電圧式人体通信と SPICE シミュレーションの親和性

加藤 康男*, 佐久田 博司*

Affinity of Voltage-Method Intra-Body Communication and SPICE Simulation

Yaso KATO* and Hiroshi SAKUTA*

* 青山学院大学 (〒 252-5258 神奈川県相模原市中央区淵野辺 5-10-1)

* Aoyama Gakuin University (5-10-1 Fuchinobe, Chuo-ku, Sagami-hara-shi, Kanagawa 252-5258)

Abstract

Recently, intra-body communication using electric-field technology is attracting attention. However, it has not yet been put into practical use due to the difficulty of engineering these devices. At the same time, the apparatus design of modern simulation technology is essential. However, in the voltage method of intra-body communication technology, only an electromagnetic field simulator is used. If a circuit simulator like SPICE is applicable, intra-body communication device design may become markedly simpler. Therefore, we examined whether SPICE is usable for the voltage method of intra-body communication technology. Our results confirmed the possibility of using SPICE for the analysis of intra-body communication.

Key Words: Electric Field Method, Intra-body Communication, Simulation, SPICE

1. はじめに

近年、人間の身体を通信経路とする「人体通信技術」が注目されている。1995年にアメリカのマサチューセッツ工科大学(MIT)で考案された技術だが¹⁾、その後、日本国内でも研究開発が始まった^{2)~4)}。人体通信の方式は「電流式」と「電圧式」に大別されるが、最近では利便性の高さから「電圧式⁵⁾」が主流になっている。

送信機で発生させた電圧信号を利用者の身体に印加し、人体に装着した受信機で受信して通信をおこなうのが「電圧式人体通信」の特徴である。低周波～10 MHz程度の周波数領域において、人体は導体とみなされる⁶⁾ことから、電圧式人体通信は静電容量結合のモデルで表わされる⁷⁾。したがって、人体に送信機と受信機を装着すると、

[送信機：電極] → 静電容量結合 →

[人体] → 静電容量結合 → [電極：受信機]

のような通信が可能になる。また、人体に電圧を印加すると、体表面から染み出すような電界が発生し⁸⁾、この電界を介して静電容量結合が成り立つことから、「電圧式」人体通信は「電界式」人体通信とも呼ばれる。2000年以降、日本国内の有力企業が開発を進めて来たが^{8)~10)}、未だ社会に浸透するに至っていない。その要因として、人体を通信経路とする特殊性から、従来の電子装置開発の手法が適用できず、それが「技術障壁」になっていることが考えられる。

近年のエレクトロニクス装置の開発において、シミュレーション技術が重要な役割を果たしていることは周知のとお

りだが、電圧式人体通信に関しては、電磁界解析^{11)~15)}以外のシミュレーション技術が有効に活用されているとはいえない。無論、電磁界の振舞いを把握することは重要だが、電磁界シミュレータの利用が人体通信装置の開発に直結する訳ではない。たとえば、時間軸波形を扱える回路シミュレータを電圧式人体通信の開発に適用できれば、前述の「技術障壁」が低くなり、電圧式人体通信の普及が早まる可能性がある。

そこで筆者らは、SPICEシミュレータと電圧式人体通信の親和性を確認すべく、基礎的な検討をおこなったので本稿において報告する。

2. 検討内容

2.1 信号伝送実験

検討は実験とシミュレーションからなり、以下の手順で進める。まず、人体を通信経路とする信号伝送実験系(Fig. 1)を構成する。送信機(Tx)、受信機(Rx)、オシロスコープ(Oscillo Scope)を実験卓上に設置する。電源には、商用電源(AC100 V)を使用する。

実験に際し、被験者は革製のビジネスシューズを履き、床に置いた銅板(Metal Plate)の上に立つ。被験者は身長177 cm、体重75 kgの成人男性で、銅板のサイズは50 cm × 50 cm、厚さは約70 μm(ノギス実測値)である。このとき、装置のグランド電位と被験者が立つ銅板の電位がシミュレーション条件と一致するように、送信機、受信機、オシロスコープの各グランド端子と銅板とを導線で接続して同

Fig. 1 Concept of experiment

電位にする。その上で、送信機で発生させた信号電圧を被験者の身体に印加し、人体を伝搬する信号を受信機で受信、オシロスコープで波形を計測する。

2.2 SPICE シミュレーション

本検討ではSPICE シミュレータとして、リニアテクノロジー社が提供する「LT SPICE (Version 4.19w)」を使用する。(以下、SPICE と略記)。まず、SPICE シミュレータの回路図エディタ上に、Fig. 1 に示す実験系と同様の回路を作成する。つぎに、人体を介して伝わる時間軸波形を解析するために、トランジェント・シミュレーションをおこなう。その後、実験波形とシミュレーション波形の比較検討をおこなう。なお、本稿においてはSPICE のモデルパラメータの詳細については触れない。

3. 実験

3.1 実験装置

送信機には、信号発生器 (NF 回路設計ブロック社製 Wave Factory 1946) を使用し、周波数 2 MHz、電圧 500 mV_{pp} の正弦波を発生させる。なお、2 MHz は筆者らが人体通信の搬送波に用いる領域の周波数である。受信機として、Fig. 2 に示す「LC 共振型電界センサ」¹⁶⁾ と外付けの可変コンデンサ (C_t)、直流安定化電源 (Power Supply)、オシロスコープ (Oscillo Scope) を用いて Fig. 3 に示す測定系を構成する。「LC 共振型電界センサ」は、コイル (L)、コンデンサ ($C_1 \sim C_3$)、抵抗 (R_a)、オペアンプをモジュール化したもので、外部電源から直流 5 V を供給して使用する。オペアンプには、リニアテクノロジー社製 LTC6088 を使用し、 $R_a = 100 \Omega$ の帰還抵抗によって増幅率 1 倍の非反転増幅器 (バッファアンプ) を構成している。今回のセンサモジュールには 560 μ H のコイルを使用し、2 MHz で出力信号振幅が最大 (共振点) になるように C_t を調整する。なお、LC 並列共振回路の共振周波数 f_c は、 $f_c = 1/(2\pi\sqrt{LC_t})$ で与えられ、 $L = 560 \mu$ H のときの C_t の理論値は約 11.3 pF である。

3.2 実験用電極

送信用、受信用の各電極は、一般的なプリント回路板の

Fig. 2 LC-resonance sensor module

Fig. 3 Outline of receiver (Rx)

Fig. 4 Electrode of Tx and Rx

Fig. 5 Contact by 1Finger

製造技術で作製されている。寸法は 42 mm × 42 mm の正方形で、銅箔部 (Cu) の面積は 40 mm × 40 mm である。なお、基板メーカーでは、レジスト厚の製造ばらつきを 15 μ m ~ 25 μ m と規定していることから、本検討におけるレジスト厚の標準値 (typ) を 20 μ m とする。人体と電極は、Fig. 4 に示すような、指先と電極表面を接触させた静電容量結合によって接続する。電極は、厚さ 50 mm のスポンジ上に設置し、各電極は 600 mm の間隔を空けて配置する。

なお、電極に対する指の接触方法は二種類とし、Fig. 5 に

Fig. 6 Contact by 2Finger

Fig. 7 Area of fingerprint

Fig. 8 Example of fingerprint area

示すように左右の人差指を送信側と受信側の各電極に接触させた状態でおこなう測定を「1Finger」、Fig. 6に示すように、左右の人差指と中指を送信側と受信側の各電極に接触させた状態でおこなう測定を「2Finger」と定義する。

3.3 指先と電極接触面積

指先と電極間の静電容量を算出するためには、指先と電極との接触面積を求める必要がある。今回筆者らは、以下の方法で指先と電極の接触面積を算出した。

まず、指先にインクを塗り、予め用意した $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ (100 mm^2) の正方形領域の「Area-F」内に指先を接触させて指紋パターンを得る。このとき、意図的に Area-F 内全面に指先が接触するように留意する。この結果が Fig. 7 (a-1) である。なお、Area-F 内の指紋以外の空白面積は、Fig. 7 (a-2) に示すように 9.9 mm^2 となり、Area-F 外の指紋面積は、Fig. 7 (a-3) に示すように 16.3 mm^2 となった。すなわち、Area-F 外の指紋面積から Area-F 内の空白面積を差し引いた値に、Area-F の面積 (100 mm^2) を加えることで指先と電極との接触面積を算出でき、その値は 106.4 mm^2 となった。

さらに二度、同じ要領で指先と電極の接触面積を算出したところ、Fig. 8に示すように、三回の測定の平均値とし

Fig. 9 Example of measurement wave-form

て 105.9 mm^2 を得た。よって、意図的に Area-F 内を埋めるように指先を電極に接触させた場合、概ね 100 mm^2 の接触面積となることが分かった。この結果から、「1Finger」の場合は指先と電極との接触面積を 100 mm^2 、「2Finger」については「1Finger」の二倍の 200 mm^2 と仮定する。なお、個人差による影響を避けるため、今回の実験は同一人物によっておこない、電極表面には Area-F に相当する枠を設ける。

3.4 実験結果

第3章1項、2項に示した条件にもとづき、人体を介して伝わる信号を計測する実験をおこなった。計測は「1Finger」、「2Finger」の各条件で5回おこない、「1Finger」の受信波形の振幅平均値は約 462 mV_{pp} 、「2Finger」の受信波形の振幅平均値は約 658 mV_{pp} であった。Fig. 9に、受信波形の代表値と実測振幅平均値を示す。なお、この平均値をシミュレーション結果と比較する。

4. シミュレーション

4.1 シミュレーション条件

Fig. 1の実験系を、シミュレーション用回路図として表わしたのが Fig. 10である。Tx部の V_x に接続されたデカップリング・コンデンサの値は $0.1\text{ }\mu\text{F}$ である（ただし、単なるデカップリング・コンデンサであるため、この値はシミュレーションには影響を与えない）。Rx部は、第3章1項で述べた「LC共振型電界センサ」で、 L と C_l の値は信号伝送実験と同様に $L = 560\text{ }\mu\text{H}$ 、 $C_l = 11.3\text{ pF}$ で、 C_1 、 C_2 、 C_3 の値も Fig. 3と同じ値である。なお、 C_{bg} は人体とグラウンド（床面）間の静電容量を表わし、今回は静電気放電の耐性評価方法の国際標準規格 IEC61000-4-2¹⁷⁾ に準拠して 150 pF と仮定する。 C_{bl} は指先と送信電極間の静電容量を表わし、 C_{br} は指先と受信電極間の静電容量を表わす。

第3章3項で述べたように、今回の信号伝送実験では、指先と電極面の接触面積を 100 mm^2 (1Fingerの場合) としており、指先と電極の銅箔面の間に極板面積 100 mm^2 の平行平板コンデンサが形成されると考える。このとき、極板間の距離はレジスト厚 $20\text{ }\mu\text{m}$ (typ) を前提とするが、指先には指紋の凹凸があり、指先の皮膚面が全て電極に接触する

Fig. 10 Circuit diagram of SPICE simulation

Fig. 11 Contact of fingerprint

訳ではない。文献¹⁸⁾によると、指紋の溝の深さは100 μm 程度であることから、今回は指紋の凹凸と電極面の関係をFig. 11に示す形状であると仮定する。

Fig. 11に示す指紋パターンにおいて、指紋の凸部（黒色部）をPosi-pattern、指紋の凹部（白色部）をNega-patternとする。このとき、Posi-patternは電極面に接触しNega-patternは電極面から約100 μm の空間を隔てた位置にある。いま、Posi-patternの静電容量を C_{pos} 、Nega-patternの静電容量を C_{neg} とすると、それぞれ以下の式で算出される。このとき、Posi-patternとNega-patternの面積は等しく、共に50 mm^2 （Area-Fの1/2）であると仮定する。また、電極表面を覆うレジストの材質はエポキシ樹脂で、その誘電率は約3.5¹⁹⁾であることから、レジストの比誘電率 ϵ_{re} を3.5とする。

$$\begin{aligned} C_{\text{pos}} &= C_r \\ &= (10 \times 10^{-3} \times 5 \times 10^{-3} \times 8.85 \times 10^{-12} \times 3.5) / 20 \times 10^{-6} \\ &\div 77 \times 10^{-12} = 77 \text{ [pF]} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} C_a &= (10 \times 10^{-3} \times 5 \times 10^{-3} \times 8.85 \times 10^{-12}) / 100 \times 10^{-6} \\ &\div 4 \times 10^{-12} = 4 \text{ [pF]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{\text{neg}} &= (C_a C_r) / (C_a + C_r) \quad \text{※ } C_{\text{neg}} \cdot C_{\text{pos}} \text{ と } C_a \text{ の直列静電容量} \\ &= (4 \times 77) / (4 + 77) \div 3.8 \text{ [pF]} \end{aligned} \quad (2)$$

上記から、

Table 1. Condition of SPICE simulation

Conditions	Best Vo (max)	Typ	Worst Vo (min)
1Finger: $C_{\text{bt}}, C_{\text{br}}$ [pF]	107	81	66
Fingerprint Area [mm^2]	(120)	(100)	(80)
2Finger: $C_{\text{bt}}, C_{\text{br}}$ [pF]	257	162	106
Fingerprint Area [mm^2]	(240)	(200)	(160)
Resist Thickness *1 [μm]	(15)	(20)	(25)
Finger Gap *2 [μm]	(100)	(100)	(100)
Resist ϵ_{re}	(3.5)	(3.5)	(3.5)

*1 Fig. 11 Resist Thickness

*2 Fig. 11 Fingerprint Gap

Fig. 12 Screen display of SPICE simulator

$$C_{\text{bt}} = C_{\text{br}} = (1) + (2) \div 81 \text{ [pF]} \quad (3)$$

(3)より、指と電極面の静電容量 C_{bt} と C_{br} は(1)+(2) $\div$ 81 pFとなる。なお、筆者らは指紋の専門家ではなく、指紋凹凸部の近似が必ずしも適切でない可能性はあるが、今回は、 C_{bt} と C_{br} の値を81 pFと仮定してシミュレーションをおこなう。なお、シミュレーションにあたり、Fig. 10のRx出力 V_o が最大になる場合を「Best」、最小になる場合を「Worst」、中間値になる場合を「Typ」とする条件を設定する。また、指先と電極の接触面積は、人間の感覚に頼る割には良好な精度で約100 mm^2 の値を得られるが、値が変動する可能性は否定できない。よって、Typ条件(100 mm^2)に対して $\pm 20\%$ の変動幅を持たせ、Best(120 mm^2)、Worst(80 mm^2)における C_{bt} 、 C_{br} の値も用意する。また、第3章2項で述べたように、レジスト厚にも製造ばらつき(15 μm ~25 μm)があるため、Typ(20 μm)、Best(15 μm)、Worst(25 μm)の条件を設定する。なお、指紋の溝の深さ(Gap: 100 μm)、レジストの比誘電率(ϵ_{re} : 3.5)は一定値として扱う。以上の事項をまとめたシミュレーション条件をTable 1に示す。

4.2 シミュレーション結果

Table 1の条件でシミュレーションを実行する。Fig. 12に示すのが、シミュレーション実行時の表示画面である。ま

Fig. 13 Result of SPICE simulation

た、Rx 出力波形の振幅 V_o を「1Finger」, 「2Finger」の条件別にプロットした図を Fig. 13 に示す。「1Finger」での振幅は、Best 条件で 500 mV_{pp} , Worst 条件では 365 mV_{pp} であった。また、「2Finger」では、Best 条件で 760 mV_{pp} , Worst 条件では 498 mV_{pp} であった。併せて、実測平均値 (1Finger $\approx 462 \text{ mV}_{pp}$, 2Finger $\approx 658 \text{ mV}_{pp}$) を「Measure Ave」としてプロットしたところ、「1Finger」, 「2Finger」いずれの条件においても、シミュレーション結果の Best-Worst 範囲内に収まった。

5. 考 察

「1Finger」でのシミュレーション Typ 値 (420 mV_{pp}) は、実測平均値 (462 mV_{pp}) の約 -9.1% の値であり、シミュレーションによって確度の高い値が導出されたと考える。また、「1Finger」でのシミュレーション Typ 値 (622 mV_{pp}) についても、実測平均値 (658 mV_{pp}) に対して約 -5.5% の値で、これもまた確度の高い値が導出されたと考える。一方で、「1Finger」, 「2Finger」の両方の条件において、実測平均値の方が大きな値となった要因として、電極表面と指紋凹凸部の接触面積の見積もり方法において、凹凸部の面積を等しく見積もったことにより、静電容量が実際よりも小さく見積もられた可能性が考えられる。実際には、指紋の溝部分 (凹部) よりも皮膚面 (凸部) の面積が広く²⁰⁾、電極面と指の間の静電容量が 81 pF (Typ) よりも大きくなる可能性が高い。また、レジスト厚やレジストの比誘電率の見積もりに問題があった可能性も考えられる。

つぎに、「2Finger」での実測平均値 (658 mV_{pp}) が「1Finger」での実測平均値 (462 mV_{pp}) の約 1.42 倍であったのに対して、シミュレーション Typ 値においても、「2Finger」 (622 mV_{pp}) が「1Finger」 (420 mV_{pp}) の約 1.48 倍となり、実測値に近い値となった。このことから、電極に触れる指の本数が増えた場合にも、シミュレーションにより適切な値が導出されたと考えられる。

Fig. 14 Example of advanced application

なお、今回の検討においては人体の静電容量を、国際標準規格 IEC61000-4-2 に準拠して 150 pF と規定した。しかし、幼児と大柄な成人男性では差があるはずであり、シミュレーション精度の向上を図るためには、人体の対地静電容量を計測する技術の確立が必要であると感じた。

本検討結果を総合的に判断すると、電圧式人体通信の開発に SPICE シミュレーションを適用できる可能性を示唆する結果を得られたと考える。

6. むすび

人体を介して伝わる信号を SPICE シミュレーションによって解析し、電圧式人体通信と SPICE シミュレーションの親和性が良好であることを確認した。一方で、送受信電極と人体 (指先) との接触面積の算出方法や、人体の対地静電容量の測定方法には課題が残ることが分かった。

また、今回は基礎検討という位置付けであったため、送信機と受信機両方の回路グラウンドを接地した条件で実験とシミュレーションをおこなったが、人体通信の高度な応用²⁰⁾を考えると、送信機、受信機の片方または両方の回路グラウンドが接地されていない (フローティング) 状態での使用方法 (Fig. 14) が考えられる。

よって、今後は本検討の結果を参考に、回路グラウンドがフローティング状態の送信機または受信機の振舞いを、SPICE シミュレーションで再現 (実際には、回路グラウンドの対地インピーダンスを高くする、などが考えられる) することを目指したい。

予想以上に良好な結果を得られたことから、今後は課題の解決を図るとともに、さらなる解析精度向上に向けて研究を継続する予定である。

謝 辞

カイザーテクノロジー 加藤 恵氏には、信号伝送実験に協力頂いた。北里大学 水澤純一 客員教授には、本稿執筆にあたり有益な御意見を頂いた。ここに深く感謝する。

(2013.12.18- 受理)

文 献

- 1) T. G. Zimmerman: "Personal Area Networks (PAN): Near-field Intra-body Communication," Thesis of the Massachusetts Institute of Technology, September 1995
- 2) 福本雅朗, 外村佳伸: "ウェアラブル・コンピュータの世界," 信学技報, IN98-9, CS98-9, MVE98-9, pp. 57-63, 1998
- 3) 土井謙之, 西村 久: "人体を伝送線路とする高信頼性通信方式," 松下電工技報, Vol. **53**, No. 3, pp. 72-76, 2005
- 4) 加藤康男, 秋岡 幸, 三林浩二: "ユビキタス人体通信による脈拍計測," 信学技報, VE2005-37, pp. 61-64, 2005
- 5) 品川 満: "体表面の誘起電界を利用した人体近傍通信技術," 電子情報通信学会誌, Vol. **92**, No. 3, pp. 234-238, 2009
- 6) 多氣昌生, 鈴木敬久, 渡辺恭平: "電界カップリングによる人体通信機器に関する曝露評価," 信学技報, EMCJ 2007-47, pp. 25-30, 2006
- 7) 多氣昌生, 鈴木敬久, 渡辺恭平: "人体近傍電界通信の等価回路の検討," 信学技報, EMCJ 2010-84, pp. 1-6, 2010
- 8) 門 勇一, 品川 満: "人体近傍界通信技術「レッドタクトン」とその応用," NTT 技術ジャーナル 2010.1, pp. 16-19, 2010
- 9) N. Matsushita, S. Tajima, Y. Ayatsuka, and J. Rekimoto: "Wearable Key: Device for Personalizing nearbody Environment," ISWC2000, pp. 119-126, 2000
- 10) ルネサスが創る新市場「ワイヤレス・センサ・ネットワーク」特集 Part2, http://japan.renesas.com/edge_ol/features/08/index.jsp, 2013. 9
- 11) 福本雅朗, 品川 満: "Carpet LAN: 人体通信を用いた屋内向け無配線ネットワーク&位置検出システム," 情報処理学会論文誌, Vol. **47**, No. 8, pp. 2697-2711, 2006
- 12) 菅 良太郎, 伊藤公一, 羽賀 望, 斉藤一幸, 高橋応明: "MHz 帯における人体近傍通信の基本特性," 信学技報, A・P, アンテナ・伝搬, Vol. **109**, No. 339, pp. 41-45, 2009
- 13) 越地福朗, 竹中秀同, 前坂琢磨, 佐々木 健: "人体通信における通信高速化と映像音声伝送システムへの応用," マイクロメカトロニクス, Vol. **53**, No. 200, pp. 140-151, 2009
- 14) 村松大陸, 山本隆彦, 越地福朗, 越地耕二: "人体通信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
- 15) 滝口清昭, 河野賢司, 前田一龍, 比嘉良人, 神谷 稔: "準静電界方式人体通信の自転車バックモニタシステム," 第 9 回 ITS シンポジウム 2010 予稿集, pp. 459-464, 2010
- 16) 加藤康男, 佐久田博司: "分散容量結合による正帰還コイル: 人体通信用電界センサの高感度化," 第 23 回マイクロエレクトロニクスシンポジウム論文集, 2C2-4, pp. 257-260, 2013
- 17) 小村淳己, 吉田孝博, 増井典明: "各種放電源からの ESD 特性の比較," 静電気学会誌, Vol. **36**, No. 1, pp. 8-13, 2012
- 18) 前野隆司, 山田大介, 佐藤英成: "ヒト指紋形状の力学的意味," 日本機械学会論文集, C 編, Vol. **71**, No. 701, pp. 245-250, 2005
- 19) 安田武夫: "プラスチック材料の各動特性の試験法と評価結果," 日本工業出版, プラスチックス, Vol. **52**, No. 5, pp. 79-84, 2001
- 20) 加藤康男, 佐久田博司: "電界式人体通信の分類と自動車への適用に関する一考察," 自動車技術会, 自動車技術会論文集, Vol. **44**, No. 5, pp. 1315-1320, 2013

著者紹介

加藤康男 (かとう やすお)

1987 年 東海大学工学部通信工学科卒業。同年 NEC 通信システム (株) 入社。1994~2002 年 NTT グループ 研究開発部門技術主査。2003 年 (株) カイザーテクノロジー設立。2006 年 東京医科歯科大学大学院医歯学総合研究科博士前期修了。2011 年より 青山学院大学大学院理工学研究科博士後期課程在学, 現在に至る。MES2012 ベストペーパー賞。

佐久田博司 (さくた ひろし)

1974 年 東京大学工学部卒業。1979 年 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了 (工学博士)。1981 年 (株) 日立製作所入社。1984 年 長岡技術科学大学機械系助手。1992 年 青山学院大学理工学部機械工学科助教授。1997 年 マサチューセッツ工科大学客員助教授。2007 年 同客員教授。2004 年より 青山学院大学情報テクノロジー学科教授。