

広帯域移動伝搬

その3 W-CDMA 対応ダイナミックパスモデル

W-CDMA方式の伝送品質を精度良く評価するためには、走行に伴う変動特性を模擬できるパスモデルが不可欠です。

本稿ではW-CDMA方式を対象として、パスの走行に伴う変動特性を模擬できるダイナミックパスモデルについて解説します。

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（パス）の到着時間の遅れ（伝搬遅延）が伝送品質に大きく影響します。特に伝搬遅延の大きいパスが複数ある場合には、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”のため、伝送信号の周波数特性が大きく歪み、伝送信号を再生できません[1]。そのため、広帯域伝送を実現するには、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。

次世代移動通信方式であるW-CDMA（Wideband-Code Division Multiple Access）方式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できることから、符号間干渉を克服できます。また、分離した複数のパスを効率良く合成することで伝送品質の改善が図れます。これはRAKE受信、またはパスダイバーシチ受信と呼ばれる受信方式であり、伝搬遅延波（分離可能なパス）の数が多いほど伝送品質の向上が図れます。

ところで、W-CDMA方式においてRAKE受信を効率良く行うためには、移動局の走行に伴って移動するパスの受信タイミングを正確に捕捉しなければなりません。しかし、走行速度が速い場合にはパスの受信タイミングも高速に変化することから、W-CDMA方式の伝送品質

を正しく評価するためには、走行に伴うパスの変動特性を模擬できるパスモデルが不可欠です。

本稿では、W-CDMA方式を対象として、パスの走行に伴う変動特性を模擬できるダイナミックパスモデルについて解説します。

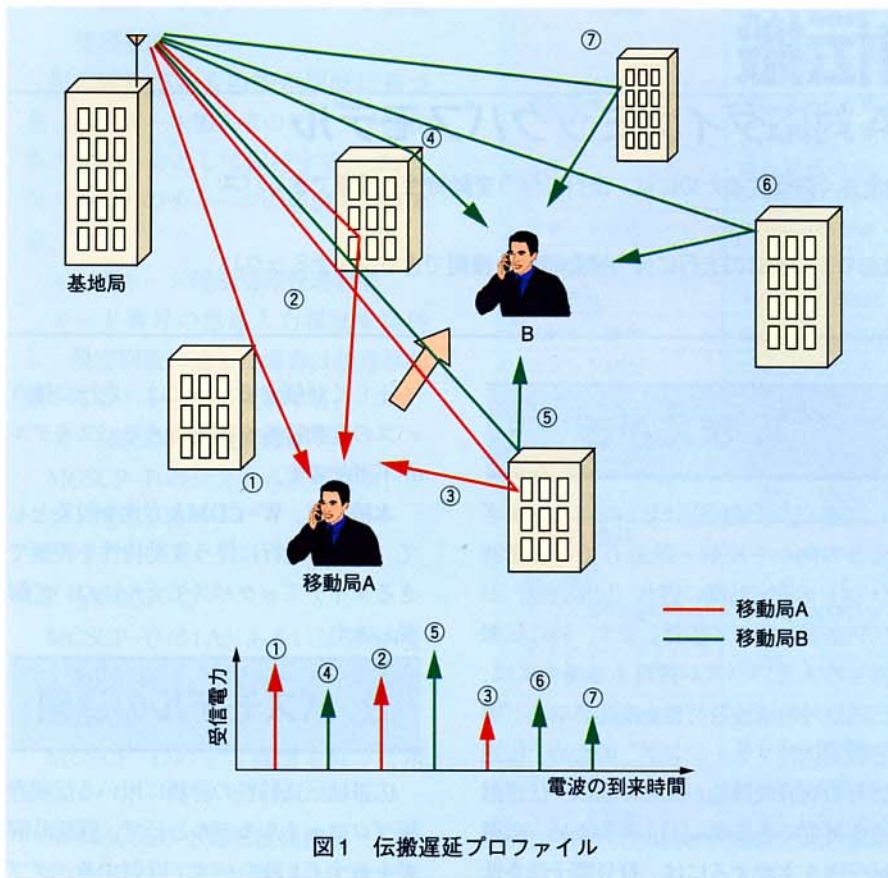
2. パスモデルの課題

広帯域伝送特性の評価に用いる伝搬遅延プロファイルモデルとして、遅延時間差を有する2波のパスで近似する“ダブルスパイクモデル”や伝搬遅延時間に対して受信電力が指数関数的に減衰する“指数関数モデル”が使い勝手が良いことやその特性が測定結果とおおむね一致することからよく用いられています[2]。しかし、これらのモデルではパスを分離し、RAKE受信するW-CDMA方式の伝送特性を評価するのに必ずしも十分ではありません。

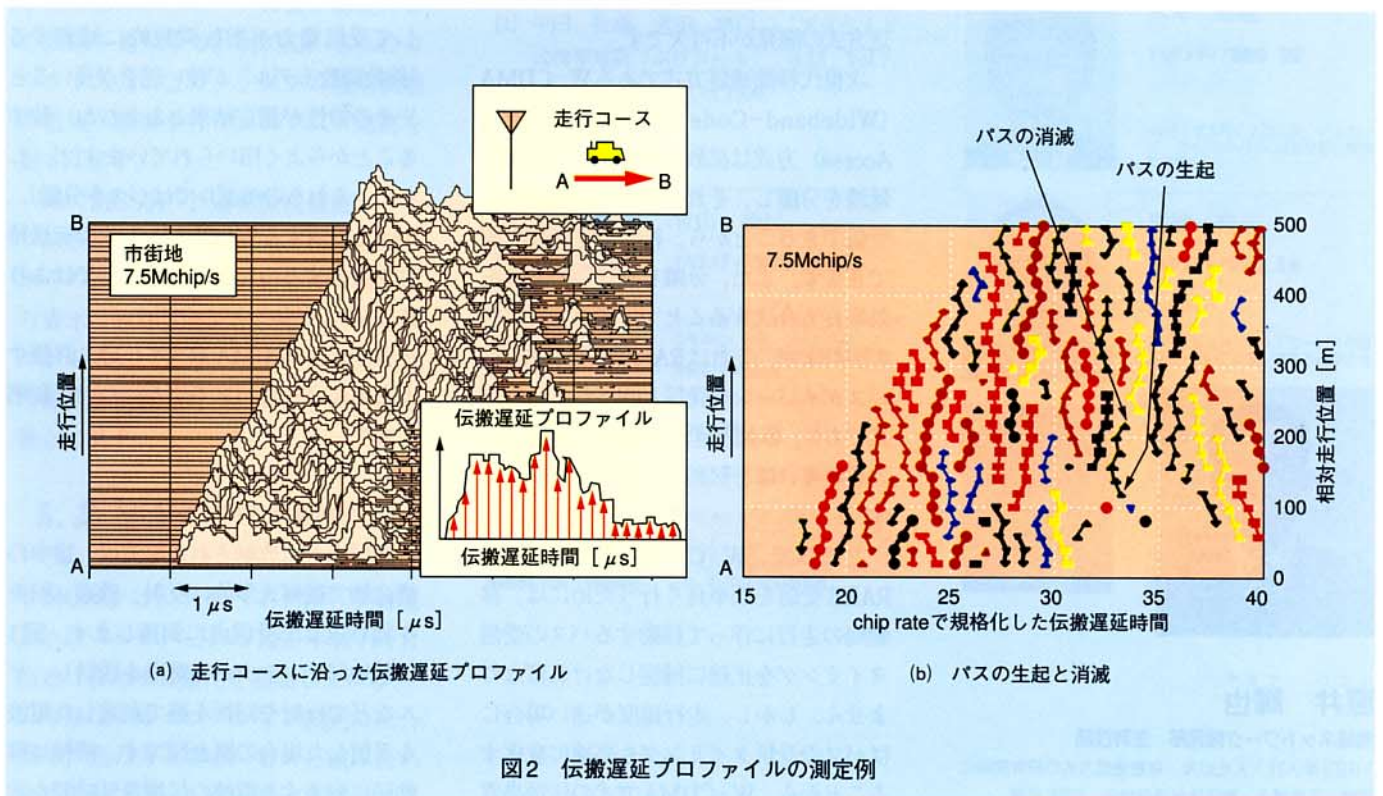
まず、W-CDMA方式を正確に評価するために必要なパスモデルについて説明します。

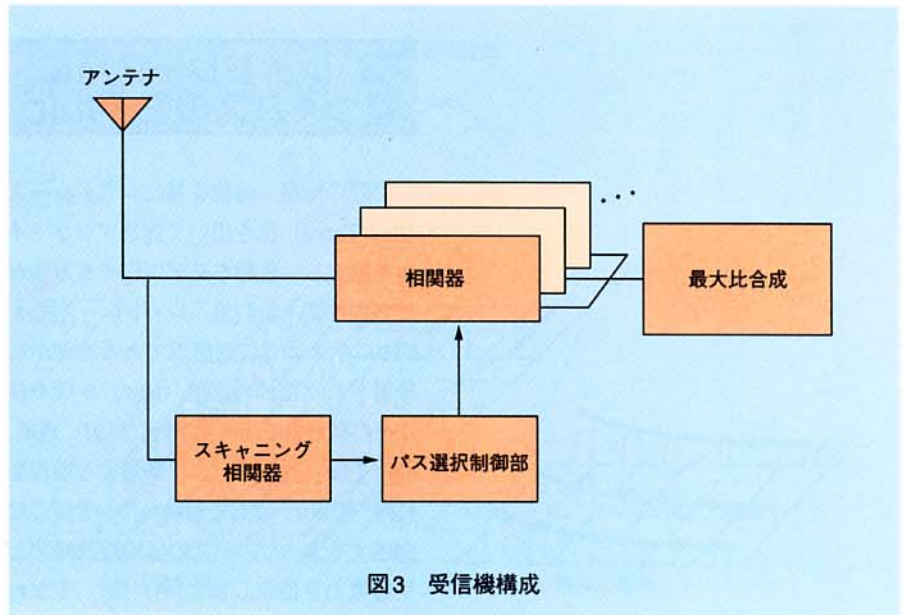
2.1 伝搬遅延プロファイル

送信点から放射された電波は、途中の構造物で幾何光学的に反射、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を示



し、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①～③、および④～⑦の電波は素波（パス）と呼ばれているものです。例えば、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、回折して到達したパスです。図1には位置Aと位置Bの伝搬遅延プロファイルを併せて示しています。移動局の位置がA、Bと変われば伝搬距離および周囲の地形・地物が変わるため、伝搬遅延プロファイルも変化します。図2に都内で測定した伝搬遅延プロファイルの測定例を示します。縦軸は移動局の走行位置を示しています。移動局の位置によって伝搬遅延プロファイルが変化している様子が分かります。また、パスの生起、消滅の観点から表示した結果を図2(b)に示します。図中の線分はパスが生起してから消滅するまでの区間長を示しています。なお、図2(a)に示す波形が図1に示





すインパルスのなパスとは異なり滑らかな曲線になっているのは伝送帯域幅の制限によるものです[1]。

このような伝搬環境下を移動局が一定速度で走行すれば、パスごとの伝搬遅延時間と受信電力は刻々と変化することになります。

2.2 W-CDMA方式のパスモデルの課題

W-CDMA方式ではアンテナで受信した受信波を相関器で逆拡散し、受信信号を最大比合成します。受信機構成の一例を図3に示します。受信機は相関器 (Correlator)、最大比合成部 (MRC: Maximum Ratio Combining) からなる受信部と相関器に割り当てるパスを選択するパス選択制御部から構成されます。分離可能なパス数は伝送帯域幅 (厳密には、拡散帯域幅です。以降、チップレートと呼ぶことにします) により異なります。一般にチップレートが高くなれば、分離可能なパス数は増大します。例えば10Mchip/s以上では分離可能なパス数は数十以上にも及びます[2]。全パスを受信するためには数十以上の相関器が必要となりますが、携帯移動機で数十以上の相

関器を持つことは物理的に困難です。そのためパス選択制御部では各パスの受信電力を測定して、受信電力の大きいパスから順に相関器数だけのパスを選択して合成します。この方法により、少ない相関器数で多くの信号電力が受信できます。一方、分離したパスは図2に示すように移動局の走行に伴って伝搬遅延時間が刻々と変化します。また、図2(b)からも分かるように途中で生じたり、消滅するパスもあります。したがって、W-CDMA方式の伝送特性を正確に評価するためには、刻々と変化するパスを捕捉し、かつ受信電力の高いパスを選択する機能 (以下、パス選択機能と呼びます) を併せて評価できるパスモデルが不可欠となります。すなわち、これらの評価要素を反映できないようなパスモデルでは伝送特性の正確な評価は行えません。以上をまとめると、W-CDMA方式の伝送特性を評価するためには次の特徴を備えたパスモデルが必要となります。

- (1) パス数がチップレートに応じて増減できるパスモデル
- (2) 移動局の走行に伴って各パスの伝搬遅延時間と受信電力が変化するパスモデル

3. レイトレース法に基づくパスのモデル化

実際の地形・地物を基にレイトレース (Ray Trace) 法を用いて遅延プロファイル (Ray Profile) を推定し、変動をモデル化する方法が提案されています[3]。レイトレース法は、図1に示すように送信点である波源から放射された電波の素波 (Ray) が壁や柱などの構造物で幾何光学的に反射、透過、回折を繰り返し受信点に到達する過程を軌跡 (Trace) として追跡して、受信点に到達するすべてのパスの伝搬遅延時間と受信電力を推定します[4]、[5]。すなわち、レイトレース法を用いればさまざまな地形・地物に対し、送受信点間の幾何光学的なトレースを求めるだけで遅延プロファイル (電界強度) を求めることができます。このことに着目して、道路に沿って場所ごとに遅延プロファイルを推定し、推定した伝搬環境下で移動局を走行させることで、変動するパスモデルを生成できます。この方法は実環境に則したパスモデルを直接生成できることから、非常に魅力的な方法です。しかしながら、レイトレース法に基づくモデル化は、地形・地物 (建物などの材質を含む) のデータベースの構築方法や地物 (建物などの構造物) の数に伴い激増する計算時間の削減方法など、数多くの課題が残されているため、実用化されていません。なお、レイトレース法については次回で詳しく説明します。

4. 実験結果に基づいたパスのモデル化

場所ごとの遅延プロファイルを推定し、モデル化するレイトレース法に代わって測定データを統計処理し、変動の特徴だけを抽出してモデル化する方法 (ここで

は回帰モデルと呼ぶことにします) があります。回帰モデルは、場所ごとの遅延プロファイルを忠実にモデル化することはできませんが、変動を比較的容易に生成できることからW-CDMA方式の伝搬路モデルとしてよく用いられます。

4.1 回帰モデルの基本概念

回帰モデルでは、まず、図4に示すように広帯域伝搬における遅延プロファイルを、(1)瞬時遅延プロファイル、(2)短区間遅延プロファイル、(3)長区間遅延プロファイル、に分類します[6]。そして、分類した遅延プロファイルごとに変動をモデル化します。伝搬遅延時間 τ のパスに着目すれば、①瞬時変動 (瞬時遅延プロファイルの変動)、②短区間変動 (短区間遅延プロファイルの変動)、および③長区間変動 (長区間遅延プロファイルの変動)、が重畳した変動を受けていることになります。

ところで、①、②のような変動は一般にランダム変動と呼ばれ、その変動特性はパワースペクトラムや変動の分布で特徴付けられます。すなわち、パワースペクトラムや変動の分布をモデル化できれば変動を生成できます。

以下では、①～③の変動について説明します。

(1) 瞬時変動

無限の帯域を有するインパルス波を送信した場合には各パスの受信レベルは一定となり変動はありませんが、伝送帯域幅が有限であれば複数のパスが重ね合わされて受信されるため受信レベルは変動します。遅延時間が τ であるパスに着目すると、合成される素波数が5波もあれば一般にレイリー変動とみなせます。このことから、瞬時遅延プロファイルの瞬時変動は一般にレイリー分布で近似できます[1]、[5]、[7]。一方、移動局の周辺では素波の到来方向の分布は水平面内で一様と仮定できます。このような電波環

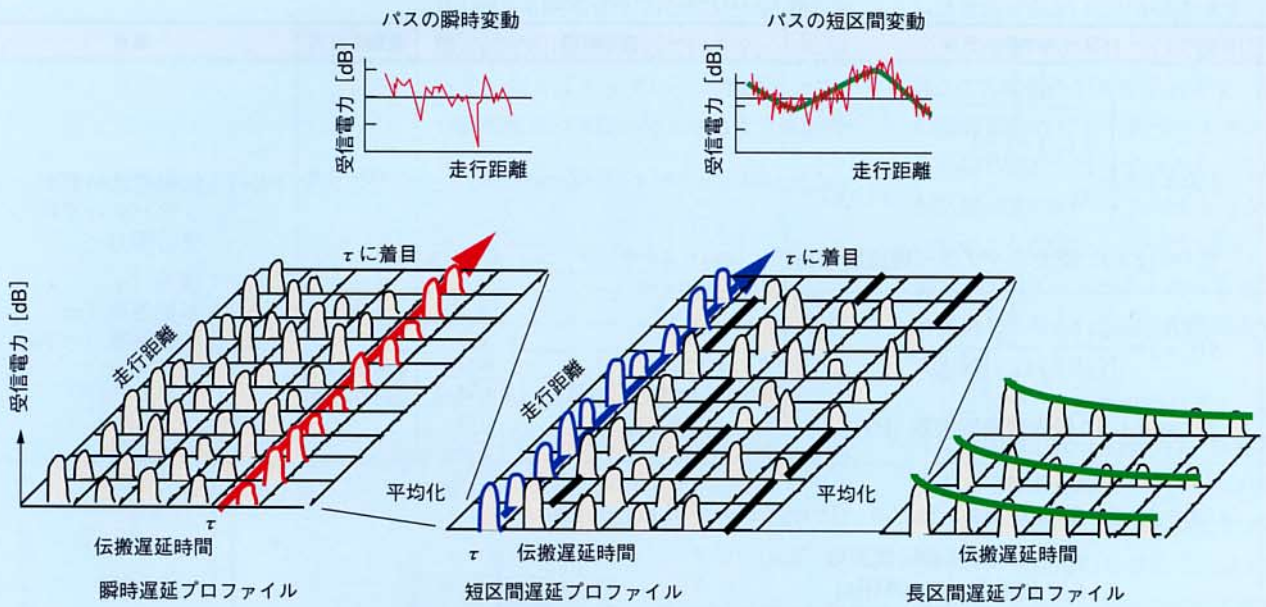
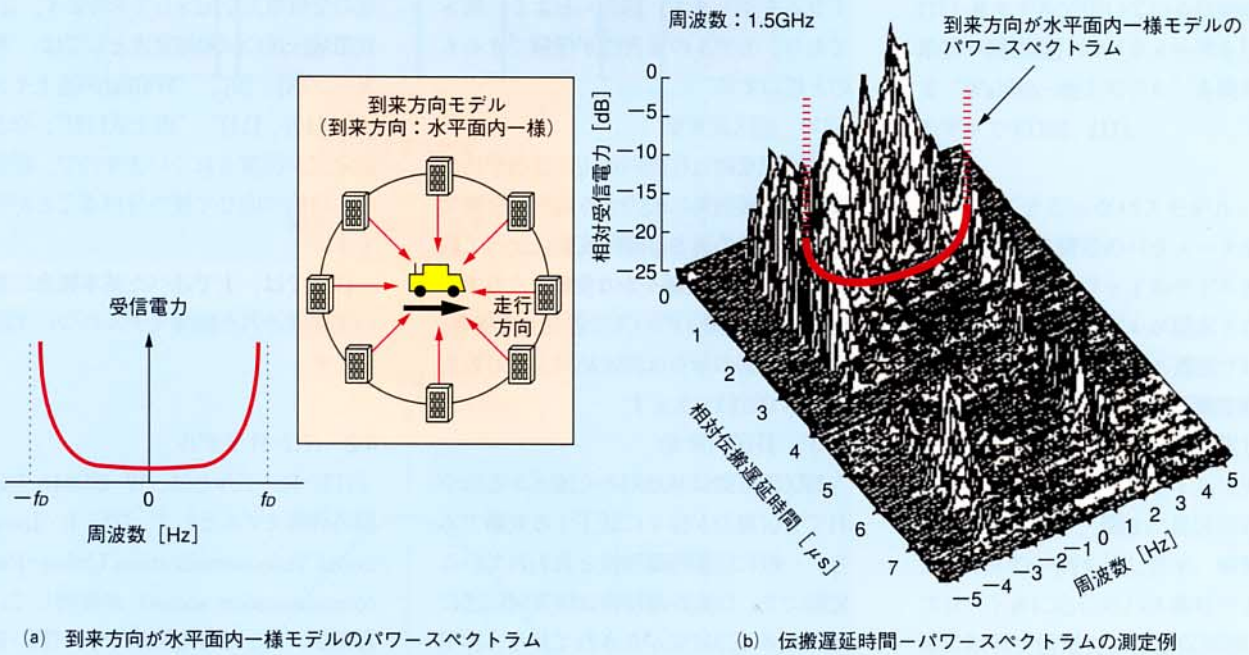


図4 遅延プロファイルの変動モデル



(a) 到来方向が水平面内一様モデルのパワースペクトラム

(b) 伝搬遅延時間-パワースペクトラムの測定例

図5 瞬時変動のパワースペクトラム

境下の中を無指向性アンテナを有する移動体が一定速度 v (最大ドップラー周波数 $f_D = v/\lambda$ [Hz] λ : 波長) で走行した場合、そのパワースペクトラムは図5(a)

および表1に示す関数で与えられます [7]. 瞬時変動の統計モデルとしては特殊な受信状況を除いてこのモデルが用いられます. 図5(b)に市街地の見通し外で測

表1 ITU-Rモデルの変動モデル

	パワースペクトラム	自己相関	変動の分布	備考
瞬時変動	$S(f, \tau) = \begin{cases} \frac{b(\tau)}{\pi f_b \sqrt{1 - (\frac{f}{f_b})^2}} & (f \leq f_b) \\ 0 & (f > f_b) \end{cases}$ $f_b (=v/\lambda)$: 最大ドップラー周波数 [Hz]	$R(t, \tau) = b(\tau) J_0(2\pi f_b t)$	レイリー分布	$b(\tau)$: 伝搬遅延時間が τ のパスの平均 受信電力 λ : 波長 [m] v : 移動速度 [m] d_{cor} : 相関距離 (=20m)
短区間変動	$S(f, \tau) = \frac{b(\tau)}{\pi} \frac{\ln^2 f_m}{f^2 + (\frac{\ln^2 f_m}{2\pi})^2}$ $f_m (=v/d_{cor})$: 最大変動周波数 [Hz]	$R(t, \tau) = b(\tau) \exp[-(\ln 2 \cdot v \cdot t / d_{cor})^2]$	対数正規分布 (dBガウス分布)	
長区間変動	$L(d) = 40(1 - 2 \times 10^{-3} \Delta h_b) \log(d) - 18 \log(\Delta h_b) + 21 \log(f) + 80$ d : 基地局移動局間距離 [km] f : 周波数 [2000MHz] Δh_b : 平均建物高からの基地局アンテナ高 [m]			

定した遅延プロファイルのパワースペクトラムを示します。図5(a)とよく一致しており、モデルの妥当性が理解できるものと思います。

(2) 短区間変動

短区間変動は移動局周辺の建物や地形などの遮蔽効果に起因する場所的変動であり、変動の速さは瞬時変動に比べて数100分の1程度と緩やかな変動となります[8]。遅延時間 τ のパスに着目した場合、パスの変動の分布は測定結果より対数正規分布で近似できます。

(3) 長区間変動

長区間変動は基地局から遠ざかるにつれて受信電力が徐々に低下する変動であり、一般に伝搬距離特性と言われている変動です。伝搬距離特性は狭帯域伝送において多くの研究がなされており、実用的な推定式が開発されています。ところで、遅延プロファイルの各パスの受信電力の総和は狭帯域伝送での受信電力と等しくなります。このことに着目して、狭帯域伝送の伝搬推定式から各パスの受信電力を求めることができます。具体的には各パスの相対受信電力が分かれば、各

パスの受信電力の比率に応じて狭帯域伝送の受信電力を配分して求めます。なお、狭帯域伝送の伝搬推定式としては、“奥村カーブ[8]、[9]”、“Walfish-池上モデル[5]、[10]、[11]”、“坂上式[12]”、などの推定式が提案されていますので、推定精度や目的に応じて使い分けることが可能です。

以下では、上で述べた基本概念に基づいて作成された回帰モデルについて紹介します。

4.2 ITU-Rモデル

ITU-Rモデルとは、W-CDMA方式の屋外評価モデルとして、ITU-R (International Telecommunication Union-Radio communication sector) が推奨している遅延プロファイルモデルです。ITU-Rモデルは、遅延プロファイルの変動を瞬時変動、短区間変動、長区間変動にわけて各々をモデル化しています[13]。まず、遅延プロファイルモデルについて説明します。遅延プロファイルはVehicular Bと呼ばれるモデルです。Vehicular Bモデルは図6に示すように、パス数が6パスで、

各パスの相対受信電力と相対伝搬遅延時間が固定的に決められています。したがって、例えばチップレートが高くなり、分離可能なパス数が増大するような場合

には対応できないことがあります。

次に変動モデルについて説明します。表1に各変動モデルを示します。各パスの瞬時変動のパワースペクトラムは図5(a)と同じ関数となっています。各パスの短区間変動のパワースペクトラムは図7に示すような関数となっています。なお、表1にはパワースペクトラムを逆フーリエ変換して得られる自己相関関数も併せて表記しています[7]。

ところで、長区間変動は表1に示すように伝搬推定式（正確には、伝搬損失式です）で与えられ、各パスごとの受信電力で与えられていません。したがって、各パスの受信電力を求めるには4.1節で説明したように、各パスの受信電力の比率（具体的には、Vehicular Bモデルのパスごとの受信電力比率）に応じて、受信電力を配分する必要があります。なお、ITU-Rモデルで用いている伝搬推定式は地物（建物高）のパラメータを反映できる“Walfish-池上モデル”を簡単にしたモデルです[10]、[11]。

4.3 ダイナミックパスモデル

実際の都市構造のパラメータを反映した伝搬遅延プロファイルモデルとしてダイナミックパスモデルが提案されています[6]、[14]。本モデルも遅延プロファイルの変動を瞬時変動、短区間変動、長区間変動にわけて各々をモデル化しています。まず、遅延プロファイルモデルについて説明します。図8に長区間遅延プロファイルの一例を示します。横軸はチップレート B に応じたパス番号であり、縦軸は相対受信電力および伝搬損失です。関数型で言えば、べき乗関数に近い関数となっています。表2に遅延プロファイルの関数モデルを示します。なお、表2に示す遅延プロファイルの関数モデルは文献[2]で示した伝搬遅延プロファイルモデルと同一です。本モデルではチップレート B [Mchip/s] に応じて、1チップご

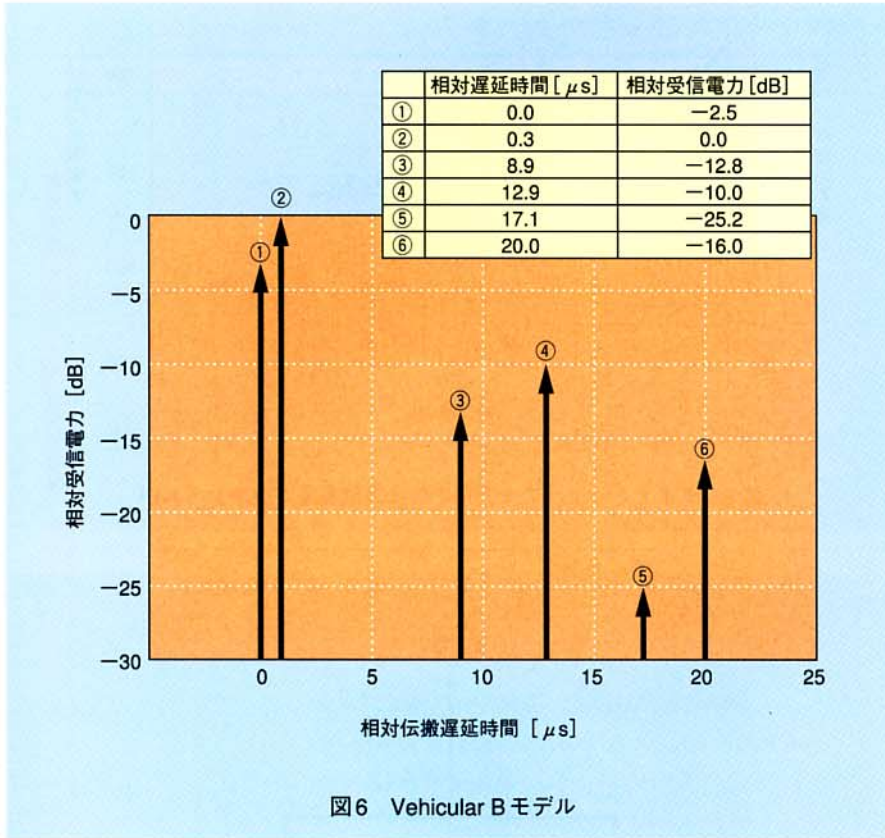


図6 Vehicular Bモデル

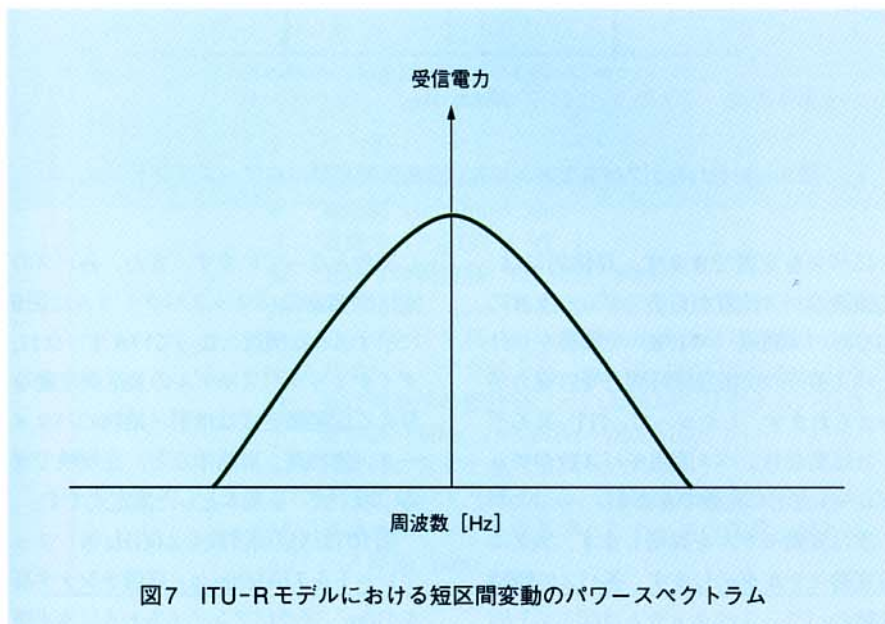


図7 ITU-Rモデルにおける短区間変動のパワースペクトラム

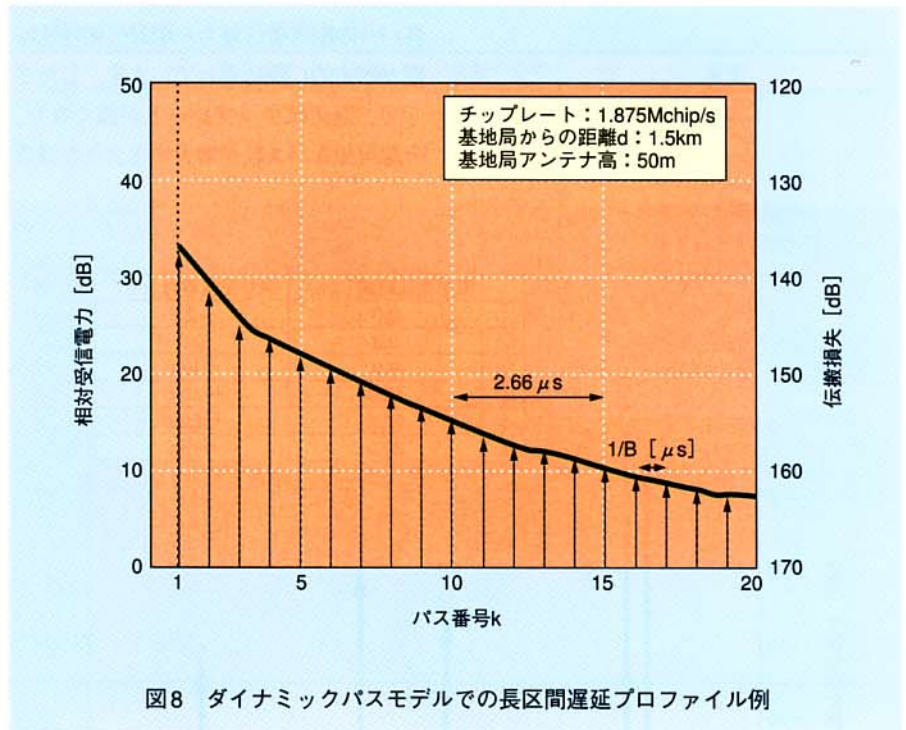


図8 ダイナミックパスモデルでの長区間遅延プロファイル例

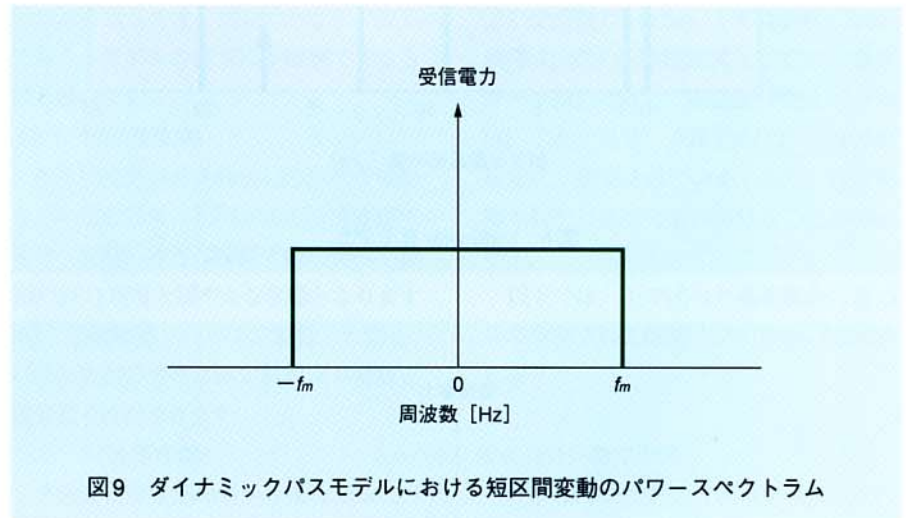


図9 ダイナミックパスモデルにおける短区間変動のパワースペクトラム

とにパスを定義できます。具体的には、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の伝搬遅延時間と受信電力が与えられます。したがって、ITU-Rモデルとは異なり、パス間隔やパス数がチップレートごとに定義できます。

次に変動モデルを説明します。表2に各変動モデルを示します。各パスの瞬時変動のパワースペクトラムは図5(a)と同

じ関数となっています。また、各パスの短区間変動のパワースペクトラムは図9に示すような関数となっています。なお、ダイナミックパスモデルの長区間変動を与える伝搬推定式は地形・地物のパラメータ (建物高、道路巾など) を反映できる“坂上式”を基本とした推定式です。

図10は送信周波数を2.6GHz帯、チップレートを7.5Mchip/s、送信アンテナ高を110m、送受信アンテナをともに水平面

内無指向性アンテナとし、同図に併せて示す周回コースを走行した場合の短区間遅延プロファイル (1mごとの瞬時遅延プロファイル) を20個平均化したプロファイル

の走行距離特性を示します[15]。ただし、図10(a)は東京都内での実測データであり、図10(b)は生成した遅延プロファイルを室内伝送実験系のフェージング発

表2 ダイナミックパスモデルの変動モデル

	パワースペクトラム	自己相関	変動の分布	備考
瞬時変動	$S(f, \tau) = \begin{cases} \frac{b(\tau)}{\pi f_b \sqrt{1 - (\frac{f}{f_b})^2}} & (f \leq f_b) \\ 0 & (f > f_b) \end{cases}$ $f_b (=v/\lambda) : \text{最大ドップラー周波数 [Hz]}$	$R(t, \tau) = b(\tau) J_0(2\pi f_b t)$	レイリー分布	$b(\tau) : \text{伝搬遅延時間が } \tau \text{ のパスの平均受信電力}$ $\lambda : \text{波長 [m]}$ $v : \text{移動速度 [m]}$ $d_{cor} : \text{相関距離}$ (チップレートにより異なり, 40m~100m)
短区間変動	$S(f, \tau) = \begin{cases} \frac{b(\tau)}{2f_m} & (f \leq f_m) \\ 0 & (f > f_m) \end{cases}$ $f_m (=v/d_{cor}) : \text{最大変動周波数 [Hz]}$	$R(t, \tau) = b(\tau) \frac{\sin(2\pi f_m t)}{2\pi f_m t}$	対数正規分布 (dBガウス分布)	

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

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

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

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

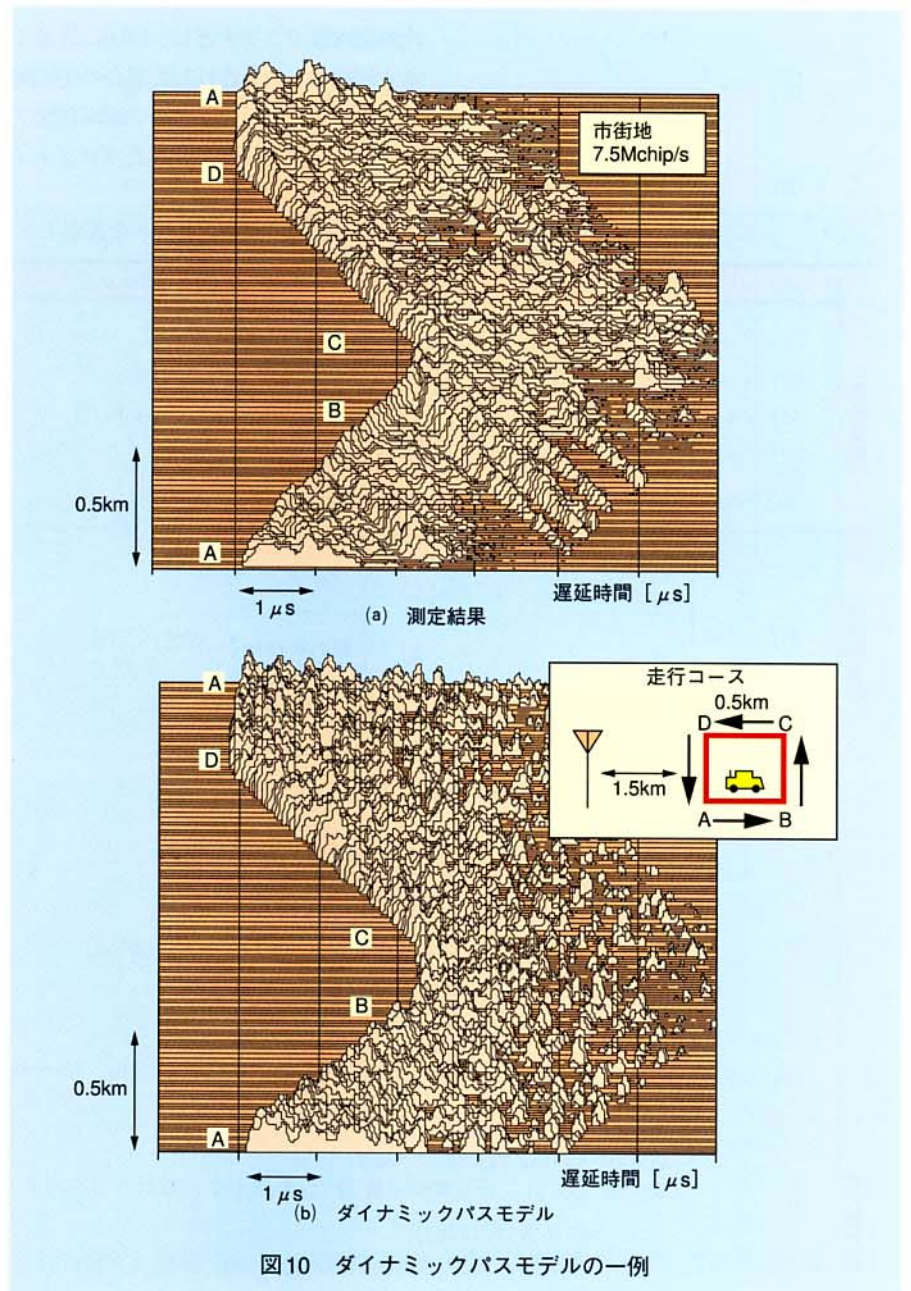
$$- a(h_m) + 10 \log(M)$$

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

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

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

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



生装置（フェージングシミュレータ）に設定し、伝搬遅延測定器で測定した結果です。測定結果と推定結果では個々の遅延プロファイル特性は当然異なりますが全体として非常によく似た特性になっています。なお、ダイナミックバスモデルの精度などについては文献[6]、[14]を参照して下さい。

5. まとめ

本稿ではW-CDMA方式を対象として、バスの走行に伴う変動特性を模擬し、W-CDMA方式の伝送品質を精度良く評価できるダイナミックバスモデルについて解説しました。

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。解析的な検討に関しては、例えば文献[5], [6]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, Oct. 1999.
- [2] 藤井：“広帯域移動伝搬 その2 伝搬遅延プロファイル”，本誌，Vol. 7, No. 4, pp. 60-70, Jan. 2000.
- [3] 今井，藤井，“レイトレースを用いた屋外伝搬路シミュレータの検討”，1996信学ソサエティ大会，B-17 (1996).
- [4] T. Kurner and D. J. Cichon：“Concepts and Results for 3D Digital Terrain-Based Wave Propagation Models：An Overview”，IEEE J. Sel. Area Commun SAC-11, 7, pp. 1002-1012 (1993).
- [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] 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, Jul. 1999.
- [7] W. C. Jakes Jr.：“Microwave Mobile Communications”，1章，John Wiley & Sons Inc., New York (1972).
- [8] 奥村，進士監修：“移動通信の基礎”，2章，電子情報通信学会 (1986).
- [9] 奥村，大森，河野，福田：“陸上移動通信における伝搬特性の実験的研究”，通研実報，Vol. 19, No. 19, pp. 1705-1764 (1967).
- [10] J. Walfish and H. L. Bertoni：“A theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environment”，IEEE Trans. Antennas Propagation, Vol. AP-36, No. 12, pp. 1788-1796 (1988).
- [11] F. Ikegami, S. Yoshida, T. Takeuchi and M. Umehira：“Propagation Factors Controlling Field Strength on Urban Streets”，IEEE Trans. Antennas Propagation, Vol. AP-32, No. 8, pp. 822-829 (1984).
- [12] 坂上，久保井：“市街地構造を考慮した伝搬損失の推定”，信学論 (B-II), J74-B-II, 1, pp. 17-25 (1991).
- [13] Rec. ITU-R M. 1225：“Guidelines for evaluation of radio transmission technicals for IMT-2000”，IMT-2000 DOCUMENTS, Dec. 1997.
- [14] 藤井：“広帯域DS-CDMA移動通信方式におけるダイナミックパスモデルの提案”，1999信学総全大，B-1-57 (1999).
- [15] 藤井，阿久津：“広帯域DS-CDMA方式におけるダイナミックパスシミュレータ”，1999信学ソサエティ大会，B-1-19 (1999).