

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

【2024年度 KR-110】

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2年目は特に①②③⑥について、車内床面から人体を介して手首に装着したユーザ端末への信号伝送を想定し、数値解析を中心として検討を行った。



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

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、2.4 GHz 帯を用いる Bluetooth Low Energy や ZigBee、また、日本では特に 315 MHz 帯の微弱無線や、400 MHz 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。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、最適な通信キャリア周波数といった具体的な仕様も含めて調査を行う。

(2) Wireless Body Area Network

スマートウォッチなどのウェアラブル機器も含めると、ユーザ周辺の無線通信ネットワーク技術である Wireless Body Area Network (WBAN) の研究開発も盛んに行われている。WBAN は IEEE 802.15.6ma で標準化された規格で、医療ヘルスケアやエンターテインメントなど広範囲の応用を想定している。表 1 に示すように、21 MHz 帯の人体通信、400 MHz、920 MHz、2.4 GHz 帯などを用いる狭帯域無線通信、そして 3.4-10.25 GHz を用いる超広帯域無線通信の、異なる 3 種類の物理層 (PHY) と、共通のメディアアクセス制御層 (MAC) を利用することが特徴である。また、ユーザが装着したウェアラブル機器やセンサ同士を接続する On-body 通信と、ハブとなる機器 (例えばスマートウォッチ) とユーザから離れた位置にある外部端末を接続する Off-body 通信の 2 種類の通信モードをサポートすることも大きな特徴である。本研究では、WBAN のうち 2.4 GHz 狭帯域無線通信を車両内通信システムに活用する方法について、アンテナ設計や通信方式も含めて調査を行う。

3. 床面からの信号入力時の伝送メカニズム

本研究では、構造物と人体を含む環境における信号伝送の一例として、車内床面から信号伝送を行うシステムを想定する。

表 1 IEEE 802.15.6ma WBAN の技術仕様

Usage	On-body	Off-body		
PHY	HBC	NBWC		UWB
Frequency band	21 MHz band	402-405 MHz	Implantable device (Universal)	3.4-4.8 GHz
		420-450 MHz	Medical telemetry (Japan)	6.25-10.25 GHz
		863-870 MHz	ISM band(EU)	Regulated by each country
		902-928 MHz	ISM band(USA)	
		950-956 MHz	Specified Low Power Radio	
		2.36-2.4 GHz	Medical device(USA)	
		2.4 GHz band	ISM band(Universal)	
Modulation		D-PSK, GFSK		OOK, D-PSK
Data rate	< 1.3 Mbps	< 970 kbps		> 12 Mbps
MAC	All common			

(1) 電磁界解析モデル

車両内の床面から人体へ高周波信号を入力したときの信号伝搬メカニズムを、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 情報通信研究機構が開発した詳細人体モデル TARO を用いた³⁾。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正確に評価するため、各生体組織には周波数に依存する電気特性を設定した。

人体モデル足下には、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。この電極間の端部に内部インピーダンス 50Ω の励振源を配置し信号を入力した。解析モデルを図 2 に示す。

(2) 伝送メカニズム

床面からの信号伝送に人体通信または WBAN の利用を想定し、今回は 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 WBAN の狭帯域無線通信での利用に加えて Bluetooth や WiFi など広く用いられる帯域であることから、それぞれ採用した。図 3 にモデル周囲の電界分布を示す。電界分布は床面の給電点を通り人体を両断する面で観察している。図からわかるように、10 MHz では人体モデルの体表から数 cm 程度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。電界が生じる範囲が人体のごく近

傍に限られるが、足下から頭頂部まで同程度の強度で電界が生じている。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、足下および手首～肩部にも強い電界が分布するものの、頭部周辺には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、人体周囲に満遍なく電界を分布させることができ、特に頭部に装着するスマートグラスやヘッドマウントディスプレイなどでは安定した通信が可能になると考えられる。一方で、2.4 GHz 帯をキャリア周波数とすることで、足下～肩程度までに強い電界を発生させることが可能で、スマートウォッチなどを対象とした伝送では有利であると考えられる。

4. 構造物とユーザ端末間の伝送チャネル特性と通信特性

本章ではユーザが装着するウェアラブルアンテナを設計し、床面とのウェアラブルアンテナの間の伝送チャネル特性を電磁界解析により計算したうえで、得られたチャネル特性に基づいて通信特性を評価する。

(1) ウェアラブルアンテナと電磁界解析モデル

ユーザが装着するスマートウォッチなどの機器に搭載するウェアラブルアンテナとして、短波帯で機能する人体通信の電極と、2.4 GHz 帯で共振するマイクロストリップパッチアンテナの、異なる 2 種類の構造を融合した、図 4 (a) に示す構造を提案す

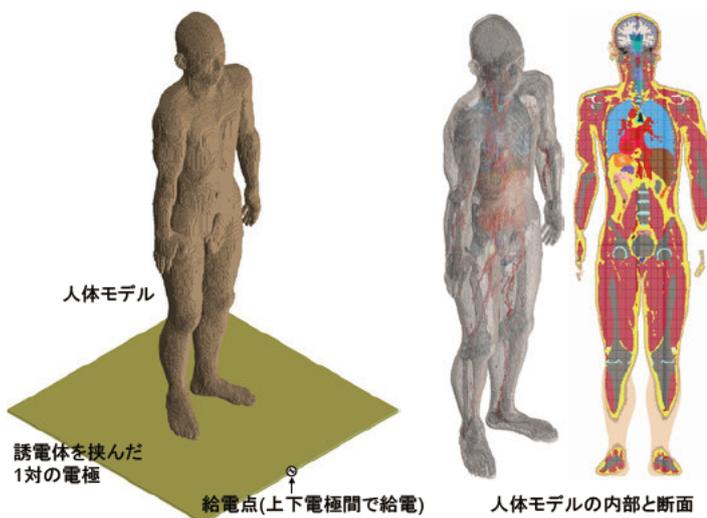


図 2 床面からの信号入力を想定した数値電磁界解析モデル

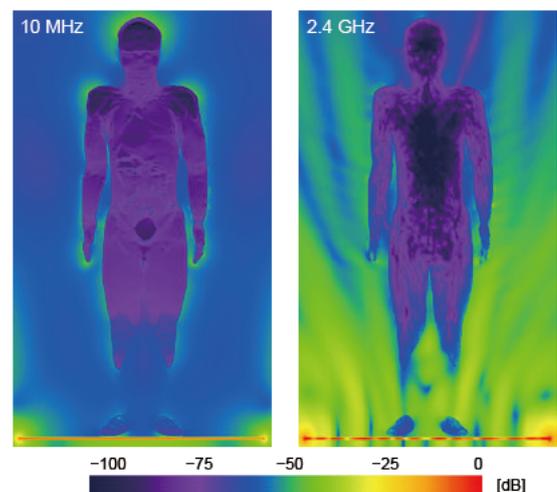


図 3 床面励振時の人体モデル周辺の電界分布

る。本アンテナは人体通信電極のグラウンド電極をパッチアンテナのグラウンド板として共用することで、ウェアラブル機器に搭載可能なレベルの小型化をはかった。また、単一の給電点で異なる2つの周波数帯の信号を励振することで、さらなる小型化および高周波部品点数の大幅な削減を可能にした。アンテナ数値モデルの信号電極、グラウンド電極、アンテナのパッチ部分、給電ワイヤは完全導体とした。電極とパッチの間には比誘電率が1.28の無損失の誘電体を装荷し、各部の寸法は2.4 GHzで共振し所望帯域を満たすように微調整した。図4 (b) に示すように、本アンテナを数値人体モデルの左手首に装着し、床面とウェアラブルアンテナの間のチャンネル特性を電磁界解析により求めた。

(2) ウェアラブルアンテナの性能評価

アンテナの反射係数 S_{11} 特性は、回路からアンテナへの供給電力のうちインピーダンス不整合で反射され回路に戻る電力の割合を示すもので、その値が小さいほど良いアンテナである。提案アンテナはWBAN 狭帯域無線通信の2.4 GHz帯で $S_{11} = -10$ dB以下の良好な特性を実現できていることが確認できた。また、無線アンテナがその端子で受け入れた無線周波数の電力をどれだけ放射電力に変換できるかを示す指標である放射効率も計算した。2.4 GHz帯の放射効率は腕が存在しない場合にはほぼ100%、腕が存在する場合は30%程度となった。これは、2.4 GHzのように高い周波数は人体に吸収されやすいことが原因である。人体の存在により放射効率は低下しているものの、ウェアラブルアンテナとしては十分な特性であるといえる。一方、10 MHzでは腕の有無にかかわらず放射効率はほぼ0%となった。こ

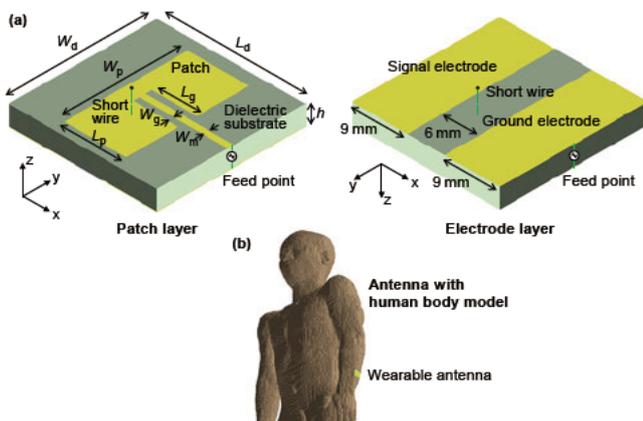


図4 提案ウェアラブルアンテナと数値電磁界解析モデル

れは、人体通信では人体近傍にのみ準静電界として信号が分布し、遠方への放射がほとんど生じないためである。

(3) 伝送チャンネル特性および通信方式の評価

床面と手首のウェアラブルアンテナの間の伝送チャンネル特性を解析した結果、2.4 GHz帯ではおよそ-30から-40 dB程度のチャンネルゲインが得られることがわかった。得られたチャンネル特性に加法性白色ガウス雑音を付加し、誤りなく伝送可能なデータレートであるスループットを計算機シミュレーションで求めた。本研究では伝送効率の異なる3種類の変調方式(BPSK、QPSK、16QAM)を想定した。1ビット当たりの信号電力と雑音密度の比である E_b/N_0 に対するスループット特性を図5に示す。図5より、 E_b/N_0 が大きいほど、すなわちチャンネル状態が改善するほど伝送効率の高い多値の変調方式のスループットが有利であることがわかる。実際の車両内環境ではユーザ移動や構造物との位置関係によってチャンネル状態が変化すると予想されるため、適応的に変調方式を制御することでスループットを改善できると考えられる。

5. 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」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、典型的な伝送事例として車両内の床面から人体へ高周波信号を入力したときの伝送メカニズムについて検討した。今後は、シートやつり革等の構造物を追

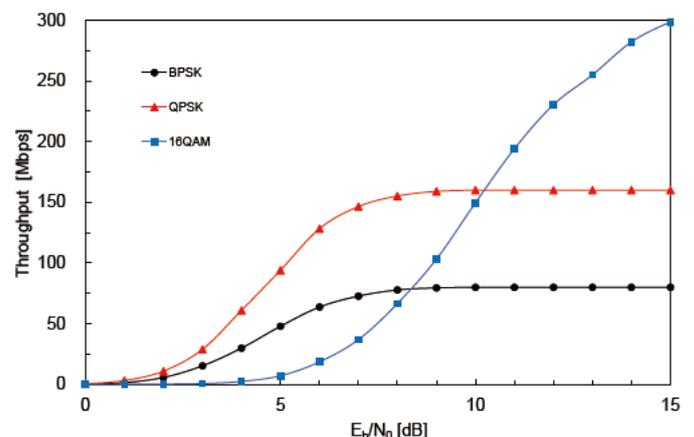


図5 床面アンテナ間伝送の E_b/N_0 -スループット特性

加するとともに人体モデルの姿勢を変化させ、車両内の通信環境をより厳密に再現した解析を行う。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)についても検討を進める。特に、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を早急に行う。ウェアラブルアンテナについては2回目の試作が完了しており、2025年度中には試作アンテナを用いた伝送実験を実施できる予定である。また、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、伝送路についても検討を進めていく。□

謝辞

本研究は一般財団法人研友社の2024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) Fujikura: 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:2025年3月31日)
- 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