

5G evolution & 6G に向けた NTN技術の研究

5G evolution & 6Gでは、空・海・宇宙を含むあらゆる場所でのユースケースを想定した「超カバレッジ拡張」が検討されています。これまでの移動通信ネットワークでは十分にカバーできなかったエリアへ高品質な通信サービスを提供するためには、GEO、LEO、およびHAPSなどを利用したNTN技術が有望です。本稿ではこれらの技術や、小型飛行機を用いた上空約3 kmでの39 GHz帯伝搬測定実験の内容について解説します。

ほかその

外園

ゆうき

悠貴

きしやま

岸山

よしひさ

祥久

あさい

浅井

たかひろ

孝浩

NTTドコモ

まえがき

第5世代移動通信システム（5G）が地方創生や地域課題解決に向けた重要技術として期待されている中、その恩恵を享受可能な通信エリアをあらゆる場所に拡張していくことが、5Gの高度化（5G evolution）および第6世代移動通信システム（6G）の時代における重要課題となります⁽¹⁾。NTTドコモは、ドローンや「空飛ぶ車」、船舶、宇宙ステーションなど、これまでの移動通信ネットワークでは十分にカバーできなかった空・海・宇宙を含むあらゆる場所への「超カバレッジ拡張^{*1}」実現をめざした研究開発に取り組んでいます。

超カバレッジ拡張の実現に向けては、衛星や高高度プラットフォーム（HAPS：High-Altitude Platform Station）^{*2}を用いた非陸上ネットワーク（NTN：Non-Terrestrial

Network）^{*3}技術に着目しています。本技術では、地理的制約を受けない衛星およびHAPSを介した通信により、山間・僻地、海上、宇宙空間までをエリアカバーすることができます。

本稿では、5G evolution & 6G実現に向けた重要課題の1つである超カバレッジ拡張について解説します。具体的には、有望なアプローチとして注目されているNTN技術の概念、HAPSによる無線システム技術のユースケースと技術課題について示し、小型飛行機を活用した電波伝搬測定にかかわる取り組み内容を解説します。

5G evolution & 6Gでめざす 超カバレッジ拡張とNTN技術

超カバレッジ拡張の実現に向けては、少なくとも数十km程度以上の長距離無線伝送を高効率に実現する技術が必要になると考えられています。

図1のように、①静止衛星（GEO：Geostationary Orbit satellite）、②低軌道衛星（LEO：Low Earth Orbit satellite）、および③HAPSの利用を

視野に入れることで、山間・僻地、海上、空、宇宙空間までカバーすることが可能になり、通信サービスをこれらの地域にも提供することができます⁽²⁾。

① GEOは、高度約3万6000 kmの軌道上にある静止衛星です。衛星から地上局アンテナ間の片道電波伝搬時間が約120 msと比較的長いものの、3～4機で地球全体をカバーし、かつ常時通信が可能であることから、現在でもモバイルバックホール^{*4}として地上ネットワークを補完しています。6G

^{*1} 超カバレッジ拡張：基地局が移動局端末との通信を行うことができるエリアを、現在の移動通信システムがカバーしていない空・海・宇宙などを含むあらゆる場所へ拡張すること。

^{*2} 高高度プラットフォーム（HAPS）：ソーラープレーン型の航空機や飛行船などを利用して、成層圏環境での運用が想定される空中プラットフォーム。

^{*3} 非陸上ネットワーク（NTN）：衛星やHAPSなどの非陸上系媒体を利用して、通信エリアが地上に限定されず、空・海・宇宙などのあらゆる場所に通信エリアが拡張されたネットワーク。

^{*4} バックホール：移動通信ネットワークにおける、多数の無線基地局とコアネットワークとの間の高速大容量な情報伝送をサポートする固定回線を表します。

* 本特集は「NTT DOCOMOテクニカル・ジャーナル」(Vol.29 No. 2, 2021年7月)に掲載された内容を編集したものです。

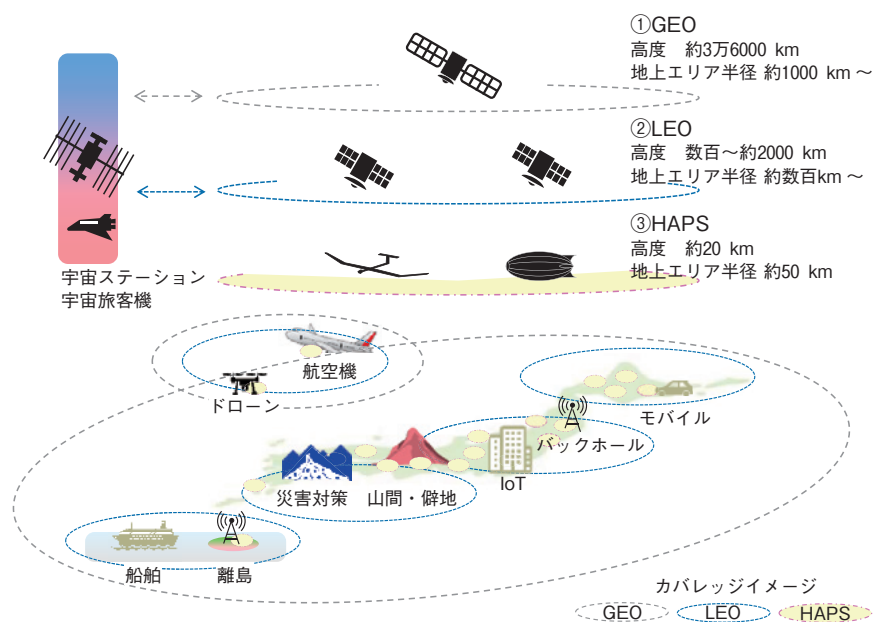


図1 衛星やHAPSを用いる空・海・宇宙へのカバレッジ拡張イメージ

時代ではさらなる大容量化が必要となることから、衛星の電力・周波数をマルチビーム間で最適化することでシステム容量を向上させる超高スループット衛星（VHTS: Very High Throughput Satellite）の実現が検討されています⁽³⁾。

② LEOは、高度数百～約2000 kmの周回軌道上にある衛星であり、GEOと比較して低高度、かつ片道電波伝搬時間が数msという低遅延の特長を活かし、現在は衛星携帯電話や衛星センシング^{*5}で利用されています。衛星製造コストの低廉化やMIMO（Multiple Input Multiple Output）^{*6}などの適用による通信容量の拡大、また将来的に複数の衛星が協調してネットワークを構成する衛星コンステレーションにより、大容量低遅延バックホールとしての利用が期待されています⁽⁴⁾。

③ HAPSは、高度約20 kmで一定の場所に常駐することができ、陸上にセル^{*7}半径約50 km以上

のカバレッジエリアを形成できることから、昨今再注目されています⁽⁵⁾。LEOと比較してさらに低高度であるため、セル半径にもよりますが片道電波伝搬時間約0.1 ms程度とさらに低遅延を実現できます。したがって、災害対策はもちろんのこと、5G evolution & 6Gで想定される多くの産業向けユースケースにも有効だと考えられます。

3GPP（Third Generation Partnership Project）では、これら衛星やHAPSを用いたNR（New Radio）^{*8}のNTNへの拡張検討が開始されています⁽⁶⁾。

HAPSのユースケースとネットワーク構成および制御技術

NTTドコモは、5G網を含む地上ネットワークとHAPSによる成層圏ネットワークが柔軟に連携できる通信方式やネットワークアーキテクチャの研究開発に取り組んでいます^{(7), (8)}。本研究開発では、今後の5G evolution & 6Gで想定される幅広いユースケー

スを柔軟にサポートすることに加えて、災害発生時の柔軟な回線制御の実現や、開発・運用コストなどの面から現実的なHAPSを活用する通信システムの実現を目的とした検討を行っています。

■HAPSのユースケース

図2に示すとおり、5G evolution & 6Gの時代に向けては、HAPSを用いて電波の中継あるいは基地局として電波を発射することで、さまざまなユースケースを実現することが期待されます。ユースケースは、バックホール用途としてサービスを提供する固定系と、端末へ直接、もしくはRepeaterやRelayを中継してサービスを提供する移動系の両方が考えられます。特に広帯域なミリ波^{*9}帯の電波を利用することで、さまざまな産業やイベントなどの用途で要求される高速大容量かつ低遅延な回線を、光ファイバなどの有線網の有無に依存せず、海上・空中・僻地など場所を選ばずタイムリーに提供することが期待されています。

HAPSシステムの要求条件はユースケースごとにさまざま、それぞれに求められる通信速度や帯域幅は異なります（図3）。固定系と移動系のあらゆるユースケースに対応できる柔軟な通信方式とシステムが望ましいです。

例えば、5G基地局へのバックホー

*5 衛星センシング：衛星に搭載している測定器によって、宇宙から大気や地表の状況を観測する技術。

*6 MIMO：同一時間、同一周波数において複数の送受信アンテナを用いて信号の伝送を行い、通信品質および周波数利用効率の向上を実現する信号技術。

*7 セル：移動通信ネットワークのサービスエリアを構成するエリア分割の単位。

*8 NR：5G向けに策定された無線方式規格。4Gと比較して高い周波数帯（例えば、6 GHz帯以下や28 GHz帯）などを活用した通信の高速化や、高度化されたIoTの実現を目的とした低遅延・高信頼な通信を可能にします。

*9 ミリ波：周波数帯域の区分の1つ。30 GHzから300 GHzの周波数であり、5Gで使用される周波数である28 GHz帯を含めて慣習的にミリ波と呼びます。

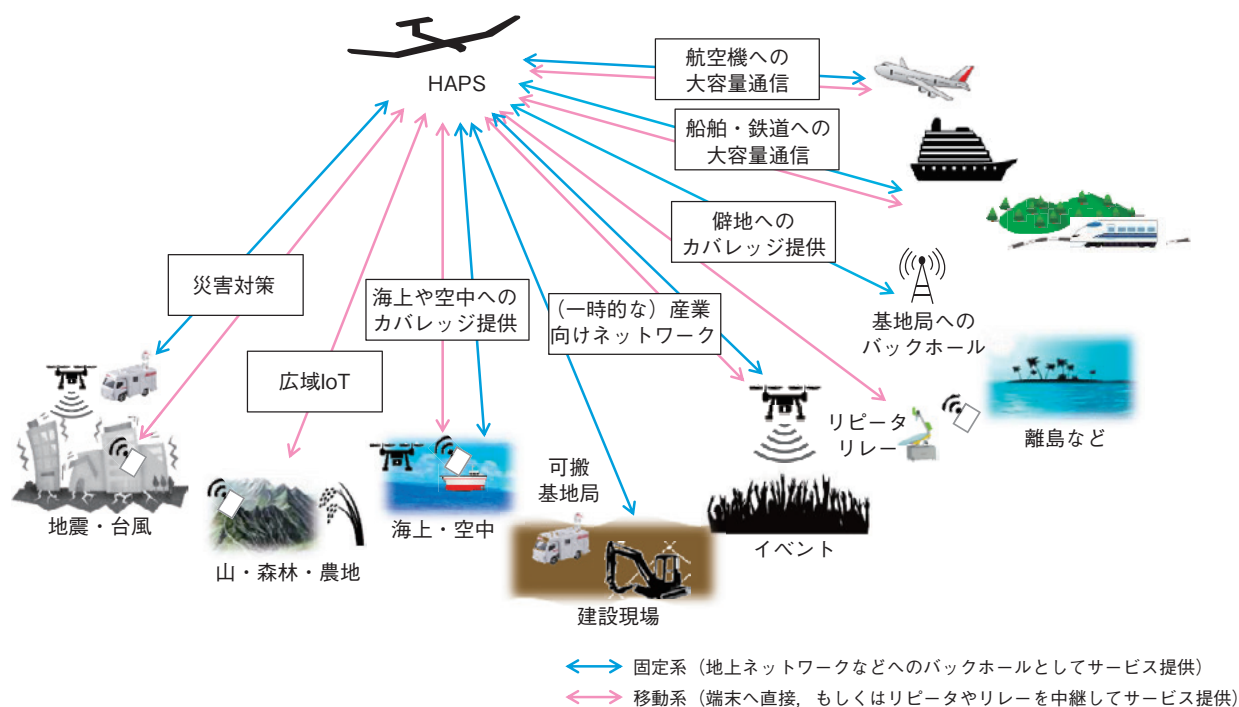


図2 HAPSで期待されるさまざまなユースケース



図3 HAPS ユースケースごとの要求条件

ル用途での通信速度は、1 サービスリンク^{*10}当り 1 Gbit/s以上が最低限必要であると考えられます。さらに複数のサービスリンクを同時提供するためには、フィードリンク^{*11}の通信速度はさらに速く（数 Gbit/s から数十 Gbit/s）、かつ可能な限り天候などの影響によらず安定している必要があります。

また、平常のビジネス用途から災害発生時のパブリックセーフティ^{*12}用

途への柔軟な回線制御も必要です。現状の災害対策は、音声通話やSMSなど最低限の通信品質を想定したのですが、将来的には災害現場における遠隔制御や映像伝送、ドローンとの通信など、ある程度高速通信が必要なユースケースも考えられます。さらに、災害対策に向けては、一部の装置が使えなくなっても動作することを想定したネットワーク構成と制御技術を検討す

ることが必要です。

■5G 網と連携したネットワーク構成と制御技術

(1) HAPS 搭載局の分類

HAPSを5G基地局へのバックホールに用いる場合のネットワーク構成と制御技術において、HAPS搭載局の分類に着目して検討を行っています。HAPS搭載局を大別すると、①中継局として地上から受信した通信信号を、必要な周波数変換などを行ったうえで地上へ折り返し送信する「中継型」と、②5G網の基地局装置もしくはその一部をHAPSへ搭載する「基地局型」に分けられます。

① 中継型の場合は、搭載装置が比較的少なく、HAPS搭載局のサイズ・重量・消費電力の制限が厳

*10 サービスリンク：NTN通信システムの中で、衛星またはHAPSと端末間の通信経路を指します。

*11 フィードリンク：NTN通信システムの中で、衛星またはHAPSと地上基地局（ゲートウェイ）間の通信経路を指します。

*12 パブリックセーフティ：防災、警察、消防、救急などの公共安全。

しい場合に有効です。

② 基地局型の場合は、アンテナ装置の搭載に加え、多くの基地局機能をHAPSへ搭載するほどHAPS側でさまざまな制御が可能になり、かつフィーダリンクの情報量を削減できます。一方、搭載機能が増えるほど搭載局のサイズ・重量・消費電力が大きくなります。一般的には、開発コストや運用面を考慮すると、より多くの基地局機能を地上ネットワーク側に配置するのが望ましいですが、HAPSに搭載することで災害の影響を受けにくいメリットもあります。また、性能面を考慮すると、HAPS搭載局側にもある程度の機能、少なくともミリ波を用いる場合はビーム制御の機能を持たせる必要があるものと考えられます。さらに、HAPS搭載局におけるサイズ・重量・消費電力、搭載局の開発・運用コスト、固定通信と移動通信でのHAPSプラットフォーム共通化、GEO/LEOとの連携など、5G網にHAPSシステムを組み込む際に考慮すべき幅広い要件を総合的に検討する必要があります。

(2) 5G 網と連携したネットワーク
構成例

5G 網と連携したネットワーク構成

における「基地局型」の一例として、O-RAN (Open RAN) ^{*13}アライアンス仕様⁽⁹⁾を参考にした5G 基地局のDU (Distributed Unit) ^{*14}とRU (Radio Unit) ^{*15}をHAPSに搭載する構成を図4に示します。この構成では、CU (Centralized Unit) ^{*16}を地上の災害に強い地点に設置することで可用性を確保し、フィードリンクにおいてHAPSがCUから受け取った情報を、サービスリンクにおいて地上の小型基地局装置(中継局)へ5G無線を介して伝送することで、有線のバックホールを使用せずに可搬5G基地局の利用が可能となります。また、この構成では中継局を介さずにHAPSから5G端末へ直接通信を提供することも可能です。さらなる拡張としては、地上側で複数のCUを用いることによって悪天候や災害発生時の影響を軽減するサイトダイバーシチ^{*17}の実現や、端末が通信のエリアを移動した際に通信先のHAPSを切り替えることでモビリティサポート^{*18}も実現できます。

図4の構成以外にも、スタンドアロン^{*19}な5G基地局をHAPSに使用する構成や、5G無線の中継装置(Repeater)をHAPSに搭載する「中継型」の構成も有力な候補として検討

しています。各構成において、モビリティサポート、サイトダイバーシチ技術および周波数共用技術^{*20}などと合わせて、GEO/LEOとの連携や装置重量・消費電力などHAPSへの搭載要件を考慮した総合的な検討が今後必要です。

小型飛行機を用いた39 GHz帯 伝搬測定実験

5G evolution & 6Gにおける上空からの通信エリア化の実現に向けて、

- *13 O-RAN：5G時代においてさまざまなサービスを効率的に提供することを目的として、オープン化とインテリジェント化された無線アクセスネットワーク。
- *14 DU：無線基地局のリアルタイムなデータリンク層制御などを行う機能部。
- *15 RU：無線基地局の無線部。
- *16 CU：無線基地局のノンリアルタイムのL2（Layer 2）機能、RRC（Radio Resource Control）機能などを実装する集約ノード。
- *17 サイトダイバーシチ：雨や障害物により電波の減衰が大きいときに、複数の地上局を切り替えることで、通信品質を向上させる技術。
- *18 モビリティサポート：端末が通信のエリアを移動した際に、通信が途切れる前に接続先の基地局を切り替えることで、通信を継続可能とする技術。
- *19 スタンドアローン：既存のLTE/LTE-AdvancedとNRをLTE-NRDCを用いて連携して運用するノンスタンドアローンに対し、NR単独で運用する形態。
- *20 周波数共用技術：2つのシステムが同じ場所でも同一周波数を利用するときに発生する干渉の影響を抑え、周波数共用を可能とする技術。本稿では、主にHAPSシステムと地上移動通信システム間の周波数共用を想定しています。

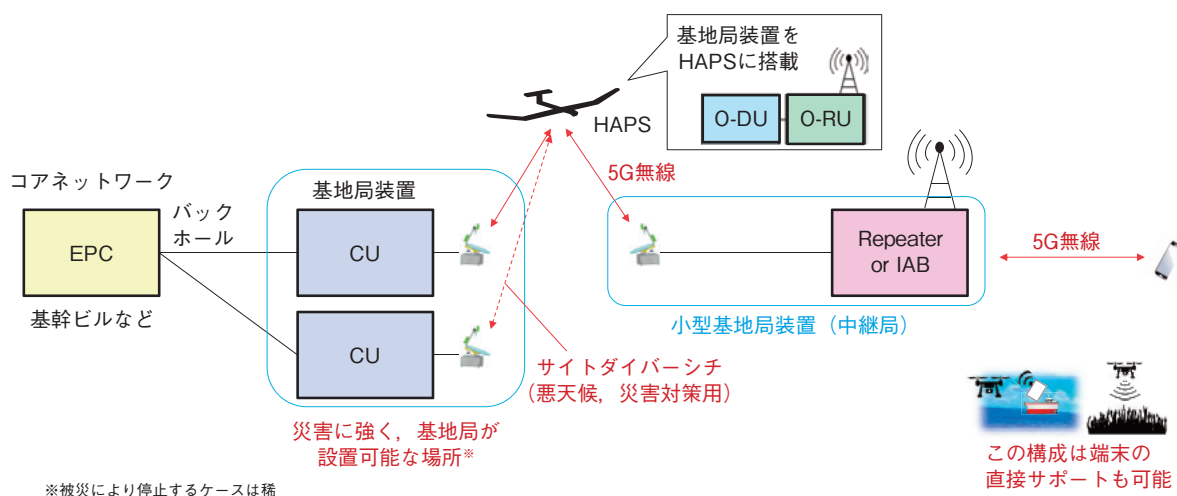


図 4 HAPS をバックホールに用いる場合の連携構成例

2021年2月15～26日まで、小型飛行機を活用して、市街地（神奈川県小田原市）、山林（丹沢）、離島（伊豆大島）での電波伝搬測定の実証実験を実施しました⁽¹⁰⁾。HAPS実機を利用する前の初期実験として、地上から上空約3 km先の小型飛行機に搭載した受信装置に向けて、5Gでの高速通信に適したミリ波（39 GHz帯）、および比較のためミリ波よりも電波が飛びやすい低い周波数（2 GHz帯）を利用した電波伝搬を測定しました。市街地では建物などの障害物や反射波の影響、山林では地形や樹木の影響、離島では海上からの低い仰角や雲の影響などを測

定しました。その結果、「さまざまな環境による39 GHz帯と2 GHz帯の電波の飛びやすさ」や「飛行機の旋回が電波の飛びやすさへ与える影響」などが明らかになりました。

■測定環境と測定項目

上空伝搬測定の実験イメージを図5に示します。市街地、山林、離島を電波の送信地点とし、半径1 kmから2 kmで旋回する小型飛行機を受信地点としました。送信地点から見た小型飛行機（受信地点）への仰角は、高度20 kmで旋回するHAPSのユースケースと同等になるように決定しました。具体的には、市街地と山林のユースケー

スでは高度20 kmに対しカバレッジ半径50 kmを想定し（仰角：21.8°）、離島のユースケースでは高度20 kmに対しカバレッジ半径200 kmを想定しました（仰角：5.7～11.5°）。また、見通しの環境に加えて、図6に示すように各ユースケースにおける建物や樹木などの遮蔽物を挟むかたちで、受信電力の測定を行いました。

送信アンテナは飛行機の旋回範囲がビーム幅^{*21}以内に含まれるような製品を選定し、飛行機の旋回中心に向けて方向を固定します。一方、受信アンテナは機装フレーム内に格納され、底面には伝搬損失^{*22}がほとんど生じないように設計された厚さ3 mmのポリカーボネイト製レドーム^{*23}が接着されています。また、初期実験として、送受信アンテナは共に追尾機能を持たず、受信アンテナを飛行機の底部に固定して設置します。

■評価

(1) 概要

実験の結果、遮蔽物のない見通し環境の場合は、ほぼ机上計算と同じ最大受信感度が得られる一方で、建物や樹木を挟んだ場合は、39 GHz帯の受信電力の損失は比較的大きいことが明らかとなりました。このような遮蔽物の影響を、サイトダイバーシチなどを用いて軽減することを検討する必要があります。また、降雨がない場合においては、雲の影響は比較的小さいことが確認できました。

さらに、今回の実験では小型飛行機の位置や飛行姿勢によらず、同じ指向性パターンアンテナを用いて送受信を行ったため、飛行機の旋回の影響で

*21 ビーム幅：アンテナの最大利得から-3 dB以内の利得を持つアンテナの放射角度。

*22 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。

*23 レドーム：アンテナを保護する囲い。電波を透過しやすい材料でつくられています。

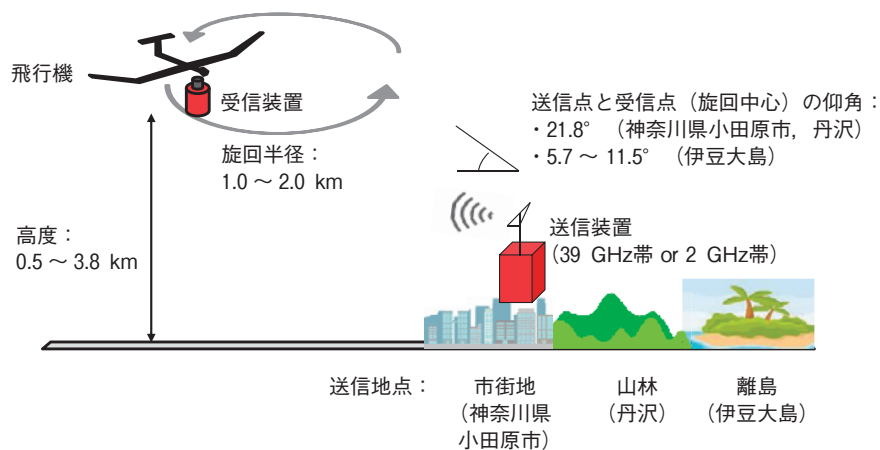


図5 上空伝搬測定の実験イメージ



(a) 市街地での実験における建物



(b) 山林での実験における樹木



(c) 山林での実験における山



(d) 離島での実験における雲

図6 さまざまな障害が存在する実験環境

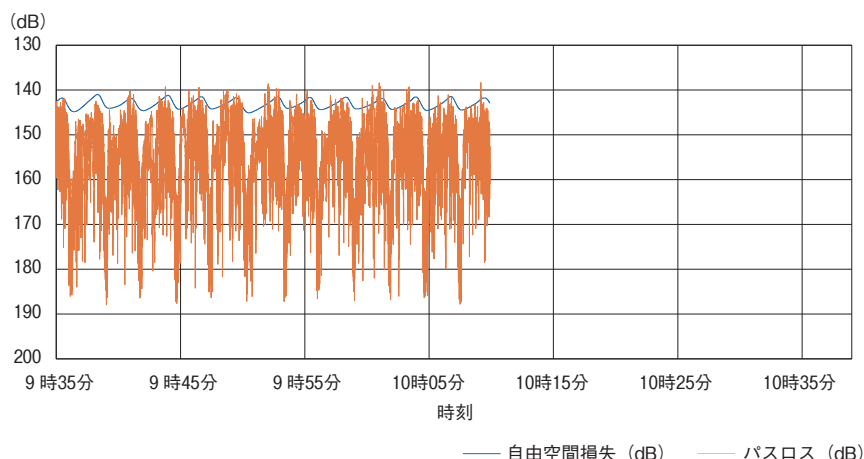


図7 神奈川県小田原市（見通し）/ 旋回直径2 km時における39 GHz帯の伝搬損失時系列データ

アンテナの角度が変化することにより、受信電力が大きく変化することも明らかとなりました。この実験結果により、将来のHAPS実用化に向けては、このような旋回による影響を抑えて一定の受信電力を保持する制御技術が重要であることを確認できました。

(2) 小田原における実験結果

測定結果の具体例として、市街地のユースケースを想定した実験について述べます。神奈川県小田原市の見通し環境にて、旋回直径2 kmで飛行したときのデータとして、39 GHz帯伝搬損失の時系列データを図7に示します。39 GHz帯の最大受信感度を図7の自由空間損失から計算すると、机上計算からの誤差が約1.2 dBと小さく、おおむね机上計算どおりでした。一方、時系列データは飛行機の旋回に応じ大きく変動しており、受信電力の平均値は最大値から約17 dB減少し、中央値^{*24}は約14 dB減少しています。この原因として、送受信アンテナの指向性利得の変動や偏波損^{*25}、そして機体の底

面が送信点からみて逆側を向いたときの機体自体による電波遮蔽が、大きく影響していることが考えられます。

また、建物による遮蔽環境における39 GHz帯伝搬損失は、見通し環境と比べ測定結果の平均値で約17 dB、中央値で約19 dBであり、2 GHz帯伝搬損失は、平均値で約8 dB、中央値で約9 dBで、周波数が高いほど建物による遮蔽環境における伝搬損失が高いことがいえます。

あ と が き

本稿では、5G evolution & 6Gにおける重要課題の1つである「超カバレッジ拡張」に向けた取り組みとして、NTN技術、特にHAPSのユースケースとネットワーク構成および制御技術について解説し、HAPSのユースケースを想定して実施した小型飛行機による上空電波伝搬試験の結果を示しました。今後もNTTドコモでは、超カバレッジ拡張の実現に向けたNTN技術開発、HAPSネットワーク実現に向けた技術開発、実証実験および標準化活動の推進に取り組んでいく予定です。

本研究開発の一部は、総務省「電波資源拡大のための研究開発（JPU

000254）」によって実施しています。

参考文献

- (1) https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/technology/whitepaper_6g/index.html
- (2) 鬼沢・立田・北・山下：“固定無線、衛星通信システムにおける最近の研究開発について,” 信学技報RCS2019-32, pp.53-58, May 2019.
- (3) J. Bejarano, C. Nieto, and F. Piñar: “MF-TDMA Scheduling Algorithm for Multi-Spot Beam Satellite Systems Based on Co-Channel Interference Evaluation,” IEEE Access, Vol.7, pp.4391-4399, Dec. 2018.
- (4) B. Di, H. Zhang, L. Song, Y. Li, and G.Y. Li: “Ultra-dense LEO: integrating terrestrial-satellite networks into 5G and beyond for data offloading,” IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol.18, Issue 1, pp.47-62, Dec. 2018.
- (5) <https://hpsalliance.org/>
- (6) 3GPP, RP-193234: “Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN),” Dec. 2019.
- (7) 鈴木・北之園・高盛・森田・岸山・外山・三浦: “高高度プラットフォーム(HAPS)による5G網と連携した38GHz帯の無線通信システム開発—5G網の高速大容量バックホール回線に係る検討—,” 2021信学総大B-3-1, March 2021.
- (8) 外園・岸山・浅井・鈴木・北之園: “高高度プラットフォーム(HAPS)による5G網と連携した38GHz帯の無線通信システム開発—HAPSネットワーク構成と制御技術の検討—,” 2021信学総大B-3-2, March 2021.
- (9) ウメシユ・矢島・内野・奥山: “O-RANフロントホール仕様概要,” NTT DOCOMO テクニカル・ジャーナル, Vol.27, No.1, pp.43-55, April 2019.
- (10) NTTドコモ報道発表資料: “上空からの通信エリア化に向けた39GHz帯の電波伝搬測定実証実験,” March 2021.



(左から) 外園 悠貴/ 岸山 祥久/
浅井 孝浩

これまでの移動通信ネットワークではカバーできなかった空・海・宇宙を含むあらゆる場所への「超カバレッジ拡張」実現に向けて、衛星やHAPSを用いたNTN技術の研究開発に取り組んでいます。

◆問い合わせ先

NTTドコモ
R&D戦略部
E-mail dtj@nttdocomo.com

*24 中央値: 有限個のデータを昇順(または降順)に並べたとき、中央に位置する値のこと。

*25 偏波損: 電波が空間を伝搬するときの電界の振動方向(偏波)によって、受信アンテナの受信電力に損失が生じること。