

空間変調プリズム干渉計

Spatially Modulated Prism Interferometer

Francis Reininger of Caltech for NASA's Jet Propulsion Laboratory

NASA ジェット推進研究所、パサディナ、米国カリフォルニア州

2001年11月12日から16日にかけて米国ハワイ島で開催された Japan-U.S. Science, Technology & Space Applications Program (JUSTSAP)において、ジェット推進研究所の Eddie Hsu 博士が行った講演で紹介された Francis Reininger 氏の研究です。NASA Tech Briefs Magazine から許可を受けて翻訳いたしました。www.nasatech.com も参照ください。

非常に広いスペクトル帯域にわたって高効率であり、小型で機械的にも安定で、スペクトルラジオメトリックとしての純度にも優れている空間変調プリズム干渉計について報告します。

はじめに

空間変調プリズム干渉計 (SMPI) は、従来の干渉計が持つ複雑さを回避し、回折グレーティング、分散プリズム、スペクトル選択フィルターの持つ限界を克服するために開発された。この干渉計の応用分野として、大気サウンディング、地質マッピング、鉱物学、海洋学、汚染モニタリング、毒物ガスの検出、医療分光学的イメージング、工業検査がある。

SMPI の原理

図1に示す三つ組みのプリズムが SMPI の重要な要素である。入力ビームは2つの互いにコヒーレントな出力ビームに分割され、主ビームの方は光学軸に平行に進む。図2に示すフーリエ光学システムでは、2つのビームを分割し、それらを傾斜させ、ひとみ平面で再び合成させる。傾いた波面によって、空間的に変調がかかった干渉パターンが生成されて、検出アレーで干渉縞として記録される。フーリエ光学システムが歪像を形成するようになっていれば、線状の画像が干渉縞に垂直な方向に形成される。設計した干渉計は25度のイメージ視野を持っている。

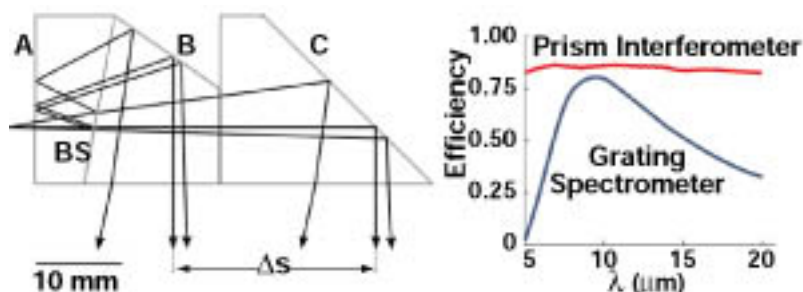


図1 ビーム共用型三つ組みプリズム

このプリズムはビーム間で同じ光学的伝搬長を維持するために単一結晶でできている。これにより、この空間変調型プリズム干渉計は、従来の干渉計に比べて2倍の効率を持ち、グレーティングスペクトロメーターに比べて広帯域特性をもつ。

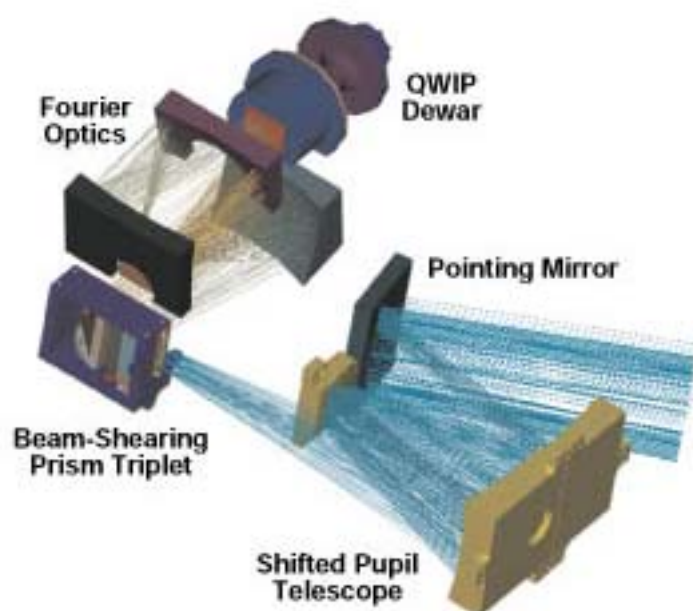


図2 空間変調型プリズム干渉計の構成

この空間変調型プリズム干渉計は 1.2 cm^{-1} の空間分解能もつ。シフトされた瞳テレスコープにより空間分解能は2倍になり、フーリエ光学計のトロイダル・ミラーにより空間分解能は最大になる。

SMPI の利点

SMPI は、ひとみ面に瞬時的な干渉縞を形成するために、次のような特徴をもつ。

視野の拡大

入力スリットの幅を任意に広げることにより、スペクトル分解能に影響を与えずに信号強度を増加できる。これは、スペクトル分解能と信号強度がトレードオフの関係にあるグレーティングスペクトロメーターやプリズムスペクトロメーターと比べて、非常に優れている点である。イメージプレーン干渉計にも同様の欠点がある。これは変調効率がスリット幅とフリンジ周波数に比例して低下するため、この現象は自己アポダイゼーション (self-apodization) と呼ばれている。

広帯域効率

図1に示すように、SMPI の効率は波長に依らずほぼ一定である。一方、グレーティング・スペクトロメーターの効率はブレイズ波長においてのみ高く、それ以外の波長では急激に減少する。SMPI はマイケルソン、サニヤック、ウォラストンプリズム干渉計と比べて2倍の効率をもつ。これは入力光を、半分ではなく、すべて利用できるからである。

迷光によってスペクトルの誤差が発生しない

SMPI 内で発生する迷光によって、ノイズフロアーが増加するが、かならずしもスペクトル信号の誤差にはならない。フィルター、プリズム、グレーティングスペクトロメーターでは、迷光がスペクトル信号と区別できなくなるため、大きなラジオメトリック上の誤差を引き起こす。グレーティングス

ペクトロメーターでは、これが傷のついたミラーと同じような動作をするため、特に問題になる。これは装置の製作が完全であっても、入力された白色光が溝の端で散乱されてスペクトルに影響を与えるためである。

放射分析の純度

検出器アレーをひとみ面に設置する場合には、視野内の様々な物体からの放射はアレー上のピクセルに一様に分布するようになる。ひとみ面干渉計では、アレーのピクセル上に、スペクトルのすべての色（波長）が一様に分布するという利点ももつ。これは装置の較正を容易にし、放射分析の誤差を小さくする。この誤差は、高い放射輝度の物がピクセル間のデッド領域にないと、イメージ面スペクトロメータやフィルターではかならず起こる誤差である。さらにピクセルの有効領域内で感度が異なると、イメージ面スペクトロメータでは放射分析に誤差を与える。これが、高いスペクトル放射分析精度が必要な科学アプリケーションでは、この種のスペクトロメータが使用されない理由である。

ラインシェープ機能

ひとみ面においては回折効果が発生しないため、SMPI はどのような色や視野領域に対してもシングルラインシェープを持つように設計できる。これにより、従来の方法に比べて、較正やスペクトル検出をかなり簡易にすることができる。従来の方法では、線スペクトルの形状が、波長に依存した回折で広がり、収差に依存したポイントスプレッド効果で変化してしまう。

瞬時的インターフォログラム

全体のインターフォログラムが検出器アレーで瞬間的に記録できるため、記録によって起こる誤差を除去することができる。観測台や光学コンポーネントの移動が必要なスキャンング・インターフェロメータやフィルターでは、観測台が完全にまっすぐ移動しなかったり、スキャン中にシーンが変化すると、修復できないスペクトルのエラーが発生する。

機械的な安定性

マイケルソン干渉計とは異なり、SMPI は機械的なショック、焦点面のジッター、ミスアライメントの影響は比較的受けにくい。これは可動部分を持っていないためと、2つのビームに分割して検出器アレー上に集光しているためである。コリメーションの特性によって焦点面の軸位置の誤差が緩和される。例えば、 5 cm^{-1} 分解能の場合、 1 mm の軸移動ではスペクトル線幅は0.5%以下の変化しか起らない。しかもスペクトル線の位置は変わらない。典型的な軸位置の誤差許容値は $10\text{ }\mu\text{m}$ で、能動冷却器の軸変動の振幅は $1\text{ }\mu\text{m}$ であるので、振動によるスペクトル誤差を考慮することなしに、検出器アレーを直接低温部に取り付けることができる。冷却能力に対する要求を大幅に緩和でき、熱機械的に焦点面のマウントを簡易にできる。

光学的な特徴

SMPI は小型で高いスペクトル分解能と高い効率を得られるための、いくつかの重要な光学的な設計上の性質を有している。望遠鏡は、主要光を検出器アレーの中央ではなく周縁部を照射するように、シフトしたひとみを使用するように設計されている。このシフトにより、パス差がゼロになるポイントはアレーの片側へ移動する。これにより、ひとみの幅を2倍にすることなしに、光学的に最大

のパス差とスペクトル分解能を効果的に2倍にすることができる。

ビーム分割プリズムは、プリズム A にコーティングされたビーム分割部 (beam splitter, BS) が入力ビームに対して10度以下の傾きを持つように設計されている。これで、プリズム A とプリズム B との間の空気ギャップで内部反射が起ることを防ぎ、ギャップを満たすためのオイルや接着剤がいらなくなる。接着剤は熱赤外で大きな吸収を持つため、これを必要としないことは望ましい。

プリズムは、2つの光ビームが同じ光学的なパス長を維持するように構成されなければならない。それらの主要光は互いに平行で、出力平面には垂直に送出されなければならない。入口と出口の表面が主要光に垂直であれば、非点収差と分散はなくなる。非点収差はインターフェロメーターのスペクトル分解能を劣化させ、分散は波長の関数としてのラインシェープを変化させる。

プリズムは、体積を最小にしてビーム分割を最大になるように設計される。ビーム間の距離 ΔS はスペクトル分解能に比例する。60mmの焦点距離をもつフーリエレンズを使った親指大のビーム分割プリズムでは、 1 cm^{-1} のスペクトル分解能をもつ。これと等価なサニヤックインターフェロメーターと比較して、体積で40分の1に匹敵する。同様に 0.5 cm^{-1} 分解能のプリズムインターフェロメーターは、大気赤外サウンダ (Atmospheric InfraRed Sounder, AIRS) の NE ΔT を2倍改善し、体積は25分の1に軽減する。なお AIRS はひとみ面グレーティングスペクトロメータである。

SMPI で高分解能が得られるのは、最近のガイウムヒ素ベースの量子井戸赤外フォトコンダクター QWIP (Quantum Well Infrared Photoconductor) 検出アレーの進歩によるところが大きい。SMPI は、運用性に優れ、感度が均一なピクセルで構成される大きなアレーを必要とする。ジェット推進研究所では、このような特性をもつ QWIP アレーを開発した。(Tech Briefs, Vol. 24, No. 5, pp. 26a-30a 参照)。QWIP アレーは低い $1/f$ 雑音特性を持っているため、安定した検出アレーや干渉計のキャリブレーションが可能である。

この仕事はカルテックの Francis Reininger が行ったものである。さらに詳しい情報は www.nasatech.com のフリーオンラインにアクセスして得ることができる。

Technology Reporting Office

JPL

Mail Stop 249-103

4800 Oak Grove Drive

Pasadena, CA 91109

(818) 354-2240

Refer to NPO-20647