



УДК 528.8

## ОПТИМИЗАЦИЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НА БАЗЕ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Ф.Г. Агаев<sup>1</sup>, Х.Г. Асадов<sup>1</sup>, Д.А. Гумбатов<sup>1</sup><sup>1</sup>Национальное Аэрокосмическое Агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика

Статья посвящена вопросам оптимизации гиперспектрального дистанционного зондирования с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в качестве носителя измерительной аппаратуры. Известно, что гиперспектральные изображения, получаемые с помощью гиперспектрометров, установленных на БПЛА оказывались слишком зашумленными, из-за влияния атмосферных условий, вибрации платформы БПЛА, оптических приборов. Отношение сигнал/шум является важнейшим параметром, зависящим от длины волны проводимых измерений и определяющим качество устройств дистанционного зондирования, а также самих изображений, получаемых методами дистанционного зондирования. При этом качество таких изображений в основном определяется отношением сигнал/шум. Целью исследования является создание математической информационной модели гиперспектрометров и, на этой основе, оптимизация всего процесса дистанционного зондирования земной поверхности с применением БПЛА, являющегося носителем гиперспектрометра. Исследована информативность гиперспектральных изображений, получаемых с помощью БПЛА, оснащенных гиперспектрометрами. Составлена оптимизационная вариационная задача нахождения оптимального вида зависимости отношения сигнал/шум от длины волны, при которой может быть достигнута максимальная информативность получаемых гиперспектральных изображений. Решение вариационной задачи с учетом ограничительного условия позволило определить оптимальный вид искомой функции, при котором информативность гиперспектрального изображения может достичь максимума. Для верификации полученного оптимального результата проведено модельное исследование. Результаты модельного исследования показали, что информативность гиперспектрального дистанционного зондирования в рассматриваемом режиме проведения измерений может быть увеличена до 11%. Таким образом, показана возможность синтеза оптимального режима гиперспектрального дистанционного зондирования с применением беспилотных летательных средств, снабженных гиперспектральной аппаратурой.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** БПЛА, дистанционное зондирование, гиперспектральное изображение, оптимизация, информативность

DOI 10.5425/2304-7380\_2023\_39\_25

<https://elibrary.ru/skckfg>

### 1. ВВЕДЕНИЕ

С появлением беспилотных летательных аппаратов и гиперспектральной измерительной аппаратуры в разных областях науки, техники и народного хозяйства, включая сельское хозяйство, лесоводство и др. началось применения БПЛА, оснащенных гиперспектрометрами [1-3]. Вместе с тем,



гиперспектральные изображения, получаемые с помощью гиперспектрометров, установленных на БПЛА оказывались слишком зашумленными, из-за влияния атмосферных условий, вибрации платформы БПЛА, оптических приборов [4-6]. При этом, качество таких изображений в основном определяется отношением сигнал/шум. Как отмечается в [7], отношение сигнал/шум является важнейшим параметром, определяющим качество устройств дистанционного зондирования, а также самих изображений получаемых методами дистанционного зондирования. При этом отношение сигнал/шум определяется как отношение среднего к стандартному отклонению сигнала, полученного в гомогенном участке исследования. Различные вариации этого метода также были предложены в [8,9].

Вместе с тем, в то время как шумы в спектральных системах бортового размещения имеют разные истоки происхождения, включая электрические, электромагнитные, вибрационные и др, значение полезного сигнала в таких системах в основном следует общим закономерностям, исходящим из закона Планка. В качестве примера можно рассмотреть устройство UAV-HYPER, разработанный в Чангчунском Институте Оптики и механики Академии Наук Китая. Этот гиперспектрометр, устанавливаемый на БПЛА имеет следующие основные характеристики: количество пикселей на строке-1024; спектральный диапазон: 350-1030 нм; спектральное разрешение-5 нм; количество каналов-128; охват 1км при высоте полета 5 км. Отношение сигнал/шум $>100$  [10]. Экспериментально снятая кривая отношения сигнал/шум этого устройства показана на рис. 1.

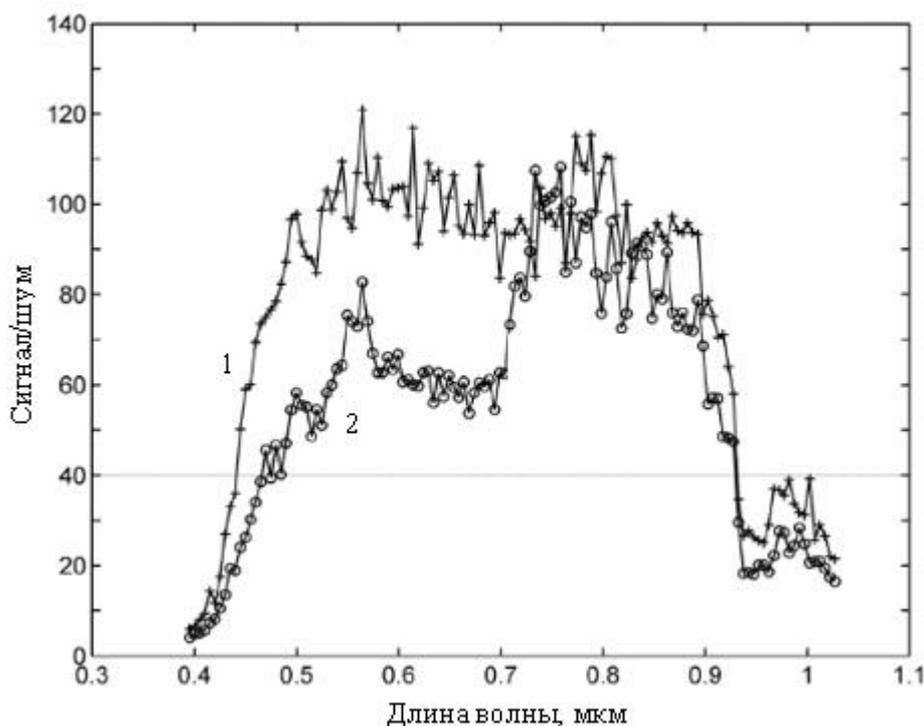


Рис. 1. Кривая зависимости отношения сигнал/шум от длины волны для устройства UAV-HYPER. Цифрами указаны: 1-исследуемый участок; 2-незаросший участок

Как видно из кривых, представленных на рис. 1, они отдаленно напоминают кривые Планка с максимумом на некоторой длине волны. Аналогичное изменение отношения сигнал/шум было получено в сигнале гиперспектрометра, установленного на БПЛА, используемого для исследования состояния рисовых полей [11]. Измерение проводилось в спектральном диапазоне 400-1000 нм, при отношении сигнал/шум в пределах  $20 \div 70$ . Соответствующая кривая изменения отношения сигнал/шум под длине волны показана на рис. 2.



Рис. 2. Диаграмма значений отношения сигнал/шум в зависимости от длины волны проводимых измерений

## 2. ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Вышеприведенные примеры изменения отношения сигнал/шум гиперспектрометров установленных на БПЛА позволяют предложить некоторую математическую модель гиперспектрометров. Целью настоящего исследования является создание такой модели и на этой основе оптимизировать весь процесс дистанционного зондирования земной поверхности с применением БПЛА, являющегося носителем гиперспектрометра.

## 3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Систему зондирования отнесем к подклассу изоморфно-голономных систем, подробно изложенной в работах [12,13]. Для конкретности и простоты изложения с учетом характера графических материалов, приведенных на рис. 1 и 2 можно предложить бинарную модель спектральной характеристики, показанную на рис. 3. В общем случае, для изоморфно-голономных систем бинарность является частным случаем и число возможных случаев выбора соответствующей функции равно бесконечности. Также для конкретности на рис.3 приведены треугольные функции, хотя при оптимизации изоморфно-голономных систем конкретный вид искомой функции связи определяется только после решения задачи оптимизации. Единственным требованием к выбору искомой функции связи является интегральное ограничительное условие, приведенное несколько ниже в данной статье.

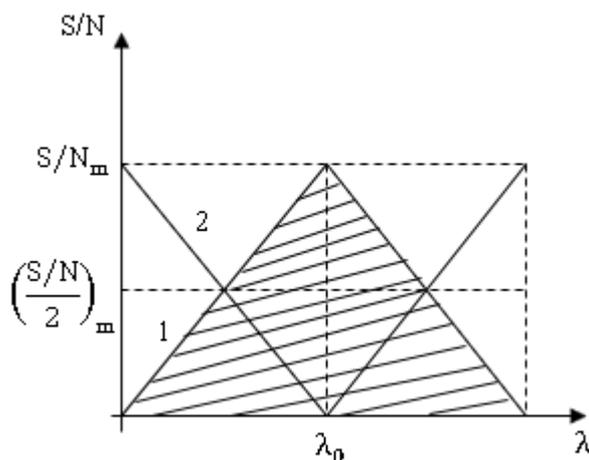


Рис. 3. Предлагаемое модельное представление зависимости сигнал/шум гиперспектрометра от длины волны

Модель 1, показанная на рис.3, условно отражает общую закономерность изменения отношения сигнал/шум по длине волны. В качестве бинарной альтернативы также представлена модель 2, являющаяся зеркальным отражением модели 1 относительно линии  $\frac{S}{N} = \left(\frac{S}{N}\right) m$ . С учетом вышеизложенной бинарной модели гиперспектрометра изложим предлагаемый метод оптимизации всей процедуры дистанционного зондирования с применением БПЛА, оборудованного гиперспектрометром. В общем случае зависимость отношения сигнал/шум от длины волны представим в виде функции

$$\psi = \psi(\lambda) \quad (1)$$

Соответствующую энтропию  $E$  определим как

$$E = \log_2 \psi(\lambda) \quad (2)$$

Допустим, что в многоспектральном изображении, полученного с помощью БПЛА обнаружено  $N(\lambda)$  количество пикселей, которые носят в себе видеосигнал с длиной волны  $\lambda$ . В этом случае, количество информации в изображении, приходящее на длину волны  $\lambda$ , может быть определено как

$$M_\lambda = N(\lambda) \cdot \log_2 \psi(\lambda) \quad (3)$$

С учетом (3), общее количество информации, имеющейся в полученном изображении при исследовании земной поверхности, определим как

$$M = \int_0^{\lambda_{max}} N(\lambda) \cdot \log_2 \psi(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

Целью проводимой оптимизации является определение оптимальной функции  $\psi(\lambda)$ , при которой информативность полученных данных могла бы быть максимальной.

Для решения поставленной задачи, применительно к вышеизложенной модели гиперспектрометра, сформируем ограничительное условие в виде

$$\int_0^{\lambda_{max}} \psi(\lambda) d\lambda = C \quad (5)$$

где  $C = const$ .

С учетом (4) и (5) составляет вариационную задачу

$$M_0 = \int_0^{\lambda_0} N(\lambda) \cdot \log_2 \psi(\lambda) d\lambda + \gamma \left[ \int_0^{\lambda_{max}} \psi(\lambda) d\lambda - C \right] \quad (6)$$

$\gamma$ -множитель Лагранжа.

Решение (6) имеет вид [14].

$$\frac{N(\lambda)}{\ln 2} \frac{1}{\psi(\lambda)} + \gamma = 0 \quad (7)$$

Из (7) получим

$$\psi(\lambda) = \left[ \frac{\gamma \ln 2}{N(\lambda)} \right]^{-1} \quad (8)$$

Таким образом, при (8)  $M_0$  достиг бы максимума т.к. производная (7) по  $\psi(\lambda)$  является отрицательной величиной.

Из (8) имеем

$$\psi(\lambda) = \frac{N(\lambda)}{\gamma \ln 2} \quad (9)$$

С учетом (5) и (9) получим

$$\frac{1}{\gamma \ln 2} \int_0^{\lambda_0} N(\lambda) d\lambda = c \quad (10)$$

Из (10) имеем

$$\gamma = \frac{1}{c \ln 2} \int_0^{\lambda_0} N(\lambda) dt \quad (11)$$

С учетом (9) и (11) получаем

$$\psi(\lambda) = \frac{N(\lambda)c}{\int_0^{\lambda_0} N(\lambda_0) dt} \quad (12)$$

Как видно из полученного выражения (12) оптимальный вид искомой функции  $\psi(\lambda)$  определяется видом функции  $N(\lambda)$ , а не исходно взятой треугольной функцией.

С учетом (4) и (12) получим

$$M = \int_0^{\lambda_0} N(\lambda) \log \left[ \frac{N(\lambda)c}{\int_0^{\lambda_0} N(\lambda) dt} \right] dt \quad (13)$$

Из (13) находим

$$M = \int_0^{\lambda_0} N(\lambda) \log N(\lambda) d\lambda + \int_0^{\lambda_0} N(\lambda) \log c dt - \int_0^{\lambda_0} N(\lambda) \log \left[ \int_0^{\lambda_0} N(\lambda) d\lambda \right] d\lambda \quad (14)$$

Из (11) имеем

$$\int_0^{\lambda_0} N(\lambda_0) d\lambda_0 = \gamma c \ln 2 \quad (15)$$

Из (14) и (15) получим

$$M = \int_0^{\lambda_0} N(\lambda) \log N(\lambda) dt - \int_0^{\lambda_0} N(\lambda) \log(\gamma \ln 2) dt = \int_0^{\lambda_0} N(\lambda) \log \frac{N(\lambda)}{c} dt \quad (16)$$

Таким образом, получена формула, позволяющая определить информативность гиперспектральных изображений, получаемых с помощью БПЛА, оборудованных гиперспектральной аппаратурой.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулирована и решена задача оценки информативности гиперспектральных изображений получаемых с помощью БПЛА, оснащенных гиперспектрометрами. Исследуемая задача сформулирована в виде оптимизационной вариационной задачи нахождения оптимального вида зависимости отношения сигнал/шум от длины волны. Для решения указанной задачи проанализирован вид известных функциональных зависимостей отношения сигнал/шум от длины волны и сформулировано соответствующее ограничительное условие. Решение вариационной задачи с учетом ограничительного условия позволило определить оптимальный вид искомой функции при котором информативность гиперспектрального изображения может достичь максимума. Получена формула для вычисления указанного максимума. Проведенное модельное исследование показало, что информативность гиперспектральных измерений в рассматриваемом режиме может быть увеличена на 11 процентов по сравнению с неоптимальным режимом измерения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Adao T. et al.* Hyperspectral imaging: a review on UAV-based sensors, data processing and applications for agriculture and forestry// *Remote Sens.* Vol. 9. No 11. Oct. 2017. Art. No 1110. Doi:10.3390/rs9111110.
2. *Lu B., Dao P., Liu J., He Y., Shang J.* Recent advances of hyperspectral imaging technology and applications in agriculture// *Remote Sens.* Vol. 12. No 16. Aug 2020. Art. No 2659. Doi:10.1016/j.rse.2020.112018.
3. *Markiet V., Mottus M.* Estimation of boreal forest floor reflectance from airborne hyperspectral data of coniferous forests// *Remote Sens. Environ.* Vol. 249. Nov. 2020. Art. No 112018. Doi:10.1016/j.rse.2020.112018.
4. *Kedzierski M., Wierzbicki D., Sekrecka A., Fryskowska A., Walczykowski P., Siewert J.* Influence of lower atmosphere on the radiometric quality of unmanned aerial vehicle imagery// *Remote Sens.* Vol. 11. No 10. May 2019. Art. No 1214. Doi:10.3390/rs1110214.
5. *Sekrecka A., Wierzbicki D., Kedzierski M.* Influence of the sun position and platform orientation on the quality of imagery obtained from unmanned aerial vehicles// *Remote Sens.* Vol. 12. No 6. Mar 2020. Art. No 1040. Doi:10.3390/rs12061040.
6. *Arroyo-Mora J. P. et al.* Assessing the impact of illumination on UAV pushbroom hyperspectral imagery collected under various cloud cover conditions// *Remote Sens. Environ.* Vol. 258. Jun 2021. Art. No 112396. Doi:10.1016/j.rse.2021.112396.
7. *Tian W., Zhao Q., Kan Z., Long X., Liu H., Cheng J.* A new method for estimating signal-to-noise ratio in UAV hyperspectral images based on pure pixel extraction// *IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing.* Vol.16. 2023.
8. *Pandit P., Dey P., Krishnamurthy K. N.* Comparative assessment of multiple linear regression and fuzzy linear regression models// *SN Comput. Sci.* Vol. 2. Jan. 2021. Art no 76. Doi:10.1007/s42979-021-00473-3.
9. *Zhang L. F., Lu X. H., Cen Y., Sun X. J.* Optimized spatial and spectral decorrelation method for noise estimation in hyperspectral images// *Nat. Remote. Sens. Bull.* Vol. 25. No 7. Pp. 1411-1421. Jul 2021. Doi:10.11834/jrs.20219043.
10. *Duan S-B, Li Z-L, Tang B-H, Wu H, Ma L, Zhao E, et al.* (2013) Land Surface Reflectance Retrieval from Hyperspectral Data Collected by an Unmanned Aerial Vehicle over the Baotou Test Site // *PLoS ONE* 8(6): e66972. <https://doi.org/10.1371/>
11. *An G., Xing M., He B., Kang H., Shang J., Liao C., Huang X., Zhang H.* Extraction of areas of rice false smut infection using UAV hyperspectral data // *Remote. Sens.* 2021. 13. 3185. <https://doi.org/10.3390/rs13163185>.
12. *Асадов Х.Г., Абдуллаева С.Н., Тарвердиева У.Х.* Метод линеаризационной оптимизации голономных информационно-измерительных и мехатронных систем // *ВЕСТНИК ПНИПУ. Серия Электртехника, информационные технологии, системы управления.* 2020, номер 75, с.169-182.

13. Асадов Х.Г., Абдуллаева С.Н., Тарвердиева У.Х. Вопросы оптимизации изоморфно-голономных информационно-измерительных систем // Известия вузов, Электромеханика. 2020. Том 63, номер 6. С. 51-56.
14. Эльсгольц Л. Е. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление// М. Наука. 1974. С. 472.

## OPTIMIZATION OF HYPERSPECTRAL REMOTE SENSING BASED ON AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

Agaev F.G., Asadov H.H., Gumbatov D.A

The article is devoted to the optimization of hyperspectral remote sensing using unmanned aerial vehicles (UAVs) as a carrier of measuring equipment. It is known that hyperspectral images obtained using hyperspectrometers mounted on UAVs turned out to be too noisy due to the influence of atmospheric conditions, vibration of the UAV platform, and optical instruments. The signal-to-noise ratio is the most important parameter, depending on the wavelength of the measurements being taken and determining the quality of remote sensing devices, as well as the images themselves obtained by remote sensing methods. At the same time, the quality of such images is mainly determined by the signal-to-noise ratio. The goal of the research is to create a mathematical information model of hyperspectrometers and on this basis, optimize the entire process of remote sensing of the earth's surface using a UAV, which is the carrier of a hyperspectrometer. The information content of hyperspectral images obtained using UAVs equipped with hyperspectrometers has been studied. An optimization variational problem of finding the optimal type of dependence of the signal-to-noise ratio on the wavelength at which the maximum information content of the resulting hyperspectral images can be achieved has been compiled. Solving the variational problem taking into account the restrictive condition made it possible to determine the optimal form of the desired function in which the information content of the hyperspectral image can reach its maximum. To verify the optimal result obtained, a model study was carried out. The results of the modeling study showed that the information content of hyperspectral remote sensing in the considered measurement mode can be increased to 11 percent. Thus, the possibility of synthesizing the optimal mode of hyperspectral remote sensing using unmanned aerial vehicles equipped with hyperspectral equipment is shown.

**KEYWORDS:** UAV, REMOTE SENSING, HYPERSPECTRAL IMAGING, OPTIMIZATION, INFORMATION