

## **Исследование эффективности методов радиолокационного измерения профиля ветра**

Д.А. Денисенков, В.Ю. Жуков

*Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, 197198 г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13, e-mail: dimasden@yandex.ru*

*Оцениваются эффективности двух радиолокационных методов определения сдвига ветра путем сравнения получаемых ими оценок параметров с данными аэрологического зондирования атмосферы. Доказывается преимущество метода, основанного на анализе оценок ширины спектра принимаемого сигнала по сравнению с методом VAD.*

*There has been compared the effectiveness of two radar methods of determining wind shear and measurement of its parameters. There has been proved the advantage of the method is based on the estimates of the spectral width of the received signal compared to the VAD.*

### **Введение**

**Сдвиг ветра** – векторная разность (или градиент) скоростей ветра в двух точках пространства, отнесенная к расстоянию между ними. Для воздушного судна сдвиг ветра является опасным явлением [1]. Внезапное возникновение сдвига ветра на малой высоте при взлёте и посадке много раз приводило к авиакатастрофам из-за малого запаса по высоте и скорости.

Решение задачи обнаружения и измерения величины сдвига ветра возможно либо контактными методами, либо дистанционными. Очевидно, что оперативный мониторинг атмосферы с целью обнаружения сдвига ветра реализуется только в рамках дистанционных. К ним относятся несколько групп систем: оптические – лидары [2]; акустические измерители ветра – содары [3, 4]; радиоакустические [5]; радиолокационные. По ряду критериев, наиболее перспективным является обнаружение сдвига ветра с помощью когерентного метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С. В настоящее время он становится штатным средством аэропортов, и его использование для обнаружения сдвига ветра не требует дополнительных затрат на оборудование.

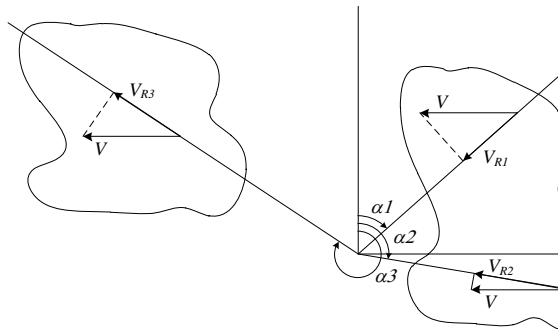
Известны следующие методы радиолокационного обнаружения сдвига ветра и определения его параметров:

- путем восстановления вертикального профиля ветра методом VAD (азимутального дисплея скорости);
- непосредственное оценивание сдвига ветра по ширине спектра радиальных скоростей гидрометеоров.

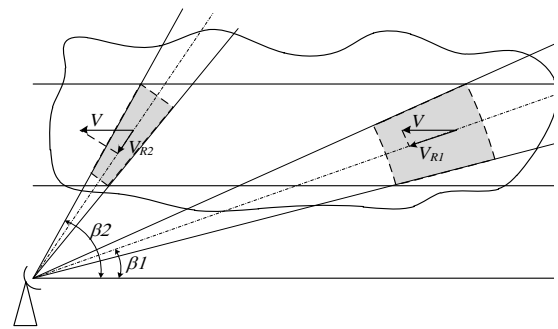
Ниже кратко рассмотрим оба метода.

### **Метод VAD.**

Он основан на оценивании средней частоты спектра принимаемого сигнала и вычислении по нему средней по разрешаемому объему радиальной скорости гидрометеоров. В процессе обзора локатором окружающего пространства получается массив оценок данного параметра в каждом элементе разрешения, расположенного в рассматриваемом слое, как это показано на рисунках 1 и 2.



**Рис.1. Сканирование в горизонтальной плоскости.**



**Рис.2. Сканирование в вертикальной плоскости.**

Аппроксимируя изменения радиальных скоростей  $V_R$  функцией [6]

$$V_R = V \cos(\theta - \alpha) \cos(\beta), \quad (1)$$

где  $V$  – величина вектора средней по слою горизонтальной скорости ветра,

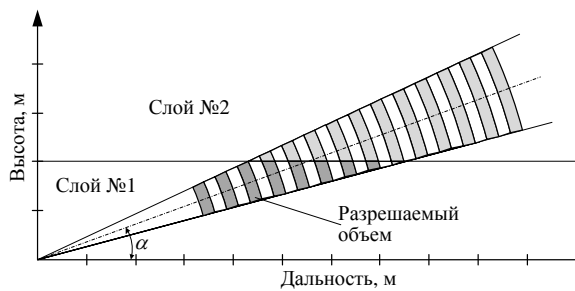
$\theta$  – направление вектора средней по слою горизонтальной скорости ветра,

$\alpha$  и  $\beta$  – текущие значения азимута и угла места антенны радиолокатора, находят оценки величины и направления скорости ветра в интересующем нас слое пространства.

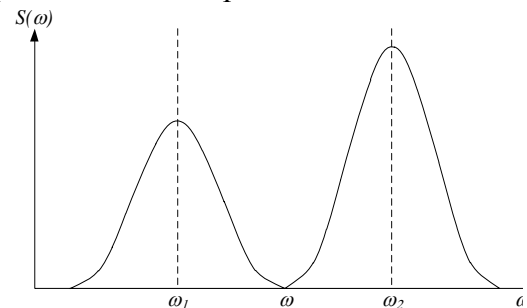
Рассчитав скорость ветра для различных горизонтальных слоёв окружающего пространства, получают вертикальный профиль ветра.

### **Обнаружение сдвига ветра по оценкам ширины спектра принимаемого сигнала**

Метод основан на эффекте появления anomalously широкого спектра сигнала, отраженного от метеоцели, имеющей сложную внутреннюю структуру, а именно неравномерное распределение по высоте скоростей составляющих ее частиц [7]. Схема наблюдения радиолокатором такой цели, состоящей из двух слоев с различными скоростями гидрометеоров в каждой, представлена на рисунке 3 [8]. При определенных условиях (угол места и дальность) образуется ситуация, когда в зоне обзора радиолокатора присутствуют одновременно два горизонтальных отражающих слоя.



**Рис.3. Схема наблюдения радиолокатором двухслойной цели**



**Рис.4. Пример двухмодального спектра**

При этом, на малых дальностях элемент разрешения заполняется в основном нижним слоем, в то время как верхний захватывается лишь краем луча антенны. По мере увеличения дальности верхний слой смещается ближе к центру элемента разрешения, нижний же становится ближе к его краю. В результате весовые коэффициенты, с которыми суммируются сигналы от каждого из слоев, перераспределяются в пользу верхнего. Если радиальные составляющие скоростей частиц различны, спектр создаваемых ими отражений становится двухмодальным, что показано на рисунке 4. Ширина такого спектра становится anomalously большой, а ее

значение зависит от разности частот радиальных составляющих скоростей частиц, которая в свою очередь изменяется с изменением азимута антенны. Таким образом, при вращении антенны формируется характерная карта распределения ширины спектра по поверхности конического разреза.

Ширина спектра  $\sigma^2$  суммарного сигнала  $S(\omega)$ , состоящего из двух составляющих  $S_1(\omega)$  и  $S_2(\omega)$  определяется формулой [9]

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

где  $F_1$  и  $F_2$  – средние частоты 1 и 2 сигнала,

$P_1$  и  $P_2$  – мощности сигналов от первого и второго слоя,

$\sigma_1$  и  $\sigma_2$  – ширина спектра отражений от нижнего и верхнего слоёв.

### Теория эксперимента

Необходимо сравнить эффективности двух методов обнаружения и измерения величины сдвига: *метод VAD* и *метод на основе оценок ширины спектра принимаемого сигнала*. В качестве эталона измерений будем использовать ряд данных, полученных от аэрологического зондирования атмосферы.

*Методика сравнения.*

Для оценки эффективности методов были выбраны следующие критерии:

– оправдываемость величины обнаружения сдвига ветра  $P_{opr}$  – это вероятность обнаружения случаев исследуемым методом. Рассчитывается по формуле

$$P_{opr} = \frac{N_x}{N_{aэро}}, \quad (3)$$

где  $N_x$  – количество зафиксированных исследуемым методом случаев сдвига ветра, совпавших со сдвигами ветра, зафиксированных при аэрологическом зондировании,

$N_{aэро}$  – общее количество зафиксированных случаев сдвига ветра при аэрологическом зондировании.

– достоверность обнаружения сдвига ветра  $P_{доот}$  – это вероятность того, что обнаруженные исследуемым методом случаи сдвига ветра подтверждаются при аэрологическом зондировании. Рассчитывается по формуле

$$P_{доот} = \frac{N_x}{N}, \quad (4)$$

где  $N$  – общее количество зафиксированных исследуемым методом случаев сдвига ветра.

Алгоритм оценки эффективности метода следующий:

1. Получение радиолокационных и аэрологических данных.

В нашем распоряжении имеются данные радиолокатора ДМРЛ-С, расположенного в г. Валдай Новгородской области за зимний период с декабря 2011 по февраль 2012 гг. В качестве источника эталонных измерений было решено использовать ближайшую к нему аэрологическую станцию – Бологое(26298), данные которой брались на сайте Вайомингского университета [10].

2. Анализ данных, полученных с помощью радиолокатора ДМРЛ-С по оценкам ширины спектра принимаемого сигнала.

Были исследованы карты ширины спектра, полученные за зимний период с декабря 2011г. по февраль 2012г. радиолокатором ДМРЛ-С на моменты запуска зондов аэрологической станцией. За каждые сутки данные брались за 00:00 и 12:00 UTC. В некоторые дни радиолокатор не работал, поэтому вместо 182 карт было просмотрено 168. Рассматривался слой от 500 до 1500 м. На первом этапе из исходной выборки

исключались обзоры, проводимые в условиях малой отражаемости и малой бальности облачности. В результате были выбраны 19 карт, которые исследовались на предмет наличия характерных распределений параметра, указывающих на наличие сдвига ветра. На картах вертикальных разрезов фиксировались области аномально широкого спектра (ширина спектра радиальных скоростей равна или более 6 м/с), а так же высота и дальность, на которых они наблюдались. Далее проверялось, не вызвано ли расширение спектра простым уменьшением мощности отражений от просматриваемого участка метеоцели. Для этого использовались карты радиолокационной отражаемости. В результате были выявлены случаи с характерным чередованием зон малых и аномально больших значений, для которых в соответствии с формулой (2) рассчитывался сдвиг ветра. Он считался обнаруженным, если полученная оценка превышала пороговое значение 1 м/с на 30 м высоты. Для остальных выбранных карт полагалось, что сдвиг ветра отсутствует.

3. Анализ данных, полученных с ДМРЛ-С по методу VAD.

Радиолокатор ДМРЛ-С оснащён программой «ГИМЕТ-2011», в которой присутствует функция восстановления профиля ветра методом VAD. Были исследованы полученные этим методом графики зависимости направления и скорости ветра от высоты в те же периоды времени, которые были отобраны в п.2. Рассматривался слой от 500 до 1500 м. Расчет величины сдвига ветра проводился в соответствии с формулой

$$W_i = \frac{\sqrt{V_i^2 + V_{i+1}^2 - 2V_i V_{i+1} \cos(\theta_{i+1} - \theta_i)}}{h_{i+1} - h_i}, \quad (5)$$

где  $W_i$  – сдвиг ветра,

$h_i$  и  $h_{i+1}$  – высоты, на которых сделаны измерения,

$V_i$  и  $V_{i+1}$  – скорость ветра на этих высотах,

$\theta_i$  и  $\theta_{i+1}$  – направление ветра на этих высотах.

Критерием обнаружения сдвига ветра принималось превышение градиентом скорости величины 1 м/с на 30 м высоты.

4. Анализ данных аэрологического зондирования.

Были исследованы данные, полученные с аэрологической станции за те же периоды времени, которые были отобраны в п.2. Рассматривался слой от 500 до 1500 м. Для каждой пары смежных по высоте отсчетов скорости и направления ветра рассчитывался сдвиг ветра по формуле (5). Критерием обнаружения сдвига ветра считалось превышение градиентом скорости величины 1 м/с на 30 м высоты.

5. По данным, полученным в п.1, п.2 и п.3, вычислялись критерии оценки обоих методов  $P_{опр}$  и  $P_{дост}$  в соответствии с формулами (3) и (4).

### 3. Результаты

– в 7 случаях из 19 был зафиксирован сдвиг ветра, 6 из них подтверждаются аэрологией. В остальных 12 случаях было определено отсутствие сдвига ветра, при этом 11 из них подтверждены аэрологией, а один – не подтвержден. Соответственно, критерии эффективности метода следующие:  $P_{опр}=0,86$  и  $P_{дост}=0,86$ .

– методом VAD в 14 случаях из 19 был зафиксирован сдвиг ветра, 5 из них подтверждаются аэрологией. В остальных 5 случаях было определено отсутствие сдвига ветра, при этом 2 из них подтверждены аэрологией, а 3 – не подтверждены. Соответственно, критерии эффективности метода следующие:  $P_{опр}=0,625$  и  $P_{дост}=0,36$ .

По результатам сравнений видно, что метод на основе оценок ширины спектра принимаемого сигнала обладает лучшими характеристиками, по сравнению с методом VAD, у которого несколько хуже оправдываемость и гораздо хуже достоверность.

## Литература

1. Руководство по сдвигам ветра на малых высотах. Руководящий документ РД. Монреаль: Международная организация гражданской авиации, 2005. – 258 с.
2. Протопопов В.В., Устинов Н.Д. Лазерное гетеродинамирование. М.: Наука, 1985. – 288с.
3. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя. Томск: СО РАН, 2001. – 280с.
4. Новицкий М.А., Мазурин Н.Ф., Кулижникова Л.К., Калинечева О.Ю., Терев Л.А., Нечаев Д.Р., Сапронов В.Л. Сравнение данных измерений ветра при помощи выпускаемого промышленностью содара и высотной метеорологической мачты в Обнинске. Обнинск: Метеорология и гидрология, 2011. – № 10. – С.74-83.
5. Каллистратова М.А., Кон А.И. Радиоакустическое зондирование атмосферы. Москва: Наука, 1985. – 198с.
6. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Щукин Г.Г. Исследование возможности применения метеорологических радиолокаторов для обнаружения сдвига ветра в пограничном слое атмосферы. XIV Санкт-петербургская международная конференция «Региональная информатика «РИ-214». Материалы конференции. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2014, – С. 63-68.
7. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю. Оценивание характеристик высотного распределения скорости ветра в пограничном слое атмосферы с помощью карт ширины спектра сигнала, принимаемого метеорологическим радиолокатором. XXI Симпозиум по радиолокационному зондированию природных сред. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2014, – С.10-13.
8. 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.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2014, – С.65-71.
9. Щукин Г.Г., Жуков В.Ю. Об особенностях радиолокационных измерений радиальной скорости гидрометеоров при двухмодальном спектре отраженного ими сигнала. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2014, с.5-15
10. <http://www.weather.uwyo.edu>.