

В. В. Рахманов¹✉, В. Г. Меледин¹, Г. В. Бакакин¹, В. Г. Главный¹

Методика тестирования амплитудно-частотных характеристик фотоэлектронных умножителей

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

Аннотация. В статье представлена методика тестирования амплитудно-частотных характеристик фотоэлектронных умножителей, адаптированная к условиям применения в лазерных доплеровских анемометрах. Точность измерений лазерных доплеровских анемометров напрямую зависит от способности фотоприемника корректно передавать высокочастотные сигналы без искажений. Существующие методики тестирования не всегда учитывают специфику работы фотоприемников в условиях слабых сигналов и широкого динамического диапазона, характерных для лазерных доплеровских анемометров. Предложенный метод основан на применении белого шума, генерируемого источником теплового излучения, в качестве тестового сигнала. Это позволило избежать использования дорогостоящих импульсных лазеров или сложных модуляторов света. В работе были получены зависимости выходного напряжения от частоты при различных уровнях питающего напряжения.

Ключевые слова: фотоэлектронный умножитель, амплитудно-частотная характеристика, дробовой шум

V. V. Rakhmanov¹✉, V. G. Meledin¹, G. V. Bakakin¹, V. G. Glavny¹

Method for testing the amplitude-frequency characteristics of photomultiplier tubes

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

Abstract. The article presents a technique for testing the amplitude-frequency characteristics of photomultipliers adapted to the conditions of use in laser Doppler anemometers. The accuracy of laser Doppler anemometer measurements directly depends on the ability of the photodetector to correctly transmit high-frequency signals without distortion. Existing testing techniques do not always take into account the specifics of photodetector operation under conditions of weak signals and a wide dynamic range typical of laser Doppler anemometers. The proposed method is based on the use of white noise generated by a thermal radiation source as a test signal. This made it possible to avoid the use of expensive pulsed lasers or complex light modulators. In the work, the dependences of the output voltage on the frequency at different levels of the supply voltage were obtained.

Keywords: photomultiplier tube, amplitude-frequency characteristic, shot noise

Введение

Лазерные доплеровские анемометры (ЛДА) являются ключевыми инструментами в аэродинамике, гидродинамике, промышленной автоматизации и биомедицинских исследованиях, обеспечивая бесконтактное измерение скорости объектов с высокой точностью. Однако их эффективность напрямую зависит от

характеристик фотоприемных устройств, таких как фотоэлектронные умножители (ФЭУ), которые преобразуют оптические сигналы, модулированные доплеровским сдвигом, в электрические. Одним из критических параметров фотоприемника на основе ФЭУ является амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), определяющая диапазон частот, в котором устройство способно корректно передавать сигнал без искажений.

Ограничения полосы пропускания ФЭУ могут приводить к потере информации о высокочастотных компонентах доплеровского сигнала, что снижает точность измерений, особенно в условиях высокоскоростных потоков или малых уровней освещенности [1-2].

При подготовке к различным физическим экспериментам зачастую необходимо выполнять исследования характеристик применяемых ФЭУ на соответствие заданным параметрам: коэффициент усиления, рабочее напряжение при заданном усилении, темновой ток при максимально допустимом напряжении, максимальная квантовая эффективность, временные характеристики и др. [3-5].

Современные методики тестирования ФЭУ часто не учитывают специфические требования ЛДА, такие как необходимость работы в условиях слабых сигналов, широкого динамического диапазона и высоких частот доплеровского сдвига (до сотен МГц).

Для тестирования АЧХ фотоприемника используют различные методы модуляции излучения передающего сигнала: вертикально-излучающие лазеры, акустооптические ячейки Брэгга, электрооптические ячейки Керра, методы пикосекундных оптических импульсов, интерференции двух лазеров с близкими длинами волн, интерферометрическая демодуляция частотно моделированного сигнала полупроводникового лазера и др. [6-7].

Но эти методы сложны в реализации, требуют дорогостоящего оборудования и, зачастую, избыточны в случае, когда необходимо оценить рабочий диапазон частот фотоприемника.

Разработка усовершенствованной методики тестирования АЧХ ФЭУ, адаптированной к условиям ЛДА, позволит:

- повысить точность измерений за счет учета нелинейных искажений и шумовых характеристик;
- оптимизировать выбор ФЭУ для конкретных применений, сокращая затраты на разработку;
- расширить функциональные возможности ЛДА в высокочастотных режимах с низкой интенсивностью светового потока.

Актуальность исследования усиливается растущими требованиями к точности в высокоскоростных аэродинамических приложениях, где важен широкий динамический диапазон измеряемых скоростей.

Целью данной работы является создание методики тестирования АЧХ фотоприемников в условиях работы, приближенных к реальным в составе ЛДА.

Методика тестирования

На быстродействие ФЭУ как конечного изделия (фотоприемника) влияют несколько параметров: конструкция вакуумной колбы, реализация делителя

напряжения, быстродействие усилителя, флуктуации и уровень напряжения питания и др. [8]. На рис. 1 представлены основные части фотоприемника на основе ФЭУ, влияющие на его быстродействие.

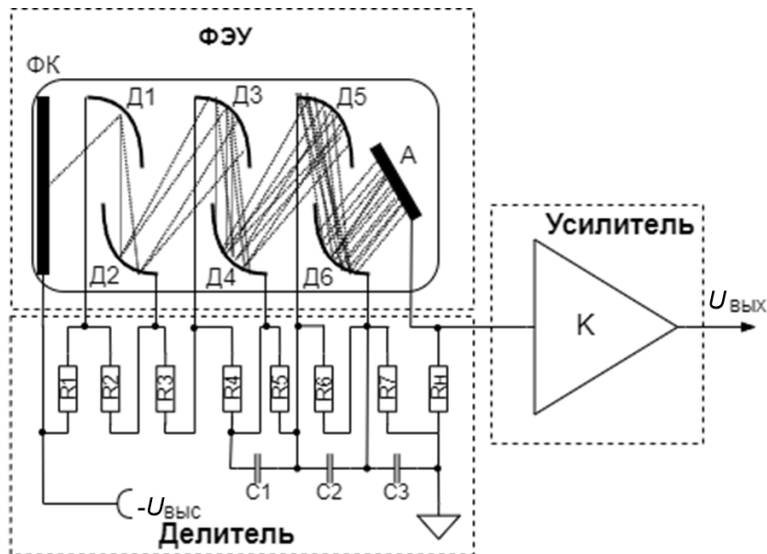


Рис. 1. Схематичное изображение составных частей фотоприемника на основе ФЭУ

ФЭУ, упрощенно, состоит из фотокатода ФК, набора диодов Д1-Д6 и анода А. Для получения электронной лавины между всеми выводами ФЭУ создается электрическое поле при помощи делителя напряжения и приложенного к ФК напряжения $-U_{\text{выс}}$.

Один из самых простых методов оценки быстродействия фотоприемника состоит в измерении времени нарастания фронта выходного сигнала после усилителя (рис. 2).

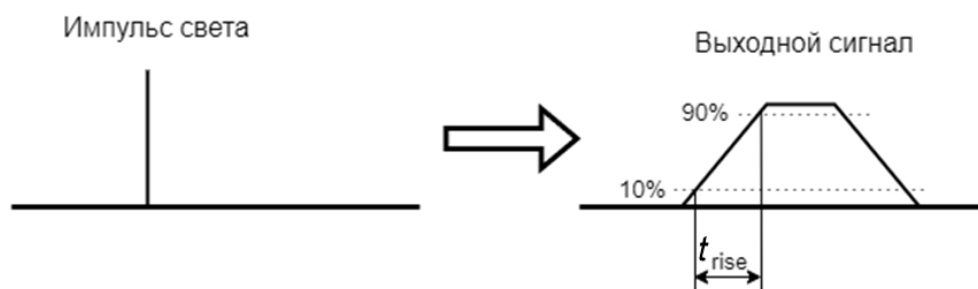


Рис. 2. Измерение времени нарастания t_{rise} от короткого импульса света

На практике пересчет полосы времени нарастания в полосу пропускания выполняют по формуле:

$$F = 350 / t_{\text{rise}}, \quad (1)$$

где F – частота в МГц; t_{rise} – время в нс.

Так, для заданной полосы пропускания в 100 МГц измеренное время нарастания сигнала с выхода усилителя должно быть не более 3,5 нс.

Типичные времена нарастания для различных типов ФЭУ составляют от 0,1 до 20 нс и приведены в табл. 1.

Таблица 1

Типичные времена нарастания для различных типов ФЭУ [8]

Тип диодной структуры	Время нарастания, нс
С круговой клеткой	0,9 – 3,0
Коробочно-сеточный	6 – 20
Линейно-ориентированный	0,7 – 3
Жалюзиобразный	6 – 18
Сетчатый	1,5 – 5,5
Микроканальный	0,1 – 0,3

Необходимо отметить, что на время нарастания сигнала и, как следствие, полосу пропускания ФЭУ влияет напряжение питания: чем выше напряжение питания, тем выше напряженность электрического поля, и меньше времени необходимо лавине электронов для преодоления расстояния от фотокатода до анода. Поэтому времена нарастания для конкретных типов ФЭУ приводят при определенном напряжении питания.

Применение такого подхода к измерению АЧХ фотоприемников на основе ФЭУ требует наличие импульсных калиброванных источников света, что не всегда возможно. Кроме того, данный метод не позволяет получить детальную картину АЧХ, а только оценить полосу пропускания.

Предлагаемый нами метод основан на использовании белого шума в качестве тестового сигнала для проведения измерений частотной характеристики фотоприемника [9].

Белый шум – это случайный сигнал, математически аналогичный импульсной δ -функции во времени и плоскому спектру в частотном представлении. Белый шум может использоваться в качестве альтернативного тестового сигнала для оценки частотной характеристики фотоприемников.

Для реализации методики в качестве источника белого шума, обеспечивающего тестирование всего тракта фотоприемника, используется статистически осредненный источник теплового излучения видимого диапазона, который вызывает электронную лавину на фотоприемнике. В результате шумовой сигнал с равномерной спектральной плотностью $S(f)$ проходит через систему с частотной характеристикой $H(f)$, то спектр выходного сигнала будет:

$$S_{\text{вых}}(f) = |H(f)|^2 \cdot S(f), \quad (1)$$

Зная $S(f)$ и измерив $S_{\text{вых}}(f)$, можно восстановить $|H(f)|$:

$$|H(f)| = \sqrt{S_{\text{ВЫХ}}(f) / S(f)} . \quad (2)$$

При уровне собственных шумов ФЭУ (темновой шум) значительно меньшем уровня сигнала от тестового некогерентного источника излучения им можно пренебречь.

Таким образом, для получения АЧХ фотоприемника на основе ФЭУ необходим источник теплового излучения, исследуемый фотоприемник с источником питания и спектроанализатор.

В тестовом стенде (рис. 3) использовались счетно-фотонные ФЭУ производства Hamamatsu R6358-10 с усилителем собственной разработки и источником питания на 1,25 кВ и анализатор спектра АКИП 4205/3 с частотным диапазоном от 9 кГц-1,5 ГГц. Производитель заявляет, что время нарастания фронта для данного ФЭУ составляет 1,4 нс, что соответствует граничной частоте 250 МГц. Однако применяемый делитель напряжения и усилитель могут существенно ограничивать данную полосу частот.

Интенсивность излучения, падающего на ФЭУ, регулируется размером диафрагмы на входе фотоприемника и интенсивностью источника теплового излучения.

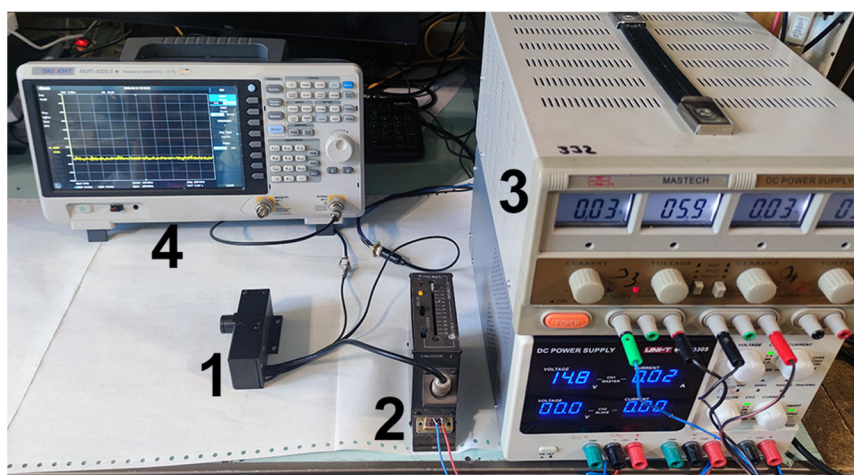


Рис. 3. Фотография тестового стенда: 1 – фотоприемник; 2 – источник высокого напряжения; 3 – источник питания усилителя; 4 – спектроанализатор

Результаты

В результате применения разработанной методики тестирования амплитудно-частотных характеристик фотоэлектронных умножителей получены графики зависимости значений выходного напряжения от частоты (рис. 4) при разном напряжении высоковольтного питания.

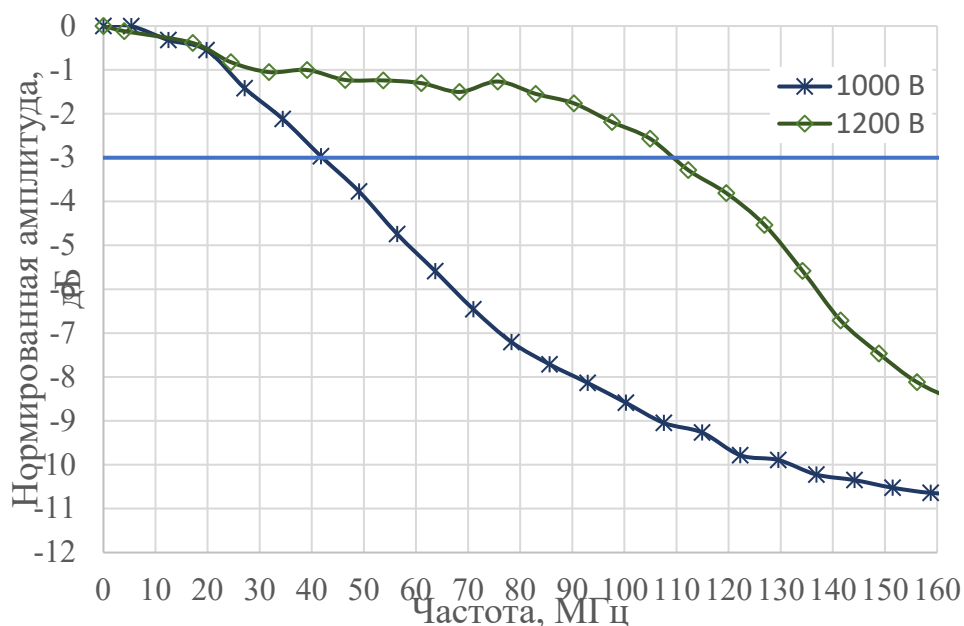


Рис. 4. АЧХ фотоприемника $H(f)$ при разных напряжениях питания

Из приведенного графика видно, что при напряжении на ФЭУ, равном 1000 В, полоса пропускания фотоприемника по уровню -3 дБ (42 МГц) ограничена исключительно самим модулем ФЭУ, и другие элементы не играют существенной роли. При подаче почти максимального для данного вида ФЭУ напряжения полоса пропускания расширяется до 110 МГц. В данном случае уже начинают сказываться ограничения, накладываемые усилителем сигнала и применяемым делителем напряжения.

Кроме того, данный метод позволяет наглядно оценить равномерность полосы пропускания в рабочей области. При применении данного фотоприемника в составе ЛДА, рабочей областью частот является диапазон от 60 до 100 МГц с центром на 80 МГц. При коэффициенте преобразования доплеровской частоты в скорость в районе 120 кГц/(м/с) (типичный коэффициент преобразования для ЛДА серии ЛАД-05*) это соответствует диапазону скоростей от -160 до $+160$ м/с.

Из данного графика видно, что при напряжении 1000 В полезный сигнал будет ослабляться, в среднем, в 2,3 раза. Причем, ослабление будет неравномерным и будет зависеть от направления измеряемой скорости потока. При этом неравномерность АЧХ в рабочей области частот составляет 3,4 дБ. В случае использования напряжения 1200 В неравномерность в рабочей области будет всего 1 дБ, и ослабление сигнала не превысит 1,3 раза.

Заключение

Разработана методика тестирования АЧХ ФЭУ, основанная на применении белого шума, генерируемого источником теплового излучения, адаптированная к специфике работы лазерных доплеровских анемометров.

Создан тестовый стенд, и получены экспериментальные данные зависимости значений выходного напряжения от частоты $H(f)$ при разном напряжении высоковольтного питания.

Данная методика позволит оптимизировать выбор ФЭУ для конкретных применений и повысить точность измерений за счет учета искажений АЧХ в рабочей области.

В дальнейшем планируется провести сравнение данного метода с методом оценки полосы пропускания при помощи импульсного лазера.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Rakhmanov, V.V., Kabardin, I.K., Klimov, A.V. et al. Correcting Spectral Density of Laser Doppler Anemometer Signals during Measuring of High-Speed Aerodynamic Flows. Part 1. J. Engin. Thermophys. 34, 12–24 (2025). <https://doi.org/10.1134/S1810232825010023>.
2. Kabardin, I.K., Rakhmanov, V.V., Klimov, A.V. et al. Correcting Spectral Density of Laser Doppler Anemometer Signals during Measuring of High-Speed Aerodynamic Flows. Part 2. J. Engin. Thermophys. 34, 25–34 (2025). <https://doi.org/10.1134/S1810232825010035>.
3. Письма в ЭЧАЯ. 2021. Т. 18, № 7(239). С. 643–661.
4. Yijiang Peng et al 2024 JINST 19 T08006 DOI 10.1088/1748-0221/19/08/T08006.
5. Research on time response of photomultiplier tubes / J. Xia, S. Qian, Z. Ning [et al.] // Proceedings of Science: 23, Vienna, 22–29 июля 2015 года. – Vienna, 2015. – P. 241. – EDN XUQPWN.
6. E. Eichen, J. Schlafer, W. Rideout and J. McCabe, "Wide-bandwidth receiver photodetector frequency response measurements using amplified spontaneous emission from a semiconductor optical amplifier," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 8, no. 6, pp. 912-916, June 1990, doi: 10.1109/50.54509.
7. Mengke Wang, Shangjian Zhang, Ying Xu, Yutong He, Yali Zhang, Zhiyao Zhang, and Yong Liu, "Frequency response measurement of high-speed photodiodes based on a photonic sampling of an envelope-modulated microwave subcarrier," *Opt. Express* 29, 9836-9845 (2021).
8. Hamamatsu Photonics K. K. (2017). PHOTOMULTIPLIER TUBES Basics and Applications, 4-th edition. https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMT_handbook_v4E.pdf (Дата обращения 22 апреля 2025 г.).
9. Saravanakumar Arumugam Investigations on using white noise as a test signal for performing frequency response measurements on transformers // *Electric Power Systems Research*, Vol. 202, 2022, 107586, ISSN 0378-7796, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107586>.

© В. В. Рахманов, В. Г. Меледин, Г. В. Бакакин, В. Г. Главный, 2025