

マイクロ波無線装置の超多値変調技術の開発

Development of Ultra-Multilevel Modulation Technology for Microwave Radio Equipment

田中 康 英 船山 拓 也 山北 晃 大 加藤 賢 晃
Yasuhide Tanaka Takuya Funayama Akihiro Yamakita Masaaki Kato

要 旨

マイクロ波無線システムへの導入が進む超多値変調方式はデジタル信号の高効率伝送を可能とするが、超多値変調方式の具現化に際しては、無線装置の局部発振回路において発生する位相雑音、パワーアンプにおける非線形歪、更には電波伝搬の過程で生じるマルチパスフェージングなどの影響を極小化することが必須の課題となる。各々の課題を解決するため、当社は永年にわたり培ってきた技術を活かし、位相雑音補償技術、DPD（デジタル信号処理技術により電力増幅器の出力信号の歪を推定し、逆特性の歪をあらかじめ与えて歪を補正する技術）、適応等化技術について性能向上の開発を行い、超多値変調方式への適用を実現した。そのうえで各々の技術を既存の製品（無線システム）に適用して総合評価を行い、4096QAM方式においても高い総合特性が得られることを確認した。各々の技術の開発により既存製品群の高性能化を具現化し、マイクロ波無線システムによる大容量伝送の基盤を築いた。

Abstract

The ultra-multilevel modulation technique, which advances to be introduced into microwave radio systems, enables the high efficiency transmission of digital signals. However, when the ultra-multilevel modulation technique is realized, the essential issues are to minimize the effects of phase noise generated in the local oscillator of the radio unit, non-linear distortion of the power amplifier, and multipath fading that occurs in the process of radio wave propagation. To solve each issue, JRC has developed to improve the performance of phase noise compensation technology, DPD (Digital Pre-Distortion: Technology that estimates the distortion of the output signal of a power amplifier using digital signal processing technique and corrects the distortion by giving the distortion of the inverse characteristics in advance) and adaptive equalization technology by utilizing the technology cultivated over many years, and has realized the application to the ultra-multilevel modulation technique. Moreover, JRC applied each technology to existing products (radio systems) and conducted a comprehensive evaluation, and confirmed that the 4096QAM system also obtained high comprehensive characteristics. Through the development of each technology, JRC has realized the high performance of the existing product group and has laid the foundation for large-capacity transmission using a microwave radio system.

1. まえがき

携帯電話などの移動体通信ネットワークに利用されるマイクロ波無線システムは、近年のトラフィック増大を受け、周波数の利用効率を上げることで大容量伝送を可能とする超多値変調方式の導入が進んでいる。また、マイクロ波無線システムは防災通信システムの基幹部でもあり、伝送の情報量増加や即時性へのニーズの高まりを受けたシステムの高度化を目的として超多値変調方式の導入が求められている⁽¹⁾⁽²⁾。このように、マイクロ波無線システムにおける超多値変調技術は、社会インフラや防災通信システムを高度化するうえで重要な位置付けにある。マイクロ波無線システムにより高度化された防災通信システムの例を図1に示す。



図1 マイクロ波無線システムにより高度化された防災通信システム

Fig.1 Disaster prevention wireless communication system applying microwave wireless device

2. 多値変調の課題

2.1 QAMとは

QAM (直交振幅変調) は位相が直交する2つの波を合成して搬送波とし、それぞれに振幅変調を施して情報を伝送する変調方式であり、単純な位相変調や振幅変調などと比べデータの伝送効率が低い。伝送効率は、多値数(“QAM”に前置される値)が大きいほど高くなる。図2に128QAM方式と4096QAM方式の信号点配置図を示す。多値になるほどシンボル間の距離が小さくなり、1シンボル当たりの伝送可能データ量が大きくなる。現在、最も伝送効率が高い公共業務用マイクロ波無線システムは、1シンボル当たり7ビットのデータを伝送する128QAM方式である。これを4096QAM方式(1シンボル当たり12ビット伝送可能)とすると、同じ周波数帯域幅において従来比70%増のデータ量の伝送が可能となる。

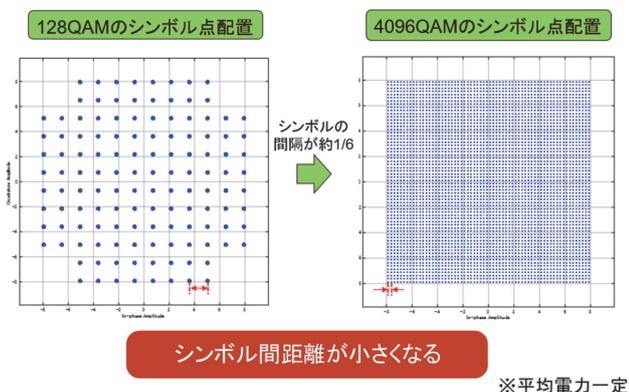


図2 多値QAM信号点配置図
Fig.2 Multilevel QAM constellation diagram

2.2 超多値変調の課題

超多値変調を導入するにあたり、平均電力を一定とした場合、変調多値数を上げることでシンボル間距離が小さくなる。図2に示すシンボル点配置を例に挙げると128QAM方式と比較して4096QAM方式ではシンボル間距離が約1/6となる。これにより4096QAM方式では同じビットエラーレート(以下BER)を得る所要CNRは128QAM方式と比較して約15 dB上がるため、伝送品質は雑音に対して極めて敏感になる。以上から、超多値変調においては無線装置の内部で発生する雑音を極めて低く抑えることが課題となる。図3にマイクロ波無線装置の概略構成図を示し、無線装置に起因する雑音発生要因について簡単に説明する。

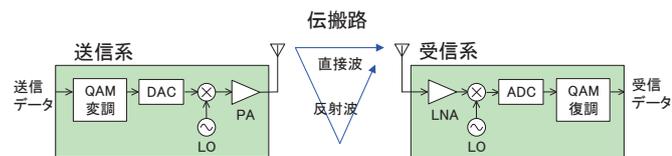


図3 マイクロ波無線装置概略構成図

Fig.3 Schematic configuration of microwave radio equipment

2.2.1 位相雑音

マイクロ波無線装置の送信系は、送信データに従ってQAM変調を行い、ローカル信号(以下LO)によりRF周波数に変換する構成となっている。受信系はRF周波数の信号をLOにより逆変換した後、QAM復調して受信データを得る。図4に示すようにLOは理想的な単一の周波数成分 f_{LO} だけでなく位相雑音と呼ばれる雑音成分を含むため、送/受信の周波数変換のたびに雑音が付加され、シンボル点の揺らぎが位相の回転方向に大きく現れる復調信号となり伝送品質に影響を及ぼす。一方、対策としてLOの位相雑音を低減することは、機器のコスト増加を招くため現実的でない。よって、送/受信LOの位相雑音をデジタル信号処理で補償することが課題となる。

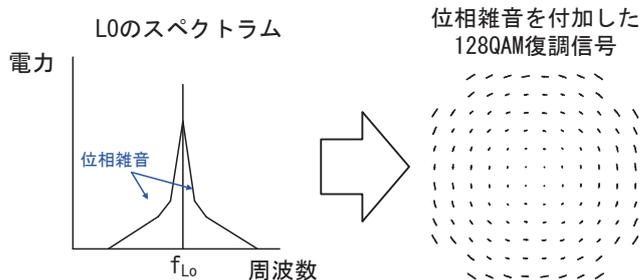


図4 復調信号に及ぼす位相雑音の影響
Fig.4 Effect of phase noise on the demodulated signal

2.2.2 非線形歪

増幅器の飽和による非線形歪の影響により、図5に示すように変調スペクトラムが広がり、受信側の復調信号では電力が大きいシンボル点の歪の原因となり伝送品質が低下する。特に大電力信号の増幅が必要となる送信系は非線形歪が大きいため、超多値変調においては高精度な歪補償が課題となる。

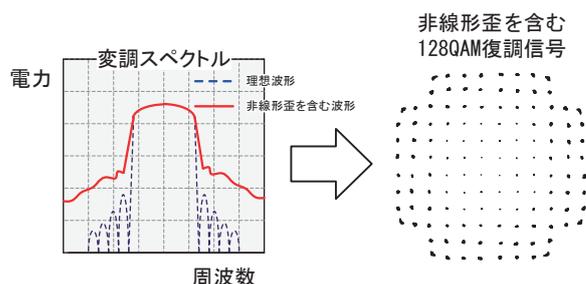


図5 復調信号に及ぼす非線形歪の影響
Fig.5 Effect of non-linear distortion on the demodulated signal

2.2.3 等化誤差

マイクロ波無線システムでは、電波伝搬路においてマルチパスフェージングが発生し受信信号の波形歪を引き起こすため、QAM復調部には波形歪を補償する適応等化器が必要となる。適応等化器は図6に示すように等化出力信号を生成する等化フィルタ部と理想シンボルに対する等化誤差か

らタップ係数を更新するタップ係数更新部からなる。等化フィルタのタップ係数は雑音等の外乱により揺らぎが発生する。この揺らぎがシンボルエラーを誘発し、そのエラーがタップ係数の揺らぎを大きくして等化誤差は更に増幅する。シンボル間距離の小さい超多値変調においては、このような等化誤差の挙動が原因でバーストエラーが発生し、通信に悪影響を及ぼす。以上から超多値変調においては適応等化器の等化誤差の変動による瞬時的な等化誤差の増加が少なくなるような安定動作が課題となる。

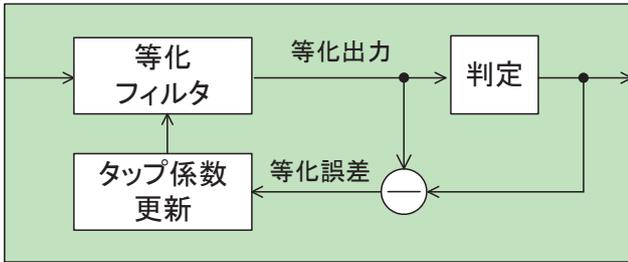


図6 適応等化器構成図

Fig.6 Adaptive equalizer configuration diagram

3. 超多値変調技術の開発

3.1 位相雑音補償技術

PLL回路による搬送波同期方式は応答が遅いため低周波成分の位相雑音の補償は可能であるが、高周波成分の位相雑音の補償ができない。シンボル間距離の小さい超多値変調では高周波成分の位相雑音による受信性能の低下が避けられないため、図7に示すように低周波位相雑音補償回路として従来のPLL回路を配し、後段に応答の速いフィードフォワード型の高周波位相雑音補償回路を実装する構成とした。この方式を採用することにより位相雑音の低減を実現した。

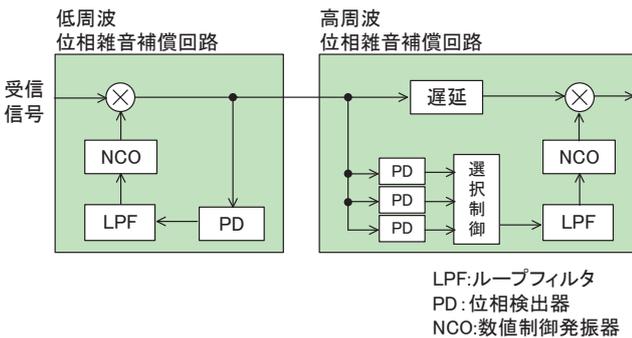


図7 位相雑音補償回路構成図

Fig.7 Phase noise compensation circuit configuration diagram

3.2 歪補償技術

図8にDPD処理部を含む送信系構成図を示す。QAM変調したデジタル信号と歪を含む送信波をADCによりデジタル信号に変換したフィードバック信号から演算処理でPAの非線形歪の逆特性を算出し、ルックアップテーブル（以下LUT）に各入力電力に対する逆特性を書き込む。このLUTによりQAM変調信号に歪の逆特性を乗算して歪補償を行う。

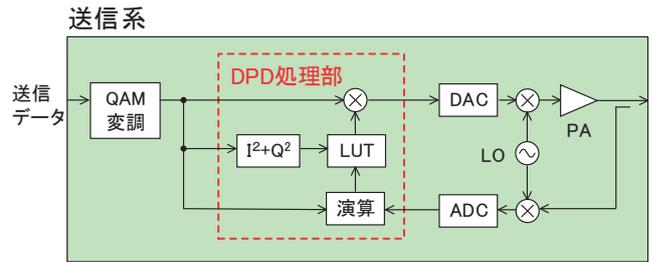


図8 送信系構成図

Fig.8 Transmission system configuration diagram

超多値変調の歪補償に必要とされる高精度化は、図9に示すようにLUTを細分化することで実現した。一方、細分化に伴いLUTの補償値演算に時間がかかり送信電力制御時に補償最適値への更新が追いつかず、制御中に対向する受信系において性能低下が問題となるため、送信電力制御時のLUTの補償誤差を低減する方式を考案し問題を解決した。

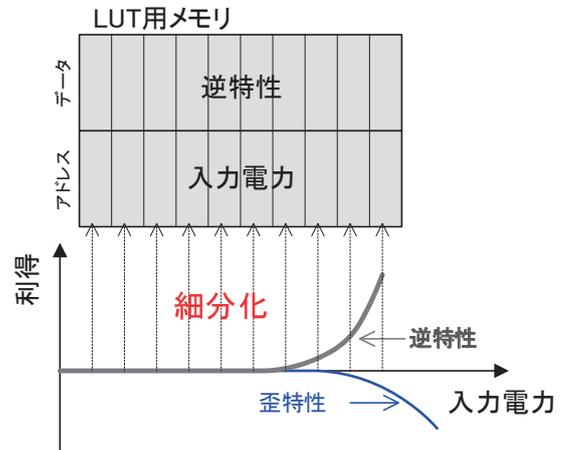


図9 ルックアップテーブル説明図

Fig.9 Look-up table explanation diagram

3.3 適応等化技術

超多値変調で課題となる適応等化器の等化雑音の瞬時的な増加、等化器の発散を防ぐために、図10に示すように等化出力誤差の平均値の大きさに応じてタップ係数更新の要否を振り分ける方式を考案した。この方式により適応等化器の等化雑音の瞬時的な増加を抑え、適応等化器の安定動作を実現した。

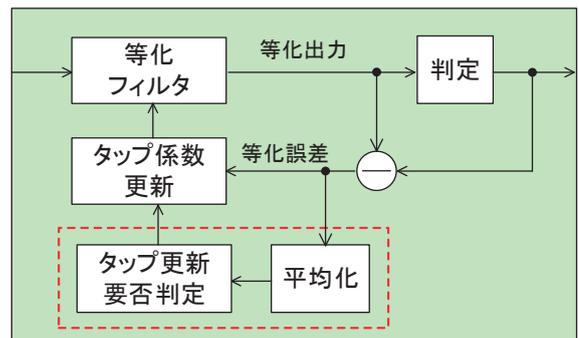


図10 適応等化器構成図

Fig.10 Adaptive equalizer configuration diagram

また、図11に示すマイクロ波無線システムの運用形態の一つである垂直/水平の偏波多重伝送を行う場合、交差偏波の干渉を低減する技術としてXPICが用いられるが、この技術も適応等化技術の一つであるため、上記の方式を採用して超多値変調における有効性を確認した。

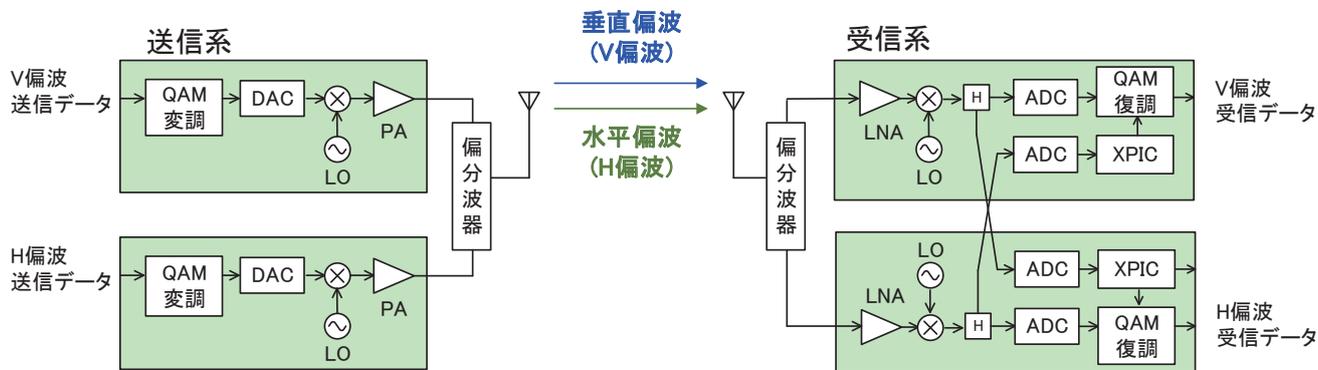


図11 マイクロ波無線装置偏波多重伝送方式構成図

Fig.11 Polarization multiplex transmission system configuration diagram for microwave radio equipment

3.4 評価結果

本技術を既存製品に組み込み、表1に示すシステム諸元で特性評価を行った。なお、誤り訂正方式は既存製品で採用されている方式とほぼ同等の符号化率となるリードソロモン符号 [198, 182]、およびリードソロモン符号 [180, 164] とした。

表1 システム諸元
Table 1 System specifications

変調方式	512QAM, 1024QAM, 2048QAM, 4096QAM
ロールオフ率	0.2
シンボルレート	30 MHz
誤り訂正方式	リードソロモン符号 [198:182] [180, 164]
インターリーブ段数	22

図12にCNR対BER特性を示す。いずれの変調多値数においても、マイクロ波無線システムの通信品質としての要件を満たす良好な結果が得られた。

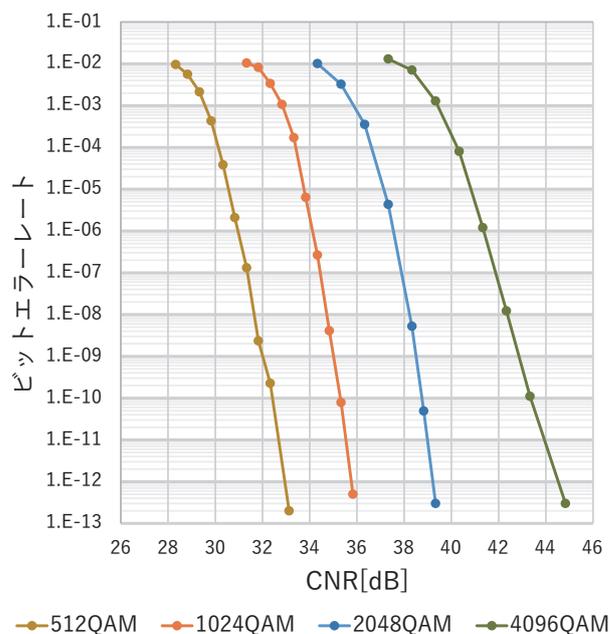


図12 CNR対BER特性

Fig.12 CNR vs. BER characteristics

4. あとがき

当社が永年にわたり築いたマイクロ波無線技術を駆使した技術により、既存の製品（無線システム）において高性能な4096QAM方式をはじめとする超多値変調方式を具現化し、無線システムによる高効率伝送を可能とした。また、送信電力レベル変動や電波伝搬状態の変動などに対するシステムの動作安定性を高め、通信品質の向上を図った。以上により、デジタル信号の伝送容量が従来比70%増となることを見込むと同時に、マイクロ波無線システムの大容量化を低コストで実現する。

今後は、防災通信におけるマイクロ波無線通信回線の大容量化に加え、適応変調方式や送信電力制御方式を組み合わせ、マイクロ波無線システムの更なる付加価値向上を目指す所存である。

参考文献

- (1) 高橋, et al., “日本無線の通信・ネットワーク技術,” 日本無線技報, No.71, pp.12-15 (2020)
- (2) 橋本, et al., “都道府県防災行政情報通信ネットワーク,” 日本無線技報, No.72, pp.31-37 (2021)

用語一覧

ADC: Analog to Digital Converter (アナログ-デジタル変換回路)
BER: Bit Error Rate (ビット誤り率)
CNR: Carrier-to-Noise Ratio (搬送波対雑音比)
DAC: Digital to Analog Converter (デジタル-アナログ変換回路)
DPD: Digital Pre-Distortion (デジタルプリディストーション)
QAM: Quadrature Amplitude Modulation (直交振幅変調)
XPIC: Cross Polarization Interference Canceller
(交差偏波間干渉波補償器)