

Nearest Gaussian 近似を用いた準解析的コヒーレントライダ回線計算式

Modified coherent laser radar equation using nearest Gaussian approximation

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

Generally used Coherent Laser Radar equation does not include the effect of beam truncation at a telescope. So, there are a few decibels difference in range dependence of SNR between experimental and calculated, and in general, numerical calculation for beam propagation has been needed to consider the effect of beam truncation. For analytical expression of CLR equation, NGA (Nearest Gaussian Approximation) is an interesting concept. Here, we combine the concept of numerical Fresnel integration and NGA, and introduce a modified CLR equation. The accuracy of the equation is confirmed by both simulation and experiment. Furthermore, we study on the optimum beam truncation depending on atmospheric refractive index structure constant which have not considered in past literatures.

1. まえがき

一般的に用いられているコヒーレントライダ回線計算式(文献[1])は、解析的で扱いやすい反面、送受光学系におけるガウシアンビームのけられを考慮していないので、SNR (Signal to Noise Ratio)に関する実験結果と計算結果との間に数 dB の差異が存在していた。ビームけられの影響については従来から検討されてきたが、この影響を考慮するためには NFI (Numerical Fresnel Integration)をはじめとした数値計算が必要であり、解析的表現を行うには、何らかの近似を用いることが必要であった。この目的に適した近似としては、送信ビームと最大の相関性を持つ理想的なガウシアンビームにより送信場を近似する、NGA (Nearest Gaussian Approximation、文献[2])が考えられる。ここでは、NFI と NGA の概念を従来式に導入した新しい回線計算式を提案する。NFI により求めた Far-field システム効率と、NGA により求めたビーム径の補正係数とを用いることで、解析的式を得ることが可能となる。式の精度について実験結果と計算結果との比較により検証し、さらに従来報告されていなかった大気構造定数に依存した最適ビームけられ率についても検討したので合わせて報告する。

2. Far-field システム効率

大気構造定数 (C_n^2) を無視できる場合、けられの影響を考慮した Far-field システム効率は NFI を用いて求めることが可能であり、次式 (1) により与えられる (文献[3])。

$$\eta_F = 2048\alpha^2\zeta^{-4} \int_0^\infty \frac{\rho}{D} d\left(\frac{\rho}{D}\right)^{1/2} \int_0^{\rho} r dr \exp[-4\zeta^{-2}r^2] J_0\left(\frac{\alpha\rho r}{D}\right)^4, \quad (1)$$

ここで r は光学系開口面における中心からの距離(m)、 ρ はターゲット面におけるビーム中心からの距離(m)、 D は光学系有効開口径(m)、 ζ はビームけられ率($=D_b/D$, $D_b: 1/e^2$ ガウシアン送信ビーム径(m))である。また、 $\alpha = kD^2/L$ であり、 k は波数($=2\pi/\lambda$, λ : レーザ光波長(m)), L はターゲット距離(m)である。 $\alpha \ll 1$ の条件における Far-field システム効率は、開口径、波長、far-field 距離といったパラメータには依存せず、けられ率にのみ依存する。

3 . Nearest Gaussian 近似

NGAにおいては、けられが存在する実際の送信ビームを、このビームと最大の相関性を持つ理想的なガウシアンビームにより近似的に表す。Nearest Gaussian ビーム径は、開口面において次式 (2) に示す相互相関関数を最大にするガウシアンビーム径として決められる。

$$X(D_b, D, D'_b) = \left| \int_0^{D/2} E(D_b, \mathbf{r}) \cdot E_N^*(D'_b, \mathbf{r}) d\mathbf{r} \right|^2, \quad (2)$$

ここで D_b' はnearest Gaussian ビーム径である。また、 $E(D_b, \mathbf{r})$ と $E_N(D_b', \mathbf{r})$ は送信ビームとnearest Gaussian ビームの電界であり次式 (3) および (4) により与えられる。

$$E(D_b, \mathbf{r}) = \begin{cases} \left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2} \frac{1}{D_b} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{D_b^2} + \frac{jk r^2}{2F}\right), & \text{if } r \leq D/2 \\ = 0, & \text{if } r > D/2 \end{cases} \quad (3)$$

$$E_N(D'_b, \mathbf{r}) = \left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2} \frac{1}{D'_b} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{D_b'^2} + \frac{jk r^2}{2F}\right), \quad (4)$$

ここで、 F は送信ビームおよび nearest Gaussian ビームの焦点距離である。文献[2]に示されているように、開口面において求めた nearest Gaussian ビームは、損失のない空間伝播においては距離 L に関係なく実際の送信場と最大の相関を持つガウシアンビームとなる。

4 . けられの影響を考慮した回線計算式

ここでは、NFI と NGA の概念を従来の回線計算式に導入し、けられの影響を考慮した新しい回線計算式を示す。この式は、ソフトターゲットの場合において次式 (5) により与えられる。

$$SNR(L) = \frac{\eta_D(L) \lambda E \beta K^{2L/1000} \pi D^2}{8hBL^2}, \quad (5)$$

ここで、 h はプランク定数(Js), E は送信パルスエネルギー (J), B は受信帯域幅(Hz), β は大気後方散乱係数 (/m/sr), K は大気透過率(/km)である。ハードターゲットの場合は、式 (5) 中 $\lambda \beta \pi / 2$ に $R / (\nu \tau)$ (R : ターゲット反射率, ν : 光周波数 (Hz), τ : パルス幅(s)) を代入する。また、 $\eta_D(L)$ はシステム効率であり、次式 (6) で与えられる。

$$\eta_D(L) = \frac{\eta_F}{\left\{ 1 + \left(1 - \frac{L}{F}\right)^2 \left[\frac{\pi(A_C D)^2}{4\lambda L} \right]^2 + \left(\frac{A_C D}{2S_0(L)} \right)^2 \right\}}, \quad (6)$$

ここで、 A_C はNGAにより求めた補正係数であり、nearest Gaussianビーム径は $A_C D$ で表される。 $S_0(L)$ は横方向コヒーレント長(m)であり、ビーム伝搬経路における C_n^2 ($m^{-2/3}$) が均一である場合、近似的に $S_0(L) = (1.1k^2 L C_n^2)^{-3/5}$ で与えられる。

式 (6) において $\eta_F = [1 - \exp(-2\zeta^{-2})]^2$ 、 $A_C = 1$ とし、 D に D_b を代入すると従来式となる。従来式では送信ビーム径を用いてシステム効率の距離依存性を表しているのに対し、式 (6) ではnearest Gaussianビーム径を用いて表している。ビームけられに関する効率である η_F 以外の効率 (例えば光学部品の透過率) に関しては、本論文の検討における結論に影響を及ぼさないで、ここでは無視している。Far-field ($L = F$)

では、 $C_n^2=0$ (i. e. $S_0(L)=\infty$)の場合において式(6)の値はNFIにより求めた η_F と同一となるので、この式により正確なシステム効率が得られる。また、同じ場合において、実際の送信ビームが伝搬過程において受ける影響は、nearest Gaussianビームが受ける影響と近似的に同じと考えられるので、システム効率の距離依存性はnearest Gaussianビーム径 $A_C D$ を用いて表すことができる。同じ理由により、 C_n^2 が無視できない場合においても、nearest Gaussianビーム径は式(6)分母中第3項に適用できる。各けられ率に対応するfar-fieldシステム効率 η_F と補正係数 A_C とを求めた結果をFig. 1に示す。

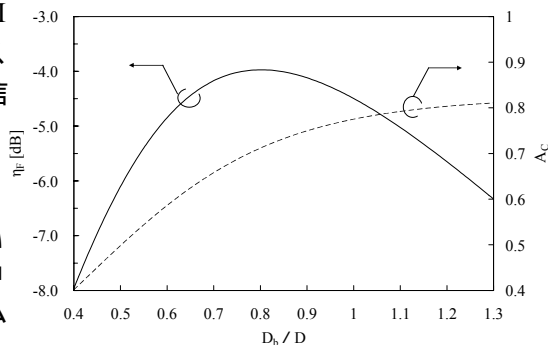


Fig. 1 Far field system efficiency and correction factor.

5. 計算式の精度検証

A. 数値計算による計算結果との比較

式(6)計算式を用いてSNRの距離依存性($=\eta_D(L)/L^2$)を計算し、NFIを用いて求めた結果と比較した。この計算では、 C_n^2 は無視しており、NFIでは正確なSNRが得られる条件となっている。 $F=\infty$ とし、けられ率を0.6、0.8、1.0、および1.2とした場合の結果について比較した結果をFig. 2に示す。横軸の距離については $(\pi D^2)/(4\lambda)$ で規格化して示している。この図から、near-fieldとfar-fieldの両方において、けられ率に関係なく両者は良く一致していることが分かる。

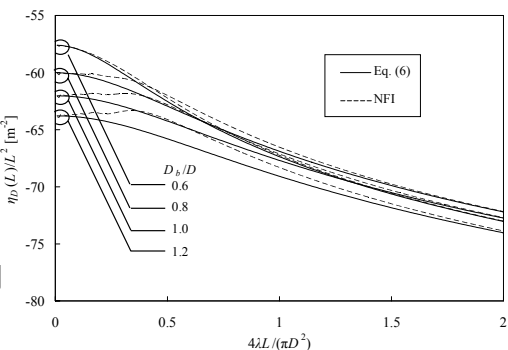


Fig. 2 Comparison of SNR obtained using Eq. (6) with NFI solution.

B. ハードターゲットを用いた実験結果との比較

次に、ハードターゲットを用いた実験結果との比較により計算式の精度検証を行う。実験では、反射率1の完全拡散体であるスペクトラロンを距離120mの位置に配置した。このターゲットからのエコー信号を波長1.5μmの全光ファイバ型コヒーレントライダ(文献[4])により計測した。ヘテロダイン検波後の信号をA/D変換し、エコー信号のスペクトルをFFT(Fast Fourier Transform)により計算した。SNRをこのスペクトルから計算し、4000回のパルス送信について平均した。送受光学系の焦点距離を変えることでSNRの距離依存性を等価的に計測した。送信ビーム径、けられ率は0.1m、1とした。このけられ率におけるfar-fieldシステム効率 η_F は-4.5dBである。送信パルスエネルギーは3.2μJ、パルス幅は0.3μsである。

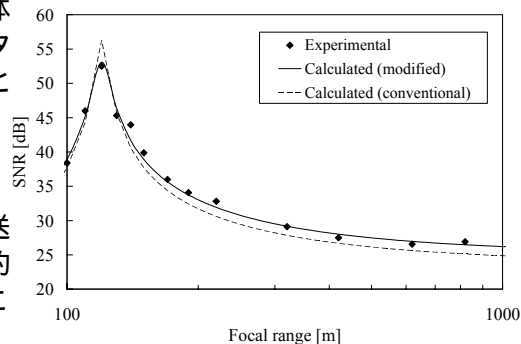


Fig. 3 Comparison of calculated SNR with experimental results.

受信帯域幅は2MHzである。この実験において、 $\eta_D(L)$ 以外のシステム効率は-11.0dBであり、これにはパルス波形に依存するフィルタ効率等が含まれている。本実験ではターゲット距離が短いので、大気透過率および C_n^2 の影響は無視した。実験結果と計算結果との比較をFig. 3に示す。従来式により求めた計算結果を図中破線により合わせて示す。図から、実験結果と本論文の式により求めた結果とがnear-field、fari-fieldの両方において1.0dB以下の差で一致していること、および従来式に対して一致度が改善されていることが分かる。

6. 最適けられ率に関する検討

文献[3]では、far-fieldシステム効率を最大にする最適けられ率に関する検討がされており、 C_n^2 が無視できる場合における最適けられ率が0.8であることが示されている (Fig. 1 参照)。しかし C_n^2 が無視できない場合は、ビームを大きくすることによるSNRの改善に制限が生じるので、最適けられ率は C_n^2 に依存して上記0.8より小さくなることが考えられる。式(6)において $L = F$ としたときのfar-fieldシステム効率と、けられ率との関係を、いくつかの $S_0(L)/D$ 、つまり C_n^2 の場合について求めた結果をFig. 4に示す。また、最適けられ率と、 $S_0(L)/D$ との関係をFig. 5に示す。図では、距離と波長で規格化した C_n^2 を合わせて示している。この図から、 C_n^2 が大きくなるにしたがって、最適けられ率が小さくなっていることが分かる。

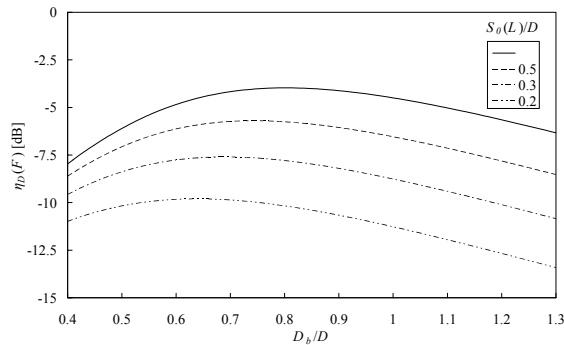


Fig. 4 Far-field system efficiency for some values of $S_0(L)$.

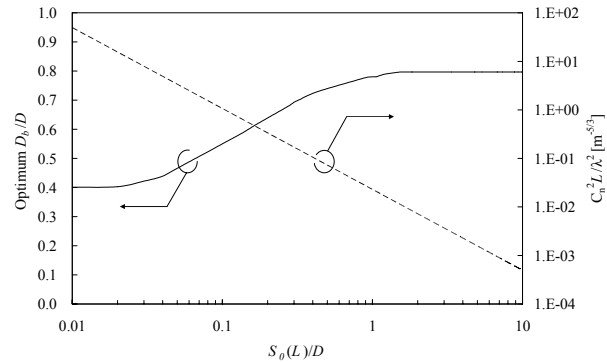


Fig. 5 Optimum truncation ratio considering the influence of C_n^2 .

7. まとめ

従来の回線計算式にNFIおよびNGAの概念を導入し、ビームけられ率に応じた補正係数を用いることにより、けられの影響を考慮できる解析的なコヒーレントライダ回線計算式を示した。本計算式により求めたSNRの距離依存性とNFIにより求めた値とを比較した結果、両者はnear-fieldおよびfar-fieldの両方において良く一致した。さらにハードターゲットを用いた実験を行い、SNR距離依存性の実験値と計算値とを比較したところ、両者が良く一致することを確認した。さらにfar-fieldにおいてSNRを最大にするための最適けられ率に関する検討を行った結果 C_n^2 が大きくなるにしたがって最適けられ率が小さくなることを見出した。本論文で示した回線計算式は、数値計算によって求めた係数を含んでいるものの、解析的表現を保持しており、コヒーレントライダの迅速なシステム設計に役立つものと考えられる。

参考文献

- [1] R. Frehlich and M. J. Kavaya, Appl. Opt., 30, 4325-5352, 1991.
- [2] P. Salamiou et al., J. Mod. Opt., 41, 2101-2113, 1994.
- [3] J. Y. Wang, Appl. Opt., 27, 4470-4474, 1988.
- [4] S. Kameyama et al., Proc. 12th Coherent Laser Radar Conference, 43-46, 2003.