

ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНАЯ СИСТЕМА ВИДИМОГО ДИАПАЗОНА НА БАЗЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ — ПЕРО

В.М.Гареев, М.В.Гареев, Н.И.Лебединский, Н.П.Корнышев, Д.А.Серебряков

HYPERSPECTRAL VISIBLE RANGE SYSTEM BASED ON THE FABRY-PÉROT INTERFEROMETER

V.M.Gareev, M.V.Gareev, N.I.Lebedinsky, N.P.Kornyshev, D.A.Serebryakov

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, nikolai.kornishev@novsu.ru

Рассматриваются основные отличия гиперспектральных систем от мультиспектральных систем, а также принципы формирования гиперспектральных изображений (гиперкуба данных) и их обработки с целью анализа спектральных характеристик исследуемых объектов. Кроме этого, рассматриваются варианты построения гиперспектральных систем видимого диапазона на основе методов пространственного и спектрального сканирования. Подробно описывается гиперспектральная система видимого диапазона на основе интерферометра Фабри — Перо. Приводится ее структурная схема и принцип работы. Анализируются технические характеристики проектируемой гиперспектральной системы, а также рассматриваются вопросы ее математического и полунатурного моделирования, что, в свою очередь, позволяет минимизировать ошибки, связанные с анализом спектральных характеристик, а также обеспечивает возможность отработки алгоритмов работы данной системы при решении задач обнаружения объектов. Приводятся аналитические выражения для оценки спектральной избирательности системы.

Ключевые слова: гиперспектральная система, актюатор, Фабри — Перо интерферометр

Для цитирования: Гареев В.М., Гареев М.В., Лебединский Н.И., Корнышев Н.П., Серебряков Д.А. Гиперспектральная система видимого диапазона на базе интерферометра Фабри — Перо // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2022. №3(128). С. 78–83. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3\(128\).78-83](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3(128).78-83)

The article discusses the main differences between hyperspectral systems (HSS) and multispectral systems (MSS), as well as the principles of formation of hyperspectral images (data hypercube) and their processing in order to analyze the spectral characteristics of the objects under study. In addition, options for constructing the HSS of the visible range based on the methods of spatial and spectral scanning are considered. The HSS of the visible range based on the Fabry–Pérot interferometer is described in detail. Its block diagram and operation principle are given. The technical characteristics of the designed HSS are analyzed, and the issues of mathematical and semi-natural modeling of the hyperspectral system are considered, which, in turn, allows minimizing errors associated with the analysis of spectral characteristics, and also provides the possibility of testing the algorithms of the HSS when solving object detection problems. Analytical expressions are given to evaluate the spectral selectivity of the system.

Keywords: hyperspectral system, actuator, Fabry–Pérot interferometer

For citation: Gareev V.M., Gareev M.V., Lebedinsky N.I., Kornyshev N.P., Serebryakov D.A. Hyperspectral visible range system based on the Fabry–Pérot interferometer // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2022. №3(128). P.78–83. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3\(128\).78-83](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3(128).78-83)

Гиперспектральная визуализация широко применяется в таких приложениях, как военные системы [1], медицинская визуализация и диагностика [2], проверка безопасности пищевых продуктов [3], сельскохозяйственные исследования [4], исследования исторических документов [5] и произведений искусства, в частности живописи [6].

Гиперспектральная система (ГСС) относится к системам дистанционной спектральной обработки света, отраженного или рассеянного от объекта. Каждый пиксель изображения ГСС может содержать более сотни спектральных каналов, в отличие от мультиспектральных систем (МСС), содержащих несколько десятков спектральных каналов. Спектральные характеристики для каждого элемента изображения, формируемые путем обработки так называемого «гиперкуба данных», получаемого при помощи ГСС,

имеют характер, приближенный к непрерывному. Аналогичные спектральные характеристики, получаемые при помощи МСС, имеют выраженный дискретный характер.

В отличие от МСС и ГСС цветные RGB-видеокамеры имеют только три спектральных канала, что не обеспечивает детальный анализ спектральных характеристик. Наблюдаемые при этом оттенки цвета являются смесью RGB-компонент и не гарантируют соответствие спектральному составу излучения. Так, например, спектральный фиолетовый цвет будет сформирован в основном смешением спектрального красного и синего.

В настоящее время широко применяются два основных способа получения гиперкуба данных: 1 — сканирование по пространственной координате, 2 — сканирование по спектральной координате (рис.1).

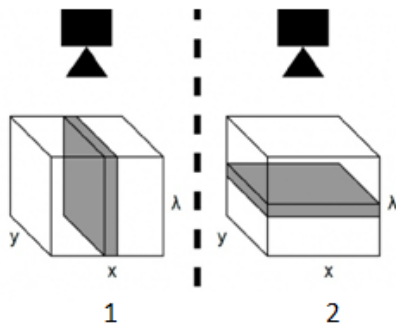


Рис.1. Методы получения гиперкуба данных

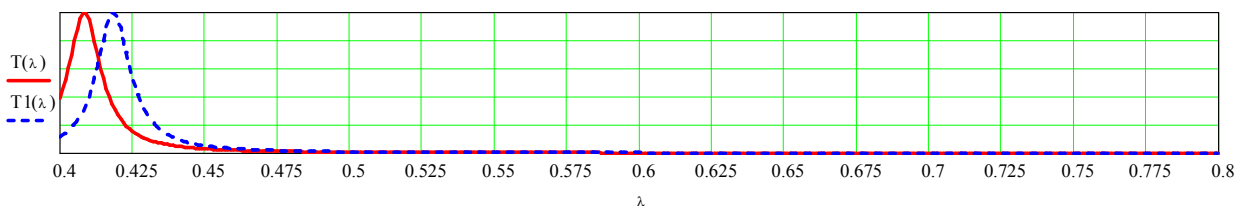
Сканирование по пространственной координате предполагает наличие диспергирующего элемента, разделяющего на спектральные составляющие входной световой поток, поступающий через щель. Дисперсионная картина регистрируется фотоприемной матрицей. Для получения гиперкуба данных требуется механическое перемещение фотоприемной матрицы относительно объекта или, наоборот, перемещение объекта относительно матрицы.

Первый метод может быть реализован на призме [7] или дифракционной решетке [8]. Использование в качестве диспергирующего элемента призмы или дифракционной решетки, с одной стороны, требует дополнительного объектива переноса, что ухудшает массогабаритные характеристики и чувствительность системы, а с другой стороны, сканирование по пространственной координате требует либо дополнительной механической системы сканирования, либо ограничивает область применения в основном дистанционным зондированием земли при помощи летательных аппаратов. Следует отметить, что механическое сканирование существенно ограничивает быстродействие системы.

Второй метод, который может быть реализован на оптическом полосовом фильтре [9] и интерферометрах (Саньяка [10], Маха — Цендера [11], Майкельсона [12], Фабри — Перо [13]), является более быстродействующим. Среди перечисленных способов его реализации наибольший интерес представляет использование интерферометра Фабри — Перо (ФПИ).

Основными преимуществами ФПИ являются:

- 1) большая светосила,
- 2) мультиплексность, обеспечивающая одновременность регистрации всего исследуемого спектрального интервала,
- 3) большая ширина одновременно регистрируемого спектрального интервала,
- 4) высокая надежность,
- 5) возможность унификации,

Рис.3. Зависимость избирательности ФПИ при изменении d от 200 до 400 нм, $\theta = 5^\circ$: $T(\lambda)$ при $d = 205$ нм, $T_1(\lambda)$ при $d = 210$ нм

6) сравнительная простота конструкции,

7) малые габариты и масса.

Целью настоящей статьи является обсуждение вариантов построения ГСС на базе ФПИ.

Рассмотрим применение в ГСС интерферометра Фабри — Перо. Для управления ФПИ целесообразно использовать управляемые пьезоактюаторы, при помощи которых регулируется воздушный промежуток (зазор) между зеркальными поверхностями. Пьезоактюаторы позволяют минимизировать массогабаритные характеристики ФПИ, а также обеспечить высокую точность регулировки величины воздушного зазора. Принцип работы ФПИ представлен на оптической схеме, изображенной на рис.2.

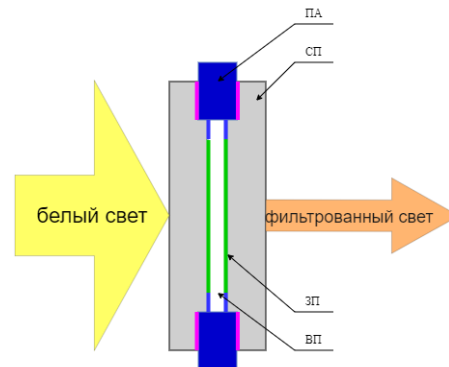


Рис.2. Оптическая схема интерферометра Фабри — Перо: СП — стеклянная пластинка; ЗП — зеркальная пленка; ВП — воздушный промежуток

Входной световой поток в диапазоне 400–700 нм (белый свет) проходит через параллельные стеклянные пластины (СП), на внутренних плоскостях которых нанесена зеркальная пленка (ЗП). Стеклянные пластины разделены воздушным промежутком (ВП), который регулируется при помощи управляемых пьезоактюаторов (ПА).

Спектральная избирательность ФПИ зависит от величины воздушного промежутка d и угла падения θ :

$$T(\lambda) = \frac{(1-R)^2}{1 + R^2 - 2 \cdot R \cdot \cos\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot \cos(\theta)}{\lambda}\right)}, \quad (*)$$

где R — коэффициент отражения зеркальной пленки; d — величина воздушного зазора; θ — угол падения.

Кроме этого, характер спектральной избирательности, а именно количество полос пропускания, зависит от диапазона изменения величины воздушного промежутка d .

На рис.3 показана спектральная избирательность ФПИ при изменении величины воздушного промежутка d от 200 до 400 нм.

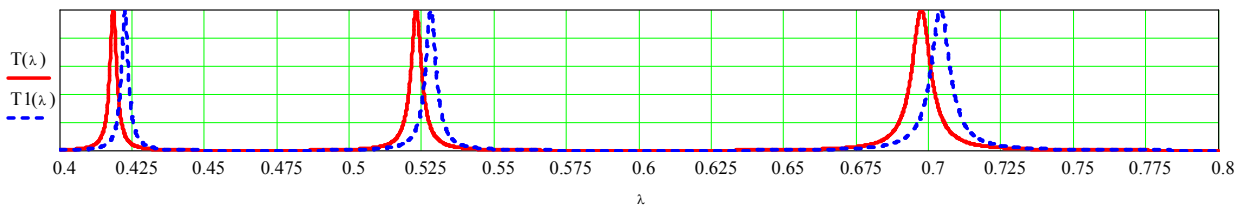


Рис.4. Зависимость спектральной избирательности ФПИ при изменении d от 800 до 1200 нм, $\theta = 5^\circ$: $T(\lambda)$ при $d = 1050$ нм, $T1(\lambda)$ при $d = 1060$ нм

На рис.4 показана избирательность ФПИ при изменении величины воздушного зазора d от 800 до 1200 нм.

В таблице показаны значения разрешающей способности ФПИ в начале и конце рабочего диапазона. Как видно из таблицы, у ФПИ с зазором, изменяющимся в пределах от 200 до 400 нм (вариант 1), спектральная избирательность примерно в четыре раза хуже, чем у ФПИ с зазором, изменяющимся от 800 до 1200 нм (вариант 2). При этом ширина полосы пропускания увеличивается с ростом длины волны и достигает примерно двухкратного увеличения от начала видимого диапазона к его концу.

Зависимость спектральной избирательности от величины воздушного зазора

Диапазон изменения d , нм	Спектральная избирательность, нм	
	Начало диапазона	Конец диапазона
200–400	9	19
800–1200	2	5

ФПИ по варианту 2 формирует, как видно из рис.4, сразу три спектральных отклика. С одной стороны, это обстоятельство позволяет реализовать одновременное получение откликов при использовании RGB -камеры, что увеличивает скорость сканирования по спектральному диапазону, а с другой стороны, создает определенные сложности при обработке сигналов спектральных откликов, формируемых в соответствующих RGB -каналах.

К дополнительным проблемам, связанным с использованием одноматричных цветных фотоприемников, относится ухудшение в два раза чувствительности при фиксированной пространственной разрешающей способности или, наоборот, пространственной разрешающей способности при фиксированной чувствительности, определяемой размером элемента фоточувствительной матрицы.

ФПИ по варианту 1 позволяет для регистрации спектрального отклика использовать обычный черно-белый матричный фотоприемник, что обеспечивает высокую чувствительность при фиксированной пространственной разрешающей способности по сравнению с одноматричным цветным фотоприемником. Однако при этом увеличивается

время сканирования по спектральному диапазону. Кроме этого, требуется более высокая точность управления воздушным зазором по сравнению с ФПИ по варианту 2.

Рассмотрим процедуры выделения спектральных составляющих в ФПИ по варианту 2 для стандартного цветного одноматричного фотоприемника типа GSENS2020, спектральная характеристика которого приведена на рис.5.

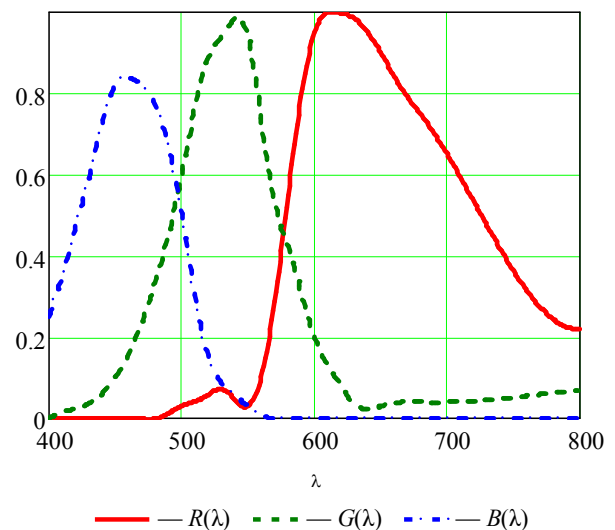


Рис.5. Спектральные характеристики RGB -каналов для стандартного цветного одноматричного фотоприемника

Сигналы на выходе фотоприемника с учетом спектральной избирательности ФПИ соответствуют выражениям:

$$S_R(d) = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} R(\lambda) \cdot T(\lambda, d) d\lambda,$$

$$S_G(d) = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} G(\lambda) \cdot T(\lambda, d) d\lambda,$$

$$S_B(d) = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} B(\lambda) \cdot T(\lambda, d) d\lambda,$$

где $R(\lambda)$, $G(\lambda)$, $B(\lambda)$ — спектральная чувствительность в соответствующих каналах фотоприемника, $T(\lambda, d)$ — спектральная избирательность ФПИ, $\lambda_{\min}$, $\lambda_{\max}$ — спектральный диапазон ГСС (400–700 нм).

RGB -сигнал, считываемый с одноматричного цветного фотоприемника, формируется обычно с использованием структуры Байера (рис.6), в которой каждый цветной пиксель состоит из четырех субпикселей.

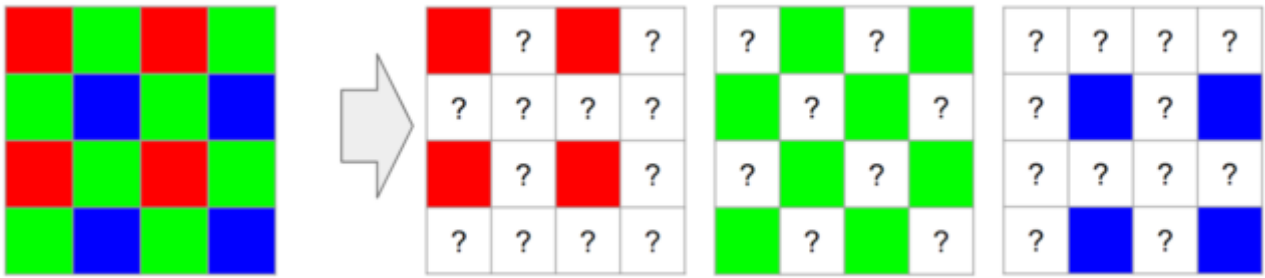


Рис.6. Структура Байера

Для восстановления недостающей цветовой информации в субпикселях каждого отдельного канала применяется интерполяция (дебайеризация). В простейшем случае она осуществляется с использованием билинейной интерполяции, которая заключается в дискретной свертке исходных сигналов фотоприемника с соответствующими масками по формулам: $R' = K_{BR}R$, $G' = K_G G'$, $B' = K_{BR}B$, где R, G, B —

исходные сигналы фотоприемника, а $K_G = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} / 4$,

$$K_G = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} / 4.$$

Структурная схема ГСС, реализующая рассмотренные выше процедуры, приведена на рис.7. ГСС содержит следующие блоки: КТ1, КТ2 — цветная видеокамера, ФПИ, УА — управление актюаторами, БЭО — блок электронной обработки, НБ — нейробокс. В ГСС выбор спектрального диапазона осуществляется в ФПИ при помощи управления пьезоактюаторами от блока УА. Сигналы спектральнональных изображений, соответствующих каждой «тройке» откликов от ФПИ для заданной величины воздушного промежутка, формируются в RGB -каналах цветной камеры КТ2 и передаются в БЭО, где осуществляется их первичная обработка и формирование гиперкуба данных. Анализ гиперкуба данных производится при помощи нейросети НБ, обученной для конкретного практического приложения. Для формирования цветного изображения в полном видимом диапазоне в ГСС предусматривается дополнительная цветная видеокамера КТ1.

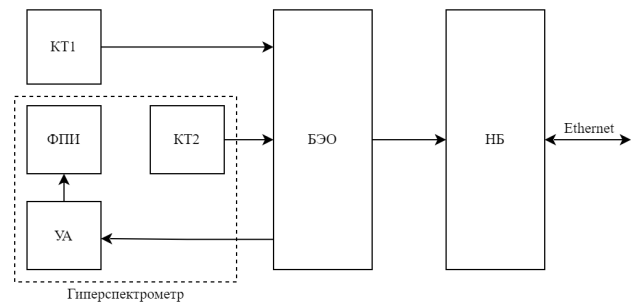


Рис.7. Структурная схема ГСС

Для отработки алгоритма работы ГСС на ФПИ и обучения нейросети (НБ) для работы в конкретном практическом приложении требуется формирование базы данных (Dataset) с последующим моделированием работы ГСС. На рис.8 представлена структурная схема процесса моделирования, которая позволяет создавать базы данных для каждой конкретной сферы применения ГСС и производить моделирование ее работы.

В процессе моделирования используется математическая модель (*). Варьируемыми параметрами являются величина воздушного зазора d , а также параметр избирательности $\Delta\lambda$, задаваемые от ПЭВМ. При моделировании предусматривается выполнение преобразований стандарта RGB в стандарт HSV , спектральные преобразования [14,15], спектральная селекция и формирование гиперкуба данных $3D$.

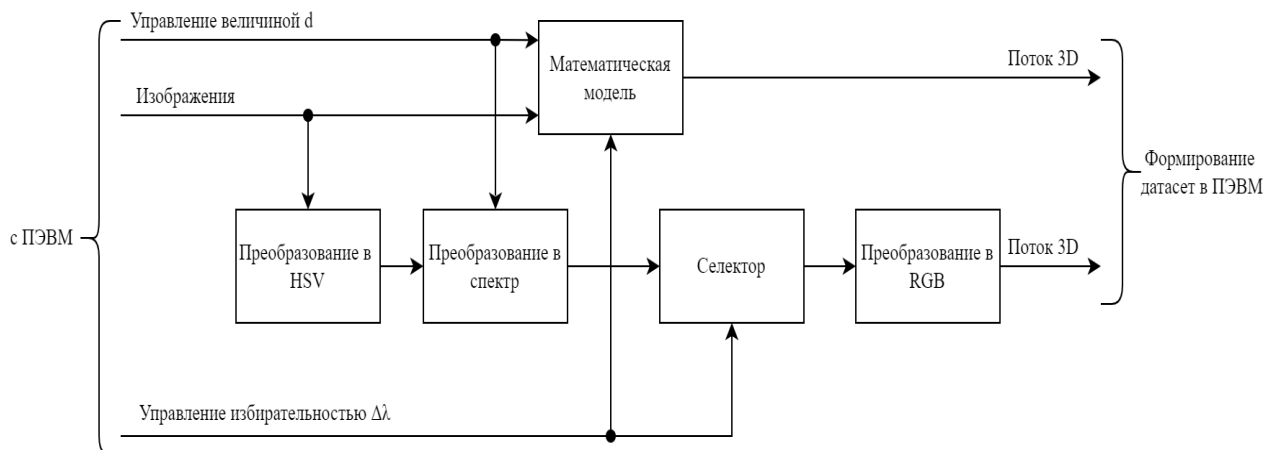


Рис.8. Структурная схема для моделирования ГСС на ФПИ

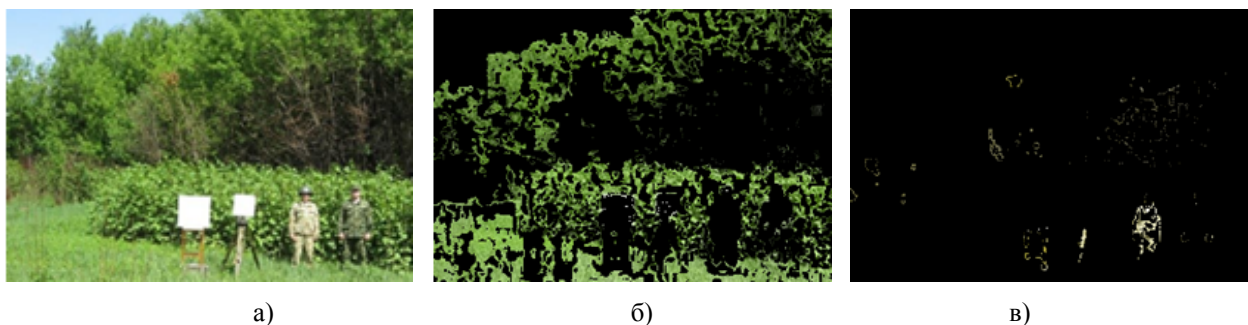


Рис.9. Поиск людей в камуфляже: а) изображение в видимом диапазоне, б) изображение на длине волны 570 нм (растительный фон), в) изображение на длине волны 596 нм (человек в камуфляже)

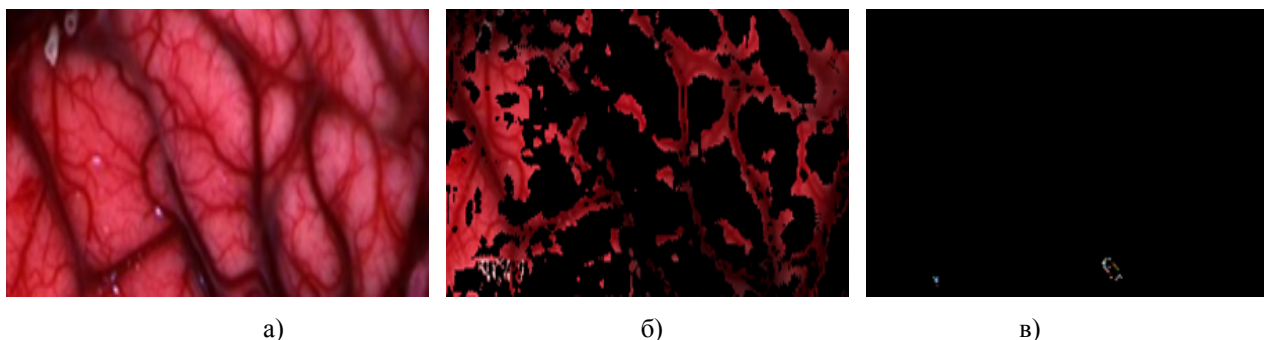


Рис.10. Поиск новообразований в мозговой ткани человека: а) изображение в видимом диапазоне, б) изображение на длине волны 440 нм (визуализируется окружающая ткань), в) изображение на длине волны 648 нм (визуализируется объект интереса)

Применение ГСС для поиска людей в камуфляже в полевых условиях [1] показано на рис.9.

В качестве иллюстрации применения ГСС для поиска объектов интереса в медицинском приложении на рис.10 показано изображение мозговой ткани человека в видимом диапазоне [2].

Приведенные примеры показывают необходимость введения в процедуру обработки информации ГСС искусственного интеллекта. Это обеспечивает возможность не только извлечь полезную информацию из гиперкуба данных, но и сократить время на получение этой информации, т. к. предварительно обученная на конкретное практическое приложение нейросеть использует заранее ограниченный объем обрабатываемой информации, требующийся для работы в данном конкретном практическом приложении.

Выводы

1. Малые габариты и массу при достаточно высокой спектральной избирательности и скорости получения гиперкуба данных можно обеспечить в ГСС видимого диапазона на базе интерферометра Фабри — Перо с управлением воздушным зазором от пьезоактуаторов

2. Созданная математическая и полунатурная модель ГСС позволяет получить базу данных, на основании которой возможно решать вопросы видеоаналитики и улучшения метрологических характеристик ГСС.

1. Бельский А.Б. Применение гиперспектрометров для решения задач по обнаружению, распознаванию объектов в составе вертолетов // Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки. Сб. науч. ст. по мат. VI Междунар. науч.-практ. конф. «АБИТОР», 14–15 февраля 2019 г. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2019. С.91–97.
2. Lu G., Fei B. Medical hyperspectral imaging: A review // J. Biomed. Opt. 2014. Vol.19. Article number: 010901. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.JBO.19.1.010901>
3. Feng Y.Z., Sun D.W. Application of hyperspectral imaging in food safety inspection and control: A review // Crit. Rev. Food. Sci. 2012. Vol.52(11). P.1039–1058. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2011.651542>
4. Adão T., Hruška J., Pádua L. et al. Hyperspectral imaging: A review on UAV-based sensors, data processing and applications for agriculture and forestry // Remote Sens. 2017. Vol.9. Article number: 1110. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs9111110>
5. Klein M.E., Aalderink B.J., Padoan R. et al. Quantitative hyperspectral reflectance imaging // Sensors. 2008. Vol.8(9). P.5576–5618. DOI: <https://doi.org/10.3390/s8095576>
6. Rosi F., Miliani C., Braun R. et al. Noninvasive analysis of paintings by mid-infrared hyperspectral imaging // Angew. Chem. Int. Ed. Engl. 2013. Vol.52(20). P.5258–5261. DOI: <https://doi.org/10.1002/anie.201209929>
7. Nie Y., Xiangli B., Zhou J., Wei X. Design of airborne imaging spectrometer based on curved prism // Proc. SPIE. 2011. Vol.8197. Article number: 81970U. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.904270>
8. Zhou G., Cheo K. K. L., Du Y. et al. Hyperspectral imaging using a microelectrical-mechanical-systems-based in-plane vibratory grating scanner with a single photodetector // Opt. Lett. 2009. Vol.34(6). P.764–766. DOI: <https://doi.org/10.1364/OL.34.000764>
9. Gat N. Imaging spectroscopy using tunable filters: a review // Proc. SPIE. 2000. Vol.4056. P.50–64. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.381686>
10. Barducci A., Guzzi D., Lastri C. et al. Theoretical aspects of Fourier transform spectrometry and common path triangular interferometers // Opt. Express. 2010. Vol.18(11). P.11622–11649. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.18.011622>

11. Naylor D.A., Gom B.G. SCUBA-2 imaging Fourier transform spectrometer // *Proc. SPIE*. 2004. Vol.5159. P.91–101. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.506395>
 12. Alcock R. and Coupland J. A compact, high numerical aperture imaging Fourier transform spectrometer and its application // *Meas. Sci. Technol.* 2006. Vol.17(11). P.2861–2868. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/17/11/001>
 13. Pisani M., Zucco M. Fourier transform based hyperspectral imaging [Электронный ресурс] // *Fourier transforms — approach to scientific principles*. Chap. 21. 2011. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/15162> (дата обращения: 30.05.2022).
 14. Schumann L.W., Lomheim T.S. Infrared hyperspectral imaging Fourier transform and dispersive spectrometers: comparison of signal-to-noise based performance // *Proc. SPIE*. 2002. Vol.4480. P.1–14. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.453326>
 15. Fellgett P.B. On the ultimate sensitivity and practical performance of radiation detectors // *Journal Opt. Soc. Am.* 1949. Vol.39. P.970–976. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOSA.39.000970>
- References**
1. Belsky A.B. *Primeneniye giperspektrometrov dlya resheniya zadach po obnaruzheniyu, raspoznavaniyu ob'yektov v sostave vertoletov* [The use of hyperspectrometers for solving problems of detecting and recognizing objects in helicopters]. Aktual'nyye voprosy is-sledovaniy v avionike: teoriya, obsluzhivaniye, razrabotki. Sb. nauch. st. po mat. VI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «AVIATOR» [Topical issues of research in avionics: theory, maintenance, development. Collection of scientific articles based on the materials of the VI International Scientific and Practical Conference "AVIATOR"], 2019, pp. 91–97.
 2. Lu G., Fei B. Medical hyperspectral imaging: A review. *J Biomed. Opt.*, 2014, vol. 19, art. no. 010901. doi: <https://doi.org/10.1117/1.JBO.19.1.010901>
 3. Feng Y.Z., Sun D.W. Application of hyperspectral imaging in food safety inspection and control: A review. *Crit. Rev. food. sci.*, 2012, vol. 52(11), pp. 1039–1058. doi: <https://doi.org/10.1080/10408398.2011.651542>
 4. Adão T., Hruška J., Pádua L., et al. Hyperspectral imaging: A review on UAV-based sensors, data processing and applications for agriculture and forestry. *Remote sens.*, 2017, vol. 9, art. no. 1110. doi: <https://doi.org/10.3390/rs9111110>
 5. Klein M.E., Aalderink B.J., Padoan R., et al. Quantitative hyperspectral reflectance imaging. *Sensors*, 2008, vol. 8(9), pp. 5576–5618. doi: <https://doi.org/10.3390/s8095576>
 6. Rosi F., Miliani C., Braun R., et al. Noninvasive analysis of paintings by mid-infrared hyperspectral imaging. *Angew. Chem. Int. Ed. Eng.*, 2013, vol. 52(20), pp. 5258–5261. doi: <https://doi.org/10.1002/anie.201209929>
 7. Nie Y., Xiangli B., Zhou J., Wei X. Design of airborne imaging spectrometer based on curved prism. *Proc. SPIE*, 2011, vol. 8197, art. no. 81970U. doi: <https://doi.org/10.1117/12.904270>
 8. Zhou G., Cheo K. K. L., Du Y., et al. Hyperspectral imaging using a microelectrical-mechanical-systems-based in-plane vibratory grating scanner with a single photodetector. *Opt. Lett.*, 2009, vol. 34(6), pp. 764–766. doi: <https://doi.org/10.1364/OL.34.000764>
 9. Gat N. Imaging spectroscopy using tunable filters: a review. *Proc. SPIE*, 2000, vol. 4056, pp. 50–64. doi: <https://doi.org/10.1117/12.381686>
 10. Barducci A., Guzzi D., Lastrì C., et al. Theoretical aspects of Fourier transform spectrometry and common path triangular interferometers. *Opt. Express*, 2010, vol. 18(11), pp. 11622–11649. doi: <https://doi.org/10.1364/OE.18.011622>
 11. Naylor D.A., Gom B.G. SCUBA-2 imaging Fourier transform spectrometer. *Proc. SPIE*, 2004, vol. 5159, pp. 91–101. doi: <https://doi.org/10.1117/12.506395>
 12. Alcock R., Coupland J.A. A compact, high numerical aperture imaging Fourier transform spectrometer and its application. *Meas. Sci. Technol.*, 2006, vol. 17(11), pp. 2861–2868. doi: <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/17/11/001>
 13. Pisani M., Zucco M. Fourier transform based hyperspectral imaging. *Fourier Transforms — Approach to Scientific Principles*, 2011, chap. 21. Available at: <https://www.intechopen.com/chapters/15162> (Accessed: 30.05.2022).
 14. Schumann L.W., Lomheim T.S. Infrared hyperspectral imaging Fourier transform and dispersive spectrometers: comparison of signal-to-noise based performance. *Proc. SPIE*, 2002, vol. 4480, pp. 1–14. doi: <https://doi.org/10.1117/12.453326>
 15. Fellgett P.B. On the maximum sensitivity and practical characteristics of radiation detectors. *J. Opt. Soc. Am.*, 1949, vol. 39(11), pp. 970–976. doi: [10.1364/JOSA.39.000970](https://doi.org/10.1364/JOSA.39.000970)