

С.А. Юшкин, И.И. Ипполитов, И.Г. Половцев

Оптическая схема фокального монохроматора для УФ-радиометрии на основе голограммной линзы

Институт оптического мониторинга СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 27.01.2000 г.

Предлагается фокальный монохроматор на основе голограммной линзы как вариант оптической схемы спектрального прибора для УФ-радиометрии. Представлены основные аналитические выражения для выполнения габаритного расчета и описания спектральных характеристик схемы. Проведен анализ способов повышения спектрального разрешения.

Достигающее поверхности Земли солнечное ультрафиолетовое (УФ) излучение оказывает разностороннее и зачастую негативное воздействие на живые и растительные организмы. По степени воздействия излучения на человека принято разделять диапазон длин волн 200÷400 нм на три области: А ($315 < \lambda < 400$ нм), В ($280 < \lambda < 315$ нм) и С ($\lambda < 280$ нм). Излучение в области А оказывает благотворное эритемное и загарное действие, в области В обладает большей биологической активностью. Благотворное в малых дозах, оно оказывает негативное воздействие с увеличением последних. Излучение в области С обладает мощным бактерицидным действием и является пагубным для живых и растительных организмов.

Можно определить мгновенную эффективную УФ-облученность или дозу (экспозицию) как

$$E = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} G(\lambda) W(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где $G(\lambda)$ – спектральная интенсивность УФ-излучения; $W(\lambda)$ – весовая функция или спектр действия для специфического биологического или химического процесса, определяемые экспериментально. Тогда часовые, дневные или более длительные дозы могут быть определены интегрированием E по времени. Именно эти дозы и их изменчивость должны рассматриваться в качестве главной цели экологического УФ-мониторинга.

Измерения УФ-радиации, особенно ее коротковолновой части, сопряжены с определенными трудностями. Оптические элементы приборов должны быть изготовлены из кварца или других материалов, прозрачных в УФ-области. Фотоприемники должны обладать достаточно высокой чувствительностью в УФ-диапазоне. В случае преобразования УФ-спектра с помощью люминофора в видимую область фотоприемники должны обладать высокой чувствительностью в видимом диапазоне. По методу выделения участков УФ-спектра УФ-радиометры можно разделить на две группы: а) спектральные приборы, использующие в качестве диспергирующих элементов кварцевые призмы, либо отражательные дифракционные решетки; б) интегральные приборы, использующие в качестве селективных элементов широкополосные фильтры [3].

На сетевых станциях УФ-мониторинга в настоящее время используются РВ-метры, в которых область В ультрафиолета выделяется с помощью фильтров. Кривая чувствительности этих фильтров приблизительно повторяет кривую эритемного спектра действия. Применение для сетевых измерений известных в настоящее время УФ-радиометров [2, 3] оказалось малоприменимым из-за сложности, громоздкости и высокой стоимости последних. Поэтому актуально стоит задача создания простого, малогабаритного и дешевого прибора для подобных измерений.

Одним из вариантов упрощения оптической схемы спектрального прибора является использование схемы фокального монохроматора, где функции диспергирующего элемента и коллиматорного объектива выполняет один элемент. В качестве такого диспергирующего и фокусирующего элемента можно использовать дифракционную линзу, представляющую собой дифракционную решетку с переменным шагом. Вследствие этого линза обладает фокусирующими свойствами [1]. Частным случаем дифракционной линзы является голограммная линза, полученная путем регистрации интерференционной картины, создаваемой двумя когерентными пучками монохроматического излучения на особом светочувствительном слое, который наносится на поверхность заготовки. Для такой линзы хроматизм положения изображения входной щели согласно [1, 4] описывается выражением

$$F(\lambda) = \frac{\lambda_0 L_1 L_2}{k\lambda(L_1 + L_2)}, \quad (2)$$

где λ_0 , L_1 , L_2 – параметры записи голограммной линзы; k – рабочий порядок дифракции; λ – рабочая длина волны.

В отличие от классических фокальных монохроматоров со стеклянной оптикой [6], не позволяющей эффективно работать с УФ-составляющей, при использовании голограммной линзы данная проблема решается путем нанесения на рабочую поверхность голограммы отражающего покрытия. К тому же зависимость фокуса от длины волны у голограммной линзы значительно выше, чем у однородной стеклянной линзы. Оптическая схема фокального монохроматора на основе голограммной линзы, представлена на рис. 1.

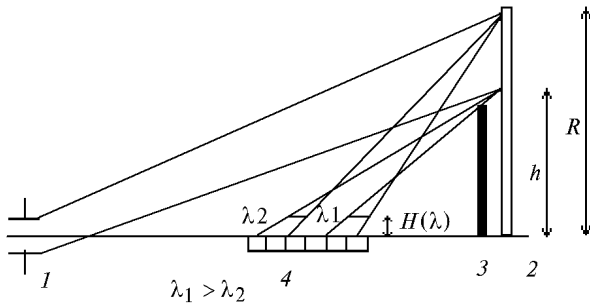


Рис. 1. Оптическая схема фокального монохроматора на основе голограммной линзы

Она содержит входную щель 1, диспергирующий элемент 2, экран 3, обеспечивающий необходимую чистоту выделяемого спектрального диапазона, линейный фотоприемник 4 для работы прибора в качестве спектрографа. Световой пучок исследуемого излучения от входной щели 1 падает на голограммную линзу 2, выполненную в виде внеосевого фрагмента осевой голограммной линзы. Из-за ярко выраженного хроматизма положения на оптической оси линзы формируется изображение входной щели в виде спектральных линий, которые регистрируются фотоприемным устройством 4. Причем в соответствии с (2) чем меньше длина волны, тем дальше от поверхности линзы находится спектральная линия. Поэтому для коротких длин волн свойственна более высокая линейная дисперсия. Если в классическом линзовом фокальном монохроматоре более высокая линейная дисперсия свойственна длинноволновому излучению, то в данной схеме ситуация обратная. Именно такой вид дисперсионной кривой свидетельствует об удобстве использования данной схемы для исследования коротковолнового излучения.

Поскольку в схеме используется внеосевой фрагмент осевой голограммной линзы, то отпадает необходимость в использовании коллиматорного объектива. Таким образом, схема имеет минимальное количество элементов, вследствие чего световые потери в приборе сведены к минимуму и определяются только дифракционной эффективностью линзы, что особенно важно при работе с УФ-составляющей солнечного излучения. Использование многоканального фотоприемника вносит дополнительные удобства в методику измерений потоков солнечного УФ-излучения, позволяя разместить на фоточувствительной площадке фотоприемника всю исследуемую спектральную область (А, В или С).

Из известной в геометрической оптике формулы Гаусса

$$\frac{S'}{S} = \frac{F}{x}, \quad (3)$$

где S' – расстояние от линзы до изображения; S – расстояние от предмета до линзы; F – фокус линзы; $x = S - F$, получим выражение, описывающее дисперсионную кривую для данной схемы:

$$S'(\lambda) = \frac{F(\lambda)S}{S - F(\lambda)}, \quad (4)$$

где $F(\lambda)$ – фокус, определяемый по формуле (2); S – расстояние от входной диафрагмы до голограммной линзы.

Поскольку длина волны воспроизведения не соответствует длине волны записи голограммы, то аппаратная

функция будет иметь абберационное размытие. Аппаратная функция, рассчитанная с учетом возникающих продольных сферохроматических aberrаций, исходя из геометрических построений рис. 1, определяется формулой

$$L(\lambda) = \frac{hH(\lambda)}{\operatorname{tg}\{\arcsin[\lambda v(h) - \sin(\operatorname{arctg}((h + d/2)/S))]\}} - \frac{RH(\lambda)}{\operatorname{tg}\{\arcsin[\lambda v(R) - \sin(\operatorname{arctg}((R + d/2)/S))]\}}, \quad (5)$$

где h – высота экрана; R – высота голограммной линзы; d – ширина входной щели; $v(h)$ и $v(R)$ – локальные частоты штрихов голограммной линзы на высоте h и R соответственно; S – расстояние между входной щелью и голограммной линзой; $H(\lambda)$ – высота над оптической осью.

При $H(\lambda) = 0$ получаем формулу, описывающую величину аппаратной функции на оптической оси голограммной линзы.

Предел спектрального разрешения, согласно [3], определяется формулой

$$\delta\lambda = \frac{L(\lambda)}{2(dS'/d\lambda)}. \quad (6)$$

Важным достоинством представленной схемы является возможность работы с широкой входной щелью. Если у обычных спектральных приборов размер входной щели варьируется от единиц до сотен микрометров, то в схеме фокального монохроматора на основе голограммной линзы можно использовать щель порядка 1 мм. Так, например, в схеме с параметрами $d = 1$ мм, $S = 25$ см, $L1 = 25$ см, $L2 = 4$ см, $h = 1$ см, $R = 3$ см, $\lambda_0 = 0,63$ мкм из (4) можно определить, что монохроматор обладает высокой дисперсией (протяженность спектра для диапазона 200÷400 нм составляет примерно 13 см). Рассчитанное по (5), (6) спектральное разрешение для рассматриваемого спектрального диапазона составило 2÷14 нм. Таким образом, при простоте конструкции и широкой входной щели фокальный монохроматор позволяет получить достаточно высокое спектральное разрешение.

Полученный результат является достаточно приемлемым, поскольку для мониторинга потоков солнечного УФ не требуется очень высокого спектрального разрешения. При этом есть возможность за счет широкой входной щели значительно увеличить энергетический поток исследуемого излучения и пренебречь потерями, вызванными невысокой дифракционной эффективностью голограммных линз (примерно 10%). При необходимости повышения спектрального разрешения можно использовать представленные ниже методики.

Как отмечалось выше, при воспроизведении голограммы на длине волны, отличной от длины волны ее записи, возникают значительные сферохроматические aberrации, которые можно уменьшить путем введения дефокусировки [5] и тем самым повысить спектральное разрешение. Исследуя изменение величины аппаратной функции при изменении ее положения над оптической осью, можно определить высоту положения минимальной аппаратной функции. Результаты расчета для схемы с описанными выше параметрами представлены на рис. 2 в виде кривой дефокусировки. Фиксирование фотоприемного устройства на данной кривой позволит при тех же пара-

метрах оптической схемы значительно (до 100 раз) повысить спектральное разрешение прибора. Однако такой способ повышения спектрального разрешения приводит к значительному усложнению методики проведения измерений.

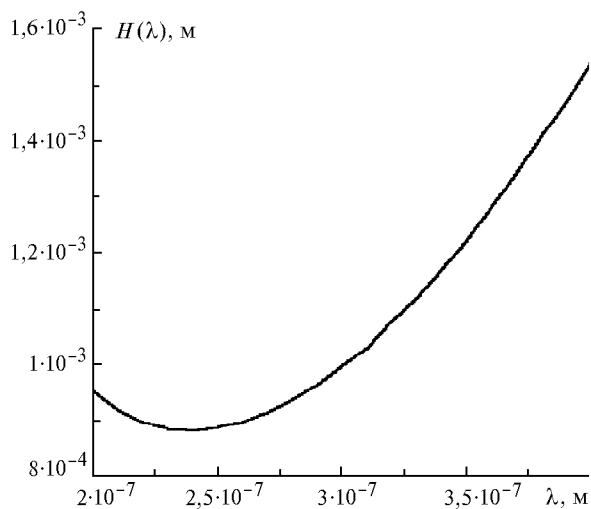


Рис. 2. График кривой дефокусировки

Другим способом повышения спектрального разрешения является изменение параметров оптической схемы фокального монохроматора: уменьшение входной щели d , уменьшение высоты голограммой линзы R или увеличение высоты экрана h . Кривые спектрального разрешения при разных параметрах оптической схемы, представленные на рис. 3, иллюстрируют степень влияния данных параметров на спектральное разрешение прибора. Однако такой способ повышения спектрального разрешения приводит к нежелательному уменьшению светосилы прибора.

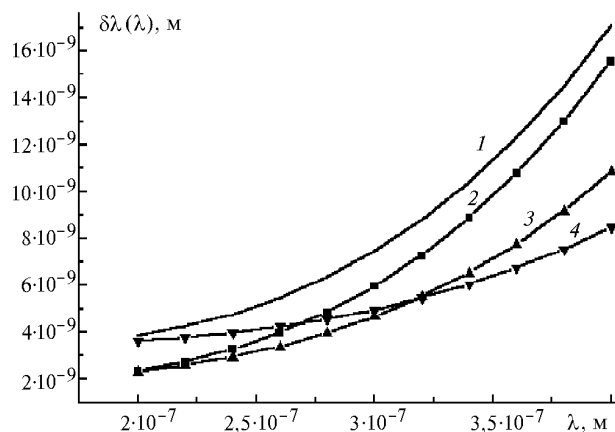


Рис. 3. Графики спектрального разрешения при разных параметрах оптической схемы: 1, 3, 4 – $d = 1$ мм, 2 – $d = 0,5$ мм; 1, 2, 3 – $R = 3$ см, 4 – $R = 2$ см; 1, 2, 4 – $h = 1$ см, 3 – $h = 2$ см

S.A. Yushkin, I.I. Ippolitov, I.G. Polovtsev. Optical scheme of focal monochromator based on the hologram lens.

Focal monochromator based on the hologram lens is proposed as a variant of spectral device optical scheme for UV radiometry. The principal analytical expressions are presented for clearance calculation and describing the scheme's spectral characteristics. Some ways of spectral resolution enhancement are under analysis.

Изменением параметров записи голограммной линзы можно увеличить разрешение, сохраняя световые характеристики прибора. Из рис. 4 видно, что к повышению спектрального разрешения приводит увеличение $L1$ и уменьшение $L2$. Однако возможность уменьшения $L2$ ограничена технологическими особенностями записи голограммы, в то время как параметр $L1$ не имеет ограничений с этой стороны. Но увеличение параметра записи $L1$ в силу более протяженной дисперсионной кривой приводит к увеличению габаритных размеров монохроматора. Таким образом, задача повышения спектрального разрешения сводится к оптимальному выбору параметров фокального монохроматора, исходя из специфики решаемой задачи и условий эксплуатации.

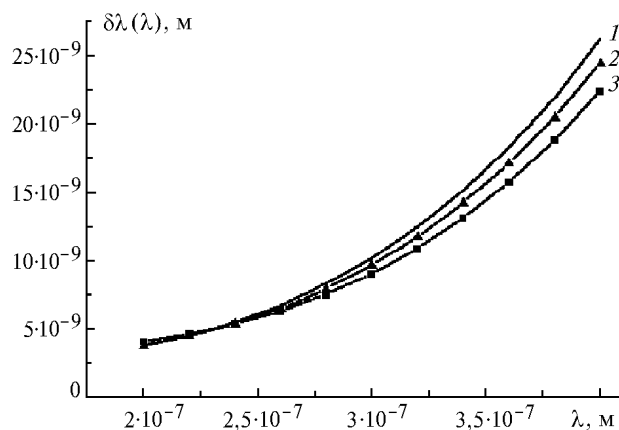


Рис. 4. Графики спектрального разрешения при разных параметрах записи голограммной линзы: 1 – $L1 = 35$ см; 2, 3 – $L1 = 25$ см; 1, 2 – $L2 = 4$ см, 3 – $L2 = 3$ см

Таким образом, использование оптической схемы фокального монохроматора на основе голограммной линзы является простым и оригинальным способом упрощения схемы спектрального прибора. Поскольку обеспечиваемое спектральное разрешение является достаточным для мониторинга потоков солнечного УФ-излучения, а также вследствие простоты конструкции и невысокой стоимости элементов, эта схема может стать основой для создания малогабаритного и недорогого УФ-спектрорадиометра.

1. Грейсх Г.И. Оптика градиентных и дифракционных элементов. М.: Радио и связь, 1990. 135 с.
2. Елисеев А.А., Ивакин Ю.А., Ипполитов И.И. // Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 2. Томск: ИОА СО РАН, 1997. С. 160–170.
3. Зайдель А.Н. Техника и практика спектроскопии. М.: Наука, 1976. 392 с.
4. Кольер Р. Оптическая голография. М.: Мир, 1973. 687 с.
5. Сокольский М.Н. Допуски и качество оптического изображения. Л.: Машиностроение, 1989. 221 с.
6. Топорев А.С. Монохроматоры. М.: Наука, 1955. 259 с.