УДК 681.518.22

Математическая модель обнаружения баллистического космического объекта многоспектральным оптико-электронным комплексом

Калинин Т. В., Лисицкий В. В., Демидова Н. С., Сервецкий А. И.

Постановка задачи: Многомерность оптических сигналов, а также свойство принимать и обрабатывать информационные массивы в реальном масштабе времени ставит оптикоэлектронные комплексы космического базирования наблюдения баллистических космических объектов на важное место среди информационно-измерительных систем автоматического обнаружения и распознавания сигналов на фоне естественных и организованных помех. Зачастую такие задачи могут успешно решаться путем создания комплексов, функционирующих одновременно в нескольких спектральных диапазонах электромагнитного излучения. Проведенный обзор в области многоспектральных комплексов обнаружения показал, что при исследовании их функционирования не был рассмотрен вопрос зависимости характеристик функционирования от квантовой природы излучения. **Цель**: применение нескольких (более одного) спектральных диапазонов при одновременной спектральной оптической фильтрации заметно повышает качество получаемой информации и эффективность функционирования оптико-электронных комплексов. Целью исследования является получение оценок показателей качества обнаружения баллистических космических объектов с учетом типа покрытия корпуса вне земной атмосферы (за ее пределами) в различных диапазонах функционирования оптико-электронного комплекса путем математического моделирования в среде компьютерной математики Mathcad с учетом квантовой природы оптического поля излучения. Используемые методы: решение задачи обнаружения и распознавания сигналов от объектов на фоне естественных и организованных помех основано на оценке возможности обнаружения баллистических космических объектов по зависимости вероятности правильного обнаружения от расстоянии при фиксированном значении вероятности ложной тревоги и по зависимости максимальной дальности действия оптико-электронного комплекса от заданного значения вероятности правильного обнаружения при фиксированном значении вероятности ложной тревоги с учетом квантовой природы излучения и различных диапазонов излучения. Новизна: элементами новизны представленного решения являются использование теории фотоэмиссии, позволяющей связать статистические свойства падающего оптического энергетического потока с процессом возникновения фотоэлектронов. Флуктуация интенсивности отраженного от объекта оптического сигнала приводит к отличию распределения фотоэлектронов от пуассоновского. Оптимальные операции обнаружения сигнала сводятся к вычислению коэффициента правдоподобия на выходе энергетического детектора – пикселя МФП. Результат: использование представленного решения показало, что обнаружительные характеристики баллистического космического объекта, покрытого композицией материалов, выше, чем обнаружительные характеристики объекта, покрытого однородным материалом. Это обусловлено тем, что образцы, покрытые композицией материалов имеют более высокий коэффициент отражения, чем покрытые однородным в выбранных диапазонах длин волн принимаемого излучения. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы, что при наблюдении объекта в наиболее благоприятных условиях при подсветке цели Солнцем, оптико-электронный ком-

Лисицкий В. В., Демидова Н. С., Сервецкий А. И. Калинин Т. В., Математическая модель обнаружения баллистического космического объекта многоспектральным оптико-электронным комплексом // Системы управления, связи безопасности. 2018. **№** 3. C. 232-248. URL: http://sccs.intelgr.com/archive/2018-03/11-Kalinin.pdf

Reference for citation:

Kalinin T. V., Lisitskiy V. V., Demidova N. S., Servetsky A. I. Detection Model of a Ballistic Space Object with a Multi-Spectral Optical-Electronic Complex. *Systems of Control, Communication and Security*, 2018, no. 3, pp. 232–248. Available at: http://sccs.intelgr.com/archive/2018-03/11-Kalinin.pdf (in Russian).

URL: http://sccs.intelgr.com/archive/2018-03/11-Kalinin.pdf

Библиографическая ссылка на статью:

плекс способен обнаружить объект на расстоянии свыше 400 км с вероятностью правильного обнаружения большем 0,98 и ложной тревоги 10⁻⁸ как в ультрафиолетовом, так и в видимом диапазонах. Вероятность правильного обнаружения увеличивается при сдвиге диапазона принимаемого обучения в дальнюю сторону инфракрасного диапазона. Обнаружительные характеристики, обеспечиваемые приемником видимого диапазона при наблюдении объекта, подсвечиваемого Солнцем, имеют «запас» максимальной дальности обнаружения, что позволяет использовать многоканальное (многоспектральное) обнаружение и селекцию. Практическая значимость: представленное решение предлагается реализовать в виде математического обеспечения функционирования многоспектрального оптико-электронного комплекса с учетом квантового характера оптического поля и количества задействованных рабочих диапазонов. Реализация этих требований при моделировании позволит осуществлять выбор диапазонов излучения и их количества для обнаружения/распознавания объектов с различными видами покрытий корпуса.

Ключевые слова: математическая модель, космический объект, оптико-электронный комплекс.

Введение

Свойство многомерности оптических сигналов, а также свойство принимать и обрабатывать информационные массивы в реальном масштабе времени ставит оптико-электронные комплексы (ОЭК) космического базирования наблюдения баллистических космических объектов (БКО) на важное место среди информационно-измерительных систем автоматического обнаружения и распознавания сигналов на фоне естественных и организованных помех.

Зачастую такие задачи могут успешно решаться путем создания ОЭК, функционирующих одновременно в нескольких спектральных диапазонах электромагнитного излучения. Как известно [1], применение нескольких (более одного) спектральных диапазонов при одновременной спектральной оптической фильтрации заметно повышает качество получаемой информации и эффективность функционирования ОЭК. При этом дополнительным преимуществом является то, что оптимальным диапазоном для обнаружения того или иного объекта может быть один, а для его идентификации – другой (другие). Обычно такими задачами являются визуализация инфракрасных изображений и измерение пространственных координат космических объектов искусственного и природного происхождения.

Одним из возможных инструментов оценки показателей качества функционирования таких ОЭК является математическая модель.

Цель работы — получение оценок показателей качества обнаружения БКО с учетом типа покрытия корпуса вне земной атмосферы (за ее пределами) в различных диапазонах функционирования оптико-электронного комплекса путем математического моделирования в среде компьютерной математики Mathcad.

Математическая модель

Оценим возможность обнаружения БКО по зависимости вероятности правильного обнаружения P_D от расстоянии до БКО $R_{\it bKO}$ при фиксированном значении вероятности ложной тревоги P_F , т.е. по показателям качества обнаружения (кривым обнаружения); и по зависимости максимальной дальности действия $R_{\it max}$ (максимального расстоянии до БКО $R_{\it bKO}$, при котором он обнаружи-

вается) от заданного значения вероятности правильного обнаружения P_D при фиксированном значении вероятности ложной тревоги P_F .

Показатели качества обнаружения БКО ОЭК напрямую зависят от статистических характеристик полезного сигнала (напряжения с выхода пикселей матричного фотоприемника (МФП), на которые проецируется изображение цели) и помехи (флуктуаций напряжения на выходе пикселя МФП, вызванных поглощаемыми им фоновыми излучениями и его собственными шумами) [2, 3]. Определим эти характеристики исходя из физических процессов, происходящих в пикселе.

Процесс обнаружения сигнала от БКО в пикселе МФП, на который проецируется изображение, связан с накоплением им сигнальных и шумовых фото-электронов. Этот процесс имеет статистический характер, обусловленный такими причинами, как:

- 1) фундаментальная неопределенность процесса фотоэлектрического взаимодействия ввиду квантового характера оптического поля;
- 2) флуктуациями интенсивности отраженного от БКО оптического сигнала.

Первая причина может быть учтена с использованием теории фотоэмиссии, позволяющей связать статистические свойства падающего оптического энергетического потока с процессом возникновения фотоэлектронов [4]. Если интенсивность сигнала, которую в рассматриваемом случае можно охарактеризовать энергетическим потоком Φ_{EKO} , не флуктуирует, стационарна и приблизительно постоянна на интервале наблюдения $(t, t+t_n)$, то справедливо выражение:

$$\int_{t}^{t+t} \Phi_{EKO}(t')dt = \overline{\Phi}_{EKO} \cdot t, \qquad (1)$$

где: $\Phi_{\mathit{BKO}}(t') = \frac{\eta_{\mathit{OЭK}}}{n_{\mathit{pix}}} \Phi_{\mathit{BKO}}(\lambda_{\scriptscriptstyle 1}, \Delta \lambda)$, $\Phi_{\mathit{BKO}}(\lambda_{\scriptscriptstyle 1}, \Delta \lambda)$ — поток от БКО на входе оптической

системы; $\lambda_{\rm l}$ — нижняя граница диапазона излучения; $\Delta\lambda$ — диапазон длин волн принимаемого излучения; $\overline{\Phi}_{\it bKO}$ — среднее по времени наблюдения (накопления) $t_{\it h}$ значение потока от БКО; $n_{\it pix}$ — количество сигнальных, т.е. «засвеченных» целью пикселей МФП; $\eta_{\it OЭK}$ — обобщенный коэффициент потерь энергии в звеньях ОЭК.

Тогда число фотоэлектронов, появляющихся в промежутке времени $(t, t+t_{\scriptscriptstyle H})$, распределено по закону Пуассона:

$$P_c(n,t_{_H}) = \frac{(\overline{n}_c)^n}{n!} e^{-\overline{n}_c}$$
 (2)

где \overline{n}_c — среднее число сигнальных фотоэлектронов, накопленных пикселем за t_u .

Вторая причина (флуктуации интенсивности отраженного от БКО оптического сигнала) приводит к отличию распределения $P_c(n,t_{_{\! H}})$ от пуассоновского.

На процесс обнаружения также влияют статистические характеристики внешних (фон) и внутренних (темновой ток и тепловой шум усилителя) шумов. Шумы приводят к генерации шумовых фотоэлектронов, т.е. их распределение тоже можно считать пуассоновским:

$$P_{u}(n) = \frac{(\overline{n}_{u})^{n}}{n!} e^{-\overline{n}_{u}}, \qquad (3)$$

где $\bar{n}_{u} = \bar{n}_{\phi} + \bar{n}_{T}$ — среднее число шумовых фотоэлектронов в виде суммы фоновых и темновых.

Для пикселя МФП вместо $\bar{n}_{\scriptscriptstyle T}$ можно использовать СКО дробового шума $N_{\partial p}.$

Оптимальные операции обнаружения сигнала сводятся к вычислению коэффициента правдоподобия на выходе энергетического детектора — пикселя МФП. Предположим, что распределения $P_c(n)$ и $P_u(n)$ являются пуассоновскими. Тогда сумма сигнала n_c и шума n_u также распределена по закону Пуассона:

$$P_{cui}(n) = \frac{(\bar{n}_{ui} + \bar{n}_{c})^{n}}{n!} e^{-(\bar{n}_{ui} + \bar{n}_{c})}.$$
 (4)

Если разбить интервал наблюдения (накопления) t_n на подынтервалы с одинаковой длительностью τ_i (i=1,2,3,...,N), то ввиду независимости генерации фотоэлектронов на отдельных подынтервалах, совместные распределения генерации шумовых и смеси сигнальных и шумовых фотоэлектронов соответственно можно представить в виде:

$$P_{u}(n_{1}, n_{2}, ..., n_{N}) = \prod_{i=1}^{N} \frac{(\overline{n}_{ui})^{n_{i}}}{(n_{i})!} e^{-(\overline{n}_{ui})},$$
(5)

$$P_{cui}(n_1, n_2, ..., n_N) = \prod_{i=1}^{N} \frac{(\overline{n}_{ui} + \overline{n}_{ci})^{n_i}}{(n_i)!} e^{-(\overline{n}_{ui} + \overline{n}_{ci})}.$$
 (6)

Тогда логарифм отношения правдоподобия будет следующим:

$$\Lambda = \ln \left[\frac{P_{c \, u}(n_1, n_2, ..., n_N)}{P_{u}(n_1, n_2, ..., n_N)} \right] = \sum_{i=1}^{N} n_i \ln \left[\frac{\overline{n}_{ui} + \overline{n}_{ci}}{\overline{n}_{ui}} \right] - \overline{n}_c.$$
 (7)

Второй член этого выражения не зависит от числа эмитированных фотоэлектронов и является постоянным. Поэтому достаточно определить величину:

$$l = \sum_{i=1}^{N} n_i \ln \left[\frac{\overline{n}_{ui} + \overline{n}_{ci}}{\overline{n}_{ui}} \right]. \tag{8}$$

Выражение (8) определяет алгоритм работы оптимального устройства обработки на выходе энергетического детектора. Решение о наличии сигнала выдается в том случае, когда $l>n_0$, где n_0 — постоянная величина, которая выбирается так, чтобы вероятность выполнения неравенства $l>n_0$ при отсутствии сигнала была равна фиксированному значению вероятности ложного обнаружения.

Вследствие того, что реально с выхода пикселя считывается заряд, накопленный в течение всего времени t_{H} , т.е. нельзя этот интервал разбить на подынтервалы, устройство обработки на выходе пикселя МФП является подопти-

мальным. Алгоритм его работы отличается от оптимальной схемы тем, что в выражении (8) опускается знак суммы, т.е. N=1.

Для случая обнаружения сигнала на фоне слабого пуассоновского шума максимально допустимая вероятность ложного обнаружения (тревоги) на интервале $(t, t+t_H)$ с учетом формулы (1) равна:

$$P_{F} = \sum_{n=n_{h}+1}^{\infty} \frac{(\overline{n}_{u_{l}})^{n}}{n!} e^{-\overline{n}_{u_{l}}} = 1 - \sum_{n=0}^{n_{0}} \frac{(\overline{n}_{u_{l}})^{n}}{n!} e^{-\overline{n}_{u_{l}}},$$

$$(9)$$

Вероятность P_F можно выразить через χ^2 -распределение:

$$P(n,x) = \left[2^{n/2} \Gamma(n/2)\right]^{-1} \int_{0}^{x} y^{(n/2)-1} e^{-\frac{y}{2}} dy,$$
 (10)

где: $\Gamma(n/2)$ – гамма-функция; n – число степеней свободы χ^2 -распределения (n=1,2,...).

При этом формула (9) принимает вид:

$$P_{F} = 1 - P \left[2\bar{n}_{u_{1}}, 2(n_{0} + 1) \right]. \tag{11}$$

Вероятность правильного обнаружения с учетом (10) равна:

$$P_D = \sum_{n=n_0+1}^{\infty} P_{cu}(n) = 1 - P[2(\overline{n}_u + \overline{n}_c), 2(n_0 + 1)].$$
 (12)

При слабых шумах справедлива приближенная формула:

$$P_D \approx \sum_{n=n_0+1}^{\infty} P_c(n) = 1 - P[2\overline{n}_c, 2(n_0+1)] \quad npu \quad \overline{n}_u < 1.$$
 (13)

Если сигнал сильный (десятки и сотни фотоэлектронов), то вероятность правильного обнаружения можно найти используя локальную теорему Лапласа:

$$P_{D} = \sum_{n=n_{0}+1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi(\overline{n}_{u_{i}} + \overline{n}_{c})}} e^{\frac{\left[n - (\overline{n}_{u_{i}} + \overline{n}_{c})\right]^{2}}{2(\overline{n}_{u_{i}} + \overline{n}_{c})}}.$$
(14)

Оценка дальности действия

При пассивной локации БКО на фоне распределенных помех (далее по тексту – «фоне») основное энергетическое уравнение ОЭК имеет вид:

$$\frac{1}{n_{\text{pix}}} \Phi_{\text{BKO}}(\lambda_{1}, \Delta \lambda) - \Phi_{\Phi}(\lambda_{1}, \Delta \lambda) \ge \mu \Phi_{n} / \eta_{O\ni K}, \tag{15}$$

где: $\Phi_{\phi}(\lambda_1, \Delta \lambda)$ — поток фона на входе (апертуре) оптической системы ОЭК в диапазоне $\Delta \lambda$ длин волн принимаемого излучения с нижней границей λ_I ; μ — заданный уровень превышения сигналом порогового потока Φ_n для пикселя.

Поток от БКО на апертуре может быть найден в соответствии с выражением:

$$\Phi_{BKO}(\lambda_1, \Delta \lambda) = \frac{\pi d_0^2}{4} E_{BKO}(\lambda_1, \Delta \lambda) = \frac{\pi d_0^2}{4} \int_{\lambda_1}^{\lambda_1 + \Delta \lambda} E_{BKO} d\lambda, \qquad (16)$$

где: d_0 — диаметр входного зрачка оптической системы (ОС) ОЭК; $E_{\text{БКО}}(\lambda_1,\Delta\lambda)$ — освещенность, создаваемая БКО на апертуре ОС в диапазоне $\Delta\lambda$; $E_{\text{БКО}}$ — спектральная плотность освещенности.

Спектральная плотность освещенности, создаваемой целью на апертуре OC ОЭК определяется выражением:

$$E_{\text{BKO}} = \cos\alpha_{\text{BKO}}\cos\delta_{\text{BKO}}I_{\text{BKO}}R_{\text{BKO}}^{-2},\tag{17}$$

где: $\alpha_{БКO}$, $\delta_{БKO}$ — углы между направлением на БКО и линией визирования по горизонтали и вертикали соответственно в системе координат, связанной с МФП (см. рис. 1); $I_{БKO}$ — спектральная плотность силы излучения БКО; $R_{БKO}$ — расстояние от ОЭК до БКО.

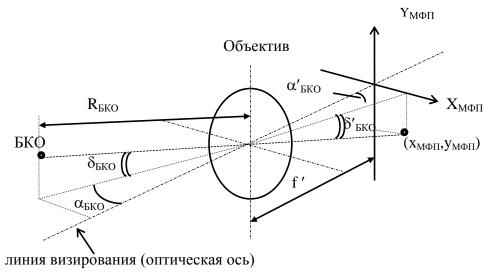


Рис. 1. Схема наблюдения БКО

Спектральная плотность силы излучения БКО I_{EKO} включает несколько составляющих, основными из которых являются:

- спектральная плотность переотражаемого целью солнечного излучения $I_C = I_C(\beta_{XOY}, \beta_{XOZ}, \gamma_{XOY}, \gamma_{XOZ}, \rho_{KOP\Pi}, \rho_{EH})$ как функция углов соответственно подсвета Солнцем в вертикальной β_{XOY} и горизонтальной β_{XOZ} плоскостях, углов оси визирования ОЭК в вертикальной γ_{XOY} и горизонтальной γ_{XOZ} плоскостях связанной системы координат БКО, а также спектральных коэффициентов отражения материалов поверхности корпуса БКО $\rho_{KOP\Pi} = \rho_{KOP\Pi}(\lambda)$ и наконечника $\rho_{EH} = \rho_{EH}(\lambda)$ БКО;
- спектральная плотность переотражаемого целью излучения освещенной части поверхности Земли I_3 .

Аналитически I_{EKO} выражается следующим образом:

$$I_{EKO} = I_C + I_3.$$

Результаты моделирования целевой обстановки [5] показали, что в дневных условиях наблюдения превалирующей является I_C , т.е.:

$$I_{EKO} \approx I_C.$$
 (18)

С учетом (17) выражение (16) примет вид:

$$\Phi_{BKO}(\lambda_1, \Delta \lambda) = \frac{\cos \alpha_{BKO} \cos \delta_{BKO} \pi d_0^2}{4 R_{BKO}^2} I_{BKO}(\lambda_1, \Delta \lambda), \qquad (19)$$

где $I_{EKO}(\lambda_1, \Delta \lambda) = \int_{\lambda}^{\lambda_1 + \Delta \lambda} I_{EKO} d\lambda$ — сила излучения БКО в заданном диапазоне.

Подставляя (19) в (15) и разрешая его относительно $R_{\it EKO}$ получим неравенство:

$$R_{EKO} \leq \sqrt{\frac{\cos \alpha_{EKO} \cos \delta_{EKO} \pi d_0^2 I_{EKO}(\lambda_1, \Delta \lambda)}{4 n_{pix} \left(\mu \frac{\Phi_n}{\eta_{O9K}} + \Phi_{\phi}(\lambda_1, \Delta \lambda)\right)}}.$$
(20)

Максимально возможное количество засвеченных изображением БКО пикселей $\max(n_{pix}) = n_{\max}$ является функцией отношения радиуса изображения БКО $d_{EKO}/2$ к минимальному линейному размеру пикселя

$$h_{\min} = \begin{cases} h_{x}, \ ecnu \ h_{x} \leq h_{y}, \\ h_{y}, \ ecnu \ h_{x} > h_{y}, \end{cases}$$

где h_x , h_y – размеры пикселя по горизонтали и вертикали соответственно, т.е.:

$$n_{\text{max}} = n_{\text{max}} \left(\frac{d_{EKO}}{2h_{\text{min}}} \right). \tag{21}$$

График этой функции представлен на рис. 2.

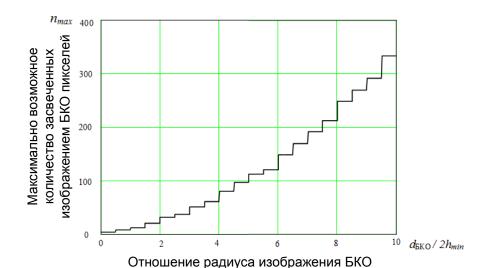


Рис. 2. Максимально возможное количество засвеченных изображением БКО пикселей n_{\max} как функция отношения радиуса изображения БКО $d_{\text{БКО}}/2$ к минимальному линейному размеру пикселя h_{\min}

к минимальному линейному размеру пикселя

Поток от фона на апертуре ОС ОЭК равен:

$$\Phi_{\varphi}(\lambda_1, \Delta \lambda) = \frac{\pi d_0^2}{4 f'^2} h_x h_y L_{\varphi}(\lambda_1, \Delta \lambda) = \frac{\pi d_0^2}{4} h_x h_y \int_{\lambda_1}^{\lambda_1 + \Delta \lambda} L_{\varphi} d\lambda, \qquad (22)$$

где: L_{Φ} – спектральная плотность яркости фона; f' – заднее фокусное расстояние ОС ОЭК.

Обобщенный коэффициент потерь ОЭК определяется равенством:

$$\eta_{O\supset K} = \Omega_{\rm ex} \Omega_{MK\Pi} \Omega_{\rm ess} \Omega_{M\Phi\Pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_1 + \Delta\lambda} \tau_{\rm ess}(\lambda) \tau_{\rm ess}(\lambda) \tau_{MK\Pi}(\lambda) \tau_{M\Phi\Pi}(\lambda) d\lambda , \qquad (23)$$

где $\Omega_{\rm ex}$, $\Omega_{\rm MKII}$, $\Omega_{\rm sbix}$, $\Omega_{\rm MΦII}$ — коэффициенты заполнения соответственно входного и выходного окон электронно-оптического преобразователя (ЭОП) микроканального преобразователя (МКП) и МФП в пределах пятна от БКО, $\tau_{\rm ex}(\lambda)\tau_{\rm sbix}(\lambda)\tau_{\rm MKII}(\lambda)\tau_{\rm MΦII}(\lambda)$ — их спектральные коэффициенты пропускания.

При отсутствии ЭОП выражение (23) принимает вид:

$$\eta_{M \ni m} = \Omega_{M \Phi n} \int_{\lambda_{1}}^{\lambda_{1} + \Delta \lambda} \tau_{m}(\lambda) \tau_{m}(\lambda) d\lambda. \tag{24}$$

Пороговый поток можно найти, используя выражение:

$$\Phi_{\Pi} = \frac{N_{\partial p} h c}{t_{H} \int_{\lambda_{L}}^{\lambda_{g}} \lambda \ q_{M\Phi\Pi}(\lambda) d\lambda},$$
(25)

где:

$$\begin{split} \lambda_{_{\!\mathit{H}}} &= \begin{cases} \lambda_{_{\!\!1}} \text{ , если нет ЭОП,} \\ \lambda_{_{\!\!1}}^* \text{ , если есть ЭОП.} \end{cases} \\ \lambda_{_{\!\mathit{G}}} &= \begin{cases} \lambda_{_{\!\!1}} + \Delta \lambda \text{ , если нет ЭОП,} \\ \lambda_{_{\!\!1}}^* + \Delta \lambda^* \text{ , если есть ЭОП.} \end{cases} \end{split}$$

h — постоянная Планка; c — скорость света; $q_{M\Phi\Pi}(\lambda)$ — спектральный квантовый выход пикселя МФП.

Для определения заданного уровня μ превышения сигналом порогового потока, или, другими словами, требуемого отношения сигнал-шум на выходе пикселя, воспользуемся полученными выше выражениями (5) (или (7)) и (8). Из первой формулы можно получить выражение порога n_0 через заданное значение вероятности ложной тревоги $P_{F\,3a\partial}$ и среднее число шумовых фотоэлектронов \overline{n}_{u} :

$$n_0 = n_0(P_{F_{2ab}}, \bar{n}_{yy}).$$
 (26)

Формула (8) с учетом (10), (26) и предположения, что $\mu = \overline{n}_c / \overline{n}_{uu}$ может быть записана в виде [5]:

$$P_{D}(P_{F \, 3ao}, \overline{n}_{uu}, \mu) = \begin{cases} \sum_{n=n_{0}+1}^{\infty} \frac{\left[\overline{n}_{uu} \left(\mu+1\right)\right]^{n}}{n!} e^{-\overline{n}_{uu} \left(\mu+1\right)} & n \, pu \quad \overline{n}_{uu} \left(\mu+1\right) \leq 100, \\ \sum_{n=n_{0}+1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2 \, \pi \, \overline{n}_{uu} \left(\mu+1\right)}} e^{-\frac{\left[n-\overline{n}_{uu} \left(\mu+1\right)\right]^{2}}{2 \, \overline{n}_{uu} \left(\mu+1\right)}} & n \, pu \quad \overline{n}_{uu} \left(\mu+1\right) > 100. \end{cases}$$

$$(27)$$

Тогда μ можно представить в виде функции от заданных значений вероятностей правильного обнаружения $P_{D \; 3a\partial}$, ложной тревоги $P_{F \; 3a\partial}$ и среднего числа шумовых фотоэлектронов \overline{n}_{u} :

$$\mu = \mu(P_{D_{3ad}}, P_{F_{3ad}}, \bar{n}_{uu}). \tag{28}$$

Таким образом, дальность действия ОЭК можно определить на основе выражения (20) учитывая формулы (14), (21), (22), (23) или (24), (25), (28):

$$R_{\text{max}} = \sqrt{\frac{\cos \alpha_{\text{EKO}} \cos \delta_{\text{EKO}} \pi d_0^2 I_{\text{EKO}}(\lambda_1, \Delta \lambda)}{4 n_{\text{max}} \left(\mu \frac{\Phi_n}{\eta_{O \ni K}} + \Phi_{\Phi}(\lambda_1, \Delta \lambda) \right)}}.$$
 (29)

С помощью модели наблюдения БКО были рассчитаны: яркость фонового излучения и значения силы излучения цели, покрытой различными материалами и в заданных диапазонах длин волн [6, 7].

Для условий, принятых в модели [5], а также при задании значений количества фоновых фотоэлектронов \overline{n}_{ϕ} при выбранном t_{H} путем моделирования получены значения интегральной яркости фона.

Проведенное моделирование показало результаты, схожие с моделями, полученными в работах авторов [8, 9].

Сильнее всего яркость фона в диапазоне 0,3...0,5 мкм, так как именно в этой части спектра максимальна яркость звездной составляющей фона, которая превалирует над другими составляющими. Однако количество фоновых фото-электронов столь незначительно по сравнению с собственными шумами МФП (в лучшем случае ~ 10 фотоэлектронов), что фоном в дальнейших расчетах можно было пренебречь.

При моделировании излучения БКО были рассмотрены следующие случаи:

- сила излучения БКО слабо меняется (только за счет изменения углов подсвета и наблюдения) по мере сокращения расстояния между объектом и ОЭК;
- корпус БКО покрыт однородным материалом (покрашен), в заданных выше диапазонах длин волн принимаемого излучения разброс значений $I_{\text{БКО}}$ от среднего значения не превышает 1,2% для диапазона В1 ($\Delta\lambda$ =0,3...0,5 мкм) и 0,9% для диапазона В2 ($\Delta\lambda$ =0,45...0,65 мкм).
- корпус покрыт разными материалами, соответственно, разброс значений I_{EKO} увеличивается примерно вдвое из-за разности спектральных коэффициентов отражения, но не превышает 2,5%, т.е. можно считать, что I_{EKO} не зависит от текущего расстояния R_{EKO} до БКО и максимальную дальность правомерно оценивать с использованием формулы (29).

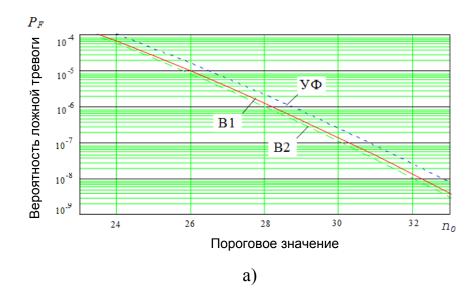
Для сравнения приведем обнаружительные характеристики ОЭК при заданных выше исходных данных (таблица 1).

На основе данных табл. 1 с использованием выражения (5) построены кривые зависимости вероятности ложной тревоги P_F от количества шумовых фотоэлектронов $\overline{n}_{u} = \overline{n}_{\phi} + \overline{n}_{T} = \overline{n}_{\phi} + N_{op}$ в различных диапазонах длин волн принимаемого излучения $\Delta\lambda$ (см. рис. 3) и порога n_{0} .

Таблица 1 – Интегральная яркость фона L_{ϕ} , $B\tau/cp\cdot m^2$ в различных диапазонах по результатам моделирования

	$\Delta \lambda$, mκm		
	0,353,5	3,453,65	5,610,0
L_{ϕ}	1,3·10 ⁻⁶	3,3·10 ⁻⁶	3,7·10 ⁻⁷
\overline{n}_{ϕ}	0,55	0,24	0,14

На основе данных табл. 1 с использованием выражения (5) построены кривые зависимости вероятности ложной тревоги P_F от количества шумовых фотоэлектронов $\overline{n}_{u} = \overline{n}_{\phi} + \overline{n}_{T} = \overline{n}_{\phi} + N_{\partial p}$ в различных диапазонах длин волн принимаемого излучения $\Delta \lambda$ (см. рис. 3) и порога n_0 .



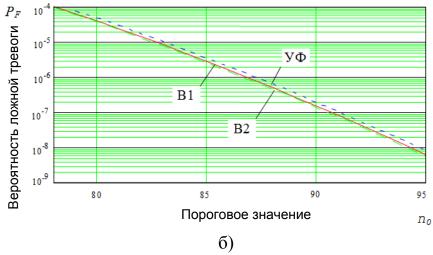


Рис. 3. Зависимость вероятности ложной тревоги P_F от диапазона $\Delta\lambda$ длин волн излучения (В1, В2, УФ – видимые и ультрафиолетовый диапазоны, соответственно) и порога n_0 при количестве шумовых фотоэлектронов N_{op} =10 (а) и N_{op} =50 (б)

Используемые в дальнейших расчетах значения порога n_0 , взятые из графиков рис. 3, приведены в таблицах 2 и 3.

Кривые вероятности правильного обнаружения цели для различных значений P_F , рассчитанные по формуле (12) с учетом таблиц 2 и 3, представлены на рис. 4 и рис. 5.

Таблица 2 — Максимальная дальность R_{max} обнаружения БКО, покрытого однородным материалом и подсвечиваемой Солнцем, в зависимости от диапазона $\Delta\lambda$ длин волн принимаемого излучения, вероятности ложной тревоги $P_{\scriptscriptstyle E}$ и СКО дробового шума $N_{\partial p}$ пикселя МФП

			$\Delta \lambda$, мкм		
			0,30,5	0,450,65	0,60,8
$R_{ m max}$, KM	$P_F = 10^{-4}$	$N_{\partial p}$ =10	597	916	783
	$P_F = 10^{-6}$	$N_{\partial p}=10$	552	846	723
	$P_F = 10^{-8}$	$N_{\partial p}=10$	516	791	675

Таблица 3 — Максимальная дальность R_{max} обнаружения цели, покрытой композицией материалов и подсвечиваемой Солнцем, в зависимости от диапазона $\Delta\lambda$ длин волн принимаемого излучения, вероятности ложной тревоги $P_{\scriptscriptstyle F}$ и СКО дробового шума $N_{\partial p}$ пикселя МФП

			$\Delta\lambda$, мкм		
			0,30,5	0,450,65	0,60,8
$R_{ m max}$, KM	$P_F = 10^{-4}$	$N_{\partial p}$ =10	613	1019	1498
	$P_F = 10^{-6}$	$N_{\partial p}=10$	566	941	1384
	$P_F = 10^{-8}$	$N_{\partial p}=10$	530	880	1293

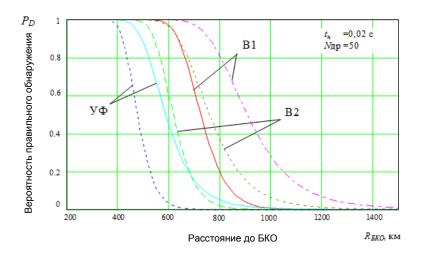


Рис. 4. Кривые правильного обнаружения БКО, покрытого однородным материалом в зависимости от расстояния до него

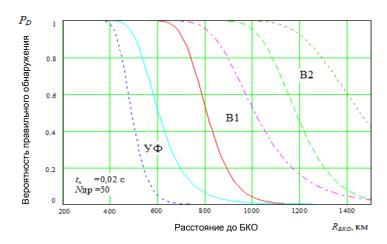


Рис. 5. Кривые правильного обнаружения БКО, покрытого композицией материалов в зависимости от расстояния до него

При сравнении рис. 4 и рис. 5 видно, что обнаружительные характеристики БКО, покрытого композицией материалов, выше, чем обнаружительные характеристики БКО, покрытого однородным материалом. Это обусловлено тем, что образцы, покрытые композицией материалов имеют более высокий коэффициент отражения, чем покрытые однородным в выбранных диапазонах длин волн принимаемого излучения. Причем образец, покрытый однородным материалом, характеризуется высоким коэффициентом отражения в диапазоне В2, что отразилось на перемещение кривых обнаружения в этом диапазоне для БКО, покрытого композицией материалов, за кривые диапазона В1 (см. рис. 5).

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы, что при наблюдении БКО в наиболее благоприятных условиях при подсветке цели Солнцем (рис. 4, 5), ОЭК способна обнаружить объект на расстоянии свыше 400 км с вероятностью правильного обнаружения $P_D \ge 0.98$ и ложной тревоги $P_{\rm F} = 10^{-8}$ как в ультрафиолетовом, так и в видимом диапазонах. Вероятность $P_{\rm D}$ увеличивается при сдвиге диапазона принимаемого обучения в дальнюю сторону инфракрасного диапазона.

Обнаружительные характеристики, обеспечиваемые МФП видимого диапазона при наблюдении БКО, подсвечиваемого Солнцем, имеют «запас» максимальной дальности обнаружения, что позволяет использовать многоканальное (многоспектральное) обнаружение и селекцию.

В процессе развития модели [6] был исследован выбор рабочего диапазона ОЭК и числа рабочих спектральных каналов обнаружения. Для простейшего случая, когда объект был принят за точечный и число градаций k сигнала на выходе канала обнаружения равно 2. Для обнаружения БКО и определения его структуры необходимо, чтобы было выполнено условие $k \ge 3$.

При дальнейших вычислениях было принято условие, что в каждом канале обнаружения число уровней градации сигнала одинаково, тогда для обнаружения и селекции п элементов (точечных объектов) количество каналов определим по формуле [10]:

sccs.intelgr.com

$$m = \frac{\lg(n+1)}{\lg k}.\tag{30}$$

Вычисленное взаимное соотношение указано в таблице 4.

Таблица 4 – Количество обнаруживаемых объектов (элементов) *n* в *m* каналах ОЭК При *k* каналах

	<u>+</u>		
***	k		
m	2	3	
1	1	2	
2	3	7	
3	7	26	

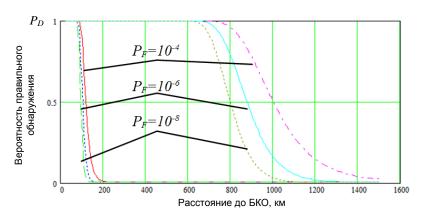


Рис. 6. Кривые правильного обнаружения БКО, покрытого однородным материалом в зависимости от расстояния до него при количестве каналов k=1 и 2 при $t_{H}=0.01$ с

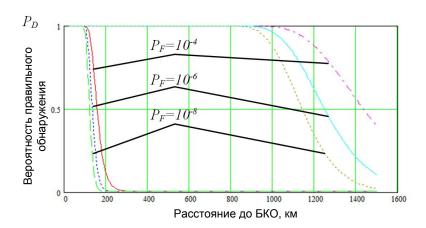


Рис. 7. Кривые правильного обнаружения БКО, покрытого композицией материалов в зависимости от расстояния до него при количестве каналов k=1 и 3 при $t_{H}=0,01$ с

Выводы

Результаты моделирования процесса обнаружения БКО при комплексировании измерений от 2 и 3 каналов и сравнение с моделированием процесса обнаружения одноканальным ОЭК в трех диапазонах излучения приведены на рис. 6 и 7, и показали, что при использовании многоканального ОЭК возможности по обнаружению БКО возрастают с увеличением количества каналов обнаружения, что дает преимущество в процессе обнаружения/распознавания БКО.

Литература

- 1. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Двух- и многодиапазонные оптикоэлектронные системы с матричными приемниками излучения. — М.: Университетская книга, 2007. — 192 с.
- 2. Кузьмин С. 3. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации. М.: Советское Радио, 1974. 432с.
- 3. Богданчук В. З., Виленчик Л. С. и др. Методы оптимальной обработки информации в информационно-измерительных системах. М.: Радио и связь, 1991. 127 с.
- 4. Чернявский Г. М., Чернов А. А. Лазерные системы в космосе (информационная технология). М.: Радио и связь, 1995. 223 с.
- 5. Удовиченко А. В. Имитационная модель наблюдения цели в видимом и УФ-диапазонах // Сборник материалов научно-технической конференции филиала ВА РВСН. М.: ВА РВСН, 2001. С. 178-192.
- 6. Калинин Т. В., Лактюхин О. А. Имитационная модель наблюдения сложной баллистической цели космическим аппаратом с бортовой аппаратурой обнаружения, работающей в видимом и ультрафиолетовом диапазонах // Научно-методический сборник Московского ВИРЭ КВ. Часть 2. М.: МВИРЭ КВ, 2011. С. 163-174.
- 7. Калинин Т. В., Катюха Р. В., Лактюхин О. А. Оценка возможности обнаружения цели оптико-электронным комплексов вне атмосферы в ультрафиолетовом и видимом диапазонах длин волн // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2011. Т. 9. № 5. С. 17-25.
- 8. Шахов Н. И. Методы и модели обработки оптических измерений в широком спектральном диапазоне для высокоточной ориентации космических аппаратов при воздействии факторов внешней среды. Дис. ... докт. техн. наук: 05.13.01. М.: ФГБНУ «Экспертно-аналитический центр» Минобрнауки РФ, 2016.
- 9. Гладышев А. И. Модели и методы получения и обработки внеатмосферной информации для обнаружения и идентификации космических объектов в оптическом спектральном диапазоне. Дис. ... докт. техн. наук: 05.13.01. М.: ФГБНУ «Экспертно-аналитический центр» Минобрнауки РФ, 2017.
- 10. Зубарев Ю. Б., Сагдуллаев Ю. С. Спектральная селекция оптических изображений. Ташкент: Фан, 1987.

References

1. Tarasov V. V., Yakushenkov Yu. G. *Dvukh- i mnogodiapazonnye optiko-elektronnye sistemy s matrichnymi priemnikami izlucheniya* [Two-and multi-band optoelectronic systems with matrix radiation receivers]. Moscow, Universitetskaya kniga Publ., 2007. 192 p. (in Russian).

- 2. Kuzmin S. Z. *Osnovy teorii tsifrovoy obrabotki radiolokatsionnoy informatsii* [Fundamentals of the theory of digital processing of radar information]. Moscow, Sovetskoe Radio Publ., 1974. 432 p. (in Russian).
- 3. Bogdanchuk V. Z., Vilenchik L. S. et al. *Metody optimal'noy obrabotki informatsii v informatsionno-izmeritel'nykh sistemakh* [Methods of optimal information processing in information-measuring systems]. Moscow, Radio i Svyaz Publ., 1991. 127 p. (in Russian).
- 4. Chernyavskiy G. M., Chernov A. A. *Lazernye sistemy v kosmose* (*informatsionnaya tekhnologiya*) [Laser systems in space (information technology)]. Moscow, Radio i Svyaz Publ., 1995. 223 p. (in Russian).
- 5. Udovichenko A. V. Imitatsionnaya model' nablyudeniya tseli v vidimom i UF-diapazonakh [A simulation model of the observation target in the visible and UV ranges]. *Sbornik materialov nauchno-tekhnicheskoy konferentsii filiala VA RVSN* [Proceeding of international scientific-technical conference of branch of Military Academy of the strategic missile forces]. Moscow, Military Academy of the strategic missile forces, 2001, pp. 178-192 (in Russian).
- 6. Kalinin T. V., Laktyukhin O. A. Imitatsionnaya model' nablyudeniya slozhnoy ballisticheskoy tseli kosmicheskim apparatom s bortovoy apparaturoy obnaruzheniya, rabotayushchey v vidimom i ul'trafioletovom diapazonakh [Simulation model of observation of a complex ballistic target by a spacecraft with onboard detection equipment operating in the visible and ultraviolet ranges]. *Nauchno-metodicheskiy sbornik Moskovskogo VIRE KV* [Proceeding of Moscow military Institute of radio electronics of Space forces]. Moscow, Moscow military Institute of radio electronics of Space forces, 2011, vol. 2, pp. 163-174 (in Russian).
- 7. Kalinin T. V., Katyukha R. V., Laktyukhin O. A. Otsenka vozmozhnosti obnaruzheniya tseli optiko-elektronnym kompleksov vne atmosfery v ul'trafioletovom i vidimom diapazonakh dlin voln [Assessment of the possibility of detecting the target of optoelectronic complexes outside the atmosphere in the ultraviolet and visible wavelength ranges]. *Journal Information-measuring and Control Systems*, 2011, vol. 9, no. 5, pp. 17-25 (in Russian).
- 8. Shakhov N. I. Metody i modeli obrabotki opticheskikh izmereniy v shirokom spektral'nom diapazone dlya vysokotochnoy orientatsii kosmicheskikh apparatov pri vozdeystvii faktorov vneshney sredy. Dis. dokt. tekhn. nauk [Methods and models for processing optical measurements in a wide spectral range for high-precision spacecraft orientation under the influence of environmental factors. Habil. Thesis]. Moscow, Expert-analytical center of Ministry of education and science of Russia, 2016.
- 9. Gladyshev A. I. *Modeli i metody polucheniya i obrabotki vneatmosfernoy informatsii dlya obnaruzheniya i identifikatsii kosmicheskikh ob"ektov v opticheskom spektral'nom diapazone. Dis. ... dokt. tekhn. nauk* [Models and methods of obtaining and processing of non-atmospheric information for detection and identification of space objects in the optical spectral range. Habil. Thesis]. Moscow, Expert-analytical center of Ministry of education and science of Russia, 2017.
- 10. Zubarev Yu. B., Sagdullaev Yu. S. Spektral'naya selektsiya opticheskikh izobrazheniy [Spectral selection of optical images]. Tashkent, Fan Publ., 1987.

Статья поступила 5 августа 2018 г.

Информация об авторах

Калинин Тимур Валерьевич — кандидат технических наук, доцент. Профессор 81 кафедры. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: информационно-управляющие системы. E-mail: timurkalinin@yandex.ru

Лисицкий Владимир Вадимович — кандидат технических наук. Докторант. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: системный анализ, системотехника и схемотехника, моделирование информационно-управляющих систем. E-mail: lisickii@yandex.ru

Демидова Наталья Сергеевна — младший научный сотрудник. Военнокосмическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: моделирование радиотехнических систем. E-mail: tipvv@mail.ru

Сервецкий Андрей Игоревич — кандидат технических наук. Начальник научно-исследовательской лаборатории. Военная академия Генерального штаба Вооруженных Сил РФ. Область научных интересов: информационно-управляющие системы. E-mail: antey197@mail.ru

Адрес: Россия, 197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13.

Detection Model of a Ballistic Space Object with a Multi-Spectral Optical-Electronic Complex

T. V. Kalinin, V. V. Lisitskiy, N. S. Demidova, A. I. Servetsky

Problem statement. Optoelectronic complexes for detecting space objects occupy an important place among information-measuring systems. The complexes operate in several spectral ranges simultaneously. The analysis of multispectral detection complexes showed that the issue of dependence of the characteristics of the complexes on quantum kind of radiation has not examined. The aim of the paper is to form indicators of detection quality of space objects in different ranges, taking into account type of space objects coating. This aim is achieved by mathematical modeling in Mathcad, taking into account the quantum kind of optical radiation. Used method. The solution of the problem of detection and recognition of signals from objects on the background of natural and organized interference is based on dependence of probability of correct detection on distance at a fixed value of probability of false alarm and dependence of maximum range of optoelectronic complex on probability of correct detection. The fixed value of the false alarm probability, the quantum kind of the radiation and the different optical radiation ranges are additionally taken into account when solving the problem. Novelty. Elements of novelty of the solution is used of photoemission theory, which allows to connection the statistical properties of the optical energy flow with process of emergence of photoelectrons. Changes in intensity of optical signal, which is reflected from the object make to change the distribution of photoelectrons, which differs from the Poisson distribution. The signal detection operation is performed as calculation of the probability coefficient at the output of an energy detector. Result. The use of the solution showed that the probability of detecting a space object covered by a composition of materials is higher than the probability of detecting an object covered by a homogeneous material. This is because objects that are coated with a composition of materials have a higher reflectance than objects that are coated with a homogeneous material. The probability of correct detection increases if the range of irradiation that

sccs.intelgr.com

is received is shifted to the infrared range. **Practical significance.** The presented solution is proposed to be used in multispectral optoelectronic complex of space objects detection.

Keywords: mathematical model, space object, optical-electronic complex.

Information about Authors

Timur Valerievich Kalinin – Ph.D. of Engineering Sciences, Docent. Mozhaisky Military Space Academy. Field of research: information management systems. E-mail: timurkalinin@yandex.ru

Vladimir Vadimovich Lisitskiy – Ph.D. of Engineering Sciences. Doctoral student. Mozhaisky Military Space Academy. Fields of research: systems analysis, systems engineering and circuit design, modeling, information management systems. E-mail: lisickii@yandex.ru

Natalia Sergeevna Demidova – Junior researcher. Mozhaisky Military Space Academy. Field of research: modeling of radio engineering systems. E-mail: tipvv@mail.ru

Andrey Igorevich Servetsky – Ph.D. of Engineering Sciences. Head of laboratory. Military Academy of the General Staff of the Armed Forces of the Russian Federation. Field of research: information management systems. E-mail: antey197@mail.ru

Address: Russia, 197198, St. Petersburg, ulitsa Zhdanovskaya 13.