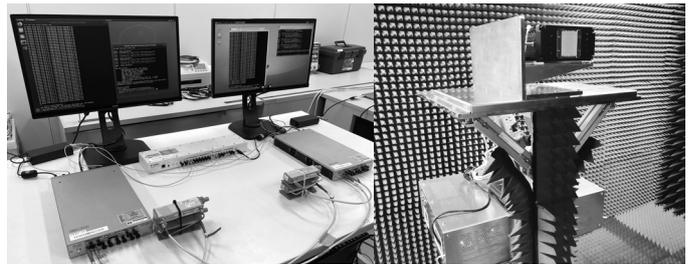


# Beyond 5G/6Gに向けた 無線アクセス網の研究開発最前線

～ 多様な通信品質要求に高信頼に応えるミリ波通信の実現 ～

あらゆる人、モノを相互に接続し、社会課題の解決を目指すソサイエティ 5.0の実現には、ミリ波を用いた無線通信の更なる高度化が避けられない。本稿では、複雑な要求を高信頼に実現する新たな無線通信技術の研究開発を紹介する。

国立大学法人電気通信大学  
先端ワイヤレス・コミュニケーション研究センター  
(AWCC)  
教授 石橋 功至



構造計画研究所と共同で開発中のグラントフリー非直交多元接続(左)、ミリ波ハイブリッドビームフォーミング(右)

## はじめに

2020年に第5世代移動通信システム(以降5G)の商用利用が開始された。第3世代から第4世代であるLTE-Advancedと移動体通信システムが進化していく中で、TwitterやYouTube、Instagram、Netflixといった様々なサービスが生まれ、スマートフォンを使った動画のストリーミングが日常化するなど、人々の無線通信の使い方、それに伴う生活のあり方は激変した。さらなる進化を遂げた5Gでは、第4世代をはるかにしのぐ高速・大容量、高信頼・低遅延、多数同時接続を実現することが可能となり、この高いポテンシャルによって、これまでにない新しいアプリケーション、ビジネスが生み出されていくことが期待されている。内閣府による科学技術基本計画では、5Gの普及を前提として、日本の目指すべき未来社会のコンセプト「ソサイエティ 5.0」が提示されている[1]。このコンセプトは、人間の社会活動に伴って生じる大量のデータをデジタル空間に余すことなく取り込み、取り込んだデータを人工知能により解析し、必要に応じてロボットなどのデバイスを介して、現実世界へとフィードバックすることで、社会維持のための必要コストを下げ、少子化、過疎化などに起因する様々な社会問題を解決しながら、経済発展を実現するというものである。ソサイエティ 5.0の実現には、高信頼で大容量な通信だけでなく、時事刻々と変化する状況に応じたきめ細やかな通信品質の制御が必要不可欠である。現在の5Gにおいても、異なる品質要求に対処できるよう高速・大容量、多数同時接続、高信頼・低遅延という3つの利用例(ユースケース)が想定され

ており、それぞれの状況に対する無線アクセス網の設計が行われてきた[2]。しかしあらゆるヒト・モノが接続され、多様で複雑な通信品質を要求するようになると、現状の5Gでは対処しきれなくなると考えられる。世界各国ではすでに5Gの高度化(Beyond 5G)、およびその後継となる第6世代(6G)の検討が活性化しており、5Gだけでは実現できない利用例への対応が議論されている。電通大石橋功至研究室では、大容量・高速な通信が実現可能なミリ波帯に着目し、ミリ波の特性を踏まえた上で、ユーザからの通信要求に柔軟かつ高信頼に応えることのできる新たな無線アクセス網の研究開発を、総務省受託研究として株式会社KDDI総合研究所、株式会社構造計画研究所と共に実施している。以降では、この研究開発について紹介する。

## ミリ波の課題

一般に30GHzから300GHzの周波数帯をミリ波帯と呼び、広い帯域幅を確保できることから、次世代移動体通信での、さらなる活用が期待されている。一方で、ミリ波帯では、これまでの6GHz帯以下の通信では起こらなかった様々な課題に取り組む必要がある。一つ目の課題は、通信距離に対する受信電力の急速な減衰である。このためミリ波を用いた基地局のカバレッジ(電波到達範囲)は著しく狭く、端末が移動する場合には、通信の切断や、別基地局への切り替えによって、通信の不安定性や、大きな遅延を引き起こしてしまう。ミリ波は、その名の通り、波長がミリオー

ダとなることから、アンテナサイズが極小となり、一般的な基地局のサイズにおいては、多数のアンテナを搭載することが可能となる。そこで5Gでは、アナログとデジタルのハイブリッドアレーアンテナを用いたビームフォーミングによって、狭い角度領域にエネルギーを集中して放射することで、この課題に対処している。二つ目の課題として、ミリ波は6GHz帯以下と比較して電波の直進性が強く、人体や車両といった物体による突発的な遮蔽の影響が顕著であることがあげられる。例えば、人が密集する繁華街や、交通量の多い道路付近では、形成したビームが瞬間的または継続的に遮断されてしまい、通信が不安定となってしまう。ロボットや自動運転車などのリアルタイム制御などを想定した場合、これらミリ波に起因する不安定性、遅延の増大といった問題は致命的であるものの、6GHz以下の周波数帯では、高密度に端末が存在し、それらが大容量・高速、多数同時接続、低遅延といった要求を次々と出してくる状況に対処できるだけの周波数資源を確保できない。結果として、ミリ波における前述の問題を解決しながら、複雑な要求に応えることができる通信技術を開発することがBeyond 5G、6Gに向けた研究開発の重要なポイントになるといえる。以降では、この課題を解決するための二つの要素技術、多数同時接続と低遅延という要求を同時に満たすための技術であるグラントフリー非直交多元接続（GF-NOMA：Grant-Free Non-Orthogonal Multiple Access）と、大容量・高速を高信頼に実現するための技術である遮蔽確率予測に基づいた多地点協調（CoMP：Coordinated Multi-Point）伝送、についてそれぞれ説明し、その後これらを組み合わせることで、将来社会の要求に応えることを可能とする新しい無線アクセス網技術 PHLEXIBLE について述べる。

### グラントフリー非直交多元接続

5Gの規格策定において各通信品質設計時の指標となる値を記載したITU-R Report M.2410では、多数同時接続時における端末密度として1平方メートルあたり1台という値が記載されている [3]。前述のソサイエティ5.0で提唱されるような、あらゆるモノ・人を接続・解析し、リアルタイムでフィードバックを行うという状況では、各人が身につけたヘルスケアデバイスや、家中に張り巡らされたスマートホームデバイス、自動運転車両に搭載されたカメラや、制御デバイス、センサ

類、自動配送ドローンなど、空間中に存在する多数のデバイスが、同時に無線アクセス網に接続することが想定され、この数は明らかに1平方メートルあたり1台を超えると考えられる。また多数が同時に接続するというだけでなく、リモート医療、車両制御といったアプリケーションでは、緊急性を要するメッセージを低遅延で確実に届ける必要性があり、「多数同時接続 + 高信頼・低遅延」という5Gにおける利用例の2つの組み合わせを同時に実現しなくてはならない。このような通信の実現を可能とする技術として、我々はグラントフリー非直交多元接続に着目している。移動体通信では、端末が上り通信を開始する前に「グラント（通信許可）」を基地局に要求し、基地局からグラントと共に通信資源（リソースブロック）の割り当てを受けた後、通信を開始するのが一般的である。このため端末の通信手順としては、①通信要求を基地局に対して送信、②基地局からグラントを受け取り、リソースブロックの割り当てを受ける、③通信を開始、の3ステップが必要となる。端末がデータを送信する際、この3ステップが、送信を開始するまでの遅延の原因となるため、5Gでは各端末に対して事前に無線リソースを割り当てておくことで、遅延を抑える手法が規定されている。しかし、これは各端末に対して、排他的にリソースブロックを予約するため、端末数の増大につれて、リソースの枯渇が問題となる。またリソースを事前に予約しておく必要があることから、瞬間的に低遅延の通信が必要となる状況への対処は難しい。一方、我々の提案するグラントフリー非直交多元接続では、無線アクセス網に端末が接続した時点で、端末に固有の非直交拡散系列を割り当てておく。各端末は低遅延通信が必要となると、非直交拡散系列を特定のリソースに配置し、残りのリソースに自身のデータを周波数方向に繰り返しながら配置して、グラントなしで即時送信する（図1）。

基地局からのグラントがないため、リソースを排他

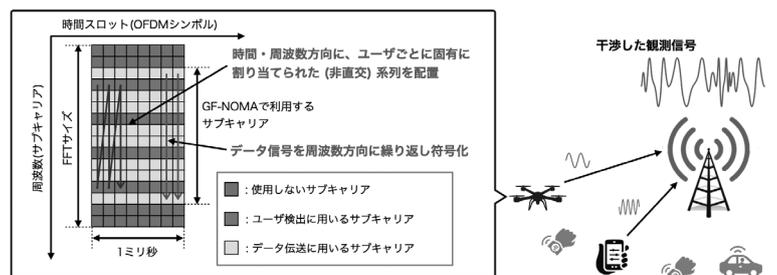


図1 提案 GF-NOMA による伝送の様子。アクティブとなった端末は基地局からのグラントなしで、設計された構造に従って伝送する

的に利用することはできず、受信機では、複数の端末による干渉が生じた信号から、①どの端末が、②どのような通信路を介して、③どのようなデータを送ったか、その全てを同時に推定しなくてはならない。そこである送信時間間隔の中では、系列を割り当てた全端末のうち、ごく一部の端末しか送信しないという特徴を利用し、「圧縮センシング」と呼ばれる手法によって、まずどの端末が、どのような通信路を介してデータを送ったかを推定する [4-5]。その後、推定した通信路情報を使って、周波数方向に繰り返し符号化されたデータ部を復調する。我々は、送信時間を1ミリ秒に設定した場合、理論上、最大で3万台の端末が同時送信しても、端末あたり100バイトのデータを確実に伝送できることを明らかにしており [5]、この手法が実用化できれば、これまでにない全く新しいアプリケーションの実現が可能となる。また文献 [5] の手法は5Gとの後方互換性を有しており、現在ソフトウェア無線を用いた実装を構造計画研究所と共に取り組んでいる。今後、実環境での試験による効果の確認や、標準化への提案を行なっていく予定である。

### 遮蔽確率予測を用いた多地点協調伝送

突発的な遮蔽への対策として、我々は遮蔽予測に基づいた複数地点からの連携ビームフォーミングを検討している。ミリ波の遮蔽は人体や車などの物体によって、物理的に伝搬経路を切断されてしまうため、送受信機および遮蔽物の位置関係が変わらない限り、回避することができない。このため、遮蔽による不安定性を回避するためには、遮蔽が発生しない別の電波伝搬経路を作り出すことが最も有効である。そこで従来の基地局機能を無線ユニット (RU: Radio Unit) と分散ユニット (DU: Distributed Unit) に分割し、複数のRUとDUをフロントホールと呼ばれる光回線で接続する。ベースバンドにおけるデジタル信号処理は全てDUで一括して行われ、RU部ではアップコンバージョン・ダウンコンバージョン、アンテナからの送受信といったRF部の処理が行われるのみである。RUを地理的に十分離れた場所に設置することによって、あるRUと端末の間で突発的な遮蔽が発生したとしても、他のRUとのリンクが維持されていれば、通信は続行可能となる。つまり複数のRUが連携して一つの仮想的なセルのように振る舞うことで、ミリ波の不安定性を補償するというアイデアである。しかし、分散配置されたRUからどのようなビームフォーミングを行えば端末の要求する通信速度を維持しながら、安定

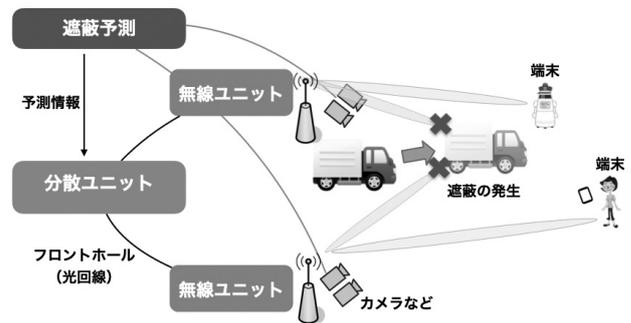


図2 遮蔽確率予測を用いた多地点協調 (CoMP) 伝送のモデル

した通信を実現できるかについては、簡単ではない。遮蔽の発生は非常に確率的かつ突発的なので、各端末へのビームを設計する段階では、データ送信中に遮蔽が起こるかどうかはわからない。一方で、遮蔽が発生するかどうかの予測なしでビームを設計すると、ビームの設計時点で受信電力が最大となるリンクに電力が大きく配分され、そのビームが遮蔽された瞬間に通信速度が急激に低下してしまう。そこで我々は、カメラによる物体の移動や、別周波数の通信路変動によって、遮蔽の発生を予測し、この遮蔽予測に基づいた新たなビーム設計法を提案した [6-7]。提案のモデルを図2に示す。

提案手法では、例えば各端末が200Mbpsの伝送速度を下回る確率を1%以下にして欲しいと要求すると、この伝送速度と信頼性を同時に満たすビームフォーミング設計を経験損失最小化 (ERM: Empirical Risk Minimization) に基づいた最適化法によって実現する。この手法によって、ミリ波の最大の問題であった不安定性を解消し、さらに個々のアプリケーションが要求する信頼性と伝送速度を確保することが可能となる。グラントフリー非直交多元接続と同様に、本手法についてもハードウェアへの実装を構造計画研究所と共に取り組んでおり、今後実環境においてどれだけの安定性が実現できるかを検証していく予定である。

### ユーザ要求を柔軟に満たす無線アクセス網技術: PHLEXIBLE

最後にここまで述べた二つの要素技術を基にした新たな無線アクセス網技術「PHLEXIBLE」について紹介する [8-9]。PHLEXIBLEは図2と同様のアーキテクチャを持つ。各RUの物理的なカバレッジを束ね、仮想的に1つの広いセルを構成することで、セルの頻繁な加入・離脱に伴う遅延の発生、不安定性を抑圧す

る。さらにグラントフリー非直交多元接続を単純な多数同時接続・低遅延通信のみに用いるのではなく、高速・大容量通信のためのグラント要求といった制御通信にも用いることで、通信に対する要求の変動が発生したとしても、接続基地局の中で閉じた処理によって即座に高速・大容量な通信に移行することが可能となる。高速・大容量を要求した端末に対しては、リソースブロックの割り当て後、遮蔽予測に基づいた多地点協調伝送を行い、要求伝送速度と信頼度を満たした通信が実現される。また本方式では、自身の仮想セル内にいるユーザがどのような通信品質要求をもっているかに応じて、高速・大容量と多数同時接続・低遅延通信への割り当てリソースブロック量を変化させることが可能であり、これによって Beyond 5G、6G 時代に求められる複雑な通信要求を満足させながら、柔軟に状況に対処することができることになる。現在各要素技術をベースに、制御部分に関する検討を続けており、今後実装および標準化への寄与を目標としている。

## おわりに

本稿では Beyond 5G、6G に向けた新たな無線アクセス網に関する研究開発について紹介した。現代の研究開発は、10年前と比較しても飛躍的に進歩しており、その理解には、線形代数、確率統計、最適化といった、数理工学的な基礎が必須となっている。技術の進展が加速し続ける現代だからこそ、そのときそのときの流行りに流されるのではなく、その全てに共通する基礎を身につけることが、長い目で見ればイノベーションを生み出す源泉になる。大学での勉強など役に立た

ないといった言説をしばしば目にすることがあるが、今こそ基礎研究の重要性を理解し、産学官連携を強め、イノベーションを生み出す地盤を固めていくことが社会全体として必要だろう。その結果として、ソサイエティ 5.0 に示されるような、あらゆる人々が未来に希望をもって生活できる社会が実現されることを願って止まない。

## 謝辞

本研究は総務省委託研究「第5世代移動通信システムの更なる高度化に向けた研究開発 (JPJ000254)」の成果の一部である。

### <参考文献>

- [1]内閣府, 第6期科学技術・イノベーション基本計画, (2021).
- [2]Report ITU-R M.2083-0- IMT Vision - Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond, (2015.9).
- [3]Report ITU-R M.2410-0 - Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s), (2017.11).
- [4]T. Hara and K. Ishibashi, "Grant-Free Non-Orthogonal Multiple Access with Multiple-Antenna Base Station and Its Efficient Receiver Design," IEEE Access, vol. 7, pp. 175717 - 175726, (2019).
- [5]原郁紀, 石橋功至, "低遅延・多接続のためのグラントフリー非直交伝送法," 電子情報通信学会総合大会, B-5-70, (2021.3)
- [6]H. Iimori, G. T. F. de Abreu, O. Taghizadeh, R.-A. Stoica, T. Hara, and K. Ishibashi, "Stochastic Learning Robust Beamforming for Millimeter-Wave Systems with Path Blockage," IEEE Wireless Commun. Lett., vol. 9 no. 9, pp. 1557 - 1561, (2020.9)
- [7]H. Iimori, G. T. F. de Abreu, O. Taghizadeh, R.-A. Stoica, T. Hara, and K. Ishibashi, "A Stochastic Gradient Descent Approach for Hybrid MmWave Beamforming with Blockage and CSI-Error Robustness," IEEE Access, (2021.5)
- [8]T. Murakami, H. Shinbo, Y. Tsukamoto, S. Nanba, Y. Kishi, M. Tamai, H. Yokoyama, T. Hara, K. Ishibashi, K. Tsuda, Y. Fujii, F. Adachi, K. Kasai, M. Nakazawa, Y. Seki, and T. Sotoyama, "Research Project to Realize Various High-Reliability Communications in Advanced 5G Network," IEEE WCNC 2020, Virtual Conference, (2020.5).
- [9]石橋功至, "ナノエリア環境のための新たな無線アクセスアーキテクチャ," 電子情報通信学会総合大会, B-5-64, pp. 352, 広島大学, 広島市, (2020.3)



先端ワイヤレス・コミュニケーション研究センター 石橋功至研究室



分散無線システム研究室 (石橋功至研究室) は、電通大先端ワイヤレス・コミュニケーション研究センター (AWCC) に属しており、無線通信技術に関する幅広いトピック、例えば Beyond 5G/6G と、IoT 向けの超低消費電力通信、エネルギーハーベスティング、ポスト量子時代を想定した物理層セキュリティ技術について、活発に研究を行っています。2013年に初代となる学部4年生が配属されてから、今年で8年目となり、現在は3名の研究員、12名の学生が在籍しています。研究室では、情報理論や信号処理に基づいた数理工学的な研究を基本としていますが、理論だけにとどまらず、ハードウェアへの実装やフィールドでの実験的評価、さらには産学官連携による社会実装にも取り組んでいます。



研究室メンバー (筆者後列右から3番目)