

УДК 535.24

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТЕЙ РАЗЛИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ДИСТАНЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ

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

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

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

Поступила в редакцию 28 января 2011

Описаны методы проведения экспериментальных исследований отражательных характеристик различных материалов и методы обработки полученных данных. Приведены результаты определения коэффициентов спектральной яркости материалов, степени линейной поляризации отраженного материалами излучения.

Ключевые слова: спектр отражения, коэффициент спектральной яркости, степень поляризации, гониометр, спектро radiометр.

Введение

Наряду с задачами распознавания объектов дистанционными оптическими методами существует и обратная задача – их маскировки. Нахождение информативных параметров излучения, выявление и снижение контрастов различными методами для затруднения распознавания является важной задачей защиты информации о свойствах и расположении объектов. При маскировке используют поглотители электромагнитного излучения и материалы-имитаторы спектрального распределения отраженного излучения. Большинство используемых поглотителей электромагнитного излучения и материалов-имитаторов, как правило, поглощают электромагнитную энергию в узких полосах радиочастотного диапазона. Поглотитель электромагнитного излучения, удовлетворяющий современным требованиям, должен быть широкополосным и эффективным как в радиочастотном, так и в видимом и инфракрасном (ИК) диапазонах длин волн. Для разработки новых маскировочных материалов исследовались спектры отражения различных природных и искусственных объектов.

Методика эксперимента и обработки данных

Лабораторные спектральные измерения проводились на гониометрической установке Г-5 [1–3] спектро радиометром ПСР-02 [4]. Блок-схема установки представлена на рис. 1. Угол падения γ коллимированного пучка света галогенной лампы КГМ-250 на исследуемый объект устанавливался равным 45° либо 55° . Спектро радиометр регистрировал спектры отраженного от образцов излучения. Угол наблюдения β изменялся от 0° до 50° . Значения углов падения и наблюдения отсчитывались от нормали к плоскости исследуемого объекта.

В результате обработки зарегистрированных на гониометрической установке спектров отражения в диапазоне $0,35\text{--}2,5$ мкм были получены зависимости спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) $L(\lambda)$ и степени линейной поляризации $P(\lambda)$ излучения для определенных углов падения и наблюдения.

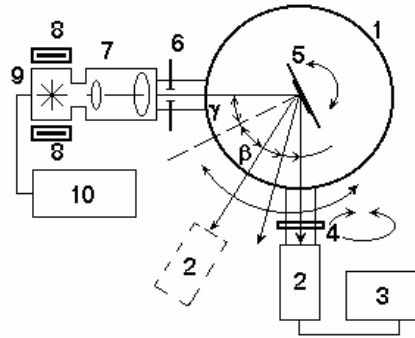


Рис. 1. Блок-схема гониометрической установки: 1 – гониометр Г-5; 2 – спектро радиометр ПСР-02; 3 – персональный компьютер; 4 – поляризационная насадка; 5 – исследуемый объект; 6 – диафрагма; 7 – коллиматор; 8 – система охлаждения; 9 – осветительная лампа КГМ-250; 10 – блок питания СНП-40

В качестве диффузного отражателя использовалась пластина молочного стекла МС-20 толщиной 10 мм. Величины СПЭЯ-спектров отражения образцов L_{ob} нормировались на величину СПЭЯ-спектра, отраженного от МС-20 излучения L_{MS} для каждой длины волны, получая коэффициент спектральной яркости (КСЯ) исследуемых образцов $R_{ob}(\lambda)$:

$$R_{ob}(\lambda) = L_{ob} / L_{MS} . \quad (1)$$

Измерения степени поляризации отраженного от объектов излучения в диапазоне 0,35–2,5 мкм проводились с помощью поляризационной насадки на основе призмы Глана-Тэйлора, устанавливаемой непосредственно перед объективом спектро радиометра. Для каждого угла наблюдения фиксировались спектральные сигналы L_0 , L_{45} и L_{90} при трех положениях оси (0° , 45° , 90°) поляризационной насадки [5].

Степень поляризации рассчитывалась для каждой длины волны λ следующим образом:

$$P_{ob} = \sqrt{Q^2 + U^2} / L , \quad (2)$$

где Q , U , L – параметры Стокса, определяемые по формулам

$$L = L_0 + L_{90}, \quad Q = L_{90} - L_0, \quad U = L_0 + L_{90} - 2L_{45} . \quad (3)$$

Спектральная зависимость степени поляризации P отраженного от объектов излучения корректировалась вычитанием известной поляризующей способности P_{PSR} спектро радиометра ПСР-02 [4]:

$$P = P_{ob} - P_{PSR} . \quad (4)$$

Поляризующая способность ПСР-02 определялась с помощью диффузного излучателя – неполной фотометрической сферы, являющейся источником деполаризованного излучения в широком спектральном диапазоне вследствие многократных переотражений внутри сферы.

Анализ погрешностей с учетом того, что относительная ошибка калибровки спектро радиометра не больше 4%, показал, что относительная неопределенность измерения интенсивности излучения, степени и азимута поляризации не превышает: $\Delta L/L \leq 4\%$ (без поляризационной насадки в оптической системе спектро радиометра), $\Delta P \leq 3\%$, $\Delta \theta \leq 4^\circ$ (последнее для $P=20\%$, так как $\Delta \theta \sim 1/P$).

В качестве образцов, последовательно помещаемых на столик гониометрической установки, использовались образцы нескольких классов подстилающих поверхностей, представляющих интерес при дистанционном зондировании. Это листья растительности – свежесрезанный лист базилика (лат. *Ocimum basilicum*) и высушенный измельченный лавровый лист в силикагеле с различным весовым содержанием, а также объекты искусственного происхождения – алюминиевая пластина, покрытая зеленой краской и кровельное покрытие, такое как лист ондулина зеленого цвета.

Обсуждение результатов

При обработке спектральных данных выбирались пары «цель – фон», которые при визуальном наблюдении мало различимы. С целью нахождения наиболее информативных спектральных интервалов для каждой пары сравниваемых объектов рассчитывались значения контраста по коэффициенту спектральной яркости K_R и значения контраста по степени поляризации K_P :

$$K_R = (R_{ob1} - R_{ob2}) / (R_{ob1} + R_{ob2}), \quad (5)$$

$$K_P = (P_1 - P_2) / (P_1 + P_2), \quad (6)$$

где R_{ob1} и R_{ob2} – относительный коэффициент спектральной яркости различных объектов, P_1 и P_2 – степень поляризации их излучения. Индекс 1 в данном случае присвоен объекту, контраст которого оценивается, а индекс 2 – фону.

Особый интерес представляет такая пара как окрашенная в зеленый цвет поверхность алюминия и лист свежей растительности. В видимой части спектра наиболее высокие значения контраста по КСЯ наблюдались в полосе поглощения хлорофилла 0,66–0,69 мкм и на «плато отражения» листовой поверхности растительности 0,74–0,90 мкм. Для контраста по степени поляризации спектра максимальный уровень наблюдаются в полосах 0,55–0,58 мкм и 0,73–0,85 мкм. Эти результаты хорошо согласуются с данными, полученными при измерениях спектрополяриметром МС-09 в видимой области спектра [6].

С появлением фотодиодных детекторов на основе InGaAs, чувствительных в области спектра 1,1–2,5 мкм, особое значение приобрели исследования оптических отражательных спектрополяризационных характеристик различных поверхностей и определения их контрастов в этой области спектра. Результаты обработки спектрополяризационных данных, полученных на гониометрической установке для различных образцов в области 1,2–2,3 мкм, представлены на рис. 2–5.

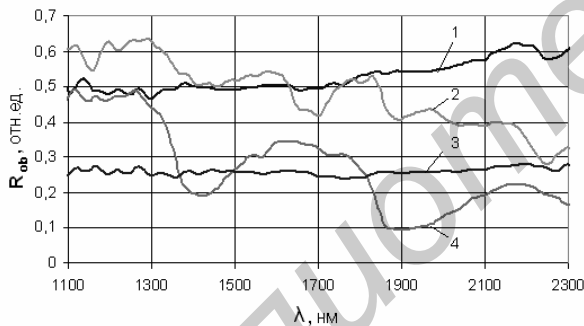


Рис. 2. Коэффициент спектральной яркости материалов (угол падения – 45° , угол наблюдения – 30°): 1 – окрашенная поверхность алюминия; 2 – лавровый лист в силикагеле; 3 – ондулин; 4 – свежий лист растительности

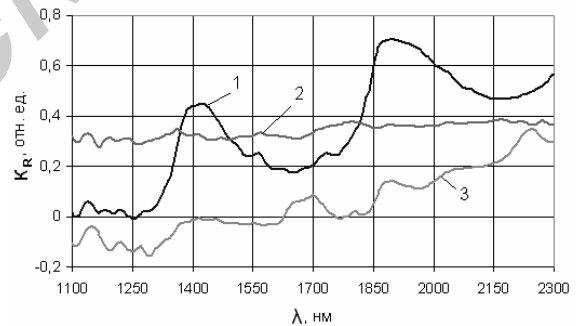


Рис. 3. Спектральный контраст «окрашенная поверхность алюминия – образец» (угол падения – 45° , угол наблюдения – 30°): 1 – свежий лист растительности; 2 – ондулин; 3 – лавровый лист в силикагеле

Из рис. 2 и 3 видно, что минимальный контраст K_R в ИК-области наблюдается у пары «окрашенный алюминий – высушенный лавровый лист в силикагеле». Максимальный контраст наблюдается у пары «окрашенный алюминий – свежая растительность» в областях поглощения воды, связанной в листовой ткани растительности: 1,35–1,50 и 1,85–2,0 нм.

Значения степени поляризации отраженного от образцов излучения в средней ИК-области спектра и поляризационный контраст различных образцов представлены на рис. 4 и 5. Поляризационный контраст окрашенных зеленой краской алюминия и ондулина довольно высок и имеет максимальное значение при длине волны 1,9 нм. С растительностью контраст ниже и максимален в области около 1,2 мкм. Он становится отрицательным в полосах поглощения воды (1,44 мкм и 1,9 мкм), связанной в листовой ткани растительности, что объясняется рассеянием и поглощением излучения на внутренней структуре листа растительности. В качестве листа растительности выбирался листок растения базилика.

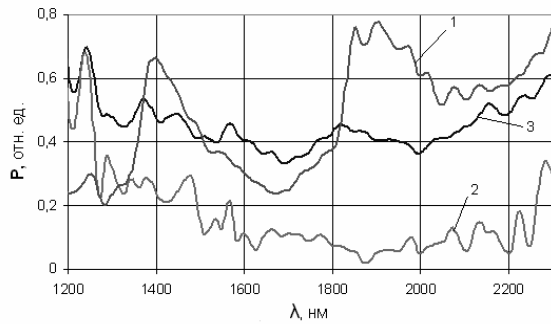


Рис. 4. Степень поляризации излучения, отраженного от поверхности образцов (угол падения – 45°, угол наблюдения – 30°): 1 – свежий лист растительности; 2 – ондулин; 3 – окрашенная поверхность алюминия

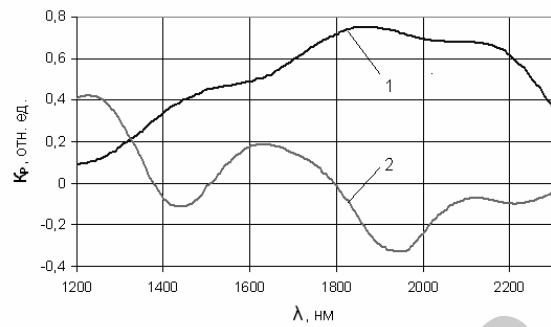


Рис. 5. Спектрально-поляризационный контраст «окрашенная поверхность алюминия – образец» (угол падения – 45°, угол наблюдения – 30°): 1 – ондулин; 2 – свежий лист растительности

Из графиков на рис. 3 и 5 видно, что значительный контраст наблюдается в полосах поглощения воды, находящейся в листовой ткани растительности. Для уменьшения значений контраста в материалах-имитаторах растительности использовались несколько подходов. Поскольку силикон – материал, хорошо изолирующий воду, между слоями силикона толщиной в несколько миллиметров помещались:

- листы лаврового листа, предварительно помещенного в воду на несколько часов;
- листы свежевырезанного растения (базилика);
- гранулы силикагеля, также предварительно выдержанные в воде и увеличившиеся при этом в объеме в несколько раз.

В качестве других образцов использовались ткани различного цвета, насыщенные водой. Спектральная зависимость КСЯ перечисленных образцов приведена на рис. 6.

По спектральной зависимости КСЯ образцов в области спектра 1,1–2,4 мкм рассчитывалась спектральная зависимость контраста «образец – фон» по формуле (5). В качестве фонового спектра использовался спектр отражения от поверхности листа растительности (базилика). Спектральные зависимости контраста образцов и листа базилика представлены на рис. 7.

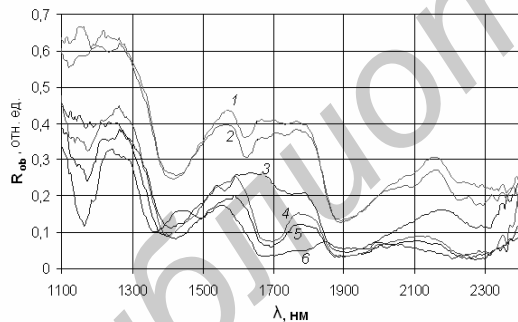


Рис. 6. Коэффициент спектральной яркости образцов (угол падения – 45°, угол наблюдения – 0°): 1 – влажная ткань 1; 2 – влажная ткань 2; 3 – свежий лист базилика; 4 – базилик в силиконе; 5 – увлажненный лавровый лист в силиконе; 6 – силикагель в силиконе

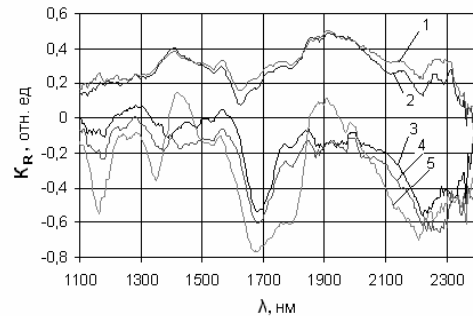


Рис. 7. Спектральный контраст «образец-лист базилика» (угол падения – 45°, угол наблюдения – 0°): 1 – влажная ткань 1; 2 – влажная ткань 2; 3 – базилик в силиконе; 4 – увлажненный лавровый лист в силиконе; 5 – силикагель в силиконе

Заключение

Наилучший результат по уменьшению значений контраста в полосах поглощения воды наблюдается у образцов на основе композитного материала – содержащих влагу листьев растительности (лаврового листа и листа базилика), в силиконе. Однако сам силикон имеет полосы поглощения с центрами на 1,7 мкм и 2,2 мкм. В этих областях спектра значения контраста по

КСЯ достаточно велики, и для его минимизации необходимо уменьшать толщину слоя силикона.

При условии уменьшения общего уровня КСЯ (при использовании нейтрального поглотителя в ИК-области), хорошие результаты дает использованная в качестве материала-имитатора увлажненная ткань, воспроизводящая полосы поглощения воды, связанной в листовой ткани растительности.

Высокие значения контраста в отдельных областях спектра имеет образец с силикагелем. При абсорбции воды данным материалом происходит образование водородных связей в силикагеле. В результате силикагель не имеет сильно выраженных полос поглощения воды в исследуемой области спектра. При этом возникают новые полосы поглощения с иными спектральными центрами локализации, отличными от спектра листа растительности.

INVESTIGATION OF THE OPTICAL REFLECTION CHARACTERISTICS OF THE SURFACE OF VARIOUS OBJECTS AT REMOTE SENSING

U.V. BELYAEV, J. SAAD OMER, I.M. TSYKMAN

Abstract

Methods for experimental studies of reflection characteristics of various materials and methods of data processing are described. The results of determining the coefficients of spectral brightness of the material, the degree of linear polarization of the reflected radiation materials are shown.

Литература

1. *Беляев Б.И., Беляев Ю.В., Курикина Т.М. и др.* // Фотометрия и ее метрологическое обеспечение. Тез. докл. 11-й науч.-техн. конф., 17–19 декабря. 1996. С. 55.
2. *Shuplyak V.I., Belyaev B.I., Belyaev Yu.V. et al.* // SPIE Proceedings of European Symp. on Aerospace Remote Sensing, 22–26 Sept. 1997. Vol. 3222. С. 88–95.
3. *Беляев Б.И., Беляев Ю.В., Чумаков А.В. и др.* // Журн. прикл. спектр. 2000. Т. 67, № 4. С. 524–529.
4. *Беляев Б.И., Беляев Ю.В., Нестерович Э.И. и др.* // Приборы и техника эксперимента. 2010. №3. С. 127–132.
5. *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.
6. *Беляев Ю.В., Казак А.А., Катковский Л.В. и др.* // Журн. прикл. спектр. 2001. Т. 68, №3. С. 407–411.