

УДК 551.508.59

**МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРА**

**Павлюковец Е.Ю., Артюхина Н.К., Кузнецик В.О.**

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация:** Приведена классификация методов измерения параметров ветра. Рассмотрены различные методы измерения скорости ветра. Выполнен анализ дистанционных методов измерения.

**Ключевые слова:** направление ветра, скорость ветра, дистанционные методы измерения скорости ветра, оптические методы, доплеровский лидар.

**METHODS FOR MEASURING THE MAIN WIND PARAMETERS**

**Pavlyukovets E., Artyukhina N., Kuznechik V.**

*Belorussian National Technical University  
Minsk, Republic of Belarus*

**Annotation:** The classification of methods for measuring wind parameters is given. Various methods of measuring wind speed are considered. The analysis of remote measurement methods is carried out.

**Keywords:** wind direction, wind speed, remote methods of measuring wind speed, optical methods, Doppler lidar.

*Адрес для переписки: Кузнецик В.О., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь  
e-mail: kuznechik@bntu.by*

Появление ветра связано с перемещением воздушных слоев в следствии разницы в давлении между ними.

Под ветром понимают горизонтальное движение воздуха относительно земной поверхности, которое характеризуется скоростью (силой) и направлением.

На метеорологических станциях и постах оценивают направление (в градусах или румбах) и скорость (м/с, км/ч, баллы) ветра. Сила ветра оценивается по шкале силы ветра в баллах.

Направление ветра определяется той стороной горизонта откуда дует ветер.

Существуют различные методы (рис. 1), средства и приборы для измерения параметров ветра.

Величину скорости, профиль скорости и направления ветра необходимо знать для решения различных практических задач, например, для прогноза погоды, охраны окружающей среды, для служб аэропортов, научных исследований.

Дистанционные методы измерения скорости ветра можно разделить на оптические (другое название лазерные или лидарные) акустические и радиолокационные. Эти методы основаны на излучении волн, которые при распространении через атмосферу рассеиваются в обратном направлении.



Рисунок 1 – Классификация методов измерения основных параметров ветра

Метод акустического зондирования (дальность действия обычно не превышает 1000 метров; чувствителен к уровню шумовых помех), на котором работают содары, заключается в излучении пакетов звуковых волн, которые при распространении рассеиваются на акустических неоднородностях атмосферы и определении времени задержки сигнала (определяют дальность), измерении мощности отраженного сигнала (судят об интенсивности турбулентности) и доплеровского сдвига частоты (вычисляют скорость ветра в проекции на направление зондирования) [1].

Радарные ветровые профайлеры работают в длинноволновой части спектра в диапазонах 0,3–0,23 м, 0,75–0,55 м и 5–10 м. (существуют ветровые системы миллиметрового диапазона для приграничного слоя атмосферы) в режиме накопления сигнала, т. е. окончательный результат измерения формируется на основе пакета, состоящего из нескольких сотен импульсов [1]. За время зондирующего импульса ( $10^{-6}$  секунд), рассеивающие неоднородности в атмосфере за данный период времени сдвигаются всего на несколько микрон, т.е. можно считать, что импульс работает по «застывшим» в пространстве рассеивателям.

Метод измерения параметров ветра системами радиоакустического зондирования заключается в искусственном создании в атмосфере отражающей неоднородности в виде звуковой решетки, которая искажается как за счет рассеяния на турбулентности, так и за счет градиентов ветра и сильной рефракции. Звуковой пакет лоцируют с помощью радара, подбирая длину волны радиолокатора такой, чтобы выполнялось условие Брэгга (длина волны радиолокатора должна быть вдвое больше длины звуковой волны). Скорость ветра регистрируется не на нулевых доплеровских частотах, а на частоте, сдвинутой на скорость звука, что облегчает селекцию сигнала.

В настоящее время широкое распространение получили дистанционные корреляционные и доплеровские оптические методы измерения параметров атмосферы, основанные на лазерных технологиях, как более точные и надежные.

Корреляционные измерения основаны на флуктуации величины эхо-сигнала при прохождении зондирующего лазерного пучка через освещенный им рассеивающийся объем атмосферы и корреляционном анализе полученных данных. Методы простые, не требуют применения дорогостоящей аппаратуры, позволяют выполнять измерения в условиях сложного рельефа местности.

Доплеровские лазерные методы (как и доплеровские методы в радиодиапазоне) основаны на использовании доплеровского смещения частоты лазерного излучения, рассеянного движущимися в атмосфере отражателями (аэрозольными частицами присутствующими в атмосфере). Эти методы реализованы в некогерентных и когерентных доплеровских лидарах.

Некогерентные лидары регистрируют рассеянное излучение, которое анализируют на интерферометре, при этом измеряется доплеровский сдвиг частоты принятого сигнала, по которому определяют проекцию ветра на направление зондирования, определяют скорость и направление ветра на различных высотах [4].

Когерентные доплеровские лидары, в которых используют два канала (опорный и зондирующий) работают следующим образом, лазерное излучение на частоте  $f_1$  при распространении в атмосфере рассеивается на аэрозольных частицах, частота рассеянной назад волны, с учетом скорости движения частиц  $V_r$ , согласно эффекту Доплера, изменяется и равна  $f_1(1 + V_r/c)$ , где  $c$  – скорость света. Рассеянное излучение поступает в приемный канал и, после сложения с опорным сигналом на частоте  $f_2$  подается на приемник. Детектируемый сигнал будет иметь составляющие на промежуточной частоте

$$f_3 = f_1 \left(1 + \frac{2V_r}{c}\right) - f_2 = f_1 - f_2 + f_d,$$

где  $V_r = \frac{f_d \lambda}{2}$ ,  $f_d$  – доплеровский сдвиг частоты,  $\lambda$  – длина волны, в спектре мощности сигнала которого ярко выраженный пик на частоте  $f_3$  [1, 4].

Когерентные доплеровские лидары можно разделить на непрерывные и импульсные. В первом используется зондирующий лазерный пучок непрерывного излучения, который фокусируется на дистанции измерения [2–4]. Во втором – для формирования зондирующего пучка используют генератор импульсного лазерного излучения с частотой отличной от опорной. Энергия рассеивается на аэрозольных частицах и, попадая в приемный канал, смешивается с опорным излучением и фиксируется приемником. Благодаря интерференции рассеянного и опорного пучков приемником регистрируется сигнал, спектр которого будет локализован вокруг промежуточной частоты. Положение пика определяется средней скоростью движения рассеивающих излучение частиц аэрозоля [3, 4].

#### Литература

1. Потапцев, И. А. Анализ методов измерения вектора скорости ветра / И. А. Потапцев. – Томск: ТГУ, 2017.
2. Когерентные доплеровские лидары для мониторинга ветровой обстановки – Фотоника. – 2014. – № 6.
3. Intelligent and compact coherent Doppler lidar with fiber-based configuration for robust wind sensing in various atmospheric and environmental conditions // Optics express. – 2022. – Vol. 30, № 11.
4. Стерлядкин, В. В. Обзор методов и средств ветрового зондирования атмосферы / В. В. Стерлядкин. – Москва [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studylib.ru/doc/2102630/obzor-metodov-i-sredstv-vetrovogo-zondirovaniya-atmosfery>.