

5Gネットワークの容量増大技術

Technologies to Enhance 5G Network Capacity

- 瀬山 崇志
- 尾崎 一幸
- 伊達木 隆
- 関 宏之
- 箕輪 守彦

あらまし

2020年以降の実用化が期待されている5G(第5世代移動通信システム)は、飛躍的な性能向上による通信の大容量化に加え、低遅延・高信頼・超多数デバイス接続といったネットワークの進化をもたらす。5Gの活用例として、監視カメラ映像の伝送、スタジアムにおける多視点ビデオ映像のリアルタイム視聴、工場におけるロボットの制御などが挙げられる。これらのサービスを収容するための容量増大技術として、小セル化やビーム多重技術が検討されているが、セル間干渉やビーム間干渉が通信品質を低下させてしまうという問題を解決する必要がある。これに対して富士通は、集中ベースバンド処理装置(C-BBU: Centralized Base Band Unit)によって、セル間の干渉を低減させるダイナミック仮想セル制御技術と、アンテナ構成およびサブアレイ間符号化によりビーム間干渉を低減させるサブアレイ間符号化インターリーブビームフォーミング技術を開発した。

本稿では、これらの技術の特長と適用シナリオ、シミュレーションおよび実験による評価結果について述べる。

Abstract

With its commercialization envisaged for 2020 and later, the fifth generation (5G) mobile communication system is expected to make communication networks evolve further by significantly improving performance—enabling increased communication capacity, low latency, high reliability, and simultaneous connections with massive numbers of devices. For example, the 5G system may be used to transmit surveillance camera images, view real-time images from multi-viewpoint video cameras in a stadium, or control manufacturing robots in a factory. To increase network capacity in order to accommodate these services, technologies such as small cells and beam division multiple access are being considered, but first it will be necessary to solve the problem of deteriorating data transmission quality due to interference between cells or beams. To address this problem, Fujitsu has developed two technologies: dynamic virtual cell control using the centralized base band unit (C-BBU) to reduce the interference between cells, and configuring interleaved beamforming with inter-subarray coding to minimize the interference between beams. This paper describes the unique features of these technologies, the scenarios in which they can be applied, and the results of evaluations through simulations and experiments.

ま え が き

世界のモバイル端末によるデータトラフィックは、2016年から2021年にかけて年平均成長率47%で増加し、その量はこの5年間で7倍になると予測されている⁽¹⁾。また、様々な機械やセンサーなどに通信機能が搭載され、ネットワークに接続されるIoTのデバイス数が年平均成長率15%で増加し、2020年には約300億個となることが予測されている⁽²⁾。

このような状況に対応するため、2020年以降の実用化が期待されている5G（第5世代移動通信システム）の研究開発が活発に進められている。5Gでは、飛躍的な性能向上による通信の大容量化に加え、低遅延、高信頼、超多数デバイス接続といったネットワークの進化⁽³⁾を活かした新たなサービスが期待されている。

活用例としては、大容量化では過密都市部における多数ユーザーによるモバイル利用の収容、ショッピングモールにおける監視カメラ映像や工場における製品検査カメラ映像の伝送などが挙げられる。また、低遅延と大容量化を組み合わせたスタジアムでのスポーツイベントにおける多視点ビデオ映像のリアルタイム視聴や、高信頼と低遅延を組み合わせた工場でのロボットの制御が考えられる。これらのサービスを実現するに当たって以下の施策が必要となる。

(1) セルの高密度化（小セル化）

小セル化とは、基地局の電波が届く範囲（セル）を小さくすることである。小セル化し、単位面積あたりのTP（Transmission Point）数を増やすことにより、一つのTPあたりのユーザー数が減少するため、単位面積あたりの大容量化が実現できる。また、5Gでは4G（LTE）より高い周波数帯の電波を利用することになるため、電波が回折しにくく、屋外から屋内への電波侵入損失が高い。このため、TPとユーザーとの間に障害物があり、直線経路が存在しない見通し外エリアや屋内エリアにおいて、不感地帯が発生しやすくなる。小セル化は、このようなケースに対しても有効である。

(2) 周波数帯域幅の拡大

収容可能なデータトラフィック量であるシステム容量は、使用する周波数帯域幅に比例するため、

周波数帯域幅を拡大することにより、増大することができる。従来より移動通信に用いられてきたUHF帯（300 MHz～3 GHz）は需要が逼迫した状態にあり、新たに広い周波数帯域を確保することが困難である。そこで、5Gではより高い周波数帯域であるSHF帯（3～30 GHz）やEHF帯（30～300 GHz）の利用も検討されている。日本においても、2018年度末までに3.7 GHz、4.5 GHz、28 GHz帯の5Gへの周波数割り当てを目指している⁽⁴⁾。

筆者らは、5Gにおける小セル化の適用に向けて、超高密度分散アンテナシステムの研究開発に2015年度から取り組んでいる^{(5)、(6)}。

本稿では、まず6 GHz以下の低SHF帯において小セル化に伴うセル間干渉への対策となるダイナミック仮想セル制御技術を紹介する。次に、広い周波数帯を確保可能な6 GHz以上の高SHF帯を用いたサブアレイ間符号化インターリーブビームフォーミング技術について述べる。

ダイナミック仮想セル制御技術

● 従来型小セルとMassive MIMOの特徴

従来の小セル構成はTP密度が高いため、ユーザーに対する周辺TPからの干渉が増大する。このセル間干渉は、小セル化によるシステム容量向上の効果を低下させる。また、図-1 (a)に示すように、受信品質の悪いセル境界領域を固定的に生じさせる。このため、小セルに分割せず、多数のアンテナを1か所に集中させたMassive MIMO（Multiple Input Multiple Output）も検討されている。

しかし、障害物によりTPとユーザーとの間の直線経路が遮られる場所（見通し外）が多い環境では、電波のビームが届きにくいいため、受信品質の悪い不感領域が生じる（図-1 (b)）。更に、高SHF帯に比べて低SHF帯では、多数のアンテナを備えたTPは装置のサイズが大きくなることから、特に屋内環境において装置を設置することによる景観への影響も懸念される。

● ダイナミック仮想セル制御技術の特長

そこで、筆者らは複数のTP間で干渉を低減しながら信号の品質を向上させるダイナミック仮想セル制御技術の検討に取り組んだ。ダイナミック仮想セル制御技術は、ビームによって、仮想的に電波が届く範囲を絞った仮想セルを形成し、その形

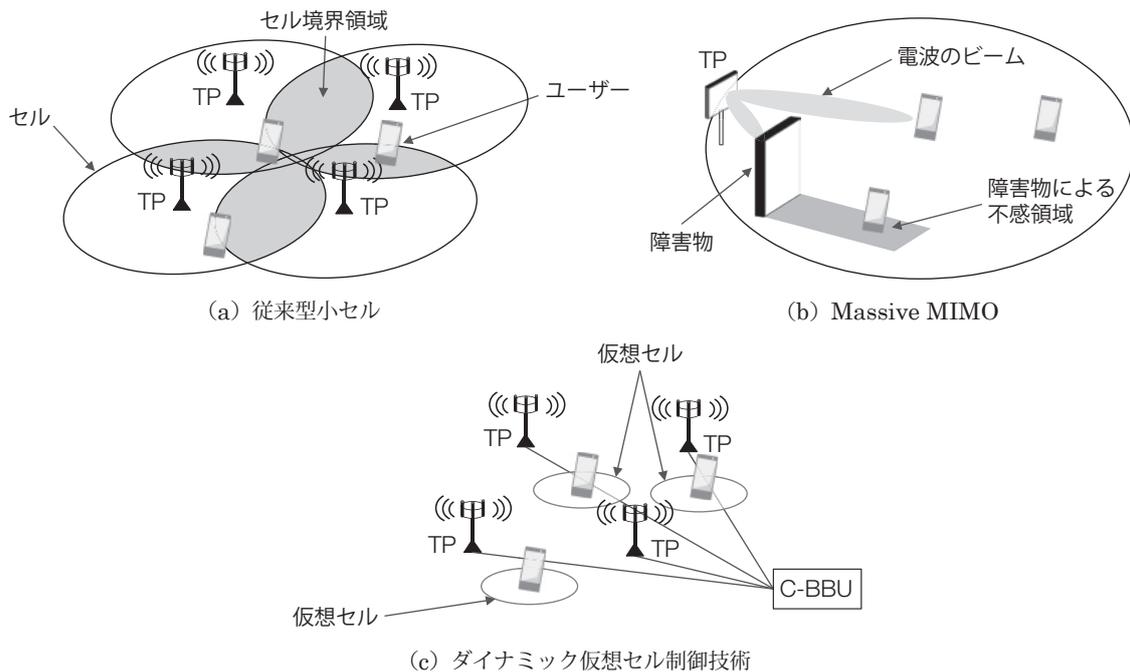


図-1 従来型小セルとダイナミック仮想セル制御技術

状を瞬時に変更でき、かつセル境界をダイナミックに変更できる。これにより、図-1 (c) に示すように、ユーザーを通信品質の良い仮想セルの中心になるように調整できる。

具体的には、TPが接続された集中ベースバンド処理装置（C-BBU：Centralized Base Band Unit）により、送信信号の振幅および位相を調整し、同時に送信された個々のユーザーデータがお互いに干渉しないようにする。⁽⁵⁾ 従来の小セルでは、周辺TPからの信号も干渉として届いていたため、スループットが低下していた。一方、ダイナミック仮想セル制御技術では、仮想的に独立した電波の伝搬経路を形成することにより、セル間の干渉がない通信が実現できる。このように、ダイナミック仮想セル制御技術は、多くのTPが干渉源となる超高密度配置において非常に有効な技術である。

● Indoor Mixed Officeモデルによるシミュレーション

ダイナミック仮想セル制御技術では、超高密度に配置されたTPのいずれかとユーザーとの間に直線経路を確保できる（見通しとなる）確率が高くなる。そのため、ダイナミック仮想セル制御技術を最大限に発揮できるのは、電波を遮る遮蔽物が多い環境である。そのようなシナリオとして、前

述したショッピングモールや生産設備が並んだ工場のような屋内環境、建物が密集する超高密度都市部環境が挙げられる。

一例として、5Gの標準規格を策定している3GPP（3rd Generation Partnership Project）において定義されている、複雑な屋内構造を模擬したIndoor Mixed Officeモデル⁽⁷⁾を用いたシミュレーションによる評価結果を紹介する。このモデルは、TPとユーザーとの間の距離に応じて、見通し、あるいは見通し外であることを確率的に決定する統計モデルである。

図-2 (a) に示すように、このモデルでは、開放的な空間を模擬したモデルよりも見通しとなる確率が低くなっており、電波が届きにくい環境を模擬している。図-2 (b) に示すように、ダイナミック仮想セル制御技術および従来型小セルでは8個のTPを、Massive MIMOでは1個のTPを天井に配置した（天井高：3 m）。またアンテナ構成は、ダイナミック仮想セル制御技術および従来型小セルでは、TPあたり交差偏波アンテナのペアを横方向に2個並べたアンテナを用いた。Massive MIMOでは、交差偏波アンテナのペアを縦方向に4個、横方向に8個並べたアンテナを用いた。

30ユーザーをランダムに配置したときの、全

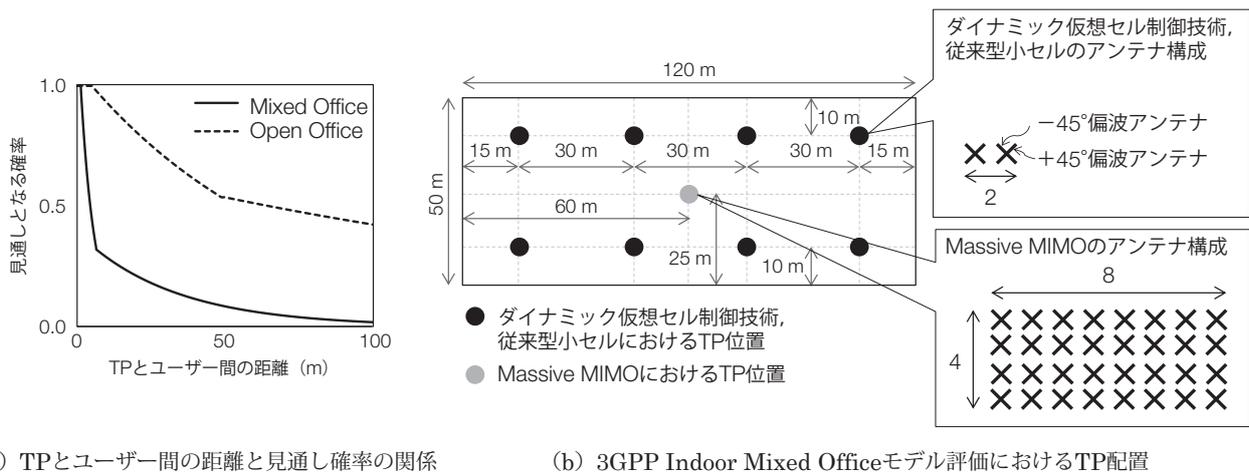


図-2 3GPP Indoor Mixed Officeモデルの評価条件

表-1 3GPP Indoor Mixed Officeモデルにおける評価結果

	合計スループット (Mbps)	5% CDFスループット (Mbps)
ダイナミック仮想セル制御技術	5,920	184
Massive MIMO	5,113	83
従来型小セル	3,269	14

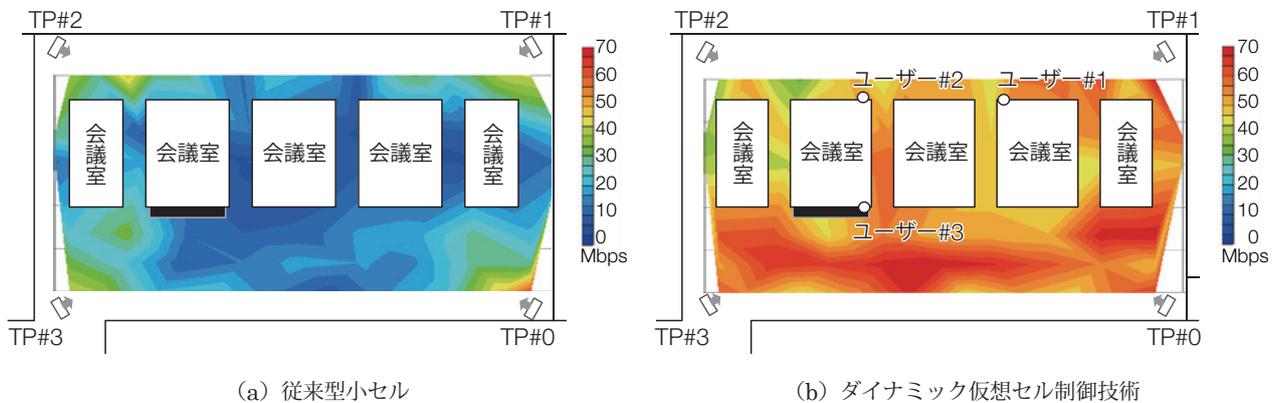


図-3 スループットの比較

ユーザーの合計スループット、および各ユーザーのスループットの累積分布 (CDF: Cumulative Distribution Function) の下位5%値である5% CDFスループットを表-1に示す。

合計スループットでは、ダイナミック仮想セル制御技術およびMassive MIMOは従来型小セルと比較して、それぞれ約1.8倍、1.6倍となっている。5% CDFスループットを見ると、ダイナミック仮想セル制御技術は従来型小セル比では約13倍、Massive MIMO比では約2.2倍となった。TPがユー

ザー近傍に存在する確率が高くなることにより、高い合計スループットと5% CDFスループットを両立可能な技術であることが確認できた。

● リアルタイム伝送装置による社内実証実験

筆者らは、富士通新川崎テクノロジースクエアのロビーエリアで、ダイナミック仮想セル制御技術の実用性を示す実験を行った。

本実験では、4個のTP (アンテナ数2) をエリアの四隅に配置し、アンテナの指向性を図-3中で示す矢印の方向に向けた。従来型小セルでは、ユー

ザー #0 (図には非表示) は受信電力が最も高いTPと通信し、それ以外のTPからはダミー信号を送信して、干渉を模擬した。一方、ダイナミック仮想セル制御技術では、ユーザー #0 ~ 3 (アンテナ数1) と通信させる。ユーザー #1 ~ 3は場所を固定し、ユーザー #0の場所を変えて測定した。

それぞれのヒートマップを図-3に示す。従来型小セルでは、セル間干渉のためスループットの良い場所はTP近傍に限られることが明らかになった。一方、ダイナミック仮想セル制御技術ではセル境界が発生しないため、どの位置でも高いスループットを維持できていることが分かった。

サブアレイ間符号化インターリーブビームフォーミング技術

● ビームフォーミング(BF)方式

28 GHzに代表される高SHF帯では、数百MHzから数GHzの広い帯域幅を確保できるため、システ

ム容量が飛躍的に向上する。このため、5Gではモバイルブロードバンド(MBB)への活用が期待されている。高SHF帯は、低SHF帯に比べると波長が短く、アンテナ素子を小型にできるため、超多素子アンテナを用いて電波の指向性(ビーム)を制御し、所望の方向に電波を送信できる。超多素子アンテナによるビームを同時に複数生成して、同時に要求される方向に信号を送受信することで、システム容量を増大できるビーム多重技術が注目されている。以下、ビーム多重技術を用いた従来方式(デジタルBF方式とローカライズドサブアレイ型ハイブリッドBF方式)の特徴と、富士通研究所が考案したサブアレイ間符号化インターリーブBF方式について述べる。

(1) 従来方式

デジタルBF方式を図-4(a)に示す。本方式はデジタル回路だけでビーム制御を行い、周波数変

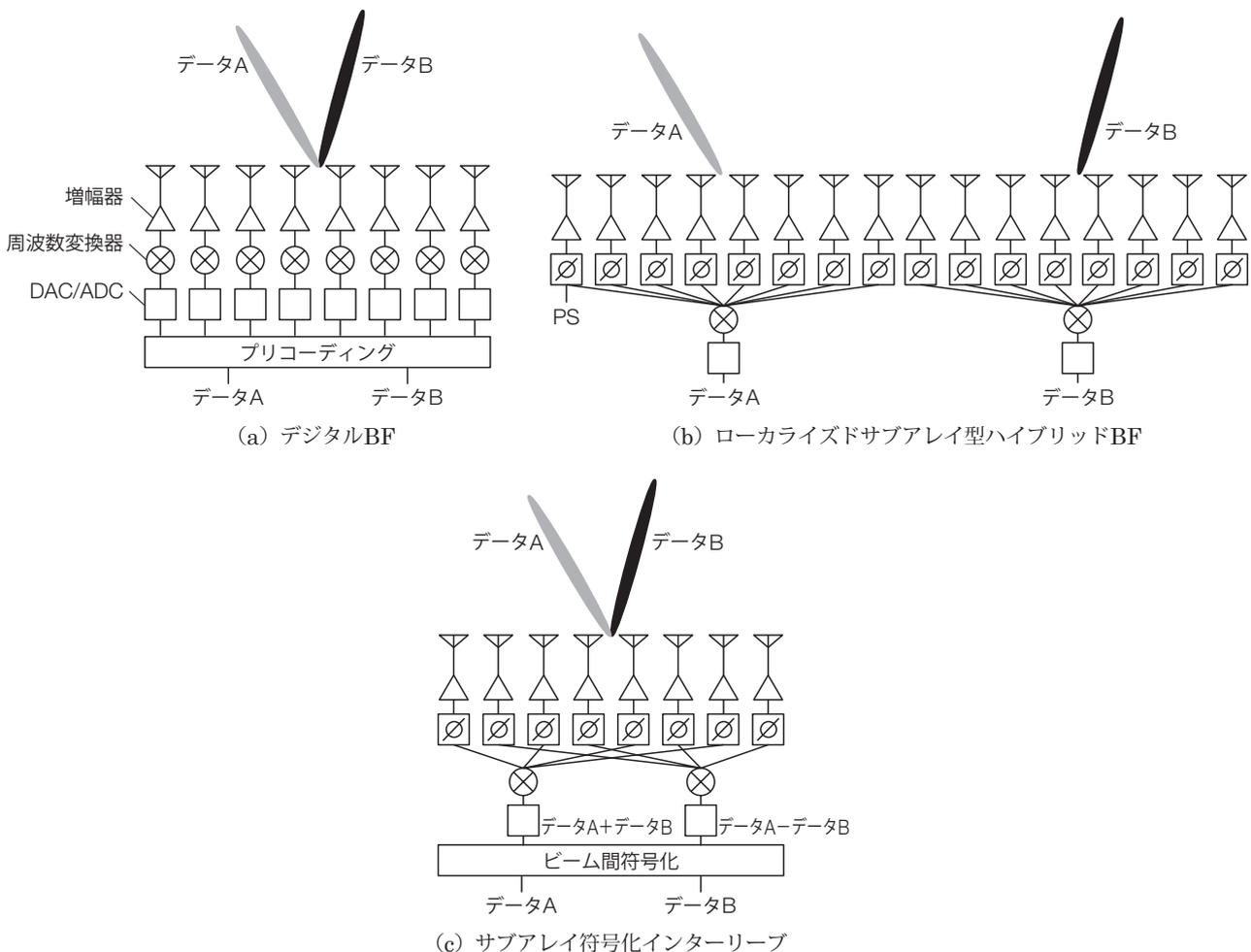


図-4 BF方式の構成例

換器やDAC (Digital-to-Analog Converter) /ADC (Analog-to-Digital Converter) の数がアンテナ素子と同じ数だけ必要となり、消費電力が膨大になってしまう。

そこで、ビーム制御をアナログ回路の位相制御器 (PS : Phase Shifter) を用いて行うハイブリッドBFが注目されている。この構成の場合、DAC/ADCや周波数変換器の数をアンテナ素子の数から生成するビームの数へと削減できるため、消費電力を大幅に低減できる。

ハイブリッドBFの方式として、アンテナを生成するビームの数のサブアレイに分けて、それぞれのサブアレイで異なる方向にビームを制御するローカライズドサブアレイ型ハイブリッドBF方式がある (図-4 (b))。しかし、この方式でデジタルBF方式と同じビームを生成するには、1ビームあたりのアンテナサイズをデジタルBF方式と同じにする必要がある。このため、全体でビーム多重数倍のアンテナサイズとなり、装置が大型化するという問題がある。

(2) サブアレイ間符号化インターリーブBF方式

そこで、筆者らは消費電力を低減すると同時に、アンテナサイズも小型にできるサブアレイ間符号化インターリーブBF方式を考案した (図-4 (c))。この方式は、複数のデータを交互に配置したサブアレイに分配してビームを形成する。各サブアレイのアンテナ間隔は1波長よりも数倍長くなってしまいうため、所望の方向とは異なる方向に不要なビームであるグレーティングローブが発生することに

なる。これについては、複数のデータをあらかじめビーム間符号化部で混合し、各データを全てのアンテナから放射してアンテナ間隔を等価的に短くすることで対応している。

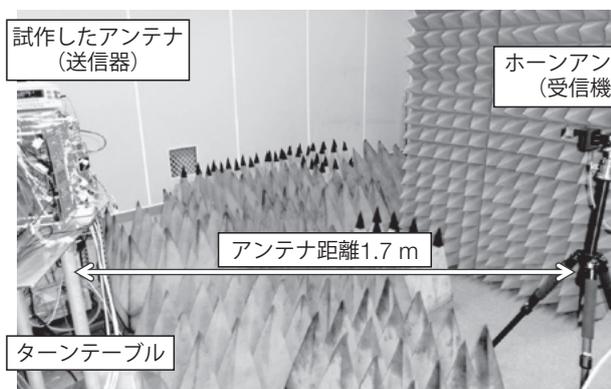
各ビームは一定の角度間隔に固定されるが、ビーム方位は各アンテナに配置されているPSによって自由に制御できる。大容量通信のユーザー需要密度が高いスタジアムの観客席や繁華街などでは、ビーム間隔が固定されていることのデメリットはほとんどなく、サブアレイ間符号化インターリーブ技術が非常に有効な技術となる。

● 実証実験

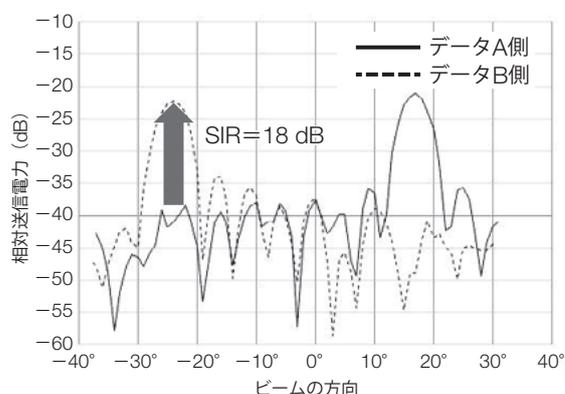
サブアレイ間符号化インターリーブBF方式の原理検証を行うために、免許不要帯である60 GHz帯の周波数を使用して実証実験を行った。実証実験を行うために試作したアンテナの本数は、水平方向に16本、垂直方向に8本を配列した合計128本である。本アンテナを用いて、45°異なった二つの方向にビームを生成するように設定した。

実際の試験環境を図-5 (a) に示す。今回試作したアンテナを用いて信号を送信し、ターンテーブルによって送信側を回転させながらホーンアンテナで信号を受信する。そして、その信号の電力を測定することで、ビームパターンを取得した。そのビームパターンを図-5 (b) に示す。

今回の実験ではデータA側とデータB側にビームを向けることで、信号対干渉電力比 (SIR) をそれぞれ18 dB以上確保し、サブアレイ間符号化インターリーブBF方式を用いたビーム多重を実現でき



(a) 実証実験の様子



(b) ビームパターンの測定結果

図-5 実証実験の様子と結果

た。また、試作アンテナを2枚用いて異なる4方向にビームを生成した結果、1ビームあたり2.5 Gbps、トータルで10 Gbpsのスループットを実現できた。

む す び

本稿では、5Gの実用化に必要なシステム容量（収容可能なデータトラフィック量）の増大に向けた従来型小セルとビーム間干渉の改善について述べた。低SHF帯では、ダイナミック仮想セル制御技術がユーザーの場所に関わらず均質なスループットを実現できることを述べた。更に、高SHF帯では、超多素子アンテナを用いたサブアレイ間符号化インターリーブBF技術について述べた。今後は、同時に通信するユーザー数を向上させる予定である。

本稿には、総務省からの委託を受けて実施した「第5世代移動通信システム実現に向けた研究開発」の成果の一部が含まれている。

参考文献

- (1) Cisco : Cisco Visual Networking Index : 全世界のモバイルデータトラフィックの予測、2016 ~ 2021年アップデートホワイトペーパー。
https://www.cisco.com/c/ja_jp/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html
- (2) 総務省 : 情報通信白書平成29年版。
<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/h29.html>
- (3) ITU-R : IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. Recommendation ITU-R M.2083-0(Sep. 2015).
https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-I!!PDF-E.pdf
- (4) 総務省 : 情報通信審議会情報通信技術分科会 新世代モバイル通信システム委員会報告 (案).
http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/joho_tsusin/5th_generation/02kiban14_04000608.html
- (5) T. Seyama et al. : Study of Coordinated Radio Resource Scheduling Algorithm for 5G Ultra High-Density Distributed Antenna Systems. APWCS2016 (Aug. 2016).

- (6) T. Okuyama et al. : Antenna Deployment of 5G Ultra High-Density Distributed Massive MIMO by Low-SHF-Band Indoor and Outdoor Experiments. VTC 2017 Fall (Sept. 2017).
- (7) 3GPP : TS 38.901 V14.3.0 (2017-12).

著者紹介



瀬山 崇志 (せやま たかし)

(株) 富士通研究所
ワイヤレス研究センター
兼 富士通 (株)
ネットワークプロダクト事業本部
5G無線通信システムの研究開発に従事。



尾崎 一幸 (おざき かずゆき)

(株) 富士通研究所
ワイヤレス研究センター
5G無線通信システムの研究開発に従事。



伊達木 隆 (だてき たかし)

(株) 富士通研究所
ワイヤレス研究センター
兼 富士通 (株)
ネットワークプロダクト事業本部
5G無線通信システムの研究開発に従事。



関 宏之 (せき ひろゆき)

(株) 富士通研究所
ワイヤレス研究センター
兼 富士通 (株)
ネットワークプロダクト事業本部
5G無線通信システムの研究開発に従事。



箕輪 守彦 (みのわ もりひこ)

富士通 (株)
ネットワークプロダクト事業本部
5G無線通信システムの研究開発に従事。