

УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫЙ ФИЛЬТР ДЛЯ “СОЛНЕЧНО-СЛЕПЫХ” ФОТОПРИЕМНЫХ МОДУЛЕЙ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ПРИ СОЗДАНИИ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ ПЕЛЕНГАЦИИ УГРОЗ

© 2016 г. В. Н. Писарев^{*}; А. В. Обрезков^{*}; А. Ю. Родионов^{*}, канд. физ.-мат. наук;
А. Н. Чиванов^{*}, канд. техн. наук; В. В. Коротаев^{**}, доктор. техн. наук

^{*}Филиал Производственного объединения “Уральский оптико-механический завод” “Урал-ГОИ”, Санкт-Петербург

^{**}Университет ИТМО, Санкт-Петербург

E-mail: uralgoi@mail.ru, korotaev@grv.ifmo.ru

Проведено теоретическое исследование влияния характеристик ультрафиолетовых узкополосных фильтров на эффективность систем обнаружения факела от различных угроз в “солнечно-слепом” диапазоне длин волн. Проведен энергетический расчет и сформулированы требования к оптимальным параметрам фильтра, позволяющего выделить сигнал на фоне шумов в различных условиях применения ультрафиолетового пеленгатора.

Ключевые слова: ультрафиолетовый пеленгатор, узкополосный фильтр, факел, оптико-электронная система обнаружения, “солнечно-слепой” диапазон.

Коды OCIS: 120.2440, 040.7190, 230.0040, 010.1320

Поступила в редакцию 03.07.2015

Одним из этапов решения проблемы безопасности летательных аппаратов в свете широкого распространения и доступности приобретения зенитных ракетных комплексов и переносных зенитных ракетных комплексов (ПЗРК) является создание систем оповещения ракетной угрозы, способных зафиксировать факт пуска ракеты и выдать с необходимой точностью ее координаты. Среди таких систем особое место занимают пеленгаторы, которые работают в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне длин волн, где отсутствует солнечное фоновое излучение (“солнечно-слепой” диапазон), и по этой причине способны достичь большей эффективности локализации по сравнению с системами инфракрасного (ИК) диапазона.

Одним из ключевых элементов систем локализации объектов ракетной угрозы является создание узкополосного фильтра в области длин волн 0,25–0,3 мкм, позволяющего с одной стороны сформировать достаточно интенсивное изображение источника УФ сигнала, с другой – уменьшить уровень фоновых засветок светочувствительной матрицы, т.е. обеспечить максимальное значение отношения сигнал/шум.

Проблема оптимизации узкополосного фильтра УФ локаторов уже неоднократно обсуждалась в литературе [1, 2]. Так в публикации [1] приведен расчетный анализ эффективности локационных УФ систем, на основе которого был сделан вывод об оптимальном положении правой спектральной границы пропускания фильтра в области длин волн $\lambda_R = 290\text{--}292$ нм. При использовании такого узкополосного светофильтра удастся достичь высокой вероятности обнаружения объекта при малой вероятности ложных тревог.

Следует, однако, отметить, что расчеты проводились в предположении прямоугольной формы полосы пропускания фильтра. К сожалению, реализовать на практике такую форму спектральной кривой оказывается чрезвычайно сложно [3]. Поскольку положение границы должно быть определено с высокой точностью, актуальной становится задача определения требований к допустимому наклону кривой спектральной зависимости пропускания фильтра.

Кроме того, приведенные в работе [1] численные оценки получены для случая, когда источник и приемник находятся в плоскости,

параллельной плоскости горизонта. Реальные системы пеленгации работают в широком угловом поле зрения, к тому же при применении ПЗРК, как правило, реализуются лишь наклонные трассы распространения. Очевидно, что в этой связи представляет интерес оптимизация структуры фильтра для расширения условий использования УФ локатора.

Расчетная модель

Расчетные оценки проводились на основе численного анализа отношения сигнал/шум на выходе фотоприемного устройства (ФПУ) в зависимости от параметров полосового фильтра пеленгатора. Значение отношения сигнал/шум (s/n) определялось на основе выражения (см. например [1])

$$s/n = n_s \Delta t / \sqrt{(n_s + n_n + n_d) \Delta t}, \quad (1)$$

где Δt – время накопления, n_s , n_n , n_d – интенсивность потока фотоэлектронов, обусловленного наличием цели, фона и темнового тока соответственно

$$n_s = S_{ob} / 2\pi L^2 \int_0^\infty I(\lambda) T_F(\lambda) S(\lambda) \times \int_{h_1}^{h_2} \tau(\lambda, h) \sec(\alpha) dh \lambda / ch d\lambda, \quad (2)$$

$$n_n = S_{ob} \Omega / 2\pi \int_0^\infty R(\lambda, h, \theta) T_F(\lambda) S(\lambda) \lambda / ch d\lambda, \quad (3)$$

где S_{ob} – площадь входного зрачка объектива локатора, L – дистанция локации, $I(\lambda)$ – спектральная плотность мощности излучения источника (абсолютно черное тело при температуре 2500 К площадью 150 см²), $T_F(\lambda)$ – спектр пропускания УФ фильтра, $S(\lambda)$ – спектральная кривая квантовой эффективности ФПУ, $\tau(\lambda, h)$ – зависимость коэффициента пропускания излучения атмосферой от длины волны излучения λ и высоты над уровнем моря h , α – угол места цели, h_1 – высота цели над уровнем моря, h_2 – высота пеленгатора над уровнем моря, $R(\lambda, h, \theta)$ – спектральная интенсивность фона, Ω – телесный угол элемента разрешения матричного приемника, c – скорость света в вакууме, h – постоянная Планка.

Спектральная интенсивность фона складывается из рассеянного атмосферой солнечного излучения и излучения, отраженного от поверхности Земли. Уровень освещенности зем-

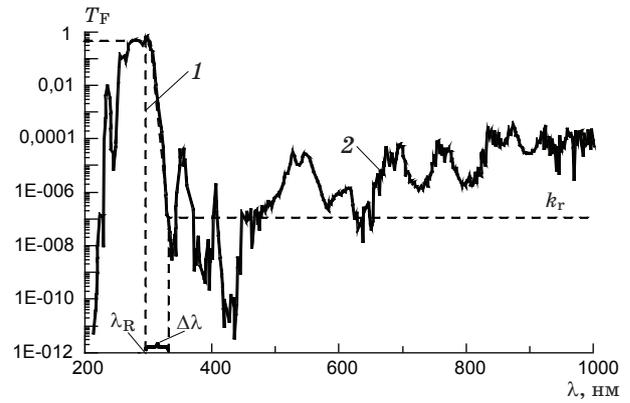


Рис. 1. Принятый в расчетах профиль спектральной кривой пропускания (1) и спектр пропускания реального фильтра (2).

ной поверхности в рассматриваемом нами “солнечно-слепом” спектральном диапазоне оказывается достаточно малым [4–7], поэтому второй фоновой составляющей можно пренебречь.

Целью расчетов являлась выработка требований к УФ фильтрам локатора, которые обеспечивали бы его высокую эффективность при максимальных значениях отношения сигнал/шум.

Спектр пропускания УФ фильтра описывался функцией, представленной на рис. 1, и определялся в расчетах тремя основными параметрами: длиной волны правой границы полосы пропускания λ_R , крутизной ее границы $\Delta\lambda$ и коэффициентом режекции k_r . Вид данной функции соответствовал характерным спектральным кривым пропускания фильтров УФ пеленгаторов [3, 8], которые обеспечивают выделение УФ сигналов и подавление шумового излучения в видимой и ближней ИК областях чувствительности ФПУ.

Ослабление излучения атмосферой в рассматриваемом спектральном диапазоне определяется, в основном, рэлеевским рассеянием, поглощением излучения молекулами озона и аэрозольным ослаблением

$$\beta(p, \lambda) = \beta_r(h, \lambda) + \beta_{oz}(h, \lambda) + \beta_a(h, \lambda). \quad (4)$$

Для расчета коэффициента рэлеевского рассеяния [км⁻¹] использовалось выражение [9]

$$\beta_r(h, \lambda) = \sigma_r(\lambda) N(h) \times 10^6, \quad (5)$$

где σ_r – сечение рассеяния (рис. 2), $N(h)$ – высотный профиль плотности воздуха.

Коэффициент поглощения излучения озоном рассчитывался на основе выражения

$$\beta_{oz}(h, \lambda) = D_{oz}(h) A_{oz}(\lambda), \quad (6)$$

где $D_{oz}(h)$ – высотный профиль эквивалентной толщины озонового слоя (рис. 3), $A_{oz}(\lambda)$ – спектральный коэффициент поглощения эквивалентным озоновым слоем (см. рис. 2).

Коэффициент аэрозольного поглощения определяется из выражения

$$\beta_a(h, \lambda) = \beta_a(0, \lambda) N_a(h) / N_a(0), \quad (7)$$

где $N_a(h)$ – высотный профиль аэрозоля (стандартная континентальная модель [10], рис. 4а), $\beta_a(0, \lambda)$ – аэрозольный коэффициент ослабления излучения на уровне моря (рис. 4б).

Мощность фонового излучения рассчитывалась на основе экспериментальных данных о спектральной плотности мощности рассеянного солнечного света $R(\lambda, h, \theta)$, полученных при различных высотах h и зенитных углах Солнца θ , приведенных в работе [11].

Расчеты проводились с использованием характерных параметров УФ “солнечно-слепых” ФПУ (см. [12]) при площади входного зрачка широкоугольного объектива УФ пеленгатора $S_{ob} = 0,1 \text{ см}^2$.

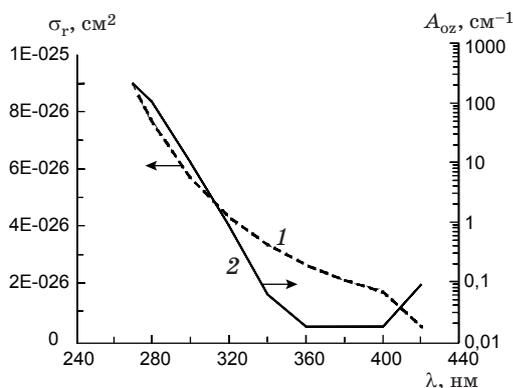


Рис. 2. Спектральная зависимость сечения рэлеевского рассеяния (1) и коэффициента поглощения озона (2) [9].

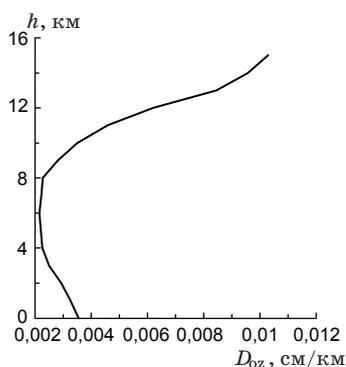


Рис. 3. Высотный профиль эквивалентной толщины озонового слоя [9].

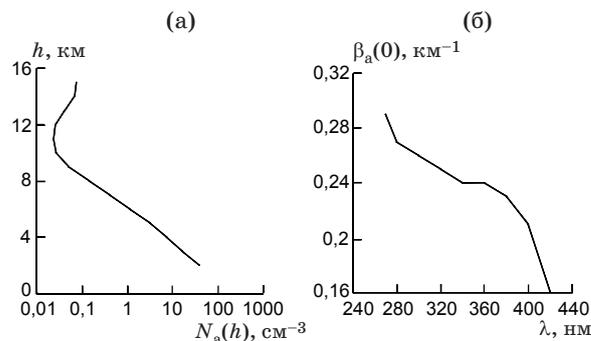


Рис. 4. Параметры аэрозольной атмосферы [9, 10] – высотный профиль (а), спектральный коэффициент аэрозольного ослабления на уровне моря (б).

Результаты расчетов

Зависимость отношения сигнал/шум от положения правой спектральной границы полосового фильтра λ_R при дистанциях локации 3 и 5 км, различной высоте пеленгатора над уровнем моря в условиях дальности видимости 20 км представлена на рис. 5. Расчеты были проведены для случая приближения резкой границы полосы пропускания ($\Delta\lambda = 0$). Как видно из рисунка, положение правой спектральной границы фильтра должно быть локализовано в области 300 нм с довольно высокой точностью – ± 10 нм. При этом с увеличением высоты пелен-

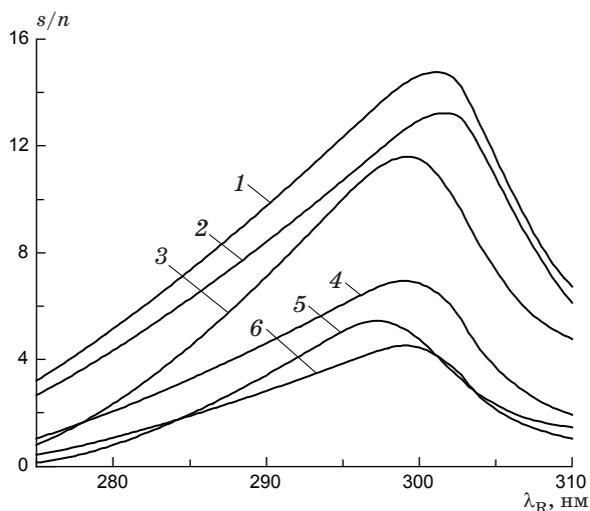


Рис. 5. Зависимости отношения сигнал/шум от положения правой спектральной границы полосового фильтра λ_R при дистанциях локации 3 (1–3) и 5 км (4–6) и высотах пеленгатора над уровнем моря 5 (2, 6), 10 (1, 4) и 15 км (3, 5). Направление локации – надир, зенитный угол Солнца 60° .

гатора над уровнем моря (повышением уровня фона) оптимальное положение правой спектральной границы фильтра смещается в коротковолновую область спектра, а с увеличением сигнала (с уменьшением дистанции пеленгации) – в длинноволновую.

Как показали вычисления, наблюдается существенная зависимость оптимального положения правой границы пропускания фильтра от ее крутизны. На рис. 6 приведено отношение сигнал/шум как функция λ_R при различных значениях $\Delta\lambda$. Из графиков видно, что с увеличением степени крутизны $\Delta\lambda$ оптимум положения границы пропускания смещается в область более коротких длин волн. При этом, если на $\lambda_R = 298$ нм при резкой границе пропускания ($\Delta\lambda$ порядка 1 нм) получаются наибольшие значения s/n , то при “размытии” границы до значений $\Delta\lambda = 13$ нм отношение сигнал/шум в точке $\lambda_R = 298$ нм оказывается близкой к единице. При $\Delta\lambda = 13$ нм оптимальное значение λ_R расположено в области 290 нм. Изменение крутизны границы пропускания фильтра приводит при прочих равных условиях и к снижению значений отношения сигнал/шум, что в случае предельных дистанций должно отразиться на дальности действия пеленгатора.

Существенное значение для эффективности работы локатора имеет коэффициент режекции k_T полосового фильтра. На рис. 7 представлены

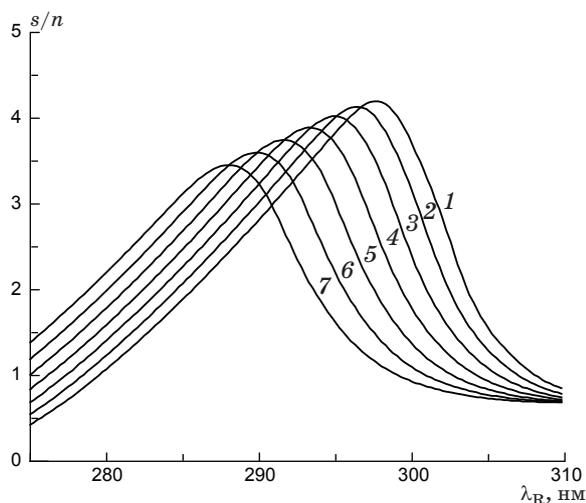


Рис. 6. Зависимости отношения сигнал/шум от положения правой спектральной границы пропускания полосового фильтра λ_R при различной ее крутизне $\Delta\lambda$ (1 (1), 3 (2), 5 (3), 7 (4), 9 (5), 11 (6) и 13 нм (7)). Дистанция локации 5 км, высота пеленгатора над уровнем моря 5 км. Направление локации – надир, зенитный угол Солнца 60° .

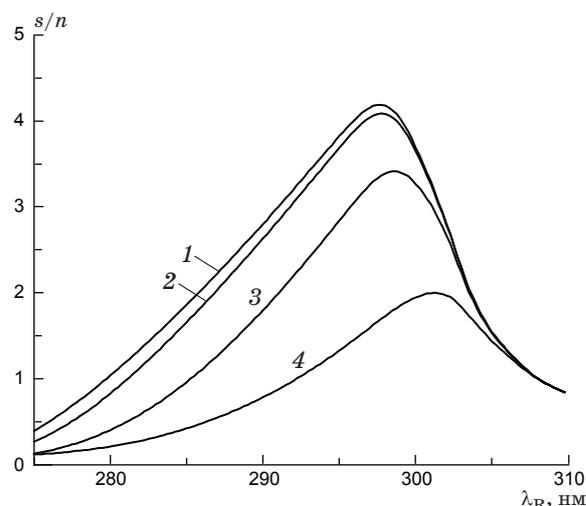


Рис. 7. Зависимости отношения сигнал/шум от положения правой спектральной границы полосового фильтра λ_R при различных значениях его коэффициента режекции (10^{-7} (1), 10^{-6} (2), 10^{-5} (3), 10^{-4} (4)). Дистанция локации 5 км, высота носителя над уровнем моря 5 км. Направление локации – надир, зенитный угол Солнца 60° .

спектральные зависимости s/n при различных значениях k_T . Для практически важных условий применения локаторов достаточно высокие значения отношения s/n достигаются при k_T , меньших, чем 10^{-7} .

Выводы

Оптимальное положение правой спектральной границы узкополосного фильтра УФ пеленгационных систем зависит от фоновой обстановки и высоты пеленгатора над уровнем моря. Для рассматриваемых параметров УФ пеленгатора она расположена в области $\lambda_R \approx 296$ – 302 нм. При этом для обеспечения эффективной работы УФ локационной системы на предельных дистанциях необходимо достаточно точно локализовать правую границу узкополосного УФ фильтра. Ошибка положения границы не должна превышать 10 нм.

Существенное влияние на эффективность работы УФ локатора оказывает крутизна правой спектральной границы полосового фильтра – $\Delta\lambda$. Если она недостаточна, происходит резкое снижение отношения сигнал/шум на $\lambda_R \approx 300$ нм. Если по технологическим причинам не удастся обеспечить резкую границу полосы пропускания фильтра, то правая спектральная граница должна быть смещена в область $\lambda_R \approx 290$ нм. При прочих равных условиях ухудшение показателя

крутизны границы полосы пропускания от 1 нм до 13 нм приводит к снижению отношения сигнал/шум примерно на 30% и соответствующему уменьшению дальности действия локатора.

Одной из важнейших характеристик УФ фильтра является коэффициент режекции.

Снижение пропускания излучения в нерабочей области спектра фильтра ведет к монотонному повышению дальности действия УФ локатора. Для обеспечения предельных дистанций обнаружения порядка 5 км коэффициент режекции должен быть не менее 10^{-7} .

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Королев В.В., Падусенко И.И., Танташев М.В., Язык В.С. Условия дистанционного обнаружения высокотемпературных источников излучения в ультрафиолетовом диапазоне спектра // Оптический журнал. 2005. Т. 72. № 1. С. 28–31.
2. Litton C.W., Schreiber P.J., Smith G.A., Dang T., Markor 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. Сафин Р.Г., Гайнутдинов И.С., Сабиров Р.С., Азаматов М.Х. “Солнечно-слепой” фильтр для УФ области спектра // Оптический журнал. 2007. Т. 73. № 3. С. 72–74.
4. Белов М.Л., Городничев В.А., Пашенина О.Е. Сравнительный анализ мощности входных сигналов лазерных систем локации и видения УФ диапазона // Наука и образование МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. № 8. С. 255–263.
5. Рафаилович А.С. Объекты исследования и параметры исследовательской аппаратуры для УФ области спектра // Тез. докл. I Междунар. спец. выставка и научн. конгр. “ГЕО-СИБИРЬ-2005”. 2005. Т. 6. С. 52–58.
6. McKenzie R.L., Johnston P.V., Kotkamp M., Bittar A., Hamlin J.D. Solar ultraviolet spectroradiometry in New Zealand: Instrumentation and sample results from 1990 // Appl. Opt. 1992. V. 31. № 30. P. 6501–6509.
7. Thorseth T.M., Kjeldstad B. All-weather ultraviolet solar spectra retrieved at a 0.5-Hz sampling rate // Appl. Opt. 1999. V. 38. № 30. P. 6247–6252.
8. Kim S., Nan M., Oi M., Webb K.J. Angle-insensitive and solar-blind ultraviolet bandpass filter // Opt. Lett. 2014. V. 39. № 19. P. 5784–5787.
9. Elterman L. Rayleigh and extinction coefficients to 50 km for the region 0.27 μ to 0.55 μ // Appl. Opt. 1964. V. 3. № 10. P. 1139–1147.
10. U.S. Standard Atmosphere, 1976. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 1976. 241 p.
11. Huffman R.E. Atmospheric emission and absorption of ultraviolet radiation // International Geophysics Series. 1992. V. 52. P. 309–317.
12. Алымов О., Васильев И., Минкин В., Татаурищikov С. Современные фотоприемники для видимого, УФ и ближнего ИК диапазонов спектра производства компании “ЦНИИ “Электрон” // Фотоника. 2014. Т. 44. № 2. С. 40–47.