

# UWB伝搬特性測定とギガビット 無線LAN方式の基礎検討

竹内 勉  
向井 裕人  
千葉 正隆

## あらまし

筆者らの開発した遅延時間分解能0.5nsを有する超広帯域チャンネルサウンダ（UWBチャンネルサウンダ）を用いた屋内伝搬測定を行い，その結果に基づいたデジタル伝送シミュレーションを行ってギガビット無線LAN方式の基礎検討を行った．その結果，方式パラメタの取り方によってギガビット無線の実現の可能性を示すことができた．

## 1. はじめに

最近の無線LAN方式の発展は目覚しく，54Mb/sのシステムが一般に普及する時代が到来した．このことは，既に1Gb/s有線LANが普及し始めていることを考慮すれば，無線方式においてもギガビット伝送の実現が待望される時代になったと言える．しかしながら，屋内の無線伝搬特性は屋外に比べてより単純で遅延時間が小さいとは言え，1Gb/sの無線信号が単純に伝送できる環境にないことは十分理解できることである．筆者らはこのような状況で屋内電波伝搬測定の性能向上を図るべく，遅延時間分解能0.5nsを有する超広帯域伝搬遅延時間測定装置（UWBチャンネルサウンダ）を開発し，これを用いたより高度な測定技術である遅延多重波到来方向測定技術の開発を検討してきた．その結果，十分な精度で多重遅延波の到来方向を測定できる技術を開発することができた<sup>1)</sup>．本報告ではこれらの結果を踏まえて実施した屋内伝搬測定の結果について述べるとともに，その測定結果をもとに構築した計算機シミュレーションプログラムによりギガビット無線LAN方式の実現性について伝送誤り率をもとに検討した．

## 2. UWBチャンネルサウンダと到来方向測定

### 2.1 UWBチャンネルサウンダ

測定に使用したUWBチャンネルサウンダの諸元を表1に示す．本チャンネルサウンダは最大長

系列（M系列）の自己相関特性を用いて測定するため、遅延時間分解能0.5nsを実現するにはクロック周波数2GHzのM系列信号を生成する必要がある．そのため送信信号帯域幅は2GHz以上、望ましくは4GHz必要となるため、搬送波周波数としては扱いやすくしかも帯域特性を確保できるように7GHzとしている．受信機では、遅延プロファイルを得るには受信側で発生したM系列信号と受信信号との間で相関演算を行う必要がある．本装置では、アナログの相関器（ダブルパラストミキサ）を用いて受信信号と受信側M系列信号の掛け算を行うとともに、受信側M系列信号の位相を適宜変化させ、測定しようとする遅延時間に対応した相関処理を行っている．受信側M系列の位相を変化させるにはM系列を発生する帰還シフトレジスタに供給するクロック信号の位相を変化させることで実現している．またこの位相の変化をパソコンで制御することにより自動測定システムとして動作可能となる．

表1 UWBチャネルサウンダの諸元

|             |               |
|-------------|---------------|
| 搬送波周波数      | 7GHz          |
| 中間周波数       | 455kHz        |
| M系列の系列長     | 32767ビット(15段) |
| 拡散符号速度      | 2GHz          |
| 振幅ダイナミックレンジ | 40dB          |

## 2.2 屋内多重遅延波到来方向測定

UWBチャネルサウンダを用いた電力遅延プロファイルの測定結果から到来方向を測定することができる．その方法は2次元平面において水平方向から到来する遅延波を図1のように水平方向無指向性の受信アンテナを半径 $r$ の円周上を移動させながら電力遅延プロファイルを測定し、各到来波の遅延時間を円周の中心に置かれた基準アンテナで測定される遅延時間と比較することで求める方法である．そのとき円周上のアンテナで受信される遅延波の遅延時間は角度 $\alpha$ で到来していると図2のような正弦波状の変化を示し、その正弦波の位相は $\alpha$ に依存するため、その位相を求めることができれば到来方向が求まる．

実際には円周上の一定の角度ごとに測定される遅延プロファイルから注目する遅延波ごとに

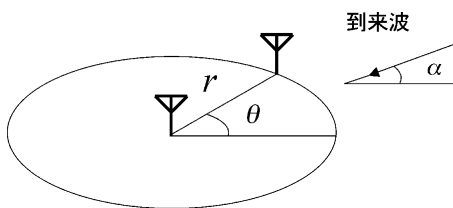


図1 DOA測定の原理図

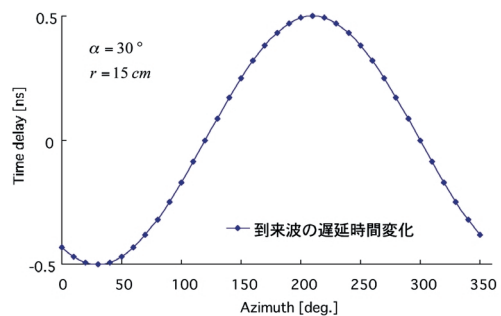


図2 DOA測定の到来遅延時間の変化

その遅延時間の変化を求め、正弦波の位相のずれを最小二乗誤差を与える理論値から求めた。実際の測定はパソコンに装着されたA/Dコンバータを用いるためその量子化誤差も含めて計算機シミュレーションを行ったところ、最大で $4.1^\circ$ 、標準偏差 $1.3^\circ$ となった。このことからほぼ正確に到来方向が算出できるものと考えられる。

### 2.3 到来方向測定結果

昨年度の報告では本学工学部第2実験室棟70実験室において行った到来方向測定について詳細に検討した結果を示した。本年度は同じ測定場所において更に詳しく測定点を変えながら測定を実施し、遅延波発生メカニズムを考察した。測定は実験室中央に送信アンテナを設置し、受信アンテナを実験室内で様々な位置に置きながら到来方向測定を行った。両アンテナは水平面内無指向性の垂直バイコンカルアンテナで、高さはどちらも床から1.9mとして壁、什器などからの反射波を主に測定した。従って、偏波面は垂直偏波である。受信アンテナの回転半径は7.5cmで $10^\circ$ 毎に測定を行った。

図3はその測定結果で最小二乗誤差が小さく到来方向が明確な測定結果を示した。1回ないし2回の反射波が図中のブラインド、金属製のドア、配電盤カバーなどで発生していることが良く理解できる。

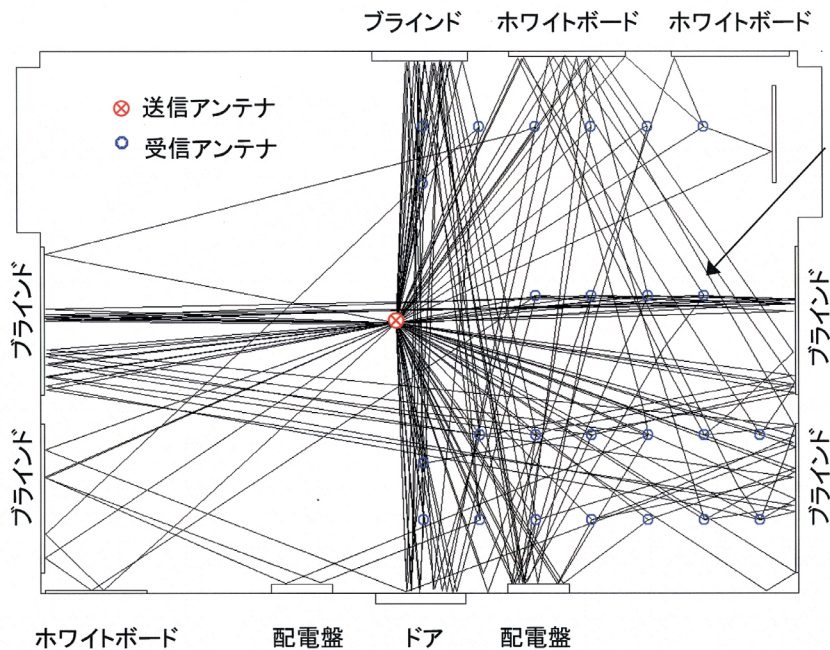


図3 到来方向測定結果

### 3. ギガビット無線LANの基礎検討

次に伝搬測定結果に基づいて屋内無線LAN方式におけるギガビット伝送の可能性について基礎検討を行った。検討は実測遅延プロファイルから伝搬路特性を求め、1Gb/sのデジタル伝送を計算機シミュレーションにより検討するものである。

#### 3.1 検討した無線LAN方式

従来、多重波伝搬路となる無線LANでは、スペクトル拡散方式による11Mb/sのIEEE802.11b方式が最も一般的であったが、最近ではIEEE802.11a,g方式で規定されているOFDM変調方式による54Mb/sの方式が普及しつつある。OFDM方式は方式自体が持つパラメータを変更することによる様々な多重波伝搬状況に幅広く対応することが可能な方式である。そこで、将来の無線LANにおけるギガビット伝送の可能性を検討するためにパラメータの設定で1Gb/sの伝送が可能であるかどうかについて実測遅延プロファイルを基に検討した。OFDM方式が持つパラメータは、

- ガードインターバル
- サブキャリア変調方式（多重ビット数）
- シンボルレート

である。54Mb/sの無線LAN方式ではそれぞれ、ガードインターバルが $0.8\mu\text{s}$ 、サブキャリア変調方式がBPSKの1ビットから64QAMの6ビット、シンボルレートが250kb/s ( $4\mu\text{s}$ )となっている。1Gb/sを実現するにはビットレートが単純に約20倍となるようこれらのパラメータに割り振ることになるが、単純な割り振りは問題解決にならない。この検討では多重波の影響を実測遅延プロファイルを用いることでより実際的な誤り率を計算機シミュレーションで求め、その結果から検討することとした。

#### 3.2 計算機シミュレーションの概要

通常、多重波伝搬環境下でのデジタル伝送シミュレーションではその誤りの原因が多重遅延波によることから遅延時間を考慮するために時間領域で伝送波形を求め、それを符号判定することで誤りが発生したかどうかを求める。しかしながら、本研究では周波数領域で各サブキャリアの信号電力を求めて熱雑音による誤り率のみを検討することでシミュレーションを実施した。これは、OFDM方式がシンボル速度そのものが多重波遅延時間に比べて十分長く、且つ多重遅延の影響をガードインターバルで除去することが可能であることを前提にした方式であるため、多重遅延波による波形歪を求めて誤り判定すること自体がOFDMの適用外の条件となるからである。またこのようにすることで波形歪を求めて誤り判定を行う時間領域での膨大なシミュレーションを縮小することが可能になる。

以上のことを基に1Gb/sを達成できるOFDM変調方式を検討するため、表2に示される諸元のシミュレーションを実施した。サブキャリア変調方式は表のように多重数1から10ビットに相当する多値変調方式で、サブキャリア数も2のべき乗値とした。シミュレーションでは全てのサブキャリアを使用し、多重波の影響はガードインターバルで全て除去できるとした。また、適用する誤り訂正は最も一般的な符号化率1/2の畳み込み符号化ビタビ復号方式とした。

表2 デジタル伝送シミュレーションの諸元

|            |   |
|------------|---|
| 変復調方式      | 符号化 OFDM                                  |
| サブキャリア変調方式 | QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM, 1024QAM       |
| サブキャリア数    | 64~8192 (2のべき乗)                           |
| 中心周波数      | 5GHz                                      |
| 伝送速度       | 1Gb/s                                     |
| 誤り訂正方式     | 畳込み符号化/ビタビ復号 ( $R = \frac{1}{2}, K = 7$ ) |

計算機シミュレーションに使用する電波伝搬環境の実測データは前章で測定した屋内多重遅延は到来方向測定と同様の方法で測定した結果を利用した。但し、前章とは異なり、送信点と受信点とが入れ替わっている。実際には各測定点毎の遅延プロファイルの中から遅延分散の値を基に伝送条件の悪いものを選び、図4に送信点(1),(2)で示される点に対応した2つの遅

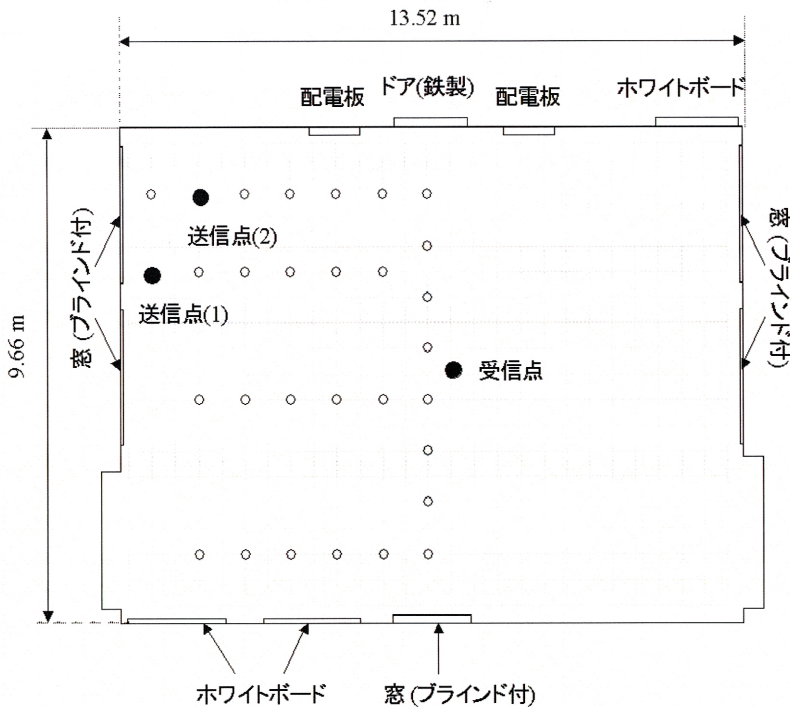


図4 シミュレーションに使用した遅延プロファイルの測定点

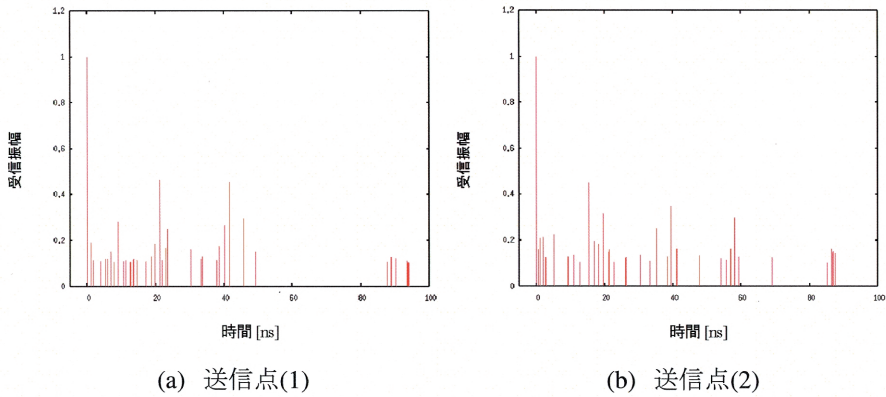
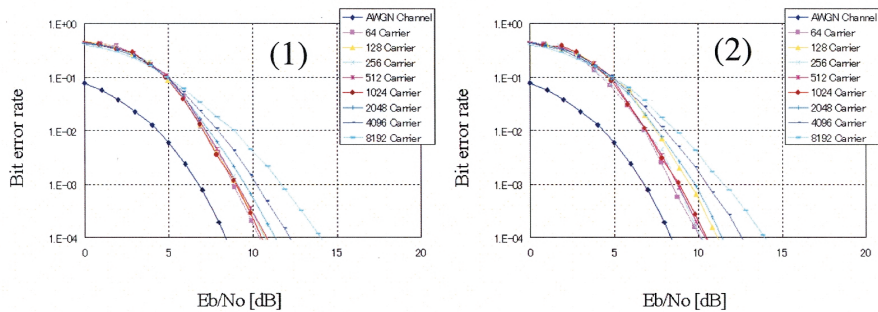


図5 シミュレーションに使用した遅延プロファイル

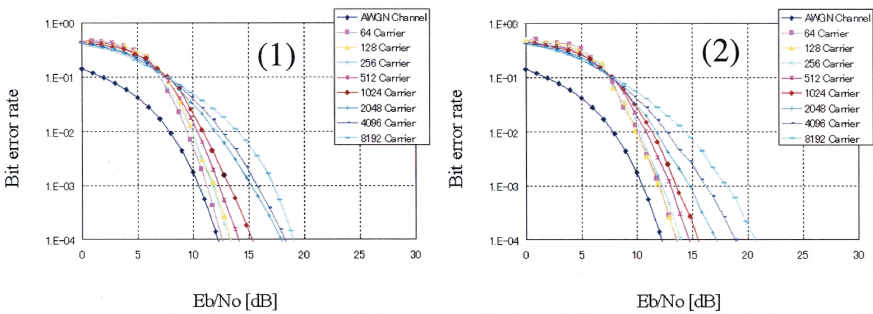
遅延プロファイルを用いてシミュレーションを行った。以後、それぞれの送信点に対応した遅延プロファイルを図5に示す。

### 3.3 計算機シミュレーション結果

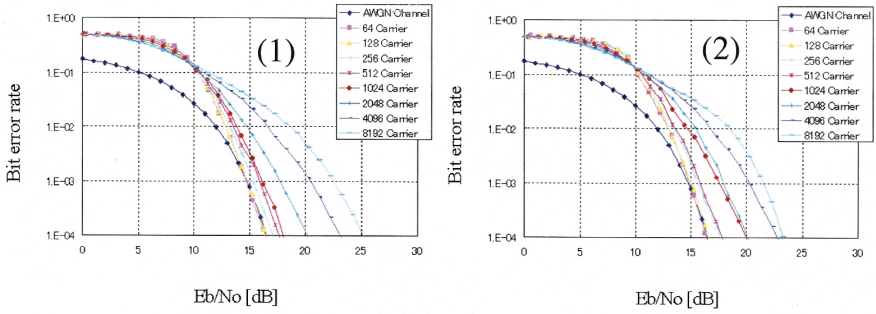
図6 (a)~(e) にサブキャリア変調方式ごとに送信点 (1) 及び (2) ごとの平均誤り率の計



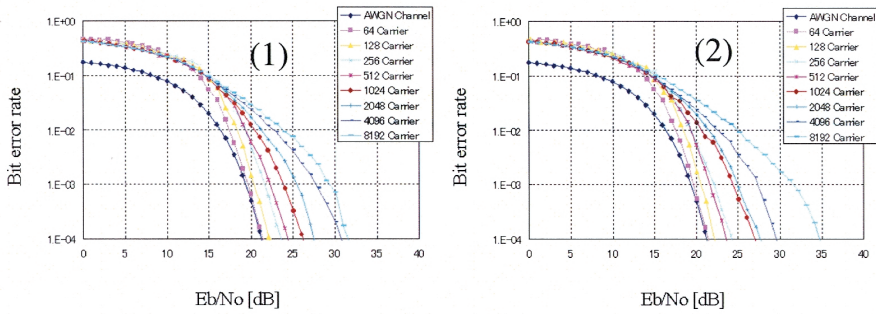
(a) QPSK



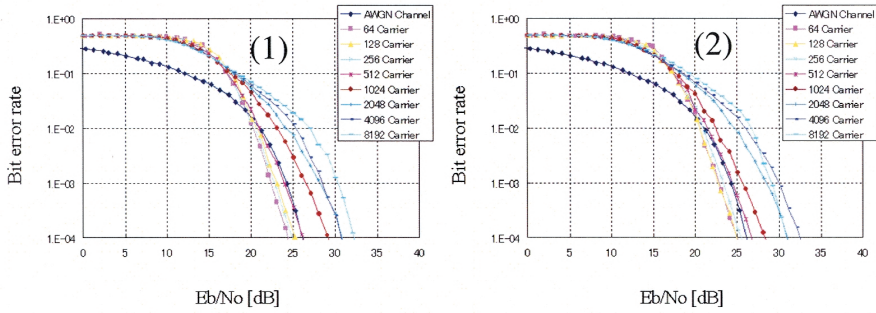
(b) 16QAM



(c) 64QAM



(d) 256QAM



(e) 1024QAM

図6 計算機シミュレーション結果

算結果を $E_b/N_0$ に対して示す．図中(1)及び(2)は送信点(1)及び(2)に対応している．

これらの結果から，当然ながら多値化数が増えるに従って誤り率は劣化するが，図中に示した熱雑音のみの計算結果(AWGNで示している．)との差が小さくなることも分かる．また，サブキャリア数が多いほどAWGNからの劣化が大きく，サブキャリア数が小さいほどAWGNの理論値に近づいている．これはこのシミュレーションでは多重遅延波によって生じる周波数特性の差によってサブキャリアごとに信号電力が異なっている．このため，サブキャリア数

が多いと周波数特性によって生じているノッチに落ち込み、信号電力が低下しているサブキャリアの数が増えてしまう。すなわちノッチに落ち込む確率が増加するためである。このシミュレーションでは伝送ビットレートを1Gb/sに一定しているため多値化数が小さくなるとシンボルレートを大きくせざるを得なくなり、サブキャリア間隔が広がるためにこのようにサブキャリア数が小さいほど誤り率の劣化が小さくなるという結果になった。

以上の計算結果から、ギガビット無線LAN方式として実現性のあるOFDM方式のパラメタを選択すると、以下ようになる。無線LAN方式の要件として

(1) 送信電力が小さい

これは無駄な電力消費を増加させることになり、且つ他システムへの干渉を増やすことになる。またハードウェアが高価となる。

(2) 誤り率特性が良好

これはシステムとしての最大の要求条件である。

これら2点と更に以下の点を考慮して、

- 同一サブキャリア変調方式に対して、サブキャリア数が少ないほど誤り率特性は良い。
- 占有帯域幅は多値化数が大きいほど良いため、1024QAM方式が望ましいが、送信電力が大きい。
- 送信電力はQPSK方式が最小であるが、サブキャリア数が増大し、占有帯域幅広がる。
- ハードウェアは、サブキャリア数が多いほど複雑であり、シンボルレートが大きいほど高速で、高価となる。

1024サブキャリアの64QAM方式程度が適当な妥協点だろうと考えられる。参考として、表3にBPSK方式の1サブキャリア当りの電力を1としたときの各サブキャリア変調方式での相対送信電力を示す。

表3 所要送信電力

| BPSK    | QPSK    | 16QAM  | 64QAM   | 256QAM  | 1024QAM |
|---------|---------|--------|---------|---------|---------|
| 93.01dB | 93.01dB | 97.0dB | 101.5dB | 106.3dB | 111.3dB |

## 4. おわりに

本報告では昨年度報告した超広帯域チャンネルサウンダを用いた屋内多重波遅延波到来方向測定を実施した結果とそれに基づく屋内無線LAN方式のギガビット伝送の可能性についての検討結果をまとめた。その結果、屋内における遅延多重波の発生原因が屋内に存在する金属などの反射率の大きな物体であることが確認された。また従来レイトレースなどの計算機シミュレーションで期待されているほど多くの幾何光学的遅延波は観測されなかった。屋内ギガビット伝送の検討ではOFDM方式のパラメタを様々に変えて実測遅延プロファイルの基づく計算機シ



ミュレーションにより検討を行った結果、実現の可能性のあるパラメタが存在しうることが明らかとなった。今後、更に多くの計算機ミュレーションを積重ねて詳細な検討が必要であり、また他の耐多重波変調方式の適用についても検討する必要がある。

最後に、竹内研究室所属の大学院1回生、北野貴士、山口喬寛の両君、並びに四回生の諸君に感謝します。

### 参 考 文 献

- 1) Tsutomu Takeuchi and Hirohito Mukai, "Ultra Wide Band Channel Sounding for Indoor Wireless Propagation Environments," Proceedings of 2003 IEEE Topical Conference on Wireless communication Technology and NSF Wireless Grantees Workshop, Oct. 2003.