

1.5 μm 風計測コヒーレントライダにける風速検出精度

Relation between velocity estimation accuracy and signal to noise ratio
on 1.5 micron wind sensing coherent lidar

亀山 俊平、安藤 俊行、平野 嘉仁

Shumpei Kameyama, Toshiyuki Ando, and Yoshihito Hirano

三菱電機(株) 情報技術総合研究所

Mitsubishi Electric Corporation Information Technology R&D Center

Abstract

In the signal processor of 1.5 micron wind sensing coherent lidars, which we have developed recently, FFT based algorithm have been used. In the system design, it is important to know the relation between wind velocity estimation accuracy and SNR. In this paper, we study on basic performance of FFT processor and obtain the relation between the accuracy and SNR for typical cases for 1.5 micron with Monte-Carlo simulation. The required SNR to realize the required estimation accuracy or detection probability is shown for each turbulence and resolution condition.

1. まえがき

近年我々が開発している波長 1.5 μm 風計測コヒーレントライダ^{1, 2}では、FFT (Fast Fourier Transform) とインコヒーレント積算を用いた信号処理により風速検出を行っている。したがってシステム設計では、この処理方式における風速検出精度とSNR (Signal to Noise intensity Ratio)との関係を把握しておくことが重要である。検出精度とSNRとの関係については従来から数多く検討されているが³⁻¹²、それらはスペクトル幅および信号強度に関する先見情報を利用した最尤推定に関するものであるか³⁻⁷、処理方式がFFTとは異なるか^{8, 9}、もしくは波長 1.5 μmの場合について検討していないか¹⁰⁻¹²、のいずれかであった。したがって、我々が必要としている上記関係を直接的に知ることができなかった。ここでは、波長 1.5 μmの風計測コヒーレントライダにおけるtypicalなケースについて、風速検出精度、検出確率、およびwideband SNRとの関係をモンテカルロシミュレーションにより求めた。また、所要精度、所要検出確率を実現するための所要SNRについて風速場の乱流条件、距離分解能毎にまとめたので報告する。

2. モンテカルロシミュレーションにおける信号および雑音モデル

信号モデルには定常ガウス過程を想定し、空間中の各微小レンジからの信号がランダム位相で重畳されるものとした。時間ゲート信号は次式(1)により計算した。

$$S(m, n, i) = SNR_w \cdot \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \left\{ A(\tau, n, i) \sin \left[\frac{4\pi v(\tau, i) m - 1}{\lambda} T_s + \phi(\tau, n, i) \right] \right. \\ \left. \times \exp \left(-\frac{2 \ln 2}{\Delta t} \frac{(m - M/2 + \tau)^2}{M^2} T_s M \right) \right\} + N_{oise}(m, n, i) \quad (1)$$

ここで SNR_w はwideband SNR、 m は時間ゲート内のサンプル番号、 M は時間ゲート内の全サンプル数であり距離分解能に相当する。 n は積算番号、 i はモンテカルロシミュレーションにおける繰り返し番号である。は微小大気レンジのレンジ番号、 Δt は送信パルスの半値全幅(s)、 T_s はサンプリング周期(s)、 λ はレーザ光波長(m)である。 N_{oise} は受信機で生じる白色ガウス雑音の振幅、 $A(\tau, n, i)$ は各微小レンジからの信号の最大振幅であり、各々規格化電力1を持つ。また $A(\tau, n, i)$ は定常ガウス過程の確率密度を有しており、これはある任意のターゲット面内に存在する各エアロゾルからの信号間の足し合わせがインコヒーレントであることを意味している。 $\phi(\tau, n, i)$ はドップラー周波数キャリアの初期位相であり、均一ランダム過程としている。これは各微小レンジからの信号の足し合わせがインコヒーレントであることを意味して

いる。これら2つのインコヒーレントな足し合わせにより、スペックル効果が模擬される。 $v(\tau, i)$ は各微小レンジにおける風速(m/s)であり、乱流条件に応じた標準偏差 Δv のランダムガウス過程を有している。この信号モデルは、時間ゲート内におけるSNRが一定と看做している点を除き、文献[3]に示されたものと同じである。

シミュレーションではまず、レーザ光波長、サンプリング周波数、距離分解能、風速検出範囲、中心風速、風速幅、パルス幅、wideband SNR、積算数、風速検出における許容誤差、および計算繰り返し数といったパラメータを設定する。次に式(1)および想定したランダム過程とから、時間ゲート信号を計算機上で発生させる。この信号に所定の0パッドを施した後、ペリオドグラムをFFTにより求め、インコヒーレント積算を行う。積算後のペリオドグラムに対し雑音フロア除去を行った後、ピーク検出と重心演算により風速検出を行う。重心演算の演算範囲は、雑音フロア除去後のペリオドグラムピーク周辺において正の強度を持つ範囲とした。本論文における風速検出では、風速検出範囲以外の先見情報はないものとしている。中心風速(真値)に対する誤差を検出し、許容誤差と比較する。このシミュレーションを多数回繰り返し行い、誤差の標準偏差と許容誤差以内での検出確率とを統計的に求める。

3. シミュレーション条件

シミュレーション条件を Table. 1 に示す。表に示した値は風計測コヒーレントライダにおける typical な条件である。各距離分解能における3つの乱流条件 (light, moderate, severe)は文献[13]に示されたものであり、Kolmogorov 乱流に相当する。この乱流では、速度幅は次式(2)により与えられる。

$$\sigma_{turb} = \sqrt{\frac{9}{40} C_v \varepsilon^{1/3} L^{1/3}}, \quad (2)$$

ここで C_v はKolmogorov定数 ($\cong 2$)、 ε はエネルギー消散係数 (m^2s^{-3})、 L は距離分解能 (m) である。各々の乱流条件に相当するエネルギー消散係数は、 $0.014 (m^2s^{-3})$ 、 $0.035 (m^2s^{-3})$ 、および $0.322 (m^2s^{-3})$ である。サンプリング周波数は風速検出範囲により決まるパラメータである。FFTポイントは0パッドにより一定 (=256)とする。0パッドによりペリオドグラムの周波数軸上において新たな周波数ビンが生成される。これにより、中心周波数がペリオドグラムにおける周波数ビン上からパイアスする場合において、検出精度を改善する効果を有する。

ここでは、積算数は100回で一定とした。積算数 N に関しては、 N (積算数)が10以上の領域においてSNRが $N^{1/2}$ 倍に改善されると近似できる。ここでは信号・雑音はともにランダムガウス過程を有しているため、積算後のペリオドグラムの各周波数ビン強度のPDF (Probability Distribution Function)は自由度 $2N$ の自乗分布を持つが、この分布は積算数が大きくなるにつれて標準偏差 $N^{1/2}$ の正規分布に漸近する。したがってこの領域では、ペリオドグラムにおける信号および雑音強度のPDFは、 $SNR \times N^{1/2}$ の値によって決まる。

Table 1 Simulation condition

Parameter	Value
Laser wavelength (μm)	1.55
Velocity search range (m/s)	-20 ~ 20
Error threshold (m/s)	1
Range resolution (m)	25, 50, 75, 100, 150
Pulse FWHM/ Range resolution	0.1 ~ 1
Turbulence condition	Light, Moderate, Severe
Accumulation number	100
Sampling frequency (MHz)	200
FFT points	256 (with zero padding)
Iteration number	1000

4. 風速検出精度・検出確率・SNRの関係に関する計算結果

風速検出精度、検出確率、およびwideband SNRとの関係を3. に示した条件をもとにシミュレーションした。各距離分解能の場合における結果をFig. 1に示す。規格化パルス幅を $R (= \Delta t / (MT_S))$ とし、この値を1として固定している。高分解能であるFig. 1(a)の場合では、3つの乱流条件における結果間の差異が小さい。これはパルス幅が短く、ペリオドグラムの幅において風速幅の寄与が小さいことを意味している。距離分解能が大きくなるにつれて、乱流条件間の差異が顕著になるが、この領域では逆に距離分解能間の差異が小さくなる (Figs. 1(c),(d) and (e))。これは距離分解能が大きくなるとペリオドグラムにおけるパルス幅の影響が小さくなることに因っている。検出精度 1m/sおよび検出確率 90%以上を実現するための所要SNRをTable 2にまとめて示す。風速検出値のPDFが正規分布であれば、検出精度 1m/sは検出確率 68%に相当するが、これは距離分解能が高いFig. 1(a)の場合が当てはまる。しかし距離分解能が大きい場合においては、精度に関する条件は検出確率 90%の条件よりも厳しくなっている。これは風速検出値のPDFがランダムな誤検出を含んでおり、この誤検出の成分が検出誤差の標準偏差をより大きくする方向に寄与するためである。検出精度の所要SNRに関するパルス幅の影響をFig. 2に示す。縦軸の許容SNRは $R=1$ における値で規格化している。この図から、パルス幅の影響は、ペリオドグラムの幅においてパルス幅の寄与が大きくなる、 R が小さい場合と乱流が小さい場合において顕著であることが分かる。

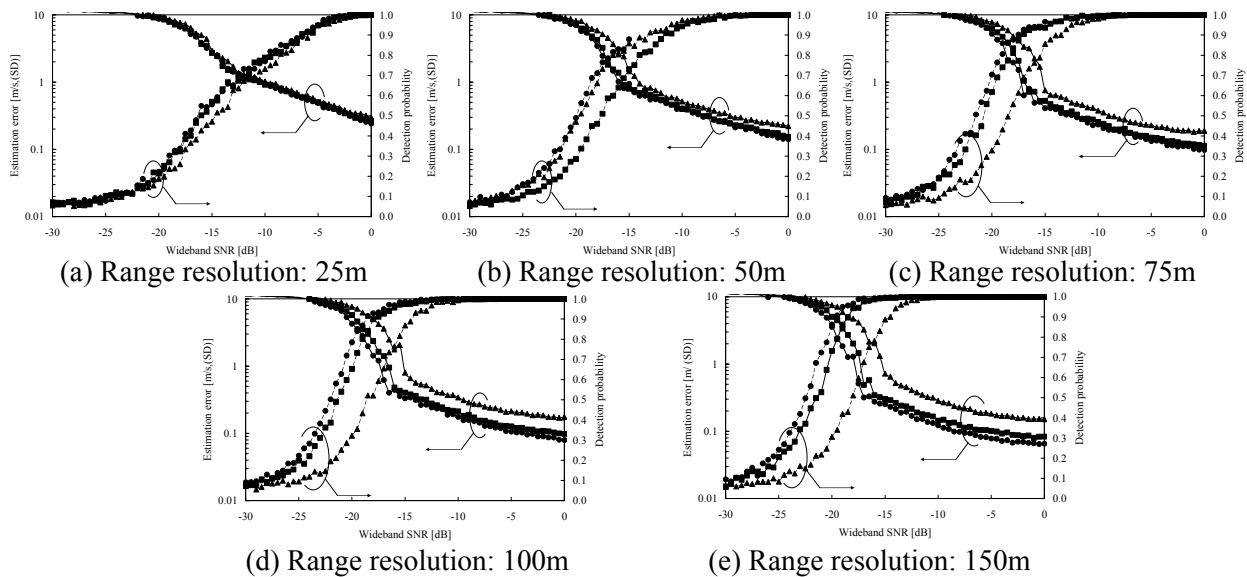
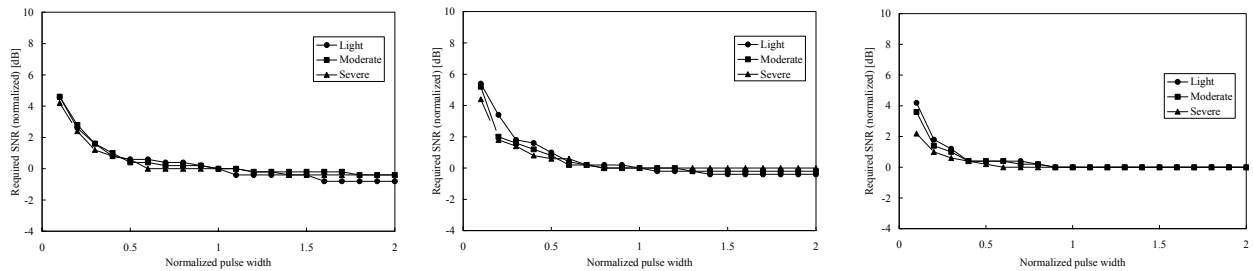


Fig. 1 Wideband SNR versus velocity estimation accuracy (solid lines) and detection probability (dotted lines) for $R=1$. Turbulence condition of light (\bullet), moderate (\blacksquare), and severe (\blacktriangle).

Table 2. Required wideband SNR (dB) to obtain accuracy of $< 1\text{m/s}$ (left side value), and detection probability of $> 90\%$ (right side value).

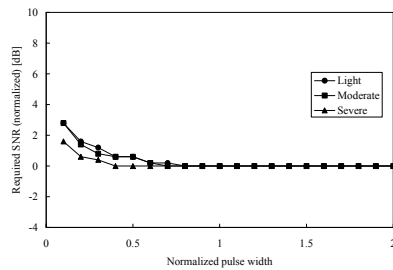
Range resolution [m]	Turbulence condition		
	Light	Moderate	Severe
25	-10.0, -6.5	-10.0, -6.5	-9.5, -6.0
50	-15.5, -13.0	-15.5, -13.0	-14.0, -11.5
75	-17.5, -17.5	-16.5, -17.0	-15.0, -13.5
100	-17.0, -18.5	-16.5, -17.5	-15.0, -14.0
150	-17.5, -19.5	-17.0, -18.0	-15.0, -14.5



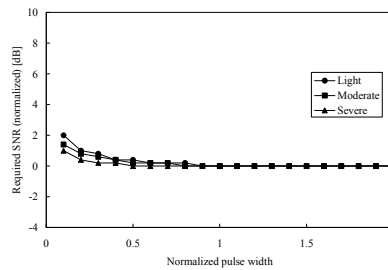
(a) Range resolution: 25m

(b) Range resolution: 50m

(c) Range resolution: 75m



(c) Range resolution: 100m



(d) Range resolution: 150m

Fig. 2 Relation between required SNR and pulse width for turbulence conditions of light (●), moderate (■), and severe (▲).

5. まとめ

波長 $1.5 \mu\text{m}$ 風計測コヒーレントライダの信号処理に FFT を用いたときの風速検出精度、検出確率、および wideband SNR の関係についてモンテカルロシミュレーションにより求め、検出精度 1m/s 、検出確率 90% を得るための所要 SNR を、距離分解能、パルス幅、乱流条件毎にまとめた。これらの結果を参照してシステム設計における所要 SNR を決めることが可能である。なお、本論文の検討では、風速検出範囲以外の先見情報を利用していない。したがって、特にペリオドグラムの幅が近似的に既知である短パルス送信の場合においては、マッチドフィルタの概念をさらに導入することにより SNR の等価的な改善を実現できる可能性が残されている。

参考文献

- [1] S. kameyama et al., Proceedings of coherent laser radar conference, 43-46, 2003.
- [2] Y. Hirano et al., Proceedings of coherent laser radar conference, 31-34, 2003.
- [3] R. Frehlich, J. Atmos. Ocean. Tech., 11, 1217-1230, 1994.
- [4] R. Frehlich, J. Atmos. Ocean. Tech., 14, 54-75, 1994.
- [5] R. Frehlich, Appl. Opt., 15, 3491-3499, 1997.
- [6] B. J. Rye and R. M. Hardesty, Journal of Modern Optics, 41, 2131-2144, 1994.
- [7] A. Dabas, J. Atmos. Ocean. Tech., 16, 19-28, 1999.
- [8] J. L. Zaradar et al., J. Atmos. Ocean. Tech., 13, 16-28, 1996.
- [9] J. L. Zaradar et al., IEEE Geosci. Remote Sens., 37, 2678-2691, 1999.
- [10] B. J. Rye and R. M. Hardesty, IEEE Geosci. Remote Sens., 31, 16-27, 1993.
- [11] B. J. Rye and R. M. Hardesty, IEEE Geosci. Remote Sens., 31, 28-35, 1993.
- [12] R. Frehlich, J. Atmos. Ocean. Tech., 11, 1517-1528, 1994.
- [13] J. A. Thompson et al., AD report AD-A257 725, p. 5, 1992.