



移動通信システムのサービスエリア拡充に向けた ガラスアンテナ技術



株式会社NTTドコモ
5Gイノベーション推進室
(現所属 日本電信電話株式会社
アクセスサービスシステム研究所)

いのまた みのる
猪又 稔



株式会社NTTドコモ
無線アクセスネットワーク部

やまだ こうじ
山田 幸司

1. まえがき

近年のスマートフォン普及に伴い、移動通信システムのトラフィックが著しく増大している。通信が集中する都市部のような高トラフィックエリアにおいては、ビル局や鉄塔局よりもアンテナ高が低くエリアカバレッジが小さいスモールセル基地局を密に設置し、トラフィックを分散させることが重要となる。スモールセル用のアンテナは通常、理想的なエリアカバレッジを構築するために、建物の中低層階への設置が望ましいが、街の景観を損なう等の理由で設置が困難な場合が多くあった。街の景観を損なわないようにするためには、建物内にアンテナを設置し、屋内から屋外のエリア化をすることが考えられる。しかし、一般的に電波は屋内から屋外、もしくは屋外から屋内に伝搬する際には、建物の窓に遮蔽され、大きな損失が発生するため、理想的なエリアカバレッジを構築できないという課題があった。

また、現在、携帯事業者において第5世代移動通信システム(5G)が導入されており、仮想現実(VR: Virtual Reality)や大量のIoT(Internet of Things)デバイスによる産業の高度化や自動化、自動運転等の自動車用無線通信(V2X: Vehicle to everything)といった新たなユースケースへの適用が期待されている^[1, 2]。5Gで利用される28GHz帯は、これまで第4世代移動通信システム(LTE)などで利用していた周波数帯よりも波長が短くなり、自動車などの車室内や建物の室内で通信するときには電波が遮蔽されやすく、弱まってしまう傾向がある^[3, 4]。

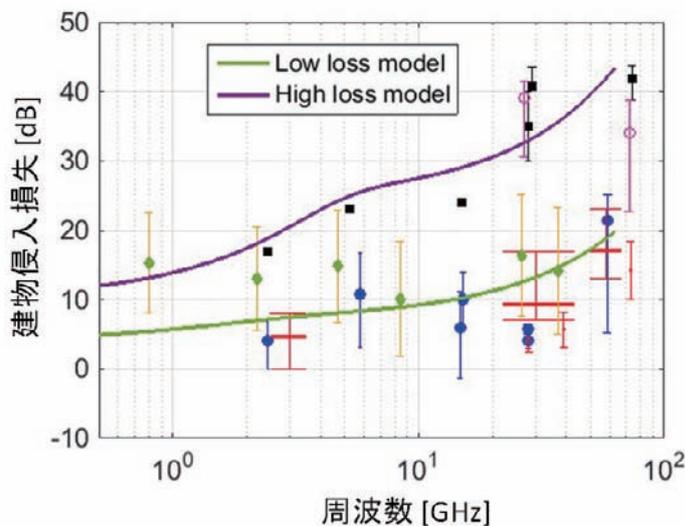
そこで、筆者らは既存窓ガラスの屋内側に貼り付けが可能な透明なLTE、5G用ガラスアンテナを新たに開発した^[5-8]。ガラスアンテナは、窓ガラスの屋内側に貼り付けられたアンテナ素子で電波を送受信することで、電波がガラスを通過する際の遮蔽損失を小さくすることができるため、理想的なエリアカバレッジを構築することが可能になる。かつ、本アンテナは透明性が高いため、窓に設置しても視界を遮らず、

課題とされていた景観を損なうことがない。本稿では、開発したLTE、5G用ガラスアンテナと建物や自動車に適用した実証例を紹介する。

2. ITU-R M.2412における侵入損失特性

景観を損なわないようにアンテナを設置するには、屋内にアンテナを設置し、屋内から屋外のエリア化をすることが考えられるが、建物や自動車の屋内から屋外もしくは、屋外から屋内へ電波が伝搬したときに伝搬損失が発生する。この伝搬損失を侵入損失と呼ぶ。IMT-2020の無線インタフェース評価手法をまとめているITU-R M.2412において記載されている建物侵入損失特性を図1に示す^[3, 4]。図1における各マークは様々な機関で建物侵入損失を測定した結果であり、各線は測定結果の平均的な特性を表現するために構築されたモデルを用いて計算した結果である。Low loss modelとHigh loss modelは、コンクリート、複層ガラス、遮熱ガラス等の建物壁面の材質の混合割合に応じて利用する。Low loss modelは、複層ガラスとコンクリートの割合が30%と70%のときのモデルであり、3GHz帯における侵入損失は約7dB程度、28GHz帯における侵入損失は約14dB程度と報告されている。また、ITU-R M.2412では自動車への侵入損失についても記載があり、0.6GHzから60GHz帯において、平均9dB程度の損失が発生すると報告されている。このことから、電波が建物や自動車の窓に遮蔽されることで、大きい損失が発生し、エリアカバレッジが縮小してしまうことが分かる。

また、侵入損失特性は、屋外区間の距離減衰、建物侵入時に発生する損失及び屋内距離減衰の和で表現され、屋内距離減衰は窓から屋内に設置されたアンテナまでの距離が減少するにしたがって、損失が小さくなる。そのため、窓からアンテナまでの距離をできるだけ短くすることで、屋内距離減衰を軽減することができ、侵入損失を軽減できる



■図1. 建物侵入損失特性

ため、窓ガラスにアンテナを近接して設置することで、理想的なエリアカバレッジを構築できる可能性がある。しかし、アンテナ設計においては一般に空気インピーダンスとアンテナのインピーダンスを整合させて設計するため、アンテナと窓ガラスとが近接して設置された場合には、不整合を起し、電波が減衰する等のアンテナ特性の劣化を引き起こしてしまう。そこで、筆者らは、アンテナと窓ガラスが近接しても、アンテナ本来の特性が損なわれないガラスアンテナを新たに開発した。

3. ガラスアンテナの開発

3.1 建物用ガラスアンテナ

建物用の3GHz及び4GHz帯におけるガラスアンテナの外観を図2に示しアンテナ諸元を表1に示す^[5,7,8]。アンテナ構造には、自動車のフロントガラスとして使われる合わせガラスの製造方法を応用した。図2に示すように、ガラス基板に透明な平面アンテナを4素子実装したガラスアンテナ基板などを一体化した合わせガラス構造となっている。また、一般に建物窓ガラスのインピーダンスは、ガラスの厚さや種類によって変化するが、厚さや種類は建物や階層によって異なり、建物ガラス自体がアンテナ性能に影響するために、

最適な整合層を選択する必要がある。図2においては、中低層階への単層ガラスに対して設置可能な整合層を選択している。また、平面アンテナは高い透明性を実現するために、透視性・透光性のあるアンテナ部材を使用した。本構造により、透明性を保ちながら、アンテナが建物の窓ガラスに近接しても、各偏波のアンテナ利得が9dBi程度となり、アンテナ本来の性能となることを確認している(表1)。



■図2. 建物用ガラスアンテナ (※ケーブル接続なしの状態)

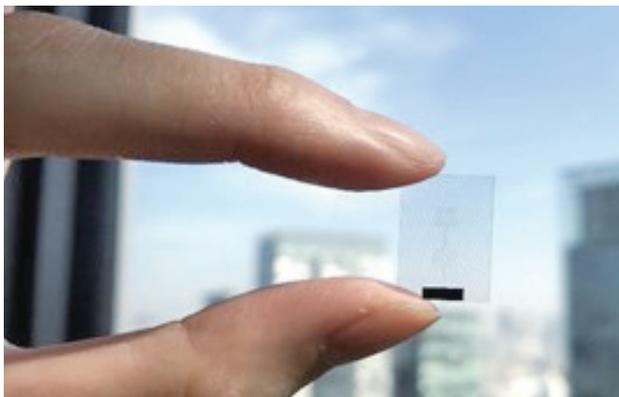
■表1. アンテナ諸元

周波数帯	3.44~3.52GHz帯	3.6~3.7GHz帯	4.5~4.6GHz帯
アンテナ利得	約9.0dBi	約9.5dBi	約9.0dBi
ビーム幅 (垂直面)	約30度	約30度	約30度
ビーム幅 (水平面)	約30度	約30度	約30度

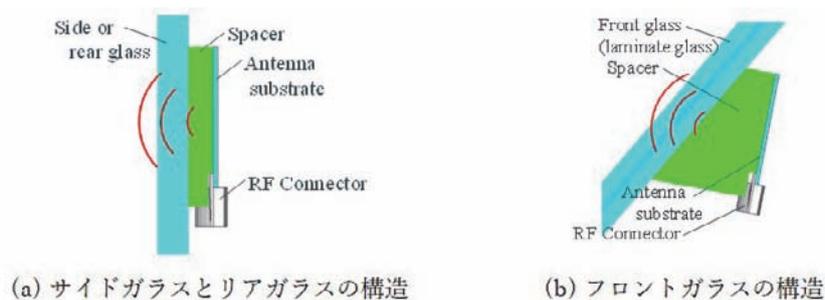


3.2 自動車用ガラスアンテナ

自動車用の28GHz帯におけるガラスアンテナの外観を図3に示し、アンテナ構造を図4に示し、アンテナ諸元を表2に示す^[6, 9, 10]。28GHz帯では、電波放射効率を向上させるため、優れた低誘電率、低誘電正接をもつアンテナ基板材料が求められる。そこで、図4に示すように、誘電率3.7、誘電正接1/10000の透明な合成石英基板にV偏波とH偏波の平面アンテナを2素子ずつ実装した。本アンテナを、窓ガラスに設置するために、窓ガラスとアンテナとの間に窓ガラスに接着可能な整合層を備えて、車両のフロントガラスとサイド/リアガラスに取り付けた。整合層は、誘電率3、誘電正接1/1000、厚み2mmとし、典型的な自動車窓ガラスの厚さに整合するようにした。また、図4のように車両フロ



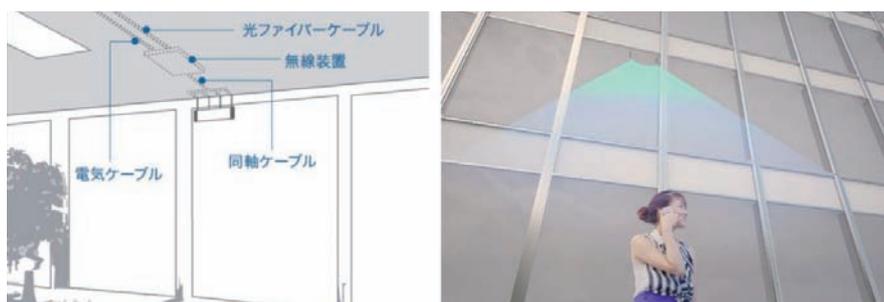
■図3. 自動車用ガラスアンテナ



(a) サイドガラスとリアガラスの構造

(b) フロントガラスの構造

■図4. 自動車用ガラスアンテナのアンテナ構造



■図5. 建物用ガラスアンテナの装置構成と屋外エリア化イメージ

■表2. アンテナ諸元

周波数帯	28 GHz帯
アンテナ利得	約6.0dBi
ビーム幅 (垂直面)	約40度
ビーム幅 (水平面)	約90度

ントガラスには傾きがあるため、自動車が基地局から遠方にいる場合において、最大のアンテナ利得が得られるように、整合層の形状を上下非対称としてアンテナ指向方向を水平方向にチルトさせた。平面アンテナは高い透明性を実現するために、透視性・透光性のあるアンテナ部材を使用した。本構造により、アンテナが窓ガラスに近接しても、各偏波のアンテナ利得が6dBi程度、水平面のビーム幅が90度となり、アンテナ本来の特性が損なわれないことを確認した(表2)。

4. ガラスアンテナの適用事例

4.1 “窓の基地局化”

前章で紹介した建物用の3.44~3.52GHz帯ガラスアンテナを用いて実証実験を行った。実証実験では、都内の建物中低層階の窓ガラスに、ガラスアンテナと天井裏に設置した無線装置を同軸ケーブルで接続し、“窓の基地局化”を実現した^[5](図5)。ガラスアンテナを用いたときのエリアカバレッジは、見通し環境下で従来のスモールセル基地局

とほぼ同等のエリアカバレッジを実現した。なお、3.44～3.52GHz帯におけるガラスアンテナは2019年10月からLTE商用サービスにて既に実用化されており^[7]、さらに、3.6～3.7GHz帯と4.5～4.6GHz帯に対応したガラスアンテナについても、従来の機能・デザイン性を継続したまま開発を完了した^[8]。

4.2 V2Xアンテナへの適用

自動車の28GHz帯ガラスアンテナを用いて、都内のモールセル見通し環境で実証実験を行った^[6, 9, 10] (図6)。実証実験は、時速約30kmで走行中の実験用車両の窓ガラスに、28GHz帯ガラスアンテナを貼り付け、ガラスアンテナを接続した5G試作端末と5G試作基地局との間で28GHz帯の400MHzの帯域幅を用いて実施した。本実験では自動車への5G適用を想定し、アンテナを車両の複数個所（フロントガラス、サイドガラス、リアガラスの合計4か所）に分散して配置することで、無指向性を形成し、もっとも電波が強い方向を選択してデータを送受信できるようにした。実証実験結果は、最大エリアカバレッジを最低スループットとなる送受信間距離と定義したとき約180m程度となり、また、スループットは下り最大3.8Gbps程度となり、ガラスアンテナを試作装置に接続して28GHz帯の高速大容量通信が実現できることを確認した。

本稿では、筆者らが開発したLTE、5G用ガラスアンテナとその適用事例を紹介した。今後、5Gの特徴である高速・大容量、低遅延、多数端末接続通信の実現に向けて、従来に増して様々な利用環境においてきめ細かなエリア構築が求められるため、ガラスアンテナの需要もますます高まっていくと考えられる。引き続き、ガラスアンテナを用いたサービスエリア拡充を継続して検討する予定である。

参考文献

- [1] NTT DOCOMO, INC. “DOCOMO 5G white paper, 5G radio access: Requirements, concept and technologies,” Jul. 2014.
- [2] NTT DOCOMO, INC. “White Paper, 5G Evolution and 6G,” Jan. 2020.
- [3] ITU-R M.2412 : “Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020,” Oct. 2017.
- [4] NTT DOCOMO, INC. et al., “5G Channel Model for bands up to 100GHz,” Oct. 2016.
- [5] 株式会社NTTドコモ, AGC株式会社, 報道発表資料, “ドコモとAGCが提携し、世界初『窓の基地局化』に成功,” https://www.nttdocomo.co.jp/info/news_release/2018/11/07_00.html, Nov. 2018.
- [6] 株式会社NTTドコモ, AGC株式会社, エリクソン・ジャパン株式会社, 報道発表資料, “世界初、28GHz帯に対応する5G端末向けのガラスアンテナで通信に成功～室内や建物内での安定した5G高速通信が可能に～,” https://www.nttdocomo.co.jp/info/news_release/2019/05/29_00.html, May. 2019.
- [7] 株式会社NTTドコモ, AGC株式会社, 報道発表資料, “ドコモとAGC、『窓を基地局化するガラスアンテナ』によるサービスエリア提供を開始～5Gに対応するガラスアンテナの開発もスタート～,” https://www.nttdocomo.co.jp/info/news_release/2019/10/01_00.html, Oct. 2019.
- [8] AGC株式会社, 報道発表資料, “AGCの『窓を基地局化するガラスアンテナ』5G対応の開発が完了,” https://www.agc.com/news/detail/1200821_2148.html, June. 2020.
- [9] 猪又 稔, ほか: “車両デザインを損なわず、安定した5G通信を実現する車載用アンテナ技術—車載用5Gアンテナ—,” NTTドコモテクニカルジャーナル, Vol.27, No.3, pp.51-56, Oct. 2019.
- [10] M.Inomata, et al., “Transparent Glass Antenna for 28GHz and its Signal Reception Characteristics in Urban Environment,” EuCAP2020, 2020.



■ 図6. 実験環境