

Ольга Алексеевна Смирнова окончила в 1971 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Радиоэлектронные системы и устройства” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 70 научных работ в области лазерной техники.

O.A. Smirnova graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1971. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Radio Electronic Systems and Devices” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 70 publications in the field of laser technology.

Юрий Викторович Федотов родился в 1974 г., окончил в 1998 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, научный сотрудник НИИ “Радиоэлектроника и лазерная техника” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 20 научных работ в области лазерной техники.

Yu.V. Fedotov (b. 1974) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1998. Ph. D. (Eng.), researcher of “Radio-electronics and Laser Technology” research institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 20 publications in the field of laser technology.

Сергей Александрович Скобяков родился в 1974 г., окончил в 1998 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана, инженер НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана.

S.A. Skobyakov (b. 1974) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1998. Engineer of “Radio-electronics and Laser Technology” research institute of the Bauman Moscow State Technical University.

УДК 681.73

В. В. К р ы ж а н о в с к и й, В. Л. Л е в ш и н

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СКАНИРУЮЩИХ СУБМАТРИЧНЫХ ТЕПЛОПЕЛЕНГАТОРОВ

Введены понятия потенциала тепlopеленгатора с позиций как приборных характеристик, так и потребительских качеств по контролю доступной области пространства, “двусторонний” критерий оптимизации и сравнения тепlopеленгатора по типу “эффективность–стоимость”. Проанализированы соотношения, связывающие введенные общие критерии с параметрами фоновой обстановки и всеми требуемыми приборными параметрами, позволяющие оценить степень совершенства конкретного тепlopеленгатора по отношению к идеализированному с предельно высокими характеристиками.

Рассмотрим широкообразные тепlopеленгаторы (ТП) с субматричным фотоприемным устройством (ФПУ) [1–4]. Используя обзорные ТП, решают задачи обнаружения и определения угловых координат удаленных (“точечных”) объектов. С этих позиций очевидны такие их важнейшие характеристики как: $\Omega \cong \alpha\beta$ — телесный угол поля обзора; T_k — время его просмотра; α и β — азимутальный и угломестный

размеры поля обзора; $\Omega_{\text{эл}} \cong \alpha_{\text{эл}}\beta_{\text{эл}}$ — угловое пространственное разрешение, где $\alpha_{\text{эл}}$ и $\beta_{\text{эл}}$ — азимутальный и угломестный размеры пиксела.

С тех же позиций эти параметры естественным образом объединяются в единое понятие: информационный приборный потенциал (ИПП) — то количество информации о наличии и местоположении объекта, обеспечиваемое ТП в единицу времени:

$$\text{ИПП} = \frac{\Omega}{\Omega_{\text{эл}}} \frac{1}{T_{\text{к}}} = N_{\Sigma}/T_{\text{к}}, \quad (1)$$

где N_{Σ} — общее количество элементов разрешения (пикселей) в поле обзора.

С потребительской системотехнической или тактико-технической позиции можно сформулировать другое определение потенциала (ТПП) ТП: объем (Ω_{3-D}) пространства, контролируемого с необходимым разрешением, точностью $\Omega_{\text{эл}}$, частотой обновления $f_{\text{к}} = \frac{1}{T_{\text{к}}}$ и достоверностью $P_{\text{п.о}}$ и $f_{\text{л.т}}$:

$$\text{ТПП} = V_{3-D}(\Omega_{\text{эл}}, T_{\text{к}}, P_{\text{п.о}}, f_{\text{л.т}}), \quad (2)$$

где $f_{\text{л.т}}$ — частота ложных обнаружений (“тревог”); $P_{\text{п.о}}$ — вероятность правильного обнаружения.

При этом объем контролируемого пространства (конуса) определяется в $3-D$ -измерениях:

$$V_{3-D} \cong \frac{\pi}{12} \Omega D_{\text{пор}}^3, \quad (3)$$

где $D_{\text{пор}}$ — пороговая дальность обнаружения объектов ТП с заданной достоверностью за время кадра $T_{\text{к}}$.

Последний параметр прямо связан, с одной стороны, с энергетикой цели $I_{\text{ц}}$, с другой стороны, с потерями излучения в атмосфере $\tau_{\text{а}}(D)$: $I_{\text{ц}} \left| \frac{\text{Вт}}{\text{стер}} \right|$ — эффективная (в используемом спектральном диапазоне $\Delta\lambda$) сила излучения объекта.

Отсюда располагаемая по дальности D облученность E на входном зрачке составляет

$$E = \frac{I_{\text{ц}}\tau_{\text{а}}(D)}{D^2}. \quad (4)$$

С другой стороны $D_{\text{пор}}$ зависит от пороговой чувствительности ТП, выражающейся в данном случае формулой

$$E_{\text{пор}} = \frac{4qK_{\text{зф}}\sqrt{ab\Delta f_{\text{с}}}}{D^* \sqrt{m}K_{\text{с}}\eta_{\text{о}}\pi D_{\text{в.з}}^2}; \quad (5)$$

где q — требуемое отношение сигнал/шум (с/ш) для обеспечения заданных в ТЗ вероятностей пропуска полезного сигнала $P_{\text{пр}}$; значения вероятности правильного обнаружения $P_{\text{п.о}}$ и периода повторения

ложных тревог $T_{л.т} = 1/f_{л.т}$ при эффективной ширине полосы усилительного тракта Δf_3 :

$$q = \Phi^{-1}(1 - P_{пр}) + \sqrt{\ln(T_{л.т} \Delta f_3)}; \quad P_{п.о} = 1 - P_{пр}; \quad (6)$$

Φ^{-1} — функция, обратная интегралу вероятности:

$$\Phi(x) \equiv \int_0^x \exp(-\alpha \xi^2) d\xi;$$

$K_{з.ф}$ — коэффициент загробления чувствительности ($K_{з.ф} \geq 1$), обусловленный специальными мерами обеспечения защиты от фоновых помех (пространственно-неоднородного поля яркости фона); a и b — (линейные) размеры шагов СФПУ соответственно по строке и столбцам (азимуту и углу места); D^* — удельная обнаружительная способность ФПУ без учета схемы временной задержки-накопления (ВЗН); m — число суммируемых сигналов ВЗН субматрицы ФПУ (СФПУ); K_c — коэффициент потерь полезного сигнала ($K_c < 1$), в том числе за счет подавления избыточного шума ФПУ и конечного размера площадки ФПУ; η_0 — коэффициент потерь в оптике ТП, в том числе с учетом виньетирования ($\eta_0 < 1$); $D_{вз}$ — диаметр входного зрачка объектива оптической системы ТП; $\tau_a(D)$ — пропускание атмосферы (осредненное в том же интервале длин волн $\Delta\lambda$); D — дальность обнаружения цели ТП.

Важнейшим параметром в формулах (4) и (5) является величина Δf_3 . Она может быть раскрыта цепочкой формул, предполагающей строчнокадровый просмотр поля обзора с угловыми размерами α (по азимуту) и β (по углу места за время кадра T_k). Схема просмотра приведена на рис. 1, где обозначено $N_{эл}$ — количество элементов в линейке (столбце) СФПУ; $\dot{\Omega}_{ск}$ — угловая скорость сканирования поля обзора; $N_{зах}$ — количество заходов (полос прохода линейки) СФПУ.

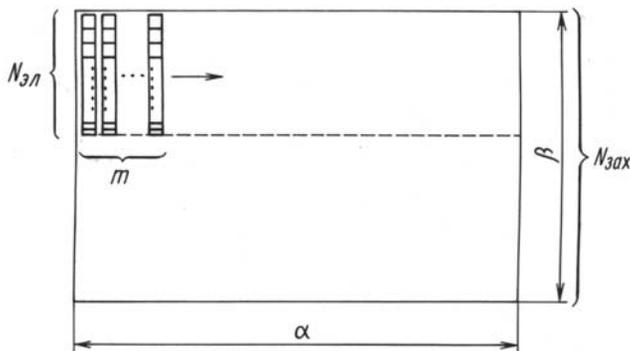


Рис. 1. Схема просмотра

Можно показать, что

$$\Delta f_3 = 0,5/\tau_{\text{и}} \quad (7)$$

(зависимость усложняется при учете фоновой помехи, что для простоты рассмотрения не отражено),

$$\tau_{\text{и}} = \frac{a}{f\dot{\Omega}_{\text{СК}}}; \quad (8)$$

$$\dot{\Omega}_{\text{СК}} = \frac{\alpha}{T_{\text{стр}}\eta_{\text{р}}}; \quad (9)$$

$$T_{\text{стр}} = \frac{T_{\text{к}}}{N_{\text{зах}}}; \quad (10)$$

$$N_{\text{зах}} = \frac{\beta f}{N_{\text{эл}}b\eta_{\text{н}}}. \quad (11)$$

В результате имеем:

$$\tau_{\text{и}} = \frac{N_{\text{эл}}}{N_{\Sigma}} T_{\text{к}}\eta_{\Sigma}; \quad (12)$$

$$\Delta f_3 \cong \frac{0,5N_{\Sigma}}{N_{\text{эл}}T_{\text{к}}} \frac{1}{\eta_{\Sigma}}; \quad (13)$$

здесь обозначено: $\tau_{\text{и}}$ — длительность импульса полезного сигнала (по уровню 0,5); f — фокусное расстояние объектива; $T_{\text{стр}}$ — время прохода строки; $\eta_{\text{н}}$ — коэффициент наложения полос, обеспечивающий непропуск подвижной цели, стоящим на подвижном основании ТП ($\eta_{\text{н}} \leq 1$); $\eta_{\text{р}}$ — коэффициент потерь от реверсов привода на краях поля обзора ($\eta_{\text{р}} \leq 1$);

$$N_{\Sigma} = \frac{\alpha\beta}{\alpha_{\text{эл}}\beta_{\text{эл}}}; \quad (14)$$

$\alpha_{\text{эл}} = \frac{a}{f}$ — угловой размер пиксела вдоль строки; $\beta_{\text{эл}} = \frac{b}{f}$ — угловой размер пиксела поперек строк; N_x и N_y — число пикселей в поле обзора по строке и поперек строк; $\eta_{\Sigma} = \eta_{\text{н}}\eta_{\text{р}}$ — общий коэффициент эффективности системы сканирования.

При этом

$$K_{\text{с}} = \tilde{\eta}_{\text{о.л}}K_{\text{и}}, \quad \eta_{\text{о.л}} < 1; \quad K_{\text{и}} < 1; \quad (15)$$

$$q = q_g K_q, \quad K_q < 1, \quad (16)$$

где $\tilde{\eta}_{\text{о.л}}$ — среднее значение коэффициента использования энергии в пятне рассеяния оптики площадкой ПИ (ФПУ); $K_{\text{и}}$ — коэффициент потерь в амплитуде импульса фототока за счет подавления нижних частот в усилительном тракте, на которых превалирует гиперболический

шум и помеха от неоднородного фона; q_g — отношение с/ш, необходимое для обеспечения заданной достоверности обнаружения объекта (P_o и $f_{л.т.}$) при отсутствии дополнительного межкадрового накопления; K_q — коэффициент снижения необходимого отношения с/ш на предусилителе за счет межкадрового накопления (по принципу “след до обнаружения”).

Выражение (5) представляет собой, по существу, энергетический потенциал ТП, обуславливающий достижимые дальности обнаружения. Для четкого понимания влияния отдельных блоков ТП на этот потенциал целесообразно выразить их в виде сомножителей, отражающих действие соответственно оптики, сканера, ФПУ и усилительного тракта:

$$E_{\text{пор}} = \frac{4}{\pi} q_g K_{\text{опт}} K_{\text{ск}} K_{\text{пи}} K_{\text{ут}}; \quad (17)$$

$$K_{\text{опт}} = \frac{1}{\eta_o D_{\text{вз}}^2}; \quad (18)$$

$$K_{\text{ск}} = \frac{1}{\sqrt{\eta_n \eta_p}}; \quad (19)$$

$$K_{\text{пи}} = \frac{\sqrt{ab}}{D^* \sqrt{m} \tilde{\eta}_{o.п}}; \quad (20)$$

$$K_{\text{ут}} = 0,7 \frac{K_q K_{\text{зф}}}{K_n} \sqrt{\frac{N_{\Sigma}}{N_{\text{эл}} T_k}}. \quad (21)$$

Важнейшей особенностью рассмотренной структуры выражений (12)–(21) являются “обменные” свойства факторов дальности и обзора, т. е. возможность определить, как можно улучшить один из параметров за счет других.

Второй важной особенностью данного подхода является возможность оценки предельных значений параметров ТП при задании $K_{\text{пи}}$ его теоретическим пределом, а $\eta_{o.п}$ и $K_{\text{ск}}$ — их идеальными значениями.

И, наконец, третьей существенной особенностью является возможность сравнения вариантов построения ТП и оптимизации их параметров.

Пороговая дальность обнаружения $D_{\text{пор}}$ определяется из равенства располагаемой (4) и пороговой (5) облученности входного зрачка ТП

$$E = E_{\text{пор}}. \quad (22)$$

Ввиду нелинейности зависимости $\tau_a(D)$, величина $D_{\text{пор}}$ не может быть выражена в явном виде.

Теперь можно вернуться к тактической эффективности ТП, т.е. к выражениям (2) и (3), раскрывая в последнем из них выражение для $D_{\text{пор}}$.

При использовании межкадрового накопления необходимо учитывать, что решение об обнаружении принимается после проведения траекторного анализа на протяжении интервала изменения дальности:

$$\Delta D = \dot{D} T_k N_k, \quad (23)$$

где \dot{D} — скорость сближения с объектом; N_k — число кадров, отведенных для траекторного анализа и межкадрового накопления.

При этом по известному закону накопления, учитывая неизбежные потери от его несовершенства на каждом суммируемом сигнале $\eta_{\text{мк}} < 1$, получим выражение для введенного ранее (16) коэффициента K_q :

$$K_q = \frac{1}{\sqrt{K_q^{N_k} N_k}}. \quad (24)$$

С учетом формулы (23) величину $D_{\text{пор}}$ из уравнения (3) необходимо скорректировать:

$$D'_{\text{пор}} = D_{\text{пор}} - \dot{D} T_k N_k. \quad (25)$$

Это выражение отражает потерю рубежа атаки за время траекторного анализа и накопления при межкадровой обработке.

Получение $D_{\text{пор}}$ требует решения длинной цепочки уравнений.

Поскольку отношение с/ш меняется в процессе сближения с объектом, межкадровый анализ сопровождается изменением q в уравнениях (3) и (17), в которых должно использоваться его значение в последнем кадре с учетом динамики повышения облученности по мере сближения с объектом от кадра к кадру в соответствии с формулами (4) и (23).

Это может быть учтено весовыми коэффициентами при рекурсивном суммировании кадров b_i и коэффициентами потерь при суммировании $K_{\text{дн}}$. В результате можно показать, что

$$E_{\text{пор}} \equiv K_{\text{н}}^{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=0}^{N_k-1} b_i K_{\text{дн}}^i}; \quad (26)$$

$$b_0 < b_1 < \dots < b_k.$$

Из этой формулы следует, что эффект накопления падает с увеличением числа суммируемых кадров N_k .

Этот фактор практически важен при больших значениях \dot{D} , когда он может лимитировать увеличение числа анализируемых кадров через потерю рубежа атаки, а также в связи с падающей эффективностью

их суммирования, тем более, что каждый добавляемый старый кадр оказывается все более зашумленным.

Следует также учитывать, что вместе с полезным сигналом суммируется “когерентно” и фоновая помеха.

Более подробное рассмотрение этих вопросов выходит за рамки настоящей работы, тем более, что даже в принятой здесь узкой постановке задачи определение $D_{\text{пор}}$ с учетом динамики сближения требует решения сложной системы нелинейных уравнений “в обратном ходе”, т.е. в порядке нахождения аргумента “прямых” выражений типа:

$$D_{\text{пор}} = \arg P_{\text{п.о}}(f_{\text{л.т}}), \quad (27)$$

при заданных значениях $P_{\text{п.о}}$ и $f_{\text{л.т}}$, а также Ω , $\Omega_{\text{эл}}$ и $T_{\text{к}}$.

Вероятность обнаружения объекта $P_{\text{п.о}}$ существенно зависит от априорной вероятности $W_{\text{апр}}^{(3-D)}$ нахождения объекта в указанном объеме V_{3-D} , зависящей от точности внешнего целеуказания σ_{α} и σ_{β} . В свою очередь $P_{\text{п.о}}$ определяется формулой

$$P_{\text{п.о}} = P_{\text{п.о}}^y W_{\text{апр}}^{(3-D)}, \quad (28)$$

где $P_{\text{п.о}}^y$ — условная вероятность обнаружения, если объект находится в данном объеме.

Считая распределения по трем параметрам независимыми, получим

$$W_{\text{апр}}^{(3-D)} = W_{\text{апр}}^{(\alpha)} W_{\text{апр}}^{(\beta)} W_{\text{апр}}^{(D)}. \quad (29)$$

Априорные вероятности по параметрам, в свою очередь, определяются через их плотности распределения W_{α} , W_{β} и W_D в соответствующих диапазонах поля обзора α и β , а также в зоне достижимых дальностей $D \leq D_{\text{пор}}$.

Априорные плотности вероятности расположения целей по угловым координатам можно представить в следующем виде:

$$W_{\alpha} = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}\sigma_{\alpha}} \exp\left(-\frac{\alpha^2}{2\sigma_{\alpha}^2}\right); \quad (30)$$

$$W_{\beta} = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}\sigma_{\beta}} \exp\left(-\frac{\beta^2}{2\sigma_{\beta}^2}\right); \quad (31)$$

где σ_{α} и σ_{β} — СКО погрешности ЦУ соответственно по азимуту и по углу места.

Характерны четыре типовые ситуации по источникам и соответственно по точности:

1. σ_{α}^1 — точное ЦУ;
2. σ_{α}^2 — грубое ЦУ;

3. σ_α^3 — очень грубое ЦУ;
4. σ_α^4 — отсутствие ЦУ.

Что касается угломестной координаты, то ее специфика связана с зависимостью β от перепада высот полета ВЦ и носителя (ΔH) в простейшем случае горизонтального их полета. Учитывая высотную зону действия авиации H_{\max} , угол β всегда будет определяться в следующих пределах:

$$\beta \leq \arctg \frac{\Delta H}{D_0}, \quad \Delta H \leq H_{\max}, \quad (32)$$

и на больших дальностях он будет существенно ограничен сверху. Исходя из тех же соображений, что и для азимутальных зависимостей, можно задать σ_α^1 ; σ_α^2 ; σ_α^3 ; σ_α^4 .

Априорные вероятности нахождения цели в поле обзора выразятся соотношениями:

$$W_{\text{апр}}^{\alpha,\beta} = 4 \int_0^\alpha \int_0^\beta w_\alpha(\alpha) w_\beta(\beta) d\alpha d\beta; \quad (33)$$

$$W_{\text{апр}}^{\alpha,\beta} = W_{\text{апр}}^\alpha W_{\text{апр}}^\beta;$$

$$W_{\text{апр}}^{\alpha,\beta} = 4 \operatorname{erf}(\alpha_{\text{обз}}^\circ) \operatorname{erf}(\beta^\circ),$$

где erf — известный интеграл ошибки;

$$\alpha^\circ = \frac{\alpha_{\text{обз}}}{\sqrt{2}\sigma_\alpha}; \quad \beta_{\text{обз}}^\circ = \frac{\beta_{\text{обз}}}{\sqrt{2}\sigma_\beta}. \quad (34)$$

Практически приемлемые вероятности имеют место при выборе $\alpha_{\text{обз}} \geq (4 \dots 5)\sigma_\alpha$ и $\beta_{\text{обз}} \geq (4 \dots 5)\sigma_\beta$.

При указанном выше выборе размеров полей обзора вероятность отсутствия цели в поле обзора должна быть достаточно мала.

С априорной вероятностью нахождения объекта в пределах зоны анализа ΔD (23) дело обстоит сложнее. Следует принять во внимание, что объекты должны, в основном, обнаруживаться на пороговых дистанциях, так как на меньшие дистанции они могут попасть с малой вероятностью лишь за счет необнаружения на больших расстояниях, либо за счет входа в поле обзора извне.

Поэтому при той же гауссовой форме плотности распределения вероятности нахождения цели на какой-то конкретной дальности D зависимость $W_D = f(D)$ из уравнения (29) целесообразно принять “односторонней” по отношению к предельно достижимой для ТП дальности обнаружения $D_0 = D_{\text{пор}}$, отнеся ее к среднему значению интервала траекторного анализа (по принципу “след до обнаружения”).

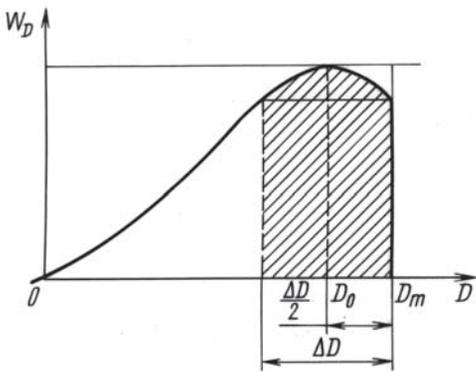


Рис. 2. Функция плотности распределения вероятности

Зависимость $W_D = f(D)$ показана на рис. 2.

Соответствующее аналитическое выражение может иметь вид

$$W_D = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_D} \exp \left[-\frac{(\dot{D} - D_0)^2}{2\sigma_D^2} \right]; \quad (36)$$

здесь σ_D – СКО плотности распределения по D , которое, как показывают грубые оценки, должно находиться в пределах

$$\sigma_D = (0,3 \dots 0,5)D_0. \quad (37)$$

При этом учитывается приоритетность нахождения объекта в районе заштрихованного на рис. 2 интервала анализа (23), нахождение вне которого может быть связано со временем кадра T_k , в течение которого объект мог извне войти в зону обзора. Более корректный учет этих факторов требует проведения дополнительных исследований.

Условная приборная вероятность обнаружения цели с помощью ТП $P_{п.о}^y$ (28) определяется обратным по отношению к величине q в формуле (6) соотношением, связывающим ее через значение сигнала с $D_{пор}$ последующей цепочкой формул. Таким образом, задача замыкается, но может быть решена только методом итераций.

При этом искомая (полная) вероятность обнаружения цели, играющая роль аргумента критерия ТТП эффективности действий ТП, определяется следующим образом:

$$P_D^{анп} = \int_0^{D_m} w_D(D) dD, \quad (38)$$

при этом

$$P_{п.о}^y(D) = \int_{U_{пор}}^{\infty} U(D) du; \quad (39)$$

При этом край функции плотности распределения вероятности нахождения ВЦ на определенной дистанции $W_D = f(D)$ окажется на D_m :

$$D_m = D_0 + 0,5 \dot{D} N_k T_k. \quad (35)$$

Эта зависимость приближенно учитывает потери рубежа обнаружения на траекторный анализ (СДЦ, межкадровое накопление, а при $N_{ц} > 1$ и “мульти-трекинг”).

где $U(D)$ — зависимость входного сигнала $U = U_c + U_{ш}$ на устройстве обнаружения с порогом $U_{пор}$:

$$U_{пор} = \arg [P_{л.т}^{\Sigma}]; \quad (40)$$

$$P_{л.т}^{\Sigma} = \int_0^{N_k T_k} P_{л.т}(t) dt; \quad (41)$$

$$P_{л.т}(t) = \int_0^{U_{пор}} U_{ш}(t) dU_{ш}; \quad (42)$$

$$P_{л.т}^{\Sigma} = \frac{N_k T_k}{T_{л.т}}; \quad (43)$$

$$U_c = K_c E; \quad (44)$$

$$U_{ш} = K_{ш} U_{ш}^{\Phi\Pi Y}, \quad (45)$$

где K_c и $K_{ш}$ — коэффициенты передачи по сигналу и шуму.

При этом должно соблюдаться соответствие K_c в части крутизны ФПУ по сигналу (вольтовой или токовой чувствительности) и $U_{ш}$ паспортным значениям удельной обнаружительной способности D^* ФПУ, входящей в формулу (5) для $E_{пор}$.

Таким образом, предлагаемый критерий ТТП эффективности использования ТП, определяемый формулой (2) с учетом последующих раскрывающих его выражений, позволяет выявить наиболее выгодное “расходование” приборного потенциала ИПП. Оно выражается в оптимизации выбора вариантов построения ТП в части параметров обзора, в том числе α , β и T_k с учетом условий его применения. К последним относятся скорость сближения \dot{D} (через интервал анализа ΔD по формуле (23)); вероятности наличия или отсутствия и различных точностей ЦУ через величины $P^{(1)} \dots P^{(4)}$ реализации формулы (30), относя вероятности ситуаций по видам ЦУ: $P^{(1)-(3)}$ и $P^{(4)}$ соответственно к случаям выдачи ЦУ, а также и свободного поиска.

Каждая из них подразумевает соответствующие сочетания пар погрешностей ЦУ: σ_{α}^1 и σ_{β}^1 ; σ_{α}^2 и σ_{β}^2 ; σ_{α}^3 и σ_{β}^3 , а также σ_{α}^4 и σ_{β}^4 .

Они определяют априорные вероятности $W_{анп}^{(\alpha)}$ и $W_{анп}^{(\beta)}$ нахождения объекта в поле обзора, размером α и β , в соответствующих ситуациях по формулам типа (32)–(34) соответственно через плотности распределения целей по угловым координатам α и β по формулам типа (29)–(30).

Для оценки всей совокупности возможных ситуаций по видам ЦУ необходимо воспользоваться формулами полной вероятности:

$$P_{\text{анр}}^{(\alpha_{\Sigma})} = \sum_{i=1}^I P_{\text{анр}}^{(\alpha_i)} P^i; \quad (46)$$

$$P_{\text{анр}}^{(\beta_{\Sigma})} = \sum_{i=1}^I P_{\text{анр}}^{(\beta_i)} P^i. \quad (47)$$

В данном случае $I = 4$.

В отношении влияния \dot{D} для авиационных ТП, возможно, будет целесообразно ввести еще априорные вероятности нахождения цели в ППС и ЗПС $P^{\text{ППС}}$ и $P^{\text{ЗПС}}$, где значения параметра \dot{D} отличаются кардинально (например, в ППС $\dot{D} = 300 \dots 1000$ м/с, а в ЗПС $\dot{D} = 100 \dots 300$, м/с).

Тогда, формулы (46) и (47) примут вид

$$P_{\text{анр}}^{(\alpha_{\Sigma})} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_{\text{п.с}}} W_{\text{анр}}^{(\alpha_i)} P^i P_{\text{п.с}}^{(j)}; \quad (48)$$

$$P_{\text{анр}}^{(\beta_{\Sigma})} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_{\text{п.с}}} W_{\text{анр}}^{(\beta_i)} P^i P_{\text{п.с}}^{(j)}, \quad (49)$$

где $I_{\text{п.с}} = 2$; $P^{(1)} = P^{\text{ППС}}$; $P^{(2)} = P^{\text{ЗПС}}$.

При этом может оптимизироваться и величина $N_{\text{к}}$, сильно зависящая от \dot{D} и соответственно от потери рубежа обнаружения ΔD по уравнению (23).

Изложенный подход может быть распространен и в случае нескольких объектов $N_{\text{ц}} > 1$ с учетом углового разрешения ТП $\alpha_{\text{р}} \times \beta_{\text{р}}$, позволяющего обнаруживать каждый из объектов в отдельности. Это может быть учтено в выражении (27) введением вероятностного фактора углового разрешения:

$$W_{\text{анр}}^{(3-D-N'_{\text{ц}})} = W_{\text{анр}}^{(3-D)} W_{\text{анр}}^{(N'_{\text{ц}})}, \quad (50)$$

где $\alpha_{\text{р}}$ и $\beta_{\text{р}}$ — угловые разрешения по соответствующим осям координат, обусловленные сверткой весовых функций ФПУ, оптической системы и электронного тракта с учетом пропускной способности ВС. $P_{\text{р}}^{(N'_{\text{ц}})}$ — вероятность того, что $N'_{\text{ц}}$ из всех $N_{\text{ц}}$ находятся вне пределов телесного угла разрешения $\Omega_{\text{р}} = \alpha_{\text{р}} \times \beta_{\text{р}}$ друг от друга.

Конкретизация этих зависимостей может явиться предметом дальнейших исследований.

С учетом этого фактора можно скорректировать понятие ТТП в формуле (2): нормируя его по телесному углу разрешения $\Omega_{\text{р}}$, переходя от угла обзора Ω в формуле (3) к числу элементов разрешения в

поле обзора $N_{\Sigma_p} = \frac{\Omega}{\Omega_p}$, отличающемся от N_{Σ} , учитывая в Ω_p потери разрешения в оптике и электронном тракте.

Остановимся теперь на вопросе адаптации режима обзора под рассмотренные выше ситуации ЦУ. В данном случае в первых трех из них при изменении поля обзора $\alpha \times \beta$ в пропорции (4...5) $\sigma_\alpha^i \sigma_\beta^i$ под каждый вариант точности ЦУ со своим значением T_k может быть сохранено общее техническое решение по сканеру и постоянное значение скорости по строке — $\dot{\Omega}_{ск} = \text{const}$ при $T_k = \frac{\alpha}{V_\alpha} N_{зак}$ (см. уравнения (9)–(11)).

При этом можно избежать переключения согласованных фильтров выделения сигнала и тем самым сохранить неизменным $E_{пор}$ (5) с учетом уравнения (26) и $D_{пор}$ с учетом уравнения (27). И только в четвертой ситуации при отсутствии ЦУ может потребоваться иное техническое решение, другое (большее) значение $\dot{\Omega}_{ск}$ во избежание недопустимого увеличения T_k и, как следствие этого, потери рубежа атаки ΔD . Поэтому первые три ситуации могут быть объединены в общий адаптируемый вариант (1)–(3) с суммированием их вероятностей:

$$P^{(1)-(3)} = P^{(1)} + P^{(2)} + P^{(3)}. \quad (51)$$

При этом $P^{II} = P^{(4)}$; и соответствующие поправки вносятся в выражения (46) и (47). Данный подход, кроме того, может быть распространен на режим селекции и распознавания целей, создавая предпосылки для объективного сравнения вариантов и оптимизации параметров по критериям вероятности правильного ранжирования, селекции и распознавания.

Рассмотренные критерии, однако, являются односторонними, не учитывая фактор “стоимости” в широком смысле. Этот фактор наиболее непосредственно связан с массогабаритными характеристиками (МГХ), но может касаться и других “затратных” факторов, таких как стоимость разработки, изготовления, испытаний и эксплуатации аппаратуры, обусловленных ее сложностью, новизной (степенью преемственности и заимствования), удобством контроля исправности, ресурсом и т.д.

Эти факторы тоже косвенно связаны с МГХ и, хотя трудно, но все же поддаются количественной оценке на этапе выбора технических решений.

В МГХ наиболее показателен объем аппаратуры (V , дм^3), который при нормальном проектировании в значительной мере определяет и ее массу (m , кг) через средний удельный вес

$$\gamma \approx 0,6 \dots 0,9 \text{ кг/дм}^3.$$

В свою очередь, объем, занимаемый оптико-механическим блоком ТП, зависит, прежде всего, от размера входного зрачка оптической системы $D_{вз}$.

В самом первом приближении можно считать, что фактор “стоимости” $C_T^{ТП}$ с эмпирическим коэффициентом $K_{ст}$ можно представить в виде

$$C_T^{ТП} \equiv V_T^{ТП} \equiv K_{ст} D_{вз}^3. \quad (52)$$

Тогда двусторонний конечный критерий типа “эффективность–стоимость” примет следующий вид (на базе последних выражений, а также формул (1) и (2)):

$$\text{ИПП}/C_T^{ТП} \equiv \frac{\text{ИПП}}{K_{ст} D_{вз}^3} \text{ и } \frac{\text{ТПП}}{K_{ст} D_{вз}^3}. \quad (53)$$

Подобным образом в принципе могут быть построены аналогичные критерии и для тепловизионной и лазерно-дальномерной ТпВ и ЛЛ – аппаратуры с учетом соответствующей их специфики.

Выводы. 1. Достаточно широко распространенные в военной технике тепlopеленгаторы с ФПУ 2-го (3-го) поколения впервые проанализированы с точки зрения достаточно обобщенной и обоснованной оценки их информационно-приборного и тактико-технического потенциала по критерию “эффективность–стоимость”.

2. Получены выражения указанных критериев через основные необходимые параметры, позволяющие оценить качество тепlopеленгатора в абсолютной и относительной (по сравнению с оптимальным ТП с предельно высокими показателями) мере, а также производить его аналитическую оптимизацию с учетом взаимосвязи параметров.

3. В полученных соотношениях фигурируют задаваемые в технических требованиях параметры внешней обстановки и требования по вероятностям ошибок при обнаружении объектов пеленгации, ограничивающие приборный потенциал. Их варьирование позволяет объективно оценить достижимые характеристики аппаратуры, учитывая все основные возмущающие факторы, операции обработки информации в ТП и используя современного типа элементную базу.

4. Предлагаемый подход может быть обобщен на другие классы систем, в том числе на тепловизионные и лазеролокационные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левшин В. Л. Обработка информации в оптических системах пеленгации. – М.: Машиностроение, 1978. – 168 с.
2. The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook, с 5, Passive E-O System. Stephen B. Company, Editor Naval Air Warfare Center, 1996.

3. Макаров А. С., Омолев А. И., Филиппов В. Л. Введение в технику разработки и оценки сканирующих тепловизионных систем. – Казань: Унипресс, 1998. – 318 с.
4. Тришеников М. А. Фотоприемные устройства и ПЗС. Обнаружение слабых оптических сигналов. – М.: Радио и связь, 1992. – 400 с.

Статья поступила в редакцию 26.10.2005

Вячеслав Владимирович Крыжановский родился в 1960 г., окончил в 1983 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Зам. главного конструктора ФГУП “НПП Геофизика-Космос”. Автор 5 научных работ в области оптико-электронного приборостроения.

V.V. Kryzhanovsky (b. 1960) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1983. Deputy chief designer of Federal State Unitary Enterprise “NPP Geofizika-Kosmos”. Author of 50 publications in the field of optic and electronic instrumental engineering.

Виктор Львович Левшин родился в 1927 г., окончил в 1950 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Зам. главного конструктора филиала ФГУП “ПО “УОМЗ Урал-Геофизика”. Лауреат Государственной премии СССР. Автор 98 научных работ в области обработки информации в оптико-электронных системах.

V.L. Levshin (b. 1927) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1950. D. Sc. (Eng.), professor of “Laser and Optic and Electronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Deputy chief designer of Branch of Federal State Unitary Enterprise “PO “UOMZ Ural-Geofizika”. Winner of the State Prize of the USSR. Author of 98 publications in the field of data processing in optic and electronic systems.

ЖУРНАЛ “ВЕСТНИК МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА имени Н.Э. БАУМАНА”

В журнале публикуются наиболее значимые результаты фундаментальных и прикладных исследований и совместных разработок, выполненных в МГТУ им. Н.Э. Баумана и других научных и промышленных организациях.

Журнал издается в трех сериях: “Приборостроение”, “Машиностроение”, “Естественные науки”; периодичность — 12 номеров в год.

Подписка по каталогу “Газеты, журналы” агентства “Роспечать”

Индекс	Наименование серии	Объем выпуска	Подписная цена (руб.)	
		Полугодие	3 мес.	6 мес.
72781	“Машиностроение”	2	250	500
72783	“Приборостроение”	2	250	500
79982	“Естественные науки”	2	250	500

Подписывайтесь и публикуйтесь!

Адрес редакции журнала “Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана”: 105005 Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5.

Тел.: (095) 263-62-60; 263-60-45.

Факс: (095) 265-42-98; 263-67-07.

E-mail: markir@bmstu.ru, press@bmstu.ru