

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2014～2016

課題番号：26420340

研究課題名（和文）短波帯で用いる人体通信機器のフロントエンド設計に関する研究

研究課題名（英文）Frontend design of shortwave band human body communication devices

研究代表者

佐々木 健（SASAKI, KEN）

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：40178645

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,900,000円

研究成果の概要（和文）：人体通信は人体を伝送経路の一部として利用する無線通信の一種であり、アンテナの代わりに人体に接触させる電極を用いる。本研究では搬送周波数に短波帯を用いる場合について、電極配置や送受信機間の相対位置関係と伝送特性の関係を数値電磁界解析と実験によって調べ、伝送路の等価的なインピーダンス特性や周囲のグラウンドとの結合の影響を定量的に示した。これらの結果により、フロントエンドと呼ばれる送受信機の入出力部の定量的な回路設計が可能となった。

研究成果の概要（英文）：Human body communication (HBC) is a wireless transmission method that uses human body as part of the transmission medium and uses electrodes instead of antennas. Transmission characteristics of HBC in shortwave band were investigated with respect to arrangement of the electrodes and placements of the transmitter and the receiver. Impedance characteristics of the transmission channel and couplings with the surrounding environment were evaluated by numerical analysis and experiments. These results provide technical data for frontend design of the transmitter and the receiver of human body communication.

研究分野：メカトロニクス

キーワード：ウェアラブル機器 人体通信 伝送特性 回路設計

### 1. 研究開始当初の背景

携帯情報機器の進歩により、情報通信や健康管理を目的としてユーザが複数のウェアラブル機器を身につけることはごく普通になった。人体周辺の複数の情報機器間の無線通信に関する国際的な規格 IEEE 802.15.6 では周波数帯は大きく 3 つに分類され、400MHz から 2.4GHz の帯域、3.5GHz～10GHz の UWB の帯域、および 3MHz～30MHz の短波帯の 21MHz を標準として用いる Human Body Communication (HBC) が規定されている。この 3 番目の HBC は人体を通信媒体の一部として利用するもので、「人体通信」と呼ばれている。

人体通信はアンテナの代わりに電極を人体に接触あるいは近接させて通信する。信号伝送は人体を流れる微小な電流と、人体の表面および機器間の静電結合が寄与している。短波帯の波長は人体より長いために、人体近傍の機器間では遠距離まで伝わる電磁波より静電結合が支配的となる。人体通信の特徴は、通信が接触によって成立するのでユーザの動作を利用した新しいインタフェースに利用できることである。またユーザの体に接触していない他の受信機で信号を傍受することは困難なため秘匿性に優れている。さらに人体が通信媒体の一部として機能するので同じ空間距離であれば空中の電波を用いる既存の無線通信より少ない電力で通信できる可能性がある。

人体通信は以上のような特徴を持つが、人体通信に関する研究は実用的な機器設計や回路設計を意識したものが少ない。人体通信を応用した具体的なアプリケーション開発や機器の普及のためには、送信機や受信機の電極および電極を接続する入出力部、いわゆるフロントエンドと呼ばれる部分の設計に必要な定量的な情報の整備が必要である。

### 2. 研究の目的

人体通信ではアンテナの代わりに電極を人体に接触あるいは近接させて信号伝送を行う。電極を含めた送受信回路の入出力部であるフロントエンドの回路設計に必要な技術情報を整備するため、以下の項目を本研究の目的とする。

- (1)送信機の電極形状・配置と伝送特性および電極間インピーダンスの関係の解明
- (2)受信機側から見た伝送路のインピーダンス特性の解明
- (3)人体通信における周囲環境の影響評価—特にグラウンドを介した結合の評価—
- (4)短波帯を用いる人体通信機器の研究開発に使用可能な電磁ファントムの開発

### 3. 研究の方法

人体通信の伝送特性の計測用に製作する送信機と受信機を用いた計測実験と、数値電磁界解析によるシミュレーションによって行った。

### (1)伝送特性計測用の送受信機

人体通信は電極を人体に接触させ、人体内部を流れる電流と人体周囲に形成される電界によって信号を伝送する。伝送特性の計測に汎用の信号発生器や測定器を用いると、人体と機器の間や接続に使うケーブルなどとの間に電界が形成され、実際に使用される人体通信機器が形成する電界と異なる可能性がある。測定機器等の影響を完全に除去することは困難なので、本研究では送信機、受信機とも電池駆動の小型の機器を製作した。

図 1. に製作した送信機と受信機の例を示す。受信した信号の大きさは受信用 IC が出力する受信信号強度(RSSI)の電圧信号をマイクロコンピュータで AD 変換した値を液晶に表示する。この送信機と受信機が用いる周波数は 10.7MHz である。受信機が据置型の場合には図 2. に示すように電池駆動の高周波アンプの出力を電池駆動のオシロスコープに接続し、信号の振幅を観測する。周波数は 5MHz, 10MHz, 20MHz を用いた。

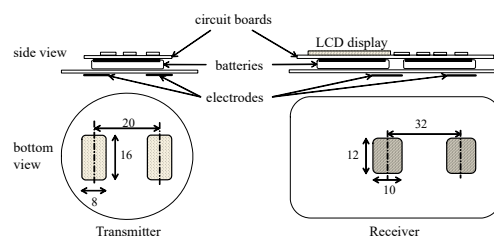


図 1. 伝送特性計測用の送信機と受信機

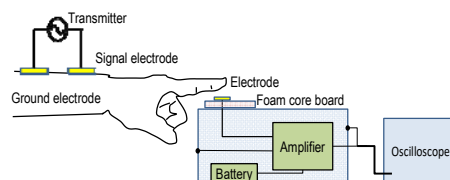


図 2. 据置型受信機を用いた測定方法

### (2)数値電磁界解析

数値電磁界解析は解析手法に FDTD 法を採用している解析ソフト (XFDTD, 米国 Remcom 社製) を用いて行った。電磁解析モデルには独立行政法人・情報通信研究機構 (NICT) より借用した詳細な数値人体モデル、および円柱や直方体で近似した均質な解析モデルを使用した。NICT の数値人体モデルは人体組織の電気的特性と分布を細かくモデル化したもので、実人体に近い解析結果が得られるが、人体の姿勢を変化させた解析が困難である。一方、単純形状の近似モデルは自分で形状を設定できるので形状や姿勢の自由度は高いが解析精度が劣る。解析目的に応じて適切なモデルを使用して解析を行った。組織の電気的特性には Cole-Cole 型分散媒質の電気的特性を適用した。

#### 4. 研究成果

##### (1)送信機の電極配置と伝送特性

送信機の電極配置として図 3.に示す電極を用意し、図 2.に示した測定方法により送信機電極の特性を評価した。

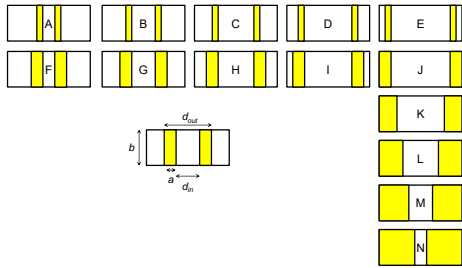


図 3. 送信機の電極配置

電極幅  $b$  は A から N まで全て 24mm で共通であり、長さ  $a$  は A から E までが 4mm, F から J までが 8mm, K から N は 12, 16, 20, 24mm である。電極間距離は A から E と F から J は内のが 8, 16, 24, 32, 40mm であり, K から N は外側の縁の距離を 56mm に固定し, 内りを変化させた。

伝送特性の測定結果を図 4.に示す。縦軸は送信機の電極間の消費電力に対する受信信号電力の大きさである。電極間距離が大きいほど、また電極面積が大きいほど信号は良く伝わる。ウェアラブル機器への電極の実装を考慮すると電極の外側の縁の距離は機器の大きさで制限され, J から N の間の K の配置で極大となり, K が設計解となる。最大値を与える電極長さは計算では求められないので, 実際の電極設計においては, 幅を実装可能な最大値に, 長手方向には外側の縁を最大値とし, 内りを調整して信号が最大となる寸法を決定することになる。

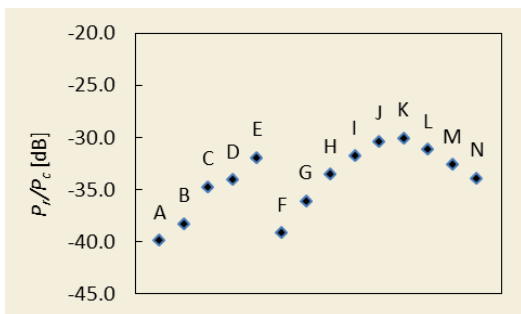


図 4. 送信機電極配置と伝送特性

##### (2)受信機側から見た伝送路のインピーダンス特性

送信機を装着したユーザが据置型受信機の電極に触れている状況 (図 2.参照) において, 受信機側の電極に触れている人体は受信機から見て信号源と見なせる。この信号源のインピーダンスを知ることができれば, 受信回路の入力部のインピーダンス整合により

受信信号電極を最大にすることができる。

人体通信は人体内部の電流と, 人体と機器との静電結合によって信号が伝送されるので, 受信機側から見た信号源の出力インピーダンスは図 5.に示すように静電結合に対応するリアクタンス成分と人体内部に対応するレジスタンス成分 (厳密にはインピーダンス成分) が直列に結合したものと考えられる。

この等価出力インピーダンスを計測するために受信電極と受信回路の間にインダクタを挿入し, 静電結合のキャパシタンス成分を相殺するインダクタンスを求め, さらに受信回路の入力抵抗を調整して受信信号電力が最大となる抵抗値を求めた。図 6.は 10MHz の搬送波において挿入したインダクタンスの値と受信信号電力の関係であり, 送信機電極の配置に依らず約 40 $\mu$ H のインダクタンスにおいて極大となった。図 7.は受信回路の入力抵抗と受信信号電力の関係であり, この場合も送信機電極の配置に依らず, 約 1500 $\Omega$  の抵抗値において受信信号電力が最大値となった。

周波数 10MHz における 40 $\mu$ H のインピーダンスは約  $j2500\Omega$  である。このことから据置型受信機を指先で触れた場合の静電結合の大きさは約 6.3pF と見積もられ, 受信機電極から見た伝送路の等価出力インピーダンスは  $1500-j2500\Omega$  と見なすことができる。このインピーダンスは通常の中用アンテナの特性インピーダンスより大きい。

人体通信の受信回路のフロントエンドは, この等価出力インピーダンスを考慮して信号を効率良く受信できるように設計すればよい。

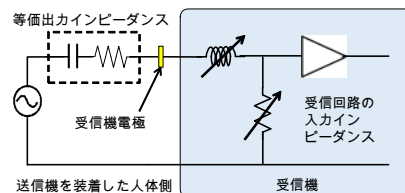


図 5. 人体上の送信機から据置型受信機への伝送モデル

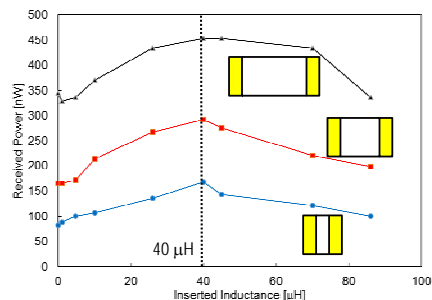


図 6. 受信機電極と受信回路の間に挿入したインダクタンスと受信信号電力

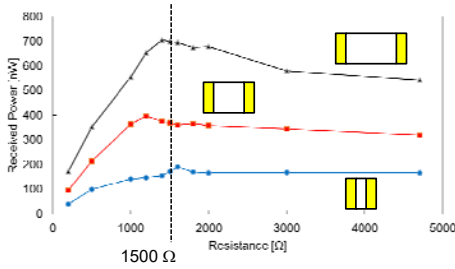


図 7. 受信機の入力抵抗と受信信号電力

(3) 人体通信における周囲環境の影響評価  
 ー特にグラウンドを介した結合の評価ー

人体通信の研究において提案されている伝送モデルの多くは人体や機器の間の静電結合とともに床や大地との静電結合を伝送経路としてモデル化している。しかし、その結合の信号伝送への寄与の大きさはほとんど検証されていない。

本研究では図 1. に示した電池駆動型の送信機と受信機を用いて人体通信におけるグラウンドを介した結合を評価した。図 8. に示すように 2 名の被験者の一方が送信機を、他方が受信機を手首に装着し、握手をして信号伝送を行う場合と、図 9. に示すように 1 名の被験者が送信機を装着して据置型の受信機の電極に触れる場合について、床の材質が異なる環境において受信信号の大きさを評価した。床はカーペット敷きのフリーアクセスフロア、コンクリート、板の間、および比較のため木製の椅子の上立つことにより床からの距離をおいた 4 つの床条件で行った。フリーアクセスフロアはスチール製のパネルの上に数 mm 厚のカーペットが敷かれた構造で、靴底や人体下部との静電結合が大きいと考えられる。据置型の受信機はアルミニウム製のスタンドの上に置き、受信回路のグラウンド端子をスタンドに接続した場合、木製のテーブルに置いた場合について計測した。握手の実験の場合、被験者は送信機と受信機を手首に装着し、握手する手を変えた全 4 種類の伝送経路の組み合わせについて計測した。据置型受信機に触れる場合は送信機を装着した側の指先で触れる場合と、その反対側の指先で触れる場合について計測した。

握手による伝送実験の結果を表 1. に、据置型受信機に触れる伝送実験の結果を表 2. に示す。表 1. の結果から分かるように、伝送経路による信号強度の違いはあるが、床材質による顕著な違いは見られない。据置型受信機に触れる場合は、送信機の装着場所が A の場合に受信機のグラウンドをスタンドに接続した場合と切り離れた場合では明確な違いがあるが、床材質による顕著な違いは見られなかった。これは、アルミニウム製スタンドと人体との結合は信号伝送に影響するが、床との結合は信号伝送に影響するほど大きくないことを意味している。送信機の装着場所が B の場合は違いが見られなかった。

据置型受信機に触れる場合の電界の電気力線の方向の電磁界解析結果を図 10. に示す。床はカーペット敷きのフリーアクセスフロアをモデル化した。図から分かるように信号伝送に寄与している電界は送信機と受信機の近傍の空間が強く、またスタンドから人体の脚部や胴体へ水平に電気力線が延びていることが分かる。これらのシミュレーションの結果は実験結果と整合する。

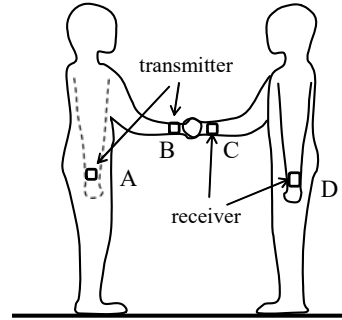


図 8. 握手による伝送実験

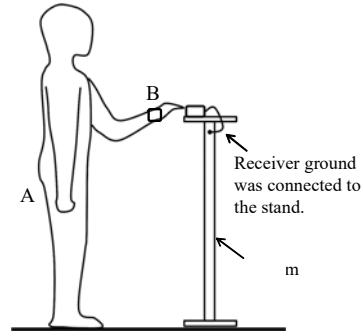


図 9. 据置型受信機に触れる伝送実験

表 1. 握手による伝送実験の結果

伝送経路	床の材質			
	フリーアクセスフロア	コンクリート	板の間	木製の椅子の上
B to C	3 mV -44 dB	3 mV -44 dB	3 mV -44 dB	3 mV -44 dB
B to D	0.17 mV -69 dB	0.11 mV -73 dB	0.10 mV -74 dB	0.13 mV -72 dB
A to C	0.11 mV -73 dB	0.12 mV -72 dB	0.12 mV -72 dB	0.14 mV -71 dB
A to D	0.04 mV -82 dB	0.04 mV -82 dB	0.04 mV -82 dB	0.05 mV -80 dB

表 2. 据置型受信機に触れる伝送実験の結果

送信機の装着場所	床の材質 (受信機はアルミ製スタンドの上)				受信機は木製のテーブルの上
	フリーアクセスフロア	コンクリート	板の間	木製の椅子の上	
A	0.55mV -59 dB	0.55mV -59 dB	0.55mV -59 dB	0.55mV -59 dB	0.11mV -73 dB
B	3 mV -44 dB	3 mV -44 dB	3 mV -44 dB	3 mV -44 dB	3 mV -44 dB

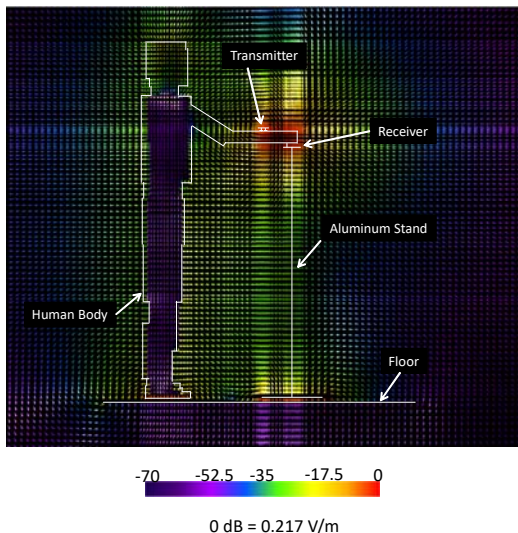


図 10. 据置型受信機に触れる信号伝送における電界の電気力線の方向

#### (4) 人体通信評価用ファントムの開発

人体通信の伝送特性や電極間インピーダンスの評価を実人体によって行うことは再現性や信頼性に問題を生ずる可能性があり、評価用電磁ファントムを使うことが望まれる。しかし、携帯電話等の開発で用いられるファントムの適用周波数は数百 MHz 以上であり、人体通信の帯域である短波帯とは人体の電気的特性が異なる。本研究では短波帯における人体の電気的特性を模擬するファントムの開発を行った。ファントムは均質な材質で製作されることが多いが、数値電磁界解析の結果、皮膚、脂肪、筋肉の3種類の組織を模擬した三層ファントムによって、均質なファントムより実人体の特性に近い特性が得られることを示し、図 11. に示す直方体状の三層ファントムを製作した。このファントムを用いることにより、電極間インピーダンスの評価が可能であることを示した。

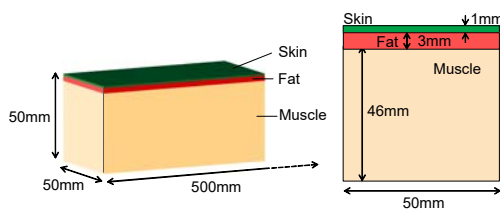


図 11. 皮膚・脂肪・筋肉の電気的特性を模擬した三層構造の人体通信評価用ファントム

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

1) Ken Sasaki, Dairoku Muramatsu, Naruto Arai, Fukuro Koshiji, “Evaluation of Ground Loop through the Floor in Human Body Communication”, Intl. J. of Wireless Information Networks, Vol.24 No.2, pp.78-90, 2017  
DOI 10.1007/s10776-017-0338-3

[学会発表] (計 9 件)

- 1) 荒井稔登, 西田欣史, 佐々木健, 村松大陸, 「人体上の送信機から据置型受信機への人体通信の等価回路モデル」, 2017 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2017 年 3 月 13-15 日, 慶応義塾大学日吉キャンパス (神奈川県横浜市)
- 2) 西田欣史, 荒井稔登, 佐々木健, 村松大陸, 「人体通信における送信機電極モデルと伝送特性」, 第 31 回エレクトロニクス実装学会春季講演大会, 2017 年 3 月 6-8 日, 慶応義塾大学日吉キャンパス (神奈川県横浜市)
- 3) Naruto Arai, Ken Sasaki, Dairoku Muramatsu, and Yoshifumi Nishida, “Variation of Impedance in Transmission Channel of Human Body Communication”, 11th Intl. Symp. on Medical Information and Communication Technology (ISMICT), Lisbon Portugal, Feb.6-8, 2017
- 4) Naruto Arai, Dairoku Muramatsu, and Ken Sasaki, “Transmission Model of Human Body Communication Incorporating Size and Distance between the Two Electrodes of a Transmitter”, 2016 Intl. Conf. on Electronics Packaging (ICEP), pp.461-464, Sapporo Japan. April 20-22, (2016)
- 5) Ken Sasaki, Dairoku Muramatsu, Naruto Arai, Fukuro Koshiji, “Evaluation of Ground Loop through the Floor in Human Body Communication”, 2015 9th International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT), Conf. Proc. pp.54-55, Boston USA, March 21-23, 2016
- 6) Naruto Arai, Dairoku Muramatsu, Ken Sasaki, “Equivalent Output Impedance of a Transmitter-Human-Body Communication Module”, The 4th IEEE Global Conference on Consumer Electronics (GCCE2015), pp.644-645, Osaka Intl. Convention Center, Osaka Japan, Oct.27-30, 2015
- 7) Naruto Arai, Dairoku Muramatsu, Ken Sasaki, “Maximization of Received Signal Power by Impedance Matching in Human Body Communication Receiver”,

Bodynets2015 - 10th EAI International Conference on Body Area Networks, Sydney, Australia, USB-4pages, Sept.28-30, 2015

8) Thang Nguyen Xuan, Dairoku Muramatsu, Ken Sasaki, "Measurement of Human Body Communication Transmission Characteristics at 20MHz", 2015 9th International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT), pp. 45-48, 2015年3月24日, 湘南国際村センター (神奈川県三浦郡葉山町)

9) 荒井稔登, 村松大陸, 佐々木健, 「ウェアラブル機器と据置型機器間の人体通信に関する研究」, 第29回エレクトロニクス実装学会春季講演大会講演論文集 pp.332-335, 2015年3月17日, 東京大学 (東京都文京区)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

佐々木 健 (SASAKI, Ken)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号 : 40178645