

# 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3月修了, 新領域創成科学研究科, 人間環境学専攻: 47-156692 荒井 稔登  
指導教員 佐々木 健 教授

In human body communication, electrodes are equivalent to antennas in other wireless communication. In order to design human body communication transmitter, it is necessary to know the relationship between received voltage and transmitter electrodes design. We make a model that shows received voltage increase and decrease by transmitter electrodes placement. It was shown that received voltage is directly proportional to the distance between two electrodes and area of electrode with power of 0.3. When a transmitter for human body communication is worn by a human user, this transmitter-human body system can be regarded as a signal source as viewed from a receiver that is in contact with the human body. We estimated the equivalent output impedance to design receiver circuit. The equivalent output reactance was affected by the transmitter electrodes distance and the equivalent output reactance is affected by the environment. The equivalent circuit model which includes the impedance affected by transmitter electrodes distance showed the effect of transmitter electrodes distance to the equivalent output resistance.

Key words: Human Body Communication, Impedance Matching, Transmission Model

## 1 はじめに

人体通信は人体を高周波信号の伝送路の一部として利用し, ウェアラブル機器間やウェアラブル機器と外部の据置型機器間で通信を行う無線通信技術の一つであり IEEE 802.15.6 規格で規定される<sup>1)</sup>.

人体通信は無線通信の一種に分類されるが, 一般の無線通信とは異なりアンテナを使わず, 代わりに電極を人体に接触, もしくは近接させることで生じる人体周囲の電界によって通信を行う, といった特徴があるため一般的な無線通信機器の設計指針を用いることはできない。

本研究の目的は人体通信機器の設計指針, 特にウェアラブル機器と据置型機器の間の人体通信についての機器設計指針を示すことである。まず, 送信機の電極配置によって受信電力が影響を受ける理由を説明するために, 電気双極子モデルを提案し, 実験的にモデルの正しさを示した。次に, インピーダンス整合によって伝送効率を最適化する受信機回路の設計指針を示すために, 送信機を身に着けた人体を信号源として考えた場合の等価的な出力インピーダンスを実験により求めた。また, 等価出力インピーダンスの実部が, 送信機電極間隔に依存する理由を送信機電極間隔に依存するインピーダンスを含んだ等価回路モデルにより解析的に示した。なお, 本研究で行われる実験は東京大学倫理審査委員会の承認を得て実施している。

## 2 電気双極子モデルによる受信電力と送信機電極配置の関係性の説明

### 2.1 送信機電極の電気双極子モデル化

手首に装着するウェアラブル送信機と, 人さし指で触れる据置型受信機間の人体通信において, 送信機電極間隔が広がると, 受信信号電圧が大きくなる<sup>2)</sup>。この理由を説明するため, 電気双極子モデルを提案する。図1に提案する電気双極子モデルを示す。電磁気の理論によって電気双極子から  $r$  離れた点 P における電位は式(1)のように表される。

$$\phi(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qd}{r^2} \quad (1)$$

ここで  $q$  は双極子の持つ電荷の大きさ,  $d$  は電荷間の距

離である。ここで送信機電極をこの電気双極子と見なし, 点 P は人体通信受信機と見なす。式(1)は真空中において成り立つ式であり, 実際の送信機電極は導電性誘電体であるため, モデルは実際の状況と異なる。

### 2.2 送信機と受信機

実験によって電気双極子モデルの検証を行う。図2に実験のセットアップを示す。被験者は送信機を左手首に装着し, 受信機電極を左手人さし指で触れる。送信機はバッテリー駆動で  $1.0 V_{pp}$ ,  $10 MHz$  の正弦波を二つの電極間に印加する。電極サイズ, 電極間隔の異なる 15 種類の送信機電極を用いて実験を行う。電極のサイズは,  $4 \times 12 mm$ ,  $4 \times 24 mm$ ,  $8 \times 24 mm$  の三種類, 電極の内縁間隔は  $8 mm$ ,  $16 mm$ ,  $24 mm$ ,  $32 mm$ ,  $40 mm$  の五種類である。受信信号は受信機電極から入力され,  $32 dB$  で増幅され,  $10 MHz$  のバンドパスフィルタを通したあとバッテリー駆動のオシロスコープで測定される。受信回路はアルミニウム製の筐体に収められ, 回路のグラウンドは筐体に接続される。受信機とオシロスコープは木製の実験台の上に設置される。受信機回路の入力インピーダンスは  $4.7 k\Omega$  に固定される。

### 2.3 モデルの実験による検証

モデルの検証を行うために 15 種類の送信機電極による受信電圧を測定した。受信機にインダクタは挿入せず, 入力抵抗は  $4.7 k\Omega$  で固定した。実験結果を図3に示す。受信電圧は送信機電極の中心間隔に比例することが確認された。式(1)によると, 受信電圧は電極間距離と, 電荷に比例する。そのため, 今回の結果から送信機電極に貯まる電荷は送信機電極の面積の 0.3 乗に比例する。

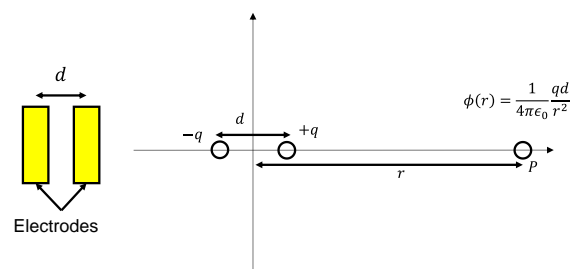


Fig.1 Electric dipole model

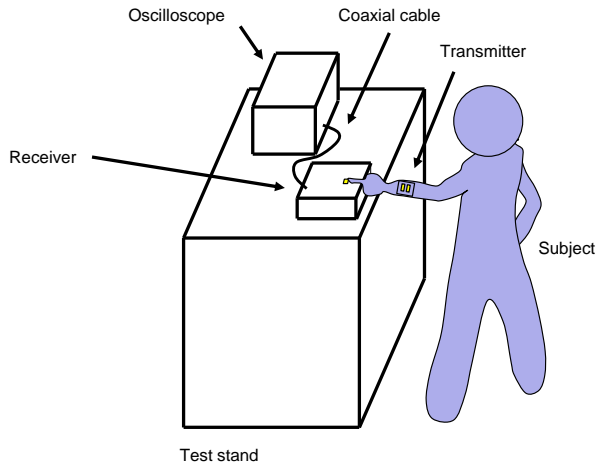


Fig.2 Experimental setup

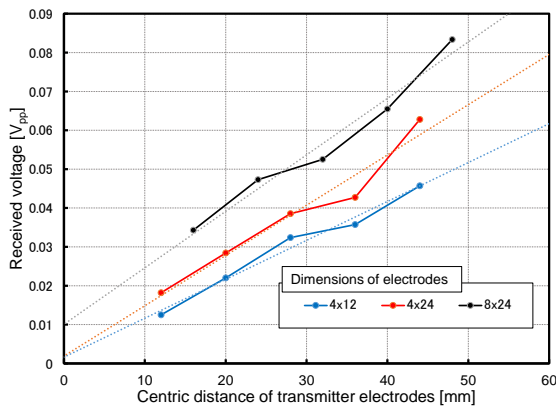


Fig.3 Relationship between received voltage and distance of transmitter electrodes

### 3 人体の等価的な出力インピーダンス

#### 3.1 人体通信の等価回路

送信機を装着した人体を送信機と見なす。図4に簡略化した人体通信の等価回路を示す<sup>3)</sup>。 $Z_r$ は受信機回路の入力インピーダンス、 $Z_h$ は人体を信号源として見なした場合の等価的な出力インピーダンスである。人体通信受信機の回路設計をするためには、この等価的な出力インピーダンス $Z_h$ を求める必要がある。人体は受信機電極に人さし指で物理的に接触しているが、受信機のグラウンドは人体との間に物理的な接触はなく、容量性結合で繋がっている。そのため等価的な出力インピーダンス $Z_h$ は容量性リアクタンスと抵抗成分の合成で表せると考えられる。

#### 3.2 送信機と受信機

本項で用いる送信機電極は、二つの電極間の間隔が異なる三種類の電極である。電極の大きさは48 x 24 mm、電極の中心間隔は16 mm、32 mm、48 mmの三種類である。受信機は前項で用いたものと同じものであるが、実験の過程で、入力抵抗を変化させ、入力部にインダクタの挿入が行われる。また、受信機と受信機に接続されるオシロスコープは木製、鉄製の実験台上に設置される。

#### 3.3 インダクタの挿入による等価出力リアクタンスの測定

まず、等価出力インピーダンス $Z_h$ のリアクタンス成分

を見積もるために、受信機の入力にインダクタの挿入を行う。0 $\mu$ Hから86 $\mu$ Hまでの9つの大きさのインダクタの挿入を行い、それぞれの受信電力を測定した。最も受信電力が大きくなる時、等価的な出力インピーダンス $Z_h$ のリアクタンス成分がキャンセルされたと考えることができる。なお、受信機の入力抵抗は4000 $\Omega$ で固定した。図5に実験結果を示す。グラフの横軸は挿入したインダクタの値、グラフの縦軸は受信電力の大きさである。二次の近似曲線によって得られた、受信電力が最大となる時のインダクタの大きさは、木製の実験台を使った場合では送信機電極間隔が16 mmのとき43.2 $\mu$ H、送信機電極間隔が32 mmのとき44.7 $\mu$ H、送信機電極間隔が48 mmのとき42.8 $\mu$ H、鉄製の実験台では送信機電極間隔が16 mmのとき39.0 $\mu$ H、送信機電極間隔が32 mmのとき42.7 $\mu$ H、送信機電極間隔が48 mmのとき36.6 $\mu$ Hである。これらの結果から、木製の実験台を用いた場合は、およそ44 $\mu$ Hのインダクタの挿入によって、鉄製の実験台を用いた場合は、およそ40 $\mu$ Hのインダクタの挿入によって受信電力を最大化でき、また等価出力インピーダンス虚部に送信機電極間隔は影響しないことがわかった。これは10 MHzにおいてそれぞれ+j2700 $\Omega$ と+j2500 $\Omega$ に相当する。よって、等価的な出力インピーダンスの虚数成分は木製の実験台の場合、-j2700 $\Omega$  (5.8 pF)、鉄製の実験台の場合-j2500 $\Omega$  (6.3 pF)に相当する。また、鉄製の実験台を用いる場合は、木製の実験台を用いる場合よりも受信電力が大きくなる。これは鉄製の実験台を用いた場合のほうが、人体と受信機間の結合が大きくなったことが原因と考えられる。

#### 3.4 受信機入力抵抗の変更による等価出力レジスタンスの測定

等価的な出力インピーダンスの虚部がインダクタの挿入により整合している状態で、受信機の入力抵抗の大きさを変更すると、受信電力が変化する。受信電力が最大となる時、等価的な出力インピーダンスの実部と、受信機の入力抵抗はインピーダンス整合の状態にあるので、受信機の入力抵抗を変化させることで、等価的な出力インピーダンスの実部を求めることができる。前項の結果より等価的な出力インピーダンスの虚部は、木製の実験台では44 $\mu$ H、鉄製の実験台では40 $\mu$ Hのインダクタの挿入によって整合できるので、これらの値に近い47 $\mu$ Hのインダクタを受信機回路の入力部に挿入して、測定を行う。今回は、500 $\Omega$ から6000 $\Omega$ までの抵抗を500 $\Omega$ ずつ変更させて受信電力を測定した。図に測定結果を示す。グラフの横軸は、受信機の入力抵抗の値、グラフの縦軸は受信電力である。受信電力を最大とする入力抵抗の大きさは、木製の実験台を用いた場合では送信機電極間隔が16 mmのとき5000 $\Omega$ 、送信機電極間隔が32 mmのとき4500 $\Omega$ 、送信機電極間隔が48 mmのとき3500 $\Omega$ 、鉄製の実験台を用いた場合では送信機電極間隔が16 mmのとき5500 $\Omega$ 、送信機電極間隔が32 mmのとき4000 $\Omega$ 、送信機電極間隔が48 mmのとき2500 $\Omega$ である。この結果から、受信機を設置する実験台の材質は等価出力インピーダンスの実部に影響を与えず、送信機電極間隔が等価出力インピーダンスの実部に影響を与えるということがわかった。

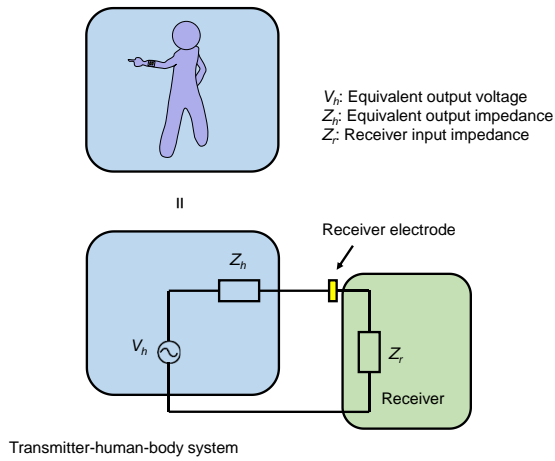


Fig.4 Equivalent circuit viewed from receiver

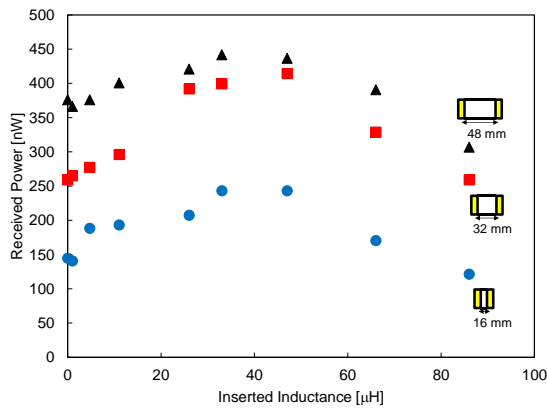
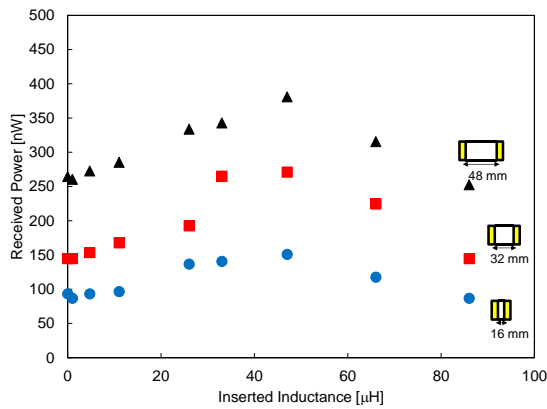


Fig.5 Relationship between inserted inductance and received power (upper graph: using wooden test stand lower graph: using steel test stand)

### 3.5 送信機電極間隔と等価出力インピーダンスの関係

前項において、送信機電極の電極間隔が変化すると、等価出力インピーダンスの実部が変化し、等価出力インピーダンスの虚部は変化しないということが示された。この理由を示すために、送信機の電極間隔に依存するインピーダンスを含む等価回路モデルを示すことで説明する。図7に今回提案する人体通信の等価回路モデルを示す。 $v$ は送信機の出力電圧、 $Z_1$ は送信機電極から通信に寄与する電界形成を行っている人体部分までのインピーダンス、 $Z_2$ と

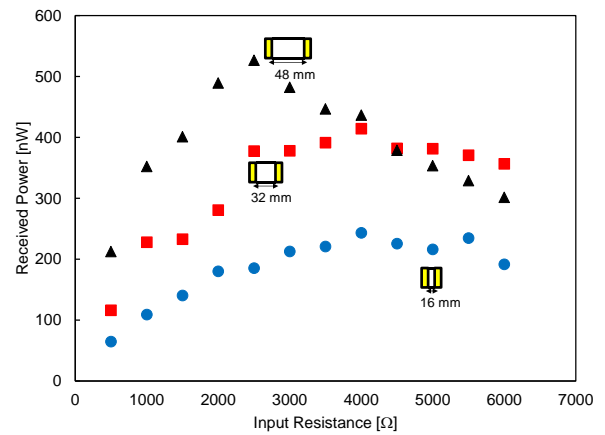
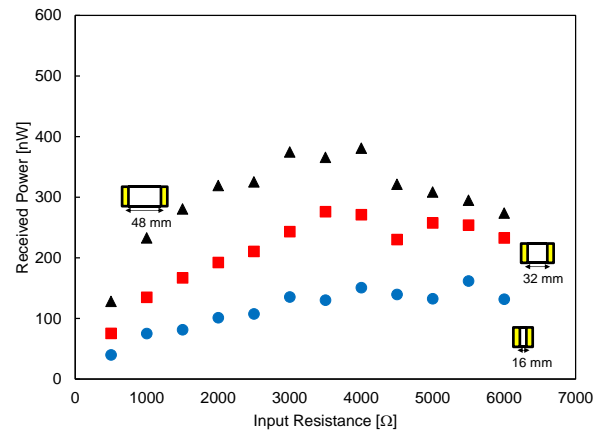


Fig.6 Relationship between input resistance and received power (upper graph: using wooden test stand lower graph: using steel test stand)

$Z_3$ は人体内部の抵抗成分と、人体と送受信機間の容量結合成分によるインピーダンス、 $Z_1$ は受信機の入力インピーダンスである。図8にこの等価回路モデルを変形したものを示す。 $v^*$ は式(2)に示すように、送信機の出力電圧に $Z_2/(Z_1+Z_2)$ を乗じたものである。

$$v^* = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} v \quad (2)$$

これによって、 $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $Z_3$ の組み合わせとして、送信機を装着した人体そのものを信号源として見なした場合の等価出力インピーダンスを示した。送信機電極間隔が広がると、等価的な出力インピーダンスの虚数成分の絶対値は小さくなり、送信機電極の電極間隔が短くなると等価出力インピーダンスの虚数成分の絶対値が大きくなる。この現象をモデルで示すために、 $Z_1$ を段状に表現する。図9に送信機の電極間隔が電界形成に与える影響を示す。送信機電極の間隔が広い場合、通信に寄与する電界は電極から近い部分から形成され、送信機電極の間隔が狭い場合、送信機電極から近い部分だけでなく送信機電極から離れた部分からも電界が形成されると考えられる。そのため、 $Z_1$ は送信機電極間隔が狭い場合、段数の少ないRC回路として示すことが出来る。また、送信機電極間隔が広い場合は段数の多いRC回路として示すことが出来る。

図9で示したように、送信機電極から通信に寄与する電界形成を行っている人体部分までのインピーダンス  $Z_1$

は抵抗成分と容量成分による並列回路となる。図 10 のように等価回路モデルにおける値を定めた。 $Z_1$  について送信機電極間隔が短い場合について図に示したが、間隔が中くらいの場合は  $2\text{ pF}$  と  $1\text{ pF}$  の二段、送信機電極間隔が短い場合は  $1\text{ pF}$  のみの一段とした。なお、送信機出力電圧  $v$  は  $1\text{ V}_{\text{p-p}}$ 、受信機の入力インピーダンス  $Z_4$  は  $4000\ \Omega$  とした。

表 1 に解析によって求めた、等価回路モデルにおける受信電圧と、等価的な出力インピーダンスの値を示す。送信機電極間隔が広がると、受信電圧が大きくなっている。また、送信機を装着した人体を信号源として考えた場合の等価的な出力インピーダンスの実部が小さくなり、虚部は大きく変化しない。この結果は、実験によって示された送信機電極と受信電圧の関係、送信機電極と等価的な出力インピーダンスの関係と一致する。この事から今回作成した人体通信のモデルは人体通信の実際の様子を適切に示していると考えられる。

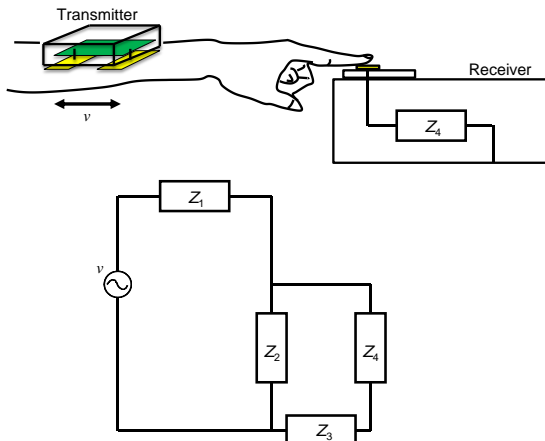


Fig.7 Equivalent circuit model of human body communication

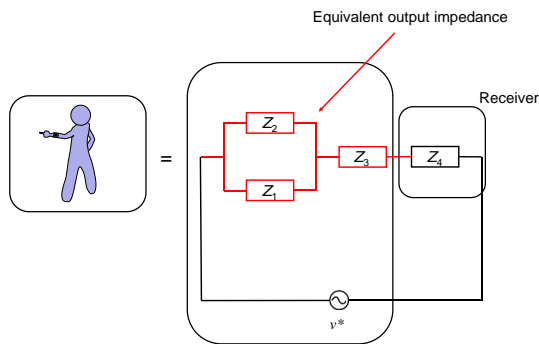


Fig.8 Equivalent output impedance of human body

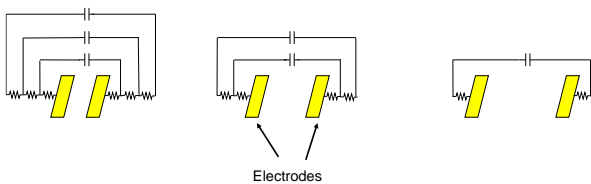


Fig.9 Relationship between electrodes distance and impedance

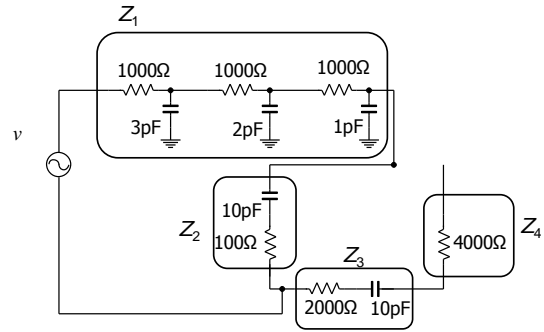


Fig. 10 Values of impedance of human body

Table 1 received voltage and equivalent output impedance

Distance between Two Electrodes	Received Voltage	Equivalent output impedance
short	240 mV <sub>p-p</sub>	2090-j2090 $\Omega$
middle	300 mV <sub>p-p</sub>	1250-j2160 $\Omega$
long	450 mV <sub>p-p</sub>	640-j1750 $\Omega$

#### 4 まとめと今後の予定

送信機電極形状と受信電圧の関係を電気双極子モデルによって示した。また、人体通信受信機的设计指針を示すために必要となる人体を信号源と考えた場合の等価的な出力インピーダンスを求めた。等価的な出力インピーダンスが大きな容量性リアクタンスを持つことが示されたが、これは人体と受信機が容量性結合で電氣的に繋がっていることが理由として考えられる。

また、等価的な出力インピーダンスの実部が送信機電極間隔に影響を受けるという結果を、送信機電極間隔に依存するインピーダンスを含む等価回路モデルによって説明した。本研究で得られた知見モデルは、人体通信の仕組みを示し、人体通信機器の設計に役立つものである。

#### 文献

- 1) IEEE standard for local and metropolitan area networks part 15.6: wireless body area networks, IEEE Computer Society, Feb. 2012.
- 2) N. Arai, D. Muramatsu, K. Sasaki, "Transmission Model of Human Body Communication Incorporating Size and Distance between the Two Electrodes of a Transmitter", International Conference on Electronics Packaging 2016, pp.461-464, Sapporo, Japan, April 2016.
- 3) N. Arai, D. Muramatsu, K. Sasaki, "Maximization of Received Signal Power by Impedance Matching in Human Body Communication Receiver", 10th EAI International Conference on Body Area Networks, Sydney, Australia, Sep. 2015.