

航空機搭載 CAT センサ用 1.5 μm 帯コヒーレントライダに関するシステム検討

Study on 1.5 micron coherent lidar for airborne CAT sensor

水間 将支、亀山 俊平、安藤 俊行、浅香 公雄、平野 嘉仁、田中 久理*、井之口 浜木*

Masashi Mizuma, Shumpei Kameyama, Toshiyuki Ando, Kimio Asaka, Yoshihito Hirano,
Hisamichi Tanaka, and Hamaki Inokuchi*

三菱電機(株)、(独)宇宙航空研究開発機構*

Mitsubishi Electric Corporation, Japan Aerospace Exploration Agency*

Abstract

Feasibility study on 1.5 micron coherent lidar system for airborne CAT (Clear Air Turbulence) sensor is introduced. Atmospheric conditions including backscatter coefficient and turbulence condition are studied. Performance on wind velocity estimation is predicted using Monte-Carlo computer simulation and required SNR (Signal to Noise Ratio) is obtained. Required system parameters are estimated using coherent lidar equation.

1. まえがき

我々はこれまでに、波長 1.5 μm 帯全光ファイバ型風計測コヒーレントライダを開発している¹⁻²。このライダは、小型・高信頼かつ配置自由度の高いシステムを構成しやすく、航空機巡航高度にてCAT (Clear Air Turbulence: 晴天乱気流) の検出を行う、航空機搭載CATセンサへの応用に適している。ここでは、上記センサ用 1.5 μm 帯コヒーレントライダのシステム検討結果について報告する。

2. 計測仕様

本検討の前提となる計測仕様を表 1 に示す。航空機巡航高度である上空 10km において、計測距離 9.3km(5n.m.)先の風速をリアルタイムに安定して計測できることを念頭に置き設定した。

Table 1. Target specification of CAT sensor.

| Parameter | Value |
|-----------------------|-----------------|
| Altitude | 10km |
| Measurable range | 9.3km (5n.m.) |
| Range resolution | 150m |
| Velocity search range | -30m/s ~ +30m/s |
| Velocity precision | < 2m/s |
| Detection probability | 80%, 90%, 95% |
| Data refresh rate | 1Hz |

3. 上空における大気条件

コヒーレントライダのシステム検討では、前提となる上空での大気条件の設定が重要である。コヒーレントライダの風計測性能に影響を及ぼす大気パラメータは、大気透過率、大気構造定数、後方散乱係数、および乱流状態の 4 つである。この内最初の 2 つについては上空での影響は無視できるため、ここでは後方散乱係数および乱流状態の 2 つについてのみ検討を行う。

Table 2. Backscattered coefficient at altitude of 10km.

| Measured or Model | Area | Season | Value (/m/sr) |
|-------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| Measured | South Atlantic | Summer | 3.3×10^{-9} |
| | | Winter | 2.8×10^{-9} |
| | North Atlantic | Summer | 8.8×10^{-9} |
| | Middle Atlantic | Spring-Summer | 3.4×10^{-9} |
| | | Winter | 1.1×10^{-8} |
| | Northeast Atlantic | Summer | 6.6×10^{-9} |
| | | - | 4.0×10^{-9} |
| | Over Pacific ocean | - | 4.0×10^{-9} |
| | North Pacific | - | 1.1×10^{-9} |
| | South Pacific | - | 1.4×10^{-9} |
| North America | - | 1.1×10^{-9} | |
| | - | 2.6×10^{-9} | |
| Model | - | - | 1.4×10^{-8} |

3-1. 後方散乱係数

上空における後方散乱係数については、1 μm 、2 μm 、および 10 μm の各波長帯において、実測に基づいたデータベースが報告されているが(文献[3]等)、1.5 μm 帯については殆ど報告がない。したがってここでは、他波長の後方散乱係数を 1.5 μm での値に変換する計算式を用いて、この波長帯でのデータベースを作成した。上空 10km における地域および季節ごとの上記変換後の平均値を表 2 にまとめて示す。参考のため、Ruralエアロゾルのモデル値を表に合わせて示す。表中、モデル値が最大となっており、実測値については、 $10^{-9}/\text{m/sr}$ のオーダーにおいてばらついている。さらに後方散乱係数は、同地域でも日時により一桁以上ばらつくため、以降の検討では、 $10^{-10}/\text{m/sr} \sim 10^{-8}/\text{m/sr}$ の範囲について考える。

3 - 2 . 乱流状態

乱流状態に相当する大気パラメータは、EDR (Eddy Dissipation Rate : エネルギー消散係数)である。ICAO (International Civil Aviation Organization)では、ANNEX 3 Standardsにおいて3つの乱流状態 (Light, Moderate, Severe) に相当するエネルギー消散係数を定義している。また、各乱流状態の出現頻度についても、航空機のオンボードセンサでの実測結果に基づいて報告している⁴。乱流状態とEDR、および出現頻度に関しまとめたものを表3に示す。Light, Moderate, Severeの乱流状態に相当する、EDRとして、0.24(m²/3/s), 0.32(m²/3/s), 0.70(m²/3/s)の3値を想定して検討する。

Table 3. Turbulence condition, EDR, and Probability of observation.

| Turbulence condition | EDR (m ² /3/s) | Probability (%) |
|----------------------|---------------------------|-----------------|
| None | 0.0 ~ 0.1 | 98.3665 |
| Light | 0.1 ~ 0.2 | 1.4732 |
| | 0.2 ~ 0.3 | 0.1312 |
| Moderate | 0.3 ~ 0.4 | 0.0200 |
| | 0.4 ~ 0.5 | 0.0051 |
| Severe | 0.5 ~ 0.6 | 0.0018 |
| | 0.6 ~ 0.7 | 0.0007 |
| | 0.7 ~ 0.8 | 0.0015 |

4 . 受信 SNR と風速計測性能に関する検討

コヒーレントライダの信号処理性能に関し、信号および雑音を計算機上で乱数発生させ、実際に即した信号処理を行うモンテカルロシミュレーション⁵を行い、受信SNR (Signal to Noise Ratio)と風速計測性能との関係を求めた。風速場に関しては上記3つの乱流状態に相当するKolmogorov乱流場をさらに乱数発生させてシミュレータに入力し、各乱流状態において、積算回数 1000 で信号検出確率 80% ~ 95%を実現するための所要受信SNRを求めた。結果を表4に示す。表の値はWideband SNRであり、デジタル信号1サンプル当たりのSNRである。

Table 4. Required wideband SNR (unit: dB).

| Condition \ Prob. | Light | Moderate | Severe |
|-------------------|-------|----------|--------|
| 80% | -26.5 | -25.5 | -22.5 |
| 90% | -25.5 | -24.5 | -21.0 |
| 95% | -24.5 | -24.0 | -19.0 |

5 . 所要パルスエネルギーに関する検討

表4に示した所要SNRを満足するためのシステムパラメータについて検討し、さらに回線計算式⁶を用いて送信パルスの所要エネルギーを求めた。受信開口径は航空機への搭載を考慮して 15cmとし、トータルのシステム効率-4.3dBとした。後方散乱係数と所要パルスエネルギーとの関係に関する計算結果を図1に示す。図は乱流条件Lightの場合に対応しているが、条件が厳しくなる場合については、表4に示した所要SNRの比だけパルスエネルギーに対する所要値を上げればよい。表2に示した後方散乱係数実測値を平均化し、さらに 1/2 を乗じた値 (2 × 10⁻⁹/m/sr) を想定すると、検出確率 80%に対応するパルスエネルギーは 3.5mJである。

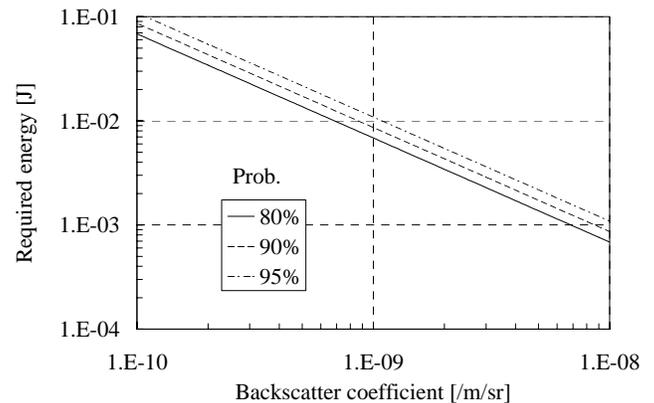


Fig. 1. Backscatter coefficient versus required energy.

6 . まとめ

航空機搭載CATセンサ用 1.5 μm帯コヒーレントライダのシステム検討結果について報告した。上空 10kmにおいて、計測距離 9.3km先の風速をリアルタイムに安定して計測できることを念頭に置き、特に上空での後方散乱係数および乱流状態といった大気条件を設定した後、この条件において所要性能を満足するためのシステムパラメータを求めた。受信開口径 15cm、後方散乱係数 2 × 10⁻⁹/m/sr、検出確率 80%の条件における送信パルスエネルギー・繰り返しは、3.5mJ・1kHzである。

参考文献

- [1] S. Kameyama et al., Appl. Opt., 46, 1953, 2007.
- [2] T. Ando et al., Proceedings of coherent laser radar conference, 50, 2007.
- [3] J. M. Vaughan et al., J. Geophysical Research, 100, 1043, 1995.
- [4] Meeting of the Communication/Navigation/Surveillance and Meteorology Sub-Group of Apanprig, IP/20, 2006.
- [5] S. Kameyama et al., Proceedings of Coherent Laser Radar Conference, 187, 2005.
- [6] S. Kameyama et al., Proceedings of Coherent Laser Radar Conference, 174, 2005.