75

空間電力合成を用いた重畳型 16QAM 通信システムの伝送特性*

田 中 將 義*

ABSTRACT In the progress of advancing information technology and public demand for fast, low cost and ubiquitous access to multimedia information, economical system design and higher capacity, higher data rate transmission over a band-limited channel are major concerns for wireless system construction. This paper presents a new communication system that can provide efficient use of the frequency resource and the transmitted power. The system incorporates a 16QAM modulation scheme and a phased array power combining technology. It also presents the effects of forward error correction coding (FEC) on nonlinear transmission channel and the theoretical studies on the signal transmission characteristics of the proposed system and the investigation results compared with the conventional systems. It was found from this study that the new superposed 16QAM system shows better performance than that of the conventional system on the nonlinear transmission channel usually observed in such a power amplifier. This unique configuration enables the reliable transmission of higher data rates with the efficient use of the power and the bandwidth.

1. はじめに

IT (Information Technology)技術の進展,マルチメ ディア情報への高速,低コスト,ユビキタスなアクセ スへの要求が高まる中で,ブロードバンド通信を提供 する基盤ネットワークの構築が検討されている.ワイ ヤレス通信システムは,広域のサービスエリアに対し て光ファイバ通信(FTTH),CATV(Community Antenna TeleVision),ADSL(Asymmetric Digital Subscriber Line) に比べて容易に,かつより迅速にブロードバンドアク セスを構築できる特徴を有している.それ故,アクセ スシステムとして主要な役割を演ずるためには,限ら れた周波数帯域において,大容量,高速伝送が可能で あり,かつ経済的にシステムを構築する技術が求めら れている.

ワイヤレスシステムを経済的に構築する上で,送信 電力の低減と送信用電力増幅器(High Power Amplifier: HPA)の低消費電力化が不可欠である.一方,限られた 周波数帯域幅でブロードバンド通信を可能とするため には、1シンボル当たりの伝送量の大きい多値変調方

式を適用することが有効である.しかしながら,一般 に多値変調波を用いた場合,通常使用されている4相 位相変調(Quadrature Phase Shift Keying: QPSK)波に比 べて,熱雑音あるいはHPAで発生する非線形歪の影響 を受けやすく、伝送特性が劣化する.その結果、通信 品質を保つためには、より大きな送信電力と良好な線 形特性が要求される. HPAの線形特性を改善するため に,動作点をバックオフすることが行われているが, 効率が低下する欠点がある.このため、衛星通信のよ うに電力制限となるシステムでは,多値変調と高電力 効率を同時に実現し,経済的なシステムを構築するこ とが大きな課題となっている. QPSK以上の多値変調方 式の導入例として、衛星ディジタル放送にトレリス符 号化8相位相変調(8PSK)¹¹,衛星高速データ通信に16 值直交振幅変調(16 Quardrature Amplitude Modulation: 16QAM)が導入されている²⁾. 16QAM 波は, 直交する 二つの搬送波に対して4値の振幅変調を行い、それら を加え合わせる方法³¹,あるいは二つの OPSK 変調波 を重畳する方法4)が提案されている. 16QAM波は振幅 と位相が変動するために,前者の構成ではHPAの非線 形特性により振幅と位相に歪が発生するために, HPA の線形性の良好な領域で動作させるために電力効率が 低下する課題がある5.一方,後者の方法は、二つの QPSK 波を電力増幅した後で重畳する方法であり,

— 75 —

Transmission Performance of Space Power Combined Superposed 16QAM Communication System. By *Masayoshi Tanaka* (College of Industrial Technology, Nihon University).

^{*} 日本大学生産工学部電気電子工学科

^{† 2004}年2月9日受付 2004年12月2日再受付

76

HPAの非線形特性の影響を受けない特徴があるが,同一周波数であるために,合成時に3dBの電力損失を伴う.この結果,出力と電力効率が半減する欠点を有しており,導入された例は少ない⁶⁾.

ー層の電力効率の向上を図るために,筆者は重畳型 16QAMを発展させて,フェーズドアレイを用いて空 間領域で重畳合成する方法を提案してきた⁷⁾.

そこで本論文では、まず従来技術に基づく16値直交 振幅変調(16QAM)システムのHPA 非線形歪による性 能劣化およびこれに対する誤り訂正符号技術の効果を 明らかにする.つづいてHPAの呈する非線形特性を容 易に補償可能である空間電力合成型重畳16値直交変調 (Space Power Combined Superposed 16QAM: SPCS-16QAM)の構成法ならびに非線形歪補償法を示し、白 色ガウスの熱雑音(Additive White Gaussian Noise: AWGN)環境下および非線形歪を受けた時の伝送特性 をシミュレーションにより解析する.さらに、従来シ ステムとの性能比較を行い、本提案システムの特徴を 明らかにするとともに、本システム固有の空間合成時 の利得ならびに位相の設定誤差による特性変動への影 響、およびそれらの許容誤差を考察し、本システムの 実現性を明らかにする.

2. 多值変調技術

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log₂M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.多値変調 として振幅変調(Amplitude Shift keying: ASK)、位相 変調(PSK)、直交振幅変調(QAM)があるが³⁾、8値以 上の多値変調では QAMが有効となる.QAMは線形領 域では、良好なスペクトラム効率を呈するが、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4相位相 変調(QPSK)方式を採用するシステムが多い.

QAM変調波 S(t)は, ASK と PSK を組み合わせた方 式と考えることができ,以下の式で与えられる³⁾.

 $S(t) = a(t) \cos \left[(2\pi ft) + \phi(t) \right]$ = $a(t) \cos \phi(t) \cos (2\pi ft) - a(t) \sin \phi(t) \sin (2\pi ft)$ = $x(t) \cdot \cos (2\pi ft) - y(t) \cdot \sin (2\pi ft)$ (1) ただし,

 $x(t) = a(t)\cos\phi(t), \quad y(t) = a(t)\sin\phi(t)$ (2)

であり, $a(t) \ge \phi(t)$ はそれぞれ,変調波の振幅,位相を 表し,x(t),y(t)は複素包絡線の実部と虚部の成分であ り,fは搬送波の周波数を示す.

本論文では、QAMの中で特に今後衛星通信に導入が 多くなると考えられる 16 値 QAM (16QAM)に焦点を 当て、HPAの高効率動作を実現する新システム構成を 示し、その特性を明らかにする.

3. 電力増幅器の非線形特性

ワイヤレス通信においては、送信機の最終段に位置 する電力増幅器(HPA)で信号のレベルを高め、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.図1に20W 2.5GHz帯固体電力増幅器 (Solid State Power Amplifier: SSPA)の非線形特性なら びに効率の測定データを示す.入力レベル Pinの増加 にしたがい、利得の低下による出力 Poutの減少と位相 が回転することを示している.さらに、飽和点近傍で





— 76 —

シミュレーション 第24巻第1号

効率が最大になることが分かる.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分かる.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⁵⁾.

伝送特性を解析する上で, 非線形特性として振幅圧 縮(AM-AM変換)と位相回転(AM-PM変換)を考慮しな ければならない. 表1に種々のバックオフ点における 利得圧縮, 位相変動, 非線形歪の度合いを表す指標で ある三次相互変調積(IM3)⁵⁰のレベルを示す.

4. 誤り訂正符号(FEC)の効果

ディジタル伝送では、伝送特性の劣化は、ビット誤 りとして表される.伝送上で発生する誤りを低減する ために、伝送信号に適当な冗長を付加し、誤り検出、訂 正することが行われる.誤り訂正(Forward Error Correction: FEC)は、雑音や干渉等に対する耐性を高め る上で効果的であり、伝送特性が改善される⁸⁰.そこ で本検討では、熱雑音と非線形歪みによる誤り訂正を 目的として、畳み込み符号と短縮型Reed-Solomon符号 をインタリーバを介して連接した符号化を検討対象と した.図2にシミュレーションに使用した畳み込み誤 り訂正符号(符号化率R=3/4)の構成を示す⁹⁰.表2に畳 み込み符号と短縮型Reed-Solomon符号の諸元を示す.

表1 種々のバックオフ点における HPA (SSPA)の特性 (図1より算出)

Output Back off OBO [dB]	Gain compression [dB]	Phase shift [deg]	Third Inter- modulation IM ₃ [dB]
0	-6	11.1	8
-1	-2.8	8.4	12.5
-2	-1.9	7.0	14.5
-3	-1.4	5.8	17



図2 シミュレーションに用いた符号化・変調部の構成

5. 従来技術のシステム構成と非線形歪の 影響

従来システムの16QAM 変調を用いたシステムの構成を図3に示す.送信データd1,d2,d3,d4に基づいて直交する搬送波を各々4レベル(2ビット)の振幅に変換(AM Mod)後,合成してHPAで電力増幅しアンテナ(ANT)より送信する.図4(a)に16QAM 変調波の信号配置を示す.シミュレーションに用いたシステム構成を図5に示す.Reed-Solomon(R-S)外符号器,インタリーバ,畳み込み内符号器,変調器,HPAを模擬する非線形素子,加法性白色ガウス雑音通信路(AWGN),復調器,Viterbi復号器,デインタリーバ,外復号器から構成される.

従来構成において、図2及び表2に示すFECを使用 した時の線形動作時のビット誤り率(Bit Error Rate: BER)特性と1ビット当たりのエネルギー/雑音電力密 度比(Eb/N₀)の関係をシミュレーションにより求めた結 果を図6に示す.シミュレーションでは、Monte Carlo 法により、ビット誤り率(BER: Bit Error Rate)を算出 して伝送特性を評価した¹⁰⁾.すなわち、"0"、"1"のデー タ信号をランダムに発生させ、誤り訂正符号化後に2 ビット1を1シンボルとして QPSK 変調を行った、熱 雑音として白色ガウス雑音(AWGN)を発生させて信号

表2 使用した誤り訂正符号の諸元

符号	種類	生成多項式/生成行列
外符号	短縮型Reed-Solomon (204,188,T=8)	$G(X) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$
内符号	量み込み符号 符号化率R=1/2 拘束長K=7	$G_1(D) = D^6 + D^5 + D^4 + D^3 + 1$ $G_2(D) = D^6 + D^4 + D^3 + D + 1$



図3 従来技術の16QAM 変調を用いたシステム構成









に重畳し、この印加雑音量を変化させて異なる Eb/N_o を作り出している、全受信ビット数、送信ビットと受 信ビットのビット誤り数からビット誤り率(BER)を求 めた.その際、確率分布の精度を高めるために誤りの 発生数が100以上となるような十分なビット数を送信 している.

図6には、FECを使用しない時の特性も併せて示し ている.BER=1e-5において、符号化利得 3.2dB が得 られている.さらに、HPAの非線形特性による伝送特 性劣化を明らかにするために、図1に示した非線形特 性を使用した.QAM 波では、HPA 入力レベル *S*(*t*)が 時間的に変動するため、下記の値で正規化した.

$$\hat{S}(t) = S(t) / \sqrt{10} \tag{3}$$

正規化後の平均電力を種々のバックオフ点(0dB 出力 バックオフ(0dB-OBO: Output Back Off), -1dB-OBO, -2dB-OBO, -3dB-OBO)に設定して,先に示したシ ミュレーション法により伝送特性を評価した.図4(b) は非線形動作(0dB-OBO)時の信号配置図を示してい る.図1に示した非線形特性のAM-AM, AM-PM変換 の影響により,原点に近い信号点 "5"は,位相回転が 小さく,振幅が増幅されるが,振幅の大きい信号点 "0" は位相回転とともに振幅が圧縮されるため,図4(a)に 示す信号配置から変形することが分かる.



図6 従来の 16QAM システムの線形動作時の BER 特性



図7 従来の16QAM システムの非線形動作時のBER 特性

非線形動作時における BER 特性と Eb/N_0 の関係を図7に示す.BER 特性は非線形歪により著しく劣化すること, -3dB-OBO 動作点では Eb/N_0 は線形動作に比べて, 0.7dB劣化(BER=1e-5の時)することが分かる.すなわち,非線形動作時に線形時と同等の特性を達成するためには, FEC のみでは非線形歪を補償するには不十分であることを示している.このため,前置歪器等の非線形補償回路¹¹¹が必要となる.

6. 空間合成重量型16QAM(SPCS-16QAM)

従来の16QAM 波は図3に示したように二つの振幅 変調器(AM Mod)を用いて実現されている.これに対 して重畳型16QAMは図8に示すように,6dBのレベル 差の有る二つのQPSK 変調器で実現可能である⁴⁾.こ れをマイクロ波回路により実現した構成を図9に示す. この構成では、一定の振幅を有する二つのQPSK 波を 別々のHPAに入力するために、HPAの非線形領域で動作 させることが可能となる.しかし、HPA出力後の合成 すべき2波の周波数が同一であるために、ハイブリッ ド回路を用いて合成すると、回路損失を理想状態の無

----- 78 -----

シミュレーション 第24巻第1号

損失と仮定しても 3dB の挿入損失が発生する¹²⁾.この 結果,合成出力ならびに電力効率が半減する欠点を有 している.この問題点を解決するために,以下に示す 空間電力合成による重畳型16QAM(SPCS-16QAM)を検 討した.

6.1 システム構成

空間合成技術を適用して重畳型16QAMを実現する 具体的なシステム構成を図10に示す.通常の二つの QPSK 変調器,合成時の利得と位相を調整する利得可 変器(VG)と位相可変器(VP),電力増幅器(HPA)と フェードアレイアンテナから構成され,二つのQPSK 変調器の出力は可変位相器を通過後,別々に電力増幅 される.その後,出力信号は,フェードアレイアンテ ナに給電され,空間で電力合成される.空間での電力 合成は,図9に示したマイクロ波回路による合成と異 なり,理想状態では回路損がなく効率的に合成が可能 となる.

二つのQPSK 変調器からの信号波は一定振幅である ため,別々のHPAで増幅される際に,図1(b)に示す入 カレベルに対応する位相回転のみを考慮すればよい.

6.2 位相補償後の伝送特性

図1(b)に示すAM-PM変換に基づく位相回転を補償 するために、図10に示すVPを用いる.

図3に示す従来システムでは、二つの独立の波形が 振幅変調後、合成されるため、その包絡線は振幅変動 している.その結果、図4(b)に示すように信号配置が 一様に位相回転しないため、位相回転を補償すること が困難であった.一方、図10に示す空間重畳型16QAM では、二つのQPSK 波の振幅は一定であり、各々独立 に位相回転を補償することが容易である.この結果、 HPAを非線形領域で動作させても、個別の位相補償に より元の信号配置を維持することが可能となる.完全 に位相回転を補償した理想状態では図4の(a)に示す線 形特性を実現できるため、図6に示す線形動作時の伝 送特性と同一となる.なお、今回の検討では、図10に 示すQPSK変調器とHPAの間に帯域制限用のフィルタ を省略している.ロールオフフィルタ等により帯域制 限を施すとQPSK の包絡線が変動するが、ビット判定



図8 二つの QPSK 波の重畳による 16QAM の実現方法



VP:Variable Phase Shifter

図9 マイクロ波回路により実現した重畳型 16QAM シス テムの構成図



図10 空間合成重畳型 16QAM (SPCS-16QAM) システムの構成図

タイミングでの振幅は常に一定であるので,このタイ ミングでの振幅における位相調整を行うことにより補 償が可能となる.ただし,帯域制限の後にHPAの非線 形歪を受けるために,帯域外のスペクトラムが増大す る欠点がある¹³⁾.

このように本システムでは、従来方式で用いられて いる複雑な4値の振幅変調器が不要となり、変調器へ の要求条件が緩和される上に、変調器の後段に位置す るHPAの位相回転を容易に補償できるため、電力効率 の良好な飽和点近傍でHPAを動作させることが可能と なる.

6.3 重量時の利得偏差と位相偏差の伝送特性に及 ぼす影響

空間重畳型16QAMでは,独立に生成された二つの QPSK 変調波を空間で合成して16QAM信号が合成さ れる.このために,送信系の2系統の経路差,2系統の アンテナの配置精度(中心の間隔),受信系の位置と放 射ビーム中心(ボアサイト)との位置関係により,合成 時に利得と位相に誤差が発生する.図11は,静止衛 星(送信と受信間の距離:36,000km)を対象として,周 波数2.5GHzにおいて,二つの送信アンテナ間の距離 (波長で正規化)および受信アンテナのビーム中心から のオフセット距離に対して,2波の位相誤差を求めた ものであり,最も位相差が大となる送信アンテナ間の 変位と受信アンテナのオフセットが同一方向にある場 合を示している.サービスエリアの周辺に行くにした がい, 誤差が増加するが, 半径100km以下のサービス エリアを有するマルチビームシステムにおいては, 位 相誤差を10度以下にすることが可能である. これらの 合成誤差による伝送特性の劣化を明らかにするために, 先に示した方法と同じシミュレーション法により, 種々の誤差時の伝送特性を解析した. 図12は, Eb/N₀ =12dBにおいて, 誤り訂正(FEC)を行わない時と行っ た時の利得と位相設定誤差に対するBER特性の劣化を



図 11 二つの送信アンテナ間隔と受信アンテナの中心から のオフセットによる合成位相誤差



図12 空間合成重畳型16QAMの利得・位相設定誤差によるBER特性への影響(誤り訂正有りとなし)(Eb/N_=12dB)

—— 80 ——

シミュレーション 第24巻第1号

示している.利得設定誤差と位相設定誤差の増加につ れて,BER特性が劣化することが分かる.また,誤差 がある程度以下であれば,FECによりBER特性が格段 に改善されることが分かる.一方,前述のFECを適用 した場合の種々の誤差条件におけるEb/N₀とBERの関 係を図13に示す.図12と13からFECは設定誤差に伴 う誤りを訂正する上で有効であることが分かる.これ らの効果をもとに,以下に消費電力の比較を行う.

7. 評価と考察

空間重畳型16QAMでは、二つのHPAを必要とする が、それぞれ電力効率の良好な飽和点近傍での動作が 可能となる.一方,従来のシステムでは,BER特性の 劣化を防ぐためにHPAを出力バックオフさせる結果, 電力効率の低下を招いている.たとえば,-3dB-OBO 点では,HPAの効率は,図1(a)に示すように飽和点に 比べて約半分に低下する.

表3は同一のBER特性(BER=1e-4)を実現する際の 空間重畳型16QAMと従来システムの電力効率と消費 電力を比較したものであり,消費電力は,従来方式に おいて-3dB出力バックオフ(-3dB-OBO)した時の値 に対する相対比で示している.比較に使用したHPAの 効率は,図1(a)に示した測定データ値を使用した.従 来方式に比べて,空間重畳型16QAMでは,非線形特



図13 空間合成重畳型 16QAM の利得・位相設定誤差による BER 特性への影響(誤り訂正あり)

	1	1	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	<u> </u>
Scheme	Condition	Eb/N ₀ [dB]	HPA efficiency(%)	Power Consumption
			(From Fig.1 (a))	(relative)
Conventional	-1dB OBO	13.2	32	1.2
16QAM	-2dB OBO	11.5	25	1.0
	-3dB OBO	10.5	20	1.0
Superposed	Phase error:6deg	13.5	40	1.0
16QAM	Gain error:2dB			
	Phase error:6deg	12.4	40	0.77
	Gain error:1.5dB			
	Phase error:1deg	11.2	40	0.59
	Gain error:1dB			
	Phase error:0deg	9.8	40	0.43
	Gain error:0dB			

表3 空間合成重畳型 16QAM と従来方式 16QAM の電力効率,電力消費の比較

----- 81 -----

性が補償される結果,必要とする Eb/N_oが低下し,送 信電力が小さくてすむこと,併せて電力増幅器を飽和 点近傍の電力効率が良好な領域で動作させることがで きるため,消費電力を低下させることができる.具体 的には,空間電力合成時の利得設定誤差を1.5dB,位 相設定誤差を6度に抑えると従来システム構成に比較 して,消費電力を20%以上低下させることが可能とな る.

8. まとめ

本論文では、空間電力合成技術を用いた重畳型 16QAM 変調システムを提案し、その伝送特性をシ ミュレーションにより解析し、従来システムとの比較 検討を行った.本システムは、従来の二波の直交する 振幅変調波を一括で電力増幅する方法や回路で2波の QPSK 波を合成する方法と異なり、通常の QPSK 変調 波の二波を空間で電力合成する方法である.この結果、 HPAの非線形補償が容易であり、HPAを飽和点近傍で 動作させることが可能となり、さらに電力合成損が小 さくなり、従来の16QAM 伝送システムに比べて電力 効率が改善されることを明らかにした.さらに、具体 的なシステム例をもとに、空間合成時に許容される利 得と位相の誤差を明らかにした.

本システムは, HPAの飽和動作に伴い帯域外スプク トラムに対する対策が必要となるが,高速伝送を高効 率で実現可能であり,特に周波数ならびに消費電力に 制限のある衛星通信システムを経済的に構築するうえ で有効であると考えられる.

参考文献

- 1)加藤久和,橋本明記,松村肇,浜田浩行:衛星ISDBの伝送 方式, No. 51, NHK 技研 R&D, 5月(1998)
- A. Franchi, E. Trachtman, L. Christodoulides, J. Sengupta: Multimedia via Inmarsat, Multimedia, IEEE, 6-4, Oct.-Dec. 15/19 (1999)
- L.W. Couch: Digital and Analog Communication Systems, 352/356, Prentice-Hall (2001)
- K. Miyauchi, S. Seki, and H. Ishio: New technique for generating and detecting multilevel signal format, IEEE Trans. Com., vol. COM-24, 263/267, Feb (1976)
- L.W. Couch: Digital and Analog Communication Systems, 251/ 256, Prentice-Hall (2001)
- 6) 斉藤洋一: ディジタル無線通信の変復調, 電子情報通信学会, 119/123 (1996)
- M. Tanaka: New satellite communications system using power combined M-ary modulation technology, AIAA ICSSC, AIAA-2003-2288, April (2003)
- B. Sklar: Digital Communications, 382/468, Prentice-Hall (2001)
- A. Viterbi J. Wolf, E. Zehavi, and R. Padovani: A pragmatic approach to trellis-coded modulation, IEEE Communications Magazine, 11/19, July (1989)
- J. Proakis and N. Salehi: Contemporay Communication Systems Using MATLAB, Brooks/Cole, 183/223 (2000)
- J. Vuolevi, Distortion in RF Power Amplifiers, 46/48, Artech House Publishers (2003)
- 12) 宮内一洋,山本平一:通信用マイクロ波回路,電子情報通 信学会,58/62(1999)
- 13) 斉藤洋一: ディジタル無線通信の変復調, 電子情報通信学 会, 145/152(1996)

— 82 —