

# 無線ベースバンド伝送におけるマルチパス環境下での伝送特性

Transmission Characteristics of the Wireless Baseband Transmission (WBT) under Multipath Environments

北川 淳一                      谷口 哲樹                      唐沢 好男  
Jun-ichi KITAGAWA          Tetsuki TANIGUCHI          Yoshio KARASAWA

電気通信大学 先端ワイヤレスコミュニケーション研究センター  
Advanced Wireless Communication research Center (AWCC), UEC

## 概要

ベースバンド信号を直接アンテナから送信するシステムである無線ベースバンド伝送におけるマルチパス環境下での伝送特性について、VNA (vector network analyser) を使用して測定した周波数領域のチャネル特性と計算機を利用し、BER (bit error rate) を指標とした特性評価をおこなっている。計算機上で直接波電力と反射波電力の比と反射波の遅延シンボル数、反射波の数を変化させて BER 特性を求めている。その結果、マルチパス環境下において支配的な要因は直接波電力と反射波電力の比であることを明らかにした。さらに、直接波電力  $P_D$  と反射波電力  $P_R$  の比  $P_R/P_D$  が  $-15$  dB より小さければ、等化や誤り訂正技術を併用せず BER が  $10^{-4}$  程度あるいはそれ以下の実用的な無線伝送が可能であることを示している。

## 1 はじめに

本研究は無線ベースバンド伝送 [1] のマルチパス環境下における基礎的な伝送特性を調べることを目的としている。無線ベースバンド伝送はこれまでの無線伝送方式と異なり、情報信号そのものであるベースバンド信号を直接アンテナより放射するものである [2]。これまでの無線伝送の概念とは異なる新たな無線伝送方式であり、有線伝送で用いられているベースバンド伝送を無線伝送に適用したものであるともいえる。従来の無線伝送で搬送波として用いられている正弦波で考えると、波の 1 つ 1 つに情報を載せるイメージとなり、超高速伝送を可能とする究極的な無線伝送方式である。この技術が実用になると、有線伝送と無線伝送をシームレスに繋ぐことも可能となり、その本質的に備わった高速伝送性をいかした大容量・高速無線伝送が実現できる。

近年注目を集めている無線システムの 1 つに UWB (ultra-wide-band) [3, 4] がある。UWB は超広帯域無線システムともよばれ、本無線ベースバンド伝送とはその比帯域の広さという点で共通している部分もある。しかし、UWB はパルス変調を含め一般の無線システムで広く用いられている変調という操作が残っているのに対し、無線ベースバンド伝送には変調という概念は無い。

無線ベースバンド伝送についての具体的な検討として、これまで無線伝送で常に問題となる反射波の存在を無視できる自由空間環境下で実験をおこなってきた。その結果、伝送路符号とアンテナを適切に選べば、無線での

ベースバンド伝送が可能なることを実験的に明らかにしてきた [1]。筆者らはこれまで伝送路符号化とアンテナにはそれぞれ、Manchester 符号化とディスコーンアンテナを主に使用してきた。この無線ベースバンド伝送をより実的なものとするためには、一般に想定され得る環境、すなわち反射波の存在するマルチパス環境下での特性評価が必要になる。これまで一般の無線通信におけるマルチパス環境下での伝送特性については多大な研究がおこなわれている [5]。UWB においてはいくつかのチャネルモデルも発表されるようになってきている [6] が、まだ十分に研究されているとはいえない。無線ベースバンド伝送についてはこれまでマルチパス環境下での伝送特性が全く検討されておらず、無線システムとしての性能を総合的に把握するためにもこれまでの自由空間下だけでなくマルチパス環境での特性評価が必要である。無線ベースバンド伝送においても、マルチパス環境下では伝送特性が劣化することは定性的には容易に予想できる。しかし、本伝送方式をより完全なものとするためには具体的な数値として劣化特性を求めることが必要である。本研究ではその指標として、BER (bit error rate) を採用している。また、どの程度のマルチパス環境までが実用になるかといった観点からの評価も必要である。そこで本研究では、マルチパスに対する劣化特性を調べるため実測したチャネル特性を用い計算機上でマルチパス受信波形を生成し、BER 特性を求めている。

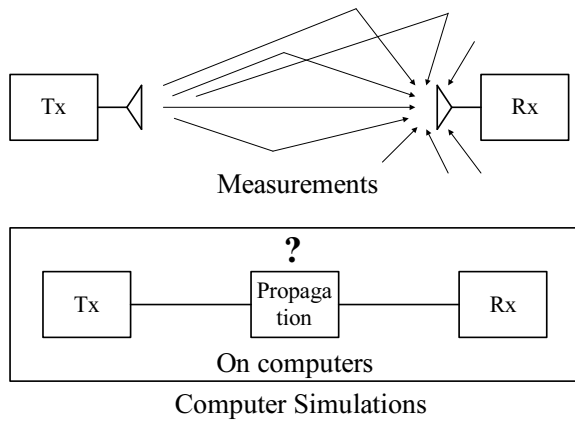


図1 実測とコンピュータシミュレーション

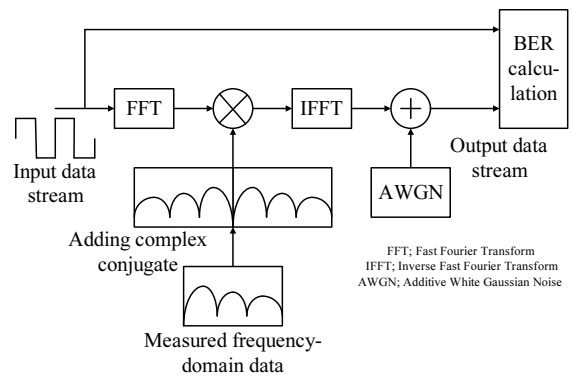


図2 BER 計算法 (1600 サンプルの 200-bit データを 1 ブロックとして処理)

## 2 BER 算出法

### 2.1 実測とシミュレーション

伝送特性を BER で評価するためには実測をおこなうか、適当なモデルをつかって計算機上のシミュレーションで評価することが考えられる。無線ベースバンド伝送方式において BER を実測するのは、BER 測定のための機器構築が容易ではない。シミュレーションは実測に比較すると容易である。しかし、無線ベースバンド伝送に対してマルチパス伝搬の部分をどう扱うかが問題となる (図 1)。そこで、本研究ではチャネル特性 (複素数) のみ VNA (vector network analyser) を使用して実測データを取得し、その他の処理は計算機上でおこなうことにより、上記の問題解決を図った。

#### 2.1.1 処理手法

一般に正弦波を搬送波として用いた無線伝送における信号の表現は実際の高周波信号をそのまま記述した帯域系ではなく、複素包絡線 (複素ベースバンド信号) を用いた等価低域系とよばれる系でおこなわれる。無線システムの比帯域は高々数 % であり、一般の興味は搬送波自体のふるまいではなく搬送波に乗っている情報信号であるので、搬送波まで含めて解析をおこなうのは表現しなければならない周波数範囲が広大になり無駄が多い。したがって、等価低域系での解析は演算量が低減し効率が良いといえる。

しかし、無線ベースバンド伝送の場合を考えてみると搬送波という概念が存在しないため等価低域系での取り扱いはできない。一般の無線伝送における帯域系と同じように実際の信号をそのままの状態ですぐ扱う必要がある。すなわち実信号として解析することになる。

BER 計算の処理方法についての概要を図 2 に示す。一般の無線通信シミュレーションで BER を求める場合と異なる点は、時間領域における信号を全て実数として扱う点

である。特に、図 2 において複素共役のデータを付け加えて実信号化するところが要点である。すなわち、VNA で取得したチャネル特性はフーリエ変換において正の周波数に対応する値と考えることができ、このままでは解析信号であるので、負の周波数分 (= 正の周波数分の複素共役) を付け加えて実信号化している。

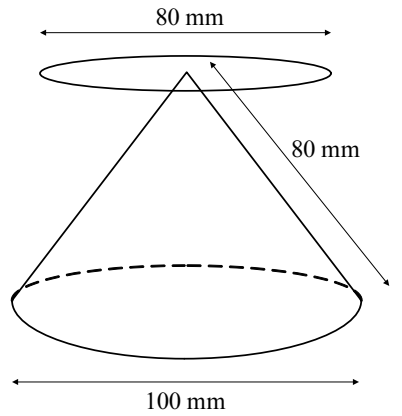
## 3 伝搬特性測定

### 3.1 アンテナ特性

無線ベースバンド伝送は超広帯域を占有し、アンテナは重要な装置の 1 つとなる。ここでは、筆者らのこれまでの実験結果から無線ベースバンド伝送においても十分実用になると判断しているディスコーンアンテナを使用した。図 3 は測定に使用した 10 cm 角サイズのディスコーンアンテナであり、これを送受信共に使用している。最低使用周波数は実験のおこない易さを考慮した結果 1 GHz として設計し銅板を成型して製作した。図 4 に実験で用いたディスコーンアンテナ (図 3) の VSWR (voltage standing wave ratio) 特性を示す。図 4 から 1-6 GHz の範囲で VSWR は 2 以下に抑えられていることが分かり、この範囲では良好に動作すると判断できる。

## 4 測定環境

図 5 に上面から見た測定環境を示す。図 5 のように測定は全て本学の電波暗室内に反射板を設置しておこなった。反射板は縦 1.8 m、横 0.90 m の発砲スチロール板にアルミニウムホイルをはりつけたものであり、これを縦にして設置した。測定は、(a) 反射板の無い場合、(b) 反射板を横方向に設置、の 2 通りについて測定をおこなった。(b) の場合の直接波と反射波の経路差は 1.2 m となり時間差にすると 4.0 ns になる。送受信アンテナ高はいずれも 1.5 m とした。



material: copper

(a) Dimensions



(b) View

図3 測定で使したディスコーンアンテナ

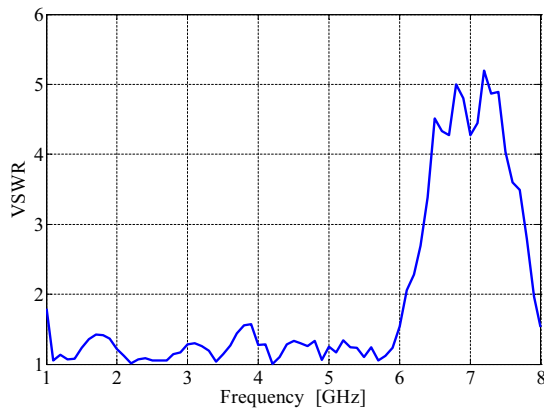
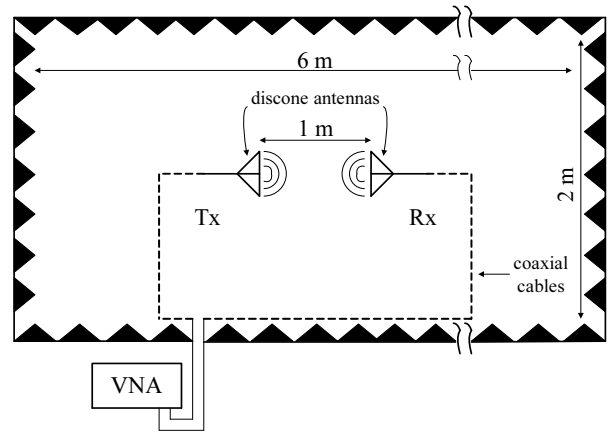


図4 ディスコアンテナの VSWR 特性

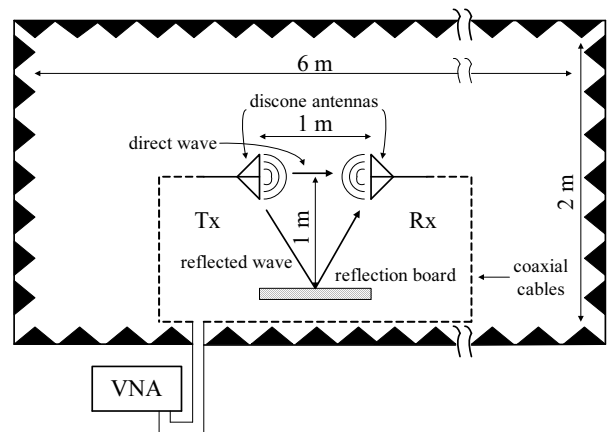
BER 算出のためのチャネル特性としては、送信アンテナを 1、受信アンテナを 2 とした時の  $S_{21}$  を取得しこれを計算機に取り込み演算処理をおこなっている。取得したデータ ( $S_{11}, S_{21}, S_{12}, S_{22}$ ) は 300 kHz–8 GHz の範囲で 801 ポイントである (およそ 10 MHz 間隔)。測定前の校正は 2 ポート・フルキャリブレーションをおこなっている。

#### 4.1 チャネル特性

VNA で取得したチャネル特性 ( $S_{21}$ ) を図 6 に示す。図 6 の表示周波数範囲は 3.1 節を考慮して 1–6 GHz としている。図 6(a) は自由空間での特性であり  $-6$  dB/octave の



(a) No reflection boards

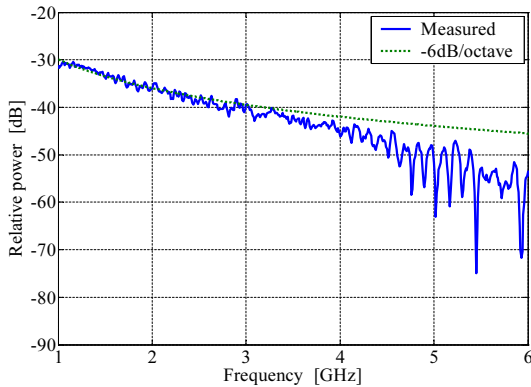


(b) One reflection board

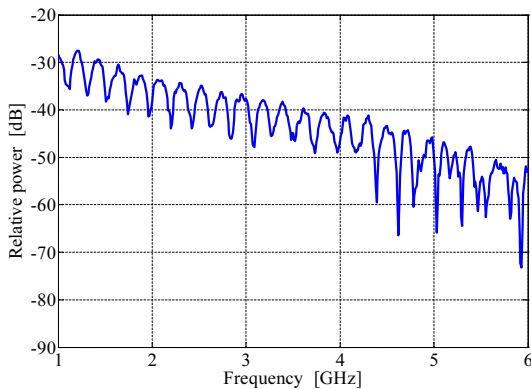
図5 測定環境

特性を示すことが分かる [1]。4 GHz 付近から測定値が  $-6$  dB/octave の特性とずれてくるのは、周波数の上昇に伴うディスコーンアンテナの垂直面指向性の乱れによるものと考えられる。図 6(b) は反射板があることによってチャネル特性にリップルの生じていることを示している。リップルの周期は直接波と反射波の到達時間差である 4 ns の逆数から 250 MHz となり、確かに図 6(b) もその通りの特性を示しているのが分かる (例えば、2–3 GHz の間に null が 4 つある)。

マルチパスの状況を把握する別の方法として、チャネル特性のインパルス応答を観測することが挙げられる。ここでは VNA で取得した図 6 のチャネル特性を用い、計算機で IFFT (inverse fast Fourier transform) した結果を図 7 に示す。図 7(a) は自由空間の場合であるので、送受信アンテナ間 1m を伝搬するのにかかる時間 (3.3 ns) 分だけ遅れて応答のあることが分かる。図 7(a) の 10–11 ns 付近に弱い反射波が確認できるのは、主にアンテナに整合する周波数範囲を超えた周波数成分による送受信アンテナ間の多重反射である。すなわち、送信アンテナからの電波は 3.3 ns かけて受信アンテナに到達するが、一部のアンテナに対

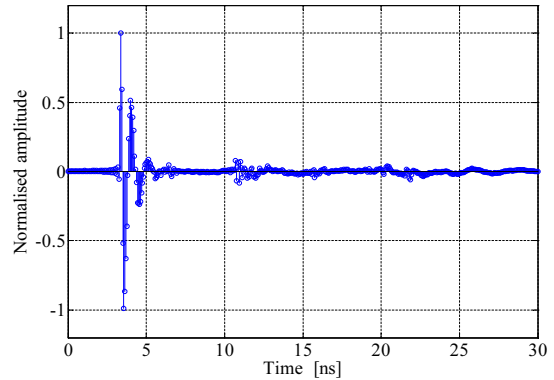


(a) No reflection boards

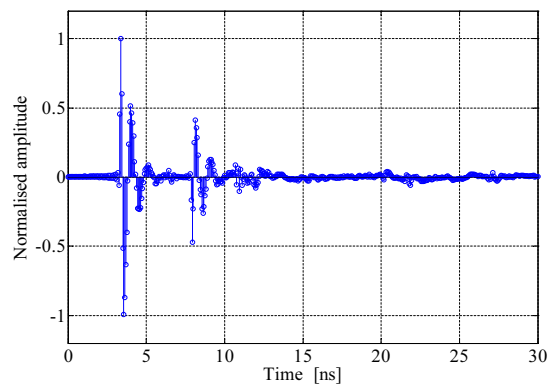


(b) One reflection board

図 6 チャンネル特性



(a) No reflection boards



(b) One reflection board

図 7 チャンネルのインパルス応答

して整合していない周波数成分は受信アンテナで反射（再放射）され送信アンテナのほうへ空間を伝わって戻り、そこでまた反射されて受信アンテナに到達することによるものである。この時の直接波との距離差はおよそ 2 m であり時間差にするとおよそ 7.0 ns であり、10–11 ns 付近に応答があることを理解できる。反射波が存在する図 7(b) の場合、直接波と反射波の時間差は 4 節で述べたように 4.0 ns であるので、確かに直接波からその分だけ遅れて反射波の応答が表れていると分かる。

## 5 伝送特性の評価

### 5.1 測定環境での BER 特性とマルチパス環境生成

図 8 に図 5 の環境で測定したチャンネル特性に対する BER 特性を示す。図 8 の横軸  $E_b/N_0$  について、本文では全て直接波（直接波 + 反射波ではない）に対する  $E_b/N_0$  を考えている。マルチパスに対する結果は、実際に反射板を設置しマルチパス環境下で取得した実測チャンネル特性に対する BER（図 8 では actual）、と自由空間下で取得した実測チャンネル特性から計算機上で合成したマルチパス受信波形に対する BER（図 8 では combined）の 2 つを表示している。図 8 から分かるように両手法で求めた BER は

よく一致しており、直接波成分の実測チャンネル特性から計算機上でマルチパス環境を生成しても問題ないことが図 8 からいえる。なお、本文では全て周波数領域のチャンネル特性から伝送特性評価をおこなっている。すなわち、実際のデータ伝送に相当する時間領域の測定は一切おこなっていない。周波数領域のチャンネル特性から伝送特性を評価しても問題ないことをいうには、時間領域での測定値と周波数領域から時間領域に変換した伝送波形が一致する必要がある。この点については文献 [1] で両者が一致することを確認している。

図 8 を求める過程のデータ伝送では Manchester 符号化をおこなっている。波形を構成する最小単位のパルス幅は文献 [1] で得られているアンテナ帯域幅との関係を考慮して 0.2 ns としている。この時、Manchester 符号化を採用していることからシンボル長は 0.4 ns となり、伝送レートは 2.5 Gbps となる。図 8 において、自由空間の場合はエラーフロアも生じておらず良好な伝送を期待できるが、ここで設定したマルチパス環境ではエラーフロアを生じており BER は  $10^{-3}$  に少し届かない状態である。この状態は実際の通信においてチャンネルの等化や誤り訂正技術を併用して実用になる限界と考えられる。反射波の遅延時間は 4

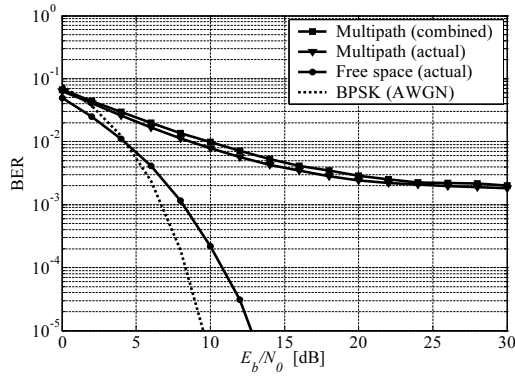


図 8 測定環境での BER 特性

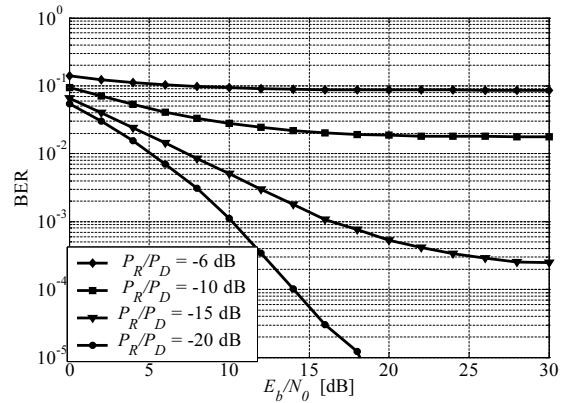
節で述べたように 4.0 ns であるので、10 シンボル分遅延した反射波が到来していることになり、符号間干渉の影響がフロアの発生に繋がっていると理解できる。また、図 8 には一般の無線伝送との比較の意味で、AWGN (additive white Gaussian noise) 通信路に対する BPSK (binary phase shift keying) の同期検波での誤り率  $P_b$  の理論値

$$P_b = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{E_b/N_0} \quad (1)$$

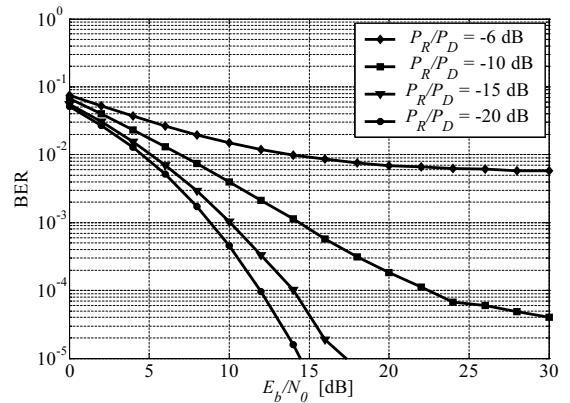
を示している。ただし、式 (1) 中の  $E_b/N_0$  は真値であり、 $\operatorname{erfc}$  は誤差補間数を表している。BPSK と無線ベースバンド伝送を比較すると、BER が  $10^{-4}$  において  $E_b/N_0$  を 3 dB 弱、無線ベースバンド伝送のほうが余計に必要なと分かる。しかし、従来の考え方で BPSK を用いて 2.5 Gbps の伝送をおこなうには比帯域を 1% とすると 250 GHz の搬送波を必要とすることになり、そのための装置やアンテナを考えると容易なことではない。したがって、無線ベースバンド伝送は BPSK より必要とする  $E_b/N_0$  は 3 dB 程度多くなるものの（本論文の場合）、高速・大容量伝送に適した無線伝送方式（GHz 電波を用いた Gbit 伝送）を実現できる可能性があるといえる。

## 5.2 直接波電力と反射波電力の比に対する BER 特性

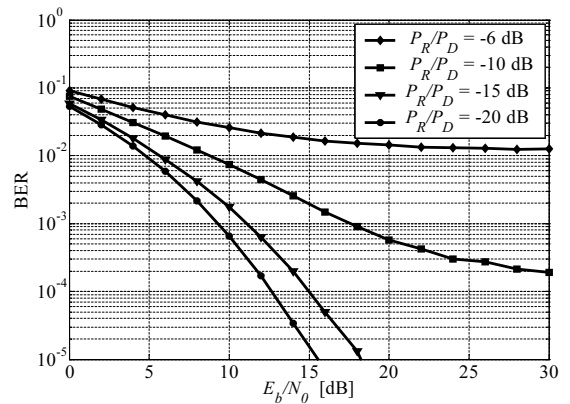
直接波と反射波の電力をそれぞれ  $P_D, P_R$  とし  $P_R/P_D$  を  $-6$  dB,  $-10$  dB,  $-15$  dB,  $-20$  dB と変化させた場合の BER 特性について調べる。図 9 は遅延シンボル数を 5, 10, 20 とし  $P_R/P_D$  を変化させた場合の BER 特性を示している。図 9(a) の遅延シンボル数が 5 の場合、 $P_R/P_D = -6$  dB,  $-10$  dB においてそれぞれ BER が  $10^{-1}$ ,  $10^{-2}$  より前でエラーフロアを生じており、 $P_R/P_D$  が  $-10$  dB より大きい領域では実用的な通信は困難といえる。図 9(b) の遅延シンボル数が 10 の場合は  $P_R/P_D = -6$  dB においてのみ BER が  $10^{-2}$  を下回った付近でフロアを生じている。それ以外では大きなフロアも無く実際の通信も問題なく可能であるといえる。図 9(c) の遅延シンボル数が 20 の場合はそ



(a) 5-symbol delay



(b) 10-symbol delay



(c) 20-symbol delay

図 9 遅延シンボル数を変化させた場合の BER 特性

れが 10 の場合（図 9(b)）と同様な傾向を示している。遅延シンボル数によって BER の値が異なるのは波形ひずみによる影響と考えているが、全体的な傾向としては遅延シンボル数よりも  $P_R/P_D$  が支配的である。図 9 を総合的に判断すると  $P_R/P_D$  が  $-15$  dB より小さければ反射波が存在しても通信は可能であるといえる。

## 5.3 パスの数を変化させた場合の BER 特性

これまでは 2 波モデルを扱ってきたが、パスの数を変化させた場合、すなわち反射波のパス数を増やした時の特性について調べる。図 10(a) は 3 パス、すなわち直接波と反

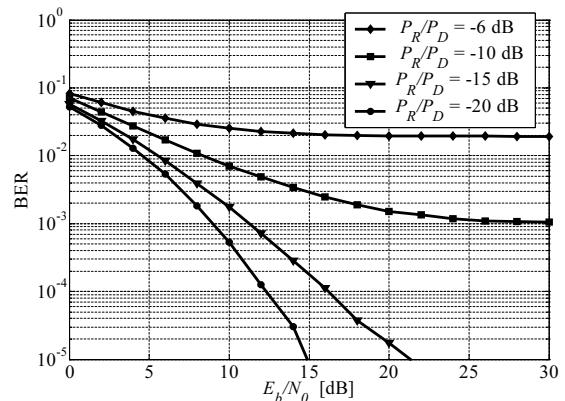
射波 2 波の場合の BER 特性を示している．ここで，遅延シンボル数は図 9(b) と図 9(c) において，互いに似た結果が得られていることを考慮し，平均遅延シンボルをそれらの平均である 15 シンボルとなるように反射波の 1 波目は 10 シンボル，2 波目は 20 シンボルの遅延となるようにしている．また，反射波の 1 波目と 2 波目は等電力としている．図 10(a) の結果は図 9 と同様な傾向を示しており， $P_R/P_D$  が  $-15$  dB より小さければ等化や誤り訂正技術を追加しなくても無線伝送は可能であると判断できる．3 パスと同様の条件で 4 パス，5 パスとした時の BER 特性はそれぞれ図 10(b)，図 10(c) に示す通りである．4 パスの場合は 10，15，20 シンボル遅れの反射波，5 パスの場合は 5，10，20，25 シンボル遅れの反射波が到達し，それぞれの反射波は等電力としている．図 10 の結果からはパス数を増やしていくと同じ  $P_R/P_D$  でも特性は少しずつ劣化していく様子が分かる．これは 5.2 節の遅延シンボル数が異なる時と同様，波形ひずみに起因するものと考えられる．しかしながら，全体的な傾向としてはパス数より  $P_R/P_D$  に依存する部分が大きく特に  $P_R/P_D$  が  $-20$  dB では 3，4，5 パスともほぼ同じ BER 特性が得られている．

## 6 むすび

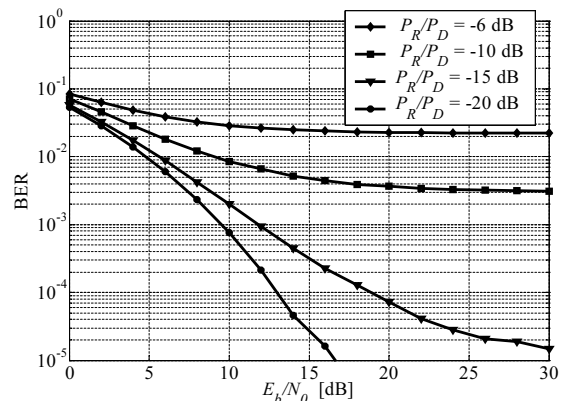
無線ベースバンド伝送について実信号解析法を示した．それを用いて，マルチパス環境下における BER 特性を実測チャンネル特性を用いて求めた．一部シミュレーションを介した評価ではあるが，10 cm 角サイズのアンテナで 2.5 Gbps の伝送が実現できることを明らかにした．無線ベースバンド伝送のマルチパス環境下での伝送特性について，直接波電力と反射波電力の比  $P_R/P_D$  が  $-15$  dB より小さければ，等化や誤り訂正技術を併用せず BER が  $10^{-4}$  程度あるいはそれ以下の実用的な無線伝送が可能であることが分かった．また，BER に支配的なのはパス数よりも  $P_R/P_D$  であることを明らかにした．より強いマルチパス環境下では符号間干渉により，十分な性能が得られないことも分かったので，等化器技術等のマルチパス対策の研究が今後必要である．

## 参考文献

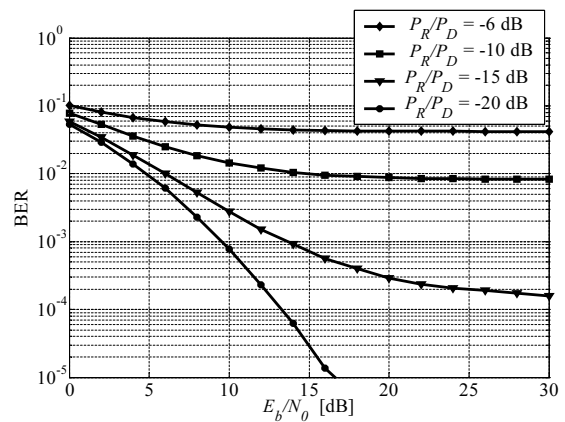
- [1] J. Kitagawa, T. Taniguchi, and Y. Karasawa, "Wireless baseband transmission experiments," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E89-B, no.6, pp.1815–1824, Jun. 2006.
- [2] 小宮山牧兒, "ATR 環境適応通信研究所の研究内容の紹介," *ATR Journal*, vol.23, pp.7–10, 1996.
- [3] 小林岳彦, 幸谷智, "UWB ワイヤレスシステムの研究



(a) 3-path



(b) 4-path



(c) 5-path

図 10 3, 4, 5 パスの場合の BER 特性

開発動向," *信学論 (A)*, vol.J86-A, no.12, pp.1264–1273, Dec. 2003.

- [4] 前田忠彦, "UWB アンテナ技術: コピキタス超高速通信のためのアンテナ伝搬・評価技術と展望," *信学論 (B)*, vol.J88-B, no.9, pp.1586–1600, Sep. 2005.
- [5] 唐沢好男, *デジタル移動通信の電波伝搬基礎*, コロナ社, 東京, 2003.
- [6] A. F. Molisch, "Ultrawideband propagation channels-theory, measurement, and modeling," *IEEE Trans. Vehi. Tech.*, vol.54, no.5, pp.2087–2104, Sep. 2005.