

■4群 (モバイル・無線) - 1編 (無線通信基礎)

6章 ダイバーシチ技術

(執筆著：府川和彦) [2009年5月 受領]

■概要■

無線伝搬路は一般に、複数の経路からなるマルチパス伝搬路であり、定在波が発生する。このため、受信レベルが頻繁に落ち込むフェージングという現象が発生し、無線通信の伝送特性を著しく劣化させる。この劣化を補償する技術の一つとして、ダイバーシチ技術があげられる。

ダイバーシチとは、複数の互いに相関の低い受信波を得て、これらの受信波を合成もしくは選択することにより、受信レベルの落込みを軽減する方法である。すべての受信波のレベルが同時に落ち込む確率は、一つの受信波のレベルが落ち込む確率よりも低くなるという原理に基づいている。受信波間の相関が高くなると、この確率低減の効果が失われるので、ダイバーシチにおいては、いかに相関の低い複数の受信波を得るかが重要な課題となってくる。

【本章の構成】

本章の構成は、まず 6-1 節において、相関の低い複数の受信波を得るブランチ構成法を説明する。次に 6-2 節において、受信波を選択もしくは合成するダイバーシチ合成法について述べ、6-3 節において DS-CDMA (Direct Spread Code Division Multiple Access) 方式で用いられているダイバーシチ技術について詳述する。最後に 6-4 節において、ユーザ間で伝搬特性が独立に変動することに基づくマルチユーザダイバーシチについて解説する。

■4群 - 1編 - 6章

6-1 ブランチ構成法

(執筆著：府川和彦) [2009年5月 受領]

複数の相関の低い受信波を得るために、空間、偏波、角度、周波数及び時間の違いを利用する方法がある。これらのブランチ構成法をブランチ数2の場合を例に図6・1に示す¹⁾。

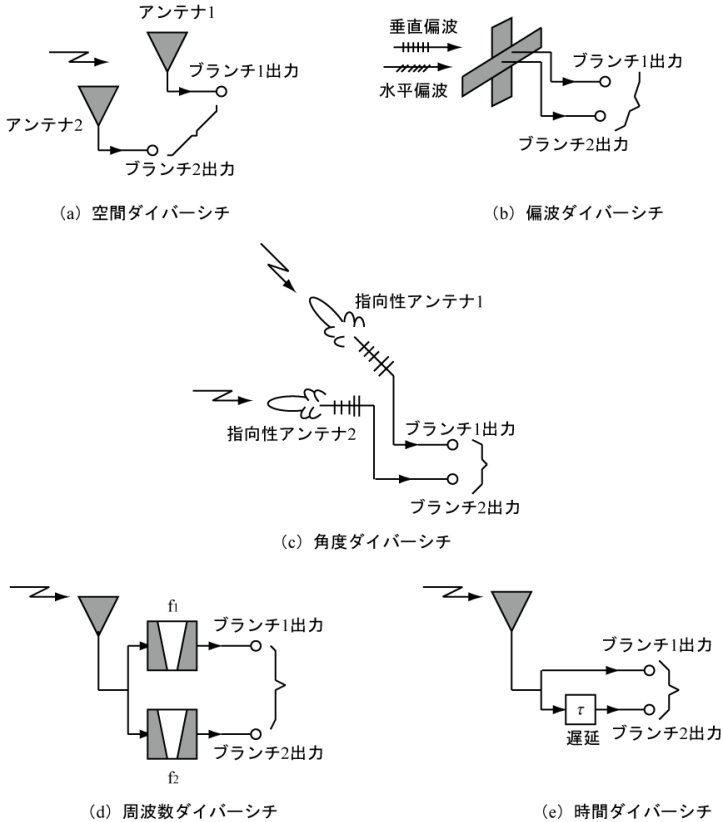


図6・1 ブランチ構成法

1. **空間ダイバーシチ**： 空間的に十分離れた複数の受信アンテナを用いる方法であり、移動局受信の場合には、アンテナ間隔を半波長程度離せば無相関に近い受信波を得ることができる。一方、基地局受信の場合には、移動局受信と異なり受信波の到来角の広がりか度と小さいために、アンテナ間隔を十波長程度離す必要がある。

2. **偏波ダイバーシチ**： 垂直及び水平偏波をそれぞれ受信する2本のアンテナを用いる方法であり、空間ダイバーシチのように受信アンテナを空間的に離す必要はないが、ブランチ数は最大2までしかとれない。近年、アンテナ間隔を広げずに済むことから、MIMO (Multiple Input Multiple Output) 伝送などへの適用が検討されている。
3. **角度ダイバーシチ**： 指向性の異なる複数の受信アンテナを用いる方法であり、受信波の到来角が十分広がっている場合に適している。
4. **周波数ダイバーシチ**： 同一信号を複数の異なる周波数で送信する方法で、狭帯域信号の場合には複数のキャリア周波数を用いて送信し、受信側ではこのキャリア周波数に対応したバンドパス・フィルタを用いて信号を分離抽出する。一方、広帯域信号の場合には複数のキャリア周波数を用いる必要はなく、等化器などの受信手段で周波数ダイバーシチ効果が得られる。
5. **時間ダイバーシチ**： 同一信号を時間間隔をおいて複数回送信する方法で、伝送路のインパルス応答が時間変動する場合に効果的である。誤り検出された場合に再送を行う ARQ (Automatic repeat request) は、この時間ダイバーシチの一種であり、異なる符号化を施した信号を再送し、複数の受信信号を用いて復号する HARQ (Hybrid ARQ) が第3.5世代携帯電話方式 HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) へ導入されている。

■4群 - 1編 - 6章

6-2 ダイバーシチ合成

(執筆者：府川和彦) [2009年5月受領]

複数の相関の低い受信波が得られた後、これらの受信波を合成する基本的な方法として、選択合成法、等利得合成法、最大比合成法がある。これらの構成を図6・2に示す。

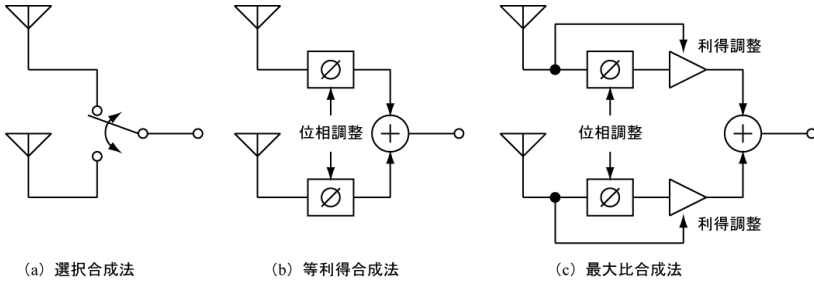


図6・2 ダイバーシチ合成

選択合成法は、複数の受信波の内、最大の信号対雑音比 (SNR: Signal to Noise Ratio) を有する受信波を選択する方法である。しかしながら、すべての受信波を用いて合成すれば、SNRをより改善することができる。等利得合成法と最大比合成法は、この種の合成を行う。

等利得合成法は、すべての受信波の位相が同位相になるよう位相調整して合成する。このように合成すれば、受信波は互いに打ち消し合うことなく、SNR を選択合成法よりも増加させることができる。

最大比合成法は、すべての受信波の位相が同位相になるよう位相調整した後、合成波のSNRが最大となるように、各受信波にその包絡線を乗算して合成する。このとき、合成波のSNRは各受信波のSNRの和となることが知られている。このように、最大比合成法はSNRを最大にする合成法であり、等利得合成法よりもSNRを改善できる。3種の合成法の中で信号処理が一番複雑となるが、近年のLSI技術の進歩によりハードウェアでの実現が容易となっている。

■4群-1編-6章

6-3 DS-CDMA のダイバーシチ技術

(執筆著者：府川和彦) [2009年5月 受領]

第3世代携帯電話方式の多元接続として DS-CDMA が採用されている。DS-CDMA においては、複数のユーザが同一周波数帯域を同時に使用するが、ユーザごとに異なる拡散符号が割り振られ、拡散符号の違いにより個々のユーザの識別を行っている。DS-CDMA の送信機では、この拡散符号を狭帯域のベースバンド信号に乗算することで、広帯域の送信信号を生成している。なお、拡散符号の自己相関関数は通常、時間差が0 のとき鋭いピークが現れる。

6-3-1 RAKE 合成

RAKE 合成は DS-CDMA の受信方法であり、詳細を以下で説明する。なお、RAKE とは熊手を意味する。まず受信機では、元のベースバンド信号を抽出するために、相関器により受信信号と拡散符号の相関を求める。この操作を逆拡散という。無線伝搬路は図6・3(a)に示すように、遅延時間の異なる複数の経路(パス)からなり、ここでは3パスの場合を考え、パス i ($i=1, 2, 3$) の遅延時間は τ_i とする。このとき、拡散符号の自己相関関数が鋭いピークをもつため、相関器出力の時系列は図6・3(b)に示すように、パスの遅延時間に対応して三つのピークが現れる。図6・4に示すRAKE受信機は、最初に、この相関器出力のピーク値を取り出す。次に、パスの複素包絡線を推定し、その推定値の複素共役をピーク値に乗算し足し合わせる。この操作は、パスに対応する相関器出力のピーク値を、同一位相になるよう位相調整した後、パスの包絡線を乗算して合成しているのので、最大比合成に相当する。このようにRAKE合成は、無線伝搬路の複数のパスを分離抽出して最大比合成を行っているのので、パスダイバーシチ効果が得られ、フェージングによる受信レベルの落ち込みやフェージング変動を軽減できる。

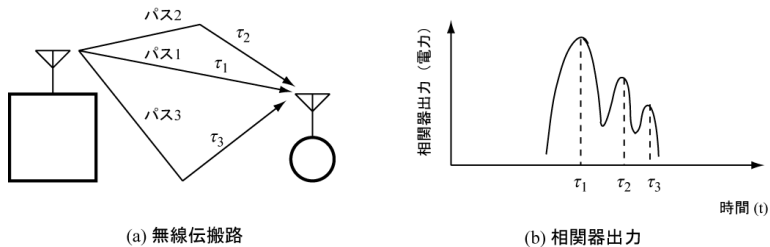


図6・3 遅延分散

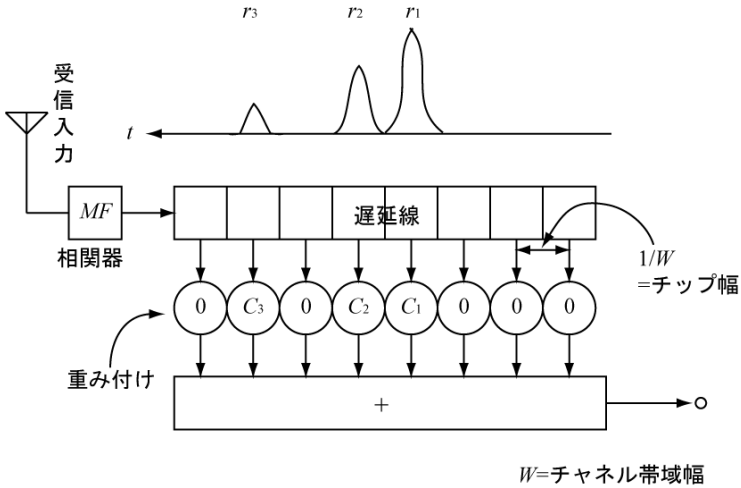
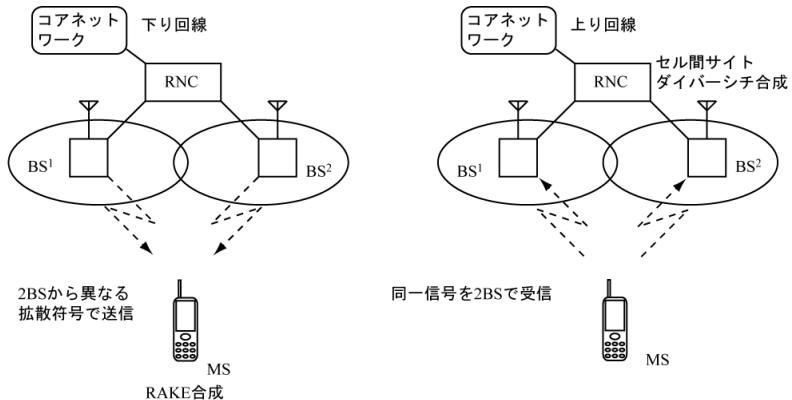


図 6・4 RAKE 受信機の構成

6-3-2 ルートダイバーシチ

DS-CDMA に基づくセルラ方式では、全セルで同一周波数帯域を用いて通信を行う。このため、図 6・5 に示すように複数の基地局からの信号を移動局で受信したり、逆に移動局からの信号を複数の基地局で受信できる²⁾。これをルートダイバーシチという。



BS: Base Station (基地局)
 MS: Mobile Station (移動機)
 RNC: Radio Network Controller (無線ネットワーク制御局)

図 6・5 ルートダイバーシチの原理

下り回線において、セル境界にいる移動局は複数の基地局からの信号を受信でき、これらの信号を最大比合成すれば、SNRが増加し下り回線の伝送特性を改善できる。更に、移動局がセル間を移動中の場合には、通信先の基地局を変更しなければならないが、使用している通信チャネルを解放する前に、移る先（ハンドオーバー先）の基地局との通信チャネルを設定できる。これをソフトハンドオーバーという。なお、TDMA（Time Division Multiple Access）やFDMA（Frequency Division Multiple Access）に基づくセルラ方式では、使用している通信チャネルを解放した後に、ハンドオーバー先の通信チャネルを設定しており、通信が途絶え瞬断を引き起こしていた。このようなハードハンドオーバーに対し、ソフトハンドオーバーではハンドオーバー処理時の瞬断は発生しない。

一方、上り回線において、移動局からの信号を受信する複数の基地局は、受信データに加えて、受信信号の信頼度に関する情報、例えばCRC（Cyclic Redundancy Check）のチェック電子結果や受信SINR（Signal to Interference and Noise Ratio）を合わせてRNC（Radio Network Controller）に送る。RNCは、複数の基地局から送られた受信データの中から、信頼度の最も高い受信データを選択する。すなわち、選択合成を行い、合成後のデータを上位局へ伝送する。

6-3-3 送信ダイバーシチ

送信ダイバーシチとは、基地局が複数のアンテナを用いて送信する技術である。移動局の受信アンテナ数を増やさずに済むため、移動機の回路規模と消費電力を抑えつつ、ダイバーシチ効果を得ることができる。DS-CDMAセルラ方式であるW-CDMA（Wideband Code Division Multiple Access）では、大別してオープンループモードとフィードバックモードの二種類の送信ダイバーシチを用いている。

(1) オープンループモード

オープンループモードとは、移動機からのフィードバック情報を必要としない送信ダイバーシチであり、STTD（Space Time block coding based Transmit Diversity）とTSTD（Time Switched Transmit Diversity）がある。

STTDはアラモウチ（Alamouti）が提案したSTBC（Space Time Block Code）³⁾と等価であり、その構成を図6・6に示す。2シンボルの S_1 と S_2 を送信するとき、2シンボル長の時間間隔で、基地局送信アンテナ1から S_1, S_2 の順番で送信し、基地局送信アンテナ2からは $-S_1^*, S_2^*$ の順番で送信する。なお、*は複素共役を表す。このように送信すると、移動機の受信アンテナは1本にもかかわらず、2ブランチの最大比合成と同等のダイバーシチ効果が得られる。なお、この2ブランチは、基地局アンテナ1から移動局アンテナまでの経路と、基地局アンテナ2から移動局アンテナまでの経路に対応している。

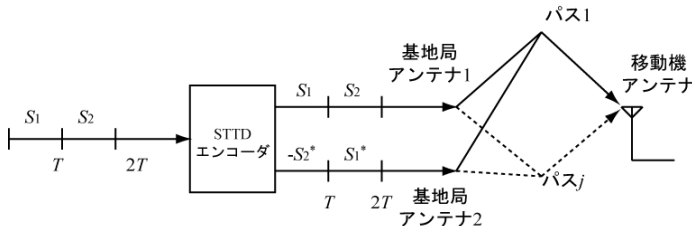


図6・6 STTDの構成

TSTD は基地局が送信アンテナを周期的に切り替える方式で、同時刻では一つの送信アンテナのみが選択されている。移動局では、複数の異なる経路を通った信号が受信されるので、ダイバーシチ効果が得られる。

そのほかに、W-CDMA で採用されていないが、送信アンテナごとに同一信号を異なる遅延時間で遅延させて送信する送信ダイバーシチがある。これは遅延送信ダイバーシチとも呼ばれ⁴⁾、その構成を図 6・7 に示す。このような送信を行うと、長い遅延時間を有するパスを恣意的に発生させることができ、受信側でパスダイバーシチの効果が期待できる。CDTD (Cyclic Delay Transmit Diversity) は、アンテナごとに異なる循環遅延を与える遅延送信ダイバーシチであり、次世代携帯電話方式への導入が検討されている。

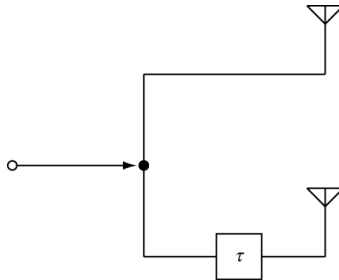


図 6・7 遅延送信ダイバーシチの構成

(2) フィードバックモード

フィードバックモードは、移動局からのフィードバック情報を用いて、送信信号の振幅や位相を制御する方法である。この位相や振幅は、移動局の受信アンテナにおいて送信信号が最適に合成されるように制御される。

■4群 - 1編 - 6章

6-4 マルチユーザダイバシティ

(執筆著：府川和彦) [2009年5月 受領]

一つの通信チャネルを、複数のユーザの中から1ユーザを選択し割り当てて問題を考える。個々のユーザが通信チャネルを用いたとき、伝送路のインパルス応答はユーザごとに独立に変動するものとし、そのときの伝送品質、例えば SNR の情報は制御系で完全に得られるものと仮定する。このとき、SNR が最大となるユーザに通信チャネルを割り当てれば、通信システム全体の通信路容量、すなわちスループットを最大にできる。これをマルチユーザダイバシティという⁵⁾。

上記のように SNR が最大となるユーザに常に割り当てると、スループットを最大にすることができるが、基地局に近いユーザにのみ通信チャネルが割り当てられ、基地局から遠い場所にいるユーザには通信する機会が与えられないという問題が発生する。このユーザ間の不公平性の問題を解決するため、PR (Proportional Fairness) などのスケジューリング・アルゴリズムが検討されている。PR は、時刻 t の有限時間平均 SNR $T(t)$ に対する瞬時 SNR $R(t)$ の比、すなわち $R(t)/T(t)$ を選択基準とし、この比が最大となるユーザへ時刻 t の通信チャネルを割り当てる。このようにすると、ある時刻に瞬時 SNR が平均値に較べて高くなるユーザへ通信チャネルが割り当てられ、基地局から遠い場所にいるユーザにも通信機会が与えられるので、不公平性の問題が緩和される。しかしながら、ユーザ間の公平性を保つため、通信システム全体のスループットは最大値に較べ若干劣化する。

■参考文献

- 1) 奥村善久, 進士昌明監修, “移動通信の基礎,” 第7章, 電子情報通信学会, 1986.
- 2) 木下耕太 著, “やさしい IMT-2000-第3世代移動通信方式-,” 第3章, 電気通信協会, オーム社, 2001.
- 3) S.M. Alamouti, “A simple transmit diversity technique for wireless communications,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol.16, no.8, pp.1451-1458, Oct. 1998.
- 4) H. Suzuki, “Performance of a new adaptive diversity equalization for digital mobile radio,” *Electronics Lett.*, vol.26, no.10, pp.626-627, May 1990.
- 5) P. Viswanath, D.N.C. Tse, and R. Laroia, “Opportunistic beamforming using dumb antennas,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol.48, no.6, pp.1277-1294, June 2002.