

Исследование зависимости пространственного распределения ширины спектра радиолокационного сигнала от распределения ветра по высоте в пограничном слое атмосферы.

Д.А.Денисенков, В.Ю.Жуков, Г.Г.Щукин.

Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского» Министерства обороны Российской Федерации.

197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13. e-mail: yka@mil.ru.

Разработаны математические модели пространственного распределения ширины спектра радиальных скоростей частиц метеообразования при наблюдении его метеорологическим радиолокатором под малыми углами места. Рассмотрены несколько характерных вариантов изменения параметров ветра с высотой: два слоя с различным направлением ветра; сдвиг ветра по величине в верхнем слое; поворот ветра в верхнем слое. Объясняется механизм формирования особенностей распределения ширины спектра в каждом рассмотренном случае. Ключевые слова: численная модель, ширина спектра радиальных скоростей частиц, метеорологический радиолокатор, сдвиг ветра.

There has been developed mathematical models of the spatial distribution spectral width radial velocities particles of the meteorological formations in the time of observing by weather radar at low elevation angles. There has been considered some specific ways of changing the wind parameters with height: two layers with different wind direction; wind shear in magnitude in the upper layer; the wind rotation in the upper layer. The mechanism of formation the distribution spectral widths has been explained for each application.

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

Реализуемые в современных когерентных метеорологических радиолокаторах системы обработки информации позволяют строить высотный профиль ветра в диапазоне высот от 1 до 15 км с разрешающей способностью 0,5 – 1 км. Для этого используются оценки средней радиальной скорости элементарных отражателей и закономерности их изменения, вызванного сканированием антенны, на каждой из исследуемых высот [1]. Самый же актуальный для авиации пограничный слой толщиной 500м остается необследованным [2]. Для устранения данного недостатка в рамках принятой технологии измерений требуется внесение значительных изменений в конструкцию радиолокатора, что связано с большими затратами средств. Поэтому интерес представляет нахождение способа построения профиля ветра в интересующей области именно в уже установленных радиолокаторах без внесения изменений в их конструкцию.

В данном докладе представлена гипотеза о тесной связи вертикального профиля ветра с особенностями и параметрами пространственного распределения параметра на картах ширины спектра радиальных скоростей гидрометеоров. Описана численная модель принимаемого радиолокатором сигнала и на ее основе исследовано пространственное распределение ширины спектра для 3-х вариантов структуры приземного ветра. Выявлены характерные особенности, анализируя которые, можно давать качественные оценки вертикального профиля ветра в приземном слое. Так же в данном докладе представлена разработанная математическая модель пространственного распределения ширины спектра радиальных скоростей гидрометеоров и определены количественные характеристики, на основании которых

возможно по получаемой радиолокатором карте восстанавливать вертикальный профиль ветра.

Численная модель пространственного распределения ширины спектра радиальных скоростей.

В поставленной задаче были приняты следующие исходные данные:

1. Радиолокатор сканирует пространство при фиксированном угле места β на дальностях от R_{min} до R_{max} в диапазоне азимутов $\alpha=(0\div359)^\circ$. Ширина диаграммы направленности антенны $\theta=1^\circ$.

2. В качестве модели среды была взята модель с двумя смежными слоями с разной отражаемостью, разным направлением ветра и разной скоростью ветра в каждом из них. В расчете среда описывается тремя векторами:

$K(h)$ – вектор, описывающий распределение отражаемости частиц по высоте;

$V(h)$ – вектор, описывающий распределение скорости движения частиц по высоте;

$\varphi(h)$ – вектор, описывающий распределение направления движения частиц по высоте.

Проекция радиальной скорости движения частиц в пространстве на вектор направления антенны рассчитывается по формуле:

$$V_r(h, \varphi) = V(h) \cos(\varphi(h) - \varphi) \cos(\theta) \quad (1)$$

где V – скорость движения частиц,

φ – направление движения частиц,

h – высота.

Диаграмма направленности антенны описывается гауссовой плотностью распределения

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi} R \sin(\theta/2)} e^{-\frac{(h - R \operatorname{tg}(\beta))^2}{2 \left(\frac{R}{3} \operatorname{tg}(\theta/2)\right)^2}} \quad (2)$$

где R – наклонная дальность,

θ – ширина диаграммы направленности антенны на уровне 0,1 по мощности.

Значения гармоник энергетического спектра и ширина последнего рассчитываются по следующим формулам:

$$S(h) = A(h)K(h) \quad (3)$$

$$\Delta V(h_0, \varphi) = \sqrt{\sum_n [(V_r(h_n, \varphi) - M(h_0, \varphi))^2 S(h_n)]} \quad (4)$$

где

$$M(h_0, \varphi) = \sum_n (V_r(h_n, \varphi) S(h_n)) \quad (5)$$

h_0 – высота расположения центра элемента разрешения.

Результаты моделирования.

На основе созданной численной модели принимаемого радиолокатором сигнала исследовано пространственное распределение ширины спектра для 3-х характерных вариантов структуры приземного ветра. Угол места антенны $\beta = 2,5^\circ$ и ширины диаграммы направленности $\theta = 1^\circ$ одинаковы во всех трех случаях. Параметры первого нижнего слоя атмосферы также во всех случаях одинаковы и составляют:

расположение слоя – от 0 до 500 м; скорость ветра $V1=10\text{ м/с}$; направление ветра $\varphi1=0^\circ$; отражаемость $K1=1$.

В слое выше 1000 метров цели отсутствуют ($K3=0$).

1. Первый вариант метеообстановки – два слоя с разной отражаемостью и разным направлением ветра в каждом из них.

Второй слой находится на высотах от 500 до 1000 метров и имеет следующие параметры ветра: скорость ветра $V2=10\text{ м/с}$, направление ветра $\varphi2=90^\circ$, отражаемость $K2=0,3$.

Результаты моделирования представлены на рис.1а.

На рисунке видны две зоны повышенного значения ширины спектра радиальных скоростей в виде двух полуокружностей. Данные полуокружности расположены симметрично относительно оси, направленной под углом $\psi = (\varphi2 - \varphi1)/2$.

Формирование данной картины можно объяснить следующим образом:

- на малых дальностях, когда в разрешаемый объем попадает только нижний слой, в спектре присутствует лишь одна, соответствующая ему составляющая. Ширина спектра при этом минимальна,

- по мере увеличения дальности, в луч радиолокатора начинает попадать второй слой, что ведет к росту соответствующей ему спектральной составляющей и уменьшению мощности отражений от первого слоя. Ширина спектра увеличивается,

- на некоторой дальности мощности обеих составляющих выравниваются, и ширина спектра становится максимальной,

- с дальнейшим ростом расстояния увеличивается составляющая от второго слоя, а от первого постепенно сходит на нет. Ширина спектра уменьшается и достигает минимума, когда разрешаемый объем полностью выходит за пределы нижнего слоя.

2. Второй вариант – два смежных слоя со сдвигом ветра по величине во втором.

Верхний слой находится на высотах от 500 до 1000 метров и имеет следующие параметры ветра:

- скорость ветра изменяется с высотой по закону $V2=V1+\Delta V \times H$, м/с, где H – высота, ΔV – скорость изменения величины ветра с высотой, которая принималась равной 45 м/с на 500 м;

- направление ветра $\varphi2=0^\circ$;

- отражаемость $K2=0,3$.

Результаты моделирования представлены на рис.1б.

На нем так же, как и в первом варианте, видны две зоны повышенного значения ширины спектра радиальных скоростей в виде двух полуокружностей. Данные полуокружности расположены симметрично относительно оси, направленной под углом 90° .

3. Третий вариант – два смежных слоя со сдвигом ветра по направлению во втором.

Верхний слой №2 находится на высотах от 500 до 1000 метров и имеет следующие параметры ветра:

- скорость ветра $V2 = 10\text{ м/с}$,

- направление ветра $\varphi2=\Delta\varphi \times H$, где H высота, $\Delta\varphi$ - скорость изменения направления ветра, значение которой принималось равным 90° на 500 м;

- коэффициент отражаемости $K2=0,3$.

Результаты моделирования представлены на рис.1в.

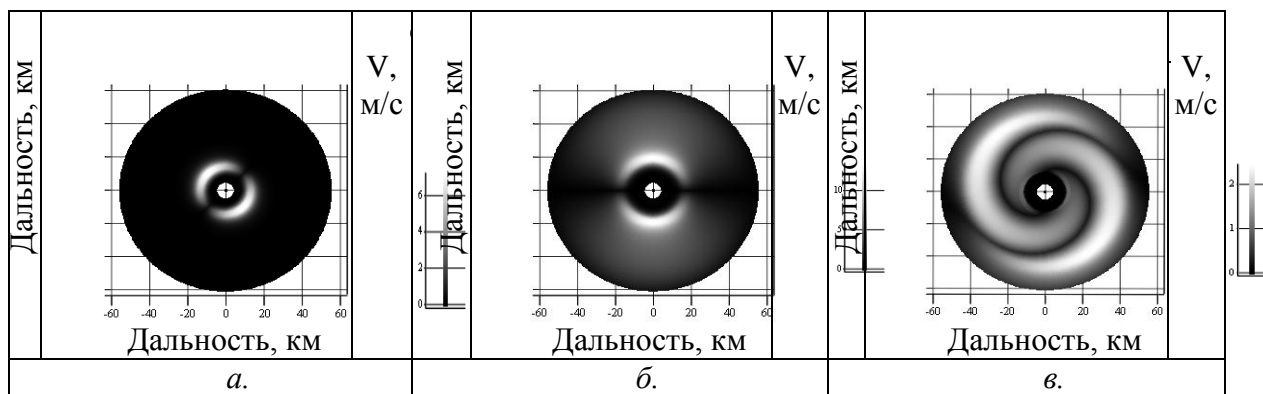


Рис.3. Карта распределения ширины спектра по поверхности конического разреза для 3-х вариантов.

На данном рисунке четко просматривается асимметрия зон повышенного значения ширины спектра радиальных скоростей, являющаяся следствием наличия сдвига ветра.

На представленных выше картах распределения ширины спектра по конической поверхности, полученных в результате моделирования, прослеживаются особенности, характерные для каждого случая вертикального профиля ветра. Анализируя данные особенности можно давать качественные оценки вертикального профиля ветра в приземном слое.

Аналитическая модель пространственного распределения ширины спектра радиальных скоростей.

Для определения количественных показателей пространственного распределения рассматриваемого параметра с целью решения обратной задачи – по получаемой карте восстанавливать вертикальный профиль ветра – авторами разработана математическая модель пространственного распределения ширины спектра радиальных скоростей гидрометеоров и определены количественные характеристики, на основании которых возможно по получаемой радиолокатором карте восстанавливать вертикальный профиль ветра.

В поставленной задаче были приняты следующие исходные данные:

Метеоцель состоит из двух смежных слоев с разной отражаемостью, разным направлением ветра и разной скоростью ветра в каждом из них:

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

2. 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 ;

λ – длина волны; θ – ширина ДН антенны; α – угол места антенны; R – наклонная дальность центра элемента разрешения; φ – азимут антенны; h_0 – высота центра элемента разрешения.

Ширина спектра суммарного сигнала $S(\square)$, состоящего из двух составляющих $S_1(\square)$ и $S_2(\square)$ (со средними частотами F_1 и F_2 , СКО σ_1 и σ_2 , мощностями P_1 и P_2) определяется формулой

$$\sigma^2 = \frac{1}{P_1 + P_2} \left[P_1 \sigma_1^2 + P_2 \sigma_2^2 + \frac{P_1 P_2}{P_1 + P_2} (F_1 - F_2)^2 \right] \quad (6)$$

На основе созданной численной модели принимаемого радиолокатором сигнала исследовано пространственное распределение ширины спектра для 4-х характерных

вариантов структуры приземного ветра. В данном докладе представлены результаты для двух вариантов.

1. Первый вариант метеобстановки - «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.2).

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

$$\frac{\Gamma}{2} \sqrt{4\sigma^2 - 2\sigma_1^2 - 2\sigma_2^2} \quad (7)$$

где Γ – оценка величины σ .

2. Второй вариант метеобстановки - распределенный по высоте сдвиг ветра без поворота.

Ветер во втором слое меняется с высотой по закону

$$V_2 = V_1 + W(h - h_1), \quad h \geq h_1 \quad (8)$$

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

$$F_2 = \int_{h_1}^{h_0 + \frac{r\sqrt{\pi}}{2}} f(h)p(h)dh \quad (9)$$

где $f(h)$ – доплеровский сдвиг частоты,

$p(h)$ – распределение мощности отражений по высоте,

r – радиус поперечного разреза разрешаемого объема.

Ширина спектра сигнала, отраженного вторым слоем, вычисляется по формуле

$$\sigma_2^2 = \int_{h_1}^{h_0 + \frac{r\sqrt{\pi}}{2}} (f(h) - F_2)^2 p(h)dh \quad (10)$$

После вычисления (9) и (10) подстановки в (6) получаем

$$\sigma^2 = 1/(P_1 + P_2) [P_1 \sigma_1^2 + (W^2 A^2)/(3^2) (P_2 (P_2 + 4P_1)) / ((P_1 + P_2))] \quad (11)$$

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

В результате после ряда математических преобразований приходим к выражению

$$\sigma^2 = (P_1 \sigma_1^2)/(P_1 + P_2) + (W^2 \pi^2)/(3^2) (x^2 (4^x (1 - 4^x)^x) / (1 - 4^x)^2) \quad (12)$$

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

Второе слагаемое в формуле (12) 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 $\varepsilon = 0$ и $x = 1$. Из (12) получаем $W = (\sqrt{3} \cdot (C)) / (r\sqrt{O})$.

Отдельно стоит вопрос различения случаев «скачка» и сдвига ветра. Критерий – различное поведение ширины спектра сигнала. В первом случае имеет место аномальное увеличение параметра в виде всплеска с дальнейшим успокоением. Во втором ширина спектра аномальных величин вообще не достигает, а медленно дорастает (возможно, с появлением одного неявного максимума) до величины,

соответствующей равномерно распределенного по высоте разрешаемого объема скорости.

Литература.

1. Довиак Р., Зрнич Д. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения. Л.: Гидрометеоздат, 1988, 512с.
2. Наставление по метеорологическому обеспечению гражданской авиации России (НМО ГА-95).