

А. В. ДЕМИН, М. И. МОИСЕЕВА

ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТА ПРОПУСКАНИЯ АТМОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

На основе экспериментальных данных получены расчетные формулы для вычисления приближенного, инвариантного относительно дальности видимости, значения коэффициента пропускания атмосферы для двух рабочих спектральных диапазонов в инфракрасной области.

Ключевые слова: коэффициент пропускания атмосферы, дистанционное зондирование Земли, алгоритм, инфракрасный диапазон.

Введение. Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) из космоса в оптическом диапазоне длин волн позволяет получить информацию как о географических и геофизических параметрах Земли, так и о техногенных процессах, происходящих на ее поверхности. В зависимости от решаемых задач ДЗЗ осуществляется методами маршрутной, объектовой, стереоскопической, статической, динамической, топографической и спектрометрической съемки. В оптическом диапазоне ДЗЗ выполняется с помощью оптико-цифровых систем и комплексов, устанавливаемых на борту космических аппаратов (КА).

Для повышения достоверности данных, получаемых при дистанционном зондировании Земли, необходимо в процессе съемки учитывать состояние атмосферы, что требует введения специальных датчиков и обуславливает дополнительную нагрузку на служебные системы. Одним из параметров атмосферы является коэффициент пропускания.

Из экспериментов известны результаты измерений коэффициента пропускания атмосферы τ_a в некоторых дискретных точках рабочих спектральных диапазонов. Однако условия получения экспериментальных данных могут не соответствовать условиям текущей съемки. В связи с этим актуальной является задача аналитического представления состояния атмосферы в реальном масштабе времени. При этом следует отметить, что параметрическое состояние атмосферы в части ее пропускания определяется помимо химического состава и геофизическими параметрами.

Постановка задачи. Цель настоящей статьи — построение расчетной формулы для определения коэффициента пропускания атмосферы в любой произвольной точке спектрального диапазона наблюдения в процессе съемки с космического аппарата при дистанционном зондировании Земли.

Искомая аналитическая зависимость $F(\tau_a)$, помимо основного компонента $\{F(\lambda)\}$, учитывающего спектральное пропускание атмосферы, содержит географический $\{F(\varphi, \xi)\}$ и климатический $\{F(T)\}$ компоненты, уточняющие параметрическое состояние атмосферы при конкретных условиях съемки, а именно: $F(\tau_a) = \{F(\lambda) \oplus F(\varphi, \xi) \oplus F(T)\}$.

Для построения расчетной формулы воспользуемся экспериментально полученными данными о значениях коэффициента пропускания атмосферы для двух спектральных диапазонов длин волн — [3; 5,2] и [8; 14] мкм — с шагом 0,02 мкм. Эти данные представлены в виде таблиц для трех значений дальности видимости (5, 23, 50) км и пяти климатических зон: тропики, Арктика (лето), Арктика (зима), средние широты (лето), средние широты (зима) [1, 2].

Табличные данные необходимо описать аналитическими зависимостями, что позволяет вычислять коэффициент пропускания атмосферы для произвольного значения длины волны

из рабочего спектрального диапазона в заданной климатической зоне без хранения больших массивов экспериментальных данных и без проведения дополнительных измерений.

Точечные графики исходных экспериментальных данных, полученных в зоне тропиков при дальности видимости 5 км, приведены на рис. 1. Для других значений дальности видимости и климатических зон общий вид зависимостей сохраняется.

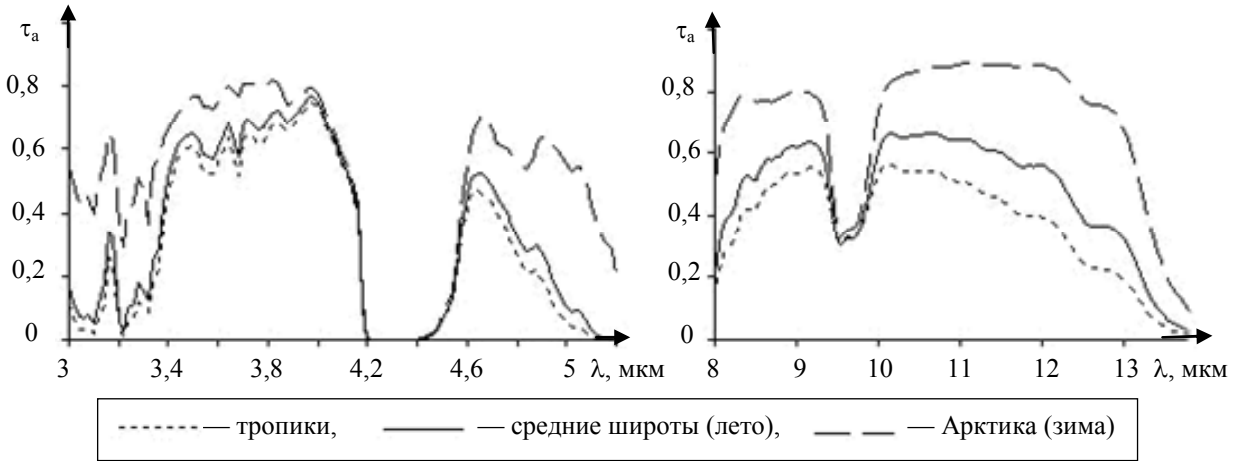


Рис. 1

Решение задачи. Для вычисления значения τ_a в любой произвольной точке диапазона необходимо получить эмпирическую формулу $\tau_a = f(\lambda)$. В целях обеспечения инвариантности искомой формулы относительно значения дальности видимости построим аналитическую зависимость $\tau_a = f(\lambda)$ на основе усредненных данных. Усреднение данных производится в обоих спектральных диапазонах для каждой климатической зоны по формуле

$$(\tau_a)_{\text{avg}} = [(\tau_a)_5 + (\tau_a)_{23} + (\tau_a)_{50}] / 3,$$

где $(\tau_a)_5$, $(\tau_a)_{23}$ и $(\tau_a)_{50}$ — данные, полученные при дальности видимости, равной 5, 23 и 50 км соответственно.

Для построения эмпирической формулы необходимо решить две задачи [3]: 1) определить общий вид формулы, 2) подобрать значения ее параметров.

Примем, что искомая зависимость $\tau_a(\lambda)$ определена в каждой точке спектрального диапазона и представлена аналитической всюду дифференцируемой функцией. Тогда эта зависимость может быть описана функцией вида $f(\lambda) = c_0 + c_1\lambda + \dots + c_n\lambda^n + \dots$, где c_i — константы, $i = 0, 1, 2, \dots$ [4].

Поскольку искомая формула должна быть применима для проведения расчетов на борту КА в реальном масштабе времени, необходимо обеспечить достаточную ее простоту. Как видно из графиков исходных данных (см. рис. 1), зависимость $\tau_a(\lambda)$ является немонотонной функцией, имеющей более двух локальных максимумов и минимумов, что затрудняет подбор достаточно простой зависимости. Поэтому представим искомую формулу совокупностью элементарных функций. К классу элементарных функций относятся полиномы, показательные функции, логарифмические, тригонометрические и обратные тригонометрические функции, а также функции, получаемые из перечисленных выше с помощью четырех арифметических действий и их суперпозиции, применяемых конечное число раз [4].

Для поиска аналитической зависимости $\tau_a(\lambda)$ разобьем диапазон [8; 14] мкм на два поддиапазона, а диапазон [3; 5,2] мкм — на три. Для каждого поддиапазона будем искать свою формулу. При этом общий вид формулы для разных климатических зон и одного поддиапазона длин волн одинаков — различаются лишь значения некоторых параметров

формулы. В этом случае путем перебора различных известных функций (полиномиальной, степенной, экспоненциальной, логарифмической, гауссоиды, функции Лоренца и др.) установлено, что наиболее общими для них являются полином пятой степени

$$f(\lambda) = A_0 + A_1\lambda + A_2\lambda^2 + A_3\lambda^3 + A_4\lambda^4 + A_5\lambda^5, \quad (1)$$

где $A_0, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$ — константы, и функция вида

$$f(\lambda) = \tau_0 + A \left[1 + \exp\left(-\frac{\lambda - \lambda_c + w_1/2}{w_2}\right) \right]^{-1} \left\{ 1 - \left[1 + \exp\left(-\frac{\lambda - \lambda_c - w_1/2}{w_3}\right) \right]^{-1} \right\}, \quad (2)$$

где τ_0 — горизонтальная асимптота, A — амплитуда, λ_c — абсцисса центра „пика“ функции, а значения параметров w_1, w_2 и w_3 определяют ширину и „форму“ пика кривой; при этом для каждого поддиапазона и всех климатических зон применяется только одна из этих функций.

Выбранные функции (1), (2) содержат по шесть параметров. Определить наилучшие значения этих параметров для каждого ряда данных можно путем нелинейного регрессионного анализа по методу наименьших квадратов с использованием итеративного алгоритма Левенберга — Маркуардта (Levenberg — Marquardt) [5]. Критерием точности полученной формулы будем считать коэффициент детерминации R^2 , принимающий значения от 0 до 1. Причем значение „1“ соответствует случаю идеальной модели, когда все точки экспериментальных данных лежат на полученной в ходе регрессии кривой.

Рассмотрим, далее, особенности нахождения аналитической зависимости для каждого спектрального диапазона отдельно.

Поиск зависимости для диапазона [8; 14] мкм. Для поиска аналитической зависимости разобьем диапазон [8; 14] мкм на два поддиапазона — участок I: [8; 9,15] ∪ [10,15; 14] и участок II: [9,2; 10,1] (рис. 2).

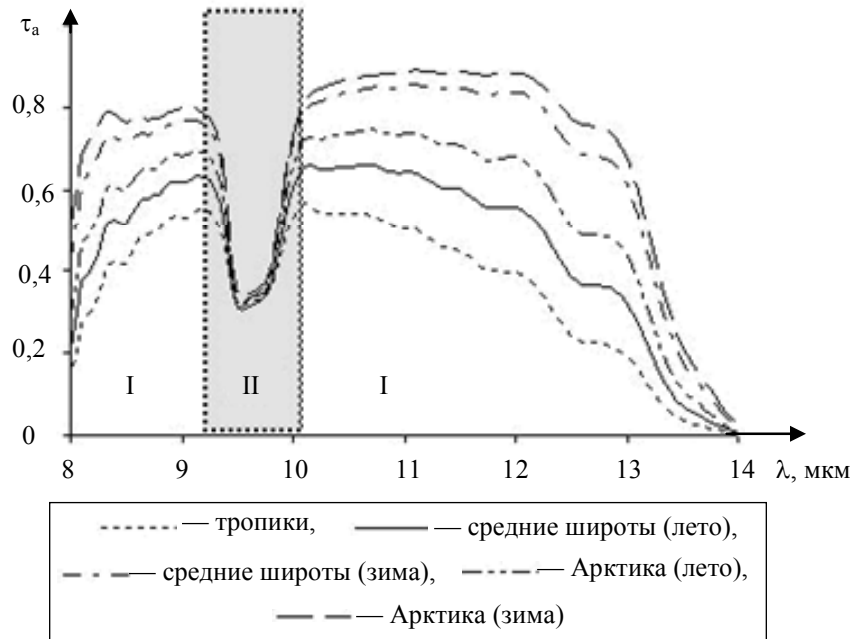


Рис. 2

Участок II визуально представляет собой наибольшую „впадину“ на графике кривой исходных данных. За его границы были приняты значения $\lambda = 9,15$ мкм и $\lambda = 10,15$ мкм — абсциссы двух локальных максимумов усредненной кривой, поскольку для разных климатических зон кривые имеют максимумы в разных точках. При этом значение усредненной кривой в каждой точке было вычислено как среднее арифметическое значений кривой для каждой климатической зоны.

В качестве формулы для обоих поддиапазонов была выбрана функция (2). Для участка I ($[8; 9,15] \cup [10,15; 14]$ мкм) полученная формула содержит два одинаковых для всех климатических зон параметра — τ_0 и λ_c , коэффициент $R^2 > 0,97$. Для участка II ($[9,2; 10,1]$ мкм) полученная формула содержит четыре одинаковых для всех климатических зон параметра — λ_c , w_1 , w_2 и w_3 , коэффициент $R^2 > 0,99$.

Поиск зависимости для диапазона $[3; 5,2]$ мкм. Диапазон $[3; 5,2]$ мкм для поиска аналитической зависимости разобьем на три поддиапазона (рис. 3) путем выделения наиболее выдающихся пиков усредненной функции — участок I: $[3; 3,2]$; участок II: $[3,22; 4,22]$; участок III: $[4,24; 5,2]$. Значение $\lambda = 4,22$ мкм — правая граница участка II — определяется как абсцисса левой точки „нулевой области“. Под „нулевой областью“ понимается наибольшая совокупность соседних абсцисс, в которых функция принимает нулевое значение. Значение $\lambda = 3,22$ мкм — абсцисса наименьшего минимума на интервале $[3; 4,22]$.

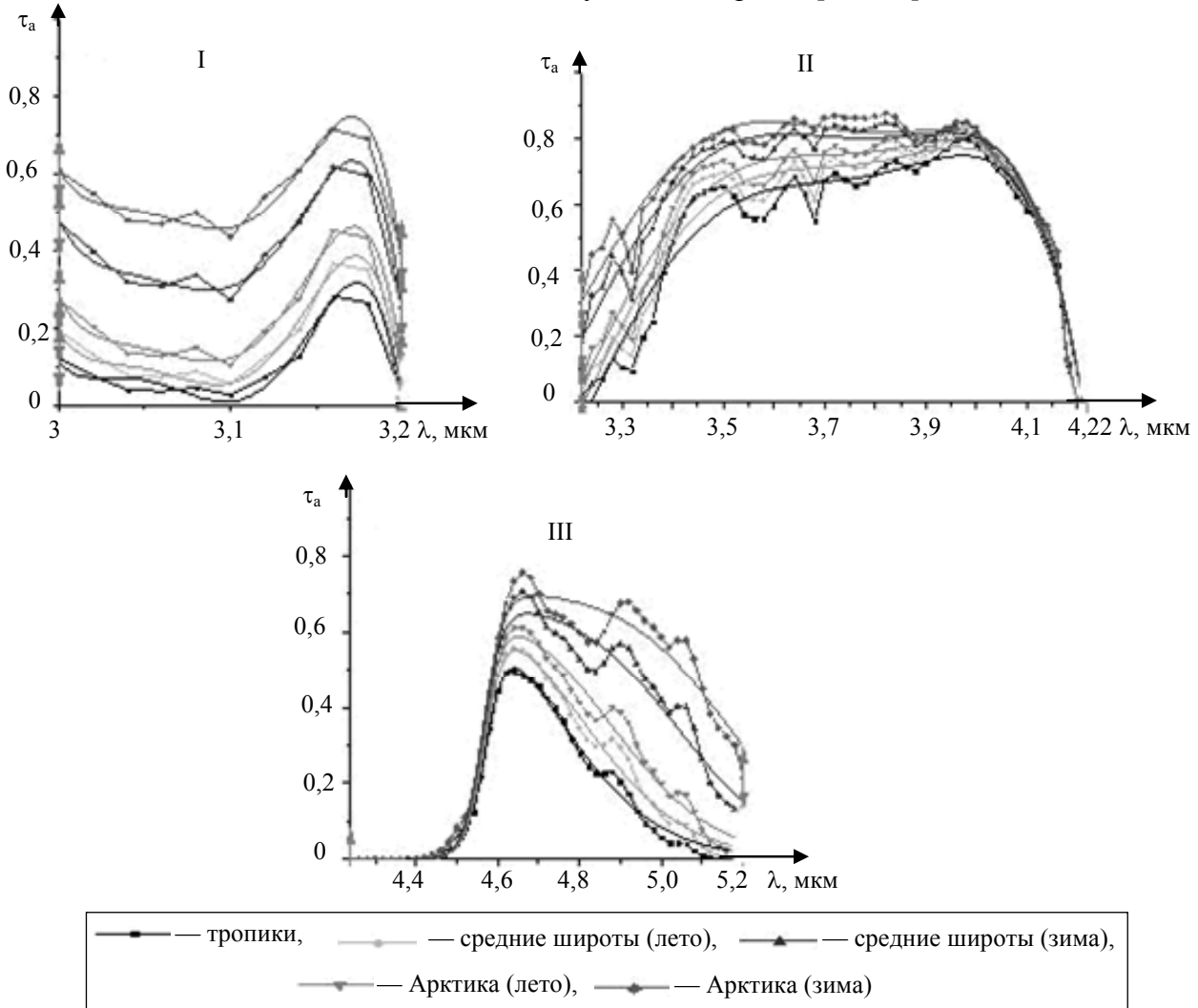


Рис. 3

В качестве формулы для участков I и II был выбран полином (1), а для участка III — функция (2). Для участка I ($[3; 3,2]$ мкм) полученная формула содержит три одинаковых для всех климатических зон параметра — A_3 , A_4 и A_5 , коэффициент $R^2 > 0,93$. Для участка II ($[3,22; 4,22]$ мкм) найденная формула включает два одинаковых для всех климатических зон параметра — A_4 и A_5 , коэффициент $R^2 > 0,93$. Для участка III ($[4,24; 5,2]$ мкм) полученная

формула содержит три одинаковых для всех климатических зон параметра — τ_0 , w_2 и w_3 , коэффициент $R^2 > 0,97$.

Заключение. Построены расчетные формулы для вычисления коэффициента пропускания атмосферы $\tau_a = f(\lambda)$ на основе известных экспериментальных данных для спектральных диапазонов [3; 5,2] и [8; 14] мкм. Для этого был предложен алгоритм разбиения диапазонов на поддиапазоны с нахождением формул для каждого из участков. Построенные формулы позволяют получить приближенное значение коэффициента пропускания атмосферы для пяти климатических зон без измерений дальности видимости.

В дальнейших исследованиях планируется оценить точность полученных расчетных формул для различных значений дальности видимости, а также выделить географическую и климатическую составляющие аналитической зависимости, описывающей пропускание атмосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по инфракрасной технике. Т.1. Физика инфракрасного излучения / Пер. с англ.; Под ред. У. Волфа, Г. Цисуса. М.: Мир, 1995. 606 с.
2. Ллойд Дж. Системы тепловидения: Пер. с англ. М.: Мир, 1978. 417с.
3. Демидович Б. П., Шувалова Э. З., Марон И. А. Численные методы анализа: Приближение функций, дифференциальные и интегральные уравнения / Под ред. Б. П. Демидовича. М.: Наука, 1967. 368 с.
4. Математическая энциклопедия / Под ред. И. М. Виноградова. М.: Сов. энциклопедия, 1985. Т. 5. С. 797—799, 977.
5. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ: Пер. с англ. М.: Финансы и статистика, 1986. 366 с.

Сведения об авторах

- Анатолий Владимирович Демин** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра информатики и прикладной математики;
E-mail: dav_60@mail.ru
- Мария Игоревна Моисеева** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра информатики и прикладной математики;
E-mail: mim14@mail.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-цифровых систем и комплексов

Поступила в редакцию
12.04.10 г.