

AI 時代の情報社会を支える 無線通信システム

東京理科大学 創域理工学部 電気電子情報工学科 教授 ひぐち けんいち 樋口 健一

1 はじめに

日常生活に欠かせなくなったスマホ（携帯電話）は、通信事業者が設置した最寄りの基地局と電波を使って無線通信します。スマホをつなげる無線通信システムは正式には移动通信システムと呼ばれ、AI 時代の情報社会を支えるべく進化を続けています。本稿では、将来の無線通信システム像とこれを支える無線通信技術の例について紹介します。

2 AI 時代の情報社会を支える 無線通信システム

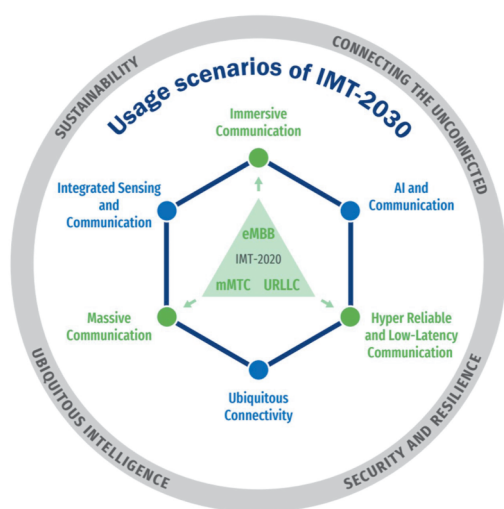
スマホ（最初は自動車電話や携帯電話でした）をつなげる無線通信システムは、概ね 10 年毎に世代更新され、NR と呼ばれる最新方式は第 5 世代（5G）に該当します。現在、2030 年頃の実現を目指して研究開発が進められている次の 6G システムはどのように進化するのでしょうか。

1G から 4G までずっと続いてきた大きな目標は「高速・大容量化」でした。つまり、スマホの通信速度の向上と、より多くのユーザをシステムに収容することです。5G システムは、この既定路線の「高速・大容量化（eMBB と称されます）」に加えて「超高信頼・低遅延化（URLLC）」と「多数同時接続（mMTC）」を実現しているのが大きな特徴です。「超高信頼・低遅延化」とは、通信の誤りと遅延時間を同時に非常に低減することです。実はこれは、人間がスマホで通信をするときの利便性向上ではなく、機械のようなモノが求める通信に必要なことなのです。利用シナリオとしては、車の自動運転、工場の自動化を含むロボットの遠隔操作、遠隔医療手術等が例に挙げられます。安全な車の自動運転やロボットの遠隔制御を実現するためには、車やロボットは無線通信によってリアルタイ

ムで自身の状態情報を送信し次の動作を決定するのに必要な情報を受信しなければいけません。この情報のやりとりに誤りや遅延が生じると重大な事故につながるため、スマホでの通信とは別次元のレベルで情報を遅延なく正しく伝送することが求められます。5G システムではこのようなモノとの通信を実現するため、99.999% の精度で 1 ミリ秒程度の伝送遅延時間を実現できるよう設計されています。

「多数同時接続」はどうでしょうか。これもまた、モノが通信をするために必要となります。例えばスマート農業では、農地に多数のセンサをばらまいてセンシング結果をネットワークに吸い上げて農作業の効率化・自動化を図ります。スマートシティでは、家電やメータ・センサの情報をもとに人々の生活の質を高め、エネルギーの効率化等環境に配慮した都市を実現します。この実現には、極めて多数のセンサ等機器の常時無線接続が必須であり、人間だけが通信をしていた時代に比較して飛躍的な「多数同時接続」が必要となります。5G システムでは、1 平方キロメートル当たり 100 万台の機器との接続性を担保すべく設計されています。

「超高信頼・低遅延化」や「多数同時接続」は、無線通信システムがモノのインターネット（IoT）を実現して社会の基盤インフラとなるために必要な要求条件です。今後はこのようなモノとの無線通信を土台として AI を活用した様々なサービスやビジネスの提供がなされる情報社会になることは間違いのないでしょう。これを支えるのが将来の 6G システムです。【図 1】に 6G システムの利用シナリオを示します。5G の柱であった「高速・大容量化」、「超高信頼・低遅延化」、「多数同時接続」は更なる高度化が期待されます。そのうえで、6G システムは AI を前提に作られる、とよく言われます。これには 3 つの意味があります。1



【図1】 6G システムの利用シナリオ IMT-2020 が 5G, IMT-2030 が 6G に該当 (ITU-R 勧告 M.2160 より抜粋)

つ目は、無線通信システムの設計・動作仕様自体に AI を組み込むということです。例えば、通信の制御に必要な情報の圧縮に AI を用いる等です。2 つ目は、ネットワーク運用に AI を賢く活用するということです。そして 3 つ目は、AI やロボットが性能を発揮できる無線ネットワーク基盤を作ることです。このためには、5G の三本柱の高度化に加えて、今までカバーできていなかった山岳部や海上のような人の住んでいないエリアもカバーし、どこにいてもなるべく一定の通信品質を保証して提供する必要があります。

以降では、6G システムを実現するためにキーとなる無線通信技術の一例として、MIMO、多元接続、ヘテロジニアスネットワーク (HetNet) について紹介します。

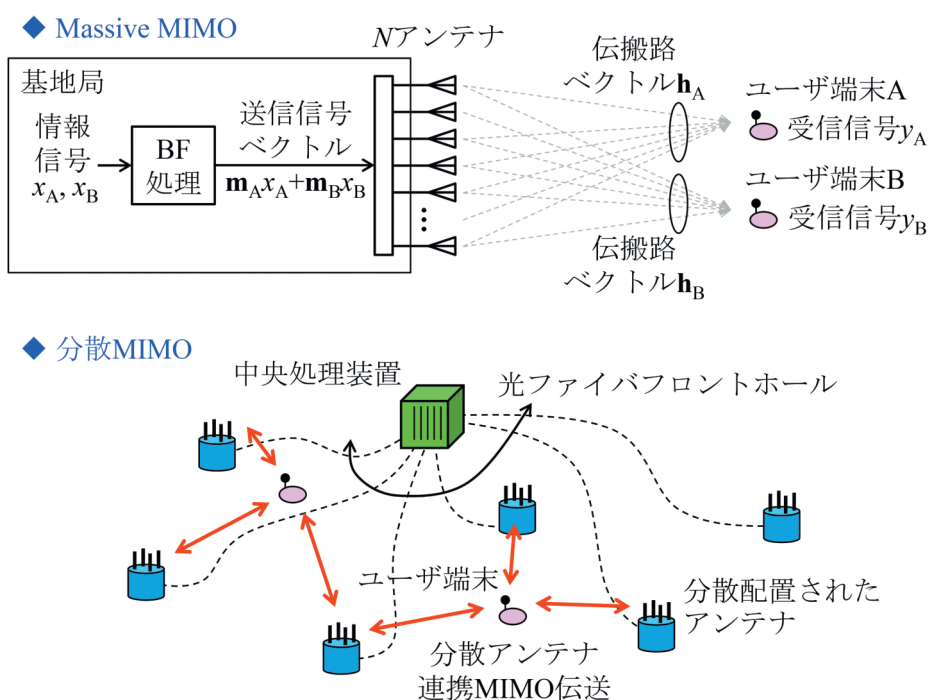
③ キーとなる無線通信技術の例

(1) MIMO

MIMO は、送信機と受信機それぞれに複数のアンテナを用意する無線通信技術です【図2】。MIMO には、受信信号電力を増大して通信距離を延ばす効果と、使用周波数を増やさずに通信速度を増大する効果があります。以降、興味のある方のために少し高校数学レベルの数式を使って説明しますが、飛ばしてしまっても大丈夫です。

N 本の送信アンテナを持つ基地局から、各々 1 本の受信アンテナを持つユーザ端末 A, B への情報伝送を考えます。基地局は、ユーザ A, B 宛の情報信号 x_A, x_B に長さ N のある列ベクトル $\mathbf{m}_A, \mathbf{m}_B$ をそれぞれ乗算してから加算して送信信号ベクトル $\mathbf{m}_A x_A + \mathbf{m}_B x_B$ を作り、このベクトルの第 n 要素を n 番目の送信アンテナから全アンテナ同時に送信するものとします。 $\mathbf{m}_A, \mathbf{m}_B$ を乗算する処理を、ビームフォーミング (BF) ないしプリコーディングと呼びます。

電波は四方八方に広がって飛んでいくので、ユーザ



【図2】 Massive MIMO と分散 MIMO

A, B の受信アンテナでは, N アンテナからの送信信号が足し合わさって受信されます。各送信信号はアンテナ毎にばらばらな無線伝搬路で決まるある係数が乗算されてから受信されます。この無線信号の届き方を示す伝搬路ベクトルをユーザ A, B それぞれ長さ N の行ベクトル $\mathbf{h}_A^T, \mathbf{h}_B^T$ で表すと, ユーザ A, B の受信信号 y_A, y_B は次式で表されます。

$$y_A = \mathbf{h}_A^T(\mathbf{m}_A x_A + \mathbf{m}_B x_B) + w_A = \mathbf{h}_A^T \mathbf{m}_A x_A + \mathbf{h}_A^T \mathbf{m}_B x_B + w_A$$

$$y_B = \mathbf{h}_B^T(\mathbf{m}_A x_A + \mathbf{m}_B x_B) + w_B = \mathbf{h}_B^T \mathbf{m}_A x_A + \mathbf{h}_B^T \mathbf{m}_B x_B + w_B$$

ユーザ A, B それぞれにとって, 青い部分は自分宛の所望信号成分, 赤い部分は他ユーザ宛信号による干渉成分です。 w_A, w_B は受信機で加わった雑音成分です。

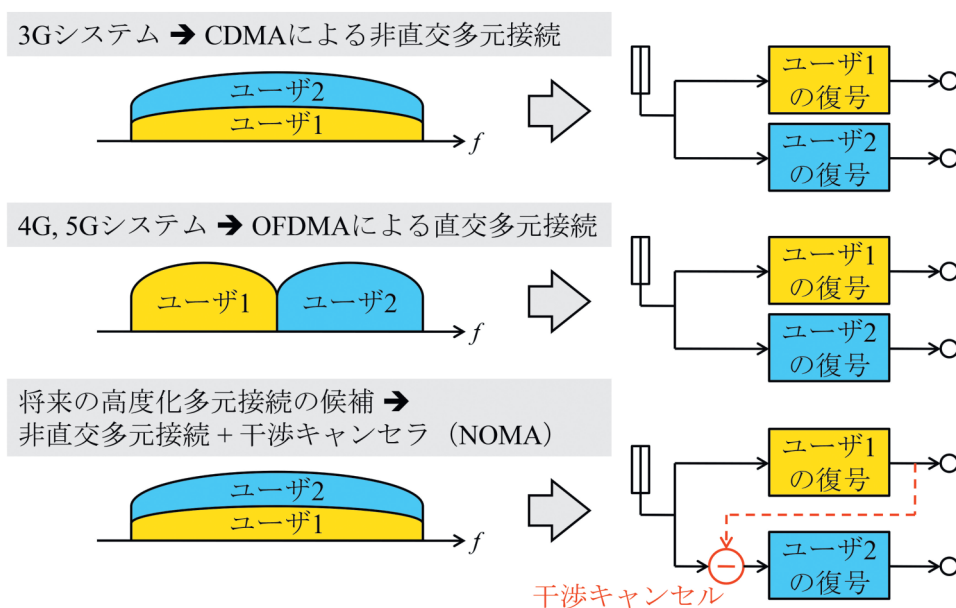
さて, ユーザ A を例に, 所望信号の受信電力を最大化するには, BF ベクトル $\mathbf{m}_A$ をどのように定めればよいでしょうか。コーシー・シュワルツの不等式から, $\mathbf{h}_A$ との内積が最大になるよう, $\mathbf{m}_A$ を $\mathbf{h}_A$ と同じ向きのベクトルに定めればよいことがわかります。これにより送信電力を増やすことなく, 受信信号電力を N 倍にして通信距離を増大できます。一方, ユーザ A, B の相互干渉を無くしたいときは, どうでしょう。この場合, $\mathbf{h}_B$ との内積が 0 になるように $\mathbf{m}_A$ を, 同様に $\mathbf{h}_A$ との内積が 0 になるように $\mathbf{m}_B$ を定めればよいですね。後者の BF の考えを発展させると原理的には使用する周波数を増やさずに同時に N ユーザに情報を伝送して通信を高速化できます。説明した 2 つの

MIMO 効果は片方を優先するともう片方の効果が減るので状況に応じて使い分けます。

MIMO の効果はアンテナ数が増えるほど増大するので, 今後は【図 2】に示した基地局のアンテナ数を 100 程度以上のオーダまで増大させた局所的な Massive MIMO と地理的に分散してアンテナを配置する分散 MIMO の両方が適材適所で活用されるものと考えられます。Massive MIMO は伝搬損失の大きなミリ波帯等の電波を使う場合に BF で通信距離を延ばすのに必須です。分散 MIMO はどの位置にいるユーザにも高い通信品質を提供するのに特に有効となります。

(2) 多元接続

エリア内の複数のユーザ端末と基地局との同時接続の仕組みを多元接続と言い, 各世代を特徴づける主要な無線通信技術となっています【図 3】。3G システムでは, CDMA という方式に基づいて各ユーザはシステムが持つ周波数帯域幅を全て用います。周波数帯域幅が広いほど通信速度を増大できますが, 異なるユーザが同一の周波数を用いるので, 互いに干渉しあう欠点があります。一方 4G, 5G システムでは, OFDMA という方式に基づいて基本的に各ユーザは互いに異なる時間・周波数を割り当てられて通信を行います。こうすると, ユーザ間干渉は生じません。しかし, 各ユーザが使用できる周波数帯域幅は, ユーザ数が増えるほど狭くなってしまいます。つまり, 3G システムと 4G/5G システムの多元接続の間には, 周波数帯域幅



【図 3】 多元接続の高度化

と干渉量の観点からトレードオフがあり、どちらも最適なものとは必ずしも言えません。

当研究室では、3Gのように複数ユーザが同じ周波数を使うことを許容しつつ、ユーザ間干渉を干渉キャンセラと呼ばれる信号処理で削減することにより両者のいいとこどりをする非直交多元接続 (NOMA) の研究を長年進めており、これまでの考案技術は4Gシステムに採用されています。NOMAは、遠方のユーザの通信品質を近傍ユーザの通信品質劣化を抑えつつ改善できる利点があるためAI時代に求められるどこでも均一な通信品質の実現に優れ、多数同時接続の高度化にも有効なため、今後の無線通信システムでの更なる高度化と応用が期待されます。

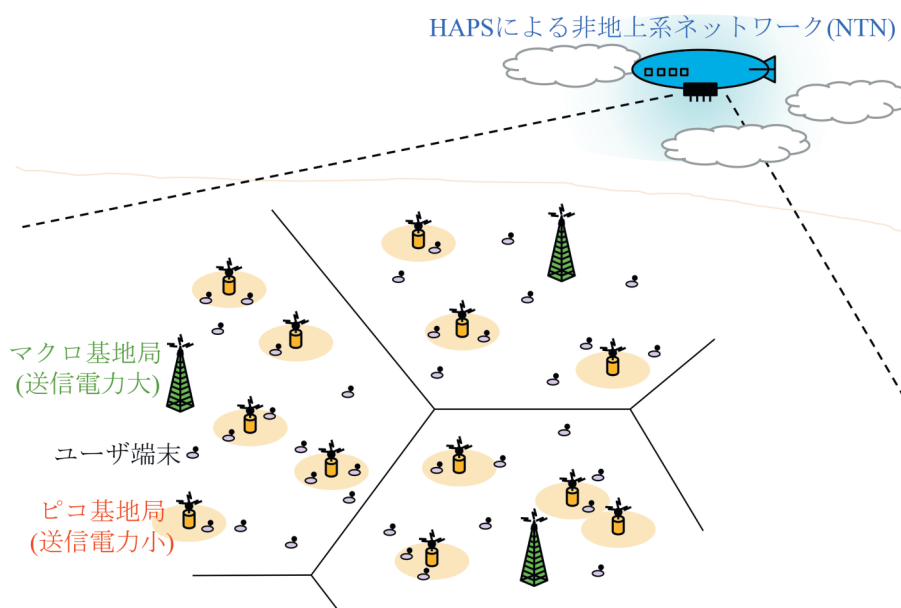
(3) ヘテロジニアスネットワーク (HetNet)

異なる性質のネットワークを混在させる HetNet は、どこでも高品質でつながる無線通信システムを低コストで実現するためのキー技術と考えられています。**【図4】**に示すように、異なる送信電力の地上基地局を混在させる構成に加えて、人工衛星や HAPS と呼ばれる高高度疑似衛星による空からのエリア化を実現する非地上系ネットワーク (NTN) との HetNet が着目されています。小電力のピコ基地局は、従来のマクロ基地局のエリア内のトラフィックが集中する場所 (例えば駅ナカ等) に置かれて、トラフィック負荷を分散します。一方、NTN は今まで地上ネットワークでカバーできていなかった山岳部、海上等のエリア化が主

な目的です。人工衛星だと Starlink が有名ですが、ここでは HAPS について紹介します。HAPS は高度約 20 km の成層圏で静止飛行して地上に半径 100 km 程度の大きな通信エリアを 1 基で形成できます (地上マクロ基地局 1 基の通信エリアは半径 1 km 程度です)。さらに、HAPS は人工衛星よりも高度が低いのでユーザ端末と低伝送遅延で直接通信できます。HAPS の実現に当たっては、地上ネットワークとの相互干渉を軽減することが大きな技術課題の一つです。また、せっかく導入するなら HAPS をより積極的に活用することを考えるのも重要です。例えば当研究室では、HAPS を中継局とした 100 km 程離れた 2 拠点間の遠隔医療手術に必要な低遅延双方向無線通信の検討を進めています。

4 おわりに

スマホをつなぐ無線通信システムは、今後モノとの通信も積極的に担って AI 時代の情報社会を支える基盤インフラとなるべく技術革新を続けています。便利になればなるほどあって当たり前の存在になり、その仕組みは気にしなくなっていくものですが、皆さんのスマホで本稿に書かれたキーワードをネット上で調べていただければ、膨大な現在進行形の情報をご覧になれます。まだまだ発展を続ける無線通信システムに興味をもっていただければ幸いです。



【図4】 NTN を用いた HetNet の例