

УДК 681.7:528.8

ОПТИМИЗАЦИЯ УЗКОПОЛОСНОЙ ШИРОКОУГОЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ГЕОСТАЦИОНАРНОМ ДЕТЕКТОРЕ МОЛНИЙ

© 2022 г. А. Л. Филатов*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук, Фрязинский филиал, Фрязино, Россия

*E-mail: a.filatov@fireras.su

Поступила в редакцию 30.06.2022 г.

После доработки 15.07.2022 г.

Принята к публикации 22.07.2022 г.

Рассмотрены проблемы в геостационарных детекторах молний, возникающие при использовании узкополосной оптической фильтрации, выполняемой для выделения самого яркого триплета в оптическом спектре излучения молнии 777.19, 777.42 и 777.54 нм на фоне отраженного от облаков солнечного света. С геостационарной орбиты Земля видна под углом $\approx 17.5^\circ$ и возникают существенные различия спектров пропускания узкополосного интерференционного фильтра для разных углов падения света. Рассмотрено оптимальное сочетание ширины и положения спектра фильтрации для минимизации смещения центральной полосы фильтрации и расщепления спектров фильтрации *s*- и *p*-поляризованного света при больших углах отклонения фильтра. Предложены новые технические решения на основе акустооптических фильтров.

DOI: 10.31857/S0367676522110114

Первое детектирование молний с использованием космических аппаратов было выполнено со спутника ОСО-В2, выведенного в 1965 г. на околоземную орбиту (600 км). На этом аппарате были установлены три телескопа, оснащенные фотометрами оптического диапазона, спроектированными для исследования корреляции между интенсивностью свечения атмосферы и геомагнитной аномалией Южной Атлантики [1]. Искомая корреляция не была обнаружена, но был получен положительный результат при проверке идеи, которая была высказана в нескольких конвенционных докладах. Pierce E.T., Coroniti S.C. и Larson G.S. предположили, что местоположения областей с сильной грозовой активностью можно определить с помощью аппаратуры, расположенной на космических аппаратах. Зарегистрированное спутником ОСО-В2 оптическое излучение позволило локализовать положения ночных гроз и сделать вывод, что над сушей бывает в десять раз больше гроз, чем над морем [2].

Солнечный свет, отраженный от облаков и земной поверхности, мешал фиксации дневных гроз. Поэтому был проделан большой объем исследований оптического спектра грозовой активности для того, чтобы найти спектральную полосу для ее круглосуточного наблюдения. Были проанализированы [3] данные двух детекторов,

работавших в спектральных диапазонах 375–695 нм [4] и 650–880 нм [5] и зафиксировавших излучение от одной и той же молнии. В спектральном диапазоне 375–650 нм была зарегистрированная средняя плотность потока энергии излучения $3.5 \cdot 10^{-5}$ Дж \cdot м⁻² для одной вспышки. Средняя спектральная освещенность штриха от 650–880 нм для тех же вспышек составляет $1.2 \cdot 10^{-5}$ Дж \cdot м⁻². Совместный анализ измеренных спектров показал, что интегральная энергия излучения уменьшается с увеличением длины волны от 430 до 850 нм в два раза быстрее, чем уменьшение солнечной энергии в том же диапазоне, причем наиболее интенсивна спектральная линия с длиной волны 744.4 нм. Результат измерений [4, 5] представлен в табл. 1, соответствующей table 1 в публикации [3].

Спектральные измерения, выполненные с борта высокоорбитального самолета U-2, показали [6], что линии 777.4 и 868.3 нм имеют наибольшую спектральную энергию. Полученный спектр излучения молний, который в настоящее время рассматривается как типичный [7], приведен на рис. 1.

Круглосуточное непрерывное отслеживание оптического излучения света из верхних слоев облаков оказалось важным инструментом в метеоро-

Таблица 1. Спектральное распределение солнечной радиации и интенсивности излучения молний (соответствует табл. в [3])

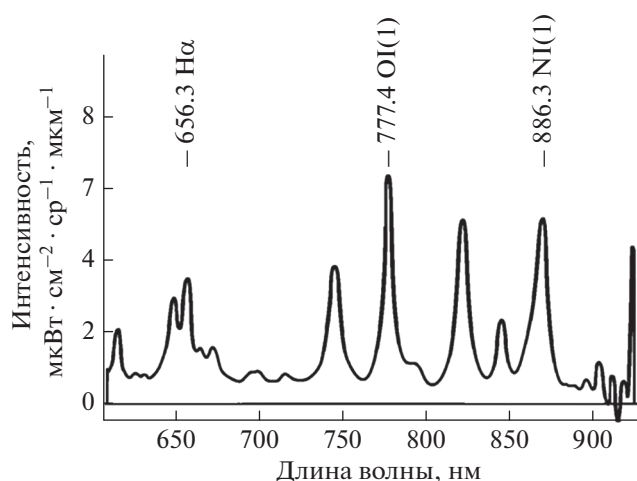
| Длина волны, нм | Средняя мощность 10 молний, Вт · м ⁻² | Относительное спектральное распределение для молний | Относительное спектральное распределение солнечной радиации вне атмосферы* |
|-----------------|--|---|--|
| 380–430 | $4.9 \cdot 10^{-6}$ | 2.6 | 1.4 |
| 430–480 | $7.2 \cdot 10^{-6}$ | 3.9 | 2.0 |
| 480–530 | $8.2 \cdot 10^{-6}$ | 4.4 | 2.0 |
| 530–580 | $6.6 \cdot 10^{-6}$ | 3.6 | 1.8 |
| 580–630 | $5.0 \cdot 10^{-6}$ | 2.7 | 1.7 |
| 630–680 | $6.1 \cdot 10^{-6}$ | 3.3 | 1.5 |
| 650–700 | $3.4 \cdot 10^{-6}$ | 1.8 | 1.4 |
| 700–750 | $2.3 \cdot 10^{-6}$ | 1.3 | 1.3 |
| 750–800 | $2.7 \cdot 10^{-6}$ | 1.5 | 1.1 |
| 800–850 | $1.8 \cdot 10^{-6}$ | 1.0 | 1.0 |

* По монографии List R.J. Smithsonian Meteorological Tables. Washington: Smithsonian Institution, 1958. 416 p.

рологических исследованиях. Для того, чтобы иметь возможность регистрировать грозовую активность, используется узкополосный интерференционный фильтр, который повышает контрастность линии 777.4 нм на фоне отраженного от облаков солнечного света. Эта линия является триплетом излучения ионизированного кислорода с длинами волн 777.19, 777.42 и 777.54 нм. Для ее выделения при нормальном падении излучения на поверхность фильтра достаточно иметь полосу пропускания 0.35 нм. Однако, при исследовании с низкоорбитальных спутников расходящегося излучения использовались более широкая

полоса от 0.85 до 1.2 нм. [8]. Варьируя полосу пропускания, разработчики компенсировали ее смещение при отклонении от нормального падения излучения на интерференционный фильтр [9].

Анализ данных за несколько лет доказал корреляцию количества зарегистрированных вспышек молний с изменением климата [10]. В результате всемирная метеорологическая организация и Американский геофизический союз (AGU) пришли к выводу, что грозовая активность является симптомом и причиной изменения климата [11]. Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства (Nation-

**Рис. 1.** Типичный спектр излучения молнии в оптическом диапазоне.

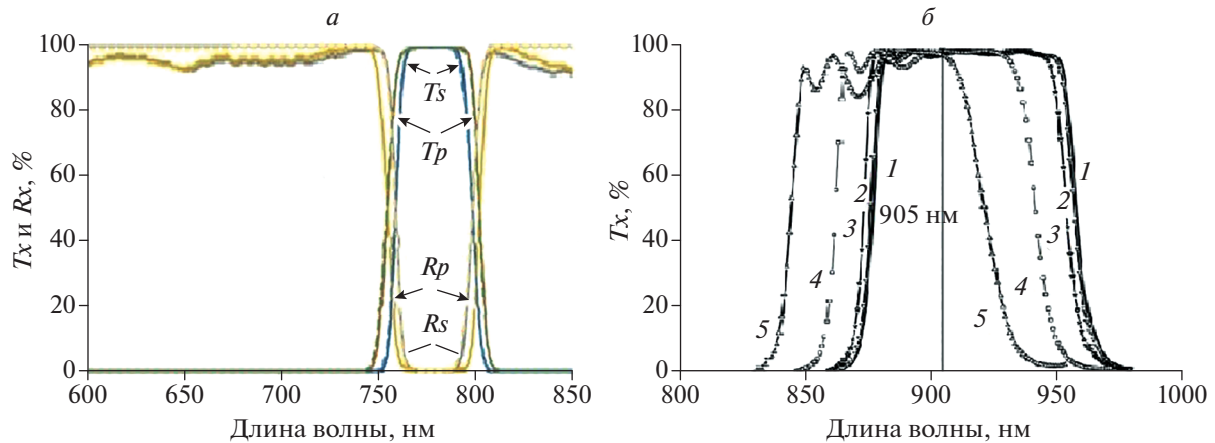


Рис. 2. Спектральные характеристики фильтров: Спектры пропускания T_s , T_p и поглощения R_s , R_p для s - и p -поляризованного света, падающего на фильтр под углом 16.3 град (a). Непрерывные линии соответствуют экспериментальным данным, пунктирные – расчетным. Смещение спектра пропускания T_x в зависимости от угла падения света: 1 – нормальное падение, 2 – 5° , 3 – 10° , 4 – 20° , 5 – 30° (b).

al Aeronautics and Space Administration – NASA) приняла решение разместить на геостационарной орбите (ГСО) картограф молний (Geostationary Lightning Mapper – GLM) [7, 12], предназначенный для следующих целей: обнаружение и предупреждение о сильных штормах, внезапных наводнениях, торнадо, граде; оценка конвективных осадков; отслеживание авиационных опасностей на аэродроме и во время перелета; предупреждение об опасности энергетических компаний, топливных складов, полей для гольфа и т.д. Этот прибор уже работает на геостационарных спутниках GOES-16, GOES-17 [13].

Для наблюдения всей поверхности Земли с ГСО при помощи одного объектива нельзя использовать узкополосные фильтры, которые были разработаны для низкоорбитальных спутников. Эти фильтры корректно функционируют при расходимости света менее 3° – 5° . Угловой размер Земли со спутника можно оценить, как $2 \cdot \arctg(6.35/42.1) \approx 17.4^\circ$ (0.072 ср), исходя из того, что радиус Земли ≈ 6.4 тыс. км, расстояние от центра Земли до спутника на ГСО $6.4 + 35.8 \approx 42.2$ тыс. км. При наклонном падении излучения под углом $\approx 8.5^\circ$ в узкополосных интерференционных фильтрах происходит расщепление полос фильтрации для s - и p -поляризованного света [14].

АО “РКЦ “Прогресс” – НПП “ОПТЭК” разрабатывает геостационарный детектор молний (ГДМ) [15] на базе детектора, который планировалось установить на международной космической станции (МКС) [16]. В обоих приборах планировалось использовать интерференционный фильтр с центральной полосой пропускания 777.4 нм. На

МКС предполагалось реализовать фильтрацию в полосе 1.7 нм [16] для компенсации сильной зависимости пропускания разрабатываемого светофильтра от угла падения лучей. Создаваемый ГМД должен был обладать следующими характеристиками [15]: проекция пикселя при наблюдении в надире не более 10 км; угловой размер изображения, градусы: не менее $17.5^\circ \times 17.5^\circ$ (вся поверхность диска Земли, видимого с ГСО); спектральный диапазон наблюдения: 775.9 – 777.9 нм. В устном докладе [15] была обозначена проблема узкополосной широкоугольной фильтрации в ГМД и предложено уменьшить поле зрения с 17.5° до 9° и сместить центр кадра с экватора на север.

При разработке Европейским космическим агентством (European Space Agency – ESA) детектора молний (Lightning Imager – LI), который согласно новому этапу программы Метеосат (Meteosat Third Generation – MTG) предполагается разместить на ГСО [17, 18], было предложено расположить солнцезащитный фильтр (Solar Rejection Window – SRW) перед узкополосным фильтром (Narrow Band Filter – NBF) [19]. SRW устанавливается для защиты NBF от прямого воздействия внешней космической среды. При углах падения излучения до 16.3° и при больших температурах солнцезащитный фильтр должен пропускать излучение только в спектральном диапазоне от 760 – 780 нм. Разработчики фильтров демонстрирует понимание, что идеальная ширина полосы NBF должна быть не больше, чем минимальная ширина полосы 0.34 нм. Однако реальная полоса пропускания указана ~ 1.9 нм, что позволяет гарантировать требуемый коэффици-

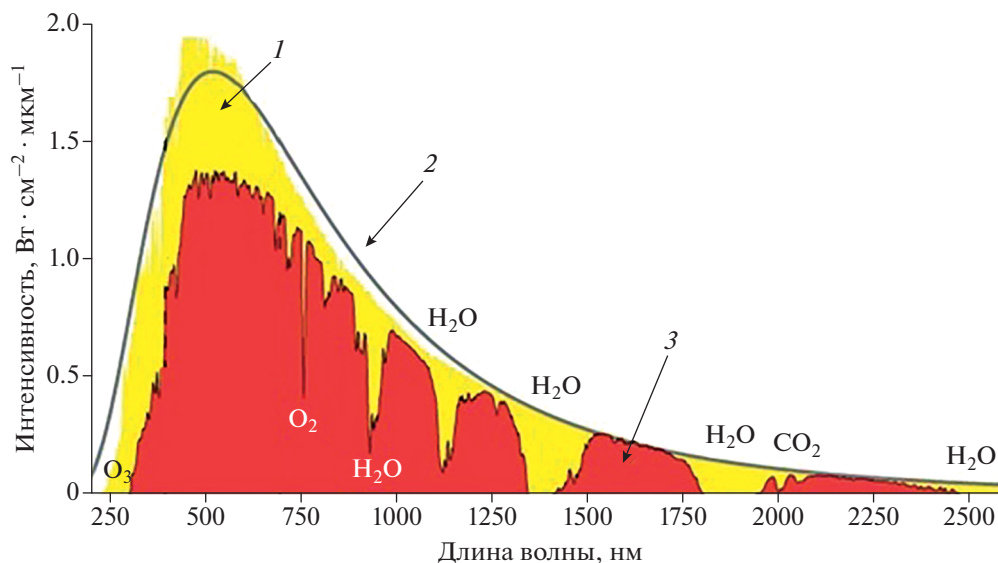


Рис. 3. Спектр излучения Солнца: 1 (желтый цвет) — пришедшее от Солнца излучение в верхней атмосфере; 2 (черная линия) — черное тело при температуре 5250°C; 3 (красный цвет) — результаты измерений на уровне моря прошедшего через атмосферу излучения Солнца.

ент пропускания в рабочем диапазоне угла падения (от 0° до 5.1°). Кроме того, при изготовлении SRW была учтена *s*- и *p*-поляризация света [14]. На рис. 2а показаны расчетные и экспериментальные спектры пропускания и поглощения SRW для излучения, падающего на фильтр под углом 16.3° . Предложенное техническое решение состоит в использовании четырех объективов, для перекрытия углового диапазона, который GLM перекрывает с помощью одного объектива.

На рис. 2б показано смещение спектра пропускания фильтра [20], сходного по параметрам с SRW, в зависимости от угла падения света от 0° до 30° . На рис. 3 показан спектр излучения Солнца [21]. Вышеизложенная информация будет использована при обсуждении оптимального сочетания ширины и положения спектра фильтрации для минимизации смещения центральной полосы фильтрации и расщепления спектров фильтрации *s*- и *p*-поляризованного света при больших углах отклонения фильтра.

Для широкоугольной фильтрации необходимо искать спектральную полосу, а не самую яркую линию, в которой максимально отношение интегральной интенсивности молниевой активности и солнечной радиации, отраженной от облаков. На основании результатов, представленных на рис. 2а и 2б, ширину полосы фильтрации можно оценить в 20 нм. Из данных, представленных на рис. 3, видно, что в районе 950 нм большая часть излучения от Солнца поглощаются молекулами

H_2O . Поэтому отраженный от облаков свет в этой спектральной полосе будет минимальным. Из данных, представленных на рис. 1 видно, что в типичный спектр излучения молнии был прописан только до 920 нм, но в его конце видна достаточно яркая линия. Жидкая вода имеет полосы поглощения вблизи 970, 1200, 1450 и 1950 нм. Спектральная чувствительность кремниевых фотодиодов, которые используются в детекторах молний, лежит в диапазоне 0.4–1.1 мкм [22]. Таким образом, вместо узкоугольных фильтров, выделяющих самую яркую линию 777.4 нм, для широкоугольного детектирования вспышек молний с ГСО целесообразно использовать фильтр с центральной длиной волны соответствующей самой яркой линии молнии в спектральном диапазоне ≈ 940 – 980 нм и шириной ≈ 20 – 30 нм.

Кроме того, необходимо отметить, что в публикации [23] уже было проведено краткое сравнение характеристик интерференционного фильтра и акустооптического фильтра (АОФ) при монохромном детектировании молний с ГСО. Эти фильтры активно используются для дистанционного зондирования Земли [24] и других планет [25]. У АОФ полоса пропускания практически не сдвигается при изменении угла падения света, т.к. при брэгговской дифракции, которая реализуется в таких фильтрах, фотоны рассеиваются на фонах с выполнением законов сохранения энергии и импульса. Стандартная полоса пропускания АОФ ≈ 2 нм в видимом диапазоне спектра,

в 1974 г. была показана возможность фильтрации расходящегося с угловой апертурой $\approx \pm 7^\circ$ [26]. В связи с тем, что, в отличие от интерференционного фильтра, АОФ обладают ограниченным пространственным разрешением, были проведены теоретические исследования [27, 28] с целью поиска условий, которые позволяют получить максимальное разрешение. В результате были созданы перестраиваемые АОФ [29–31], пространственное разрешение фильтрации которых лучше, чем реализует фотодетекторная матрица $\approx 800 \times 800$ элементов. В статье работе [32] было показано, что многополосная АОФ позволяют формировать сложные спектры. Такие спектры могут эффективно выделить несколько линий спектра излучения молнии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обоснована целесообразность широкоугольной фильтрации всплеск молний с центральной длиной волны вблизи 970 нм и полосой ≈ 20 нм (вместо выделения полосы 777.4 нм, успешно применяемой при узкоугольном детектировании). Предложено применять метод многополосной акустооптической фильтрации в детекторах молний космического базирования для одновременного выделения нескольких линий спектра излучения молнии.

Работа выполнена в рамках государственного задания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sparrow J.G., Ney E.P., Burnett G.B., Stoddart J.W. // J. Geophys. Res. 1968. V. 73. P. 857.
2. Vorpahl J.A., Sparrow J.G., Ney E.P. // Science. 1970. V. 169. No. 3948. P. 860.
3. Orville R.E., Henderson R.W. // J. Atmosph. Sci. 1984. V. 41. P. 3180.
4. Barasch G.E. // J. Geophys. Res. 1970. V. 75. P. 1049.
5. Connor T.R. 1965 ARPA-AEC joint lightning study at Los Alamos. V. 1. The lightning spectrum, 1967. P. 32.
6. Christian H.J., Goodman S.J. // J. Atmosph. Ocean. Technol. 1987. V. 4. No. 4. P. 701.
7. Christian H.J., Blakeslee R.J., Goodman S.J. // J. Geophys. Res. 1989. V. 94. P. 329.
8. Betz H.D., Schumann U. Lightning: principles, instruments and applications. Springer Science + Business Media B.V., 2009. P. 641.
9. Розенберг Г.В. Оптика тонкослойных покрытий. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1958. 570 с.
10. Bruning E.C., Tillier C.E., Edgington S.F. et al. // J. Geophys. Res. 2019. V. 124. Art. No. 14285.
11. Gao Zi-Yi, Chen Qi-Xiang, Gao Peng et al. // Infrared Phys. Technol. 2022. V. 123. Art. No. 104202.
12. Goodman S.J., Blakeslee R.J., Koshak W.J. et al. // Atmosph. Res. 2013. V. 125–126. P. 34.
13. <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/flashy-first-images-arrive-from-noaa-s-goes-16-lightning-mapper>.
14. Королев Ф.А., Клементьева А.Ю. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. и астрон. 1980. Т. 21. № 6. P. 56.
15. Квитка В.Е., Дюльдин Р.С., Ключников М.В., Прасолов В.О. // Сб. докл. 17-й Всеросс. конф. “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. М.: ИКИ РАН, 2019. С. 140.
16. Квитка В.Е., Корх А.В. // Вестник РГРТУ. 2018. № 66-1. С. 42.
17. https://www.researchgate.net/publication/260965450_Meteosat_Third_Generation_-_The_future_European_geostationary_meteorological_satellite.
18. Tommasi L., Basile G., Romoli A., Stagi M. // Proc. SPIE. 2017. V. 10567. Art. No. 1056711.
19. Montcalm C., Badeen A., Burbidge D. et al. // Proc. SPIE. 2019. V. 11180. Art. No. 111804Z.
20. Baohua Shi, Zaijin Li, Hongyu Li, Yi Qu // Proc. SPIE. 2014. V. 9295. Art. No. 929507.
21. https://mark4sun.jpl.nasa.gov/report/UT_seminar_Solar_Spectrum_Toon.pdf.
22. Бараночников М.Л. Приемники и детекторы излучений. Справочник. М.: ДМК Пресс, 2012.
23. Филатов А.Л. // Солн.-земн. физ. 2022. Т. 8. № 3. С. 18. // Filatov A.L. // Sol.-Terr. Phys. 2022. V. 8. No. 3. P. 21.
24. Pustovoi V.I., Pozhar V.E. // Proc. SPIE. 1999. V. 3750. P. 243.
25. Korablev O., Fedorova A., Jean-Loup Bertaux et al. // Planet. Space Sci. 2012. V. 65. P. 38.
26. Chang I.C. // Appl. Technol. Appl. Phys. Lett. 1974. V. 25. P. 370.
27. Волошинов В.Б., Москера Х.С. // Опт. и спектроск. 2006. Т. 101. № 4. С. 675; Voloshinov V.B., Mosquera J.C. // Opt. Spectrosc. 2006. V. 101. No. 4. P. 635.
28. Манцевич С.Н., Купрейчик М.И., Балакший В.И. // Сб. статей XXII Междунар. науч. конф. Ч. 1. СПб.: ГУАП, 2020. С. 53.
29. Perchik A.V. // Proc. SPIE. 2013. V. 8888. P. 88880.
30. Епихин В.М., Кияченко Ю.Ф., Мазур М.М. и др. // Физ. осн. приборостр. 2013. Т. 2. № 4. С. 116.
31. Molchanov V.Y., Anikin S.P., Chizhikov S.I. et al. // Proc. SPIE. 2014. V. 9147. Art. No. 91472T.
32. Филатов А.Л. // Письма в ЖТФ. 2021. Т. 47. № 1 С. 20; Filatov A.L. // Tech. Phys. Lett. 2021. V. 47. No. 1. P. 16.

Optimization of narrow-band wide-angle filtering for geostationary lightning mapper

A. L. Filatov*

*Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, Fryazino Branch,
Fryazino, 141190 Russia*

**e-mail: a.filatov@fireras.su*

Problems of narrow-band optical filtering in geostationary lightning mappers are considered. The filtering is designed to isolate the brightest triplet in the optical response of lightning (777.19, 777.42, and 777.54 nm) against background of sunlight reflected from the clouds. Earth's angle of view is ≈ 17.5 degrees from the geosynchronous equatorial orbit and there are significant differences in a narrow band pass of Fabry–Perot filter for different light incidence angles. This paper proposes a comparative analysis of filters for Geostationary Lightning Mapper are reported in the literature. An optimal combination for the width and position of the filtering spectrum is substantiated, which minimizes the shift of the central filtering band and the splitting of the filtering spectra *s*- and *p*- of polarized light for large filter deviation angles. New technical solutions based on acousto-optic filters are proposed.