

10. ヘテロダイン方式におけるビーム整合の検討

Study of Beam Matching Technique in an Optical Heterodyne Detection.

村沢 健吾, 前田 和雄, 橘 篤志

K. Murasawa K. Maeda A. Tachibana

日立製作所・戸塚工場

Hitachi Ltd., Totsuka Works.

1. まえがき ヘテロダイン検出方式においては、信号光と局発光の波面を正確に揃えて検出器に照射すべきであると言われているが、レーザ・レーダに適用する場合は目標物の漂動や伝搬路である大気の屈折率のゆらぎに応じて信号光の入射条件が変動するので、必ずしも理想的な整合がとれているとは言い難い。本文では信号光と局発光の波面の整合およびビーム入射角度の変動に伴う損失を解析したので報告する。

2. 波面整合

信号光と局発光が図1のように角度 θ だけ傾いて入射するとき、

信号光を、 $\dot{E}_s = E_s \cos \omega_s t$ (1)

局発光を、 $\dot{E}_L = E_L \cos(\omega_L t - \beta x)$ (2)

$$\beta = \frac{2\pi \sin \theta}{\lambda_L} \quad (3)$$

λ_L : 局発光の波長

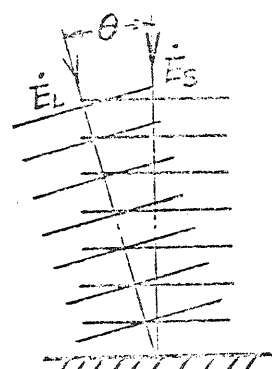


図1. 波面整合

とおくと、 $\theta = 0^\circ$ におけるヘテロダイン出力と、

任意角 θ におけるそれとの比 ε_θ は式(4)で与えられる。

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{\sin(2\pi\sigma_s \sin\theta/\lambda_L)}{2\pi\sigma_s \sin\theta/\lambda_L} \quad (4)$$

3. 光束の重なり量の影響

レンズ系への入射角が変化すると図2のように、焦点面におけるビームの重なり量が変化する。

電界の空間分布を次の様におく。

$$\text{信号光: } E_s(x,y) = \frac{E_s}{\sigma_s} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \exp\left[-\frac{x^2+y^2}{\sigma_s^2}\right] \quad (5)$$

$$\text{局発光: } E_L(x,y) = \frac{E_L}{\sigma_L} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \exp\left[-\frac{(x-a)^2+y^2}{\sigma_L^2}\right] \quad (6) \quad \text{図2. 光束の重なり}$$

但し、 σ_s , σ_L は信号光、局発光のビーム半径。

a は信号光と局発光の中心の移動量。

ヘテロダイン出力 Γ_{HET} は、検出器の応答係数を α とおくと、

$$\begin{aligned} \Gamma_{\text{HET}} &= \alpha \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_s(x,y) \cdot E_L(x,y) dx dy \\ &= \alpha E_s \cdot E_L \cdot \frac{2(\sigma_L/\sigma_s)}{1+(\sigma_L/\sigma_s)^2} \cdot \exp\left[-\frac{(a/\sigma_s)^2}{1+(\sigma_L/\sigma_s)^2}\right] \end{aligned} \quad (7)$$

最良の条件即ち、 $\sigma_s = \sigma_L$, $a=0$ における式(7)との比を ε_a とおくと、

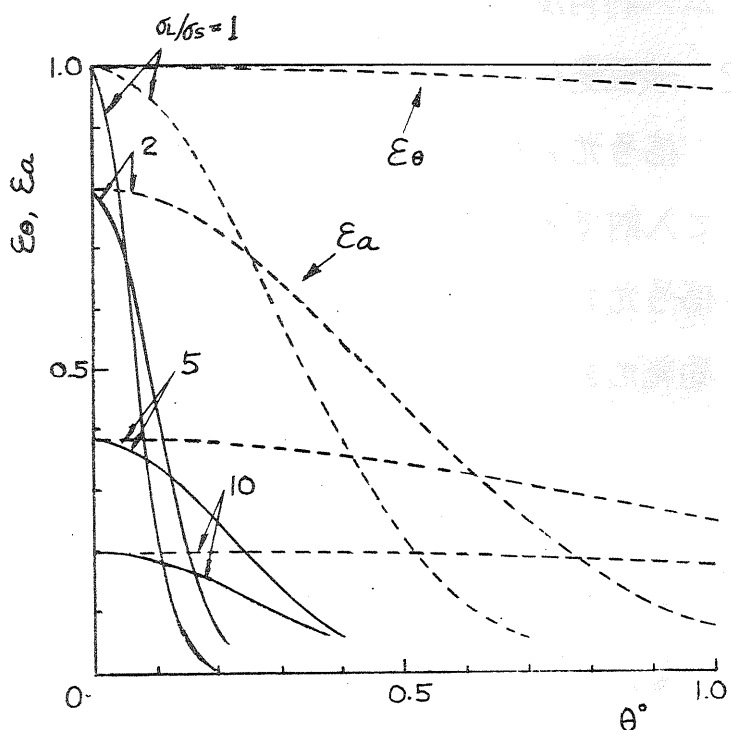
$$\varepsilon_a = \frac{2(\sigma_L/\sigma_s)}{1+(\sigma_L/\sigma_s)^2} \cdot \exp\left[-\frac{(a/\sigma_s)^2}{1+(\sigma_L/\sigma_s)^2}\right] \quad (8)$$

但し、 $a = f \cdot \theta$ (f はレンズの焦点距離)。

図3は式(4)と式(8)を表したものである。尚レンズの焦点距離は $f=1\text{ cm}$ とした。
図より次の点が判明する。

$f[\text{cm}]$	$\lambda_L[\text{cm}]$	$\sigma_s[\text{cm}]$
1	10.6×10^{-4}	— 10×10^{-4}
		- - - 50×10^{-4}

図3. ヘテロダイン出力の角度依存性



- ①. 波面の傾きの影響 ε_θ はビーム重なるの影響 ε_α に比べて無視できるほど小さい.
- ②. ビーム径の比 σ_L/σ_S を大きくするとヘテロダイン出力は減ずるが、角度許容範囲が増える.

4. S/N に対する影響.

局発光のビーム径を信号光のそれより大きくすると、入射角度に対する許容範囲は増すが、2つの光束の重ならない部分は直流成分を発生し、これに伴う雑音を誘起するので S/N の劣化が予想される。雑音の主成分をショット雑音に依るものと考え、雑音の自乗平均値 $\langle \gamma_n^2 \rangle$ は、

$$\begin{aligned}\langle \gamma_n^2 \rangle &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e B \alpha [P_S(x, y) + P_L(x, y)] dx dy \\ &= e B \alpha \sqrt{\pi} (P_S \sigma_S + P_L \sigma_L)\end{aligned}\quad (9)$$

但し、 B は帯域幅、 e は電荷、 P_S, P_L は信号光、局発光の電力.

一方ヘテロダイン出力信号の自乗平均値 $\langle \gamma_{IF}^2 \rangle$ は、

$$\begin{aligned}\langle \gamma_{IF}^2 \rangle &= \frac{1}{2} \alpha^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P_S(x, y) \cdot P_L(x, y) dx dy \\ &= \alpha^2 P_S P_L \cdot \frac{\sigma_L/\sigma_S}{1 + (\sigma_L/\sigma_S)^2} \cdot \exp\left[-\frac{2(f\theta/\sigma_S)^2}{1 + (\sigma_L/\sigma_S)^2}\right]\end{aligned}\quad (10)$$

また、ヘテロダインの S/N は、 $(S/N)_{HET} = \langle \gamma_{IF}^2 \rangle / \langle \gamma_n^2 \rangle$ (11)

で与えられる。ヘテロダイン検出における最適条件 ($\sigma_S = \sigma_L, \alpha = 0$) における $(S/N)_{HETO}$ との比を δ とすると、

$$\delta \equiv \frac{(S/N)_{HET}}{(S/N)_{HETO}} = \frac{2}{1 + (\sigma_L/\sigma_S)^2} \cdot \exp\left[-\frac{2(f\theta/\sigma_S)^2}{1 + (\sigma_L/\sigma_S)^2}\right]\quad (12)$$

図4は、式(14)の振舞いを示すものである。尚、レンズの焦点距離は $f = 1 \text{ cm}$ 縦軸 δ は dB 表示とした。図より、次の点が判明する。

- ①. ビーム径の比 σ_L/σ_S を大にするほど S/N は劣化する。
- ②. 角度 θ を大にするほど S/N は劣化する。

いずれも S/N が改善される要素はないが、入射角度 θ に対する S/N の劣化の割合は σ_L/σ_S を大にするほど緩和される。

5. むすび

以上の解析により、ヘテロダイン検出においては光束の入射条件の変動が波面整合を悪くすることによる損失よりも、信号光と局発光の重なり量が減ることによる損失が非常に大きいことが判明した。また、信号光および局発光の径を広げることにより多少のS/Nの劣化を犠牲にしても実用上問題となるビームの照射条件の許容範囲を広げることが可能であることが明白となった。

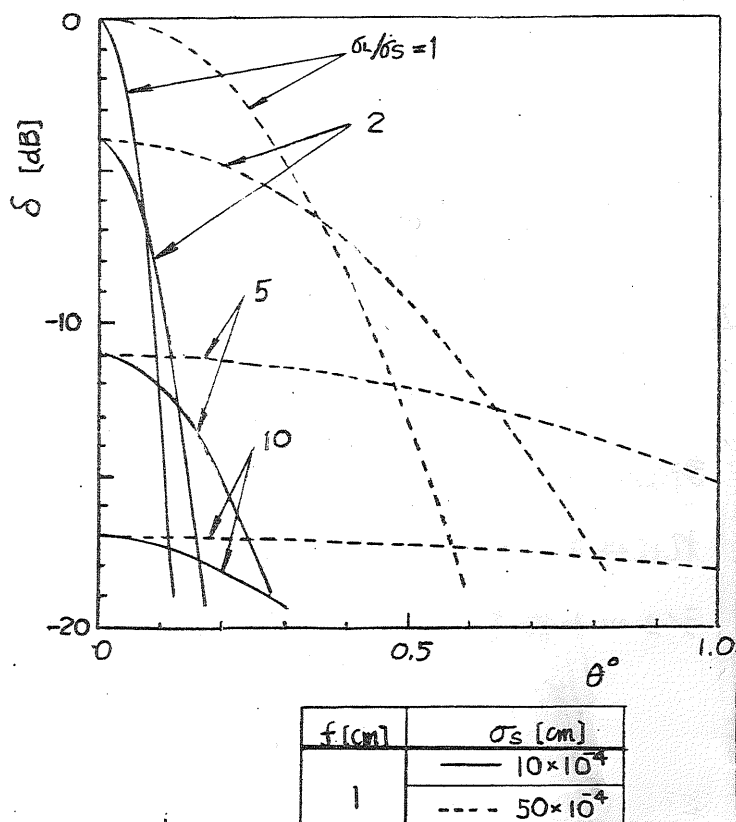


図4. ヘテロダイン $(S/N)_{HET}$ の角度依存性