

УДК 535.24

УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНО-ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ОТРАЖЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

ДЖАМАЛЬ СААД ОМЕР*, И.М. ЦИКМАН, Ю.В. БЕЛЯЕВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко
Курчатова, 7, Минск, 220108, Беларусь

Поступила в редакцию 16 мая 2012

Описаны методы проведения экспериментальных исследований спектрально-поляризационных параметров отраженного от поверхности различных материалов излучения от видимого до среднего инфракрасного (ИК) диапазона. Представлены методы обработки полученных данных. Приведены результаты определения степени линейной поляризации отраженного материалами излучения.

Ключевые слова: спектр отражения, степень линейной поляризации, спектрорадиометр, углы визирования, гониометр.

Введение

Снижение заметности различных объектов и скрытие информации об их свойствах и местоположении является важной задачей противодействия технической разведке (ограничения информационных утечек). Дальнейшее развитие средств и методов оптической диагностики требует учета различных параметров оптического поля объекта и окружающего его фона в широкой (от видимой до средней ИК) области спектра. Одной из важнейших характеристик, наряду со спектрально-энергетическими, является спектральная зависимость степени линейной поляризации отраженного солнечного излучения различных образцов и фона. В современных условиях наружного наблюдения большое значение имеет угловая зависимость параметров излучения, т.е. значения параметров оптического поля для разных фазовых углов, измеряемых между потоком падающего излучения и направлением визирования.

В целях снижения заметности объектов в видимой области спектра широко применяются различные маскировочные сети. Однако влияние сеток на поляризационные характеристики отраженного объектом излучения и их спектрально-угловые зависимости слабо изучены. В данной работе исследовалось влияние сеток различного состава с различным шагом ячейки на спектрально-поляризационные параметры оптического поля некоторых материалов подложки.

Методика эксперимента и обработки данных

Экспериментальные образцы, параметры оптического поля отражения которых исследовались, изготавливались следующим образом. Слой сетки укладывался поверх подложки, образуя двухслойный комбинированный материал. В качестве подложки использовались окрашенная металлическая пластина и поверхность, образованная хаотично расположенными кусочками измельченного лаврового листа, скрепленными связующим компонентом на прямоугольном основании. Отдельно проводились измерения образца из пластика, гладкая поверхность которого окрашена в зеленый цвет, а также – идентично окрашенного пластика, расчерченного в виде сетки с шагом 2–3 мм.

Использовались сетки четырех видов: 1) матерчатая маскировочная сеть темно-зеленого цвета с размером ячейки 2,5 мм и отверстиями порядка 1мм (две третьих площади ячейки – ткань); 2) сеть со структурой, что в первом случае, но цвета хаки с комбинацией трех цветов (светлого и темного зеленого, коричневого); 3) капроновая сеть зеленого цвета с размером ячейки 2–2,5 мм; 4) металлическая сетка с размером ячейки 2,5–3 мм.

Регистрация спектрально-поляризационных параметров оптического поля, отраженного от поверхности комбинированных материалов, проводилась с помощью спектрорадиометра ПСР-02. Спектрорадиометр ПСР-02 [1] имеет общий проекционный объектив и два полихроматора с детекторами, регистрирующими спектры излучения соответственно в диапазонах 0,35–1,05 мкм и 1,05–2,5 мкм. При измерении яркости спектрорадиометр регистрирует темновые спектры при закрытой крышке объектива, а затем полезные (за вычетом темновых) сигналы V_λ по нескольким (10–100) спектрам в серии. Спектрорадиометр ПСР-02 регистрирует сигналы V_λ каждого спектрального канала линейных приемников излучения в единицах аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Приемник полихроматора диапазона 0,35–1,05 мкм имеет 3648 каналов, приемник полихроматора ИК-диапазона 1,05–2,5 мкм – 256 каналов. С помощью собственного программного обеспечения зарегистрированные спектры усредняются по количеству спектров в серии измерениям и пересчитываются в единицы спектральной плотности энергетической яркости $I(\lambda)$. Пересчет в энергетические единицы осуществляется по ранее проведенной калибровке спектрорадиометра на аккредитованном органе Госстандарта РФ метрологическом комплексе «Камелия-М».

При определении степени линейной поляризации излучения перед проекционным объективом спектрорадиометра с помощью специального крепления устанавливается поляризационная насадка на основе призмы Глана-Тэйлора [2]. Призма Глана-Тейлора из кальцита (исландский шпат) работает как поляризатор до 3 мкм, что позволяет использовать ее во всем рабочем спектральном диапазоне спектрорадиометра 0,35–2,5 мкм. Поляризационная насадка имеет возможность поворота вокруг оптической оси прибора.

Для изучения спектрально-поляризационных параметров оптического поля, отраженного от поверхности комбинированных материалов, спектрорадиометр устанавливался на вращающейся вокруг образца платформе гониометрической установки [3] таким образом, что его объектив располагался в плоскости падающего и отраженного от образца излучения. Образец освещался галогенной лампой КГМ-250. Коллимированный пучок света галогенной лампы направлялся под углом 45° к нормали поверхности образца таким образом, чтобы освещаемая поверхность превышала пространственное (геометрическое) поле зрения спектрорадиометра. Направление визирования, измеряемое от нормали к поверхности образца менялось от 0° до 55°, при этом регистрировались спектры для углов визирования 0°, 30°, 45°, 55°.

Спектральный поток отраженного от образцов излучения для каждого угла визирования измерялся при трех положениях поляризационной насадки – 0°, 45°, 90° по отношению к начальной плоскости поляризации призмы, соответственно яркости этих потоков – $I_0(\lambda)$, $I_{45}(\lambda)$ и $I_{90}(\lambda)$. Измеренная степень поляризации $P_{изм}(\lambda)$ отраженного от образца излучения вычислялась по формуле

$$P_{изм}(\lambda) = \frac{\sqrt{(I_{90}(\lambda) - I_0(\lambda))^2 + (I_0(\lambda) + I_{90}(\lambda) - 2I_{45}(\lambda))^2}}{(I_0(\lambda) + I_{90}(\lambda))} \quad (1)$$

Данная формула позволяет не учитывать ориентацию оси поляроида относительно плоскости максимальной поляризации отраженного излучения и, таким образом, исключить погрешности определения степени поляризации, связанные с неточностью совмещения плоскости поляризации призмы (насадки) и плоскости максимальной поляризации отраженного излучения.

При определении спектрополяризационных характеристик образцов необходимо учитывать поляризующую способность спектрорадиометра ПСР-02 (рис. 1). Поляризующая способность определялась с помощью источника деполаризованного излучения – фотометрической сферы. При этом спектрорадиометром регистрировался спектральный поток излучения сферы $I(\lambda)$ при двух положениях поляризационной насадки – 0° и 90° по отношению к оптиче-

ской оси призмы. Поляризующая способность полихроматоров спектро радиометра $P_{\text{ПСР}}(\lambda)$ во всем рабочем спектральном диапазоне определялась по формуле:

$$P_{\text{ПСР}}(\lambda) = (I_0(\lambda) - I_{90}(\lambda)) / (I_0(\lambda) + I_{90}(\lambda)). \quad (2)$$



Рис. 1. Поляризующая способность спектро радиометра ПСР-02

Спектральная зависимость степени линейной поляризации $P_{\text{образец}}(\lambda)$ отраженного от исследуемых образцов излучения находилась вычитанием поляризующей способности спектро радиометра:

$$P_{\text{образец}}(\lambda) = P_{\text{изм}}(\lambda) - P_{\text{ПСР}}(\lambda). \quad (3)$$

По полученным значениям $P_{\text{образец}}(\lambda)$ для различных углов визирования строились и анализировались спектральные зависимости степени линейной поляризации отраженного излучения.

Анализ погрешностей показал, что относительная расширенная неопределенность измерения яркости излучения $U_{\text{отн}}(I_\lambda)$ и не превышает 5% (без поляризационной насадки в оптической системе полихроматора видимого диапазона) и 10% для ИК-полихроматора. Относительная расширенная неопределенность измерения степени поляризации в видимой области $U_{\text{отн}}(P_\lambda) \leq 6\%$ и для среднего ИК-диапазона $U_{\text{отн}}(P_\lambda) \leq 12\%$. Спектральные данные приведены для диапазона 0,38–2,3 мкм, так как на границах спектрального диапазона приемников спектро радиометра погрешность измерений превышает указанные значения.

Обсуждение результатов

Значения степени линейной поляризации излучения, отраженного от образцов; окрашенной металлической пластины, и растительной подложки для различных углов визирования представлены на рис. 2.

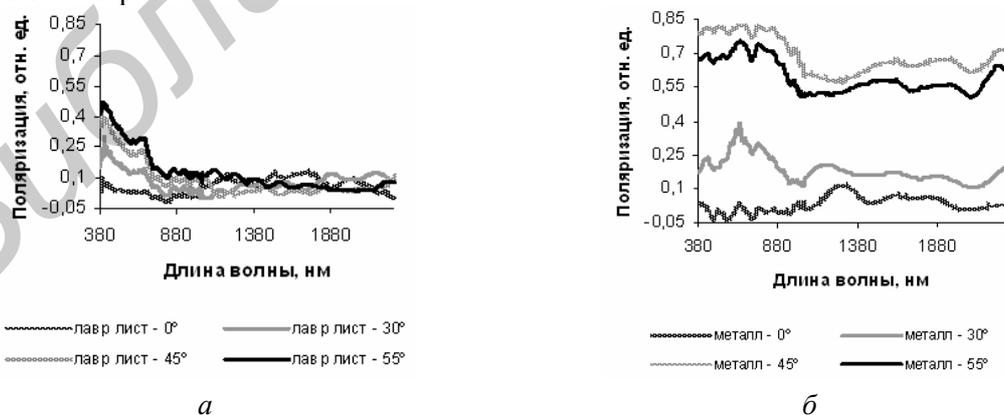


Рис. 2. Степень линейной поляризации отраженного излучения образцов для различных углов визирования: а – подложка 1 (лавровый лист); б – подложка 2 (металлическая пластина)

Как видно из рис. 2, при маскировке объектов с окрашенной металлической поверхностью на фоне растительности необходимы дополнительные меры для снижения степени поляризации отраженного излучения, особенно в красной и ИК-областях спектра. При анализе спек-

тральных зависимостей поляризации отраженного излучения образцов на основе подложки 1 (с кусочками лаврового листа) и различным сеточным покрытием (сеть 1 – сеть 4) было установлено: 1) отсутствие поляризации отраженного излучения в диапазоне 1,0–2,3 мкм для всех рассматриваемых углов наблюдения (полученные значения находятся в границах неопределенности измерения степени поляризации); 2) в видимом и ближнем ИК диапазонах (0,38–1,0 мкм) с ростом угла наблюдения растет и степень линейной поляризации даже при переходе через «зеркальный» угол, что характерно для образцов на основе растительности и также объясняется некоторой хаотичностью расположения в поле зрения спектрорадиометра различных пластинок – фрагментов лаврового листа; 3) сетки 1, 2, 3 меняют спектральную зависимость степени линейной поляризации исходной подложки, при этом сетки 1 и 2 (на основе синтетической ткани) значительно снижают степень линейной поляризации излучения отраженного от подложки в области спектра 0,64–1,0 мкм, а сетка 3 – в области 0,4–0,45 мкм.

На рис. 3 представлены спектральные зависимости поляризации отраженного излучения для комбинированного материала на основе подложки 2 (окрашенная металлическая пластина).

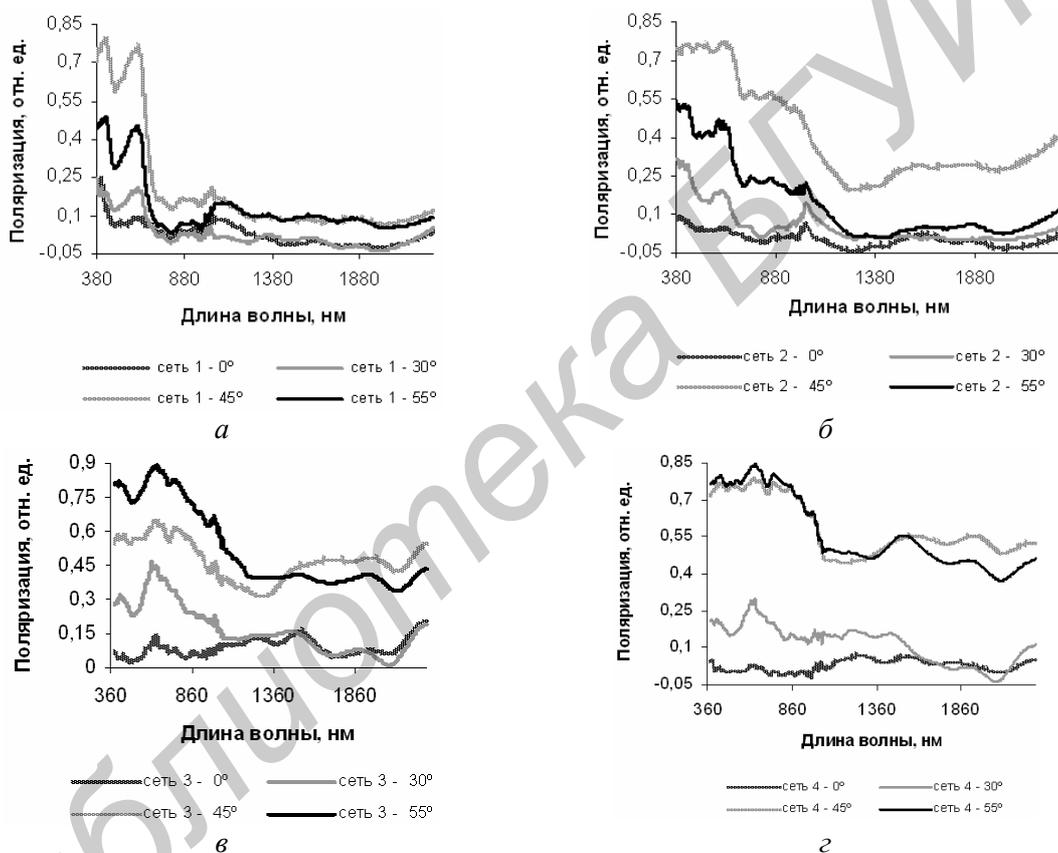


Рис. 3. Степень линейной поляризации отраженного излучения от комбинированного материала на основе металла и сеток: *а* – металлическая пластина с сетью 1; *б* – металлическая пластина с сетью 2; *в* – металлическая пластина с сетью 3; *г* – металлическая пластина с сетью 4

Анализ спектральных данных для образцов на основе подложки 2 и различного сеточного покрытия показал: 1) с ростом угла наблюдения растет степень линейной поляризации, как подложки 2 (рис. 2, *а*), так и подложки 2 с сеточным покрытием (рис. 3); 2) сетки 1, 2 и 3 снижают степень линейной поляризации излучения, отраженного от металлической пластины, в красной и ИК-областях спектра – 0,65–2,3 мкм, металлическая сеть 4 практически не меняет поляризацию излучения подложки 2; 3) максимальное снижение степени поляризации в области 0,65–2,3 мкм (особенно в ИК-диапазоне) наблюдается у образцов с применением сеток 1 и 2 (на основе синтетической ткани), что можно объяснить их высокой экранирующей способностью и деполаризующим свойством для длин волн свыше 0,65 мкм при значительных углах наблюдения 45° и 55°; 4) для сеток 1 и 2 характерно максимальное значение степени поляризации для «зеркального» угла визирования – 45°, как и у окрашенной металлической пластины.

Из проведенных исследований следует, что экранирующие свойства и снижение степени линейной поляризации значительно больше у сеток с меньшим размером ячейки.

Сетки 1 и 2 изготовлены из одинакового материала, но имеют различную окраску. Полосы поглощения красителя вносят свой вклад в различие хода спектральной зависимости степени линейной поляризации.

Анализ спектральных зависимостей степени линейной поляризации излучения, отраженного от образцов из окрашенного пластика (расчерченная и гладкая), при разных углах наблюдения показал, что при одинаковых углах наблюдения разница в значениях степени поляризации излучения двух образцов пластмассы незначительна и практически не превышает неопределенности измерений, что объясняется малой толщиной нанесенных линий и достаточно крупным размером ячеек, размер ячеек превышает толщину нанесенных линий в 25–30 раз, шероховатость и диффузность поверхности при такой разметке практически не возрастает, а эффекты регулярной структуры незначительны из-за относительно крупного шага размеченной сетки.

Заключение

Максимальные экранирующие свойства со снижением степени линейной поляризации в области спектра 0,38–2,3 мкм наблюдаются у сеток с минимальным (1,0 мм) размером отверстия и большей площади тканевой основы. Наибольшая эффективность таких сеток наблюдается после 0,6 мкм и максимальна в области от 1,0 до 2,3 мкм. В более коротковолновой области спектра эффективность таких сеток меньше. Сетки с шагом более 3 мм не вносили в условиях данного эксперимента какое-либо значительное влияние на значения степени линейной поляризации. Дальнейшего исследования требует влияние различных красителей на поляризующие свойства сеточных материалов. В ИК-области следует отметить деполаризующее свойство экранов с поверхностью, образованной хаотично расположенными кусочками высушенной растительности. Нанесение штриховой сетки на гладкую поверхность пластика тонкими линиями (0,2 мм) с шагом 3 мм ощутимых результатов не принесло.

ANGULAR DISTRIBUTION OF SPECTRAL-POLARIZATION PARAMETERS OF RADIATION REFLECTED

JAMAL SAAD OMER, I.M. TSYKMAN, Y.V. BELYAEV

Abstract

The methods of experimental investigations of reflected from the surface of various materials spectral-polarization parameters are described. The methods of data processing are present. The results of determining the degree of linear polarization of the reflected radiation materials are shown.

Список литературы

1. Беляев Б.И., Беляев Ю.В., Нестерович Э.И. и др. // Приборы и техника эксперимента. 2010. №3. С. 127–132.
2. Беляев Ю.В., Дж. Саад Омер, Цикман И.М. // Докл. БГУИР. 2011. №1(55). С. 75–79.
3. Домарацкий А.В., Казак А.В., Курикина Т.М. и др. // Приборостроение – 2010: Материалы 3-й Международной науч.-техн. конф., 10–12 ноября. 2010. С. 140–141.