

# 非接地型ウェアラブル機器間の伝送特性の測定方法に関する研究

M2012MM044 高橋知秀

指導教員：奥村康行

## 1 はじめに

近年、人体を伝送路として見立て、情報のやりとりを行う人体通信が注目されており、同時に通信デバイスを身に付けるウェアラブルコンピューティングの研究も盛んに行われている [1]-[3]。人体通信とは、「さわる」や「ふれる」といった人間が当たり前に行う動作を通信システムに組み込む通信方式であり、通信デバイスとしてウェアラブル機器が用いられることがある。この通信デバイスを設計する際、必要となる値が透過係数  $S_{21}$  (伝送特性) であり、透過係数は送信機から送られた信号と人体に透過して受信機に届く信号の比率で求められる。

先行研究 [2] では、実際に人体通信で使用することを想定した電池内蔵型の測定器を搭載したウェアラブル受信機とウェアラブル送信機を用い、測定を行っている。そして、この測定結果と同条件でのシミュレーション結果を比較し、両結果が近似することが確認された。よって、ウェアラブル機器による測定方法は正しいと考えられる。

しかし、先行研究 [2] は求めている値が透過係数ではなく受信電圧レベルであり、先行研究 [3] は異なる物理量である受信電圧レベルと透過係数を比較していることが確認された。また、電池内蔵型小型通信機 (ウェアラブル機器) を用いた測定は透過係数を求める際、正確性やダイナミックレンジ等の確保などで測定が困難になることがあるため、一般に普及しているネットワークアナライザを用いた測定方法について考察する。

そこで、本研究ではウェアラブル機器の電極構造を模した同軸型デバイスであるモックアップ機器とネットワークアナライザを用いた測定構成において、透過係数にのみ着目し、シミュレーションと実験を行い、両結果を比較検証し、ウェアラブル機器間の伝送特性の測定方法について考察する。

## 2 先行研究と本研究の比較

本節は先行研究と本研究の違いについて述べ、それらをまとめた表を表 1 に示す。受信電圧レベル  $V$  は式 (1)、透過係数  $S_{21}$  は式 (2) にそれぞれ表す [4]。ここで、 $V_1^+$  は port1 からの入力電圧、 $V_2^+$  は port2 からの入力電圧、 $V_2^-$  は port2 からの反射電圧をそれぞれ表す。式 (1)、(2) から、透過係数は port2 を整合終端したときという条件があり、それぞれが異なる物理量であることがわかる。本研究では、透過係数  $S_{21}$  についてのみ着目する。

$$V = \frac{V_2^-}{V_1^+} \quad (1)$$

$$S_{21} = \left. \frac{V_2^-}{V_1^+} \right|_{V_2^+ = 0} \quad (2)$$

表 1 先行研究と本研究の比較

	シミュレーション	実験	
		ウェアラブル	モックアップ ネットワークアナライザ
$V$	[2], [3]	[2], [3]	/
$S_{21}$	本研究	/	[3], 本研究

## 3 課題と解決策

本節はネットワークアナライザを用いた測定の課題とその解決策について述べる。

### 3.1 $S_{21}$ の測定でネットワークアナライザを用いる課題

図 1 はネットワークアナライザを用いた測定構成を表し、測定器をネットワークアナライザ、送信機および受信機をモックアップ機器、人体モデルを生体等価ファントム、とそれぞれ採用している。ネットワークアナライザとモックアップ機器を接続させるために同軸ケーブルを用いるが、不平衡フィーダである同軸ケーブルを介して接続させると雑音である同相電流が発生するため、測定が困難になる課題が挙げられる。実線の矢印で表された差動電流は負荷であるモックアップ送信機及び受信機を駆動する正規の電流であり、破線の矢印で表された同相電流は同軸ケーブルやモックアップ送信機及び受信機の動作に害を及ぼす電流である。この同相電流を低減することが課題である [3]。

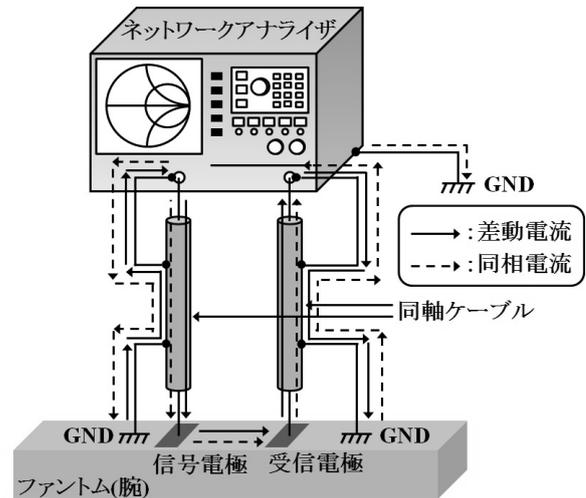


図 1 ネットワークアナライザを用いた測定

### 3.2 課題の解決策

測定構成にネットワークアナライザを組み込むためには同相電流を低減し、差動電流のみが流れる状態にしなければならない。そこで、図 2 の測定構成のネットワー

クアナライザとモックアップ送信機及び受信機を直接同軸ケーブルで繋げずに、中間にバランを介させることを提案する。バランの役割としては同相電流を低減し、アンテナやフィーダの動作を所定のものにする事が挙げられる。バランについては6節に役割と妥当性確認を示す[3].

#### 4 測定構成とパラメータ

図2のようにバランを組み込んだ測定構成で生体等価ファントムの上面に設置したモックアップ送信機及び受信機には、表2のようにGND電極の有無の組み合わせがあり、4通りそれぞれについて測定を行う。また、表3に測定のパラメータを示す。

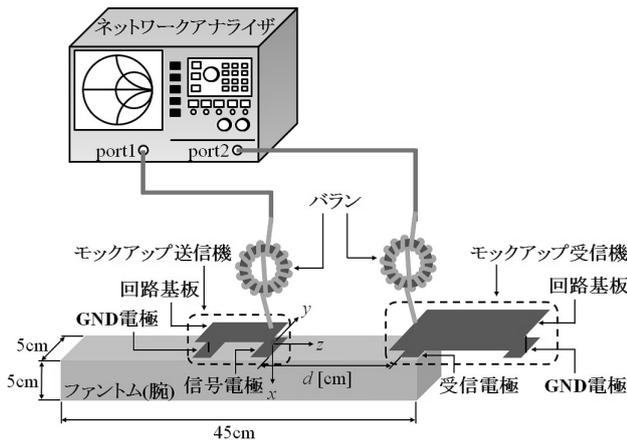


図2 測定構成 (GND電極の組み合わせ (a) の場合)

表2 送信機及び受信機のGND電極の有無の組み合わせ

	受信機 GND電極 有	受信機 GND電極 無
送信機 GND電極 有	(a)	(b)
送信機 GND電極 無	(c)	(d)

表3 測定のパラメータ

送信機	モックアップ送信機
受信機	モックアップ受信機
周波数 [MHz]	10
供給電圧 [V <sub>p-p</sub> ]	3.0
測定ステップ [cm] (送信機・受信機間の距離 d)	1~20(1 step)
測定の繰り返し回数 [回]	5

#### 5 シミュレーション

本研究では、FDTD法を採用し、シミュレーションソフトXFDTD ver.7[5]を使用し、解析を行う。先行研究[2]でモックアップ送信機及び受信機の電極構造はモデル化されているため、それらを採用する。シミュレーションの解析モデルを図3、パラメータを表4に示す。また、解析においても表2の電極の組み合わせ(a)~(d)までの4通りについてそれぞれ行う。

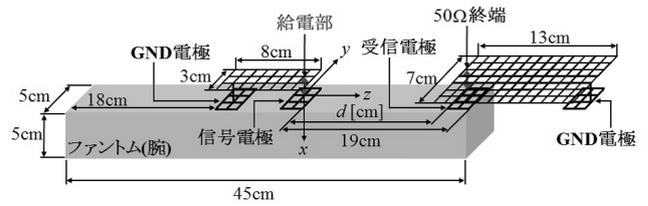


図3 解析モデル [2]

表4 シミュレーションのパラメータ

送信機	モックアップ送信機
受信機	モックアップ受信機
周波数 [MHz]	10
供給電圧 [V <sub>p-p</sub> ]	3.0
波形	正弦波
セルサイズ [cm]	$\Delta x = \Delta y = \Delta z = 1$
タイムステップ数	15600
吸収境界条件	PML 7 layers
送信機・受信機間の距離 [cm]	1~20(1 step)

#### 6 実験機器

本節は実験で使用する機器について述べる。

##### 6.1 モックアップ機器

本研究では、先行研究[2]で使用されたウェアラブル機器と同様の電極構造である同軸型デバイスをモックアップ機器と呼ぶ。図4(a)にモックアップ送信機、(b)にモックアップ受信機を示す。

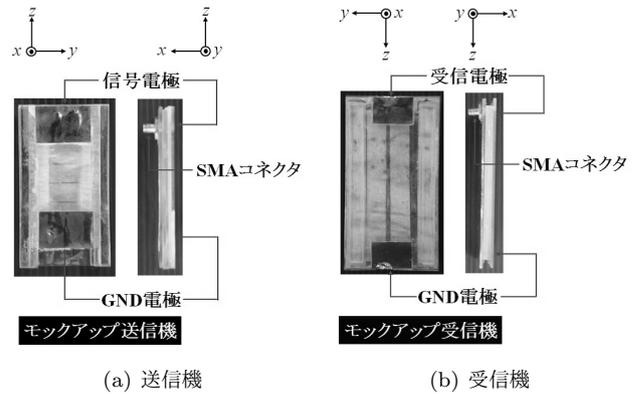


図4 モックアップ機器

##### 6.2 生体等価ファントム

生体と電磁波の作用を検討するための人体モデルを生体等価ファントムという。ファントムは電気定数が人体の各組織と等しくなるように設計される。作製及び使用するファントムのサイズは日本人男女の腕の平均である5cm×5cm×45cmと設定する。腕の筋肉のファントムの電気定数は比誘電率 $\epsilon_r=170.73$ 、導電率 $\sigma=0.62S/m$ である[6]。図7に作製したファントムを示す。

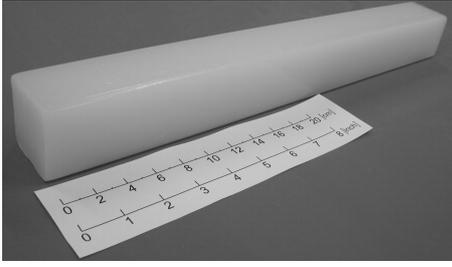


図5 作製した腕のファントム (5cm×5cm×45cm)

### 6.3 バラン

本研究では同相電流を低減することが目的であり、同相(コモン・モード・)チョークの性質を持つフロートバランを採用する。フロートバランは同軸ケーブルをコアに巻き付け、ケーブルの外界に大きなインピーダンス(コモン・モード・インピーダンス  $Z_{cm}$ )を発生させ、同相電流を低減する。同相電流の低減効果は  $Z_{cm}$  の大きさに比例するため、一定以上の値を満たさなければ、十分に同相電流を低減することができない。フロートバランの設計における条件は同軸ケーブルの直径  $2a$  と地面からの高さ  $h$  から、式(3)が得られる[7]。

$$Z_{cm} \approx 138 \times \log_{10} \left( \frac{h + \sqrt{h^2 - a^2}}{a} \right) \quad (3)$$

同軸ケーブルの直径は3mm、地面からの高さ500mmの状態で行うので、これらの値を式(3)に代入すると、 $Z_{cm}$  は約390となる。また、フロートバランのもう一つの条件として、コモン・モード・チョークの性質を利用するときに必要なインピーダンスは390の10倍、すなわち約4000Ω以上が目安となる。そこで、図6の測定構成で作製したバランの  $Z_{cm}$  を測定し、その結果を図7に示す。ここで、図6の測定治具は先行研究[3]で用いられていたモノを使用し、図7では測定構成の妥当性確認の結果も載せる。図7より、本研究で使用する2つのバランはともに基準である4000Ωのインピーダンスを大きく超える値を得た。この結果から、これら2つのバランは同相電流を十分に低減する効果をもつといえる。図8には作製したバランを示す。

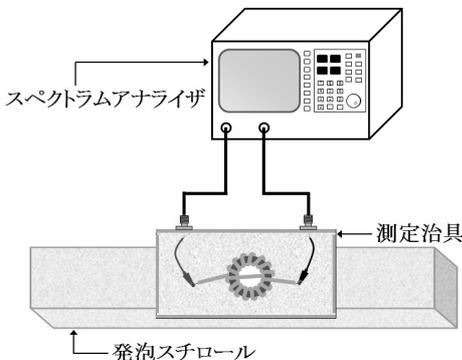


図6 バランの測定構成

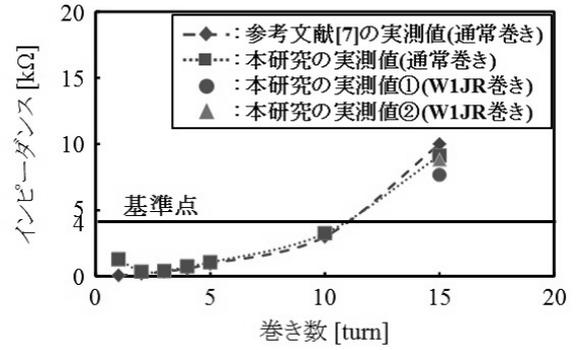


図7 フロートバランの妥当性確認 [7]

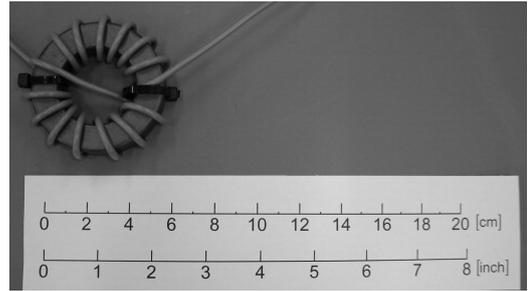


図8 作製したフロートバラン

## 7 結果の比較と考察

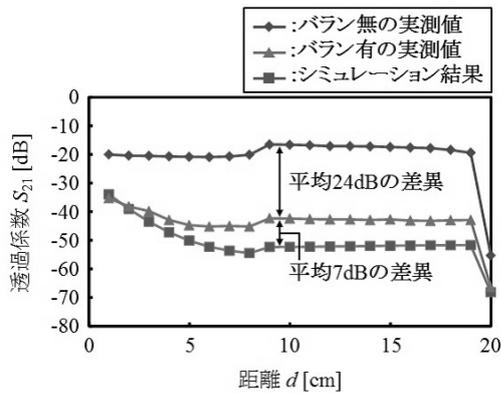
図9(a)~(d)にシミュレーション結果と2つの実験結果の比較したグラフを示し、各結果の平均値についてまとめたものを表5に示す。

はじめに、グラフの傾向から着目すると、シミュレーション結果とバラン無及びバラン有の2つの結果の傾向は良好に一致していることがわかる。バラン無とバラン有の差異は約24~30dBであり、この結果は同相電流を低減した効果であると考えられる。バラン有とシミュレーションは約7~18dBの差異があり、この分だけ実測値とシミュレーション値に差異がある。この約7~18dB分の差異はネットワークアナライザの測定限界であると考えられる。各グラフのシミュレーション値が-50dB以下でグラフが緩やかに減少しているとき、実測値はほぼ一定の値、または僅かな減少傾向を描いている。そして、実測の際、 $S_{21}$ の波形が-50dB以下から大きく乱れており、-50dB以下の精確な  $S_{21}$  のデータの出力が困難であった。これらより、バラン有とシミュレーション結果の差異は測定限界や測定誤差だと考える。

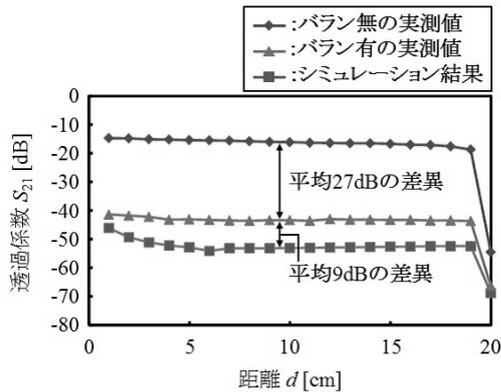
次に、(a)~(d)においてどの電極構造が通信において有利か考察する。まず、 $S_{21}$ のシミュレーション値は(a)と(b)がより高い値を示しており、伝送効率が良い。そして、通信の安定性を考慮すると、距離  $d$  に関わらず、グラフは一定の  $S_{21}$  の値を描いていることが望ましいことから、(b)がより安定した通信が行えるといえる。したがって、通信において有利な電極配置は(b)の「送信機 GND 電極有、受信機 GND 電極無」と結論付ける。

表 5 各結果の平均値及び差異

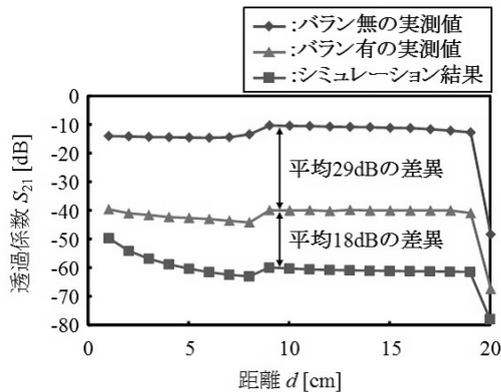
	(a)	(b)	(c)	(d)
バラ無の $S_{21}$ の平均 [dB]	-19	-16	-13	-11
バラ有の $S_{21}$ の平均 [dB]	-43	-43	-41	-41
シミュレーション値の $S_{21}$ の平均 [dB]	-50	-52	-60	-58



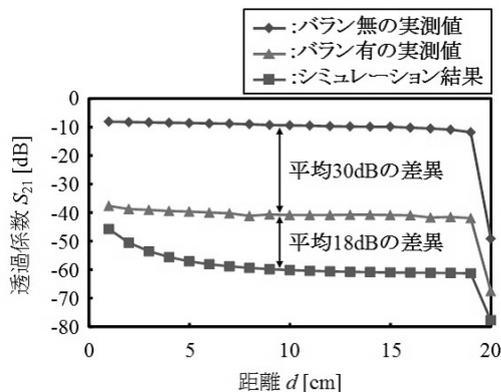
(a) 送信機 GND 電極 有, 受信機 GND 電極 有



(b) 送信機 GND 電極 有, 受信機 GND 電極 無



(c) 送信機 GND 電極 無, 受信機 GND 電極 有



(d) 送信機 GND 電極 無, 受信機 GND 電極 無

図 9 シミュレーション結果と実験結果の比較

## 8 まとめと今後の課題

本研究では、先行研究 [3] を踏まえて、透過係数  $S_{21}$  のみ着目し、ネットワークアナライザを用いたウェアラブル機器間の伝送特性の測定方法の課題を確認した。課題である同相電流を低減するため、測定構成にバラを組み合わせ、シミュレーション結果、バラを組み合わせない実験結果、バラを組み合わせた実験結果について比較及び考察した。その結果、バラを組み合わせた  $S_{21}$  の値はシミュレーション値により近似したことから、測定構成にバラを組み合わせるものの必要性を確認した。また、通信の際、ウェアラブル機器の有利な電極構造は「送信機 GND 電極 有, 受信機 GND 電極 無」だと結論付けた。そして、実測値とシミュレーション値の傾向が良好に一致し、ネットワークアナライザを用いた人体通信ウェアラブル機器の伝送特性の測定方法を示した。

今後の課題として、本研究では測定回数が 5 回に留まったので、測定回数を増やし、多くのデータを確保する必要がある。また、先行研究 [2] や過去の論文で本研究で用いたファントムにおける表面波の存在を推測及び検討したが、実証まで至っていないため、その実証も必要となる。

## 参考文献

- [1] 藤井勝之, 伊藤公一, 田島茂, “人体を伝送路として利用したウェアラブル送受信機の信号伝送状況の計算モデルに関する検討,” 信学論 (B), vol.J87-B, no.9, pp.1383-1390, 2004.
- [2] K.Fujii, M.Takahashi, and K.Ito, “Electric field distributions of wearable devices using the human body as a transmission channel,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol.55, no.7, pp.2080-2087, 2007.
- [3] 井戸大介, 杉浦大輔, “非接地型ウェアラブル機器間の伝送特性の測定方法の確立,” 2011 南山大学情報通信学科卒業論文集, 2012.
- [4] D.M.Pozar, “Microwave Engineering Third Edition,” John Wiley and Sons, pp.174-182, 2005.
- [5] REMCOM, “XFDTD,” <http://www.remcom.com/xf7>, 2013.
- [6] IFAC, “An Internet resource for the calculation of the Dielectric Properties of Body Tissues in the frequency range 10Hz - 100GHz,” <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/>, 2013.
- [7] 山村英穂, トロイダル・コア活用百科, CQ 出版社, 東京, 2006.