

【詳細資料】

概周期周波数配置を用いた 100 万チャンネル以上の超周波数多重方式

梅野健 情報学研究科教授、中澤勇夫 同博士後期課程学生は、IoT(Internet of Things)時代を目指した 100 万チャンネル以上の超多重化を可能とする概周期関数*を基本とする概周期周波数配置の生成と複号方式のコンセプトを世界で初めて提案し、その実現性を明らかにしました。

概周期を元にした符号生成は既に研究されていますが、周波数軸上で概周期周波数配置を実現する手段はまだ実現されていませんでした。

本研究成果は、IoT 時代の 100 万チャンネル以上の独立成分の超多重化の実現性を示すものであり、今後地上での 60 億デバイスとの無線接続を目指した方式で、今後の 5G モバイル通信の IoT 本命とされ、ITU(国際電気通信連合)で決定された 1 平方 km で 100 万デバイスの接続を可能とするという要求条件を満足する 5G の超大量接続用途にも応用が期待できます。本研究成果は 2017 年 12 月 1 日、電子情報通信学会発行の *IEICE Communications Express* に掲載されました。

1. 背景

IoT時代を目指した無線通信では、携帯無線通信 (LTE、W-CDMA 等)、PHS、BWA (AXGP、WiMAX 等)、Wi-SUN、ZigBee、Bluetooth、Wi-Fi、特定小電力無線、RFID 等の多様な無線システムを利用して行われているところであり、今後はこのようなM2M 通信やワイヤレスセンサーネットワークの飛躍的拡大により、無線トラフィックの増加が予測されます。通信容量はここ 30 年間で 1 万倍にも増大していると報告されています。このように、人から人のみならず、モノからモノ (M2M)、端末から端末 (E2E)をつなぐ多種多様なアプリケーションの発展に伴って、データの中身、発信者、用途産業が爆発的に拡大されることとなりますが、IoT時代ではネットワークの多層化、異種混合等へのデバイスが接続するネットワークシステムの異機種混在化、ネットワーク網でのシームレス化がその基盤となることが想定されます。

2. 研究手法・成果

従来の完全同期を元にした CDMA(3G)或いは OFDM(4G)等のチャンネル多重方式に対し、最近では、同期を前提とせず、準同期であり準直交性を有するカオス理論を基礎とした通信の研究がすすめられています。カオス理論を利用した通信が通信システムに適用できるのか、これまでにシミュレーション結果を報告し、概周期周波数配置には既存の周期的な信号とは違う特徴を有することを発表していました。

本研究では、概周期周波数配置(Almost Periodic Frequency Allocation:APFA)という全く新しいコンセプトによる無線通信システムへの適用性を報告しました。概周期周波数の変復調信号処理、APFAを用いた送受信系のシミュレーションを行い、超周波数多重化したシステムの概周期周波数配置に生成技術と複素相互相関を用いた信号再生が実現できることと、概周期関数から非線形ひずみによる符号間干渉が優れていることが解りました。

概周期周波数配置の概周期周波数 $x_k(r,p)$ は、ドイツの数学者の H. Weyl(1885-1955)が考えたワイル

概周期関数*を、初めて、信号の周波数配置という問題に応用したもので、ワイルの均等分布定理 (Equidistribution Theorem) を拡張して、素数のべき乗根の実数倍 (式 1) は 0-1 の区間において一様分布するのを利用して概周期周波数の独立性が保証されます。

$$x_k(r, p) = \sqrt[k]{p} \times r \pmod{1}. \tag{1}$$

ここで、

- r**: 時間 (実数)、
- P**: 任意の素数、
- k**: べき乗根の指数

また、整数 N 以下の素数を用いてワイル概周期関数から求められる概周期周波数分布は図 1 に示すように概ね一様分布しています。

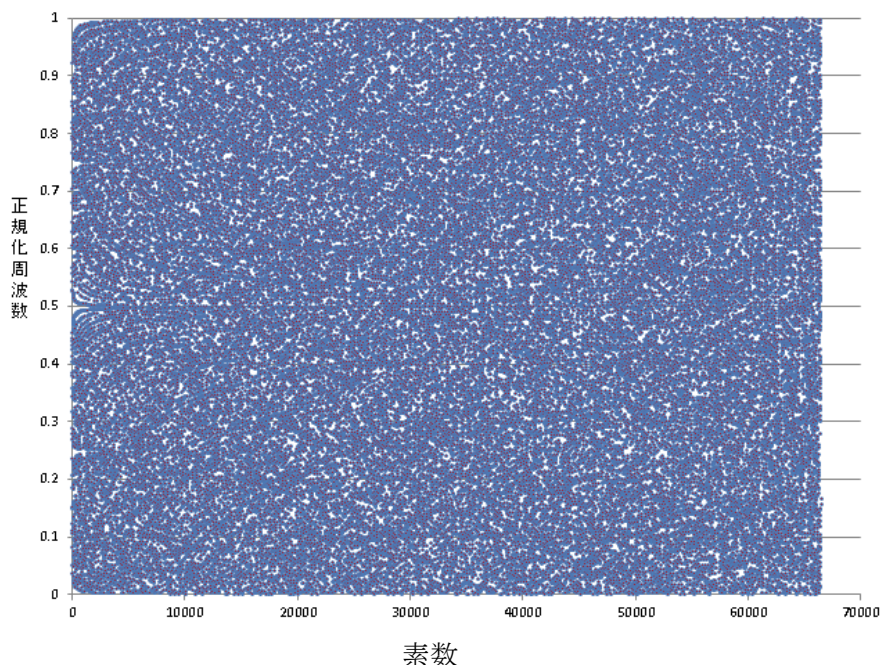


図 1. 多数の素数から求めた概周期周波数

本研究で提案した概周期周波数配置は、同期した OFDM 周波数配置をターゲット周波数配置にして、OFDM 周波数配置の各サブキャリアに近い概周期周波数を選ぶことにより実現できます。この概周期周波数は図 1 に示すように多数の素数の n 乗根の少数部分が、概ね[0,1]上を一様分布しているのので、概周期周波数とターゲット周波数との周波数差は素数の数を大きくすることにより微小にすることが可能です。また、この周波数差は正規分布をしており、正規分布の標準偏差 σ で概周期周波数のターゲット周波数への接近度を表すこととなります。

また、標準偏差 σ を限りなくゼロに近づければ OFDM 周波数配置に近い同期系の伝送特性を有します。

注 1. ワイルの均等分布定理 (Equidistribution Theorem) : 素数のべき乗根の整数倍の小数部は 0 から 1 の間に一様分布する。

注2 概周期周波数の独立性は各周波数成分が無理数で表現されているため、他の周波数の演算によって求められないことから自明です。

概周期周波数配置を用いた変調波信号は式2で表されます。

$$TX(t) = \sum_{d=1}^M Code_d e^{j2\pi APFF_k(d, P_N)t + j\theta_d}. \quad (2)$$

ここで、

$Code_d$: d 番目のサブキャリアの変調符号

θ_d : d 番目のサブキャリアの変調符号による位相回転

$APFF_k(d, P_N)$: d 番目のサブキャリアの概周期周波数

また、概周期周波数配置の信号の再生は式3に示す複素相互相関係数によって求められます。

$$\rho(R_x, S_m^*) = \frac{\frac{1}{T_m} \int_0^{T_m} (R_x(t), S_m^*(t)) dt}{\frac{1}{T_m} \times \sqrt{\int_0^{T_m} (R_x(t), R_x^*(t)) dt} \times \sqrt{\int_0^{T_m} (S_m(t), S_m^*(t)) dt}}. \quad (3)$$

ここで、

$$R_x(t) = \sum_{m=1}^M I e^{j2\pi \sqrt[k]{P_m} t},$$

$$S_m(t) = e^{j2\pi \times APFF_k(m, P_N) \times t},$$

$$T_m = \lceil M \times APFF_k(m, P_N) \rceil / APFF_k(m, P_N),$$

$\lceil \]$ means ceiling function,

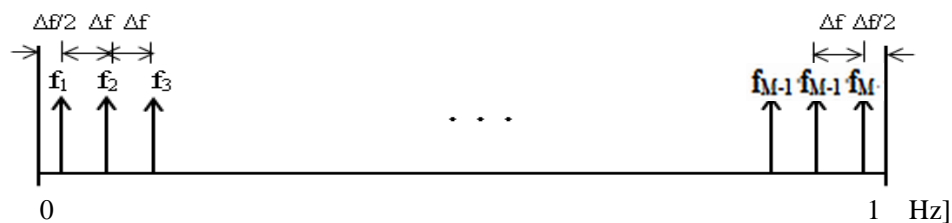
* means complex conjugate.

3. 波及効果、今後の予定

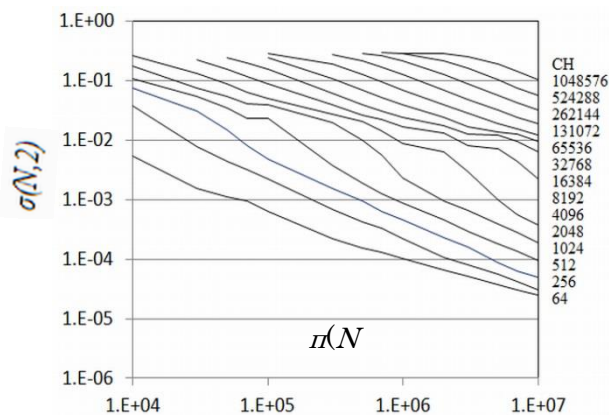
本研究成果は、従来の同期系のOFDMに対して非同期系の概周期系の周波数成分を元に周波数配置した超多重マルチキャリア方式を実現したもので、非同期の特性と概周期の特性を合わせ持つ方式です。非同期系からはサブキャリア間のフレーム長を任意に選べることで、サブキャリア毎に自由な伝送速度を選べることを意味します。また、概周期系の周波数成分は、各サブキャリアは無理数を元に行っているために独立した周波数であり、サブキャリア毎の全ての相互変調積が同じ周波数に一致しないという特徴を有しています。このために根本的に増幅器の非線形性に対して同期系のOFDM方式に対して、より強い耐非線形性を有しています。

この概周期周波数配置は超周波数多重化システムに対応可能で、伝送容量は少ないが伝送速度が端末によって違う端末が多くあるセンサーネットワーク、5Gシステムの多くの端末を収容する制御回線用ネットワーク(C-PLANE)、また、時刻配信、周波数配信等の社会基盤情報配信に適用が考えられ、今後は、以下の取り組みを考えています。

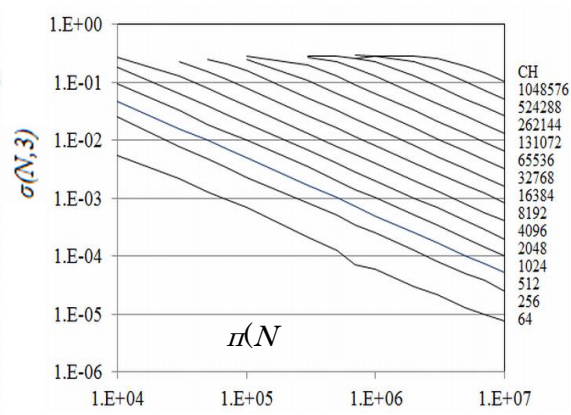
- ・概周期周波数配置の Weyl 関数以外の構成を研究して、概周期周波数配置適用を発展化
- ・概周期周波数配置の非同期性と概周期性の特性検証
- ・概周期周波数配置のカオス性の研究
- ・概周期周波数配置の最適化およびその実装
- ・概周期周波数配置の通信以外への適用、例えば植生の通信、脳神経の通信メカニズムの解明等
- ・電波産業会 (ARIB) 標準化部会 IMT-2020 無線インターフェース提案検討会における今後の詳細評価への対応
- ・3GPP における 5G Phase 2 (mMTC: massive machine type communication) Release 16 標準化での本技術の提案



(a) 基準周波数配置 (0-1)



(b) APFA 周波数の標準周波数偏差 $\sigma(M,k)$ in case of $k=2$



(c) APFA 周波数の標準周波数偏差 $\sigma(M,k)$ in case of $k=3$

図 2. 素数の数 $\pi(N)$ とサブキャリア数 M に対する APFA 周波数の標準周波数偏差

APFA の周波数要素となる素数の総数 $\pi(N)$ とサブキャリア数から基準周波数からの周波数偏移の標準偏差 $\sigma(M,K)$ は素数のべき乗数 k によって一意に決定できることがサブキャリア数 100 万チャンネルに対して求められる。

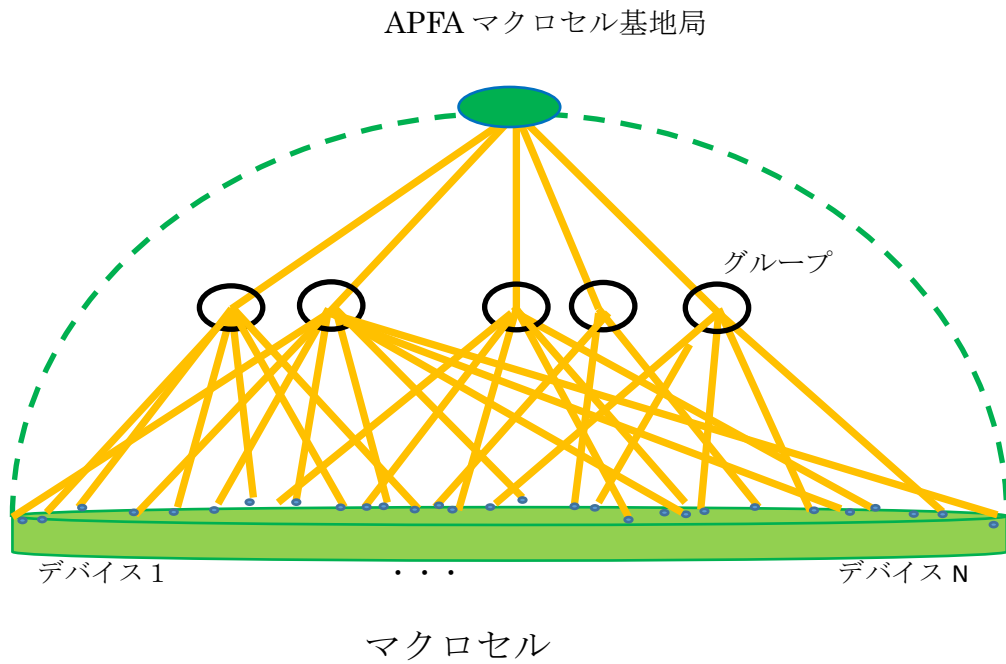


図 3. IoT のデバイスの周波数超多重化のイメージ図
—デバイス毎の周波数のグルーピング—

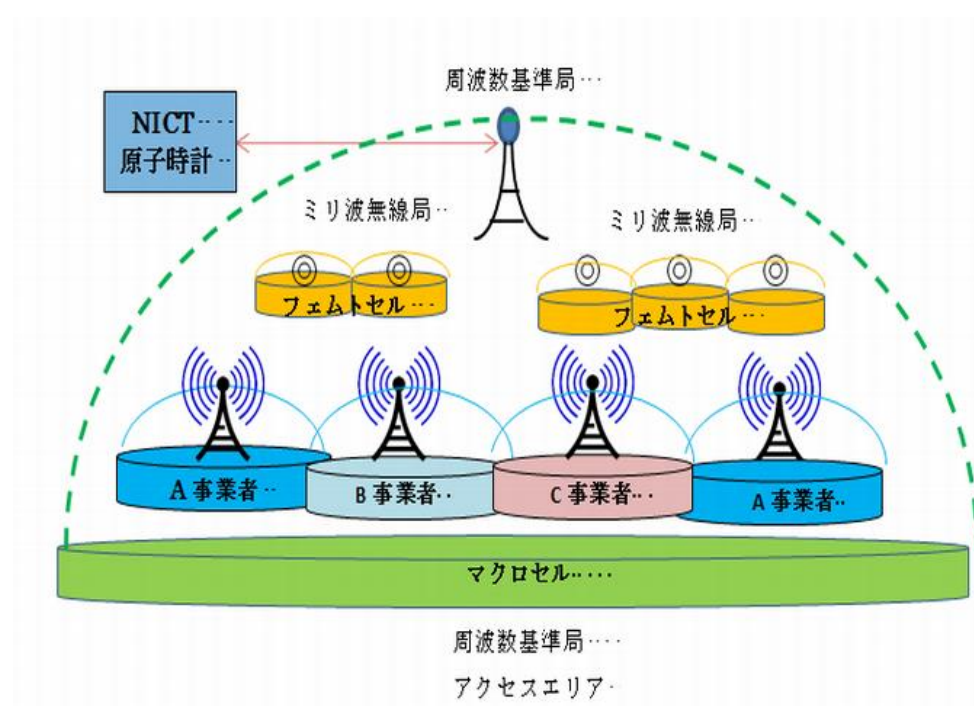


図 4. 周波数配信の構成例(日本で展開する場合)