

# 16 パルス光波の情報量

INFORMATION CONTENT OF OPTICAL PULSED SIGNAL

広田 修 平野 信夫

OSAMU HIROTA,

NOBUO HIRANO

東京電機大学 電気通信工学科

TOKYO ELECTRICAL ENGINEERING COLLEGE, COMMUNICATION ENG.

## I. 情報細胞と信号記述

INFORMATION BASE AND SIGNAL REPRESENTATION

帯域幅  $B$ , 時間長  $t$  の光信号の自由度は物理的分解可能時間として COHERENCE 時間  $T_c = 1/B$  を持つ事より  $Bt$  である。すなわち GABOR<sup>(1)</sup> の情報細胞 ( $4B \cdot 4t = 1$ ) の基本時間を  $T_c$  に選ぶ事によって, それは細胞  $B \cdot T_c = 1$  の含有数となる。

古典的には細胞はさらに2つの自由度を持ち自由度は  $2Bt$  であるが, 量子力学的にはその2つの共役変数は独立ではなく自由度は各細胞1である。

光信号は情報細胞内の基本事象によって記述され, その基本事象は場の波動関数の固有状態展開によって規定されその固有状態を情報基底と定義する。

すなわち情報基底を決めれば情報事象とその観測系が一意に決まるとする。

情報基底として NUMBER STATE<sup>(6)</sup> を選べば光子数表示であり観測系は理想的光電計数器となる。

従って信号記述は一意的ではなく情報基底の取り方によって種々の表現ができる。しかしその種々の記述によって情報媒体の物理的観測過程が異なり, 情報の取り扱い方を変えねばならない。

## II パルス信号の記述<sup>(2),(3)</sup>

REPRESENTATION OF PULSED SIGNAL

情報基底は Number state<sup>(6)</sup> とする。細胞内の平均光子数  $\bar{n}$  は

固定として、光波が熱状光と仮定し、観測時間は光波の1自由度を分解するに十分短かいものとする。

その時、時間的連続信号の記述として

$$P(m; \bar{m}) = \frac{1}{1 + \bar{m}} \left( \frac{\bar{m}}{1 + \bar{m}} \right)^m : 1細胞当り (1)$$

いわゆる BOSE-EINSTEIN 分布となる。光波が正弦波であれば、その分布は POISSON 分布となる。

次にパルス波として二種類の表示が考えられ、その一つは規則的、他は不規則(確率的)にパルス化する方法である。

前者は巨視的基本時間長  $T = N\tau_c$  に対し、規則的に時間長  $\tau_c$  のパルスを配列するものである(すなわち、 $N$ 細胞の内の一に規則的にパルスを置く)。その時の信号記述は

$$P(m; \bar{m}/D) = \frac{1}{1 + \bar{m}/D} \left( \frac{\bar{m}/D}{1 + \bar{m}/D} \right)^m : N細胞当り (2)$$

$D$ は巨視的基本時間長  $T$  と  $\tau_c$  の比(いわゆるデューティ)である。

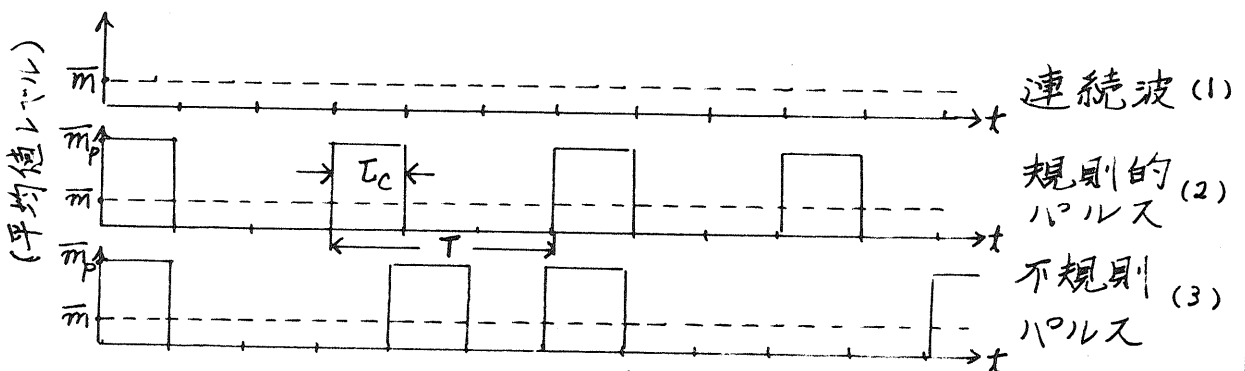
$D = \tau_c/T = \bar{m}/\bar{m}_p = 1/N$ ,  $\bar{m}_p$ はパルスの有する平均光子数である。

次に後者は各細胞に不規則にパルスが存在する場合でパルスの生起確率と光子数分布の2重確率で記述される。

$$P(m; \bar{m}/P_p) = P_p \left\{ \frac{1}{1 + \bar{m}/P_p} \left( \frac{\bar{m}/P_p}{1 + \bar{m}/P_p} \right)^m \right\} + (1 - P_p) \delta_{m,0} (3)$$

: 1細胞当り

ここで  $P_p$ はパルスの存在確率であり、平均値一定条件から  $P_p = \bar{m}/\bar{m}_p$  で定義される。 $\delta_{m,0}$ はクローネッカーデルタである。



図・1 各種信号波形

### III. パルス波の情報量<sup>(2),(3)</sup>

#### INFORMATION CONTENT OF PULSED SIGNAL

信号の持つ情報量は単位系 nat/cell で、次式で定義される。

$$H(X) = - \sum_m P(m) \log P(m) \quad (4)$$

熱状光時間連続波の情報量は上式から

$$H(X) = \log(1 + \bar{m}) + \bar{m} \log(1 + \frac{1}{\bar{m}}) \quad (5)$$

熱状光使用規則的パルスの情報量は  $N$  細胞当り式(5)と同様の式となる。従って単位細胞当りに変換すれば

$$H(X) = \frac{1}{N} \left\{ \log(1 + \bar{m}_p) + \bar{m}_p \log(1 + \frac{1}{\bar{m}_p}) \right\} \quad (6)$$

熱状光使用不規則パルスの情報量は

$$\begin{aligned} H(X) &= - \sum_{m=0}^{\infty} P_p \cdot P(m: \bar{m}_p) \log P_p \cdot P(m: \bar{m}_p) \\ &\quad + P_p \cdot P(m=0) \log P_p \cdot P(m=0) \\ &\quad - \{ P_p \cdot P(m=0) + (1 - P_p) \} \log \{ P_p \cdot P(m=0) + (1 - P_p) \} \\ &= P_p \left\{ \log(1 + \bar{m}_p) + \bar{m}_p \log(1 + \frac{1}{\bar{m}_p}) \right\} \\ &\quad - P_p \log P_p - \left\{ P_p \frac{1}{1 + \bar{m}_p} + (1 - P_p) \right\} \log \left\{ P_p \frac{1}{1 + \bar{m}_p} + (1 - P_p) \right\} \\ &\quad + P_p \cdot \frac{1}{1 + \bar{m}_p} \log P_p \cdot \frac{1}{1 + \bar{m}_p} \quad (7) \end{aligned}$$

### IV. 非交換量同時観測の情報量

#### INFORMATION CONTENT OF SIMULTANEOUS MEASUREMENT OF NONCOMMUTING

情報基底は  $|R\rangle, |P\rangle$  なる場の一次量と仮定し、観測系は  $P, R$  を同時観測するホモダイン受信系とする<sup>(4)</sup>。古典的理論は1細胞当り2自由度を有する。すなわち  $P, R$  に相当するものは同時観測可能であり情報量は SHANNON-WIENER の公式<sup>(5)</sup>

$$I = \log \left( 1 + \frac{S}{N_{Th}} \right) = \log \left( 1 + \frac{S}{\bar{n}_{th} h \nu} \right) \quad (8)$$

ここで  $S$  は信号エネルギー、 $N_{Th}$  は熱雑音のエネルギーである。

$$\bar{n}_{th} = \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad : \quad \text{PLANCK} \quad (9)$$

量子力学的物理量としての  $P, \delta$  は非交換量であり正確な同時観測は不可能である。観測系が理想的である時、同時観測後の状態は COHERENT STATE <sup>(4)</sup> が保たれる。そのくり返し同時観測の観測確率は分散  $1/\bar{n}$  の Gauss 分布となり量子雑音が導入される<sup>(6)</sup>。その時の最大情報量は式(8)の雑音光子数に +1 のエネルギー量子が付加される。

$$I = \log \left( 1 + \frac{\delta}{(\bar{n}_{th} + 1)} \right) \quad (10)$$

光の場では  $kT \ll h\nu$  より  $\bar{n}_{th} \rightarrow 0$  となり上式は

$$I = \log \left( 1 + \frac{\delta}{h\nu} \right) = \log (1 + \bar{m}) \quad (11)$$

上式は式(5)の H-B-E において  $\bar{m}$  が大きい場合に相当する。

従って信号のエネルギーが大きい場合、情報基底は光子数表示でも、電界・磁界表示でも同じ情報を得る。信号エネルギーがきわめて小さい場合、式(11)と光子数表示式(5)は

$$I \doteq \bar{m} \quad (11)' \quad H(x) \doteq \bar{m} \log \frac{1}{\bar{m}} \quad (5)' \quad \bar{m} \ll 1$$

以上から式(5)' > 式(11)', 従って信号エネルギーがきわめて小さい場合、光子数表示による情報量が最大となる。

## V. 光波帯減衰器の情報量 <sup>(2)(3)</sup>

### INFORMATION CONTENT OF OPTICAL ATTENUATOR

節IIで定義された各種信号を理想的自由空間通信路モデルの入力とした時、その平均相互情報量は

			減衰器出力が大きい場合 ( $\bar{m}_y \gg 1$ )				小さい場合 ( $\bar{m}_y \ll 1$ )
連続波	熱	熱	$\frac{1}{2} \log \bar{m}_y - 0.1303$	連続波	熱	熱	$(1-\delta) \bar{m}_y$
		正	0			正	0
パルス波	規則的	熱	$D \left\{ \frac{1}{2} \log \bar{m}_{y,p} - 0.1303 \right\}$	パルス波	規則的	熱	$(1-\delta) \bar{m}_y$
		正	0			正	0
パルス波	不規則	熱	$\frac{P_p}{2} \log \bar{m}_{y,p} + P_p \log P_p^{-1} + (1-P_p) \log (1-P_p)^{-1}$	パルス波	不規則	熱	$\bar{m}_y \log \frac{1}{\bar{m}_y}$
		正	$P_p \log P_p^{-1} + (1-P_p) \log (1-P_p)^{-1}$			正	

- REFERENCE. (1). GABOR, COMMUNICATION THEORY AND PHYSICS, Phil. mag, 1950,  
 (2). 広野平野. 光波帯信号のパルス化と減衰器の情報量. 量工研報 GE-72-50. 1972  
 (3). 広野平野. 信号の形式と光子通信路の最大情報量. パターン認識研報 PRL-72-130. 1973  
 (4). C.Y.SHE, Quantum electrodynamics of communication channel, IEEE. IT14  
 (5). SHANNON, A Mathematical theory of communication.  
 (6). GLAUBER, Quantum optics, Enrico Fermi Course 42.  
 (7). 平野広野. 光波帯機器の情報量(最大エントロピー入力の場合) 信論誌 Vol 55 B. 1972