# УДК 538.958, 53.087.5, 535.346, 677.017, 004.93

## Ш. З. Ловпаче

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

Ю. В. Мамелин, С. Г. Синица, В. Ю. Бузько, А. С. Мамелина Кубанский государственный университет

# Разработка методов мультиспектральной дифференциации природных и синтетических материалов на основании спектральных характеристик диффузного отражения

Проведен аналитический обзор существующих проблем дифференциации органических (т. е. листьев растений) и синтетических функциональных композитных материалов (ФКМ) существующими методами наземного дистанционного зондирования местности, а также методов реализации алгоритмов дискриминации органических и синтетических ФКМ на основании мультиспектральных и гиперспектральных изображений, полученных фотометрическим методом. В результате установлено, что актуальной задачей развития наземных методов дистанционного зондирования местности является разработка алгоритмов дифференциации органических и синтетических ФКМ, работающих в спектральном диапазоне длин волн от 300 до 900 нм. Цель – определить возможность дифференциации органических и синтетических ФКМ средствами наземного мультиспектрального зондирования местности в этом спектральном диапазоне. Применялись метод спектроскопии диффузного отражения света, методы локализованной полиномиальной регрессии (LOESS) и остаточной суммы квадратов (RSS), метод обратного распространения ошибки, оптимизатор «Adam» для разработки алгоритмов дифференциации материалов и метрика ассигасу. Исследованы спектральные отражательные характеристики некоторых растительных объектов и предназначенных для их имитации синтетических функциональных композитных материалов. Разработаны два мультиспектральных алгоритма дифференциации ФКМ, а проведенный сравнительный анализ правильности работы метрики ассигасу алгоритмов выявил, что для оценки спектральных характеристик материалов наиболее эффективен интегральный параметр G. Полученные результаты целесообразно применять в качестве вспомогательного критерия существующих наземных методов дистанционного зондирования местности, осуществляемых для дискриминации органических и синтетических функциональных композитных материалов посредством анализа спектральных характеристик диффузного отражения.

#### Спектроскопия диффузного отражения, фотограмметрия, мультиспектральная визуализация, полосовые фильтры (FSF), материальная дифференциация, вегетативные показатели, нейронные сети

Наземные и летательные робототехнические устройства, предназначенные для выполнения задач на территории городской и сельской местности, оснащаются мультиспектральными и гиперспектральными устройствами технического зрения [1]–[5], что необходимо для детектирования, распознавания и различения органических ФКМ друг от друга [6], [7] и от синтетических ФКМ [1], [3], [8], [9], а также для ориентации в пространстве [4]. Несмотря на то, что современные устройства технического зрения способны функционировать в спектральном диапазоне длин волн от 300 до 2500 нм [5], существует ряд проблем их использования на борту мобильных наземных, а также летательных робототехнических устройств. Эти проблемы связаны с тем, что работа в столь широком спектральном диапазоне влечет за собой увеличение массогабаритных параметров робототехнического устройства из-за использования комплекса технического зрения, состоящего из набора фото- и видеокамер, способных обеспечить выполнение поставленных задач в диапазоне длин волн от 300 до 2500 нм. Однако сложная система такого комплекса ведет к необходимости увеличения вычислительных мощностей для обработки данных [1], [5] в реальном времени. Решение этой проблемы возможно путем разработки алгоритма распознавания и детектирования органических ФКМ друг от друга и от синтетических ФКМ в диапазоне длин волн, определяемом квантовой эффективностью фоточувствительных элементов для большинства современных камер в спектральном диапазоне от 300 до 900 нм. Для реализации такого алгоритма мобильными комплексами дистанционного зондирования (ДЗ) местности используются широкополосные вегетационные индексы [6], [10] и описанный в [11] интегральный параметр G. Данные параметры реализуются с помощью следующих методов: кластеризации [12], деревьев решений [13] или анализа главных компонент [14]. Однако подобный подход ориентирован на анализ и обработку информации, полученной аэрокосмическими средствами ДЗ Земли, что ставит под сомнение их результативность на спектрозональных изображениях, полученных наземными средствами ДЗ. Также стоит отметить, что высокие показатели точности и робастности демонстрируют алгоритмы, основанные на нейронных сетях [15], однако на данный момент поведение этого класса алгоритмов изучено недостаточно подробно.

Материалы и методы. Для разработки алгоритмов дифференциации органических и синтетических ФКМ измерены спектры диффузного отражения света (ДОС):

 – от органических ФКМ лиственных и вечнозеленых кустарников следующих видов: гибискус «Hibiscus», роза «Rosa», лавровишня «Prunus laurocerasus», туя «Thuja standishii» и можжевельник «Juniperus sabina»;

коммерчески произведенных функциональных камуфляжных сеток производства ООО «ТК Нитекс»: «Флора Охотник», МКТ-2Л (Стандарт) и Лайт-Профи (Зеленый, коричневый);

- эталонов спектрального поглощения.

Измерение спектров диффузного отражения оптического электромагнитного излучения (ЭМИ) от исследованных ФКМ осуществлялось в лабораторных условиях с использованием спектрофотометра Hitachi U3900 с двухканальной интегрирующей сферой в спектральном диапазоне от 300 до 900 нм [14]. Для чистоты эксперимента произведено по десять спектров диффузного отражения от каждого исследованного образца, после чего полученные массивы данных усреднялись. Итоговый спектр диффузного отражения ЭМИ от каждого исследованного образца сглаживался методом локализованной полиномиальной регрессией (LOESS) и исследовался на наличие локальных максимумов при помощи специализированного программного обеспечения PeakFit 4.11.

Также использована двухканальная система мультиспектрального зрения [16], принцип работы которой заключается в фотографировании пары плоских изображений одной и той же исследуемой области: одно изображение исследованной области снималось цветной камерой «Basler асе acA1920-50gc» без использования светофильтров, второе изображение – черно-белой камерой «Basler ace acA1920-40gm» через набор ПСФ производства компании «MidOpt Systems», США: BP470, BP540, BP635, BP735 и BP880 [4].

Согласованность экспериментальных данных, полученных в полевых условиях двухканальной системой мультиспектрального зрения, обеспечивалась покадровой программной калибровкой спектральной составляющей изображения по эталону поглощения, имеющему спектр отражения, представленный на рис. 1, б. Полученные данные нормировались по каждому из спектральных каналов в соответствии с измеренным отклонением значений от эталона поглощения [13], [17], [18].

Результаты и анализ. В целях выполнения поставленных задач на первом этапе исследования была определена локация проведения полевых испытаний, на которой были определены виды произрастающих лиственных и хвойных кустарников. Полученные массивы данных спектров диффузного отражения ЭМИ от листьев гибискуса, можжевельника, лавровишни, туи и розы соответственно представлены на графиках функций 1-5 на рис. 1, а в виде функциональной зависимости математического ожидания спектров диффузного отражения M(R) от длины волны  $\lambda$ . На рис. 1, б представлены четыре графика спектров диффузного отражения от исследованных функциональных композитных материалов: сетки «Флора Охотник», «МКТ-2Л (Стандарт)», «Лайт-Профи (Зеленый, коричневый)» и эталон спектрального поглощения.

Анализ отличия графиков спектров диффузного отражения ЭМИ от органических ФКМ и функциональных камуфляжных тканей, представленных на рис. 1, а и б, выявил, что в области спектра от 690 до 900 нм они имеют схожий характер изменения отражательной способности. В областях спектра от 300 до 400 и 500 до 570 нм наблюдаются отчетливые различия отражательной способности, которые в первом случае определены явно выраженным пиком отражения функциональных камуфляжных тканей в окрестности 371 ± 3 нм. Наличие такого пика светоотражения обусловлено содержанием хромоксидных синтетических композитных пигментов в красящей составляющей функциональной композитной ткани, которые характеризуются пиками светоотражения в окрестности 385 ± 20 нм и  $545 \pm 15$  нм [19], [20]. Во втором случае различия в отражательной способности исследуемых материалов обусловлены явно выраженным пиком светоотражения от органических ФКМ в окрестности  $553 \pm 3$  нм, связанным с природным органическим пигментом - хлорофиллом, что согла-

Основываясь на анализе спектральных характеристик диффузного отражения ЭМИ от исследуемых образцов ФКМ, а также существующих исследований [6], [10], [11], [15], можно выдвинуть следующую гипотезу: дифференциация органических и синтетических ФКМ по их мультиспектральным изображениям возможна в том случае, если алгоритм дифференциации в своей основе использует специфичные спектральные параметры, характеризующие ту или иную группу материалов. Такими спектральными парамет-

суется с [19], [21].

рами могут служить широкополосные вегетативные индексы (ВИ) RVI, NDVI, MSR определяемые в соответствии с формулами:

$$RVI = \frac{NIR}{RED};$$
 (1)

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED};$$
 (2)

$$MSR = \sqrt{\frac{\frac{NIR}{RED} - 1}{\frac{NIR}{RED} + 1}},$$
 (3)

где NIR и RED соответствуют широкополосным участкам спектра, определяемым в областях спектра от 760 до 960 нм и от 600 до 700 нм. И интегральным параметром *G*, определяемым в соответствии с формулой

$$G = \frac{\left(S_{\text{TOY}}^{\lambda_{540} \to \lambda_{570}} + S_{\text{TOY}}^{\lambda_{750} \to \lambda_{780}}\right)^2}{S_{\text{TOY}}^{\lambda_{650} \to \lambda_{680}} S_{\text{TOY}}^{\lambda_{350} \to \lambda_{410}}}$$
(4)

где  $S_{\text{точ}}^{\lambda_a \to \lambda_b}$  – это интеграл участка спектра диффузного отражения на участке от  $\lambda_a$  до  $\lambda_b$ , *a* и *b* определяются в соответствии с [4] на следующих участках спектра: от 350 до 410 нм, от 540 до 570 нм, от 650 до 680 нм и от 750 до 780 нм.

Данные были интерпретированы в соответствии с используемой установкой мультиспектрального сканирования местности и примененных в ее конструкции ПСФ следующим образом: BP470 ~  $\lambda_{350} \rightarrow \lambda_{410}$ , BP540 ~  $\lambda_{540} \rightarrow \lambda_{570}$ , BP635 ~ RED ~  $\lambda_{650} \rightarrow \lambda_{680}$  и (BP735 + BP880)/2 ~ ~ NIR ~  $\lambda_{650} \rightarrow \lambda_{680}$ . Также в целях проверки



выдвинутой гипотезы в определенной ранее локации, вид которой представлен на рис. 2, *a*, где располагаются исследованные ранее органические и неорганические материалы: сетки 1 -«Лайт-Профи (Зеленый, коричневый)», 2 -«МКТ-2Л (Стандарт)», 3 - гибискус, 4 -«Флора Охотник», 5 - лавровишня, 6 -туя, 7 - можжевельник, 8 -эталон поглощения (с расстояния  $20 \pm 0.1$  м до плоскости его расположения была проведена серия снимков местности в разных спектрах).

Полученные в результате изображения местности далее размечались полигональными областями (с помощью инструмента VGG Image Annotator), каждой из которых соответствует тот или иной вид исследуемых органических ФКМ или образец функциональной камуфляжной ткани, как показано на рис. 2, б. Затем полученная разметка экспортировалась в формате JSON (JavaScript Object Notation) для дальнейшей работы с изображением. Также в многомерные тензоры были объединены черно-белые изображения исследуемой области по спектральным каналам.

В ходе исследования возможности дискриминации исследуемых видов органических и неорганических ФКМ разработаны два алгоритма дифференциации, а именно наивный и на основе сверточной нейронной сети (СНС). Наивный алгоритм подразумевает использование эмпирически подобранных доверительных интервалов для каждого из распознаваемых классов, в то время как алгоритм на основе СНС использует ВИ в качестве предварительной обработки и в силу своих конструктивных особенностей в некотором смысле представляет собой дообучаемый адаптивный индекс.

Концепция работы наивного алгоритма, представленная на рис. 3, а в виде блок-схемы, основана на разбиении изображения исследуемой области на некоторые (сравнительно небольшие) прямоугольные фрагменты и последующем расчете среднего значения яркости пикселей на них, таким образом осуществляя свертку по каждому из спектральных каналов. Далее для каждого полученного значения всего полученного массива данных рассчитываются интересующие спектральные параметры. В рамках данного исследования в качестве спектральных характеристик, реализуемых в алгоритмах, были использованы интерпретированные широкополосные ВИ RVI, NDVI, MSR и интегральный параметр G, определяемые в соответствии с (1)-(4). Затем на основе метода доверительных интервалов, определенных эмпирическим путем для каждого класса, осуществлялась итоговая классификация каждого из фрагментов, полученных на первом этапе. В результате обработки мультиспектральных данных исследованной области наивным алгоритмом с использованием параметров RVI, NDVI, MSR и G получены изображения исследованной области, где в зависимости от значения полученной функции определяется интенсивность каждого отдельного пикселя изображения (т. е. функция выдает вещественное число, которое мы потом дискредитируем некоторыми пороговыми значениями). В качестве примера на рис. 3, б, представлено результирующие изображение исследуемой области после обработки исходных мультиспектральных данных предложенным наивным алгоритмом, в основе которого используется параметр G.







б

Puc. 2



Puc. 4

Сформированная модель архитектуры разработанного алгоритма дифференцирования материалов на основе СНС представлена на рис. 4. Разработка осуществлялась методом автоматического подбора гиперпараметров по сетке (grid search). В основе данного алгоритма дифференцирования, аналогично представленному ранее наивному алгоритму дифференцирования материалов, используется один из интерпретированных параметров RVI, NDVI, MSR и G, определяемых (1)–(4).

В соответствии с представленной на рис. 4 моделью архитектуры алгоритма дифференцирования материалов на основе СНС рассмотрим структуру его работы по блокам. Блок «InputLayer» соответствует входному слою нейронной сети, на котором исходный мультиспектральный файл изображения преобразуется в тензор. Затем осуществляется переход на следующий уровень, обозначенный блоком «VegIndex», где попиксельно вычисляются спектральные параметры анализируемого мультиспектрального изображения с ис-

.....

пользованием одного из параметров RVI, NDVI, MSR и G в составе полученной функции. Следующие два уровня «ConvBlock1», «ConvBlock2» представляют собой сверточные блоки, внутреннее устройство которых представлено на рис. 4 в отдельно вынесенном сером блоке, который в свою очередь состоит из блока двумерной свертки «Conv2D» с размером окна 3 × 3 и блока подвыборки «MaxPooling», реализующих соответствующие матричные операции. При переходе к слою «Flatten» полученный многомерный массив данных преобразуется в одномерный вектор. Метод регуляризации предотвращает переобучение нейронной сети, ограничивая скорость роста и значения весов в процессе обучения на слое «Dense». В результате мы получаем вектор вероятностей принадлежности к каждому из классов (камуфляж 1, камуфляж 2, растение 1, растение 2 и т. д.).

Обучение СНС проводилось на выборке, полученной из общей генеральной совокупности данных случайным выбором в соотношении 80/20 (обучающей и тестовой выборок соответственно). Модель обучалась в течение 20 эпох с применением оптимизатора Adam. В качестве критерия максимизации использовалась метрика accuracy, которая описывает общую точность предсказания модели по всем классам и бралась равной отношению числа точных предсказаний к общему числу элементов тестовой выборки.

	Точность, %	
		Алгоритм
Параметр	Наивный	на основе
	алгоритм	сверточной
		нейронной сети
RVI	50.61	52.33
NDVI	57.13	69.27
MSR	64.00	77.01
G	68.58	84.50
Без использования		
спектральных	-	62.02
параметров		

Результаты сравнительного анализа точности классификации, проводимого на основе тестовой выборки, которая составлена путем случайного семплирования 20 % от общей выборки, представлены в табл. 1. По результатам сравнительного анализа выявлено, что самые высокую и низкую точности разработанные алгоритмы в сочетании со спектральными параметрами демонстрируют при использовании параметров G и RVI соответственно. Кроме того, точность дифференцирования исследованных материалов в рамках каждого отдельно взятого параметра, используемого алгоритмом на основе СНС, систематически больше в 1.22 ± 0.02 раза в сравнении с аналогичными результатами точности дифференцирования, полученными наивным алгоритмом. Также стоит отметить, что использование спектрального параметра G в наивном алгоритме позволило получить более высокую точность 1.31 раз в сравнении с результатами точности, которые получены при реализации алгоритма, построенного на СНС, без использования спектральных параметров.

1. Measurements and analysis of active/passive multispectral imaging / C. Grönwall, D. Hamoir, O. Steinvall, H. Larsson, E. Amselem, P. Lutzmann, E. Repasi, B. Göhler, S. Barbé, O. Vaudelin, M. Fracès, B. Tanguy, E. Thouin // Proc. of SPIE: Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technol., and appl. VII; and Military Appl. in Hyperspectral Imaging and High Spatial Resolution Sensing. Dres-

2. Svensson T. Multispectral MWIR imaging sensor // Proc. of SPIE: Infrared Technol. and Appl. XXVIII. Seattle, 2003. Vol. 4820. P. 116–125.

den, 2014. Vol. 8897. P. 8897705.

Представлены спектральные характеристики диффузного отражения ЭМИ от зеленых лиственных и хвойных органических ФКМ, которые типичны для южной и центральной части РФ. Описаны разработанный наивный алгоритм дифференциации и алгоритм дифференциации на основе СНС, которые классифицируют органические ФКМ и синтетические функциональные камуфляжные ткани с учетом особенностей спектральных характеристик диффузного отражения ЭМИ. Данные алгоритмы основаны на общепринятых спектральных параметрах MSR, RVI, NDVI, а также впервые алгоритмы дифференциации реализованы на основе интегрального параметра G, характеризующего спектральные характеристики органических ФКМ. Впервые примененный в разработанных алгоритмах дискриминации интегральный параметр G позволил добиться увеличения точности в сравнении с наивными алгоритмами при использовании спектральных параметров MSR, RVI и NDVI на 4.58, 17.97 и 11.45 % соответственно. Дифференциация органических и функциональных ФКМ алгоритмом на основе СНС с применением спектральных характеристик MSR. NDVI и G относительно вариации алгоритма на основе СНС без применения спектральных характеристик привело к увеличению точности на 14.99, 7.25 и 22.49 % соответственно.

В дальнейшем планируется разработка более оптимальных алгоритмов с точки зрения потребляемых вычислительных ресурсов, а также расширения набора дифференцируемых объектов для создания универсальных моделей распознавания природных и синтетических материалов на местности.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям «Разработка автономной системы идентификации лиц на основе мультиспектральной съемки для применения на объектах без доступа к сети Интернет», договор № 15200ГУ/2020.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

.....

3. Multispectral and hyperspectral measurements of soldier's camouflage equipment / M. Kastek, T. Piatkowski, R. Dulskl, M. Chamberland, P. Lagueux, V. Farley // Proc. of SPIE: Active and Passive Signatures III. Maryland, 2012. Vol. 8382. P. 83820K.

4. Бондаренко А. Аппаратно-программная реализация мультиспектральной системы улучшенного видения // Современная электроника. 2017. № 1. С. 32–37.

5. Denning R. J. Camouflage fabrics // Engineering of High-Performance Textiles. 2018. Vol. 15. P. 349–375.

6. Mamelin Y. V. Discrimination of coniferous and deciduous leaves of trees and shrubs from decorative and artificial materials by optical diffuse reflectance spectroscopy // Optics and Spectroscopy. 2020. Vol. 128, no 2. P. 280–284.

7. Asmala A. Analysis of maximum likelihood classification on multispectral data // Analysis of Maximum Likelihood Classification. 2012. Vol. 6, no 129. P. 6425–6436.

8. Исследование возможности имитирования оптических характеристик естественно-стареющих листьев / Ю. В. Мамелин, В. Ю. Бузько, А. С. Данилов, А. С. Мамелина // Инженерный вестн. Дона. 2020. Т. 71, № 11. С. 72–81.

9. Random forest-based river plastic detection with a handheld multispectral camera / I. Cortesi, A. Masiero, M. De Giglio, G. Tucci, M. Dubbini // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. France, Nice, 2021. Vol. 43B1. P. 9–14.

10. Remote sensing vegetation indices in viticulture: a critical review / R. Giovos, D. Tassopoulos, D. Kalivas, N. Lougkos, A. Priovolou // Agriculture. 2021. Vol. 11, no 5. P. 547.

11. Мамелин Ю. В. Исследование оптических характеристик листьев биообъектов растительного происхождения // Гуманитарные, естественно-научные и технические аспекты современности. Материалы XXXIII Всерос. науч.-практ. конф. СПб.: ООО «Издательство BBM», 2021.

12. Kumar V. Camouflage detection using MWIR hyperspectral images // J. Indian Soc. Remote Sens. 2017. Vol. 45. P. 139–145.

13. Research on camouflage recognition in simulated operational environment based on hyperspectral imaging technology / D. Zhao, S. Liu, X. Yang, Y. Ma, B. Zhang, W. Chu // J. of Spectrosc. 2021. Vol. 2. P. 1–9. 14. Farrell M. D. On the impact of PCA dimension reduction for hyperspectral detection of difficult targets // IEEE Geosci. and Remote Sensing Lett. 2005. Vol. 2, no 2. P. 192–195.

15. Backhaus A. Robust classification of the nutrition state in crop plants by hyperspectral imaging and artificial neural networks // 3rd Workshop on Hyperspectral Image and Signal Proc.: Evolution in Remote Sensing. Lisbon, 2011. P. 12386199.

16. Чепрасова В. С. Разработка мультиспектральной установки дистанционного зондирования // Науч. исследования и инновации: Материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. М.: «КДУ», «Добросвет», 2021. С. 22–35.

17. Deepak G. Estimation of grapevine crop coefficient using a multispectral camera on an unmanned aerial vehicle // Remote sensing. 2021. Vol. 13, N 13. P. 2639.

18. Maize crop coefficient estimated from UAVmeasured multispectral vegetation indices / Yu. Zhang, W. Han, X. Niu, G. Li // Remote sensing. 2021. Vol. 19, № 23. P. 2–17.

19. Thongkanluang T. Preparation and characterization of Cr2O3–TiO2–Al2O3–V2O5 green pigment // Ceramics Intern. 2011. Vol. 37. P. 543–548.

20. Colour performance investigation of a  $Cr_2O_3$  green pigment prepared via the thermal decomposition of CrOOH / S.-t. Liang, H. Zhang, M. T. Luo, K.-j. Luo, P. Li, H.-b. Xu, Y. Zhang // Ceramics Intern. 2014. Vol. 40, no 3. P. 4367–4373.

21. Farbod M. Color parameters of Y2Cu2O5 green-blue nanopigments fabricated by the sol-gel combustion method and their efficiency for coloring the glazed tiles // Ceramics Intern. 2016. Vol. 42, no 14. P. 15732–15738.

#### Sh. Z. Lovpache University ITMO

Yu. V. Mamelin, S. G. Sinitsa, V. Yu. Buzko, A. S. Mamelina *Kuban State University* 

### DEVELOPMENT OF METHODS FOR MULTISPECTRAL DIFFERENTIATION OF NATURAL AND SYNTHETIC MATERIALS BASED ON SPECTRAL CHARACTERISTICS OF DIFFUSE REFLECTION DITIONS

An analytical review of the existing problems for organic (i. e. plant leaves) and synthetic functional composite materials (FCM) differentiation by existing ground-based remote terrain sensing methods, as well as methods for implementing discrimination algorithms for organic and synthetic FCM based on multispectral and hyperspectral images obtained by photometric method has been carried out. As a result, it has been established that the development of algorithms for the differentiation of organic and synthetic FCMs operating in the spectral range of wavelengths from 300 to 900 nm is an actual task in the development of ground-based methods for remote terrain sensing. Purpose – to determine the possibility of differentiating organic and synthetic PCM by means of multispectral terrain sensing in the spectral range of wavelengths from 300 to 900 nm. The article used diffuse reflectance spectroscopy, localized polynomial regression (LOESS) and residual sum of squares (RSS) methods for processing and analyzing diffuse reflectance spectra, backpropagation method, Adam optimizer for materials differentiation algorithms and Accuracy metric. Authors researched the spectral reflective characteristics of some plants and synthetic functional composite materials intended for their imitation. Two multispectral algorithm's «accuracy» revealed that the most effective parameter for assessing the spectral characteristics of materials is the integral parameter G. It is advisable to apply the obtained results as an auxiliary criterion of existing ground-based methods of remote terrain sensing, carried out to discriminate between organic and synthetic functional composite materials is by means of their diffuse reflection spectral characteristics.

Diffuse reflection spectroscopy, photogrammetry, multispectral imaging, bandpass filters (FSF), material differentiation, vegetative indices, neural networks