

В. В. Рахманов^{1}, В. Г. Меледин¹, Г. В. Бакакин¹, С. В. Двойнишников¹*

Исследование влияния квадратурных демодуляторов лазерных доплеровских анемометров на погрешность определения скорости

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

Аннотация. Выполнено исследование влияния микросхем квадратурных демодуляторов на погрешность определения доплеровской частоты лазерным доплеровским анемометром (ЛДА) в зависимости от соотношения сигнал/шум сигнала фотоприемника. Рассматривался режим одночастичного рассеяния при низких значениях соотношения сигнал/шум. В качестве источников шума рассматривались собственный шум системы сбора данных и дробовой шум фотоприемника. В качестве измеренного параметра использовалось среднеквадратичное отклонение (СКО) доплеровской частоты. В случае учета только шумов системы сбора данных, лучшие результаты измеренной доплеровской скорости были получены при использовании микросхемы квадратурного демодулятора КФ174ПС1 (СКО=0,03% при соотношении сигнал/шум = 1). При учете дробового шума, соответствующего применению кремниевого фотоприемника, оптимальные результаты обеспечивает микросхема LTC5584 (СКО=0,188% при соотношении сигнал/шум = 1). Полученные результаты показывают, что при использовании кремниевых фотоприемников с высоким уровнем дробового шума в лазерных доплеровских анемометрах оптимальным вариантом применения микросхемы двойного балансного демодулятора будет микросхема LTC5584.

Ключевые слова: лазерный доплеровский анемометр, квадратурный демодулятор, погрешность измерения скорости

V. V. Rakhmanov^{1}, V. G. Meledin¹, G. V. Bakakin¹, S. V. Dvoynishnikov¹*

Investigation of the Influence of Quadrature Demodulators of Laser Doppler Anemometers on Velocity Determination Error

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

Abstract. The influence of quadrature demodulator chips on the error of determining the Doppler frequency by a laser Doppler anemometer depending on the signal-to-noise ratio of the photodetector signal is studied. The single-particle scattering mode at low values of the signal-to-noise ratio was considered. The intrinsic noise of the data acquisition system and the shot noise of the photodetector were considered as noise sources. The standard deviation of the Doppler frequency was used as the measured parameter. In the case of taking into account only the noise of the data acquisition system, the best results of the measured Doppler speed were obtained when using the KF174PS1 quadrature demodulator chip (RMS=0,03% at a signal-to-noise ratio of 0 dB). When taking into account the shot noise corresponding to the application of the silicon photodetector, the optimal results provide the chip LTC5584 (RMS = 0,188% at a signal-to-noise ratio of 0 dB). The results show that when using silicon photodetectors with a high level of shot noise in laser Doppler anemometers, the best option for the use of a dual balanced demodulator chip will be the LTC5584 chip.

Keywords: laser Doppler anemometer, quadrature demodulator, speed measurement error

Введение

Развитие лазерной доплеровской анемометрии связано с применением новейшей оптико-электронной элементной базы, расширением метрологических и функциональных характеристик измерительных комплексов [1–4].

В современных высокоточных лазерных доплеровских анемометрах широко используется дифференциальная схема с двумя зондирующими пучками. Передающий тракт устроен таким образом, что расщепление лазерного луча происходит при помощи акустооптического модулятора (АОМ) [5–6]. Луч с частой излучения F_L от источника лазерного излучения попадает на АОМ и за счет дифракции на бегущей ультразвуковой волне на частоте F_M расщепляется на несколько лучей. Для уменьшения интенсивности всех дифракционных максимумов, кроме первого, лазерный луч направляется на АОМ под углом Брэгга.

На движущийся объект со скоростью \vec{V} направляются два лазерных пучка, а рассеянное в произвольном направлении оптическое излучение регистрируется фотоприемником. Величина доплеровского сдвига частоты F_D определяется геометрией освещающих пучков и не зависит от приемной апертуры. На фотоприемник падает свет с суммой частот $F_L + F_M + F_D$. Измерение доплеровского сдвига частоты дает информацию о скорости:

$$V_X = \frac{F_D}{\gamma}, \quad (1)$$

где V_X – компонента вектора скорости \vec{V} , лежащая в плоскости рисунка и направленная перпендикулярно оптической оси прибора; F_D – доплеровский сдвиг частоты; γ – коэффициент преобразования, который находится через известные параметры оптической схемы.

Частота F_L для видимого лазерного излучения составляет $(4..8) \cdot 10^{14}$ Гц и лежит далеко за пределами полосы пропускания фотоприемника. На выходе фотоприемника после пролета светорассеивающей частицы формируется гауссоподобный сигнал, состоящий из высокочастотной и низкочастотной составляющих. Частота колебаний высокочастотной составляющей определяется суммой или разностью (в зависимости от направления пролета частицы) значений частоты модуляции F_M и частоты доплеровского сдвига F_D . Для выделения доплеровской частоты F_D из высокочастотной составляющей сигнала применяют квадратные демодуляторы [7], выполняющие спектральное гомодинное преобразование. Демодулятор переносит спектр выходного сигнала фотоприемника из области частоты модуляции F_M в область нулевой частоты. Он сохраняет информацию о знаке отклонения частоты доплеровского радиосигнала от опорной и представляет ее в виде относительной фазы выходных сигналов.

В случае, когда фотоприемником выступает кремниевый фотоумножитель (Si-ФЭУ) вместо классического вакуумного ФЭУ, было экспериментально показано [8], что уровень шумов выходного сигнала сопоставим с амплитудой высо-

кочастотной составляющей. Это ухудшает точность определения доплеровской частоты.

В данной работе рассмотрены особенности применения различных квадратурных демодуляторов в условиях высоких дробовых шумов в выходном сигнале кремниевого фотоприемника.

Методика экспериментальных исследований характеристик микросхем квадратурных демодуляторов

Существуют различные интегральные схемы, реализующие работу квадратурных демодуляторов. С развитием микроэлектроники данные микросхемы постоянно совершенствуются. Увеличиваются рабочие частоты и полосы пропускания квадратурных демодуляторов, уменьшаются погрешности преобразования и уровни интермодуляционных искажений.

Однако, основная часть современных микросхем квадратурных демодуляторов предназначена для работы в линиях высокочастотной связи с частотами свыше 800 МГц. Для задач лазерной доплеровской анемометрии они не подходят, так как не работают при частотах ниже 100 МГц.

Из микросхем, работающих в данном диапазоне частот, для проверки их работы в условиях высоких дробовых шумов были выбраны 4 микросхемы: КФ174ПС1 (НПП «Пульсар»), SA612A (NXP Semiconductor), ADL5380 (Analog Devices Inc.) и LTC5584 (Analog Devices Inc.).

Был собран измерительный стенд (рис. 1) по исследованию влияния квадратурных демодуляторов на погрешность определения доплеровской частоты при низких значениях соотношения сигнал/шум во входном сигнале.

Так как добиться единообразных сигналов со стабильной частотой (на уровне $10^{-6}\%$) на выходе фотоприемника в реальных условиях эксперимента крайне сложно, то использовался модельный сигнал. Для его формирования на входы сумматора (5) подаются три сигнала: гауссоподобный низкочастотный пьедестал при помощи генератора сигналов произвольной формы (1), синусоидальный сигнал с частотой 81 МГц (2) и сигнал дробового шума (3) через коммутатор (4). На выходе демодулятора формируются синфазная и квадратурная составляющие демодулированного сигнала с разностной частотой 1 МГц. Эти сигналы поступают на 12-ти разрядный аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) (7) и далее – в систему сбора данных (8) для дальнейшей обработки и анализа.

Изменяя амплитуду сигнала высокочастотного генератора (2) от 0 до -30 дБм, при неизменной амплитуде шумового сигнала (3), можно моделировать различные соотношения сигнал/шум, возникающие при работе реальных приборов с фотоприемниками на основе Si-ФЭУ.

Квадратурные составляющие демодулированного сигнала при помощи комплексного преобразования Фурье анализируются на наличие пиков интенсивности. По пикам интенсивности в частотной области определяется частота сигнала. И для выборки частот вычисляется среднеквадратичное отклонение (СКО), характеризующее ошибку измерения частоты.

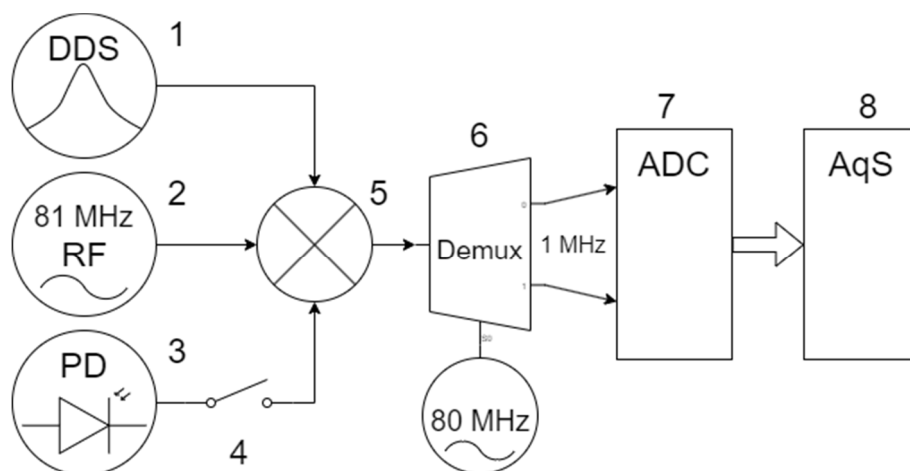


Рис. 1. Схема измерительного стенда: 1 – генератор сигналов произвольной формы, 2 – ВЧ генератор, 3 – источник дробового шума, 4 – коммутатор, 5 – сумматор, 6 – демодулятор, 7 – АЦП, 8 – система сбора данных

Рассматривались два случая работы измерительной системы: без добавления дробового шума и с добавлением дробового шума. Первый случай соответствует работе измерительной системы в идеальных условиях высокой интенсивности принимаемого фотоприемником сигнала. Тут соотношение сигнал/шум высокое, и уровень шума определяется шумами электронных модулей ЛДА.

Для измерения собственных шумов системы были записаны данные при отключенных генераторах на входе сумматора. Характерный спектр таких шумов показан ниже (рис. 2а).

Видно, что существуют выделенные частоты в спектре шумов, которые соответствуют 10 и 20 МГц. Амплитуда собственных шумов измерительной системы составляет порядка 10 мВ. И она разная для каждого анализируемого квадратурного демодулятора, так как различаются их коэффициенты усиления. Потому для каждого демодулятора измерялась амплитуда собственных шумов.

Второй случай – с добавлением дробового шума фотоприемника – соответствует работе измерительной системы в условиях недостаточной интенсивности принимаемого фотоприемником сигнала и больше соответствует работе Si-ФЭУ в качестве фотоприемника.

Сигнал источника дробового шума имеет амплитуду в 10 раз большую, чем амплитуда собственных шумов системы: около 100 мВ. Амплитуда дробового шума, измеренная системой сбора данных, также будет отличаться для разных микросхем квадратурных демодуляторов. Спектр сигнала при добавлении дробового шума для микросхемы SA612A показан на рис. 2б.

Измеренный коэффициент усиления для разных плат квадратурных смесителей приведен в табл. 1.

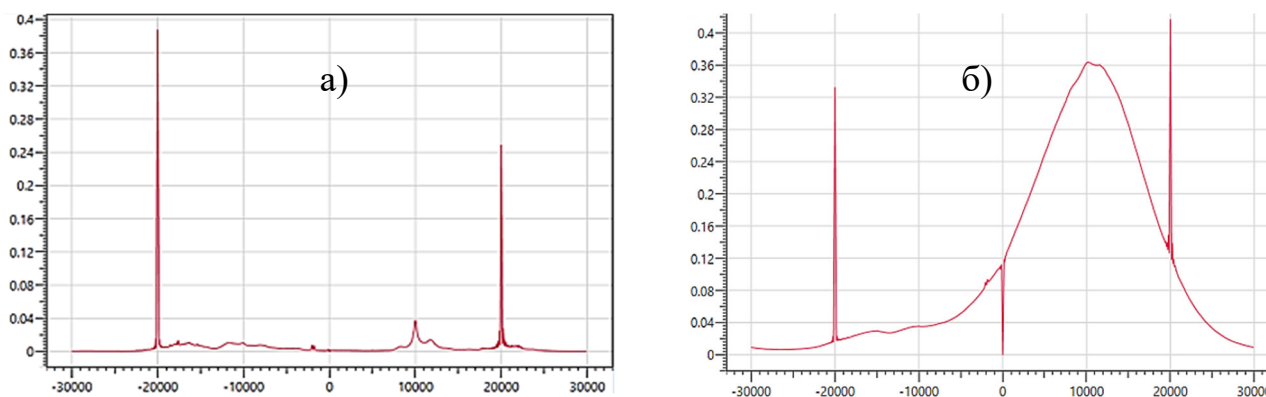


Рис. 2. Характерный спектр собственных шумов измерительной системы (а) и спектр источника дробовых шумов (б)

Таблица 1

Коэффициенты усиления плат квадратурных демодуляторов

Наименование	КФ174ПС1	SA612A	ADL5380	LTC5584
Коэффициент усиления	0,2	0,2	0,8	0,5

Время сбора данных каждой выборки составляло 10 секунд (около 25000 измерений в выборке). Этого достаточно для достоверной оценки ошибки измерения частоты демодулированного сигнала.

Квадратурный сигнал, анализируемый в данной работе, имел в среднем 6 периодов колебаний. Это соответствует среднему значению числа колебаний сигнала в реальных экспериментах для анемометра ЛАД-05. Число колебаний сигнала соответствует числу интерференционных полос в измерительной области ЛДА, пересекаемых светорассеивающей частицей.

Результаты

В результате эксперимента были получены значения СКО частоты демодулированного сигнала для случая без добавления дробового шума (табл. 2) и с добавлением дробового шума (табл. 3). Для каждого измерения вычислялось среднее значение частоты и СКО частоты по выборке в % от среднего значения.

Таблица 2

СКО частоты демодулированного сигнала без дробового шума

Сигнал/шум	SA612A	КФ174ПС1	ADL5380	LTC5584
20,0	0,004	0,003	0,257	0,003
10,0	0,005	0,005	0,257	0,010
5,0	0,010	0,006	0,257	0,019
2,0	0,023	0,010	0,260	0,062
1,0	0,043	0,030	0,276	0,203
0,5	0,112	0,082	0,366	0,320

Для первого случая, когда учитывается только собственный шум системы сбора данных, минимальная ошибка определения частоты демодулированного сигнала получается у микросхемы КФ174ПС1, производства РФ. Даже при отношении сигнал/шум, равном 0,5, когда амплитуда шумов в 2 раза больше амплитуды полезного сигнала, получены значения СКО частоты сигнала менее 0,1%.

Чуть хуже итоговые характеристики у микросхемы SA612A. У LTC5584 значения СКО приемлемые для значений сигнал/шум больше 1. При этом микросхема ADL5380, показавшая худший результат, работала в режиме «двоения» частоты демодулированного сигнала. Возможно, это обусловлено тем, что работа данного квадратурного демодулятора не гарантируется в полосе частот ниже 400 МГц. Несмотря на это он участвовал в экспериментах, чтобы проверить возможность его работы в полосе частот до 100 МГц.

Для второго случая, когда добавляется дробовой шум фотоприемника, результаты меняются. Минимальную ошибку определения частоты демодулированного сигнала показывают уже микросхемы LTC5584 и ADL5380.

Таблица 3

СКО частоты демодулированного сигнала с дробовым шумом

Сигнал/шум	SA612A	КФ174ПС1	ADL5380	LTC5584
4,0	0,239	0,183	0,038	0,015
2,2	0,253	0,234	0,089	0,053
1,3	0,284	0,271	0,152	0,145
0,7	0,393	0,355	0,225	0,234
0,4	0,592	0,510	0,323	0,338
0,2	1,003	0,859	0,547	0,549
0,1	1,665	1,301	0,918	0,940

При хорошем качестве сигнала (сигнал/шум >2) лидирует LTC5584. При ухудшении сигнала до значений сигнал/шум <1, немного более лучший результат у получается у ADL5380. Микросхемы КФ174ПС1 и SA612A показывают примерно одинаковый результат. Причем видно, что СКО без дробового шума и с шумом при схожих значениях сигнал/шум изменилось в худшую сторону на порядок. Это говорит о сильном проникновении шумового сигнала со входа у данных демодуляторов. И использовать микросхемы КФ174ПС1 и SA612A с кремниевыми фотоумножителями при соотношении сигнал/шум менее чем 4 не рекомендуется.

На рис. 3 представлены полученные данные о СКО частоты демодулированного сигнала с добавлением дробового шума в виде графиков.

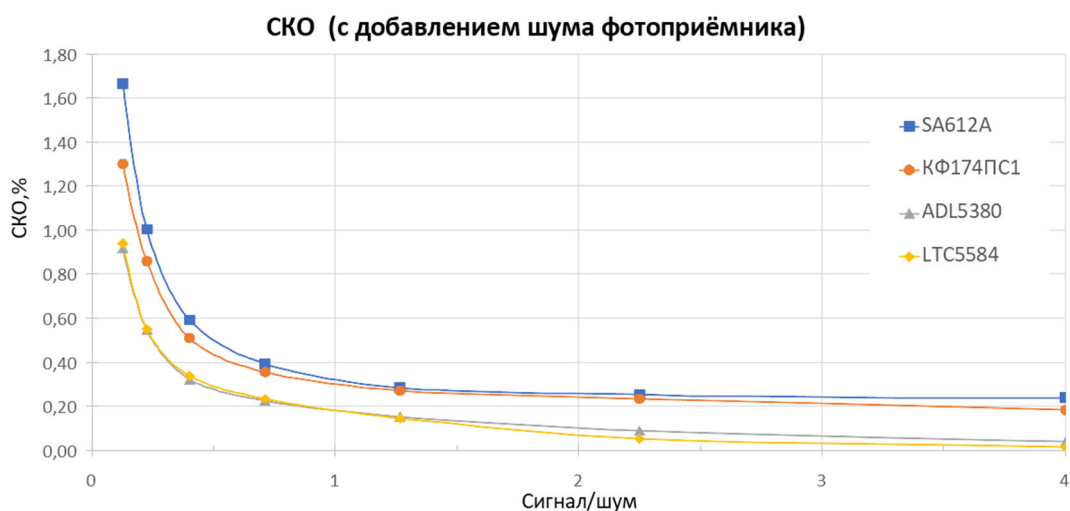


Рис. 3. СКО определения частоты демодулированного сигнала с добавлением дробового шума

Обсуждение

Полученные данные хорошо согласуются с расчетными значениями, приведенными в работе [3] для случая собственных шумов системы. Так для числа периодов колебаний сигнала, равного 5, при соотношении сигнал/шум, равном 1, предлагаемый авторами метод максимального правдоподобия дает оценку СКО в 0,04%. Это значение хорошо согласуется с полученным экспериментальным результатом в 0,03% для КФ174ПС1 или 0,043 для SA612A.

Однако, в случае добавления дробового шума лучший результат СКО частоты, полученный экспериментальным путем, равен 0,19%, что почти в 5 раз хуже теоретического расчета. Но так как в численных расчетах использовались только идеальные условия в отсутствии любых шумов, кроме дробового шума фотоприемника, то такое расхождение в результатах вполне допустимо.

Заключение

Выполнено исследование влияния микросхем квадратурных демодуляторов на погрешность определения доплеровской частоты в зависимости от соотношения сигнал/шум сигнала фотоприемника.

В случае учета только шумов системы сбора данных, без дробового шума фотоприемника лучшие результаты получаются при использовании микросхемы КФ174ПС1 (СКО=0,03% при соотношении сигнал/шум=1).

При добавлении дробового шума, соответствующего применению кремниевого фотоприемника, оптимальные результаты обеспечивает микросхема LTC5584.

В данной работе исследован только случай, когда число периодов колебаний сигнала равно 6. Однако возможны оптические схемы построения ЛДА, где число полос интерференционной картины равно 10 и более. И в дальнейшем нужно исследовать влияние количества полос на точность определения доплеровской частоты для нахождения оптимального их количества.

Кроме того, возможно более детальное исследование ухудшения точности определения доплеровской частоты при использовании КФ174ПС1 в случае добавления дробового шума.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Меледин В. Г. Информатика оптоэлектронных измерений: наука и инновационные промышленные технологии // Новосибирск: Изд-во ИТ СО РАН. – 2008. – 75 с.
2. Коронкевич В. П., Соболев В. С., Дубнищев Ю. Н. Лазерная интерферометрия. Новосибирск: Наука, 1981. – 211 с.
3. Соболев В. С., Кащеева Г. А. Потенциальная точность методов лазерной доплеровской анемометрии в режиме одночастичного рассеяния // Автометрия, 2017. – Т. 53, № 3. – С. 74–80.
4. Рахманов В. В., Павлов В. А., Бакакин Г. В., Двойнишников С. В. Метод оптической фильтрации сигналов в трехкомпонентных лазерных доплеровских анемометрах // Интерэкспо Гео-Сибирь, 2022. – Т. 8, № 1. – С. 99–104.
5. Соболев В. С., Журавель Ф. А., Кащеева Г. А. Сравнительный анализ качества лазерных доплеровских систем методами максимального правдоподобия и приращений фазы // Автометрия. – 2016. – 52, № 6. – С. 29–33.
6. Павлов В.А., Бакакин Г.В., Главный В.Г., Кротов С.В., Куликов Д.В., Рахманов В.В., Садбаков О.Ю. Акустооптический коммутатор оптических измерительных каналов лазерных доплеровских анемометров // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 2. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=8934> (дата обращения: 14.03.2023).
7. Бакакин Г.В., Аникин Ю.А., Главный В.Г., Двойнишников С.В., Кабардин И.К., Кротов С.В., Павлов В.А., Садбаков О.Ю., Чубов А.С. Спектральный оптико-электронный квадратурный преобразователь сигналов лазерного доплеровского анемометра // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 2. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=8794> (дата обращения: 14.03.2023).
8. V. V. Rakhmanov et al, 2021, J. Phys.: Conf. Ser. 2057, 012088.

© В. В. Рахманов, М. Г. Меледин, Г. В. Бакакин, С. В. Двойнишников, 2023