<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-2-42-47>

УДК 535.231.15

Математическое моделирование фоно-целевой обстановки летательного аппарата над уровнем моря

В. А. Рязанцева, К. Н. Стешенко, Д. Д. Никеев, Е. В. Гаврилов

Акционерное общество «Научно-производственный комплекс Пеленгатор»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Разработанная программная модельная среда позволяет оценить мощностные характеристики фонового излучения. Метод ее реализации позволяет получать индикатрисы излучения Солнца с учетом отраженного излучения от водной поверхности. Высокий уровень универсальности модельной среды дает возможность проводить расчеты для любых летательных аппаратов при различных состояниях поверхности воды в нескольких спектральных диапазонах.

Ключевые слова: моделирование излучения, излучение летательного аппарата, расчетное исследование, индикатриса излучения

Для цитирования: Рязанцева В. А., Стешенко К. Н., Никеев Д. Д., Гаврилов Е. В. Математическое моделирование фоно-целевой обстановки летательного аппарата над уровнем моря // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 2. С. 42–47. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-2-42-47>

For citation: Riazantseva V. A., Steshenko K. N., Nikeev D. D., Gavrilov E. V. Mathematical simulation of aircraft background-target environment above sea level // Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey". 2021. No. 2. P. 42–47. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-2-42-47>

Поступила 21.12.2020 Отрецензирована 14.01.2021 Одобрена 25.03.2021 Опубликована 18.06.2021

Введение

При моделировании фоно-целевой обстановки основной вклад в пространственное распределение энергии вносит излучение летательного аппарата (ЛА). В настоящее время существуют работы, посвященные расчетам и моделированию характеристик излучения двигателей ЛА [1, 2], разработаны методики полного расчета пространственного распределения энергии [3]. Работы в данной области дают достаточно точную оценку излучения ЛА, однако для полной оценки фоно-целевой обстановки также необходим учет излучения от фоновых объектов (поверхность воды, учет рассеянного излучения в условиях тумана и при наличии облаков). Несмотря на наличие работ, подробно описывающих расчет

параметров отраженного излучения от водной поверхности [4] и характеристик рассеянного излучения в условиях тумана и облачности [5, 6], все еще отсутствует программная реализация, учитывающая и излучение ЛА, и фоновое излучение. Поэтому существует необходимость в создании единого универсального инструмента для данных вычислений.

Методика расчетов

Данная работа является логичным продолжением работы [7], в которой была предложена модель, позволяющая получить характеристики излучения ЛА. Здесь представлена новая модель с учетом фонового излучения, в том числе и отражения от поверхности воды.

Основной вклад в фоновое излучение вносит излучение Солнца. Спектр солнечного излучения $I(\lambda, T)$ полагается соответствующим излучению абсолютно черного тела

© Рязанцева В. А., Стешенко К. Н., Никеев Д. Д., Гаврилов Е. В., 2021

с температурой 6000 К [8] и рассчитывается по формуле Планка:

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}, \quad (1)$$

где h – постоянная Планка, c – скорость света в вакууме, k – постоянная Больцмана, T – температура, λ – длина волны.

Особенностью расчета фонового излучения над поверхностью воды является необходимость производить моделирование излучения, рассеянного на туманах и дымках. Параметры излучения, прошедшего через толщу водных аэрозолей, значительно отличаются от параметров излучения, прошедшего сквозь слой атмосферы, который состоит только из молекул газа, и поэтому требуют отдельного расчета. Учет рассеяния солнечного излучения на водных аэрозолях происходит в соответствии с теорией Ми и формулами (2) и (3), описанными в [9]:

$$Q_{\text{экт}} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \operatorname{Re}(a_n + b_n), \quad (2)$$

$$Q_{\text{рас}} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \{|a_n|^2 + |b_n|^2\}, \quad (3)$$

где $Q_{\text{экт}}$, $Q_{\text{рас}}$ – коэффициенты эффективности экстинкции и рассеяния излучения аэрозолями соответственно, вычисляемые через коэффициенты Ми a_n , b_n ; x – параметр, характеризующий отношение размера аэрозольной частицы к длине волны излучения.

Еще один важный фактор, вносящий вклад в итоговую картину распределения излучения, – это отражение излучения от водной поверхности. В расчетной модели поверхность воды разбивается на элементарные площадки и итоговое отражение рассчитывается как сумма вкладов от каждой площадки. Отражение каждой площадки считается ламбертовским, и коэффициенты отражения рассчитываются по формулам Френеля (4) [8]:

$$\begin{aligned} r_{\parallel} &= \frac{n_2 \cos(\alpha_1) - n_1 \cos(\alpha_2)}{n_2 \cos(\alpha_1) + n_1 \cos(\alpha_2)}, \\ \tau_{\parallel} &= \frac{2 \cdot n_1 \cos(\alpha_1)}{n_2 \cos(\alpha_1) + n_1 \cos(\alpha_2)}, \\ r_{\perp} &= \frac{n_1 \cos(\alpha_1) - n_2 \cos(\alpha_2)}{n_1 \cos(\alpha_1) + n_2 \cos(\alpha_2)}, \\ \tau_{\perp} &= \frac{2 \cdot n_1 \cos(\alpha_1)}{n_1 \cos(\alpha_1) + n_2 \cos(\alpha_2)}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $r_{\parallel}$, $r_{\perp}$ – продольная и поперечная компоненты амплитуды отраженной волны, $\tau_{\parallel}$, $\tau_{\perp}$ – продольная и поперечная компоненты амплитуды прошедшей волны, α_1 – угол падения, α_2 – угол отражения, n_1 – показатель преломления среды, в которой свет распространяется до отражения, n_2 – показатель преломления среды, в которую свет попадает после отражения.

Использование в расчетах элементарных площадок варьируемого размера позволяет учитывать различную степень волнения водной поверхности при моделировании. Пример

Рис. 1. Пример полигонального разбиения поверхности воды для расчета отражения (зеленая, красная, синяя линии – оси прямоугольной системы координат)

формирования водной поверхности представлен на рисунке 1.

Для демонстрации результатов моделирования предусмотрена возможность визуализации полученного излучения.

Были проведены расчеты коэффициентов отражения для учета интенсивности отраженного света от разных типов водных поверхностей в нескольких оптических диапазонах. Полученные результаты (рис. 2) используются для дальнейшего моделирования фоно-целовой обстановки.

Результаты

Для построения индикатрисы излучения, отраженного от водной поверхности, используется метод, описанный в [7]. Варьируемыми параметрами являются угол наблюдения и состояние водной поверхности, которое можно оценить по десятибалльной шкале. Спектр

излучения Солнца, дошедшего до водной поверхности, с учетом поглощения атмосферным воздухом и аэрозолями в видимом и ближнем ИК диапазонах представлен на рисунке 3. Поглощение атмосферных газов соответствовало поглощению стандартной атмосферы и рассчитывалось с использованием базы данных HITRAN [10], концентрации и распределение аэрозолей получены на основе лидарных данных. Результаты построения индикатрисы в видимом диапазоне представлены на рисунке 4 при угле падения солнечных лучей 60° . При волнении водной поверхности в 1 балл ее можно считать достаточно гладкой, и, следовательно, отражение возникает под углом 60° градусов. При углах наблюдения 30° и 60° рассеяние излучения близко к равномерному (рис. 4а, в). При угле наблюдения 40° появляется выделенная ось, соответствующая углу отражения (рис. 4б). При 5-балльном

Рис. 2. Зависимость коэффициентов отражения для водных поверхностей в диапазоне: а) 0,3–0,9 мкм, б) 2–14 мкм
— лед, — вода

Рис. 3. Спектры излучения Солнца, дошедшего до водной поверхности, с учетом поглощения атмосферным воздухом и аэрозолями, в диапазоне: а) 0,3–1,0 мкм, б) 2–6 мкм, в) 8–14 мкм

Рис. 4. Зависимость распространения отраженного излучения от азимута при различных углах места наблюдения: а) 30°, б) 40°, в) 60° при волнении водной поверхности в 1 балл, г) 30°, д) 40°, е) 60° при волнении водной поверхности в 5 баллов

Рис. 5. Спектры излучения Солнца, отраженного водной поверхностью, в диапазоне: а) 0,3–1,0 мкм, б) 2–6 мкм, в) 8–14 мкм

возмущении водная поверхность сильно деформирована и блики возникают произвольно, поэтому нет выделенного направления отражения, что можно наблюдать на рисунке 4 (г–е).

Итоговый спектр отраженного излучения, вносящий наибольший вклад в фоновую обстановку в условиях нахождения цели над морской поверхностью, представлен

на рисунке 5. Данные спектры получены для незеркального отражения от поверхности моря при угле обзора 45° на дистанции 1 км от поверхности отражающей площадки.

Заключение

Разработана программная среда, позволяющая в зависимости от угла наблюдения

оценить мощностные характеристики фонового излучения.

Разработанная программная среда обладает большой гибкостью и позволяет проводить расчеты при различных состояниях водных и твердых поверхностей. Разработанная программная среда может быть использована для создания оптико-электронных систем.

Список литературы

1. Филиппов Г. С. Математическое моделирование излучения двигательной установки АЛ-31Ф в инфракрасном диапазоне. Вестник Самарского государственного космического университета им. академика С. П. Королёва (национального исследовательского университета). 2014. №. 4 (46). С. 99–106.
2. Кузьмин В. А. и др. Тепловое излучение гетерогенных продуктов сгорания в факеле модельного ракетного двигателя. Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22. №. 3. С. 385.
3. Тымкул Л. В., Тымкул В. М. Системы инфракрасной техники. СГГА, 2007.
4. Показеев К. В., Чаплина Т. О., Чашечкин Ю. Д. Оптика океана. МГУ, 2010.
5. Акименко Т. А., Горбунова О. Ю. Прохождение света сквозь аэрозольную среду. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2011. Вып. 5 ч. 3. С. 82–87.
6. Егоров А. Д., Потапова И. А., Ржонсницкая Ю. Б. Теория и эксперимент в области лидарного зондирования атмосферы. Вопросы радиометеорологии. Сборник статей, посвященный памяти В.Д.Степаненко. СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского. 2013. С.193–205. DOI: 10.13140/RG.2.1.2830.9924
7. Стешенко К. Н. и др. Математическое моделирование зависимости мощности излучения летательных аппаратов от угла наблюдения. Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2018. № 3 (26). С. 98–104.
8. Тимофеев Ю. М., Васильев А. В. Теоретические основы атмосферной оптики. СПб.: Наука, 2003. 474 с.
9. Wiscombe W. J. Improved Mie scattering algorithms. Applied optics. 1980. Vol. 19. No. 9. P. 1505–1509.
10. The HITRAN molecular spectroscopic database. <https://hitran.org>

Об авторах

Рязанцева Валентина Александровна – инженер-программист 3 категории дирекции оптико-электронных систем Акционерного общества «Научно-производственный комплекс Пеленгатор», Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Область научных интересов: исследование физических процессов в разряде, оптика.

Стешенко Кирилл Николаевич – начальник сектора общего ПО дирекции оптико-электронных систем акционерного общества «Научно-производственный комплекс Пеленгатор», Санкт-Петербург, Российская Федерация. Область научных интересов: дистанционные оптические методы исследования, газодинамические расчеты летательных аппаратов, пространственное моделирование физических процессов.

Никеев Дмитрий Дмитриевич – начальник отдела программного обеспечения дирекции оптико-электронных систем акционерного общества «Научно-производственный комплекс Пеленгатор», Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Область научных интересов: математическое моделирование физических процессов, генерация и распространение инфракрасного излучения.

Гаврилов Егор Валерьевич – заместитель генерального директора – заместитель генерального конструктора акционерного общества «Научно-производственный комплекс Пеленгатор», Санкт-Петербург, Российская Федерация. Область научных интересов: разработка оптико-электронных систем.

Mathematical simulation of aircraft background-target environment above sea level

Riazantceva V. A., Steshenko K. N., Nikeev D. D., Gavrilov E. V.

Joint Stock Company Research and Production Complex “Pelengator”, St. Petersburg, Russian Federation

The developed software model environment allows to estimate the power characteristics of background radiation. A method of this model implementation makes it possible to obtain solar radiation indicatrices taking into account scattered radiation from the water surface. The high level of versatility of the model environment enables us to make calculations for any aircraft under different conditions of the water surface in several spectral ranges.

Keywords: radiation simulation, aircraft radiation, computational research, radiation indicatrix

Information about the authors

Riazantceva Valentina Aleksandrovna – Software Engineer of the 3rd category, Directorate for Optoelectronic Systems, Joint Stock Company Research and Production Complex “Pelengator”, St. Petersburg, Russian Federation.

Science research interests: investigation of physical processes in discharge, optics.

Steshenko Kirill Nikolaevich – Head of General Software Sector, Directorate for Optoelectronic Systems, Joint Stock Company Research and Production Complex “Pelengator”, St. Petersburg, Russian Federation.

Science research interests: remote optical research methods, gas-dynamic calculations of aircraft, spatial modelling of physical processes.

Nikeev Dmitriy Dmitrievich – Head of Software Department, Directorate for Optoelectronic Systems, Joint Stock Company Research and Production Complex “Pelengator”, St. Petersburg, Russian Federation.

Science research interests: mathematical modelling of physical processes, generation and distribution of infrared radiation.

Gavrilov Egor Valerievich – Deputy General Director – Deputy General Designer, Joint Stock Company Research and Production Complex “Pelengator”, St. Petersburg, Russian Federation.

Science research interests: development of optoelectronic systems.