

人体通信における馬蹄形電極の入カインピーダンス特性

Input Impedance Characteristics of Horseshoe-Shaped Electrode for Intra-Body Communication

○藤澤貴明(国士舘大) 越地福朗(国士舘大) 越地耕二(東京理科大)

Takaaki FUJISAWA, Kokushikan University
Fukuro KOSHIJI, Kokushikan University
Kohji KOSHIJI, Tokyo University of Science

Abstract: Intra-body communication draws a lot of attention as a promising wireless technology in order to materialize wireless body area network. In this study, impedance characteristics of horse-shoe electrode structure, which is proposed in the previous our research works, of wearable transmitter for intra-body communication were analyzed by finite difference time domain (FDTD) method. This analysis has shown that the input impedance between the two electrodes varied proportionally to the distance between the electrodes and inverse proportionally to the lengths of the electrodes. Furthermore, it is found that the 50 ohm-impedance matched electrode was obtained when the electrode cutting angle, the distance between electrodes, electrode length, circuit board length, width, and distance between electrodes and circuit board are 180°, 40 mm, 30 mm, 80 mm, 30 mm, 10mm, respectively.

Key Words: Intra-body communication, Body area network, Wearable, Electromagnetic field analysis, FDTD method

1. はじめに

近年、ボディアエリアネットワークとよばれる人体周辺通信技術に注目が集まっており、有力な通信方式のひとつに、通信用の電極を人体に接触させ、人体自体を電気信号の伝送媒体として利用する、人体通信がある⁽¹⁾。

人体通信における電極は、一般的なワイヤレス通信システムにおけるアンテナに相当し、システムの性能を決める重要なデバイスである。そのため、良好な伝送特性および伝送効率を実現するためには、電極と人体を含む空間とのインピーダンス整合が重要な課題となる。しかしながら、これまで検討されている平板状電極では、生体組織を詳細に再現した人体モデルを用いた場合に、50Ω整合が難しいことが報告されている⁽²⁾。

これに対し、我々は、電極を腕部に固定するアームバンドに内蔵する構造とする馬蹄形電極を提案し、従来の平板状の電極構造に比べて、50Ω整合しやすいインピーダンス特性となることを報告している⁽³⁾。

しかしながら、電極の各寸法変化にともない電極入力インピーダンスがどのように変化するかは明らかにされておらず、電極設計のことを考えると、電極の各寸法変化にともなう電極入力インピーダンス変動がどの程度あるかを明らかにしておく必要がある。本稿では、馬蹄形の電極構造における電極の各寸法に対する電極入力インピーダンス特性について検討を行う。

2. 電磁界解析モデル

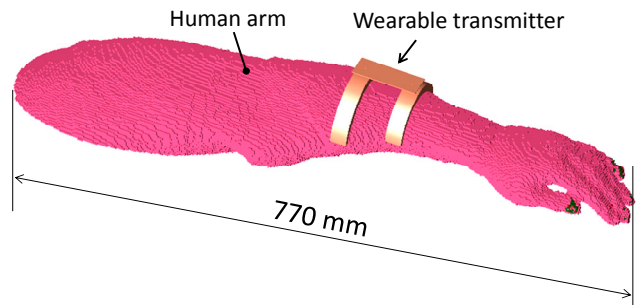
図1に、本稿で検討する電磁界解析モデルを示す。同図(a)は、ウェアラブル送信機を装着した腕部全体モデル、(b)は、ウェアラブル送信機の構造を示している。

本稿で使用する電磁界解析モデルは、U.S. National Library of Medicine (NLM)より提供された西洋人男性の平均的な体型を有する全身モデル⁽⁴⁾を姿勢変形ソフトウェア(VariPose, Remcom, Inc.)により姿勢変形し、腕部のみを切り出し、同図(c)に示すウェアラブル送信機を装着したモデルである。NLM腕部モデルは、2mm角のボクセルで構成され、皮膚、脂肪、筋肉、血液、血を含む体液、血管、リンパ液、爪、靭帯、脊髄神経、骨髄、皮質骨、海綿骨の14つの生体組織で構成されている。

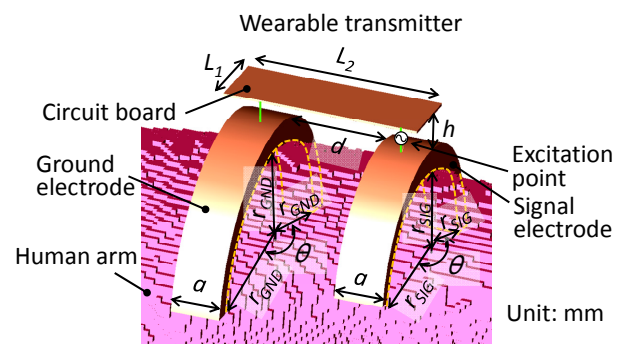
図(b)に示すように、ウェアラブル送信機は、回路基板と信号電極、グラウンド電極で構成される。本稿ではモデルの単純化のため、回路基板、信号電極、グラウンド電極ともに、導体板としてモデル化している。

電極各部の寸法は、信号電極の半径 r_{SIG} 、グラウンド電極の半径 r_{GND} 、馬蹄形電極の切り込み角度 θ 、電極間隔 d 、電極長 a 、回路基板と電極との間隔 h 、回路基板長 L_1 、回路基板幅 L_2 とする。

本稿では、人体通信用の周波数帯として、



(a) NLM arm model with transmitter



(b) Wearable transmitter on forearm

Fig. 1 Models for electromagnetic field analysis

Industry-Science-Medical (ISM) バンドのひとつである 13.56 MHz を用いることを想定しているため、10 MHz の励振源を用いて検討を行う。また、各生体組織の導電率や誘電率などの電気特性も 10 MHz の値を用いている^(5,6)。

3. 入力インピーダンス特性

人体通信用電極の設計において、電極の各寸法に対する電極入力インピーダンス特性を把握しておくことは重要である。ここでは、馬蹄形電極における電極の各寸法に対する電極入力インピーダンス特性について検討を行う。

電極の基本寸法を、電極各部の寸法は、信号電極の半径 $r_{SIG} = 48$ mm, グラウンド電極の半径 $r_{GND} = 60$ mm, 馬蹄形電極の切り込み角度 $\theta = 180^\circ$, 電極間隔 $d = 40$ mm, 電極長 a , 回路基板と電極との間隔 $h = 10$ mm, 回路基板長 $L_1 = 80$ mm, 回路基板幅 $L_2 = 30$ mm とする。ただし、電極間隔 d の変化にともない、信号電極とグラウンド電極の装着箇所が変動し、装着箇所の手腕部半径が変わる。そのため、各装着箇所において信号電極とグラウンドの半径 r_{SIG}, r_{GND} は若干変化する。

図 2 は、ウェアラブル送信機の電極の切り込み角度 θ に対する電極の入力インピーダンス特性の解析結果を示したものである。図 2 より、入力インピーダンスの抵抗成分およびリアクタンス成分の絶対値は、電極の切り込み角度 θ

の増加に対し、大きくなっていることがわかる。これは、電極の切り込み角度 θ が大きくなると、人体と接触する電極面積が小さくなり、人体へ流入する電流が減少して、インピーダンスが大きくなるためである。

図 3 に、ウェアラブル送信機の信号電極とグラウンド電極の電極間隔 d に対する電極の入力インピーダンス特性の解析結果を示す。図 3 より、電極間隔 d の増加に対し、入力インピーダンスの抵抗成分はほぼ線形に増加し、リアクタンス成分はほぼ線形に減少することがわかる。抵抗成分の増加は、電極間隔 d の増加に伴い、人体に接触している電極間の距離が増加するためである。

図 4 は、ウェアラブル送信機の電極長 a に対する電極の入力インピーダンス特性の解析結果を示したものである。電極間隔 d は固定している。図 4 より、入力インピーダンスの抵抗成分およびリアクタンス成分の絶対値は、電極長 a の増加に対し、ほぼ反比例して小さくなっていくことがわかる。これは、電極長 a が大きくなるとともに、人体と接触する電極面積が大きくなり、人体へ流入する電流が増加して、インピーダンスが小さくなるためである。

図 5 は、ウェアラブル送信機の回路基板と電極との間隔 h に対する電極の入力インピーダンス特性の解析結果を示したものである。図 5 からわかるとおり、ウェアラブル送信機の回路基板と電極との間隔 h の変化に対して、入力イ

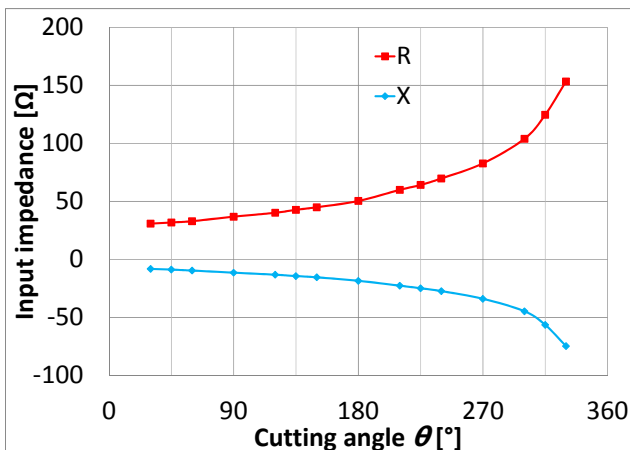


Fig. 2 Input impedance characteristics of transmitter electrodes as a function of cutting angle

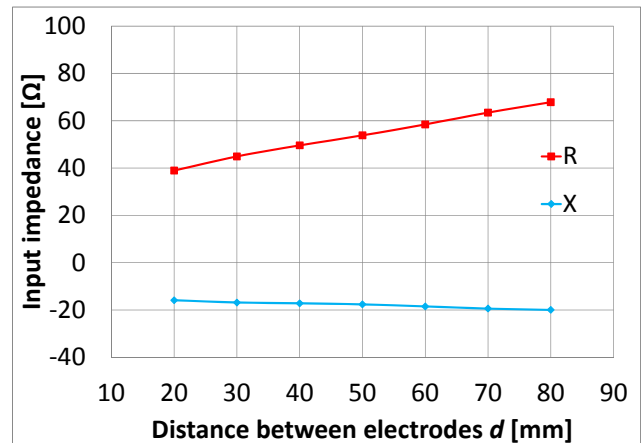


Fig. 3 Input impedance characteristics of transmitter electrodes as a function of distance between electrodes

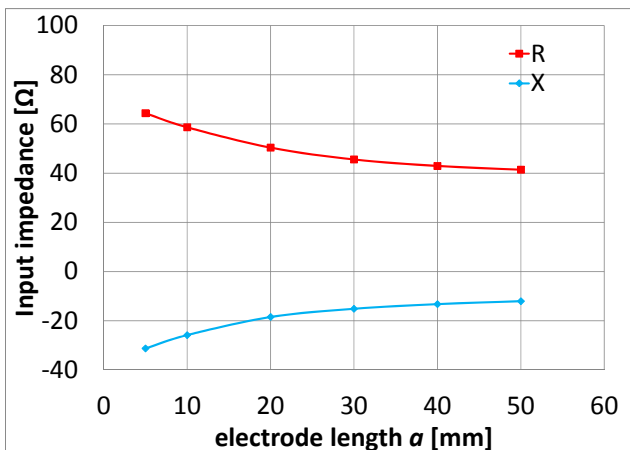


Fig. 4 Input impedance characteristics of transmitter electrodes as a function of electrode length

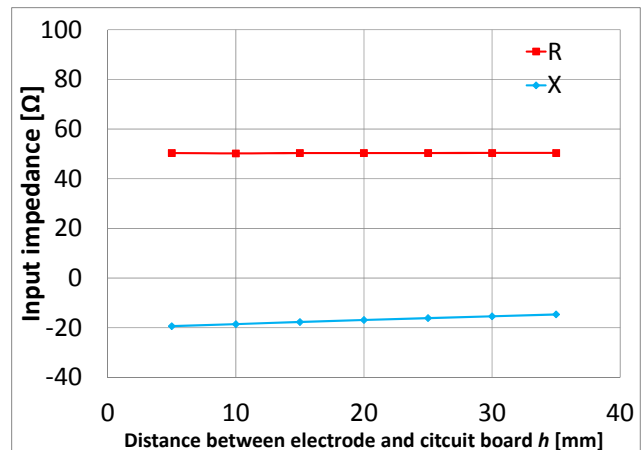


Fig. 5 Input impedance characteristics of transmitter electrodes as a function of electrode length

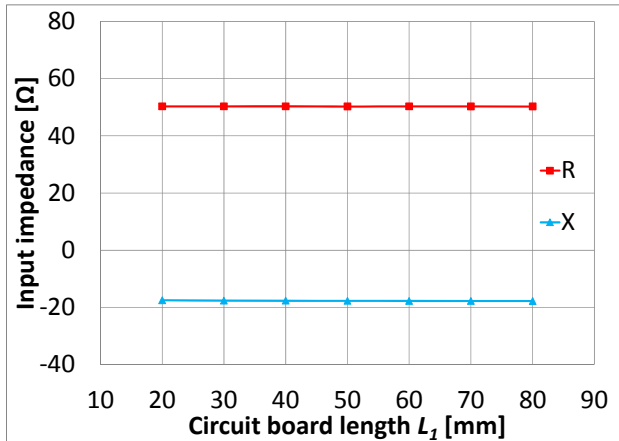


Fig. 6 Input impedance characteristics of transmitter electrodes as a function of Circuit board length

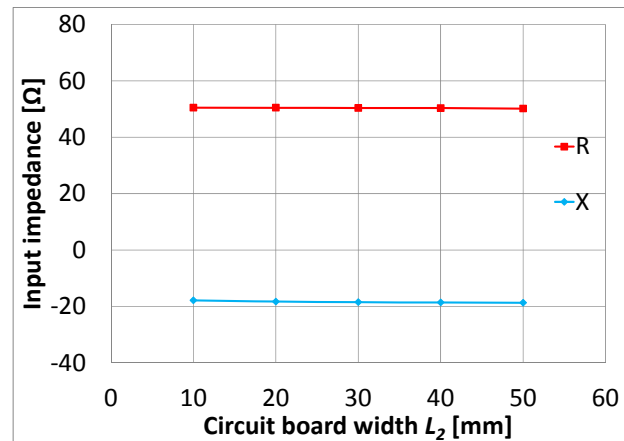


Fig. 7 Input impedance characteristics of transmitter electrodes as a function of Circuit board width

インピーダンスの抵抗成分はほぼ一定であるが、リアクタンス成分の絶対値は回路基板と電極との間隔 h が大きくなるにつれて小さくなることがわかる。これは、 h の増加に伴い、回路基板と電極との間を接続するワイヤのインダクタンスが増加するためである。

図 6 および 7 は、ウェアラブル送信機の回路基板長 L_1 および回路基板幅 L_2 に対する電極の入力インピーダンス特性の解析結果を示したものである。電極長 a 、電極幅 b 、電極間隔 d 、回路基板と電極との間隔 h は固定している。図 6 および 7 からわかるとおり、ウェアラブル送信機の回路基板長 L_1 および回路基板幅 L_2 の変化に対して、電極の入力インピーダンス特性はほとんど変化しないことがわかる。これは、回路基板と腕部表面の間の分布容量やインダクタンスが微小であり、無視できる大きさであることを意味している。したがって、人体に接触している電極の寸法のみでほぼ決まることがわかる。

以上の結果から、電極各部の寸法が、信号電極の半径 $r_{SIG} = 48$ mm、グラウンド電極の半径 $r_{GND} = 60$ mm、馬蹄形電極の切り込み角度 $\theta = 180^\circ$ 、電極間隔 $d = 40$ mm、電極長 a 、回路基板と電極との間隔 $h = 10$ mm、回路基板長 $L_1 = 80$ mm、回路基板幅 $L_2 = 30$ mm としたときに、電極の入力インピーダンスは、 $Z_{in} = 50.3 - j17.6 \Omega$ となり、50Ω 整合しやすい電極構造が得られることがわかった。

4. まとめ

本稿では、従来の平板状の電極構造に比べて、50Ω 整合しやすいインピーダンス特性を有する馬蹄形電極について、電極の各寸法変化に対する電極入力インピーダンスの検討を行った。

送信機の電極入力インピーダンスは、電極の切り込み幅の増加にともない増加することがわかった。また、電極間隔に比例し、電極長に反比例し、回路基板幅や回路基板長の影響をほとんど受けないことを明らかにした。また、回路基板と電極との間隔は、リアクタンス成分のみに影響を及ぼし、その変化はほぼ比例であることがわかった。

また、電極各部の寸法が、信号電極の半径 $r_{SIG} = 48$ mm、グラウンド電極の半径 $r_{GND} = 60$ mm、馬蹄形電極の切り込み角度 $\theta = 180^\circ$ 、電極間隔 $d = 40$ mm、電極長 a 、回路基

板と電極との間隔 $h = 10$ mm、回路基板長 $L_1 = 80$ mm、回路基板幅 $L_2 = 30$ mm としたときに、50 Ω 整合しやすい電極構造が得られることがわかった。

これにより、電極入力インピーダンス特性が明らかとなり、インピーダンス整合を考慮した人体通信用電極の設計において、有用な知見となる。

参考文献

- (1) Ken SASAKI, Fukuro KOSHIJI, Shudo TAKENAKA, "Intrabody Communication Using Contact Electrodes in Low-Frequency Bands", CRC Press, Taylor and Francis, "Healthcare Sensor Networks - Challenges toward Practical Application", ISBN-13: 978-1439821817, Chapter 3, pp.51-73, September 2011.
- (2) Fukuro KOSHIJI, Takaaki FUJISAWA, Dairoku MURAMATSU, Ken SASAKI, Kohji KOSHIJI, "Input Impedance Characteristics of Wearable Transmitter Electrodes in Dry/Wet Skin Conditions for Human Body Communication", IEEE-EMBS Micro- and Nanoengineering in Medicine Conference (MNMIC 2012), December 2012.
- (3) Takaaki FUJISAWA, Fukuro KOSHIJI, Kohji KOSHIJI, "Proposal of New Electrode Structure for Intra-Body Communication", International Conference on Electronics Packaging 2013 (ICEP 2013), pp.877-880, Osaka, Japan, April 2013.
- (4) M.J. Ackerman, "The Visible Human Project", Proceedings of the IEEE, Vol.86 No.3, pp.504-511, Mar 1998.
- (5) S. Gabriel, et al., "The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz", Phys. Med. Biol. 41, pp.2251-2269, 1996.
- (6) International Federation of Automatic Control (IFAC) website (<http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/>).