

С. В. Суворов

**АМПЛИТУДНАЯ И ВРЕМЕННАЯ СЕЛЕКЦИЯ
ОБЪЕКТОВ В ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ
С ОДНОЭЛЕМЕНТНЫМИ ПРИЕМНИКАМИ**

Рассмотрены соотношения, характеризующие сигналы, которые возникают на входе решающего блока сканирующей оптической системы с одноэлементным приемником излучения инфракрасного диапазона, в целях селекции объектов по амплитуде сигналов и их временным характеристикам. Показано, что учет характеристик сигналов по времени приводит к дополнительным преимуществам в селекции объектов.

E-mail: ssv-g@mail.ru

Ключевые слова: оптическая система, инфракрасный диапазон, одноэлементный приемник, анализ сигналов.

Во многих случаях для гражданских и военных нужд используются оптические локационные системы, выделяющие полезный сигнал в силу различия в собственном или отраженном излучении между исследуемым объектом и подстилающей поверхностью. Простейший объектив такой системы формирует поле зрения в виде конуса с углом α при вершине и имеет приемник излучения с одним чувствительным элементом.

При сканировании таким полем зрения по поверхности в него последовательно попадают различные участки, отличающиеся интенсивностью как собственного, так и отраженного излучения. Возникающие флуктуации спектральной плотности излучения этих участков обусловлены разностью температур и коэффициентов излучения или отражения. Эти флуктуации вызывают колебания напряжения на выходе приемника лучистой энергии. Задача обнаружения объекта контроля (цели) состоит в выделении сигнала от объекта контроля на фоне естественных и искусственных флуктуаций сигнала [1, 2].

Неподвижное поле зрения в виде конуса может применяться в охранных и контрольных системах, когда объект контроля имеет отличия в спектральных характеристиках излучения или отражения по сравнению с фоном, на котором он наблюдается. Эти отличия проявляются при вхождении объекта контроля в поле зрения оптической системы (ОС).

Как в сканирующих, так и в неподвижных системах обнаружения подобного рода используется амплитудная селекция с применением различных алгоритмов и критериев оценки правильного обнаружения. При этом чаще всего имеет место априорная неопределенность относительно параметров помехи и полезного сигнала. В этом случае

для преодоления априорной неопределенности используются адаптивный байесовский подход, отношение максимального правдоподобия, принципы инвариантности к сдвигу и масштабу и т.п. [2–4].

Сигналы на входе решающего блока. Лучистый поток собственного излучения Φ , падающий на чувствительную площадку приемника лучистой энергии (ПЛЭ), при условии, что излучатель может быть аппроксимирован серым телом, будет равен [5, 6]

$$\Phi = \frac{S_{\text{вх.зр}} S_{\text{эф}}}{\pi D^2} \int_{\Delta\lambda} \tau_a(\lambda, D) \tau_o(\lambda) \tau_c(\lambda) \varepsilon_T(\lambda) m_{\text{ч.т}}(\lambda, T) d\lambda, \quad (1)$$

где $S_{\text{вх.зр}}$ — площадь входного зрачка ОС; $S_{\text{эф}}$ — эффективная излучающая поверхность объекта или фона; D — текущее значение дальности; $\tau_a(\lambda, D)$, $\tau_o(\lambda)$ и $\tau_c(\lambda)$ — спектральные коэффициенты пропускания атмосферы, оптики и светофильтра соответственно; $\Delta\lambda$ — рабочий спектральный диапазон; $\varepsilon_T(\lambda)$ — спектральный коэффициент черноты излучателя; $m_{\text{ч.т}}(\lambda, T)$ — спектральная поверхностная плотность потока излучения черного тела; T — абсолютная температура излучателя.

При одновременном нахождении в поле зрения ОС объекта и фона справедливо выражение

$$S_{\text{эф}} = S_o + S_\phi, \quad (2)$$

где S_o — эффективная излучающая поверхность объекта; S_ϕ — эффективная излучающая поверхность фона.

С учетом (2) формулу (1) можно представить в виде

$$\Phi = \frac{S_{\text{вх.зр}} S_o}{\pi D^2} \int_{\Delta\lambda} \tau_a(\lambda, D) \tau_o(\lambda) \tau_c(\lambda) \varepsilon_{T_o}(\lambda) m_{\text{ч.т}}(\lambda, T_o) d\lambda + \frac{S_{\text{вх.зр}} S_\phi}{\pi D^2} \int_{\Delta\lambda} \tau_a(\lambda, D) \tau_o(\lambda) \tau_c(\lambda) \varepsilon_{T_\phi}(\lambda) m_{\text{ч.т}}(\lambda, T_\phi) d\lambda, \quad (3)$$

где $m_{\text{ч.т}}(\lambda, T_o)$ и $m_{\text{ч.т}}(\lambda, T_\phi)$ — спектральные поверхностные плотности потока излучения черного тела при абсолютных температурах объекта (T_o) и фона (T_ϕ).

Площадь излучающего пятна $S(D)$, ограниченного углом поля зрения ОС, является функцией дальности:

$$S(D) = q \left(\frac{D}{f'} \right)^2, \quad (4)$$

где q — площадь чувствительного элемента ПЛЭ; f' — фокусное расстояние ОС.

Электрический сигнал на входе порогового (решающего) устройства может быть получен из уравнения (3) в предположении, что лучистый поток, поступающий на ПЛЭ, пропорционально преобразуется в

напряжение:

$$U_c = \frac{k_{yc} S_{вх.зр} S_{\lambda_{max}}}{\pi D^2} \left\{ S_0 \int_{\Delta\lambda} \tau_a(\lambda, D) \tau_o(\lambda) \tau_c(\lambda) s(\lambda) \varepsilon_{то}(\lambda) m_{ч.т}(\lambda, T_o) d\lambda + [S(D) - S_0] \int_{\Delta\lambda} \tau_a(\lambda, D) \tau_o(\lambda) \tau_c(\lambda) s(\lambda) \varepsilon_{тф}(\lambda) m_{ч.т}(\lambda, T_{\phi}) d\lambda \right\}, \quad (5)$$

где k_{yc} — коэффициент усиления электронной части системы; $S_{\lambda_{max}}$ — максимальная чувствительность ПЛЭ на длине волны $\lambda = \lambda_{max}$; $s(\lambda)$ — относительная спектральная чувствительность ПЛЭ.

Формула (5) справедлива для случая наблюдения объекта, занимающего часть поля зрения ОС. Если в формуле (5) обозначить интеграл первого слагаемого в фигурных скобках как B_1 , интеграл второго слагаемого в фигурных скобках как B_2 , дробный множитель перед фигурными скобками без входящей в него дальности как C , то выражение для электрического сигнала приобретает вид

$$U_c = C \left[\frac{S_0}{D^2} (B_1 - B_2) + \frac{q}{(f')^2} B_2 \right]. \quad (6)$$

Площадь исследуемого объекта S_0 , как правило, точно не известна и, кроме того, носит случайный характер, связанный с траекторией сканирования. Величины B_1 и B_2 зависят от температур соответственно объекта и фона, от прохождения излучения через атмосферу, которое, в свою очередь, зависит как от метеорологических условий, так и собственно от дальности D . Зависимость U_c от дальности D оказывается весьма сложной и мало пригодной для построения дальномеров пассивного типа, работающих с амплитудами исследуемых сигналов.

Выясним, каковы возможности временной селекции в подобных сканирующих системах. На рис. 1 приведены параметры сканирующей ОС. Объективом, находящимся на высоте H (высота может меняться) и наклоненным под углом β к вертикали, сканируются поверхности с угловой скоростью вращения ω . При этом пятно поля зрения объекта, определяемое углом α , описывает на поверхности окружность радиуса R . Скорость сканирования по поверхности в этом случае $v_{ск} = 2\pi R\omega = 2\pi D\omega \sin \beta$, а время нахождения в поле зрения объекта, размеры которого меньше этого поля, и при попадании в центр полосы сканирования определяется выражением

$$T = \frac{2r}{v_{ск}} = \frac{D \operatorname{tg} \alpha}{v_{ск} \cos \beta} = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\pi \omega \sin 2\beta}. \quad (7)$$

При малых углах α , что характерно для систем обнаружения, $T = \frac{\alpha}{\pi \omega \sin 2\beta}$. В последних выражениях и на рис. 1 введены следующие обозначения: H — текущая высота объектива над поверхностью

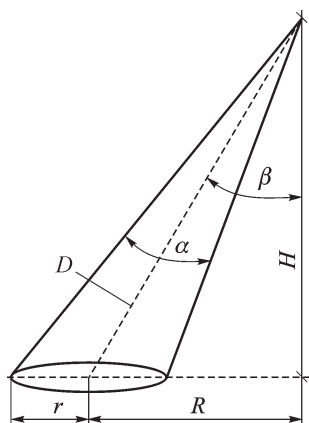


Рис. 1. Параметры сканирующей оптической системы

сканирования; D — текущая дальность до поверхности сканирования; R — текущий радиус сканирования по поверхности оптической оси объектива; r — текущий радиус пятна поля зрения объектива на поверхности; α — угол поля зрения объектива; β — угол наклона оптической оси объектива к вертикали.

Выражение (7) не содержит информации о дальности, так как радиус пятна поля зрения объектива и линейная скорость сканирования по поверхности пропорциональны дальности.

Модернизируем объектив сканирующей системы, вводя второй приемник излучения и формируя второе поле зрения, вложенное в первое. Таким образом, объектив будет иметь два поля зрения, каждое в виде конуса, с углами при вершинах α_1 и α_2 (рис. 2). По поверхности сканирования со скоростью $v_{ск}$ будут двигаться два пятна полей зрения радиусами R и r ; S_0 — объект обнаружения, условно показанный в разные моменты времени процесса сканирования. В нижней части рисунка показаны отклики, возникающие на приемниках излучения, соответствующие графическим размерам полей зрения и объекта.

Если использовать средний инфракрасный диапазон и пироэлектрические приемники излучения, реагирующие на изменение температуры чувствительного элемента [7, 8], то продолжительность отклика будет совпадать по времени с процессами входа в поле зрения и выхода из него, а знак будет определяться повышением или снижением температуры чувствительного элемента.

На рис. 2 введены также следующие обозначения: T — время между максимумами сигналов первого приемника излучения с углом поля

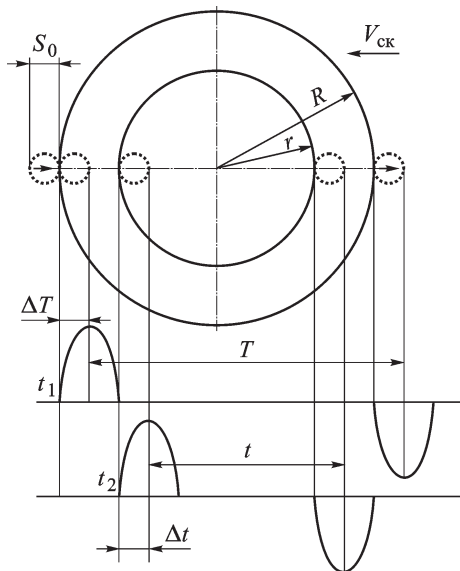


Рис. 2. Сканирование объекта двойным полем зрения

зрения α_1 ($\alpha_1 > \alpha_2$); t — время между максимумами сигналов второго приемника излучения с углом поля зрения α_2 ; ΔT и Δt — время от начала до окончания вхождения объекта в поле зрения α_1 и α_2 ; t_1 и t_2 — моменты начала вхождения объекта в поле зрения α_1 (начало отклика) и α_2 .

Для малых углов α справедливы, как и в предыдущем случае, выражения

$$T = \frac{\alpha_1}{\pi\omega \sin 2\beta}; \quad t = \frac{\alpha_2}{\pi\omega \sin 2\beta}.$$

Кроме того, $\Delta T = \Delta t = \frac{S_0}{v_{\text{ск}}} = \frac{S_0}{2\pi D\omega \sin \beta}$; $t_2 - t_1 = \frac{T - t}{2} = \text{const}$.

Выражение для разности $t_2 - t_1$ является константой для данного применения ОС (неизменны углы полей зрения и угловая скорость сканирования), т.е. на любых дальностях время задержки между появлением сигналов в двух каналах системы остается постоянным. Покажем это:

$$\frac{\Delta T}{t_2 - t_1} = \frac{S_0}{2\pi D\omega \sin \beta} \cdot \frac{2\pi\omega \sin 2\beta}{\alpha_1 - \alpha_2} = \frac{2S_0 \cos \beta}{D(\alpha_1 - \alpha_2)}, \quad (8)$$

откуда

$$t_2 - t_1 = \frac{\Delta T D (\alpha_1 - \alpha_2)}{2S_0 \cos \beta} = \text{const}. \quad (9)$$

Для каждой конкретной системы можно найти константу $K = \frac{\Delta T_0 D_0}{S_0} = \frac{\Delta T D}{S}$, которая будет являться ее характеристикой, что позволяет проводить определенную селекцию объектов по размерам или по дальности.

Например, если объект имеет небольшой разброс значений своих размеров S_0 , то такая система кроме обнаружения объекта могла бы давать информацию о дальности до него, а также повысить вероятность обнаружения, исключая идентификацию объектов несоответствующего размера. Константа ОС при этом определяется заранее на этапе испытания и сдачи изделия.

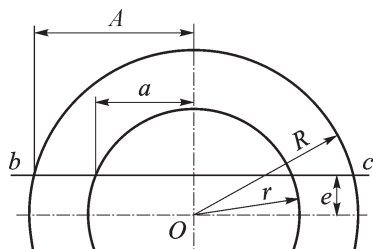


Рис. 3. Попадание объекта в область вне центра полей зрения

Ввиду случайного характера траектории сканирования объект может не попасть в центр полей зрения ОС (рис. 3). На этом рисунке линия bc — траектория прохождения объекта через поля зрения оптической системы. Все остальные обозначения на рисунке — геометрические размеры. Величину e можно назвать своеобразным эксцентриситетом траектории сканирования.

Вычисленная текущая константа K системы будет в этом случае искажаться тем больше, чем больше эксцентриситет траектории.

Разность $t_2 - t_1$ в этом случае будет зависеть от размеров A и a . Введем коэффициент $\gamma = \frac{A}{a} = \sqrt{\frac{R^2 - e^2}{r^2 - e^2}}$. При прохождении линии сканирования через центры полей зрения коэффициент γ будет иметь определенное значение, зависящее от углов полей зрения объектива. При наличии эксцентриситета e коэффициент γ будет меняться. Это изменение позволяет вносить поправку в вычисляемую константу K . При этом объект обязательно должен попасть во внутреннее поле системы, характеризующееся радиусом r .

Рассмотрим случай трехмерного объекта с ограниченной высотой, не выводящей его за пределы конуса поля зрения, как показано на рис. 4. В этом случае импульсы, возникающие на приемниках излучения, будут увеличиваться по амплитуде и длительности в силу увеличения совокупной площади объекта и времени входа в поле зрения и выхода из него. Однако соотношение (9) при этом сохраняется, а величины ΔT и S_0 изменяются в сторону увеличения. Если систему откалибровать по объемному объекту с нахождением соответствующей константы K , то по такому объекту можно определять примерную дальность до него.

Если же система была откалибрована по плоскому объекту, а реальный сканируемый объект имеет третью координату (объемный объект), то возникает ошибка в определении дальности. Дальность определяется из соотношения $D = \frac{K S_0}{\Delta T}$, где ΔT – реальная временная характеристика, полученная в результате измерения, причем в данном случае, как следует из рис. 4, $\Delta T = \frac{S_0 + h \operatorname{tg}(\alpha/2)}{v_{\text{ск}}}$. Очевидно, что для относительных ошибок γ для дальности и временного интервала ΔT ,

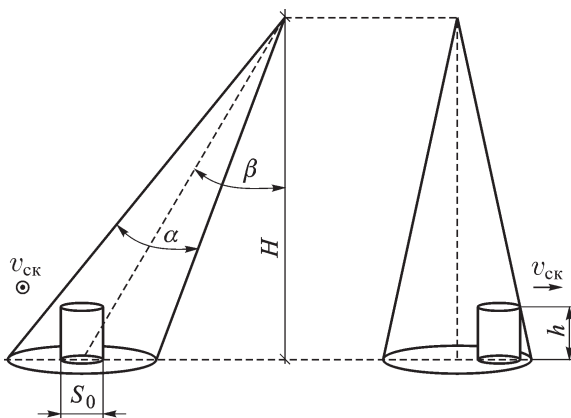


Рис. 4. Сканирование трехмерного объекта

справедливо $\gamma_D = \gamma_{\Delta T} = \frac{\Delta(\Delta T)}{\Delta T} = \frac{h \operatorname{tg}(\alpha/2)}{S_0}$. Для объекта высотой, соизмеримой с условным размером объекта S_0 ($h \approx S_0$), относительная ошибка определения дальности $\gamma_D = \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$. Например, для угла $\alpha=5^\circ$ ошибка $\gamma_D \approx 4\%$.

Приведенные соотношения сохраняются в диапазоне от больших дальностей, где ограничением может являться энергетика или контрастность объекта, до малых дальностей, где пятно поля зрения системы соизмеримо с объектом или меньше его размеров.

Заключение. В рассмотренной ОС время вхождения объекта в поле зрения оказывается пропорциональным отношению размера объекта к дальности до него. Наличие второго поля зрения позволяет учесть факт прохождения объекта вне центров полей зрения ОС.

Использование селекции сигналов по времени в рассмотренной ОС приводит к дополнительным преимуществам:

1. При известной дальности до объекта появляется возможность определения его текущих размеров (селекция по размерам). Это в совокупности с анализом амплитуды сигналов, характеризующей излучательные и отражательные свойства объекта, позволяет повысить вероятность правильного обнаружения.

2. При известных размерах объекта возможно определение дальности до него.

3. В известных условиях применения ОС можно заранее определить диапазон возможных соотношений между размерами объекта и дальностью до него. В реальных условиях применения все, что не попадает в этот априорно заданный диапазон, отсекается как недостоверное.

Таким образом, временная селекция представляется перспективной с точки зрения определения дальности до объекта или повышения вероятности его правильного обнаружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сафронов Ю. П., Эльман Р. И. Инфракрасные распознающие устройства. – М.: Воениздат, 1976.
2. Дмитриенко А. Н., Суворов С. В. Применение адаптивного байесовского подхода для двухспектрального обнаружения слабоконтрастных объектов в инфракрасном диапазоне // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2002. – № 2 (47). – С. 37–46.
3. Шахтарин Б. И. Обнаружение сигналов. – М.: Гелиос АРВ, 2006.
4. Теория обнаружения сигналов / Под ред. П.А. Бакуто. – М.: Сов. радио, 1984.
5. Суворов С. В. Вопросы построения ИК-высотометров с учетом влияния атмосферы // Труды МВТУ. № 426. – М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1984.

6. Я к у ш е н к о в Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. – М.: Сов. радио, 1980.
7. М у с ь я к о в М. П., Ш а х т а р и н Б. И., В а н е е в Г. Г., С у в о р о в С. В. Некоторые особенности пьезоэлектрических преобразователей на полимерных сегнетоэлектриках // Электричество. – 1998. – № 9. – С. 46–51.
8. И ш а н и н Г. Г. Приемники излучения оптических и оптико-электронных приборов. – Л.: Машиностроение, 1986.

Статья поступила в редакцию 19.03.2010

Сергей Витальевич Суворов родился в 1952 г., окончил в 1975 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Доцент кафедры “Автономные информационные и управляющие системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана, заведующий отделом СМ2-2 “Информационные и управляющие системы” НИИ СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 40 научных работ в области систем ближней локации и теории высшего образования.

S.V. Suvorov (b. 1952) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1975. Assoc. professor of “Autonomous Information and Control Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University, head of department of Special Machinery Research Institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 40 publications in the field of short-range radar systems and theory of higher education.