

УДК 621.384.3

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СИНТЕТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В ИК ОБЛАСТИ СПЕКТРА *

А.В. Зверев, Д.Е. Ипатов
ООО «Мотив НТ»

Физически корректные синтетические изображения трехмерных сцен в заданном диапазоне длин волн обладают высокой значимостью в решении ряда прикладных задач. В основе формирования таких данных лежит моделирование физических взаимодействий, в том числе распространения электромагнитного излучения в пространстве сцены. В данной работе представлены результаты разработки механизма трассировки лучей в программном комплексе моделирования трехмерных сцен. Предложенный алгоритм расчета излучательного теплопереноса программно реализован для исполнения на графических процессорах в виде шейдеров и позволяет учесть сигнал от множества тел на сцене. Каждый испущенный луч, имитирующий распространение электромагнитной волны, претерпевает не более двух взаимодействий с телами и вносит добавку к собственному излучению наблюдаемой площадки в виде числа фотонов в заданном диапазоне длин волн и телесном угле. Для оценки разработанного алгоритма был предложен ряд модельных сцен, на которых было проведено сравнительное исследование при моделировании ИК области спектра. Учет механизмов излучательного теплопереноса при формировании картин радиометрических величин позволяет качественно улучшить получаемые изображения и вносит значительный вклад в фоновый сигнал.

Ключевые слова: моделирование, гиперспектральный симулятор, графический процессор, трассировка лучей, ИК-спектр, излучательный теплоперенос.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-4-7-14

Введение

Подготовка физических данных в виде изображений виртуальной сцены в заданной области спектра представляет большой интерес в ряде исследовательских и прикладных задач ввиду значительной сложности, а, зачастую и, невозможности их получения на основе натурных исследований. Это направление получило общее название гиперспектральная отрисовка изображений, в зарубежной литературе известное как Hyperspectral Imaging, HSI [1].

Симуляторы гиперспектральных данных выполняют расчет физически корректного взаимодействия электромагнитного излучения в широком диапазоне длин волн, обычно, от ультрафиолета до длинноволнового участка ИК излучения, а результаты расчета являются основой для подготовки правдоподобных характерных сигналов различных объектов. Физически корректные данные с широким динамическим диапазоном величин используются в модельных исследованиях, например, в задаче обнаружения болезней растений в сельском хозяйстве [2], обнаружения и раннего предупреждения лесных пожаров [3] или в исследованиях, направленных на задачи оборонной промышленности [1].

Основу симулятора гиперспектральных данных составляет моделирование физических взаимодействий, в том числе, электромагнитного излучения. В общем

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90079.

случае, моделирование распространения электромагнитного излучения в пространстве представляет собой случай решения задачи проверки пересечения двух объектов. Один из способов решения данной задачи заключается в применении трассировки лучей, реализованного в разработанном программном комплексе [4].

Первым шагом в трассировке лучей является их формирование на модельной сцене. В программном комплексе лучи испускаются на сцену из точки наблюдения в направлениях, задающихся с применением псевдослучайного генератора чисел. При распространении по виртуальному пространству из ансамбля тел, каждый из испущенных лучей может претерпевать различные изменения свойств. Взаимодействие луча со сценой, например, столкновение с телом, прохождение через тело или отсутствие взаимодействия луча со сценой по заданным критериям, приводит к вызову одной из предварительно подготовленных процедур. Поскольку в данном трассировщике лучей используется алгоритм трассировки пути, то направления распространения лучей по сцене обладают стохастикой, поэтому каждый луч претерпевает собственное, уникальное число и виды взаимодействий, которые нельзя предположить заранее и заложить в основу математической модели. Результат взаимодействий определяется в обратном порядке – от последнего взаимодействия к источнику, откуда луч вышел, таким образом формируя сигнал на точке наблюдения.

В ранних работах [4, 5] были представлены результаты применения алгоритма трассировки лучей для отрисовки сцены в видимом спектре. Расчет видимой области спектра в программном комплексе имеет исключительно демонстрационный характер и не предназначен для получения каких-либо количественных радиометрических величин. Моделирование ИК спектра качественно изменяет вид получаемой информации, поскольку мы начинаем исследовать сигнал, источником которого являются наблюдаемые тела. Каждое твердое тело, жидкость или газ с температурой выше абсолютного нуля является источником теплового сигнала, который формирует один из важнейших компонентов фоновой засветки – механизм излучательного теплопереноса.

Цель данной работы – разработка алгоритма расчета механизма излучательного теплопереноса в программном комплексе моделирования ИК сцен. В работе предложен алгоритм трассировки пути, учитывающий вклад ближайших тел в излучение наблюдаемой площадки. На основе заранее подготовленных модельных сцен был проведен качественный анализ результатов расчета с учетом разработанного алгоритма.

1. Алгоритм расчета излучательного теплопереноса

Одной из отличительных особенностей программного комплекса является аппаратное ускорение расчетов на основе графических процессоров (ГП). Инструкции для исполнения на ГП являются результатом компиляции написанных на специальных языках программ, называемых *шейдерами*. Унифицированная архитектура современных ГП позволяет в шейдерах выполнять произвольные математические расчеты, не привязанные к решению задач визуализации.

В настоящее время к набору высокоскоростных ядер ГП общего назначения добавляют вычислительные блоки, обеспечивающие аппаратное ускорение задачи *трассировки лучей*. Самой важной их особенностью является возможность рекурсивного вызова процедур из шейдеров и аппаратное ускорение ряда алгоритмов, в том числе процедуры поиска точки пересечения луча с телом на сцене.

Реализованный алгоритм отрисовки сцены методом трассировки пути в ИК спектре начинается с *шейдера формирования лучей*. *Шейдер формирования лучей* вызывается для каждого пикселя фокальной плоскости моделируемого фотопри-

емного устройства (ФПУ), на которую будет падать итоговое излучение от тел на сцене. Для этого из точки наблюдения на сцену через сетку фрагментов фокальной плоскости отправляется набор лучей, причем каждый луч проходит не через центр фрагмента, а с небольшим псевдослучайным колебанием относительно него. Подобный подход позволяет избавиться от проблемы алиасинга изображения и сформировать более естественные переходы на гранях резко отличающихся по своим свойствам объектов сцены.

Исходящие из точки наблюдения лучи распространяются по сцене в соответствии с заданным полем зрения оптической системы и могут претерпевать различные виды взаимодействий с телами. Моделирование взаимодействия лучей с телами выполняется *шейдером ближайшего столкновения*.

В ИК области спектра сначала необходимо определить телесный угол Ω_{OS} , в котором элемент фокальной плоскости ФПУ получает поток фотонов с наблюдаемой поверхности S_{OS} в заданном интервале длин волн. Для этого из известного поля зрения оптической системы FOV_{optics} в приближении излучения в прямом круговом конусе мы получаем телесный угол, в котором излучает наблюдаемая площадь поверхности тела:

$$\Omega_{OS} = 2\pi(1 - \cos(FOV_{optics} / 2)). \quad (1)$$

Полученные величины помещаются во временное хранилище для последующих вычислений. Результатом расчета *первого взаимодействия* сформированного луча со сценой является число фотонов, излучаемых с единицы площади в секунду в данном телесном угле в данном интервале длин волн с учетом отклонения наблюдаемой площадки от направления распространения луча из элемента сенсора на угол θ_{OS} :

$$N_{phd0} = \Omega_{OS} \cdot \cos(\theta_{OS}) \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} L_B(\lambda) d\lambda, \quad \frac{\text{фотонов}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}, \quad (2)$$

где L_B – спектральная плотность энергетической яркости по Планку. Интенсивность в виде числа фотонов, достигших элемент сенсора, можно получить путем произведения N_{phd0} на площадь элемента S_d .

Второе взаимодействие моделируемого луча с телами на сцене вызывает алгоритм расчета вклада окружения N_{phi} в излучение площади поверхности, определенной на первом взаимодействии:

$$N_{phd} = N_{phd0} + \sum_1^N N_{phi}. \quad (3)$$

Для учета излучения окружающих тел на наблюдаемой площадке S_{OS} строится единичная полусфера с центром в точке пересечения первого луча, на поверхности которой задано равномерно распределенное облако точек. Число точек определяет максимальное число учтенных источников излучения и минимальный размер элемента телесного угла Ω_{prim} , в котором сигнал дополнительного источника вносит вклад.

Каждый луч, проходящий из центра полусферы через точку на ее поверхности, может совершить столкновение с различными излучающими площадками. Чтобы определить, какая часть излучения внешнего источника формирует отражатель-

ную добавку к сигналу площади S_{OS} , нам необходимо рассчитать угловой коэффициент K_f с учетом двулучевой функции отражательной способности Ламбертовской поверхности, телесного угла θ_{prim} и угла между нормалью к площадке источника излучения и направлением распространения луча θ_{prim} :

$$K_f = \frac{\Omega_{prim} \cdot \cos(\theta_{prim})}{\pi \cdot \Omega_{OS} \cdot \cos(\theta_{OS})}, \cos(\theta_{OS}) > 0. \quad (4)$$

С учетом K_f мы можем определить ту часть излученных этим примитивом фотонов, которые формируют отражательную добавку к результату расчета первого взаимодействия:

$$N_{phi} = K_f \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} L_B(\lambda)(1 - \epsilon(\lambda)) d\lambda, \quad (5)$$

где ϵ – коэффициент серости материала площадки S_{OS} . Таким образом, мы можем определять вклад в сигнал наблюдаемой площадки путем многократной выборки источников излучения по направлениям, которые определены однородным распределением в полусфере.

Если луч, испущенный из точки наблюдения на сцену, не выполнил какого-либо взаимодействия со сценой, то будет вызвана процедура *шейдера промаха*. В данном варианте реализации программного симулятора, шейдер промаха вернет нулевое число излученных фотонов и завершит трассировку лучей.

2. Результаты расчета ИК сцен с применением трассировки пути

Для исследования разработанного трассировщика ИК лучей была поставлена серия модельных экспериментов на компьютере под управлением ОС Debian 11, с процессором Intel Core i9 12900K и ГП Nvidia RTX 3080 12G. Апробация ИК трассировщика пути была проведена на основе двух сцен: модель корнеллской коробки и модель человека на фоне кирпичной стены [4, 5].

Модель корнеллской коробки представляет собой классическую сцену для оценки качества трассировщиков лучей в видимой области спектра. Она состоит из прямоугольного помещения, в котором для каждой грани поставлены в соответствии в различающиеся по свойствам материалы. На верхней грани размещается источник освещения, на полу располагается несколько тел произвольной формы.

Для каждого тела задан диффузный материал, обладающей определенной отражательной способностью в видимом спектре, которая определяет его цвет, и характеристиками коэффициента серости и температуры в ИК области. Сцена в видимой области спектра без моделирования теней и остальных элементов представлена на рис. 1, а. На этом изображении ИК характеристики различающихся материалов обозначены в виде подписей, где верхнее значение соответствует коэффициенту серости в ИК области спектра, а нижнее – температуре материала тела.

Добавление трассировки лучей в видимом спектре (рис. 1, б) формирует карту теней от единственного источника освещения, поэтому вблизи ярко раскрашенных объектов или между телами можно наблюдать формирование затемненных областей.

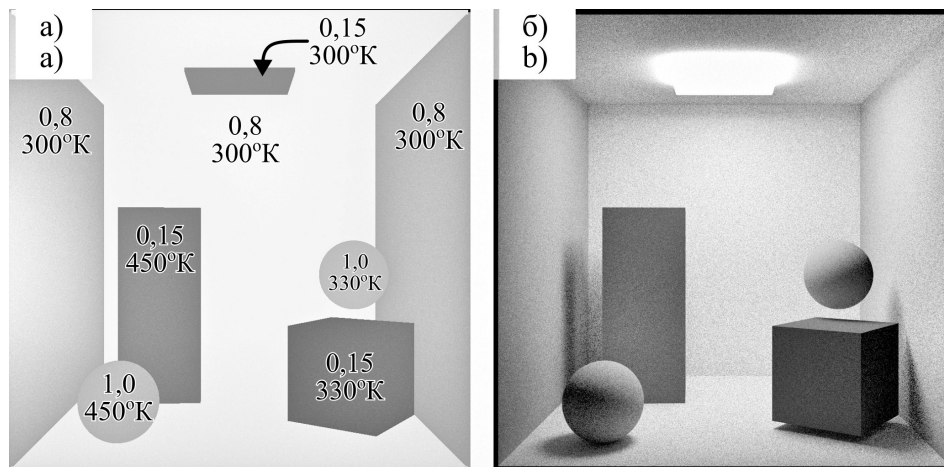


Рис. 1 – Изображение сцены корнеллской коробки без учета (а) и с учетом трассировки лучей (б). ИК характеристики материалов помечены подписью, где в верхней строке указан коэффициент серости, а в нижней – температура в градусах Кельвина

Fig. 1 – A Cornell box scene image without (a) and using raytracing (b). The IR materials characteristics are marked up with a signature, where top line is a greyness value and bottom line is a temperature in Kelvin degrees

Вид данной сцены в ИК спектре без трассировки лучей (рис. 2, а) позволяет определить наиболее яркие участки благодаря сильным температурным различиям. Включение трассировки пути обеспечивает учет излучательного теплопереноса по сцене (рис. 2, б), что формирует области локального нагрева вокруг горячих тел и участки тени, куда излучение не попадает. Подобное решение ухудшает контрастность теплового изображения и делает грани объектов более размытыми.

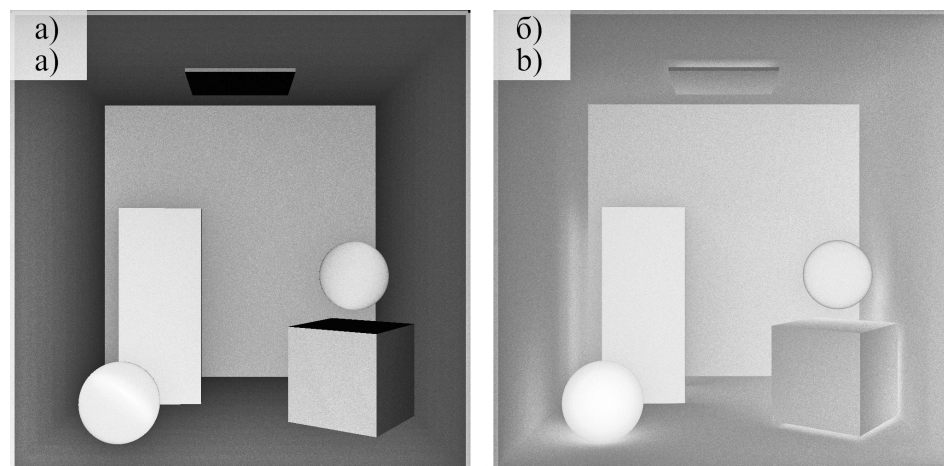


Рис. 2 – Изображение сцены корнеллской коробки в ИК диапазоне от 3 до 5 мкм без (а) и с моделированием распространения излучения (б)

Fig. 2 – A Cornell box scene image in the IR from 3 to 5 μm without (a) and with (b) radiation propagation modeling

На второй модельной сцене (рис. 3) представлена трехмерная модель человека на фоне кирпичной стены с воссозданным температурным профилем на основе эмпирических данных [4].

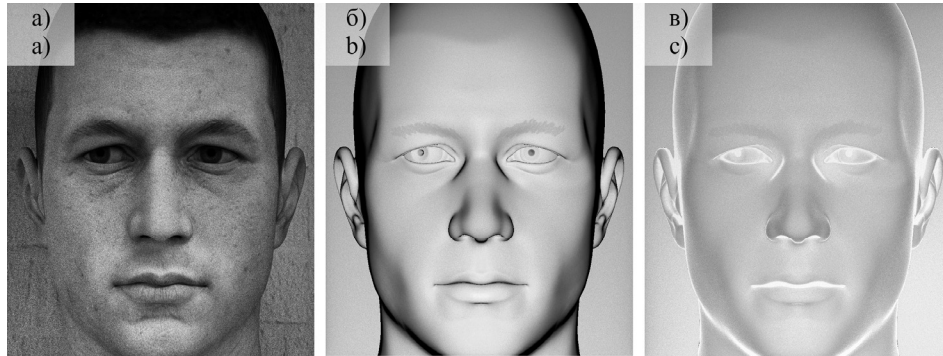


Рис. 3 – Изображение сцены с моделью человека в видимом спектре (а), в ИК спектре без учета излучательного теплопереноса (б) и с учетом (в)

Fig. 3 – A human model scene in visible spectrum (a), IR spectrum without (b) and with radiative heat transfer (c)

Учет излучательного теплопереноса сформировал ряд новых особенностей изображения. Например, область лица вблизи глаз, губ и ушей стали более яркими, а температурный градиент к краю лица с данного ракурса стал менее резким.

Заключение

В данной работе представлены разработки механизма трассировки лучей методом трассировки пути для моделирования трехмерных ИК сцен в разработанном программном комплексе. Предложенный алгоритм излучательного теплопереноса позволяет учесть вклад множества источников излучения на сцене в итоговый сигнал, формирующий отклик на материале фотоприемного устройства. Применение трассировки лучей методом трассировки пути для моделирования распространения электромагнитных волн позволило учесть механизм излучательного теплопереноса в ИК области спектра что качественно улучшило картины сцены. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта РФФИ 20-37-90079.

ЛИТЕРАТУРА

1. An end-to-end hyperspectral scene simulator with alternate adjacency effect models and its comparison with CameoSim / U.A. Zahidi, P.W.T. Yuen, J. Piper, P.S. Godfree // Remote Sensing. – 2020. – Vol. 12 (1). – P. 74. – DOI: 10.3390/rs12010074.
2. Чешкова А.Ф. Обзор современных методов обнаружения и идентификации болезней растений на основе анализа гиперспектральных изображений // Вавиловский журнал генетики и селекции. – 2022. – Т. 26, № 2. – С. 202–213. – DOI: 10.18699/VJGB-22-25.
3. Скуднева О.В., Коптев С.В., Иванцов С.В. Навигационно-пилотажная система беспилотного летательного аппарата для мониторинга лесных пожаров // Известия вузов. Лесной журнал. – 2020. – № 6. – С. 194–203. – DOI: 10.37482/0536-1036-2020-6-194-203.
4. Зверев А.В., Ипатов Д.Е. Моделирование взаимодействия излучения со средой в программном комплексе симуляции трехмерных динамических сцен // Успехи прикладной физики. – 2023. – Т. 11, № 5. – С. 433–445. – DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-5-433-445.

5. Зверев А.В., Ипатов Д.Е. Модель динамической ИК сцены с асинхронной регистрацией излучения // Наноиндустрия. – 2023. – Т. 16, № S9-1 (119). – С. 234–242. – DOI: 10.22184/1993-8578.2023.16.9s.234.242.
6. Zverev A.V., Ipatov D.E. Complexities in data stream generation of model 3D scenes for IR time differentiating sensors // 2022 IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – IEEE, 2022. – P. 15–19. – DOI: 10.1109/EDM55285.2022.9855059.

FEATURES OF RADIOMETRIC QUANTITIES SYNTHETIC IMAGES FORMATION IN THE IR REGION OF THE SPECTRUM

Zverev A.V., Ipatov D.E.
Motiv NT LLC, Moscow, Russia

Physically correct synthetic images of 3D scenes in a given wavelength range are of great importance in solving some applied problems. Such data generation is based on a physical interactions modelling, including electromagnetic radiation propagation in a scene space. This paper presents the results of a ray tracing mechanism development in a 3D scene modeling software package. An algorithm for calculation radiative heat transfer that allows accounting a radiation from multiple bodies in the scene is proposed. In order to be executed on graphical processors it is implemented in form of shader programs. Each emitted ray, which simulates the propagation of an electromagnetic wave, undergoes no more than two interactions with bodies and makes an addition to an observed area radiation in a number of photons given wavelengths range and solid angle. To evaluate the algorithm a number of model scenes were proposed, on which comparative study was carried out in case of infrared region modeling. As results show, taking into account the mechanisms of radiative heat transfer allow for qualitative improvement of the resulting images and makes a significant contribution to the background signal.

Keywords: radiative heat transfer, modeling, graphical processing unit, infrared, ray tracing

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-4-7-14

REFERENCES

1. Zahidi U.A., Yuen P.W.T., Piper J., Godfree P.S. An end-to-end hyperspectral scene simulator with alternate adjacency effect models and its comparison with CameoSim. *Remote Sensing*, 2020, vol. 12 (1), p. 74. DOI: 10.3390/rs12010074.
2. Cheshkova A.F. Obzor sovremennykh metodov obnaruzheniya i identifikatsii boleznei rastenii na osnove analiza giperspektral'nykh izobrazhenii [A review of hyperspectral image analysis techniques for plant disease detection and identification]. *Vavilovskii zhurnal genetiki i selektsii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding*, 2022, vol. 26, no. 2, pp. 202–213. DOI: 10.18699/VJGB-22-25.
3. Skudneva O.V., Koptev S.V., Ivantsov S.V. Navigatsionno-pilotazhnaya sistema bespilotnogo letatel'nogo apparata dlya monitoringa lesnykh pozharov [Navigation and piloting system of unmanned aerial vehicle for forest fires monitoring]. *Izvestiya vuzov. Lesnoi zhurnal = Bulletin of higher educational institutions. Forestry journal*, 2020, no. 6, pp. 194–203. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-6-194-203.
4. Zverev A.V., Ipatov D.E. Modelirovanie vzaimodeistviya izlucheniya so sredoi v programmnom komplekse simulyatsii trekhmernykh dinamicheskikh stsen [An environmental radiation interaction modeling in dynamic scene simulation software]. *Uspekhi prikladnoi fiziki = Advances in Applied Physics*, 2023, vol. 11, no. 5, pp. 433–445. DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-5-433-445.
5. Zverev A.V., Ipatov D.E. Model' dinamicheskoi IK stseny s asinkhronnoi registratsiei izlucheniya [Model of a dynamic IR scene with asynchronous radiation registration]. *Nanoindustrialiya = Nanoindustry*, 2023, vol. 16, no. S9-1 (119), pp. 234–242. DOI: 10.22184/1993-8578.2023.16.9s.234.242.
6. Zverev A.V., Ipatov D.E. Complexities in data stream generation of model 3D scenes for IR time differentiating sensors // 2022 IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). IEEE, 2022, pp. 15–19. DOI: 10.1109/EDM55285.2022.9855059.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Зверев Алексей Викторович – родился в 1975 году, канд. физ.-мат. наук, звания нет, Руководитель отдела СБИС-разработки, ООО «Мотив НТ». Область научных интересов: разработка интегральных схем для сбора и анализа данных. Опубликовано 110 научных работ. (Адрес: 630102, Россия, Новосибирск, Большевицкая, 35. E-mail: zverev@motivnt.ru).

Zverev Alexey Victorovich – (b. 1975), Candidate of Science (Phys.&Math.), Lead of VLSI-development department, Motiv NT. Research Interests: VLSI-development for signal processing. He is author of 110 scientific papers. (Address: 630102, Russian Federation, Novosibirsk, Bolshevistskaya, 35. E-mail: zverev@motivnt.ru).



Ипатов Дмитрий Евгеньевич – родился в 1995 году, завершил обучение в аспирантуре Института физики полупроводников им А.В. Ржанова (ИФП СО РАН) в 2022 году, в настоящее время работает в ООО «Мотив НТ» на должности ведущего инженера-электроника СБИС. Область научных интересов: схемотехника, разработка визуализаторов трехмерных сцен. Опубликовано 7 научных работ. (Адрес: 630102, Россия, Новосибирск, Большевицкая, 35. E-mail: dipatov@motivnt.ru).

Ipatov Dmitriy Evgen'evich (b. 1995) – completed his postgraduate studies at the A.V. Rzhanov Institute of Semiconductor Physics (ISP SB RAS) in 2022, currently works at Motiv NT LLC as a leading VLSI electronics engineer. His research interests are currently focused on circuit design, development of 3D scene visualizers. He is author of 7 scientific papers. (Address: 630102, Russian Federation, Novosibirsk, Bolshevistskaya, 35. E-mail: dipatov@motivnt.ru).

Статья поступила 29 октября 2024 г.
Received October 29, 2024

To Reference:

Zverev A.V., Ipatov D.E. Osobennosti formirovaniya sinteticheskikh izobrazhenii radiometricheskikh velichin v IK oblasti spektra [Features of radiometric quantities synthetic images formation in the IR region of the spectrum]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2024, no. 4 (65), pp. 7–14. DOI: 10.17212/1727-2769-2024-4-7-14.