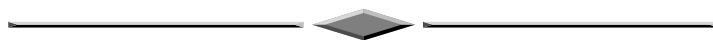


ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ, ФОТОГРАММЕТРИЯ



УДК 528.837

DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-4-26-31

Анализ влияния атмосферы на пространственное разрешение сканирующих съемочных систем летательных аппаратов

Г. В. Алиева¹, О. А. Гусейнов¹

¹ Национальное Аэрокосмическое Агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика

e-mail: gunelcelilova@mail.ru

Аннотация. Исследовано влияние функции передачи модуляции (ФПМ) различных факторов на пространственно-угловое разрешение бортовых съемочных систем. Отмечено, что пространственное разрешение бортовых съемочных систем, формирующих изображения, в основном ограничивается ФПМ турбулентности, ФПМ аэрозоля и ФПМ оптики и электроники. При этом целесообразным пределом улучшения ФПМ оптики и электроники является ФПМ аэрозоля. Показано наличие такого вида функции взаимосвязи между расстоянием до объекта и показателем аэрозольной экстинкции, при которой ФПМ аэрозоля достигает минимума. Рекомендовано избегать такого режима на практике.

Ключевые слова: пространственное разрешение, модуляционная функция, бортовые системы, аэрозоль, БВС

Для цитирования:

Алиева Г. В., Гусейнов О. А. Анализ влияния атмосферы на пространственное разрешение сканирующих съемочных систем летательных аппаратов // Вестник СГУГиТ. – 2025. – Т. 30, № 4. – С. 26–31. – DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-4-26-31

Введение

Как отмечается в работе [1], применение беспилотных воздушных судов (БВС) расширило методы и технологии сбора пространственной информации, а также раскрыло новые возможности для моделирования, поскольку БВС может проводить съемку исследуемых объектов с разных ракурсов и высот. Указанное преимущество также расширяет возможности геоинформационного анализа данных дистанционного зондирования, позволяет повысить информативность геоинформационного и геотехнического мониторинга. В последние десятилетия беспилотные летательные аппараты широко применяются в

пространственной съемке и моделировании [2–4]. Согласно [5], для анализа качества изображений, получаемых с помощью беспилотных воздушных судов (БВС), используют такие методы, как анализ функции ФПМ (функция передачи модуляции); метод краевой реакции (edge response); метод GSD (пространственное разрешение).

Вместе с тем, качество снимков, получаемых с помощью БВС, низко по сравнению с пилотируемыми летательными аппаратами, так как при тестовой оценке качества снимков БВС используется показатель GSD, который не учитывает контрастные характеристики изображения. В общем случае ФПМ (функция передачи модуляции) определяется как [5]

$$\Phi_{\text{ПМ}} = \frac{\text{модуляция в изображении}}{\text{модуляция в объекте}}. \quad (1)$$

В качестве примера на рис. 1 приведен вид функции ФПМ сенсора IXM-100400 nm [5].

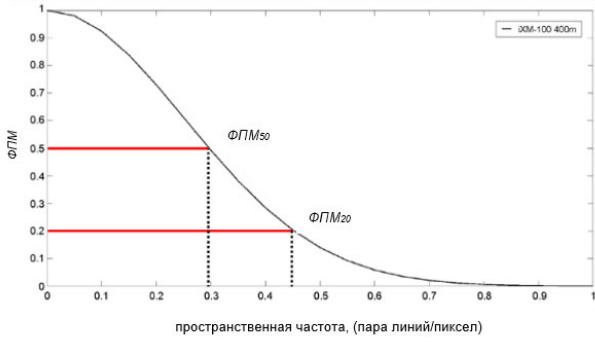


Рис. 1. Кривая ФПМ сенсора IXM-100400 nm [5]

Согласно [6], в качестве импульсной реакции космических оптических съемочных систем используется функция расширения (spread) точки, включающая такие явления, как дифракция, абберация, искажения (смаз) из-за движения, различные воздействия в течение времени интегрирования.

Как отмечается в работах [7, 8], в съемочных системах, в которых ограничивающим

фактором качества являются шумы, искажения могут быть частично устранены путем применения рекурсивных или медианных фильтров.

Что касается влияния атмосферы на качество изображения, то здесь основными влияющими факторами являются турбулентность среды, рассеяние и поглощение мелких частей (аэрозоля) [9]. Турбулентность среды приводит к наклону фронта волны, что создает эффект смещения на плоскости изображения. Спектр мощности таких явлений обычно ограничивается несколькими сотнями герц.

Смаз изображения из-за турбулентности характеризуется сферически волновым ФПМ

$$\Phi_{\text{ПМ}} = \exp \left[-a_1 \cdot f_a^{5/3} C^2 \lambda^{-1/3} Z \right], \quad (2)$$

где $a_1 = \left(\frac{3}{8} \right) \cdot 57,73$; f_a – пространственно-угловая частота съемочной системы; C_n – структурный коэффициент индекса рефракции; λ – длина волны оптической радиации; z – расстояние до объекта.

Отметим, что формула (2) соответствует случаю длительной экспозиции. В случае короткой экспозиции ФПМ может быть оценена по формуле [6]

$$MTF = \exp \left[-a_1 \cdot f_a^{5/3} C^2 \lambda^{-1/3} z \left[1 - \left(\frac{1}{b} \right) \left(\frac{\lambda f_a}{D} \right) \right] \right], \quad (3)$$

где $\left(\frac{1}{b} \right)$ равен 1 в близкой зоне и 0,5 в дальней зоне; D – диаметр диафрагмы.

Что касается аэрозоля, то как ФПМ аэрозоля, так и ФПМ турбулентности должны

быть рассмотрены в качестве частей ФПМ системы. Следовательно, ФПМ всей системы определяется как перемножение ФПМ турбулентности, аэрозоля и аппаратуры.

Согласно [9], ФПМ аэрозоля определяется как

$$MTF_a = \begin{cases} \exp \left[-A_a - S_a Z \frac{f_a}{f_{ac}} \right]^2; & \text{при } f_a \leq f_{ac}, \\ \exp \left[(-A_a + S_a) Z \right]; & \text{при } f_a > f_{ac} \end{cases}, \quad (4)$$

где A, S – коэффициенты абсорбции и рассеяния; f_{ac} – частота аэрозоля.

Целью настоящего исследования является изучение выбора высоты съемки с помощью съемочной системы в зависимости от показателя

экстинкции E , определяемого в данном случае как

$$E = A_a + S_a$$

применительно к условию $f_a > f_{ac}$.

Материалы и методы

Выражение (4) показывает, что высокие пространственные частоты ФПМ аэрозоля ограничиваются атмосферным пропусканием. В случае чистого неба пропускание съемочной системы ограничивается ФПМ турбулентности. Общий вид кривых нормализованных ФПМ турбулентности (1), ФПМ аэрозоля (2); ФПМ оптики и электроники (3) и ФПМ всей системы (4) показан на рис. 2.

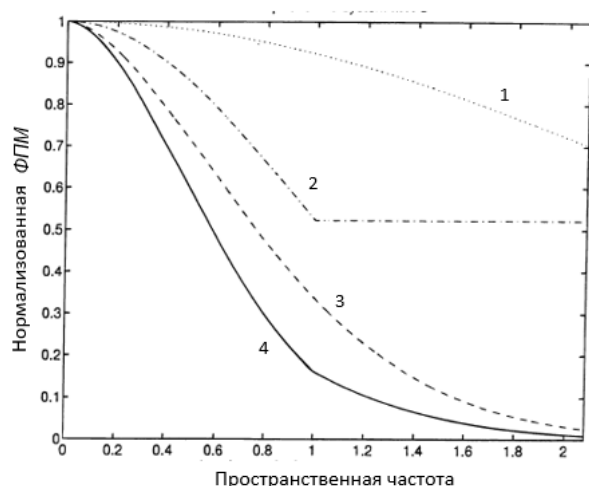


Рис. 2. Нормализованные кривые ФПМ турбулентности (1); аэрозоля (2); оптики и электроники (3); всей системы (4) [5]

Исследование зависимости ФПМ аэрозоля важно с той точки зрения, что этот показатель в принципе определяет предел для ФПМ оптики и электроники в плане их совершенствования. Очевидно, что ФПМ оптики и электроники целесообразно усовершенствовать вплоть до ФПМ ясного неба, но не более, чем ФПМ турбулентности.

Вместе с тем, присутствие аэрозоля в атмосфере является объективным фактом, и актуальность исследования ФПМ аэрозоля в зависимости от взаимосвязи между показателями E и z заключается в поиске условий достижения максимального пространственного разрешения создаваемой дистанционной оптической съемочной системы в усредненном выражении.

Допустим наличие следующих упорядоченных множеств:

$$E = (E_1, E_2, E_3, \dots, E_{n-1}, E_n), \quad (5)$$

где

$$E_i = E_{i-1} + \Delta E; \quad \Delta E = \text{const}; \quad i = \overline{1, n}; \quad E_0 = 0.$$

$$z = (z_1, z_2, z_3, \dots, z_{n-1}, z_n), \quad (6)$$

где

$$z_j = z_{j-1} + \Delta z; \quad \Delta z = \text{const}; \quad j = \overline{1, n}; \quad z_0 = 0.$$

Целью исследования является выбор такой функции взаимосвязи

$$z_j = \psi(E_i), \quad (7)$$

при которой дискретный функционал F_g

$$F_g = \frac{1}{n} \sum_{i,j=1}^n \exp[-E_i z_j(E_i)] \quad (8)$$

достиг бы экстремума.

Для решения данной задачи воспользуемся аналоговой интерпретацией дискретной модели (5)–(8), допустив наличие непрерывной функции

$$z = \psi(E), \quad (9)$$

а также следующего целевого функционала F

$$F = \frac{1}{\Delta E} \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \exp[-Ez(E)] dE, \quad (10)$$

где

$$\Delta E = E_{\max} - E_{\min}. \quad (11)$$

Для решение вышеуказанной оптимизационной задачи применительно к искомой функции $z(E)$ примем следующее ограничительное условие

$$\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} z(E) dE = C_1; \quad C_1 = \text{const}. \quad (12)$$

Смысл условия (12) заключается в ограничении класса непрерывных и дважды дифференцируемых функций для выделения подкласса функции, удовлетворяющих условию (12) для поиска оптимального вида $z(E)$.

С учетом выражений (10) и (12) составим целевой функционал безусловной вариационной оптимизации F_0

$$F_0 = \frac{1}{\Delta E} \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \exp[-Ez(E)] dE + \gamma \left[\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} z(E) dE - C_1 \right], \quad (13)$$

где γ – множитель Лагранжа.

Согласно [10], решение задачи (13) должно удовлетворить условию

$$\frac{d \left\{ \frac{1}{\Delta E} \exp[-Ez(E)] + \gamma z(E) \right\}}{dz(E)} = 0. \quad (14)$$

Из условия (14) находим

$$-\frac{1}{\Delta E} \exp[-Ez(E)] + \gamma = 0. \quad (15)$$

Из выражения (15) получим

$$\exp[-Ez(E)] = \frac{\gamma \Delta E}{E}. \quad (16)$$

Логарифмируя выражение (16), имеем

$$z(E) = \frac{1}{E} \ln \frac{E}{\gamma \Delta E}. \quad (17)$$

При решении (17) функционал F_0 достигает минимума, так как производная выражения (15) всегда является положительной величиной.

Для вычисления множителя Лагранжа γ воспользуемся выражениями (12) и (17). Имеем

$$\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \frac{1}{E} \ln \frac{E}{\gamma \Delta E} dE = C_1. \quad (18)$$

Из выражения (18) находим

$$\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \frac{1}{E} \ln E dE - \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \frac{1}{E} \ln \frac{E}{\gamma \Delta E} dE = C_1. \quad (19)$$

Из выражения (19) получим

$$\ln(\gamma \Delta E) \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \frac{dE}{E} = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \frac{1}{E} \ln E dE - C_1. \quad (20)$$

Из выражения (20) находим

$$\ln(\gamma \Delta E) = \frac{\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \frac{1}{E} \ln E dE - C_1}{\ln \frac{E_{\max}}{E_{\min}}}. \quad (21)$$

Из выражения (21) окончательно получим

$$\gamma = \frac{1}{\Delta E} \exp \left[\frac{\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \frac{1}{E} \ln E dE - C_1}{\ln \frac{E_{\max}}{E_{\min}}} \right]. \quad (22)$$

Таким образом, решением задачи являются выражения (17), (22). Однако такое решение соответствует достижению минимума средней величины ФПМ аэрозоля, поэтому на практике следует избегать взаимосвязи (17).

Обсуждение

В настоящей статье исследовано влияние ФПМ таких факторов, как турбулентность, аэрозоль, оптика и электроника на пространственно-угловое разрешение бортовых съемочных систем. Определено, что ФПМ атмосферного аэрозоля имеет особую важность, так как в реальной атмосфере аэрозоль всегда существует, а пространственно-частотные искажения, вносимые турбулентностью, намного ниже, чем подобные искажения, вносимые ФПМ аэрозоля. Сформулирована и решена задача поиска оптимального вида взаимосвязи расстояния до объекта и показателя экстинкции атмосферного аэрозоля. В результате решения оптимизационной задачи установлен вид такой взаимосвязи указанных показателей, при котором ФПМ аэрозоля достигает минимума. Рекомендовано на практике избегать такой взаимосвязи указанных показателей.

Основные результаты и выводы

1. Определено, что основными факторами, ограничивающими пространственное разрешение бортовых съемочных систем, формирующих изображения, являются ФПМ турбулентности, ФПМ аэрозоля и ФПМ оптики и электроники.

2. Определено, что целесообразным пределом улучшения ФПМ оптики и электроники является ФПМ аэрозоля.

3. Определено наличие такого вида функции взаимосвязи между расстоянием до объекта и показателем аэрозольной экстинкции, при которой ФПМ аэрозоля достигает минимума. Рекомендовано избегать такого режима на практике.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ознамец В. В. Пространственная съемка и моделирование с использованием беспилотных летательных аппаратов // Образовательные ресурсы и технологии. – 2020. – № 1 (30). – С. 83–89. – DOI 10.21777/2500-2112-2020-1-83-91. – EDN LTSMOB.
2. Савиных В. П., Цветков В. Я. Геоинформационный анализ данных дистанционного зондирования. – М. : Картоцентр-Геодиздат, 2001. – 224 с. – EDN RQISMN.
3. Цветков В. Я. Геоинформационный геотехнический мониторинг // Науки о Земле. – 2012. – № 4. – С. 54–58. – EDN QZQRUZ.
4. Цветков В. Я., Ознамец В. В., Филатов В. Н. Определение условной береговой линии по снимкам беспилотного летательного аппарата // Информация и космос. – 2019. – № 1. – С. 126–131. – EDN VXRJGC.
5. Kim J. H., Sung S. M. Quality analysis of unmanned aerial vehicle images using a resolution target // Applied Sciences (Switzerland). – 2024. – Vol. 14, No. 5. – P. 2154. – DOI 10.3390/app14052154. – EDN WARXCL.
6. Pedrotti F. L., Pedrotti L. M. Introduction to Optics, 3rd ed. // Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2017. – P. 640. – ISBN 9781108552493. – DOI 10.1017/9781108552493.
7. Blanc P., Wald L. A review of earth-viewing methods for in-flight assessment of modulation transfer function and noise of optical spaceborne sensors // Working paper. – 2009. – P. 1–38.
8. Holst G. C. Electro-optical imaging system performance // JCD press. Winter park. SPIE optical engineering press. WA. – 1995. – P. 371–372.
9. Sadot D., Kopeika N. S., Rotman S. R. Target acquisition modeling for contrast-limited imaging: effects of atmospheric blur and image restoration // J. Opt. Soc. Am. – 1995. – Vol. 12. – p. 2401–2414.
10. Эльсгольц Л. Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. – М. :Наука, 1974. – 432 с.

Об авторах

Алиева Гюнель Вагиф гызы – кандидат технических наук, доцент, начальник отдела НИИ Космических исследований природных ресурсов.

Гусейнов Омар Анар оглы – аспирант Национального Аэрокосмического Агентства.

Получено 01.11.2024

© Г. В. Алиева, О. А. Гусейнов, 2025

Analysis of atmosphere impact on spatial resolution of scanning imaging systems in aircraft

G. V. Aliyeva¹✉, O. A. Huseynov¹

¹National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan Republic

e-mail: gunelcelilova@mail.ru

Abstract. The influence of various factor modulation transfer function (MTF) on spatial and angular resolution of airborne imaging systems is investigated. It is noted that the spatial resolution of airborne imaging systems forming images is primarily limited by MTF turbulence, aerosol, optics and electronics. In this case a reasonable limit for improving the MTF optics and electronics is the MTF aerosol. A specific type of relationship between object distance and aerosol extinction coefficient, when the MTF aerosol reaches its minimum value, is demonstrated. It is recommended to avoid such conditions in practice.

Keywords: spatial resolution, modulation function, on-board systems, aerosol, UAV

REFERENCE

1. Oznamets, V. V. (2020). Spatial surveying and modeling using unmanned aerial vehicles. Educational resources and technologies. No. 1 (30) pp. 83–89. DOI 10.21777/2500-2112-2020-1-83-91. EDN LTSMOB [in Russian].
2. Savinykh, V. P., & Tsvetkov, V. Ya. (2001). Geoinformatsionnyy analiz dannykh distantsionnogo zondirovaniya [Geoinformation analysis of remote sensing data]. M.: Cartocenter-Geodesizdat, 224 p. EDN RQISMN [in Russian].
3. Tsvetkov, V. Ya. (2012). Geoinformation geotechnical monitoring *Nauki o Zemle [Earth Sciences]*. No. 4. pp. 54–58. EDN QZQRUZ [in Russian].
4. Tsvetkov, V. Ya., Oznamets, V. V., & Filatov, V. N. (2019) Determination of a conditional coastline from unmanned aerial vehicle images *Informatsiya i kosmos [Information and space]*. No 1. P. 126–131. EDN VXRJGC.
5. Kim, J. H., & Sung, S. M. (2024). Quality analysis of unmanned aerial vehicle images using a resolution target *Applied Sciences (Switzerland)*. Vol. 14, No. 5. P. 2154. DOI 10.3390/app14052154. EDN WARXCL.
6. Pedrotti, F. L., & Pedrotti, L. M. (2017). Introduction to Optics, 3rd ed.; *Cambridge University Press: Cambridge, UK* P. 640. ISBN 9781108552493. DOI 10.1017/9781108552493.
7. Blanc, P., & Wald, L. (2009). A review of earth-viewing methods for in-flight assessment of modulation transfer function and noise of optical spaceborne sensors *Working paper*. p. 1–38.
8. Holst, G. C. (1995). Electro-optical imaging system performance *JCD press. Winter park. SPIE optical engineering press. WA*. Pp. 371–372.
9. Sadot, D., Kopeika, N. S., & Rotman, S. R. (1995). Target acquisition modeling for contrast-limited imaging: effects of atmospheric blur and image restoration *J. Opt. Soc. Am.* Vol. 12. November Pp. 2401–2414.
10. Elsgolts, L. E. (1974). *Differentsial'nyye uravneniya i variatsionnoye ischisleniye [Differential'nyye uravneniya i variatsionnoye ischisleniye]* M. Science. P. 432.

Author details

Aliyeva Gunel Vagif kyzy – Ph. D., Associate Professor, Head of the Department of the Scientific Research Institute for Space Research of Natural Resources.

Huseynov Omar Anar oglu – Ph. D. Student, National Aerospace Agency.

Received 01.11.2024

© G. V. Aliyeva, O. A. Huseynov, 2025