УДК 004.932.2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ МНОГОКРАТНОГО ОТРАЖЕНИЯ ПРИ АНАЛИЗЕ ЦВЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ СНЕЖНО-ЛЕДОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ АРКТИКИ В ЗАДАЧАХ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

¹Путинцев Д.Н., ²Арлазаров Н.В., ¹Усилин С.А., ³Кац В.А.

¹Институт системного анализа ФИЦ ИУ РАН, Москва, e-mail: 2001dnp@mail.ru, usilin.sergey@gmail.com; ²ООО «Смарт Энджинс Сервис», Москва, e-mail: nikita.arlazarov@gmail.com; ³Московский физико-технический институт, Москва, e-mail: vladk1894@gmail.com

В настоящей работе исследуется эффект многократного отражения света в складках рельефа снежноледовой поверхности для использования в алгоритмах цветовой константности. Складкой, предметом изучения, считается область поверхности, в которой может возникать переотражение падающего света и которая
может быть наблюдаема посредством видеосьемки с воздуха, в том числе в режиме полета БПЛА. Исследование подобных складок необходимо в задаче определения загрязнения снежно-ледовой поверхности по
изменению отражательной способности. Места потенциальных складок на поверхности Арктики характерны для торосистых участков и требуют дополнительного изучения. Для описания наблюдаемого изменении
предложен подход, который позволяет не только детектировать области переотражения в режиме реального времени, но и определять загрязненные участки в складках по изменению отражательной способности
снежно-ледовой поверхности.

Ключевые слова: обработка изображений, многократное отражение, переотражение, цветовая константность, снежно-ледовый покров, Арктика

THE USE OF MULTIPLE REFLECTION EFFECTS IN THE ANALYSIS OF COLOR IMAGES OF THE CMOW AND ICE SURFACE OF THE ARCTIC IN THE TASKS OF ENVIRONMENTAL MONITORING

¹Putintsev D.N., ²Arlazarov N.V., ¹Usilin S.A., ³Kats V.A.

¹Institute for Systems Analysis, FRC CSC RAS, Moscow, e-mail: 2001dnp@mail.ru, usilin.sergey@gmail.com; ²Smart Engines Ltd., Moscow, e-mail: nikita.arlazarov@gmail.com;

³Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Moscow, e-mail: vladk1894@gmail.com

In this paper we study multiple reflection effect of light in a fold of the snow-ice surface relief for use in color constancy problem. The fold is the area of the surface in which the reflection of the incident light can occur and which can be observed by video from the air, including in UAV flight mode. Investigation of such folds is necessary in the problem of determining the contamination of the snow-ice surface by changing the reflectivity. Places of potential folds on the surface of the Arctic are characteristic of hummocky areas and require further study. To describe the observed change in the chromaticity of the surface in the fold region, the applicability of the Gaussian spectral model is considered. An approach is proposed that allows not only to detect real-time reflection regions, but also to determine contaminated sites in folds by changing the reflectivity of the snow-ice surface.

Keywords: image processing, multiple reflections, rereflection, color constancy, snow-ice cover, Arctic

Локализация загрязненных участков снежного и ледового покрова по изменению отражательной способности может основываться на сравнении значений спектральной индикатрисы рассеяния, определенных для выбранных гладких участков поверхности с заранее подготовленными значениями для снега и льда с заведомо известным уровнем и типом загрязнения. Вычисление индикатрисы рассеяния при известном освещении и рельефе является одной из двух обратных задач по отношению к задаче моделирования изображения рельефа. Другой обратной задачей является задача «shape from shading» восстановления формы рельефа

по изображению при известном освещении и индикатрисе рассеяния.

В случае, когда речь идет не о выпуклых участках поверхности, то наблюдаемое изменение цветовых характеристик льда и снега может быть вызвано как наличием изменений в физико-химическом составе (в том числе загрязнений), так и эффектом многократного отражения падающего света в складке поверхности. Под складкой будем понимать область поверхности, в которой может возникать переотражение падающего света и которая может быть наблюдаема посредством видеосъемки с воздуха, в том числе в режиме полета БПЛА.



Рис. 1. Примеры торосов на арктической поверхности

Расположение таких складок на снежно-ледовой поверхности характерно для участков с торосистой поверхностью, которые являются распространенным явлением в Арктике. Торосы представляют собой нагромождение обломков льда, которые образуются в результате сжатия ледяного покрова и могут достигать до 10–20 метров в высоту. Пример торосов приведен на рис. 1. Таким образом, участки поверхности, потенциально имеющие эффект переотражения, могут достигать заметных размеров и их исследование необходимо в задаче определения загрязненных участков по изменению отражательной способности.

Важно отметить, что загрязнения арктической поверхности (в частности, вызванные разливами нефти) приводят к изменениям отражательных характеристик свойств снега и льда, которые в свою очередь могут становиться причиной различных климатических аномалий и изменений, включая таяние и разрушение льдов [1].

Работа состоит из четырех частей. В первой части рассматривается постановка задачи цветовой константности. Во второй части приводится описание линейных и мультипликативно-замкнутых спектральных моделей. В третьей части обсуждается эффект многократного отражения применительно к наблюдению складок на поверхности Арктики. В четвертой части приведено заключение.

Постановка задачи цветовой константности

Сложность задачи цветовой константности (ЦК) или цветопостоянства заключается в восстановлении окраски наблюдаемой по-

верхности по зарегистрированным сенсором спектральным характеристикам излучения при неизвестной цветности освещения сцены. Даже если наблюдение ведется при освещении сцены одним источником, могут возникать переотражения, при которых спектр освещения изменяется — умножается на спектр окраски поверхности. Вследствие этого мы имеем дело с тем, что разные точки поверхности оказываются освещены излучением разного спектрального состава.

Применительно к задачам компьютерного зрения изучение вопроса цветовой константности [3, 4] является актуальным при создании алгоритмов детекции объектов, распознавания образов, стереоотождествления и др.

В общем случае математическая постановка задачи цветовой константности является некорректной, так как подразумевает восстановление бесконечномерных спектров освещения и окраски по маломерной реакции сенсора. Для того, чтобы снять данную неопределенность, при рассмотрении вводят модельные предположения о спектральных свойствах окраски, свойствах освещения и наблюдаемых поверхностей. Модельные предположения позволяют выделить на изображении эффекты, которые принято называть ключами константности и наличие которых позволяет решить задачу ЦК.

Приведем несколько подходов к выбору ключа константности применительно к нашей задаче. В классическом подходе предполагается, что на наблюдаемой поверхности всегда содержится белый объект, для которого цветность отраженного излучения соответствует цветности источника осве-

щения [5]. В алгоритме «gray world» [6] ключом является всё изображение, так как предполагается, что средние интенсивности по каждому RGB-каналу равны между собой. Необходимо отметить, что в случае большого размера загрязнения, наблюдаемого БПЛА, оба сформулированных предположения могут быть не выполнены.

Предложение использовать в качестве ключа константности складку поверхности сделано в работе [7]. При освещении складки поверхности возникает множественное отражение падающего света, что приводит к изменению спектральных характеристик цвета в различных точках складки. При этом показано, что спектр отраженного света в различных точках складки подчиняется некоторым закономерностям.

Спектральные модели

Рассмотрим модель цветного изображения трехмерного объекта:

$$\vec{a}(\vec{r}) = \int_{0}^{\infty} \Phi(\lambda, \vec{r}) \cdot S(\lambda, \vec{r}) \cdot \vec{\chi}(\lambda) d\lambda, \qquad (1)$$

где $\vec{r} = (x, y)$ — координаты точки на изображении, λ — длина волны, \vec{a} — регистрируемое изображение, Φ — спектр окраски, $S(\lambda)$ — спектр освещения, χ — вектор чувствительности сенсора. Как правило, используются трехканальные сенсоры, то есть вектор χ имеет 3 компоненты. Для решения задачи оценки окраски поверхности (решения задачи ЦК) необходимо при известном χ оценить χ по χ по χ оценить χ по χ п

Предположим, что в наблюдаемой сцене присутствует трехмерный объект, спектр окраски которого одинаков для всей поверхности. В этом случае при освещении поверхности преимущественно одним диф-

фузным источником света уравнение (1) может быть записано в следующем виде:

$$\vec{a}(\vec{r}) = g(\vec{r}) \int_{0}^{\infty} \Phi(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot \vec{\chi}(\lambda) d\lambda, \qquad (2)$$

где g — неизвестная функция, зависящая от геометрии сцены [2].

Определение спектра окраски $\Phi(\lambda)$ согласно (2) является некорректной задачей, так как $\Phi(\lambda)$ — функция, которая определена для всех неотрицательных вещественных чисел, а a(r) является трехмерным вектором. Предположение, что $\Phi(\lambda)$ может описываться моделью, позволяет решить проблему корректности задачи ЦК.

К часто используемым спектральным моделям можно отнести линейные спектральные модели (спектрозональная модель, модель Ильмаза), в которых пространство спектральных функций ограничивается некоторым трехмерным линейным подпространством. Их существенным недостатком является проблема цветопередачи, которая заключается в невозможности адекватной аппроксимации спектров излучений и окрасок высокой насыщенности. Это объясняется тем, что узкополосные спектры, различающиеся сдвигом по оси длин волн (чьи цвета различаются тоном), линейно независимы.

Избежать проблемы цветопередачи позволяет использование гауссовской спектральной модели (ГСМ), обладающей преимуществом мультипликативной замкнутости. В ГСМ верно утверждение, что результат перемножения двух функций, входящих в семейство модели, также входит в семейство. Использование ГСМ позволяет упростить построение алгоритмов ЦК за счет аналитической интегрируемости интеграла реакций (1).

В общем виде ГСМ выглядят следующим образом:

$$\Phi(\lambda, \vec{p}) = \exp(p_1 \cdot B_1(\lambda) + p_2 \cdot B_2(\lambda) + p_3 \cdot B_3(\lambda)), \tag{3}$$

где $B_i(\lambda)$ – базисные функции, $p=(p_1,p_2,p_3)\in\mathbb{R}^3$ – вектор параметров модели. Для ГСМ вектор базисных функций выглядит следующим образом:

$$B_{1}(\lambda) = 1,$$

$$B_{2}(\lambda) = \lambda,$$

$$B_{3}(\lambda) = \lambda^{2}.$$
(4)

Для определения окраски в точке с показанием сенсора a необходимо решить задачу оптимизации в пространстве параметров спектральной модели:

$$\vec{p}_{opt} = \arg\min_{\vec{p}} \left\| \vec{a} - \int_{0}^{\infty} \Phi(\lambda, \vec{p}) \cdot S(\lambda) \cdot \vec{\chi}(\lambda) d\lambda \right\|_{2}.$$
 (5)

Спектр окраски с параметрами p_{opt} доставляет минимум между оценкой отклика и зарегистрированным сенсором откликом.

При этом каждая точка складки получается освещенной не только первичным источником света, но и переотраженным светом от стенок складки [8]:

$$\Phi'(\lambda, \vec{r}) = \Phi(\lambda) + b_1(\vec{r}) \cdot \Phi^2(\lambda) + b_2(\vec{r}) \cdot \Phi^3(\lambda) + ...,$$
(6)

где b_i — некоторые коэффициенты, характеризующие геометрию сцены.

В ГСМ допустимо следующее приближение:

$$\vec{a'}(\vec{r}) = g(\vec{r}) \int_{0}^{\infty} \Phi'(\lambda, \vec{r}) \cdot S(\lambda) \cdot \vec{\chi}(\lambda) d\lambda \approx$$

$$\approx g(\vec{r}) \int_{0}^{\infty} b'(\vec{r}) \cdot \Phi^{\theta}(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot \vec{\chi}(\lambda) d\lambda, \quad (7)$$

где $\theta > 1$, $\vec{a'}$ – отклик сенсора на луч в случае многократного отражения.

Таким образом, зафиксировав на границе складки два различных отклика сенсора на одну и ту же окраску внутри и вне складки, можно получить вдвое больше данных для решения задачи восстановления спектральной функции окраски.

Использование эффекта многократного отражения на снежно-ледовой поверхности для решения проблемы метамерии окрасок

Метамерией называется явление, когда два излучения с разными спектральными составами формируют одинаковый отклик сенсора. В задачах экологического мониторинга возможна ситуация, когда спектральный состав чистой снежно-ледовой поверхности оказывается метамерен спектральному составу загрязнения, то есть ответы сенсора оказываются неразличимыми. Рассмотрение складок поверхности в качестве ключа ЦК дает способ решения этой проблемы.

В качестве сенсора при наблюдении снежно-ледовой поверхности в Арктике в режиме полета БПЛА выступает оптическая система, в общем случае удовлетворяющая следующим двум условиям. Первое из них заключается в получении изображений наблюдаемой поверхности, являющихся предметом непосредственного изучения. Второе условие — получение изображений небосвода, для чего можно использовать дополнительное устройство видеозахвата, установленное на БПЛА и включающее широкоугольный объектив

для охвата полусферы неба. Получаемое изображение небосвода может использоваться для получения оценки спектрального состава излучения [9].

При известных параметрах сенсора и оценке спектрального состава излучения возможно восстановление спектра окраски в гауссовской спектральной модели с целью последующего их сравнения с эталонными параметрами чистого снежно-ледового покрова и известных загрязнений. Однако вследствие эффекта метамерии окрасок совпадение параметров еще не гарантирует совпадение спектральных составов.

Фиксация излучения после многократного отражения в различных точках складки с применением ГСМ (рис. 2) позволяет получить независимую оценку параметров окраски. Под независимостью здесь понимается, что в ситуации, когда прямые отражения света от поверхностей двух разных окрасок оказались метамерными, многократные переотражения от поверхностей складок двух тех же окрасок гарантированно метамерными не окажутся.

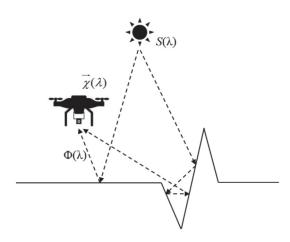


Рис. 2. Схема наблюдения эффектов отражения и многократного отражения в складке

Стоит отметить, что несмотря на то, что исследователями уже получены частные экспериментальные подтверждения применимости ГСМ и использования в качестве ключа константности складку для изучения эффекта переотражения на различных поверхностях [10], дальнейшее развитие этого подхода для анализа изображений рельефа снежно-ледовой поверхности требует глубокой практической проработки как на уровне обработки синтетических данных, так и фото/видеоданных, полученных в ходе натурных наблюдений.

Заключение

В работе с использованием спектральной модели ГСМ описаны эффекты многократного отражения при анализе цветных изображений. Для моделирования эффекта переотражений предложено решение задачи цветовой константности, базирующееся на использовании в качестве ключа константности однородно окрашенной складки поверхности. При известных спектральных характеристиках сенсора показана применимость данного ключа для обработки цветных изображений при освещении поверхности одним диффузным источником, в случае когда одна из базисных функций спектральной модели является константой.

Предложенный подход позволяет при анализе цветных изображений Арктики интерпретировать данные об изменении отражательной способности снега и льда на участках с торосистой поверхностью, для которых наличие эффекта многократного отражения объясняется особенностями рельефа. В частности, на изображении, получаемом при наблюдении с БПЛА, могут быть детектированы «видимые» области складок торосов. При отклонениях в складке значений спектра окраски поверхности от значений спектра окраски «чистого» снега и льда может быть сделано предположение о наличии загрязнения.

Работа проводилась при поддержке грантов РФФИ № 15-29-06091 (офи_м) и 15-29-06080 (офи_м).

Список литературы

- 1. Измайлов В.В. Воздействие нефтепродуктов на снежно-ледяной покров Арктики // Известия Всесоюзного географического общества. 1980. T. 112, № 2. C. 147–152.
- 2. Николаев П.П., Карпенко С.М., Николаев Д.П. Спектральные модели цветовой константности: правила отбора // Труды ИСА РАН. 2008. Т. 38. С. 322–335.
- 3. Li B., Jiang G., Shao W. Color correction based on point clouds alignment in the logarithmic RGB space // The Visual Computer. 2015. V. 31, № 3. P. 257–270.
- 4. Mohd N., Mohd J., Nor N., Isa A.M., Lim W.H. Saturation avoidance color correction for digital color images // Multimedia Tools and Applications. 2017. V. 76, $\[Mathemath{N}\]$ 7. P. 10279–10312.
- 5. Forsyth D.A. A novel algorithm for color constancy //
 International Journal of Computer Vision. − 1990. − V. 5, № 1. −
 P. 5–35
- 6. Celik T., Yetgin Z. Grey-wavelet: unifying grey-world and grey-edge colour constancy algorithms // Signal, Image and Video Processing. 2015. V. 9, № 8. P. 1889–1896.
- 7. Funt B.V., Drew M.S., Ho J. Color constancy from mutual reflection // International Journal of Computer Vision. -1991. V. 9, N 1. P. 5-24.
- 8. Nikolaev D., Nikolaev P. On spectral models and colour constancy clues // In proc. of ECMS. 2007. P. 318–323.
- 9. Kawakami R., Zhao H., Tan R.T., Ikeuchi K. Camera Spectral Sensitivity and White Balance Estimation from Sky Images // International Journal of Computer Vision. 2013. V. 105, № 3. P. 187–204.
- 10. Gusamutdinova N., Ershov E., Gladilin S., Nikolaev D. Verification of applicability two multiplicative closed spectral models for multiple reflection effect description // In proc. of SPIE (ICRMV). $-2016.-1025305.-P.\ 1-5.$