17. レーザ・レーダにおける光パルスの一受信方式

A Receiving Method of Optical Pulses in a Laser Rader System

太田紘一　橘篤志

Kouichi Outa　Atsushi Tachibana

日立製作所　戸塚工場

Totsuka Works, Hitachi Ltd.

1. まえがき　一般に，光パルスを光電子増倍管やアバランシェ・ホトダイオード（ＡＰＤ）のような，増倍作用のある受光素子で受信した場合，パルスの存在する場合と存在しない場合とでは，雑音の大きさに違いを生じる。パルスの無い場合は，検出回路に存在する雑音は熱雑音と，受光素子の暗電流によるショット雑音だけであるが，光パルスを受光した場合は，光電流によるショット雑音が付加される。さらに，受光素子の増倍係数は，信号よりもショット雑音を増加させる方に作用している。

さて，従来のレーダの受信方式は，マッチドフィルターなどを用い，信号パルスの尖頭値と雑音の実効値の比が最大になるようにして，ピーク値附近での瞬時判断をするピーク値検出方式である。通常，最適閾値は信号の存在する場合でも，存在しない場合でも同じ程度の雑音の大きさを見積ってピーク値の½に設けられる。しかし，レーザ・レーダでは，上でも述べたように，パルスの存在の有無で雑音に大きな違いを生じるため，最適閾値レベルの設定の仕方は変化する。瞬時判断方式であれば，最適閾値レベルは“0”の方向に近ずく。また，光電流の大きさに雑音レベルも依存するので，マッチドフィルターの設計は困難となる。これらのことを考慮し，光電流による雑音をむしろ検出に積極的に活用すること，パルスの幅を有効に利用しようという考えで瞬時判断方式ではない方式を考え，解析を試みたので報告する。

2．光パルス受信方式－I　図1に信号パルスとそれに雑音が重畳した場合のモデルを示す。信号パルスが存在する場合を"1"，無い場合を"0"とする。"1"の光電流と"0"のそれの場合では，前にも述べたように雑音の大きさが異なる。今，"1"のパルスの平均尖頭値を1，そのときの雑音の大きさをσ_1^2とする。また"0"のパルスの平均尖頭値をγとし，そのときの雑音の大きさをσ_0^2とする。パルス幅をτ_p，雑音の相関時間をτ_cとする。図1に示すような一連の光パルスを受信する方式として，"あるゲート時間（τ_g）内に，パルスが1回でもある閾値レベルを越せば"1"，そうでない場合は"0"と判断する。"という判断方式を提案する。この方式は雑音が増せば，ゲート時間（最大，パルス幅）中に閾値レベルを1回は越す確率が増すということが予想される。

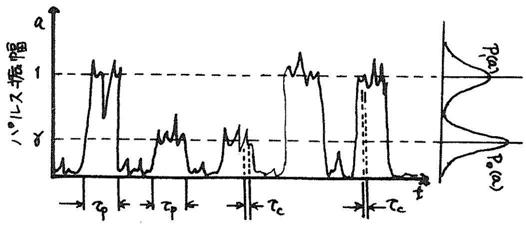

図1　受信パルス列

3．方式－Iによる受信符号誤り率と閾値レベル　受信符号誤り率P_eは，一般的に，

$$P_e = P_1 \cdot P_{10} + P_0 \cdot P_{01} \tag{1}$$

と表わせる。P_1："1"の生起確率，P_0："0"の生起確率，P_{10}："1"が"0"に誤る確率，P_{01}："0"が"1"に誤る確率である。今，ゲート時間と相関時間の比をn（$=\tau_g/\tau_c$）とする。"1"の振幅確率密度関数（P.D.F）を$P_1(a)$，"0"のそれを$P_0(a)$とし，閾値レベルをkとする。

相関時間内で，"1"を"1"と判断する確率P_1はτ_c内でkを越す確率だから，

$$P_1(k) = \int_k^\infty P_1(a)\,da \tag{2}$$

である。"1"を"0"と誤る確率P_{10}は，kを越さない確率で，

$$P_{10}(k) = \int_{-\infty}^{k} P_1(a)\,da = 1 - P_1(k) \tag{3}$$

である。また"0"を"0"と判断する確率P_0は，kを越さない確率だから，

$$P_0(k) = \int_{-\infty}^{k} P_0(a)\,da \tag{4}$$

である。"0"を"1"と誤る確率P_{01}は，kを越す確率だから

$$P_{01}(k) = \int_{k}^{\infty} p_0(a)\,da = 1 - P_0(k) \qquad (5)$$

である。次にゲート時間内で，1回でもkを越せば“1”と判断，そうでない場合は“0”と判断するという方式での，“1”を“0”に，“0”を“1”に誤る確率は，相関時間外で信号はお互いに独立と考えると，

$$\mathbb{P}_{10}(k) = P_{10}^{\,n}(k) \qquad (6) \qquad\qquad \mathbb{P}_{01}(k) = 1 - P_0^{\,n}(k) \qquad (7)$$

となる。これから，方式－Ⅰによる誤り率は，（1）式に上式を代入し，生起確率を½として，

$$P_e(k) = \frac{1}{2}\left(P_{10}^{\,n}(k) + 1 - P_0^{\,n}(k) \right) \qquad (8)$$

となる。P.D.Fを正規分布と仮定し，（8）式を計算した結果を図2～4に示す。図2は，横軸に閾値レベル，縦軸に誤り率P_eを目盛ってある。図2からも判るように，nすなわちゲート時間が相関時間に比べ大きくなるとP_eを最小にするkは“1”の方に移動する。図中，rはσ_0/σ_1であり，この場合，$r=1$だから，“1”と“0”の雑音の大きさを等しくしてあり，図3に，$r=0.5$，$\gamma=0.05$の場合を示す。図4は，同じS/Nに対しても，nが大になれば，最小誤り率P_e（最適なkの値のときのP_e）は小さくなり改善されることを示している。

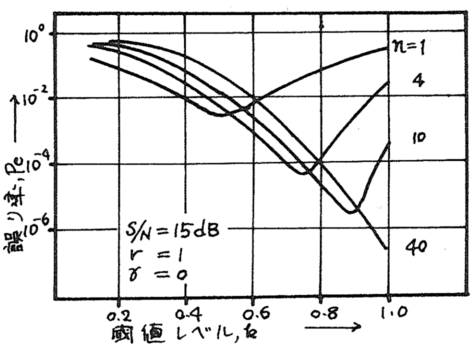

図2　Pe－k

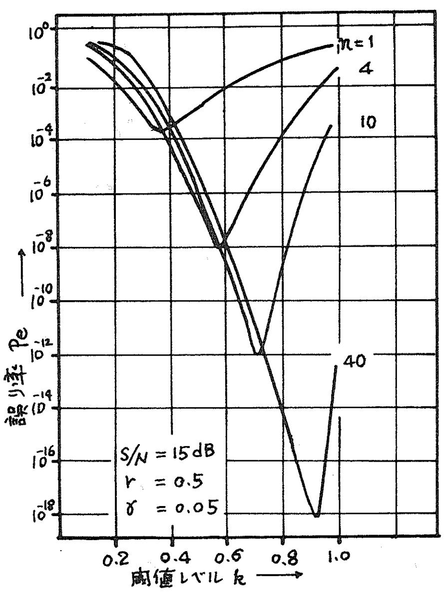

図3　Pe－k

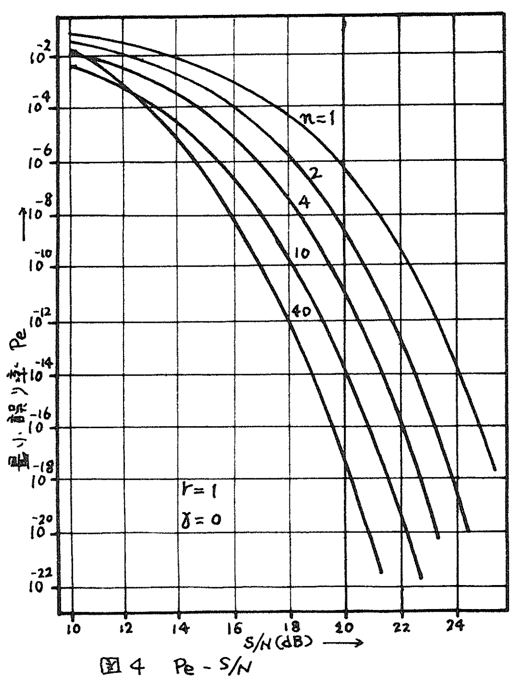

図4　Pe－S/N

4．光パルス受信方式－Ⅱとその誤り率　方式－Ⅰを一般化して，“ゲート時間中にm回以上閾値レベルを越せば“1”，m回未満の場合は“0”と判断

する"という判断方式が考えられる。さて，この場合の"1"を"0"に誤る確率$\mathbb{P}_{10}$と"0"を"1"に誤る確率$\mathbb{P}_{01}$は（2）～（5）式を用いて，

$$\mathbb{P}_{10} = P_{10}^{n} + {}_nC_1 P_{10}^{n-1} P_1^{1} + {}_nC_2 P_{10}^{n-1} P_1^{2} + \cdots + {}_nC_{m-1} P_{10}^{n-(m-1)} P_1^{m-1} \quad (8)$$

$$\mathbb{P}_{01} = {}_nC_m P_0^{n-m} P_{01}^{m} + {}_nC_{m+1} P_0^{n-(m+1)} P_{01}^{m+1} + \cdots + {}_nC_1 P_0 P_{01}^{n-1} + P_{01}^{n} \quad (9)$$

となる。誤り率は（8），（9）を用い，（1）から得られる。正規型のP.D.Fを用い（8），（9）式，と誤り率を種々のkに対し，mを変化させ計算した結果を図5に示す。また，kを変化させた場合，Peを極小にするmの値を用いたとき，nをパラメーターにして図6にプロットした。この計算で使用したS/Nは6 dB，r = 1，γ = 0である。図中，2点鎖線は従来方式で，一点鎖線P_e^mは方式－IIによるPeを示す。点線と実線は$\mathbb{P}_{01}$，$\mathbb{P}_{10}$を示す。これからk = 0.3のときP_e^mは最小になることがわかる。図6からはnを大にするとPeは小さくなり，Peを最小にするkが2ヶ所にあることを示している。これは今r = 1としたため生じたものである。これから，S/N = 6 dBでもn = 10とし，m = 3 or 7で，k = 0.3 or 0.7で$P_e^m \approx 0.006$とかなり小さくできることがわかる。

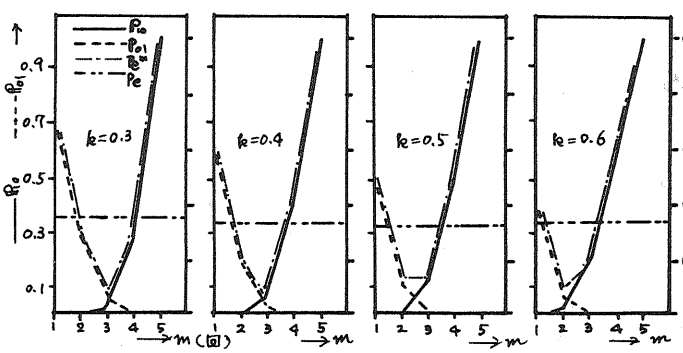

図5　方式IIによる誤り率

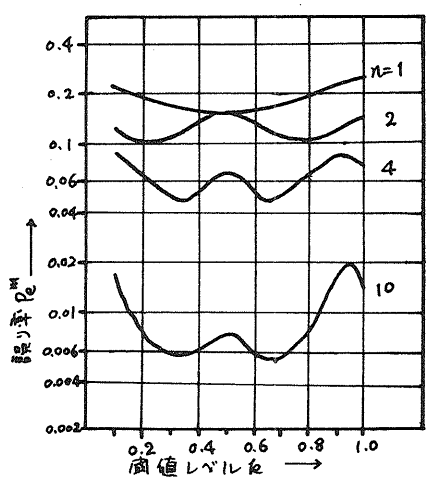

図6　P_e^m－k（方式II）

5．結　論　　従来のピーク値検出と異なり，パルス幅と，光検出素子のショット雑音を有効に利用しようという考えから，新しいパルス受信方式を考え，解析し，誤り率がかなり改善できる事を示した。なお本方式は，マッチドフィルターなどを用いた場合でも有効と考える。