

13. *Основы* ночного видения // www.raffa.ru.
14. *Зиркевич В. Н.* Методический подход к оценке влияния совокупности ТТХ на огневую мощь БМП // Артиллерийское и стрелковое вооружение. — 2004. — № 2(11). — С. 3–6.
15. *Круковский-Сеневич К. Б., Полегенько А. Ф.* Оценка перспективности образца В и ВТ при принятии решения на его разработку // Там же. — 2007. — № 2(23). — С. 54–56.

УДК 629.7.018:2.001.2

АППАРАТУРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ОБЪЕКТИВОВ ПРИЦЕЛОВ СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ

О. К. КУЧЕРЕНКО, канд. техн. наук (НТУУ «Киевский политехнический институт»)

Рассмотрены принципы конструирования аппаратуры контроля качества объективов для стрелкового оружия. На основании проведенного компьютерного моделирования определены параметры фотоприемного блока аппаратуры для существующей элементной базы. Предложен метод микросканирования, повышающий точность измерений.

Розглянуто принципи конструювання апаратури контролю якості об'єктивів для стрілецької зброї. На основі проведенного комп'ютерного моделювання визначено параметри фотоприймального блока апаратури для існуючої елементної бази. Для підвищення точності вимірювань запропоновано метод мікросканування.

Principles for designing equipment for quality control of the small arm objectives are considered. On basis of the carried out computer simulation parameters of the photo-receiving unit of the equipment are determined for the existing element base. The microscanning method is suggested which increases accuracy of the measurements.

Разработкой современных прицелов для стрелкового оружия типа день-ночь занимаются ведущие предприятия военно-промышленного комплекса России [1]. Примером прицела, который, кроме видимой части спектра работает на длине волны $\lambda = 850$ нм, является также прицел KN250 фирмы «Simrad» (Норвегия) с ночной зеркально-линзовой насадкой [2]. Тепловизионные прицелы способны работать в окне прозрачности атмосферы 8...12 мкм и реагировать на тепловое излучение нагретых тел. Примером может служить прицел SRTS фирмы «Texas Instruments» (США) [3]. Основные тактико-технические характеристики подобных прицелов приведены во многих публикациях и каталогах [4–9]. Анализ упомянутых публикаций

свидетельствует о том, что объективы этих прицелов, по-видимому, должны иметь высокие технические характеристики как в видимой, так и инфракрасной областях спектра. Кроме сугубо эксплуатационных характеристик (массы, габаритов), важное значение приобретает качество изображения в диапазоне увеличений 3...8 крат и углов поля зрения до 12°.

Для оценки качества изображения, создаваемого объективами по требованиям Международной системы стандартизации, должна использоваться оптическая передаточная функция (ОПФ) и ее составляющие — функция передачи модуляции (ФПМ) и функция передачи фазы (ФПФ). Измерение ОПФ целесообразно проводить на установке с непериодическим тест-объектом в виде освещенного

© О. К. КУЧЕРЕНКО, 2009

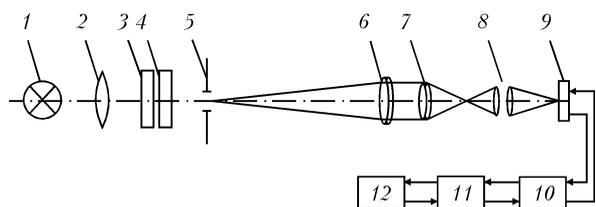


Рис. 1. Функциональная схема установки для измерения ОПФ (пояснения приведены в тексте)

щенной щели. Схема установки приведена на рис. 1. Ее осветительная часть состоит из источника света 1, асферического конденсора 2, молочного стекла 3 и набора интерференционных светофильтров 4, рассчитанных на спектральный диапазон работы контролируемых объективов. Тест-объектом является щель 5, ширина которой может изменяться в диапазоне 0...0,4 мм с помощью микрометрического винта, имеющего цену деления 1 мкм. Объектив коллиматора 6 может быть зеркальным или линзовым и его фокусное расстояние должно в 5...6 раз превышать аналогичное расстояние контролируемого объектива 7. Последний устанавливается в держатель и может поворачиваться относительно оптической оси стенда на угол 360° и ортогональной вертикальной оси в диапазоне углов ±60°. Фотоприемный блок включает тубус, в который вставляется микрообъектив 8, проецирующий изображение тест-объекта в плоскость фоточувствительных элементов линейного прибора с переносом заряда (ЛППЗ) или матричного фотоприемника 9. Сигнал с фотоприемника поступает на аналого-цифровой преобразователь 10, интерфейс 11 и компьютер 12.

Принцип действия установки основан на том, что фотоприемник измеряет функцию рассеивания линии (ФРЛ) как импульсный отклик контролируемого объектива. С помощью компьютера определяется ОПФ, как нормированное Фурье-преобразование от ФРЛ согласно соотношению [10]:

$$\tilde{S}(v'_m) = T \sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k} \exp \left\{ \frac{-j2\pi mk}{N} \right\}, \quad (1)$$

где T — период дискретизации значений ФРЛ; $S_{x'k}$ — нормированное значение ФРЛ; $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$ — номер отсчета в масси-

ве ФРЛ; $m = 0, 1, 2, \dots$ — номер дискретного значения пространственной частоты; x' — линейная координата в плоскости изображения.

С учетом (1) и формулы Эйлера ФПМ как модуль ОПФ равняется

$$|\tilde{S}(v'_m)| = \sqrt{\left(\frac{\sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k} \cos \left(\frac{2\pi mk}{N} \right)}{\sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k}} \right)^2 + \left(\frac{\sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k} \sin \left(\frac{2\pi mk}{N} \right)}{\sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k}} \right)^2}. \quad (2)$$

Для того чтобы расчет ОПФ объектива по формуле (2) отвечал действительному значению передаточной функции с допустимыми погрешностями, блок фотометрирования должен удовлетворять следующим условиям:

- частотная характеристика фотоприемника не должна влиять на результаты измерений;
- погрешность, возникающая в результате осреднения значений освещенности чувствительными элементами ЛППЗ, не должна превышать допустимую;
- искажение спектра сигнала, возникающее вследствие наложения на спектр сигнала спектра шумов, не должно превышать допустимого значения.

Влияния частотной характеристики фотоприемника на результат измерения ОПФ можно избежать, если ФРЛ дискретизировать с достаточно высокой частотой. Одним из средств повышения степени дискретизации служит использование в узле фотометрирования микрообъектива с увеличением, которое находится из соотношения

$$\beta \geq v_{\max} 2T, \quad (3)$$

где v_{\max} — максимальная пространственная частота исследуемого объектива; T — период дискретизации чувствительных элементов фотоприемника.

Такой подход может быть использован, если контролируемый объектив прицела работает в видимой области спектра. В этом спектральном диапазоне существует большой выбор микрообъективов, рассчитанных с минимальными aberrациями, не влияющими на

точность измерений. Для определения ОПФ объективов прицелов, которые работают в инфракрасной области спектра, могут быть предложены действия, когда ЛППЗ разворачивают относительно изображения ФРЛ [11] или сам тест-объект разворачивают относительно столбцов матричного приемника [12]. Эти действия основываются на том, что количество отсчетов в массиве ФРЛ возрастает за счет увеличения количества элементов дискретных приемников, принимающих участие в фотометрировании. Повышение точности измерений может быть достигнуто также путем усложнения алгоритма обработки сигнала фотоприемного блока [13].

При определении необходимого увеличения микрообъектива следует учитывать радиус кружка рассеивания контролируемого объектива, дискретность существующих фотоприемников и допустимую погрешность измерений [14]. На результаты измерения ОПФ объектива влияют также собственные шумы фотоприемника. В результате перекрытия спектров шумов и полезного сигнала ОПФ контролируемого объектива искажается. Влияние указанных факторов на точность определения ОПФ было исследовано с помощью компьютерного моделирования. При моделировании использовались следующие значения переменных параметров:

- радиусы кружка Эри контролируемых объективов $\rho_E = 13,9; 19,3; 27,8; 34,7; 41,7; 48,6; 55,6$ мкм;

- периоды следования чувствительных элементов ЛППЗ $T = 11; 13; 20; 25$ мкм (соответствуют приборам, которые изготавливают фирмы «Sony», «Kodak», «Hamamatsu», «Fairchild Image»);

- уровни ограничения выходного сигнала: $0,005 \dots 0,01$ от максимального нормируемого значения ФРЛ;

- максимальная возможная погрешность определения ОПФ — 2 % (моделирование предусматривало также изменение предельного значения допустимой погрешности измерений).

В результате проведенного моделирования получена серия номограмм, с помощью кото-

рых можно определить необходимое значение увеличения микрообъектива в блоке фотометрирования при заданной погрешности измерения ОПФ. Исследования номограмм показали, что качественный характер зависимости $\beta = f(\rho, T)$, где ρ — коэффициент аппроксимации ФРЛ, определяемый по формуле $\rho = 0,36 \rho_e$, остается неизменным для разных ρ, T . Это дает возможность практически использовать одну из номограмм серии для определения параметров блока фотометрирования при контроле ОПФ с погрешностью 2 %. На рис. 2 приведена номограмма, кото-

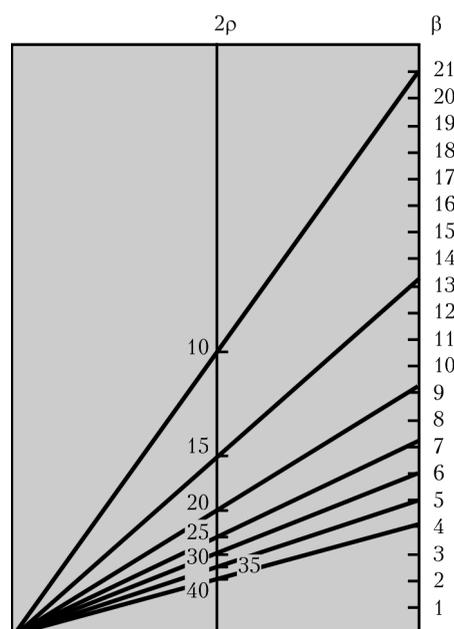


Рис. 2. Номограмма для определения увеличения микрообъектива

рая соответствует ЛППЗ с периодом следования чувствительных элементов $T_n = 11$ мкм. Для использования этой номограммы при применении в фотоприемном блоке с ЛППЗ с другим периодом следования чувствительных элементов и погрешностью, которая не превышает значения, принятого при моделировании, следует привести значение кружка рассеивания контролируемого объектива к условиям приведенной номограммы согласно соотношению:

$$2\rho_{11} = \frac{T_n 2\rho}{T}, \quad (4)$$

где $2\rho_{11}$ — коэффициент аппроксимации ФРЛ, рассчитанный для ЛППЗ с периодом чувствительных элементов $T_H = 11$ мкм; 2ρ — коэффициент аппроксимации ФРЛ, рассчитанный для контролируемого объектива.

С помощью номограммы, приведенной на рис. 2, можно производить расчет значения радиуса кружка Эри исследуемого объектива, определение коэффициента аппроксимации 2ρ , а затем нахождение необходимого значения увеличения микрообъектива по шкале β с использованием вспомогательной прямой. Если период следования чувствительных элементов отличается от $T_H = 11$ мкм, следует привести значение кружка рассеивания испытуемого объектива к условиям использования в приведенной номограмме по формуле (4), а затем найти необходимое увеличение микрообъектива по шкале β . При этом погрешность определения ФПМ не будет превышать 2%. Как примеры, на номограмме найдены значения β для коэффициентов аппроксимации $2\rho = 10, 15, 20, 25, 30, 35$ и 40 мкм.

Результаты компьютерного моделирования показали также, что качественная зависимость влияния ограничения нижнего уровня сигнала, формируемого ЛППЗ при наложении шумовой составляющей на погрешность определения ФПМ, остается неизменной для ЛППЗ разных периодов, типовых значений коэффициентов аппроксимации контролируемых объективов 2ρ и увеличений микрообъективов. Допустимые уровни ограничения выходного сигнала, которые позволяют уменьшить погрешность определения ФПМ, не должны превышать 0,01 максимального нормируемого значения ФРЛ, поскольку дальше погрешность определения ФПМ начинает существенно возрастать. С увеличением уровня ограничения максимум погрешности определения ФПМ сдвигается в сторону более высоких пространственных частот. С помощью ограничения уровня выходного сигнала ЛППЗ наиболее существенно можно компенсировать погрешность определения ФПМ в зоне средних и высоких пространственных частот.

В том случае, когда контролируемый объектив прицела работает в ближней и даль-

ней инфракрасных областях спектра, использование микрообъектива в аппаратуре контроля проблематично. Причина этого заключается в том, что номенклатура микрообъективов в указанных спектральных областях ограничена, а качество изображения, создаваемого ими, далеко от дифракционного. В результате погрешность измерения ОПФ возрастает. Проблема согласования частотных характеристик ЛППЗ и контролируемого объектива при этом может быть решена методом микросканирования. Согласно этому методу во время измерений ЛППЗ шаг за шагом сдвигается на часть размера чувствительного элемента. Это позволяет увеличить частоту дискретизации в несколько раз. Тогда максимальная частота, которая может присутствовать в ОПФ исследуемого объектива и не вносит погрешности в измерение, определяется формулой [15]

$$v_{\max} = v_H = \frac{\beta S}{2\rho}, \quad (5)$$

где S — количество сдвигов; v_H — частота следования чувствительных элементов ЛППЗ.

Дискретную выборку значений освещенности в изображении, которые снимаются с помощью средств ЛППЗ, можно представить в виде решетки δ -функций, узлы которой расположены в центрах чувствительных элементов и имеют значение, равное снятому с чувствительного элемента сигналу q_n . Тогда последовательность, которая описывает сигнал ЛППЗ, запишется как сумма произведений значений сигнала и сдвинутой δ -функции, а для микросканирования шаг за шагом будем иметь несколько таких сумм [15]:

$$\begin{aligned} Q(x) &= \sum_{n=0}^{N-1} q_n \delta\left(x - np\right) + \sum_{n=0}^{N-1} q_n \delta\left(x - np - \frac{p}{S}\right) + \\ &+ \sum_{n=0}^{N-1} q_n \delta\left(x - np - 2\frac{p}{S}\right) + \dots + \sum_{n=0}^{N-1} q_n \delta\left(x - np - (S-1)\frac{p}{S}\right) = \\ &= \sum_{n=0}^{NS-1} q_n \delta\left(x - n - \frac{p}{S}\right). \end{aligned}$$

Другими словами, шаг следования δ -функций в решетке уменьшается и соответственно увеличивается частота дискретизации.

Над такой выборкой можно осуществить дискретное преобразование Фурье-преобразование, которое описывается выражением [16]

$$F \in [m] = \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} Q[n] \exp\left(-\frac{2\pi i n m}{N}\right),$$

где $m = -N/2, -N/2 + 1, \dots, N/2 - 1$.

Пронормировав такую последовательность относительно значения $F \in [0]$, можно получить значение искомой ФПМ.

Из формулы (5) можно также найти количество сдвигов, которое необходимо осуществить для того, чтобы имело место разрешение аппаратурой частоты ν_{\max} :

$$S = \text{round}\left(\frac{\nu_{\max} 2p}{\beta}\right), \quad (6)$$

где $\text{round}(x)$ — функция, которая отбрасывает дробную часть x .

С помощью компьютерного моделирования исследована возможность повышения точности определения ФПМ при осуществлении микросканирования. При этом при разном количестве шагов микросканирования при других выходных постоянных параметрах были определены соответствующие значения ФПМ. Таким образом, в результате численного моделирования получены четыре последовательности значений ФПМ: $M_{\text{ida}}(\nu)$ — значения ФПМ, согласно аналитическому выражению Фурье-преобразования аппроксимации ФРЛ; $M(\nu)$ — значение ФПМ без осуществления микросканирования; $M_z(\nu)$ — значение ФПМ при микросканировании с соответствующим количеством шагов; $M_{\text{cor}}(\nu)$ — значение ФПМ при микросканировании и с введением корректирующего коэффициента, учитывающего, что сигнал с каждого чувствительного элемента ЛППЗ является результатом интегрирования по его площади.

Погрешность определения ФПМ относительно аналитического выражения при использовании четырехшагового микросканирования приведена на рис. 3, из которого видно, что данное количество шагов микросканирования является достаточным и значительно повышает точность определения ФПМ.

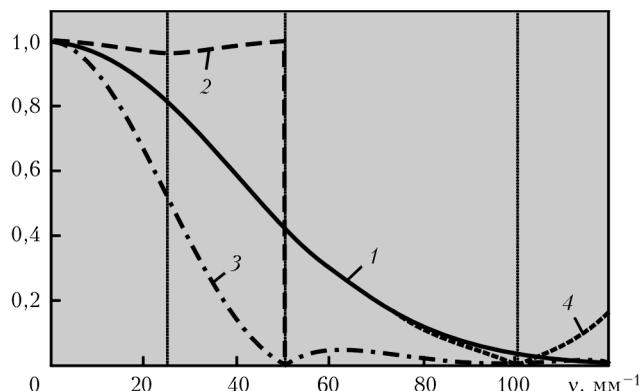


Рис. 3. Вид функции передачи модуляции при четырехшаговом микросканировании в сравнении с аналитической функцией передачи модуляции: 1 — $M_{\text{ida}}(\nu)$; 2 — $M(\nu)$; 3 — $M_z(\nu)$; 4 — $M_{\text{cor}}(\nu)$

Анализ полученных зависимостей свидетельствует о том, что увеличение количества шагов микросканирования до минимально необходимого количества сводит погрешность определения ФПМ к пренебрежимо малому значению. Для сравнения следует отметить, что погрешность определения ФПМ при двухшаговом микросканировании составляет, например, 0,2 отн. ед. на частоте $\nu = 40 \text{ мм}^{-1}$, а при отсутствии микросканирования на той же частоте она составляет 0,45 отн. ед. Компьютерное моделирование подтвердило эффективность использования микросканирования для повышения точности определения ФПМ. Вычисление минимально необходимого количества шагов по формуле (6) позволит уменьшить время измерения, а в некоторых случаях и упростить конструкцию устройства высокоточного позиционирования с использованием шаговых или пьезодвигателей.

Проведенные теоретические исследования и результаты компьютерного моделирования дают возможность определить параметры аппаратуры для контроля качества объективов прицелов, работающих в широком спектральном диапазоне. Рекомендации по выбору элементной базы и методике измерений при использовании микросканирования позволят повысить точность измерения ОПФ и снизить погрешность измерения до 2 %. 🐼

1. Саников В. Л. Айсберг высоких технологий отечественного ВПК. Обзор рынков приборов ночного видения российского производства // Спец. техника. — 2000. — № 3. — С. 2–12.

2. *Simrad* Optronics. Simrad KN 200/KN250. — Норвегия, 1999. — 12 p.
3. *Texas Instruments*. SRTS-Sniper Sight. — США, 1990. — 14 p.
4. *Dedal* — NV. Day/Night vision raffle scope dedal-DN510 2,5-7,3Ф50. 2000. — 8 p.
5. *ITT*. ITT F7201 modular day/night weapon sight. — США, 2000. — 6 p.
6. *Волков В. Г., Добровольский Ю. А., Коцавцев Н. Ф. и др.* Малогабаритные дневно-ночные приборы наблюдения // Приклад. физика. — 2000. — № 5. — С. 50–53.
7. *ITT*. AN/PVS-14. Monocular night vision devise (MNVD) США, 1997. — 10 p.
8. *Litton*. Multi-Adaptive night tactical imaging system (MANTIS). — США, 1997. — 8 с.
9. *Litton*. Night vision goggles. — США, 1997. — 8 с.
10. *Кучеренко О. К., Кравченко І. В., Ліхолім М. І. та ін.* Вимірювально-обчислювальний комплекс для контролю якості об'єктивів // Вісн. НТУУ «КПІ». Сер. Приладобудування. — 2003. — № 23. — С. 38–45.
11. А. с. 1739240 СССР. Устройство для контроля качества объективов / О. К. Кучеренко, В. Г. Колобродов, А. Абрахам, Д. Вензель. — 1992. — Бюл. № 21.
12. *Пат.* 2254931 Украина. Устройство для контроля качества объективов оптической системы / О. К. Кучеренко, С. И. Велидченко. — 2008. — Бюл. № 12.
13. *Пат.* 2024000 РФ. Устройство для контроля качества оптической системы / О. К. Кучеренко, В. Г. Колобродов, А. А. Зарицкий, Л. А. Коваленко. — 1994. — Бюл. № 22.
14. *Кучеренко О. К., Савекін А. В.* Визначення параметрів вузла фотометрирування в стенді вимірювання ОПФ об'єктивів // Вісн. НТУУ «КПІ». Сер. Приладобудування. — 2003. — № 26. — С. 5–11.
15. *Кучеренко О. К., Кучеров І. В.* Точність визначення МПФ фотоприймальним пристроєм з ЛППЗ // Там же. — 2006. — № 31. — С. 31–38.
16. *Великотный М. А., Петрас С. В.* Принципиальные аспекты измерения ОПФ с помощью дискретного самосканирующего фотоприемника // Опт. журн. — 1994. — № 9. — С. 50–55.



8-11 September 2009
ExCeL London UK
www.dsei.co.uk

Defence Systems & Equipment International Exhibition 2009
The world's most prestigious defence exhibition

The world's largest **fully integrated** international **defence exhibition** bringing together senior international visitors and military influencers in an **optimal business environment**.

DSEi 8-11 September 2009. ExCeL, London, UK, E16 1XL

Международная выставка оборонных систем и военной техники 2009
8-11 сентября 2009 г., Выставочный центр, Лондон, Великобритания