

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

Dynamic Path Model for Wideband DS-CDMA Cellular Systems

広帯域 DS-CDMA 移動通信方式は、マルチパスを分離して RAKE 受信できることから通信品質の向上が図れる。そのため、DS-CDMA 方式を設計するには分離可能なパス特性の解明が不可欠である。本稿では移動局の走行に伴うパスの動的な変動特性を模擬できるダイナミックパスモデルを提案し、その推定法を明らかにする。また、この推定法に基づいて開発したダイナミックパス生成ソフトウェアの概要についても述べる。

A Wideband DS-CDMA (W-CDMA) receiver can reduce frequency selective fading and improve transmission performance because the multipath with different time delay are resolved and combined each resolved path effectively with RAKE combiner. It is very important to construct a propagation path model (path model) corresponding a particular bandwidth in order to evaluate the transmission performance of the W-CDMA system.

In this paper, we propose a dynamic path model that takes into account of dynamical aspects of a delay profile and show the prediction method. Also we show the simulator software developed based on the proposed model.

藤井 輝也 今井 哲朗
Teruya Fujii Tetsuro Imai

まえがき

次世代移動通信の有力候補の一つに広帯域 DS-CDMA (Direct Sequence-Code Division Multiple Access) 方式があり、その実現に向けた研究開発が精力的に進められている[1][2][3]。DS-CDMA 方式では、拡散帯域幅 (チップレート) を広くすればそれに応じて受信波を複数の伝搬遅延波 (パス) に分離して RAKE 受信できることから、狭帯域 FDMA (Frequency Division Multiple Access) 方式や TDMA (Time Division Multiple Access) 方式で問題であったフェージングの影響を軽減でき、高品質な通信が実現できる。そのため、高精度な伝送特性評価を行うには分離可能なパスの伝搬特性の解明が重要である。

パスの伝搬特性は一般に伝搬遅延特性または伝搬遅延プロファイル (遅延プロファイル) 特性と呼ばれ、その形

状の分析やモデル化の検討が盛んに行われている[4][5][6]。例えば遅延プロファイルの形状に関しては、遅延時間に対して指数関数的に減衰する指数関数モデルでおおよそ近似できることが知られている[4]。

ところで、RAKE 受信では受信機 (相関器) の数が実際に受信できるパス数よりも一般には少ないため全パスを受信できない。また、移動局の走行と共にパスの伝搬遅延時間と受信レベルは変動する。そこで RAKE 受信では受信効率の向上を図るため、パスの有無を検索し、受信レベルの高い順にパスを選択し合成することが一般に行われている。これに着目し、受信レベルの高い順にパスの受信レベル特性が容易に評価できる“レベル降順パスプロファイルモデル”が提案されている[7][8]。しかしながら、精度の高い RAKE 受信の評価を行うためには、移動局の走行に伴うパスの伝搬遅延時間の変化と受信レベルの変動を模擬でき

るパスモデルが不可欠である。

本稿では DS-CDMA 方式を対象として、連続した遅延プロファイルに代って、チップレートに応じてパスの遅延時間が離散的に与えられ、走行に伴う伝搬遅延時間の変化と受信レベルの変動が簡単に模擬できるダイナミックパスモデルを提案する[9]。また、提案したモデルに基づいて開発したソフトウェアの概要について述べる。

CDMA 方式対応の パスモデルの課題

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ある。横軸は移動局に到来する電波の伝搬遅延時間 (遅延時間) であり、縦軸は受信電力を示したもので、電力遅延プロファイル (遅延プロファイル) と呼ばれる。また、図1に示す①～⑤の電波は素波 (パス) と呼ばれる。遅

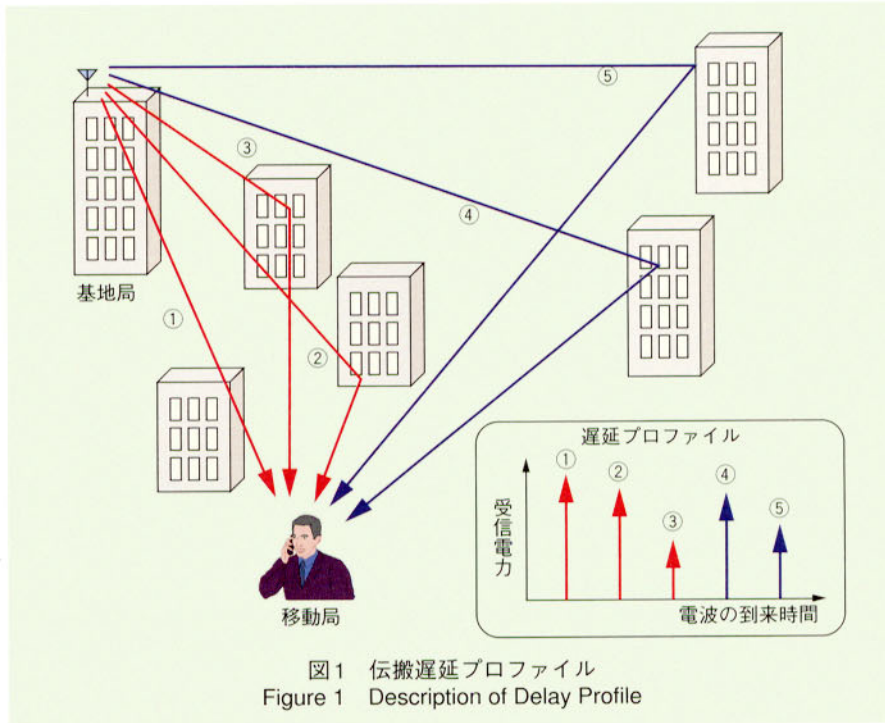


図1 伝搬遅延プロファイル
Figure 1 Description of Delay Profile

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、遅延時間がそれより大きなパス④、⑤は遠方の建物や山岳などで反射、回折を経て到達したパスである。図2は基地局から一定の距離を周回した場合の遅延プロファイルの測定例を示す。移動局の走行に伴ってパスの遅延時間と受信レベルが刻々と変化している様子がわかる。

図3にチップレート B [Mchip/s] を変えた場合の遅延プロファイルを示す。図よりチップレートが高くなる程パス数が増大し、また各パスの伝搬損失が大きくなっていることがわかる。これはチップレートが高くなるほど時間分解能が向上するためである。

ところで遅延プロファイルモデルとしては、例えば指数関数モデルのように連続した関数モデルで与えられることが多い[4]。この場合、図4(a)に示すような連続したモデルから離散的なパスモデルを作成するためには時間分解能 ($=1/B$) に応じた変換が必要である。しかしながら、パスの具体的な変換方法については必ずしも明確でない。一方、COST (European Cooperation in the Field of Science and Technical Research) [10]で規定されているモデルのようにパスの遅延時間とレベルをあらかじめ固定したモデルでは、チップレートに応じてパスを合成/分離しなければ実際のパスモデルとは程遠くなる。特に図4(b)に示すようにチップレートが高速になれば各パスをさらに複数の遅延時間のパスに分離する必要があるが、具体的な分離方法については明らかにされていない。

以上のことを鑑みて、CDMA方式の伝送品質などを計算機シミュレーションや室内実験で簡単に評価できるパスモデルとして、次に示す特徴を備えたパスモデルが不可欠であると考えられる。

- (1) チップレートごとに定義できる離散的なパスモデル (パスプロファイルモデル)

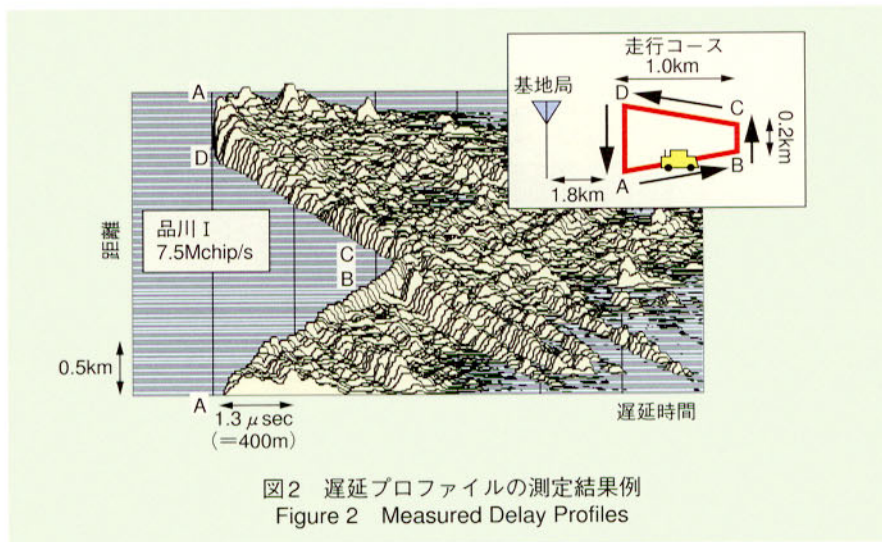


図2 遅延プロファイルの測定結果例
Figure 2 Measured Delay Profiles

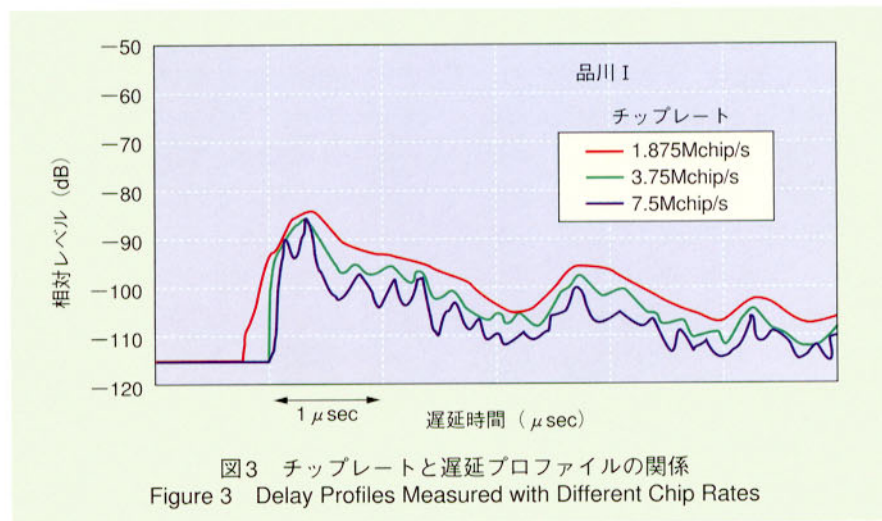
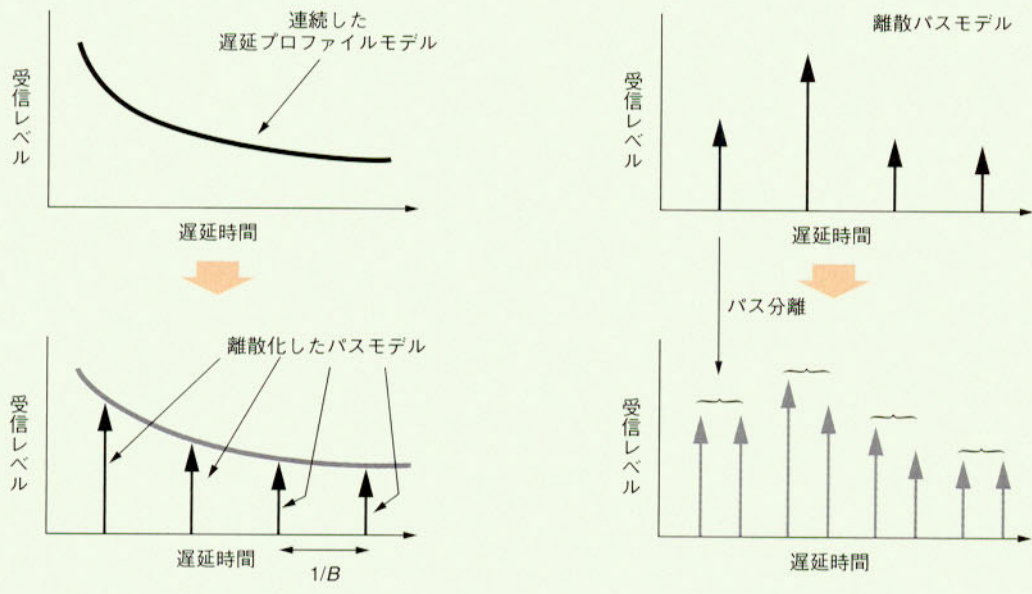


図3 チップレートと遅延プロファイルの関係
Figure 3 Delay Profiles Measured with Different Chip Rates



(a) 連続したバスモデルから離散的バスモデルへの変換法
 (a) Conversion Method of Continue Profile Model to Discrete Profile Model

(b) 異なる伝送速度に対応するバスモデルへの変換法
 (b) Conversion Method of Profile Model with Low Chip Rate to Profile Model with High Chip Rate

図4 従来のバスモデルの課題
 Figure 4 Problems of Conventional Delay Profile Model

(2) 移動局の走行に伴うバスの遅延時間の変化と受信レベルの変動を模擬できるバスモデル (ダイナミックバスモデル)

具体的には、図4に示すようにバス間隔 $\Delta \tau$ が時間分解能に相当する $1/B$ で与えられ、先頭バスから順にバスを配置した離散的なバスモデルである。

測定

ダイナミックバスモデルの評価に必要な遅延プロファイルの測定を東京都品川区および神奈川県平塚市で行った。測定諸元を表1に示す。送信周波数は2.6GHz帯、チップレート B は1.875 Mchip/s, 3.75Mchip/s, 7.5Mchip/s, 30Mchip/sの4種類とした。送受信アンテナ高は表1に示す通りであり、送受信アンテナは共に水平面内無指向性アンテナを用いた。測定は各地区とも基地局から半径3km以内の基地局アンテナが見通し外となる道路で行った。測定を実施した品川地区は平均建物高が6階~10階の典型的な市街地であり、平塚地区は1階~

表1 測定諸元
 Table 1 Measurement Parameters

| | 市街地 (品川地区) | | 郊外地 (平塚地区) |
|----------|--|-------|------------|
| | 品川 I | 品川 II | 平塚 |
| 周波数 | 2.598GHz | | |
| チップレート | 1.875Mchip/s, 3.75Mchip/s, 7.5Mchip/s, 30Mchip/s | | |
| 最大測定遅延時間 | 約30msec | | |
| 送信電力 | 10W | | |
| 基地局アンテナ | コリニアアンテナ：利得7dBi | | |
| 基地局アンテナ高 | 65m | 115m | 35m |
| 移動局アンテナ | ダイポールアンテナ：利得2.2dBi | | |
| 移動局アンテナ高 | 2.9m | | |

2階建ての家屋が主体の典型的な郊外型の住宅地である。

データ処理では、まず瞬時遅延プロファイルを一定区間 (ここでは20m区間) で平均化した短区間遅延プロファイルを求め、次にチップレート B に応じた時間分解能でサンプリングし、離散的なバスの配列に置き換える。以下では離散的なバスの配列を短区間遅延バスプロファイルと定義して用いる。

ダイナミックバスモデル

狭帯域伝送のレベル変動特性は、①

送受信間距離の指数関数で近似できる長区間変動 (伝搬距離変動)、②道路周辺の地物・地形の影響で長区間変動を中心としてその分布が対数正規分布に従う短区間変動 (シャドウイング)、③数m程度の区間での多重波の干渉により短区間変動を中心にしてその分布がレイリー分布する瞬時変動、が重畳した変動特性として表わせる[11]。

一方、図5に示すように広帯域伝送における遅延プロファイルのレベル変動特性は狭帯域伝送の場合と同様に、①長区間遅延プロファイル変動 (バスの長区間変動)、②短区間遅延プロフ

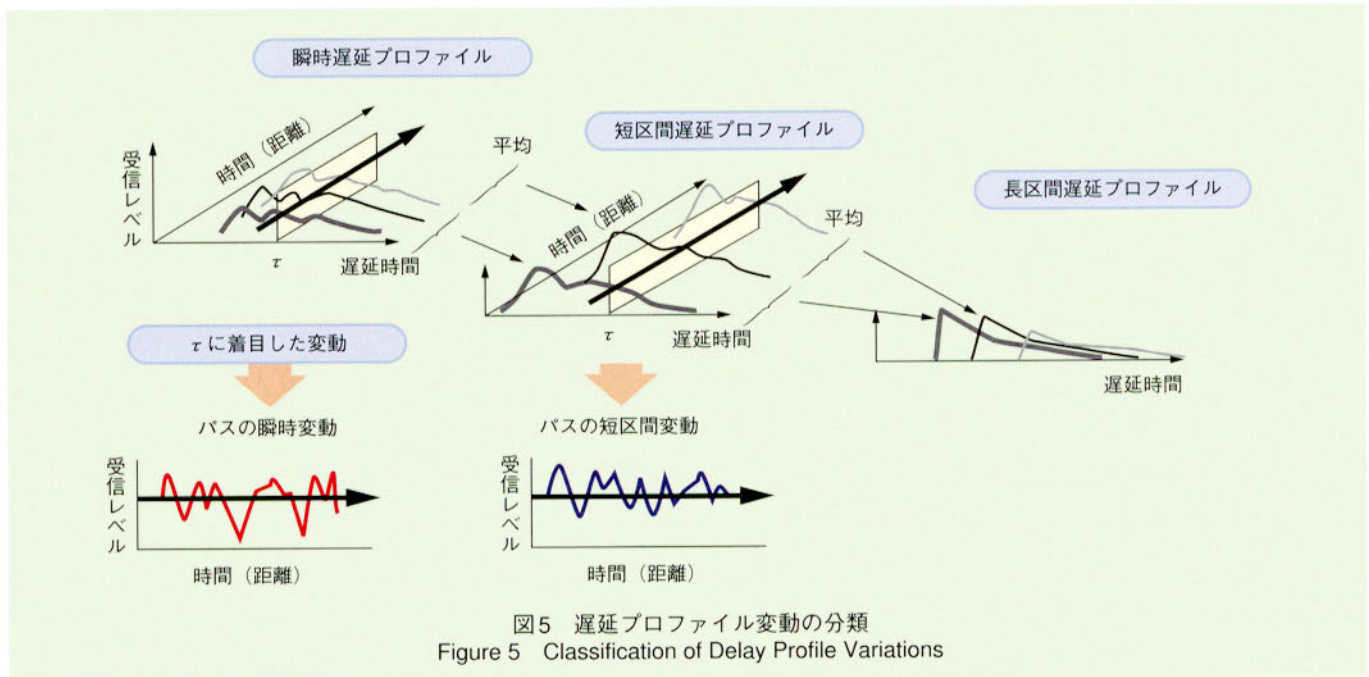


図5 遅延プロファイル変動の分類
Figure 5 Classification of Delay Profile Variations

ファイル変動（パスの短区間変動）、③瞬時遅延プロファイル変動（パスの瞬時変動）に分類できる[9][12]。遅延時間 τ のパスに着目した場合、その変動は狭帯域伝送の場合と同様に瞬時変動と短区間変動および長区間変動が重畳した変動特性で表わせる。測定結果をもとに各変動をモデル化した結果を以下に示す。

■パスの瞬時変動

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ない。しかし、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する。今、遅延時間が τ であるパスの受信レベルを $R(\tau)$ （真値）とすると、測定結果よりその分布は次式で示すレイリー分布で近似できる。

$$P(R, \tau) = \frac{R}{b_0} \exp\left(-\frac{R^2}{2b_0}\right)$$

また、素波の到来方向は測定結果より水平面内でおおよそ一様分布と近似できる。このような電波環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（最大ドップラー周波数 f_D [Hz]）で走行した場合、受信信号のパワース

ペクトラム $S(f, \tau)$ は次式で表わせる[4][12]。

$$S(f, \tau) = \frac{b_0(\tau)}{\pi f_D \sqrt{1 - (f/f_D)^2}}$$

ここで、 $b_0(\tau)$ は遅延時間が τ のパスの平均受信電力（短区間平均値）である。

■パスの短区間変動

遅延時間 τ のパスに着目した場合、そのパスの短区間変動は測定結果より対数正規変動で近似できる[7][9]。今、dB表示した短区間平均値を $X(=10\log(b_0(\tau)))$ とおくと、 X の確率密度関数 $p(X, \tau)$ は次式で表わせる。

$$p(X, \tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(X - m(d, \tau))^2}{2\sigma^2}\right]$$

ここで、 σ [dB]はパスの短区間変動の標準偏差であり、 $m(d, \tau)$ はパスの長区間平均値である。また、対数圧縮した短区間変動のパワースペクトラムを $S(f, \tau)$ とおくと、 $S(f, \tau)$ は測定結果から次式で示す矩型のスペクトラムで近似できる。

$$S(f, \tau) = \begin{cases} \frac{\sigma^2}{2f_m} & (|f| \leq f_m) \\ 0 & (|f| > f_m) \end{cases}$$

ここで、 f_m はパスの短区間変動のパワースペクトラムの最大周波数である。ところで標準偏差 σ や最大周波数 f_m の値は都市構造やチップレートにより異なるが、測定結果から σ は5dB～7dBの値となり、また車速（ v [m/s]）で規格化した最大周波数 f_m/v は0.007～0.013の値となる。

■パスの長区間変動

狭帯域伝送での受信レベルは図6に示すように各パスの受信電力の総和で表わせる。このことに着目すれば、仮に狭帯域伝送の伝搬推定式を真とすれば、各パスを推定するのに必要な情報はすべてそれに含まれていることになる（ただし、情報は縮退している）。したがって、狭帯域伝送の伝搬推定式から各パスへの受信電力の分配則を定式化できれば、狭帯域伝送の伝搬推定式から広帯域伝送におけるパスごとの伝搬推定式が作成できる。

今、パス間隔を時間間隔（ $1/B$ ）に代って、光の速度 c を用いた距離間隔 Δd （ $=c/B=0.3/B$ ）で表わすことにする。この場合、先頭パスから k 番目

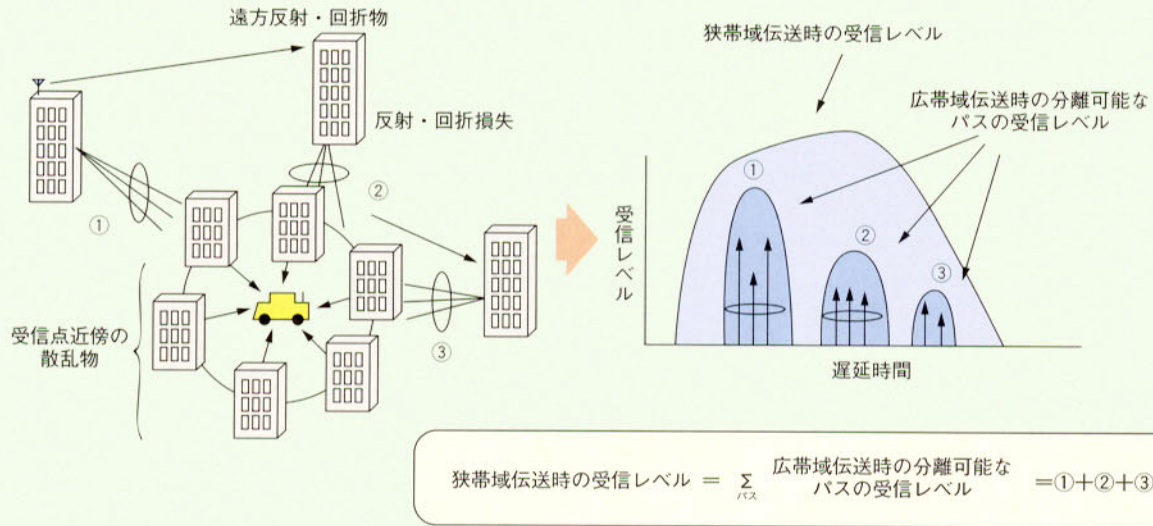


図6 狭帯域伝送と広帯域伝送の関係
Figure 6 Relation between Narrow-Band Propagation and Wideband Propagation

$$L_p(d, k) = L(d + (k-1)\Delta d) + R + D$$

ここで

$$\begin{aligned}
 L(d + (k-1)\Delta d) = & 100 - 7.1 \log W + 0.023 \theta + 1.4 \log h_s \\
 & + 6.11 \log \langle H \rangle - \{24.37 - 3.7 (H/h_{50})^2\} \log h_b \\
 & + (43.42 - 3.1 \log h_b) \log \{d + (k-1)\Delta d\} + 20.4 \log f \\
 & - a(h_m) + 10 \log(M)
 \end{aligned}$$

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

$$D = 3$$

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

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

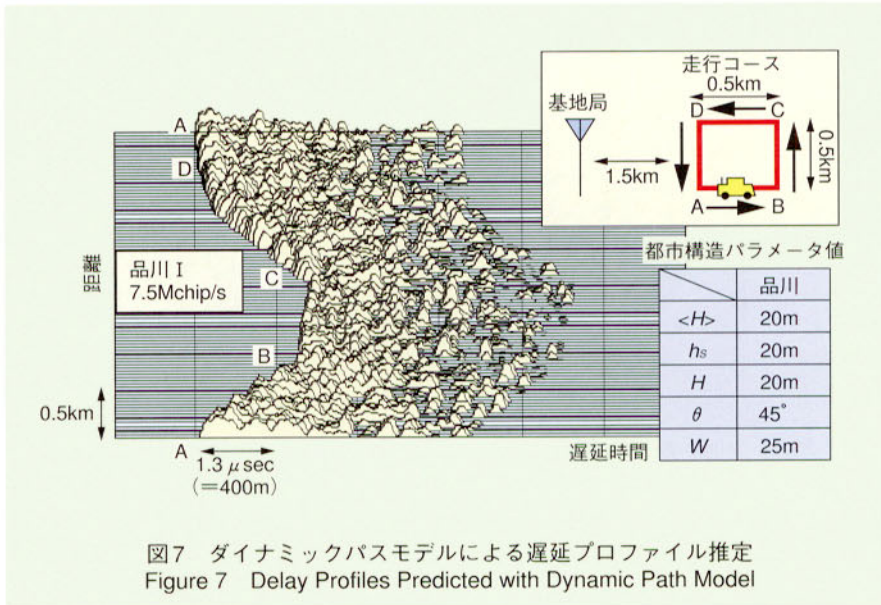
のパスの伝搬距離は先頭パスの伝搬距離 d を用いて $d + (k-1)\Delta d$ ($k=1, 2, 3, \dots$) となる。測定結果をもとに各パスへの受信電力の分配則を求め、各パスの伝搬推定式 $L_p(d, k)$ を近似した結果を数式1に示す[8]。ただし、狭帯域の伝搬推定式として、地形・地物などの都市構造パラメータを扱える“坂上式[13]”を拡張した推定式を用いている[7][8]。

評価

図7はチップレートを7.5Mchip/sと

- k : パス番号 ($1 \leq k$)
- d : 基地局移動局間の最短距離 [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 : 基地局アンテナ高 [m] (移動局の地面からの高さ: 20m~120m, $h_b > \langle H \rangle$)
- h_{50} : 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: $H \leq h_{50}$)
- f : 周波数 [MHz] (800MHz~2600MHz)
- h_m : 移動局アンテナ高 [m] (1m~10m)
- B_B : 基準チップレート [Mchip/s] (1Mchip/s~2Mchip/s)
- B : チップレート [Mchip/s] (1Mchip/s~30Mchip/s)
- M : パス分割数 ($M \geq 1$)
- Δd : パス間隔 [km]

数式1
Equation 1



し、ダイナミックパスモデルで発生させた短区間遅延プロファイルのシミュレーション結果例である。シミュレーションでは基地局条件と移動局条件は品川Ⅰと同じ値を用い、都市構造パラメータ値は図7で示す値を用いた。また、短区間変動の標準偏差 σ は5dB、最大変動周波数 f_m/v は0.01とした。

次に、ダイナミックパスモデルの推定精度を評価する。評価は各パスを個別に行えば非常に複雑になるので次に示す項目で行う[9]。

- (1) “レベル降順パスプロファイル”を用いた受信レベル特性の評価
- (2) “遅延スプレッド”を用いた伝搬遅延特性の評価
- (3) “バス停留率”を用いたバスの遅延時間変動特性の評価

なお、紙面の都合上、評価は品川Ⅱ(基地局アンテナ高115m)に限定する。他の地域の評価は文献[7][8][15]を参照されたい。

■レベル降順パスプロファイル

レベル降順パスプロファイルは図8(a)に示すように遅延パスプロファイルを受信レベルの大きい順にバスを並び換えたものである[7][8]。すなわち、レベル降順パスプロファイルモデルはチップレートに応じて分離可能なバスの受信レベルだけが与えられるモデル

であり、走行に伴うバスの発生消滅を意識せずに受信レベルの評価が可能となる。図8(b)は品川Ⅱにおいてチップレート B を7.5Mchip/sとした場合のレベル降順パスプロファイルの第1バスと第5バスの伝搬損失距離特性を示す。ただし、処理は20m区間の短区間遅延パスプロファイルに対して行った。横軸は送受信間距離 d であり、縦軸は伝搬損失[dB]である。図8(c)は送受信間距離 d を1.5kmとした場合のレベル降順パスプロファイルを示す。横軸はレベル降順のバス番号であり、縦軸は各チップレートの第1バスからの相対レベルである。測定値と推定値は良く一致していることがわかる。

■遅延スプレッド

バスの遅延特性を遅延スプレッドで評価する[12][14]。ここでは図9(a)に示すように遅延プロファイルに対し、Peakバスより ΔL (dB) 以内にあるバスを有効バスと定義し、評価の対象とする。図9(b)は品川Ⅱにおける ΔL と電力遅延スプレッドの関係をチップレートをパラメータとして示す。ただし、処理は20m区間の短区間遅延パスプロファイルに対して、熱雑音の影響を避けるため最大損失が148dBより小さいバスを選択して行った。測定値と推定値は比較的良く一致していること

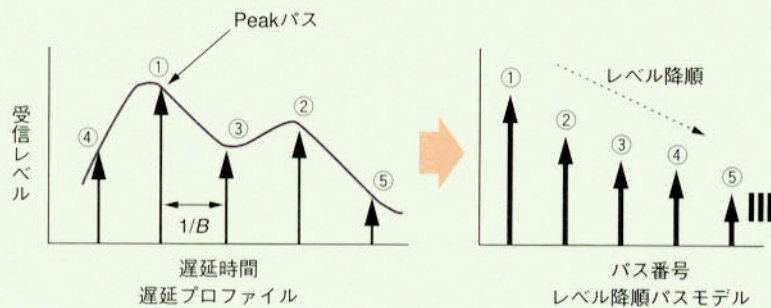
がわかる。

■バス停留率

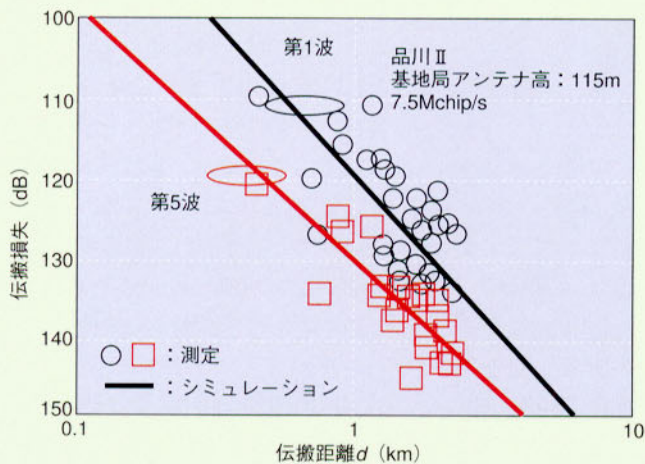
移動局の走行に伴うバスの移動特性を“バス停留率”で評価する[15]。まず、図10(a)に示すように i 番目の短区間遅延パスプロファイルと $(i+1)$ 番目の短区間遅延パスプロファイルの遅延時間を比較し、 i 番目のバスと $(i+1)$ 番目のバスの遅延時間差が ΔD ($=\pm 0.5\text{chip}$) 内であるバスを停留バスと定義する。そして、停留するバス数の割合を“バス停留率”と定義する。同図では、 i 番目のバス(バスの遅延時間 X_1, X_2, X_3)に対し、 $(i+1)$ 番目のバスの遅延時間 Y_1, Y_2 は ΔD 内に収まっているが、 Y_3 は外れている。この例ではバス1、バス2の2バスが停留バスとなり、バス停留率は2/3となる。図10(b)は品川Ⅱにおける ΔL とバスの平均停留率の関係をチップレートをパラメータとして示す。ただし、処理は20m区間の短区間遅延パスプロファイルに対して行った。測定値と推定値は良く一致していることがわかる。

ダイナミックパス生成ソフトウェア

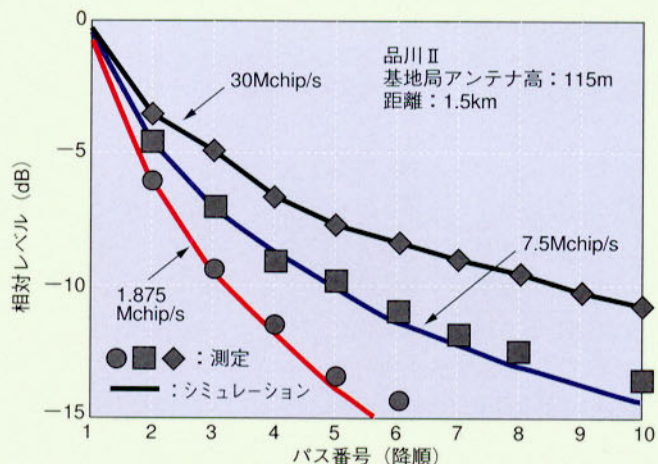
ダイナミックパスモデルを生成できるソフトウェアをPC(OS:Windows)上で開発した。図11に機能構成を示す。基地局条件設定部、移動局条件設定部、ダイナミックパスシミュレーション部、計算条件設定部、都市構造パラメータ設定部、走行コース作成部などからなる。図7は本ソフトで作成したパスモデルを室内伝送実験系のフェージング発生装置(フェージングシミュレータ)に設定し、伝搬遅延測定器で測定した結果である。ただし、周波数は2.598GHz、チップレートは7.5Mchip/sであり、フェージング発生装置に設定したバス数は24バスである。



(a) 定義
(a) Definition of Path Profile Rearranged in Order of Decreasing Level

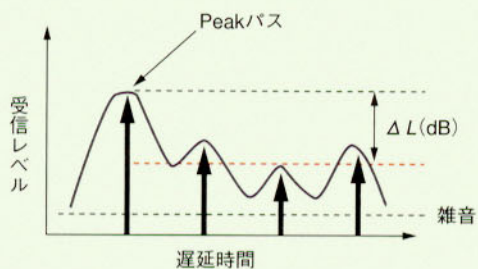


(b) 距離特性
(b) Path Loss Characteristics of Path Profile Rearranged in Order of Decreasing Level

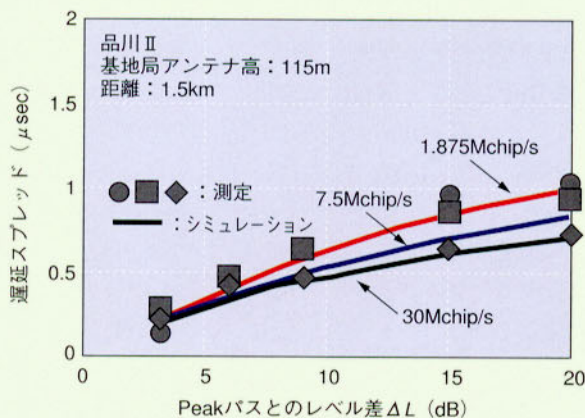


(c) レベル降順パスプロファイル
(c) Path Level Rearranged in Order of Decreasing Level

図8 レベル降順パスプロファイル特性
Figure 8 Path Level Characteristics Rearranged in Order of Decreasing Level

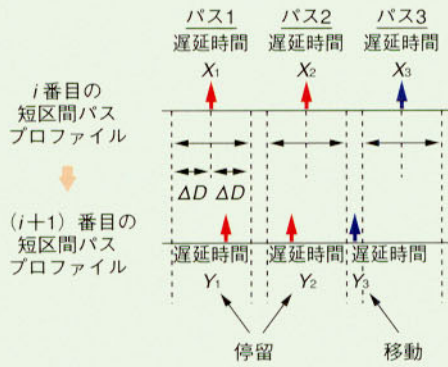


(a) 有効パスの定義
(a) Definition of Available Path

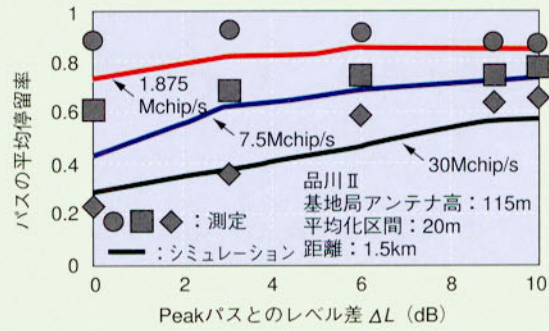


(b) 遅延スプレッド
(b) Delay Spread

図9 遅延スプレッド特性
Figure 9 Delay Spread Characteristics



(a) 停留バスとバス停留率の定義
(a) Definition of Path Staying Ratio



(b) バス停留率
(b) Path Staying Ratio

図10 バス停留率特性
Figure10 Path Staying Ratio Characteristics

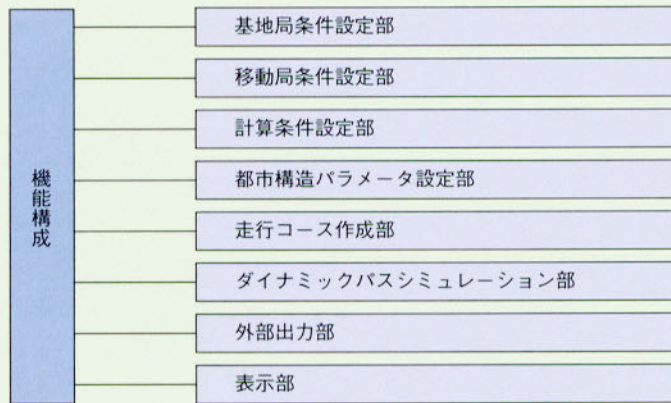


図11 機能構成
Figure11 Main Function of Dynamic Path Model Simulator Software

むすび

DS-CDMA方式を対象として、ダイナミックバスモデルを提案し、その推定法を明らかにした。また、提案した推定法に基づいて開発したダイナミックバス生成ソフトウェアの概要について述べた。本モデルの特徴は以下の通りである。

- (1) 伝送速度(チップレート)に応じて遅延バスプロファイルを定義できる。
 - (2) 周波数、アンテナ高、地形・地物などの都市構造に応じて遅延バスプロファイルを定義できる。
- 本モデルはこのような特徴を備えていることから、計算機シミュレーションや室内実験において実際の伝搬路を

容易に模擬できる非常に実用的なバスモデルであると考えられる。

文献

- [1] K.S.Gilhausen, et al: "On the capacity of a cellular CDMA system", IEEE Trans. Veh.Technol., VT-40, pp.303-312, 1991.
- [2] A.J.Viterbi, A.M.Viterbi: "Erlang capacity of a power controlled CDMA system", IEEE J.Sel.Areas in Commun., vol.11, pp.892-900, 1993.
- [3] 大野, 安達: "DS-CDMAの上りリンク容量と送信電力", 信学論 (B-II), J79-B-II, 1, pp.17-25, 1996.
- [4] W.C.Jakes Jr.: "Microwave Mobile Communications", 1章, John Wiley & Sons Inc., New York, 1972.
- [5] H.Suzuki: "A Statistical Model for Urban Radio Propagation", IEEE Trans. Commun., COM-25, 7, pp.673-680, 1972.
- [6] 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の検討", 信学技報告, AP96-72, 1996.
- [7] 藤井, 今井: "広帯域DS-CDMA移動通信におけるバスモデルの提案", 信学技報, RCS97-5, 1997.
- [8] 藤井, 今井: "広帯域DS-CDMA移動通信におけるバスモデルの定式化", 信学技報, RCS97-236, 1998.
- [9] 藤井: "広帯域DS-CDMA移動通信方式におけるダイナミックバスモデルの提案", 1999信学総全大, B-1-57.
- [10] COST 207: "Digital land mobile radio communications", Final report of the COST-Project 207, Commission of the European Communities, Brussels, 1996.
- [11] 奥村監修: "移動通信の基礎", 電子情報通信学会, 1986.
- [12] 例えば, 細矢良雄監修: "電波伝搬ハンドブック", 15章, リアライズ社, 1999.
- [13] 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.
- [14] 例えば, 進士監修: "無線通信の電波伝搬", 12章, 電子情報通信学会, 1992.
- [15] 藤井, 今井, 関谷: "広帯域移動伝搬におけるバスの移動特性", 1998信学ソサイエティ大会, B-1-31.