

高効率・大容量無線伝送を実現する OAMモード多重伝送方式

佐々木 英作 平部 正司 宮元 裕章

要旨

マイクロ波・ミリ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が、Beyond 5G/6G用途では、50 Gbps以上という従来方式では対応が困難な大容量化が求められます。本稿では、高効率・大容量化が実現可能、かつ広帯域が利用可能な高周波帯に適した通信方式であるOAMモード多重伝送方式について、その原理・特徴・課題・実装方法を紹介します。本技術の実現性実証のため行ったサブテラヘルツ帯での実時間伝送実験では、偏波多重との組み合わせにより、256QAM/16多重(14.7Gbps)の100m伝送に成功しました。商用化に向けた開発では、100Gbps伝送の実現を目指します。



OAM/軌道角運動量/UCA/空間多重伝送方式/周波数利用効率/ミリ波/サブテラヘルツ波

1. はじめに

世界のモバイルバックホール (Mobile Backhaul) (以下、MBH) 網構築には、マイクロ波・ミリ波の無線通信システムが大きな役割を果たしており、NECは、これらのシステムを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。

現在、世界で開発が進められているBeyond 5G/6GのMBHでは、50Gbpsを超えるような従来の無線通信方式では実現困難な大容量伝送が求められます。

本稿では、このような大容量化の要求に応える技術として、空間多重伝送方式の1つであるOAM (Orbital Angular Momentum) モード多重伝送方式について紹介します。

2. OAMモード多重伝送方式

2.1 原理と特徴

OAMとは、電磁波の持つ物理量の1つである軌道角運動量であり、OAMには互いに直交する無限のモードが存在します。これを同一周波数で複数の独立な信号を伝送する多重化に利用できれば、大容量化と同時に高い周波

数利用効率が実現できます。

OAM信号は、Laguerre 陪多項式を用いた円筒座標系の数式で表され¹⁾、数式内の偏角指数 l (l は整数) をモードと表現します。

モードは、 $l=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ と無限に存在し、互いに直交します。 $l=0$ は、従来の無線通信に使われてきた平面波 (Gaussianビーム) です。 $l \neq 0$ 以外のモードは、図1に示すように等位相面が l 個のらせん面 (互いの位相差は $2\pi/l$ rad) の組み合わせになっており、モードの極性がらせん面の回転方向に対応しています (Z軸はビームの進行方向)。この等位相面形状が、OAM信号の特徴です。平面波の等位相面は、波長間隔で現れる平面になります。

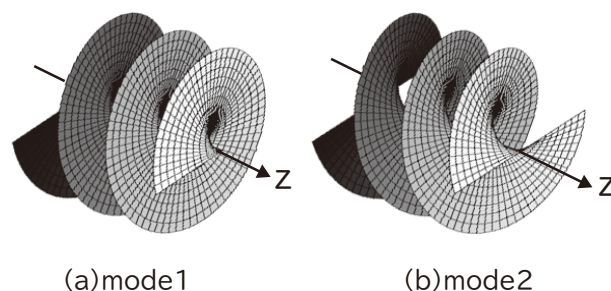


図1 等位相面形状

複数のモードを多重化して送信した場合、OAMモードの直交性によりmode + lで送信した信号はmode + lの受信機以外ではエネルギーが0になります。つまり、モード間の干渉を受けずに所望のモードだけを受信することができるため、理論上は無限の多重化が可能になります。

具体的には、同一周波数のOAM各モードの正弦波を搬送波として変調を掛けることにより各モードの変調波が生成され、これらを加算することでOAMモード多重化信号となります。

2.2 課題と対策

一方で、OAMには原理的な課題があります。前述の数式から計算すると、ある距離でのOAM信号の電力密度分布は、図2のようなリング状になります。これは、mode0以外ではビーム軸上で位相が 2π radの整数倍回転しているため、信号が打ち消し合って電力が0になるためです。この電力が最大となるリング半径は、モードの次数が高い

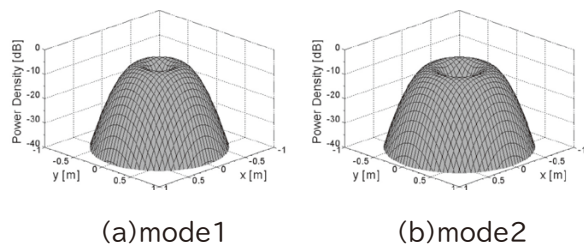


図2 電力密度分布

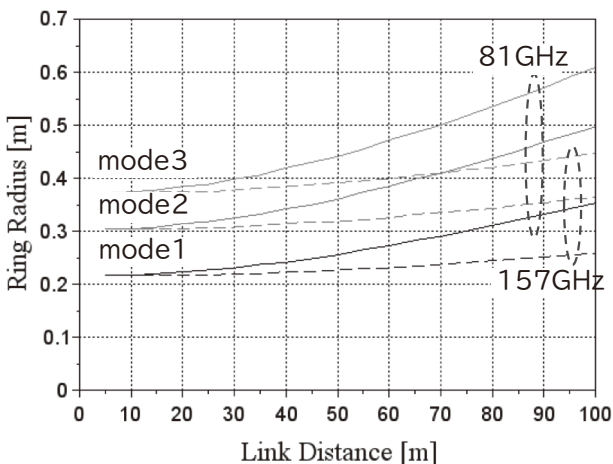


図3 伝搬距離 対 リング半径

ほど大きく、また図3に示すように伝搬距離とともに拡大していきます。つまり、OAM信号は伝搬するにしたがって拡散する性質があります²⁾。

この伝搬によるリング径の拡大は、高次モードほど大きくなります。双方向対称通信を前提とした送受同一径のアンテナで受信する場合、伝搬距離が長くなるにつれ、高次モードほど受信レベルが低下することになりますので、無限の多重化を実現することはできません。また、低次モードの使用に限っても、Gaussianビームによる通信に比べ、伝送距離が制限されます。この点が、OAM信号を無線通信に適用した場合の課題です。図3に示すように、このリング径の拡大率はRF周波数が高いほど小さくなるため、OAM信号の伝送距離の拡大という課題に対しては、ミリ波、100GHz以上のサブテラヘルツ波といった高い周波数帯の利用が有効です。このような高周波帯では広い帯域幅を利用できることも、大容量化に対する利点となります。

また、送受アンテナのビーム軸が一致しない軸ずれがわずかでもある場合、モード間干渉が生じ特性が劣化することも実用上の課題です。これに対する対策は、第3章2節で説明します。

2.3 偏波多重とOAMモード多重の組み合わせ

OAMと偏波は互いに独立であり、従来方式と同様に、偏波多重を併用することが可能です。多重化技術としては、一対のアンテナで済む偏波多重の方がOAMモード多重より経済的なため、OAMは偏波多重以上に容量を増やしたい場合に使われることとなります。Nモード多重と偏波多重の組み合わせにより、容量は2N倍になるため、高効率、かつ大容量の無線通信が実現可能となります。

3. 実装手段

3.1 アンテナと位相差付与手段

ここではRF周波数依存性のないデジタル信号処理(Digital Signal Processing) (以下、DSP) + UCA (Uniform Circular Array) アンテナの構成について説明します。

OAMは、電力がリング状に集中しているため、円環状に素子を配置したUCAにより近似的に実現可能であり、N素子でN個のモードを扱うことができます。

OAMの振幅・位相に関するモードと素子の関係は、離散フーリエ変換 (Discrete Fourier Transform) (以下、DFT) になっていますので、N素子UCAの使用を前提とすると、DSPでDFTを実行すればよいことになります。受信側は、これの逆になりますのでDSPでのIDFT (Inverse Discrete Fourier Transform) 処理になります。全体の構成は、図4のようになります。通信路はDFT/IDFTで直交化されるため、リンク距離によらず多重化信号の分離が可能になります。

送受で複数のアンテナ素子を使用することで複数のパスを構成する多重通信方式を空間多重伝送方式と呼びますが、本構成によるOAMもその1つになります。

3.2 受信側信号処理の適応制御化

実際には、軸ずれや機器を含む通信路の不完全性により、固定係数では通信路直交化が成立しなくなり、発生するモード間干渉によって特性が大きく劣化します。この劣化を補償するためには、少なくとも受信側信号処理を適応制御化することが必須となります。

OAMモード分離回路の適応制御化には、符号間干渉補償を行う等化器 (Equalizer : EQL) 制御と同じ誤差信号とLMS (Least Mean Square) アルゴリズムが適用できます。

偏波間干渉は、OAMモード分離の後段で補償可能であり、OAMと偏波多重の組み合わせに対応する受信機が構成できます。

4. 特性

4.1 リンクバジェット計算

軸ずれなしの条件下では、送受のUCA各素子間の経路長差で生じる位相差と送信出力での位相差を基にした

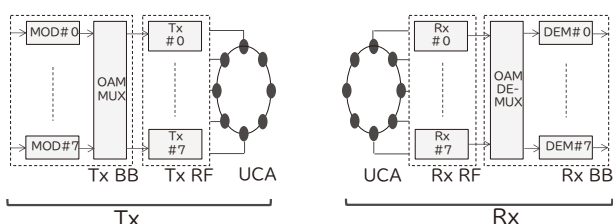


図4 DSP + UCA構成 (N=8)

電力計算のみで、各モードの受信電力が求められます³⁾。この受信電力と受信機の雑音電力から、CNR (Carrier to Noise power Ratio) が計算できます。

軸ずれがある場合は、前述の計算にアンテナ素子の放射パターンの影響とOAM分離適応制御の効果も加味することで、モードごとのCNRを求めることができます。

4.2 D帯における伝送実験結果

最後に、D帯 (130~174.8GHz) における実時間伝送実験の結果⁴⁾を紹介します。試作機諸元を表に、試作機UCA外観を写真に示します (中央の1素子は、初期調整用)。

図5は、距離100mにおける各OAMモードの受信信号MSE (Mean Square Error) 実測値とリンクバジェット計算によるCNRを比較したものです。

16多重 (OAM8 × 偏波2) の256QAM信号を連続1時間伝送してビット誤りなしという良好な結果が得られました。実測環境で軸ずれが0になることはないため、この結果はOAM分離処理の適応制御化の効果と考えられます。CNR計算値との比較でも、mode2を除き実測MSE

表 D帯試作機諸元

項目	仕様
UCA	4/8素子、φ0.62m
RF周波数	157.0GHz
変調速度	115.2Mbaud
変調方式	シングルキャリアQPSK~256QAM
OAMモード	0, ±1, ±2, ±3, 4 (全8モード)
偏波	V/H
誤り訂正符号	Reed-Solomon(255, 239)

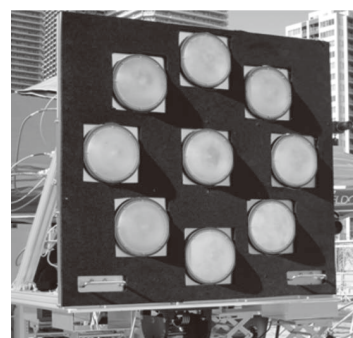


写真 D帯8素子UCA

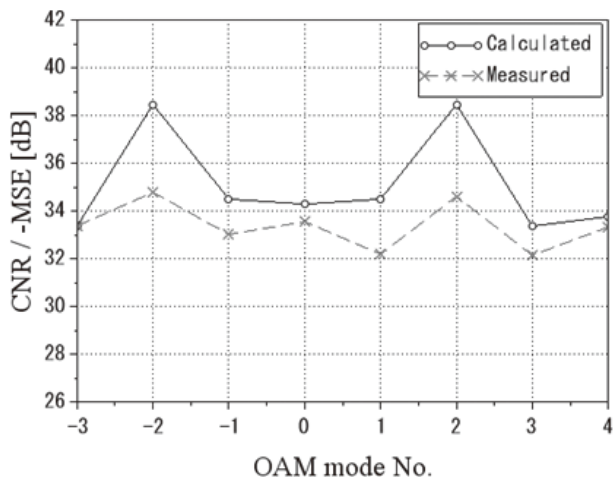


図5 OAMモード別MSE実測値/CNR計算値

が計算値に近い値となっています。mode2の劣化は、受信側では完全には補償できない送信側の軸ずれによるものと推定されます。周波数利用効率82.7bps/Hzは、マイクロ波・ミリ波の固定無線方式では最大レベルです。

5. むすび

本稿では、Beyond 5G/6Gに向けた高効率大容量無線伝送実現へのアプローチとして、サブテラヘルツ帯におけるOAMモード多重伝送方式について、その原理から実装手段、実測結果までを紹介しました。

現在、本方式の商用化に向け、送信軸ずれに対する耐性を更に高めた方式を検討中であり、容量としては帯域幅1.25GHzでの100Gbpsの実現を目指しています。100Gbps伝送可能な無線通信システムができれば、光通信の代替手段としての利用も期待できます。

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

6. 謝辞

OAMに関する研究の一部は、総務省の「電源資源拡大のための研究開発」(JPJ000254)のうち「ミリ波帯における大容量伝送を実現するOAMモード多重伝送技術の研究開発」により実施されたものです。

参考文献

- 1) L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw and J. P. Woerdman: Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes, Physical Review A, vol.45, no.11, 1992
- 2) E. Sasaki, M. Hirabe, T. Maru and N. Zein: Pragmatic OAM with polarization multiplexing transmission for future 5G ultra-high capacity radio, European Microwave Conference, 2016.10
- 3) D. K. Nguyen et al.: Discussion about the link budget for electromagnetic wave with orbital angular momentum, The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014) proc, pp.1117-1121, 2014
- 4) NEC プレスリリース: NEC、150GHz帯において、伝送距離100mのリアルタイムデジタルOAMモード多重無線伝送に世界で初めて成功, 2020.3
https://jpn.nec.com/press/202003/20200310_01.html

執筆者プロフィール

佐々木 英作

ワイヤレスアクセス開発統括部
シニアプロフェッショナル
IEEE ComSoc 会員

平部 正司

ワイヤレスアクセス開発統括部
プロフェッショナル

宮元 裕章

ワイヤレスアクセス開発統括部
主任

NEC 技報のご案内

NEC 技報の論文をご覧いただき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.75 No.1 オープンネットワーク技術特集

～オープンかつグリーンな社会を支えるネットワーク技術と先進ソリューション～

オープンネットワーク技術特集よせて
NECのオープンネットワークに向けた技術開発と提供ソリューション

◆ 特集論文

Open RANとそれを支える仮想化技術

Open RANがもたらすイノベーション
モバイルネットワークにおける消費エネルギー削減
自己構成型スマートサーフェス
Nuberu: 共有プラットフォームによる高信頼性のRAN仮想化
vrAln: vRANにおけるコンピューティングリソースと無線リソースのためのディープラーニングベースのオーケストレーション

5G/Beyond 5Gに向けた無線技術

グリーン社会の実現に向けたNECにおける5G/Beyond 5G基地局のエネルギー効率化技術開発
双方向トランシーバアーキテクチャを備えたミリ波ビームフォーミングICとアンテナモジュール技術
5G/6G屋内ワイヤレス通信向け1ビットアウトフェージング変調による光ファイバ無線システム
空間分割多重を用いた28GHz帯マルチユーザー分散Massive MIMO
28GHz帯マルチユーザー分散MIMOシステムを用いたOTFS変調信号のOTA測定
Sub6GHz帯アクティブアンテナシステムにおける空間多重性能の改善
トランジスタ非線形モデルを使用しないブラックボックスドハティ増幅器の設計手法
最大8マルチユーザー多重化を実現する39GHz帯256素子ハイブリッドビームフォーミングMassive MIMO

オープンAPN (オープン光・オール光)の実現への取り組み

APN実現に向けたNECの取り組み～Openな光ネットワーク実現に向けて～
APN実現に向けたNECの取り組み～APN製品(WXシリーズ)の特長～
APN実現に向けたNECの取り組み～フィールドトライアル～
オールフォトニクスネットワークを支えるシリコンフォトニクス光源による波長変換技術
NEC Open Networksを支える光デバイス技術～800G超の光伝送技術～

コア&パリューネットワークへの取り組み

カーボンニュートラルな社会の実現に向けたデータプレーン制御を支える技術
5G時代の人々の暮らしを支えるNECのネットワークスライシング技術
Beyond 5G, IoT, AIを活用したDX推進を支えるアプリケーションアウェアICT制御技術
通信事業者向け5Gコアネットワークにおけるパブリッククラウド活用

高度なネットワークサービスを提供する自動化・セキュア化への取り組み

OSSにおける運用完全自動化へのNECの取り組み
利用者の要件に基づくネットワークの自律運用技術とセキュリティ対応の取り組み
情報通信ネットワークの安全性を向上するセキュリティトランスペアレンシー確保技術
ネットワーク機器のサプライチェーン管理強化に向けた取り組み

ネットワーク活用ソリューションとそれを支える技術

通信事業者向け測位ソリューション
5Gのポテンシャルを最大限に引き出すトラフィック制御ソリューション(TMS)
ローカル5G向け小型一体型基地局「UNIVERGE RV1200」及びマネージドサービス
産業DXを支えるローカル5G活用によるパーティカルサービス
ローカル5G、LAN/RAN融合ソリューション

グローバル5G xHaulトランスポートソリューション

トランスポートネットワークの高度化を実現するxHaulソリューション・スイート
xHaulトランスフォーメーションサービス
xHaulトランスポート自動化ソリューション
5G/Beyond 5Gにおける固定無線トランスポート技術
Beyond 5Gに向けたSDN/自動化
高効率・大容量無線伝送を実現するOAMモード多重伝送方式

Beyond 5G/6Gに向けて

Beyond 5G時代に向けた取り組み

◆ NEC Information

2022年度C&C賞表彰式典開催



Vol.75 No.1
(2023年6月)

特集TOP