

АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 551.501

С.Н. Волков

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ–ПЕРО В ЛИДАРЕ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ

Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск

Поступила в редакцию 15.12.98 г.

Принята к печати 10.02.99 г.

Рассматривается возможность использования интерферометра Фабри–Перо в сочетании с дифракционной решеткой для монохроматора, выполненного по автоколлимационной схеме. Анализируется эффективность предлагаемого монохроматора.

Требования к аппаратным средствам зондирования, такие как высокая разрешающая способность в сочетании с долговременной стабильностью параметров и небольшие габариты, предполагают постоянный поиск новых решений. Привлекательность использования интерферометра Фабри–Перо для решения проблемы выделения узких спектральных интервалов при лазерном зондировании с использованием эффекта комбинационного рассеяния (КР) обсуждалась ранее [1–3]. Было отмечено, что с его помощью можно надежно выделить вращательную структуру КР кислорода и азота атмосферы и использовать это для определения профилей температуры в атмосфере посредством КР-лидара. В работе [4] показано, что для решения этой задачи оптимальным является выделение из чисто вращательного спектра КР азота двух линий, например с квантовыми числами 6 и 14. Оптимальным аппаратным решением для такого выделения представляется использование интерферометра Фабри–Перо в сочетании с дифракционной решеткой. При этом интерферометр ставится, как это показано на рис. 1, в оптическое плечо «линза–решетка» дифракционного монохроматора, выполненного по автоколлимационной схеме.

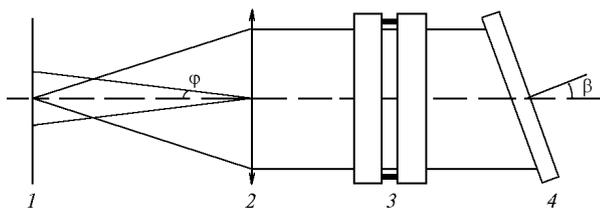


Рис. 1. Схема предлагаемого монохроматора: 1 – плоскость расположения входных и выходных отверстий монохроматора; 2 – линза; 3 – интерферометр Фабри–Перо; 4 – дифракционная решетка

Принцип действия монохроматора следующий.

На рис. 2 показано расположение входных и выходных щелей для случая согласования монохроматора с отверстиями. Отверстия 2 и 4 предназначены для выделения линий с вращательными квантовыми числами соответственно 6 и 14 из стоксова и антистоксова крыльев линий чисто вращательного спектра КР азота. На отверстие 3 попадает дважды ослабленное излучение на длине волны зондирования. На отверстие 6 направляется неослаблен-

ное излучение на основной линии зондирования как результат интерференции на интерферометре в обратном направлении. Смысл симметричной относительно оптической оси монохроматора окружности 5 заключается в том, что при расположении на ней световодов условия для интерференции на интерферометре Фабри–Перо будут идентичными

$$2d \cos \varphi = m \lambda, \tag{1}$$

где  $d$  – расстояние между пластинами интерферометра;  $\varphi$  – угол падения волнового фронта на интерферометр;  $m$  – порядок интерференционной картины;  $\mu$  – показатель преломления;  $\lambda$  – длина волны.

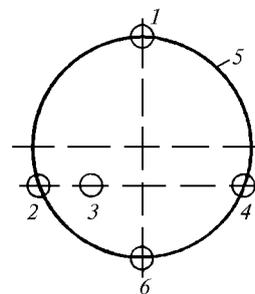


Рис. 2. Расположение отверстий в приемной плоскости: 1 – входное отверстие; 2, 3, 4, 6 – выходные отверстия; 5 – окружность, на которой расположены отверстия 1, 2, 4, 6

Излучение от входного отверстия 1 попадает на линзу и затем, как почти плоская волна, под углом  $\varphi$  попадает на интерферометр. Расстояние между пластинами интерферометра выбирается таким, чтобы спектральная селекция, осуществляемая интерферометром, соответствовала чисто вращательному спектру КР азота [5] с шагом  $7,958 \text{ см}^{-1}$ .

После интерферометра излучение попадает на дифракционную решетку, где происходит угловая спектральная селекция. Решетка настраивается таким образом, чтобы представляющие интерес два спектральных интервала, соответствующие вращательным квантовым числам 6 и 14, попадали обратно на интерферометр под углом  $\varphi$ . Дважды отселектированное интерферометром излучение собирает линза на отверстия 2 и 4.

Отметим, что если вместо дифракционной решетки расположить плоское зеркало и настроить его так, чтобы

отраженное зеркалом излучение попадало на интерферометр под углом  $\varphi$ , то за линзой картина в плоскости изображения, для огибающей интенсивности, будет аналогична картине дифракции на круглом отверстии с эффективным сечением, равным входной апертуре отверстия. С дифракционной решеткой картина поперек плоскости угловой спектральной селекции решетки не изменится.

Для расчета монохроматора примем в качестве исходных такие величины, как относительное отверстие согласованной оптической системы  $O$ , апертуры отверстий  $A_c$  и интерферометра Фабри–Перо  $A_n$ , а также угол блеска дифракционной решетки  $\beta$ , известными.

Тогда фокусное расстояние линзы  $F$  определяется из соотношения

$$F = A_n^* O. \quad (2)$$

Обратная линейная дисперсия  $D_l$  рассчитывается по формуле

$$D_l = \lambda / (2F \operatorname{tg} \beta). \quad (3)$$

Параметры интерферометра Фабри–Перо определяются следующими образом:

$$\delta m = (1 - R) / (\pi \sqrt{R}); \quad (4)$$

$$K_i = [(1 + R) / (1 - R)]^2; \quad (5)$$

$$M_i = T^2 / (T + A)^2, \quad (6)$$

где  $\delta m$  – ширина аппаратной функции интерферометра;  $R$  – коэффициент отражения зеркал интерферометра;  $K_i$  – контраст за один проход;  $M_i$  – коэффициент пропускания интерферометра;  $T$  и  $A$  – соответственно коэффициенты пропускания и поглощения зеркал интерферометра.

Предлагаемый монохроматор располагается в лидаре комбинационного рассеяния либо непосредственно в фокальной плоскости приемной антенны, либо разнесен через оптическую развязку, осуществляемую с помощью световодов. Необходимое согласование определяется следующим образом. Представим аппаратную функцию интерферометра  $\delta m$  в виде

$$\delta m = \delta \lambda / (\Delta \lambda), \quad (7)$$

где  $\Delta \lambda$  – область свободной дисперсии;  $\delta \lambda$  – полуширина аппаратной функции, и определим  $\delta \lambda$  для нашего случая как спектральное заполнение входной щели монохроматора.

Для предлагаемого монохроматора спектральное заполнение  $\delta \lambda$  можно получить, дифференцируя (1) и исключая  $m$ :

$$\delta \lambda = \lambda \operatorname{tg} \varphi \delta \varphi, \quad (8)$$

где  $\delta \varphi$  – угловая апертура входного отверстия,

$$\delta \varphi = \frac{\cos^2 \varphi}{F} A_c. \quad (9)$$

Пропускание предлагаемого монохроматора  $M_m$  можно записать в виде

$$M_m = M_l^2 M_i^2 M_r, \quad (10)$$

где  $M_l$  – пропускание линзы;  $M_r$  – пропускание дифракционной решетки.

Подавление уровня фона  $K_m$  в монохроматоре определим по формуле

$$K_m = K_i^2 K_r, \quad (11)$$

где  $K_r$  – коэффициент подавления уровня фона дифракционной решеткой.

Поясним принцип работы предлагаемого монохроматора на конкретном примере. Положим (для наиболее вероятного случая), что лидар работает в видимой области около 0,532 мкм и согласован с монохроматором с помощью световодов. Примем диаметр световодов равным 0,3 мм, относительное отверстие согласованной оптической системы – 1:3 и апертуру интерферометра – 50 мм. Положим также, что дифракционная решетка работает в пятом порядке с разрешением 600 штр./мм. Тогда фокусное расстояние линзы 3 будет равно 150 мм. Обратная линейная дисперсия монохроматора 4 в этом случае составит 13,5 Å/мм. Расстояние между световодами 2 и 4 (см. рис. 2), равное 3,77 мм, обуславливает наименьший диаметр окружности 5 и угол  $\varphi = 0,72^\circ$ . Рассчитывая промежуток, коэффициент отражения зеркал и контраст за один проход для интерферометра из выражений (1), (4)–(9), получим  $d = 0,6282$  мм,  $R = 0,834$ ,  $K = 122$ . Таким образом, на основной линии излучения (световод 3) подавление на интерферометре за два прохода составит четыре порядка величины. Для световодов 2 и 4 подавление основной линии излучения увеличится еще на 4 порядка на дифракционной решетке и общее подавление уровня фона составит восемь порядков величины.

Если располагать интерферометр по традиционной схеме перед монохроматором, то приведенный выше пример показывает невысокий, всего два порядка, контраст за один проход для интерферометра, что определяется условиями согласования параметров интерферометра с приемной антенной лидара для наиболее распространенного случая.

Предлагаемый монохроматор оптимально решает указанную проблему.

Для определения эффективности предлагаемого монохроматора в сравнении с двойным монохроматором рассмотрим величину

$$\gamma = P \delta \lambda / K, \quad (12)$$

где  $P$  – принимаемая мощность излучения на основной линии излучения;  $K$  – коэффициент подавления основной линии на соседнем спектральном участке.

Таким образом,  $\gamma$  можно рассматривать как характеристику величины фонового излучения, попадающего на регистрирующую аппаратуру. Для двойного монохроматора с дифракционной решеткой спектральное заполнение входной щели, как правило, выбирается около 10 Å при коэффициенте подавления восемь порядков.

Для рассматриваемого случая  $\delta \lambda = 0,13$  Å при коэффициенте подавления уровня фона восемь порядков. Таким образом, отношение характеристик  $\gamma$  обоих монохроматоров составит 1:77, что явно в пользу предлагаемого монохроматора.

Кроме того, выделение вращательной структуры интересующей нас газовой составляющей атмосферы при наличии загрязнений является положительным фактором.

Предлагаемый монохроматор рекомендуется построить по схеме, представленной на рис. 3. Здесь вместо линзы используется сферическое или, что еще лучше, параболическое зеркало. Расположение входных и выходных световодов в плоскости изображения (см. рис. 2) останется прежним.

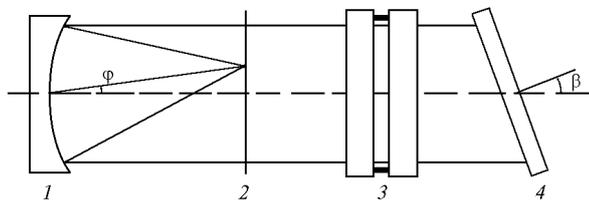


Рис. 3. Схема монохроматора, предлагаемого к исполнению: 1 – сферическое зеркало; 2 – плоскость расположения отверстий; 3 – интерферометр Фабри–Перо; 4 – дифракционная решетка

В этом случае в фоновом излучении, падающем на приемные световоды 2 и 4, появляющиеся в результате рассеяния на оптических деталях, будет отсутствовать доля излучения, отраженная при преломлении на линзе. Это важный момент, на который стоит обратить особое внимание.

Фоновое излучение на приемных световодах составлено (в порядке убывания) из отраженных при преломлении на оптических деталях бликов, из рассеянного излучения от пыли и элементов конструкции и из дифракционных эффектов на излучающих световодах.

От просветленной поверхности линзы доля мощности блика, падающего на приемную плоскость световодов, составляет около 0,1% от излучения, падающего в монохроматор. Тогда, при площади световода 0,1 мм<sup>2</sup> и диаметре блика около 30 мм, доля фоновой мощности на световоде может достигать 10<sup>-5</sup> от общего излучения.

Запыленные оптические поверхности, дающие вклад в фоновое излучение, можно рассматривать как экраны, рассеивающие во все стороны. Уровень фона 10<sup>-8</sup> на приемных световодах означает долю рассеянной мощности от основного излучения 0,5–1%, что можно оценить как уровень запыленности выше среднего.

Влияние фона от дифракционных эффектов от световодов 1 или 6 на световоды 2 и 4 в данном случае может составлять [6] не более 10<sup>-9</sup>–10<sup>-10</sup> от общей мощности из-

лучения, если учитывать расположение световодов и то, что диаметр световодов гораздо больше длины волны.

Можно сделать вывод, что при тщательном исполнении зеркальный вариант предлагаемого монохроматора является предпочтительным. Конструктивно предлагаемый монохроматор компактен, и в нем используется меньшее количество оптических элементов, чем в двойном монохроматоре. По сравнению с описанным ранее [7] двухлучевым монохроматором в нем отсутствует составленный из световодов коммутационный узел.

Изготовление промежуточного кольца для интерферометра не представляет особых затруднений, поскольку его толщина может варьироваться в некоторых пределах, определяя диаметр окружности 5 в плоскости изображения, на которой, в свою очередь, выбирается расположение световодов 2 и 4, определяемое параметрами зеркала и решетки. Блок световодов изготавливается с фиксированным расположением световодов. Интерферометр и дифракционная решетка монтируются в юстировочных оправах. Юстировка монохроматора не сложна и состоит из двух этапов. На входной световод 1 заводится излучение зондирующего лазера, и интерферометр выставляется так, чтобы отраженное от него в результате интерференции излучение попадало на световод 6. Затем, на втором этапе, дифракционная решетка выставляется так, чтобы ослабленное излучение лазера собиралось на световоде 3.

Можно предположить, что при тщательном исполнении предлагаемый монохроматор будет соответствовать требованиям высокой спектральной селективности, согласованности с лидаром и малых габаритов.

1. Barrett J.J., Mayers S.A. // J. Opt. Soc. Amer. 1971. V. 61. N 9. P. 1246–1251.
2. Hayden W.S. // Opto-Spectr. 1972. V. 4. N 2. P. 161–167.
3. Barrett J.J. // Laser Raman Gas Diagnostics / Eds. Lapp M., Penney C.M. New York: Plenum Press, 1974. P. 63–85.
4. Cohen A., Cooney J.A., Geller K.N. // Appl. Opt. 1976. V. 15. N 11. P. 2896.
5. Сушинский М.М. Спектры комбинационного рассеяния молекул и кристаллов. М.: Наука, 1967. 548 с.
6. Солимено С., Крозиньяни Б., Ди Порто П. Дифракция и волновое распространение оптического излучения: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 664 с.
7. Волков С.Н., Кауль Б.В., Шапранов В.А., Шелефонтьук Д.И. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. N 10. С. 1527–1530.

S.N. Volkov. Efficiency of Fabry–Perot Interferometer in Raman Scattering Lidar.

A monochromator with Fabry–Perot interferometer and grating is proposed. The monochromator efficiency is analyzed.