



直接検波最適光受信機

塚本勝俊*

1. はじめに

近年、衛星間光通信や深宇宙通信等、宇宙光通信システムに関する研究が各方面で推進されている。このような通信システムでは、地上系と大きく異なり太陽光という強烈な背景光存在下で数千～数万kmの無中継距離通信リンクを形成しなければならない。したがって、制限された光信号電力による高効率な情報伝送が必要であり、光信号の最適受信方法が重要となる。本稿では、強度変調された光信号から情報を取り出す直接検波最適光受信機の信号検出の原理とその性能について述べる。

2. 最適光受信機の構成

図1に光検波系の原理的な構成を示す。光検

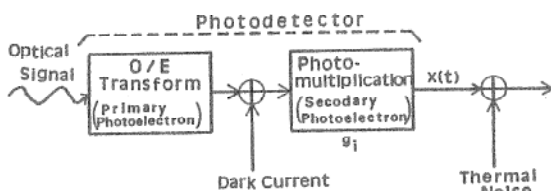


図1 光検波系の原理的構成

波器の重要な機能は、光電変換機能である。強度変調された光信号と背景雑音光が光検波器に入射すると光子によっていくつかの1次光電子が生成され光電子増倍機構を経て次式のショット雑音過程が生じる。

$$x(t) = e \sum_{i=1}^k g_i z(t - t_i) \quad (1)$$

ここで、 e は電子電荷、 g_i は増倍率（任意の i

番目の1次光電子によって生じる2次電子数）、 $z(t)$ は光電子1個による電流応答パルス、 k は観測時間 T に発生する1次光電子数（1次計数）である。なお、アバランシェフォトダイオード（APD）や光電子増倍管等の増倍機構を有する光検波器では、一般に g_i はランダム量である。

ところで、1次計数 k は光の量子的な粒子性に起因して離散的ランダム変数となり、その確率分布はレーザ光や光検波器より広帯域な背景雑音光の場合、平均値が観測時間内での入射光エネルギーに比例するポアソン分布に従う。

さて、2進情報（0，1）で強度変調された光信号を検出するとき、受信電気回路から発生する熱雑音が無く $g_i = 1$ の理想的な光検波系を仮定すると、ビット区間 T 内の1次計数 k を観測し、あらかじめ設定したスレッシュホールドと比較するというポアソン検波が誤り率を最小にする意味で最適となる。このときの誤り率特性が、光通信系が達成できる究極の性能であり、ショット雑音限界特性と呼ばれる。さらに背景雑音光も無視できるときは系は量子限界にあり、誤り確率はビットあたりの平均信号計数を N_s として次式の量子限界値となる。

$$P_e = \frac{1}{2} \exp(-N_s) \quad (2)$$

このような理論限界に対して、実用化されている通常の直接検波光受信機では10～20dB程度劣化した受信感度しか達成できない。その主な原因は、電気回路系熱雑音とランダムな増倍機構である。直接検波方式では、電気回路系熱雑音に打ち勝つため一般にAPDを光検波器に用い受信信号光を増倍するが、確定的な増倍であればショット雑音限界が達成できるものの、ランダム増倍に起因する増倍雑音によって性能

*塚本勝俊(Katsutoshi TSUKAMOTO), 大阪大学, 工学部, 通信工学科, 森永研究室, 助手, 工学修士, 通信工学

改善が制限されてしまうわけである。

ところで、通常の受信機では光検波出力を信号成分と加法性白色雑音にモデル化した上で、電気通信系と同様な相関受信を信号検出の基本としている。しかし、光系に特有なショット雑音の確率密度関数をもとに統計的信号検出理論から最適受信機を導くと、その構造が全く異なったものとなる。

最適受信機を導出する場合、式(1)の光検波出力に対して2つのとらえ方ができる。その模様を図2に示す。(a)は、比較的十分な電力の受

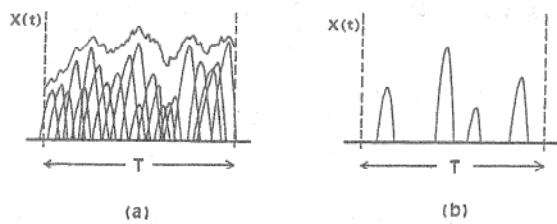


図2 光検波出力

信信号光が入射した場合であり、増倍された光電子パルスが重なり合って生じた連続波形が観測される。一方、信号光電力が極微弱になると光の粒子性が顕著になり、(b)のようにひとつひとつの光子に対応する光電子パルスが、それぞれ分離されて観測される。

(a)のような状況では、光検波出力はガウス雑音過程にモデル化が可能であり、このとき検出すべき情報は、その平均値とゆらぎ成分(分散)に含まれている。すなわち、雑音に埋もれた雑音状信号の検出と等価であり、このときの最適受信機は、通常の相関検出部だけではなく情報依存性を有するゆらぎ成分からも情報を検出するエネルギー検出部から構成される。本稿では、この受信機をガウスモデル受信機と呼び、その基本構成を図3に示す。ガウスモデル受信機は、光検波系の広帯域化と高増倍率化によって通常受信機の誤り率特性を改善できることが理論検討によって示されている。⁽¹⁾

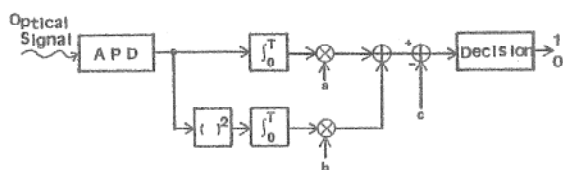


図3 ガウスモデル受信機の基本構成

一方、(b)のような状況では、光検波出力に現われる光電子パルスをひとつひとつ計数することで受信した光子数を推定し、その推定値からポアソン検波を行って情報を復調する光子計数受信機が最適となる。図4にその基本構成を

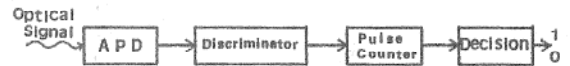


図4 光子計数受信機の基本構成

を示す。光子計数受信機では個々の光電子パルスを回路系熱雑音から誤りなく弁別する必要があり、検波器には高い増倍率と広帯域性が要求される。ただし、発生した光電子パルスが重なり合うともはや正確な光子数推定が不可能となる。したがって、この受信機は極めて微弱な光信号に対してのみ有効な局所最適受信機といえよう。このような欠点を改良するため、光電子パルスが重なっても重なったパルスの個数をN個まで統計的に決定し、その結果から情報を復調するN値判定型受信機がある。⁽²⁾

以上、光検波系の2つの状況に応じた光信号の最適受信法、受信機構造について見てきたが、あらゆる状況に対処できる一般的な最適受信機はこれまでのところ見いだされていない。今後、さらに解明を進める予定である。次節では、ここに述べた受信機の性能について述べる。

3. 誤り率特性の数値例

図5, 6に、ガウスモデル受信機、光子計数受信機、2個までのパルス重なりを検出できる3値判定型受信機の平均信号計数対誤り率特性の数値例を示す。同図においてBは光検波系の帯域幅を、 N_H は背景光平均計数を表す。

図5からわかるように、光子計数受信機、3値判定受信機によって通常受信機($2BT=1$)の誤り率特性を大きく改善できる。一方、ガウスモデル受信機は殆ど改善が期待できないことがわかる。その理由は、検波系の広帯域化に伴ってガウスモデルの正当性が失われることにあると考えられる。

図6では、3値判定型受信機が光子計数受信機より優位になる検波系帯域の存在が示されている。したがって、検波系の帯域幅と光信号電

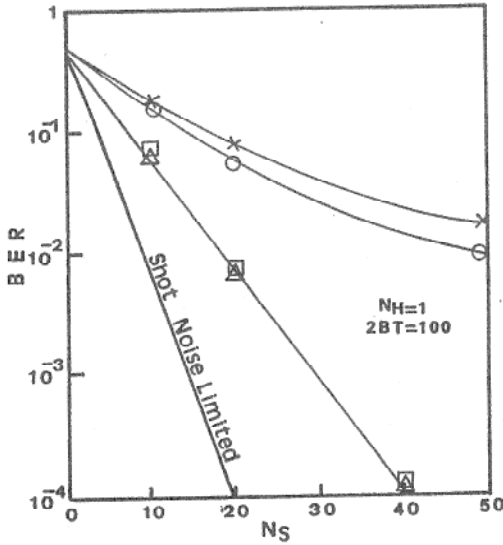


図5 誤り率特性
 ×; 2BT=1
 △; 光子計数受信機
 □; 3値判定型受信機
 ○; ガウスモデル受信機

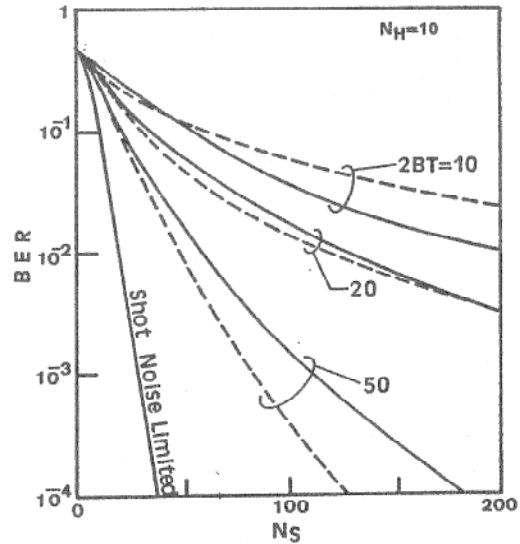


図6 誤り率特性
 —; 光子計数受信機
; 3値判定型受信機

力に応じて最良のN値判定型受信機が存在することが予想される。

4. むすび

ショット雑音限界を達成できるもうひとつの光通信方式であるコヒーレント光通信方式が光ファイバ系で活発に研究されているが、本稿で述べた直接検波による光信号の最適受信方式の利点は、コヒーレント系に要求される光搬送波の周波数、位相の高精度制御といった複雑なシ

ステム要素が不要であり、高信頼性と高感度を両立させ得ることである。したがって、低速でも良いが高信頼性が要求される超長距離宇宙光通信方式に適している。

文 献

- 1) 秦, 森永, 滑川, “直接検波最適光受信機に関する考察”, 信学論, J67-B, 10, pp. 1009-1016 (1984).
- 2) 阿部, 塚本, 森永, “直接検波光通信方式における最尤検定受信機に関する一考察”, 信学全大会, B-1003 (1990)