} \cos(a) \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{W}{V_1 \Delta} t \right) \sin(a-t) - \frac{W}{V_1 \Delta} \cos(a-t) = \\ = t \cos(a) + \sin(a) - \frac{W}{V_1 \Delta} \cos(a). \quad (17) \end{aligned}$$

Пример графического решения данного уравнения представлен на рис. 6.



$$f_1(t) = \left(1 + \frac{W}{V_1 \Delta} t \right) \sin(a-t) - \frac{W}{V_1 \Delta} \cos(a-t),$$

$$f_2(t) = t \cos(a) + \sin(a) - \frac{W}{V_1 \Delta} \cos(a)$$

Рис. 6. Пример графического решения уравнения (16)

Заключение

Из приведенных расчетов следует, что получаемые современными метеорологическими радиолокаторами карты ширины спектра принимаемого сигнала несут информацию о распределении вектора скорости ветра по высоте в пограничном слое атмосферы. Характеристики этого распределения могут быть оценены по максимальному значению параметра на указанной карте и по образующейся зависимости его минимального значения от азимута антенны.

Литература

1. Руководство по сдвигам ветра ИКАО.
2. Довиак Р., Зрнич Д. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 512 с.
3. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю. Исследование влияния профиля ветра в пограничном слое на пространственное распределение ширины спектра: труды III Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». – СПб., 2014. – С. 65–71.
4. Жуков В.Ю., Щукин Г.Г. Обоснование метода оценивания доплеровского сдвига частоты эхо-сигнала метеообразований при негауссовой форме их спектра // III Всероссийские Армандовские чтения: материалы IV Всероссийской научной конференции «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике». – Муром, 2013. – С. 174–180.
5. Крюковский А.С. Каустическая и лучевая структуры отраженных радиоволн в линейном плазменном слое // Вестник Российского нового университета. – 2011. – Вып. 4. Управление, вычислительная техника и информатика. – С. 12–22.