

空間重畳型16QAM変調波の高効率電力増幅の研究

日大生産工(院) ○間舘 大泰
日大生産工 田中 將義

1. はじめに

16値直交振幅変調(16QAM)等の多値変調は1シンボル当りの情報量が多く1度に多くの情報が伝送可能となり、周波数の有効利用ができる。その反面、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する結果、電力増幅効率が低下する課題がある。

この問題を解決する方法として空間重畳型多値変調が提案されている^{(1)~(4)}。複数の4相変調(QPSK)信号を独立した複数の電力増幅器で個別に増幅後、空間で重畳合成しM値QAM信号を生成する方式である。QPSKは振幅がほぼ一定であることから、QAMと比べ、HPAを効率の良い非線形領域近傍で動作させることが可能となる。

そこで本研究では、この空間重畳合成法の妥当性を実証することを目的とし、本方式による高効率動作時の消費電力と従来方式である16QAM, 16APSKの電力増幅時の消費電力の比較検討を行った。

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に通信のシステム構成を示す。まず、デジタル信号を変調(Mod)し、その後フィルタ(Filter)によって送信波形を整形し、電力増幅器(HPA)によって増幅し、受信側のフィルタで再度フィルタリングを行い復調(Demod)してデジタル信号を受信する。

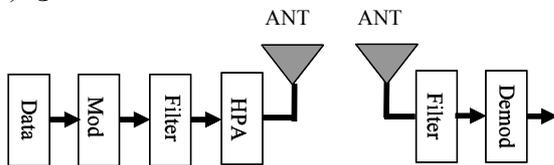


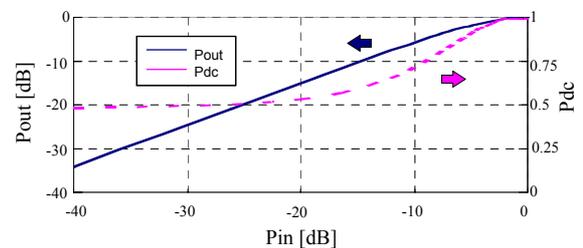
Fig.1 Conventional communication system

2.2 電力増幅器の非線形特性

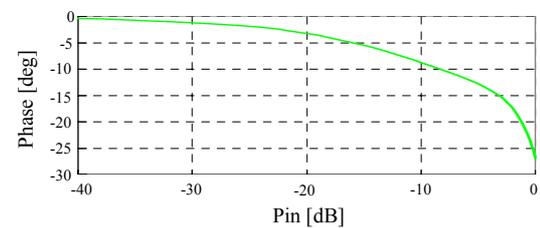
ワイヤレス通信において、送信機の最終段に位置するHPAでレベルを高め、アンテナから送信する(Fig.1参照)。送信機器の中でHPA消費電力の占める割合が大きく、HPAの効率が全体の消費電力を決定している。

Fig.2(a)に一般的なHPAのAM-AM特性ならびに効率の測定データ、(b)にAM-PM特性を示す。入力レベル P_{in} の増加にしたがい、出力レベル P_{out} の増加と位相が回転することを示している。さらに、飽和点近傍で効率が最大になることがわかる。また、動作点を下げる(バックオフ)により、効率が低下するが、線形特性が改善されることがわかる。このため高効率動作と非線形特性のトレードオフからHPAの動作点が決定される。

伝送特性を解析する上で、この非線形特性である振幅圧縮と位相回転を考慮した。



(a)AM-AM Conversion & Power efficiency



(b)AM-PM Conversion

Fig.2 HPA characteristics used for analysis

A Study on Efficient Power Amplification of Spatially Superposed 16QAM Communications System

Hiroyasu MADATE and Masayoshi TANAKA

2.3 多値変調システムの特徴

Fig.3(a)に16QAMの信号空間配置，(b)に16APSKの信号空間配置を示す。

M値のシンボルを使用するM値(M-ary)通信は，1シンボルが $\log_2 M$ ビットの情報量を伝送するため伝送容量を高める上で効果的である。しかしながら，信号空間での各シンボル間の距離が接近する結果，熱雑音，非線形歪みに対する耐性が低下するため，大きな送信電力，利得の大きなアンテナを必要とする。QAM，APSKには高い線形性が要求されるため電力効率が低下する欠点があり，これまでのワイヤレスシステムでは，伝送速度，帯域幅と送信電力について各性能のトレードオフを行い，一定の振幅で搬送波の位相のみを変化させるQPSK方式を採用するシステムが多い。

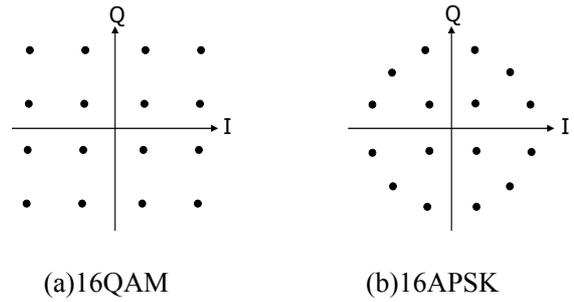
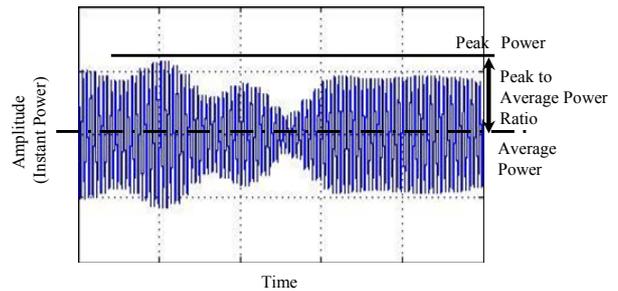


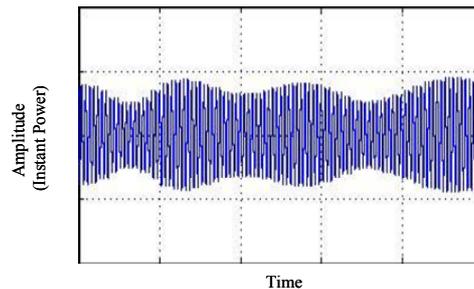
Fig.3 Signal constellation

2.4 電力増幅時の瞬時電力

QAMなどの変調波はRF(キャリア)信号の振幅，位相が信号に応じて変化している(Fig.4参照)。すなわち，I-Q信号に応じてRF信号の包絡線が変動している。この包絡線に従って瞬時電力が変化し，各瞬間の瞬時入力電力におけるAM-AM/PM特性に応じて瞬時出力電力と位相が決まる。瞬時入力電力が大きくなると瞬時出力電力が飽和し，変調波の包絡線が歪む。また，Fig.4より16QAMとQPSKの包絡線を比較した場合，QPSKの方が振幅変動が小さいことがわかる。



(a)16QAM



(b)QPAK

Fig.4 Signal envelope of roll-off filtered modulation wave

Fig.5にQPSK，16QAM，16APSKのHPA入力信号の瞬時電力分布，またTable1にはそれぞれの平均電力とピーク電力の比であるPAPR(Peak to Average Power Ratio)の値を示す。PAPRは $x(t)$ を信号波としたとき，以下の式で与えられる。

$$PAPR = 10 \log \left[\frac{\max\{x(t)^2\}}{\text{mean}\{x(t)^2\}} \right] \quad [dB] \quad (1)$$

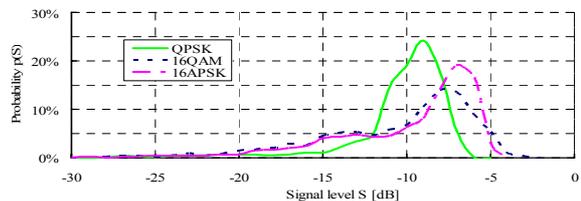


Fig.5 Instantaneous input power distribution

QPSK変調波ではPAPRの値は3.8[dB]，16QAM変調波は6.1[dB]，16APSK変調波は4.7[dB]と，QPSK変調波に比べて大きくなるのがわかる。

電力増幅時，飽和電力近傍で急激に歪むが，これは変調波のピークが増幅器の飽和でクリッピングされるためである。そのためこれらの変調波を低歪みで増幅するためには，出力を下げたバックオフ領域で動作させることが必要である。

Table1 Comparison of Peak to Average Power Ratio

	PAPR [dB]
QPSK	3.8
16QAM	6.1
16APSK	4.7

3 空間重畳型多値変調システム

3.1 システム構成

空間重畳型16QAMシステムの構成をFig.6に示す。Fig.6に示すようにレベルが6[dB]異なる2つのQPSK変調波をHPAで個別に増幅後、アンテナにより空間重畳合成することで16QAM変調波を生成する⁽¹⁾。QPSKは振幅がほぼ一定であることから、QAMと比べ、HPAを効率の良い非線形領域近傍で動作させることが可能となる。

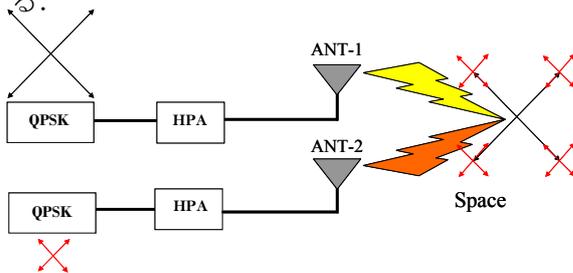


Fig.6 Principle of spatially superposed 16QAM modulation system

3.2 空間重畳合成の課題

空間重畳合成時に、同一周波数の2つの信号波で振幅・位相が異なると重畳誤差となり、性能劣化が発生する。

Fig.7に空間合成時の位相差による重畳誤差を示す。2つの送信アンテナ(ANT-1,ANT-2)間隔を d とすると受信アンテナ(ANT-3)までの距離は異なりその差は $d\sin\theta$ で与えられ、これが位相差となる。

デジタル変調では信号配置が多少劣化しても誤り訂正符号により、誤りを検出・訂正することが可能となる。誤り訂正を考慮した伝送特性解析より導出した2ビーム間の振幅差および位相差の許容条件をTable2に示す。

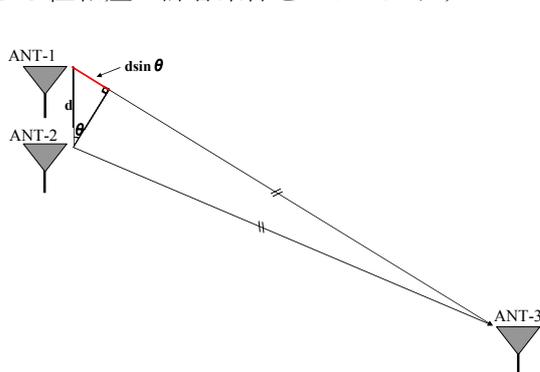


Fig.7 Phase error in spatial superposition

Table2 Allowable spatial combining errors in 16QAM

Amplitude difference of two beams [dB]	1
Phase difference of two beams [deg]	15

4 空間重畳型多値変調の評価⁽⁹⁾

空間重畳型多値変調通信システムの実証実験を行った。さらに、BER(Bit Error Rate)特性、スペクトル特性、PAPRと消費電力をそれぞれ解析による評価で従来方式との比較を行った。

Fig.8に解析に用いた評価システムの構成を示す。比較対象として従来の変調方式である16QAMと16APSKを用いた。HPAのAM-PMによる位相回転を考慮し、HPAの入力前で位相調整(Phase Rotation)を行った。また、高効率動作を実現するため、HPAを非線形領域で動作させ、同一のAWGN(Additive White Gaussian Noise)で同じビット誤り率になるようにバックオフさせて、このときのHPAで消費される電力を測定した。

なお、HPAは一般的な特性であるFig.2のものを用いた。

4.1 空間重畳実証実験

Fig.9に実験構成と結果を示す。6[dB]レベルの異なる2つのQPSK変調波を2台の発振器により送信、空間で合成する。10[m]離れた場所で信号を受信し、受信データを確認した。

受信データは16QAMの信号空間配置を示しているのがわかる。

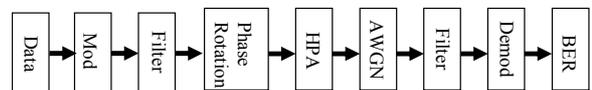


Fig.8 Analytical system of spatially superposed 16QAM

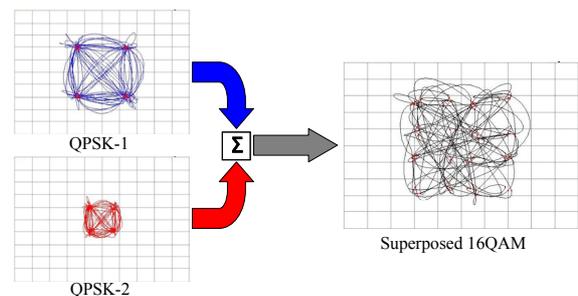
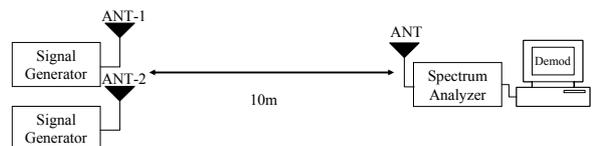


Fig.9 Experiment with system and result

4.2 BER特性

Fig.10は従来方式である16QAM, 16APSKと今回提案する空間重畳型16QAMのBER特性を示す. どの変調波もHPAは非線形領域で動作させているがBERが同じになるようにそれぞれバックオフさせているため特性は同一である.

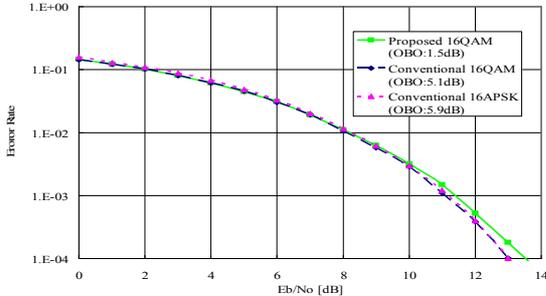


Fig.10 Comparison of Bit Error Rate

4.3 スペクトラム特性

増幅器の高効率動作を実現するため, 非線形領域で動作させ, 同一のAWGN, 同じビット誤り率時のスペクトラム特性を評価した. Fig.11に増幅時のスペクトラム特性を示す.

本システムである空間重畳型16QAMはバックオフが少ない非線形領域で動作させているため, スペクトラムが広がっているのがわかる.

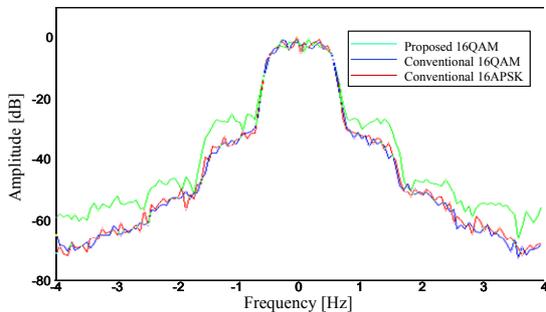


Fig.11 Comparison of output signal spectrum

4.4 PAPRと消費電力の比較

HPAの消費電力 P_{dc} は以下の式で与えられる.

$$P_{dc} = \frac{P_{out}}{\eta} \quad (2)$$

ここで P_{out} は出力, η は電力効率である. Table.3は従来方式(16QAM,16APSK)と本システムである空間重畳型16QAMのPAPRと出力バックオフ(OBO), 消費電力の比較を示している. 消費電力は空間重畳型16QAMを 1 としたときの比率で示している.

空間重畳型16QAMのPAPRは 3.8[dB] であり従来方式より低減しているのがわかる. ま

Table3 Comparison of HPA power consumption

	PAPR [dB]	OBO [dB]	Consumption Power
Proposed 16QAM	3.8	1.5	1
Conventional 16QAM	6.1	5.1	1.91
Conventional 16APSK	4.7	5.9	2.21

た, Fig.9のように同じビット誤り率のとき, 従来方式では16QAMが 5.1[dB], 16APSKが 5.9[dB] の出力バックオフが必要となる. 一方, 本システムでは 1.5[dB] でよい. 消費電力は本システムを 1 とすると従来方式では約 2 倍の電力が消費されることとなり, 従来方式より低消費電力化となる.

6 まとめ

本研究では, レベルが 6[dB] 異なる 2 つの QPSK 変調波を HPA で個別に増幅後, アンテナにより空間重畳合成して 16QAM 変調波を生成する多値変調方式を検討した. そして, 実証実験により本空間重畳型多値変調システムの実現性を明らかにした.

また, 従来の多値変調方式の HPA の消費電力を比較検討し, その結果ほぼ同一条件 (AWGN, BER) において, 従来方式より消費電力を約 50% 低減可能であることを示した.

今後は, 32,64QAM 等の多重度の大きい空間重畳型多値変調の実現性を検討し, 消費電力の比較検討をしていく.

参考文献

- 1) M. Tanaka, AIAA, ICSSC2003, AIAA-2003-2288, 2003, April.
- 2) 田中, シミュレーション, 第24 巻, 1 号, pp75-82, 2005
- 3) M. Tanaka, AIAA, ICSSC2005, I000249, 2005, Sept
- 4) M. Tanaka, & T. Eguchi, AIAA, ICSSC2006, AIAA-2006-5347, 2006, Jun
- 5) 田中将義, 江口拓弥, 信学ソサエティ, B-3-3, 2006
- 6) 江口拓弥, 田中将義, 信学総全大, B-1-47, 2006
- 7) 江口拓弥, 田中将義, 信学ソサエティ, B-1-152, 2006
- 8) 江口拓弥, 田中将義, 信学総全大, B-3-12, 2007
- 9) 間舘大泰, 田中将義, 信学総全大, B-3-21, 2009