

榎本 真貴, 竹内 延夫  
Masaki Enomoto and Nobuo Takeuchi

千葉大学映像隔測研究センター

Remote Sensing and Image Research Center, Chiba University

abstract: For the use of a Fabry-Perot interferometer with a narrow transmission spectrum width, the free spectrum range becomes narrow and the neighboring transmission frequency bothers the measurement of an exact line profile. In this paper, we propose a new method to derive an exact absorption profile from an overlaid line profile.

## 1. はじめに

大気微量成分を高い精度で測定するためには、波長分解能の高いスペクトロメータが必要である。ファブリーペロー・エタロン干渉計のような多光束の干渉を利用した分光器は比較的容易に高い波長分解能を得ることができる。その分解能はエタロンの反射率と表面精度とにより決定されるが、異なる次数のスペクトルが共振し、重なって検出されるために、フリースペクトルレンジより狭い波長幅での分解能を得ることは困難であった。ここでは共振して検出されたスペクトルより単一スペクトルを分離し、元のスペクトルを推定する方法について、シミュレーションモデルを用いて検討する。

## 2. 装置の概要

本研究で想定する装置は、太陽を光源とし、大気を透過した光を地上で受け、その特定波長帯での透過率より大気成分を分析することを目的としたものである。この装置の概要をFig.1に示す。望遠鏡に入射した太陽光は、光ファイバーを通して分光器に送られ、波長範囲を限定され、air-gapエタロンを透過して、レンズで一次元CCD (Charge Coupled Device) 面上に集光される。

エタロンのair-gapの調整には圧電素子を用い、そのgapの校正用光源には波長可変半導体レーザー (LD) を用いる。LDの波長同調の制御は、測定すべき物質を入れた参照セルにレーザー光を周波数変調しながら透過させ、中心波長が最大吸収を示す波長となるようにレーザーの駆動電源にフィードバックすることによって行う。

## 3. スペクトルの分離法

エタロンに角度 $\chi$ で入射した光は、その内部で多数回反射し、同じ角度 $\chi$ で透過してくる。

まず、角度 $\chi$ を求める方法について考える。エタロンを出てレンズを通してCCD面上に集光されるまでの光路をFig.2に示す。エタロンから透過してくる干渉光は、角度 $\chi$ をもつ平行光線であり、レンズの焦点距離で一点に集光される。ここにCCDを置くと、各画素の位置に対し $\chi$ が一意に求められる。その対応式は、

$$\cos \chi = \frac{f}{\sqrt{f^2 + (kt)^2}} \quad (1)$$

と表すことができる。ここで、 $f$ はレンズの焦点距離を、 $k$ はCCDの画素チャンネルNo.を、 $t$ はCCD 1画素の幅を示している。また、エタロンの強度透過率 $T$ は、

$$T = \frac{I}{I_0} = \frac{1}{1 + F \sin^2 \left( \frac{\phi}{2} \right)} \quad (2)$$

$$F = \frac{4R}{(1-R)^2} \quad (3)$$

と表すことができる。ここで、 $R$ はエタロンの強度反射率を、 $\phi$ は光路差による位相差を示す。 $R$ は既知であることから、 $T$ は $\phi$ により一意に決定される。ここで、透過率が最大( $T=1$ )となるには、

$$\phi = 2m\pi \quad (m: \text{整数}) \quad (4)$$

が成立すればよい。これが満たされないとき、 $R$ が1.0に近いことから、 $F \gg 1$ より透過率は極めて低くなる。その結果として $\phi = 2m\pi$ の近傍以外の光はほとんど透過しない。

このとき、上の条件を満たす各々の透過光が干渉して強めあうためには、光路差が波長の整数倍でなくてはならない。光路差はFig.3より $\Delta L = 2nd \cos \chi$ で表されることから、その位相差 $\phi$ は、

$$\phi = 2\pi \tilde{\nu} 2nd \cos \chi \quad (5)$$

と表すことができる。ここで $\tilde{\nu}$ は波数( $\text{cm}^{-1}$ )、 $d$ はair-gapの間隔、 $n$ はair-gapの屈折率を示している。 $n, d$ は既知であり、 $\cos \chi$ はCCDの画素のチャンネル $k$ より一意的に求められることから、共振する波数間隔 $\Delta(\text{cm}^{-1})$ は次式で得られる。

$$\Delta = \frac{1}{2nd \cos \chi} \quad (6)$$

CCDの各画素からは、そのチャンネル $k$ の共振波数における透過率の総和が出力される。チャンネル毎に共振波数の間隔 $\Delta$ が異なることを利用して、各チャンネルでの共振波数における透過率を未知数とした連立方程式が立てられる。この演算は、次式のように行列演算の形で表すことができる。

$$\mathbf{T} = \mathbf{A} \mathbf{X} \quad (7)$$

ここで、 $\mathbf{T}$ はCCDの検出光度出力を表すベクトルで、

$$\mathbf{T}^t = | T_1 \ T_2 \ \dots \ T_k \ \dots \ T_v | \quad (8)$$

で表される。ここで $T_k$ はチャンネル $k$ でのCCDの出力を、 $v$ はCCDの画素数を示す。また $\mathbf{T}^t$ は、ベクトル $\mathbf{T}$ の転置を表している。 $\mathbf{X}$ は波数に対する透過率を表すベクトルで、

$$\mathbf{X}^t = | x_1 \ x_2 \ \dots \ x_i \ \dots \ x_u | \quad (9)$$

で表される。 $\mathbf{X}^t$ はベクトル $\mathbf{X}$ の転置を表している。 $x_i$ は各波数における透過率を示す。添字 $i$ は次式で定義される。

$$\tilde{\nu}(i) = \widetilde{\nu_{\min}} + i\Delta \tilde{\nu} \quad (i: 1, 2, \dots, u) \quad (10)$$

ここで、 $\tilde{\nu}(i)$ は推定するスペクトルの波数を、 $\widetilde{\nu_{\min}}$ は、分光器を透過する波長範囲の下端を示し、

$u$ は分光器の波長範囲内での $i$ の最大値である。 $\Delta\tilde{\nu}$ は推定したいスペクトルの最小幅、すなわち波長分解能を示す。この $\Delta\tilde{\nu}$ は任意に与えることができる。

(7)式の行列 $\mathbf{A}$ は、光源のスペクトル分布から得られる $u \times v$ の係数行列である。

以上より、(7)式の行列演算を解くことにより、波長分解能 $\Delta\tilde{\nu}$ で原信号スペクトル $\mathbf{X}$ が得られるのである。

以上の理論に基づき、透過率のモデルデータを用いて高分解スペクトロメーターのシミュレーションを行った。透過率のモデルとしては大気中の水蒸気を想定し、大気圧下では透過率の関数形として一般的なLorentzianモデル $T(\tilde{\nu})$ を用いた。それを次式に示す。

$$T(\tilde{\nu}) = \exp(-\tau(\tilde{\nu})) \quad (11)$$

$$\tau(\tilde{\nu}) = \frac{1}{\pi\Delta\tilde{\nu}_c} \frac{\tau_0}{1 + \left(\frac{\tilde{\nu} - \tilde{\nu}_c}{\Delta\tilde{\nu}_c}\right)^2} \quad (12)$$

ここで $\tilde{\nu}_c$ は最大吸収波長を示し、 $\Delta\tilde{\nu}_c$ は吸収の半値幅を示す。 $\tau_0$ は吸収係数であり、

$$\tau_0 = \sum_i n_i \sigma_i l_i \quad (13)$$

で表される。ここで $i$ は大気層を示し、各層について $n_i$ は濃度を、 $\sigma_i$ は中心での吸収断面積を、 $l_i$ は光路長を示している。

今回のシミュレーションに用いた透過光 $T(\tilde{\nu})$ のスペクトルのモデルの概形と、幾つかのチャンネル $k$ における共振波数をFig.4に示す。

実際に演算を行ったところ、行列 $\mathbf{A}$ にはかなりの列の従属列が存在するため、CCDの画素数が少ないとき、 $u > v$ となって解が得られないことがある。その対策としては、

- ・ 充分画素の多いCCDを用いること
- ・ 分光器の透過波長範囲を狭め、高分解能においても $u$ が大きくなるようにすること

の2点に留意する必要がある。これらの条件を満たすようにシステムを設計することにより、本システムは高分解スペクトロメーターとして利用可能となると考えられる。

#### 4. まとめ

本稿では、行列演算を用いて共振したスペクトルを分離して、高い波長分解能を得るスペクトロメーターのシステムを提案し、その基本的概念について、大気圧下での水蒸気の透過率のモデルを用いてシミュレーションを行い、有用性について検討した。このシステムについては、ノイズに対する本システムの有効性の検討、SN比の検討、および実際の装置に適用する際の問題点についての検討などが残されており、今後の課題である。

#### 5. 参考文献

吉原邦夫, 「物理光学」, 共立出版 (1966)

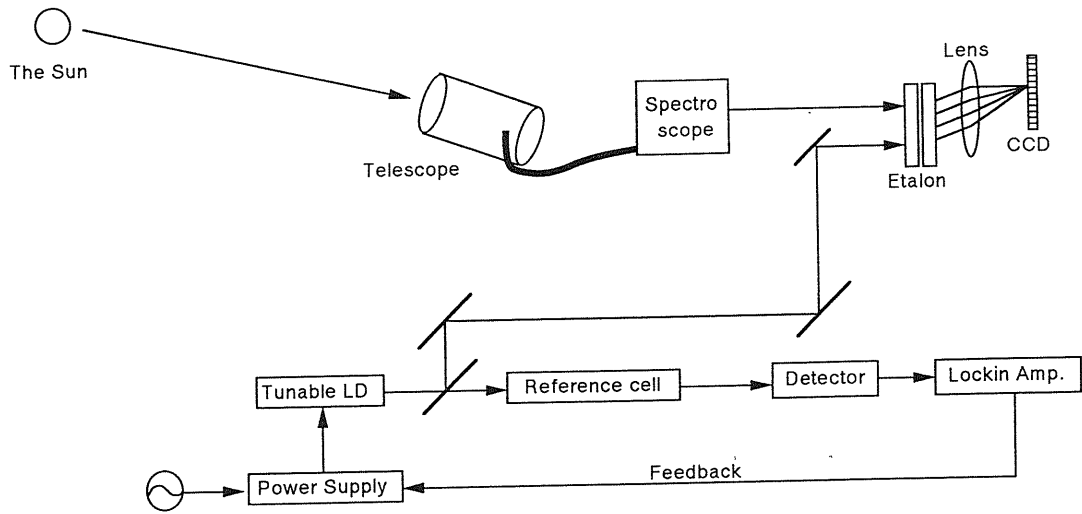


Fig.1 Schematic diagram of a system for simulation.

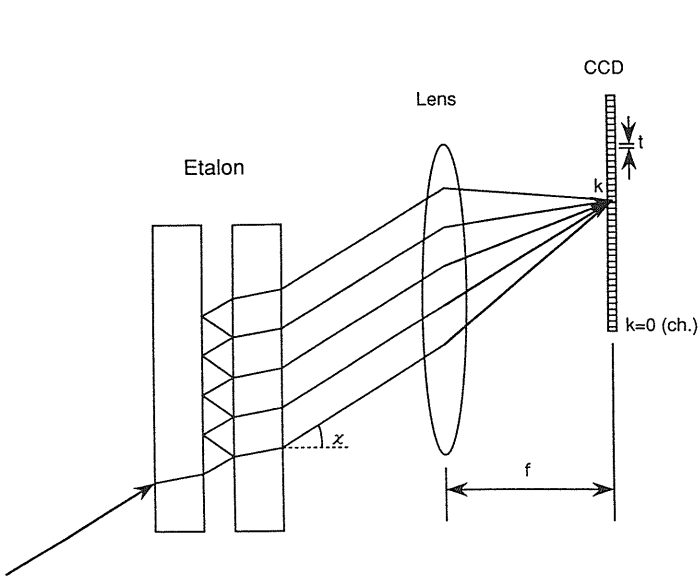


Fig.2 Optical path between etalon and CCD.

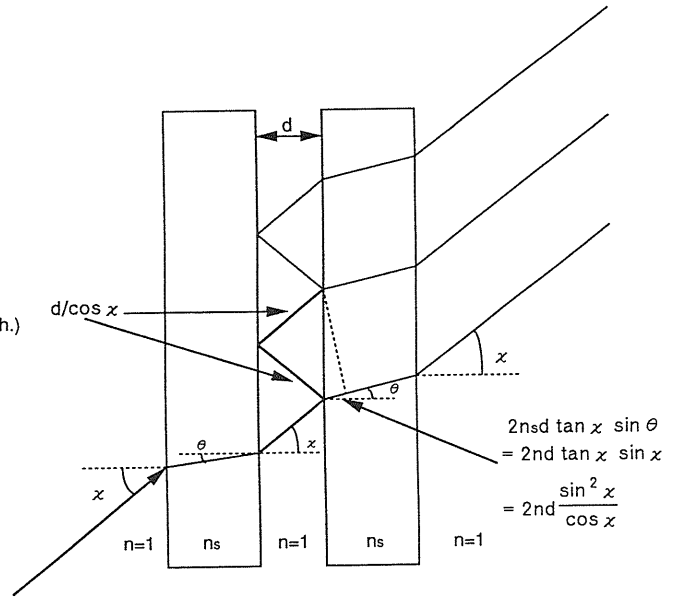


Fig.3 Optical path difference at the inside of an etalon.

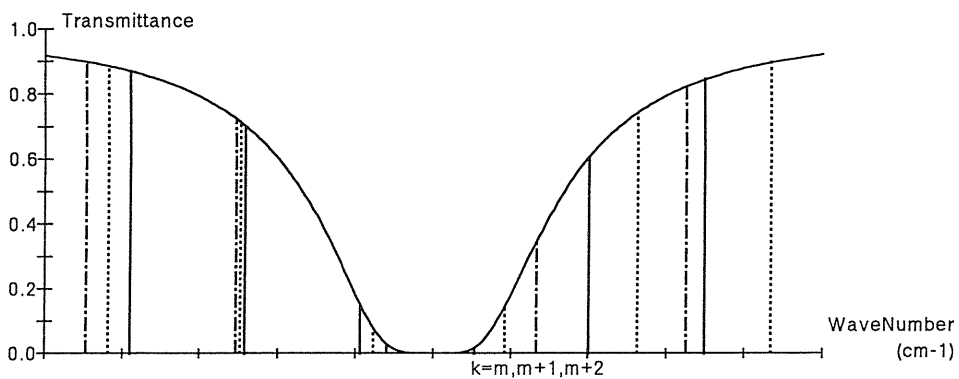


Fig.4 Artificial spectral model used in simulation.