

УДК 623.618.2

В.А. Павлій, Ю.С. Соломоненко, Г.В. Худов

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

## МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ В КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ

В статье усовершенствована модель формирования изображения с учетом особенностей функционирования космических систем оптико-электронного наблюдения. В модели учитывается влияние мультипликативных маскирующих помех.

**Ключевые слова:** изображение, модель, оптико-электронное наблюдение, космическая система, помеха, атмосфера.

### Введение

**Постановка проблемы в общем виде.** Известно [1-11], что качество изображений, полученных космическими системами оптико-электронного наблюдения, существенно зависит от воздействия различного рода искажающих факторов, таких как аддитивные и мультипликативные помехи, различного рода шумы, неправильная экспозиция, дисторсия, расфокусирование, поворот, сдвиг, изменение масштаба изображения и другие.

Существующие информационные технологии обработки изображений в космических системах наблюдения имеют ограниченные возможности по восстановлению изображений, эффективны только для определенных спектральных диапазонов, что, в свою очередь, негативно влияет на последующие этапы обработки изображений, особенно на этапы координатной привязки и обнаружения объектов на изображениях. Одна из причин ограниченных возможностей существующих информационных технологий обработки изображения – несовершенная модель формирования изображения с учетом особенностей космических оптико-электронных систем наблюдения.

**Цель статьи** – разработка модели формирования изображения с учетом особенностей функционирования космических систем оптико-электронного наблюдения.

**Анализ последних достижений и публикаций.** При формировании оптико-электронных изображений космических систем наблюдения атмосфера является возмущающей средой, которая искажает спутниковые данные, а в некоторых участках электромагнитного диапазона, например в дальнем инфракрасном с длиной волны около 100 мкм, вообще препятствует получению информации [10, 11]. Существенно влияют на формирование изображений различные аэрозоли [10, 11]. Естественный аэрозоль – твердые и жидкие частицы, взвешенные в воздухе, включают космическую, вулканическую и

почвенную минеральную пыль, пыльцу растений, частицы морской соли, капли облаков и туманов, частицы дыма лесных и торфяных пожаров. Антропогенный аэрозоль – это частицы сажи, пепла, цемента и другие отходы производства и транспорта. Существенным источником загрязнения являются топки печей, гидроэлектростанции, тепловые двигатели.

Атмосфера ослабляет восходящее излучение от поверхности Земли и в полосах прозрачности, этот эффект можно описать объемным коэффициентом поглощения  $\beta$  [12]. Происходит рассеяние света молекулами газов, капельками воды, пылинками, этот эффект описывается объемным коэффициентом рассеяния  $\sigma_{\text{рассеян}}$  [12]. Оптическая толщина  $\tau$  – это произведение объемного коэффициента ослабления света атмосферой на геометрическую длину пути светового луча. Если коэффициенты  $\beta$  и  $\sigma_{\text{рассеян}}$  зависят от координаты (а плотность атмосферы меняется с высотой), то на пути между точками с координатами  $\mathbf{r}_1$  и  $\mathbf{r}_2$ , оптическая толщина  $\tau$  определяется выражением [12]

$$\tau(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \int_{\mathbf{r}_1}^{\mathbf{r}_2} [\beta(\mathbf{r}) + \sigma(\mathbf{r})] d\mathbf{r}. \quad (1)$$

При малости эффектов многократного рассеяния, т.е. в пределах справедливости закона Бугера, имеем [12]:

$$I_1 = I_0 \exp(-\tau), \quad (2)$$

где  $I_0$  и  $I_1$  – интенсивности излучений в начальной (на поверхности Земли) и в конечной (на орбите спутника) точках соответственно.

Эффектами многократного рассеяния можно пренебречь для зеленого (G) и более длинноволновых участков спектра, но не для синего (B) участка [10, 12]. Приведенная формула (2) справедлива для наблюдения в надире. Если наблюдение проводится под углом  $\delta$  к надире, то для однородной атмосферы

ры интенсивность излучения в конечной (на орбите спутника) точке (рис. 1):

$$I_2 = I_0 \exp(-\tau / \sin \delta). \quad (3)$$

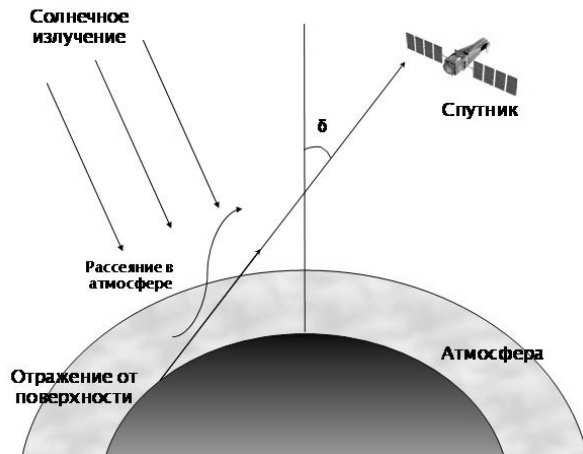


Рис. 1. Атмосферные факторы, влияющие на формирование изображения [12]

Выражение (3) не учитывает кривизну Земли, однако, существуют методики [10-13], позволяющие провести такой учет. Не учитывается также влияние возможных горизонтальных локальных неоднородностей (наличие тумана, дымки, облаков пыли и т.д.), поэтому расчет является приближенным [12, 13].

### Постановка задачи и изложение материалов исследования

Рассеяние света молекулами газов, капельками воды, пылинками подчиняется некоторым закономерностям [14-16]. Интенсивность молекулярного рассеяния для света с длиной волны  $\lambda$  пропорциональна  $\lambda^{-4}$ , эффект наиболее заметен в коротковолновой части спектра, он ответствен за голубой цвет неба [14-16]. Рассеяние на аэрозолях (размер частиц от  $0,01\lambda$  до  $10\lambda$ ) приводит к более слабой зависимости интенсивности от длины волны  $\lambda^{-n}$ , где  $0 < n < 4$ . Частицы дыма и облаков имеют размеры, много большие, чем длина волны видимого и инфракрасного диапазонов, здесь нет зависимости интенсивности рассеянного солнечного излучения от длины волны, цвет дымов и облаков близок к белому [13, 17, 18].

Космический аппарат (КА) может принимать информацию с больших площадей, при этом различные участки поверхности наблюдаются под разными углами  $\delta$ , и луч от них проходит разные расстояния в атмосфере. В результате одинаковые по оптическим свойствам участки поверхности могут иметь различную яркость. Для расчетов по формуле Бугера необходимо знать оптическую толщину атмосферы  $\tau$  [11-13, 18]. Это можно сделать, измеряя на Земле ослабление солнечной радиации. Со спут-

ника величину  $\tau$  можно оценить, наблюдая яркость объектов с заранее известными оптическими характеристиками. Грубо оценить величину  $\tau$  в видимом участке спектра можно также, используя зависимость между  $\tau$  и метеорологическими характеристиками тропосферы – температурой воздуха, скоростью ветра, относительной влажностью и упругостью водяного пара [13, 18].

Более точно учесть влияние атмосферы можно на основе теории переноса излучения в атмосфере, которая позволяет оценить яркость объектов по данным измерения восходящего излучения путем решения обратной задачи [13, 18].

Таким образом, с учетом [5, 6, 9, 10-13, 16, 18] модель формирования оптико-электронного изображения может быть представлена в виде

$$v(x, y) = I(x, y) \cdot f(x, y), \quad (4)$$

где для каждой точки изображения с координатами  $(x, y)$  введены функции:

- $v(x, y)$  – освещенность в точке с координатами  $(x, y)$ ;
- $I(x, y)$  – внешняя освещенность на трассе распространения излучения от Солнца до точки с координатами  $(x, y)$ , изменение которой создает эффект помехи;
- $f(x, y)$  – коэффициент отражения от подстилающей поверхности с расположенными на ней объектами наблюдения.

Предполагается [5, 6, 9, 10-13, 16, 18], что функция  $I(x, y)$  пространственно изменяется существенно медленнее, чем  $f(x, y)$ .

Модель регистрации изображения может быть записана как [5, 6, 9, 10-13, 16, 18]

$$g(x, y) = s(x, y) \cdot v(x, y) + n(x, y), \quad (5)$$

где  $g(x, y)$  – регистрируемая освещенность точки с координатами  $(x, y)$ ;

- $s(x, y)$  – коэффициент изменения освещенности изображения на трассе «точка с координатами  $(x, y)$  – КА» (эффект помехи);
- $n(x, y)$  – шум.

Другие изменения освещенности в точке с координатами  $(x, y)$  не учитываются.

Таким образом, в принятых обозначениях задача обработки изображения формулируется как нахождение истинного изображения (восстановления)  $r(x, y)$  – функции, пропорциональной  $f(x, y)$ , по регистрируемому изображению  $g(x, y)$ . По отношению к искомой функции  $f(x, y)$ , функции  $I(x, y)$  и  $s(x, y)$  являются мультипликативными [11, 18, 19].

Рассмотренная выше модель формирования оптико-электронного изображения (4), (5) сформулирована применительно к задаче обработки изображений в условиях воздействия различного рода помех (аддитивных, мультипликативных и т.д.).

Поставим задачу усовершенствования модели (4), (5) применительно к случаю формирования оптико-электронных изображений при наличии мультипликативной протяженной маскирующей помехи.

Учтем [12, 13, 17, 18], что для видимого диапазона волн ослабление оптического излучения атмосферой происходит за счёт рассеяния энергии излучения вследствие оптически неоднородной атмосферы. Принято [10, 11], что действие мультипликативной помехи при наблюдении с борта КА сосредоточено в узком приземном слое атмосферы, который считаем однородным, а искажающий фактор моделируется множественными отражениями от эффективного полупрозрачного экрана, который находится на линии раздела слоев. Коэффициент отражения от экрана считается

заданным и равным  $\alpha$ , ослабление света в самом экране, между экраном и подстилающей поверхностью учтем множителем  $\gamma$ .

При отсутствии помех регистрируемое изображение  $g(x, y)$  в основном определяется отражением от поверхности Земли. Примем для простоты, что освещенность  $I(x, y)$  постоянна, тогда из (4) следует, что в неискаженной области

$$g(x, y) = \text{const} \cdot f(x, y), \quad (6)$$

где  $f(x, y)$  – яркость исходного изображения с расположенными на ней объектами наблюдения.

Не теряя общности, примем, что в (6)  $\text{const} = 1$ , при этом значения всех величин, используемых ниже, будут лежать в диапазоне  $[0; 1]$ .

Для упрощения расчетов яркости изображения в искаженной области применена диаграммная техника. Так, множественные отражения можно представить в виде следующего ряда (верхняя линия соответствует экрану) (рис. 2).

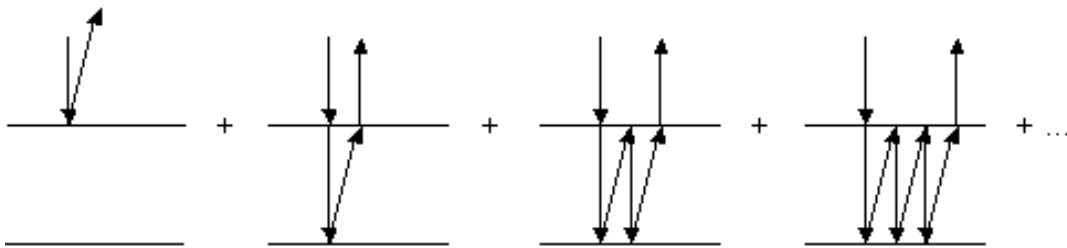


Рис. 2. Диаграммная техника расчета яркости изображения в искаженной области

Результирующая яркость регистрируемого изображения в каждой точке  $(x, y)$  в области наличия искажений находится как сумма слагаемых, каждое из которых соответствует однократному отражению, двукратному, троекратному и т.д. При этом каждое отражение от экрана приносит множитель  $\alpha$ , прохождение через экран – множитель  $(1 - \alpha)$ , отражение от подстилающей поверхности –  $f(x, y)$ , каждое прохождение между экраном и подстилающей поверхностью дает множитель  $\gamma$ .

Таким образом, диаграмме, изображенной на рис. 2, будет соответствовать ряд

$$g(x, y) = \alpha + (1 - \alpha) \cdot \gamma \cdot f(x, y) \cdot \gamma \cdot (1 - \alpha) + (1 - \alpha) \cdot \gamma \cdot f(x, y) \cdot \gamma \cdot \alpha \cdot \gamma \cdot f(x, y) \cdot \gamma \cdot (1 - \alpha) + (1 - \alpha) \cdot \gamma \cdot f(x, y) \cdot \alpha \cdot \gamma \cdot f(x, y) \cdot \gamma \times \alpha \cdot \gamma \cdot f(x, y) \cdot \gamma \cdot (1 - \alpha) + \dots, \quad (7)$$

где  $\gamma$  – коэффициент прохождения в области между экраном и подстилающей поверхностью (при отсутствии помехи  $\gamma = 1$ ).

Ряд (7), начиная со второго слагаемого (первое слагаемое равно  $\alpha$ ), представляет собой геометрическую прогрессию с первым членом

$(1 - \alpha)^2 \gamma^2 f(x, y)$  и знаменателем  $\alpha \gamma^2 f(x, y) < 1$  [19]. Сумма ряда равна [19]

$$g(x, y) = \alpha + \frac{(1 - \alpha)^2 \gamma^2 f(x, y)}{1 - \alpha \gamma^2 f(x, y)}. \quad (8)$$

Таким образом, для решения задачи восстановления изображения по измеренным значениям  $g(x, y)$  необходимо оценить параметры модели  $\alpha$ ,  $\gamma$ , после чего из (8) определяется  $f(x, y)$ . Вычисленное значение изображения  $f(x, y)$  (восстановленное изображение) обозначено как  $r(x, y)$ .

Решив уравнение (8) относительно  $f(x, y)$ , получаем, что в искаженной области

$$r(x, y) = \frac{1}{\gamma^2} \frac{g(x, y) - \alpha}{1 + \alpha g(x, y) - 2\alpha}. \quad (9)$$

Таким образом, окончательно получим

$$r(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{\gamma^2} \frac{g(x, y) - \alpha}{1 + \alpha g(x, y) - 2\alpha} & \text{в области искажения,} \\ g(x, y) & \text{в неискаженной области.} \end{cases} \quad (10)$$

## Выводы и направления дальнейших исследований

Таким образом, модель формирования изображения в космической системе оптико-электронного наблюдения с учётом воздействия мультипликативной маскирующей помехи учитывает сосредоточенность искажающей среды в узком приземистом слое, первичное отражение солнечного излучения от верхней границы искажающего слоя и последующие многократные переотражения прошедших излучений видимого диапазона волн от земной поверхности и верхней границы слоя искажающей среды.

Направлением дальнейших исследований является использование усовершенствованной модели для обработки изображений, полученных в космических системах оптико-электронного наблюдения.

## Список литературы

1. Красильников Н.Н. Цифровая обработка 2D- и 3D-изображений / Н.Н. Красильников. - СПб.: БХВ-Петербург, 2011. - 608 с.
2. Злобин В.К. Обработка аэрокосмических изображений / В.К. Злобин, В.В. Еремеев. - М.: Физматлит, 2006. - 288 с.
3. Антонушкина С.В. Особенности анализа и обработки информации от систем гиперспектральной съемки земной поверхности / С.В. Антонушкина, В.В. Еремеев, А.А. Макаренко // Цифровая обработка сигналов. - 2010. - № 4. - С. 38-45.
4. Кузнецов А.Е. Организация процесса формирования мозаичных изображений земной поверхности / А.Е. Кузнецов, О.А. Пресняков // Цифровая обработка сигналов. - 2011. - № 3. - С. 28-35.
5. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В.А. Сойфера. - 2-е изд., испр. - М.: Физматлит, 2003. - 784 с.
6. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. - М.: Техносфера, 2005. - 1072 с.
7. Бейтс Р. Восстановление и реконструкция изображений / Р. Бейтс, М. Мак-Доннелл. Пер. с англ. - М.: Мир, 1989. - 336 с.
8. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / Р.А. Шовенгердт. - М.: Техносфера, 2010. - 560 с.
9. Новейшие методы обработки изображений / [А.А. Потапов, Ю.В. Гуляев, С.А. Никитов, А.А. Пахомов, В.А. Герман] под ред. А.А. Потапова. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. - 456 с.
10. Маковейчук О.М. Алгоритмы реставрации дефокусированных изображений / О.М. Маковейчук, В.О. Подліпаєв // Системи озброєння і військова техніка. - 2005. - № 3-4. - С. 99-103.
11. Маковейчук А.Н. Теоретическое обоснование методики защиты видовых изображений от воздействия маскирующих помех / А.Н. Маковейчук, В.А. Подліпаєв, Г.В. Худов // Системи обробки інформації. - Х.:ХУПС, 2005. - Вип. 6. - С. 62-71.
12. Зуев В.Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере / В.Е. Зуев. - М.: Сов. радио, 1970. - 496 с.
13. Зуев В.Е. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере (в условиях помех) / В.Е. Зуев, М.В. Кабанов. - М.: Сов. радио, 1977. - 368 с.
14. Кузьмин В.Л. Когерентные эффекты при рассеянии света в неупорядоченных системах / В.Л. Кузьмин, В.П. Романов // УФН, 1996. - Т. 166. - С. 247-253.
15. Кляцкин В.И. Распространение электромагнитных волн в случайно-неоднородной среде как задача статистической математической физики / В.И. Кляцкин // УФН, 2004. - Т. 174. - С. 177-183.
16. Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами / Г. ван де Хюлст. - М.: Издательство иностранной литературы, 1961. - 536 с.
17. Депременджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами / Д. Депременджан - М.: Мир, 1971. - 165 с.
18. Нагирнер Д.И. Лекции по теории переноса излучения: Учеб. пособие / Д.И. Нагирнер. - СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2001. - 284 с.
19. Корн Г.А. Справочник по математике для научных работников и инженеров: Пер. с амер., перераб. / Г.А. Корн, Т.М. Корн; под общ. ред. И.Г. Арамановича. - М.: Наука, 1986. - 831 с.

Поступила в редколлегию 12.02.2015

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

## МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ ЗОБРАЖЕННЯ В КОСМІЧНИХ СИСТЕМАХ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ

В.О. Павлій, Ю.С. Соломоненко, Г.В. Худов

В статті удосконалена модель формування зображення з урахуванням особливостей функціонування космічних систем оптико-електронного спостереження. В моделі враховано вплив мультипликативної маскуючої перешкоди.

**Ключові слова:** зображення, модель, оптико-електронне спостереження, космічна система, перешкода, атмосфера.

## MODEL OF IMAGE FORMATION IN SPACE SYSTEMS OF OPTO-ELECTRONIC SURVEILLANCE

V.O. Pavliy, Yu.S. Solomonenko, H.V. Khudov

In article the model of formation of the image taking into account features of functioning of space systems of optiko-electronic surveillance is improved. In model influence of multiply mask hindrances is considered.

**Keywords:** the image, model, optiko-electronic surveillance, space system, a hindrance, atmosphere.