# リモートワークセキュリティ強化のためのマルチバンド5G電波遮蔽シートの研究

代表研究者 李 尚曄 東京工業大学 科学技術創成研究院 助教

# 1 背景と目的

2020年に開始された 5G(第5世代移動通信)は、6GHz 以下の周波数を利用するサブ 6GHz(Sub6、また は Frequency Range 1, FR1)と 24GHz 帯から 71GHz にわたるミリ波領域(Frequency Range 2, FR2)に分 けられ、普及が進められている。Sub6 を用いた 5G 通信は、従来の 4G LTE(第4世代移動通信、Long Term Evolution)に比べ、高速・大容量かつ低遅延通信が可能となり、これを置き換える形で展開されている。 一方、日本においては 28GHz 帯を使用する 5G ミリ波通信が開発されており、この技術はアンテナの指向性 を向上させるとともに、ビームフォーミングおよびステアリング機能を組み合わせ、通信を求めるユーザ ーにのみビームを集中させて情報を伝送する手法として注目されている(図 1)。

しかし、無線通信技術の進展に伴い、従来の光ファイバー網を用いた有線通信と比較すると、情報漏洩 のリスクが増大している。特に、アンテナのビーム指向性を高め、特定の少数ユーザーにのみ情報を送信 する5Gミリ波通信においては、ビームの指向方向以外で物理的に情報の盗難を難しくする効果があるもの の、特定条件下では、アンテナのメインローブやサイドローブの方向から大容量の情報が盗取されやすく なるという問題が生じている。それは、コロナパンデミック後のポストコロナ時代にリモートワークが増 加し、モバイル通信(5G・4G LTE)やWi-Fi 無線によるデータのやり取りが増加したことにもつながり、 情報セキュリティの強化が求められている。

そこで、本研究では、情報漏洩を防ぎ、セキュリティを強化するための対策として、56 周波数帯(例: Sub6、28GHz帯)で使用可能な電波遮蔽シートの開発を行った。さらに、56 ミリ波領域のマルチバンド化 を実現し、日本で使用される 28GHz帯だけでなく、アメリカで使用される 39GHz帯も同時にカバーする技 術を目指した。Sub6 通信用の周波数帯としては、周波数は異なるものの測定環境を考慮して 2.4GHz帯お よび 5GHz帯用の遮蔽シートを作製し、性能評価を行った。また、家やオフィスなどにおける電波による情 報漏洩について調査するため、建材の電波特性調査を実施した。最後に、模擬木造壁や木造実験小屋を建 設し、測定が可能な周波数帯として 2.4GHz帯(Sub6 相当)および 24GHz帯(56 ミリ波相当)での測定を 行った。今後、56 通信および 2030 年から始まる Beyond 56/66 通信に適用可能な技術として、無線通信技 術の更なる普及に寄与し、それを基盤とした Society5.0 の構築にも貢献できると考えられる。



図 1. 5G 通信における情報漏洩

### 2 本研究と進め方

#### 2-1 28GHz 帯用電波遮蔽シートの開発

5G ミリ波用の電波遮蔽シートとして、日本で使用される 28GHz 帯に関する検討を行った。市販品では 28GHz 帯を中心に数 GHz 程度を吸収・遮蔽するものが存在するが、24GHz 帯や 39GHz 帯を含む他の海外で使用され る周波数帯をカバーする製品はほとんど報告されていない。本研究では、24GHz 帯から 39GHz 帯までカバー 可能な広帯域電波遮蔽シートの開発を進めた。

広帯域電波遮蔽シートにおいては、研究代表者が別の研究課題(総務省 SCOPE、2021 年度、代表:LEE SANGYEOP(李 尚曄))で既に研究開発していた Jaumann 型広帯域電波吸収体技術を採用した。この 技術では、誘電体を2層使用することにより、空気層とのインピーダンスマッチングを広帯域で効果的に行 うことが可能である[1-4]。さらに、屋内使用時に違和感がないよう透明化を目指し、インピーダンスマッチ ングを細かく調整するために、銀ナノワイヤの印刷を用いた周波数選択性表面(Frequency Selective Surface, FSS)技術を導入した。特に四角いループ型のFSS構造を採用することにより、透明度を保ちつつ、特定の周 波数帯での遮蔽特性を向上させることが可能となった。提案された遮蔽シートの性能を検証するために、 Ansys 社の HFSS という電磁界シミュレータを用いてシミュレーションを実施した。このシミュレーションで は、別の研究課題で得られた誘電体の周波数依存性を考慮したモデルが使用された。シミュレーションの結

果を踏まえ、実際に PET やアクリル OCA などの誘電体、抵抗層、そして銀ナノワイヤを用いて製作した FSS

# 2-2 マルチバンド電波遮蔽シートの開発

さらに、広帯域化を目指すだけでなく、特定のターゲット周波数帯(例:28GHz帯、39GHz帯)で最大の吸 収特性や遮蔽特性を実現するため、マルチバンド化の検討を行った。異なる2種類のFSS構造を上下に2層 使用することにより、マルチバンド化が可能であることをシミュレーションで検証した。しかし、2層のFSS 構造の試作に必要な予算が不足していたため、実際の試作は行われず、シミュレーションのみでの検証とな った。

#### 2-3 Sub6 用電波遮蔽シートの開発

構造による試作品を作成した[5,6]。

5G 電波遮蔽シートとして 28GHz 帯に加え、6GHz 以下の Sub6 用電波遮断シートの検討も行った。日本では 3.7GHz、4.0GHz、そして 4.5GHz 帯が使用されているが、本検討では測定環境を考慮し、より一般的に使用さ れている 2.4GHz および 5GHz 帯の Wi-Fi 用の測定器を用い測定を実施した。遮蔽シートはアルミ箔で形成さ れた四角いループのアレイ構造を採用し、Ansys HFSS を用いて事前のシミュレーションを行った。さらに、 アクリル板にこのアレイ構造を形成し、技適マークが付いた Wi-Max モジュールを使用して実測試験を実施し た。この遮蔽シートは、例えば木造の壁において断熱材の位置に配置され、目に見えない形で特定周波数の 電波を遮断する機能を持つ。

#### 2-4 建材電波特性調查

屋内空間における 5G 電波の伝搬特性を調査するために、木材、石膏ボード、コンクリート、ガラスといった建材の電波透過特性を、ベクトル・ネットワーク・アナライザ、レンズ、アンテナを用いた自由空間法で 測定した。この測定は、18GHz から 26.5GHz および 26.5GHz から 40GHz の範囲で行われた。

#### 2-5 模擬木造壁構造における電波特性の調査

建材の実測結果に基づき、電波の低損失化に有利な建材を選定し、柱や断熱材と組み合わせて模擬木造構造を組み立てた。その電波特性は、2.4GHz帯のWi-Maxモジュールおよび24GHz帯のレーダーモジュールを使用して実測により調査した。

#### 2-6 実験小屋での窓ガラス、壁における電波特性の調査

最後に、実際の木造実験小屋を建設し、その小屋での電波特性について調査を行った。一般的な家やオフィスにおいては、設計図面が不明で壁の断面構造が確認できないため、電波特性の詳細な調査が困難である。 この実験小屋を用いることで、実際の建築環境における電波特性を具体的に分析する事例として活用するこ とが可能となった。

木造実験小屋の壁は、前述の模擬木造壁構造の実測結果に基づき、電波の低損失化に適した材料と組み合わせで施工された。また、窓ガラスについても、通常のペアガラスとLow-Eペアガラスの二つのケースで調査を実施した。2.4GHz帯のWi-Maxモジュールおよび24GHz帯のレーダーモジュールを活用して、それぞれの周波数特性を調べた。

# 3 検討結果

#### 3-1 28GHz 帯用電波遮蔽シートの開発

図2左には、開発した28GHz帯用電波遮蔽シートの測定様子を示す。このシートは透明化を目指し、銀ナ ノワイヤインクで印刷されたループパターンを特徴としている。測定はAnritsu社製のベクトル・ネットワ ーク・アナライザを用い、26.5GHzから40GHzに対応するアンテナとレンズを活用した自由空間法で行われ た。

図2右には、ポート1側での反射特性の実測結果を示す。-10dB以下の反射損失で90%以上の吸収が可能であり、-20dB以下では99%以上の吸収が可能であるとすると、本開発品は26.5GHzから40GHzまでと非常に広い帯域で99%以上の吸収が可能な特性を示している。また、遮蔽シートとしての透過損失は全帯域で-15dB以下となっており、これはシミュレーション結果よりも若干劣化した値を示している。本開発品は、日本で使用される28GHz帯の5Gミリ波通信だけでなく、39GHz帯を含む、5G通信が行われている他の地域にも適用可能である。これにより、様々な周波数帯での5G通信環境に対応する広範な遮蔽ソリューションを提供することができる。



図 2. 28GHz 帯電波遮蔽シートの測定の様子(左)、実測結果(右)

# 3-2 マルチバンド電波遮蔽シートの開発

5G ミリ波通信用の周波数帯である FR2 は、既に周波数帯が定まっているため、広帯域特性を追求するより も、実際に使用される周波数帯に特化して吸収や遮蔽特性を改善する方が効果的なケースも存在する。この ため、28GHz 帯と 39GHz 帯を同時にカバーできるマルチバンド遮蔽シートの開発にも着手した。提案する遮 蔽シートは、異なる 2 種類の FSS 構造を上下に配置することで、特定の周波数帯に対する高い遮蔽効果を実 現する。Ansys HFSS を用いた電磁界シミュレーションの結果を図 3 に示す。反射損失と透過損失は、28GHz 帯や 39GHz 帯付近でそのピーク特性を示しており、これらの周波数帯における吸収や遮蔽効果が最大化され ることが確認されている。



図3. マルチバンド化の検討結果(シミュレーション)

# 3-3 Sub6 用電波遮蔽シートの開発

Sub6 用電波遮蔽シートとして、木造壁に適したアルミ箔で構成されたループアレイパターン(FSS 構造) およびアクリル板で構成された電波遮蔽シートを提案した。図4には、2.4GHz 帯用遮蔽シート(左)と5GHz 帯用遮蔽シートの測定の様子を示している。測定には、2.4GHz 帯と5GHz 帯の両方に対応可能な Wi-Max モジ ュールを使用した。ただし、実験スペースの制約により、近傍界での測定を行う必要があった。その結果、 2.4GHz 帯用遮蔽シートは、遮蔽シートがない状態と比較して約35dB の遮蔽特性を示した。これにより、シ ートの有効性が明確に確認された。



図 4. Wi-Fi 周波数(2.4GHz, 5GHz 帯)における電波遮蔽シートの電波性能実測の様子

#### 3-4 建材電波特性調査

図5左に示す通り、コンクリート、スタイロフォームなどの断熱材、石膏ボード、木材、ガラスといった 様々な建材についての測定を行った。これらの材料は、実際の建材として使用されるものであり、ミリ波以 上の周波数帯での測定を可能にするために、可能な限り薄く加工されたり、特注で製作されたものも含まれ ている。これらの建材を、2ポート自由空間法測定系を用いて比較対象として配置し、自由空間における建 材の反射、損失、比誘電率、誘電損失などの測定を実施した。

図6に示された一部の結果によると、12mm 厚の石膏ボード、2mm 厚のガラス、12mm 厚の針葉樹合板、および10.5mm 厚のコンクリートの透過損失特性が観察されている。厚みと透過損失の関係を考察すると、石膏ボードは低損失化に非常に有利であることが明らかである。一方、ガラスは実際には3mmや5mmといった厚さ

でも、ミリ波電波の透過に適しており、窓口としての機能を果たすことが確認された。

また、同じ木材でもその種類によって同じ厚みのものでもその損失のばらつきは大きかった。例としては 針葉樹合板のほうがラワン合板よりもっと小さい透過損失特性を示した。



図 5. 建物における電波伝搬特性探索のための自由空間法による建材電波特性実測





# 3-5 模擬木造壁構造における電波特性の調査

前述の建材の電波特性調査結果に基づき、実際の施工で使用される組み合わせ(例:木材、断熱材、石膏 ボード)および柱を用いて、簡易模擬木造壁を組み立て、電波特性の調査を行った。図7に示される模擬木 造壁は石膏ボード面であり、2種類の壁構造(① 針葉樹構造用合板 9mm + グラスウール 50mm + 石膏ボード 9mm、② 針葉樹構造用合板 12mm + グラスウール 100mm + 石膏ボード 12mm)を用いて 2.4GHz 帯および 24GHz 帯での実測を行った。

その結果、2.4GHz 帯において、構造①ではアンテナが間柱の中央部に置かれている場合 4.4dB の透過損失 が観測され、その位置を間柱の中央部からずらした場合は透過損失が 2.4dB に減少した。構造②では、アン テナが間柱の中央部に配置された場合 4.6dB の透過損失を示し、位置をずらした場合には透過損失が 1.6dB に低下した。一方、24GHz 帯において、造①ではアンテナが間柱の中央部に置かれている場合 14.5dB の透過 損失が観測され、その位置を間柱の中央部からずらした場合は透過損失が 9.3dB に減少した。構造②では、 アンテナが間柱の中央部に配置された場合 17.3dB の透過損失を示し、位置をずらした場合には透過損失が 12.0dB に低下した。さらに、間柱の影響がない場所での指向性が高い特性を活かして測定を行った結果、構 造①では 7.8dB、構造②では 7.3dB と、損失がさらに低下した。この結果は、コンクリート系の壁に比べて 損失が比較的低い木造壁でも、間柱の存在によりアンテナビームが遮蔽されやすい可能性があることを示し ている。



図 7. 壁の模擬構造における電波特性実験の様子

#### 3-6 実験小屋での窓ガラス、壁における電波特性の調査

最後に、提案された木造壁構造(組み合わせ)の有効性を確認するため、千葉県鴨川市釜沼にて、一般社 団法人「小さな地球」の協力を得て実際の実験小屋を施工した。この実験では、①木造壁における低損失に 向けた最適な材料の組み合わせを導出し、②5Gミリ波通信の電波の窓口として使用されるガラスの損失を検 討することで、5G通信の窓口としての機能と、情報漏洩の可能性のある箇所の検証を行った。図8左には実 際に施工された実験小屋が示されており、そのサイズは約10平方メートルで、部屋の4面の壁がそれぞれ異 なる材料の組み合わせで構成されているため、比較検討が可能となっている。

木造壁構造の一例として、杉板12mm、グラスウール100mm、構造用合板9mm、石膏ボード9mmで構成された場合の検証結果では、同じ距離で何も測定対象が置かれていない場合と比較して、2.4GHz帯で約4dB、24GHz帯で約7dBの損失が増加することが確認された。一方、電波による情報漏洩を防ぐ場合、材料の組み合わせを変更することである程度の改善が可能であり、さらに提案された電波遮蔽シートを用いることで、特定の周波数帯での情報漏洩を効果的に防止できる。

図8には窓ガラスの測定様子とその結果(ペアガラスあり)を示している。2.4GHz 帯において、ペアガラ スを外した状態でWi-Max からの受信電力は-48dBm であったが、ペアガラスを設置した場合、損失が 2dB 増 加し、受信電力は-50dBm となった。Low E ペアガラスを設置した場合は損失がさらに増え、受信電力は-64dBm に低下した。一方、24GHz 帯では、ペアガラスを外した状態でのレーダーからの受信電力は-25dBm だったが、 ペアガラスを設置すると-28dBm、Low E ペアガラスを設置すると-53dBm と大幅に損失が増えた。これにより、 屋外からの電波の透過性を改善するには Low E ペアガラスは適していないが、窓側での電波漏れを防ぐには Low E ペアガラスの使用が有効であることが確認された。







図 8. 実験小屋(左) での実験の様子(中)と減衰結果(24GHz帯)

# 4 まとめ

本研究では、56 通信における情報漏洩を防ぐ手段として電波遮蔽シートに着目し、研究開発を行った。その結果、銀ナノワイヤインクを用いたパターン印刷によって作製された 28GHz 帯電波遮蔽シートの広帯域化および透明化に成功した。このような透明かつ広帯域の電波遮蔽シートは、屋内において違和感を与えずに設置でき、情報漏洩の恐れがある箇所に配置することでセキュリティ強化に貢献できる。さらに、安価に製作可能なループ型の周波数選択性表面を用いた空間フィルタ構造により、6GHz 以下の周波数帯でも有効に電波を遮断できる遮蔽材の製造が可能であることを示した。

また、建物内での電波伝搬特性を調査し、それに基づいて情報漏洩が発生しやすい箇所を特定するために、 各種建材における電波透過特性の実験を行い、様々な建材(木材、石膏ボード系、コンクリート、ガラスな ど)のデータベースを構築することができた。最後に、実際の模擬壁構造や実験小屋での実験を通じて、実 物に近い形で電波伝搬特性を検証することができた。

このような研究は、電波遮蔽により今後の 5G および Beyond 5G/6G 通信における無線セキュリティ強化に 貢献するとともに、透過特性の改善、すなわち高速・大容量・低遅延通信における電波伝搬特性の向上にも 寄与することが期待される。

# 【参考文献】

- [1] S. Ogawa and M. Kimata, "Metal-insulator-metal-based plasmonic metamaterial absorbers at visible and infrared wavelengths: A review," *Materials*, Vol., 11, No., 3 458, 2018.
- [2] S. Lee, M. Fujita, M. Toyoda, K. Takano, S. Hara, I. Watanabe, A. Kasamatsu, and H. Ito, "Ultra-wideband electromagnetic-wave absorber for IEEE 802.15.3d," *Global Symposium on Millimeter Waves*, May 2022.
- [3] S. Lee, M. Fujita, M. Toyoda, K. Takano, S. Hara, I. Watanabe, A. Kasamatsu, and H. Ito, "Sub-terahertz electromagnetic-wave absorber for future wireless communication," *IEEE International Symposium on Frequency Integration Technology*, Aug. 2022.
- [4] S. Lee, M. Fujita, M. Toyoda, K. Takano, S. Hara, I. Watanabe, A. Kasamatsu, S. Amakawa, T. Yoshida, and H. Ito, "A transparent band-pass-filtered reflector for IEEE Standard 802.15.3d," *IEEE Asia-Pacific Microwave Conference*, Dec. 2022.
- [5] 李尚曄, 澤木裕子, 吉田毅, 天川修平, 高野恭弥, 原紳介, 渡邊一世, 笠松章史, "電磁波吸収・シール ド材料の開発と電磁ノイズの対策: 第1章第11節テラヘルツ帯フィルム型電波吸収体設計,"技術情報 協会, 2024 年 4 月.
- [6] S. Lee, K. Takano, S. Hara, I. Watanabe, A. Kasamatsu, T. Yoshida, and Y. Sawaki, "A sub-terahertz wide-incident-angle transparent radio-wave absorber," *4th URSI Atlantic Radio Science Meeting*, May 2024.

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
(国際学会) A transparent band-pass-filtered reflector for IEEE Standard 802.15.3d	IEEE Asia-Pacific Microwave Conference	2022 年 12 月
(展示会)ミリ波・テラヘルツ帯単方向/双 方向フィルタ開発	マイクロ波展 2023 ブース展示 (テ ラヘルツシステム応用推進協議 会)	2023 年 11 月
(国内学会)茅葺屋根および金属瓦葺屋根 における 2.4GHz 帯電波の減衰量	情報シンポ 2023 インタラクティ ブ発表	2023年12月
(国際学会) <i>RLGC</i> ·model-based film-type electromagnetic-wave absorber design	The 25th Workshop on Synthesis And System Integration of Mixed Information Technologies	2024年3月
(著書)電磁波吸収・シールド材料の開発 と電磁ノイズの対策:第1章第11節テラへ ルツ帯フィルム型電波吸収体設計	技術情報協会	2024年4月

〈発表資料〉