

УДК 001.891.57

ИНВАРИАНТНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ КОЭФФИЦИЕНТА ПРОПУСКАНИЯ АТМОСФЕРЫ ПРИ МОНИТОРИНГЕ ОБЪЕКТОВ В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА

А.В. Демин, М.И. Моисеева

Рассматривается задача учета влияния атмосферы на пропускание излучения в среднем и дальнем диапазоне инфракрасного спектра с целью повышения достоверности результатов при мониторинге летательных аппаратов. Предложена аналитическая апостериорная модель пропускания излучения атмосферой. Показана общая структура такой модели. Приводятся результаты идентификации значения коэффициента пропускания атмосферы на основе экспериментальных данных.

Ключевые слова: аналитическая модель, идентификация, коэффициент пропускания атмосферы, мониторинг объектов, экспериментальные данные.

Введение

Проблема достоверности результатов при дистанционном зондировании среды в среднем и дальнем диапазоне инфракрасного (ИК) спектра излучения (ИК_{Сид}) является актуальной при решении задачи пеленгации высокоскоростных летательных аппаратов (ЛА). Зондирование среды представляет собой процесс определения состояния среды по измеренным параметрам с целью выявления в ней отклонений от некоего «эталона», характеризуемого совокупностью физико-химических и оптико-физических параметров. Отклонения среды от «эталона» возникают как при наличии в среде объектов, отличных от нее (например, летательный аппарат), так и вследствие техногенного вмешательства.

На достоверность определения пеленгационных характеристик ЛА при его мониторинге влияет атмосфера. Последнее особенно сказывается при пеленгации высокоскоростных ЛА, которая возможна только в ИК_{Сид}. Это объясняется их температурой, лежащей в пределах 270–1000 К.

Для учета состояния атмосферы, характеризуемого коэффициентом пропускания (входящим в уравнение пеленгации), необходимо наличие базы данных со сведениями об атмосфере при любых возможных условиях. Последнее практически невозможно на момент мониторинга без соответствующей аппаратуры. На рис. 1 изображена структурная схема процесса мониторинга объекта с помощью оптико-электронных систем. В этом случае общим уравнением для измеряемой яркости будет $\Omega_{\text{изм}} = I_{\text{атм}} \circ I_{\text{объекта}}$, где $I_{\text{атм}}$ и $I_{\text{объекта}}$ – функции, характеризующие яркость атмосферы и объекта мониторинга; \circ – композиция функций. Учет атмосферной компоненты $I_{\text{атм}}$ особенно важен тогда, когда необходима высокая вероятность принятия верного решения.

Известны работы [1, 2], посвященные измерениям коэффициента пропускания атмосферы в различных спектральных диапазонах. Следует заметить, что имеющиеся практические результаты получены при конкретных условиях, которые в общем случае могут отличаться от текущих. В настоящей работе предлагается получение апостериорной аналитической модели для учета коэффициента пропускания атмосферы $\tau_a(\lambda)$, инвариантной относительно условий наблюдения.

Аналитическая модель для оценки коэффициента пропускания атмосферы

При построении аналитической модели для оценки коэффициента пропускания атмосферы в ИК_{Сид} необходимо получить расчетное соотношение для прохождения ИК излучения в атмосфере.

Известно, что аналитическая модель экспериментальных данных, полученных в результате исследования определенного физического явления или технического объекта, может быть представлена композицией функций вида

$$Z = F_1(r_1, r_2, \dots, r_k) \circ F_2(S_1, S_2, \dots, S_m),$$

где r_1, r_2, \dots, r_k – внутренние параметры, характеризующие явление, а S_1, S_2, \dots, S_m – внешние (рис. 2). Соответственно, компонента $F_1(r_1, r_2, \dots, r_k)$ описывает влияние внутренних параметров и представляет собой общую часть искомой модели. Вторая компонента – $F_2(S_1, S_2, \dots, S_m)$ – характеризует воздействие внешних параметров.

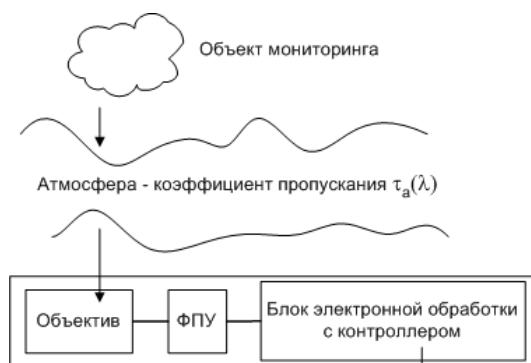


Рис. 1. Структурная схема процесса мониторинга объекта

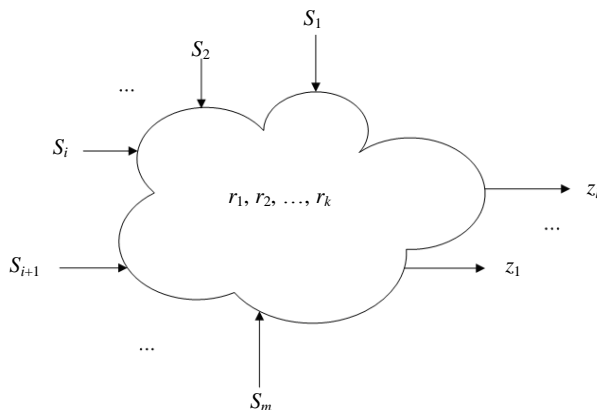


Рис. 2. Параметры, описывающие физическое явление

При получении аналитической модели не будем учитывать возможную зависимость состояния объекта от выходных параметров, т.е. предполагаем отсутствие обратной связи. Кроме того, будем считать, что все исходные эмпирические данные описывают одно и то же явление, которое с точки зрения физики должно подчиняться какому-то единому закону. Несмотря на то, что аналитическая модель строится апостериорно – на основе экспериментальных данных, полученных при различных условиях, – она должна содержать некоторые общие для всех ситуаций составляющие, учитывающие единый физический закон явления (см. рис. 1). Этим объясняется наличие компоненты F_1 . Компонента F_2 необходима для корректировки результатов с учетом различных внешних условий.

Известны [1, 2] экспериментальные данные о значении коэффициента пропускания атмосферы $\tau_a(\lambda)$ для двух спектральных диапазонов в инфракрасной области – [3; 5,2] и [8; 14] мкм. Результаты, представленные графически на рис. 3, получены для пяти климатических зон при различных значениях метеорологической дальности видимости d .

Различия форм графиков для разных участков диапазонов спектра, наличие множества локальных экстремумов обусловлены сложной физической природой явления пропускания атмосферы. Пропускание атмосферы определяется поглощением составляющих атмосферу газов и рассеянием на частицах, молекулах и аэрозолях. Для диапазона ИК излучения существенное влияние оказывает присутствующий в атмосфере водяной пар. На рис. 4 показаны спектры пропускания озона (O_3), углекислого газа (CO_2) и водяных паров (H_2O). Для сравнения показан солнечный спектр, наблюдаемый с земной поверхности [3].

Метод практического определения коэффициента пропускания атмосферы описан в [4] и применим при известных параметрах атмосферы: температуре, метеорологической дальности видимости и относительной влажности. Данный метод обременителен при мониторинге объектов, поскольку требует наличия дополнительных измерительных систем. Кроме того, для его применения необходимо наличие базы данных, содержащей сведения о поглощении газов в различных спектральных диапазонах, о коэффициенте рассеяния атмосферы и другие сведения. Для оценки коэффициента пропускания предлагается построение апостериорной аналитической модели в виде зависимости

$$\tau_a(\lambda) = f_1(\lambda) \circ f_2(\varphi, \xi),$$

где $f_1(\lambda)$ – функция пропускания в зависимости от длины волны излучения для среднестатистического физико-химического состава атмосферы; $f_2(\varphi, \xi)$ – функция, учитывающая геофизический и климатический фактор (географическое место, его физические особенности и время года – например, Арктика и летний период).

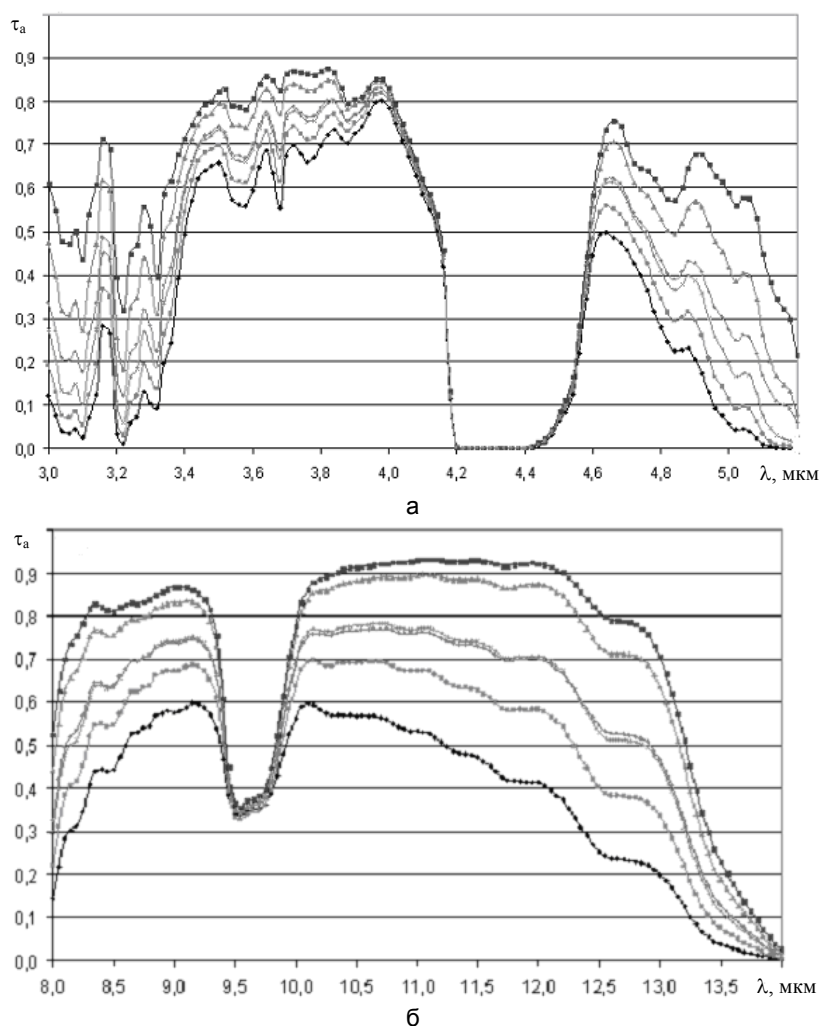


Рис. 3. Значения коэффициента пропускания атмосферы для $d = 5$ км в диапазоне длин волн [3; 5,2] мкм (а) и [8; 14] мкм (б). Сверху вниз показаны данные для климатических зон: Арктика зимой; средние широты зимой; усредненные данные; Арктика летом; средние широты летом; тропики

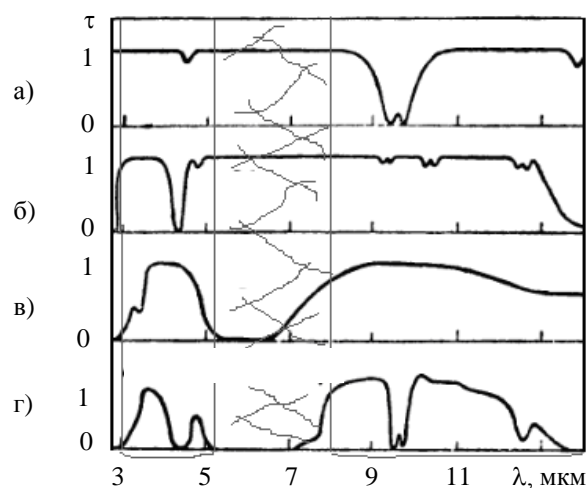


Рис. 4. Спектральное пропускание озона (а), углекислого газа (б), водяных паров (в) и атмосферы (г)

Исходные экспериментальные данные известны для разных метеорологических дальностей видимости и климатических зон. Для получения инвариантной относительно условий наблюдения зависимости усредним все исходные данные по величине дальности видимости d . Для удобства математического представления спектральной характеристики коэффициента пропускания $\tau_a(\lambda)$ и повышения точности

вычислений выделим в спектре характерные участки. Подобный подход предложен авторами в [5]. Это позволяет использовать для каждого участка наиболее приемлемую эмпирическую зависимость.

Вид эмпирической зависимости определим с помощью регрессионного анализа и перебора различных известных функций. Эмпирические коэффициенты для каждой климатической зоны получены на основе метода наименьших квадратов.

Критерием достоверности получаемой зависимости будем считать коэффициент детерминации R^2 , превышающий значение 0,9.

Результаты построения модели

Диапазон [3; 5,2] мкм был разделен на три участка (I, II, III) по точкам локальных минимумов (подробнее принцип деления представлен в [5]). Диапазон [8; 14] мкм был разделен на участки IV, V, VI по точкам локальных максимумов. Графически этот этап представлен на рис. 5.

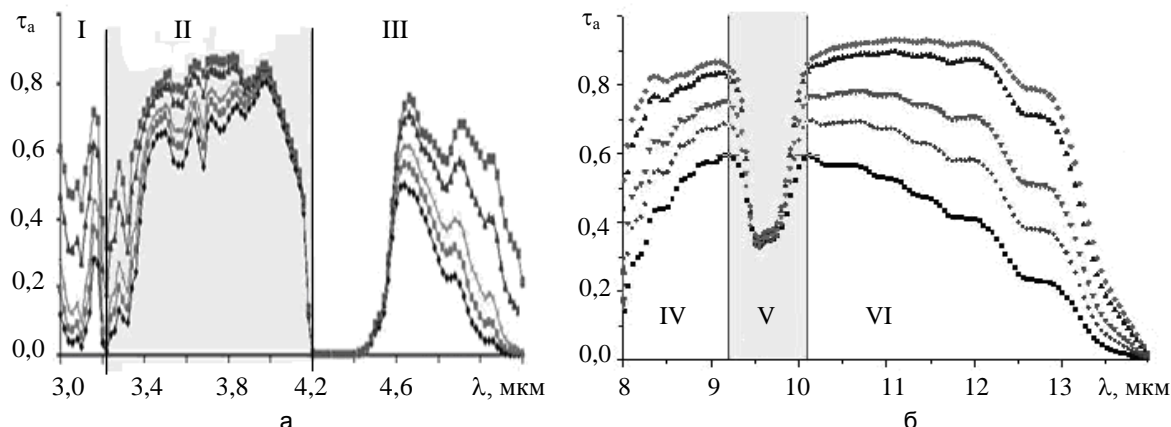


Рис. 5. Разбиение спектральных диапазонов на изотропные участки: диапазон длин волн [3; 5,2] мкм (участки I, II, III) (а); диапазон длин волн [8; 14] мкм (участки IV, V, VI) (б)

Для математического представления спектрального коэффициента пропускания на выделенных участках длин волн выбраны полином пятой степени

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

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

$$\tau(\lambda) = \tau_0 + A \cdot \frac{1}{1 + e^{\frac{\lambda - \lambda_c + w_1/2}{w_2}}} \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + e^{\frac{\lambda - \lambda_c - w_1/2}{w_3}}} \right), \quad (2)$$

иногда называемая asymmetric double sigmoid, где τ_0 – горизонтальная асимптота; A – амплитуда; λ_c – абсцисса центра «пика» функции; w_1, w_2 и w_3 – параметры, влияющие на ширину и «форму» пика кривой.

На каждом из шести выделенных участков спектрального диапазона применима только одна из представленных зависимостей (1). Зависимость (1) применена на первых двух (I, II) участках диапазона [3; 5,2] мкм, а зависимость (2) – для участка III диапазона [3; 5,2] мкм и на всех участках (IV, V, VI) диапазона длин волн [8; 14] мкм. Участки IV и VI аппроксимируются одной формулой. Вычисленные значения эмпирических коэффициентов в формулах приведены в табл. 1 и табл. 2. При этом величины коэффициента детерминации составили от 0,939 до 0,955 для полиномиальной аппроксимации (1) и от 0,975 до 0,997 для аппроксимации asymmetric double sigmoid (2), что показывает высокую достоверность полученных результатов.

Отметим, что математическое представление соотношения (1) – более простое, но коэффициенты аппроксимации должны иметь 15 значащих цифр и не несут физического смысла. Соотношение (2) больше соответствует реальным физическим законам пропускания атмосферы, эмпирические коэффициенты могут быть подсчитаны с точностью до четырех значащих цифр.

Коэффициенты	Арктика. Лето	Тропики	Арктика. Зима	Средние широты. Лето	Средние широты. Зима
	I: [3; 3,2] мкм				
A_0	19879555,8171565	19875345,1528570	19878738,8475666	19877752,8039432	19880602,3121815

ИНВАРИАНТНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ КОЭФФИЦИЕНТА ПРОПУСКАНИЯ...

A_1	-32259735,6738831	-32255664,8883141	-32258955,5542238	-32257992,0433420	-32260752,0135739
A_2	20937847,8100510	20936536,2672222	20937599,8373558	20937285,8598364	20938176,8571623
A_3	-6794064,3632233	-6793923,5474454	-6794038,1152467	-6794004,0082322	-6794099,8705824
A_4	1102181,0				
A_5	-71514,0				
R^2	0,976	0,935	0,940	0,972	0,969
II: [3,22; 4,22] мкм					
A_0	14168,7544688900	14169,8581257862	14173,0513145934	14168,8873745887	14170,5451200000
A_1	-19903,7802491497	-19904,5253558671	-19905,8000394155	-19903,9297913745	-19904,5681000000
A_2	11145,3869141245	11145,5017267942	11145,6249282324	11145,4149164221	11145,4731300000
A_3	-3110,5230				
A_4	432,7770				
A_5	-24,020				
R^2	0,952	0,939	0,947	0,946	0,955

Таблица 1. Эмпирические коэффициенты для соотношения (1).
Цифрами I–II обозначены соответствующие участки спектра

Коэффициенты	Арктика. Лето	Тропики	Арктика. Зима	Средние широты. Лето	Средние широты. Зима
	III: [4,24; 5,2] мкм				
y_0	-0,002				
x_c	4,722	4,653	4,862	4,687	4,803
A	0,708	0,801	0,718	0,741	0,693
w_1	0,313	0,159	0,594	0,234	0,476
w_2	0,024				
w_3	0,126				
R^2	0,982	0,990	0,976	0,987	0,975
IV: [8; 9,15], VI: [10,15; 14] мкм					
y_0	0,754	0,599	0,856	0,690	0,830
x_c	9,643				
A	-0,412	-0,259	-0,500	-0,360	-0,484
w_1	0,496				
w_2	0,036				
w_3	0,060				
R^2	0,996	0,997	0,997	0,996	0,997
V: [9,2; 10,1] мкм					
y_0	-0,198				
x_c	10,566				
A	0,970	0,771	1,113	0,889	1,078
w_1	5,320	4,980	5,675	5,124	5,580
w_2	0,292	0,203	0,307	0,248	0,326
w_3	0,506	0,803	0,339	0,623	0,372
R^2	0,989	0,979	0,987	0,989	0,987

Таблица 2. Эмпирические коэффициенты для соотношения (2).
Цифрами III–VI обозначены соответствующие участки спектра

Построенные по предложенным эмпирическим зависимостям спектральные характеристики пропускания атмосферы показаны на рис. 6.

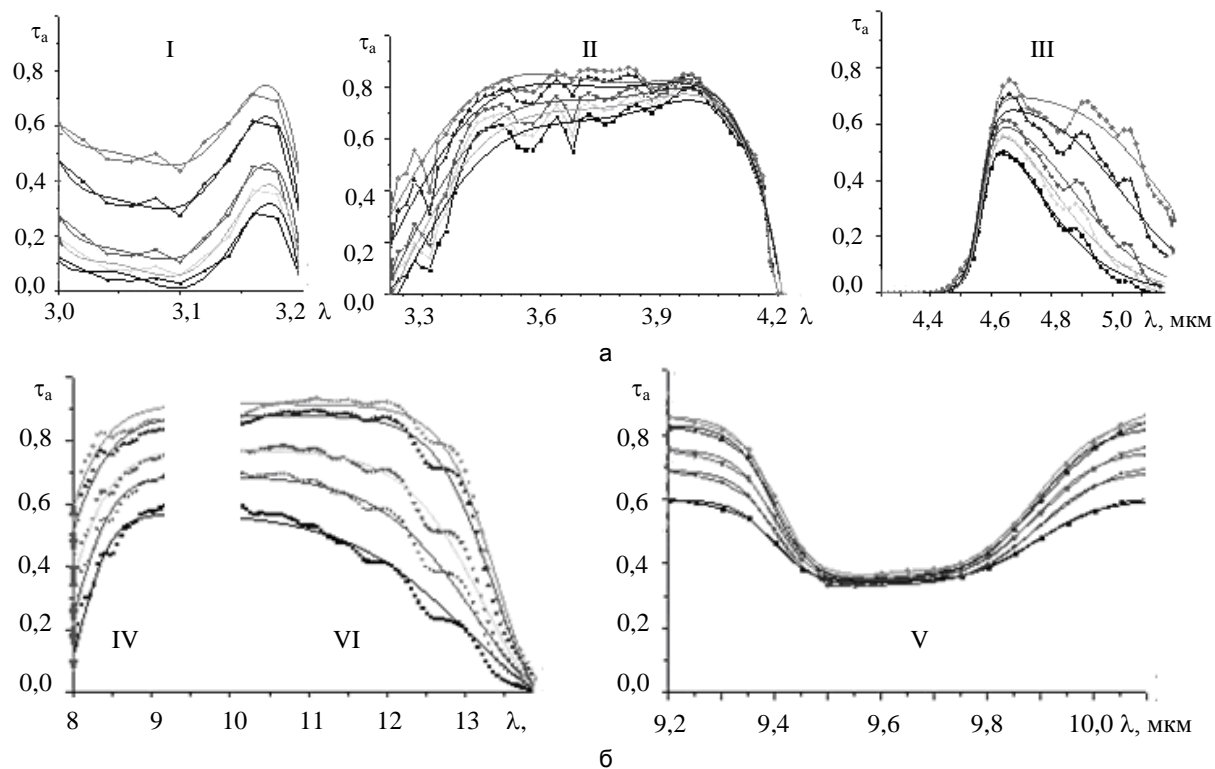


Рис. 6. Расчетные зависимости $\tau_a(\lambda)$ для диапазонов [3; 5,2] мкм (а) и [8; 14] мкм (б) на выделенных участках диапазонов длин волн. Сверху вниз показаны данные для климатических зон: Арктика зимой; средние широты зимой; усредненные данные; Арктика летом; средние широты летом; тропики (цифрами I–VI обозначены соответствующие участки спектра)

На сегодняшний день учет географических и климатических условий представлен в модели различными значениями коэффициентов в эмпирической формуле (табл. 1, 2). Задача поиска компоненты $f_2(\varphi, \xi)$ модели, учитывающей внешние факторы, будет решена на последующих этапах работы.

Заключение

Рассмотрена проблема учета внешних условий при мониторинге среды на примере явления пропускания атмосферы в среднем и дальнем ИК диапазоне спектра излучения. Предложен алгоритм разбиения множества известных экспериментальных данных в диапазонах длин волн [3; 5,2] мкм и [8; 14] мкм на группы для представления их аналитическими зависимостями. Предложена инвариантная по отношению к дальности видимости аналитическая модель оценки коэффициента пропускания атмосферы при мониторинге объектов. Полученные результаты полезны для создателей тепловизионной техники.

Литература

1. Ллойд Дж. Системы тепловидения: Пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 417 с.
2. Справочник по инфракрасной технике / Под ред. У. Волф, Г. Цисис. Т.1. Физика инфракрасного излучения: Пер. с англ. – М.: Мир, 1995. – 606 с.
3. Джемисон Дж.Э., Мак-Фи Р.Х., Плас Дж.Н. и др. Физика и техника инфракрасного излучения. – М.: Советское радио, 1965. – 642 с.
4. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: Пер. с франц. – М.: Мир, 1988. – 416 с.
5. Демин А.В., Моисеева М.И. Представление экспериментальных данных об оптических параметрах атмосферы аналитическими зависимостями // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 2 (72). – С. 90–95.

Демин Анатолий Владимирович – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, dav_60@mail.ru

Моисеева Мария Игоревна – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, mim14@mail.ru