

広帯域移動伝搬 その2 伝搬遅延プロファイル

移動通信でもマルチメディアに対応するため、高速・広帯域伝送方式へと進展しています。高速・広帯域伝送を実現するには、電波の強さ（電界強度）のみならず、伝搬遅延特性（伝搬遅延プロファイル）が重要な設計パラメータとなります。本稿では広帯域伝送の伝送品質に大きく影響を与える伝搬遅延プロファイル特性について解説します。また、理論解析や計算機シミュレーションに用いられる伝搬遅延プロファイルモデルについて概説します。

1. まえがき

高速・広帯域伝送においては、さまざまな方向から反射・散乱してくる電波の到着時間の遅れ（伝搬遅延）が伝送品質に大きく影響をします。そのため広帯域伝送方式では電波の強さ（電界強度）のみならず、伝搬遅延特性が重要な設計パラメータとなります。

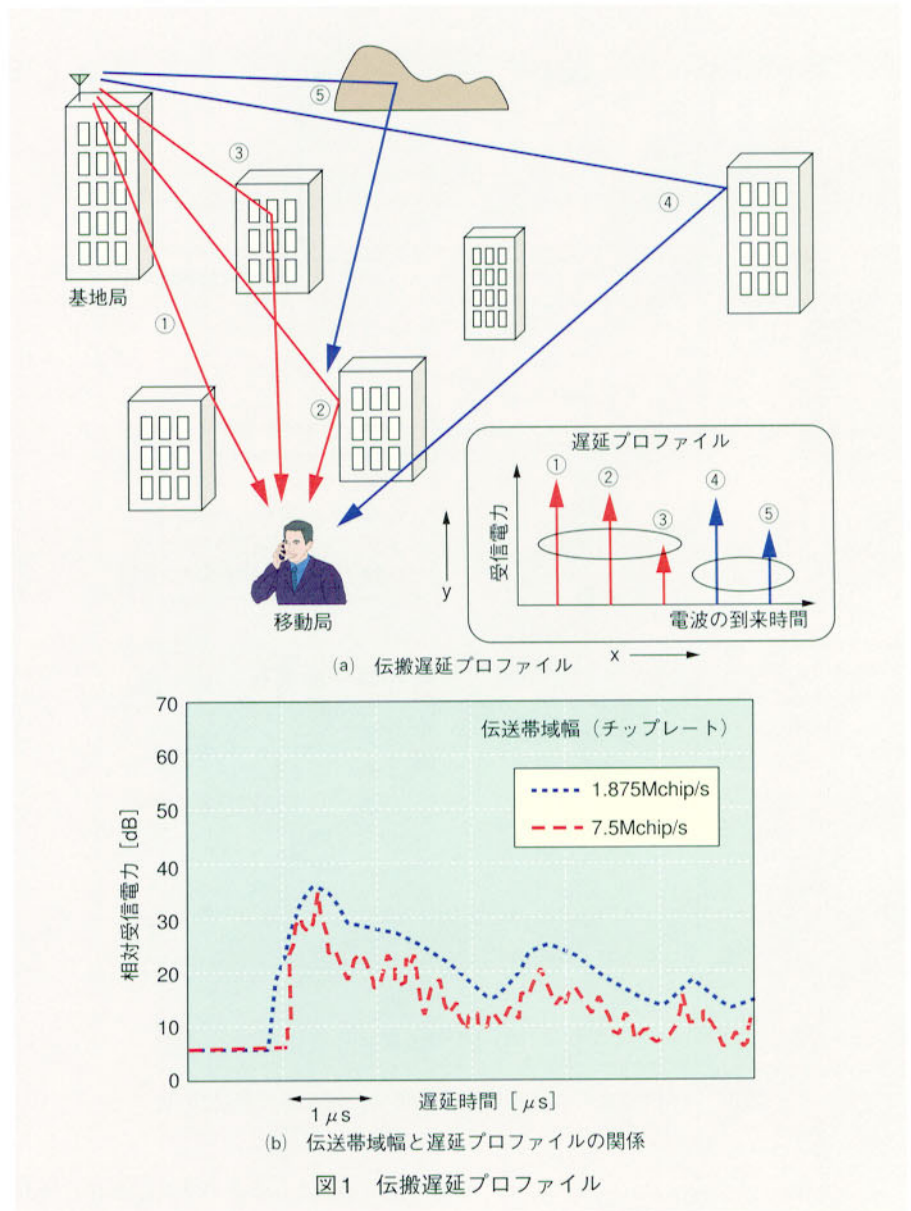
ところで、伝搬路特性は伝搬遅延時間により、①伝送信号の周波数特性を変化させない“一様フェージング (Flat Fading)”と、②伝送信号の周波数特性を変化させる“周波数選択性フェージング (Selective Fading)”に分類できます。周波数選択性フェージングは伝搬路のインパルス応答である伝搬遅延プロファイルで特徴付けられます[1]。周波数選択性フェージング伝搬路において、広帯域伝送を実現するためには、符号間干渉を克服する工夫や伝送方式の開発が不可欠です。次世代方式である W-CDMA 方式 (Wideband-Code Division Multiple Access) もその一つです。

本稿では、広帯域伝送の伝送品質に大きく影響を与える伝搬遅延プロファイル特性について解説します。まず、周波数選択性フェージング伝搬路での伝送品質について説明します。続いて、理論解析や計算機シミュレーションで用いられる伝搬遅延プロファイルモデルについて概説します。

2. 伝搬遅延特性と伝送品質

送信点から放射された電波は、途中の構造物で幾何学的に反射、透過、回折を繰り返して受信点に到達します。図1は基地局アンテナから電波を送信し、ビルなどで反射や回折を経て到達した電波を受信した場合の概念図です。横軸は移動局に到来する電波の伝搬遅延時間であり、縦軸は受信電力を示したもので、伝搬遅延プロファイルと呼ばれるものです。また、同図に示す①、②、③、④、⑤は電波の素波（パス）を示しています。伝搬遅延時間の最も小さいパス①は基地局から最短距離で到達したパスであり、パス②、③は移動局周辺で反射、回折をされたパスです。伝搬遅延時間がそれよりさらに大きいパス④、⑤は、遠方の建物や山岳などで反射、回折して到達したパスです。図1(b)に遅延プロファイルの測定例を示します。波形が図1(a)に示す離散的なパスとは異なり滑らかな曲線になっています。また、波形のピーク値を分離可能なパスと定義すれば、伝送帯域幅（厳密には拡散帯域幅であり、以降、チップレートと呼ぶことにします）を大きくするほど分離可能なパス数が多くなっていることが分かります。

ところで図1に示すような伝搬遅延波があると、伝搬路の周波数特性が変化し、その結果伝送信号の周波数特性が大きく歪みます[1]。このような伝搬路で広帯域信号を送信すれば受信スペクトラムは大

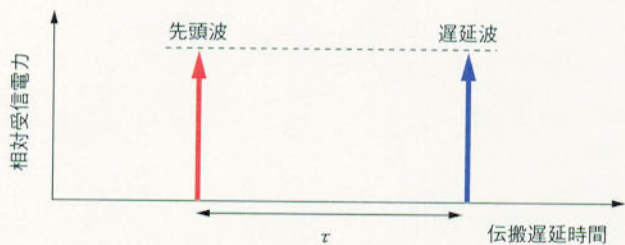


大きく歪み、伝送信号を再生できません。そのため、広帯域伝送を実現するためには、符号間干渉を低減する工夫や伝搬遅延波を克服できる伝送方式の開発が不可欠です。

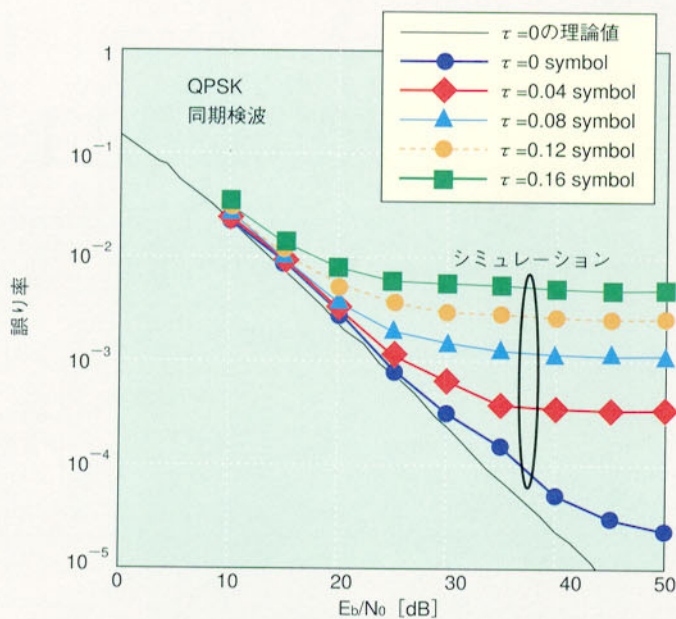
2.1 TDMA方式

TDMA方式 (Time Division Multiple Access) では、伝送信号の符号長に比べて伝搬遅延時間が大きければ符号間干渉 (ISI : Inter Symbol Interference) により伝送誤りを起こします。その値は変調方

式や受信方式によって異なりますが、符号長の1/10~1/20程度の遅延が一応の目安と考えられます。その値を超えると急激に誤りを起こすようになり、伝送品質は大きく劣化します。例えば、伝送速度を1Mbit/sとした場合、伝送信号1ビットは1 μ sであり、許容遅延時間は上記に示した符号長の1/10とすれば100nsとなります。この値を伝搬距離で換算すると電波の速度が秒速30万kmですので、約30mとなります。すなわち、伝搬距離差で30m遅れた遅延波があると符号誤り



(a) 遅延プロファイルモデル



(b) 伝送誤り率

図2 TDMA方式における伝搬遅延時間と伝送誤り率特性 [2]

が生じることになります。伝搬遅延時間と伝送信号の誤り率の関係を図2に示します[2]。ただし、変調方式はQPSK (Quadri-Phase Shift Keying)、復調方式は同期検波としています。図2(a)は評価に用いた伝搬遅延プロファイルです。先頭波と遅延波1波の2波で構成される最も簡単な伝搬遅延プロファイルで、各パスの振幅はレイリー分布に従い変動（以降、レイリー変動と呼ぶことにします）しているものとし、また、図中のパラメータはシンボル長で規格化した伝搬遅延時間です。伝搬遅延時間が大きくなると受信電力をいくら大きくしても

符号間干渉のために誤りを軽減できません。

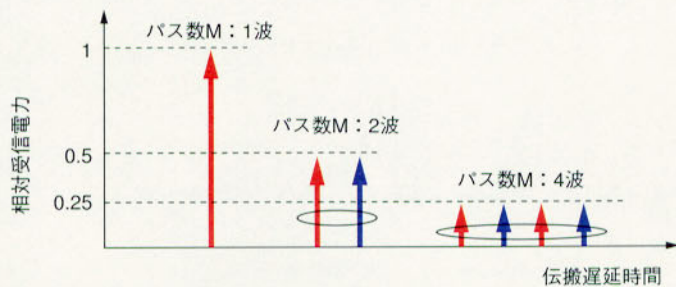
このようにTDMA方式を用いて広帯域伝送を実現するためには符号間干渉を克服する技術が重要であり、適応等化器やアダプティブアレイアンテナなどの時空間等化技術が精力的に研究されています[3]。

2.2 CDMA方式

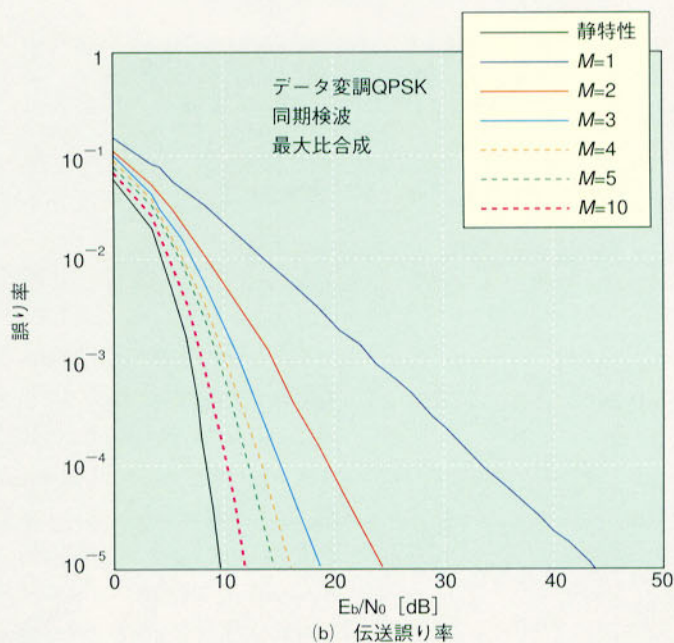
CDMA方式では拡散符号を用いて伝搬遅延波を分離し、それぞれのパスを個別に受信します。そのため、TDMA方式で問題であった符号間干渉を克服できます。さらに、分離した複数のパスは同一の情報を含んでいるのでそれらを効率良く合成することで伝送品質の改善が図れます[4]。この受信方式はRAKE受信、またはパスダイバーシチ受信と呼ばれています。しかし、符号間干渉を受けない程度に伝搬遅延波を分離するためには、伝送信号を10倍以上の帯域に拡散する必要があります。

ところで、CDMA方式ではTDMA方式とは逆に伝搬遅延波（分離可能なパス数）が多いほど、RAKE受信により伝送品質の向上が図れます。図3は分離可能なパス数 M と伝送信号の誤り率の関係を示しています。変調方式はデータ変調としてQPSK、復調方式は同期検波、RAKE受信方法は最大比合成を用いています。図3(a)は評価に用いる伝搬遅延プロファイルであり、各パスはレイリー変動しているものとしています。また、パスの総電力は1となるように規格化しています。例えば、パス数 M が2波の場合には各パスの受信電力は0.5となり、4波の場合には各パスの受信電力は0.25となります。図からパス数 M が増加するほど誤り率は改善することが分かります。

以上の説明から伝搬遅延特性は伝送方式に関わらず伝送品質を決定するうえで



(a) 遅延プロファイルモデル



(b) 伝送誤り率

図3 CDMA方式における分離可能なパス数と伝送誤り率特性

非常に重要であることが理解できると思っています。

3. 伝搬遅延プロファイル

伝搬遅延プロファイルは地形・地物、特に都市構造に大きく依存します。また、基地局アンテナ高にも依存します。このことは図1に示すように遅延波が反射、回折を繰り返して受信点に到達することからも容易に類推できるかと思えます。

図4は伝搬遅延プロファイルの測定例を示します[5], [12]。測定場所は、都内、平塚、甲府および千葉です。都内ではす

ぐ真近に高層ビル群が控えていますが、周囲の中層ビルの遮へいにより、高層ビル群からの長い遅延波はほとんど到達していません。一方、甲府では遠方にある山岳からの反射波を遮る建物が少ないことから長い遅延波が到達しています。このように、地形や地物が異なれば伝搬遅延プロファイルの違いが顕著に現われることが分かります。

また、基地局アンテナ高によっても伝搬遅延プロファイルの形状は変わります。図5は都内で、基地局アンテナ高をそれぞれ115mと65mとした場合の測定結果です。基地局アンテナ高が高くなるほど伝搬遅延プロファイルの傾きが急峻になっています。

ところで、地域は同じでも特殊な伝搬環境のため伝搬遅延プロファイルが大きく変わることがあります。図6は都内の港湾（埠頭）における測定結果です。海に面している側は遅延波を遮る建物がないため、対岸からの長い遅延波が到達しています。平均的に伝搬遅延が小さい地域でもこのような特殊な伝搬環境が存在することには注意を払う必要があります。

4. 伝送品質の評価

2章で説明したように、TDMA方式とCDMA方式では伝搬遅延プロファイルの伝送品質に及ぼす影響は大きく異なります。そこで方式ごとの伝搬遅延プロファイルの評価方法について説明します。

4.1 遅延スプレッド

TDMA方式では2.1節で説明したように伝搬遅延波が存在すれば伝送品質は劣化します。興味深いことに伝送誤り率は伝搬遅延プロファイルの形に影響されずに、伝搬遅延プロファイルの標準偏差である遅延広がり（遅延スプレッド）と密接な相関関係があることが明らかにされています[6]。すなわち、伝搬遅延プロフ

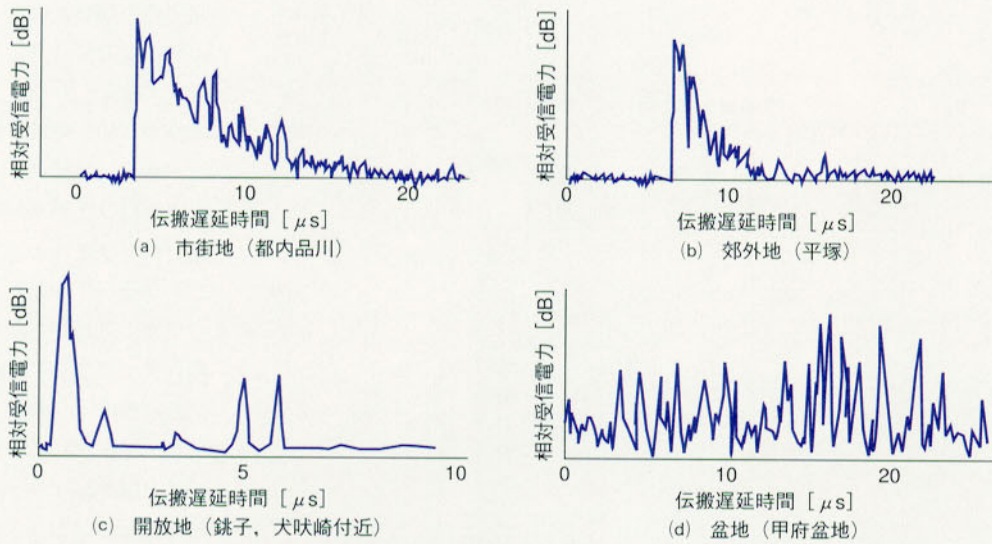


図4 伝搬遅延プロファイルの測定例 [5], [12]

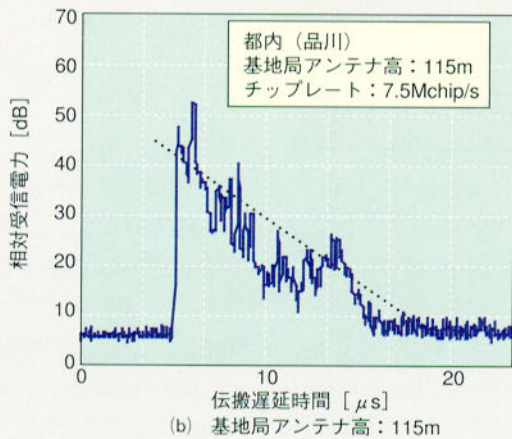
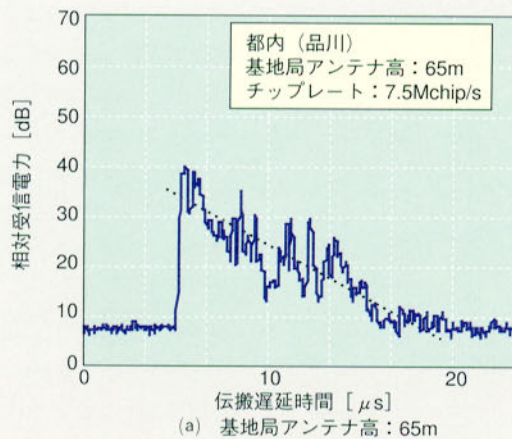


図5 基地局アンテナ高特性 (都市 品川)

ファイルの形状が指数関数形であろうと他の関数形であろうと遅延スプレッド値が同じであれば、誤り率はほぼ同じ値になります。したがって、TDMA方式では伝搬遅延の影響は遅延スプレッドで評価されます。図2(a)に示す伝搬遅延プロファイルの場合、遅延スプレッドは遅延時間 τ の半分の $\tau/2$ となります。例えば、図2(b)の $\tau=0.16$ シンボルの曲線は遅延スプレッドが0.08シンボルの場合の誤り率を与えています。

典型的な市街地である都市、および開放地である甲府で測定した遅延スプレッド値を図7に示します[5], [7]。この場合、基地局アンテナ高は周辺の建物よりも高く設置されています。移動局周辺に多数の建物があり、見通しがきかない市街地では、遠方からの反射波は建物に遮られて移動局には届きにくいいため、遅延スプレッドは小さくなっています。しかし、移動局周辺に建物が少なく、遠方からの反射波（この場合、山岳からの反射）が到達しやすい開放地では遅延スプレッドは大きくなっています。

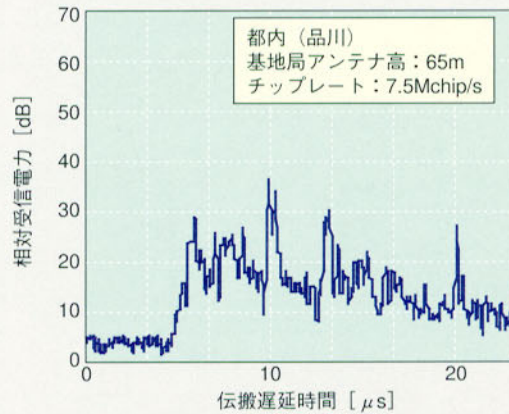


図6 特殊地域（埠頭）での測定例（都内 品川）

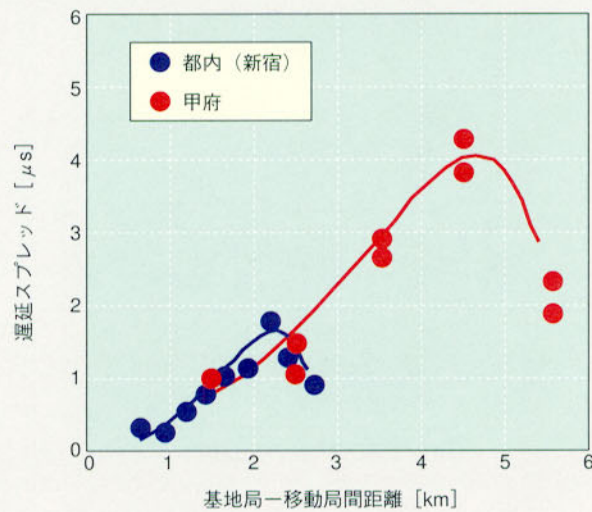


図7 遅延スプレッドの測定例 [5]

4.2 有効パス数

CDMA方式では符号間干渉は問題になりませんが、2.2節で説明したように分離するパスの受信電力が伝送品質を評価するうえで重要となります。特にRAKE受信では、受信電力の向上に大きく寄与するパス（以下、有効パスと呼ぶことにします）の数が重要となります。都内、平塚で測定したチップレートと有効パス数の関係を図8に示します[8]。ただし、図8(a)に示すように、最大Peakパスより

ΔL (dB) 以内にあるパスを有効パスと定義し、評価の対象としています。同図では有効パス数は3パスとなります。 ΔL が小さいほど受信電力の大きいパス数の評価を行うこととなります。図1(b)に示すようにチップレートにより有効パス数は変わりますが、例えばチップレートを5Mchip/s、 ΔL を9dBとすれば郊外地（平塚）でも有効パスを3パス程度得られることが分かります。

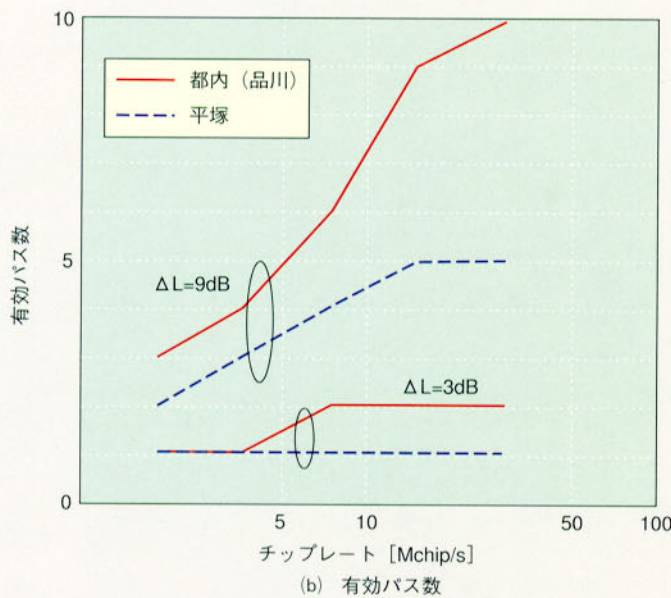
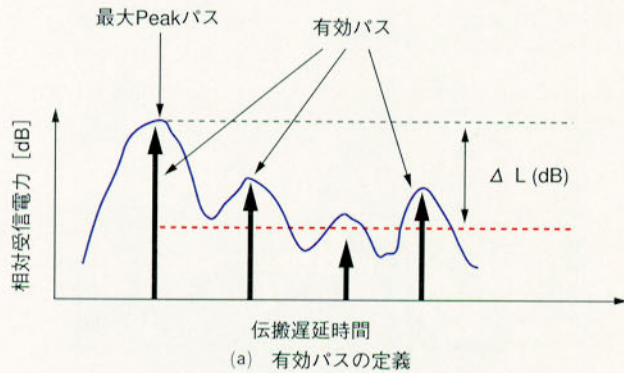


図8 有効パス数の測定例

5. 伝搬遅延プロファイルモデル

3章で示したように伝搬遅延プロファイルは周囲の地形や地物に応じて大きく変わります。解析が容易でしかも測定結果の特徴をよく表わしている伝搬遅延プロファイルモデルを以下に示します[5]。

(1) ダブルスパイクモデル

図9(a)に示すように多重伝搬路を先行波と遅延波の2波で特徴付けたもので、その関数形は表1(a)で与えられます。ここで、 P_1 、 P_2 は先行波と遅延波の平均電力であり、 $\delta(x)$ はデルタ関数で、 δ

$(x) = 1(x=0)$, $\delta(x) = 0(x \neq 0)$ で定義されます。また遅延スプレッドSおよび平均遅延時間 T_b も併せて表に示しています。このモデルは最も簡易であり、伝送特性の理論解析モデルや伝搬路を模擬するフェージングシミュレータモデルとして用いられます。具体的には伝送特性(例えば、伝送誤り率)が実際の測定結果と合うように等価的な P_1 、 P_2 および遅延時間差($\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$)を決めて用います。

(2) 指数関数モデル

図9(b)は指数関数モデルです。縦軸をdBで表わしているため、伝搬遅延時間に対して直線となっています。このモデルは市街地の伝搬遅延プロファイルモデルとして用いられます。伝搬遅延プロファイルの関数形を表1(b)に示します[3]。ただし、全電力が1となるように規格化しています。ここで、 $U(x)$ は $U(x) = 1(x \geq 0)$, $U(x) = 0(x < 0)$ で定義されるユニット関数です。また、 σ_0 は平均遅延時間です。

典型的な市街地における平均遅延時間 σ_0 の値は $1 \mu s \sim 2 \mu s$ 程度の値です。指数関数型モデルは関数形が非常に簡易なこと、その特性が測定結果とおおむね一致することから伝送特性の理論解析モデルとしてよく用いられます。

(3) べき乗関数モデル

図9(c)はべき乗関数モデルです。べき乗関数モデルは縦軸をdBで表わした場合に、その形状が遅延時間に対して指数関数で与えられるモデルです。周辺建物高と同程度に基地局アンテナ高を設定し、サービスエリアを構成する市街地マイクロセル対応の伝搬遅延プロファイルモデルとして提案されています[13]。伝搬遅延プロファイルの関数形を表1(c)に示します。ここで α は定数であり、市街地では3~4程度の値となります。

(4) 多重指数関数モデル

伝搬遅延プロファイルを詳細に記述す

るモデルとして、指数関数モデルを拡張した多重指数関数モデルがあります。これは、山岳や高層ビルが遠方に複数存在する市街地の伝搬遅延プロファイルを一般化したモデルと位置付けられます。図9(d)に示すように複数の遅延波群（群数： n ）から構成されます。各遅延波群の伝搬遅延プロファイルは、平均遅延時間が σ_i ($i=0, 1, 2, \dots, n-1$)である指数関数で与えられます。伝搬遅延プロファイルの関数形を表1(d)に示します。ここで、 τ_i は各遅延波群の中の先頭波の

遅延時間です。例えば n を1とすれば表1(b)に示す指数関数モデルとなり、 n を2とし、各遅延波群の σ_i を0とおけば表1(a)に示すダブルスパイクモデルとなります。なお、多重指数関数モデルの場合、解析的に遅延スプレッド S および平均遅延時間 T_D を求めることは非常に困難です。そのため表1には記載していませんが、定義に従って数値計算を行えば容易に求められます[5]。

(5) 回帰モデル

実際の都市構造のパラメータを反映し

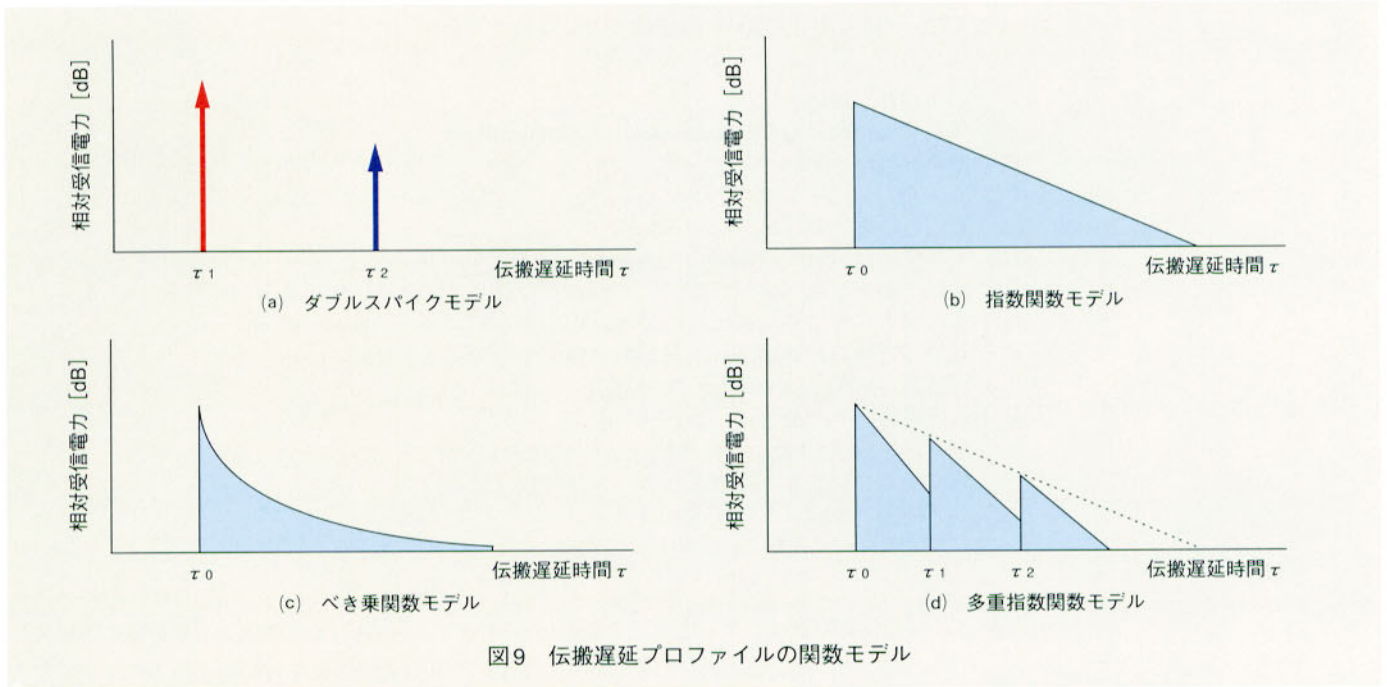


図9 伝搬遅延プロファイルの関数モデル

表1 遅延プロファイルモデル

モデル	関数形 $p(\tau)$	平均遅延時間 T_D	遅延スプレッド S
(a) ダブルスパイクモデル	$p(\tau) = \frac{1}{P_1+P_2} \{P_1 \cdot \delta(\tau - \tau_1) + P_2 \cdot \delta(\tau - \tau_2)\}$	$T_D = \frac{P_2 \cdot (\tau_2 - \tau_1)}{P_1 + P_2}$	$S = \frac{\sqrt{P_1 \times P_2}}{P_1 + P_2} (\tau_2 - \tau_1)$
(b) 指数関数モデル	$p(\tau) = \frac{1}{\sigma_0} \exp\left(-\frac{\tau - \tau_0}{\sigma_0}\right) U(\tau - \tau_0)$	$T_D = \sigma_0$	$S = \sigma_0$
(c) べき乗関数モデル	$p(\tau) = \frac{(\alpha - 1)}{\tau_0^{-\alpha + 1}} \tau^{-\alpha} U(\tau - \tau_0)$	$T_D = \frac{1}{\alpha - 2} \tau_0$	$S = \tau_0 \sqrt{\left(\frac{\alpha - 1}{\alpha - 3}\right) - \left(\frac{\alpha - 1}{\alpha - 2}\right)^2}$
(d) 多重指数関数モデル	$p(\tau) = \frac{1}{\sum_{i=0}^{n-1} \sigma_i} \sum_{i=0}^{n-1} \exp\left(-\frac{\tau - \tau_i}{\sigma_i}\right) U(\tau - \tau_i)$	—	—

表2 遅延プロファイルモデル（回帰モデル）の推定式

$$L_p(d, k, B) = L(d, k, B) + R(k, B) + 3$$

ただし、

$$L(d, k, B) = 100 - 7.1 \log W + 0.023 \theta + 1.4 \log h_s$$

$$+ 6.11 \log \langle H \rangle - \{24.37 - 3.7 (H/h_{b0})^2\} \log h_b$$

$$+ (43.42 - 3.1 \log h_b) \log \{d + (k-1) \Delta d\} + 20.4 \log f$$

$$- a(h_m)$$

$$+ 10 \log(M)$$

$$R(k, B) = \begin{cases} 0 & (k=1) \\ \max[0, 6.43 - 8.2 \log \langle H \rangle + 6.0 \log(h_b) + \{0.25 - 10.0 \log \langle H \rangle + 10.0 \log(h_b)\} \log(k-1) \Delta d] & (k \geq 2) \end{cases}$$

$$a(h_m) = 3.2 (\log 11.75 h_m)^2 - 4.97$$

$M = [B/1.875]$ ($[x]$ はガウス記号で x を越えない整数を表わす)

- k : パス番号 ($k \geq 1$)
- d : 基地局と移動局の最短距離 [km] (0.5km~10km)
- W : 道路幅 [m] (5m~50m)
- θ : 道路角 [$^\circ$] ($0^\circ \sim 90^\circ$)
- h_s : 道路際の建物高 [m] (5m~80m)
- $\langle H \rangle$: 平均建物高 [m] (移動局の地面からの高さ: 5m~50m)
- h_b : 送信アンテナ高 [m] (移動局の地面からの高さ: 20m~120m, $h_b > \langle H \rangle$)
- h_{b0} : 基地局アンテナ地上高 [m] (基地局の地面からの高さ: 20m~120m)
- H : 基地局近傍の建物高 [m] (基地局の地面からの高さ: $H \leq h_{b0}$)
- f : 周波数 [MHz] (800MHz~2600MHz)
- h_m : 移動局アンテナ高 [m] (1m~10m)
- B : チップレート [Mchip/s] (1Mchip/s~30Mchip/s)
- M : 基準チップレートを基準としたパス分割数 ($M \geq 1$)
- Δd : パス間隔 [km]

た伝搬遅延プロファイルモデルとして回帰モデルが提案されています[10], [11]. このモデルはチップレート B [Mchip/s] に応じて離散的なパスごとの伝搬損失値が計算できる実用的なモデルです. 今、先頭波のパス位置からチップレート B に応じたパス間隔 ($1/B$) で順番をつけたパス番号を k とします. k 番目のパスの伝搬損失を $L_p(d, k, B)$ とおくと、 $L_p(d, k, B)$ は表2のように与えられます. ただし、 d は先頭パスの送受信間距離 (送受信間の最短距離) です. 図10に伝搬遅延プロファイルの計算例を示します. 表1(c)のべき乗関数モデルに近い関数モデルとなっています. このモデルを用いれ

ば、例えばCDMA方式の評価に不可欠な有効パス数を容易に求めることができます.

図11に表1(b), (c), (d)の伝搬遅延プロファイルモデルを図5(b)の伝搬遅延プロファイルに併せて表示した結果を示します. 関数形の複雑さと適応度の関係が視覚的に理解できるものと思います. ところで、表1(a)~(d)で示した伝搬遅延プロファイルモデルは連続関数で与えられているため、表2で示した回帰モデルのように有効パス数を簡単には求めることはできません. 連続関数で表わしている遅延プロファイルからも有効パス数を解析的に求めることはできます. 具体的な

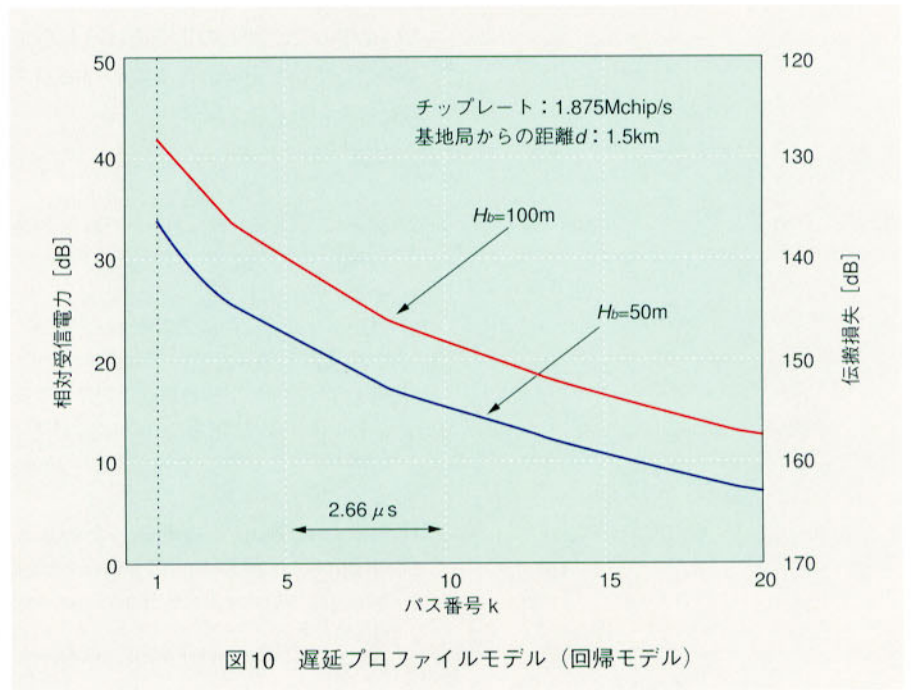


図10 遅延プロファイルモデル (回帰モデル)

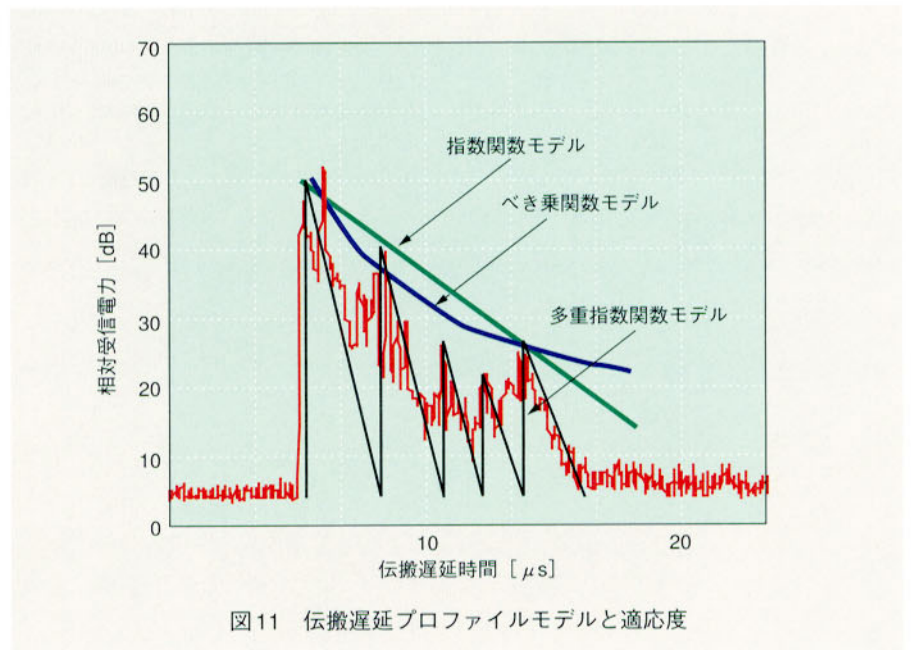


図11 伝搬遅延プロファイルモデルと適応度

求め方は文献[9]を参照して下さい。

6. まとめ

本稿では広帯域伝送の伝送品質に大きく影響を与える伝搬遅延プロファイル特性について解説しました。また、理論解

析や計算機シミュレーションに用いられる伝搬遅延プロファイルモデルなどについて概説しました。

なお、本稿では定性的な説明に重点をおいたため、数式を用いた解析的な解説は省略しました。理論解析に関しては、例えば文献[5]、[14]に詳しくまとめられ

ていますので、関心のある方はそれらを参考にしていただければ本稿の理解が一層深まるものと考えます。

文 献

- [1] 藤井：“広帯域移動伝搬 その1 狭帯域伝搬から広帯域伝搬”，本誌，Vol.7，No.3，pp.38-46 (1999)。
- [2] 齊藤：“デジタル無線通信の変復調”，5章，電子情報通信学会 (1996)。
- [3] 例えば，鈴木：“移動通信における無線信号処理 変復調技術における適応信号処理を中心にして”，本誌，Vol.3，No.2，pp.22-31 (1995)。
- [4] 例えば，A.J.Viterbi：“CDMA”，：Principles of Spread Spectrum Communication Addison-Wesley Publishing Company (1995)。
- [5] 細矢監修：“電波伝搬ハンドブック”，15章，リアライズ社 (1999)。
- [6] J.Chung：“Simulation of digital modulation on portable radio communication channels with frequency-selective fading”，IEEE Globcom '86，pp.31.6.1-31.6.7 (1986)。
- [7] 田中，明山，小園：“移動通信における市街地の多重路伝搬遅延特性”，信学論 (B-II)，J73-B-II，11，pp.772-778 (1990)。
- [8] 藤井，今井：“広帯域DS-CDMA 移動通信方式における有効パス数に関する一検討”，J82-B，10，pp.1923-1927 (1999)。
- [9] 井上，唐沢：“時間及び空間に広がりを持つマルチパス波の最適合成に関する理論的考察”，信学技報，RCS98-25，pp.7-12 (1998)。
- [10] 藤井，今井：“広帯域DS-CDMA方式におけるダイナミック遅延プロファイルモデル”，本誌，Vol.7，No.2，pp.38-45 (1999)。
- [11] 藤井，今井：“広帯域DS-CDMA方式における遅延プロファイル推定”，1999信学ソサイエティ大会，B-1-18。
- [12] 木野，猿渡：“市街地および山岳地域における陸上移動遅延プロファイルの測定”，信学技報，AP87-77 (1987)。
- [13] 市坪，古野，川崎：“都市内マイクロセル伝搬における遅延プロファイルモデル”，信学論 (B-II)，J80-B-II，8，pp.707-713 (1997)。
- [14] 細矢監修：“電波伝搬ハンドブック”，12章，リアライズ社 (1999)。