

## パーソナル・エリア・ネットワーク：人体通信

Personal Area Networks (PAN): Near-Field Intra-Body Communication

トーマス ジーマーマン著

(\*Personal Area Network (パーソナル・エリア・ネットワーク、PAN) は、個人のコンピューターデバイス (電話機や PDA を含む) 間の通信のために使われるコンピューターネットワークである。-wikipedia)

(\*人体通信 (じんたいつうしん、英: Intra-body Communication) は、誘電体である人体を通信媒体として利用する通信の形態である。定義上、有線通信や無線通信には該当しない新しい通信方式である。-wikipedia)

### 概要

PAN は、人体上または人体付近の近接場の静電気結合を介して、電子機器とのデジタル情報を交換することを可能にする無線通信システムであります。情報は、電界と静電 (容量) を変調することによって送信される。それは体内にピコアンペアの電流を結合することによって行われます。体に取り付けられレシーバにより、ごく僅かな電流 (例えば、50 pA) を流して行なわれます。環境 (通称「ルームグラウンド」) は、送信信号のリターンパスを提供します。低周波のキャリア (例えば、330 kHz の) が利用されているので、エネルギーが伝播することはない。また、近くにある PAN によって起こる干渉や遠隔盗聴を最小限に抑えることができます。

デジタル情報は、直交検波とキーイングのオン/オフを用いて転送されます。

それは、干渉を低減し、受信感度を高めるためです。低コストの (\$20 以下) の半二重モデムは、アナログ双極性チョッパーを使用して実装されています。

また、直交検波器として積分、信号取得のためのマイクロコントローラなども実装されません。PAN で使用される技術は、最小のサイズおよびコストのカスタム CMOS チップに統合することができます。

### 1. 紹介

#### 1.1 過去の電界検出実証

PAN の開発は、MIT メディアラボの物理学とメディアグループの研究所が、電界検出を適用し、測定を位置決めし始める事から始まっています。グループは、測定および計測の問題解決をしようとしたときに、電界センシングに興味を持つようになりました。教授ニール・ガーシェンフェルド氏は、教授トッドマコーバー氏と共同で、ヨーヨー・マ (有名なチェロ奏者) のチェロの弓の位置を測定するというプロジェクトをしていました。プロジェクトのコンセプトは彼の弓を精巧なマウスとして処理することにより、ヨーヨーの演奏技術を拡張することでした。課題は、ヨーヨーの演奏技術を妨げることなく、2つの軸

で弓の位置を測定することでした。得られた結果は、低周波無線信号を（～50 キロヘルツ）チェロの本体に取り付けられたアンテナへ流れました。また近接場信号の強度を測定し、弓<Gershenfeld93>に沿って、抵抗ストリップの両端に（～10メガオーム）が取り付けられました。センシングを無線にするために、それは、電界に手を置くことで、劇的に受信された信号を減衰させることが発見されました。この観察から生まれた検知メカニズムは[Zimmerman の 95]に記載されています。

## 1.2 ワイヤレスネットワークの動向

ワイヤレスネットワークの研究は歴史的には、赤外線（IR）光技術と無線伝送に注目されて来ました。前者は視線制限の問題を抱え、後者は FCC の規制での問題を抱えています。1985年に FCC は、産業、科学、および医療用アプリケーション向けに、ISMバンドと呼ばれるいくつかの周波数帯域を公表しました。ISMバンドは、周波数ホッピングとダイレクトシーケンススペクトラムの拡散送信機用の1ワットまでのピークパワー出力ができます。ISM周波数帯域は902-928 MHz、2.2835-2.4、および5.725-5.85 GHzを含みます。ワイヤレスネットワークのパフォーマンスのための標準的な基準は、メッセージのビットレートです。カーンは、無指向性のIRを使用して、最大100Mbpsまでのデータレートを獲得することが可能であることを示す分析を発表しています。現在のIRシステムは、最大4 Mb/秒まで行います。カーンシステムは、壁やオフィスの天井（部屋75立方フィート当たりの各電力の消費は約1ワット）に位置する赤外線レーザーダイオードを使用することを提案しています。送信機は大量のエネルギーが必要ですが、受信機は、送信機電力の分数で動作することができます。典型的には、モバイルユーザはキーストロークと、デバイス情報を送信し、それらは2400ボーモデムに対応することができます。この非対称性は、低電力モバイルコンピュータモデムを選んで、うまく動作します。ラジオ無線LANの第一世代は、静止ワークステーションを相互接続するために設計され、LANの拡張として特色づけられました。-またそれは、主電源から供給された約20ワットを消費します。現在の無線LANの世代は、ISM帯域でのスペクトル拡散を使用します。20メガビット/秒という高いデータレートを達成します。

## 1.3 PAN (パーソナルネットワーク)の動機

電子機器の小型、低消費電力化、低価格化になるにつれて、私たちは、個人情報や通信機器で自分自身を表現し始めています。これらのデバイスは、携帯電話、パーソナルデジタルアシスタント（PDA）、ポケットビデオゲーム、コンピューターパッド、小型コンピュータ、ポケットベルなどを含みます。現在、これらのパーソナル電子機器を相互接続するための標準的な規格/方法はありません。PAN (パーソナルエリアネットワーク)は、これらの個人的なデバイス機器を相互接続するための手段であります。

### 1.3.1 WAN ⇒MAN ⇒LAN ⇒PAN

ワイドエリアネットワーク（WAN）は、マイクロ波、電波、同軸ケーブル、及び光ファイバを使用して、コンピュータを遠隔接続します。メトロポリタンエリアネットワーク（MAN）は、都市内のコンピュータを接続します。ローカルエリアネットワーク

(LAN) は、オフィスビル内のコンピュータを接続します。この論文は、パーソナルエリアネットワーク PAN の新しい概念を紹介しています。これは、人体の近くの近接場の静電結合を介してデジタル情報を交換することを可能にする無線通信システムであります。ニール・ガーシェンフェルド氏によって開発された著者[Gershenfeld95A]。その通信システムは PAN と呼ばれ、コンピュータネットワーク業界の開発/進展の進化を印象付けるものでした。そして、身体に、または身体の近くに装着する、パーソナルコンピューティングと情報家電製品として、注文を集めるでしょう。データ送受信のための PAN 通信技術を使用するデバイスは、PAN デバイスと呼ばれます。

### 1.3.2 Interconnectivity Reduces Redundancy (相互接続は、冗長性を削減します)

腕時計、ポケットベル、携帯電話、カセット/FM プレーヤー/レコーダー、PDA、そしてノートブックコンピュータを運んでいる人は、5つのディスプレイ、3つのキーボード、そして2つのスピーカー、2つのマイクロフォン、および3つの通信デバイスを持っていることになります。入力/出力 (I/O) の2つの機能付きデバイスは、デバイスがデータを交換できないことへの結果になります。これらのデバイスはすべて、いくつかの論理演算処理装置、一般的にマイクロプロセッサを含んでいます。適切なネットワーク構造により、これらのデバイスは、計算リソースを共有することができ、いずれかの分散計算を行います。主のプロセッサにとって計算が大量で追いつかない時に、より特別で大容量のサブに頼ることになります。リソースを共有する能力は、連絡容量及び、システムの複雑さによって調整されています。

### 1.3.3, 偏在するコンピューター 対 ディストリビューション I/O

個人情報データを共有する機器はその有用性を増大させることでしょう。独立したデバイスでは不可能なだった機能を提供します。多くの場合、これらの新しいデバイスが、ユーザの意図とユーザの欲求を満足させるマシン/システム間に、インターフェイスになります。将来的に人は”私の最初の会議はいつ?”と呼び出すだけで最初の会議の時間を見つける事が出来ることになるかもしれません。彼女のシャツの襟や時計でマイクが、彼女の環境での無線トランスポンダの一連の彼女の声を伝えることになる(例えば、靴、机、テーブル、椅子)彼女のカレンダーを検索し、彼女の襟のスピーカーまたは彼女の時計の視覚表示にトランスポンダのリモート音声認識コンピュータネットワークを介して応答を返します。相互接続されたデバイスの自律機能、分散型の入出力 (I/O) のユビキタスコンピューティングの概念を変換することができます。デバイスは、ポータブルかつ継続的に静止したデータベースおよびコンピューティングマシンにネットワーク接続されている場合、コンピュータは、ポータブルである必要はありません。分散ネットワーク計算資源のこの概念は、「(計算)クラウド」と呼ばれています。

### 1.3.4 外部の世界との通信

相互通信するために身体ベースのデバイスを使用できるようにすると、外部の有線の世界への通信チャンネルをサポートする負担を軽減します。もし1個のPANデバイスが、すべての身体ベースのPANデバイスと通信することが可能な場合、そして有線ネットワーク

に接続された場合、すべてのボディベースのPANデバイスは、外の世界と通信することが可能になります。

外の世界とコミュニケーションする身体ベースのPANデバイスは、

A)すべてのPANデバイスで、その時に1番届く最適なPANデバイスが繋がる。

B)位置的によくPANデバイスが繋がりやすい場所/環境、例えばシューベースのPANデバイスなど。

C)従来の無線ベースまたは赤外線ベースのトランシーバを搭載したPANデバイス。

## 1.4 静電赤外線通信の比較

赤外線通信は、視野に入る事に依存しているため、財布、またはポケットに配置することができるデバイスには適していません。赤外線は、静電気により高い帯域幅を提供します。光搬送波周波数は、PANデバイスキャリアよりも桁違いであることを意味します。一方で赤外通信は、高い光パワーの広角ビームを受信するために数百ミリワットも生成しなければなりません。静電結合されたPANデバイスは、数ミリワットの電源で動作することが可能です。

## 1.5 静電RF(電波)送信の比較

PANデバイスの物理的な通信チャネルとしての静電結合の競争相手は、無線伝送であることは間違いないでしょう(電磁波の伝播)。ラジオ波エネルギーの伝播の主な利点は、静電結合と比較して、より高い帯域幅と長い範囲があります。ある人は、静電結合を無線の低周波数端と検討するかもしれません。無線送信機への任意の受信機へのエネルギーの結合機構は、実質的に静電及び静磁の波長の範囲であります。(ニアフィールドまたは誘導性のフィールド領域) [Weston91, Mills93, Ramo94]. PANデバイスの作動距離を考慮すると、2メートル未満であります。無線送信機の搬送波周波数は、ファーフールドを操作するために150メガヘルツを超えることが必要であろう。

### 1.5.1 アンテナサイズと効率

PANデバイス近接場通信と無線周波近接場通信の基本的な違いは、通信が明確にアンテナの設計で実証されています。静電結合を最大にするために、電極面積が最大化されます。静電結合を最大にするために、電極面積が最大化されます。放送送信機の信号を強度最大にするために、送信機の電気インピーダンスは、自由空間のそれに一致しています。送信された電磁波の強度は、アンテナ電流の関数であります。最大アンテナ電流は、共振時のアンテナを操作することによって達成されます。周波数が0になるときの反応です。共振

を達成するための最短のアンテナの長さは、波長の半分の長さです。一般的な PAN デバイスは長さ 25~80 ミリメートルのオーダーであることを考慮すると、(SIZE を参照) 3.75 ギガヘルツを超えるキャリアが必要とされるであろう。インダクタは、電気ショートアンテナを補償するために整合回路網として使用することができ、アンテナの帯域幅を減少させるにもかかわらず、整合ネットワーク内の電力消費を増加させます。

### 1.5.2 インターフェレンス (干渉)

放射線の性質は、停止するまで無限に伝播することで、二次的に脱落した電界強度を持ちます。(遠視野領域で) 電磁スペクトルは混雑しています。そのほとんどは人の手によるものです。FCC 規格の第 15 部では、限られた電力および帯域幅の無免許放送局を許容にします。周波数帯域は、例えば 900MHz 帯を使用する携帯電話のような消費者製品に開放されたときに、干渉が考えられます。公共交通機関、エレベーター、キューイングライン、会議、講堂のように一緒に小さなスペースで多くの人々がいることは決して珍しくはありません。このような状況下では、PAN デバイスが隣接の PAN システムからの干渉で不具合が起きる事への失敗は許されません。多くの規制のない放送局の運営課題は、無線 LAN の設計者が直面しています。新興ソリューションは、スペクトルエチケットの一つであると思われます。それは「あなたが送信する前に聞きます。」を促進する、そして、あなたのリスナーによって聞かれるのに必要な電力を送信する。近接場領域内の電界は、距離乗で低下します。これは本質的に短距離通信に限定電界の放射非を行います。静送信機と受信機の電極は、大きな表面積を有することにより、最適化されています。それにより、遠くの送信機の間で少しの干渉、そして無視できる伝送及び電磁放射の傍受があります。複数の隣接 PAN システムは大幅に重なるため、周波数、時間、またはコード分割で同時に実行する可能性があります。放射トランジスタは、基本的に意図したレシーバー以外は汚染されます。このようなポケットベル、携帯電話、無線電話などの無線機器使用者の数は、劇的に増加しています。それでもまだ、電磁スペクトルは有限な資源のままです。したがって、同等以上の伝送メディアの選択肢を持っている通信チャネルは混雑を避ける為に、それらを選択する必要があります。個人の通信デバイスが、時計やクレジットカード程に一般的になった場合、近距離無線通信は、電磁汚染の劇的な増加を回避することができます。

### 1.5.3 FCC 電界強度の規制

FCC は、電子機器を、意図的または意図的ではない放射器として分類しています。電卓は、意図的でない放射器である一方で、ワイヤレスマイクは意図的なトランスミッタです。PAN 機器は、意図的にパワーを放射しません。その通信は、近接場結合に基づいていません。すべての電子機器は、FCC の排出規制を遵守しなければなりません。FCC の仕様説明の第 15 部は、以下の表にまとめた電子機器の許容電界強度を示しています。

Freq. (MHz) Field Strength 0.009-0.490 2400/Freq. 0.490-1.705 2400/Freq.

1.705-30 30 30-88 100 88-216 150 216-960 200 >960 500

(uV/m) (kHz) (kHz)

Distance (meter) 300

30 30 3 3 3 3

FCC パート 15 の仕様で、典型的な PAN 送信機の遵守を確認するには、電界強度は、双極子遠視野によってために定義されている距離  $r$  に対して、フィールドポテンシャル場を微分することによって見出されます。

$$V_{\text{field}} = (P/4\pi\epsilon)(1/r^2)$$

双極子モーメント  $P$  ( $P = Qd$  の) は、平行平板コンデンサとしての電極を近似することによって推定されます。距離が離れて  $D$ 、および  $V_{\text{osc}}$  のは、プレートの両端の電圧である関係  $Q = CV_{\text{usd}}$ 、によってプレート上に得られた電荷  $Q$  を計算します。(共振送信機用の典型的な) 30 ボルトで 330 kHz で送信し、80 ミリメートル×50 ミリメートル×8 ミリメートル (厚さのクレジットカード) を測定する典型的な PAN 送信機は、FCC 許容電界強度以下の 86 デシベル 300 メートルで 344 PV/メートルの電界強度を持っています。近似は、PAN 送信電界強度が FCC によって許可されたものより、低い桁であることを示すのに十分です。

放射ネットワークの開発は、FCC のライセンス要件によって遅延されています。後半 1970 年のヒューレット・パッカーは、無線端末間のネットワークングのために直接シケンススペクトラム拡散伝送実験を始めとし、スペクトラム拡散通信の商業的使用のためのいくつかのスペクトルを解放するように FCC に請願しました。研究の 4 年後、FCC は、1985 年に [Pahlawan95] ISM バンドをリリースしました。静電結合された PAN 装置の使用は、FCC ライセンスがなくても、すぐに始めることができます。パート 15 の PAN 送信機の承認は、小さな電界強度発生のため、簡単である必要があります。

#### 1.5.4 盗聴

無線送信機は、エネルギーを伝播します。これは放送の性質である。シグナルの強度は (無指向性) ラジエータからの信号強度は距離により減退するのと、ラジエータは球体の表面を「照明」させます。PAN デバイス間で通信されるデータの一部は、敏感な性質のものであろう。例えば、クレジットカードや電話番号、クライアント・ノート、日記、ビジネスコミュニケーション、およびコンピュータのパスワードなど。無線システムは、追加の処理オーバーヘッドによって、暗号化、安全化する事が可能ですが、最高のセキュリティは <傍受されることのないメッセージ> です。静電結合は、他の一方で、電磁エネルギーを伝播しません。電界強度は距離の三乗によって減退します。双極子電荷のフィールドのキャンセルに結果的になります。静電結合 (距離の二乗対乗) との大きな信号減衰は、遠い距離で検出する静電結合された信号をより困難にします。例えば、1 メートルを基準に 300 メートルで、静電結合された信号強度は、同等の信号を放射よりも 50 デシベル小さくなっています。

送信機と盗聴者間の距離が十分に大きい場合、傍受信号強度は、メッセージの受信は、非常に困難、熱雑音よりも小さくなります。前節、FCC 電界強度の規制では、典型的な PAN 送信機は 300 メートルで、信号強度未満 400 PV/メートルを持っていることが示されました。非常に高いインピーダンス (例えば 10<sup>12</sup> ~ 10<sup>9</sup>) は、小さな電位を測定する

必要があります。、ある熱雑音（ジョンソンノイズ[Horowitz94]としても知られています）ケーブル共鳴現象と非理想的なオペアンプの性能に示されるように、室温で1M抵抗の300メートルでメートルを横切る電場電位よりも5桁大きい41UVになります。別の言い方をすれば、10Kオームと10kHzの帯域幅の入力インピーダンスを持つ理想的なアンプ（ノイズなし）は300メートルで、PAN信号を受信するために1度ケルビン未満で動作する必要があります。距離減衰の信号の固有のセキュリティに加えて、LAN通信に使用される同じセキュリティ手段がPAN系で使用することができます。

### 1.5.5 パワー

電子部品で消費されるエネルギーは、起因容量S3を放電発生による損失に周波数とともに増加します。無線送信PANデバイスを効率的に伝送するために、メガヘルツ～ギガヘルツの周波数で実行する必要があります。情報を含むために必要なものを超える搬送波の周波数の増加は、本質的に無駄になります。静電結合は、非常に低い周波数（0.1から1MHz）で動作することができます。短い距離（<2メートル）、低帯域幅（<100キロビット/秒）は通信用の高周波無線伝送よりも、それらは本質的に、より効率化します。例えば、10 pfの電極の静電容量を持つ30ボルトで330kHzで動作するPANシステムのプロトタイプでは、1.5 mWのは、電極容量を放電に消費されています。このエネルギーの大部分は、電極容量とインダクタとの間の共振タンク回路を作成することにより、（リサイクル）に保存することができます。（トランスミッターのパワーのブーストを参照）

### 1.6 ネットワーク規格

ネットワーク接続された通信システムを定義する際に多くの選択肢とトレードオフがあります。PANシステムは、静電場を用いて、人体通信の設計とエンジニアリング問題のいくつかを探求する最初の試みです。実用的かつ有用であるために、通信規格を開発する必要があります。TCP/IPプロトコルは、2000万人以上の人々が電子的に世界中に分布する様々な種類のコンピューター同士を通信することを可能にします。MIDI（ミュージカルインストルメントデジタルインターフェース）規格は、電子音楽スタジオを統合し、コンピューターを何百もの楽器を、例えばドラムマシン（リズムマシン）やキーボードまで、接続通信させることを可能にします。同様に、個人情報機器のための標準は、有用性との相乗効果を高め、これらのデバイス間の冗長性を低減するために開発される必要があります。論文でのPAN送受信技術がコンピューター・システムを既存の中に組み込むことができる方法を理解するためには、ネットワークの規格を確認することが重要です。国際標準化機構（ISO）は、コンピューターの通信機器間の相互運用性を促進するためのネットワーク規格を開発するために1977年に小委員会を結成しました。小委員会は、通信機能のための7層モデルを指定し、1984年に発表した報告書、ISO7498を、発行しました。ISOネットワーク規格は、既存のコンピューターシステムにPANデバイスを組み込むための明示的な手段を提供します。モデルは、各レイヤーの機能はそれぞれの層が独立して開発することを許容し、それぞれが一緒に動作することを保証します。第一層は、物理層です。電氣的仕様は、通信媒体を横切って構造化されていないビットを転送します。第二層は、同期とフレーミング技術により信頼性の高いデータ伝送を提供し、データリンクを確立しました。第3層は、使用される特定の物理的およびデータリンク技術の独立した上位層ネットワーク提供します。7番目と最後の層、アプリケーション層は、例えば、ファイル転送などのユーザにサービスを提供します。論文は、主に、通信チャネルの電氣的特性を検査することは、第1の層、物理層に関するものです。第二層は、信頼性の高い情報の

リンクを確立することは、静電的に結合された PAN デバイスのワーキングプロトタイプを実装するために行なわれます。ISO ネットワーク規格は、アプリケーションへの PAN デバイスを接続するための第三の層を現像することにより、アプリケーションに PAN 装置を組み込むように設計されたシステムを可能にします。体内ネットワークアーキテクチャの上位レベルの作業は現在、MIT でメディアラボ教授マイケル・ハーレイと彼の個人的な情報アーキテクチャグループによって行われています。論文は、ジーマン 95 で説明した MIT のメディアラボの物理学とメディアグループで行った電界センシングに関する応用研究の産物です。論文は、ジーマン 95 で説明した MIT のメディアラボの物理学とメディアグループで行った電界センシングに関する応用研究の産物です。

## 1.7 論文の概要

彼の論文は、PAN の電氣的性質を模索し、物理層で始まります通信チャンネル、回路モデルを開発し、実験的に測定して回路モデル成分値を定量化します。サイズ、コスト、消費電力およびデバイスの位置を含む物理的な設計上の問題が、次に考えられます。

システムの物理的制約を確立後、変調及び符号化戦略が検討されています。特に注意が、スペクトルを拡散するために与えられています、共振器を用いた広帯域変調技術、および狭帯域伝送両方共にの PAN 通信に適しています。注意はそれから PAN プロトタイプを理解するために、ハードウェアとソフトウェアの開発の実際的な問題に変わります。特に、回路設計、プログラミング、および開発環境になります。実験は、スペクトル拡散とオンオフ振幅キーイング (OOK) 変調技術を模索して行われます。これらの実験は、PAN 機器の装着者が握手することによって、名刺を交換することができ、動作するプロトタイプの構築につながります。PAN デバイスのプロトタイプを開発した経験は、今後の研究の章で提起されているそのうちのいくつかは、多くの未回答の質問を、発生させます。仕事関連のセクションでは、電界 (EF) の感知に関連するいくつかの研究開発成果が含まれています。特に、評価用ボードおよびトランシーバの設計、および EF センシングのケーブル容量や湿度の影響など。

## 2. PAN システムの電気モデル

### 2.1 電氣的インピーダンス断層撮影

PAN 送信機と受信機は人体を通信路として利用する。PAN システムを設計・評価するためには、通信路の特徴を決定する必要がある。人体の電氣的特性に関する広範な文献は存在する。電氣的インピーダンス断層撮影 (以下 EIT) は、身体組織の抵抗率を測定することによって内臓や身体の構造をイメージ化しようとする [Webster 89]。通常 EIT では、身体に多数の電極 (たとえば、24 個の電極) を取り付け、その中のひとつの電極 (送信機) に定電流を流し、残りの電極 (受信機) の電位を記録する。送信機と受信機の電極のあいだには組織のインピーダンスがあるため、電位が発生する。電極を配列することによって、いくつかのインピーダンスの測定値が集められる。これらの測定値をコンピュータ処理し組織のインピーダンスを再構成すると、臓器や組織の低解像度のイメージが形成される。

## 2.2 哺乳動物の抵抗率

Barber と Brown[Barber84]は、哺乳動物の組織の公表抵抗率を調査した。彼らの報告では、人間の腕の抵抗率は、縦方向で  $2.4 \Omega \text{m}$ 、横方向で  $6.75 \Omega \text{m}$ であった。肺組織においては、間質液および細胞内で  $1.6 \sim 51 \Omega \text{m}$ が算出された。血液の抵抗率は  $1.5 \Omega \text{m}$ で、脂肪の抵抗率は  $12.75 \Omega \text{m}$ と報告されている。抵抗率が一番高かったのは濡れた牛骨で  $166 \Omega \text{m}$ であった。あらゆる組織で報告されている抵抗率はいくつかの要素により変動する可能性があるが、人体の大部分の抵抗率は  $10 \Omega \text{m}$ 以下であることは確かである。というのは、腕の抵抗率は  $7 \Omega \text{m}$ 未満であり、体中を巡る血液の抵抗率は  $1.5 \Omega \text{m}$ であるからである。

## 2.3 人体は完全な導体に近い

人体（皮膚下の）の内部抵抗  $R$ を算出するためには、 $R=r(L/A)$ という公式を利用する。抵抗を  $R$ 、抵抗率を  $\rho$ 、導体の長さを  $L$ 、導体の断面積を  $A$ とする。身長  $2 \text{m}$ の成人男性で、平均直径が  $0.3 \text{m}$ 、平均抵抗率が  $10 \Omega \text{m}$ であれば、抵抗値は  $251 \Omega$ と計算できる。低い体内の抵抗は、皮膚や空気、衣服によってPANデバイスの電極から絶縁される。皮膚、空気、衣服の抵抗を集めればメガオーム、ギガオームといった大きなインピーダンスを生じるからである。体に取り付けた電極のインピーダンス（メガオームやギガオーム）と比較すると、人体は完全導体と考えることができる。

## 2.4 PAN通信の基本概念

一般的な条件下では、PAN送信機は周囲環境の電位を摂動させ、受信機はその摂動を検出する。この通信メカニズムについて別の言い方では、送信機は受信機に容量結合している、という。非放射信号が送信機から受信機に流れるためには、電流の復路が用意されねばならない。送信機は、人間の体を通して送信機と容量結合する。その復路は、図1に示しているように、空気（誘電体）と地面（誘電体と導体の混合）である。地面は、PANデバイスに近接する周囲環境にある導体および誘電体の混合を意味する。電界は距離の3乗で低下する（理想双極子場の場合）ので、近接していることは重要である。

送信機と受信機の電極は、コンデンサ板とその間にあるすべてのものとしてモデル化できる。金属は効率的にコンデンサ板をを接合しキャパシタンスは増加する。電圧  $V$ が与えられれば、誘電体があることにより大きな電荷  $Q$ はコンデンサ板に蓄積し、キャパシタンスも増加する ( $C=Q/V$ )。周囲環境の導体には、金属の家具、ワイヤ、配管、強化棒、金属性壁スタッド、事務機器、通風ダクト、水、地面などがある。周囲環境に存在する誘電体には、空気 ( $\epsilon=1$ )、木製品 ( $\epsilon=3 \sim 4$ )、乾いた地質物質 ( $\epsilon=4 \sim 8$ )[Kearey91]、ガラス ( $\epsilon=4 \sim 10$ )、プラスチック ( $\epsilon=2 \sim 10$ )、ゴム ( $\epsilon=3 \sim 7$ )、水 ( $\epsilon=78$ )などがある。周囲にある物質は人体から電氣的に絶縁する必要がある。というのは、人体と復路の間にいかなる結合

があってもカレントループを短絡させてしまうからである。このことは、我々が通信路の電気モデルを調査するとき明らかになるであろう。

## 2.5 通信路の集中モデル: 対称性の破れ

PAN デバイス通信の基本原理は、送信機電極と受信機電極の間のインピーダンスが低いときに存在する対称性を破ることである。図 2 は PAN 送信機、受信機とそれらの電極間の容量結合を表わしている。送信機（発振器）と受信機（差動増幅器）はバッテリー駆動の 2 つの端末デバイスである。2 つのデバイスはそれぞれ局所電氣的グラウンドを有しているが、お互いに電氣的に絶縁されており、したがって共通の電氣的グラウンドは共有していない。

4 つの電極（送信機、受信機双方とも）の間には重要なインピーダンスが 4 つ存在する。送信機電極間の電極内インピーダンスは送信機に対する負荷を表わすが、送信機発振器は理想電圧源として扱われるので電極内インピーダンスは無視する。受信機の電極内インピーダンスは、受信機電極を同じ電位で維持しようとする電流増幅器によって占められており、受信機電極板間のインピーダンスは低いので、これも無視する。送信機と受信機の電氣的通信を理解するために、問題となっている 4 つのインピーダンスに、A,B,C,D の記号を付加している。

4 つのインピーダンスは、実際の（抵抗）部品かもしれないが、純粹にリアクタンス性のもの（キャパシタンス）として表わされる。PAN デバイス通信が 4 つの電極の対称性を破ることによってどのように機能するかを示すために、回路は再配置してある。回路はホイーストブリッジであり、 $A/B=C/D$  の関係に不均衡があれば電位が生じ、電流が受信機に流れる。回路をゼロにするためには  $A/B$  と  $C/D$  の比が正確に等しくなければならないが、体に取り付けた PAN デバイスは常時動くので、受信機がインピーダンスの不均衡を検出できる感受性を持つ限り、常に電氣的通信路が存在することになる。

## 2.6 PAN デバイスの電界

このシステムのすべての電界路を特定することによって、PAN 電気通信のより詳細な電気モデルが説明できる。電界は異なる電位で体中に存在する。図 3 は、PAN 送信機が受信機と通信する電気モデルを表わしている。PAN 送信機 T は、電氣的に絶縁した 2 つの電極の間に振動する電位を発生させる。発振周波数は 1 MHz 未満（波長 300 m 以上）で、電極のサイズはセンチメートルのオーダーである。よって、エネルギー放射は認識されない。PAN デバイスの周囲にあるすべての物体は、電氣的に中性（静電的電位も交流電位もない）であるか、あるいは少なくとも PAN 送信機と全く同じ電位（周波数、位相、振幅）は持っていない。

周囲環境に近い方の電極と体に近い電極とを簡便に言い表すために、周囲側電極 e と体側電極 b の概念を導入する。これらの間に元々の相違はない。すなわち、送信機または受信機の周囲側電極と体側電極を逆にすれば、送信信号と受信信号それぞれに 180 度の位相変化が生じる。一方の電極は体に極めて近くに配置し（体側電極 b）、他方の電極は体から離すように（周囲側電極 e）PAN デバイスを設計する。PAN 送信機体側電極 tb と人体の間に電界 C が形成される。人体は、部屋電位から電氣的に絶縁された完全導体としてモデル化され、コンデンサの大きな板のように機能し、送信機によって充電されたり放電したりする。人体に充電すると、その周囲とのあいだに電位が生まれ、人体と周囲環境との間に電界 E が発生する。人体の電位は、人体と送信機周囲側電極 te の間に電界 B を形成する。

送信機周囲側電極 re では、人体側より周囲側の方がインピーダンスがより小さく、それに対応して、体側電極 rb では周囲側より人体側の方がインピーダンスが小さい。この非対称により、受信機は人体と周囲の間の電位差を検出できる。人体の電位は、送信機体側電極 rb に対して電界 F を作り出す。受信機 R の回路は、受信機周囲側電極 re を受信機体側電極 rb と同じ電位に維持し、受信機回路は小さな電流を計測する。体側電極 rb の振動電位が周囲側電極 re 上に維持され、周囲環境との間に電界 G を形成する。實際上、受信機は両電極を正確に同じ電位に維持することはできないので、人体と周囲側電極 re の間に小さな電界 H が発生する。

## 2.7 通信路の電氣的モデル

### 2.7.1 集中回路電氣的モデル

図4は、図3で図示した電界の回路と同等の回路である。人体は完全な導体ノード（人体ノード）として表わされる。Aは、送信機周囲側電極 te と周囲側グランド電位の容量結合を表わす。Bは、送信機周囲側電極 te と人体の容量結合である。Cは、送信機体側電極 tb と人体の容量結合である。Dは、送信機周囲側電極 te と周囲環境との容量結合である。Eは、人体と周囲環境との容量結合である。Fは、人体と送信機体側電極 rb との容量結合である。Gは、受信機周囲側電極 re と周囲環境グランドとの容量結合である。

この電氣的モデルでは、周囲環境 E に対する人体のキャパシタンスは PAN デバイスの通信性能を劣化させ、すなわち送信機が人体に加えようとする電位を接地し短絡してしまうことが明らかとなった。ある実験では、電極キャパシタンス計測に限った条件のもと、スニーカーを履いている被験者の左手首の送信機から右手首にある受信機に電流が容量結合している。被験者が裸足のとき、計測された変位電流は-12dB 弱められ、グランドワイヤが被験者の額に付着されているとき、変位電流は-28dB になった。この計測結果により、たとえば PAN デバイス装着者が地中に埋まった水道管を握れば、PAN デバイスの性能が悪化することが示唆されている。

電氣的モデルは、足が PAN デバイスを装着するのに最も適した部位であることを示している。すなわち、体側電極と周囲側電極は、人体と周囲環境に最も強く結合する。このことは、PAN 通信の「最も弱いリンク」である（最もインピーダンスが大きい）周囲側電極について当てはまる。大きな面積の周囲側電極を地面にできるだけ近く（通常、靴が位置する）に置けば、信号通信の大きさは最大になる。詳細はスニーカー・パワーの節で説明するが、靴は歩いている最中に発散されるエネルギーを捉える理想的な部位でもある。

## 2.7.2 人体キャパシタンス計測

電氣的モデルのキャパシタンスの典型的数値のいくつかが図 4 に示されている。周囲環境に対する人体のキャパシタンス  $E$  の数値は、人体に平行なコイルの共振周波数を計測することによって経験的に決定される。人体の周囲環境に対するキャパシタンスは、絶縁体によって隔てられた 2 つの電極板で構成されるコンデンサと考えることができる。すなわち、空気や他の絶縁体が誘電体であり、人体は 3 次元の大きな電極板、周囲環境は巨大な電極板である。人体の周囲環境に対するキャパシタンスは、人体の形状（大きさと形）、周囲環境との空間的關係、周囲環境の構成に依存する。電氣的に接地された導体に触れれば、電極板間の距離が効果的に減少することによって人体のキャパシタンスは増加する。皮膚は死んだ細胞と脂質膜に覆われ水分で満たされた細胞から構成されており、絶縁体、誘電体として機能する。絶縁体である皮膚が、抵抗の小さい組織や導体である血液を覆っている。人間が接地された金属に触れれば、体内の導体（血液や組織）は外部の導体（接地された金属）に近づく。たとえば、電氣的に絶縁された人間の場合、体のキャパシタンスは 107 pf である。同じ人が電氣的に接地された端子をつかめば、体のキャパシタンスは 845 pf に上昇する。

体のキャパシタンスは分析的に計算できる。簡単な方法は、人体を球体として近似し、人体の形状モデルの低次モーメントを近似計算することである。絶縁された帯電球体は放射状に拡散する一様な電界を生成する。この単純化によって、同様に単純な結果が生じる。すなわち、半径  $R$  の絶縁された球体のキャパシタンス  $C$  は、自由空間の誘電率を  $\epsilon$  とするとき、 $C=4\pi\epsilon R$  である。人間を半径 1 m の球体として捉えた場合、キャパシタンスは 111 pf になる。人間が半径 1 m より小さくても、人体が絶縁されていないことで相殺される。すなわち、ゼロ電位の位置は無限よりはるかに近く、周囲環境のグランド電位を構成するすべての導体によって構成される。正確な解がほしいならば、ラプラス方程式を使い体のまわりの電位を計算する必要があり、体を覆う表面にはガウスの法則を適用し体表の電荷を計算しなければならないであろう。

## 2.7.3 電極キャパシタンス計測

ロックイン増幅器を用いて電極のキャパシタンスを計測する。通信路インピーダンス  $Z$  が決定され、発振器周波数を  $F$  とするとき、キャパシタンスは  $C=1/2\pi FZ$  の式で求められる。すべてのインピーダンス  $Z$  は、純粹にリアクタンス性のもの（キャパシタンス）と扱われるので、問題をリアクタンス性インピーダンスのネットワークとキルヒホッフ、オームの法則の適用に還元することができる。その計測技術とは、ロックイン増幅発振器から 5 V、

## 第172回NPOテクノロジー犯罪被害ネットワーク定例会資料

100 kHz の正弦波信号を送信機電極に加え、送信機電極で変位電流を計測するというものである。

回転に対する感受性を取り除くために、直径 25 mm の送信機・受信機円形電極が用いられる。4 cm×4 cm×1 mm のプラスチックシートを電極と皮膚の間に置き、インピーダンスが完全にキャパシタンス性（実際の抵抗部品ではない）であることを確認する。バッテリー駆動の電流増幅器を受信機電極で用いて、ケーブルのあらゆる容量性効果を消去した。

人体キャパシタンス計測の中で説明したように、最初に人体の地面に対するインピーダンス  $Z_{e8}$  を測定した。人体の電極に対するインピーダンス  $Z_c$  と  $Z_f$  は電極が同じサイズ（直径 2.5 cm）であることから、等しいものと仮定する。 $Z_c$  と  $Z_f$  を測定するため、送信機電極を被験者の一方の手首に着け、受信機電極を他方の手首に装着した。電極は、手首関節の 30 mm 上に装着しベルクロテープで固定した。ロックイン増幅器は低抵抗グラウンドを提供したので、インピーダンス  $Z_d$  と  $Z_g$  はゼロオームとする。人体ノードの電圧は、キルヒホッフの電圧法則を用いて計算し、そうすることでインピーダンス  $Z_f, Z_h, Z_r$  を通じて電流を計算することができた。

グラウンドインピーダンス  $Z_d, Z_g$  の外部電極は、送信機発振器と送信機電極のあいだに取り付けた  $1\text{ M}\Omega$  の抵抗器の電圧低下を測定することによって決定した。オームの法則を用いて結果として生じる変位電流を計算した。変位電流と電圧がわかったので、グラウンドインピーダンスの送信機電極をオームの法則を用いて計算した。

図 1. PAN システムのブロック図。情報は、人体に容量結合する電界を変調することによって符号化される。人体には、きわめて小さい信号（ピコアンペア）が流れ、信号を復調する受信機に到達する。地面は信号の復路になる。

図 2. 電氣的集中型 PAN 送信機（発振器）と受信機（差動増幅器）。キャパシタンスの複雑なインピーダンスは再構成されホイーストブリッジ配列を表わしている。ブリッジに不均衡が生じれば受信機に電流が流れる。

図 3. PAN 送信機 T が形成する電界。電界 G の一部が受信機 R に達する。

図 4. PAN システムの電気モデル。送信機 T は、人体（完全導体としてモデル化されている）を通して受信機 R と容量結合する。地面は信号の復路を提供する。

5 グランド電極は、1" の銅テープと伝導性接着剤を用いて被験者の額に装着されている。被験者は著者で、身長 6.2 フィート、体重 210 ポンド。

6 浮遊容量を説明するため、33.5  $\mu\text{H}$  のコイルの共振周波数ははじめに測定する。その後、コイルに触れている被験者の共振周波数を再測定する。

7 スタンフォード型 SR-850 DSP ロックイン増幅器。

transmitter 送信機

receiver 受信機

Electrical Impedance Tomography 電氣的インピーダンス断層撮影

communication channel 通信路

resistivity 抵抗率

impedance インピーダンス

perturbations 摂動

is capacitively coupled to 容量結合する

current return path 電流の復路

dielectric 誘電体

earth ground 地面

capacitor コンデンサー

capacitance キャパシタンス

current loop カレントループ

oscillator 発振器

differential amplifier 差動増幅器

electrical ground 電氣的グラント

intra-electrode impedance 電極内インピーダンス

purely reactive 純粹にリアクタンス性の

electric field paths 電界路

body node 人体ノード

displacement current 変位電流

ground wire グラントワイヤ

permittivity 誘電率

lock-in amplifier ロックイン増幅器

reactive impedances リアクタンス性インピーダンス

20 ページ 2 行目

The basic principle of PAN device communication is to break the symmetry with which the transmitter electrodes "see" (have a lower impedance to) the receiver electrodes.

21 ページ 1 行目

The four impedances are represented as purely reactive (capacitance), though they may contain a real (resistive) component.

特に purely reactive と real (resistive) component の意味がわかりません。

22 ページ 17 行目

The receiver environment electrode **re on the "sees" the environment better (has a smaller impedance)** than it sees the body,

### 3. PAN（個人領域での通信網）の設計

#### 3.1 寸法

PAN 装置は設計にあたって主に電力消費量、寸法、及び費用の制限から影響を受けている。PAN 装置は身近で見られる普通の物体の形状をしている。例；クレジットカード、時計、ベルト、靴。

1枚のクレジットカードには2つの広い表面積があり(表と裏)、片面は身体(身体電極)に面しており、もう片面は身体(環境電極)から離れた側にあり、1か所に設置されている。腕時計はもっと難しい対象である。なぜなら、(クレジットカードより)さらに小さい表面積と容積(容量、体積)で、時計のバンドの半分(表側)は体から離れた遠くを指している為、可変(変化しやすい)方位だからである。腕時計のバンドは電極の為に自然な位置にあり、バンドを身体電極や環境電極に最適に二等分する為に、その長さを切って短くしたり電子的に多重化する事が出来る。ベルトには広い表面積が有るが、手や腕に近接すると電気不足になる。これらの部分から離れた領域への電極の分割や制限、ほとんどは手や腕によって電気不足になるが、これは避けられないだろう。

PAN装置計画は、電極間のわずかな静電気容量(より少ない変位電流の分流が計測された)

で広い領域の電極を有する事で(さらに電場を集め)、最適化された。寸法、領域、電極間の静電気容量(理想的な平極板蓄電器=コンデンサーとして算出された)の電極設定は以下となる。

種目	電極の寸法(mm)	領域( $m^2 \times 10^{-4}$ )	静電気容量(pf)
時計表面	25×25×8	5	0.5
足当て板	2ドル以下で	30×30×8	9
時計のバンド	70×20×4	14	3.0
	70×20×8	14	1.5
クレジットカード	80×50×3	40	11.4
	80×50×8	40	4.3
靴挿入物	130×40×8	52	5.3
ベルト	900×25×4	225	48.2

## 3.2 電力消費量

### 3.2.1 運動靴の電力

電気時計の為に通常の電池寿命設計基準は3年である[Helm95]。通常の時計電池は57mWHのエネルギー容量である。すなわち1.4 uA 3年以上である。密封されたクレジットカード装置は電池を取り換えられない。ぴったりと埋め込まれた誘導コイルは、外部充電誘導コイルに近接させる事により、密封された電池や超蓄電器を再充電出来るだろう。靴にPAN装置を設置する事で信号強度が得られる。エネルギーは人の歩行で消散(散逸)する: 75kgの人は一歩歩くごとに約400mWを消散する。10%ほどの低い効率で蓄電器(コンデンサー)を充電する圧縮セラミック電池は、PAN装置に十分なパワーを供給する。

### 3.2.2 蓄電器(コンデンサー)充電によるエネルギーの喪失

PAN送信者は別の電極を基準とした振動電圧源で駆動(励振)される電極である。最も単純な電氣的な実施(処理)は、伝送電極に直接にデジタル矩形波(方形波)出力をつなぐ事である。送信者の電極は発信器への容量性負荷となり、(電氣的エネルギー)散逸駆動回路を通して各周波を放電した。結果として $1/2CFV^2$ のエネルギー消費量となった。;通常のPAN送信者では1ミリワットの電力を消費する。

### 3.2.3 共振送信者

負荷容量を充電するのに必要とされるエネルギーの大半は、誘電器の磁場（磁界）での蓄電によって埋め合わされるかもしれない。負荷容量で連続して置かれた誘電器はLCタンク回路を形成する。ひとたび $1/2CV^2$ のエネルギーがタンクサーキットへ流されると、必要とされる付加エネルギーだけが、実際のタンク素子（エレメント）の抵抗によって、散逸されるエネルギーを補充する。これは、タンクサーキットが共振駆動された時のみ起こる；容量 $X_c$ の電気抵抗がコイル $X_L$ と等しい時に。共振周波数 $f_r$ は誘導係数 $L$ と静電容量 $C$ の数値で定められる：

$$f_r = 1/2\pi\sqrt{LC}$$

### 3.3 費用

PAN装置による情報交換は従来の個人の電気器具に付加価値を付ける；eメールやポケベルのメッセージ文を表示する時計、携帯電話へ電話番号をダウンロードするPDA(携帯情報端末)、握手によって情報交換する人。これら付加価値サービスは、埋め込まれた情報交換システムの追加費用を正当化する。全ての宣伝製品、費用の低減化、商品へ科学技術の組み込みの簡易化。この論文におけるPANの送信機と受信機の試作品は、既製の低費用の部品を使用している。低電気量、低費用の演算増幅器（オペアンプ）と極小制御装置を作るとい産業的動機がPAN装置の費用を減少させた。

PAN受信機の低費用完成版は、プレッシー（商標）ZN414Zの様な統合AM受信機から2ドル以下で組み立てられるかもしれない。通常のPAN送信機と受信機に使用されたPIC16C71は5ドル以下である。タンク送信機を作るのに、PAN送信機で使用された誘電器は0.20ドル掛かった。PAN装置での情報交換に使用された搬送周波数は1MH以下で、1個の統合回路はPAN送受信機（トランシーバー）のアナログとデジタル機能をすべて働かせる為に、従来のCMOS技術を使用して組み立てる事が出来る。その結果、シングルチップPAN送受信機（送信機と受信機を合わせてある）が1ドル以下で作るのが可能となるかもしれない。

統合PAN受信機の実際の性能の良い例を見せる装置には、プレッシーZN414Zの設計書は何の役にも立たない。ZN414Zは10個のトランジスターで、3ピンTO-92プラスチック箱に詰められたラジオ周波数回路回路を回転させた。回路は650kHzに集中した600kHzの-6dB（周波数）帯域幅の増幅器利得（3段階）の72dBを供給する。トランジスター検知器そして20dBの自動利得制御（AGC）。回路は1.3ボルトの時、0.4mWの電力を消費し、0.3mAの供給電量を必要とする。

### 3.4 通信路の容量

情報交換の回路網はハートリー・シャノンの法則[カールソン 86]によって定義された理論上の限界と共に、まず通信路容量によって判定される。

$$C = B \log_2 (1 + S/N)$$

Cは通信路容量で単位はbits/秒、Bは（周波数）帯域幅、Sは信号、Nはノイズ（電氣的雑音）。