

УДК 623.618.2

В.А. Павлій<sup>1</sup>, А.Н. Маковейчук<sup>2</sup>, Г.В. Худов<sup>1</sup><sup>1</sup>Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков<sup>2</sup>Львовский филиал Киевского транспортного университета, Львов

## ФУНКЦИЯ РАЗМЫТИЯ ТОЧКИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ СМАЗЕ И ДЕФОКУСИРОВКЕ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ НЕОДНОРОДНОСТЬЮ АТМОСФЕРЫ

В статье рассматриваются основные искажающие факторы, обусловленные неоднородностью атмосферы, приводящие к смазу и дефокусировке оптико-электронных изображений. Получено математическое выражение при влиянии атмосферных искажений и выражение для функции размытия точки. Для искаженного изображения, полученного с аппарата дистанционного зондирования Земли, построена функция размытия точки.

**Ключевые слова:** изображение, функция размытия точки, смаз, дефокусировка, атмосфера, турбулентность.

### Введение

**Постановка проблемы в общем виде.** Известно [1 – 5], что наиболее частыми случаями искажений оптико-электронных изображений являются размытия из-за неправильного фокуса и смаза. Одна из причин указанных искажений – влияние атмосферы. Закон искажения изображения определяется функцией искажения или функцией размытия точки (ФРТ), ядром искажающего оператора [5].

**Цель статьи** – определить ФРТ, обусловленную атмосферными искажениями.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Вопросам распространения оптического излучения в атмосфере, влияния атмосферы на оптический сигнал, влияния турбулентностей атмосферы на оптический сигнал посвящено большое количество работ, некоторые из которых рассмотрены в [1]. Установлено [2, 3, 6 – 16], что по характеру искажений оптического сигнала атмосферные помехи разделяются на несколько групп. Проанализируем возможность получения ФРТ с учетом известных характеристик атмосферных искажений.

### Постановка задачи и изложение материалов исследования

Молекулярное поглощение излучения атмосферными газами приводит к энергетическим потерям в сигнале. Известно [2, 3, 8 – 10], что атмосфера, кроме водяного пара, состоит главным образом из азота, кислорода и аргона, процентное содержание которых приведено в табл. 1.

Атмосфера также содержит и другие компоненты, однако, как указано в [1], другие содержащиеся в атмосфере газы не оказывают существенного влияния на поглощение видимых и инфракрасных волн. Водяной пар оказывает наибольшее влияние на распространение оптического сигнала в диапазоне 5,5 – 7,5 мкм, 2,6 – 3,3 мкм, а также в полосах поглощения с центрами около длин волн 1,87; 1,38; 1,1; 0,94; 0,81; 0,72 мкм. Тонкая структура колебательно-вращательного спектра водяного пара чрезвычайно сложна и запутана. Каждая из этих полос состоит из сотен и даже тысяч отдельных линий, идентификация которых представляет собой весьма сложную задачу [1, 3].

Таблица 1  
Состав сухого воздуха

Составляющие атмосферы	Средняя концентрация в тропосфере, %	Примечание
N <sub>2</sub>	78,084	В верхней ионосфере диссоциирует, на более низких уровнях перемешан
O <sub>2</sub>	20,946	Диссоциирует выше 95 км, на более низких уровнях перемешан
Ar	0,934	Перемешан до высоты 110 км, выше – диффузное разделение

Атмосфера также содержит и другие компоненты, однако, как указано в [1], другие содержащиеся в атмосфере газы не оказывают существенного влияния на поглощение видимых и инфракрасных волн. Водяной пар оказывает наибольшее влияние на распространение оптического сигнала в диапазоне 5,5 – 7,5 мкм, 2,6 – 3,3 мкм, а также в полосах поглощения с центрами около длин волн 1,87; 1,38; 1,1; 0,94; 0,81; 0,72 мкм. Тонкая структура колебательно-вращательного спектра водяного пара чрезвычайно сложна и запутана. Каждая из этих полос состоит из сотен и даже тысяч отдельных линий, идентификация которых представляет собой весьма сложную задачу [1, 3].

Аэрозольное и молекулярное рассеяние отбрасывает у оптического сигнала часть энергии и передает её «рассеянной» сигнальной компоненте с низкочастотным пространственным спектром [3]. Наиболее часто встречающиеся в атмосфере аэрозоли представляют собой капли воды в жидком и твердом состояниях, объединяемые общим понятием – гидрометеоры (дождь, туман, снег, дымка и т.д.). Ослабление энергии видимого диапазона объясняется тем, что волна наводит токи смещения, которые, в свою очередь, являются источниками вторичного и рассеянного излучения, что также создает эффект ослабления в направлении распространения волны, причем в видимом диапазоне основные потери энергии создаются за счет явления рассеяния [1, 2]. К аэрозолям в атмосфере относятся переносимые ветром частицы пыли и морской соли, продукты сгорания (сажа, пепел), конденсированные органические остатки и вещества, образующиеся в результате химических реакций в атмосфере. Коэффициенты аэрозольного рассеяния очень сильно зависят от размеров, химического состава и концентрации частиц аэрозоля, которые подвержены большой изменчивости во времени и пространстве. С достаточной для инженерных расчетов точностью можно сказать, что концентрация аэрозоля с ростом высоты до 10 км уменьшается [1, 2].

Световая волна, распространяющаяся в земной атмосфере, кроме энергетических потерь, испыты-

вает флуктуации амплитуды и фазы, возникающие вследствие случайного пространственно-временного распределения показателя преломления воздуха, обусловленные турбулентными движениями в атмосфере, влекущими за собой случайное изменение температуры и связанного с ней показателя преломления. Известно [1 – 3], что согласно теории распространения волн в турбулентной атмосфере энергетические потери проходящего излучения оказываются незначительными по сравнению с потерями из-за молекулярного рассеяния, в то время как параметры оптической волны испытывают существенные случайные флуктуации. Флуктуации амплитуды и фазы волны в оптическом пучке приводят к появлению помех, связанных с изменением структуры оптических пучков: расширению оптического пучка, флуктуациям направления его распространения и расщепления оптического пучка.

Основными причинами турбулизации воздушных течений в атмосфере являются возникающие по тем или иным причинам контрасты в полях температуры и скорости ветра. К атмосферным процессам, формирующим эти контрасты, относятся [17]:

- трение воздушного потока о поверхность земли и образование в нижней его части профиля скорости ветра с большими вертикальными градиентами;

- неодинаковое нагревание различных участков подстилающей поверхности земли и связанное с этим развитие термической конвекции;

- процессы облакообразования, при которых происходит выделение тепла конденсации и кристаллизации и изменение характера поля температуры и скорости ветра;

- сближение и взаимодействие масс воздуха с различными характеристиками вблизи атмосферных фронтов и высотных фронтальных зон, где велики горизонтальные контрасты температуры и скорости ветра;

- потеря устойчивости волнами, образующимися в инверсионных слоях, на тропопаузе и вблизи других атмосферных поверхностей раздела;

- деформация воздушных течений горными препятствиями и возникновение волновых возмущений и роторных движений на подветренной их стороне.

Расширение пучка турбулентной атмосферой делает невозможной фокусировку оптического излучения на больших расстояниях, что имеет место при съемке с борта летательного аппарата. По мере увеличения диаметра источника дифракционное пятно в фокусе уменьшается в турбулентной атмосфере не в соответствии с известными в оптике однородных сред формулами, а до некоторого конечного размера, которое называют размером насыщения.

Помимо молекулярного поглощения, аэрозольного и молекулярного рассеяния на распространение оптического сигнала оказывают влияние помехи от посторонних источников (рассеянное и отраженное солнечное излучение, собственное свечение атмосферы и земной поверхности и т.д.). Помехи от посторонних источников проявляются в добавлении к сигналу независимой фоновой составляющей [3]. Максимальная яркость фона для помех различной природы приведена в табл. 2 [3].

Таблица 2

Максимальная яркость фона для помех различной природы

	Максимальная яркость фона, Вт/см <sup>2</sup> ·ср·мкм	
	$\lambda = 1\text{мкм}$	$\lambda = 10\text{мкм}$
Природа фоновых помех		
Отражение солнечного излучения водной поверхностью	$10^{-1}$	$10^{-5}$
Рассеяние солнечного излучения атмосферой (яркость безоблачного неба)	$10^{-2}$	$10^{-7}$
Рассеяние солнечного излучения облаками (яркость облачного неба)	$10^{-3}$	$10^{-7}$
Тепловое излучение атмосферы	$10^{-7}$	$10^{-3}$
Свечение атмосферы	$10^{-10}$	$10^{-6}$

Кроме теплового равновесного излучения в атмосфере присутствует неравновесное излучение, вызванное рядом физических и химических процессов, которое имеет место при взаимодействии оптической и жесткой солнечной радиации с атмосферой. Результатом этих процессов является слабая люминисценция атмосферы. Нетепловое оптическое излучение называют свечением атмосферы [1, 3, 17]. Однако, свечение атмосферы является существенной помехой только при работе оптико-электронных приборов в ночное время [3, 17].

Таким образом, в рамках линейного приближения процессов переноса излучения, принятого при изложении материала и достаточного для большинства практических ситуаций [3], рассмотренные выше атмосферные искажения могут быть описаны математической моделью (1):

$$y(t_1, t_2) = a \iint_D h(\tau_1, \tau_2) x(t_1 - \tau_1, t_2 - \tau_2) d\tau_1 d\tau_2 + b, \quad (1)$$

где  $x(t_1, t_2)$  – входной сигнал, поле истинной яркости земной поверхности;  $y(t_1, t_2)$  – выходной сигнал, поле яркости, наблюдаемое через атмосферу;  $a$  и  $b$  – параметры искажений: соответственно, коэффициент прозрачности атмосферы и яркость фона ( $0 < a < 1, b > 0$ );  $h(\tau_1, \tau_2)$  – ФРТ, обусловленная турбулентностью атмосферы.

По результатам, представленных в работах [3, 11, 12], следует, что ФРТ допускает довольно точную аппроксимацию:

$$h(\tau_1, \tau_2) = C \cdot \exp \left[ - \left( \frac{\tau_1^2 + \tau_2^2}{r^2} \right)^{\frac{5}{6}} \right], \quad (2)$$

где  $r$  – параметр, служащий оценкой радиуса пятна «размытия» двумерного сигнала;

$C$  – постоянная нормировки.

При наблюдении из космоса в направлении, близком к надиру, в зависимости от состояния атмосферы значения  $r$  изменяются от 1,7 до 10 см [3], т.е. оказываются меньше, чем пространственное разрешение современных систем дистанционного зондирования Земли [18].

Проведем оценку ФРТ, обусловленную турбулентностью атмосферы для снимка, представленного на рис. 1.

Изображение взято из источника [19] и представляет собой оптико-электронное изображение земной поверхности размером (512×512) пикселей, 256 градаций яркости серого цвета, полученное со спутника дистанционного зондирования Земли.

С учетом (2) ФРТ, обусловленная турбулентностью атмосферы, имеет вид (рис. 2).

## Выводы и направления дальнейших исследований

Таким образом, в работе получена ФРТ, обусловленная турбулентностью атмосферы, для изображения рис. 1. Видно, что действительно, полученная ФРТ может быть представлена гауссоидой.

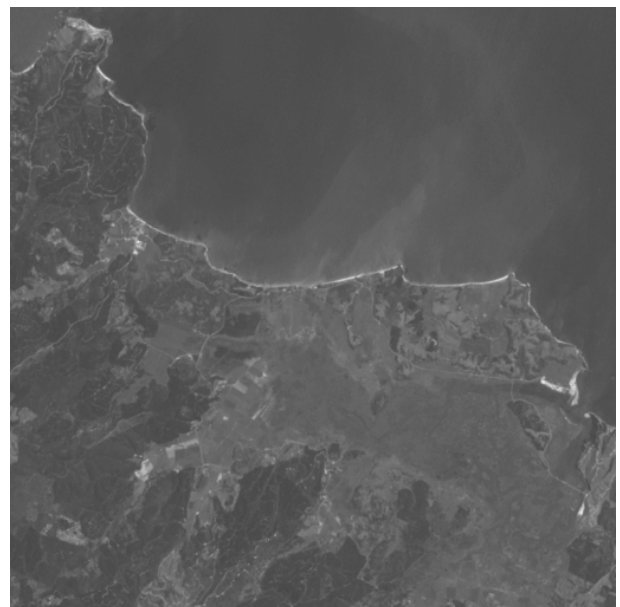


Рис. 1. Исходное изображение с помехой типа «смаз» и дефокусировкой

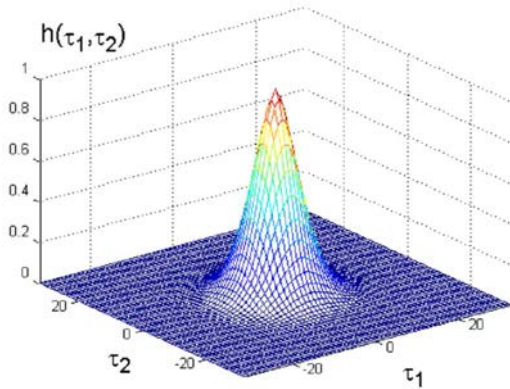


Рис. 2. ФРТ, обусловленная турбулентностью атмосферы

В дальнейшем исследованиях необходимо исследовать ФРТ, обусловленные другими искажающими факторами, приводящим к дефокусировке и смазу изображения, такими как движение объекта и аппаратные искажения.

### Список литературы

1. Зуев В.Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере / В.Е. Зуев. – М.: Советское радио, 1970. – 496 с.
2. Rees W.G. *Physical Principles of Remote sensing* / W.G.Rees. – Cambridge University Press, 2012. – 530 p.
3. Моделирование видеоинформационного тракта оптико-электронных систем дистанционного зондирования Земли: решения, проблемы, задачи / А.Ю. Баврина, В.В. Мясников, В.В. Сергеев, Е.В. Трецева, Н.В. Чушиев // *Компьютерная оптика*, 2012. – Т. 36. – № 4. – С. 572-585.
4. Внешний масштаб динамической турбулентности по результатам акустического зондирования атмосферы / О.Ф. Капегешева, Н.П. Красненко, П.Г. Стафеев, Л.Г. Шаманаева // *Оптика атмосферы и океана*, 2013. – Т. 26. – № 11. – С. 964-968.
5. Павлій В.А. Анализ известных методов восстановления оптико-электронных изображений, искаженных смазом / В.А. Павлій, Г.В. Худов // *Системи оборобки інформації*, 2013. – Х.: ХУПС. – Вип. 6 (113). – С. 118-121.
6. Новейшие методы обработки изображений / [А.А. Потапов, Ю.В. Гуляев, С.А. Никитов, А.А. Пахомов, В.А. Герман]. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 456 с.

7. Schowengerdt, R.A. *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing* / R.A. Schowengerdt. – Academic Press, 2006. – 560 p.

8. Зуев В.Е. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере (в условиях помех) / В.Е. Зуев, М.В. Кабанов. – М.: Советское радио, 1977. – 368 с.

9. Мишин И.В. Оценка нелинейных искажений оптического изображения земной поверхности в горизонтально-однородной атмосфере / И.В. Мишин // *Исследование Земли из космоса*. – 1982. – № 6. – С. 80-85.

10. Кондратьев К.Я. Влияние атмосферы на исследование природных ресурсов из космоса / К.Я. Кондратьев, О.И. Смоктий, В.В. Козодеров. – М.: Машиностроение, 1985. – 272 с.

11. Гонин Г.Б. Космическая фотосъемка для изучения природных ресурсов / Г.Б. Гонин. – Л.: Недра, 1980. – 319 с.

12. Мельканович А.Ф. Фотографические средства и их эксплуатация / А.Ф. Мельканович. – М.: Изд. Министерства обороны, 1984. – 576 с.

13. Goodman J.W. *Statistical Optics* / J.W. Goodman. – Wiley-Interscience, 2000. – 572 p.

14. Сергеев В.В. Методы цифрового моделирования оптико-электронных систем дистанционного формирования и обработки изображений: дис. докт. тех. наук: 05.13.06 / Сергеев Владислав Викторович. – Самара, 1993. – 432 с.

15. Matisse B.K. *Simulating the Performance of Imaging Sensors for Use in Realistic Tactical Environments* / B.K. Matisse, T.J. Rogne, G.R. Gerhart [et al.] // *Proceedings SPIE*. – 1985. – Vol. 550. – P. 2-11.

16. Пахомов А.А. Цифровая обработка малоcontrastных изображений, искаженных турбулентным слоем: автореферат дис. ... д-ра тех. наук: 05.13.18 / Пахомов Андрей Анатольевич. – М., 2009. – 35 с.

17. Турбулентность в свободной атмосфере / Н.К. Винниченко, Н.З. Пинус, С.М. Шметер, Г.Н. Шур. – Л.: Гидрометеоиздат, 1976. – 286 с.

18. Попов М.О. Стан і перспективи розвитку гіперспектральних систем аерокосмічної розвідки / М.О. Попов, С.В. Гринюк, П.М. Піонтиківський // *Наука і оборона*. – К., 2012. – № 2. – С. 39-47.

19. Электронный ресурс. Режим доступа к источнику: <http://www.pancroma.com/img/unprocessed.png>.

Поступила в редколлегию 5.11.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. К.С. Васюта, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

### ФУНКЦІЯ РОЗМИТТЯ ТОЧКИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ЗОБРАЖЕНЬ ПРИ ЗМАЗІ ТА ДЕФОКУСУВАННІ, ЩО ОБУМОВЛЕНІ НЕОДНОРІДНІСТЮ АТМОСФЕРИ

В.О. Павлій, О.М. Маковейчук, Г.В. Худов

В статті розглядаються основні спотворюючі фактори, що обумовлені неоднорідністю атмосфери, що приводять до змазу та дефокусуванню оптико-електронних зображень. Отримано математичний вираз при впливі атмосферних спотворень та вираз для функції розмиття точки. Для спотвореного зображення, що отримано з апарату дистанційного зондування Землі, побудована функція розмиття точки.

**Ключові слова:** зображення, функція розмиття точки, змаз, дефокусування, атмосфера, турбулентність.

### FUNCTION OF DEGRADATION OF THE POINT OF OPTIKO-ELECTRONIC IMAGES AT GREASING AND NOFOCUSING, CAUSED BY HETEROGENEITY OF ATMOSPHERE

V.A. Pavliy, A.N. Makoveychuk, G.V. Khudov

In article the basic deforming factors caused by heterogeneity of atmosphere, leading at greasing and nofocusing of optik electronic images are considered. Mathematical expression at influence of atmospheric distortions and expression for function of degradation of a point is received. For the deformed image received from the device of remote sounding of the Earth, it is constructed function of degradation of a point.

**Keywords:** the image, function of degradation of a point, greasing, nofocusing, atmosphere, turbulence.