

6Gシステムレベルシミュレータ —100GHz帯100Gbpsの超高速 通信の実現に向けて—

6G-IOWN推進部

おくやま たつき すやま さとし
奥山 達樹 須山 聡
のなか のぶひで あさい たかひろ
野中 信秀 浅井 孝浩

6Gでは、5Gで導入されたミリ波帯に加え、100～300GHz帯までをターゲットにした、いわゆるテラヘルツ波も活用しピークデータレートとして100Gbps超の超高速通信が期待されている。すでにドコモでは、6Gにおけるテラヘルツ波の活用に向けた研究開発が開始されており、将来的には実験装置を用いた実証実験も行われると想定されるが、現状の初期検討段階では、100Gbpsの超高速通信に関しては、シミュレーションによる性能評価により、テラヘルツ波を活用したシステム性能向上の可能性を示すことが求められる。そこでドコモでは、開発した100GHz帯を用いるシステムレベルのリアルタイムシミュレータを活用し、屋内環境における2種類のシナリオにおいて、多数のユーザが存在する環境下でユーザ当たり100Gbps超のスループットを達成できることを明らかにした。本稿ではその詳細について解説する。

1. まえがき

第5世代移動通信システム（5G）は世界的に商用導入が進められているが、サービスが普及するにつれ、5Gにおける課題や、5Gのさらなる進化に対する期待も生じている。5Gでは、Sub6^{*1}帯や、28GHz帯といったミリ波^{*2}帯を用いたサービスが展開され、

特に28GHz帯は、日本では400MHzと広い帯域幅を割り当てられており、100MHz幅であるSub6と比較して高いデータレートが提供できる。

一方、米国の連邦通信委員会が95GHz～3THzのミリ波より高い周波数帯を、第6世代移動通信システム（6G）のトライアル向けに開放するなど、昨今6Gに向けて高周波数帯を活用する機運が高まり

©2021 NTT DOCOMO, INC.

本誌掲載記事の無断転載を禁じます。

本誌に掲載されている社名、製品およびソフトウェア、サービスなどの名称は、各社の商標または登録商標。

^{*1} Sub6：周波数帯域の区分の1つ。3.6GHzから6GHzの周波数をもつ電波信号。

^{*2} ミリ波：周波数帯域の区分の1つ。30GHzから300GHzの周波数をもつ電波信号。

つつある。これらの高周波数帯の利用に向けて、無線技術の検討やデバイスの開発が進められている[1]～[3]。しかし、これらの実現には、高周波数帯の利用によるシステム性能の向上の可能性を早期に明らかにする必要がある。研究開発が進むにつれて実験装置を用いた実環境での性能評価も必要となる。ただし、装置開発には相応の時間を要することから、初期の検討段階では実環境での評価は容易ではなく、シミュレーションによりテラヘルツ波^{*3}を用いることで、どの程度の通信速度が達成できるか、性能を示すことが求められる。そこで、ドコモは6Gによる超高速通信の実現性を実環境に近い環境で明らかにすることを目的に、システムレベルシミュレータ^{*4}を開発した。ショッピングモールと工場を模擬した2種類のシナリオにおいて、静止あるいは移動する端末（MS：Mobile Station）が混在する中で、前述の95GHz～3THzの周波数帯から一例として100GHzを利用したときのMS当りの下りリンクのスループットを評価した。

本稿では、シミュレーションにより、6Gの実用化に向けて、帯域幅8GHzの超広帯域^{*5}伝送で、MS当り100Gbpsのスループットを実現できることに加え、ドローン基地局（BS：Base Station）やIRS（Intelligent Reflecting Surface）^{*6}を活用することで100GHzの大きな伝搬損失^{*7}を補償しつつ、100Gbpsを達成可能なMS数を増やせることを解説する。

2. 6Gに向けた高周波数帯の開拓と新たな無線通信技術

6Gでは、5Gの高速・大容量、低遅延、多数端末同時接続に収まらない新しい組合せの要求条件や、5Gでも達成困難な究極の超高性能を必要とするユースケースが想定される[3]。具体的には、6Gによ

り通信速度をさらに向上させ、100Gbpsを超える「超高速・大容量通信」により、現実の五感による体感品質と同等、もしくはそれを超えるような新体感サービスが実現されると考えられる。また、現在の移动通信システムがカバーしていない空・海・宇宙などをエリアカバーとする「超カバレッジ拡張」、今後のミリ波・テラヘルツ波開拓におけるビット当りの「超低消費電力・低コスト化」、また、1ms以下のE2E（End to End）での超低遅延実現、高信頼性や高セキュリティを実現する「超高信頼通信」が期待される。加えて、6G時代にはkm²当り1000万デバイスの「超多接続」や、無線通信の電波を用いてMSのcm精度で超高精度な測位を行うなどの実世界を「センシング」する機能を備えることも想定される[4]。

6Gでは、テラヘルツ波において5Gと比較して飛躍的に広い信号帯域幅が利用できるため、100Gbpsを超える超高速通信の実現が期待される。しかし、テラヘルツ波は、従来のミリ波よりもさらに電波の直進性が高まり、伝搬損失が大きくなることにより、遠くへ飛ばなくなる技術課題がある。そのため、テラヘルツ波における電波伝搬特性^{*8}の明確化やモデル化、それに基づいた6G無線アクセス技術の確立、そして、これらの高周波数帯での無線デバイス技術の進展が重要である。

現在の移动通信ネットワークでは、通信事業者が設置したBSでエリアをカバーする固定的なネットワークトポロジーが主流である。一方、6Gでは、高周波数帯でのカバレッジ確保や接続性の向上を考え、MS周囲の複数アクセスポイントが協調して最適なパス選択やダイバーシチ^{*9}送受信を行う、より高密度なネットワーク構成の分散ネットワーク高度化技術（New Radio Network Topology）が必要である[3]。New Radio Network Topologyでは、街灯、照明など、既存オブジェクトの通信のアンテナへの

^{*3} テラヘルツ波：1THz前後の電磁波の呼称。100GHzから10THzの周波数を指すことが多い。

^{*4} システムレベルシミュレータ：基地局と端末間の振舞いをシミュレーションするリンクレベルシミュレーション（^{*15}参照）に対し、システムレベルシミュレーションは基地局と端末が複数存在する環境にて、通信端末の選択や電波伝搬環境に基づく品質制御などを組み込んだ評価方法。

^{*5} 超広帯域：100MHz以上の帯域幅のこと。日本では、28GHz帯において400MHzの帯域幅が5G無線通信用に割り当てられた。

^{*6} IRS：メタマテリアルとよばれる波長に対して微小な構造体を

平面的に配置し、反射波の方向やビーム形状を任意に設計できる反射板。

^{*7} 伝搬損失：送信局から放射された電波の電力が受信点に到達するまでに減衰する量。

^{*8} 電波伝搬特性：伝搬損失、電力遅延プロファイル、角度プロファイルなどの特性を指す。

^{*9} ダイバーシチ：MIMOアンテナを用いて通信の質や信頼性の向上を図る技術の総称であり、特に閉ループ型でないもの。

利用, IAB (Integrated Access and Backhaul)^{*10}や高周波数帯向けリピータ^{*11}などの無線中継技術の高度化, 反射強度や指向性^{*12}を動的制御可能なIRS, MS間連携, 移動するBSなど, いろいろ検討の余地がある。また, 6GではMassive MIMO (Multiple Input Multiple Output)^{*13}の高度化も重要な技術領域であり, さらなる多素子化およびストリーム数の増加(多レイヤ化)が進むとともに, New Radio Network Topologyと組み合わせた分散型アンテナ配置のMassive MIMOである分散MIMO^{*14}も有望である。

3. 高周波数帯活用に向けた 6Gシステムレベルシミュレータ

3.1 シミュレータの概要

ドコモホワイトペーパーや本誌特集記事 [3] [4] で記載された6Gの要求条件や技術コンセプトを実証し, テラヘルツ波の可能性を示すためには, 最終的に実機を活用した実環境での評価が重要であるが, 無線デバイス技術の成熟や装置開発には相応の時間を要する。一方, テラヘルツ波活用の可能性の検証は早期に実施していく必要があるため, シミュレーションを活用して100Gbps超の超高速通信の実現可能性を評価することが重要である。すでに, リンクレベルシミュレーション^{*15}により100GHz帯で100Gbps以上のスループットが達成できることが示されているが [5], より現実に近い環境でもテラヘルツ波の有用性を確認するため, 100GHz帯6Gシステムレベルシミュレータを開発し, これにより伝送性能評価を行った。

本シミュレータでは, 28GHz帯と同等のアンテナサイズとし, 送信電力を5Gと同一にするという拘束条件の下, テラヘルツ波を適用することとしてい

る。テラヘルツ波を用いることでアンテナ素子数(以下, 素子数)を大幅に増加させることができ, このことで高いBF (BeamForming)^{*16}利得が得られるため, テラヘルツ波の大きな伝搬損失の補償が期待できる。本シミュレータでは, それが可能かどうかを検証する。また, 前述のNew Radio Network Topologyの検証の一貫としてIRSや移動BSを実装し, 遮蔽による損失に対する改善効果を確認できる。

本稿では, 屋内環境であるショッピングモールと工場の2つのシナリオにおいて, ユーザスループットを評価し, 100Gbps超のスループットの実現可能性を示す。

3.2 シミュレータの機能

本シミュレータでは, ミリ波帯を活用する5Gと100GHz帯を活用する6Gの性能を比較する。前述した屋内の2シナリオにて, あらかじめ設定した位置に固定局のBSを複数台設置し性能評価を行う。6Gの性能評価では, 固定局のBSに加え, 特定の経路上をドローンBSや小型車両型のBSが移動しながら通信を提供する。また, これまでの人が所有するデバイスの通信に加えて, 将来の高度化されたロボットによるサービス提供を想定し, MSとして人およびロボットを配置した。さらに, 歩行速度で移動するMSと静止MSの混在とした。

テラヘルツ波はミリ波と比較してより一層伝搬損失や遮蔽損失の影響が大きくなる。そのため, 本シミュレータではBSとMSの位置関係, また, BSとMSの間の遮蔽物の有無に応じて, 伝搬損失および遮蔽損失を算出した上で, 各MSの受信電力を決定し, その受信電力に基づき, 各BS(固定, ドローン, 移動, IRS)と通信するMSを決定する。なお, IRSを利用する場合は, BSからIRS, IRSからMSまでの経路長を用いて遮蔽損失を算出する。評価の簡易

^{*10} IAB: 5G無線通信をバックホールの通信にも適用し, 柔軟かつ安価なネットワーク設計・展開を図り, 高速大容量サービスを広いエリアで実現することを目的とした技術。

^{*11} リピータ: 基地局からの下り受信信号を電力増幅して端末への送信を行う物理層の中継機器。

^{*12} 指向性: アンテナの放射特性の1つで, アンテナからの放射強度(あるいは受信感度)の方向特性のこと。

^{*13} Massive MIMO: 送信と受信にそれぞれ複数素子のアンテナを用いることで無線信号を空間的に多重して伝送するMIMO伝送方式において, より多くのアンテナ素子で構成される超多素子

アンテナの採用により, 高周波数帯使用時の電波伝搬損失補償を可能とする鋭い電波ビームの形成や, より多くのストリームの同時伝送を実現する技術。これらにより, 所望のサービスエリアを確保しつつ, 高速なデータ通信を実現する。

^{*14} 分散MIMO: 複数の基地局から異なるMIMOストリームを1つのユーザ端末に送信してMIMO伝送を行う技術。

^{*15} リンクレベルシミュレーション: 送信機・受信機の機能, および, それらの間の無線伝搬路の物理的な振る舞いをモデル化したもので, 送信から受信までの一連の機能や性能の試験に適用される。

化のため、IRSによる反射方向の制御は理想的に動作するものと仮定し、評価上ではIRSを仮想的に固定BSとみなしてBFを行うようにしている。そして、以上から算出される受信電力に基づき、遅延なくMSと通信するBSが切り替わるものとした。

複数MSに対して通信を提供する上で、BSは、無線リソース^{*17}割当てのスケジューリング、送信ウェイト^{*18}生成、ランク制御^{*19}、変調多値数^{*20}の決定を行っている。スケジューリングでは、時間はスロット単位で、周波数はRB (Resource Block)^{*21}単位で、PF (Proportional Fairness)^{*22}アルゴリズムに基づき実施する。MSおよびRBごとにPFメトリック^{*23}を算出し、最大のPFメトリックを有するMSとRBの組合せに対してリソース割当てを実施する。ただし、本シミュレータでは再送を実施しないため、再送制御をメトリック算出には利用しない。

リソース割当て後、RB内で推定した平均SINR (Signal to Interference plus Noise power Ratio)^{*24}に応じて変調多値数を決定する。そして、スロット

ごとに各BSは1台のMSと通信し、BSは送信可能なレイヤ数に応じて最大8レイヤまで伝送する。このとき、システムレベルシミュレーションにおける計算速度高速化を目的に、伝搬チャネル^{*25}のエルミート転置^{*26}の列方向の要素を、ランク数で平均化した送信ウェイトを利用する。

MSは、伝搬チャネルを用いたMMSE (Minimum Mean Squared Error)^{*27}ウェイトにより送信信号を推定する [6]。この推定信号のブロック誤り率および受信SINRを算出し、スループットを計算する。

3.3 評価シナリオ

本稿では、ショッピングモールおよび工場を模擬したシステムレベルシミュレーションを実施する。これらのシミュレーションでは、マルチパスレイリーフェージング^{*28}に基づき伝搬環境を構築している。

(1) ショッピングモールシナリオ概要

ショッピングモールシナリオを図1に示す。ショッ

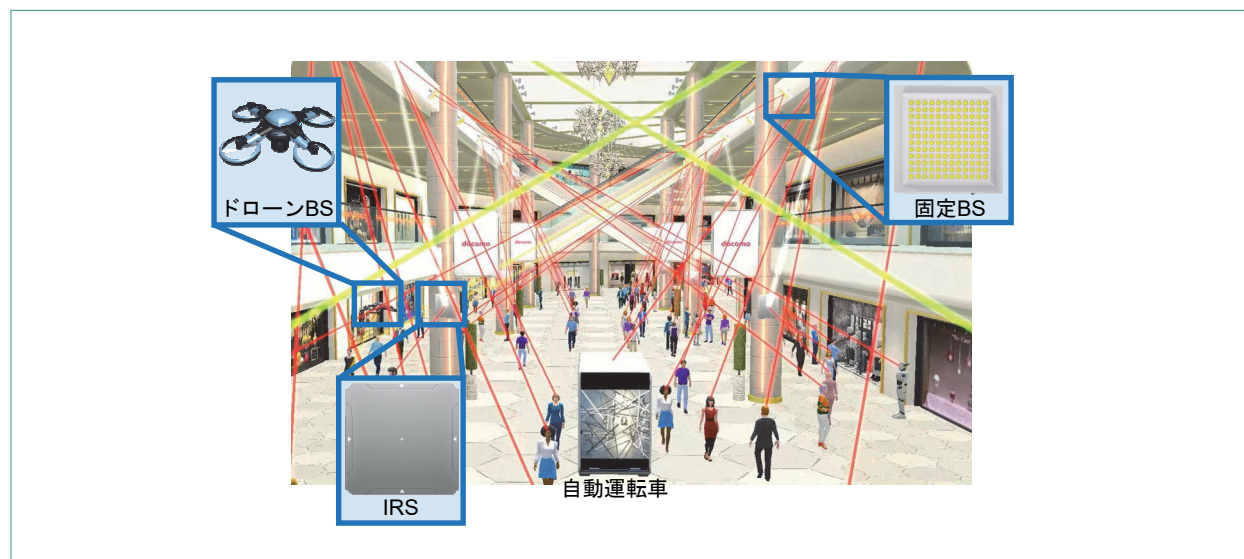


図1 ショッピングモールシナリオでの評価環境

- *16 BF: 複数のアンテナの振幅および位相の制御によってアンテナに指向性パターンを形成し、特定方向に対するアンテナ利得を増加/減少させる技術。
- *17 無線リソース: 無線通信を行うために必要なリソース (無線送信電力、割当て周波数など) の総称。
- *18 送信ウェイト: 複数のアンテナの振幅および位相の制御によってアンテナに指向性パターンを形成し、特定方向に対するアンテナ利得を増加/減少させるための送信重み係数。
- *19 ランク制御: 無線伝搬路の状況に応じて空間多重ストリーム数を適応的に変化させる方法。空間多重に必要な固有空間の数

(ランク) が大きな伝搬環境の場合は、高いスループットを得られるように、空間多重ストリーム数を大きくする。

- *20 変調多値数: データ変調における信号位相点の数。例えば、QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) の場合は4, 16QAM (Quadrature Amplitude Modulation) の場合は16である。
- *21 RB: 無線リソースを割り当てるスケジューリングを行う際の周波数の割当て単位。
- *22 PF: 複数端末の公平性を考慮した無線リソース割当て技術。

ピングモールシナリオでは、2階建ての建物で、吹抜けの通路の側面にショップが並ぶ環境としている。ただし、簡易化のため、ショップ部は壁面として扱う。MSである人やロボット、自動運転車はすべて1階で静止、あるいは移動している。固定BSについては2階天井部の壁側面に設置する。また、6Gを想定した評価では、IRSやドローンBSを設置した。IRSについては、柱や通路に飛び出している看板による遮蔽の影響を緩和する目的で柱に設置し、固定BSの電波を所望方向に反射させる。ドローンBSは2階通路下部のMSに対して通信を提供するために、2階通路下部の上空を定期的に往復させる。本評価では、ドローンBSのバックホール^{*29}は理想的に構築されているものとした。

(2)工場シナリオ概要

工場シナリオを図2に示す。工場シナリオでは、ショッピングモールと異なり大型の箱型の環境を想定する。内部に作業用のベルトコンベアや荷物運搬用のクレーン、また、無人搬送車（AGV：Auto-

matic Guided Vehicle）が存在する環境としている。本環境では、人、ロボット、AGVがMSとなる。固定BSを天井に設置し、クレーンなどで遮蔽され得る場所に位置するMSへ電波を届けられるようIRSを壁や柱に設置した。また、本環境はショッピングモールシナリオでの天井部のような遮蔽は無く、上空方向からの電波は固定BSでまかなえると考えられるため、ドローンBSの効果は得られにくい。そこで、地上のAGVの一部を移動BSとして扱うこととした。移動BSのバックホールは、ドローンBSと同様に理想的に動作する。

4. テラヘルツ波利用による100Gbps超スループットの性能評価

4.1 シミュレーション諸元

シミュレーション諸元を表1に示す。5Gでは中心周波数^{*30} 28GHz、帯域幅400MHzとし、6Gでは100GHzの中心周波数で帯域幅8,000MHzの超広帯域

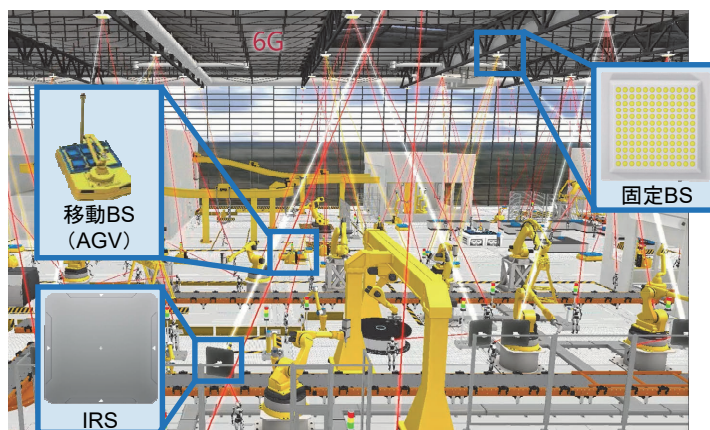


図2 工場シナリオでの評価環境

^{*23} メトリック：数値的な指標をいう。ここではPFアルゴリズムにおいて、瞬時の通信品質の値（受信電力など）を一定期間で平均した通信品質の値で除算した値。
^{*24} SINR：所望波信号の受信信号電力と、それ以外の干渉波信号と雑音電力の和の比。
^{*25} 伝搬チャネル：無線通信の個々の通信路。ここでは各送受信アンテナ間の通信路。
^{*26} エルミート転置：各行列成分が複素数である複素行列の行と列を転置後、各成分の共役をとること。
^{*27} MMSE：平均二乗誤差を最小とするように信号を復調する方法。

^{*28} マルチパスレイレーフェージング：送信点から放射され複数の伝送路（マルチパス）を通った電波が受信点で合成されることにより、移動する受信点での受信レベルが激しく変動する現象をマルチパスフェージングと呼ぶ。特に見通しが無い伝搬環境では、統計的な変動分布をレイレー分布で近似できることが知られている。
^{*29} バックホール：コアネットワークから無線基地局への接続回線を指す。
^{*30} 中心周波数：あるバンドにおける通信帯域の中心となる周波数。

表1 シミュレーション諸元

	ショッピングモール		工 場	
通信システム	5G	6G	5G	6G
中心周波数	28GHz	100GHz	28GHz	100GHz
帯域幅	400MHz	8,000MHz	400MHz	8,000MHz
固定BS素子数 (縦×横×サブアレー)	392 (7×7×8)	4,608 (24×24×8)	128 (4×4×8)	1,152 (12×12×8)
ドローンBS素子数 (縦×横×サブアレー)	－	1,024 (8×8×8)	－	－
移動BS素子数 (縦×横×サブアレー)	－	－	－	228 (6×6×8)
BS数	10	固定：10, 20 ドローン：4 IRS：12	12	固定：12, 25 移動：3 IRS：12
BS総送信電力	30dBm	固定：30dBm ドローン：15dBm	30dBm	固定：30dBm 移動：15dBm
BS素子間隔	0.5λ			
BS素子利得	5dBi			
MS素子数	32（オムニアンテナ）			
MS数	100（移動：70, 静止：30）		100（移動：50, 静止：50）	
MS素子利得	0dBi			
移動速度	3km/h			
チャネル推定	理想			
最大レイヤ数	8			

伝送を行うものとしている。5G, 6G共に素子間隔は0.5 λ とする。このとき、5Gと6Gで固定BSのアンテナパネルサイズは同等であると仮定し、6Gは5Gの約10倍の素子とした。BSは8つのサブアレー^{*31}で1枚の平面アレー^{*32}を構築するものとし、各サブアレーで1つのアナログビームを形成する。ただし、ビーム方向は各BSで1台のMSを向くようにしており、また、各BSは1台のMSのみを収容するSU (Single User) -MIMO^{*33}となっている。送信電

力は、素子数によらず一定とし、固定BSは30dBm, ドローンBSや移動BSは15dBmとした。MSは利得のないオムニアンテナ^{*34}を32素子有するとし、複数素子によるダイバーシチ利得をMS利得としている。また、MSを評価環境に100台存在させ、それらのうち、ショッピングモールで70台、工場で50台が、常に時速3kmで決められたルートを移動するものとしている。送信レイヤ数については、MS当り1, 2, 3, 4, 8個の候補から伝搬環境に応じて通信

*31 サブアレー：回路規模の縮小などを目的に、 N 個のアンテナ素子をもつMassive MIMOにおいて、 L 本のビームを生成する場合に、 N 個の素子を共用し L ビーム生成するフルアレーと呼ばれる構成に対し、 N/L 個の素子で1つのビームを生成する構成を指す。

*32 平面アレー：Massive MIMOアンテナにおいて、多素子を2次元に配置したアレー構造。

*33 SU-MIMO：1ユーザを対象に基地局および端末間で複数のアンテナで複数の信号系統を送り、多重化して送信する技術。

*34 オムニアンテナ：無指向性アンテナとも呼ばれ、電波強度が全方向同等であるアンテナ。

可能な最大数が選択でき、4レイヤ以上で100Gbps以上のスループットが達成できる諸元とした。

4.2 ショッピングモールシナリオ

(1)5G適用時における評価結果

5G適用時のジオメトリ^{*35}と、各MSのスループットの割合を図3に示す。5Gでは固定BSのみを10局利用している。ジオメトリは10～50dBのレンジで画面内に表示されている。また、図中左下のグラフでは、スループットの割合が示されている。0～1Gbps, 1～10Gbps, 10～50Gbps, 50～100Gbps, 100Gbps以上、の5種類の色で表現されており、横軸を時間、縦軸をスループットの割合としている。また、図中のBSとMS間を結ぶ直線の色は、スループットの色を示している。同図から、28GHz帯を利用した5Gでは、伝搬損失はSub6帯と比較すると大きいものの、1階部分はおおむね全範囲をカバーできており、全MSが、1Gbps以上のスループットを達成できていることが確認できる。

(2)6G適用時の評価結果

次に、図3と同じ固定BS設置位置のまま、6Gを想定しBSの素子数を増加させ、また、100GHzの中心周波数へと変更した場合の結果を図4に示す。図中には、図3と同様にジオメトリとスループット割合が表示されている。帯域幅を8,000MHzとしているため、電力スペクトル密度^{*36}は大きく低下するものの、波長の関係から比較的小型の平面アレーであっても素子数を5Gより大幅に増加させることが可能であり、高いBF利得を得ることができる。そのため、1階通路中央付近では受信電力を5Gと比較して約10～15dBほど向上できている。広帯域化および高BF利得により、各MSのスループットも大きく向上できており、約70%のMSが100Gbps以上のスループットを、約30%のMSも50Gbps以上のスループットを達成できていることが確認できる。特に、1台のBSが複数ビームをMSに向けており、BSとMSの直線の色から、見通し環境にあり比較的BSの近接に位置するMSは100Gbps超のスループット



図3 5Gでの評価結果

^{*35} ジオメトリ：受信電力分布などを用いたエリアの品質を示す指標の1つ。

^{*36} 電力スペクトル密度：単位周波数（1Hz）当りの電力。

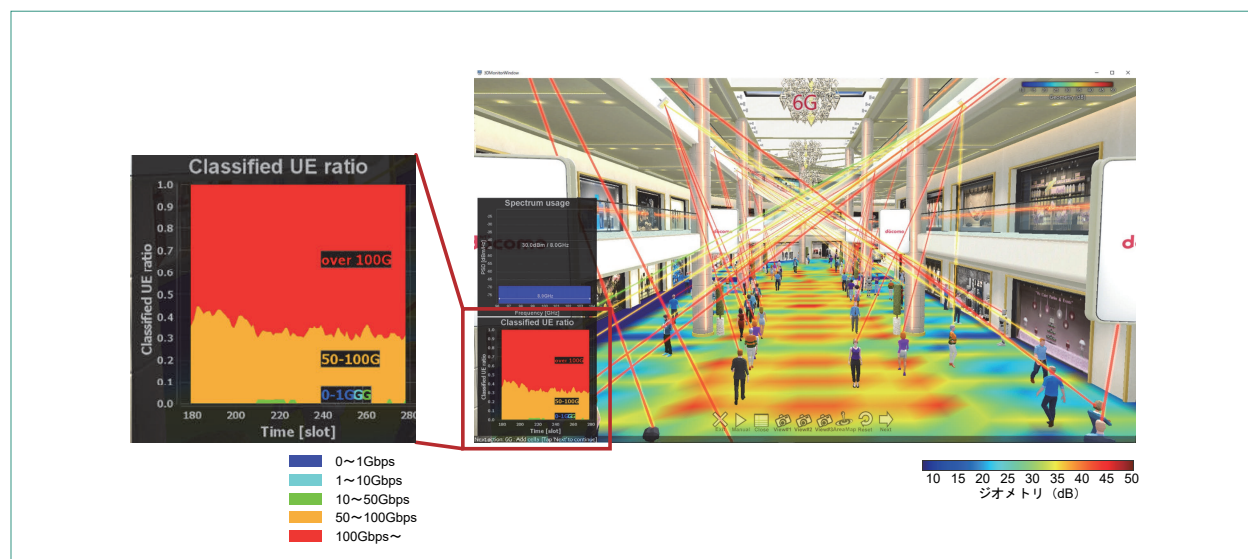


図4 6Gでの評価結果

(レイヤ数が4あるいは8)を達成していることを確認できている。一方で、100GHz帯の電波の伝搬損失の大きさ、直進性の強さから、1階壁面付近は2階の床による遮蔽の影響で、受信電力は10dBほどまで大きく劣化している。また、柱による遮蔽の影響により、例えば右側壁面に設置した固定BSの電波は左側床面の一部に到達しなくなっている。

(3)BSをさらに増加させた場合の評価結果

そこで、固定BS数を20局に増加させた場合の評価結果を図5に示す。結果から、BSの密度が高まったため、柱の遮蔽の影響は緩和できている。さらに、受信電力が20dB以下となる割合を低減できている。これらの効果により、100Gbps以上のスループットを達成可能なMSの割合も、約85%まで向上できている。しかしながら、図5においても依然として1階壁面付近の受信電力は低いままである。

(4)ドローンBSとIRSを追加した場合の評価結果

そこで、ドローンBSおよびIRSを追加した場合の評価結果を図6に示す。4局のドローンBSは1階壁面

付近を低速で移動し続け、IRSについては6本ある柱に2局ずつ設置した。結果から、1階壁面付近の受信電力を大きく向上できしており、おおむね20dBほど改善されている。ただし、通路中央付近はすでに固定BSにより高い受信電力であるため、ドローンBSやIRSの効果は壁面付近に限られていると考えられる。そのため、スループットとしてはわずかながらの改善であり、100Gbps以上のMSの割合は約90%である。

以上から、ショッピングモールシナリオにおいて、6Gで100GHzを利用したときに、100Gbps以上のスループットが達成可能であることを確認するとともに、遮蔽などの影響がドローンBSやIRSによって改善可能であることを明らかにした。

4.3 工場シナリオ

次に、工場シナリオにおけるジオメトリとスループットを明らかにしていく。

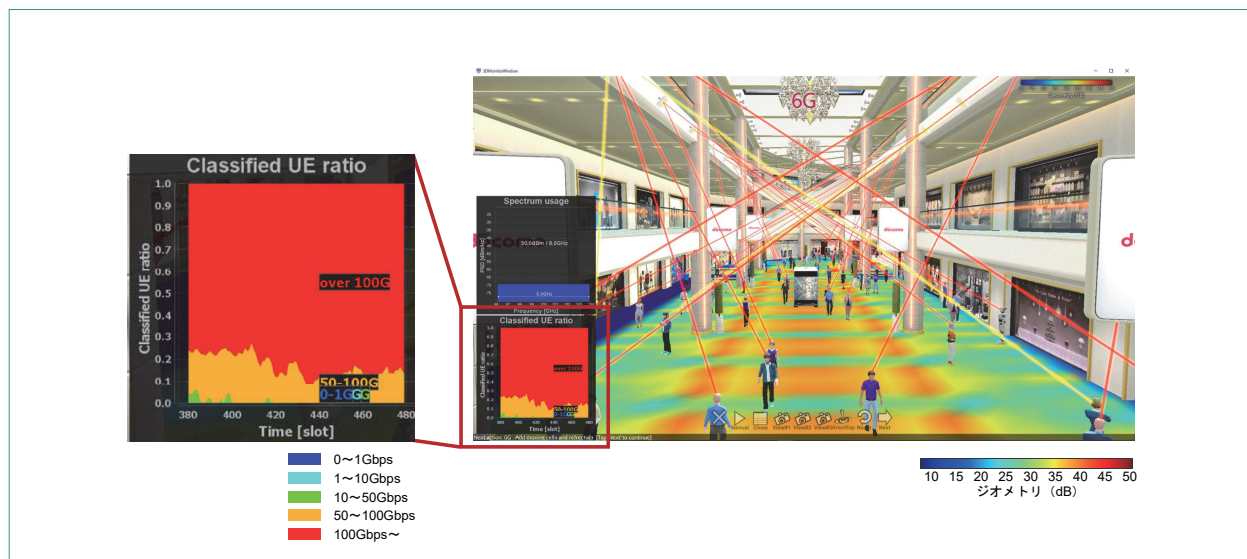


図5 6Gかつ固定BS増設時の評価結果

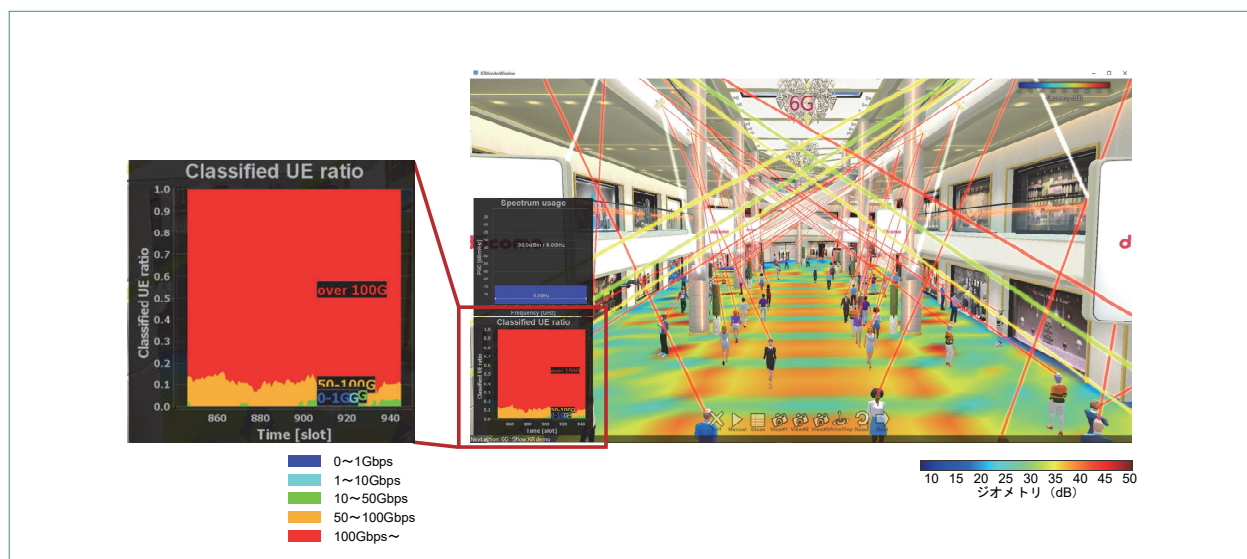


図6 6GかつIRS・移動BS追加時の評価結果

(1)5G適用時における評価結果

まず、5Gの場合の結果を図7に示す。5Gでは12局の固定BSを天井に設置している。ショッピングモール環境と異なり、天井からの電波放射であり、

天頂方向に遮蔽物が少ないことから、全エリアで約35dBほどの受信電力を安定的に達成でき、スループットについても、全MSが1Gbps以上を達成できている。

(2)6G適用時における評価結果

次に、5Gと同じ固定BSの位置、数のまま、6Gに置き換えた場合の結果を図8に示す。ショッピングモールシナリオと同様に、BF利得により見通しと

なっている箇所の受信電力は5Gと比較して10dB以上向上できており、また、広帯域化の効果も相まって100Gbps以上のスループットを達成できるMSが約30%、50Gbps以上のスループットを達成できる

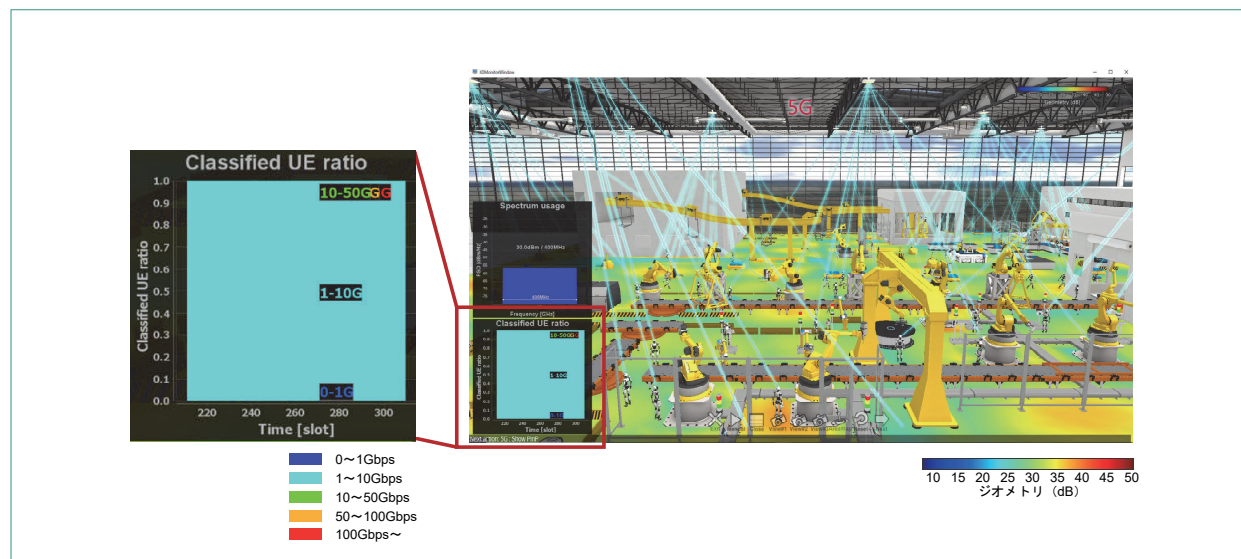


図7 5Gでの評価結果

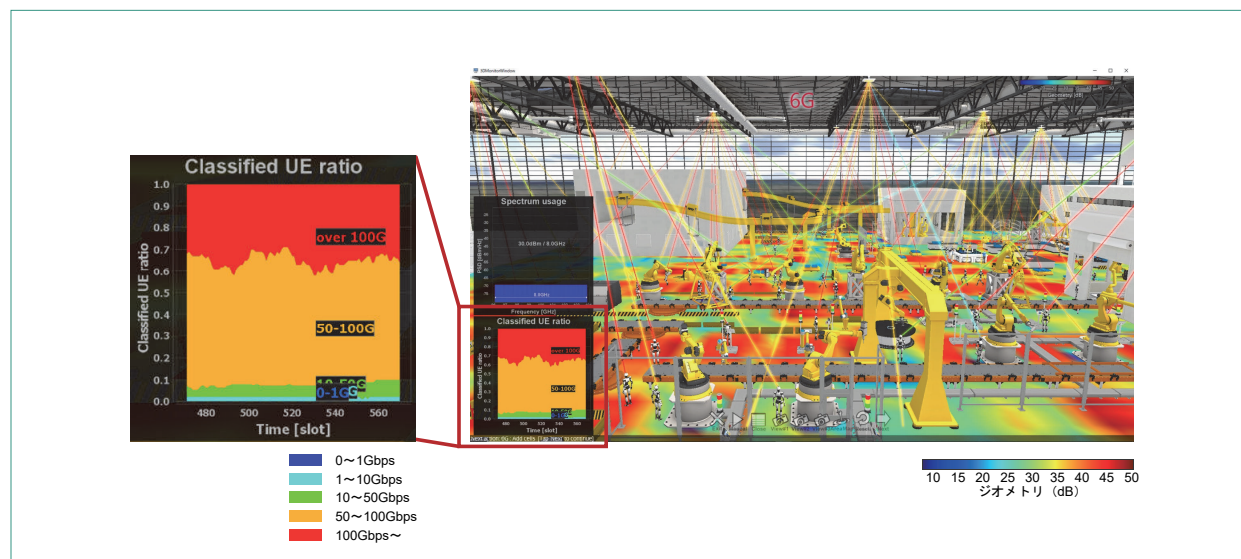


図8 6Gでの評価結果

MSも約60%となっている。また、ショッピングモールシナリオ同様、BSとMSの直線の色から主に見通し環境で100Gbps超（4レイヤ以上）の通信を行えている。一方で、工場シナリオでも100GHzの伝搬損失や直進性の関係で、クレーンなどによる遮蔽の影響を受けており、一部のエリアで受信電力が20dB前後となっている。このため、ユーザスループットとしても10～50Gbpsの割合がショッピングモールシナリオと比較して高くなっている。

(3)BSをさらに増加させた場合の評価結果

そこで、まずは固定BSの数を25局に増加させた。その結果を図9に示す。増加させたことで、平均的な到達距離が短くなり、また、遮蔽されていた場所へも、異なる固定BSからBFを行うことが可能となるため、受信電力もエリア全体で改善できており、30dB以下の受信電力となっているエリアはほとんど無くなっている。この効果により、100Gbps以上のスループットを達成できるMSは約80%まで増加し、10～50GbpsとなるMSの割合も大幅に低減できている。

一方で、図中奥の建物付近の受信電力は低く、これは上部にある固定BSの電波が遮られているためと考えられる。

(4)移動BSとIRSを追加した場合の評価結果

そこで、該当の建物と図中手前のクレーン付近にIRSを、図中中心を左右に移動する移動BSを追加した。この場合の評価結果を図10に示す。結果から、遮蔽の影響が緩和され受信電力を向上することができ、また、スループットにおいても100Gbps以上のMSの割合を約85%まで向上させている。

以上から、工場シナリオにおいても、100GHzを利用し、また、IRSなどを併用していくことで、エリア全体の受信電力の向上かつ100Gbps以上のスループットの達成が可能であることを明らかにした。

5. あとがき

本稿では、100GHzの活用による超高速通信の実現可能性を明らかにするために実施した、ショッピング

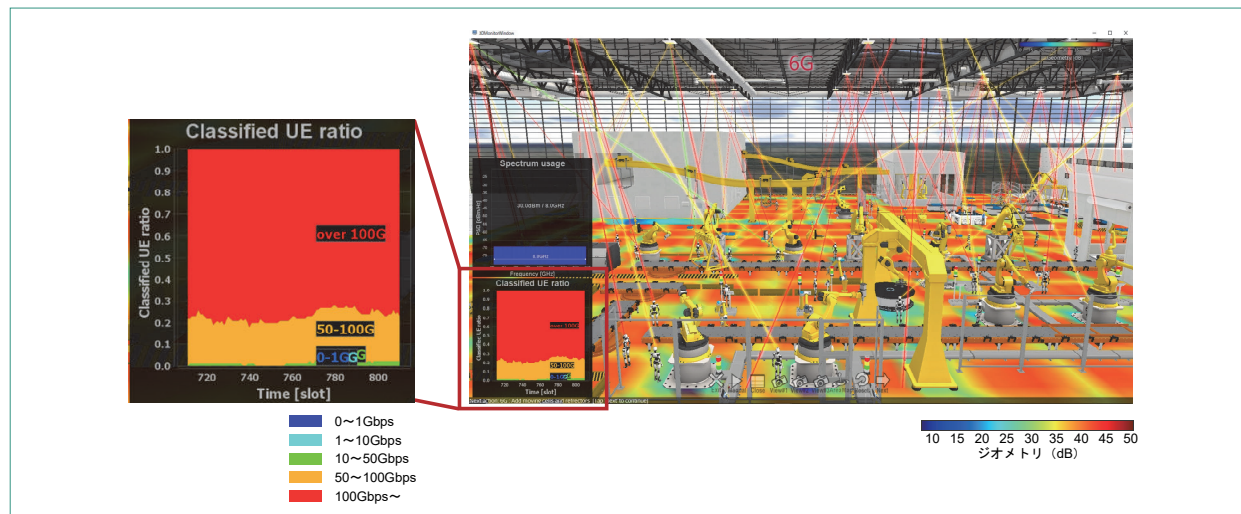


図9 6Gかつ固定BS増設時の評価結果

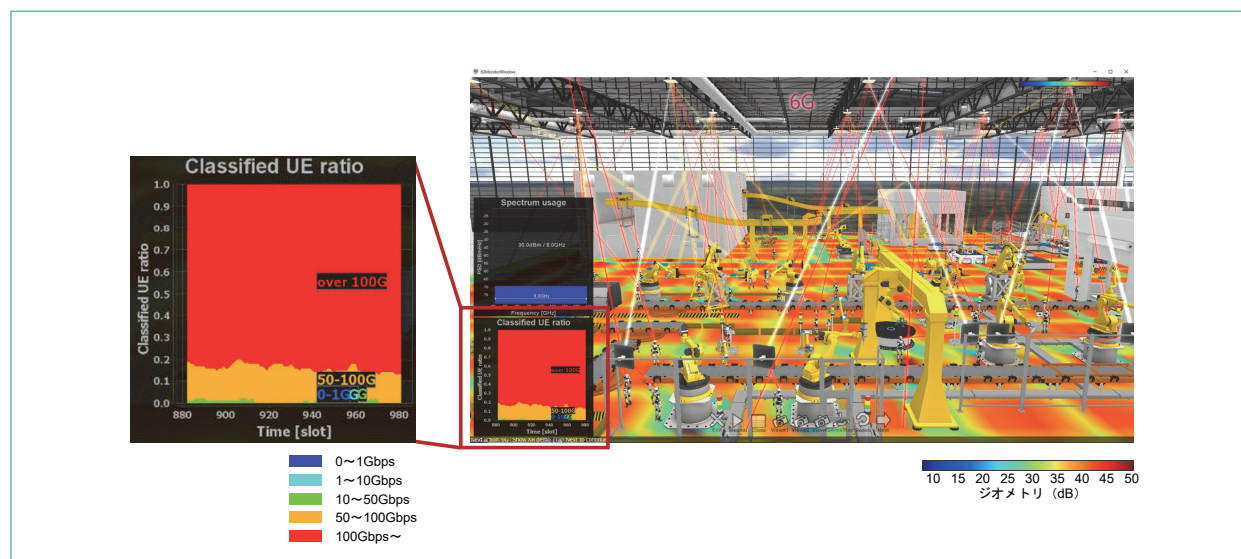


図10 6GかつIRS・移動BS追加時の評価結果

グモールおよび工場を模擬した2つのシナリオでのシステムレベルシミュレーションについて解説した。今後、6Gの実現に向けて、上り方向の通信や異なるシナリオでの性能評価が必要である。将来的には、さまざまな技術コンセプトのシステム評価および性能の可視化ができるように、さらには、その性能に応じて6G時代のユースケースを体験できるように、本シミュレータを拡張していきたい。

文 献

- [1] R. Alghamdi, R. Alhadrami, D. Alhothali, H. Almorad, A. Faisal, S. Helal, R. Shalabi, R. Asfour, N. Hammad, A. Shams, N. Saeed, H. Dahrouj, T. Y. Al-Naffouri and M.S. Alouini : "Intelligent Surfaces for 6G Wireless Networks : A Survey of Optimization and Performance Analysis Techniques," IEEE Access, Vol.8, Oct. 2020.
- [2] P. Skrimponis, S. Dutta, M. Mezzavilla, S. Rangan, S. H. Mirfarshbafan, C. Studer and J. Buckwalter : "Power Consumption Analysis for Mobile MmWave and Sub-THz Receivers," IEEE 2020 2nd 6G Wireless Summit, Mar. 2020.
- [3] NTTドコモ : "ホワイトペーパー : 5Gの高度化と6G," 第3版, Feb. 2021.
https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/technology/whitepaper_6g/index.html
- [4] 岸山, ほか : "5G evolution & 6Gへの動向と目指す世界," 本誌, Vol.29, No.2, pp.6-14, Jul. 2021.
- [5] 須山 聡, 奥山 達樹, 岸山 祥久, 野中 信秀, 浅井 孝浩 : "高周波数帯超広帯域伝送による100 Gbps実現に向けた6G無線アクセス技術の一検討," 信学技報, RCS2020-146, pp.66-71, Dec. 2020.
- [6] T. Ohgane, T. Nishimura and Y. Ogawa, "Applications of Space Division Multiplexing and Those Performance in a MIMO Channel," IEICE Trans. Commun., Vol.E88-B, No.5, May. 2005.