УДК 004.93:621.31

МЕТОДЫ ОПТИМАЛЬНОГО ВЫБОРА РАБОЧИХ ЗОН ДЛЯ МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ ПРИБОРОВ ДИСТАНЦИОННОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

В.А.ШПЕНСТ, *д-р техн. наук, профессор, shpenst@spmi.ru,*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

В статье описываются основные методологические аспекты проектирования многоспектральных оптико-электронных приборов, предназначенных для дистанционного обследования воздушных линий электропередач. На основании предложенных показателей и критериев обнаружения предлагается метод выбора рабочих спектральных зон для данных приборов, излагается методика исследования их эффективности и приводятся результаты имитационного моделирования процесса их функционирования.

***Ключевые слова*:** многоспектральный прибор, линия электропередач, критерий оптимальности, обнаружение, контраст, спектральная зона.

В России общая протяженность магистральных воздушных линий (ВЛ) электропередач составляет более 150 тыс.км. Эффективная эксплуатация ВЛ настоятельно требует периодической диагностики и точного определения координат мест, выявленных в ходе диагностики повреждений. В настоящее время система профилактического обслуживания ВЛ характеризуется низкими оперативностью и точностью выявления координат мест аварийных и предаварийных состояний энергетических объектов. Повысить эффективность диагностики состояния и определения места повреждения линий электропередач и других объектов электроэнергетики способны летательные аппараты (ЛА), оснащенные многозональными оптико-электронными средствами тепловизионного обследования [6]. Это позволит выявлять дефекты на ранней стадии их развития, в режиме работы под напряжением, что минимизирует возможность преждевременного выхода оборудования из строя [7].

Одной из важнейших задач проектирования таких приборов является выбор оптимальных рабочих зон. Задачу предлагается решать в соответствии с неким выбранным критерием оптимальности. С точки зрения классической теории обнаружения оптимальной рабочей будет та зона, для которой ошибки 1-го и 2-го рода или функционал риска минимальны. В рамках данной теории нахождение оптимальных рабочих зон многоспектрального оптико-электронного прибора сводится к определению зависимости этих ошибок или функционала от длины волны и к решению задачи оптимизации. Применение методики осложнено тем, что при определении ошибок 1-го и 2-го рода или функционала риска необходимо располагать полной статистикой параметров сигнала, что практически невозможно для случая диффузного отражения некогерентного излучения от реальных ландшафтов. Поэтому предлагается использовать для выбора рабочих зон рациональный критерий, который основывается на теории полезности.

В соответствии с теорией полезности каждой спектральной зоне (длине волны) можно поставить в однозначное соответствие число, характеризующее полезность зоны (длины волны) для обнаружения тех или иных объектов. Это число принимается за показатель полезности $\Pi(\lambda)$. Спектральная зона $\Delta\lambda_i$ будет предпочтительна относительно других зон $\Delta\lambda_j$, если будет выполняться условие

$$\Pi(\Delta\lambda_i) = \max\{\Pi(\Delta\lambda_i)\};\ \ i \in \{n\},$$

где $\Pi(\Delta\lambda_i)$ – показатель полезности i-й зоны; $\{n\}$ – счетное множество зон спектра.

По максимуму показателя полезности выбирается рабочая спектральная зона. Очевидно, что любая спектральная зона будет полезна, если вероятность обнаружения объекта при дешифрировании изображения, полученного в этой зоне, будет отлична от нуля. Так как вероятность обнаружения объекта на фоне местности зависит от яркостного контраста между объектом и близлежащим фоном, то ее можно описать зависимостью

$$P = 1 - \exp\left\{\frac{a\mathrm{K}^2\delta^3 B_c^{0,3} t}{(2\beta_н)^2}\right\}, \tag{1}$$

где δ – приведенный угловой размер объекта; B_c – яркость сцены; K – яркостный контраст объекта с фоном; 2β – приведенный угловой диаметр поля, в котором отыскивается объект; t – время поиска; a – коэффициент пропорциональности, характеризующий поисковую способность наблюдателя.

Яркостный контраст определяется формулой

$$\mathrm{K}_{\Delta\lambda_i} = \frac{\left|B_{o\Delta\lambda_i} - B_{ф\Delta\lambda_i}\right|}{\max\left\{B_{o\Delta\lambda_i}; B_{ф\Delta\lambda_i}\right\}} = 1 - \min\left\{\frac{B_{o\Delta\lambda_i}}{B_{ф\Delta\lambda_i}}; \frac{B_{ф\Delta\lambda_i}}{B_{o\Delta\lambda_i}}\right\}, \tag{2}$$

где $B_{o\Delta\lambda_i}$ – яркость изображения объекта; $B_{ф\Delta\lambda_i}$ – яркость изображения фона; $\Delta\lambda_i$ – ширина интервала длин волн i-й спектральной зоны, зависящая от яркости объектов и фона местности, ширины и положения зоны в оптическом диапазоне спектра.

Следовательно, для различных длин волн и ширины рабочей зоны $\Delta\lambda$ значения вероятности P неодинаковы и полезность спектральной зоны будет различна. Наиболее полезной будет та зона, для которой вероятность обнаружения максимальна. Как следует из формулы (1), вероятность обнаружения однозначно связана с контрастом объекта относительно фона местности и с увеличением контраста возрастает. Учитывая это, за показатель полезности спектральной зоны можно принять яркостный контраст объекта относительно фона местности.

Однако для реальных объектов и фонов местности контраст является случайной величиной, так как спектральные коэффициенты яркости и освещенность, определяющие значения яркости, зависят от многих случайных факторов. Это обстоятельство не позволяет использовать случайные реализации контраста $\mathrm{K}_{\Delta\lambda_i}$ в качестве показателя полезности. Случайность контраста при рассмотрении полезности спектральной зоны требует учета его вероятностных характеристик: математического ожидания и дисперсии. Использование этих характеристик приведет к понятию полезности в среднем, т.е. к величине, к которой будет стремиться полезность по вероятности. В этом случае при увеличении математического ожидания контраста в среднем будет расти вероятность обнаружения объекта и соответственно полезность данной зоны.

В то же время, при увеличении средних значений отклонения контраста в сторону меньших величин полезность спектральной зоны будет уменьшаться, так как за счет этого будет возрастать вероятность попадания контраста $\mathrm{K}_{\Delta\lambda_i}$ за порог контрастной чувствительности глаза человека.

Таким образом, за показатель полезности $\Pi(\Delta\lambda_i)$ спектральной зоны предлагается принять выражение [8]

$$\Pi(\Delta\lambda_i) = m_1\left\{\mathrm{K}_{\Delta\lambda_i}\right\}\left\{1 - m_1(\xi\Delta\lambda_i)\right\}, \tag{3}$$

где $m_1\{\mathrm{K}_{\Delta\lambda_i}\}$ – математическое ожидание яркостного контраста в i-й спектральной зоне; $m_1(\xi\Delta\lambda_i)$ – математическое ожидание отклонения яркостного контраста $\mathrm{K}_{\Delta\lambda_i}$ от математического ожидания в сторону меньших значений.

Максимум показателя полезности $\Pi_{\max}(\Delta\lambda)$ будет соответствовать наиболее предпочтительной зоне спектра (длине волны). Полученный показатель полезности (3) позволяет определить, на какой длине волны необходимо формировать изображение для создания наилучших условий обнаружения объектов.

Влияние ширины спектральной зоны на вероятность обнаружения объектов может быть определено, исходя из соотношения между спектральным и интегральным контрастами. Выражение для спектрального и интегрального контраста изображения объекта относительно фона, формируемого на выходе прибора со спектральной характеристикой $S(\lambda)$, имеет вид

$$\mathrm{K}(\lambda_j)=\frac{\left|B_{\text{о}}(\lambda_j)-B_{\text{ф}}(\lambda_j)\right|}{\max\{B_{\text{о}}(\lambda_j);B_{\text{ф}}(\lambda_j)\}}; \tag{4}$$

$$\mathrm{K}(\Delta\lambda)=\frac{\left|\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2}B_{\text{о}}(\lambda)S(\lambda)d\lambda-\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2}B_{\text{ф}}(\lambda)S(\lambda)d\lambda\right|}{\max\left\{\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2}B_{\text{о}}(\lambda)S(\lambda)d\lambda;\ \int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2}B_{\text{ф}}(\lambda)S\right\}}, \tag{5}$$

где λ_j находится в пределах спектральной ширины зоны $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$.

Пусть длина волны λ_j выбрана таким образом, что $m_1[\mathrm{K}(\lambda_j)=\max\{m_1[\mathrm{K}(\lambda)]\}$. Учитывая, что $B_{\text{о}}(\lambda)$ и $B_{\text{ф}}(\lambda)$ являются случайными непрерывными в среднем функциями на интервале (λ_2, λ_1), определим, к какому значению стремится в среднем разность спектрального и интегрального контрастов

$$\Delta\mathrm{K}=\mathrm{K}(\lambda_j)-\mathrm{K}(\Delta\lambda). \tag{6}$$

По своей физической природе $B_{\text{ф}}(\lambda)$, $B_{\text{о}}(\lambda)$, $S(\lambda)$ являются неотрицательными функциями длины волны. Так как интеграл является линейным оператором, то операция интегрирования осуществляет линейное преобразование случайных функций $B_{\text{ф}}(\lambda)$, $B_{\text{о}}(\lambda)$.

Поскольку $B_{\text{ф}}(\lambda)$, $B_{\text{о}}(\lambda)$ непрерывны в среднем на интервале (λ_2, λ_1), то будут существовать в смысле сходимости в среднем и интегралы $\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2}B_{\text{о}}(\lambda)S(\lambda)d\lambda$, $\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2}B_{\text{ф}}(\lambda)S(\lambda)d\lambda$ [8]. В этом случае

$$m_1\{\Delta\mathrm{K}\}=m_1\left\{\frac{\left|B_{\text{о}}(\lambda_j)-B_{\text{ф}}(\lambda_j)\right|}{\max\{B_{\text{о}}(\lambda_j);B_{\text{ф}}(\lambda_j)\}}\right\}-m_1\left\{\frac{\left|\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2}B_{\text{о}}(\lambda)S(\lambda)d\lambda-\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2}B_{\text{ф}}(\lambda)S(\lambda)d\lambda\right|}{\max\left\{\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2}B_{\text{о}}(\lambda)S(\lambda)d\lambda;\ \int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2}B_{\text{ф}}(\lambda)S\right\}}\right\}=$$

$$=m_1\left\{\min\left\{\frac{\left|\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2}B_{\text{о}}(\lambda)S(\lambda)d\lambda\right|}{\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2}B_{\text{ф}}(\lambda)S(\lambda)d\lambda};\ \frac{\left|\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2}B_{\text{ф}}(\lambda)S(\lambda)d\lambda\right|}{\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2}B_{\text{о}}(\lambda)S(\lambda)d\lambda}\right\}\right\}-\min\left\{\frac{B_{\text{о}}(\lambda_j)}{B_{\text{ф}}(\lambda_j)};\ \frac{B_{\text{ф}}(\lambda_j)}{B_{\text{о}}(\lambda_j)}\right\}. \tag{7}$$

Не нарушая общности рассуждений, предположим, что

$$\min\left\{\frac{\left|\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{\text{о}}(\lambda)S(\lambda)d\lambda\right|}{\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{\text{ф}}(\lambda)S(\lambda)d\lambda};\ \frac{\left|\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{\text{ф}}(\lambda)S(\lambda)d\lambda\right|}{\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{\text{о}}(\lambda)S(\lambda)d\lambda}\right\} = \frac{\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{\text{о}}(\lambda)S(\lambda)d\lambda}{\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{\text{ф}}(\lambda)S(\lambda)d\lambda}; \tag{8}$$

$$\min\left\{\frac{B_{\text{о}}(\lambda_j)}{B_{\text{ф}}(\lambda_j)};\ \frac{B_{\text{ф}}(\lambda_j)}{B_{\text{о}}(\lambda_j)}\right\} = \frac{B_{\text{о}}(\lambda_j)}{B_{\text{ф}}(\lambda_j)}.$$

Для этого случая выражение (7) примет вид

$$m_1(\Delta \text{K}) = m_1\left\{\frac{\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{\text{о}}(\lambda)S(\lambda)d\lambda}{\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{\text{ф}}(\lambda)S(\lambda)d\lambda}\right\} - m_1\left\{\frac{B_{\text{о}}(\lambda_j)}{B_{\text{ф}}(\lambda_j)}\right\}. \tag{9}$$

Как известно, спектральные и интегральные яркости природных образований и искусственных объектов распределены по логнормальному закону [3]. При таком законе распределения вероятности случайных значений яркостей отношение независимых между собой яркости объекта к яркости фона будет распределено по следущему закону [9]:

$$f\left(\frac{B_{\text{о}}(\lambda_j)}{B_{\text{ф}}(\lambda_j)}\right) = \left(\frac{B_{\text{о}}(\lambda_j)}{B_{\text{ф}}(\lambda_j)}\right)^{-1}\left[2\pi\left(\sigma_{\text{о}}^2(\lambda_j) + \sigma_{\text{ф}}^2(\lambda_j)\right)\right]^{-\frac{1}{2}} \times$$

$$\times \exp\left\{-\frac{\left[\ln\left(\frac{B_{\text{о}}(\lambda_j)}{B_{\text{ф}}(\lambda_j)}\right) - \ln\left(\frac{m_1\{B_{\text{о}}(\lambda_j)\}}{m_1\{B_{\text{ф}}(\lambda_j)\}}\right) - \frac{\sigma_{\text{о}}^2(\lambda_j)}{2} + \frac{\sigma_{\text{ф}}^2(\lambda_j)}{2}\right]^2}{2\left(\sigma_{\text{о}}^2(\lambda_j) + \sigma_{\text{ф}}^2(\lambda_j)\right)}\right\}, \tag{10}$$

где $\sigma_{\text{о}}^2(\lambda_j)$, $\sigma_{\text{ф}}^2(\lambda_j)$ – дисперсия логарифма яркости объекта и фона соответственно.

Отношение интегральных яркостей объекта и фона будет иметь аналогичное распределение. С учетом этого закона математические ожидания отношений, входящих в выражение (10), примут вид:

$$m_1\left\{\frac{\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{\text{о}}(\lambda)S(\lambda)d\lambda}{\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{\text{ф}}(\lambda)S(\lambda)d\lambda}\right\} = \int\limits_0^{\infty} \frac{\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{\text{о}}(\lambda)S(\lambda)d\lambda}{\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{\text{ф}}(\lambda)S(\lambda)d\lambda} f\left(\frac{\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{\text{о}}(\lambda)S(\lambda)d\lambda}{\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{\text{ф}}(\lambda)S(\lambda)d\lambda}\right) \times$$

$$\times d\left(\frac{\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{\text{о}}(\lambda)S(\lambda)d\lambda}{\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{\text{ф}}(\lambda)S(\lambda)d\lambda}\right) = \frac{m_1\left(\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{\text{о}}(\lambda)S(\lambda)d\lambda\right)}{m_1\left(\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{\text{ф}}(\lambda)S(\lambda)d\lambda\right)}\exp\left[\sigma_{\text{ф}}(\lambda)\right] = \frac{\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2} m_1\{B_{\text{о}}(\lambda)\}S(\lambda)d\lambda}{\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2} m_1\{B_{\text{ф}}(\lambda)\}S(\lambda)d\lambda}\exp\left[\sigma_{\text{ф}}(\Delta\lambda)\right]; \tag{11}$$

$$m_1\left(\frac{B_{\text{о}}(\lambda_j)}{B_{\text{ф}}(\lambda_j)}\right)=\int_0^{\infty}\frac{B_{\text{о}}(\lambda_j)}{B_{\text{ф}}(\lambda_j)}f\left(\frac{B_{\text{о}}(\lambda_j)}{B_{\text{ф}}(\lambda_j)}\right)d\left(\frac{B_{\text{о}}(\lambda_j)}{B_{\text{ф}}(\lambda_j)}\right)=\frac{m_1\{B_{\text{о}}(\lambda_j)\}}{m_1\{B_{\text{ф}}(\lambda_j)\}}\exp\{\sigma_{\text{ф}}(\lambda_j)\}. \quad (12)$$

Подставив полученные выражения в формулу (9), получим:

$$m_1(\Delta\text{K})=\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}m_1\{B_{\text{о}}(\lambda)\}S(\lambda)\exp\{\sigma_{\phi}(\lambda_j)\}d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}m_1\{B_{\text{ф}}(\lambda)\}S(\lambda)d\lambda}=\frac{m_1\{B_{\text{о}}(\lambda_j)\}}{m_1\{B_{\text{ф}}(\lambda_j)\}}\exp\{\sigma_{\text{ф}}(\lambda_j)\} \quad (13)$$

Так как при интегрировании случайной величины дисперсия интеграла будет всегда больше или, по крайней мере, равна дисперсии интегрируемой величины, то можно заменить в формуле (13) $\exp\{\sigma_{\text{ф}}(\Delta\lambda)\}$ на меньшую величину $\exp\{\sigma_{\text{ф}}(\lambda)\}$.

Тогда

$$m_1(\Delta\text{K})\geq\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}m_1\{B_{\text{о}}(\lambda)\}S(\lambda)\exp\{\sigma_{\text{ф}}(\lambda_j)\}d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}m_1\{B_{\text{ф}}(\lambda)\}S(\lambda)d\lambda}-\frac{m_1\{B_{\text{о}}(\lambda_j)\}}{m_1\{B_{\text{ф}}(\lambda_j)\}}\exp\{\sigma_{\text{ф}}(\lambda_j)\}=$$

$$=\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}m_1\{B_{\text{ф}}(\lambda)\}\left[\frac{m_1\{B_{\text{о}}(\lambda)\}}{m_1\{B_{\text{ф}}(\lambda)\}}\exp\{\sigma_{\text{ф}}(\lambda)\}-\frac{m_1\{B_{\text{о}}(\lambda_j)\}}{m_1\{B_{\text{ф}}(\lambda_j)\}}\exp\{\sigma_{\text{ф}}(\lambda_j)\}\right]S(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}m_1\{B_{\phi}(\lambda)\}S(\lambda)d\lambda}.$$

Выражение

$$\frac{m_1\{B_{\text{о}}(\lambda)\}}{m_1\{B_{\text{ф}}(\lambda)\}}\exp\{\sigma_{\text{ф}}(\lambda)\}-\frac{m_1\{B_{\text{о}}(\lambda_j)\}}{m_1\{B_{\text{ф}}(\lambda_j)\}}\exp\{\sigma_{\text{ф}}(\lambda_j)\}$$

неотрицательно, так как $m_1\{\text{K}(\lambda_j)\}=\max\{m_1\{\text{K}(\lambda)\}\}\geq m_1\{\text{K}(\lambda)\}$ или

$$\frac{m_1\{B_{\text{о}}(\lambda)\}}{m_1\{B_{\text{ф}}(\lambda)\}}\exp\{\sigma_{\text{ф}}(\lambda)\}\leq\frac{m_1\{B_{\text{о}}(\lambda_j)\}}{m_1\{B_{\text{ф}}(\lambda_j)\}}\exp\{\sigma_{\text{ф}}(\lambda_j)\}.$$

Поэтому и интеграл будет неотрицательной функцией, что приводит к условию $m_1\{\Delta\text{K}\}\geq 0$.

Аналогичные рассуждения при других соотношениях между яркостями объекта и фона [4] приводят к убеждению о справедливости условия $m_1\{\Delta\text{K}\}\geq 0$. Таким образом, расширение спектральной рабочей зоны $\Delta\lambda$ уменьшает контраст, что, в свою очередь, снижает вероятность обнаружения. Следовательно, при выборе ширины рабочей зоны необходимо стремиться, чтобы она была как можно уже. Однако при сужении зоны падает величина потока принимаемого излучения, что ведет к снижению дальности действия прибора. Учитывая это, ширину рабочей зоны необходимо выбирать из условия обеспечения требуемой дальности работы прибора.

Перед непосредственным выбором количества рабочих зон рассмотрим, насколько предпочтительней многоканальная система по сравнению с одноканальной. Предположим, что имеется двухканальная система с вероятностью обнаружения объекта P_1 и P_2 в первом и во втором каналах соответственно. Тогда вероятность обнаружения объекта хотя бы в одном канале будет равна

$$P_{\text{обн}_2} = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2). \quad (14)$$

Формула (14) справедлива для случая независимых каналов. Если же каналы зависимы, то вероятность обнаружения объекта будет описываться выражением [1, 5]:

$$P'_{\text{обн}_2} = 1 - \left(1 - P_1(A_1)\right)\left(1 - P_2\left(A_2 / \overline{A}_1\right)\right), \quad (15)$$

где A_1, A_2 – события обнаружения объекта в 1-м и 2-м каналах соответственно; $\overline{A}_1$ – событие, противоположное A_1; $P_1(A_1)$ – вероятность обнаружения объекта в 1-м канале; $P_2\left(A_2 / \overline{A}_1\right)$ – вероятность обнаружения объекта во 2-м канале при условии, что в 1-м канале объект не обнаружен.

Сравнивая величину $P_{\text{обн}_2}$ или $P'_{\text{обн}_2}$ с любой из P_1 и P_2, легко убедиться, что $P_{\text{обн}_2}$ и $P'_{\text{обн}_2}$ в двухканальной системе превосходит вероятность обнаружения в одном из каналов.

Для *n*-канальной системы с независимыми и зависимыми каналами можно записать

$$P_{\text{обн}_n} = 1 - \prod_{i=1}^{n}(1 - P_i), \quad (16)$$

где P_i – вероятность обнаружения объекта в *i*-м канале;

$$P'_{\text{обн}_n} = 1 - \left(1 - P_1(A_1)\right)\left(1 - P_2\left(A_2 / \overline{A}_1\right)\right)\ldots\left(1 - P_n\left(A_n / \overline{A}_1 \ldots \overline{A}_{n-1}\right)\right), \quad (17)$$

где A_n – событие обнаружения объекта в *n*-м канале; $\overline{A}_{n-1}$ – событие, противоположное A_{n-1}; $P_n\left(A_n / \overline{A}_1 \ldots \overline{A}_{n-1}\right)$ – вероятность обнаружения объекта в *n*-м канале при условии, что в предыдущих каналах объект не обнаружен.

Как видно из выражений (16) и (17), с увеличением числа каналов *n* значения $P_{\text{обн}_n}$ и $P'_{\text{обн}_n}$ стремятся к единице, если вероятности P_i или $P_n\left(A_n / \overline{A}_1 \ldots \overline{A}_{n-1}\right)$, то будут отличны от нуля. Таким образом, многоканальная система имеет более высокую вероятность обнаружения по сравнению с одноканальной и с увеличением числа каналов вероятность обнаружения асимптотически стремится к единице, что свидетельствует о преимуществе многоканальной системы. Однако при увеличении числа каналов возрастает время, затрачиваемое на обнаружение объекта (необходимо последовательно просмотреть и дешифрировать изображения, полученные в каждом канале). В этом случае среднее время, затрачиваемое на обнаружение объекта, будет находиться в пределах

$$\bar{t}_1 \le \bar{t} \le \sum_{i=1}^{n} \bar{t}_i, \quad (18)$$

где $\bar{t}_i$ – среднее время обнаружения объекта в *n*-м канале.

С увеличением числа каналов верхняя граница интервала будет расти. В реальных условиях время ведения наблюдения ограничено, что накладывает соответствующие ограничения на число каналов. В этом случае необходимо решать следующую задачу: найти из множества спектральных зон *n* совокупность зон *m*, доставляющих максимум вероятности обнаружения $P_{\text{обн}_m}$ при условии ограничения времени наблюдения. Если по какой-либо причине нельзя строго наложить ограничение на время наблюдения объектов, но можно задаться требуемой вероятностью обнаружения, то эту задачу можно решать в другой постановке: найти из множества спектральных зон *n* совокупность зон *m*, доставляющую минимум времени наблюдения *t* при условии, что вероятность обнаружения объекта не меньше заданной $P_{\text{обн}_m} \ge P_{\text{обн}_{\text{зад}}}$. Указанные задачи можно свести к задачам целочисленного программирования [2].

Предположим, что имеется многоканальная система с независимыми каналами. Вероятность обнаружения объекта такой системой определяется по формуле (16). С учетом формулы (1) ее можно записать в следующем виде, считая, что угловое поле и разрешение каждого канала одинаковы,

$$P_{\text{обн}_m} = 1 - \prod_{i=1}^{m} \exp\left\{ -\frac{\alpha\delta^3}{(2\beta_н)^2} \left(C_{k_i} m_1\{\mathrm{K}_i\}\right)^2 \left(C_{B_i} m_1\{B_{C_i}\}\right)^{0,3} t_i \right\} =$$

$$= 1 - \exp\left\{ -\frac{\alpha\delta^3}{(2\beta_н)^2} \sum_{i=1}^{m} \left(C_{k_i} m_1\{\mathrm{K}_i\}\right)^2 \left(C_{B_i} m_1\{B_{C_i}\}\right)^{0,3} t_i \right\}, \qquad (19)$$

где C_{k_i}, C_{B_i} – коэффициент передачи контраста (яркости) *i*-м каналом прибора; t_i – время наблюдения в *i*-м канале прибора.

Из формулы (19) видно, что значение $P_{\text{обн}_m}$ полностью определяется суммой

$$\sum_{i=1}^{m} \left(C_{k_i} m_1\{\mathrm{K}_i\}\right)^2 \left(C_{B_i} m_1\{B_{C_i}\}\right)^{0,3} t_i$$

и что вероятность обнаружения слабо зависит от изменения яркости сцены B_{C_i}. Учитывая это, при практических расчетах зависимостью $P_{\text{обн}_m}$ от $m_1\{B_{C_i}\}$ можно пренебречь. Тогда максимальное значение $P_{\text{обн}_m}$ будет достигаться при максимуме суммы

$$\Theta_m = \sum_{i=1}^{m} \left(C_{k_i} m_1\{\mathrm{K}_i\}\right)^2 t_i. \qquad (20)$$

Время, затрачиваемое на просмотр изображений всех каналов *m*, можно вычислить по формуле

$$t_m = \sum_{i=1}^{m} t_i. \qquad (21)$$

Введем бинарную переменную

$$x_1 = \begin{cases} 1, & \text{если спектральная зона } i \text{ не используется в приборе;} \\ 0, & \text{если спектральная зона } i \text{ используется в приборе.} \end{cases}$$

Выражения (20) и (21) с учетом (22) примут вид

$$\Theta_m(\vec{x}) = \sum_{i=1}^{m} \left(C_{k_i} m_1\{\mathrm{K}_i\}\right)^2 t_i\, x_i, \qquad (23)$$

$$t_m(\vec{x}_i) = \sum_{i=1}^{m} t_i\, x_i. \qquad (24)$$

Пусть каналы прибора имеют одинаковые коэффициенты передачи контраста и изображения просматриваются за одинаковые интервалы $t_i = t_0$. Тогда

$$\Theta_m(\vec{x}) = C_k^2 t_0 \sum_{i=1}^{m} \left(m_1\{\mathrm{K}_i\}\right)^2 x_i, \qquad (25)$$

$$t_m(\vec{x}_i) = t_0 \sum_{i=1}^{m} x_i. \qquad (26)$$

После проведенных преобразований перечисленные задачи легко формулируются в терминах задач целочисленного программирования:

1. Найти вектор $\vec{x} = (x_1, ..., x_i, ..., x_n)$, доставляющий максимум функции (25), при условии, что $t_n(\vec{x}) \le t_{зад}$.

2. Найти вектор $\vec{x} = (x_1, ..., x_i, ..., x_n)$, доставляющий минимум функции (26), при условии, что $\Theta_n(\vec{x}) \le \Theta_{зад}(P_{обн.зад}) = [\ln(1 - P_{обн.зад})]\left(-\frac{(2\beta_н)^2}{\alpha\delta^3 C_k^2 (C_B B_c)^{0,3}}\right)$.

Поставленные задачи справедливы, если в каждом канале многоспектрального прибора отсутствуют ложные тревоги. На практике ложные тревоги в многоспектральных приборах возникают тогда, когда изображение элементов фона местности совпадает с изображением объекта. Реально эта величина мала и ею можно пренебречь. Однако для строгости решения поставленной задачи учет вероятности ложной тревоги необходимо осуществлять следующим образом. В случае независимых и зависимых каналов вероятность ложной тревоги *n* канальной системы при принятии решения об обнаружении объекта по появлению ложного изображения хотя бы в одном канале определяется из выражений

$$P^*_{лт_n} = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - P_{лт_i}),$$

$$P'_{лт_n} = 1 - (1 - P_{лт_1}(B_1))(1 - P_{лт_2}(B_2 / \overline{B}_1))...(1 - P_{лт_n}(B_n / \overline{B}_1 ... \overline{B}_{n-1})),$$

где B_n – событие появления ложной тревоги в *n*-м канале.

Из приведенных выражений видно, что с увеличением числа каналов указанные вероятности растут. Следовательно, при выборе числа каналов необходимо задаваться не только уровнем вероятности обнаружения или временем просмотра каналов, но и уровнем ложных тревог. С учетом этого приведенные задачи формулируются следующим образом: найти вектор $\vec{x}$, доставляющий максимум функции (25), при условии, что $P^*_{лт_n} \le P_{лт.зад}$. Эти задачи решаются известными методами динамического программирования.

Таким образом, выбор рабочих зон оптико-электронного многоспектрального прибора предлагается осуществлять следующим образом:

1. Определяется минимальная ширина спектральной зоны, исходя из требуемой дальности действия прибора.

2. Рассчитывается показатель полезности (13) для различных типов объектов и фонов.

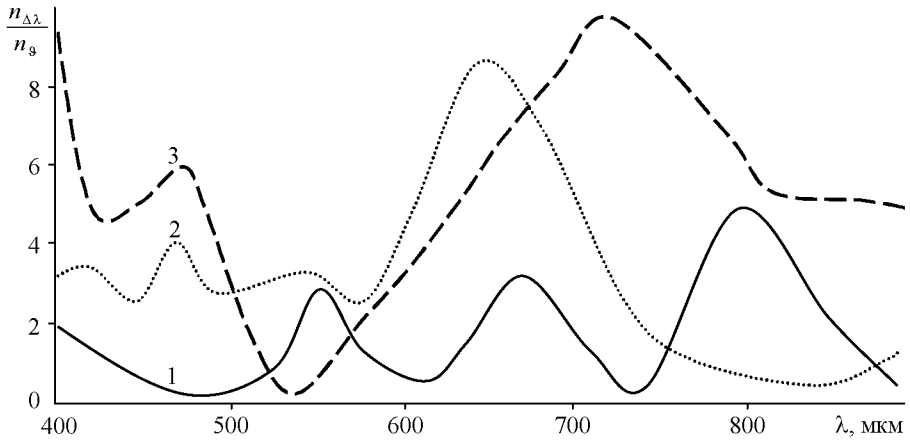
3. Определяются зоны, соответствующие максимумам показателя полезности.

4. Решается одна из указанных выше задач выбора оптимального числа каналов методами динамического программирования.

Изложенная методика учитывает физические явления, имеющие место при визуальном поиске и обнаружении объектов, и позволяет рационально выбрать рабочие зоны многоспектрального прибора, их количество, ширину и положение в оптическом диапазоне спектра.

На основе разработанной методики был осуществлен выбор рабочих зон для многоспектральных приборов с непосредственной визуализацией изображения. Исходя из энергетических возможностей, ширину рабочей зоны предлагается принять равной $\Delta\lambda = 50$ нм. Для типовых воздушных линий электропередач рассчитывался показатель полезности при условии, что они находятся на фоне растительности. Результаты расчетов представлены на рисунке, где изображено изменение относительного значения показателя полезности (по отношению к значению показателя полезности для видимой области) от длины волны. Из рисунка видно, что полезность на различных длинах волн неодинакова и имеется несколько экстремумов.

Были рассчитаны корреляционные матрицы для контрастов воздушных линий электропередач на фоне зеленой растительности. Значения коэффициентов корреляции представлены в таблице.



Зависимость относительного показателя полезности от длины волны
1 – ЛЭП на фоне неба; 2 – на фоне леса; 3 – на фоне луга

Корреляционная матрица $\left\|\rho_{i,j}\left\{\mathbf{K}(\lambda_i);\ \mathbf{K}(\lambda_j)\right\}\right\|$ для контрастов типовой высоковольтной лини на фоне зеленой растительности

λ_j, нм	λ_i, нм										
	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900
400	1	0,504	0,336	0,201	–0,024	–0,069	0,161	–0,075	0,187	0,212	0,108
450		1	0,587	0,313	0,184	0,039	0,259	0,020	0,045	0,152	0,147
500			1	0,448	0,191	–0,05	0,37	0,069	0,035	0,131	0,108
550				1	0,527	0,017	0,250	0,021	0,228	0,215	0,149
600					1	0,656	0,250	–0,106	–0,065	0,127	0,297
650						1	0,099	–0,109	–0,211	–0,02	0,278
700							1	0,023	0,165	0,191	0,099
750								1	0,466	–0,112	–0,645
800									1	0,596	–0,162
850										1	0,489
900											1

Расчет показал, что зоны, соответствующие максимуму показателя полезности, существенно не коррелированы. В связи с этим, количество рабочих спектральных зон для многоспектральных приборов с непосредственной визуализацией изображения выбиралось в соответствии с выражениями (23) и (26). При выборе количества зон решалась задача целочисленного программирования определения минимума времени, затрачиваемого на обнаружение объекта, при требуемом уровне вероятности. Требуемое значение вероятности принималось равным 0,9, а вероятность ложной тревоги равной нулю. Общая совокупность каналов (спектральных зон) бралась по условию превышения относительного значения показателя полезности единичного уровня и отсутствия значимой корреляционной зависимости между зонами.

При решении использовался метод целочисленного программирования «ветвей и границ», так как при прямом переборе необходимо в каждой задаче рассматривать более 5000 всевозможных комбинаций. В результате решения оптимизационных задач было установлено, что для обнаружения типовых линий электропередач необходимо формировать изображения в следующих спектральных зонах: при расположении линий электропередач на фоне зеленой растительности 725-775, 825-875, 475-575, 375-425 нм, а при расположении на фоне хвойного леса 625-675, 375-425, 875-925 нм. Из изложенного следует, что для устойчивого обнаружения линий электропередач многоспектральный прибор с непосредственной визуализацией изображения должен формировать изображения в спектральных зонах 375-425, 475-525, 525-575, 625-675, 725-775, 825-875, 875-925 нм.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бакулев П.А.* Радиолокационные системы. М.: Радиотехника, 2004. 320 с.
2. *Иванов Ю.П.* Комплексирование информационно-измерительных устройств летательных аппаратов / Ю.П.Иванов, А.Н.Синяков, И.В.Филатов. Л.: Машиностроение, 1984. 207 с.
3. *Мирошников М.М.* Теоретические основы оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1983. 696 с.
4. Облака и облачная атмосфера: Справочник / Под редакцией И.П.Мазина. М.: Гидрометеоиздат, 1988, 647 с.
5. Справочник по инфракрасной технике / Под редакцией М.М.Мирошникова. В 4-х томах. М.: Мир, 1999.
6. *Сучкова Г.А.* Комплексное обследование и контроль технического состояния элементов ВЛ неразрушающими методами // Энергетик. 2008. № 4. С.20-22.
7. *Шалыт Г.М.* Определение мест повреждения в электрических сетях. М.: Энергоиздат, 1982. 312 с.
8. *Шпенст В.А.* Комплексная обработка информации в радиоэлектронных системах. СПб: ВАУ, 2012. 480 с.
9. *Якушенков Ю.Г.* Теория и расчет оптико-электронных приборов. М.: Логос, 2004. 472 с.

REFERENCES

1. *Bakulev P.A.* Radiolokacionnye sistemy (*Radar systems*). Moscow: Radiotehnika, 2004, p.320.
2. *Ivanov Yu.P., Sinjakov A.N., Filatov I.V.* Kompleksirovanie informacionno-izmeritel'nyh ustrojstv letatel'nyh apparatov (*Integration of aircraft information-measuring systems*). Leningrad: Mashinostroenie, 1984, p.207.
3. *Miroshnikov M.M.* Teoreticheskie osnovy optiko-jelektronnyh priborov (*Theoretical Foundations of optoelectronic devices*). Moscow: Mashinostroenie, 1983, p.696.
4. Oblaka i oblachnaja atmosfera: Spravochnik (*Clouds and cloudy atmosphere: Reference book*). Ed. I.P.Mazin. Moscow: Gidrometeoizdat, 1988, p.647.
5. Spravochnik po infrakrasnoj tehnike (*Reference book on infrared technology*). Ed. M.M.Miroshnikov. In 4 volumes. Moscow: Mir, 1999.
6. *Suchkova G.A.* Kompleksnoe obsledovanie i kontrol' tehnicheskogo sostojanija jelementov VL nerazrushajushhimi metodami (*Inspection and condition monitoring of OTL elements by non-destructive methods*). Jenergetik. 2008. N 4, p.20-22.
7. *Shalyt G.M.* Opredelenie mest povrezhdenija v jelektricheskih setjah (*Fault location in power networks*). Moscow: Jenergoizdat, 1982, p.312.
8. *Shpenst V.A.* Kompleksnaja obrabotka informacii v radiojelektronnyh sistemah (*Integrated information processing in electronic information systems*). St Petersburg: VAU, 2012, p.480.
9. *Yakushenkov J.G.* Teorija i raschet optiko-jelektronnyh priborov (*Theory and calculation of optoelectronic devices*). Moscow: Logos, 2004, p.472.

OPTIMUM OPERATING ZONES SELECTION METHODS FOR MULTISPECTRAL OVERHEAD POWER LINES REMOTE SENSING DEVICES

V.A.SHPENST, *Dr. of Engineering Sciences, Professor, shpenst@spmi.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia

The article describes the main methodological aspects of designing multispectral optoelectronic devices intended for remote sensing of overhead power lines. Based on proposed indicators and detection criteria a method for selecting operating spectral zones for these devices is suggested, methods of researching into their efficiency and the results of simulating the process of their operation are described.

***Key words*:** multispectral device, overhead power line, optimality criterion, detection, contrast, spectral zone.