

# 世界最高の周波数利用効率を実現する 超多値変調方式用位相雑音補償方式の開発

佐々木 英作 神谷 典史

## 要旨

マイクロ波通信システムは世界各地でモバイルバックホール用途に使われています。近年のトラフィック増大に対し、帯域幅が制限されているマイクロ波帯において更なる大容量化を実現するためには、1024QAMといった周波数利用効率の高い超多値変調方式の導入が必要となります。しかし、それには位相雑音の克服という大きな課題がありました。本稿では、超多値変調方式に対する位相雑音の影響と、安定した伝送品質を保つために新たに開発した位相雑音補償技術について紹介します。本技術の開発によって、位相雑音耐性を従来方式より10dB以上改善し、世界最高の多値変調方式である2048QAMを実現しました。



超多値変調方式／モバイルバックホール／位相雑音／搬送波同期／周波数利用効率／PLL／PSAM／誤り訂正方式

## 1. はじめに

携帯電話網の基地局をつなぐネットワークであるモバイルバックホールにおいては、世界各地でマイクロ波帯の無線通信システムが大きな役割を果たしています。NECは、これらの無線通信システムを「PASOLINK (パソリンク)」の名称で世界各国の通信事業者様に納入しています。

この領域では、スマートフォンの普及といった近年の急激なトラフィック需要の増加に伴い、伝送容量の大容量化への要求が高まっています。

本稿では、伝送容量拡大の手段の1つである変調方式の多値化に伴う要素技術開発として、位相雑音補償技術を取り上げ、その内容について紹介します。

## 2. 変調方式多値化の課題

### 2.1 マイクロ波帯の条件と現状

通常、モバイルバックホールには、周波数利用免許が必要とされる6GHzから42GHzの帯域が用いられます。本稿では、この帯域をマイクロ波帯と呼ぶことにします。

このマイクロ波帯は、降雨減衰の影響を受けるものの、キロメートル単位の比較的長い距離を安定した品質で伝

送できるという特徴があるため、広くモバイルバックホール用途に使われています。

マイクロ波帯では、公的な規格によって1つの信号で使用できる帯域幅が決められており、広い帯域幅がとれる高周波数帯でも56MHz（最近の一部の高周波数帯では112MHzに拡大）が上限とされています。シャノンの定理から分かるように、伝送容量を拡大する最も基本的な手段は帯域幅の拡大ですが、帯域幅を制限された場合には、次の手段として変調方式の多値化が必要になります。

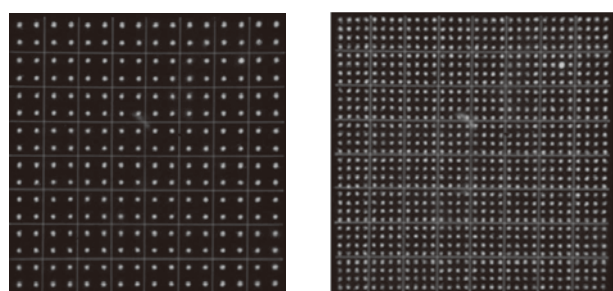
変調多値数を2倍に上げることで、一度に伝送できるビット数を1つ増加させることができるので、伝送容量とともに周波数利用効率（1Hz当たりの伝送容量）も向上させることができます。マイクロ波の使用には、帯域幅に応じた電波使用料を各国監督官庁に支払う必要があるため、周波数利用効率の向上は、通信事業者にとってはシステムの運用経費削減という観点からも利点になります。マイクロ波帯では変調方式の多値化が進み、既に256QAM（8bit/symbol）といった多値変調方式が一般的になっています。256QAMを用いた場合、一般的な値として伝送容量で350Mbps、周波数利用効率で7bps/Hz程度の数値になります。

## 2.2 超多値変調方式の課題

このような状況から更に変調方式の多値化を進めるためには、図1 (b) に示す1024QAM (10bit/symbol) といった超多値変調方式を導入する必要があります。このような超多値変調方式を持つ課題について、以下に説明します。

変調方式を1段階上げる、つまり変調多値数を2倍にすると、平均電力を一定とした場合に信号点間隔が元の変調方式に対し $1/\sqrt{2}$ に縮まるため、同じビット誤り率 (Bit Error Rate : BER) を得るための所要CNR (Carrier to Noise power Ratio) は3dB上がり、SNR (Signal to Noise power Ratio) 有限の条件下では実現の難易度が上がります。この所要CNRの増加は、誤り訂正方式の利得を向上させることで圧縮できるため、これまで誤り訂正方式の高度化が図られ、現在では非常に高い符号化利得を持つLDPC (Low-Density Parity-Check) 符号が採用されるに至っています。

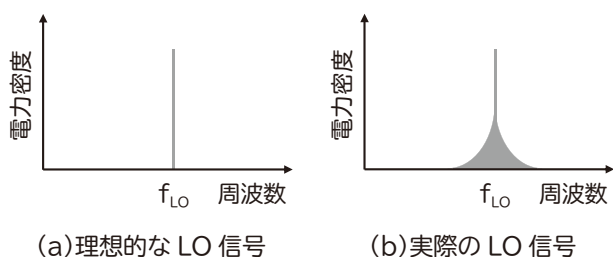
これとは別の課題として、位相雑音による伝送品質の劣化があります。通常、マイクロ波の通信機は、ベースバンド帯域で送信すべきデジタル信号に応じたQAM変調を行い、それをRF周波数帯に周波数変換する構成をとっています。その周波数変換は、変調信号とRF周波数の正弦波



(a) 256QAM

(b) 1024QAM

図1 多値QAM変調方式の信号点配置



(a) 理想的な LO 信号

(b) 実際の LO 信号

図2 LO信号のスペクトラム

信号 (Local Oscillator : LO) との乗算で実行されます。このLO信号は、図2 (a) のような理想的な単一周波数の信号ではなく、図2 (b) のように位相雑音と呼ばれる不要な周波数成分を持っており、乗算後のRF帯の変調信号には、この位相雑音が相加されてしまいます。

受信側では送信側と逆の操作を行いますので、更に受信側LO信号の位相雑音も加わり、復調されたベースバンドQAM信号には、図3に示すような位相方向の変動が生じます。

これは当然、伝送誤りの発生要因になりますが、位相雑音特性自体の改善は装置製造コストの上昇を招くため許されません。図4に示すPLL (Phase Locked Loop) による従来の復調器の搬送波同期回路には、位相雑音を抑圧する特性がありますが、所要CNRが高くなる超多値変調方式に対して、十分な抑圧量を確保することは困難です。特に受信信号に含まれる雑音が多い場合、同期回路制御のための情報に含まれる誤りが多くなる結果、制御が不安定になり、誤り訂正が効かないバースト誤りが発生します。先に述べた誤り訂正利得の向上によって、搬送波同期回路の安定動作を要求される環境がより低CNR方向にシフトした結果、従来のPLL回路で超多値変調方式の搬送波同期を安定に保つことが困難であるという課題が、より深刻になってしまいました。

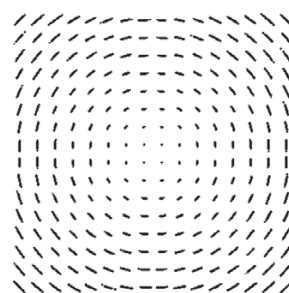


図3 位相雑音があわった256QAM復調信号

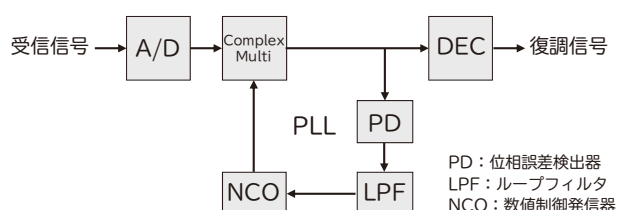


図4 PLLによる従来の搬送波同期回路

### 3. 新たな位相雑音補償方式の開発

#### 3.1 PSAM方式の導入

通常の送信信号だけから制御情報を得るPLL回路を用いた搬送波同期回路の理論的な検討結果から、PLLパラメータの最適化を行っても、バーストエラーの発生を抑えることはできないことがわかりました。この結果から、低CNRの条件下で安定した制御を行うためには、数%の伝送効率低下を許容してPSAM (Pilot Symbol Assisted Modulation) 方式の導入が必要と判断しました。図5に、PSAM方式の搬送波同期回路ブロック図を示します。

PSAM方式は、送信側であらかじめ定められた周期で既知のQPSK信号(パイロット信号)を超多値変調方式の送信信号間に挿入し、受信側では抽出したパイロット信号だけを情報源とし位相制御を行うものです。既知信号ゆえ、高レベルの熱雑音が加わった状態でも位相誤差を正確に知ることができるため、位相制御の安定化を達成することができます。

一方、制御情報の更新速度がパイロット信号の周期分の1に落ちるため、高周波の位相雑音による高速の位相変動には追従できません。そのため、超多値変調方式に対しては位相ずれによるシンボル判定誤りが多発し、エラーフリー伝送は実現できません。

#### 3.2 誤り訂正を組み込んだPLL回路

PSAM方式の導入で低CNR条件下での同期の安定化は図れるものの、BERを低く抑えることはできないため、他の手段を組み合わせることが必要です。他の手段としてPSAM回路の後段にPLL回路を組み合わせると、元のPLL回路の問題点が再現してしまいます。そこで、PLL回路の問題点であった位相情報源のシンボル判定誤りを、誤り訂正回路(DEC)によって低減することを考案しました。図6に新たな搬送波同期回路の全体構成を示します。

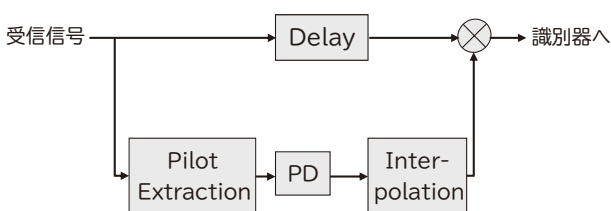


図5 PSAM方式搬送波同期回路ブロック図

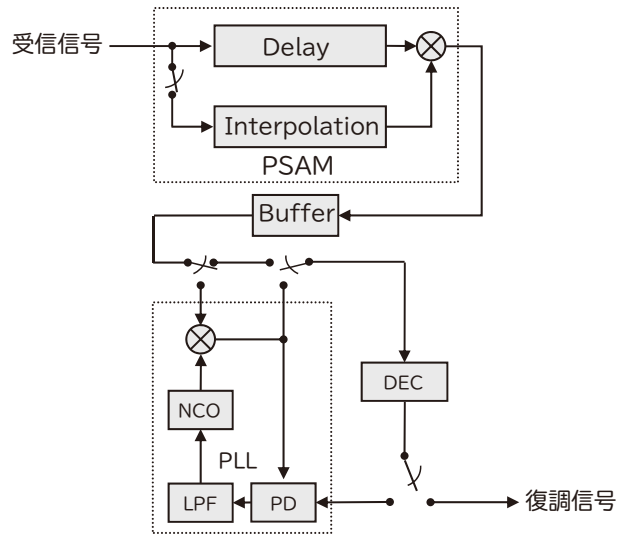


図6 新搬送波同期回路ブロック図

PSAM回路出力信号を、まずDECに通します。誤り訂正効果により、シンボル判定の誤りは低減されます。この結果から求めた位相誤差情報をPLL回路に入力し、PSAM出力信号の位相制御を行います。これにより、PSAM出力信号の位相ずれは改善されます。この結果を、再度DECに入力し、シンボル判定の誤りを低減します。このサイクルを繰り返すことで、バーストエラーを引き起こすことなく復調信号の位相制御の精度を上げていく、つまり結果的にBERを低減することができます。

DECを通常より高速に動作させることにより、連続的に信号を受信しながら、複数回のサイクルを回すことが可能です。また、いったん蓄積した受信信号に対して処理を行っているため、PLLのようなフィードバック制御で問題となるループ内遅延の増加による特性劣化はありません。

以上、説明したように、前段のPSAMで同期を安定化し、後段のPLL+DECの反復動作により位相制御の高精度化を図ることで、超多値変調方式の復調特性を改善することができます。なお、PSAMを除いた後段の回路だけでは低CNR条件下での同期が安定しないため、元の課題がそのまま残ってしまいます。

#### 3.3 特性評価結果

図7に、1024QAMで測定した位相雑音耐力特性の実測値を示します。従来方式に比べ、位相雑音耐力が10dB以上改善し、かつ基礎的なCNR値が1dB以上改

善しています。この結果から、LO信号の位相雑音特性のばらつきを考慮しても、十分安定した特性を得られることが確認できました。

図8に、位相雑音レベル-100dBc/Hzの系で測定した2048QAMのCNR対BER特性を示します。CNR増加に対してBER低下が止まってしまうエラーフロア発生の可能性がないことが分かります。

#### 4. むすび

以上、マイクロ波超多値変調方式における位相雑音の

影響と、その抑圧のために開発した位相雑音補償方式について紹介しました。本方式は、これまでのマイクロ波通信システム開発でNECが培ってきた、変復調技術と誤り訂正技術を組み合わせることで実現できたものです。

本方式の開発によって、マイクロ波帯の標準的な変調方式である256QAMに対し、伝送容量と周波数利用効率を25%向上できる1024QAM、同38%向上できる2048QAMの商用化を、コスト上昇要因となるLO信号の特性改善を行うことなく実現しました。

NECは、今後も世界の通信インフラの高度化に寄与する製品開発を行ってまいります。

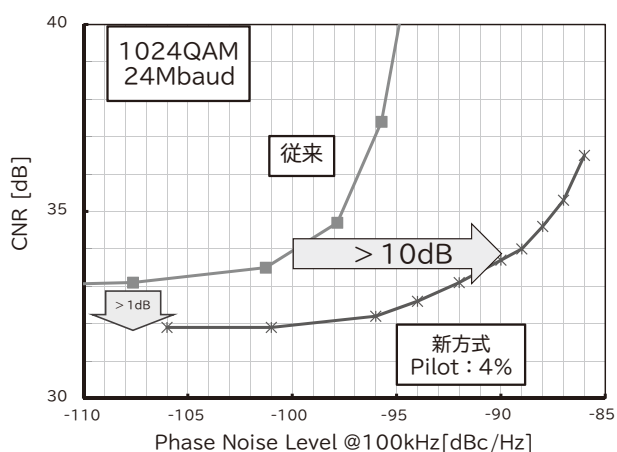


図7 位相雑音対CNR@BER=10<sup>-6</sup> (実測)

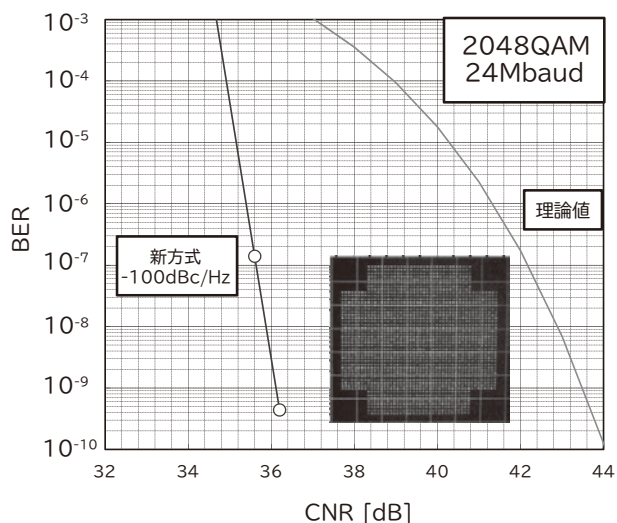


図8 2048QAM CNR対BER特性 (実測)

#### 参考文献

- 1) N. Kamiya, E. Sasaki: Pilot-symbol assisted and code-aided phase error estimation for high-order QAM transmission, IEEE Trans. Comm., vol.61, no.10, pp.4369-4380, 2013.10
- 2) A. Spalvieri, L. Barletta: Pilot-aided carrier recovery in the presence of phase noise, IEEE Trans. Comm. Vol.59, no.7, pp.1966-1974, 2011.7

#### 執筆者プロフィール

佐々木 英作

モバイルワイヤレスソリューション  
事業部  
主席主幹

神谷 典史

クラウドシステム研究所  
主幹研究員

#### 関連URL

PASOLINKシリーズ

<http://www.nec.com/en/global/prod/nw/pasolink/>



# NEC 技報のご案内

NEC 技報の論文をご覧くださいありがとうございます。  
ご興味がありましたら、関連する他の論文もご一読ください。

NEC技報WEBサイトはこちら

NEC技報(日本語)

NEC Technical Journal(英語)

## Vol.68 No.3 新たな価値創造を支えるテレコムキャリアソリューション特集

新たな価値創造を支えるテレコムキャリアソリューション特集によせて  
変革期を迎えたテレコム産業に向けた NEC のソリューション

### ◇ 特集論文

#### ネットワークに新たな価値を提供する SDN/NFV ソリューション

SDN/NFV ソリューション技術体系  
ネットワークのインテリジェントな運用管理を実現する MANO 技術  
vEPC におけるユーザープレーン制御の実現  
付加価値の高い MVNO ビジネスを支援する vMVNO-GW  
通信事業者向け仮想化 IMS ソリューションへの取り組み  
NFV で実現する IoT ネットワーク  
通信事業者向けトランスポート SDN ソリューション  
通信事業者の収益向上を実現するトラフィック制御ソリューション (TMS)  
トラフィック制御ソリューション (TMS) の要素技術

#### トラフィックの増大に対応するトランスポートシステム

大規模データセンター向け OpenFlow イーサネットファブリック  
増大するトラフィック対応に向けた 10G-EPON の開発  
大容量基幹ネットワークを支える要素技術とマルチレイヤ統合トランスポート装置  
光デジタルコヒーレント通信技術の開発  
光海底ケーブルシステムを支える大容量光伝送技術

#### 無線アクセスの高度化に対応するワイヤレスソリューション

ロシアでの通信事業者向けネットワーク最適化プロジェクト  
サウジアラビアモバイル通信事業者向け大容量無線伝送システムを実現する iPASOLINK ソリューション提案  
世界最高の周波数利用効率を実現する超多値変調方式用位相雑音補償方式の開発  
モバイル通信の高度化を支える高密度 BDE

#### 通信事業者向け ICT ソリューション

NEC Cloud System の競争力強化と OSS モデル構築 SI 技術への取り組み  
会話解析ソリューションの通信事業者への適用  
止まらないキャリアシステム開発への取り組み  
通信事業者の業務を下支えするビッグデータ分析基盤

### ◇ 普通論文

セキュアな重複排除型マルチクラウドストレージ「Fortress」

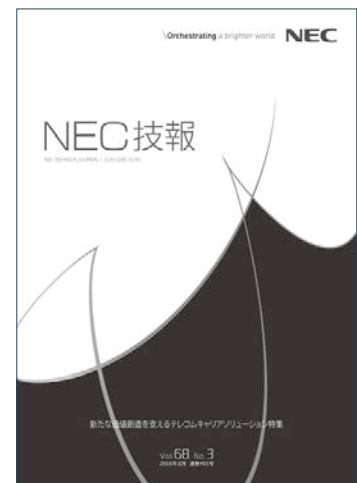
### ◇ NEC Information

C&C ユーザーフォーラム & iEXPO2015 Orchestrating a brighter world

基調講演  
展示会報告

### NEWS

2015 年度 C&C 賞表彰式開催



Vol.68 No.3  
(2016年3月)

特集TOP