

А.А. Борисов¹
 А.Б. Маков²
 С.В. Чернышев³

A.A. Borisov
 A.B. Makov
 S.V. Chernyshev

**СПОСОБ ВОССТАНОВЛЕНИЯ
 ПОЛЯ ВЕТРА ПО ДАННЫМ
 ИЗМЕРЕНИЙ ДОПЛЕРОВСКОГО
 МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО
 РАДИОЛОКАТОРА**

**METHOD OF RECOVERY OF THE WIND
 FIELD ACCORDING TO MEASURES DATA
 OF THE DOPPLER WEATHER RADAR**

Предложен новый способ восстановления поля ветра, позволяющий оценивать его характеристики по результатам измерений, полученным с помощью доплеровского метеорологического локатора.

Ключевые слова: поле ветра, доплеровский метеорологический локатор, безопасность полетов авиации, зондирование атмосферы

A new method of recovery of the wind field, allowing to evaluate its performance based on the results of measurements made with the help of the Doppler weather radar is presented in this article.

Keywords: wind field, Doppler weather radar, aviation safety, atmospheric sounding.

Хозяйственная деятельность человека и функционирование созданных им технических систем (ТС) происходит в условиях воздействия на них внешней среды – атмосферы. При этом спектр влияющих факторов атмосферы и степень их воздействия многообразен – от незначительного, практически не влияющего на хозяйственную деятельность человека, до имеющих катастрофические последствия событий, таких, как наводнения, землетрясения, ураганы и др. Своевременное диагностирование гидрометеорологических факторов в градации опасных или стихийных явлений является одной из главных задач, решаемых гидрометеорологическими службами.

Одним из факторов атмосферы, приносящих наибольший ущерб хозяйственной деятельности

человека, является ветер, скорость которого превышает значения, установленные для функционирования ТС и проведения различных технологических операций.

Наиболее подверженной влиянию ветра является авиационная отрасль, точнее самолеты и вертолеты, осуществляющие перевозку пассажиров и коммерческих грузов. Определение скорости и направления ветра в зоне взлета и посадки воздушных судов по маршруту их полета является первоочередной задачей метеорологических подразделений государственной авиации.

В настоящее время для определения параметров ветра используются следующие способы [1]:

- ракетное зондирование;
- температурно-ветровое зондирование атмосферы;
- шаропилотные наблюдения;
- радиолокационное зондирование;
- лидарное зондирование.

Для представленных выше способов характерны следующие недостатки.

Методы ракетного зондирования обеспечивают определение ветра до высоты около 80 км. Однако с начала 1990-х гг. и без того немного-

¹ Кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника кафедры Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

² Кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

³ Кандидат технических наук, преподаватель кафедры Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

численные станции ракетного зондирования практически не функционируют.

Аэрологическое зондирование производится на сети станций с периодичностью 1 раз за 12 часов, при этом зондирование осуществляется до высоты 30 км.

Шаропилотные наблюдения позволяют диагностировать ветер до высот 3 км в условиях отсутствия низкой облачности и явлений, ухудшающих видимость в атмосфере.

Лидарные методы зондирования атмосферы в настоящее время не получили широкого распространения из-за не достаточной для практического использования результатов зондирования точности и существенной зависимости от метеорологической обстановки над пунктом зондирования.

Наиболее интересными, с точки зрения возможности реализации и дальнейшего использования, являются радиолокационные методы.

В настоящее время в РФ разрабатываются доплеровские метеорологические локаторы (ДМРЛ), позволяющие диагностировать атмосферу, в том числе доплеровскую скорость ветра – проекцию скорости ветра на радиус-вектор – в районе с радиусом до 250 км и по высоте до 20 км. Таким образом, применение ДМРЛ для диагностики ветра позволит получить данные о поле ветра высокого пространственного разрешения не только в районе расположения радиолокационной станции, но и в зоне ответственности аэропорта. Для повышения качества метеорологического обеспечения авиации предлагается улучшить качество диагностики и прогнозирования перемещения воздушных масс за счет внедрения в алгоритм работы ДМРЛ метода диагностики поля ветра.

Если применить разработанный в [2] метод оперативной диагностики поля ветра на основе данных измерений доплеровских скоростей, то будет обеспечена возможность по-новому оценивать параметры ветра – перейти от нахождения среднего значения вектора скорости ветра, как это делается до сих пор, к восстановлению конкретной реализации распределения этого вектора в окружающем радиолокатор пространстве.

Сущность диагностики поля ветра по данным измерений ДМРЛ заключается в использовании физических и структурных особенностей поля распределения доплеровских скоростей, измеряемых метеорологическим радиолокатором, для восстановления характеристик фактического ветра в районах радиолокационного обзора.

Определим точность получаемых оценок и те пространственные области, в пределах которых ожидается получение оценок надлежащего качества.

Алгоритм оценивания составляющих вектора ветра, согласно работе [2], имеет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \left[\sum_{i=1}^n \frac{x_i^2}{x_i^2 + y_i^2} \right] U + \left[\sum_{i=1}^n \frac{x_i y_i}{x_i^2 + y_i^2} \right] V &= \sum_{i=1}^n \tilde{K}_i \frac{x_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} \\ \left[\sum_{i=1}^n \frac{x_i y_i}{x_i^2 + y_i^2} \right] U + \left[\sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{x_i^2 + y_i^2} \right] V &= \sum_{i=1}^n \tilde{K}_i \frac{y_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} \end{aligned} \right. , \quad (1)$$

где U и V – горизонтальная и вертикальная составляющие искомого вектора скорости ветра; x_i и y_i – координаты точек, в которых проведены измерения; \tilde{K}_i – оценки радиальной составляющей скорости, полученные в этих точках.

Найдем оценку одной из составляющих скорости ветра, например горизонтальной:

$$\tilde{U} = \frac{\sum_i^n \sum_j^n \tilde{K}_i \left(\frac{x_i y_j^2}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2} (x_j^2 + y_j^2)} - \frac{y_i x_j y_j}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2} (x_j^2 + y_j^2)} \right)}{\sum_i^n \sum_j^n \left(\frac{x_i^2 y_j^2}{(x_i^2 + y_i^2)(x_j^2 + y_j^2)} - \frac{x_i y_i x_j y_j}{(x_i^2 + y_i^2)(x_j^2 + y_j^2)} \right)} . \quad (2)$$

Перейдем к полярным координатам дальности (r_i) и азимута (φ_i) цели. Тогда

$$\tilde{U} = \frac{\sum_i^n \sum_j^n \tilde{K}_i \frac{r_i r_j^2 (\cos \varphi_i \sin^2 \varphi_j - \sin \varphi_i \cos \varphi_j \sin \varphi_j)}{r_i r_j^2}}{\sum_i^n \sum_j^n \frac{r_i^2 r_j^2 (\cos^2 \varphi_i \sin^2 \varphi_j - \cos \varphi_i \sin \varphi_i \cos \varphi_j \sin \varphi_j)}{r_i^2 r_j^2}} . \quad (3)$$

Получим независимость оценки от дальности (без учета данной зависимости для \tilde{K}). После тригонометрических преобразований имеем:

$$\tilde{U} = \frac{\sum_i^n \sum_j^n \tilde{K}_i \sin \varphi_j \sin(\varphi_j - \varphi_i)}{\sum_i^n \sum_j^n \cos \varphi_i \sin \varphi_j \sin(\varphi_j - \varphi_i)} . \quad (4)$$

Найдем характеристики распределения случайной величины \tilde{U} .

Математическое ожидание определяется по формуле:

$$E(\tilde{U}) = \frac{\left(\sum_i^n \sum_j^n E(\tilde{K}_i) \sin \varphi_j \sin(\varphi_j - \varphi_i) \right)}{\left(\sum_i^n \sum_j^n \sin \varphi_j \cos \varphi_i \sin(\varphi_j - \varphi_i) \right)} . \quad (5)$$

Дисперсию ищем в соответствии с известным выражением

$$D(\tilde{U}) = E(\tilde{U}^2) - E^2(\tilde{U}).$$

Математическое ожидание квадрата оценки определяется следующим образом:

$$E(\tilde{U}^2) = E \left(\frac{\sum_i^n \sum_j^n \sum_k^n \tilde{K}_i \tilde{K}_k \sin \varphi_j \sin(\varphi_j - \varphi_i) \sin \varphi_i \sin(\varphi_i - \varphi_k)}{\left(\sum_i^n \sum_j^n \sin \varphi_j \cos \varphi_i \sin(\varphi_j - \varphi_i) \right)^2} \right). \quad (6)$$

Используя формулу (5), переходим к дисперсии и учитываем независимость оценок, получаемых в разных точках пространства [при $i \neq k$ $E(\tilde{K}_i \tilde{K}_k) = E(\tilde{K}_i)E(\tilde{K}_k)$], тогда имеем:

$$D(\tilde{U}) = \frac{\sum_i^n \sum_j^n \sum_k^n D(\tilde{K}_i) \sin \varphi_j \sin \varphi_i \sin(\varphi_j - \varphi_i) \sin(\varphi_i - \varphi_k)}{\left(\sum_i^n \sum_j^n \sin \varphi_j \cos \varphi_i \sin(\varphi_j - \varphi_i) \right)^2}. \quad (7)$$

Перейдем от суммы по количеству измерений к сумме по числу углов m , под которыми эти измерения проводились. Если под i -м углом проведено n_i измерений на различных дальностях, то приходим к выражению:

$$D(\tilde{U}) = \frac{\sum_i^m \sum_j^m \sum_k^m n_i n_j n_k D(\tilde{K}_i) \sin \varphi_j \sin \varphi_i \sin(\varphi_j - \varphi_i) \sin(\varphi_i - \varphi_k)}{\left(\sum_i^m \sum_j^m n_i n_j \sin \varphi_j \cos \varphi_i \sin(\varphi_j - \varphi_i) \right)^2}. \quad (8)$$

Считаем, что под каждым из углов производится одинаковое количество измерений p . Тогда получаем:

$$D(\tilde{U}) = \frac{\sum_i^m D(\tilde{K}_i) \left(\sum_j^m \sin \varphi_j \sin(\varphi_j - \varphi_i) \right)^2}{p \left(\sum_i^m \sum_j^m \sin \varphi_j \cos \varphi_i \sin(\varphi_j - \varphi_i) \right)^2}. \quad (9)$$

Очевидно, что наиболее слабым местом метода является случай, когда на участок, для которого ветер считается неизменным, приходится всего два азимутальных угла, и обработке подвергается наименьшее количество данных метеорологического радиолокатора. Оценим дисперсию оценки составляющей ветра в указанных условиях. При $m = 2$ имеем:

$$D(\tilde{U}) = \frac{D(\tilde{K}_1) \sin^2 \varphi_2 + D(\tilde{K}_2) \sin^2 \varphi_1}{p \sin^2(\varphi_2 - \varphi_1)}. \quad (10)$$

Дисперсии отдельных оценок, получаемых в смежных разрешаемых объемах, можно считать одинаковыми. В итоге получаем:

$$D(\tilde{U}) = D(\tilde{K}) \frac{\sin^2 \varphi_1 + \sin^2 \varphi_2}{p \sin^2(\varphi_2 - \varphi_1)}. \quad (11)$$

Экстремальных значений рассматриваемая величина достигает при азимуте φ , кратном $n\pi$ и $\pi/2 + n\pi$.

При $\varphi_1 = 0$ имеем минимальное значение дисперсии:

$$D(\tilde{U}) = \frac{D(\tilde{K})}{p}. \quad (12)$$

При $\varphi_1 = \pi/2$ она максимальна:

$$D(\tilde{U}) \approx \frac{2D(\tilde{K})}{p \sin^2(\varphi_1 - \varphi_2)}. \quad (13)$$

Аналогично нахождению горизонтальной оценки находим формулу для дисперсии вертикальной составляющей скорости ветра:

$$D(\tilde{V}) = \frac{\sum_i^m D(\tilde{K}_i) \left(\sum_j^m \cos \varphi_j \sin(\varphi_j - \varphi_i) \right)^2}{p \left(\sum_i^m \sum_j^m \cos \varphi_i \sin \varphi_j \sin(\varphi_i - \varphi_j) \right)^2}. \quad (14)$$

В случае двух азимутальных углов она преобразуется в выражение:

$$D(\tilde{V}) = D(\tilde{K}) \frac{\cos^2 \varphi_1 + \cos^2 \varphi_2}{p \sin^2(\varphi_2 - \varphi_1)}. \quad (15)$$

Экстремальные значения рассматриваемой дисперсии полностью совпадают со значениями, указанными в формулах (12) и (13), с той лишь разницей, что минимум достигается при азимутальных углах $\pi/2 + n\pi$, а максимум – при углах, кратных π .

Первый вывод, который можно сделать из полученных результатов, состоит в том, что применение метода имеет ограничение по дальности. Рассмотрим этот вопрос подробнее. Прежде всего примем во внимание тот факт, что минимальное угловое расстояние, на котором возможно получение независимых оценок спектральных характеристик эхо-сигнала метеообразования, например облака, равно половине ширины диаграммы направленности антенны радиолокатора. Следовательно, для получения двух отсчетов по дальности необходимо, чтобы угловой размер области, внутри которой параметры ветра полагаются неизменными (область D), не был меньше ширины этой диаграммы. Максимальная дальность, для которой это условие выполняется, и есть граница применения метода. В работе [1] установлен минимальный размер упомянутой области – 2×2 км. При ширине диаграммы направленности $1,5^\circ$, что имеет место, например, в

малогабаритном метеорологическом радиолокаторе (МРМЛ), созданном в рамках ОКР «Зодиак» [3], данная граница проходит на удалении 80 км от локатора. Дальность действия указанного радара в режиме «Скорость», при котором измеряются спектральные характеристики сигнала, составляет 100 км. Следовательно, ограничение, накладываемое методом на радиус действия локатора, незначительно и относится только к минимальному принятому размеру области D . При сужении диаграммы направленности до 1° , что имеет место в радиолокаторе ДМРЛ [4], граница применимости метода фактически совпадает с дальностью его действия в режиме «Скорость» (125 км), а при увеличении размеров области D какие-либо ограничения по дальности вообще отсутствуют.

Далее оценим, какие еще требования к локатору можно предъявить в соответствии с рассматриваемым методом восстановления поля ветра для получения результатов с приемлемой точностью. Здесь необходимо отметить, что для получения количественных характеристик точности необходимо знать величину дисперсии оценки радиолокатором радиальной скорости гидрометеоров. Последняя же зависит от параметров радара, применяемого метода оценки и внешних условий. Поэтому будем считать, что измерения в каждом разрешаемом объеме проводятся с удовлетворяющей точностью, а оценивать будем отношение дисперсий составляющей скорости ветра и радиальной скорости. Указанное отношение определим для вертикальной составляющей вектора скорости ветра в зоне ее максимального значения вблизи азимута, равного нулю.

При перечисленных условиях дисперсия оценки вертикальной составляющей определяется по формуле (13). У МРМЛ шаг измерений по углу места – $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = 0,75^\circ$. Следовательно, для того чтобы компенсировать «ухудшение» одной дисперсии относительно другой, необходимо иметь количество независимых измерений на каждом направлении не менее $\frac{2}{\sin^2 0,75^\circ} \approx 11700$. При продольном размере разрешаемого объема, составляющем 150 м, что соответствует обычно используемой в режиме «Скорость» длительности (или эквивалентной длительности для ДМРЛ) зондирующего импульса 1 мкс, имеем на каждом азимуте 13 независимых отсчетов дальности. Оставшееся после их учета уменьшение дисперсии в 900 раз можно компенсировать только за счет увеличения времени наблюдения на каждом направлении, что требует соответствующего сни-

жения скорости сканирования в горизонтальной плоскости. Обычная скорость вращения антенны – 6 оборотов в минуту. Теперь же один оборот займет 2,5 ч, что сделает получаемые данные, во-первых, неоперативными и, во-вторых, некорректными, так как за это время пространственное распределение ветра может измениться коренным образом. Выход из сложившейся ситуации один – при необходимости сужения области D до минимальных размеров переходить к восстановлению поля ветра не во всем окружающем радиолокатор пространстве, а в узком, представляющем интерес секторе. Например, сканирование сектора размером 5° на одной высоте займет около 20 мин.

Рассмотрим далее, как влияет на точность измерений увеличение размеров области D . При принятых ограничениях формулу (14) можно переписать в виде:

$$D(\tilde{V}) = \frac{D(\tilde{K}) \sum_{i=0}^{m-1} \left(\sum_{j=0}^{m-1} (j-i)^2 \right)}{p(\Delta\varphi)^2 \left(\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{m-1} j(i-j) \right)^2} = \frac{6D(\tilde{K})}{p(\Delta\varphi)^2 (m-1)(2m-1)}. \quad (16)$$

Учтем увеличение независимых отсчетов по дальности $p = p_2 \binom{m}{2}$, где p_2 – число данных отсчетов при $m = 2$. Тогда

$$D(\tilde{V}) = \frac{12D(\tilde{K})}{p_2(\Delta\varphi)^2 m(m-1)(2m-1)}. \quad (17)$$

Очевидно, что исследуемая величина уменьшается пропорционально третьей степени числа отсчетов по азимуту m . Нетрудно подсчитать, что уже при увеличении области D относительно минимальной в 7 раз требуемое уменьшение скорости сканирования антенны составляет всего 1,1 раза.

В заключение сделаем следующие выводы. Для МРМЛ при выборе размеров области пространства, в котором вектор скорости ветра считается постоянным (область D), более 14×14 км, восстановление поля ветра по предлагаемой методике с заданной точностью может вестись во всем рабочем пространстве радиолокатора синхронно со штатными наблюдениями без каких-либо изменений темпа обзора. Если же решаемая задача требует более тонкой детализации наблюдаемого процесса, то необходимо введение особого режима работы радиолокатора с уменьшением скорости сканирования антенны в азимутальной плоскости и/или сокращением

зоны обзора. То же самое относится и к радиолокатору ДМРЛ, с той лишь разницей, что за счет сужения луча антенны до 1° требуемая точность измерений достигается либо на той же дальности при в 1,5 раза меньшей скорости сканирования, либо при той же скорости сканирования на в $\sqrt{1,5}$ раза большем радиусе действия.

Таким образом, детализированная информация о поле ветра с использованием вышеизложенного метода существенно повысит качество определения параметров ветра и разработки прогнозов погоды в целях метеорологического обеспечения государственной авиации.

Литература

1. Клименко И.С., Шарапова Л.В. К исследованию феномена информации // Вестник Российского нового университета. – 2014. – Выпуск 4. Управление, вычислительная техника и информатика. – С. 141–148.
2. Капустин А.В., Сторожук Н.Л. Технические средства метеорологической службы. – СПб. : «Издательское агентство “Энергомашиностроение”», 2005.
3. Чернышев С.В., Готюр И.А., Жуков В.Ю. и др. Доплеровский радиолокационный метод определения характеристик поля ветра и некоторые результаты // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. Научно-теоретический журнал. – 2011. – № 21. – С. 66–75.
4. Тактико-техническое задание на опытно-конструкторскую работу «Разработка и создание малогабаритного метеорологического радиолокатора (шифр «Зодиак-ГМС»)».
5. Доплеровский метеорологический радиолокатор ДМРЛ-С. Руководство по эксплуатации. ЦИВР.462414.002 РЭ.