

# УСЛОВИЯ ДИСТАНЦИОННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ В УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА

© 2005 г. В. В. Королев; И. И. Падусенко; М. В. Тангашев, канд. физ.-мат. наук;  
В. С. Яцык, канд. техн. наук

НПО "Государственный институт прикладной оптики", г. Казань

На основе оптической модели ModTran 4.1 проведены численные исследования влияния атмосферы на условия обнаружения тепловых источников в ультрафиолетовом диапазоне спектра. Предполагая использование режима счета фотонов, на основе статистики Пуассона проведены оценки дальности обнаружения в зависимости от состояния атмосферы, высоты и геометрии наблюдения. Представлены рекомендации по оптимальному выбору оптического диапазона чувствительности датчика. Проведена оценка необходимой степени подавления фона вне полосы пропускания П-образного фильтра.

Коды OCIS: 010.1320, 040.7190, 120.2440.

Поступила в редакцию 19.04.2004.

Усиление в последнее время террористической деятельности приводит к необходимости уделения большего внимания безопасности полетов гражданской авиации, в частности, созданию датчиков обнаружения факта пусков атакующих ракет. В статье рассмотрены условия обнаружения высокотемпературного источника на мешающем фоне в ультрафиолетовой (УФ) области электромагнитного спектра.

Прохождение оптических сигналов в атмосфере в УФ диапазоне определяется следующими процессами: молекулярным поглощением озона; рассеянием излучения на аэрозольных частицах, всегда присутствующих в атмосфере; молекулярным рассеянием (релеевское рассеяние), обусловленным флуктуациями плотности воздуха.

В диапазоне 0,2–0,3 расположены сильные полосы поглощения озона (полосы Хеггинса, Хартли) [1], вследствие чего из-за наличия мощного озонового слоя на высоте 20–25 км имеет место небольшой "солнечно-слепой" диапазон, в пределах которого солнечное излучение почти не достигает тропосферы, а прозрачность при этом остается относительно высокой. В этих условиях фон практически отсутствует, что дает большое преимущество при обнаружении целей, излучающих в УФ области.

Озон – изменчивая компонента атмосферы, ее распределение зависит от высоты, широты места и времени года [1]. Помимо озона, большую роль в формировании фона играет аэрозольное и молекулярное рассеяние. Последний фактор довольно стабилен, его изменчивость находится в относительно узких рамках, в то время как количество аэрозоля и его свойства варьируются в очень широких пределах. В интересующей нас области спектра проявляются и другие учитываемые нами поглотители ( $O_2$ ,  $NO_2$  и т. д.), их влияние не выходит за рамки не-

определенностей, обусловленных наличием уже перечисленных факторов.

Вопросы распространения УФ излучения в атмосфере применительно к схожим проблемам были уже предметом обсуждения, в частности в работе [2] приведены данные о количестве фотонов, достигших того или иного уровня в атмосфере, а также рассмотрены значения конкретных параметров приемной системы (динамический диапазон, частотная полоса, регистрирующие устройства, количество и размеры чувствительных площадок детектора и т. д.). Отметим одну методическую неясность, которая нам представляется принципиальной. В работе [2] влияние атмосферы учитывалось только через прозрачность, в то время как при более строгом рассмотрении необходимо принимать во внимание и яркость фона, т. е. более полно учитывать рассеивающие свойства атмосферы. Значение этого фактора существенно при определении правой границы спектрального диапазона.

В настоящей работе проведен анализ достижимых значений дальности обнаружения условного источника, выявления степени влияния внешних факторов на эффективность оптического датчика (ОД).

Расчеты проводились в предположении, что уровень сигналов мал, т. е. регистрирующая система должна неизбежно работать в режиме счета фотонов [3, 4], обеспечивающем максимально возможную чувствительность приема. Для вычислений использовались следующие соотношения:

$$n_c = Qq(\lambda') T_0 \lambda k / L^2 \int_0^\infty I(\lambda) \tau(\lambda, L) T_\Phi(\lambda) S(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где  $n_c$  – интенсивность фотоэлектронов, обусловленная наличием цели (в ед. электрон/с);

$$n_{\phi} = Qq(\lambda')T_0\lambda'\omega k \int_0^{\infty} B(\lambda)T_{\phi}(\lambda)S(\lambda)d\lambda, \quad (2)$$

где  $n_{\phi}$  – интенсивность фотоэлектронов, обусловленная излучением фона (в ед. электрон/с);  $Q = \pi d^2/4$  – площадь входного окна ОД,  $d$  – диаметр (в ед. см);  $\omega$  – телесный угол, соответствующий элементарному полю зрения (в ед. ср);  $q, \lambda'$  – квантовая эффективность и длина волны, соответствующие максимуму чувствительности;  $k$  – коэффициент преобразования (в ед. фотон/Вт с);  $T_0$  – пропускание ОД, которое полагается постоянным по всему спектру;  $I(\lambda)$  – спектральная плотность энергетической силы излучения источника (в ед. Вт/ср мкм);  $B(\lambda)$  – спектральная плотность энергетической яркости фона (в ед. Вт/ср см<sup>2</sup> мкм);  $\tau(\lambda, L)$  – спектральное пропускание атмосферы на дистанции  $L$ ;  $T_{\phi}(\lambda)$  – спектральное пропускание оптического фильтра, где  $T_{\phi} = 1$  при  $\lambda \in [\lambda_n, \lambda_{np}]$ ,  $T_{\phi} = 0$  – в ином случае;  $\lambda_n, \lambda_{np}$  – левая и правая границы П-образного фильтра (в ед. мкм);  $S(\lambda)$  – спектральная характеристика чувствительности приемного устройства.

Оптимизация границ спектрального диапазона проводилась по двум критериям: максимизации отношения сигнал/шум в предположении гауссового распределения вероятностей интенсивности фона и максимизации вероятности правильного обнаружения при описании потока фотонов статистикой Пуассона. В обоих случаях вычислялось значение вероятности ложных тревог для заданного порога обнаружения.

При использовании критерия Неймана–Пирсона [5] фиксируется условная вероятность ложной тревоги и минимизируется условная вероятность пропуска сигнала (или максимизируется условная вероятность правильного обнаружения сигнала). При этом можно считать, что распределение числа фотонов сигнального и фоновых излучений подчиняется закону Пуассона [3, 4]. Предполагается, что процедура обнаружения заключается в подсчете числа электронов за время наблюдения и сравнении полученного числа с пороговым значением [3].

Значения отношения сигнал/шум, вероятности ложных тревог и вероятности правильного обнаружения источника определялись по формулам

$$\eta = N_c / \sqrt{N_c + N_{\phi} + N_T}, \quad (3)$$

$$P_{\text{ЛТ}}(N_0) = \left[ 1 - \sum_{n=0}^{N_0-1} \frac{(N_T + N_{\phi})^n}{n!} \exp(-(N_T + N_{\phi})) \right], \quad (4)$$

$$P_0(N_0) = \left[ 1 - \sum_{n=0}^{N_0-1} \frac{(N_c + N_T + N_{\phi})^n}{n!} \times \exp(-(N_c + N_T + N_{\phi})) \right], \quad (5)$$

где  $N_0$  – порог обнаружения,  $n_t$  – интенсивность темновых электронов,  $\Delta t$  – время накопления сигнала оптического датчика,  $N_c = n_c \Delta t$  – число сигнальных электронов, накопленных за время  $\Delta t$ ,  $N_{\phi} = n_{\phi} \Delta t$  – число фоновых электронов, накопленных за время  $\Delta t$ ,  $N_T = n_T \Delta t$  – число темновых электронов, накопленных за время  $\Delta t$ .

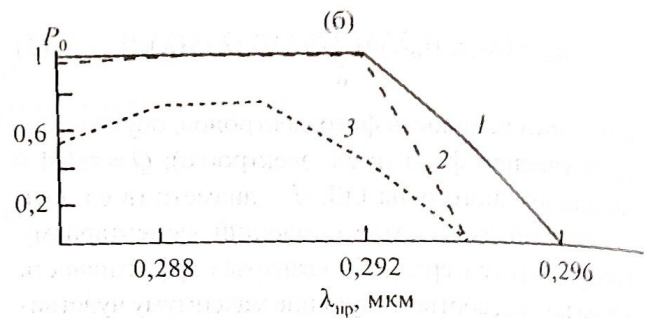
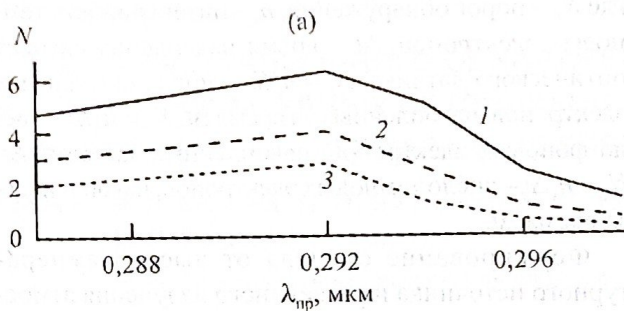
Формирование сигнала от высокотемпературного источника и рассеянного излучения атмосферы зависит от многих факторов и невозможно без комплексного представления описания оптических свойств атмосферы, т. е. моделей атмосферы, описывающих характеристики типовых состояний атмосферы, имеющих место в различных погодных, сезонных и климатических условиях. Одним из примеров наиболее полного формирования оптических моделей атмосферы является разработка лаборатории AFGL BBC США. Эти модели оформлены в виде программного продукта [6, 7], последняя реализация которого в среде Windows особенно удобна для практического использования.

На данном этапе использовалась преимущественно одна “Стандартная модель США (1976)” [6, 7], в рамках которой менялись отдельные параметры: наземная метеорологическая дальность видимости ( $S_m$ ), высота нахождения ОД ( $h$ ) и зенитное расстояние Солнца ( $zs$ ), а также общее содержание озона в атмосфере. В последнем случае вводился нормирующий множитель ( $oz$ ) соответственно для максимального и минимального содержаний озона во всей толще атмосферы. Выбор этих крайних значений осуществлялся среди всех моделей, представленных в Modtran 3.0 [6, 7].

Источник излучения с площадью, равной 137 см<sup>2</sup>, как и в [2], был принят в виде абсолютно черного тела при температуре 2230 К. Для конкретизации расчетов остальные параметры оптического датчика, ось которого была направлена в горизонт, имели следующие значения:  $Q = 1$  см<sup>2</sup>,  $q = 0,07$ ,  $\omega = 10^{-4}$  ср,  $n_t = 0,01$  электрон/с,  $T_0 = 0,5$ ,  $\Delta t = 1$  с.

Пример выполненных расчетов отношения сигнал/шум и вероятности правильного обнаружения при метеорологической дальности видимости  $S_m = 23$  км в зависимости от значения правой границы фильтра  $\lambda_{np}$  ( $\lambda_n = 0,265$  мкм) показан на рисунке.

При оценке вероятности правильного обнаружения сигнала определялся порог обнаружения  $N_0$ , при котором выполнялось условие для вероятности ложных тревог  $P_{\text{ЛТ}}(N_0) < 10^{-9}$ , а затем по формуле (5) рассчитывалось значение  $P_0(N_0)$ . Из рисунка видно, что для обоих критериев максимальное значение имеет выраженный характер, при этом по критерию максимума вероятности правильного обнаружения значение  $\lambda_{np}$  может быть разным.



Зависимость отношения сигнал/шум (а) и вероятности правильного обнаружения (б) от правой границы П-образного фильтра ( $\lambda_{пр}$ ),  $S_m = 23$  км,  $h = 4$  км,  $zs = 45^\circ$ ,  $oz = 1$ ,  $L = 3$  (1), 4 (2), 5 км (3).

Выполненные массовые расчеты при вариации метеорологической дальности видимости, зенитного угла Солнца, концентрации озона, высоты и дистанции наблюдения показали, что по критерию максимального отношения сигнал/шум значение правой границы оптического фильтра изменялось в пределах 0,290–0,292 мкм и в большинстве случаев равнялось 0,292 мкм. По критерию максимума вероятности правильного обнаружения оптимальное значение правой границы несколько смещается влево и находится в пределах 0,289–0,292 мкм.

Выбор левой границы фильтра  $\lambda_n$  в интервале 0,26–0,27 мкм практически не оказывает влияния на значение критериев оптимальности и определяется принятыми интенсивностью темновых электронов и значением вероятности ложных тревог.

Изготовление идеального П-образного фильтра практически невозможно, поскольку в крыльях, т. е. вне полосы пропускания, например в интервале спектра 0,29–1 мкм, всегда имеет место небольшое пропускание, которое может оказать существенное влияние на работу ОД.

По результатам проведенных расчетов необходимая степень подавления излучения фона в интервале 0,29–1 мкм для обеспечения заданного значения ложных тревог при различных типах фотоприемных устройств и материалах фотокатода (AlGaIn/GaN, Cs<sub>2</sub>Te, лавинные фотодиоды) составила  $10^{-6}$ – $10^{-12}$ .

Для оптимального оптического фильтра с правой границей 0,29 мкм и требуемой степенью подавления фона в интервале 0,29–1 мкм был проведен расчет дальности обнаружения источника в за-

висимости от условий внешней среды. Результаты расчета представлены в таблице.

Проведенные расчеты позволяют сделать следующие выводы:

Изменение интенсивного содержания озона на 10–30 % вызывает соответствующее увеличение или уменьшение дальности обнаружения на 10–15%.

Увеличение яркости фона при уменьшении зенитного угла Солнца приводит к уменьшению дальности обнаружения, при этом на высотах Солнца  $45^\circ$  это изменение незначительно и более заметно при больших высотах Солнца.

Наиболее существенное влияние на дальность обнаружения оказывает аэрозольное состояние атмосферы, что проявляется в зависимости дальности обнаружения от метеорологической дальности видимости.

При увеличении высоты наблюдения условия обнаружения улучшаются до высот 5–6 км, а затем происходит их постепенное ухудшение.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Атмосфера (справочник) / Под ред. Седунова Ю.С. Л.: Гидрометеониздат, 1991. 509 с.
2. Litton C.W., Schreiber P.J., Smith G.A., Dang T., Morokoc H. Design requirements for high-sensitivity UV Solar blind imaging detectors based on AlGaIn/GaN Photodetector Arrays: A review // Proc SPIE. 2001. V. 4454. P. 218–232.
3. Лебедько Е.Г., Порфирьев Л.Ф., Хайтун Ф.И. Теория и расчет импульсных и цифровых оптико-элект-

Дальность обнаружения при  $P_0 = 0,9$ ,  $P_{лт} = 10^{-9}$  км

| Высота наблюдения, км | Интегральное содержание озона, $S_m = 23$ км, $zs = 45^\circ$ |     |     | Зенитный угол Солнца, град. $S_m = 23$ км, $oz = 1$ |     |     |     | Метеорологическая дальность видимости, км $zs = 45^\circ$ , $oz = 1$ |     |     |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------|-----|-----|-----------------------------------------------------|-----|-----|-----|----------------------------------------------------------------------|-----|-----|
|                       | 1,3                                                           | 1,0 | 0,9 | 60                                                  | 45  | 30  | 15  | 23                                                                   | 10  | 5   |
| 0                     | 2,7                                                           | 3,1 | 3,2 | 3,2                                                 | 3,1 | 2,7 | 2,1 | 3,1                                                                  | 2,1 | 1,3 |
| 4                     | 4,0                                                           | 4,3 | 4,4 | 4,4                                                 | 4,3 | 4,0 | 3,1 | —                                                                    | —   | —   |
| 6                     | 4,1                                                           | 4,5 | 5,0 | 5,1                                                 | 4,5 | 4,1 | 3,2 | —                                                                    | —   | —   |
| 10                    | 3,8                                                           | 4,2 | 4,3 | 4,3                                                 | 4,2 | 3,8 | 3,1 | —                                                                    | —   | —   |

- ронных приборов и систем. Л.: Машиностроение, 1984. 191 с.
4. Гальярди Р.М., Карп Ш. Оптическая связь. Пер. с англ. / Под ред. Шереметьева А.Г. М.: Связь, 1978. 215 с.
5. Шестов Н.С. Выделение оптических сигналов на фоне случайных помех. М.: Сов. радио, 1967. 347 с.
6. Kneizys F.X., Chetwynd J.H., Clough S.A., Shettle E.P. et al. Atmospheric transmittance/radiance: computer code Lowtran 7 // Hansom AFB. 1996. P. 340.
7. Kneizys F.X., Abreu L.W., Anderson G.P. The Modtran 2/3 report and Lowtran 7 model. PL/GPOS // Hansom AFB. MA 0173-3010. Contract F19628-91-C 0132. 1996. P. 260.