

広帯域移動伝搬 その1 狭帯域伝搬から広帯域伝搬へ

移動通信でもマルチメディアに対応するため伝送速度が数十kbit/s程度の低速・狭帯域伝送方式から数十Mbit/s程度の高速・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、広帯域伝搬、すなわち、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。そこで伝搬遅延特性が高速・広帯域伝送に及ぼす影響について解説します。

まえがき

陸上移動通信では移動局アンテナ高は一般に数m以下と低く、また移動局は自在に移動します。そのため、送受信間の見通しが建物などに遮られ、電波の通り道である伝搬路の状況は地物や地形の影響を絶えず受け、時々刻々と変化します。このことが移動通信と固定通信との最大の差であり、伝搬路の状況の変化を克服する技術革新そのものが移動通信の発展の歴史といっても過言ではありません。

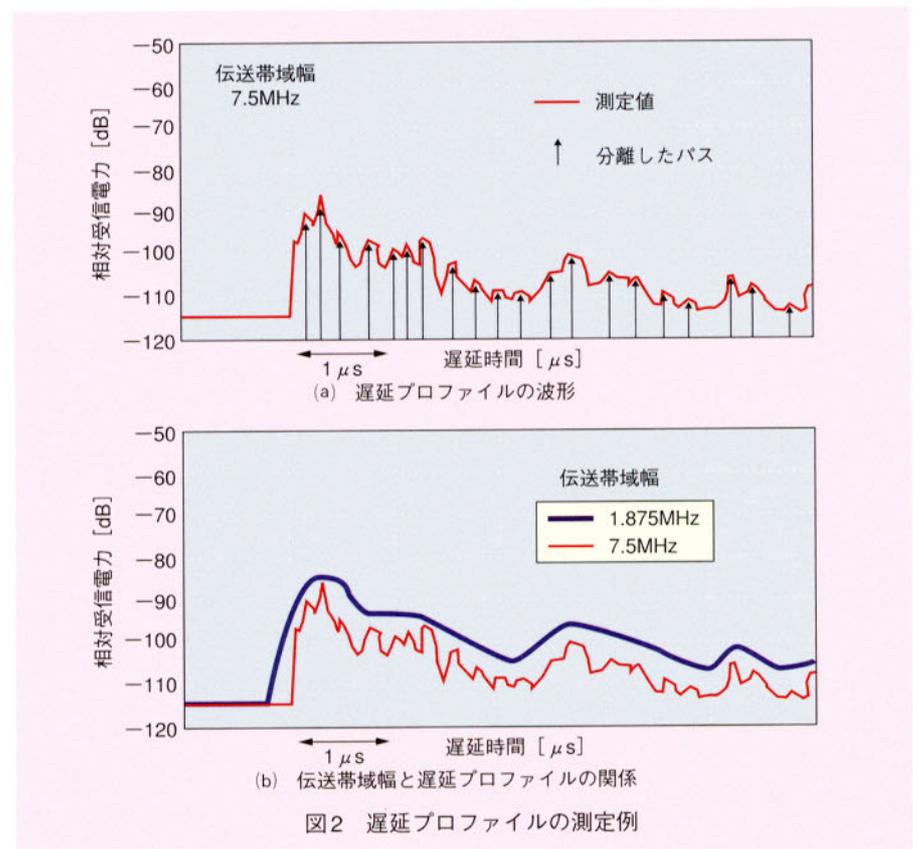
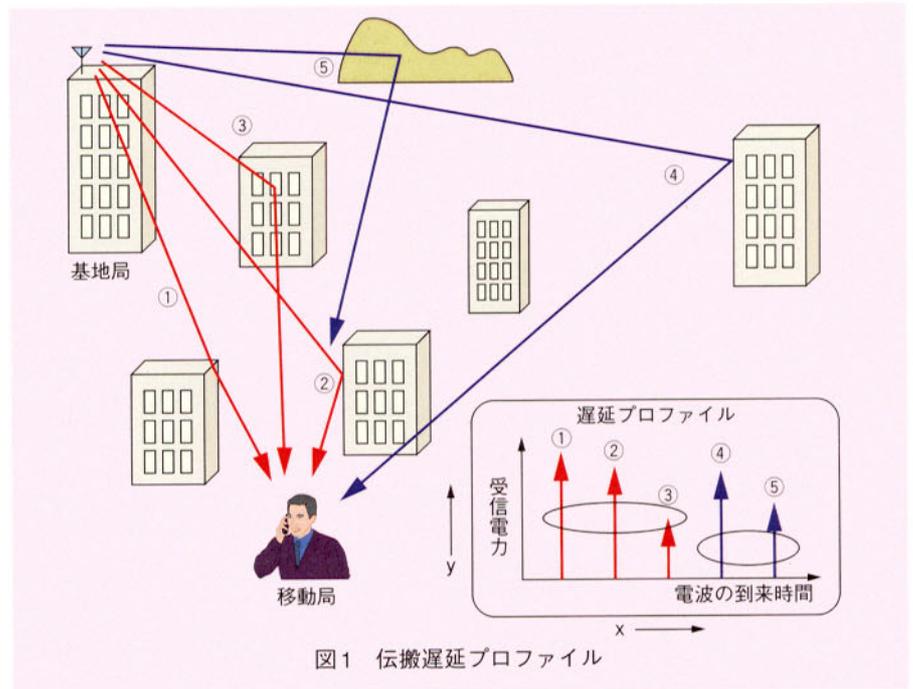
ところで、移動伝搬は無線回線設計方式や無線伝送方式と密接に関連し、進展してきました。例えば、無線伝送方式に着目すれば、FMなどのアナログ伝送方式からPSK（Phase Shift Keying）などのデジタル伝送方式へ、また伝送速度が数十kbit/s程度の低速・狭帯域伝送方式から数十Mbit/s程度の高速・広帯域伝送方式へと進展しています。例えば、現在の日本標準のデジタル方式自動車電話システム（PDC：Personal Digital Cellular Telecommunication System）では、約50kHzの伝送帯域で伝送していますが、次世代方式であるW-CDMA（Wide band-Code Division Multiple Access）方式では5MHz程度の伝送帯域を用いた伝送を予定しています。特に高速・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。このように移動伝搬に求められる課題も無線回線設計方式や無線伝送方式に応じて多様化し、それらに応じた伝搬特性の解明が必要となっています。

本稿では、高速・広帯域伝送を実現する上で不可欠な広帯域移動伝搬（広帯域伝搬）について解説します。

広帯域伝搬とは

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。x軸は移動局に到来する電波の伝搬遅延時間であり、y軸は受信電力を示したもので、遅延プロファイルと呼ばれるものです。また、同図に示す①～⑤の電波は素波（パス）と呼ばれます。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もさらに大きいパス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2に遅延プロファイルの測定例を示します。図2(a)より実際には図1に示したよりもパス数が多いことが分かります。また、波形が図1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。これは伝送帯域幅に制限があるために生じるもので、図2(b)に示すような伝送帯域幅を小さくする



程、波形はなまります。

ところで図1に示すような遅延波があると伝搬路の周波数特性は変化し、その

結果伝送信号の周波数特性が歪みます。図3は伝搬路の周波数特性の一例を示します。伝搬遅延時間が大きいほど伝搬路

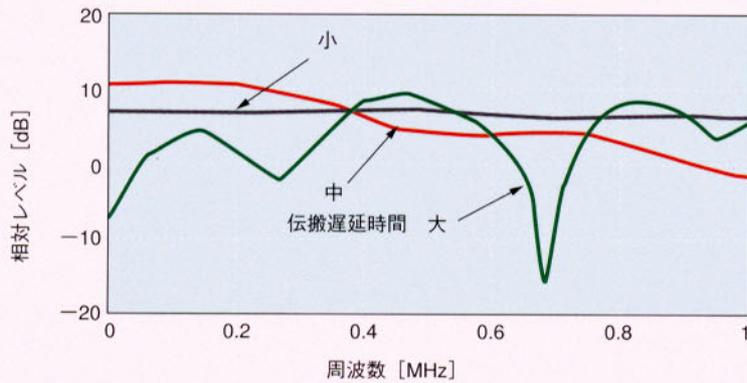


図3 周波数特性

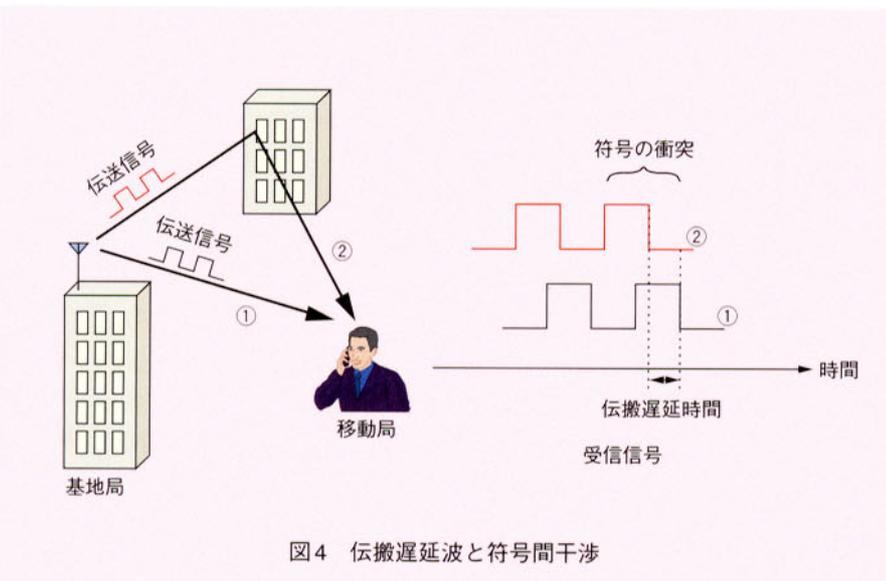


図4 伝搬遅延波と符号間干渉

の周波数特性は大きく歪んでいます。広帯域信号をこのような伝搬路で伝送すれば受信スペクトラムは大きく歪み、伝送信号を再生できません。このように伝搬遅延特性は伝送品質を決定する上で極めて重要となります。

まず、このような遅延波が伝送品質に及ぼす影響について説明します。残響(エコー)がある大きなホールやトンネル内で大きな声で話した場合を思い起こして下さい。この場合、天井や壁に反射した残響のために何を話しているのか良く分からないことがあります。一方、小さな浴室で鼻歌を歌う場合を思い起こして

下さい。この場合にも残響はありますが、それほど気にはなりません。その差は、残響である声の伝搬遅延時間にあります。ホールやトンネル内に伝搬遅延時間が大きければ直前に発した声が発して遅延してきた声と衝突して、聞き取れなくなります。しかしながら、小さな浴室のように声の伝搬遅延時間が小さければ、直前に発した声と遅延してきた声がうまく重なりあってむしろ心地よく聞こえます。同じことが電波の世界でも成り立ちます。図4に示すように伝送信号(符号)の長さに比べて、伝搬遅延時間の大きい伝送信号が衝突すれば符号誤りを起こします。これは符号間干渉(ISI: Inter Symbol Interference)と呼ばれ、その値は変調方式や受信方式によって異なりますが、例えば符号長の1/10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遅れた遅延波があれば符号誤りが生じることになります。一方、伝送速度を50kbit/sとすれば、許容遅延時間は2 μ sとなり、伝搬距離差で約600m遅れた遅延波までは伝送できることとなります。伝送速度1Mbit/sで符号誤りとなる30m程度の遅延波は、伝送速度が50kbit/sからすれば浴室の残響のように“むしろ心地よく聞こえる”伝搬遅延時間と考えられます。このように、広帯域伝送を実現する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方式もその一つです。

次に図2に示すような遅延波が存在する場合に、移動局が走行した場合の受信

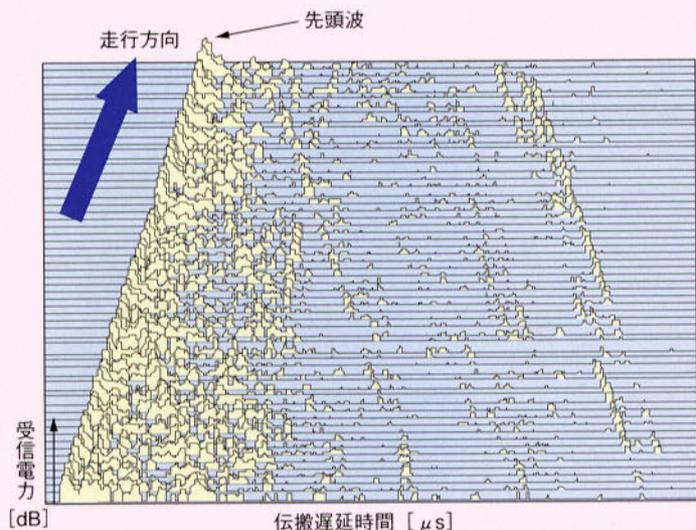


図5 遅延プロファイルの測定例

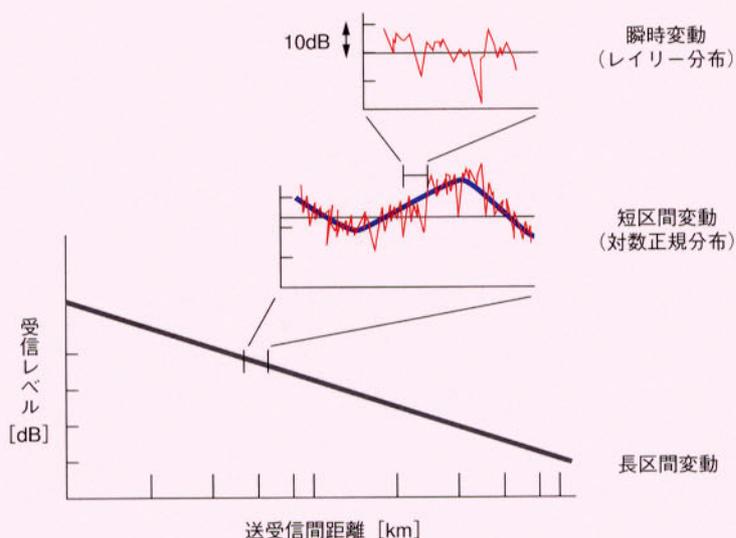


図6 狭帯域伝搬特性

レベル変動について説明します。図5は基地局から遠ざかるように走行した場合の遅延プロファイルの測定例です。先頭波の伝搬遅延時間が走行に伴い徐々に大きくなっていることが分かります。また、各パスの伝搬遅延時間と受信レベルが走行に伴って刻々と変化している様子も分

かります。

広帯域伝搬変動

図5に示すように広帯域伝搬の変動特性は非常に複雑で、狭帯域伝搬とは大きく異なります。その現象を説明します。

陸上移動通信では道路周辺の地物の状況が絶えず変わるため受信レベルは多種多様な変動を受けます。図6に狭帯域伝搬における受信レベル変動特性を示します。図に示すようにゆっくりと大きく変化する変動に、速い周期の深い瞬時変動が重ね合わされた変動となります。具体的には、①基地局と移動局間の距離の変化に伴う変動（長区間変動）、②道路周辺の地物の高低などにより数十m程度の区間長を周期とする緩慢な変動（短区間変動）、および③数m程度の区間で多重波の干渉による急激な変動（瞬時変動）、が重畳した変動となります[1]。

一方、広帯域伝搬における遅延プロファイルの受信レベル変動を図7に示します。狭帯域伝搬の場合と同様に、①長区間遅延プロファイル変動（パスの長区間変動）、②短区間遅延プロファイル変動（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）、が重畳した変動となります。ここで伝搬遅延時間が τ であるパスに着目すれば、その変動は瞬時変動と短区間および長区間変動が重畳した変動で表せます[2][3]。

瞬時変動は多重波の干渉に起因するため、伝搬路の遅延特性や伝送帯域幅に応じてその様相は大きく変わります。そこで伝搬路の遅延特性や伝送帯域幅と伝搬変動の関係について説明します。

■伝送帯域幅と遅延プロファイル

図1に示すような離散的な伝搬遅延特性を得るためには、理論的には無限の伝送帯域幅を必要とします。しかしながら、実際には所要の帯域幅に帯域制限をして

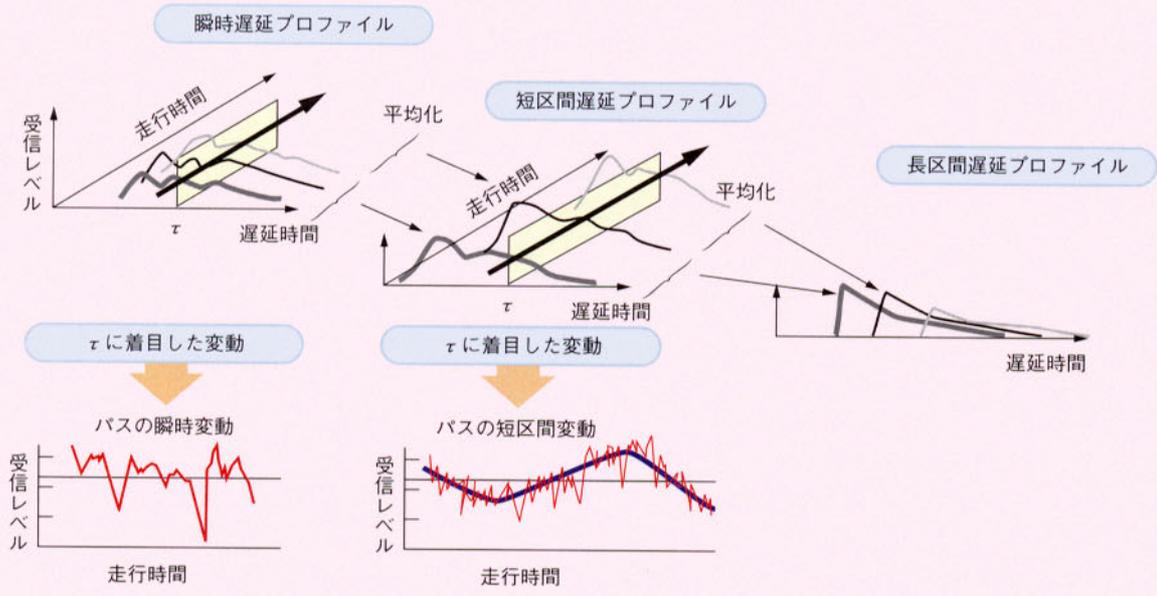


図7 広帯域伝搬特性

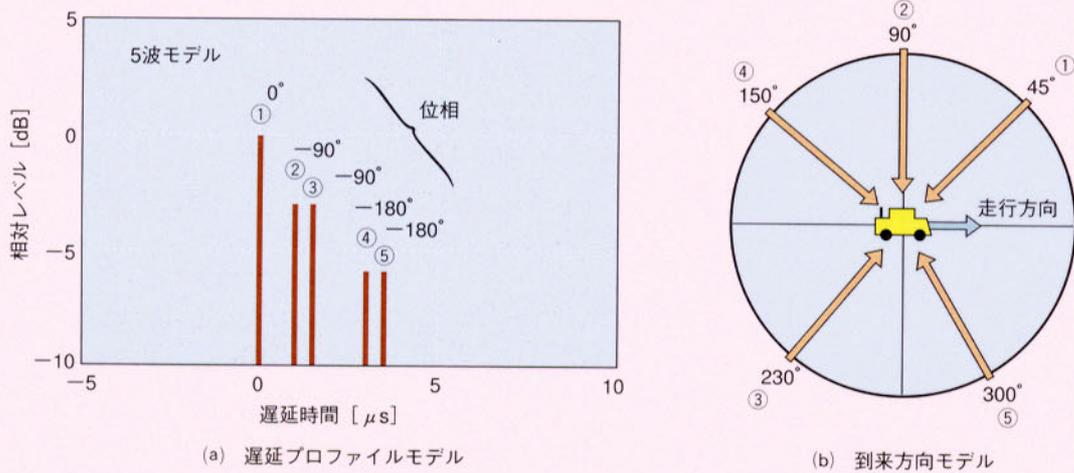


図8 バスモデル

いるため遅延プロファイルは図2に示すようになまった波形になります。

今、伝搬路特性として図8に示すバスモデルを仮定しましょう。バス数は5波とし、振幅、位相および伝搬遅延時間は同図に示す値とします。また、バスの到来方向は移動局の走行方向を基準とした

角度で与えています。例えば、バス①は走行方向に対して45°の方向から到来し、受信電力は0dB、位相は0°であり、バス②は方向が90°の方向から到来し、受信電力は-3dB、位相が-90°となります。このバスモデルではバス数が5波と非常に少ないように受け取れますが、

全方向から電波が到来している移動局の受信環境をおおそモデル化しています。このような伝搬路において伝送帯域幅Bで帯域制限した場合の遅延プロファイルを図9に示します。伝送帯域を制限すると、高周波成分の通過が阻止されるため波形はなまります。すなわち、伝送帯域幅Bを狭くする程遅延波形はなまり、伝送帯域幅Bを広くする程、遅延波形は急峻になります。なお、図中の○印などの記号は伝搬遅延時間を1/Bごとにサンプリングした場合のサンプル値です。例えば、Bを0.1MHzとすれば10 μ sごとに(記号は○)、Bを0.5MHzとすれば2 μ sごとにサンプリングしています(記号は◇)。この例では伝送帯域幅Bを0.1MHzとすれば5波の遅延波はあたかも一つの遅延波の様に見えますが、伝送帯域幅Bを10MHzとすれば遅延波はすべて分離できることが分かります。一般に遅延波を全く分離できない伝送帯域幅の伝搬路を狭帯域伝搬と定義します。この例では、例えば、伝送帯域幅Bが0.1MHzの場合には遅延波を分離できていないことから狭帯域伝搬となります。

■伝送帯域幅と周波数特性

伝搬遅延時間が大きければ伝搬路で受信スペクトラムは大きく歪みます。これは伝搬遅延時間が異なる伝送信号が干渉しあって、伝搬路に図3に示すような周波数特性が生じるためです。その特性は伝搬遅延時間に大きく依存します。伝搬遅延時間が小さいと干渉の割合が小さいため周波数特性はほとんど歪みませんが、伝搬遅延時間が大きいと周波数特性は大きく歪みます。このことに着目して、伝搬路の変動を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)”に分類して、使い分けられています[4]。

図8の遅延プロファイルを用いて伝搬路の周波数特性を計算した結果を図10に示します。図10(a)は伝送帯域幅を1MHz、図10(b)は伝送帯域幅を0.01MHzと制限した場合の周波数特性の2次元、3次元表示です。x軸は周波数f[MHz]、y軸は移動局の走行時間t[s]、z軸は相対レベル[dB]です。ただし、搬送波の波長で規格

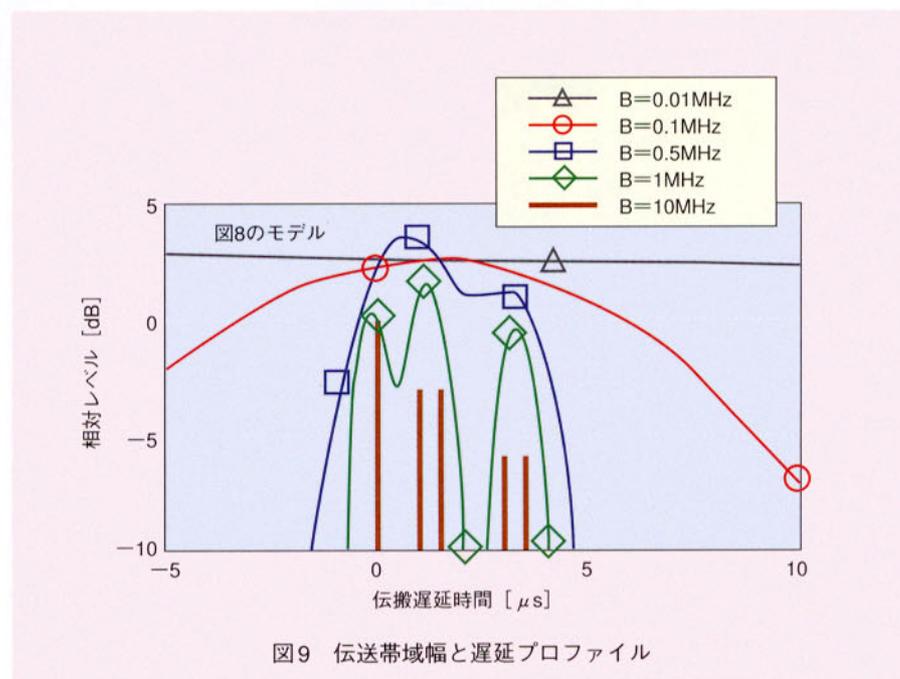


図9 伝送帯域幅と遅延プロファイル

化した走行速度 f_0 を 1Hz としています。伝送帯域幅 B を 1MHz とすれば伝搬路の周波数特性は図 10(a) における $f = -0.5\text{MHz} \sim f = 0.5\text{MHz}$ の周波数特性となり、大きく歪んでいることが分かります。例えば、走行時間 $t = 0$ の特性に着目すれば周波数帯域が 0MHz から 0.2MHz の間で大きく減衰しています。また、走行時間 t が変われば周波数特性も変化しています。このような変動が“周波数選択性フェージング”の特徴です。一方、伝送帯域幅 B を 0.01MHz とすれば伝搬路の周波数特性は図 10(b) となります。この場合、

走行時間 t と共にレベルは大きく変動していますが、周波数特性はほぼ平坦となり、歪んでいません。これが“一様フェージング”の特徴です。これらから“周波数選択性”、“一様”という言葉のニュアンスが理解できると思います。

ところで、伝搬路の周波数特性の評価指標として周波数相関特性があります [5]。周波数相関は異なる周波数間の受信レベル変動の相互相関で定義されます。例えば、伝搬路が“一様”とみなせる周波数差であれば図 10(b) に示すような受信レベルは周波数に依存せずと同じように

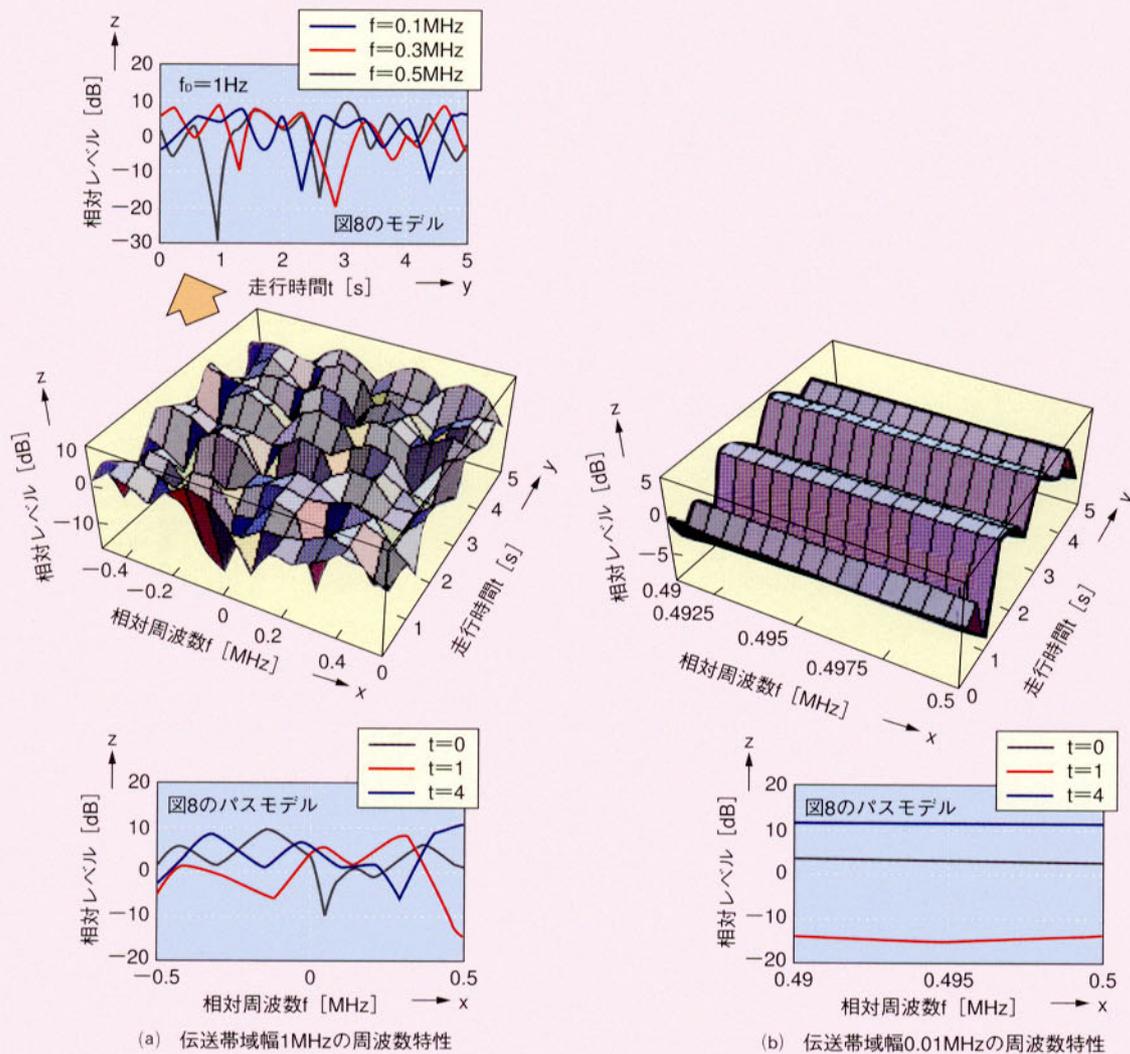


図 10 伝送帯域幅と周波数特性

変動するため周波数相関は高くなり、図10(a)に示すように伝搬路が“周波数選択的”とみなせる周波数差があれば受信レベル変動が大きく異なるため周波数相関は小さくなります。図11に図8の遅延プロファイルを用いて計算した周波数相関係数を示します。この例では、伝送数差が0.15MHzで周波数相関係数が0となり無相関になっています。したがって、図8に示すパスモデルでは周波数帯域幅Bが0.15MHz以上では周波数選択性フェージングの伝搬路となります。

■伝送帯域幅と瞬時レベル変動

広帯域伝搬では狭帯域伝搬とは異なり、瞬時変動が非常に浅くなる特徴があります[6]。図8の遅延プロファイルを用いて受信レベル変動を計算した結果を図12(a)に示します。伝送帯域幅を大きくする程、瞬時変動が浅くなっていることが分かります。その理由について説明します。受信電力は伝送帯域幅B内の受信電力の総和で与えられます。すなわち、図10に示す周波数特性の図において伝送帯域幅Bを積分範囲とした積分値になります。伝送帯域幅Bが広ければ図10(a)に示すように伝送帯域内のある周波数の受信電力が小さくても、別の周波数の受信電力が大きくなっていることから受信電力の総和は所謂“平均化効果”のため一定の値に近づきます。すなわち、走行時間tが変わっても受信電力は大きく変化しません。一方、伝送帯域幅Bが狭ければ図10(b)に示すように周波数全体で同一に変動し、“平均化効果”が得られないため受信電力は走行に伴って大きく変化します。図12(b)に受信レベルの累積分布を示します。x軸は見やすいように適当にシフトしています。伝送帯域幅を広くするほど受信レベルの変動幅が小さくなっていることが分かります。ところで狭帯域伝搬の瞬時レベルの分布は見通し外では一般にはレイリー分布することが知られてい

ます。レイリー分布する変動であれば変動の深さは累積確率の50%と10%値の差で約10dB、50%と1%値の差で約20dBとなります。例えば、伝送帯域幅Bが0.01MHzの場合にはほぼ上記の値となっていることから狭帯域伝搬であることが分かります。

狭帯域伝搬と広帯域伝搬

それでは、どこまでが狭帯域伝搬で、どこからが広帯域伝搬か？という素朴な疑問について考察します。ここでは、伝送帯域に対する伝搬路の周波数特性に着目し、それが一様であれば“狭帯域伝搬”、周波数選択的であれば“広帯域伝搬”と分類することにします。すなわち、伝送帯域に対して一様フェージングの伝搬路であれば狭帯域伝搬であり、周波数選択性フェージングの伝搬路であれば広帯域伝搬となります。この分類に従えば、例えば、屋外のように伝搬遅延時間が大きければ、100kHz程度の伝送帯域でも周波数特性が“周波数選択的”となるため広帯域伝搬となり、屋内のように伝搬遅延時間が小さければ1MHz程度の帯域でも周波数特性が“一様”となるため狭帯域伝搬となります。このように狭帯域伝搬と広帯域伝搬の境界は絶対的な伝送帯域幅で決まるものではなく、伝搬遅延時間に応じて決まることとなります。狭帯域伝搬と広帯域伝搬の境界を具体的に決定する方法の一つに図11に示す周波数相関があります。例えば、伝搬路の周波数相関係数が0.5以上となる帯域幅を狭帯域伝搬というように定義すれば、境界を決定論的に決めることができます。この考え方を図11に適用すれば伝送帯域幅Bが0.07MHzまでは狭帯域伝搬の範疇に入ることになります。

一方、受信レベル変動の深さから狭帯域伝搬と広帯域伝搬の境界を推測することもできます。例えば、狭帯域伝搬であ

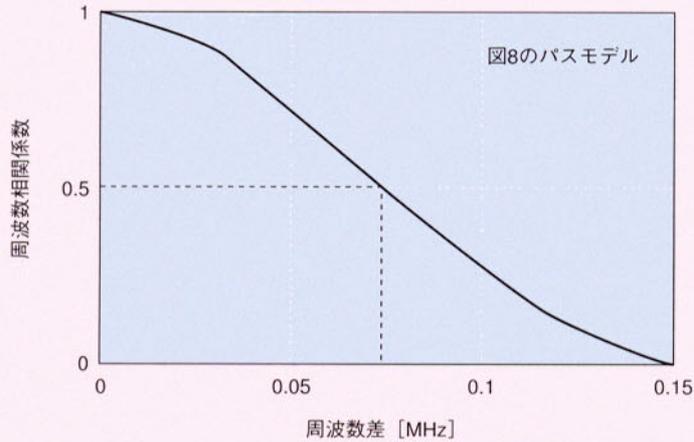
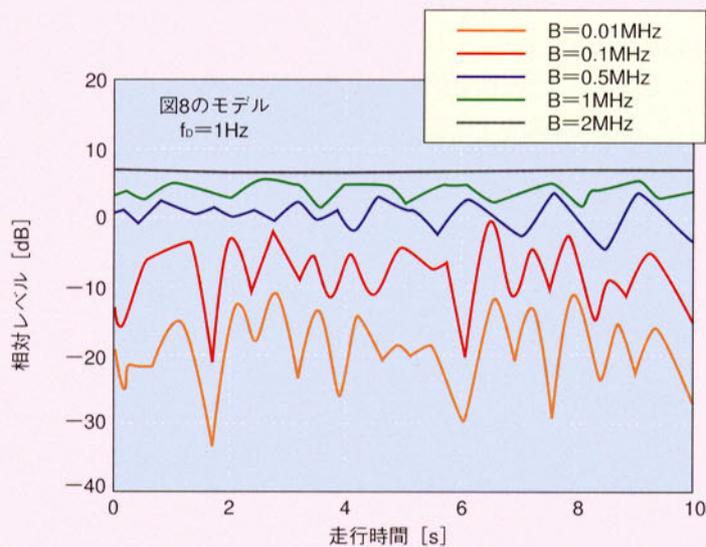
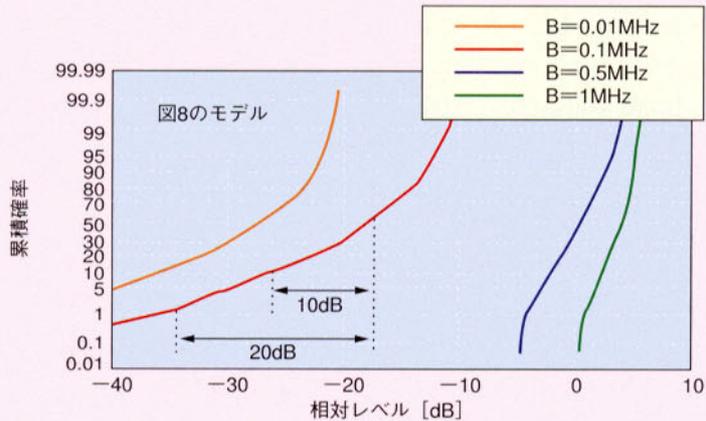


図11 周波数相関特性



(a) 受信レベルの時間変動



(b) 受信レベルの累積分布

図12 伝送帯域幅と受信レベル特性

れば変動特性が一般にレイリー分布するので、変動の深さを比較することで狭帯域伝搬か広帯域伝搬かの判断ができます。図12では伝送帯域幅 B が0.01MHz, 0.1MHzの場合には狭帯域伝搬の範疇に入ります。

おわりに

本稿では、広帯域移動伝搬における伝送帯域幅と変動特性の関係を伝搬遅延時間領域、周波数領域、走行時間領域（空間領域）の視点から解説しました。

なお、本稿では定性的な説明に重点をおいたため、数式を用いた理論的な扱いは省略しました。理論に関しては、例えば文献[7]に詳しくまとめられていますので、一読すれば本稿の理解が一層深まるものと考えます。

文献

- [1] 奥村，進士監修：“移動通信の基礎”，2章，電子情報通信学会（1986）。
- [2] 細矢監修：“電波伝搬ハンドブック”，15章，リアライズ社（1999）。
- [3] 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，Apr.1999。
- [4] 例えば，斉藤：“デジタル無線通信の変復調”，5章，電子情報通信学会（1996）。
- [5] W. C. Jakes Jr.：“Microwave Mobile Communications”，1章，John Wiley & Sons Inc., New York（1972）。
- [6] S. Kozono：“Received signal level characteristics in a wideband mobile radio channel”，IEEE Trans. Veh. Technol., vol.43，No.3，pp.480-486（1994）。
- [7] 細矢監修：“電波伝搬ハンドブック”，12章，リアライズ社（1999）。