

В. В. Рахманов^{1}, В. Г. Меледин¹, С. В. Кротов¹, В. А. Павлов¹*

Метод компенсации низкочастотной части доплеровского сигнала для расширения динамического диапазона фотоприемника в металлургическом лазерном доплеровском анемометре

¹ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация
* e-mail: rahmanov@inbox.ru

Аннотация. В работе исследован метод компенсации низкочастотной составляющей доплеровского сигнала для расширения динамического диапазона лавинного фотоприемника в технологическом лазерном доплеровском анемометре. В основе метода лежит использование дифференциальной структуры когерентного света, рассеянного движущимся объектом измерения. За счет компенсации фототоков частотное разделение принимаемого сигнала реализуется непосредственно в квадратичном фотоприемнике, а не в электронном преобразователе фототок-напряжение, обеспечивая существенное повышение отношения сигнал/шум. Метод реализован в виде дифференциальной схемы с последовательно соединенными лавинными фотодиодами. Выполнены экспериментальная проверка предложенного метода и сравнение полученных результатов с работой схем на основе традиционных фотоприемников. Показано, что реализованный метод в сложных условиях перегрузок по интенсивности принимаемого оптического сигнала позволяет существенно улучшить точность и надежность работы лазерных доплеровских анемометров.

Ключевые слова: лазерный доплеровский анемометр, динамический диапазон фотоприемника, дифференциальный фотоприемник

V. V. Rakhmanov^{1}, V. G. Meledin¹, S. V. Krotov¹, V. A. Pavlov¹*

A Method for Compensating the Low-frequency Part of the Doppler Signal to Expand the Dynamic Range of a Photodetector in a Metallurgical Laser Doppler Anemometer

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: rahmanov@inbox.ru

Abstract. The paper investigates a method of compensating the low-frequency component of the Doppler signal to extend the dynamic range of the avalanche photodetector used in the technological Laser Doppler Anemometer. The method is based on the use of the differential structure of the coherent light scattered by a moving object of measurement. Due to the compensation of photocurrents, the frequency separation of the received signal is realized directly in the square-wave photodetector instead of in the electronic photocurrent-voltage converter, which significantly increases the signal-to-noise ratio. The method is implemented as a differential circuit with series-connected avalanche photodiodes. Experimental verification of the proposed method and comparison of the obtained results with the operation of schemes based on traditional photodetectors have been carried out. It is shown that the implemented method allows to significantly improve the accuracy and reliability of laser Doppler anemometers under difficult conditions of intensity overload of the received optical signal.

Keywords: laser Doppler anemometer, dynamic range of the photodetector, differential photodetector

Введение

В металлургической промышленности для прецизионного бесконтактного измерения длины и скорости горячего и холодного проката используются методы лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА). Использование метода ЛДА дает несколько ключевых преимуществ: бесконтактность, высокая точность [1], возможность проведения измерений в сложных промышленных условиях эксплуатации [2], измерения в реальном времени, неинвазивность и безопасность.

Создание подобных оптико-электронных измерителей основано на использовании надежных функциональных элементов, выдерживающих работу в сложных климатических и эксплуатационных условиях. Одним из наиболее критичных для метрологии узлов приборов на основе метода ЛДА является фотоприемник. Использование высокочувствительных классических фотоприемников на основе вакуумных диодных фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) в технологических ЛДА является дискуссионным по причине их ограниченной надежности в условиях оптических перегрузок. Кроме того, существенно усложняется структура и стоимость реализации приборов.

Формируемый движущейся поверхностью проката малоконтрастный оптический сигнал имеет высокую интенсивность фоновых засветок. Поэтому целесообразным является использование компенсационных дифференциальных методов, а в качестве фотоприемников – устойчивых к оптическим перегрузкам кремниевых лавинных фотодиодов (ЛФД) с высоким квантовым выходом в рабочем диапазоне. Дифференциальный принцип построения оптических схем ЛДА представлен в отечественной и зарубежной литературе [3–5]. Основная его идея – формирование в измерительной зоне независимых когерентных оптических полей, различающихся по какому-либо признаку (поляризация, длина волны и т.д.), проецируемых на два независимых фотоприемных канала в дифференциальном включении, и выделение малого интерференционного сигнала при дифференциальном подавлении оптических некогерентных и аддитивных засветочных компонент.

Основными преимуществами кремниевых лавинных фотодиодов, проявляющимися в подобных схемах, является низкая стоимость, простота реализации, относительно высокая фоточувствительность (<1 нВт) и высокое усиление (до 1000 раз) [6]. К минусам можно отнести высокие собственные шумы при работе в режиме лавинного пробоя, существенную внутреннюю емкость и необходимость температурной компенсации напряжения смещения.

В отличие от лавинных фотодиодов из других видов материалов (германий, арсенид галлия и др.) у кремниевых фотодиодов наблюдается наименьшая чувствительность к дальнему инфракрасному спектру принимаемого света, что уменьшает влияние паразитных засветок от горячего проката. Однако в металлургическом применении высокая чувствительность фотоприемника может быть

и отрицательным фактором. В результате преобразования оптического сигнала в фототок доплеровский сигнал, рассеянный поверхностью движущегося объекта, представляется в виде суммы двух сигналов: U_H – низкочастотной части (называемой пьедесталом) и U_B – высокочастотной части, содержащей информацию о скорости объекта (рис. 1).

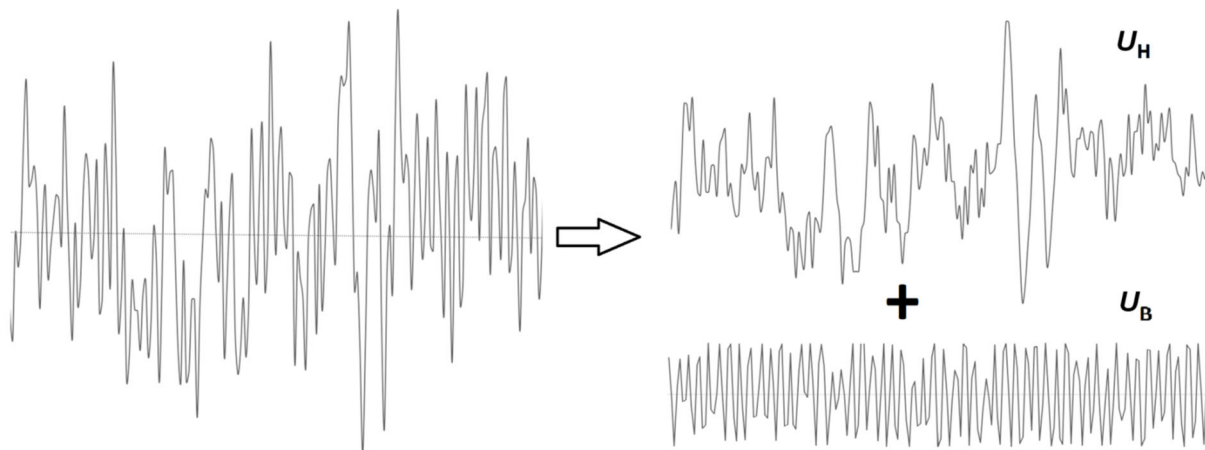


Рис. 1. Доплеровский сигнал от поверхности

Пьедестал часто используется для детектирования доплеровского сигнала в аэро- и гидродинамический экспериментах, однако для измерения скорости проката он является паразитным. Энергетический вклад пьедестала U_H в приемный оптический сигнал на один-три порядка превышает вклад высокочастотной составляющей U_B . Для обработки подобных сигналов необходим значительный динамический диапазон фотоприемной части. Ограниченность динамического диапазона фотоприемника может приводить к ошибкам в вычислении скорости движения объектов.

Дифференциальный метод компенсации низкочастотной части доплеровского сигнала в металлургическом лазерном анемометре позволяет нивелировать ошибки определения доплеровской скорости, вызванные превышением динамического диапазона фотоприемника пьедестальной компонентой.

Описание метода

Стандартный метод ослабления низкочастотной составляющей доплеровского сигнала состоит в применении адаптивных фильтров высокой частоты для электрического сигнала после фотоприемника [7]. В зависимости от типа и порядка фильтра можно ослабить низкочастотную составляющую сигнала до 1000 раз. Однако данное решение не избавляет от перегрузки самого фотоприемника и вносит погрешность в измерения низких значений скорости объекта. Так при существенном замедлении объекта измерения и возможной остановке, данный метод не позволит измерять скорость, что ведет к высокой погрешности в работе приборов.

Также существует метод компенсации, основанный на поляризационном разделении оптических сигналов двух фотоприемников с последующим вычитанием сигналов [3]. Данный метод имеет тот недостаток, что необходимо дополнительно усложнять оптическую схему, вводя в нее призму Волластона и другие элементы, что приводит к удорожанию прибора и усложняет настройку оптики. Кроме того, эффективность данного метода зависит от деполаризации рассеянного излучения поверхностью движущегося объекта.

В работе используется дифференциальность структуры когерентного света, рассеянного движущимся объектом измерения. За счет компенсации фототоков частотное разделение принимаемого сигнала реализуется непосредственно в квадратичном фотоприемнике, а не в электронном преобразователе фототок-напряжение, обеспечивая существенное повышение отношения сигнал/шум.

Метод реализован в виде дифференциальной схемы с последовательно соединенными лавинными фотодиодами. Если вместо одного фотоприемника разместить симметрично относительно приемной оптической оси два последовательно включенных фотоприемника (рис. 2) так, чтоб принятое излучение делилось на два канала и затем поступало на два фотоприемника, то низкочастотная составляющая сигнала будет вычитаться, а высокочастотная поступать на усилитель.

Рассмотрим упрощенную модель: одночастичный [8] идеальный доплеровский сигнал от двух плоских волн.

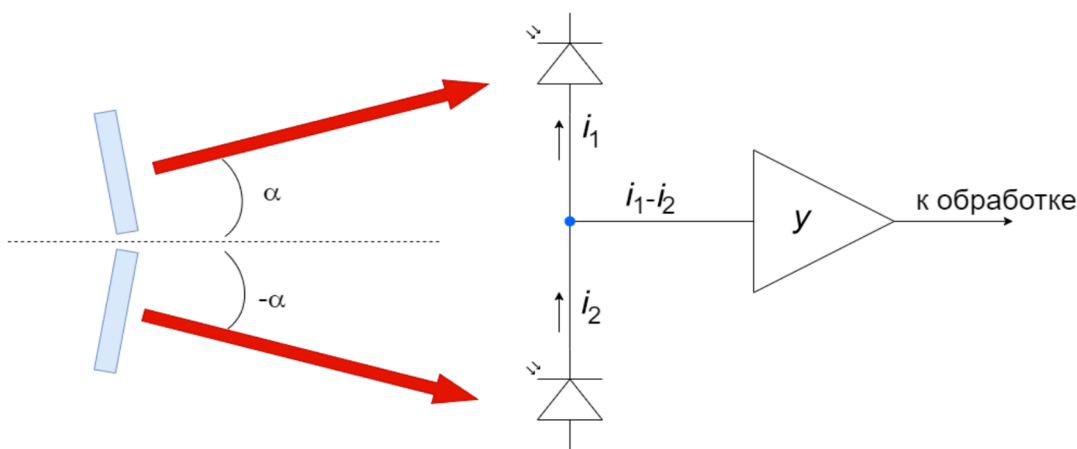


Рис. 2. Схема включения лавинных фотодиодов

Выходной ток первого фотоприемника $i_1(t)$ будет иметь вид:

$$i_1(t) = i_p(t) + I_D(t) \cdot \cos(\omega_D t + \varphi_1), \quad (1)$$

где $i_p(t)$ – низкочастотный пьедестал; $I_D(t)$ – амплитуда доплеровской составляющей; ω_D – частота доплеровской составляющей; φ_1 – фаза сигнала.

На второй фотоприемник будет поступать половина общего приемного сигнала, и сигнал со второго фотоприемника будет иметь вид:

$$i_2(t) = i_p(t) + I_D(t) \cdot \cos(\omega_D t + \varphi_2). \quad (2)$$

При вычитании (2) из (1) получим:

$$\Delta i(t) = i_p(t) - i_p(t) + I_D(t) \cdot \cos(\omega_D t + \varphi_1) - I_D(t) \cdot \cos(\omega_D t + \varphi_2). \quad (3)$$

Так как входной световой поток делится поровну, то низкочастотная составляющая у сигналов одинаковая и вычитается, и остается только высокочастотная часть:

$$\Delta i(t) = I_D(t) \cdot (\cos(\omega_D t + \varphi_1) - \cos(\omega_D t + \varphi_2)). \quad (4)$$

Выражение (4) можно переписать в виде:

$$\Delta i(t) = 2I_D(t) \cdot \sin\left(\omega_D t + \frac{(\varphi_1 + \varphi_2)}{2}\right) \sin\left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right). \quad (5)$$

Отсюда следует, что если разность фаз φ_1 и φ_2 равна π , то на выходе усилителя получим максимальный сигнал.

В реальном случае амплитуды низкочастотной составляющей на фотоприемниках не равны, но можно добиться их существенного ослабления. Также, фаза сигналов является некой случайной статистической величиной, зависящей от свойств объекта измерения. Однако, приведенные выше закономерности сохраняются.

Кроме того, так как каждый лавинный фотодиод уникален, их коэффициенты усиления по умолчанию не равны. Для максимальной компенсации низкочастотной составляющей необходимо подстроить их коэффициенты усиления так, чтобы при попадании приемного оптического сигнала на такой фотоприемник на выходе усилителя низкочастотная составляющая сигнала была минимальна.

Для этого в схеме питания каждого из двух ЛФД имеется подстроечный элемент, регулирующий напряжение смещения и, как следствие, усиление лавинного диода. Один ЛФД можно принять за «опорный» и настраивать только второй для достижения максимального взаимного подавления пьедесталов на выходе трансимпедансного усилителя.

Для получения максимальной по амплитуде высокочастотной части также предусмотрена пространственная юстировка одного из фотоприемников.

Результаты

Данный метод был реализован в фотоприемнике макета металлургического ЛДА и опробован в лабораторных условиях (рис. 3).

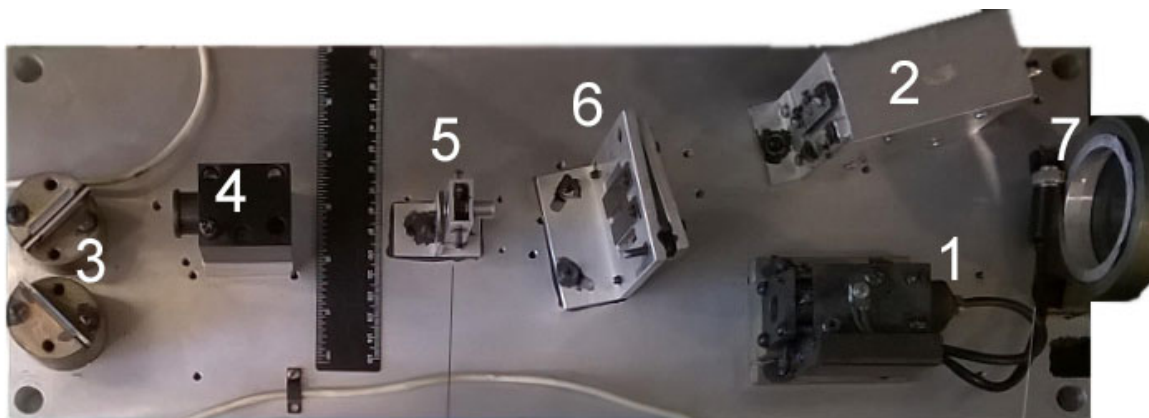


Рис. 3. Макет металлургического ЛДА: 1 – лазерный излучатель, 2 – фотоприемник, 3 – поворотные зеркала, 4 – подстроечная линза, 5 – микрообъектив с дифракционной решеткой, 6 – ограничительная диафрагма и приемные зеркала, 7 – выходной объектив

Лазерный луч, исходящий из излучателя 1, при помощи поворотных зеркал 3 заворачивается и поступает на подстроечную линзу 4, при помощи которой фокусируется в область дифракционной решетки 5. На дифракционной решетке происходит расщепление луча на нулевой, первый и другие порядки. При помощи ограничительной диафрагмы 6 обрезаются все лучи, кроме нулевого и первого порядка, которые попадают на выходной объектив 7 и в перетяжке формируют измерительную зону с максимальной плотностью мощности. От измерительного объекта свет попадает снова в объектив 7 и при помощи двух зеркал 6 фокусируется в район фотоприемников.

В качестве тестового объекта использовалась торцевая часть дюралюминиевого диска, установленного на вращающуюся платформу.

При использовании только одного ЛФД в качестве фотоприемника при определении скорости объекта периодически возникали сбои в алгоритме обработки, так как выходной сигнал усилителя за счет амплитуды пьедестала ограничивался значением напряжения питания усилителя. Таким образом, и высокочастотная составляющая сигнала, содержащая полезную информацию, не могла поступить в модуль обработки.

Однако, после задействования двух ЛФД в схеме вычитания пьедестала, определение скорости происходило без сбоев (рис. 4).

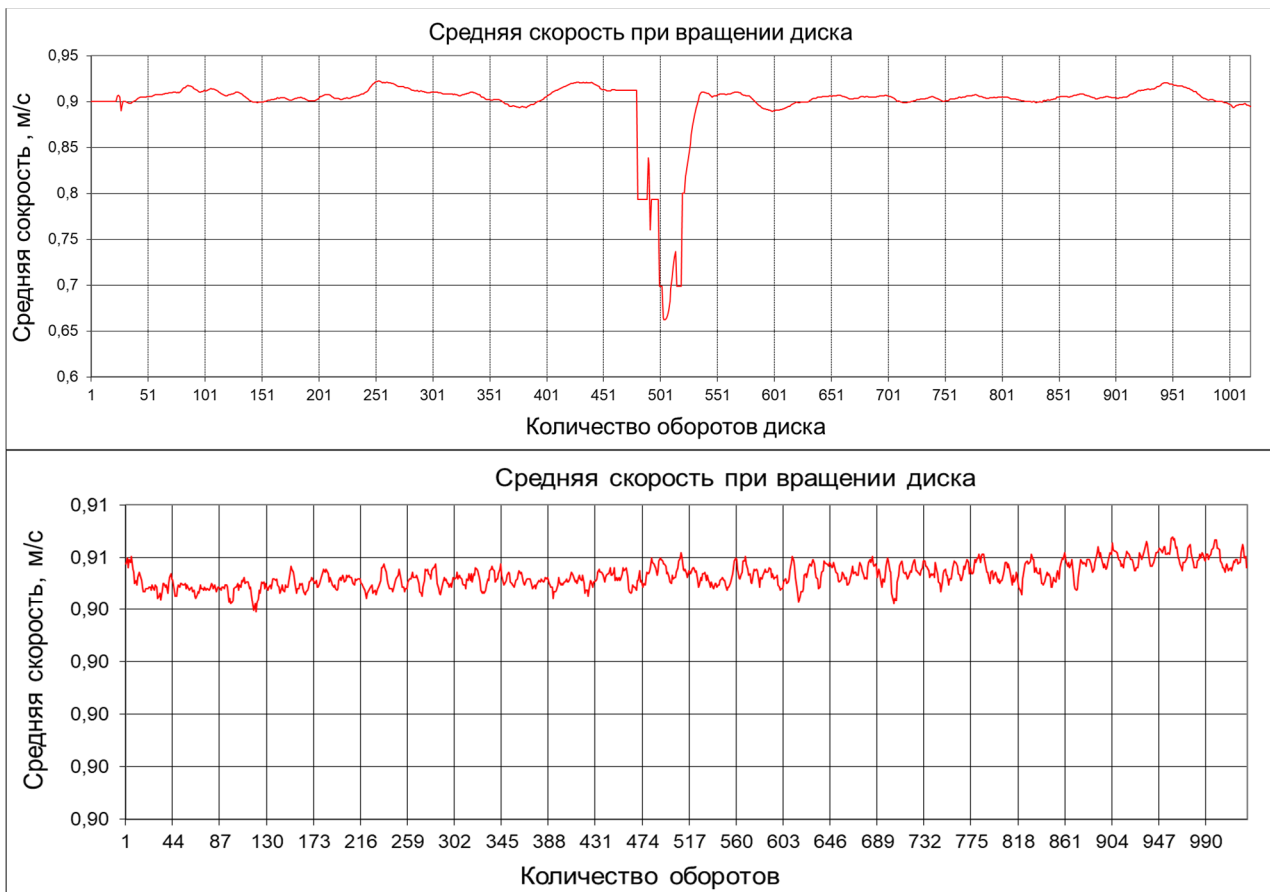


Рис. 4. Средняя скорость вращения диска за оборот. Сверху – со сбоем определения скорости, снизу – без сбоев (с компенсацией пьедестала)

Эксперимент с примененным методом компенсации проводился непрерывно в течение полутора суток для подтверждения работоспособности метода. Метод компенсации низкочастотной части доплеровского сигнала для расширения динамического диапазона фотоприемника успешно прошел лабораторные испытания и перспективен для современных высоконадежных металлургических лазерных доплеровских анемометров.

Заключение

Исследован метод компенсации низкочастотной части доплеровского сигнала для расширения динамического диапазона фотоприемника в металлургическом лазерном доплеровском анемометре, выполнен анализ его преимуществ и ограничений. Показано, что метод актуален для многих видов современных кремниевых фотоприемников, в том числе микропиксельных лавинных фотодиодов, сочетающих преимущества традиционных лавинных фотодиодов и вакуумных фотоэлектронных умножителей.

Разработанный метод вычитания низкочастотной части доплеровского сигнала для расширения динамического диапазона лавинного фотоприемника успешно применен в макете металлургического лазерного анемометра и прошел первичные лабораторные испытания и тестирование.

Применение данного метода позволило в несколько раз снизить влияние низкочастотной составляющей доплеровского сигнала на точность определения скорости горячего проката.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Попов, К. В. Государственный первичный специальный эталон единицы скорости воздушного потока ГЭТ 150-2012 / К. В. Попов, С. А. Поликарпов, Ю. А. Чистяков // Измерительная техника. – 2014. – № 8. – С. 3–4.
2. Кротов С.В., Меледин В.Г., Бакакин Г.В., Павлов В.А., Рахманов В.В., Двойнишников С.В. Метрологические ограничения металлургических лазерных доплеровских измерителей скорости и длины горячего проката // Высокие технологии, фундаментальные исследования, инновации: сборник статей Семнадцатой международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике» 22-23 мая 2014, Санкт-Петербург, Россия / Научные редакторы А.П. Кудинов, М.А. Кудинов. – Спб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2014. – С. 200–203.
3. Дубнищев Ю. Н., Ринкевичюс Б. С. Методы лазерной доплеровской анемометрии. М.: Наука, 1982. 304 с.
4. R. Paschotta, article on "Balanced Photodetection" in the RP Photonics Encyclopedia, retrieved 2024-05-02, <https://doi.org/10.61835/3f2>.
5. Mahnke, P., Kliebisch, O. & Damm, M. Precise characterization of a fiber-coupled laser Doppler anemometer with well-defined single scatterers. Appl. Phys. B 125, 119 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00340-019-7229-5>.
6. Kwok K. Ng, "Avalanche Photodiode (APD)," in Complete Guide to Semiconductor Devices, IEEE, 2002, pp.454-461, doi: 10.1109/9780470547205.ch58.
7. Paarmann, L.: Design and Analysis of Analog Filters. Springer, Boston (2003). <https://doi.org/10.1007/b100752>.
8. Albrecht, H.-E., Borys, M., Damaschke, N., Tropea, C. (2003). Light Scattering from Small Particles. In: Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques. Experimental Fluid Mechanics. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-05165-8_4.

© В. В. Рахманов, М. Г. Меледин, С. В. Кротов, В. А. Павлов, 2024