
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 681.78

А. А. МАРАЕВ, И. А. КОНЯХИН, А. Н. ТИМОФЕЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ С ПОЛИХРОМАТИЧЕСКОЙ ОПТИЧЕСКОЙ РАВНОСИГНАЛЬНОЙ ЗОНОЙ

Представлены основные результаты исследований эффективной энергетической чувствительности к смещениям фотоприемной части в системах с полихроматической оптической равносигнальной зоной. Показано, что применение критерия энергетической чувствительности для таких систем особенно эффективно на стадии выбора излучающих, фотоприемных и оптических компонентов.

Ключевые слова: оптико-электронная система, полихроматическая равносигнальная зона, пространственное позиционирование.

Для оптико-электронных систем (ОЭС) с оптической равносигнальной зоной (ОРСЗ) характерны высокая эффективность при полной автоматизации процессов управления или измерения в статическом и динамическом режимах, а также возможность корректировки результатов с учетом влияния условий эксплуатации [1].

Возрастающие требования к точности при позиционировании объектов в строительстве, на железнодорожном транспорте, в самолетостроении и геодезии [2], а также при построении систем, предназначенных для предупреждения техногенных катастроф, обуславливают необходимость совершенствования ОЭС с ОРСЗ. В настоящее время осуществляются исследования по оценке возможности применения полихроматической ОРСЗ в целях учета влияния регулярной рефракции воздушного тракта [3] при использовании специальных алгоритмов обработки информативных параметров [4]. Оптическая равносигнальная зона формируется задатчиком базовой плоскости (ЗБП). При этом чувствительность к поперечным смещениям фотоприемной части (ФПЧ) ОЭС обуславливается энергетической чувствительностью. Понятие энергетической чувствительности ранее не применялось для полихроматического потока оптического излучения источников, образующих ОРСЗ, и было ограничено лишь монохроматическими составляющими оптического излучения [5].

В настоящей статье представлены основные результаты исследований эффективной энергетической чувствительности к смещениям ФПЧ в системах с ОРСЗ с учетом полихроматического потока оптического излучения источников, спектральной характеристики ФПЧ и параметров оптической системы, что более полно соответствует реальным условиям работы систем.

На рис. 1 приведена схема оптико-электронной системы с ОРСЗ, где I_1 , I_2 — источники излучения; f_1 , f_2 — частота модуляции источников, Φ_1 , Φ_2 — поток оптического излучения

источников I_1 и I_2 соответственно; E_1, E_2 — облученность, создаваемая на приемнике источниками I_1 и I_2 ; $l_{\text{п}}$ — размер переходной зоны, m_0 — дистанция фокусировки.

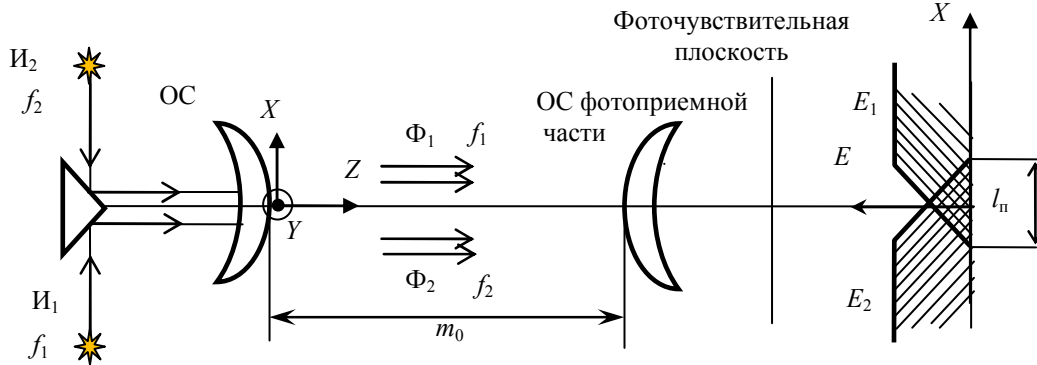


Рис. 1

Разностный поток в ОЭС с ОРСЗ [1], образованной разномодулированными потоками излучения Φ_1 и Φ_2 , для одинаковых монохромных источников с учетом окончательной обработки электрических сигналов определяется выражением

$$d\Phi(x, y, z, \lambda) = \Phi_1(x, y, z, \lambda) - \Phi_2(x, y, z, \lambda),$$

где $\Phi_1(x, y, z, \lambda)$ и $\Phi_2(x, y, z, \lambda)$ — формируемые источниками I_1 и I_2 потоки оптического излучения, попадающие во входной зрачок объектива ФПЧ; x, y, z — координаты точки пространства в прямоугольной системе координат $OXYZ$ (см. рис. 1); λ — длина волны источников оптического излучения.

Тогда при смещении ФПЧ на величину dx разностный поток (информативный поток рассогласования) определяется как

$$d\Phi(x + dx, y, z, \lambda) = d\Phi_1(x + dx, y, z, \lambda) - d\Phi_2(x + dx, y, z, \lambda).$$

Энергетическая чувствительность есть отношение разностного потока $d\Phi(x + dx, y, z, \lambda)$ к соответствующему малому линейному смещению dx с учетом спектрального состава излучения однотипных источников в полосе длин волн $\Delta\lambda$ (от λ_1 до λ_2). Выражение, определяющее энергетическую чувствительность $W(x + dx, y, z, \lambda)$ в ОЭС, будет иметь следующий вид:

$$W(x + dx, y, z, \lambda) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_1(x + dx, y, z, \lambda) d\lambda - \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_2(x + dx, y, z, \lambda) d\lambda}{dx}.$$

Амплитуда потока рассогласования при противофазной модуляции потоков излучения источников с учетом зависимости распределения энергии в пределах переходной зоны $l_{\text{п}}(\lambda)$ [1] определяется как

$$d\Phi(m, \lambda) = \frac{\pi S_{\text{ЗБП}} S_{\text{ПЧ}}}{m^2} \left(\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\tau_{\text{атм}}(\lambda) \tau_{\text{ОС}}(\lambda) L_{e1}(\lambda)}{l_{\text{п}}(\lambda)} d\lambda - \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\tau_{\text{атм}}(\lambda) \tau_{\text{ОС}}(\lambda) L_{e2}(\lambda)}{l_{\text{п}}(\lambda)} d\lambda \right) dx, \quad (1)$$

где $\tau_{\text{атм}}(\lambda)$ — пропускание атмосферы; $\tau_{\text{ОС}}(\lambda)$ — пропускание оптической системы; $S_{\text{ЗБП}}$ — площадь выходного зрачка объектива ЗБП; $S_{\text{ПЧ}}$ — площадь входного зрачка объектива ФПЧ; $L_{e1}(\lambda), L_{e2}(\lambda)$ — спектральная плотность энергетической яркости первого и вто-

рого источников оптического излучения в одном канале; m — расстояние между ЗБП и ФПЧ; $l_{\text{п}}(\lambda)$ — линейный размер переходной зоны [1] в направлении исследуемой оси координат.

В общем виде размер переходной зоны определяется выражением

$$l_{\text{п}}(\lambda) = k(\lambda)\delta\varphi(\lambda)m + D_{\text{ЗБП}} \frac{|m_0(\lambda) - m|}{m_0(\lambda)},$$

где $k(\lambda)$ — коэффициент, характеризующий форму распределения aberrаций объектива ЗБП; $\delta\varphi(\lambda)$ — угловая сферическая aberrация объектива ЗБП; $D_{\text{ЗБП}}$ — диаметр выходного зрачка объектива ЗБП; $m_0(\lambda)$ — дистанция фокусировки объектива ЗБП.

В соответствии с законами геометрической оптики дистанция фокусировки $m_0(\lambda)$ определяется выражением

$$m_0(\lambda) = \frac{f'(\lambda)a}{a + f'(\lambda)},$$

где a — расстояние от передней главной плоскости объектива до ребра разделительной призмы, формирующей ОРСЗ; $f'(\lambda)$ — заднее фокусное расстояние объектива ЗБП.

Следовательно, объектив, сфокусированный на расстояние m_{01} для длины волны λ_1 , для λ_2 будет сфокусирован на расстояние m_{02} , отличное от m_{01} , так как присутствуют хроматические aberrации объектива.

При одинаковом распределении спектральной яркости источников энергетическую чувствительность можно определить выражением для круглых или квадратных зрачков оптической системы ЗБП и ФПЧ:

$$W(m, \lambda) = \frac{2\pi S_{\text{ЗБП}} S_{\text{ФПЧ}}}{m^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\tau_{\text{атм}}(\lambda)\tau_{\text{ОС}}(\lambda)L_e(\lambda)m_0(\lambda)}{k(\lambda)\delta\varphi(\lambda)m_0(\lambda)m + D_{\text{ЗБП}}|m_0(\lambda) - m|} d\lambda,$$

где $L_e(\lambda)$ — функция спектральной плотности энергетической яркости источника оптического излучения.

С учетом спектральной чувствительности фотоприемника эффективное значение энергетической чувствительности

$$W_{\text{эф}} = \frac{2\pi S_{\text{ЗБП}} S_{\text{ФПЧ}}}{m^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\tau_{\text{атм}}(\lambda)\tau_{\text{ОС}}(\lambda)L_e(\lambda)m_0(\lambda)s(\lambda)}{k(\lambda)\delta\varphi(\lambda)m_0(\lambda)m + D_{\text{ЗБП}}|m_0(\lambda) - m|} d\lambda,$$

где $s(\lambda)$ — относительная спектральная чувствительность фотоприемника ФПЧ.

Как видно из графика зависимости энергетической чувствительности от длины волны (рис. 2, кривая 1) при одинаковой яркости оптического излучения (10 Вт/м^2) полупроводниковых излучающих диодов (ПВД), на дистанции 50 м для объектива ПУЛ-Н [1] и серийно выпускаемых ПВД типа VetLux-L515RGBС (на рисунке — VL(R, G, B)) и 3Л136-А энергетическая чувствительность возрастает при смещении максимума спектра излучения ПВД в ИК-область. Эффективная энергетическая чувствительность (кривая 2) рассчитана с учетом ФПЧ на базе кремниевого фотодиода Hamamatsu 1133-14. При этом отношение величин W изменяется от 55 % при $\lambda=0,43 \text{ мкм}$ (ПВД типа VL-(B)) до 84 % при $\lambda=0,81 \text{ мкм}$ (ПВД типа 3Л136-А). Таким образом, эффективная чувствительность к смещению ФПЧ для системы

с ОРСЗ с учетом спектральной характеристики приемника определяет коэффициент полезного действия преобразований оптических сигналов и поэтому должна учитываться при выборе параметров системы.

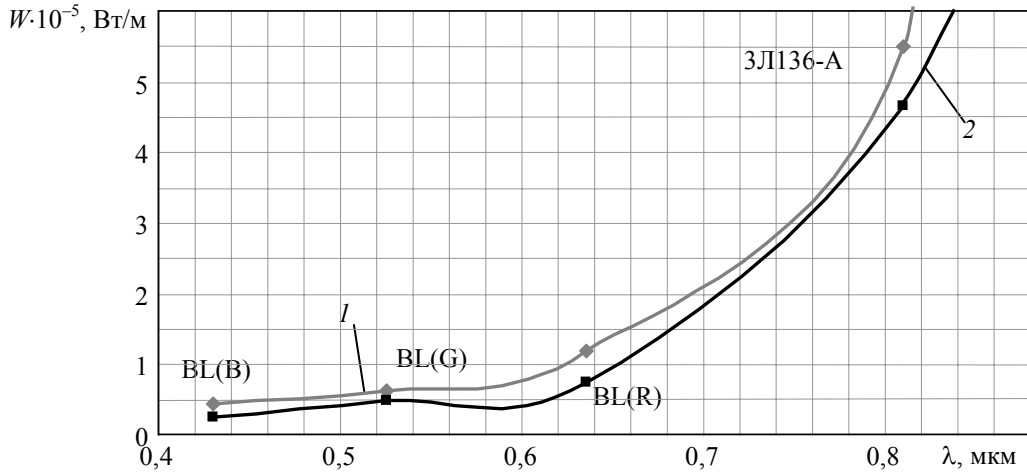


Рис. 2

Для полихроматической ОРСЗ, образованной, например, двумя каналами, суммарная эффективная энергетическая чувствительность определяется как

$$W_{\text{эф}\Sigma} = W_{\text{эф}1} + W_{\text{эф}2} = \frac{2\pi S_{\text{ЗБП}} S_{\text{ПЧ}}}{m^2} \left(\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\tau_{\text{атм}}(\lambda) \tau_{\text{ОС}}(\lambda) L'_e(\lambda) m_0(\lambda) s(\lambda)}{k(\lambda) \delta\varphi(\lambda) m_0(\lambda) m + D_{\text{ЗБП}} |m_0(\lambda) - m|} d\lambda + \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} \frac{\tau_{\text{атм}}(\lambda) \tau_{\text{ОС}}(\lambda) L''_e(\lambda) m_0(\lambda) s(\lambda)}{k(\lambda) \delta\varphi(\lambda) m_0(\lambda) m + D_{\text{ЗБП}} |m_0(\lambda) - m|} d\lambda \right),$$

где (λ_1, λ_2) , (λ_3, λ_4) — диапазоны длин волн оптического излучения источников первого и второго каналов соответственно; $L'_e(\lambda)$, $L''_e(\lambda)$ — функция спектральной плотности энергетической яркости источников первого и второго каналов.

Для равноточного определения смещений ФПЧ, образованных в полихроматической ОРСЗ двумя каналами в разных диапазонах длин волн (λ_1, λ_2) и (λ_3, λ_4) , необходимо, чтобы энергетическая чувствительность была одинаковой в каждом канале, т.е. $W_{\text{эф}1} = W_{\text{эф}2}$. С учетом одинаковых значений величин $S_{\text{ЗБП}}$, $S_{\text{ПЧ}}$, $D_{\text{ЗБП}}$ и m для двух каналов получаем

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\tau_{\text{атм}}(\lambda) \tau_{\text{ОС}}(\lambda) L'_e(\lambda) m_0(\lambda) s(\lambda)}{k(\lambda) \delta\varphi(\lambda) m_0(\lambda) m + D_{\text{ЗБП}} |m_0(\lambda) - m|} d\lambda = \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} \frac{\tau_{\text{атм}}(\lambda) \tau_{\text{ОС}}(\lambda) L''_e(\lambda) m_0(\lambda) s(\lambda)}{k(\lambda) \delta\varphi(\lambda) m_0(\lambda) m + D_{\text{ЗБП}} |m_0(\lambda) - m|} d\lambda, \quad (2)$$

откуда следует, что при одинаковом характере распределения aberrаций по длине волны компенсировать разность значений энергетической чувствительности в каналах можно путем изменения яркости источников. При этом отношение значений эффективных энергетических чувствительностей двух каналов дает коэффициент, который следует учитывать при коррекции потока оптического излучения во втором канале по отношению к первому. При одинаковом характере распределения aberrаций и отсутствии хроматических aberrаций для рассмотренных спектральных участков равенство (2) преобразуется к виду

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{\text{атм}}(\lambda) \tau_{\text{ОС}}(\lambda) L'_e(\lambda) s(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} \tau_{\text{атм}}(\lambda) \tau_{\text{ОС}}(\lambda) L''_e(\lambda) s(\lambda) d\lambda.$$

Основываясь на анализе хода кривой 2 (см. рис. 2), обеспечить равенство чувствительностей в каналах полихроматической ОРСЗ можно путем уменьшения яркости источников в канале с ПИД в ИК-области спектра.

Проведенные исследования показали, что предлагаемый критерий эффективной энергетической чувствительности к смещениям ФПЧ в системах с ОРСЗ с учетом сложного потока оптического излучения источников, спектральной характеристики фотоприемной части и параметров оптической системы рационально использовать на стадии выбора и оценки оптимальности применения оптоэлектронных и оптических элементов схемы ОЭС.

Применение предложенного критерия позволяет комплексно учитывать не только изменение спектрального распределения мощности излучения источников и спектрального распределения чувствительности приемников, но и изменения условий пропускания воздушного тракта. Поэтому дальнейшие исследования целесообразно продолжить в направлении развития адаптивных алгоритмов спектральной селекции, учитывающих указанные изменения.

Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009 — 2013 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джабиев А. Н., Мусяков В. Л., Панков Э. Д., Тимофеев А. Н. Оптико-электронные приборы и системы с оптической равносигнальной зоной. Монография / Под ред. Э. Д. Панкова. СПб: СПбГИТМО(ТУ), 1998. 238 с.
2. Мусяков В. Л., Панков Э. Д., Тимофеев А. Н. и др. Направления развития оптико-электронных систем с оптической равносигнальной зоной // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 9. С. 27—31.
3. Витол Э. А., Мусяков В. Л., Коняхин И. А., Тимофеев А. Н. Реализация дисперсионного метода в оптико-электронных системах с оптической равносигнальной зоной // Сб. трудов VI Междунар. конф. „Прикладная оптика“, 18—21 окт. 2004 г., Санкт-Петербург. СПб, 2004. Т. 1. С. 37—40.
4. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения. М.: Университетская книга, Логос, 2007. 192 с.
5. Мараев А. А., Тимофеев А. Н. Исследование распределения энергетической чувствительности в полихроматической оптической равносигнальной зоне // Сб. трудов IX Междунар. конф. „Прикладная оптика — 2010“, 18—22 окт. 2010 г. СПб: ГОИ им. С.И. Вавилова, 2010. Т. 1, ч. 1. С. 241—245.

Сведения об авторах

- Антон Андреевич Мараев** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем;
E-mail: antoshka87@gmail.com
- Игорь Алексеевич Коняхин** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем;
E-mail: igog@grv.ifmo.ru
- Александр Николаевич Тимофеев** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем;
E-mail: timofeev@grv.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию
12.04.11 г.