

詳細人体モデルによる人体通信機器の入力特性 および生体暴露に関する検討

A Study on Input Characteristics of Human Body Communication Devices and Human Exposure Using Realistic Human Model

○村松大陸 (東京大) 越地福朗 (国士舘大) 越地耕二 (東京理科大) 佐々木健 (東京大)

Dairoku Muramatsu, The University of Tokyo, Fukuro Koshiji, Kokushikan University
Kohji Koshiji, Tokyo University of Science, Ken Sasaki, The University of Tokyo

Abstract: Human body communication is expected as a new transmission method for body area network (BAN). Input impedance characteristics of transmitter have been investigated through a three-dimensional electromagnetic field simulation for improving transmission characteristics between devices by impedance matching. However, detailed human body model is not considered in simulations. In this report, it was found that the detailed human model and the homogenous cylinder model showed different input impedance characteristics. Moreover, applying the voltage required for the communication between the electrodes, the SAR on the body surface and inside the body were less than the safety standards.

Key Words: Human Body Communication, Body Area Network, Wearable, Impedance Matching, FDTD Method

1. はじめに

近年, BAN(Body Area Network)⁽¹⁾に必要な至近距離での無線通信技術として, 低消費電力, 低電磁雑音で通信可能な人体通信⁽²⁾が注目されている. 人体通信の応用例として, 装着したウェアラブル機器で取得した生体情報を, 人体通信により携帯端末等に伝送し管理する健康管理システム⁽³⁾などが考えられている. このようなウェアラブル機器を使用する際に, 通信品質やバッテリー使用時間の向上が求められており, インピーダンス整合による伝送特性の改善が重要な課題である.

これまで著者らは, 人体腕部を筋肉の電気的特性を有する円柱 (均質円柱モデル) でモデル化し, モデルに接触させた送信機の入力インピーダンス特性について検討を行ってきた⁽⁴⁾. しかしながら, 実際の腕部は皮膚, 脂肪, 筋肉, 骨などによる多層構造で構成されているため, より詳細な構造をもつモデルでの検討が必要である. 本研究では, 多数の生体組織で構成される詳細人体モデルの腕部を用い, 人体通信における送信機に着目し, FDTD (Finite Difference Time Domain)法を用いた電磁界解析により, 送信機の入力インピーダンス特性について検討を行った. さらに, 本技術が人体を伝送路として通信を行うことを考慮し, 送信機により誘起される電界が生体に与える影響について, 詳細人体モデル腕部の SAR(Specific Absorption Rate)を算出することにより検討を行った.

2. 想定システム

本研究では, 手首をはじめとする前腕部に装着されたウェアラブル送信機と, 手に持った携帯端末型受信機との通信を想定した. Fig. 1 にその伝送モデルを示す. 過去の検討において 10 MHz 付近で最大の伝送特性が得られたこと⁽⁵⁾および, ISM(Industry-Science-Medical)バンド⁽⁶⁾での使用を想定していることから信号周波数は 10 MHz とした. また, 高周波 LSI(Large Scale Integration)の出力インピーダンスは, 50 Ωが一般的であるため, 本研究においても送信機励振源の出力インピーダンスは 50 Ωとした.

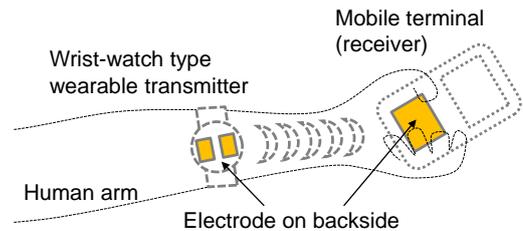


Fig. 1 Human body communication system

3. 電磁界解析モデル

本研究では, 三次元電磁界シミュレーションソフトを用いて FDTD 法による解析を行った. 詳細人体モデルとして, NICT の提供する数値人体モデル (TARO)⁽⁷⁾の左腕部分を著者らが解析用に加工した詳細腕部モデルを用いた. 詳細腕部モデルは皮膚, 脂肪, 筋肉, 血管, 腱, 皮質骨, 海綿骨の 7 種類の生体組織で構成される. Table 1 に 10 MHz における各組織の電気的特性を示す⁽⁸⁾. 皮膚については, 乾燥状態, 湿潤状態, 通常状態それぞれの特性を示す. 加工したモデルを手の甲側から見た図, 手の平側から見た図をそれぞれ Fig. 2 に示す. 肩から指先までの長さは 732 mm となっている.

人体通信送受信機として, 著者らが均質円柱モデルを用いて, 入力インピーダンスが 50 Ωとなるように設計した送信機⁽⁴⁾および携帯端末サイズで最適化を行った受信機⁽⁹⁾を用いた. 送信機および受信機の構造を Fig. 3(A), (B)にそれぞれ示す. 送信機の信号電極, グラウンド電極, 回路基板, ワイヤおよび, 受信機の上電極, 下電極, ワイヤは完全導体により構成した. 送受信機の電極下面は, 腕部モデルに密着するように加工を行った. 励振源の出力インピーダンスおよび受信抵抗は 50 Ωとし, 送信機は腕部モデル中央に, 受信機は手の平に配置した.

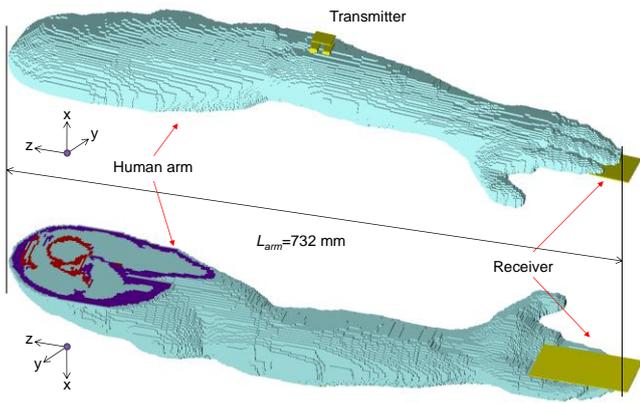


Fig. 2 An analysis model of human body communication system

入力インピーダンス Z_{in} 特性を電磁界解析により算出した。比較のため、解析結果を詳細腕部モデルの全組織を筋肉としたモデルおよび、均質円柱モデルを用いた場合の Z_{in} 特性とあわせて Table 2 に示す。Table 2 より、各生体組織で構成される多層構造を有する詳細腕部モデルの場合、他の 2 種類のモデルに比較し大きく Z_{in} 特性が異なっていることがわかる。

Simulation model	Re(Z_{in}) [Ω]	Im(Z_{in}) [Ω]
Detailed human arm model	179	-86.4
Detailed human arm model (muscle homogenous)	45.4	-5.88
Muscle homogenous cylinder model	50.1	-6.60

4-2 皮膚状態が入力インピーダンスに与える影響

本研究で用いている送信機は、人体に直接接触させるため、電流が最も多く流れる皮膚の状態により送信機の入力インピーダンスは大きく変化する可能性がある。そこで、皮膚の状態として、乾燥、湿潤、通常の 3 つに関して解析を行った。各状態における皮膚の電気的特性は Table 1 に示した値を用いた。解析の結果、Table 3 に示すように、皮膚の状態によって入力インピーダンスの実部はあまり変化しないことが明らかになった。以上より、送信機の入力インピーダンスは皮膚の状態ではなく、皮膚より下層の構造に大きく依存すると考えられる。

Skin condition	Re(Z_{in}) [Ω]	Im(Z_{in}) [Ω]
Dry	180	-127
Normal	179	-86.4
Wet	165	-51.8

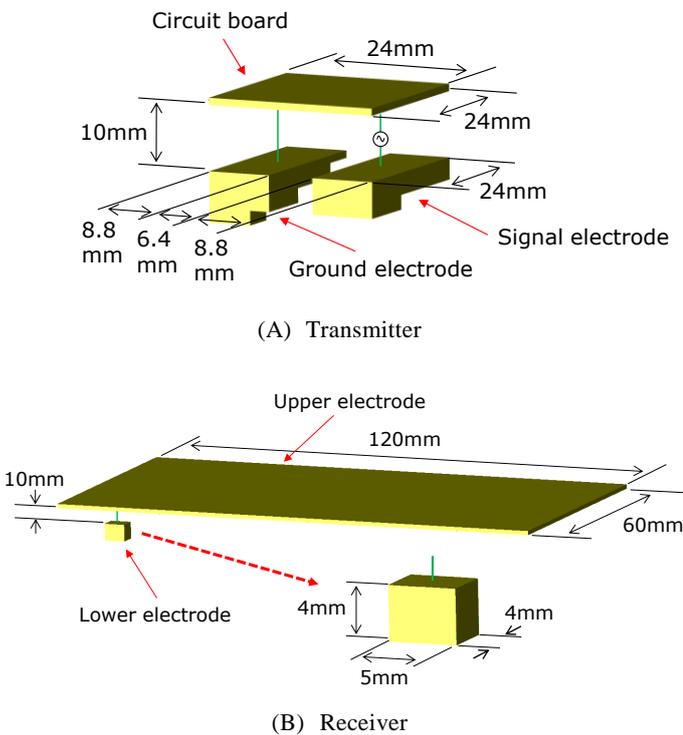


Fig. 3 Structure of transmitter and receiver

Tissue name	Conductivity [S/m]	Relative permittivity
Skin (dry)	1.1	360
Skin (normal)	0.37	220
Skin (wet)	0.28	290
Fat	0.029	14
Muscle	0.62	170
Blood	1.1	280
Tendon	0.41	100
Cortical bone	0.043	37
Cancellous bone	0.12	71

4. 送信機の入力インピーダンス特性

4-1 均質円柱モデルと詳細腕部モデルの比較

Table 1 に示した電気的特性を有する詳細腕部モデルに接触した送信機の励振源から、腕部および空間を見込んだ

5. 電界分布

人体通信では送信機により励起される電界により通信を行うため、入力特性に加えて正確な電界分布を算出する必要がある。Fig. 4 に詳細腕部モデルの、送信機の励振源を含む zx 面における電界の実効値分布を示す。Fig. 4 より、円柱均質モデルを用いて解析を行った場合と同様に、腕部周辺に電界が強く分布しており、腕部表面から離れた位置においては電界強度は大幅に低減されることがわかる。このように、詳細腕部モデルを用いた場合でも、人体通信の優れた特長である、通信の秘匿性や EMC の観点から有効と考えられる電界分布が得られる事が確認できた。

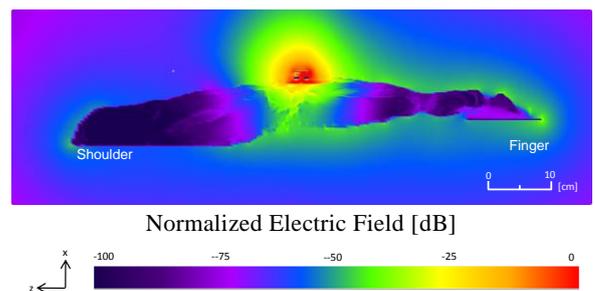


Fig. 4 Electric field distributions around and inside the human arm with wrist-watch sized wearable transmitter and mobile sized receiver

6. 生体に対する安全性

Bluetooth や無線 LAN 等の一般的な無線通信システムで使用される受信モジュールの受信限界感度は、-70dBm 程度であるのが一般的である⁽¹⁰⁾。本研究で用いた腕および送受信機モデルの場合には、励振源において 2 V を入力したときに受信抵抗において受信限界感度を満足する 1.28×10^{-10} W (-68.9 dBm) を得ることができる。このとき、人体通信により生じる電界が生体に与える影響を確認するため SAR を計算した。SAR は体重 1 kg あたりで 1 秒間に吸収されるエネルギーとして定義され、高周波電磁界が生体に及ぼす熱作用の指標として用いられる。SAR は電界強度 E [V/m]、導電率 σ [S/m]、生体組織の密度 ρ [kg/m³] を用いて、次式(1)のように表される。

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{\rho} \quad (1)$$

Fig. 5 に詳細腕部モデルの、送信機の励振源を含む zx 面における SAR 分布を 2 W/kg を 0 dB として規格化して示す。SAR が最大となったのは送信機の電極間の皮膚部分であり、腕部組織 10 g あたりの局所 SAR の最大値は 0.35 W/kg となった。これは総務省の電波防護指針⁽¹¹⁾に示される局所吸収制限である、任意の組織 10 g 当たりの局所 SAR が職業的曝露で 10 W/kg、公衆の曝露で 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、電磁波の熱作用という点で、本技術は生体に対して十分に安全な通信技術といえることが明らかとなった。

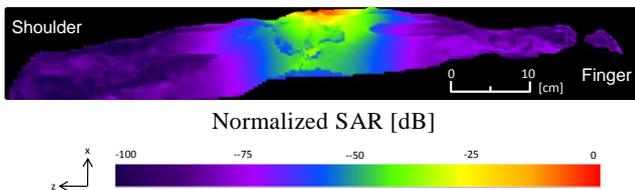


Fig. 5 SAR inside the human arm with wrist-watch sized wearable transmitter and mobile sized receiver

7. まとめ

本研究では詳細腕部モデルを用いた電磁界解析により、人体通信送信機の入力インピーダンス特性を算出した。これまでに検討されてきた均質円柱モデルとの比較の結果、単一組織で構成される均質円柱モデルと詳細腕部モデルでは送信機の入力特性が大きく異なることがわかった。また、皮膚の水分状態は入力インピーダンス実部にはほとんど影響を与えないことが確認された。さらに、送信機励振時の電磁波による生体への熱作用が、ガイドラインの制限値以下であることを確認した。以上の検討より、詳細腕部モデルによる電磁界解析の重要性および、本技術の生体に対する安全性が明らかになった。

参考文献

- (1) Huan-Bang Li, Kenichi Takizawa, Ryuji Kohno : “Trends and Standardization of Body Area Network”, Proceeding of the 1st European Wireless Technology Conference, 2008.
- (2) T. G. Zimmerman: “Personal Area Networks (PAN):Near- Field Intra-Body Communication”, M.S.thesis, MIT Media Laboratory, 1995.
- (3) 尾崎徹, 小見正幸, 杉本千佳, 柴建次, 苗村潔, 保坂寛, 板生清, 佐々木健, : “ヘルスケア用ウェアラブルセンシングユニットの開発研究”, マイクロメカトロニクス, Vol. 47, No. 3, pp.12-19, 2003.
- (4) 村松大陸, 山本隆彦, 越地福朗, 越地耕二: “インピーダンス整合を考慮した人体通信用電極構造の検討”, 生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 2010論文集, pp.412-415, 2010.
- (5) 蜂須賀啓介, 中田杏里, 武田輝, 柴建次, 佐々木健, 保坂寛, 板生清, 他: “人体を伝送路とした情報通信デバイスの開発”, マイクロメカトロニクス, Vol. 46, No. 2, pp.53-64, 2002.
- (6) International Telecommunication Union (<http://www.itu.int/en/pages/default.aspx>)
- (7) 渡辺聡一, 山中幸雄, 長岡智明, 国枝悦夫, 鈴木敬久, 多氣昌生, 王建青, 藤原修: “日本人数値人体モデル開発と無償データ利用公開の経緯”, 信学技報, EMCJ2004-53, pp.29-35, 2004.
- (8) International Federation of Automatic Control (IFAC) website (<http://nirem.fiac.cnr.it/tissprop/>)
- (9) 村松大陸, 山本隆彦, 越地福朗, 越地耕二: “人体通信用受信機の電極構造に関する検討”, 日本 AEM 学会誌, Vol.19, No.2, pp.354-359, 2011.
- (10) インターフェース第27巻 第8号, CQ出版社, pp.60-63, ISSN 0387-9569, August 2001.
- (11) 総務省電波防護指針(<http://www.tele.soumu.go.jp/>)