

Применение искусственных нейронных сетей при моделировании спектроэнергетических характеристик местности для систем технического зрения с корреляционно-экстремальными алгоритмами навигации

А. А. Каменев, А. Ю. Тонышев

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

vka@mil.ru

Аннотация. Для обеспечения исходными данными по портретам местности корреляционно-экстремальных алгоритмов навигации систем технического зрения беспилотных летательных аппаратов предложено использовать методику расчета спектроэнергетических характеристик типовых сюжетных элементов ландшафта с учетом сезонно-суточной изменчивости в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах на основе искусственных нейронных сетей. Данная методика позволяет получить спектрозональные яркостные характеристики различных сочетаний подстилающих поверхностей, формирующих контрасты сюжетных элементов ландшафта.

Ключевые слова: видимый диапазон; ближний инфракрасный диапазон; спектроэнергетические характеристики; коэффициент спектральной яркости; спектральная плотность энергетической облучённости поверхности; подстилающая поверхность; искусственная нейронная сеть

1. ВВЕДЕНИЕ

Для наблюдения за наземными объектами интереса (ОИ) в условиях быстрого изменения факторов и параметров наблюдения необходимо оснащение современных систем технического зрения (СТЗ) многоспектральными оптико-электронными средствами (ОЭС), чувствительными к отражённому от поверхностей этих объектов и сопутствующих подстилающих поверхностей (ПП) солнечному излучению в видимом и ближнем инфракрасном (ИК) диапазонах. Полезная информация о характеристиках ОИ в контролируемой области ландшафта, его принадлежности к определённому классу (типу) и функциональном состоянии, содержится в регистрируемых СТЗ видеосигналах сцены и может быть получена на основе применения адекватных методов их вторичной обработки и последующего анализа значений информативных параметров, а также структуры углового, временного, пространственного и спектрального распределений интенсивности видеосигналов.

С использованием систематизированных экспериментальных данных по отражательным характеристикам объектов наземной фоноцелевой обстановки (ФЦО) (включая ОИ и типовые ПП) в видимом и ближнем ИК диапазонах для оценки возможностей СТЗ по обнаружению и распознаванию ОИ, в настоящей статье предложен метод моделирования спектроэнергетических характеристик (СЭХ) портретов местности (сцен), удовлетворяющих требованиям к значениям показателей качества изображения.

Для прогнозирования сезонной и суточной изменчивости СЭХ ПП применяются динамические ряды $y_i (i = 1, n)$, где i – номер члена ряда; n – число членов ряда, основными компонентами которого являются тенденция (тренд) y_T , циклическая y_C и случайная (шумы) y_S составляющие. Идентификацию и экстраполяцию динамических рядов предлагается осуществлять с помощью искусственных нейронных сетей (ИНС).

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЭХ ПОДСТИЛАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ИНТЕРЕСАХ ФОРМИРОВАНИЯ ПОРТРЕТОВ МЕСТНОСТИ

Основным источником подсветки ПП Земли является излучение Солнца. Спектральное распределение солнечного света на верхней границе атмосферы (ВГА) Земли достаточно полно изучено и описывается спектральной плотностью энергетической освещенности (СПЭО) Солнца на ВГА [1], [2].

Уравнение для расчёта спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) однократно диффузно рассеянного от ПП солнечного излучения, прошедшего через атмосферу Земли в направлении ОЭС, записывается в следующем виде:

$$L_{\lambda}(z) = \frac{S_{\lambda}}{4} \int_{z_0}^{z_{\text{вс}}} p_{\lambda}(z_{\text{тод}}, z, \varphi_{S0}) \omega_{\lambda}(z) x_{\lambda}(z, \varphi_S, \gamma_S) p_{\lambda}(z, \gamma) dz,$$

где S_λ – спектральная плотность мощности солнечного излучения на верхней границе атмосферы (ВГА), Вт/м² мкм; p_λ – спектральный коэффициент пропускания атмосферного слоя Z ; φ_{s0} – зенитный угол направления потока солнечного излучения на верхней границе атмосферы; φ_s – зенитный угол направления потока солнечного излучения, входящего в слой атмосферы на соответствующей высоте Z (Z_0 соответствует высоте ВГА); ω_λ – альbedo однократного рассеяния солнечного излучения от ПП; χ_λ – индикатриса рассеяния ПП солнечного излучения для заданной длины волны λ ; γ_s – азимутальный угол направления падения солнечного излучения; γ – азимутальный угол проекции линии визирования ОЭС относительно направления на север в горизонтальной плоскости ($Z_{осс}$ соответствует высоте ОЭС);

Коэффициент пропускания p_λ характеризует долю излучения на длине волны λ , прошедшего через атмосферу вдоль оптической трассы наблюдения с учётом атмосферного ослабления излучения. Коэффициент пропускания трассы рассчитывается по формуле: $p_\lambda = e^{(-\tau_\lambda)}$.

Оптическая толща τ_λ вдоль оптической трассы

$$\tau_\lambda = \sec \theta \int_{z_l}^{z_u} k_\lambda(z') dz', \quad (1)$$

где k_λ – коэффициент объёмного ослабления слоя атмосферы, км⁻¹; z_l, z_u – граничные значения координат в начале и конце участка оптической трассы, км.

Коэффициент k_λ для текущей высоты Z и длины волны λ рассчитывается в виде суммы спектральных коэффициентов:

$$k_\lambda = k_{\lambda,MA} + k_{\lambda,MS} + k_{\lambda,AE}, \quad (2)$$

$k_{\lambda,MA}$ – коэффициент объёмного ослабления, обусловленного молекулярным поглощением; $k_{\lambda,MS}$ – коэффициент объёмного ослабления, обусловленного молекулярным рассеянием; $k_{\lambda,AE}$ – коэффициент объёмного ослабления, обусловленного аэрозольным ослаблением.

В отличие от коэффициентов $k_{\lambda,MS}$ и $k_{\lambda,AE}$, коэффициент $k_{\lambda,MA}$ имеет ярко выраженную спектральную селективность. Для учёта молекулярного поглощения и определения тонкой структуры деформации спектра при моделировании переноса широкополосного излучения необходимо исследуемый диапазон разбить на спектральные подынтервалы, в пределах которых коэффициент рассеяния можно считать независимым от

длины волны, и для каждого из них вычислить функцию пропускания данного атмосферного слоя, обусловленную молекулярным поглощением. В работах [1], [2] принято допущение о том, что перенос излучения подчиняется экспоненциальному закону, что не позволяет учесть деформацию тонкой структуры спектра при реальной немонахроматической функции пропускания. Для устранения этого недостатка разработана адаптивная численная методика расчёта эффективных коэффициентов ослабления излучения света поглощающими атмосферными газами, позволяющая повысить достоверность моделирования пропускания атмосферы [3], в соответствии с которой эффективный коэффициент ослабления молекулярного поглощения газовой компоненты атмосферы с индексом j для длины волны λ описывается формулой:

$$k_{\lambda,MA,j} = a_\lambda \left[X_{v\lambda} \left(\frac{P}{P_0} \right)^{pp_\lambda} \left(\frac{T_0}{T} \right)^{tt_\lambda} \right]^{b_\lambda}, \quad (3)$$

где $X_{v\lambda}$ – относительное объёмное содержание j -ого газа в слое атмосферы; P, T – давление и температура атмосферы, К; P_0, T_0 – стандартные давление и температура атмосферы; $a_\lambda, b_\lambda, pp_\lambda, tt_\lambda$ – эмпирические параметры, значения которых зависят от λ .

На основе представленных соотношений (1)-(3) разработан алгоритм расчёта СПЭО Солнцем поверхности Земли и СПЭЯ крупномасштабных областей системы «Земля-атмосфера» для различных условий наблюдения [4], а также реализующий его программно-моделирующий комплекс (ПМК) [5], позволяющий рассчитывать интегральные и спектральные зависимости этих СЭХ для ОЭС с низким пространственным разрешением. На рис. 1 приведены зависимости СПЭО Солнцем ПП $E_{сум}(\lambda)$ для $h_0 = 15, 30, 45, 60$ град., полученные с использованием ПМК [5] для безоблачной атмосферы при низких уровнях освещённости местности.

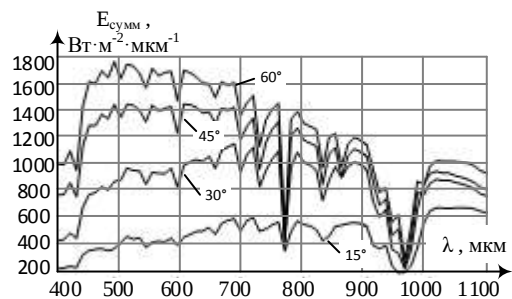


Рис. 1. Зависимости СПЭО Солнцем поверхностью Земли при $h_0 = 15, 30, 45, 60$ град для средних широт северного полушария (метеорологическая дальность видимости составляет 23 км)

Отражательные свойства локальных ПП наземной сцены достаточно полно описываются с помощью спектральных зависимостей коэффициентов спектральных яркостей (КСЯ), для получения которых могут

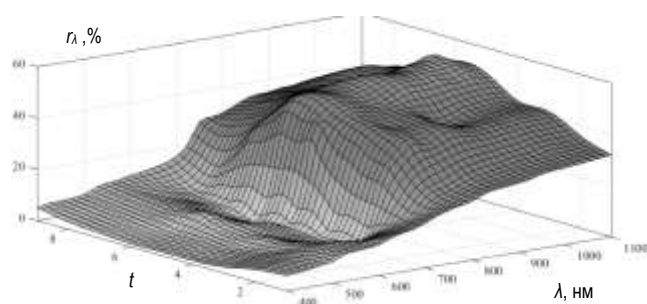
использоваться нормативные документы и справочники [6], а также расчётно-экспериментальные модели [7], [8]. КСЯ является функцией фотометрической величины, характеризующей спектральную структуру отражённого ПП излучения в зависимости от длины волны λ , условий освещения и расположения носителя ОЭС.

В соответствии с [6] КСЯ ПП – отношение СПЭЯ $L_\lambda(\Theta, \varphi_\odot, E_\lambda)$ данной ПП к СПЭЯ $L_\lambda^m(E_\lambda)$ идеально рассеивающей эталонной поверхности:

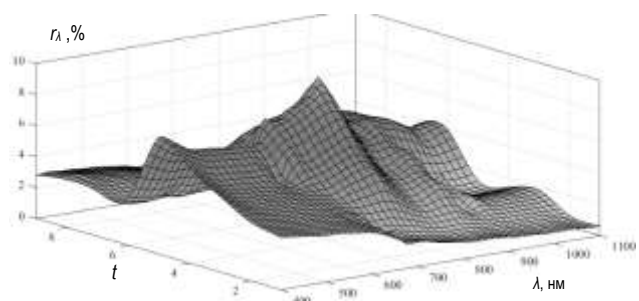
$$r_\lambda(\Theta, \varphi_\odot, E_\lambda) = \frac{L_\lambda(\Theta, \varphi_\odot, E_\lambda)}{L_\lambda^m(E_\lambda)}. \quad (4)$$

При получении КСЯ необходимо обеспечить одинаковые условия освещения исследуемой и эталонной ПП путём проведения сопутствующих синхронных наземных измерений с использованием калиброванных полевых видеоспектрометров и спектрорадиометров.

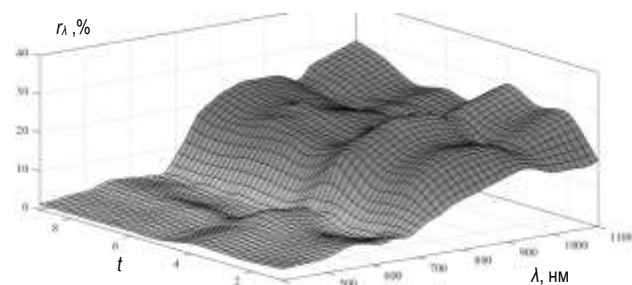
На рис. 2 представлены разновременные КСЯ типовых ПП (а – разнотравный луг, б – водная поверхность, в – хвойный лес, г – лиственный лес) в спектральном диапазоне 0,4...1,1 мкм. По оси t указаны даты, соответствующие серединам фенологических периодов: 1 – 11.04 (оживление весны), 2 – 9.05 (разгар весны), 3 – 10.06 (начало лета), 4 – 28.06 (полное лето), 5 – 14.07 (вершина лета), 6 – 11.08 (спад лета), 7 – 29.08 (начало осени), 8 – 21.09 (золотая осень), 9 – 12.11 (предзимье).



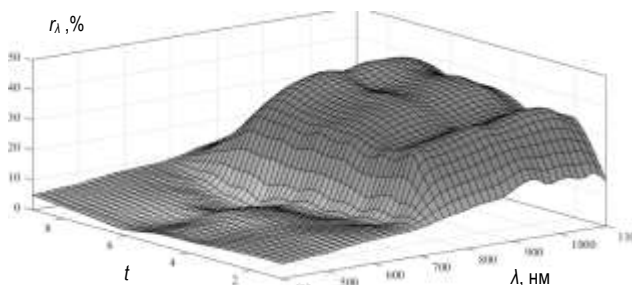
а



б



в



г

Рис. 2. Разновременные КСЯ типовых ПП: а – разнотравный луг, б – водная поверхность, в – хвойный лес, г – лиственный лес.

В качестве исходных данных для моделирования реалистичных портретов местности также необходима опорная информация в виде цифровых снимков местности, содержащих изображение интересующего участка сцены, а также карт местности, матриц рельефа. Задачей моделирования является пересчёт актуального цифрового снимка на другие условия (временные, погодные, визирования и т. д.). Эта задача может быть решена на основе:

- 1) компьютерного моделирования трехмерных сцен и их двумерных изображений с использованием математического описания геометрии сцены;
- 2) пересчета (коррекции) распределения яркостей элементов исходного изображения на прогнозируемые условия наблюдения по исходным данным об изменчивости отражательных свойств ПП.

III. МОДЕЛИРОВАНИЕ СЭХ ПОРТРЕТОВ МЕСТНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Этапы моделирования реалистичных СЭХ портретов местности включают:

- 1) подготовку необходимых исходных данных о геометрии сцены, условиях ее подсветки, отражательных характеристиках элементов сцены, положении в пространстве связки проектирующих лучей, а также параметрах блока формирования изображения СТЗ;
- 2) трассировку лучей последовательно из всех точек изображения сцены на фокальной плоскости ОЭС в сторону сцены и расчёт координат точки встречи следа луча с изображением сцены, а также направляющих косинусов нормали к элементу сцены в этой точке;

3) расчёт облученности текущей точки сцены;

4) проецирование этой точки на фокальную плоскость ОЭС (при выполнении этой операции учитываются отражательные характеристики элементов сцены, а после прохода всех точек фокальной плоскости ОЭС завершается формирование идеального энергетического портрета сцены);

5) учёт размывающего действия объектива, атмосферы, движения носителя ОЭС и его шумов;

6) выполнение заключительных действий для вывода и визуализации модельного изображения сцены;

7) зашумление изображения сцены с учётом параметров ОЭС, трассы наблюдения и флуктуаций яркости ПП ландшафта.

Применение ИНС позволяет осуществлять прогноз динамических рядов, описывающих изменчивость СЭХ ПП, определяющую вариации отражательной способности ПП для прогнозируемых условий визирования и состояния атмосферы в заданном районе. Методы прогнозирования в соответствии со способом распределения исходных данных могут быть параметрическими или непараметрическими. Параметрические методы предполагают использование базы знаний (систематизированных априорных данных) с использованием экспоненциального сглаживания на основе алгоритмов авторегрессии и скользящих средних. Непараметрические методы не требуют в явном виде информации о распределении данных об отражательных характеристиках ПП ландшафта.

Существует множество вариантов применения ИНС в прогнозировании. Нейронные сети могут отличаться архитектурой, количеством слоев и нейронов, использованием определённой функции активации или способом обучения. Для прогнозирования могут использоваться следующие виды ИНС: сети прямого распространения; рекуррентные нейронные сети; свёрточные нейронные сети.

К основному показателю точности прогноза изображения сцен предъявляются требования независимости от шкалы динамического ряда, устойчивости к выбросам и симметричности оценки [9]. В качестве основного показателя точности прогноза широко используются известная оценка RMSE (Root Mean Squared Error) и дополненная процентным нормированием оценка RMSPE (Percentage Error):

$$RMSPE = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \cdot \frac{100}{y_{\max} - y_{\min}} \quad (5)$$

В формуле (5) RMSPE-мера работает с разностью между фактическим наблюдаемым значением y_i и прогнозируемым значением $\hat{y}_i$. Оценка прогностических свойств используемого алгоритма была проведена авторами на основе представительных множеств выборок реальных динамических рядов отражательных характеристик ПП.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный метод моделирования спектроэнергетических характеристик портретов местности позволяет формировать реалистичные изображения наблюдаемых сцен в фокальной плоскости ОЭС СТЗ для прогнозируемых условий наблюдения с получением оценок соответствия требуемым показателям качества изображения (линейное разрешение на местности, контрастность, возможность различения сюжетно-важных объектов по яркости в рабочих диапазонах СТЗ с учётом состояния и параметров атмосферы). Применение искусственных нейронных сетей может повысить точность прогноза отражательных свойств подстилающих поверхностей ландшафта в 2...3 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Кондратьев К.Я. Перенос излучения в атмосфере. Л.: Гидрометеониздат, 1972. 402 с.
- [2] Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Теоретические основы атмосферной оптики. СПб.: Наука, 2003. 474 с.
- [3] Яковлев А.А. Использование банков спектроскопических данных при разработке адаптивных методов моделирования излучения и поглощения немонохроматического света атмосферными газами // Оптический журнал. 2001. Т.68. №10. С.3-8.
- [4] Каменев А.А., Махров А.С. Структура программного комплекса расчёта спектроэнергетических характеристик атмосферы Земли в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазонах // Сборник алгоритмов и программ прикладных задач. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2014. Вып. 31. С.173-176.
- [5] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программно-моделирующий комплекс расчёта СЭХ системы Земля – атмосфера в широком оптическом диапазоне / Каменев А.А., Богоявленский А.И., Найшулер Д.В. № 2016619929 от 1.09.2016.
- [6] Чапурский Л. И. Отражательные свойства природных объектов в диапазоне 400 – 2500 нм. Л.: МО СССР, 1986. 160 с.
- [7] Каменев А.А., Тоньшев А.Ю. Модель формирования отражательных характеристик типовых подстилающих поверхностей наземных сцен в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах // Вопросы радиоэлектроники, Сер. Техника телевидения. 2020. № 4. С.45-53.
- [8] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа моделирования отражательных характеристик ПП наземных сцен в видимом и ближнем ИК диапазоне / Тоньшев А. Ю., Каменев А. А., Алексеев А. А. № 2020662696 от 16.10.2020
- [9] Кочегурова Е.А., Репина Е.Ю., Цехан О.Б. Гибридный подход для краткосрочного прогнозирования временных рядов на основе штрафного Р-сплайна и эволюционной оптимизации // Компьютерная оптика. 2020. Т. 44, № 5. С.821-829.