

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

【2025年度 KR-111】

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

スマートフォンなど個人が利用する情報通信端末の爆発的な普及を背景に、飲食店をはじめ多くの場所でインターネット接続サービスが提供されている。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⁾。近年では、第5世代移動通信システム(5G)の登場で、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、スペインのマドリッ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²⁾。

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%以上が水分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」技術や「Wireless Body Area Network」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. 調査研究の対象となる技術

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伝送し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環境における伝送メカニズムの解明、②構造物とユーザ端末間の伝送チャネル特性のモデル化、③伝送チャネル特性に基づく通信方式の選択/制御、④ユーザ移動に伴う伝送チャネル変動の影響評価、⑤近接・接触するユーザとの干渉制御、⑥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3年目は⑤を中心に、2名のユーザが近接・接触する場合の干渉を想定し、数値解析と実機実験の両面から検討を行った。

スマートフォンの通信には5Gなどの移動無線通信のほかにWi-Fiなどが利用される。人体周辺数m以内の近距離無線通信規格としては、2.4GHz帯を用いるBluetooth Low EnergyやZigBee、また、日本では特に315MHz帯の微弱無線や、400MHz帯の特定省電力無線の利用が多い。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。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。

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の界面には近接場電界が生じ、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。一方で、ユーザが対象機器あるいは機器を装着した他のユーザに接触すると伝送路が形成される性質から、本研究で想定するような車両内通信システムにおいてはユーザ同士の近接や接触によって信号干渉が生じ、通信品質の劣化が懸念される。

3. 隣接ユーザとの干渉評価

本研究では人体通信による車両内通信システムにおける干渉問題の一例として、2名のユーザが近接・接触することで生じる信号干渉を想定し評価する。

(1) 電磁界解析の条件

車両内通信における2名のユーザ間の干渉を評価する電磁界解析モデルを図2に示す。一方のユーザの手首に送信機を、他ユーザの複数位置に受信機を装着し、送受信機間の伝送特性を計算することで干渉レベルを評価する。ユーザを想定した人体モデルとして、国立研究開発法人 情報通信研究機構が開発した男性人体モデル TARO および女性人体モデル HANAKO を用いた³⁾。TARO と HANAKO はそれぞれ2mm角のボクセル約800万個と630万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。送信機 (TX) は男性モデルの左手首に装着した。また、送信機と受信機間の距離の影響を調べるため、2つの受信機

(RX #1 および RX #2) を女性モデルの左手首および右手首にそれぞれ装着した。ユーザ間の接触条件の影響を評価するため、図3に示すように、非接触(近接)、握手、腕組みの3つの条件を設定した。

図4に TX および RX モデルの構造を示す。TX モデルは回路基板、信号電極、グラウンド電極、配線、および出力インピーダンス 50 Ω の給電点から構成される。RX モデルは回路基板、信号電極、および 9k Ω の負荷から構成される。送受信機に使用したすべての材料は完全導体としてモデル化した。電極直下の皮膚は、電極と確実に接触するように設計した。周波数は ISM 帯の 13.56MHz 帯や Wireless Body Area Network の 21MHz 帯の代表値として 10MHz とした。

(2) 被験者実験の条件

ユーザ間の干渉を測定するための実験系について述べる。ベクトルネットワークアナライザなどの大型測定器を使用すると、装置筐体や交流電源接地を介した不要な信号伝搬が生じ、人体の伝送特性を過大評価してしまう可能性がある。そこで本研究では、伝送特性の測定に小型スペクトラムアナライザ tinySA を用いた。このスペクトラムアナライザは 74mm × 123mm × 23mm と小型であり、内蔵リチウムポリマーバッテリーによりスタンドアロンで動作可能である。さらに信号発生機能を内蔵しているため、受信機としてだけでなく送信機としても使用できる。TX および RX の電極は、図4に示したシミュレーションモデルと同一の構造および寸法となるように、両面銅張り FR4 基板から製作した。これらの電極は、基板上に実装した SMA 同軸コネクタを介して、スペクトラムアナライザの送信ポートおよび受信ポートに直接接続した。図5に、電極に接続された小型スペクトラムアナライザからなる実際の TX および RX 機器を示す。

測定では、2名の被験者が図2に示したシミュレーションモデルと対応する位置に、それぞれ手首へ TX と RX を装着し、被験者間の伝送特性を評価した。被験者は日本人男女各1名であり、電磁界解析で使用した男性モデルおよび女性モデルに対応している。身長は男性 176.0cm、女性 164.8cm であり、解析モデル (それぞれ 173.2cm および 160.8cm) と近い値である。図6に示すように、測定はユーザ間の接触条件として、(a) 握手および (b) 腕組みの2条件で実施した。

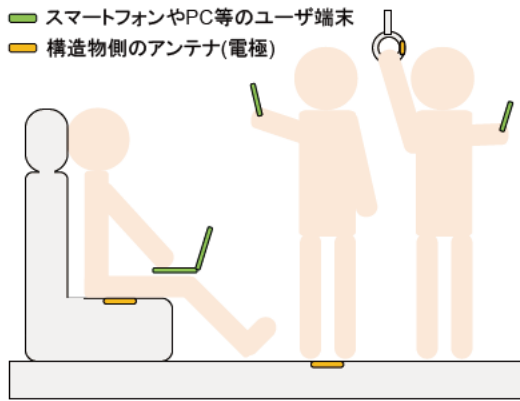


図1 人体通信による車両内通信システムのイメージ

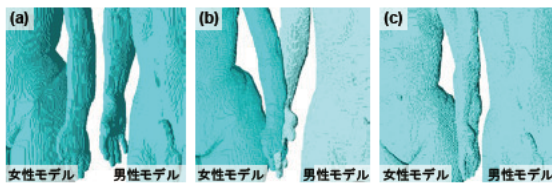


図3 接触条件：

(a) 非接触 (近接)、(b) 握手、(c) 腕組み

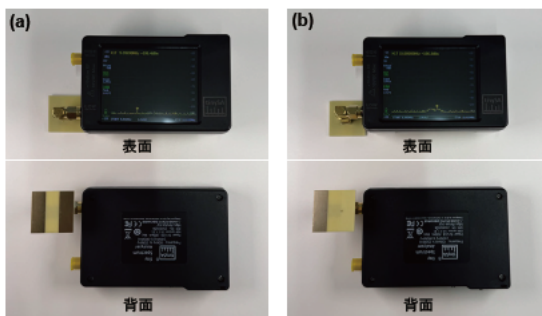


図5 試作電極を接続した測定器：
(a)TX側、(b)RX側

(3) 解析および測定の結果

図7および表1に、電磁界解析および被験者実験から得られた10MHzにおける伝送特性 $|S_{21}|$ を示す。まず、干渉という観点からみると、すべてのRX位置および接触条件において $|S_{21}|$ は約-90dBを下回る値となった。これは前年度までに得られた車両内通信で想定される伝送特性より50dB程度小さな値であり、ユーザ間の信号干渉という観点からは好ましい結果である。なお、測定において非接触(近接)評価を行っていないのは、測定器の限界によるものである。

まず、RX位置の影響に着目する。表1に示したように、解析におけるRX#1の $|S_{21}|$ は-95.8dB(握手)、-90.4dB(腕組み)であるのに対し、RX#2ではそれぞれ-110dBおよび-105dBである。したがって、同一の接触条件において、RX#1のパスロス(RL)はRX#2より14~15dB小さい。同様の傾向は測定結果にも見られ、RX#1の平均 $|S_{21}|$ は

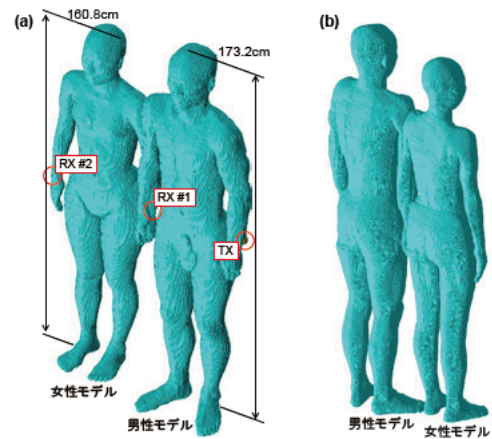


図2 干渉の解析に用いた電磁界解析モデル：
(a) 前面、(b) 背面

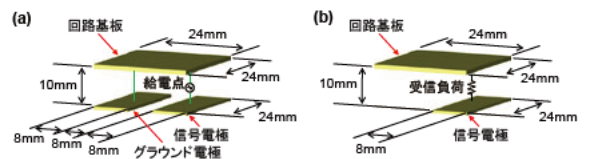


図4 送受信機モデルの構造詳細：(a)TX、(b)RX



図6 実験で想定したユーザ間の接触条件：
(a) 握手、(b) 腕組み

-95.9dB および -90.8dB であるのに対し、RX#2では-102.6dB および -101.2dB である。この結果、RX#1とRX#2の差は、握手で約7dB、腕組みで約10dBとなり、これは接触条件間の差よりも大きい。これらの結果は、ユーザ間の信号干渉において伝送特性を支配する主因はユーザ間接触条件ではなく、送受信機間の距離であることを示している。次に、解析と測定の結果を比較する。表1より、RX#1の $|S_{21}|$ は両接触条件において1dB以内で一致したが、RX#2では差がやや大きくなった(約4~7dB)。しかし、全体的な傾向は一致しており、常にRX#1の方がRX#2よりもパスロスが小さく、腕組みの方が握手よりもわずかに良好な伝送特性を示した。このわずかな改善は接触形状によって説明できる。握手と比較して腕組みでは、前腕同士の接触により接触領域が広く分布し、ユーザ間距離も短くなるため、人体間の結合が強まり $|S_{21}|$ がわずかに向上する。残存する差異は、解剖学モデルと実際の被験者間の

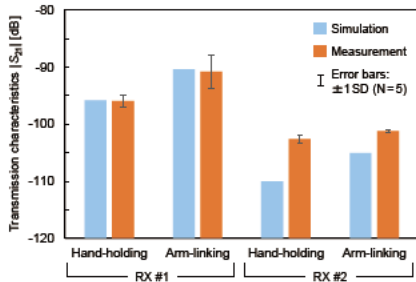


図7 解析と測定により得られた伝送特性

電気特性や形状の違い、電極と皮膚の不完全な接触による接触インピーダンス、および測定で用いた小型スペクトラムアナライザと電極接続にともなう寄生容量・インダクタンスなど、数値モデルで完全に再現しきれない条件に起因すると考えられる。

図8に、TXの給電点を含み両ユーザを横切る観測面上の電界分布を示す。本分布から、TX周辺で励振された強い電界がTX側ユーザの腕および胴体を経由し、接触部分で他方のユーザへ伝搬していく様子が確認できる。信号がRX側ユーザに入ると電界は広範囲に広がり、ユーザが握手している場合でも腕を組んでいる場合でも、受信位置周辺ではほぼ一様となる。この挙動は図7および表1の傾向と一致している。すなわち、受信側人体周辺の電界が広く分布するため、送信機との距離が大きく変わらない限り、同一構造の受信機を身体上のさまざまな位置に装着しても伝送特性は大きく変化しない。

以上より、信号干渉の度合いは、ユーザ間の接触条件より送受信機間の距離が大きく影響するものの、車両内通信におけるユーザ間の信号干渉という観点での影響はきわめて小さいことが明らかとなった。

4. まとめ

本研究では、車両内の安定高速通信実現に向け、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、近接・接触するユーザ間の信号干渉について検討した。これまでに実施した、車両内における伝送メカニズムの解明、チャネル特性に基づく通信方式の選択/制御法、人体への電磁曝露の最小化、などとあわせて、人体通信技術を用いた車両内通信システムに要求される仕様や要素技術について調査を完了した。□

表1 解析および測定により得られた伝送特性と5回試行の統計

	RX #1		RX #2	
	Hand-holding	Arm-linking	Hand-holding	Arm-linking
$ S_{21} $ in simulation [dB]	-95.8	-90.4	-110	-105
$ S_{21} $ in measurement [dB]				
Mean (N = 5)	-95.9	-90.8	-102.6	-101.2
Trial 1	-94.9	-87.4	-102.9	-101.4
Trial 2	-96.4	-89.4	-101.4	-100.9
Trial 3	-94.9	-89.4	-102.9	-101.4
Trial 4	-97.4	-93.4	-102.9	-100.9
Trial 5	-95.9	-94.4	-102.9	-101.4
Standard deviation (N = 5)	0.95	2.65	0.60	0.25

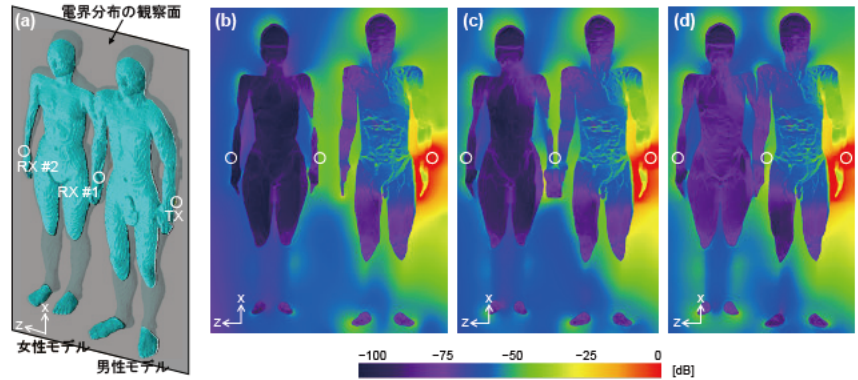


図8 人体モデル周囲の電界分布：
(a) 電界分布の観測面、(b) 非接触（近接）、(c) 握手、(d) 腕組み

謝辞

本研究は一般財団法人研友社の2025年度調査研究助成を受けて行われた。ここに謝意を表する。

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) Fujikura: Millimeter-wave signal transmission experiment in coach of railway, IP&T Center, Universidad Politécnica de Madrid (UPM), <https://mmwavetech.fujikura.jp/60g/train/>, 参照日: 2026.3.31
- 3) 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