

## 空間重畳型64値直交振幅変調(64QAM)システムの重畳誤差に関する研究

日大生産工 (大学院) ○山口 大貴  
日大生産工 田中 將義

## 1. はじめに

衛星通信では、有限資源である周波数帯域と電力の有効利用が重要課題である。多値変調は、1シンボル当りの情報量が多く、周波数帯域の有効利用が可能で、高速衛星通信の方式として注目されている<sup>(1)</sup>。しかし、被変調波の振幅変動が大きくなるため電力増幅器 (HPA) に高い線形性が要求され、線形性確保のため出力をバックオフ (OBO) する結果、電力増幅効率が低下する欠点がある。

筆者等はこの問題を解決する方法として、多値変調波を振幅変動の小さい複数波に分離した後、それぞれ個別に非線形高効率電力増幅し、空間でベクトル合成する空間重畳合成型多値変調システムを提案している<sup>(2-15)</sup>。

本研究では、64値直交振幅変調(64QAM)波を振幅変動の小さい3つのレベルの異なる4値位相変調(QPSK)波に分割し、個別に非線形領域で高効率に電力増幅後に、2ビームで空間重畳合成する空間重畳型64 QAMシステムを提案<sup>(13,15)</sup>、2ビーム間の時間遅延誤差と空間重畳合成時の利得・位相の誤差の影響を検討した。その結果、これらの誤差は、実現可能な範囲内であり提案するシステムが実現可能であることを明らかにする。

## 2. 多値変調通信システムの概要

## 2.1 通信システムの概要

Fig. 1にワイヤレス通信のシステム構成を示す。デジタル信号を変調 (Mod)、その後フィルタ(Filter)で送信波形を整形し、電力増幅器 (HPA) で増幅して送信する、受信側では低雑音増幅器(LNA)で増幅後、再度フィルタリングを行い、復調 (Demod) してデジタル信号を取り出す。

## 2.2 電力増幅器の入出力特性と効率

ワイヤレス通信では、Fig. 1に示す送信機の最終段に位置するHPAでレベルを高め、アンテナから送信する。送信機器の中でHPA消費電力の占める割合が大きく、HPAの効率が全体の消費電力を決定している。

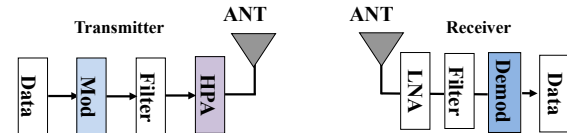


Fig. 1 Conventional wireless communications system.

Fig. 2に電力増幅器の入出力特性と電力効率を示す。効率は線形領域では低く、非線形領域に近づくにつれて高くなる。HPAに高い線形性が要求される場合、出力バックオフした点で動作させるため、電力増幅効率が低下する。したがって、非線形特性による伝送特性の劣化を抑えつつ、非線形領域で動作させることが可能となれば、高効率動作が実現する。

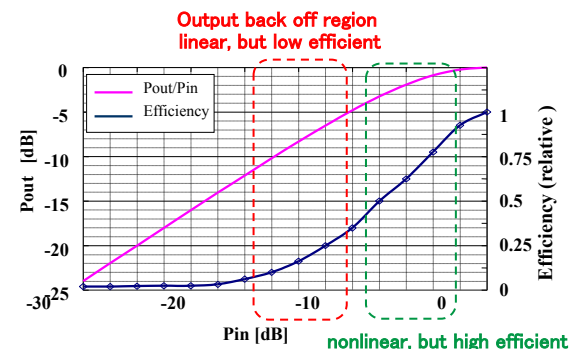


Fig. 2 HPA characteristics and power efficiency.

## 2.3 64QAM変調システムの課題

従来方式の64 振幅位相変調 (64APSK) と64 QAM変調の信号空間配置 (搬送波の振幅と位相の関係) とシステム構成をFig. 3とFig. 4に示す。

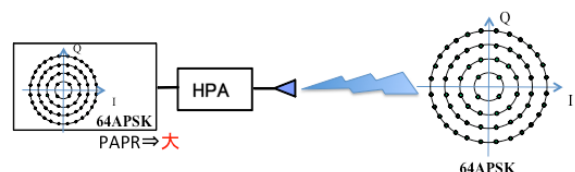


Fig. 3 Configuration of conventional 64 APSK transmitter.

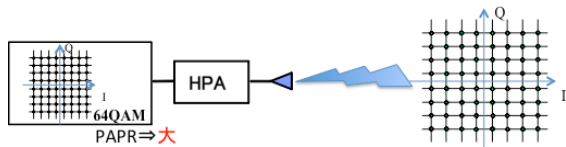


Fig. 4 Configuration of conventional 64 QAM system.

従来方式の64値多値変調システムでは、信号波は一括電力増幅後に送信される。Fig. 5とFig. 6にそれぞれ64 APSK変調と64 QAM変調の非線形動作時の電力増幅後の信号空間配置図を示す。電力増幅効率の良い非線形領域で増幅すると、各信号点が大きく変動し伝送特性が劣化することが分かる。

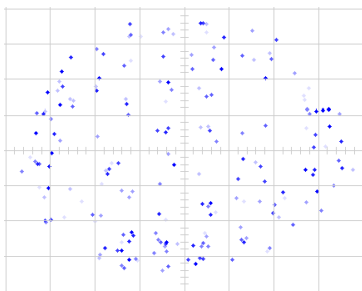


Fig. 5 Influence of nonlinear effect on 64 APSK signal constellation

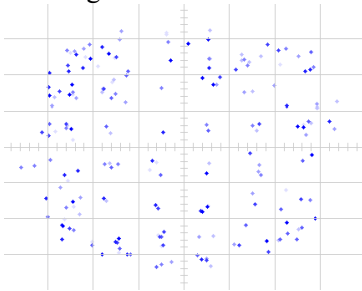


Fig. 6 Influence of nonlinear effect on 64 QAM signal constellation.

### 3. 空間重畳型64QAM変調システムの提案

#### 3.1 特徴

多値変調波を振幅変動の小さな3つのQPSK波に分離した後、それぞれ個別に非線形高効率電力増幅し、2ビームにまとめて空間でベクトル合成することにより、周波数の有効利用と消費電力の低減を同時に実現する構成である<sup>(13,15)</sup>。

#### 3.2 原理

2ビーム空間重畳型  $4 \times 16 (=4 \times 4) = 64$  QAMシステムの原理を Fig.7 に示す。振幅変動の小さなQPSK波3波をそれぞれ個別にHPAの飽和領域近傍で高効率増幅後、レベルの小さい2波を電力合成器(PC)で合成した16QAM波とレベル

の一番大きなQPSK波を別々のアンテナで送信し、空間でベクトル合成する。

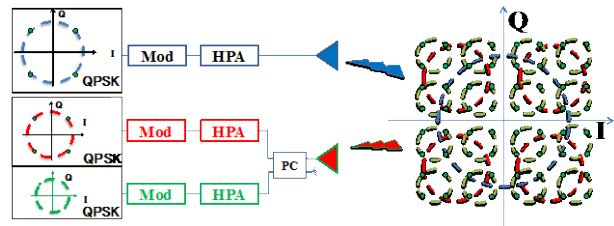


Fig. 7 Principle of two-beam spatially superposed  $4 \times 16 (=4 \times 4) = 64$  QAM system.

### 3.3 HPA消費電力比較

同一BER時の従来方式の64 APSK、64QAMと2ビーム空間重畳型の  $4 \times 16 = 64$  QAMの消費電力比較を Table 1 に示す。従来方式の64 QAMの消費電力を1として表示している。2ビーム空間重畳型  $4 \times 16 (=4 \times 4) = 64$  QAMの消費電力は0.6倍と低消費電力化を実現している。

Table 1 Comparison of HPA power consumption when the same BER is obtained.

| Modulation | No. of beams | Input signals | HPA   | OBO(dB) | Pdc(相対値) |
|------------|--------------|---------------|-------|---------|----------|
| 4x16 QAM   | 2            | QPSK          | HPA-1 | 0.9     | 0.55     |
|            |              | 16(=4x4) QAM  | HPA-2 | 0.9     |          |
|            |              |               | HPA-3 | 0.9     |          |
| 64APSK     | 1            | 64APSK        | HPA   | 3.3     | 1.00     |
| 64QAM      | 1            | 64QAM         | HPA   | 3.35    | 1.04     |

### 4. 時間遅延誤差と空間重畳合成時の利得・位相誤差の影響

#### 4.1 原理

回路の電気長の違いにより遅延時間誤差、伝搬路長の違いにより重畳誤差が発生する。

解析時に考慮した時間遅延誤差と空間重畳合成時の2ビーム間の利得・位相誤差をFig. 8に示す。3つの変調波間に遅延誤差  $\Delta t$  を仮定した。また、電力増幅後に各アンテナから送信される2ビーム間には、空間重畳合成時に利得・位相誤差  $\Delta G$  と  $\Delta \phi$  が発生する<sup>(6,11,14)</sup>。

空間重畳合成する2ビームの信号をそれぞれ式で示すと、ビーム1は  $a_1(t + t_1)e^{j\omega_c t} G_1 e^{j\theta_1}$  となり、ビーム2は  $a_2(t + t_2)e^{j\omega_c t} G_2 e^{j\theta_2}$  となる。すると、時間遅延誤差  $\Delta t = t_1 - t_2$ 、位相誤差  $\Delta \phi = \theta_1 - \theta_2$ 、利得誤差  $\Delta G = G_1 - G_2$  となる。

#### 4.2 時間遅延誤差と利得・位相誤差の影響

時間遅延誤差と空間重畳時の利得と位相誤差を与えて、BER特性を評価した。帯域制限

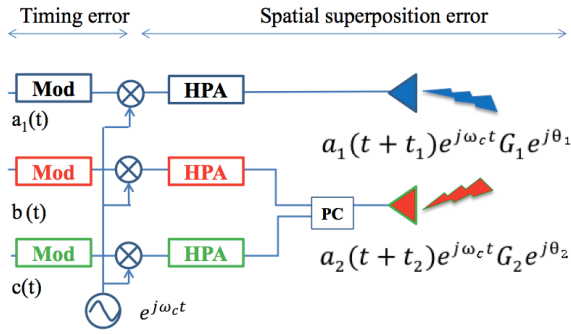


Fig. 8 Timing and spatial superposition errors in spatially superposed 64 QAM.

Filterのroll off比を0.35, BCHとLDPCの誤り訂正符号(符号化率=3/5)を使用した. 評価システムの構成をFig. 9に示す.

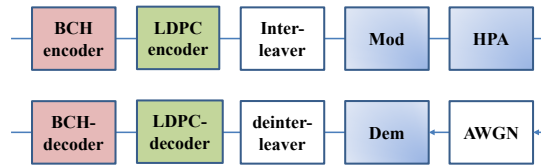


Fig. 9 Configuration of performance evaluation system

時間遅延誤差を1/16シンボル, 位相誤差を5と10(deg), 利得の誤差を0.5と1.0 (dB)とした時のBER特性をFig. 10に示す.

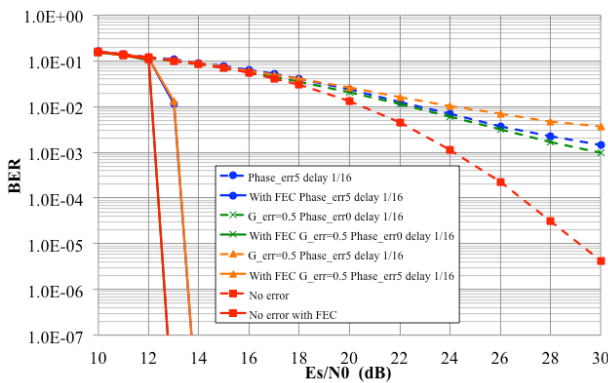


Fig. 10 BER performance of spatially superposed 64 QAM system under several timing and superposition errors.

Table 2は, 時間遅延誤差=0, 空間重畳合成時の利得・位相誤差=0を基準として, Es/N0の劣化量(dB)を示している. 遅延誤差1/16シンボル, 利得誤差0.5 dB, 位相誤差 5 degでは約0.5 dBと小さな劣化量であり, これらの重畳誤差は空間重畳用アンテナシステムで実現可能な値<sup>(10,12,14)</sup>であることから, 本システムは実現可能である.

Table 2 Es/N0 degradation in dB of spatially superposed 64 QAM system due to timing and superposition errors.

|                       | Phase_err(deg) |            |         |            |         |            |
|-----------------------|----------------|------------|---------|------------|---------|------------|
|                       | 0              |            | 5       |            | 10      |            |
| $\Delta G_{err}$ (dB) | delay 0        | delay 1/16 | delay 0 | delay 1/16 | delay 0 | delay 1/16 |
| 0                     | 0              | 0          | 0       | -0.5       | -1      | -1         |
| 0.5                   | 0              | 0          | -0.5    | -0.5       | -1      | -1         |
| 1                     | 0              | -0.5       | -0.5    | -1         | -1      | -1.5       |

## 5. 空間多値変調システムの効果

2ビームの空間重畳を実現するアンテナとして, Fig. 11に示すようにビームあたり3個のフィードホーンを交互に配置する方法が, 空間重畳誤差を抑えることに有効である<sup>(10,12,14)</sup>.

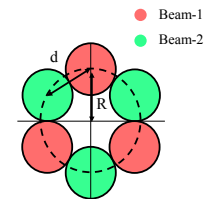


Fig.11 Configuration of feed horns for two-beam spatial superposition antenna.

従来方式の64多値変調システムと空間重畳型64値変調システムの全体構成図をFig. 12に示す. 2ビーム合成による空間重畳型の64 QAMシステムでは, 従来方式の大型電力増幅器による一括増幅するものと異なり, 小型の電力増幅器を複数用いた構成であり, HPAの低消費電力化と小型化, そして温度制御と電源系の簡素化が可能となり, システム全体の小型経済化が可能である.

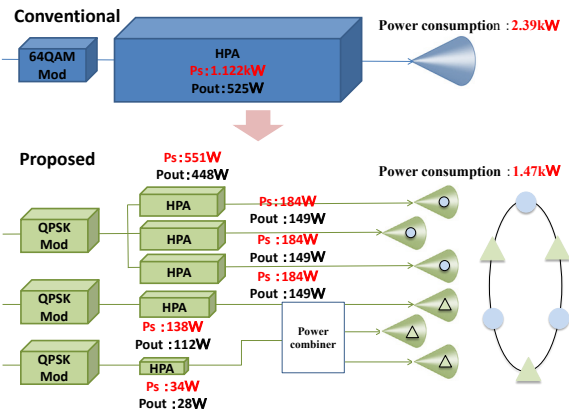


Fig. 12 Profit of superposed 64 QAM system.

## 6. 本提案方式の適用例

以上の検討結果から, 空間重畳型システムが適用可能な衛星通信システムを検討した.

### 6.1 Bent-pipe 方式を用いた衛星通信

衛星内で地上の送信基地局から送信された上りの信号を受信し, 周波数変換, 増幅後に

下り信号として送信する **Bent-pipe** 型の衛星システムにおいて、上りの **Uplink** に空間重畳型システムを適用し、**Downlink** に従来方式を適用した例を Fig. 13 に示す。本提案方式を適用することにより、従来方式に比べて **Uplink** で消費電力の 40 % 低減が可能である。

## 6.2 再生中継方式を用いた衛星通信

地上の送信基地局から送信された信号を受信後、衛星内で一度デジタル信号に復調する再生中継の衛星システムにおいては、Fig. 14 に示すように上りの **Uplink** と下りの **Downlink** の両方に空間重畳型システムを適用できる。本方式では、従来方式と比べて全体で 40 % の消費電力低減が可能である。

## 6.3 具体的な適用例

本システムの具体的な適用例を Fig. 15 に示す。イベント中継等での超高精度テレビジョン放送(4K, 8K)の素材伝送、被災地の状況調査のための超高精細映像の伝送、海洋資源探査船からの探査情報の伝送等に適用することにより、経済的な送信システムの構築が可能である。

## 7. まとめ

周波数帯域幅を有効に利用して高速大容量伝送が可能な衛星通信方式として **64APSK** や **64QAM** 等の多値変調方式が検討されている。しかし、多値変調波を一括増幅するために送信時の電力効率が低下する課題がある。この問題を解決するために、空間上で2波の振幅変動の小さい変調波を重畳合成する空間重畳型システムを提案した。

3つのレベルの異なる **QPSK** 波を2ビームで空間重畳合成する **Superposed 64 QAM** システムについて、時間遅延誤差と空間重畳合成時の利得・位相のビーム間誤差の影響を検討した。その結果、遅延誤差 1/16 シンボル、利得誤差 0.5 dB、位相誤差 5 deg では、BER 特性の劣化は約 0.5 dB と小さく、十分に実現可能なシステムである

## 参考文献

- (1) ETSI, Digital Video Broadcasting (DVB), ETSI EN 302 307 v1. 2. 1(2009-08)
- (2) M. Tanaka, H. Madate, AIAA, ICSSC-2010-8681, August. 2010
- (3) 間館, 田中, 信学技報, SAT2010-85, 2011-2
- (4) M. Tanaka, H. Madate, AIAA, ICSSC, AIAA-2011-8026, Nov. 2011
- (5) M. Tanaka, T. Watanabe, & M. Tobinai, AIAA ICSSC, 6-1, Sept. 2012

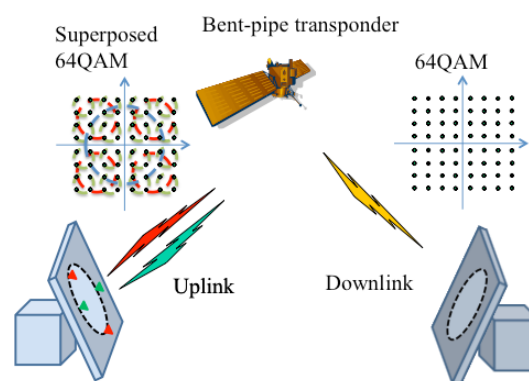


Fig. 13 Application scenario for bent-pipe satellite communications.

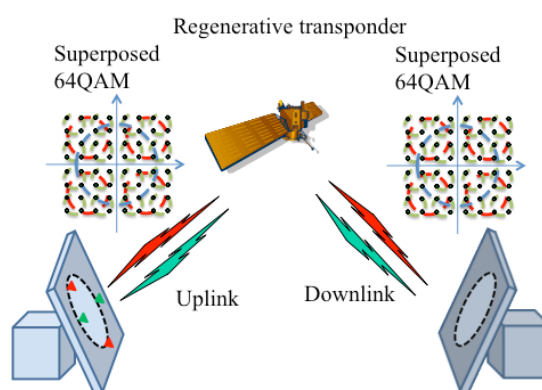


Fig. 14 Application scenario for regenerative satellite communications.

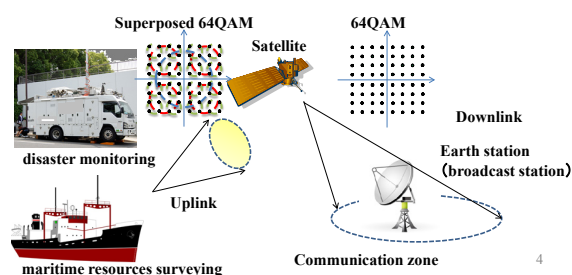


Fig. 15 Application scenario for ultra high definition video data transmission.

- (6) 大窪, 田中, 信学総大, B-3-13, 2013,
- (7) M. Tanaka, T. Ohkubo, AIAA ICSSC, AIAA 2013-5677, 2013
- (8) 田中, 大窪, 信学総全大, B-3-18, 2014
- (9) 山口, 田中, 信学会サテライト大, B-3-9, 2014
- (10) 大窪, 田中, 信学会サテライト大, B-3-14, 2014
- (11) 山口, 田中, 学術講演会, 2-4, 2014
- (12) 大窪, 田中, 信学総全大, B-3-29, 2015
- (13) 山口, 田中, 信学総全大, B-3-28, 2015
- (14) M. Tanaka, T. Ohkubo, AIAA ICSSC, AIAA 2015-4334, 2015
- (15) 山口, 田中, 信学会サテライト大, B-3-22, 2015