

УДК 535.241.13

О.В. Ефимова¹, Е.Л. Черкашина²¹ *Университет гражданской защиты Украины, Харьков*² *Харьковская национальная академия городского хозяйства, Харьков*

ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ АКУСТОПТИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ВИДЕОСПЕКТРОМЕТРОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Обсуждается возможность использования видеоспектрометров для исследования отражающих свойств почвенно-растительного покрова в интересах дистанционного зондирования Земли. Показано, что существенные различия в отражающих свойствах земной поверхности можно получить, только повышая селективность фильтров, основанных на использовании периодических структур изменения показателя преломления среды. Используя взаимодействие света с ультразвуком под двойным углом Брэгга и пространственные составляющие второго порядка, возможно повысить в несколько раз разрешающую способность акустооптических фильтров.

Ключевые слова: акустооптический фильтр, дистанционное зондирование Земли, селективность, видеоспектрометр, угол Брэгга.

Введение

Постановка проблемы. В настоящее время одним из важных и приоритетных направлений развития средств и методов дистанционного зондирования Земной поверхности является разработка и применение видеоспектрометров [1]. До появления видеоспектрометров спектры отражения и излучения поверхности Земли мало использовались в качестве идентификационных признаков, хотя изучались десятки лет и были хорошо известны [2]. Это было связано с тем, что авиационные спектрометры имели низкое геометрическое разрешение, давали информацию только вдоль линии полета и позволяли судить о спектральных свойствах лишь достаточно протяженных объектов [3]. В видеоспектрометрах реализуются принципы новой научной дисциплины – изображающей спектроскопии, когда помимо геометрических используются спектральные характеристики объектов. Появление видеоспектрометров связано с развитием новых технологий: с разработкой матричных приемников, а также с появлением полихроматоров, обладающих высоким спектральным разрешением. В состав видеоспектрометров входят две системы. Во-первых, оптическая система, которая делит регистрируемую область пространства на набор смежных точек и, во-вторых, изображающий спектрометр, который разлагает состав принятого электромагнитного излучения на набор ограниченных спектральных полос [4].

В результате видеоспектральной съемки формируется многомерное пространственно-спектральное изображение, в котором каждый элементарный участок изображения «пиксел» характеризуется собственным спектром. Такое изображение носит название «куба» информации, два измерения которого соответствуют пространственному изображению местности на плоскости, а третье – характеризует спектральные свойства изображения.

Спектральное разрешение современных видеоспектрометров достигает 1,8 – 2,0 нм и обеспечивает построение спектральных характеристик подстилающей поверхности, определяемой мгновенным полем зрения прибора (для авиационных видеоспектрометров около 1 мрад.) [3].

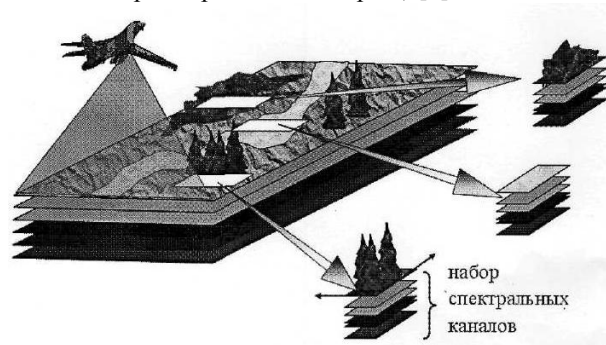


Рис. 1. Принцип получения видеоспектральных изображений

Практическая значимость развития видеоспектральной съемки обусловлена чрезвычайно широкими возможностями ее применения при решении задач мониторинга лесных покровов, сельскохозяйственных угодий, воздействия ионизирующих излучений, а также атмосферных и почвенных загрязнений.

При обнаружении лесных пожаров с использованием оптоэлектронных систем обычно используются различные информационные признаки: изменение температуры подстилающей поверхности, выброс в атмосферу газообразных продуктов горения, дымовые шлейфы, а также потеря цветности участков местности, охваченных лесным пожаром. Можно ожидать, что видеоспектральная съемка позволяет предсказать возможность возникновения лесных пожаров путем оценки изменения отражающих свойств почвенно-растительного покрова в результате стресса растительности при дефиците влаги. Однако при решении подобного класса задач, величина спектраль-

ного разрешения современных видеоспектрометров может оказаться недостаточной. Дело в том, что только в пределах достаточно узкого интервала длин волн (от сотых до единиц нанометров) проявляются существенные различия в отражающих и излучающих свойствах земной поверхности [5].

Поэтому целью настоящей статьи является обсуждение путей повышения разрешающей способности селективирующих устройств, оснащенных акустическими фильтрами.

Анализ последних исследований и публикаций. Основными характеристиками видеоспектрометрических систем являются: рабочий спектральный диапазон – $\delta\lambda$; спектральное разрешение – $\Delta\lambda$; количество спектральных каналов – ΔN ; геометрические параметры поля зрения и величина мгновенного поля зрения. Как известно, эти характеристики в значительной степени определяются свойствами диспергирующих устройств, входящих в состав видеоспектрометров.

Анализ известных диспергирующих устройств показал, что акустооптические фильтры обладают высокими динамическими свойствами и способны изменять свою аппаратную функцию в достаточно широких пределах, как по спектру, так и по величине коэффициента преломления путем изменения условий акустооптического взаимодействия.

Известно, что в периодических структурах, в том числе основанных на периодических структурах изменения коэффициента преломления, вызванных ультразвуковой волной, могут распространяться световые волны, лежащие в пределах ограниченных спектральных полос пропускания, что определяется числом полупериодов изменения коэффициентов преломления, укладывающихся на длине взаимодействия электромагнитной волны с периодической структурой l . При неколлинеарном взаимодействии эти условия реализуются при угле Брэгга. Угол Брэгга, как известно, вычисляется из соотношения $\sin\theta_B = -k_0/2k$ (где k_0 и k – волновые числа ультразвука и света соответственно), при этом существенными оказываются дифракционные составляющие первого порядка [6].

В работе, выполненной при участии авторов [7], показано, что при взаимодействии световой и ультразвуковой волн под углами, кратными углу Брэгга $2\theta_B$, $3\theta_B$ и т.д., максимальной величины достигают дифракционные составляющие второго, третьего и последующих порядков. Показано, что дифракционная эффективность зависит не только от величины относительного изменения коэффициента преломления $\Delta n/n_0$, связанного с наличием в среде ультразвуковой волны, но и от частоты ультразвука.

Постановка задачи и ее решение

В настоящей статье произведена сравнительная оценка характеристик акустооптических фильтров, построенных с использованием первых либо вторых

порядков брэгговской дифракции. Для этого воспользуемся соотношениями для дифракционной эффективности составляющих первого и второго порядков анализа спектральной разрешающей способности и углового поля зрения [7]:

$$\eta_1 = \frac{1}{1 + \gamma_1^2} \sin^2 \left(\frac{\Delta n}{n_0} \frac{kl}{2} \sqrt{1 + \gamma_1^2} \right); \quad (1)$$

$$\eta_2 = \frac{1}{1 + \gamma_2^2} \sin^2 \left[\left(\frac{\Delta n}{n_0} \right)^2 \frac{kl}{2} \left(\frac{k}{k_0} \right)^2 \sqrt{1 + \gamma_2^2} \right], \quad (2)$$

где $\varepsilon_1 = 1 + 2k \sin \theta / k_0$; $\varepsilon_2 = 2 + k \sin \theta / k_0$ – относительная расстройка, определяющая отличие условий взаимодействия от условий брэгговского синхронизма; $\Delta n/n_0$ – относительное изменение коэффициента преломления, вызванное ультразвуковой волной

$$\gamma_1 = \varepsilon_1 / 2q; \quad \gamma_2 = \varepsilon_2 / q^2; \quad q = \Delta n / n_0 \cdot k / k_0^2.$$

Используя выражения (1) и (2), определим условия взаимодействия, при которых реализуется максимальный коэффициент пропускания акустооптических фильтров (максимальная дифракционная эффективность). Эти условия для фильтров, использующих первые и вторые порядки, будут иметь вид:

$$\Delta n / n_0 \cdot kl = \pi; \quad \Delta n / n_0^2 \cdot kl \cdot k / k_0^2 = \pi. \quad (3)$$

Селективность для составляющих первого и вторых порядков определим как величину приращенной длины волны светового излучения $\Delta\lambda$ в выражениях (1) и (2), при котором дифракционная эффективность для каждого из порядков равна нулю. Тогда:

$$\Delta\lambda / \lambda_1 = 2\sqrt{3}q; \quad \Delta\lambda / \lambda_2 = \sqrt{3}q^2 / 2. \quad (4)$$

Решая попарно две системы уравнений (3) и (4), получим соотношения для спектральной селективности компонент первого и второго порядков для случая, когда для каждого из них реализуется максимальная дифракционная эффективность:

$$\Delta\lambda / \lambda_1 = 2\sqrt{3}\pi / Q; \quad \Delta\lambda / \lambda_2 = \sqrt{3}\pi / 2Q. \quad (5)$$

Из выражений (5) следует, что при равенстве волновых параметров взаимодействия $Q = k_0 l / k$ разрешающая способность акустооптических фильтров на вторых порядках дифракции будет в четыре раза выше по сравнению с фильтрами на первых порядках.

На рис. 2 изображены зависимости дифракционной эффективности для первых (а) и вторых (б) порядков дифракции от длины световой волны, вычисленные для случая: длина волны оптического излучения $\lambda_0 = 0,633$ мкм; частота ультразвука 60 МГц, когда длина взаимодействия равна $l = 0,5$ см. В качестве рабочего материала используют кристалл парателлурита, у которого скорость распространения ультразвука $v_0 = 0,617 \cdot 10^5$ см/с, а коэффициент преломления $n_0 \approx 2,4$. Как следует из анализа графиков, ширина спектральных каналов разрешения для составляющих второго порядка примерно в 4 раза уже, чем для первых.

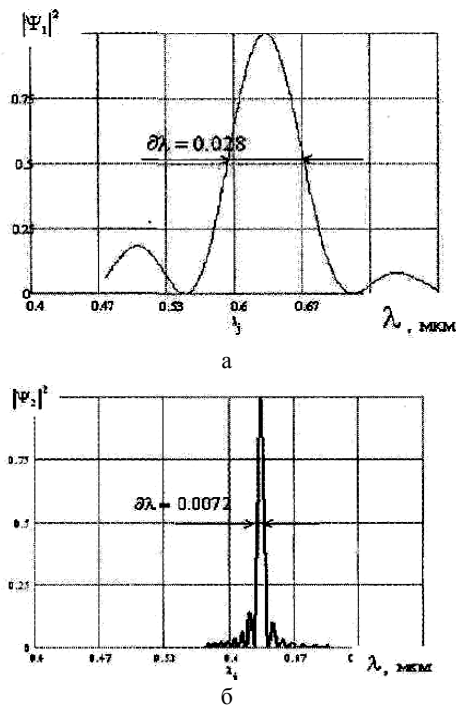


Рис. 2. К поясненню селективних свойств брэгговских резонансов первых и вторых порядков. Зависимость дифракционной эффективности пространственных составляющих первых порядков – (а) и вторых порядков – (б) от длины световой волны

Высокие селективные свойства составляющих вторых и последующих порядков обусловлены тем, что световое излучение претерпевает многократное рассеяние на объемных периодических структурах, созданных ультразвуковой волной. Следовательно, при взаимодействии света с ультразвуком равном удвоенному углу Брэгга, помимо увеличения спектральной селективности, условия брэгговского синхронизма будут происходить в меньшем угловом диапазоне, что означает уменьшения угла зрения. Действительно, в выражения для относительной расстройки ε_1 и ε_2 входят $\sin \theta$ (где θ – угол взаимодействия световой и ультразвуковой волн).

Это означает, что в выражениях (5) следует произвести замену $\Delta\lambda/\lambda_1 \rightarrow \Delta\sin\theta/\sin\theta_1$; $\Delta\lambda/\lambda_2 \rightarrow \Delta\sin\theta/\sin\theta_2$ и, следовательно, угловое поле зрения для фильтров на вторых порядках дифракции будет примерно в четыре раза меньше.

ШЛЯХИ ВДОСКОНАЛЕННЯ АКУСТОПТИЧНИХ ФІЛЬТРІВ ДЛЯ ВІДЕОСПЕКТРОМЕТРІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

О.В. Єфімова, О.Л. Черкашина

У статті обговорюється можливість використання відеоспектрометрів для дослідження відбиваючих властивостей ґрунтово-рослинного покриву на користь дистанційного зондування Землі. Показано, що істотні відмінності у відбиваючих властивостях земної поверхні можна отримати, тільки підвищуючи селективність фільтрів, заснованих на використанні періодичних структур зміни показника заломлення середовища. Використовуючи взаємодію світла з ультразвуком під подвійним кутом Брегга і просторові складові другого порядку, можливо підвищити у декілька разів роздільну здатність акустоптичних фільтрів.

Ключові слова: акустоптичний фільтр, дистанційне зондування Землі, селективність, відеоспектрометр, кут Брегга.

Выводы

Таким образом, видеоспектральная съемка обеспечивает решение широкого класса задач дистанционного зондирования земной поверхности. Однако, для определения пожароопасных участков необходимы спектрометры с полосой от сотых долей до единиц нанометров. Показано, что обеспечив взаимодействие света с ультразвуковой волной под двойным углом Брэгга, можно увеличить разрешающую способность примерно в четыре раза, с одновременным уменьшением углового поля зрения. Это, по-видимому, открывает возможность построения нового класса акустоптических устройств, характеристики которых отличаются от характеристик приборов, использующих обычную брэгговскую дифракцию.

Список литературы

1. Шилин Б.В. Использование видеоспектральной аэросъемки для экологического мониторинга / Б.В. Шилин, В.Н. Груздев, А.В. Марков, В.Ф. Мочалов // *Оптический журнал*. – 2001. – Т. 68, № 12. – С. 41-49.
2. Чапурский Л.И. Отражательные свойства природных объектов в диапазоне 400 – 2500 нм / Л.И. Чапурский. – М.: Изд. МО СССР, 1986. – 224 с.
3. Шилин Б.В. Видеоспектральная аэросъемка – ведущее направление развития дистанционного зондирования в оптическом диапазоне / Б.В. Шилин, В.В. Хотяков // *Оптический журнал*. – 1998. – Т.4, № 1. – С. 29-38.
4. Колобродов В.Г. Оптические системы видеоспектрометров дистанционного зондирования Земли / В.Г. Колобродов, П.В. Бородийчук, В.И. Микитенко // *Космична наука і технологія*. – 1998. – Т.4, № 1. – С. 29-38.
5. Ключников В.Ю. Использование гиперспектральных технологий дистанционного зондирования для оценки экологического состояния природных комплексов / В.Ю. Ключников // *Двойные технологии*. – 2001. – № 3. – С. 13-19.
6. Корпел А. Акустоптика: пер. с англ. / А. Корпел. – М.: Мир, 1993. – 240 с.
7. Купченко Л.Ф. Дифракционная эффективность второго порядка брэгговской дифракции при взаимодействии света с ультразвуком под двойным углом Брегга / Л.Ф. Купченко, Ю.М. Плахов, О.В. Ефимова и др. // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 1999. – Т.4, № 4. – С. 342-348.

Поступила в редколлегию 8.08.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.И. Карпенко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

**WAYS OF PERFECTION ACOUSTO-OPTIC FILTERS
FOR THE VIDEOSPECTROMETERS OF REMOTE SENSING OF EARTH**

O.V. Yefimova, Ye.L. Cherkashina

In the article possibility of the use of videospectrometers comes into question for research of reflecting properties of soil-vegetable cover in behalf of the remote sensing of Earth. It is shown that substantial distinctions it is possible to get in reflecting properties of earthly surface, only promoting selectivity of filters, based on the use of periodic structures of change of index of refraction of environment. Using co-operating of light with an ultrasound under the double Bregg's angle and spatial constituents of the second order, it is possible to promote in once or twice settling ability of aacousto-optic filters.

Keywords: *acousto-optic filter, remote sensing of Earth, selectivity, videospectrometer, Bregg's angle.*