

В. Р. АХМЕТЯНОВ, О. А. МИШИНА

## ОБРАБОТКА ДАННЫХ ВЕТРОВОГО КОГЕРЕНТНОГО ДОППЛЕРОВСКОГО ЛИДАРА НА ОСНОВЕ МЕТОДА ГАУССОВОЙ АППРОКСИМАЦИИ

Рассмотрена задача определения параметров доплеровского спектра сигнала в ветровом когерентном доплеровском лидаре с использованием метода гауссовой аппроксимации. С помощью численного моделирования определены основные характеристики гауссова метода. Представлена оценка скорости ветра, проведено сравнение метода гауссовой аппроксимации с другими методами.

*Ключевые слова:* ветровой когерентный доплеровский лидар, математическое моделирование, аппроксимация, итерация.

**Введение.** Одним из датчиков, позволяющих измерять скорость ветра в атмосфере, является ветровой когерентный доплеровский лидар (ВКДЛ). Исследования ВКДЛ проводились в США [1], Германии [2] и России [3—5].

Несколько подобных комплексов разработаны в НПП „Лазерные системы“ [5] и БГТУ „ВОЕНМЕХ“ им. Д. Ф. Устинова и приняты в эксплуатацию рядом организаций.

В настоящее время уровень вычислительной мощности компьютерной техники и специализированных цифровых процессоров позволяет повышать точность измерения параметров скорости ветра с помощью ВКДЛ не только за счет совершенствования оптических и электронных узлов, но и благодаря разработке и применению современных методов обработки измерительной информации.

В работе [6] было предложено использовать двухэтапную обработку данных ВКДЛ. На первом этапе осуществляется внутриимпульсная обработка (оценивается скорость ветра на интервале времени в пределах длительности зондирующего импульса); на втором этапе проводится междуимпульсная обработка данных путем уточнения оценок скорости ветра методами калмановской фильтрации.

На этапе внутриимпульсной обработки возможны такие подходы к получению оценок скорости ветра, как спектральная обработка, обработка по критерию максимума правдоподобия, поиск аргумента корреляционной функции.

В настоящей статье рассмотрен метод гауссовой аппроксимации амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) ВКДЛ на этапе внутриимпульсной обработки, проведено сравнение с известными алгоритмами.

**Основные положения математической модели.** В соответствии с известной моделью физических процессов, происходящих в ВКДЛ, для определения параметров скорости ветра используется метод фурье-преобразования принятого лидарного сигнала [7]. Анализ доплеровского спектра сигнала ВКДЛ позволяет сделать вывод, что область пика АЧХ представляет собой колоколообразную функцию.

На рис. 1 приведен пример доплеровского спектра сигнала ВКДЛ ( $u$  — амплитуда сигнала,  $f$  — его частота).

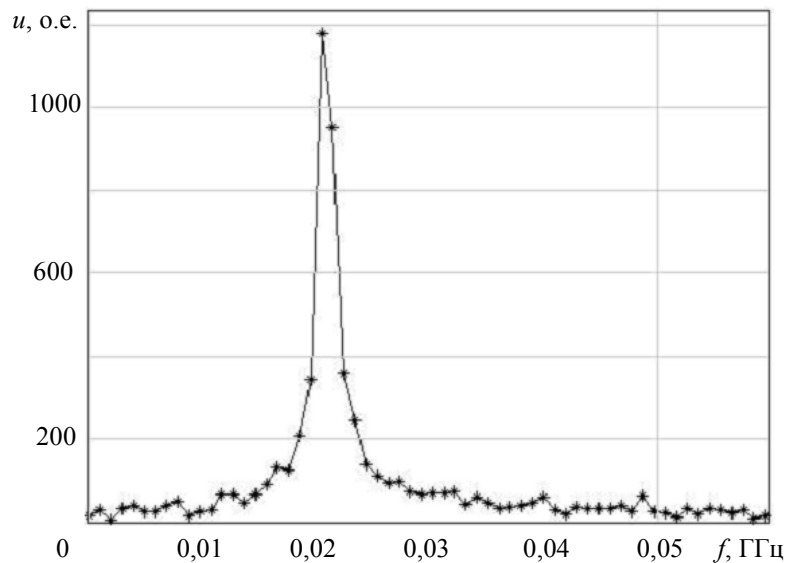


Рис. 1

Положение максимума АЧХ соответствует средней скорости ветра, а полуширина характеризует степень атмосферной турбулентности [8]. В связи с дискретностью доплеровского спектра, полученного после преобразования Фурье, для более точного нахождения оценки положения максимума предлагается провести его аппроксимацию.

Для определения оценки скорости ветра используются широко известный центроидный метод [9], а также методы аппроксимации — с использованием кубических сплайнов [10] и гауссов [11].

При использовании центроидного метода оценка скорости ветра определяется координатой центра тяжести доплеровского спектра, т.е.

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^M x_i u(x_i)}{\sum_{i=1}^M u(x_i)}, \quad (1)$$

где  $x_i$  — координата по оси абсцисс, соответствующая  $i$ -му отсчету АЧХ,  $u(x_i)$  — амплитуда сигнала  $i$ -го отсчета АЧХ,  $M$  — количество отсчетов.

Центроидный метод прост, следовательно, при его реализации не требуется больших вычислительных затрат. Но этот метод имеет серьезный недостаток — высокую чувствительность к шуму во входном сигнале. В методе с использованием кубических сплайнов искомая оценка определяется положением максимума аппроксимирующей функции.

В отличие от первых двух методов с помощью гауссовой аппроксимации можно определить как положение максимума, так и полуширину спектра (см. рис. 1).

Метод аппроксимации отсчетов доплеровского спектра гауссоидой применялся в работе [12] для обработки брэгговских пиков. При этом параметры гауссоиды определялись по методу Ньютона с использованием критерия минимума среднеквадратичной ошибки.

Совокупность  $M$  экспериментальных точек  $u(x_i)$  аппроксимируется гауссоидой  $U\varphi(x, x_{\max}, \sigma)$ , где  $U$  — амплитудный коэффициент,  $\varphi(x, x_{\max}, \sigma)$  — функция Гаусса:

$$\varphi(x, x_{\max}, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-x_{\max}}{\sigma}\right)^2}, \quad (2)$$

где  $x_{\max}$  — центр гауссова распределения, характеризующий положение максимума колоколообразной функции,  $\sigma$  — дисперсия гауссова распределения, характеризующая ширину колоколообразной функции.

Для нахождения параметров гауссоиды используется итерационная процедура

$$\begin{bmatrix} U^{(k+1)} \\ x_{\max}^{(k+1)} \\ \sigma^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U^{(k)} \\ x_{\max}^{(k)} \\ \sigma^{(k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta U^{(k)} \\ \delta x_{\max}^{(k)} \\ \delta \sigma^{(k)} \end{bmatrix},$$

где  $U^{(k)}$  —  $k$ -е приближение  $U$ ;  $x_{\max}^{(k)}$  —  $k$ -е приближение  $x_{\max}$ ;  $k = 1 \dots K$ , где  $K$  — количество итераций;  $\delta U^{(k)}$  — поправка к  $U^{(k)}$ ,  $\delta x_{\max}^{(k)}$  — поправка к  $x_{\max}^{(k)}$ ,  $\delta \sigma^{(k)}$  — поправка к  $\sigma^{(k)}$ . Нулевые приближения определяются каким-либо другим методом, в частности центроидным.

В соответствии с методом Ньютона значения поправок  $\delta U^{(k)}$ ,  $\delta x_{\max}^{(k)}$ ,  $\delta \sigma^{(k)}$  находятся из системы уравнений

$$AX = B, \quad (4)$$

где

$$A = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^M (\varphi_i^{(k)})^2 & U^{(k)} \sum_{i=1}^M \varphi_i^{(k)} \frac{\partial \varphi_i^{(k)}}{\partial x_{\max}^{(k)}} & U^{(k)} \sum_{i=1}^M \varphi_i^{(k)} \frac{\partial \varphi_i^{(k)}}{\partial \sigma^{(k)}} \\ \sum_{i=1}^M \varphi_i^{(k)} \frac{\partial \varphi_i^{(k)}}{\partial x_{\max}^{(k)}} & U^{(k)} \sum_{i=1}^M \left( \frac{\partial \varphi_i^{(k)}}{\partial x_{\max}^{(k)}} \right)^2 & U^{(k)} \sum_{i=1}^M \frac{\partial \varphi_i^{(k)}}{\partial x_{\max}^{(k)}} \cdot \frac{\partial \varphi_i^{(k)}}{\partial \sigma^{(k)}} \\ \sum_{i=1}^M \varphi_i^{(k)} \frac{\partial \varphi_i^{(k)}}{\partial \sigma^{(k)}} & U^{(k)} \sum_{i=1}^M \frac{\partial \varphi_i^{(k)}}{\partial x_{\max}^{(k)}} \cdot \frac{\partial \varphi_i^{(k)}}{\partial \sigma^{(k)}} & U^{(k)} \sum_{i=1}^M \left( \frac{\partial \varphi_i^{(k)}}{\partial \sigma^{(k)}} \right)^2 \end{pmatrix}; \quad X = \begin{pmatrix} \delta U^{(k)} \\ \delta x_{\max}^{(k)} \\ \delta \sigma^{(k)} \end{pmatrix};$$

$$B = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^M u(x_i) \varphi_i^{(k)} - U^{(k)} \sum_{i=1}^M (\varphi_i^{(k)})^2 \\ \sum_{i=1}^M u(x_i) \frac{\partial \varphi_i^{(k)}}{\partial x_{\max}^{(k)}} - U^{(k)} \sum_{i=1}^M \varphi_i^{(k)} \frac{\partial \varphi_i^{(k)}}{\partial x_{\max}^{(k)}} \\ \sum_{i=1}^M u(x_i) \frac{\partial \varphi_i^{(k)}}{\partial \sigma^{(k)}} - U^{(k)} \sum_{i=1}^M \varphi_i^{(k)} \frac{\partial \varphi_i^{(k)}}{\partial \sigma^{(k)}} \end{pmatrix};$$

$$\varphi_i^{(k)} = \varphi(x_i, x_{\max}^{(k)}, \sigma^{(k)}), \quad \frac{\partial \varphi_i^{(k)}}{\partial x_{\max}^k} = \frac{\partial \varphi}{\partial x_{\max}} \Big|_{x_{\max}=x_{\max}^k, x=x_i}, \quad \frac{\partial \varphi_i^{(k)}}{\partial \sigma^k} = \frac{\partial \varphi}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=\sigma^k, x=x_i}.$$

Итерационная процедура продолжается до тех пор, пока поправки  $\delta U^{(k)}$ ,  $\delta x_{\max}^{(k)}$ ,  $\delta \sigma^{(k)}$  не становятся по абсолютной величине меньше заданных значений. Иначе новые значения  $U^{(k+1)}$ ,  $x_{\max}^{(k+1)}$ ,  $\sigma^{(k+1)}$  используются как приближенные значения корней, и процесс повторяется до тех пор, пока не будет найдено решение (или не станет ясно, что получить его невозможно).

**Методика моделирования сигнала ВКДЛ.** Моделирование проводилось с использованием программного пакета MatLab Simulink.

Для формирования исходных данных применялась математическая модель сигнала ВКДЛ, представленная в [3, 7]. Согласно этой модели, лидарный сигнал содержит как аддитивные, так и мультипликативные шумы, которые приводят к ошибкам определения параметров доплеровского спектра. Мультипликативные шумы обусловлены когерентной природой используемого лазерного излучения. Искажения сигнала также возникают из-за дискретности данных.

Генерация сигнала производилась в соответствии с выражением

$$Z(t_S) = \frac{\sqrt{SNR}}{\sqrt{2 \sum_{l=1}^{n_S} P_S(t_S)}} \sum_{l=1}^{n_S} a(l) P_S^{1/2}(t_S) \exp \left[ -j \frac{4\pi l t_S (V_r + 0,5 \Delta f \lambda)}{\lambda} \right] + \frac{1}{\sqrt{2}} b(t_S), \quad (5)$$

где  $a(l)$  и  $b(t_S)$  — независимые случайные числа, распределенные по нормальному закону с нулевым средним и единичной дисперсией ( $l = \overline{1, n_S}$ );  $P_S(t_S)$  — мощность зондирующего пучка;  $SNR = S/N_{ш}$  — отношение сигнал—шум;  $S$  — среднее значение мощности полезной составляющей фототока;  $N_{ш}$  — средняя мощность шума;  $\lambda$  — длина волны зондирующего пучка;  $n_S$  — число рассеивающих аэрозольных частиц в рассматриваемой области;  $t_S$  — время дискретизации;  $V_r$  — заданная для модели скорость ветра;  $\Delta f$  — сдвиг частоты опорного сигнала.

Характеристики моделируемого ВКДЛ [5] следующие: длительность импульса — 1—2 мкс;  $t_S$  — 2—4 нс;  $\Delta f$  — 20 МГц;  $\lambda$  (CO<sub>2</sub>-лазера) — 10,6 мкм.

Предполагалось, что скорость ветра в пределах длительности импульса постоянна. При моделировании использовалась форма импульса  $T$  (рис. 2) зондирующего лазерного сигнала, генерируемого в реальном ВКДЛ, описанном в работе [5].

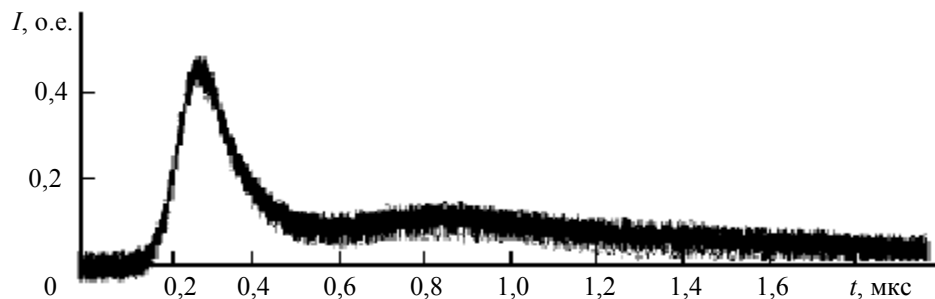


Рис. 2

Для различных значений  $SNR$  проводилась генерация сигнала в соответствии с выражением (5). Затем осуществлялось быстрое преобразование Фурье с заданным временем дискретизации и определялось положение максимума АЧХ в соответствии с выбранным методом.

Скорость ветра вычисляется по формуле

$$V = \frac{f_D \lambda}{2}, \quad (6)$$

где  $f_D$  — доплеровская частота.

В результате проведения вычислительного эксперимента для различных реализаций шумов определялись оценки скорости ветра, их среднее значение, а также среднеквадратичное отклонение. При моделировании для анализа использовалась ошибка ( $\Delta$ ), представляющая собой сумму абсолютного значения систематической ошибки и среднеквадратичного отклонения.

**Результаты.** Рассмотрим результаты оценки скорости ветра при аппроксимации АЧХ гауссовым методом.

Моделирование проводилось для скорости ветра от 5 до 20 м/с, что соответствует по шкале Бофорта силе ветра от слабого до практически штормового, значение  $SNR$  в пределах от 1 до 10. Нулевое приближение параметров  $U^{(0)}$ ,  $x_{\max}^{(0)}$  аппроксимирующей гауссоиды находилось с помощью центроидного метода либо с использованием стандартной функции поиска максимума пакета MatLab. Для определения нулевого приближения  $\sigma^{(0)}$  ширины пика АЧХ на полувысоте использовалась линейная аппроксимация доплеровского спектра. Количество итераций — 10.

В качестве примера на рис. 3, а представлены результаты оценки скорости ветра (для  $V_r = 5$  м/с), при отношении сигнал—шум, равном 4. Кривые 1—3 соответствуют отдельным реализациям вычислительного эксперимента. Кривая 4 является усредненной характеристикой оценки скорости ветра по 100 испытаниям. Подобная картина наблюдается и для других значений скорости ветра в пределах рассматриваемого диапазона при анализируемых значениях  $SNR$ . В результате анализа представленных на рис. 3, а кривых можно сделать вывод, что после второго-третьего шага итерационного процесса оценка скорости ветра стремится к постоянной величине.

На рис. 3, б представлены сглаженные кривые зависимости ошибки оценки скорости ветра от отношения сигнал—шум при условии, что заданная в модели скорость ветра равна 5 (кривая 1) и 10 м/с (2). Из графиков следует, что при  $SNR > 4$ —5 повышение точности оценок скорости ветра гауссовым методом не превышает 5—6 %. На рис. 3, в показана зависимость ошибки оценки от значения  $V_r$ . Видно, что с увеличением скорости ветра с 5 до 20 м/с абсолютное значение ошибки гауссова метода возрастает, а относительное падает соответственно с 10 до 5 %. На рис. 3, г представлена зависимость параметра  $\Delta$  от ошибки нулевого приближения оценки скорости ветра  $V^{(0)}$  ( $V_r = 10$  м/с).

На следующем этапе моделирования при определении оценки скорости ветра проводилось сравнение центроидного метода с методами аппроксимации АЧХ кубическими сплайнами и гауссоидой.

На рис. 4 представлена зависимость ошибки оценки скорости ветра от значения  $SNR$  для рассматриваемых методов: центроидного (кривая 1) метода и методов аппроксимации АЧХ кубическими сплайнами (2) и гауссоидой (3). Данные кривые получены для случая, когда скорость ветра в модели принималась равной 10 м/с.

Как видно из графиков, при использовании центроидного метода значение ошибки определения параметров ветра в среднем в 2—3 раза больше, чем при использовании других методов. В свою очередь, ошибка оценивания скорости ветра методом использования кубических сплайнов в среднем на 20—30 % больше, чем при применении метода гауссовой аппроксимации.

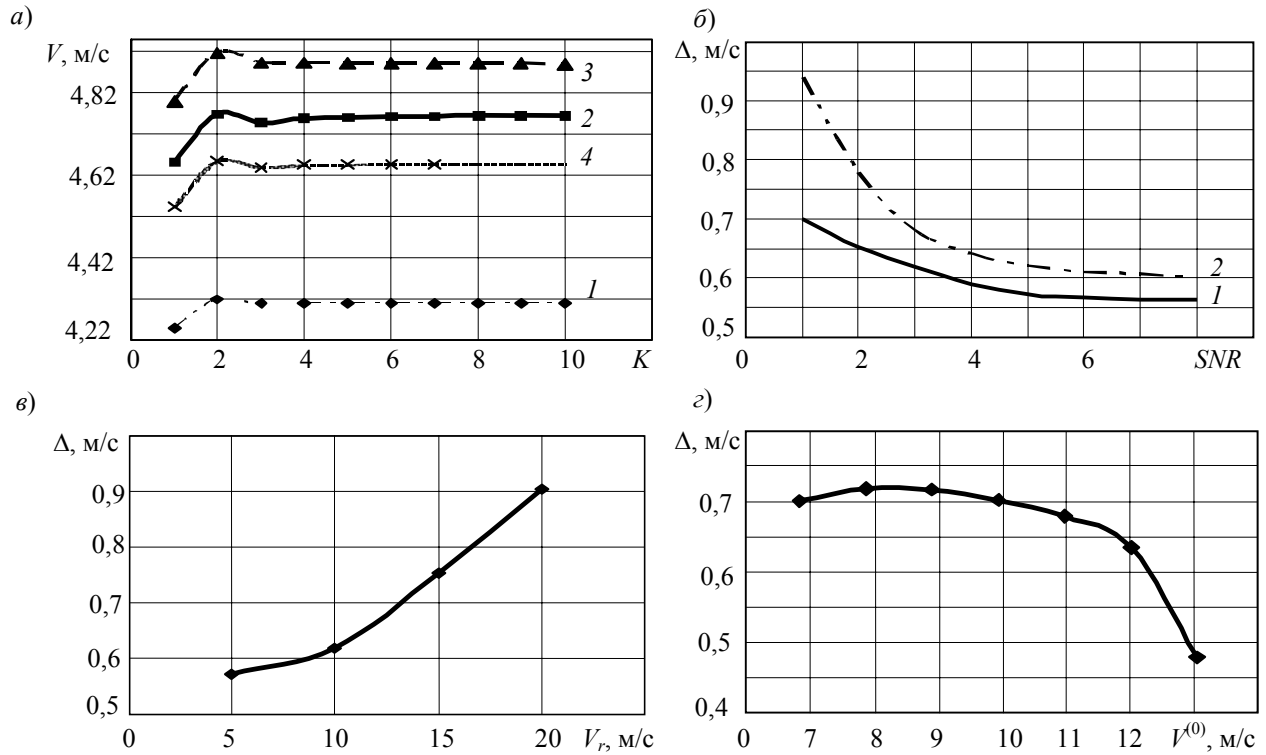


Рис. 3

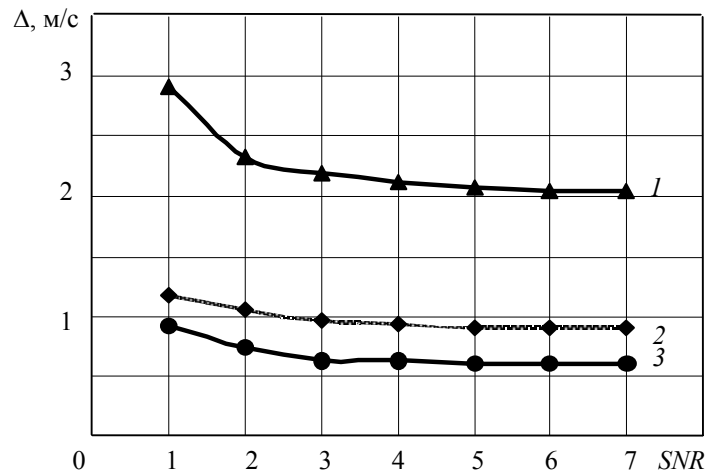


Рис. 4

**Заключение.** В процессе математического моделирования с использованием пакета MatLab проведено сравнение результатов центроидного метода и двух методов аппроксимации доплеровского спектра сигнала ВКДЛ для определения оценок скорости ветра. При использовании гауссова метода и метода аппроксимации кубическими сплайнами достигаются более точные оценки параметров анализируемого доплеровского спектра по сравнению с центроидным, но требуется больше вычислительных затрат.

Установлено, что гауссов метод приводит к лучшим результатам по сравнению с методами кубических сплайнов.

Моделирование также показало, что итерационный процесс в методе гауссовой аппроксимации целесообразно завершать уже на втором-третьем шаге.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Munoz R. M., Mocker H. W. Airborne laser Doppler velocimeter // Appl. Optics. 1974. Vol. 13, N 12. P. 2890—2898.
2. Hardesty R. M. Atmospheric remote sensing using the NOAA coherent lidar system // Opt. and Laser Remote Sensing. Berlin, 1983. P. 350—355.
3. Банах В. А., Фалиц А. В. Оценивание параметров атмосферной турбулентности из измерений скорости ветра импульсным когерентным CO<sub>2</sub> доплеровским лидаром // Оптика атмосферы и океана. 2004. Т. 17, № 4. С. 297—305.
4. Гордиенко В. М., Путивский Ю. Я. Ветровой когерентный доплеровский TEA CO<sub>2</sub>-лидар // Квант. электрон. 1994. Т. 21, № 3. С. 284—290.
5. Борейшо А. С., Коняев М. А. и др. Мобильные многоволновые лидарные комплексы // Квант. электрон. 2005. Т. 35, № 12. С. 1167—1178.
6. Ахметьянов В. Р., Мишина О. А. Подход к разработке требований к информационному обеспечению систем дистанционного зондирования окружающей среды // Региональная информатика — 2008. Мат. конф. СПб, 2008. С. 258—259.
7. Протопопов В. В., Устинов Н. Д. Лазерное гетеродинирование. М.: Наука, 1985. 288 с.
8. Банах В. А., Фалиц А. В. и др. Оценка параметров турбулентности из измерений скорости ветра импульсным когерентным доплеровским лидаром // Оптика атмосферы и океана. 2005. Т. 18, № 12. С. 1062—1065.
9. Замятин В. В. Алгоритмы контроля координат источника излучения на фоточувствительной поверхности матрицы // Ползуновский вестник. 2008. № 3. С. 350—355.
10. Ахметьянов В. Р., Мишина О. А. Методика и результаты моделирования сигнала в ветровом когерентном доплеровском лидаре // Четвертые Уткинские чтения. Мат. междунар. науч.-технич. конф. Т. 1. СПб: БГТУ, 2009. С. 57—59.
11. Мишина О. А. Метод гауссовской аппроксимации доплеровского спектра лидарного сигнала // Системы управления и передачи информации. Мат. межвуз. науч.-технич. конф. студ., аспирант. и мол. ученых. СПб: БГТУ, 2009. С. 38—39.
12. Веснин В. Л. Метод гауссовской аппроксимации пика спектра отражения волоконно-оптического брэгговского датчика // Изв. Самарского научного центра РАН. Общая физика и электроника. 2003. Т. 5, № 1. С. 156—164.

*Сведения об авторах*

- Валерий Равинович Ахметьянов** — канд. техн. наук; Балтийский государственный технический университет „ВОЕНМЕХ“ им. Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург;  
E-mail: zinval@mail.ru
- Ольга Александровна Мишина** — Балтийский государственный технический университет „ВОЕНМЕХ“ им. Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург; инженер;  
E-mail: olga\_A\_mishina@mail.ru

Рекомендована университетом

Поступила в редакцию  
01.07.09 г.