

人体を伝送路として利用する通信における伝送特性の実験的検討

高崎 和之¹ 原 和輝¹ 前山 利幸² 唐沢 好男¹

Experimental Evaluation of Transmission Characteristics in Human Body Communications

Kazuyuki TAKASAKI¹, Kazuki HARA¹, Toshiyuki MAEYAMA² and Yoshio KARASAWA¹

Abstract

Human body communication is advocated as one of the next generation near field communication technologies. However, it has a problem that the transmission rate is slow. In this paper, we investigated the transmission characteristics of the human body by means of the current transmission method. As a result, when the size of the electrode is optimized, it has been able to get a frequency-stable characteristic in 100 kHz-40 MHz band. Moreover, an experiment where there was an insulator between the electrode and the human body was carried out. As a result, although the transmission property was somewhat deteriorated, we succeeded with the transmission of information bit rate of 17 Mbps by means of an Orthogonal Frequency Division Multiplexing scheme.

Keywords: Personal area networks, Body area networks, Human body communication

1. 緒言

情報通信機器の小型・高性能化に伴い、端末機器と周辺機器によって構築される Personal Area Network(以下, PAN 呼ぶ)や Body Area Network(以下, BAN と呼ぶ)と呼ばれる小規模なネットワークが爆発的に増加している。PAN や BAN は、どちらもユーザを中心とした半径数十 cm 程度のネットワークであり、従来はケーブルを用いた有線接続方式が良く利用されていたが、ケーブルを携帯したり接続することの煩わしさや、コネクタの互換性の問題などから、最近では無線 LAN や Bluetooth などの ISM バンドを利用した無線通信方式が利用よく利用されている。しかし、ISM バンドは既に飽和状態となっていることに加え、個人情報保護意識の高まりから、伝送路には高い秘匿性が要求されている。筆者らは、これらの要求を満たす次世代通信技術として、人間の身体を伝送路として用いる人体通信方式に着目した。人体通信方式は 1980 年代に Zimmerman により提案されたが⁽¹⁾、当時はコンピュータや通信機器が大型であったことなどから、現在ほど注目されることはなかった。しかし、携帯電話の普及によって、多くの人が情報端末を携帯して利用するようになり、近年再び注目を集めている。

本論文では、人体に微弱な電流を流す電流方式について、人体各部の基本伝送特性を実験的に明らかにした。その結果、100 kHz~40 MHz の比較的広い周波数帯で安定した周波数特性が得られることを見出した。さらに電極と人体の間に絶縁体を挿入して、顕著な周波数特性が現れた場合でも、OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing : 直行周波数分割多重) の持つ周波数特性の不均一に対する耐性を利用することで、地上デジタル放送 1 チャンネル分、実効速度 17 Mbps 程度の速度で通信が可能であることを実証した。

2. 近距離通信技術

近年では、信号処理技術の発達により、小型情報通信機器においても高度な信号処理が可能となり、さまざまな近距離通信技術が利用されている。その中でも、数十 cm~数 m 規模の範囲における通信に用いられている通信方式とその特徴を次に示す。

2.1 有線及び無線通信技術

有線通信方式は、送信機と受信機を同軸ケーブルなどで物理的に接続する方式である。近距離通信では無線通信方式に比べて伝送損失が少なく、直流から伝送特性の優れた伝送路を得ることができるため、ベースバンド通信が可能で変調器を省略することができる。秘匿性に優れ、電波法による規制を受けないなどの理由から、一般

1 電気通信大学 AWCC, 〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

2 拓殖大学, 〒112-8585 東京都文京区小日向 3-4-14

によく用いられているが、可搬型の機器や小型の機器では、接続部が機械的に破損しやすく、また、埃などの異物によるトラブルが発生しやすいため、近年では無線通信方式への置き換えが進んでいる。

無線通信方式は、電波や赤外線などによって情報を伝送する方式である。有線接続方式に比べ、機械的な損傷がない反面、秘匿性や密集地における干渉などが問題となっている。電波を用いた方式は、IEEE802.11b に代表される無線 LAN と Bluetooth が広く一般に利用されており、前者はその俗称のとおり、Local Area Network 向けの規格である。そのため、実用通信範囲は数 m ～数十 m 程度と PAN の範囲よりも広域で、規格上の通信速度は 300 Mbps であるが、干渉せずに使用できるチャンネル数が最大 4 つと少なく、学校やオフィスビルなど複数のネットワークが密集した状態では干渉等による通信障害が発生することがあり、問題となっている。また、無線 LAN は Bluetooth に比べて待機時の消費電力が大きいことも携帯電話などの小型バッテリーで駆動する端末では問題となることがある。他方、Bluetooth は、PAN を対象にコンピュータと周辺機器を接続する目的で開発された規格であるため、消費電力、通信範囲、チャンネル数などの面で無線 LAN より優れているが、通信速度が遅く、動画などの伝送には不向きである。

光を用いた通信方式では、ノートパソコンや携帯電話などで使われている Infrared Data Association (以下、IrDA) が一般的である。IrDA は赤外線を用いた数 Mbps 程度の速度の通信規格で、通信可能距離は 1 m 程度と PAN に適しているが、送受信機間に障害物があると通信障害が発生するため、電話番号やメールアドレス、写真などの情報を交換するなど、極短時間の間だけ利用されることが多い。

2.2 人体通信方式

人体を伝送路として用いる方法は、従来から提唱されていたが⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾、周波数特性が均一でないために高速伝送ができないなどの問題があり⁽⁴⁾、これまであまり利用されていなかった。しかし、端末性能の向上などにより、次世代近距離通信に対する需要が高まっており、近年再び注目を集めている。人体を用いた情報伝送は、情報の伝送メカニズムによって、電流方式と電界方式に大別することができる。両者の主な違いを次に示す。

2.2.1 電流方式

電流方式は、図 1 に示すように送受信機間に閉回路を構成し、回路を流れる電流によって情報を伝送する方式である。閉回路を構築するためには、送信機から受信機へ電流を流す経路(Path1)と、受信機から送信機へ電流を流す経路(Path2)の 2 つの経路が必要となる。本論文では、便宜上、前者の経路を流れる電流を信号電流、後者の経路を流れる電流を帰路電流と呼ぶことにする。一般に、信号電流を流す経路には人体を用い、帰路電流の経路は機器筐体間の容量性結合などが利用される⁽⁵⁾。この場合、図 2(a)に示すように、人体には送信側、受信側にそれぞれ 1 つの電極を接触させることになる。これを 1 電極方式と呼ぶことにする。また、帰路電流を流しやすくする

ために、図 2(b)に示すように人体を利用して容量性結合を強くすることがある⁽⁵⁾。この方式を 2 電極方式と呼ぶことにする。1 電極方式では、送信電極から人体に流れる電流はそのほとんどが信号電流となって受信電極へと流れるが、2 電極方式では、送信電極の近くにある基準電位電極に向かっても電流が流れる点に留意する必要がある。

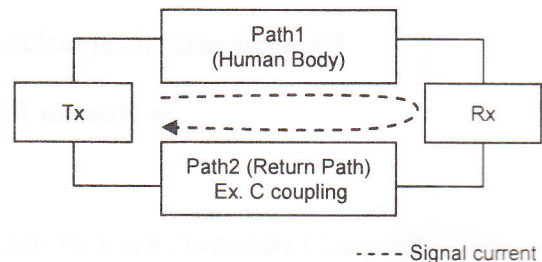


Fig.1 Basic configuration of current transmission method

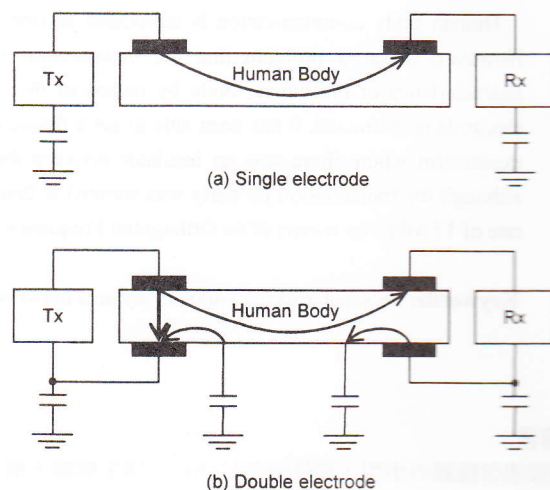


Fig.2 Difference of electrode setting positions

2.2.2 電界方式

人体の誘電率が空気よりも大きいことを利用し、図 3 に示すように電界を体内に閉じ込め、漏れ出た電界を検出する方式である。漏れ出す電界が微弱であるため、電界の変化を光で検出する特殊な光学素子がよく用いられている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。電界の変化を光学素子によって検出する場合、基準電位の固定が不要という利点があるが、漏れ出す電界が微弱であるため、電流方式のように握手によって 2 つの PAN を接続することは一般に困難である。

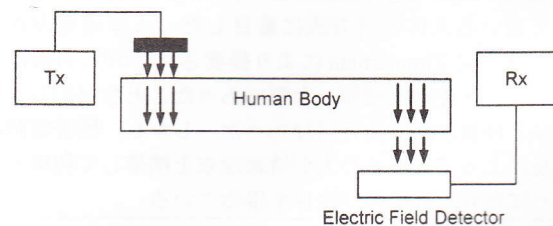


Fig.3 Electro field transmission

2.2.3 本論文で検討する方式

電界方式については、10 Mbps 程度の伝送速度で通信可能なシステムが開発されたが、人体から数 cm 程度離れても信号を受信できてしまうため、人体通信の持つ有線通信と同等程度の秘匿性が損なわれてしまう。本研究では、秘匿性を重視し、そのことが特徴である電流方式について検討を行った。電流方式では、人体の他に帰路電流を流す経路が必要となるが、本研究ではその検討の第一歩として帰路電流が流れる経路は確保されているとして、すなわち、共通にアースが取られているとして、人体の持つ電気的特性についてのみ評価を行った。この点に関しては、今後、さらに検討を重ねる必要がある。また、数十～百 kbps 程度の通信は既に実用化されているが、本研究では動画像などの伝送にも十分に耐えうる高速大容量伝送を目標に評価と検討を行った。

3. 人体の電気的特性

3.1 安全基準

人体に電流を流すとき、電流が多すぎると感電や、健康に影響を及ぼす恐れがある。そのため、さまざまな観点から安全に流すことができる電流の上限値等が規定されているが、国や規定の解釈の違いにより、統一された安全基準が制定されていないのが実情である。参考文献中に示された実験条件でも、送信信号のレベルは 30 Vp-p⁽¹⁾、25 Vp-p⁽⁴⁾、500 μ A⁽⁵⁾、(安全マージンを設けた上で) 15dBm⁽⁵⁾などさまざまである。本論文においては、前述の条件の中で最も厳しい設定値である 500 μ A を上限値の目安とし、送信機出力レベルを設定した。本研究では 50 Ω 系の実験装置を用いたため、防護指針に準拠した電流で通信を行うと、最大受信レベルは -19 dBm となるが、信号源と人体による伝送路は整合がとられていないため、入力端で大部分がリターンロスとなることが予想されることや、人体による伝送損失が約 15～20 dB 程度⁽⁴⁾と予想されることなどから、送信信号レベルは 0 dBm (実測値) とした。

なお、ARIB STD-38⁽⁸⁾によって規定されている上限値は 4.5 mA であることから、この設定値は十分に安全なものである。

3.2 基本伝送路特性

人体は、皮膚や骨、筋肉などの特性の異なる組織によって構成されているが、いずれの組織も、周波数が高くなると誘電率が減少し、導電率が増加する傾向があることが知られている⁽⁹⁾。従って、全体でも同様の傾向が現れると考えられる。人体の代表的な構成組織 (皮膚、筋肉、骨) の導電率と誘電率をそれぞれ表 1 と表 2 に示す。

人体の電気的特性を測定するため、図 4 に示すような直径 12 mm、長さ 100 mm、間隔 100 mm の棒状電極を、キャリブレーションを行った同軸ケーブルの芯線に接続し、人体 (両手間) に電流を流した場合の伝送損失を測定した。測定は入出力インピーダンスが 50 Ω のネットワークアナライザ (ADVANTEST R3767CG) を用いて行い、作業机の上に電極を固定して被験者は立った姿勢で電極を握った。図 5 に示すとおり、帰路電流が流れる

経路はネットワークアナライザ内部で接続されているため、図 6 に示す測定結果は、信号電流が流れる経路のみすなわち人体の伝送損失を示すものである。

Table 1 Conductivity of human body (Unit:S/m)

Freq.(MHz)	0.1	1	10
Skin(wet)	0.05	0.3	0.4
Muscle	0.7	0.7	0.7
Bone	0.04	0.06	0.15

Table 2 Relative permittivity of human body

Freq.(MHz)	0.1	1	10
Skin(Wet)	20000	1500	150
Muscle	2000	500	100
Bone	1000	500	100

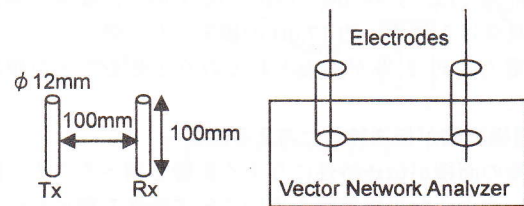


Fig.4 Size of electrode

Fig.5 Measurement system

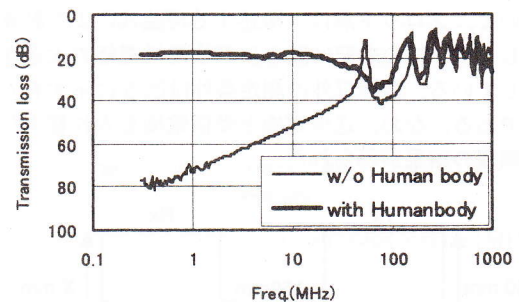


Fig.6 Transmission loss of Human body

図 6 より、人体を介した場合の伝送損失は、人体を介さない場合 (空間を伝搬させた場合) の伝送損失と比べ、40 MHz を越えるあたりから急激に伝送損失が増加することが確認できた。周波数が数十 MHz のオーダーになると、電極間に生じる結合によって人体の有無による伝送損失の差が少なくなり、50 MHz 近辺からは人体がないほうが伝送損失が小さくなり、伝送特性が良くなる場合もあることが確認できる。このことから、人体伝送が有効に利用できる周波数はおよそ 40 MHz までであると分かった。

また、人体に微弱な電流を流し、その伝送特性を測定することで体脂肪率を測定できる体脂肪計が市販されていることから、人体の電気的特性は、体格や体質、体調などの影響を受けることが想像できる。そこで、成人男女 15 名に対し、同様の条件で伝送特性の測定を行った。なお、電極を握る強さ、握り方については両手で握る以

外の指示をしていない。その結果を Fig.7 に示す。

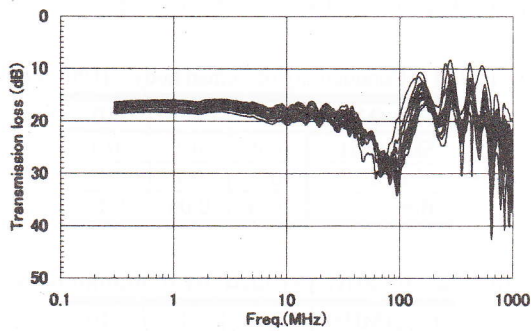


Fig.7 Effect of individual difference

図 7 より、周波数特性が比較的均一である 40 MHz 以下の部分では、3~4 dB の差はあるものの、顕著な個体差は見受けられず、約 17 dB の損失として考えてよく、入力電力の約 2 % が出力として取り出せることが確認できた。

3.3 電極面積が伝送特性に与える影響

電極の面積が伝送特性に与える影響を調べるため、図 8 に示すような平板電極を用いて伝送特性の測定を行った。測定は、図 5 に示す測定系において、キャリブレーションを行った BNC ケーブルの芯線に接続コネクタを介して接続した。図 9 にその結果を実線で示す。図 9 において、プロット点は、後述する理論式による計算値を示し、サイズの表記は図 8 に示す受信電極の大きさを表している。電極以外の測定条件は図 5 に示すものと同じである。なお、送信電極と受信電極を入れ替えた場合も同様の結果が得られた。

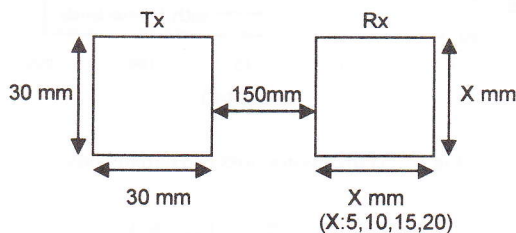


Fig.8 Plate type electrode

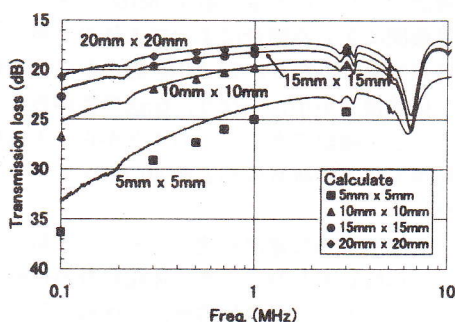


Fig.9 Frequency response vs. Electrode area

図 9 より、電極面積が増加するに従って伝送損失が減

少するが、電極面積がある程度大きくなると、伝送損失の改善がほとんど見られなくなること、すなわち、特性が飽和することがわかる。また、図 9 より、電極面積を小さくすると、特に低周波側の伝送損失が増大する傾向にあることがわかる。従って、電流方式の人体通信では、電極面積を適切に設定することで、人体を比較的均一な伝送特性を持つ伝送路として利用可能である。そのため、システムを設計するにあたり、電極面積は非常に重要な設計パラメータの 1 つであると言える。

人体は、骨、筋肉、皮膚、血管などの複数のこのとなる組織から構成されており、それぞれ、電気的特性が異なっているが、ここでは、主要な構成要素である、骨、筋肉、皮膚についてのみ考えることにする。これらの部位の電気的特性値は表 1 および表 2 に示したが、Table 1 より、皮膚の導電率は他の組織と比較して、周波数に対して大きく変化していることがわかる。皮膚は電極と直接接触する部分であるため、この特性は伝送特性に大きな影響を与えると考えられる。他方、筋肉は周波数 100 kHz から 10 MHz の範囲では導電率が変化しておらず、骨については、約 4 倍程度に増加しているが、筋肉の 1/5 程度の導電率であり、周囲を筋肉に囲まれているため、電流の大部分は筋肉に流れると予想され、人体の伝送特性を考える上では、さほど影響を与えないと考えられる。したがって、人体の周波数特性は、周波数によって大きく変化する皮膚の部分と変化が少ない筋肉と骨によるものとに分離して考えればよい。これを簡略化して考えたものを図 10 に示す。

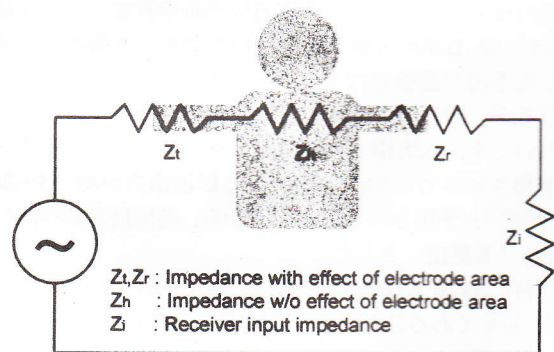


Fig.10 Equivalent circuit

図 10 より、人体によって生じる電圧降下率を計算すると、

$$L = 20 \log \left| \frac{Z_i}{Z_i + Z_h + Z_t(f) + Z_r(f)} \right| \quad (1)$$

となる。ここで、 Z_i は受信機の入力インピーダンス、 Z_h は人体のインピーダンスのうち周波数によって変化しない部分、 Z_t 、 Z_r は人体のインピーダンスのうち周波数によって変化する皮膚による部分である。この部分は、電極面積の影響を受けると考えられることから、送受信電極の面積を A_t と A_r 、電極が接する部分の皮膚の導電率を

S_i および S_r , 皮膚の厚さを d_i , d_r とすると,

$$Z_i = \frac{d_i}{A_i S_i(f)}, \quad Z_r = \frac{d_r}{A_r S_r(f)} \quad (2)$$

と表現することができる. この式の妥当性を検証するため, 図 9 に示す実験パラメータについて, 式(1)及び(2)を用いて理論値を求めたところ, 図 9 のプロット点及び表 3 に示すように, 実験値とよく一致した. ただし, 式(2)において, 皮膚の厚さは 4 mm (成人男性の手のひらの親指の付け根付近の皮膚の厚さ) とし, 周波数の影響を受けないインピーダンス Z_h は 300 Ω と仮定した. Z_h は, 電極面積が 15 mm $\times$ 15 mm で周波数が 700 kHz のとき, 実測値と計算値が一致するように計算し求めた値である. このことから, 図 10 に示す等価回路の正当性が確認できた. なお, 図 9 では, 6~7 MHz 付近に伝送損失の増加が見られるが, 伝送距離を 1.5 m と仮定した場合, 皮膚と空間の誘電率の違いによって生じる波長短縮を計算すると, ちょうど半波長分位相差が生じることから, 空間または皮膚の表面を伝搬したエネルギーとの干渉によって生じた可能性が高い.

Table3 Comparison between calculation value and experiment value ($f=1\text{MHz}$)

Electrode area (mm ²)	Measurement (dB)	Calculate (dB)
25	23.7	25.0
100	19.6	19.8
225	18.2	18.4
400	17.4	17.8

3.4 人体各パート間の伝送損失特性

図 11 に示すように 2 人の被験者が握手をし, A 点で示す被験者 1 の手のひらに 30 mm 角のアルミ箔で製作した電極を取り付け, 次に示す部位に同様の電極を取り付けた場合の伝送特性を測定した.

- A: 被験者 1 の握手していない方の手掌 (送信点)
- B: 被験者 1 の送信電極を取り付けた方の腕の手首
- C: 被験者 1 の送信電極を取り付けた方の腕の肩
- D: 被験者 1 の握手をしている手
- E: 被験者 2 の握手をしている手
- F: 被験者 2 の握手をしていない方の手掌

それぞれの測定点における伝送損失を測定した結果を図 12 に示す. 図 12 より, 伝送損失は, 伝送距離が 50cm を越えるあたりからほぼ直線的に増加していることが分かる. また, 伝送距離が短い場合には, 電極間の結合 α が生じ, 損失が小さくなったものと考えられる.

4. 非接触型電極による通信

4.1 人体と電極の間に絶縁体がある場合

電流方式による人体伝送では, 電極は人体に直接接触していなければならず, 電極と人体の間に衣服などの絶

縁体があると, 通信することができなかった. しかし, 実際に人体通信が利用されるシーンにおいて, むき出しの電極にユーザが触れるというのは, 限定的である. そこで, 電極と人体の間に絶縁体としてポリプロピレン製のシートを挿入し, 容量性結合によって電極と人体を電氣的に接続することができないか, 図 13 に示すような平板電極を用いて伝送損失の変化を調べた. この場合でも, 直流電流は遮断されるが, 交流電流は流れるため, 電流方式という位置付けは変わらない. なお, 伝送区間は両手の手掌間とした.

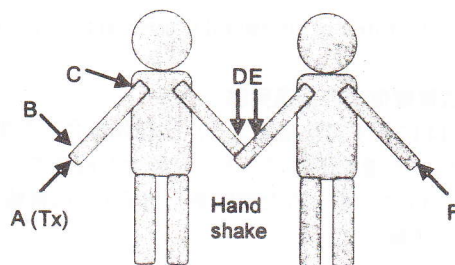


Fig.11 Measurement point

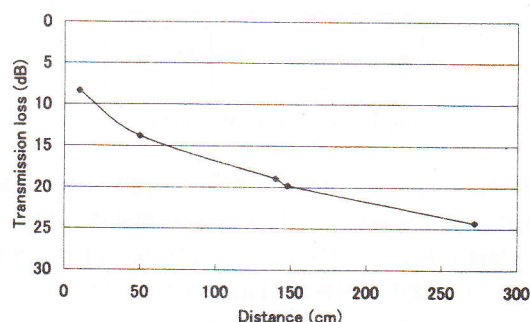


Fig.12 Effect of distance on transmission loss ($f=1\text{MHz}$)

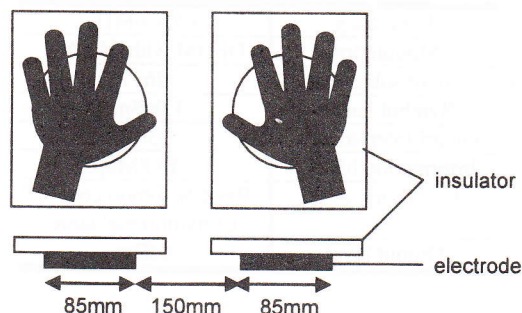


Fig.13 Electrode

縁シートの厚さが伝送損失に与える影響の測定結果を図 14 に示す.

図 14 より, 絶縁体を挿入した場合, 絶縁体の厚みが厚くなるに従って伝送損失が増加し, 周波数特性が劣化していることが分かる. しかし, 絶縁体の厚みが 3 mm の場合であっても, 絶縁体がない場合に比べ低い周波数側で伝送損失が数十 dB 程度増加しているが, 人体に直接電極を接触させず, 絶縁体を介した場合でも人体通信が

行える可能性があることが確認できた。

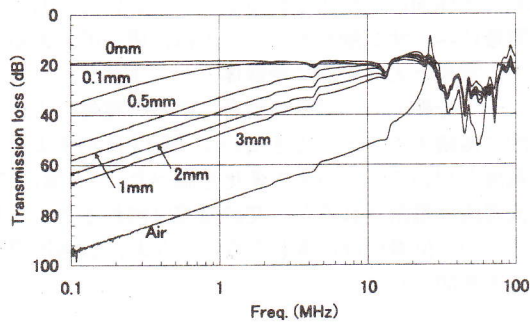


Fig. 14 Effect of insulator thickness on transmission loss

4.2 広帯域信号の伝送実験

図 14 に示す実験結果より、絶縁体を介した場合でも、人体による情報伝送が行える可能性が確認できたことから、図 15 に示すような実験系を構築し、広帯域信号を伝送する実験を行った。

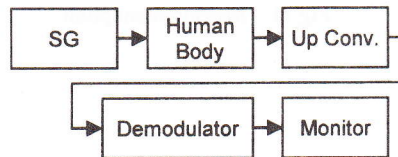


Fig. 15 Experiment system

広帯域信号として、OFDM を用いて変調された帯域幅約 6 MHz、実効情報レート約 16 Mbps の動画像 (ISDB-T 規格に準拠したもの) を利用した。伝送信号は中心周波数 3 MHz の低域中間周波数 (Low-IF) 信号である。伝送実験に用いた広帯域信号の仕様を表 4 に示す。

Table 4 Specification of wide band signal (ISDB-T)

Frequency	300k-6MHz
Modulation	OFDM with 64QAM
No. of sub carrier	5617
Symbol length	1.008ms
Guard Interval ratio	3/4
Information bit rate	16.8Mbps
Error correction	Reed-Solomon coding Convolutional code
Output level	0dBm

伝送信号は、人体を介して伝送された後、復調器の仕様に合わせて周波数変換を行い、映像の復調の可否によって情報伝送の可否を判定した。広帯域信号の変調方式に OFDM を採用した理由は、実際の利用環境を想定した絶縁体を介する非接触型の電極では、周波数 (100 kHz ~ 40 MHz) によって数十 dB 程度、伝送損失に差があるため、伝送特性の不均一に対する耐性が必要であると考えたためである。伝送実験の結果、絶縁体の厚さが 1 mm 以下の場合、ブロックノイズのない動画像が復調できたが、絶縁体の厚さを 1.5 mm とすると、ブロックノイズが頻繁に発生しはじめ、2 mm ではかろうじて映像は得られ

ているが視聴は困難な状態、2.5 mm 以上では全く復調できなかった。これらの結果から、厚さ 1 mm 程度の絶縁体を介した場合でも、OFDM 方式を用いることで実効レート 17 Mbps 程度の情報を人体を介して伝送することができていることが確認できた。また、人体に対して 1 ~ 2 mm 程度の範囲でないと復調ができないことから、高い秘匿性を有していることも確認できた。

5. むすび

人体を伝送路として用いる伝送方式のうち、電流による情報伝送方式について、基本伝送特性を実験的に明らかにした。その結果、電極面積を最適化することで伝送特性を比較的均一にすることができていることが分かった。また、人体と電極の間に絶縁体を挟んだ場合、伝送特性は劣化するが、二次変調方式として OFDM を用いることにより、絶縁体が 1 mm 程度までの厚みであれば 17 Mbps 程度の速度で情報伝送が可能であることが実験により確認できた。また、絶縁体を介す場合には、電極との距離が 1 ~ 2 mm 程度でなければ通信ができないことから、伝送路の高い秘匿性も確認することができた。

参考文献

- (1) Thomas Guthrie Zimmerman, "Personal Area Networks: Near-Field intrabody communication," IBM SYSTEM JOURNAL, Vol.35, NOS3&4, 1996, pp.609-617.
- (2) 藤井勝之, 高橋応明, 伊藤公一, "人体を伝送路として利用したウェアラブル機器のリアルな全身モデルを用いた信号伝送状況の解析," 2006 年電子情報通信学会総大会, B-1-110, March 2006, pp.110.
- (3) K. Fujii, M. Takahashi, K. Ito, K. Hachisuka, Y. Terauchi, Y. Kishi, K. Sasaki and K. Itao, "Study on the transmission mechanism for wearable device using the human body as a transmission channel," IEICE Trans. commun., vol.E88-B, no.6, June 2005, pp. 2401-2410.
- (4) Masaaki Fukumoto, Mitsuru Shinagawa, Toshiaki Sugimura, "A Broad-band Interbody Communication System with Electro-Optic Probe," First international Conference on Appliance Design 2003, 2003, pp.107-108.
- (5) 土井謙之, 西村篤久, "人体を伝送路とする高信頼性通信方式," 松下電工技報, vol.53, no.3, August 2004, pp.72-77.
- (6) NTT, Red Tacton, NTT, <http://www.redtacton.com/>
- (7) J.A. Ruiz, J. Xu, and S. Shiamamoto, "Propagation characteristics of intra-body communications for body area networks," 3rd IEEE Conf. on Consumer Communications and Networking, vol.1, 2006, pp.509-503.
- (8) 電波産業会, "電波防護 標準規格 RCR STD-38 2.0 版," 電波産業会, http://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/1-STD-38v2_0.pdf
- (9) Gamelia Gabriel, Sami Gabriel, "COMPILATION OF THE DIELECTRIC PROPERTIES OF BODY TISSUES AT RF AND MICROWAVE FREQUENCIES," <http://niremf.ifac.cnr.it/docs/DIELECTRIC/Report.htm>