

К. С. Редколес¹✉

Разработка структуры методики расчета дальности действия низкоуровневых телевизионных систем на основе гибридного электровакуумного фотоприемного устройства

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
*e-mail: redkoles20@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена разработке структуры методики расчета дальности действия низкоуровневых телевизионных систем на основе гибридных электровакуумных фотоприемных приборов. В центре внимания находится формирование подхода к инженерной оценке дальности обнаружения, распознавания и идентификации объектов без необходимости проведения натурных испытаний. В статье представлена структурная схема математической модели, отражающая взаимосвязь основных блоков и факторов, влияющих на дальность действия системы. В качестве основы для последующего расчета рассматривается критерий отношения сигнал/шум на выходе системы и его сопоставление с пороговым значением для зрительного анализатора. Предложенная структура методики может служить основой для дальнейшей разработки инженерных методов расчета, оптимизации параметров низкоуровневых телевизионных систем и создания систем автоматизированного проектирования.

Ключевые слова: гибридный электровакуумный фотоприемный прибор, дальность действия, оптико-электронные системы, системы ночного видения, автоматизированное проектирование оптико-электронных систем

K. S. Redkoles¹✉

Development of a Methodological Framework for Operating Range Calculation of Low-Light-Level Television Systems Based on Hybrid Electro-Vacuum Photodetectors

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: redkoles20@mail.ru

Abstract. The article is devoted to the development of the structure of a methodology for calculating the operating range of low-light-level television systems based on hybrid electro-vacuum photodetectors. The focus is on the formation of an approach to engineering estimation of detection, recognition, and identification ranges of observed objects without the need for full-scale experimental testing. The paper presents a structural diagram of a mathematical model reflecting the interrelation of the main blocks and factors affecting the system operating range. As a basis for further calculations, the signal-to-noise ratio at the system output is considered and compared with the threshold value corresponding to the human visual system. The proposed structure of the methodology can serve as a foundation for the further development of engineering calculation methods, optimization of parameters of low-light-level television systems, and the creation of computer-aided design systems.

Keywords: hybrid electro-vacuum photodetector, operating range, electro-optical systems, night vision systems, computer-aided design of electro-optical systems

Введение

При разработке оптико-электронных систем без проведения испытаний на реальном образце достаточно трудно заранее оценить фактические значения

дальности обнаружения, а также возможности распознавания и идентификации наблюдаемого объекта [1].

На данный момент актуальность приобретает создание такого инструмента, который помог бы с помощью методических подходов и инженерных расчетных процедур оценить дальность действия низкоуровневых телевизионных систем, построенных на базе гибридных электровакуумных фотоприемных приборов, с учетом условий их реального практического использования [2, 3].

Текущие методы определения дальности обнаружения и распознавания типовых объектов не удовлетворяют современным стандартам. Они требуют сбора статистических данных в реальных условиях испытаний, что создает сложность из-за трудностей формализации критериев обнаружения и распознавания. Кроме того, эти методики не являются универсальными, так как предполагают использование для наблюдения только объектов с штатной окраской. Данные испытания направлены исключительно на подтверждение соответствия полученной дальности обнаружения заданным требованиям. Отсутствие учета разных конструктивных решений и технологий лишает эти испытания возможности анализа и выявления ключевых факторов, определяющих увеличение дальности действия. Параллельно с этим, не отвечая на вопрос в каком направлении работать конструкторам и технологам. В связи с изложенным, необходимо разработать инженерную методику для проведения оценочных расчетов дальности действия низкоуровневых телевизионных систем [4, 5].

Блок-схема математической модели для проведения расчетов дальности действия

В свете современных подходов к оценке качества низкоуровневых телевизионных систем, целесообразно использовать блочно-модульную структуру для построения модели расчетов. Такой подход открывает возможность реализации множества существенных преимуществ, показанных в табл. 1 [6, 7].

Таблица 1 – Преимущества применения блочно-модульной структуры модели расчета

Особенность	Практическое значение
Детальное изложение работы каждого функционального модуля	Моделирование каждого этапа процесса формирования и обработки изображения осуществляется с достаточной полнотой и глубиной
Возможность адаптации параметров фоноцелевого окружения к изменяющимся условиям	Дает возможность расширения функционала за счет включения новых объектов, фонов и погодных условий без необходимости переделывать существующую модель
Изменение структуры модели на локальном уровне	Изменение отдельных элементов модели можно производить без влияния на другие, что способствует легкому ее совершенствованию
Анализ воздействия каждого фактора на конечный исход	Каждый блок системы может быть проанализирован с точки зрения его влияния на общую оценку качества
Гибкость и расширяемость вычислительных систем	Модель будет расширяться и становиться более точной, при этом ее исходная структура останется неизменной

Блок-схема математической модели для проведения расчетов дальности действия низкоуровневых телевизионных систем на основе гибридного электровакуумного фотоприемного прибора представлена на рисунке 1.

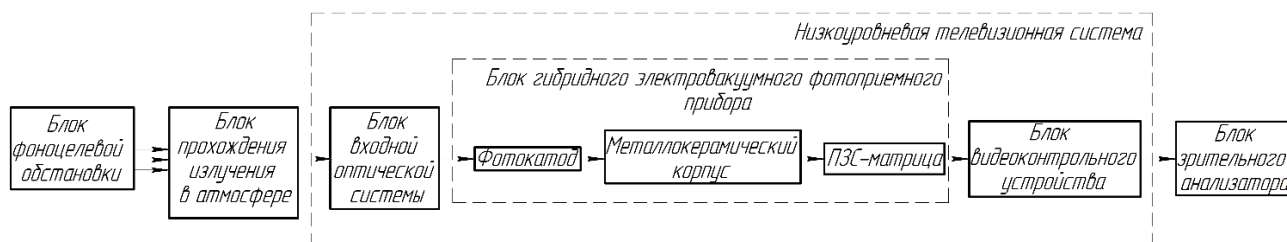


Рис. 1. Блок-схема модели расчета дальности действия низкоуровневых телевизионных систем на основе гибридного электровакуумного фотоприемного прибора

Анализ блоков, показанных на рис. 1, выявляет комплекс взаимосвязанных элементов, которые составляют основу для определения дальности действия низкоуровневых систем. В эту систему входят такие важные составляющие как особенности фоноцелевой среды, атмосферные явления, влияющие на распространение сигнала, свойства устройств, генерирующих световой поток и преобразующих его в сигнал, а также механизмы отражения видеоинформации и ее интерпретации наблюдателем [8, 9].

В связи с задачами, которые необходимо решить, и выявленными недостатками текущих методов испытаний, новая методика должна соответствовать следующим ключевым принципам:

отражать данные, полученные при испытаниях, проведенных в среде, максимально имитирующей реальные условия эксплуатации;

гарантировать максимально полное отражение всех ключевых параметров, чтобы результаты расчетов были достаточно точными и могли быть использованы в реальных условиях;

гарантировать оперативное проведение вычислений;

выявить определяющие факторы и заложить теоретическую основу для создания автоматизированных систем проектирования, которые будут использоваться при разработке передовых образцов [10, 11].

Основа математической модели для проведения расчетов дальности действия

Модель оценки предельной дальности, построенная на математических принципах, использует критерий соотношения для принятия решения. Решение принимается при выполнении соотношения:

$$[S / N] \geq [S / N]_{\text{lim}}, \quad (1)$$

где $[S / N]$ – отношение сигнал/шум на выходе низкоуровневой телевизионной системы на основе гибридного электровакуумного фотоприемного устройства; $[S / N]_{\text{lim}}$ – пороговое значение отношения сигнал/шум для глаза, соответствующее выбранному при проведении расчетов уровню вероятности принятия решения оператором [12].

$$[S / N] = \frac{C(F_t)G|N_0 - N_p|}{\sqrt{F_n G^2 (N_0 + N_p + N_{th})} + N_{ccd}}, \quad (2)$$

где $C(F_t)$ – сквозная функция передачи модуляции низкоуровневой телевизионной системы; F_t – пространственная частота; G – коэффициент усиления электронов, полученных от фотокатода; N_0, N_p – число электронов, полученное от фотокатода за время t_e (постоянная времени глаза) при облучении зон миры, соответствующих объекту и фону; F_n – фактор шума гибридного электровакуумного фотоприемного прибора; N_{th} – число электронов, испускаемых фотокатодом за время t_e вследствие темновой эмиссии; N_{ccd} – число темновых электронов, получаемое от ПЗС-матрицы за время t_e с площади изображения миры.

Анализ взаимосвязи между отношением сигнал-шум и расстоянием распознавания выявил прямую зависимость от значений ФПМ на высоких пространственных частотах. Такая же пропорциональная связь прослеживается при расчете квадратного корня из отношения интегральной чувствительности, характерной для гибридных электровакуумных фотоприемников, к уровню шума. Разработка высокоэффективной низкоуровневой телевизионной системы, способной охватить максимальную площадь приема, с применением гибридного электровакуумного фотоприемника, ставит перед разработчиками ключевую задачу: минимизировать падение ФПМ на высоких пространственных частотах во всей цепочке компонентов. Важно помнить при этом и о пространственно-временных, спектральных и шумовых свойствах ПЗС-матрицы, которые также оказывают существенное влияние на качество изображения. Важнейшим требованием выступает соответствие ФПМ заданной пространственной частоте. Это условие необходимо реализовать для каждого элемента системы, формирующей изображение [13, 14, 15].

Ввиду изложенного, для повышения эффективности гибридного электровакуумного фотоприемного прибора по данному показателю требуется его совершенствование. Необходимо оптимизировать конструкцию и технологию, связанные с поиском путей увеличения интегральной чувствительности фотокатода, снижения уровня шума гибридного электровакуумного фотоприемного прибора и улучшения принципов работы и характеристик ПЗС-матриц, что позволит повысить общую производительность системы [16].

Заключение

Разработанная по данной структуре методика служит основой для проведения исследований, направленных на оценку оптимизации характеристик низкочастотных телевизионных систем с применением гибридных электровакуумных фотоприемников. Предложенная блочная структура методики дальности может быть использована в качестве фундамента для создания системы автоматического проектирования таких систем. Предлагаемый методический подход к определению дальности действия низкочастотных телевизионных систем, основанный на замене реальных объектов энергетически эквивалентными моделями и сравнении отношения сигнал/шум с порогом чувствительности человеческого глаза, демонстрирует высокую значимость и применимость. Данный метод может быть использован для приборов наблюдения различных конструктивных исполнений и режимов функционирования. Практическая значимость результатов, полученных данной методикой, может проявляться в том, что они могут быть использованы для:

- определения ключевых параметров и характеристик проектируемых образцов;
- оценки соответствия разрабатываемых образцов установленным требованиям;
- разработка новых моделей современного оборудования ночного видения, а также улучшение существующих моделей;
- анализ перспектив применения современных образцов [17, 18, 19].

Важнейшим положительным моментом также может быть сокращение материальных, финансовых расходов и времени, необходимого для проведения испытаний [20].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Грузевич Ю. К. Оптико-электронные приборы ночного видения / Ю. К. Грузевич. — Москва : Физматлит, 2014. — 275 с. : ил., табл. — ISBN 978-5-9221-1550-6.
2. Ришар Ж. Характеристики систем ночного видения. — Москва : Мир, 1991. — 295 с.
3. Guanyang Chen. Design of cooled EMCCD camera [Проектирование охлаждаемой EMCCD-камеры] [Текст] : dissertation. — Nanjing : Nanjing University of Science and Technology, 2020.
4. Криксунов Л. З. Приборы ночного видения. — Киев : Техника, 1975. — 216 с.
5. Chen Lei, Han Jun. Algorithm for infrared and low light-level image fusion [Алгоритм слияния инфракрасных и низкоосвещенных изображений] // Journal of Xi'an Technological University. — 2021. — Vol. 41, № 5. — p. 566–571.
6. Guipeng Li. Research on high-resolution back-illuminated CMOS sensor imaging technology [Исследование технологий визуализации высокоразрешающего заднеосвещенного CMOS-датчика] [Текст]. — Nanjing : Nanjing University of Science and Technology, 2022.
7. Siegmund O. H. W., Vallerga J., Welsh B., Tremsin A. S., McPhate J. B. Imaging photon counting detectors for high time resolution astronomy [Фотонные детекторы счета единичных фотонов для астрофизики с высоким временным разрешением] // High Time Resolution Astrophysics : Astrophysics and Space Science Library. — 2008. — Vol. 351. — p. 327–343. — Springer, DOI:10.1007/978-1-4020-6518-7.

8. Seitz P., Theuwissen A. J. P. (eds.) Single-photon imaging [Текст] [Однофотонная визуализация]. – Berlin ; Heidelberg : Springer, 2011. – 420 p.
9. Волков В. Г. Высокочувствительные телевизионные камеры для обеспечения безопасности / В. Г. Волков. – Москва : Радио и связь, 2005. – 144 с.
10. Yun Yanhui, Li Muzhai, Dong Kai. Push equipment digitalization to a new stage of development [Переход цифровизации оборудования на новый этап развития] // Robot Industry. – 2022. – Vol. 3. – p. 24–28.
11. Zhou Jiqiang. Research on test system of gain characteristics of electron multiplier layer in EBAPS [Исследование системы тестирования характеристик усиления электронной умножающей структуры в EBAPS] [Текст]. – Changchun : Changchun University of Science and Technology, 2019.
12. Роуз А. Зрение человека и электронное зрение / пер. с англ. А. А. Гиппиус ; под ред. В. С. Вавилова. – Москва : Мир, 1977. – 216 с.
13. Holst G. C. CCD arrays, cameras, and displays [CCD-массивы, камеры и дисплеи] / G. C. Holst. – Bellingham (WA) : SPIE Optical Engineering Press, 1996. – 310 p.
14. Aglieri Rinella G., Gys T., Piedigrossia D., Van Lysebetten A. Performance studies of pixel hybrid photon detectors for the LHCb RICH counters [Исследование характеристик пиксельных гибридных фотодетекторов для счетчиков LHCb RICH] // Nucl. Phys. B Proc. Suppl. – 2006. – Vol. 150. – p. 285–290.
15. Williams G. M., Jr. The high-performance LLLTV CCD camera for night-time pilotage [Высокопроизводительная CCD-камера LLLTV для ночной пилотации] / G. M. Williams Jr. – B: Proceedings of SPIE. – 1992. – Vol. 1655. – p. 120–128.
16. Yanhui Yun, Muzhai Li, Kai Dong. Push equipment digitalization to a new stage [Переход цифровизации оборудования на новый этап] // Robot Industry. – 2022. – Vol. 3. – p. 24–28.
17. Flyckt S. O., Marmonier C. Photomultiplier tubes: principles and applications [Фотоумножительные трубки: принципы и применения] / S. O. Flyckt, C. Marmonier. – France : Photonis Technologies S.A., 2002. – 95 p. – URL: <http://www.burle.com/cgi/byteserver.pl/pdf/photo.pdf> (дата обращения: 01.05.2026).
18. Han J., Jiao G., Yan L., Cheng H., Yang Y., Lei S., Fan H., Li T. Research progress of digital low-light-level devices [Исследование прогресса цифровых устройств низкого уровня освещенности] // Journal of Applied Optics. – 2023. – Vol. 44, No. 4. – p. 874–882.
19. Pingping Li. Study on low-light-level image intensifier operation and protection technology under strong light conditions [Исследование работы усилителя низкоуровневого изображения и защиты в условиях сильного света] [Текст]. – Nanjing : Nanjing University of Science and Technology, 2022.
20. Ллойд Дж. Системы тепловидения / пер. с англ. Н. В. Васильченко ; под ред. А. И. Горячева. – Москва : Мир, 1978. – 361 с.

© К. С. Редколес, 2026