

パルスレーザスペクトル計測のための 光ヘテロダイン手法のシミュレーション

川原 琢也¹, 西村 美紀¹, 小林 允隆¹, 江尻 省²

¹信州大学工学部 (〒380-8553 長野県長野市若里 4-17-1)

²国立極地研究所 (〒190-8518 東京都立川市緑町 10-3)

Simulation of the optical heterodyne interferometry for pulse laser spectrum measurements

Takuya KAWAHARA¹, Miki NISHIMURA¹, Yoshitaka KOBAYASHI¹, and Mitsumu EJIRI²

¹Shinshu Univ., 4-17-1 Wakasato, Nagano, Nagano 380-8553

²National Institute of Polar Research., 10-3 Midoricho, Tachikawa, Tokyo 190-8518

Abstract: An optical heterodyne interferometry was applied to the simulation of a pulsed laser spectrum measurement. Assuming the pulse spectrum (FWHM ~50 MHz) to be a set of line-shape spectrums, a pulse laser spectrum is reproduced in the radio frequency range. This ultra-high-resolution technique is used for the correction of wind velocity offset that measured wintertime lidar observations of the MLT region (upper mesosphere and lower thermosphere) at Tromsø (69.6°N, 19.2°E), Norway. Although vertical wind is expected be 0 m/s, observed nightly mean winds have large offset around ~12 m/s. One possible reason we haven't included in the data analysis program is the asymmetry of the pulsed laser spectrum. In this presentation, we verified this method for the Na lidar measurement.

Key Words: Laser, sodium lidar, optical heterodyne method, pulse spectrum measurement

1. 概要

ナトリウム (Na) ライダーは、中間圏・下部熱圏領域 (高度 80~115km) に存在する Na 原子層に向けて波長 589nm のパルスレーザーを射出し、Na 層からの共鳴散乱光を時系列で受信、解析することにより Na 密度、大気温度、風速の高度分布を高分解能で測定するシステムである。信州大学/名古屋大学/理化学研究所では、Nd:YAG レーザで構成される精密波長制御の Na ライダーをノルウェーのトロムソに設置し、2010 年から継続的に冬期観測を行っている¹⁾⁻²⁾。

中間圏界面の大気は温度成層しているため、主に水平風が卓越しており鉛直方向の風速は時間平均すると 0 m/s になる。しかし Na ライダーで観測された 1 日平均の鉛直風速は、例えば 2012 年の場合、12m/s の大きな値が観測されている。風速は Na 層全高度において 0 m/s から一定の値だけずれており (これを以下、風速オフセットと呼ぶ)、かつ、観測シーズン中ほぼ一定の値をとり、観測シーズンの変わり目で値が切り替わることから (Figure 1)、ハードウェア側の要因がオフセットの原因となっている可能性が極めて高い。しかし、射出レーザー周波数の同調精度は~1MHz で、インジェクションシーディングによりパルスレーザーのピーク周波数が決まるので、従来の解析手法では風速オフセットが生じる要因はない。仮に、実際の射出レーザー周波数が絶対周波数と異なっているとすると、その値は 12m/s で 20MHz となり、これは現状の実験精度からあり得ない。一方、レーザーの周波数スペクトルは解析プログラムに組み込まれておらず、その影響は未検証のままとなっている。レーザーは超狭帯域 (周波数幅が数 10MHz 以下、波長換算で幅

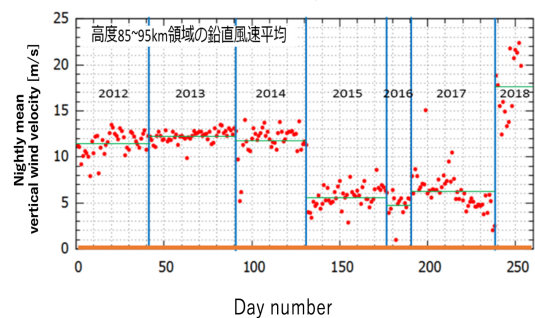


Figure 1. Nightly mean vertical wind velocity in each observation season.

0.1pm 以下) であるため、既存の分光計ではスペクトルの分光計測は極めて難しい。そこで本研究では、光ヘテロダイン干渉法を用いてスペクトル計測を行う手法について、計測原理に基づき様々な条件のもとで実験シミュレーションを行った。この結果をもとに、実際の計測に応用していく。

2. 光ヘテロダイン干渉法

従来の分光技術では、半値幅が数 10GHz (波長で数 10pm) 程度のレーザパルス (周波数 THz 帯) のスペクトルを計測できるほど高分解能の分光計は存在しない。光ヘテロダイン干渉法は、基準光と信号光とのうなり成分をとり、周波数帯域を落として信号光の特性を検出する手法である。周波数が未知の信号光 (単一周波数 ν_s) に対し、周波数が既知の基準光 (単一周波数 ν_r) を合成させると、合成光の強度変動の周波数 ν は、 $\nu = |\nu_r - \nu_s|$ となる。589 nm のパルスレーザに対し数 100MHz 離れた適当な基準光との合成光の振動数 ν を MHz 帯域で計測できれば、光の帯域の ν_s を求めることが可能である。これが光ヘテロダイン干渉法である。実際は、パルスレーザは単一周波数ではなく半値幅が数 10MHz の連続スペクトルである。そこで本シミュレーションではスペクトルを離散化し、単一周波数のラインスペクトルの集合として計算を行なった。

3. シミュレーション

初期条件として、離散化したパルススペクトルの周波数と強度、離散化したデータ点数、基準光の強度とパルススペクトルピークとの周波数差、を与えた。次に信号光を含むすべてのラインスペクトルの合成光を生成した。これが実際の実験での合成光を模擬している。この光強度の総和 (ビート信号) の時間変動に対し、高速フーリエ変換 (FFT) を用いて周波数解析を行い、ラインスペクトルの周波数と強度の再現性の検証を行なった。FFT の結果をグラフ化すると、横軸は合成光を構成した 2つのラインスペクトルの周波数差、縦軸はそれらから得られる相対強度となる。

原点に近い [周波数, 強度] の分布は、パルススペクトル内の周波数が近いラインスペクトル同士の合成の結果が反映された。一方、基準光とパルススペクトルの合成を FFT した結果は、初期条件で与えた周波数差だけ原点から正の方向にずれてスペクトルが再現された。離散化パルススペクトルのスペクトル幅とスペクトル同士の相対強度は初期条件に等しく、初期条件で与えた形状がガウス関数でも非対称でも再現されていることが確認できた。Figure 2 はその一例で、半値幅 15MHz のパルススペクトルを 1MHz 間隔のラインスペクトルの集合とし、50MHz 離れた参照光とのビート信号から元の信号成分を抽出した結果を示す。参照光との周波数差の分だけずれたところに、全体として 15MHz の半値幅の周波数成分が再現されている。

これらの結果から、本研究では、光ヘテロダイン干渉法を用いたシミュレーションに基づき狭帯域レーザパルススペクトル計測の実現性を評価し、実際に計測を行う上での最適条件を明らかにすることができた。

4. ライダー観測への応用

これをライダーシステムで検証するには、インジェクションシーディングに用いるシーダーから生成する cw の 589 nm と、パルスレーザの 589 nm を用いる。原理的にパルス 589 のピーク周波数は cw589 と一致しているの
で、cw589 nm の一部を、音響光学素子を用いて 50MHz ずらし、それをパルスと合成し、合成光を FFT 解析する手法が可能である。本手法で非対称スペクトルを計測し、鉛直風オフセットの検証を行っていく

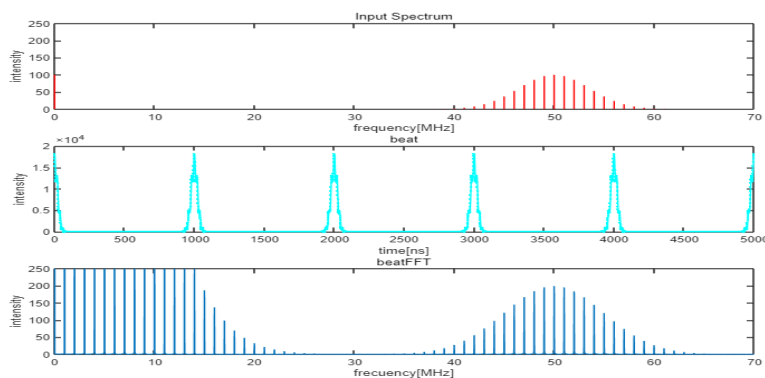


Figure 2. Example of a simulation result of the optical heterodyne interferometry, assuming a pulse laser (FWHM 15MHz) and a reference laser, which is 50 MHz away from the pulse peak.

参考文献

- 1) S. Nozawa, T. D. Kawahara, N. Saito, C. M. Hall, T. T. Tsuda, T. Kawabata, S. Wada, A. Brekke, T. Takahashi, H. Fujiwara, Y. Ogawa, and R. Fujii: *J. Geophys. Res.*, **119**(1) (2014) 441.
- 2) T. D. Kawahara, S. Nozawa, N. Saito, T. Kawabata, T. T. Tsuda, and S. Wada: *Optics Express*, **25**(2017)A491.