

多値変調波の高効率電力増幅の検討

日大生産工(院) ○間舘 大泰
日大生産工 田中 将義

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高効率増幅後、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。

しかしながら、HPAを効率の良い非線形領域で動作させるとスペクトラムが広がり帯域制限効果が低下する欠点がある。

そこで本研究では、HPAの高効率動作と同時に送信波形の帯域制限を実現する方法として、変調波の位相遷移を制限したOQPSK 2波を用いた空間重畳型16QAM通信システム^{(5)~(8)}を提案し、従来方式と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、送信する。受信側では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取り出す。

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

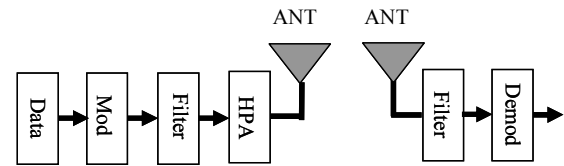
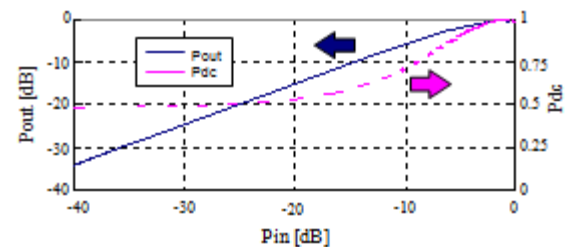


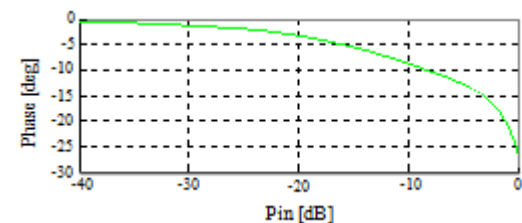
Fig.1 Conventional wireless communication system

(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、(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、動作点を下げること(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



(a) AM-AM conversion & power consumption



(b) AM-PM conversion

Fig.2 Typical HPA characteristics

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。

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。

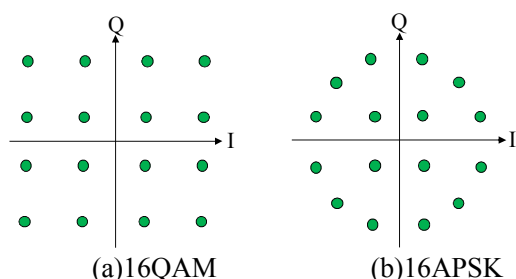


Fig.3 M-ary signal constellation

2.4 4相変調の比較

Fig.4にQPSKとOQPSKの信号点遷移を示す。QPSKは位相の遷移に原点を通過する場合Fig.4があるため振幅変動が大きい。そのため非線形領域での増幅は帯域制限効果を低下させる。

一方OQPSKは、変調ベースバンド信号が互いに1/2シンボルだけ時間的にオフセットしている。このため同相・直交成分の極性が同時に変化せず、搬送波位相が変化する場合には必ず $\pm \pi/2$ [rad] の位相変化が生じ、位相遷移上原点を通らない。従って、OQPSKはQPSKより振幅変動を小さくすることができる。

2.5 電力増幅器の入力振幅変動

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.5参照)。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振幅が変化し、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

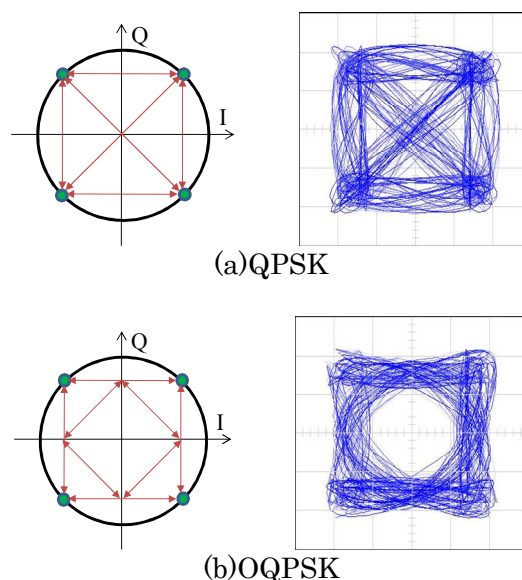


Fig.4 Signal constellation and trajectory

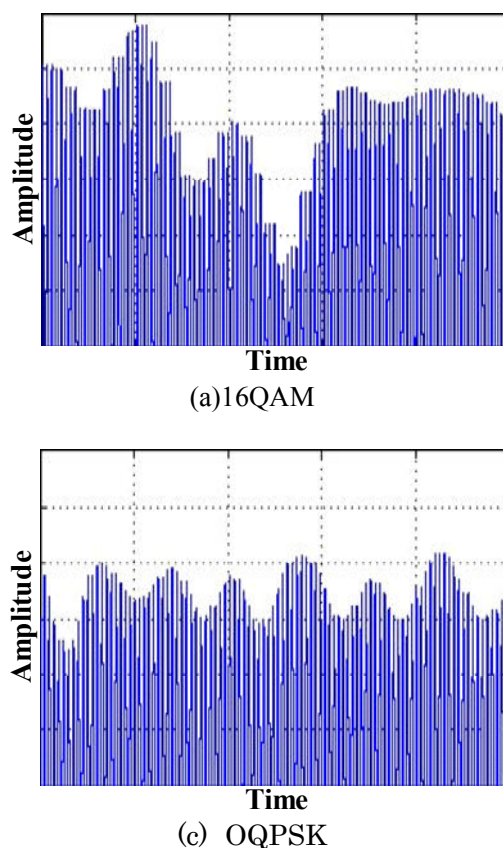


Fig.5 Signal envelope of roll-off filtered modulation wave

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.5より16QAM とOQPSKの包絡線を比較した場合、OQPSKの方が振幅変動が小さいことがわかる。

Table1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

Table1 Comparison of peak to average power ratio

	PAPR [dB]
OQPSK	3.5
QPSK	3.8
16QAM	6.6
16APSK	5.2

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．

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

OQPSK変調波ではPAPRの値は3.5[dB]，QPSK変調波は3.8[dB]，16QAM変調波は6.1[dB]，16APSK変調波は4.7[dB]と，OQPSK変調波は他の変調波に比べてPAPRが一番小さくなる事がわかる．

電力増幅時，飽和電力近傍で急激に歪む．そのためPAPRの値が小さいほど，効率の良い飽和点近傍でHPAを動作させることが可能となる．

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OQPSK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⁾．OQPSKは振幅変動が小さいことから，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．

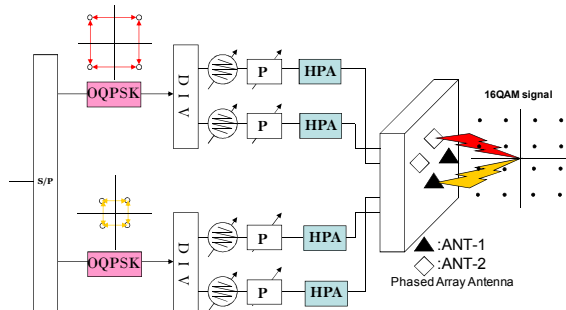


Fig.6 Principle of spatially superposed 16QAM modulation system

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，

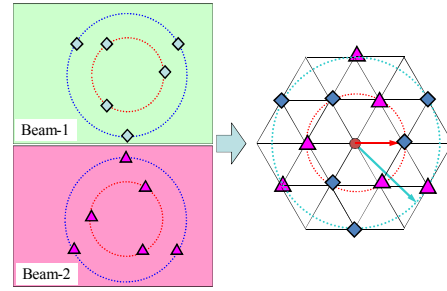


Fig.7 Configuration of 2-beam superposition with phased array system

性能劣化が発生する．したがって，空間重畳誤差の小さいフェイズドライが求められる．

Fig.7に空間重畳用アレイアンテナシステムの構成を示す．同心円状に素子を配置したアレイアンテナで構成される．両ビームとも二重円上の6つの素子で構成され，△および◇で示す素子から各々のビームが放射される．同一円周上の素子間隔は互いに等しく，また，アンテナ素子ビームの基準点は円の中心であり，2ビームの基準点が等しい．

これにより2ビーム間の重畳誤差を小さくすることができる⁽⁴⁾．

4 空間重畳型多値変調の評価⁽⁶⁾

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，S_p外乱特性，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解析した．

なお，HPAは一般的な特性であるFig.2のものをを用いた．

4.1 空間重畳実証実験

6[dB]レベルの異なる2つのOQPSK変調波を2台の発振器により送信，空間で合成する．離れた場所で信号を受信し，受信データを確認

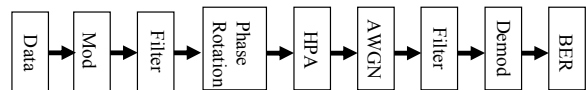


Fig.8 Analytical system of spatially superposed 16QAM

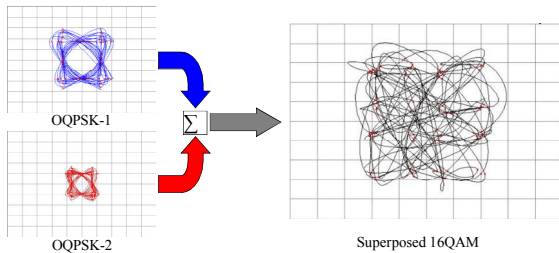


Fig.9 Experimental result of spatial superposition

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。

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。3方式ともHPA動作点を同一としており、本システムはHPAによる非線形歪の影響を受けにくいことを示している。

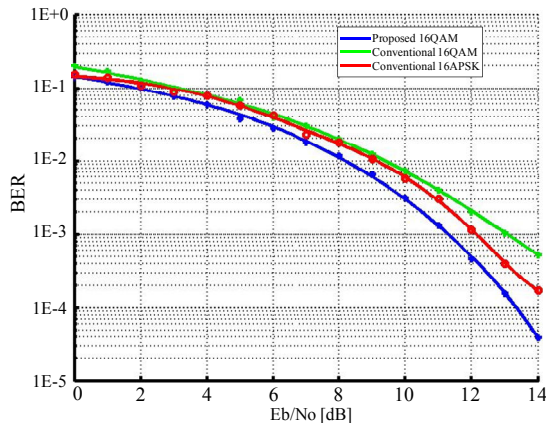


Fig.10 Comparison of Bit Error Rate

4.3 スペクトラム特性

上記4.2同様、HPA動作点を同一としたときのスペクトラム特性を評価した。その結果をFig.11に示す。本システムは位相遷移の特異性や全体のゲインミッングが小さいことから、非線形増幅時でもスペクトラムの拡大を抑制できることを示している。

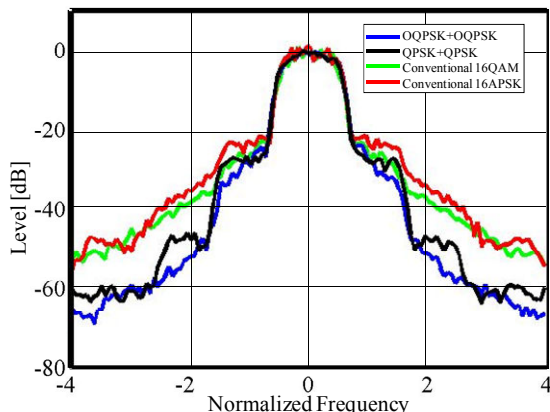


Fig.11 Comparison of output signal spectrum

4.4 PAPRと消費電力の比較

Table2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 3.5[dB] であり従来方式より低減しているのがわかる。また、同じビット誤り率としたとき、出力バックオフは従来方式では16QAMが 5.1[dB] , 16APSKが5.9[dB] 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を実現できる。

Table2 Comparison of HPA power consumption

	PAPR [dB]	OBO [dB]	Consumption Power	D/U [dB]
OQPSK+OQPSK	3.5	1.5	1	35.0
QPSK+QPSK	3.8	1.5	1	25.0
Conventional 16QAM	6.1	5.1	1.91	37.0
Conventional 16APSK	4.7	5.9	2.21	39.0

6 まとめ

本研究では、レベルが 6[dB] 異なる2つのOQPSK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提案した。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。

さらに、HPAの消費電力を検討し、その結果は同一条件(AWGN,BER)において、従来方式より消費電力を約50%低減、かつスペクトラムの拡大を抑制できることを明らかにした。

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行う。

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)M.Tanaka, H.Madate, AIAA ICSSC2010 ,AIAA-8681-317,2010,Aug
- 6)間館,田中,第42回日本大学生産工学部学術講演会,2-23,2009
- 7)間館大泰,田中將義,信学総全大,B-3-21,2009
- 8)間館大泰,田中將義,信学サエティ,B-3-32,2010
- 9)間館大泰,田中將義, 信学総全大, B-3-7,2010