

И. П. ТОРШИНА

ОСОБЕННОСТИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОДИАПАЗОННЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ОБНАРУЖЕНИЯ

Рассмотрены особенности компьютерного моделирования многодиапазонных оптико-электронных систем обнаружения, относящиеся к отдельным модулям их обобщенной компьютерной модели. Представлена энергетическая модель фоноцелевой обстановки работы двухдиапазонной оптико-электронной системы обнаружения.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы.

Многодиапазонные оптико-электронные системы (ОЭС), работающие одновременно в двух или более оптических спектральных диапазонах, находят в настоящее время все большее распространение в самых различных областях науки и техники [1]. Такие системы успешно используются для обнаружения различных объектов (целей) в военной технике, для мониторинга экологического состояния и контроля окружающей среды, в правоохранительной и охранной аппаратуре и др. Поскольку проведение натурных испытаний очень часто сопряжено с большими технико-экономическими и временными затратами, роль

компьютерного моделирования в процессе синтеза и анализа ОЭС, особенно на первых этапах проектирования, трудно переоценить.

В подавляющем большинстве отечественных и зарубежных публикаций, посвященных компьютерному моделированию ОЭС, рассматривается моделирование однодиапазонных ОЭС, работающих в каком-либо одном спектральном диапазоне. В настоящее время возникает необходимость разработки компьютерных моделей (КМ) многодиапазонных ОЭС, обладающих рядом преимуществ перед однодиапазонными [1, 2].

При создании ОЭС, работающих в активном режиме и использующих несколько узкополосных источников излучения или несколько полос излучения одного источника, применяют те же принципы построения. Различие состоит в том, что базы данных многодиапазонных ОЭС должны дополнительно содержать следующую информацию.

— В КМ многодиапазонных ОЭС необходимо строго учитывать спектральную селективность пропускания среды (атмосферы).

— Необходимо, чтобы в базе данных оптических систем КМ таких ОЭС содержались характеристики оптических материалов с пропусканием в рабочих спектральных диапазонах, параметры диспергирующих систем (призм, дифракционных решеток, наборов узкополосных светофильтров и др.).

— Характеристики матричных многодиапазонных приемников излучения (МПИ) [1, 3], реализующих спектральную селекцию и пространственную фильтрацию в одном элементе.

— Наличие в составе многих ОЭС систем совмещения изображений, получаемых в разных рабочих спектральных диапазонах.

Как известно, характерными показателями эффективности работы двухдиапазонной ОЭС являются:

— спектральный контраст

$$K_{\lambda} = \frac{r_{\lambda_1} - r_{\lambda_2}}{r_{\lambda_1} + r_{\lambda_2}} \quad \text{или} \quad K_{\lambda} = \frac{E_{\lambda_1} - E_{\lambda_2}}{E_{\lambda_1} + E_{\lambda_2}}, \quad (1)$$

— разность оптических сигналов

$$\Delta_{\lambda} = r_{\lambda_1} - r_{\lambda_2} \quad \text{или} \quad \Delta_{\lambda} = E_{\lambda_1} - E_{\lambda_2}, \quad (2)$$

— спектральное отношение

$$R_{\lambda} = r_{\lambda_1} / r_{\lambda_2} \quad \text{или} \quad R_{\lambda} = E_{\lambda_1} / E_{\lambda_2}, \quad (3)$$

— логарифмические спектральные отношения

$$\lg R_{\lambda} = \lg [r_{\lambda_1} / r_{\lambda_2}] \quad \text{или} \quad \lg R_{\lambda} = \lg [E_{\lambda_1} / E_{\lambda_2}]. \quad (4)$$

Здесь r_{λ} — коэффициент спектральной яркости отражающих поверхностей, E_{λ} — спектральная плотность светового потока, приведенные к выходу системы.

Энергетическая модель, в которой учитываются собственное и отраженное излучение объекта, фона и среды, находящихся в угловом поле ОЭС (в телесном угле $\Omega_{\text{ОЭС}}$), а также отраженное от них или рассеянное ими излучение, создаваемое посторонним источником или окружающей средой, находящимися вне углового поля $\Omega_{\text{ОЭС}}$, представлена на рисунке ($L_{\text{об}}$, $L_{\text{ф}}$ и L_i — яркость объекта, фона и i -го слоя ($i = \overline{1, I}$) среды соответственно; $L_{\text{отр}}$ — яркость „постороннего“ излучения в плоскости фона).

Чтобы учесть неоднородность среды распространения, разделим ее на отдельные зоны (слои), находящиеся в термодинамическом равновесии. Внутри каждого i -го слоя значения его температуры T_i , спектральных коэффициентов излучения $\varepsilon_i(\lambda)$ и пропускания $\tau_i(\lambda)$ приняты постоянными. В первом слое находится входной зрачок объектива ОЭС, объект находится в слое с номером $i=n_{\text{об}}$, фоновый излучатель — в слое с номером $i=n_{\text{ф}}$.

Приведем соотношения для

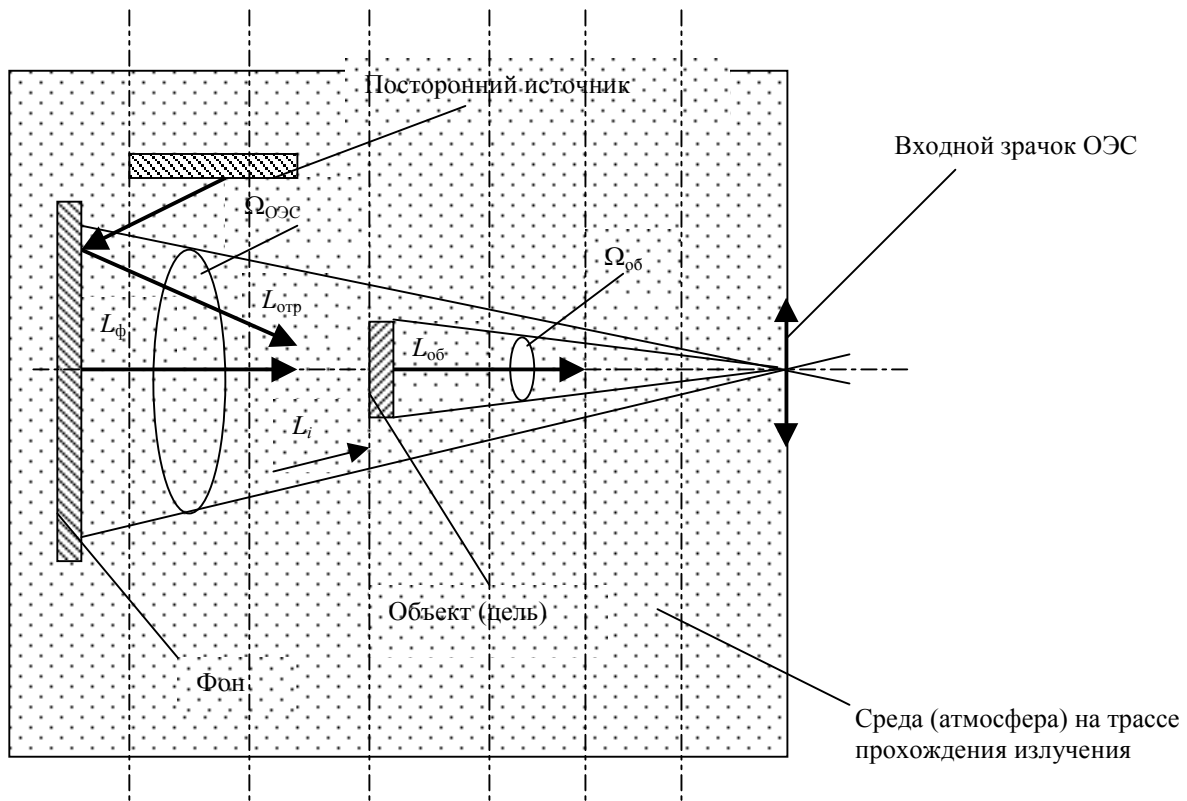
— яркости излучения, собираемого внутри телесного угла $\Omega_{об}$ и представляющего собой сумму собственного и отраженного излучения объекта, а также излучения среды на трассе внутри этого угла

$$L_{об}(\lambda) = \left[\varepsilon_{об}(\lambda)L_{об}(\lambda, T_{об}) + \frac{1}{\pi} \rho_{об}(\lambda)E_{об}(\lambda) \right] \prod_{i=1}^{n_{об}} \tau_i(\lambda) + \sum_{i=1}^{n_{об}} L_i(T_i) \prod_{j=1}^{i-1} \tau_j(\lambda) [1 - \tau_j(\lambda)]; \quad (5)$$

— яркости фона, наблюдаемого ОЭС в пределах телесного угла ($\Omega_{ОЭС} - \Omega_{об}$), не занятого объектом; эта яркость вызвана собственным и отраженным (обычно рассеянным) излучением фона, а также излучением среды на трассе внутри угла ($\Omega_{ОЭС} - \Omega_{об}$):

$$L_{ф}(\lambda) = \left[\varepsilon_{ф}(\lambda)L_{ф}(\lambda, T_{ф}) + \frac{1}{\pi} \rho_{ф}(\lambda)E_{ф}(\lambda) \right] \prod_{i=1}^{n_{ф}} \tau_i(\lambda) + \sum_{i=1}^{n_{ф}} L_i(T_i) \prod_{j=1}^{i-1} \tau_j(\lambda) [1 - \tau_j(\lambda)], \quad (6)$$

где $\varepsilon_{об}$, $\varepsilon_{ф}$, $\rho_{об}$ и $\rho_{ф}$ — коэффициенты излучения и отражения объекта и фона соответственно; $T_{об}$, $T_{ф}$ и T — температура объекта, фона и среды; $\tau(\lambda)$ — спектральное пропускание среды.



Облученность входного зрачка объектива будет равна

$$E_{вх}(\lambda) = L_{об}(\lambda)\Delta\Omega_{об} + L_{ф}(\lambda) (\Omega_{ОЭС} - \Omega_{об}).$$

Примем отражения от объекта и фона ламбертовскими, излучательные способности и значения яркости по их поверхностям и в пределах телесных углов $\Omega_{об}$ и $(\Omega_{ОЭС} - \Omega_{об})$ будем считать постоянными.

Если известны не значения облученности $E_{об}(\lambda)$ и $E_{ф}(\lambda)$, создаваемые источником „постороннего“ излучения в плоскостях объекта и фона, а приведенные к этим плоскостям яркости этого источника $L_{ex\ об}(\lambda)$ и $L_{ex\ ф}(\lambda)$, в первых квадратных скобках правой части (5) и (6) для изотропно отражающих объектов и фонов слагаемые $\frac{1}{\pi} \rho_{об}(\lambda)E_{об}(\lambda)$ и $\frac{1}{\pi} \rho_{ф}(\lambda)E_{ф}(\lambda)$ следует заменить на $\rho_{об}(\lambda)L_{ex\ об}(\lambda)$ и $\rho_{ф}(\lambda)L_{ex\ ф}(\lambda)$ соответственно (в таких случаях для непрозрачных излучателей использовать зависимости $\rho_{об}(\lambda) = 1 - \varepsilon_{об}(\lambda)$ и $\rho_{ф}(\lambda) = 1 - \varepsilon_{ф}(\lambda)$).

Часто в качестве аргумента функций r_λ или E_λ , описывающих оптический сигнал, используется не отдельная длина волны λ_1 и λ_2 , а спектральные диапазоны $\Delta\lambda_1$ и $\Delta\lambda_2$, порой достаточно протяженные, например окна прозрачности атмосферы 3—5 и 8—14 мкм. Для определения величин сигналов в рабочих спектральных диапазонах $\Delta\lambda_1$ и $\Delta\lambda_2$ можно выражения (5) и (6) проинтегрировать по λ в пределах $\Delta\lambda$.

Сигнал на выходе приемника излучения можно представить в следующем виде:

$$V(\lambda) = E_{\text{вх}}(\lambda) A_{\text{вх}} \tau_{\text{об}}(\lambda) S(\lambda),$$

где $A_{\text{вх}}$ — площадь входного зрачка объектива ОЭС, $\tau_{\text{об}}(\lambda)$ — спектральное пропускание объектива, $S(\lambda)$ — спектральная чувствительность приемника.

При нахождении в угловом поле ОЭС обнаруживаемого объекта и ряда помех сигналы в рабочих спектральных диапазонах $\Delta\lambda_1$ и $\Delta\lambda_2$ равны

$$V_{\Delta\lambda_1} = \sum_{i=1}^I V_{\text{п}\Delta\lambda_1 i} + V_{\text{ц}\Delta\lambda_1}, \quad V_{\Delta\lambda_2} = \sum_{i=1}^I V_{\text{п}\Delta\lambda_2 i} + V_{\text{ц}\Delta\lambda_2},$$

где индексы $\Delta\lambda_1$ и $\Delta\lambda_2$ обозначают принадлежность сигналов от цели $V_{\text{ц}}$ и от помех $V_{\text{п}}$ к первому или второму спектральному диапазону.

Спектральные соотношения для цели и помех могут иметь следующий вид:

$$R_{\text{ц}\Delta\lambda_1\Delta\lambda_2} = V_{\text{ц}\Delta\lambda_1} / V_{\text{ц}\Delta\lambda_2},$$

$$R_{\text{п}\Delta\lambda_1\Delta\lambda_2} = \sum_{i=1}^I V_{\text{п}\Delta\lambda_1 i} / V_{\text{п}\Delta\lambda_2 i},$$

$$R_{\text{ц+п}\Delta\lambda_1\Delta\lambda_2} = \sum_{i=1}^I V_{\text{ц+п}\Delta\lambda_1 i} / V_{\text{ц+п}\Delta\lambda_2 i}.$$

Если в процессе работы ОЭС значения излучательной способности и температуры цели и помех, а также коэффициенты пропускания среды распространения сигналов не изменяются, первые два ее соотношения остаются постоянными.

Третье соотношение определяет сигнал, когда в угловом поле системы могут находиться одновременно цель и помехи. Оно изменяется во времени, если относительные величины сигналов от цели и помех непостоянны в течение работы системы, например за время одного периода сканирования поля обзора. В случае, если сигнал от цели в каком-либо спектральном диапазоне, например в $\Delta\lambda_2$, гораздо слабее других сигналов, относительные величины $R_{\text{ц}\Delta\lambda_1\Delta\lambda_2}$, $R_{\text{п}\Delta\lambda_1\Delta\lambda_2}$ и $R_{\text{ц+п}\Delta\lambda_1\Delta\lambda_2}$ подчиняются неравенству $R_{\text{п}\Delta\lambda_1\Delta\lambda_2} < R_{\text{ц+п}\Delta\lambda_1\Delta\lambda_2} < R_{\text{ц}\Delta\lambda_1\Delta\lambda_2}$.

Следует учитывать различные значения пространственного разрешения, свойственного ОЭС, работающим в тех или иных участках оптического спектра. Так, в ОЭС УФ-диапазона пространственное разрешение обычно определяется размером одного пиксела МПИ. В ОЭС видимого диапазона это разрешение в плоскости МПИ может составлять долю пиксела МПИ, а в ОЭС длинноволнового ИК-диапазона оно может соответствовать дифракционному пределу [3].

Компьютерная модель двухдиапазонной ОЭС обнаружения может помочь при выборе положения и ширины рабочих спектральных диапазонов, что часто является одной из важных задач на начальном этапе проектирования таких ОЭС. Так, например, при разработке ряда ОЭС важно сопоставить целесообразность выбора рабочих спектральных диапазонов в ультрафиолетовой или в инфракрасной областях спектра. При работе в УФ-области можно почти полностью пренебречь влиянием фона, например, подстилающей наземной или водной поверхности. Однако пропускание среды распространения оптических сигналов — атмосферы — в УФ-диапазоне хуже, чем в окнах прозрачности ИК-диапазона. При этом уровни сигналов, создаваемых обнаруживаемыми или наблюдаемыми объектами (целями и помехами), также заметно разнятся в этих областях.

Для оценки эффективности спектральной селекции цели можно использовать величины спектральных отношений, определенные для различных задаваемых значений дальности обнаружения.

Поскольку при выборе определенных рабочих спектральных диапазонов $\Delta\lambda$ могут заметно уменьшаться величины сигналов от цели, несмотря на увеличение спектрального отношения, на практике при использовании такой „двухцветовой“ спектральной селекции необходимо стремиться одновременно к оптимизации (увеличению) спектрального отношения и обеспечению требуемого для надежной работы ОЭС уровня сигнала от цели в диапазонах $\Delta\lambda_1$ и $\Delta\lambda_2$, т.е. в рабочих спектральных каналах системы.

Поэтому уже на первых этапах компьютерного моделирования двух- и многодиапазонной ОЭС обнаружения целесообразно в соответствии с заданной вероятностью ложных тревог выбрать порог обнаружения [4, 5], а затем с помощью характеристик обнаружения (рабочих характеристик) для различных законов распределения вероятностей [6] определить зависимость вероятности правильного обнаружения от величины порога обнаружения для различных вероятностей ложных тревог. После этого, изменяя положения и ширину $\Delta\lambda_1$ и $\Delta\lambda_2$ для различных дальностей, задаваемых техническим заданием, можно вычислить спектральные отношения, приведенные к выходу системы.

Настоящая работа поддерживалась грантом Минобрнауки РФ по программе „Развитие научного потенциала высшей школы (2009—2010 гг.)“, проект № 4163.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения. М.: Логос, 2007. 192 с.
2. Торшина И. П. Компьютерное моделирование многодиапазонных оптико-электронных систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 9. С. 37—41.
3. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Инфракрасные системы „смотрящего“ типа. М.: Логос, 2004. 444 с.
4. Якушенков Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. М.: Логос, 2004. 472 с.
5. Джемисон Дж. Э., Мак-Фи Р. Х., Плас Дж. Н. и др. Физика и техника инфракрасного излучения / Пер. с англ.; под ред. Н. В. Васильченко. М.: Сов. радио, 1965. 642 с.
6. Каценбоген М. С. Характеристики обнаружения. М.: Сов. радио, 1965. 104 с.

Сведения об авторе

Ирина Павловна Торшина

— д-р техн. наук, доцент; Московский государственный университет геодезии и картографии, кафедра оптико-электронных приборов;
E-mail: torshinai@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов

Поступила в редакцию
10.03.09 г.