

С.А. Останин

Корреляционная обработка спектра лидара

Чувствительность внутрирезонаторной спектроскопии (ВР-спектроскопии), а в случае ЛП-лидара и динамический диапазон измерения коэффициента селективного поглощения исследуемого газа (определяющего возможный диапазон измеряемых концентраций) зависит от минимально регистрируемой глубины провалов в спектре генерации лазеров. Для случая фотографической регистрации спектра на фотоматериал или координаточувствительный детектор (ПЗС-линейку, видикон) регистрируется провал с относительной глубиной 3–5%. Эта величина обусловлена изрезанностью регистрируемого спектра шумами различного происхождения: как шумами материала или детектора, так и интерферометрическими шумами лазера и дисперсионного элемента. Под интерферометрическими шумами мы понимаем паразитные селекции и спекл-структуру поля после дисперсионного элемента. Изучение способов управления спектрально-кинетическими характеристиками излучения с целью «сглаживания» спектра генерации и улучшения его повторяемости является одним из основных направлений работ по повышению чувствительности внутрирезонаторной спектроскопии. Для «сглаживания» спекл-структуры поля применяют, например, вращающийся с большой скоростью (до 150 м/с) рассеиватель.

Учитывая, что изрезанность спектра обладает свойствами шума, а провалы в спектре генерации, вызванные поглощением исследуемого газа, носят не случайный характер, определение центра линии поглощения и глубины провала можно осуществить статистическими методами. При этом шумы фотоматериала или детектора фильтруются цифровыми методами, так как АЧХ этих шумов известна заранее и имеется возможность изменением пространственного масштаба регистрируемого спектра сдвинуть эти шумы в низкочастотную или высокочастотную области спектра по сравнению с характерными пространственными частотами провалов.

Предположим, имеются две реализации спектров, полученных за два импульса генерации $I_1(\omega_i)$ и $I_2(\omega_i)$. Если определить коэффициенты корреляции между реализациями $f_2 > f_1$ и $I_2(\omega_i)$ для различных участков спектра с шириной, порядка ширины провала, который обусловлен поглощением, то максимальным коэффициент

корреляции будет для того участка спектра, где имеется провал. Корреляция для остальных участков будет тем ближе к нулю, чем больше число реализаций в связи со случайным характером изрезанности спектра вне провала. В случае, когда ширина провала заранее неизвестна, разбиваем дискретные последовательности $I_1(\omega_i)$ и $I_2(\omega_i)$ на всевозможные двумерные векторы

$$\begin{aligned} I_1(\omega_{ij}) &= (I_1(\omega_i), I_1(\omega_j)), \\ I_2(\omega_{ij}) &= (I_2(\omega_i), I_2(\omega_j)), \end{aligned} \quad (1)$$

где $i \neq j$; $i = \overline{1, N}$; $j = \overline{1, N}$; N – количество значений интенсивности в реализации спектра.

Для определения коэффициентов корреляции между всеми векторами первого и второго спектров, построим матрицу $R_{1,2}$

$$R_{1,2} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1N} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2N} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ r_{N1} & r_{N2} & \dots & r_{NN} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$r_{ij} = r(I_1(\omega_{ij}), I_2(\omega_{ij})). \quad (3)$$

Так как $r_{ij} = r_{ji}$, а $r_{ii} = r_{jj} = 1$, то полученная матрица является симметричной и ее диагональ образует не несущие информации единичные коэффициенты корреляции.

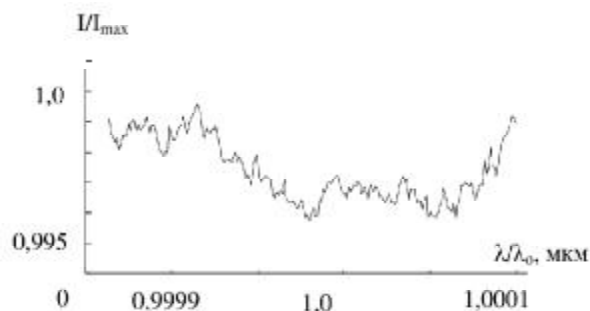
Среднее от строк (или столбцов) матрицы

$$\bar{r}_j = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N r_{ij} \quad (4)$$

дает средний коэффициент корреляции для всевозможных векторов с общим началом (концом).

Будем называть этот параметр \bar{r}_j корреляцией j -х векторов. Находим место провала из условия, что связь между спектрами наиболее сильна в тех участках спектров, где имеется провал. Задавая величину связи r_Φ в виде значения коэффициента корреляции, например, $r_\Phi = 0,5$ (r_Φ в этом случае играет роль коэффициента фильтрации), по индексам которого из (3) определяем значения ω_j , соответствующие провалу.

Максимальному будет соответствовать центр провала. Корреляция между участками спектров $I_1(\omega_i)$ и $I_2(\omega_i)$ вне провала тем ближе к нулю,


 Рис. 1. Исходная спектрограмма поглощения H_2O

чем больше число реализации спектров благодаря хаотичности пиков и провалов в спектре генерации, не обусловленных селективным поглощением атмосферы.

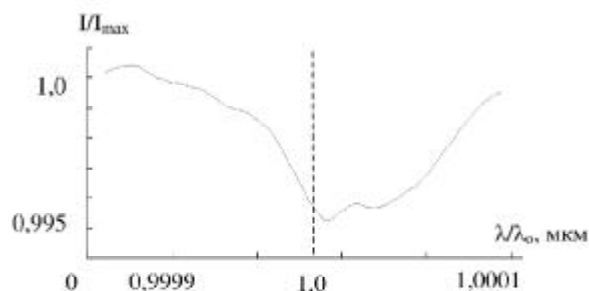
Имея m -реализаций спектров $I_m(\omega_i)$, вычисляем матрицы $R_{a,b}$ вида (2) для $\alpha = \overline{1, m}$, $\beta = \overline{1, m}$ и $a \neq b$. Далее вычисляем корреляцию j -х векторов для всех реализаций, как

$$R_j = \frac{1}{m} \sum_{\gamma=1}^m r_{i\gamma}, \quad (5)$$

где γ – индекс суммирования по реализациям.

Как уже отмечалось, в том случае, если всплески и провалы вне участка поглощения на спектре носят случайный характер и значения $I(\omega_i)$ в пределах дисперсии равновероятны, то в пределе при $m \rightarrow \infty$ $R_j = 0$ вне провала и $R_j \neq 0$ в пределах провала.

После того как границы провала определены и из участка спектра устранены те значения $I_m(\omega_i)$, для которых $\overline{r_j} < r_\phi$, производим усредне-


 Рис. 2. Восстановленный участок спектра поглощения H_2O

ние значений $I_m(\omega_i)$, принадлежащих провалу по числу реализаций m

$$\overline{I(\omega_j)} = \frac{1}{m} \sum_{\psi=1}^m r_{j\psi}. \quad (6)$$

Значения $\overline{I(\omega_j)}$, определенные из (6), дают нам отфильтрованный спектр провала. Недостающие значения, отброшенные в ходе фильтрации, восстанавливаем, производя интерполяцию известными методами.

Апробация предложенного метода показала, что при десятиразрядном АЦП уверенно (с точностью 10% от полуширины линии поглощения) определялось место провала с относительной глубиной около 0,5% при исходном отношении сигнал/шум, равном 20 и более пяти реализаций спектра.

На рисунке 1 показана одна из реализаций спектра. Значение γ_0 соответствует центру линии поглощения паров воды. На рисунке 2 представлен результат обработки пяти реализаций спектра в соответствии с изложенной методикой.