

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА НА НАКЛОННЫХ ТРАССАХ НЕПРЕРЫВНЫМ ДОПЛЕРОВСКИМ ЛИДАРОМ

### DETERMINATION OF AIRFLOW PARAMETERS ON SLOPING PATHS CONTINUOUS DOPPLER LIDAR

*D. Vasiliev*

*Summary.* The article is devoted to the application of the Doppler lidar for determining the parameters of the wind speed vector (horizontal and vertical components, projections in the Cartesian coordinate system) on inclined paths. The optimization of the location of the three noncollinear sensing directions and the recalculation of the projections of the wind velocity vector measured in these directions into a Cartesian coordinate system are considered. The result is a complete system of calculation formulas that can be applied as part of the lidar's mathematical support. The accuracy of determining the projection of the wind speed on the direction of the locating along the signal spectrum at the difference frequency is estimated. The received accuracy of measurement of a projection and geometry of an arrangement of a triple of directions of sounding allow to provide high accuracy of carrying out of measurement of parameters of a vector of speed of a wind and degree of turbulization of an air stream

*Keywords:* Doppler lidar, Cartesian coordinate system, noncollinear sensing directions, wind speed vector, localized volume, turbulence of air flow, signal spectrum.

**Васильев Дмитрий Викторович**

*К.т.н., Акционерное общество «Раменский  
приборостроительный завод».  
Заместитель главного конструктора  
vasiliev1969@yandex.ru*

*Аннотация.* Статья посвящена применению доплеровского лидара для определения параметров вектора скорости ветра (горизонтальных и вертикальных составляющих, проекций в декартовой системе координат) на наклонных трассах. Рассматривается оптимизация расположения трех неколлинеарных направлений зондирования и пересчет измеренных по этим направлениям проекций вектора скорости ветра в декартову систему координат. Результатом является законченная система расчетных формул, которая может быть применена как часть математического обеспечения лидара. Оценена точность определения проекции скорости ветра на направление лоцирования по спектру сигнала на разностной частоте. Полученная точность измерения проекции и геометрия расположения тройки направлений зондирования позволяют обеспечить высокую точность проведения измерения параметров вектора скорости ветра и степени турбулизации воздушного потока.

*Ключевые слова:* Доплеровский лидар, декартова система координат, неколлинеарные направления зондирования, вектор скорости ветра, локализованный лоцируемый объем, турбулентность воздушного потока, спектр сигнала.

### Введение

**В** статье рассматриваются вопросы ориентировки направлений зондирования непрерывного моностатического доплеровского лидара при определении параметров ветра на наклонных трассах. Точность определения модуля и направления вектора скорости ветра определяется двумя основными моментами: первое — точностью измерения проекции вектора скорости ветра на направление зондирования и, второе, выбором направлений зондирования для обеспечения минимальной погрешности измерения и локализации исследуемой области пространства. В работе они рассматриваются по отдельности.

Рассмотрим измерение проекции вектора скорости ветра на направление зондирования. Определение параметров проекции осуществляется на основе регистрации спектра сигнала, который является огибающей распределения эффективности гетеродинирования по частотам, зависящей от формирования измерительного объема, параметров оптической системы и источ-

ника излучения, концентрации эффективно отражающих аэрозолей и степени турбулизации воздушного потока [2, 3, 4, 5, 6].

Пространственное распределение эффективности гетеродинирования, позволяющее оценить возможность формирования измерительного объема и получения отраженного сигнала на разностной частоте при различной метеовидимости определяется выражением:

$$I^* = \frac{4c^4}{\pi^2 \Delta v^4 n^4 (S' + z_1)^4} \sqrt{I_3} \sqrt{I_r} \sin^4 \left( \pi \Delta v \frac{n(S' + z_1)}{c} \right),$$

где

$$I_3 = I_3(x_{13}, y_{13}, z_{13}, \nu) = \frac{4\pi^2 \alpha^4 n^2 \nu^2}{c^2 S'^4} [A_3^2 + B_3^2] e^{-\alpha(S'_3 + z_{13})}$$

— интенсивность зондирующего одночастотного излучения;

$$I_r = I_r(x_{1r}, y_{1r}, z_{1r}, \nu) =$$

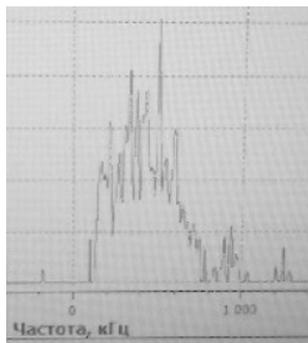


Рис. 1. Спектр доплеровского сигнала при локации воздушного потока

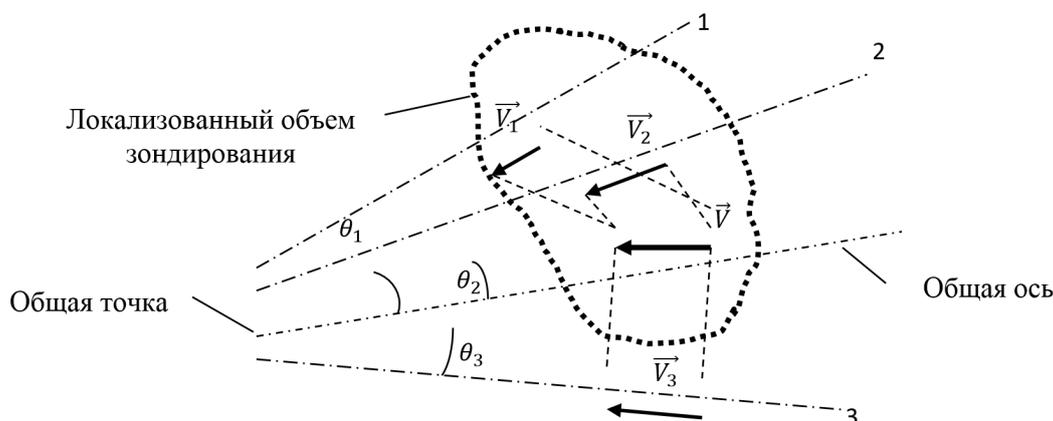


Рис. 2. Формирование измерительного объема тройкой лучей, расходящихся из одной общей точки

$$= \frac{4\pi^2 a^4 n^2 v^2}{c^2 S_r^4} [A_r^2 + B_r^2] e^{-\alpha(S_r + z_{1r})}$$

— интенсивность гетеродинного (опорного) одночастотного излучения.

$n$  — показатель преломления среды;  $v$  — частота излучения;  $\Delta v$  — ширина спектра излучения;  $a$  — радиус выходного зрачка одинаков для зондирующего и гетеродинного пучков излучения;  $x_{1r}, y_{1r}, z_{1r}$  — система координат в пространстве изображений для гетеродинного пучка;  $x_{13}, y_{13}, z_{13}$  — система координат в пространстве изображений для зондирующего пучка;  $S'_r$  — задний сопряженный отрезок для гетеродинного пучка в пространстве изображений;  $S'_3$  — задний сопряженный отрезок для зондирующего пучка в пространстве изображений.

На рис. 1 представлен зарегистрированный спектр сигнала на разностной частоте.

Учитывая то, что рабочая длина волны 0,975 мкм, скорости воздушного потока 1 м/с соответствует доплеровская частота 2,05 МГц. Спектр зарегистрированного сигнала имеет ширину не более 1 МГц и хорошо разрешается с шагом 200 кГц, что соответствует 0,1 м/с.

Таким образом, точность измерения проекции скорости ветра на направление зондирования составляет не хуже 0,1 м/с, что является высокой точностью для проведения такого рода дистанционных измерений.

Для того, чтобы определить параметры ВСВ, необходимо получить его проекции на три неколлинеарных направления, являющихся направлениями зондирования. Задание неколлинеарных направлений зондирования в случае применения одного доплеровского лидара осуществляется следующим образом:

Все три неколлинеарных направления зондирования имеют одну общую исходную точку из которой расходятся под определенными углами к общей оси (рис. 2) [4].

1, 2, 3 — три неколлинеарных направления зондирования;  $\vec{V}$  — вектор скорости ветра;  $\vec{V}_1, \vec{V}_2, \vec{V}_3$  — проекции ВСВ на 1, 2, 3 направления зондирования, соответственно;  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  — углы между неколлинеарными направлениями зондирования и общей осью.

Во втором случае ВСВ — есть некоторый усредненный по локализованному объему зондирования вектор скорости ветра. Локализованный объем зондирования

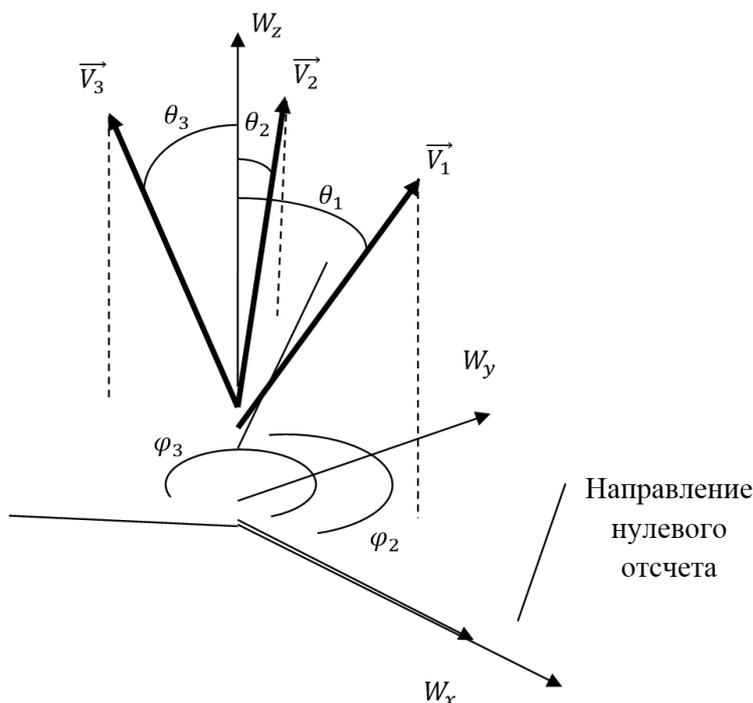


Рис. 3. Расположение направлений зондирования относительно декартовой системы координат

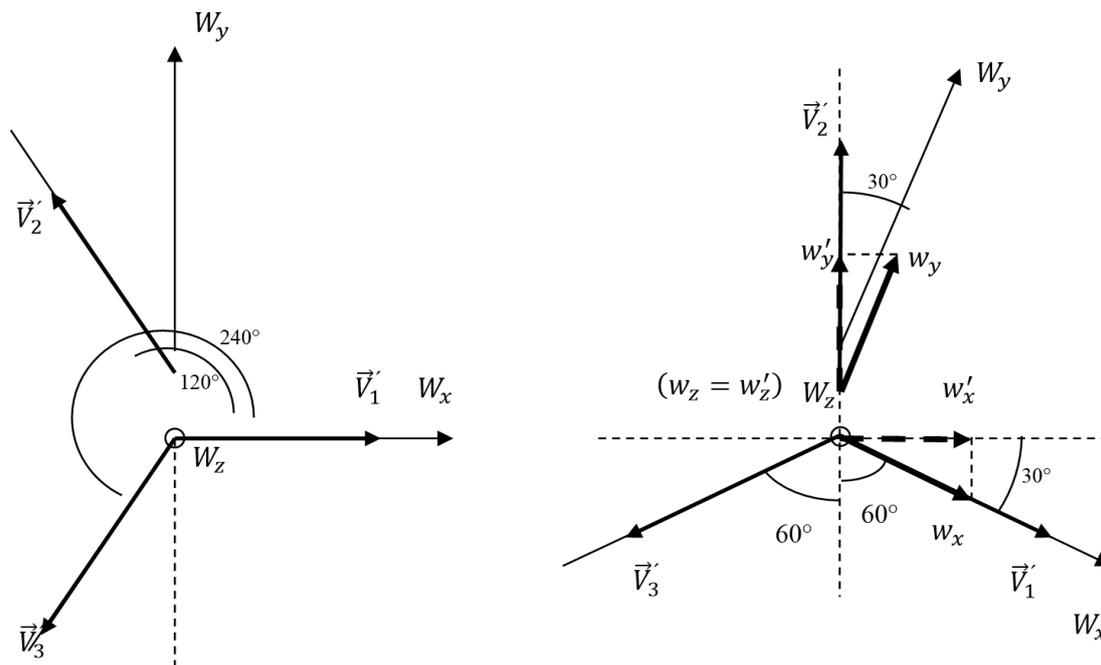


Рис. 4. Разворот декартовой системы координат с симметричным расположением направлений зондирования

представляет собой усеченную трехгранную пирамиду, образованную каустиками каждого из трех лучей. Ориентировка положений лучей поясняется рис. 3 [4].

$\varphi_1$  ( $\varphi_1 = 0^\circ$ ),  $\varphi_2$  ( $\varphi_2 = 120^\circ$ ),  $\varphi_3$  ( $\varphi_3 = 240^\circ$ ) — углы между направлением нулевого отсчета и проек-

циями направлений зондирования на плоскость XY;  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  — углы между направлением Z и направлениями зондирования.

Определение проекций вектора скорости ветра в декартовой системе координат [1, 7].

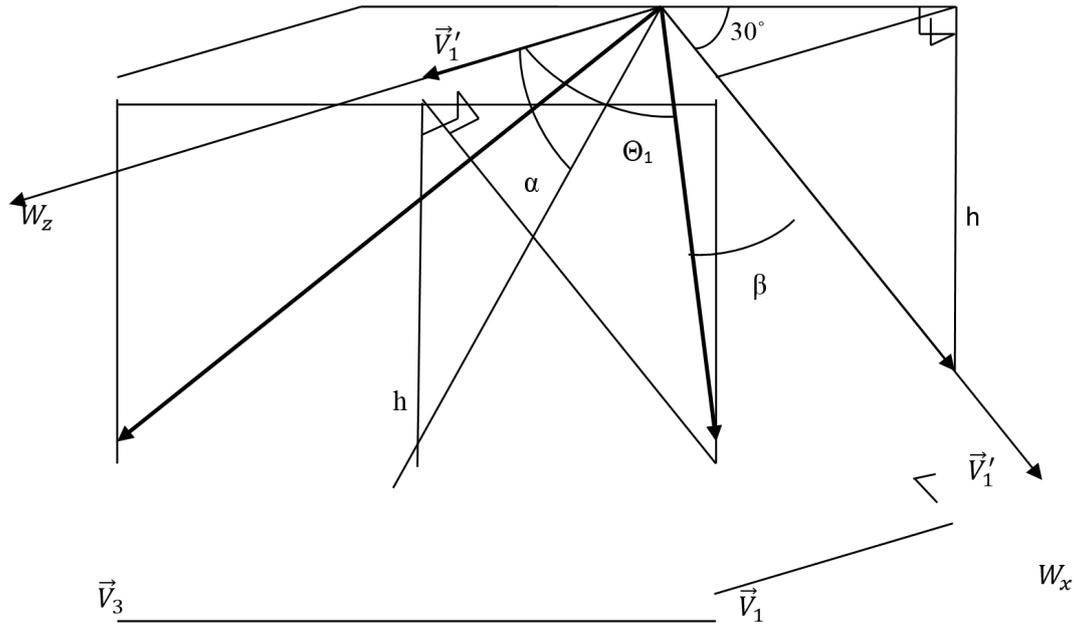


Рис. 5. Разложение направлений зондирования в декартовой системе координат

$$\vec{w} = A^{-1}\vec{P}$$

$$\text{где: } \vec{w} = \begin{pmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \end{pmatrix}; \vec{P} = \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{pmatrix}$$

Матрица направляющих косинусов:

$$A = \begin{pmatrix} \sin \theta_1 \cos \varphi_1 & \sin \theta_1 \sin \varphi_1 & \cos \theta_1 \\ \sin \theta_2 \cos \varphi_2 & \sin \theta_2 \sin \varphi_2 & \cos \theta_2 \\ \sin \theta_3 \cos \varphi_3 & \sin \theta_3 \sin \varphi_3 & \cos \theta_3 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}$$

Опуская промежуточные выкладки запишем:

$$\left. \begin{aligned} w_x &= \frac{1}{D_A} (A_{11}V_1 + A_{21}V_2 + A_{31}V_3) \\ w_y &= \frac{1}{D_A} (A_{12}V_1 + A_{22}V_2 + A_{32}V_3) \\ w_z &= \frac{1}{D_A} (A_{13}V_1 + A_{23}V_2 + A_{33}V_3) \end{aligned} \right\}$$

Таким образом, получаются три проекции вектора скорости ветра на декартову систему координат  $W_x, W_y, W_z$ . Необходимо разместить эту систему координат в пространстве для обеспечения возможности проведения измерений ВСВ на наклонных (в частном случае, на горизонтальной) трассах.

Рассмотрим варианты размещения (рис. 4.).

Для определения необходимого угла наклона оси  $W_z$  к горизонтальной плоскости произведем некоторые дополнительные построения (рис. 5).

$$\theta_1 = 90^\circ - \beta; h = \vec{V}_1' \sin 30^\circ; \vec{V}_1'' = \vec{V}_1 \cos \beta$$

Тогда:

$$h = \vec{V}_1 \cos \beta \sin 30^\circ; \frac{h}{\vec{V}_1''} = \tan \alpha; \vec{V}_1'' = \vec{V}_1 \cos \theta_1$$

$$\alpha = \arctan \frac{h}{\vec{V}_1''} = \arctan \frac{\vec{V}_1 \cos \beta \sin 30^\circ}{\vec{V}_1 \cos \theta_1} =$$

$$= \arctan \frac{\cos \beta \sin 30^\circ}{\cos \theta_1}$$

$$\beta = 90^\circ - \theta_1$$

$$\alpha = \arctan \frac{\cos(90^\circ - \theta_1) \sin 30^\circ}{\cos \theta_1} =$$

$$= \arctan \frac{0.5 \cos(90^\circ - \theta_1)}{\cos \theta_1}$$

Рассмотрим конкретный пример, когда угол  $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta = 15^\circ$  между осью  $W_z$  и направлением зондирования  $\vec{V}_1 (\vec{V}_2, \vec{V}_3)$ . Тогда:

$$\alpha = \arctan \frac{0.5 \cos(90^\circ - 15^\circ)}{\cos 15^\circ} = 7.63^\circ$$

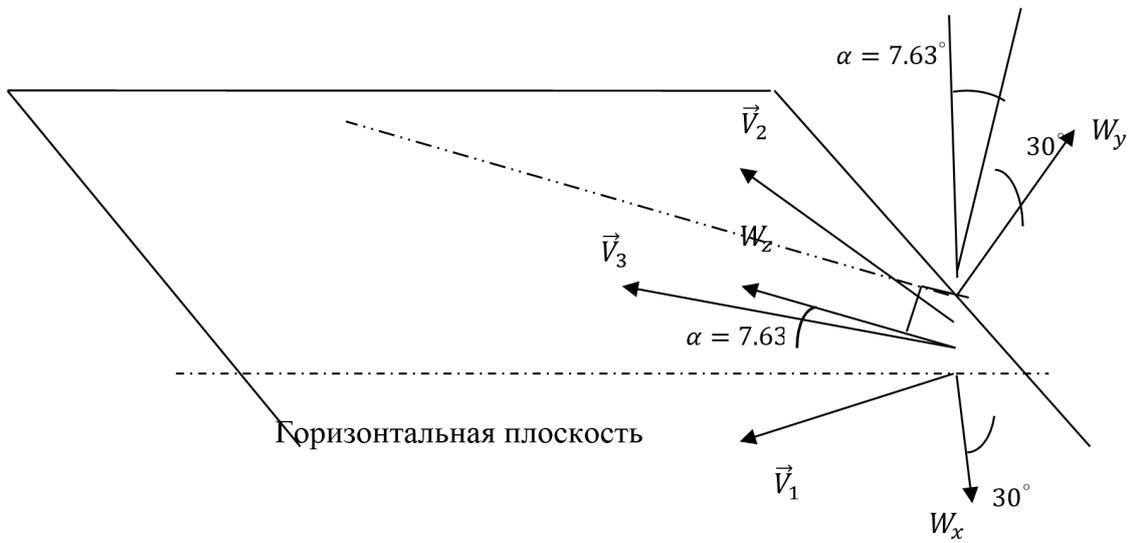


Рис. 6. Расположение направлений зондирования при измерении вектора скорости ветра на горизонтальной трассе

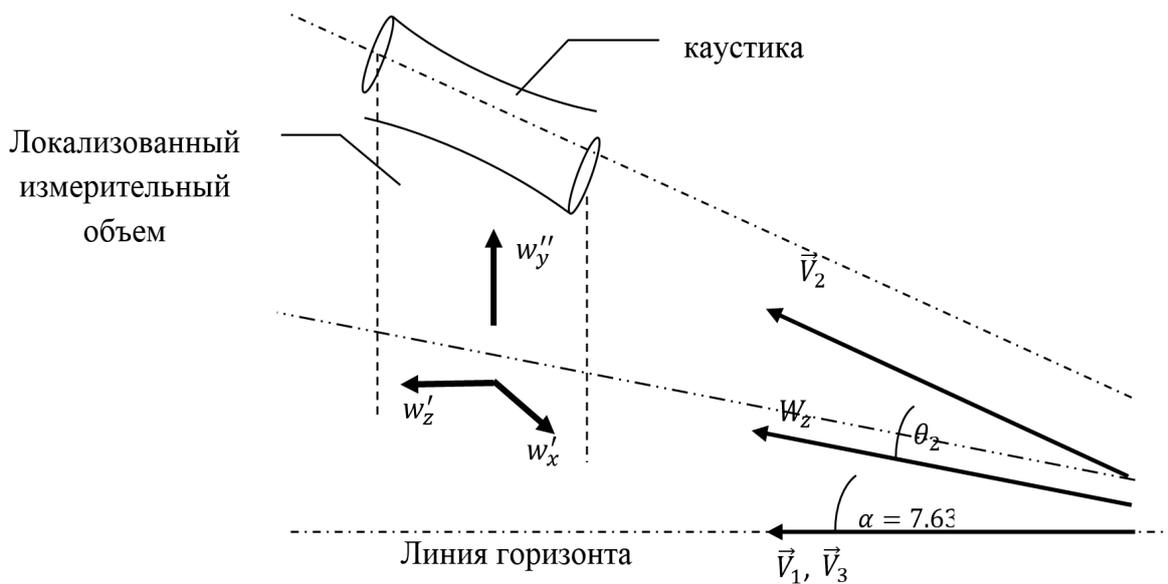


Рис. 7. Положение усредненных по локализованному измерительному объему поперечной, вертикальной и продольной проекций вектора скорости ветра

Т.е., в том случае, когда направления зондирования  $\vec{V}_1$  и  $\vec{V}_3$  располагаются в горизонтальной плоскости и угол  $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta = 15^\circ$ , ось  $W_z$  поднимается над горизонтальной плоскостью на угол  $\alpha = 7.63^\circ$ . Это соответствует проведению измерения вектора скорости ветра на горизонтальной трассе (рис. 6.).

Измерение вектора скорости ветра ведется в измерительном объеме размер которого определяется параметрами каустики и направлениями зондирования  $\vec{V}_1, \vec{V}_2, \vec{V}_3$  (рис. 7.).

Искомыми параметрами являются:

$w'_z$  — продольная;  $w'_x$  — поперечная;  $w'_y$  — вертикальная составляющие вектора скорости ветра, привязанные к средней точке локализованного измерительного объема, размеры которого определяются длиной сформированной каустики по каждому направлению зондирования и углами отклонения направлений зондирования ( $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ ) от оси  $W_z$  декартовой системы координат (рис. 8).

Расчетные формулы составляющих вектора скорости ветра:

$$w'_z = w_z \cos \alpha; \quad w'_x = 0.866w_x; \quad w'_y = 0.866w_y; \\ w''_y = w'_y \cos \alpha = 0.866w_y \cos \alpha$$

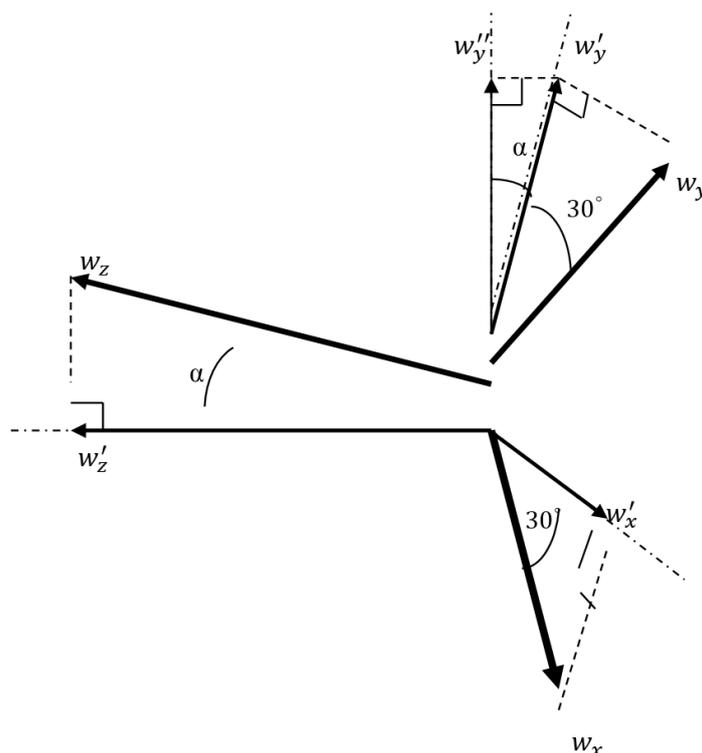


Рис. 8. Определение  $w'_z$  — продольной;  $w'_x$  — поперечной;  $w'_y$  — вертикальной составляющих вектора скорости ветра

В качестве примера рассмотрим случай, когда  $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta = 15^\circ$ , а угол  $\alpha = 7.63^\circ$ , тогда:

$$w'_z = 0.991w_z; w'_x = 0.866w_x; w'_y = 0.858w_y$$

#### Выводы

Полученные в статье результаты позволяют применить их на практике для решения задачи определения векто-

ра скорости ветра и степени турбулизации атмосферы в случае использования непрерывного моностатического доплеровского лидара с последовательным перемещением направления зондирования. Рекомендованные углы выставки лучей позволяют проводить измерения модуля вектора ветра с точностью до 10% и направления — в пределах  $5^\circ$ , возможности регистрации спектра позволяет обеспечить точность измерения проекции 0.1 м/с, что является вполне приемлемым для решения большинства задач.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров / Пер. с франц.; Под ред. К. С. Шифрина. М.: Наука. 1967. — 780 с.
2. Андреев М.А, Васильев Д. Н., Пенкин М. С., Смоленцев С.А, Борейшо А. С., Клочков Д. В., Коняев М. А., Орлов А. Е., Чугреев А. П. Когерентные доплеровские лидары для мониторинга ветровой обстановки // Фотоника. 2014. т. 48. № 6. С. 20–28.
3. Ахметьянов В. Р., Васильев Д. Н., Клочков Д. В., Коняев М. А., Пенкин М. С., Орлов А. Е. и др. Лидарный доплеровский профилометр для измерения параметров ветра в составе наземного комплекса метеорологического обеспечения аэронавигации // Авиакосмическое приборостроение. 2013. № 9. С. 41–52.
4. Брикенштейн В. Х., Погосов Г. А. Когерентные доплеровские лидары. Вопросы теории. // Научно — технический сборник НИИАО. 1988, № 2 (10). — 109 с.
5. Гордиенко В. М., Путивский Ю. Я. Ветровой когерентный доплеровский ТЕА СО2-лидар // Квантовая электроника. 1994. т. 21. № 3. С. 284–290.
6. Коняев М. А., Савин А. В., Доплеровские метеолидары для систем обеспечения вихревой безопасности полетов // Метеоспектр. 2008. № 1. С. 147–152.
7. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука. 1984. — 831 с.