

人体通信技術による車両内通信システム実現に向けた研究調査

【2023年度 KR-103】

電気通信大学 大学院情報理工学研究科 機械知能システム学専攻 准教授

村松 大陸

1. 調査研究の背景

鉄道車両内における高速インターネット接続サービスは、東海道新幹線やつくばエクスプレスにおいて利用が開始されて以来、ユーザのニーズを満たし鉄道の付加価値向上にも貢献してきた¹⁻³⁾。近年では、第5世代移動通信システム(5G)の登場で⁴⁾、車両内通信のさらなる高速化に向けた研究開発も進んでいる。例えばJR東日本とKDDIは、在来線試験車両を用いた実証実験により、高速走行する列車内で生じるビームトラッキングやハンドオーバー性能を評価している。また、列車内の各ユーザ端末(スマートフォン等)への情報伝送高速化という点では、スペインのマドリード工科大の研究グループが、シーメンス製の車両内で60GHz帯ミリ波無線通信モジュールを用いた超高速伝送実験を実施して成果を上げている⁵⁾。

一方で、ミリ波帯などの超高周波は電波の直進性が極めて強く、アンテナ設置位置やユーザの移動が通信状態に大きな影響を与える。さらに座席等の構造物に加え、その60%以上が電界質で構成される人体は、ミリ波帯の電波にとって致命的な障害物となる。本研究の目的は、車両内の安定高速通信(インターネット接続も含む広義の通信)実現に向け、対象に「触れる」あるいは「近接する」ことで通信する「人体通信」技術を用いた車両内通信システムの実現を目指し、要求される仕様や要素技術について調査することである。

2. 調査研究の概要

本研究で提案するシステムは図1に示すように、アクセスポイントのアンテナ(電極)相当の部分が

床・シート・つり革等の構造物に接続される。ユーザが車両内にいる場合、靴や衣類を介しこれらの構造物に必ず接触することになるため、ユーザの体を介して各端末へ情報を伝送することができれば、車両内のどこにいても安定高速通信が可能となる。本研究では後述する人体通信技術を用いて、電気信号をユーザ周囲に電界としてオーラのように分布させることで、ユーザが所持している端末に信号を送り車両内通信システムを実現することを想定し調査研究を行っている。本システムの実現には、①構造物と人体を含むモデルでの電磁界分布の解析、②ユーザ移動に伴う伝送路変動の影響評価、③近接・接触するユーザとの干渉制御、④伝送路となる人体への電磁曝露の最小化、などが必要となる。調査研究1年目は特に①の観点から、床面に配置された電極から人体へ高周波信号を入力したときの電磁界の分布について検討した。

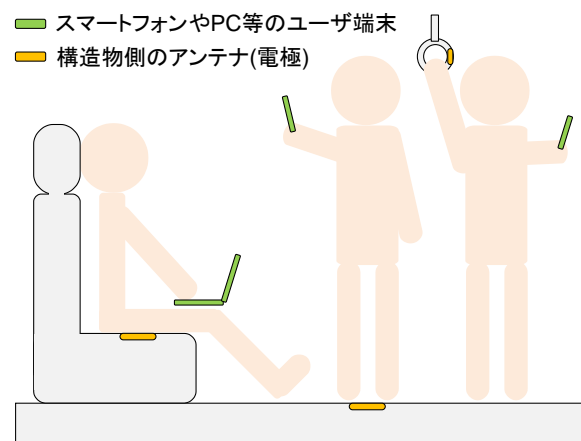


図1 人体通信による車両内通信システムのイメージ

(1) 人体通信

一般に電磁波の周波数が高いほど人体に吸収され

るエネルギーは大きくなることが知られており、スマートフォン等における無線通信で使用される数百 MHz ～数 GHz の周波数帯において人体の存在は障害として作用する⁶⁾。このように、無線通信において人体は電磁波を減衰させ通信を妨害する厄介な存在であるが、その人体を高周波信号の伝送路としてとらえ、有効活用しようという発想がある。これは一般に人体通信と呼ばれる技術で、人体に接触または近接させた電極（アンテナ）を介して高周波信号を入出力し通信する、一種の無線通信方式である⁷⁾。

図2に人体通信の基本的な伝送メカニズムを示す。人体通信では、人体表面を流れる電流と、周囲に形成される近接場電界が通信に寄与する。人体は電氣的にみると導電性誘電体であるので、電極を介して人体に高周波信号が励振された場合、人体表面には高周波電流パスが形成される。また、数十 MHz 以下の周波数では人体と空間（空気）の界面には近接場電界（準静電界）が生じ、遠方への放射電磁界に比べて支配的となる。近接場電界は距離に応じて指数関数的に減衰する性質をもつため、信号伝送時に周辺空間に電磁界がほとんど漏洩せず、秘匿性に優れ、電磁雑音を発生しない通信が可能となる。また、通信距離が限定されるため、空中の電磁波を利用する既存の無線通信技術より低消費電力で通信が行える可能性がある。さらに、通信対象となる人や物に「触れる」ことで伝送路が確立するため、ユーザの動作を利用した直感的なヒューマンインターフェースに利用できるといった特長もある。本研究では、この人体通信の特長を車両内通信システムに活用する方法について調査する。

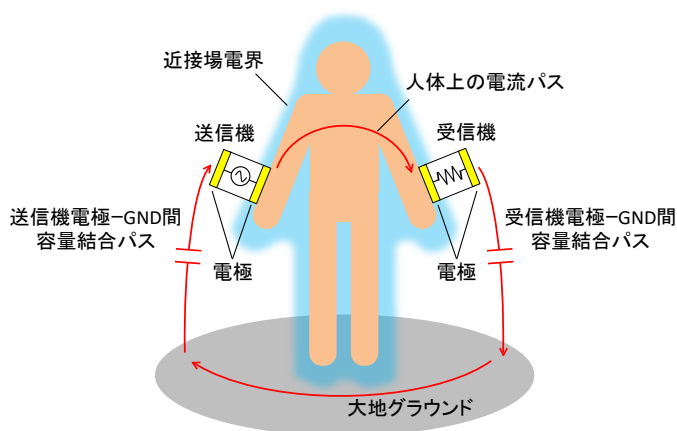


図2 人体通信の基本伝送メカニズム

(2) 床面からの信号入力を想定した数値電磁界解析モデル

車両内の床面に配置された電極から人体へ高周波信号を入力したときの電磁界の分布を、数値電磁界解析を用いて検討した。ユーザを想定した人体モデルとして、国立研究開発法人 情報通信研究機構から提供を受けた詳細人体モデル TARO を用いた⁸⁾。TARO は $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$ のボクセル約 800 万個で構成されており、各ボクセルは 51 種類の生体組織のいずれかが割り当てられている。生体と電磁波の相互作用を精確に評価するため、各生体組織には周波数に依存する電気特性を設定した⁹⁾。人体モデルの足下には、完全導体で構成された $1 \times 1 \text{ m}^2$ の 1 対の電極が、比誘電率 4.6 で厚み 1 mm の誘電体を挟んで配置されている。これらの電極間中央部に内部インピーダンス 50 Ω の励振源を配置し信号を入力した。数値解析モデルを図3に示す。今回は人体モデルの足裏を電極表面に直接接触させている。メッシュは人体モデル内部および周辺から離れるに従って粗くなる不均一なメッシュとし、解析空間端の吸収境界は 7 層の Perfectly Matched Layer を配置、タイムステップは 9.533 ps に設定した。電磁界解析は、Finite-difference time-domain 法に基づく商用ソフトウェアを用いて行った。

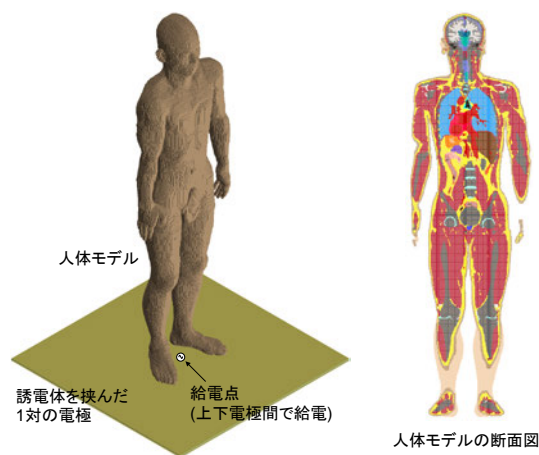


図3 床面からの信号入力を想定した数値電磁界解析モデル

3. 電磁界解析の結果および考察

上述した数値電磁界解析モデルを用いて、周波数による電界分布の差違を比較するため、10 MHz および 2.4 GHz の 2 つの信号周波数で解析した。10

MHz は人体通信での利用が多数検討されていること、2.4 GHz は Bluetooth や WiFi に用いられることから、それぞれ採用した。図 4 にモデル周囲の電界分布を示す。電界分布は電極中央の給電点を通り人体を両断する面で観察している。10 MHz と 2.4 GHz で解析空間の大きさが異なるのは、信号周波数（あるいは波長）に応じて適応的にメッシュサイズを変更しているためである。図からわかるように、10 MHz では人体モデル周囲にオーラのように電界が生じ、人体から離れるにしたがって急激に減衰している。一方で、2.4 GHz では床面から空間に対して放射する成分が大きく、人体周辺は足下を除いてほとんど電界が分布していないことがわかる。この結果から、数十 MHz 程度を通信のキャリア周波数とすることで、人体周囲に強い電界を分布させることができ、安定した通信が可能になると考えられる。

さらに人体通信ではユーザ自身の体を伝送路として活用するため、電磁曝露の点で生体への安全性を担保することが極めて重要となる。今回は Bluetooth や Wi-Fi などの一般的な無線通信システムで使用される出力を想定したときに、励振される電界が生体に与える影響を確認するための指標として比吸収率（SAR: specific absorption rate）を計算した。その結果、局所的な SAR の最大値はいずれの周波数においても 0.8 W/kg を下回っており、公衆の曝露の制限値である 2 W/kg 以下であることを十分に満たしている。このことから、電磁的な曝露という点で、本技術が安全であることも確認できた。

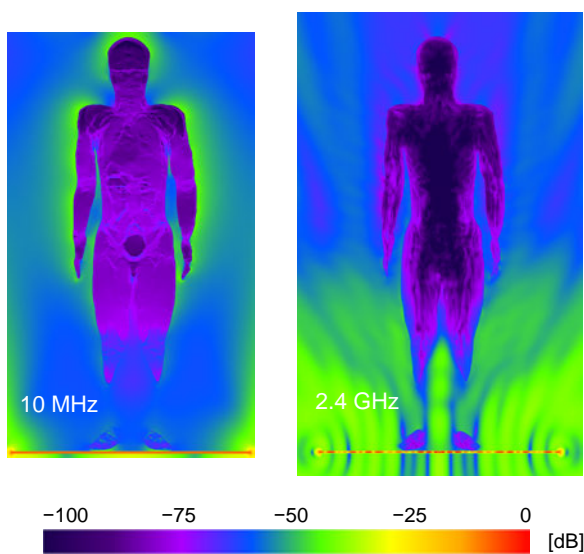


図 4 床面励振時の人体モデル周辺の電界分布 (10 MHz および 2.4 GHz)

4. まとめ

本研究では、車両内の安定高速通信実現に向け、対象に「触れる」あるいは「近接する」ことで通信する「人体通信」技術を用いた車両内通信システムの実現を目指し、その第一段階として床面に配置された電極から人体へ高周波信号を入力したときの電磁界の分布について検討した。検討の結果、数十 MHz 程度の信号を入力した場合に人体周囲に強い電界が分布することが明らかとなった。このため、安定した車両内通信を実現するためには、数十 MHz 程度がキャリア周波数の候補として有力であると考えられる。今後は、ユーザ移動に伴う伝送路変動の影響評価、近接・接触するユーザとの干渉制御、伝送路となる人体への電磁曝露の最小化、について検討を進める。

今回の電磁界解析に用いた人体モデルは、厳密な組織構造や人体形状を再現することで生体と電磁波の相互作用を正確に評価できる一方で、膨大な計算リソースを消費し解析には相当の時間を要する。さらに、車両内の通信環境をより厳密に再現するために、シートやつり革等の構造物を追加するとともに、床面積も広げる必要があり、解析にはさらに時間を要することになると考えられる。このため、解析精度と必要計算リソースのトレードオフを考慮した簡略人体モデルの開発を進めている。また、実際の使用環境を想定し、電極間に挿入する誘電体の種類や、電極と人体間の距離や絶縁方法（床材や靴を想定）について検討している。さらに、数値解析モデルと同様の状況の検証実験を行うため、床面内埋込型の電極および測定系の構築なども並行して進めている。

□

謝辞

本研究は一般財団法人研友社の 2023 年度調査研究助成を受けて行われた。ここに謝意を表す。

参考文献・引用文献

- 1) 佐川雄一, 中村宏之: つくばエクスプレスにおける列車内高速インターネットアクセスシステム, Journal of the ITU Association of Japan, Vol.37, No.12, pp.48-51, 2017
- 2) 杉山寛之, 佐川雄一, 駒井伸一: 東海道新幹線

- N700 系列車内インターネット接続システムの実用化, ARIB 機関誌 ARIB bulletin, Vol.69, pp.9-16, 2010
- 3) 浅川直輝: 時速 130km で疾走する「つくばエクスプレス」に, どうやってネットを接続できたのか, <https://xtech.nikkei.com/dm/article/NEWS/20060725/119478/> (参照日:2024 年 3 月 31 日)
 - 4) 3GPP TR38.913 (V0.4.0): Study on scenarios and requirements for next generation access technologies (Release 14), 2016
 - 5) Fujikura: Universidad Politécnica de Madrid (UPM): IP&T Center, Universidad Politécnica de Madrid (UPM) Millimeter-wave signal transmission experiment in coach of railway, <https://mmwavetech.fujikura.jp/60g/train/>, (参照日: 2024 年 3 月 31 日)
 - 6) A. Mauludiyanto, G. Hendrantoro, M. F. Nova: The Attenuation Characteristics of the Body Tissue on Frequency Function in WBAN Channel, *Adv. res. elect. electron. eng*, Vol.5, No.2, pp.107-113, 2021
 - 7) T.G. Zimmerman: Personal Area Networks: Near-Field Intra-Body Communication, *IBM Sys. Jour.*, Vol.35, No.3&4, pp.609-617, 1996
 - 8) T. Nagaoka, S. Watanabe, K. Sakurai, E. Kunieda, S. Watanabe, M. Taki, Y. Yamanaka: Development of realistic high-resolution whole-body voxel models of Japanese adult males and females of average height and weight, and application of models to radio-frequency electromagnetic-field dosimetry., *Phys Med Biol*, Vol.49, pp.1-15, 2004
 - 9) S Gabriel, R W Lau and C Gabriel: The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz, *Phys. Med. Biol.* 41, pp.2251-2269, 1996