

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ
OPTICAL ENGINEERING

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-6-1077-1083

УДК 535.2

Моделирование освещенности земной поверхности для выбора режимов
работы источника излученияАлександр Иванович Алтухов¹, Денис Сергеевич Коршунов²✉^{1,2} Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация¹ aai_51@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4105-0296>² korshunov.denis@rambler.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-6344-2533>

Аннотация

Введение. Предложен подход к получению светосигнальных характеристик в графоаналитическом виде для обоснования режимов работы излучающей аппаратуры оптико-электронных комплексов дистанционного зондирования Земли. Данные комплексы применяются для ведения съемки в условиях недостаточной естественной освещенности местности по причине сложного рельефа, географического положения района или низкого положения Солнца над плоскостью местного горизонта. **Методы.** С использованием представленной модели проведены расчеты энергетической освещенности земной поверхности. Построены зависимости, учитывающие влияние на распределение спектральной плотности потока электромагнитного излучения положения Солнца над плоскостью местного горизонта для конкретных дат и суточного времени. **Основные результаты.** Получены светосигнальные характеристики, которые можно использовать для обоснования режимов работы излучающей аппаратуры оптико-электронных комплексов. На основе светосильных характеристик сделан вывод о необходимости искусственного усиления спектральной плотности потока излучения в заданном диапазоне спектра с целью достижения требуемой освещенности снимаемого участка земной поверхности на конкретные дату и время. Усиление спектральной плотности потока излучения позволило создать экспозицию, требуемую для формирования изображений с высокими изобразительными свойствами. **Обсуждение.** Результаты выполненного моделирования могут найти применение в задаче прогнозирования качества изображений, полученных с использованием искусственных источников оптической подсветки. Предложенный подход позволяет получить изображения, характеризующиеся высоким значением линейного разрешения на местности, не прибегая к повышению времени накопления заряда фотоприемным устройством регистрирующей аппаратуры. Применение рассмотренного подхода наиболее актуально в условиях ведения аэрокосмической съемки.

Ключевые слова

оптическая подсветка, светосигнальная характеристика, оптико-электронные комплексы

Ссылка для цитирования: Алтухов А.И., Коршунов Д.С. Моделирование освещенности земной поверхности для выбора режимов работы источника излучения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 6. С. 1077–1083. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-6-1077-1083

Modeling the illumination of the Earth's surface to select the operating modes
of the radiation sourceAlexander I. Altuchov¹, Denis S. Korshunov²✉^{1,2} Mozhaisky Military Aerospace Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation¹ aai_51@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4105-0296>² korshunov.denis@rambler.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-6344-2533>

Abstract

An approach to obtain light-signal characteristics in graphoanalytical form is proposed to substantiate the operating modes of the emitting equipment of active optoelectronic complexes of remote sensing of the Earth. These complexes are used for shooting in conditions of insufficient natural illumination of the terrain due to the difficult terrain, geographical location of the area or the low position of the Sun above the plane of the local horizon. Using the presented model,

© Алтухов А.И., Коршунов Д.С., 2023

calculations of the energy illumination of the Earth's surface were carried out, dependencies were constructed that take into account the influence of the position of the Sun above the local horizon plane for specific dates and daily time on the distribution of the spectral density of the electromagnetic radiation flux. Light-signal characteristics have been obtained, which can be used to justify the operating modes of the emitting equipment of active optoelectronic complexes. Based on these characteristics, it is concluded that it is necessary to artificially enhance the spectral density of the radiation flux in a given range of the spectrum in order to achieve the required illumination of the photographed area of the Earth's surface for a specific date and time. The amplification of the spectral density of the radiation flux makes it possible to create the exposure required for the formation of images with high visual properties. The simulation results are used in the problem of predicting the quality of images obtained using artificial sources of optical illumination. The proposed approach makes it possible to obtain images characterized by the high value of linear resolution on the ground, without resorting to increasing the charge accumulation time by the photodetector of the recording equipment. The application of this approach is particularly relevant in the conditions of conducting aerospace surveys.

Keywords

optical illumination, light-signal characteristic, optoelectronic complexes

For citation: Altuchov A.I., Korshunov D.S. Modeling the illumination of the Earth's surface to select the operating modes of the radiation source. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 6, pp. 1077–1083 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-6-1077-1083

Введение

Один из элементов процесса планирования применения оптико-электронных систем дистанционного зондирования Земли — экспонетрический расчет, на основе результатов которого выполняется выбор режимов съемки земной поверхности, обеспечивающих получение снимков, применимых для интерпретации [1–5]. В основе экспонетрического расчета лежит использование экспоненциальных функций, широко применяемых для исследования условий роста и деградации процессов, анализа распространения сигналов и других физических явлений. Например, при планировании применения оптико-электронных систем дистанционного зондирования Земли на основе экспоненциальных функций моделируется освещенность земной поверхности с учетом местного времени. Полученные данные используются для выбора оптимального времени съемки, когда угол падения солнечных лучей на земную поверхность обеспечивает экспозицию, тре-

буемую для формирования изображений с высокими изобразительными свойствами.

Также дополнительно в рамках экспонетрического расчета можно оценить изменение освещенности земной поверхности в течение светового дня, что позволяет выполнить коррекцию времени накопления заряда фотоприемным устройством регистрирующей аппаратуры и получить изображение, характеризующееся высоким линейным разрешением на местности. Приведем примеры (рис. 1) снимков местности, учитывающие разные положения Солнца над земной поверхностью. На рис. 1, *a, b* показаны участки местности, которые не освещены прямыми солнечными лучами и расположены в тени, что существенно снизило качество соответствующих фрагментов изображений. На изображениях (рис. 1, *c, d*) подобные области видны отчетливо, вследствие правильного учета условий освещенности и выбора соответствующих режимов работы регистрирующей аппаратуры.

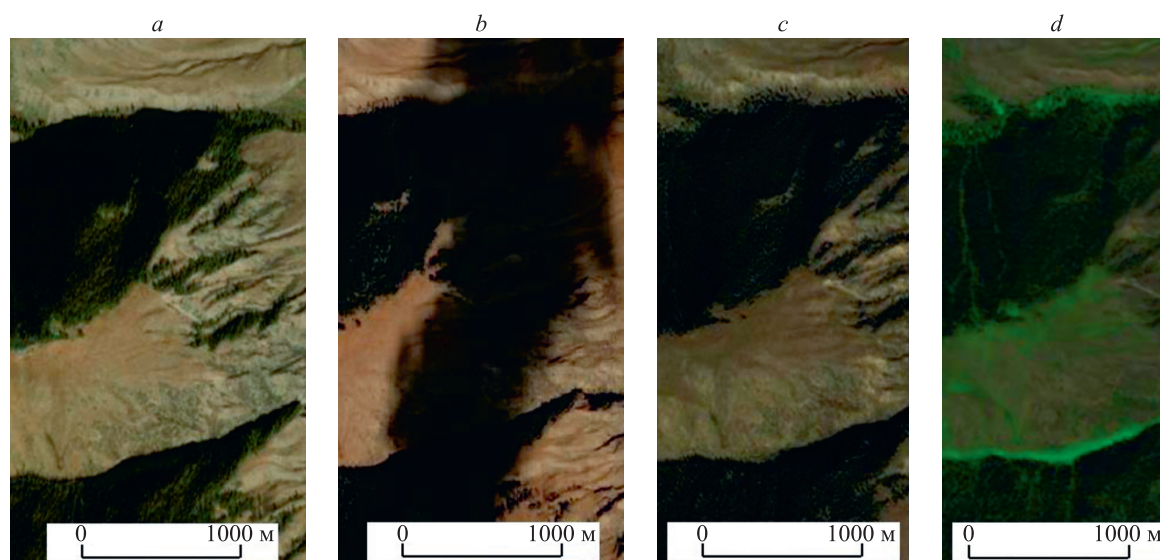


Рис. 1. Снимки земной поверхности с центром в точке снятия координат WGS 84 (81.080039, 42.620698), публикуемые картографическими сервисами: ESRI Satellite (*a*); Yandex Satellite (*b*); Google Satellite (*c*); AutoNavi Satellite (*d*)

Fig. 1. Images of the Earth's surface centered at the point of removal of coordinates WGS 84 (81.080039, 42.620698), published by cartographic services: ESRI Satellite (*a*); Yandex Satellite (*b*); Google Satellite (*c*); AutoNavi Satellite (*d*)

В каждом конкретном случае экспонетрического расчета необходимо учитывать тематическое назначение изображений и режимы работы регистрирующей аппаратуры в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Данное утверждение объясняется тем, что в пределах полосы захвата могут находиться участки местности, обладающие различными физическими свойствами в условиях прямого и непрямого освещений Солнцем. Отметим, что выбор соответствующего режима работы регистрирующей аппаратуры не обеспечивает в полной мере получение изображений, применимых для интерпретации. Например, в условиях сложного рельефа местности и при высоких значениях зенитного угла Солнца невозможно добиться экспозиции, требуемой для формирования изображений [1, 6].

Решить обозначенную проблему можно путем применения оптико-электронных комплексов, оснащенных устройствами искусственной оптической подсветки [7–10]. Режимы работы таких устройств должны синхронизироваться с режимами работы регистрирующей аппаратуры на основе светосигнальных характеристик, например, спектральной плотности потока излучения и энергетической освещенности земной поверхности [11].

Цель работы — обоснование выбора параметров работы излучающей аппаратуры оптико-электронных комплексов с учетом естественных условий освещенности земной поверхности.

Модель энергетической освещенности земной поверхности

Основная светосигнальная характеристика, используемая для выбора параметров работы фотоприемного устройства регистрирующей аппаратуры — освещенность земной поверхности, которая создается прямой и рассеянной солнечной радиацией [11, 12]. При этом величина освещенности ограничена свойствами атмосферы, географическими особенностями ландшафта, временем суток и другими факторами. В свою очередь, прямая солнечная радиация — облученность поверхности Земли излучением Солнца. В верхней границе атмосферы излучение от Солнца охватывает ультрафиолетовую (200–380 нм), видимую (380–780 нм) и инфракрасную (780–450 нм) области спектра, а энергетическая освещенность на границе с атмосферой E_* составляет 1350 Вт/м².

Величину спектральной солнечной постоянной $E_*(\Delta\lambda)$ на границе с атмосферой для диапазона длин волн спектра электромагнитного излучения $[\lambda_1, \lambda_2]$, в котором ведется съемка, найдем по формуле [1, 5]:

$$E_*(\Delta\lambda) = E_* \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda, T) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda, T) d\lambda}, \quad (1)$$

где $\Delta\lambda$ — интервал спектра электромагнитного излучения, в котором ведется съемка; $\lambda_1 = 0,2$ мкм и $\lambda_2 = 4,5$ мкм — нижняя и верхняя границы интервала спектра излучения Солнца; λ_1 и λ_2 — нижняя и верхняя границы интервала спектра излучения, регистрируемого приемником; $E(\lambda, T)$ — спектральная плотность

потока излучения, испускаемого единицей поверхности абсолютно черного тела с температурой T на длине волны λ .

Рассчитаем спектральную плотность [1]:

$$E(\lambda, T) = E_* \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}, \quad (2)$$

где $h = 6,626176 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка; $k = 1,38062 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана; $c = 2,9979258 \cdot 10^8$ м/с — скорость света; T — температура абсолютно черного тела ($T = 6000$ К).

При ведении аэрокосмической съемки суммарную освещенность земной поверхности E_C при ясном небе рассчитаем по формуле [1, 13]:

$$E_C = E_* \sin h_* \left[e^{-\tau_0 \cos h_*} + \frac{1 - e^{-\tau_0}}{2} (1 - e^{-\tau_0 \cos h_*}) \right], \quad (3)$$

где h_* — высота Солнца над плоскостью местного горизонта; τ_0 — оптическая толщина слоя атмосферы, характеризующая ее прозрачность, как количественная оценка наряду с коэффициентом пропускания $T = e^{-\tau_0}$.

Использование выражения (3) предусматривает вычисление значения эквивалентной толщины поглощающего слоя атмосферы для интервала длин волн $[\lambda_1, \lambda_2]$ по формуле [14]:

$$\tau_0(\Delta\lambda) = \frac{1}{\Delta\lambda} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_0(\lambda) d\lambda, \quad (4)$$

где $\Delta\lambda$ — интервал спектра электромагнитного излучения, в котором ведется съемка; $\tau_0(\lambda)$ — эквивалентная толщина поглощающего слоя атмосферы для заданной длины волны λ .

С учетом выражений (3) и (4), результирующее выражение для оценивания освещенности земной поверхности при ясном небе для спектральных поддиапазонов оптического излучения имеет вид:

$$E_C(\Delta\lambda) = E_*(\Delta\lambda) \sin h_* \left[e^{-\tau_0(\Delta\lambda) \cos h_*} + \frac{1 - e^{-\tau_0(\Delta\lambda)}}{2} (1 - e^{-\tau_0(\Delta\lambda) \cos h_*}) \right]. \quad (5)$$

В выражении (5) величина освещенности зависит от значения угла высоты Солнца над плоскостью местного горизонта h_* , которое рассчитаем по формуле:

$$\sin h_* = \sin \varphi_* \sin \delta_* + \cos \varphi_* \cos \delta_* \cos t_*, \quad (6)$$

где φ_* — астрономическая широта объекта съемки; δ_* — склонение Солнца; t_* — часовой угол Солнца в момент времени съемки.

С использованием формул (1)–(6) выполним моделирование энергетической освещенности земной поверхности и построим графоаналитические характеристики спектральной плотности потока электромагнитного излучения, учитывающее положение Солнца на конкретные дату и время. Полученные результаты моделирования могут быть применены для обоснования выбора типов и режимов работы излучающей аппаратуры оптико-электронных комплексов.

Результаты моделирования светосигнальных характеристик источника оптического излучения

На рис. 2 показаны графические зависимости, полученные с использованием формул (5) и (6), демонстрирующие распределение освещенности земной поверхности с учетом даты и времени съемки, а также координат освещаемой точки. Значения освещенности представлены в нормированном виде на интервале от 0 до 1.

Из рис. 2, *a* видно, что точка земной поверхности с координатами $59^{\circ}57'00''$ северной широты и $30^{\circ}19'00''$ восточной долготы освещается Солнцем с 00 ч 00 мин 22 июня 2023 года до 00 ч 00 мин 23 июня 2023 года на протяжении 18 ч 50 мин. Максимальное значение освещенности 0,9 приходится на 12 ч 50 мин. Допустим, что пороговое значение, при котором возможно ведение съемки в естественных условиях освещения, составляет 0,4. При этом временной интервал ведения съемки составит с 05 ч 30 мин до 20 ч 45 мин. На рис. 2, *b* показано существенное сокращение временного интервала освещения Солнцем указанной точки земной поверхности до 05 ч 50 мин в случае выбора даты наблюдения 22 декабря 2023 года. Максимальное значение освещенности 0,55 приходится на 12 ч 55 мин. При аналогичном пороговом значении для ведения съемки в естественных условиях освещения также определим временной интервал ведения съемки — с 11 ч 00 мин до 15 ч 00 мин на выбранную дату.

В случае ведения оптико-электронной съемки добиться получения снимков, применимых для интерпретации, возможно только в условиях достаточной освещенности земной поверхности (рис. 2), что не всегда обеспечивается естественным источником оптического излучения — Солнцем. Согласно формулам (1) и (2), освещенность земной поверхности в видимой области спектра (380–780 нм) зависит от $E_*(\Delta\lambda)$, величина которой определяется спектральной плотностью потока излучения $E(\lambda, T)$. На рис. 3 в графоаналитическом

виде представлены зависимости $E(\lambda, T)$ от длины волны для разного времени суток. Получение данных зависимостей применительно к земной поверхности предполагает учет в формуле (2) величины спектрального распределения коэффициента пропускания атмосферы. Для оценки коэффициента пропускания используем выражение [15] вида:

$$\tau_a(\lambda) = f_1(\lambda)f_2(\varphi, \xi), \quad (7)$$

где $\tau_a(\lambda)$ — функция пропускания в зависимости от длины волны излучения для среднестатистического физико-химического состава атмосферы; $f_2(\varphi, \xi)$ — функция, учитывающая геофизический и климатический факторы (географическое место, его физические особенности и время года).

С учетом формул (2) и (7) результирующее выражение для расчета спектральной плотности потока излучения запишем в виде:

$$E(\lambda, T) = E_*\tau_a(\lambda) \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}.$$

Из рис. 3 видно, что величина спектральной плотности потока оптического излучения изменяет свое значение при изменении длины волны, а также времени года и суток, что объясняется изменением величины зенитного угла Солнца. Наиболее высокая спектральная плотность потока наблюдается в диапазоне спектра от 450 до 470 нм. Снижение спектральной плотности потока ведет к ослаблению освещенности снимаемой точки земной поверхности и, как следствие, к необходимости увеличения времени накопления заряда фотоприемным устройством T_{nak} для получения экспозиции, обеспечивающей формирование изображения. В условиях недостаточной освещенности реализация такого подхода затруднена из-за ограничений, накладываемых скоростью бега оптического изображения вследствие

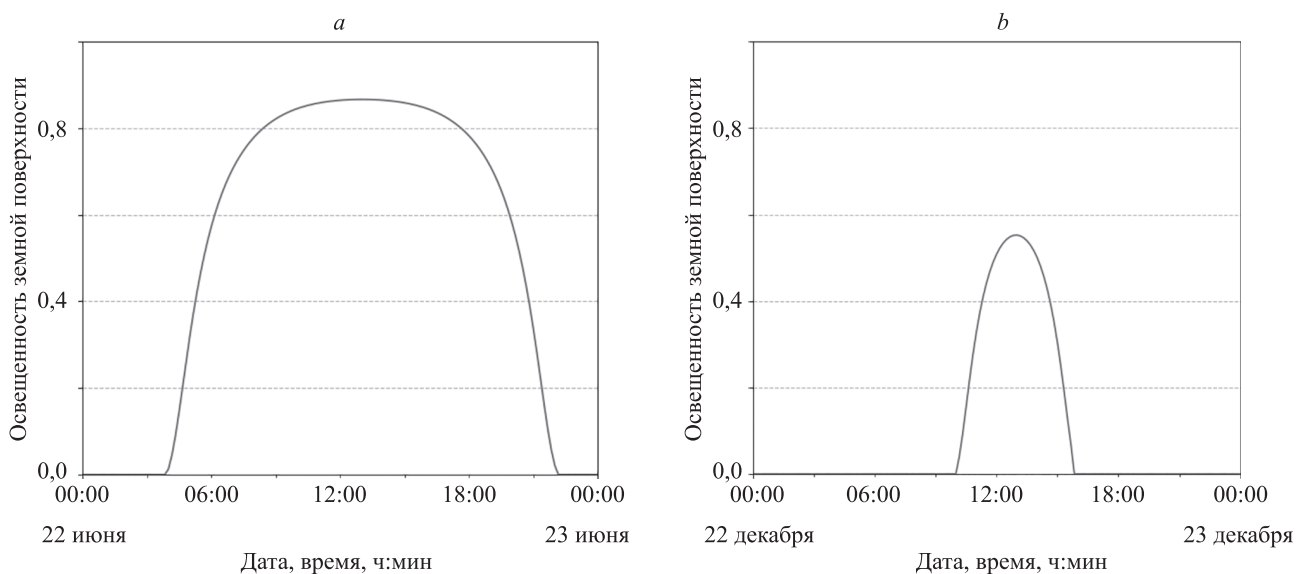


Рис. 2. Зависимости освещенности земной поверхности от даты и времени на 22 июня (*a*) и 22 декабря (*b*) 2023 года
 Fig. 2. Dependence of the illumination of the Earth's surface vs. date and time: as of June 22, 2023 (*a*); as of December 22, 2023 (*b*)

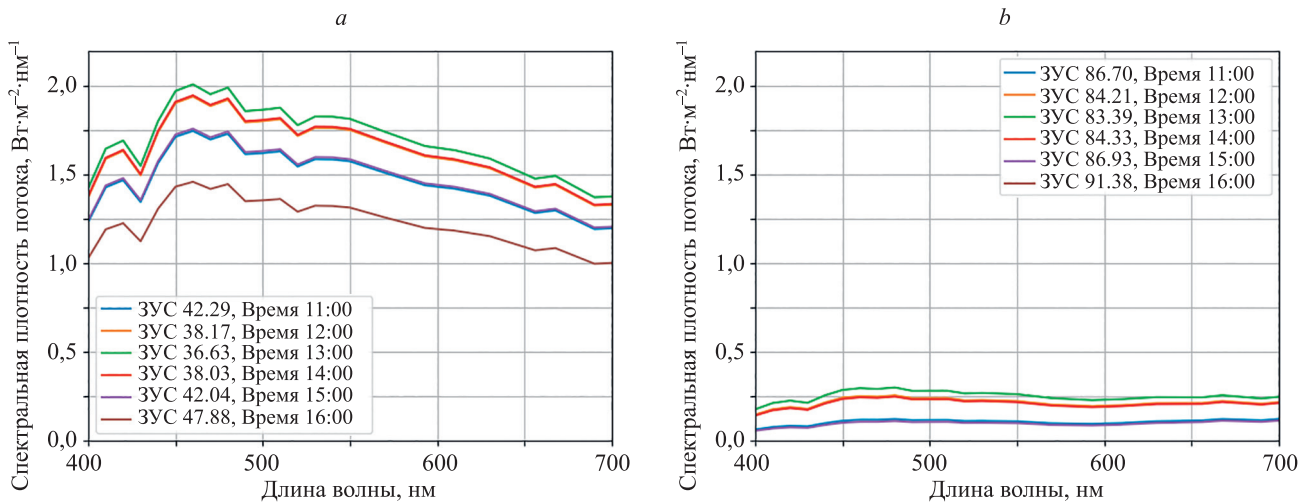


Рис. 3. Зависимости спектральной плотности потока от длины волны на 22 июня (а) и 22 декабря (б) 2023 года.
ЗУС — зенитный угол Солнца

Fig. 3. Dependence of the spectral flux density vs. the wavelength: as of June 22, 2023 (a); as of December 22, 2023 (b)
ЗУС — zenith angle of the Sun

перемещения носителя регистрирующей аппаратуры [1, 14]:

$$T_{nak} = \frac{aN_{TDI}K_{zam}}{V_{img}}, \quad (8)$$

где a — размер элемента фотоприемного устройства; N_{TDI} — число шагов накопления заряда (в случае, если используется режим временной задержки и накопления заряда); V_{img} — скорость бега оптического изображения в фокальной плоскости; K_{zam} — коэффициент тангажного замедления (при отсутствии разворота летательного аппарата по тангажу равен 1).

Восполнить недостаточную естественную освещенность можно путем применения активных оптико-электронных комплексов, оснащенных средствами искусственной подсветки [9]. Параметры оптической подсветки выберем с учетом типа источника оптического излучения, типа регистрирующей аппаратуры, а

также условий их взаимного размещения в воздушном или космическом пространстве. Задача источника оптической подсветки — усиление спектральной плотности потока излучения в заданной области спектра для достижения требуемой освещенности снимаемого участка земной поверхности на конкретные дату и время.

Рассчитаем спектральную плотность потока излучения $E_{\Delta}(\lambda, T)$, испускаемого единицей поверхности источника подсветки в единичном интервале длин волн:

$$E_{\Delta}(\lambda, T) = E_{\odot}(\lambda, T) - E(\lambda, T), \quad (9)$$

где $E_{\odot}(\lambda, T)$ — величина спектральной плотности потока излучения в единичном интервале длин волн, обеспечивающая получение изображений, пригодных для интерпретации.

На рис. 4 показаны графики, демонстрирующие величину усиления спектральной плотности потока

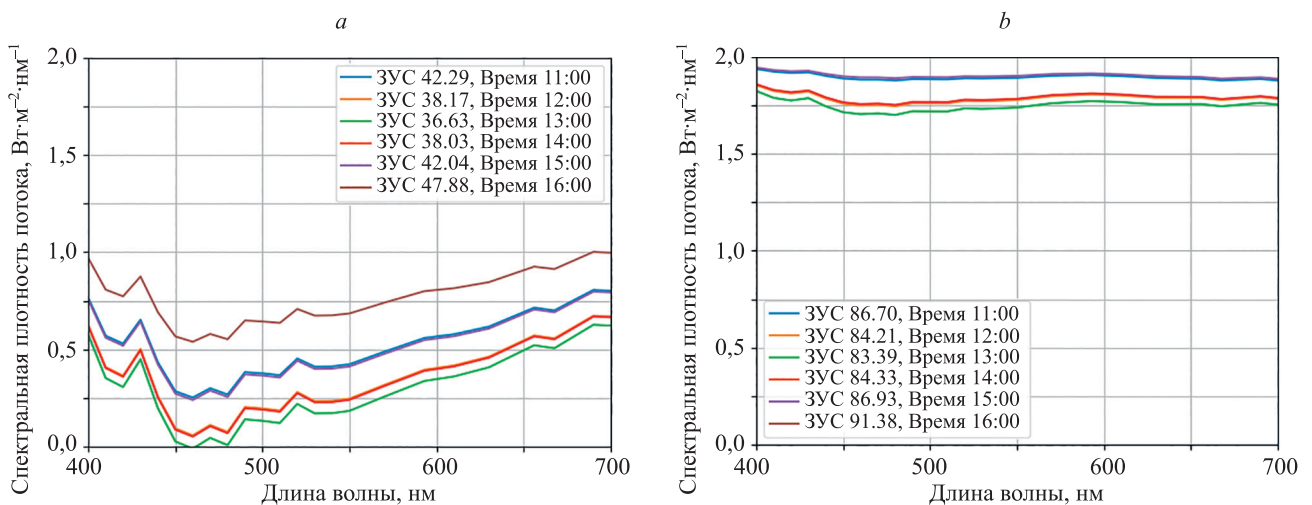


Рис. 4. Величины усиления спектральной плотности потока от длины волны на 22 июня (а) и 22 декабря (б) 2023 года
Fig. 4. The magnitude of the spectral density gain of the flux vs. the wavelength: as of June 22, 2023 (a); as of December 22, 2023 (b)

излучения в зависимости от длины волны спектра с учетом времени суток. За эталон принят участок кривой в диапазоне длин волн 450–470 нм на дату 22 июня 2023 года. Из рис. 4, а видно, что в указанном диапазоне не требуется усиление спектральной плотности потока для создания освещенности, необходимой для формирования изображения на время 13 ч 00 мин. При этом в 14 ч 00 мин такое усиление должно составлять $0,1 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{нм}^{-1}$. На дату 22 декабря 2023 года усиление спектральной плотности потока излучения варьируется в диапазоне $1,7\text{--}1,8 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{нм}^{-1}$ в зависимости от времени суток.

С учетом формул (1) и (9), результирующее выражение для определения величины спектральной солнечной постоянной $E_*(\Delta\lambda)$ в диапазоне длин волн спектра электромагнитного излучения $[\lambda_1, \lambda_2]$, в котором ведется съемка с применением активных оптико-электронных комплексов, имеет вид:

$$E_*(\Delta\lambda) = E_* \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\Delta}(\lambda, T) d\lambda + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda, T) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda, T) d\lambda}.$$

Результаты моделирования возможно использовать для оценивания распределения спектральной плотности потока оптического излучения с учетом длин волн спектра электромагнитного излучения, географического положения снимаемой точки и времени съемки для обоснования выбора режимов работы источников излучения и регистрирующей аппаратуры в составе активных оптико-электронных комплексов. Практическое

применение результаты моделирования найдут в задаче прогнозирования качества изображений [1, 9, 14, 16, 17], полученных с использованием искусственных источников оптической подсветки.

Заключение

В работе представлен подход к моделированию светосигнальных характеристик — спектральной плотности потока излучения и энергетической освещенности земной поверхности. Указанные характеристики учитывают местоположение и время съемки средствами дистанционного зондирования Земли освещаемой точки.

На практике светосигнальные характеристики используются для обоснования выбора режимов работы излучающей аппаратуры оптико-электронных комплексов с учетом естественных условий освещенности земной поверхности. В частности, на основе оценок сделан вывод о необходимости искусственного усиления спектральной плотности потока излучения в заданном диапазоне спектра. Цель такого усиления — достижение требуемой освещенности снимаемого участка земной поверхности на конкретные дату и время. Усиление спектральной плотности потока излучения позволяет создать экспозицию, требуемую для формирования изображений.

Достоинством предложенного подхода является возможность получения снимков, характеризуемых высоким значением линейного разрешения на местности, не прибегая к повышению времени накопления заряда фотоприемного устройства, что особенно актуально в условиях ведения аэрокосмической съемки.

Литература

1. Бакланов А.И. Системы наблюдения и мониторинга: учебное пособие. М.: Бином. 2009. 234 с.
2. Юрченко В.И. Особенности проектирования аэрофотосъемочных работ с беспилотного воздушного судна // Вестник СГУГиТ. 2021. Т. 26. № 2. С. 65–81. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2021-26-2-65-81>
3. Емельянов С.Г., Атакишев О.И., Алтухов А.И., Гнусарев Н.В., Коршунов Д.С. К вопросу учета условий освещенности при съемке космических объектов фотографическими средствами // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 3-1(42). С. 58–62.
4. Хрущ Р.М. Аэрокосмические методы. Часть 1. Аэрокосмические съемки и теория одиночного фотоснимка: учебное пособие. СПб.: Издательство Санкт-Петербургского университета, 2009. 160 с.
5. Моисеев В.С. Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами: монография. Казань: ГБУ «Республиканский центр мониторинга качества образования», 2013. 768 с. (Серия «Современная прикладная математика и информатика»).
6. Занин К.А. Методы проектирования оптико-электронных комплексов космических аппаратов // Проектирование автоматических космических аппаратов для фундаментальных научных исследований. Т. 1. М.: МАИ, 2013. С. 261–335.
7. Григорьев А.Н., Алтухов А.И., Коршунов Д.С. Подход к ведению аэросъемки местности с использованием компоновки оптико-электронных камер // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 3. С. 318–326. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2020-20-3-318-326>
8. Карасик В.Е., Орлов В.М. Локационные лазерные системы видения. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 478 с.

References

1. Baklanov A.I. *Observation and Monitoring Systems*. Moscow, BINOM Publ., 2009, 234 p. (in Russian)
2. Yurchenko V.I. Design peculiarities of the aerial photography from an unmanned aircraft. *Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT)*, 2021, vol. 26, no 2. pp. 65–81. (in Russian). <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2021-26-2-65-81>
3. Emelyanov S.G., Atakishev O.I., Altuchov A.I., Gнусarev N.V., Korshunov D.S. On accounting lighting conditions to survey space objects photographic means. *Proceedings of Southwest State University*, 2012, no. 3-1(42), pp. 58–62. (in Russian)
4. Khrushch R.M. *Aerospace Methods. Part 1. Aerial and Satellite Surveys and a Single Still Photograph Theory*. St. Petersburg, Saint Petersburg State University Publ., 2009, 160 p. (in Russian)
5. Moiseev V.S. *Applied Command and Control Theory for Unmanned Aerial Vehicles*. Kazan, Republican center for monitoring the quality of education, 2013, 768 p. (in Russian)
6. Zanin K.A. Methods for designing optical-electronic complexes of space vehicles. *Design of automatic space vehicles for fundamental scientific research*. Moscow, MAI Publ., 2012, pp. 261–335. (in Russian)
7. Grigor'ev A.N., Altuchov A.I., Korshunov D.S. Aerial mapping based on arrangement of optical electron cameras. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 318–326. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2020-20-3-318-326>
8. Karasik V.E., Orlov V.M. *Location-Based Laser Vision Systems*. Moscow, BMSTU Publ., 2013, 478 p. (in Russian)
9. Grigor'ev A.N., Altuchov A.I., Korshunov D.S. Approach to getting images of objects based on indirect laser location data. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*

9. Григорьев А.Н., Алтухов А.И., Коршунов Д.С. Подход к получению изображений объектов на основе данных не прямой лазерной локации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21. № 1. С. 31–39. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-1-31-39>
10. Gariepy G., Krstajic N., Henderson R., Li C., Thomson R.R., Buller G.S., Heshmat B., Raskar R., Leach J., Faccio D. Single-photon sensitive light-in-flight imaging // *Nature Communications*. 2015. V. 6. P. 6021. <https://doi.org/10.1038/ncomms7021>
11. Тихонов Е.В., Маркушин Г.Н., Кошелев А.В., Векшин Ю.А., Алмазов А.А., Швалев А.В., Коротаев В.В. Параметрический лазерный дальномер с пассивной системой термостабилизации // *Оптический журнал*. 2023. Т. 90. № 10. С. 80–92. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-10-80-92>
12. Григорьев А.Н., Замарин А.И., Караваев М.Н. Метод формирования групповых объектов для космических средств дистанционного зондирования Земли // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 4. С. 587–594. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2015-15-4-587-594>
13. Молчанов А.С., Чаусов Е.В. Методика оценивания линейного разрешения авиационных цифровых оптико-электронных систем в процессе летных испытаний // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2019. № 2. С. 140–150.
14. Григорьев А.Н., Коршунов Д.С., Беляев А.С. Прогнозирование качества гиперспектральных снимков космических систем дистанционного зондирования // *Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского*. 2010. № 629. С. 143–147.
15. Демин А.В., Моисеева М.И. Инвариантная модель для оценки коэффициента пропускания атмосферы при мониторинге объектов в оптическом диапазоне спектра // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 1. С. 9–14.
16. Маркушин Г.Н., Коротаев В.В., Кошелев А.В., Самохина И.А., Васильев А.С., Тимофеев А.Н., Васильева А.В., Ярышев С.Н. Двухдиапазонные оптико-электронные системы обнаружения субъектов браконьерского промысла // *Оптический журнал*. 2022. Т. 89. № 9. С. 36–48. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-09-36-48>
17. Злобин В.К., Еремеев В.В. *Обработка аэрокосмических изображений*. М.: Физматлит, 2006. 288 с.
- Optics*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 31–39 (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-1-31-39>
10. Gariepy G., Krstajic N., Henderson R., Li C., Thomson R.R., Buller G.S., Heshmat B., Raskar R., Leach J., Faccio D. Single-photon sensitive light-in-flight imaging. *Nature Communications*, 2015, vol. 6, pp. 6021. <https://doi.org/10.1038/ncomms7021>
11. Tikhonov E.V., Markushin G.N., Koshelev A.V., Vekshin Yu.A., Almazov A.A., Shvalev A.V., Korotaev V.V. Parametric laser rangefinder with passive system of thermostabilization. *Opticheskii Zhurnal*, 2023, vol. 90, no. 10, pp. 80–92. (in Russian). <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-10-80-92>
12. Grigoriev A.N., Zamarin A.I., Karavaev M. N. Method of group objects forming for space-based remote sensing of the Earth. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 4, pp. 587–594. (in Russian)
13. Molchanov A.S., Chausov E.V. Method of estimating a linear solution aviation digital optico-electronic systems during flight testing process. *Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*, 2019, no. 2, pp. 140–150. (in Russian)
14. Grigorev A.N., Korshunov D.S., Beliaev A.S. Quality prediction of the hyperspectral images of remote sensing space systems. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*, 2010, no. 629, pp. 143–147. (in Russian)
15. Demin A., Moiseeva M. Invariant model for estimation of the atmosphere transmitting efficiency at objects monitoring in the optical spectral range. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2012, no. 1, pp. 9–14. (in Russian)
16. Markushin G.N., Korotaev V.V., Koshelev A.V., Samokhina I.A., Vasilev A.S., Timofeev A.N., Vasileva A.V., Yaryshev S.N. Dual-band optoelectronic poaching detection systems. *Journal of Optical Technology*, 2022, vol. 89, no. 9, pp. 528–536. <https://doi.org/10.1364/JOT.89.000528>
17. Zlobin V.K., Eremeev V.V. *Aerospace Imaging Processing*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006, 288 p. (in Russian)

Авторы

Алтухов Александр Иванович — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация, [sc 57217053398](https://orcid.org/0000-0002-4105-0296), <https://orcid.org/0000-0002-4105-0296>, aai_51@mail.ru
Коршунов Денис Сергеевич — кандидат технических наук, доцент, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация, [sc 57195312804](https://orcid.org/0000-0001-6344-2533), <https://orcid.org/0000-0001-6344-2533>, korshunov.denis@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 13.10.2023
 Одобрена после рецензирования 01.11.2023
 Принята к печати 26.11.2023

Authors

Alexander I. Altuchov — PhD, Associate Professor, Head of Department, Mozhaisky Military Aerospace Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation, [sc 57217053398](https://orcid.org/0000-0002-4105-0296), <https://orcid.org/0000-0002-4105-0296>, aai_51@mail.ru
Denis S. Korshunov — PhD, Associate Professor, Mozhaisky Military Aerospace Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation, [sc 57195312804](https://orcid.org/0000-0001-6344-2533), <https://orcid.org/0000-0001-6344-2533>, korshunov.denis@rambler.ru

Received 13.10.2023
 Approved after reviewing 01.11.2023
 Accepted 26.11.2023



Работа доступна по лицензии
 Creative Commons
 «Attribution-NonCommercial»