

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として

移動通信における重要な基盤技術の1つである適応信号処理について概要を述べる。まず、移動無線において信号伝送にかかわる信号処理を無線信号処理（RSP）として概括し、レイヤに分類する。無線信号を同相成分と直交成分に分離してベースバンドで信号処理を行う同相-直交レイヤについて、適応信号処理の目的と要求条件、具体的な技術を述べる。RSPにおける適応信号処理の具体例として、TDMA移動通信システムに用いる適応等化器、TDMAまたはCDMAに用いる適応干渉キャンセラ、およびデジタル伝送用部品の自動調整を取り上げ、それぞれの技術について、原理、効果、最近の成果などの詳細を述べる。

すずき ひろし
鈴木 博

まえがき

マルチメディアに対応した高度移動通信システムの実現を目指して、TDMAおよびCDMAの多元接続技術、それらを実現するための無線信号に関する様々な信号処理技術が研究されている。高い信頼性で情報を無線伝送するための信号処理は、RF帯からベースバンドまで多岐にわたっており、以下では無線信号処理（Radio Signal Processing: RSP）と総称する。従来の移動無線におけるRSPは、RF帯およびIF帯の増幅、フィルタリング、周波数シンセサイジングなどのアナログ信号処理が中心であった。これらの部品は今後も小型・高精度化に向けた改良が進むと予想されるが、伝送路のデジタル化に伴って、システムの機能・性能を決定し、さらに高度化するための基本的な信号処理は、ベースバンドにおけるデジタル信号処理（DSP）に移っていくと考えられる。

デジタル移動通信の実現においてキーテクノロジーとなった音声符号復号化技術には、適応信号処理を含む高度なDSP技術が不可欠であったが、この適応信号処理技術は変復調信号処理にはあまり積極

的に利用されてこなかった。その理由として、従来の比較的簡易なデジタル変復調技術でも実用的な伝送特性が得られたこと、また、デジタル信号処理における消費電力の増加が携帯機の低消費電力化の要求に応えられなかったことなどが挙げられる。しかしながら、無線周波数をより効率良く利用する変復調方式、多重化方式、多元接続方式、また多様な高速サービスに応える伝送方式を将来の移動通信方式として実現するためには、等化、RAKE、アダプティブアレー、干渉キャンセルなど、適応信号処理技術を適用した高度な伝送技術が不可欠である¹⁻⁶⁾。さ

らに、半導体集積回路技術の発展は、徐々にこれらの高度な信号処理技術の導入を高集積度と低消費電力化の両面から可能にしつつある。

本稿は、移動通信における変復調関連の適応信号処理とその応用について最近の進展をまとめたものである。

移動通信における 適応信号処理

■無線信号処理（RSP）

送受信ブロックダイヤに対応して、図1に示すようにRSPの処理内容を4つのレイヤに分類できる⁶⁾。同相-直交レイヤ

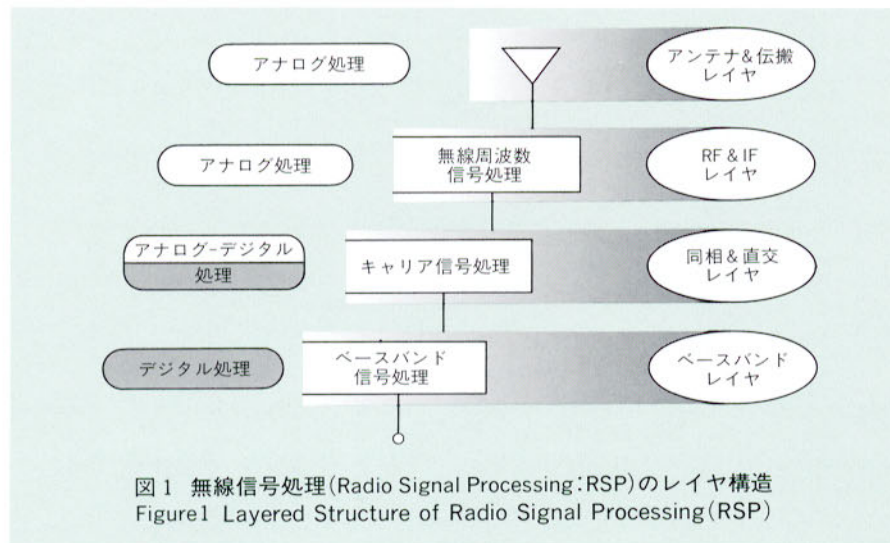


図1 無線信号処理(Radio Signal Processing: RSP)のレイヤ構造
Figure1 Layered Structure of Radio Signal Processing (RSP)

レイヤ	技術
アンテナ&伝搬レイヤ	<ul style="list-style-type: none"> ● 利得・指向性制御 (固定・可変) ● ビームチルト制御 (固定・可変) ● 多周波数帯共用 ● 送受アンテナ共用
RF & IFレイヤ	<ul style="list-style-type: none"> ● 高効率送信増幅 ● 低雑音受信増幅 ● IF増幅器 (AGC線形/リミタ) ● RFフィルタリング ● IFフィルタリング ● 周波数信号生成 ● 周波数変換
同相&直交レイヤ	<ul style="list-style-type: none"> ● 変復調 (GMSK/QPSK/16 QAM, 遅延検波/同期検波) ● 適応等化 (DFE/MLSE, ZF/LMS/RLS) ● ダイバーシチ受信 (最大比合成/等利得/選択) ● アダプティブビーム形成 ● デコリレーション ● RAKE
ベースバンドレイヤ	<ul style="list-style-type: none"> ● 情報源符号化 (APC-AB/TC-WVQ/VSELP/PSI-CELP) ● 伝送路符号化 (ARQ/FEC, Hard/Soft Decision) ● 同期 (シンボル、フレーム、ワード、チップ)

●は適応信号処理を含む

図2 各レイヤにおける代表的な技術
Figure 2 Techniques of Each Layer

では、変調されたキャリア信号を同相成分と直交成分に分離し、RFで行う処理と等価なベースバンド処理を行う。各レイヤの具体的な技術例を図2に示す。この図が示すように、ベースバンドレイヤでは、DSPはすでに主要技術である。同相-直交レイヤにおいても適応信号処理は主要技術になりつつある。これは時間的に変動する伝送路において最適伝送を実現するためには、適応的に変動する伝送路パラメータを推定することが不可欠であることによる。

一般に適応信号処理は蓄積、変換、処理というDSPの基本的な信号処理を用いて、パラメータが時間的に変化しているシステムの観測、または最適制御を行うものである。以下では、雑音・フェージング条件での最適信号受信、あるいは伝送部品の最適制御を行う方法について述べる。

■目的と要求条件

移動通信における最適伝送という観点から適応信号処理の主要目的を分類すると図3のようになる。(i)等化、アレー信号処理による受信信号電力対雑音比 (Signal to Noise Ratio : SNR)の最大化、(ii)アレー信号処理、マルチユーザ信号検出による同一チャネル干渉成分の除去、(iii)アダプティブアレーのビーム形成のための信号入射方向の推定は、基本的な技術課題である。具体的な適用例を同図に列挙した。なお、等化技術は初期には、符号間干渉によるひずみを単に除去する技術であったが、現在では、符号間干渉条件のもとで最適に符号判定する復調技術として研究されている³⁾。ただし、特に大きな遅延による符号間干渉については、同一チャネル干渉波とみなしてアダプティブアレーで除去する方法が検討されている。これらの技術を検討する際の移動無線の環境を図4に示す。移動伝搬路は、(i)インパルスレスポンスが最小位相 (Minimum Phase : MP) と非最小位相 (Non-Minimum Phase : NMP) との間を遷移する、(ii)信号と比較して雑音と干渉の電力レベルが高い、(iii)伝搬路の変化に伴う信号のタイミン

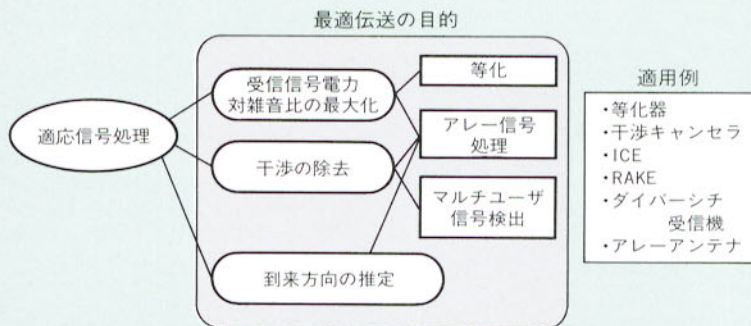


図3 最適伝送における適応信号処理の目的とその適用例
Figure3 Objectives of Adaptive Signal Processing for Optimal Transmission and Applied Transmission Example

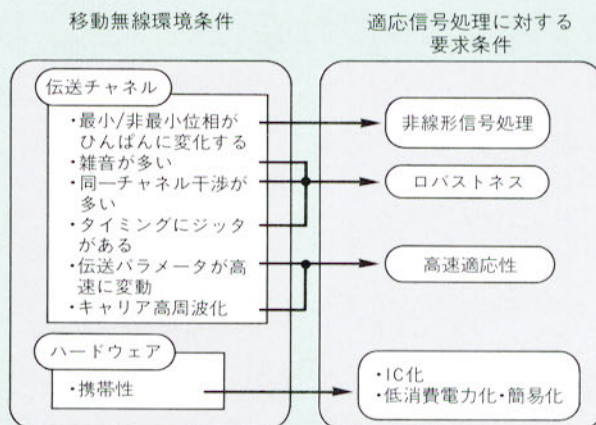


図4 適応信号処理に対する移動無線環境条件と要求条件
Figure4 Mobile Radio Environments and Requirements for Adaptive Signal Processing

グジッタが比較的大きい、(iv)受信信号振幅と位相が高速フェージングの影響で急激に変化する。特に、RF周波数が高周波化してくると、フェージング変動の影響は非常に厳しくなる。以上の問題に加えて、(v)ハードウェア上は機器の携帯性が重要となり、機器全体としての低消費電力化が要求される。これらの条件の下で良好な伝送状態を確保するために、移動無線における適応信号処理には、非線形信号処理、ロバストネス、高速追従性、処理規模の低減が要求されている。

等化における適応信号処理

■ TDMA移動通信

多元接続方式としてTDMAを用いる移動通信システムへの適応等化の適用例は2つに大別される¹⁾。日本あるいは米国の

方式であるPDC,USDCではフェージング変動周波数がビットレートに比較してかなり高速である。一方、欧州の方式であるGSM方式ではビット同期で正規化された遅延スプレッドが大きい。GSMとPDCの動作例を表1に示す。この動作条件を図5にプロットした。縦軸の左側は、最大ドップラー周波数 f_D をシンボル長 $2T$ 、バースト長 T_B 、およびフレーム長 T_F で正規化した値を示す。もし、 $f_D T_F$ あるいは $f_D T_B$ が0.1より大きいならば、等化器のタップ係数を、フレームごとあるいは1バースト区間内でも、フェージング変動に合わせて変化させる必要があり、適応アルゴリズムの採用は不可欠である。同図は $f_D = 40, 80\text{Hz}$ のときの様子を実線と破線で示している。この図が示すように、フレームごとのインパルスレスポンス推定はPDC, GSMともに $f_D T_F > 0.1$ であるから

適応アルゴリズムを採用する必要がある。バースト内での適応信号処理は、PDCでは $f_D T_B > 0.5$ であるから必須であるのに対して、GSMでは $f_D T_B = 0.05$ 程度(40Hz)で不要であるが、 $f_D = 80\text{Hz}$ では $f_D T_B = 0.1$ となるので、適用アルゴリズムの採用により特性が改善される。同図の右側の縦軸には遅延時間差 τ をシンボル間隔 $2T$ で正規化した値が示されている。図中には $\tau = 3, 30\mu\text{s}$ の様子が示されている。正規化した値が0.1以上では等化器が必要である。GSMでは、 $\tau = 20\mu\text{s}$ のとき $\tau/2T$ が2.5程度となるので、等化器が必須である。PDCは $\tau = 30\mu\text{s}$ 程度で $\tau/2T$ が0.1程度となるので、等化器が必要となる。ただし、現状のPDCにおいては、小さいセルの配置、チルト形基地局アンテナの採用、選択形ダイバーシチの導入、などによって τ を $5\mu\text{s}$ 程度に抑え、等化器の導入を不要としている。TDMAのバーストごとに行われる適応信号処理では、バーストごとの初期チャネル同定を確実に行う必要があるのでトレーニング信号がバーストごとに挿入されている。図6に3種類のバーストフォーマットを示す。(a)はプリアンブルとポストアンブル、(b)はミッドアンブル、(c)はプリアンブル、をバーストに挿入した形式を示している。このうち、ミッドアンブルには、(i)バーストあたり1つのトレーニング信号しか用いていないのでスペクトル利用効率が高い、(ii)バーストを2つの部分に分割しているので正規化最大ドップラー周波数は半分になり、適応信号処理の追従性に対する要求が緩和される、という利点がある。トレーニング信号の個数は図6(d)に示すようにインパルスレスポンスの推定法と深く関係している。(i)単一トレーニング信号は、トレーニング区間だけで行う推定、あるいはデータ区間を含む予測で用いられる。(ii)2つのトレーニング信号は、補間あるいは予測で用いられる。(iii)ブラインドアルゴリズムによる推定ではトレーニング信号は原理的には不要である。これらのうち、2つのトレーニングを用いる方法では両方向等化が可能となる⁵⁾。この方法では通常とは

表1 GSMとPDCの基本仕様と動作例
Table 1 Specifications and Operation Examples of GSM and PDC

システム	GSM	PDC
キャリア周波数	800 MHz	800 MHz 1.5 GHz
ビットレート(1/T)	270 kb/s	42 kb/s
変調方式	GMSK	$\pi/4$ -shift QPSK
フレーム長(T_F)	4.6 ms	20 ms
バースト長(T_B)	0.58 ms	6.7 ms
最大ドップラー周波数(f_D)	80 Hz	80 Hz 160 Hz
最大遅延時間差(τ)	20 μs	5 μs (1%) (USDC : 41.2 μs)

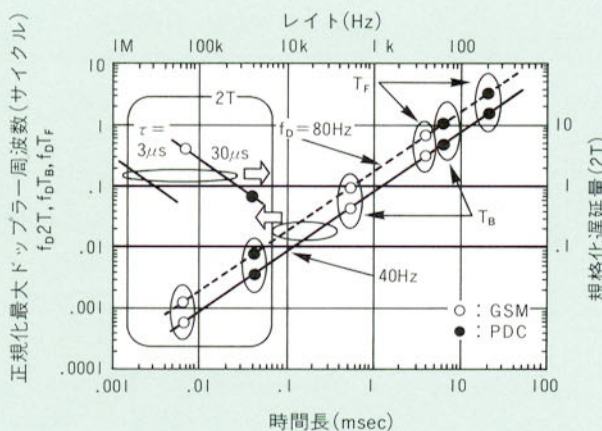


図5 適応動作条件の具体例
Figure5 Specification Examples and Condition of Adaptation

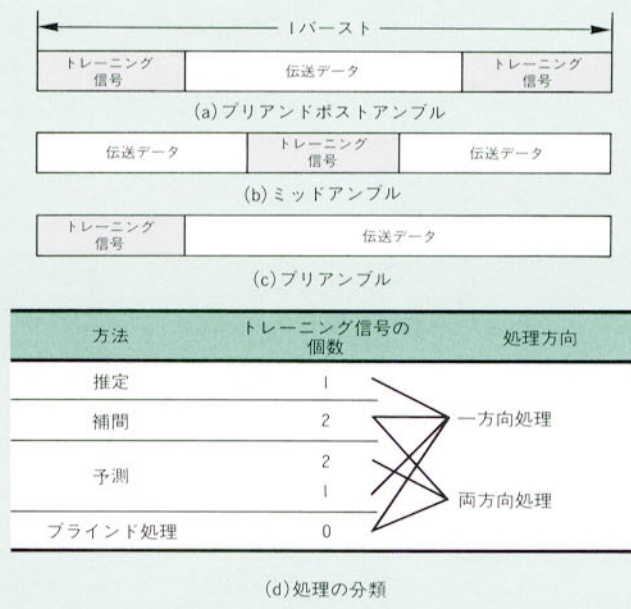


図6 適応信号処理のためのトレーニング信号
 Figure6 Training Signals for Adaptive Signal Processing

MLSEが有効である^{4,5,7-9)}。この適応MLSEにおいて、シンボル系列推定にはビタビアルゴリズムが利用されている。適応性改善、BER低減のための技術的な特徴を以下に列挙する。

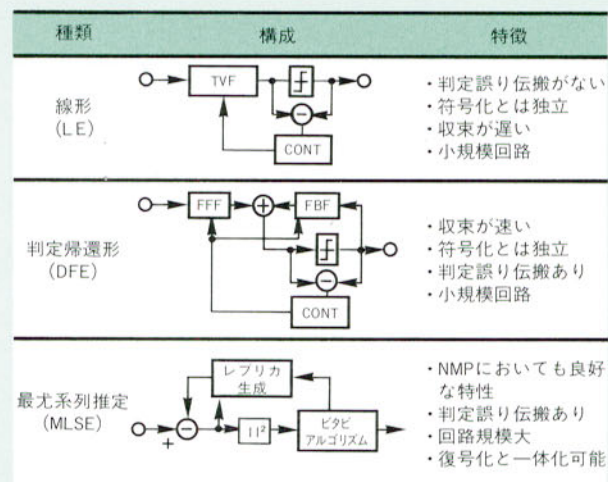
- (i) 時間的に変動するチャンネルに対して、ビタビアルゴリズムの状態ごとにインパルスレスポンスを推定している。より高速のトラッキングは、変動チャンネルに対する高次状態変数モデルを採用することにより実現できる。
- (ii) タイミングジッタの影響については、受信信号のシンボルサンプリングとレプリカ生成におけるダブルサンプリングにより抑えることができる。伝搬路の変動に伴う急激で大きなタイミングジッタについては、レプリカ生成をシンボルサンプリングにしてトレーニング時の最適タイミングサーチにより吸収することができる。後者の方が前者より処理量を小さくでき、また大きなジッタを吸収できる。
- (iii) 通常、ビタビアルゴリズムを終結させるためのビット系列が不可欠であるが、信号シーケンスに特別なビットを付加しないで、バースト後には信号が消失することに対応した新しい状態を特別に設け、NMPにおけるBERの増加を抑えている。

逆方向にも等化を行うので、NMPがMPに変換され、NMPにおける等化処理が大幅に簡略化される。また、ブラインドアルゴリズムは、トレーニング信号がなくても本質的に収束可能であるから本質的に安定した動作が期待できる⁶⁾。実用的には、ブラインドアルゴリズムにおいても立ち上がりの収束を速くするためにトレーニング信号が用いられるが、そのトレーニング長は通常のものより短くできると考えられる。

■等化方式

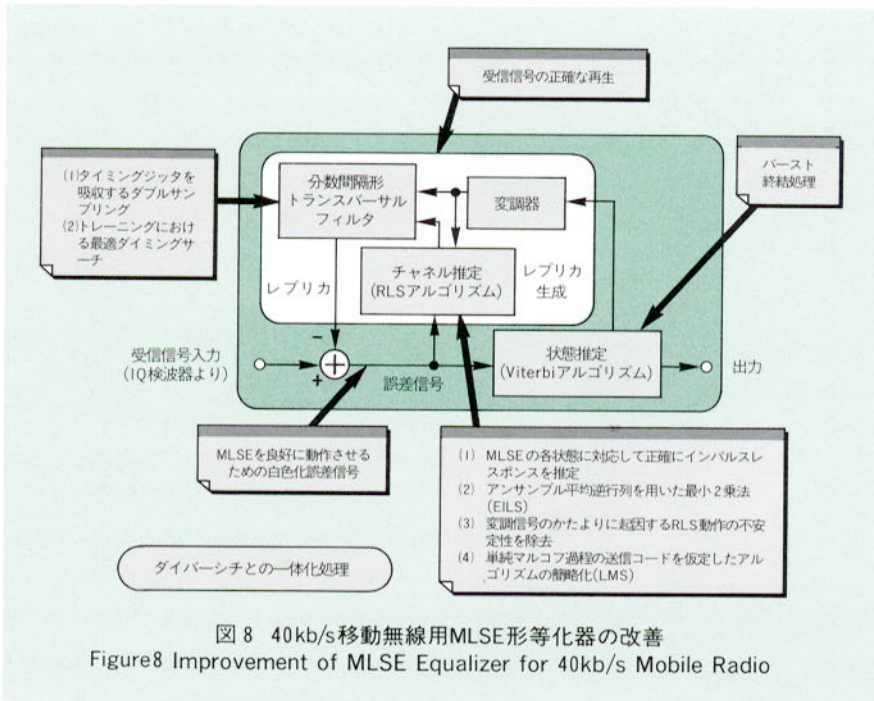
等化方式として、線形等化 (Linear Equalizer : LE)、判定帰還形等化 (Decision Feedback Equalizer : DFE)、および最尤系列推定 (Maximum Likelihood Sequence Estimation : MLSE)の3種類がよく知られている³⁾。図7はこれらの基本構成と特徴を示したものである。移動無線伝搬路ではNMPがひんぱんに発生するので、移動無線用としてLEは適していない。DFEは移動通信で広い応用が考えられている。MLSEは、フェージング変動の激しい移動無線チャンネルでもほぼ最適な特性を実現できる。DFEは判定シンボル系列を帰還し、また、MLSEでは受信される可能性のあるシンボル系列候補を帰還して符

号間干渉を打ち消している。この判定処理あるいは候補の生成処理には非線形操作が必要なのでこれらは非線形等化といわれている。非線形等化では雑音がない信号を帰還しているので一般にLEよりも特性が改善される。PDCやUSDCにおいては前述したように、正規化最大ドップラー周波数 $f_D 2T$ が大きく、フェージングに対する追従性が重視されている。多くの研究結果から、図8に示すような適応



TVF: トランスバーサルフィルタ FFF: フィードフォワードフィルタ
 FBF: フィードバックフィルタ CONT: タップ係数制御

図7 3種類の等化器の構成と特徴
 Figure7 Three Equalizer Schemes and their Feature



てもARモデルを形成し、状態変数モデルに組み込んだものである。図11は2プランチダイバーシチを導入したときに追従性および熱雑音特性が大幅に改善されることを示している。

これらの図に示した適応MLSEは最尤推定理論から厳密に導出されたものである⁷⁾。この理論では、まずMLSEとカルマンフィルタが一体となった形式が最尤推定規準とベイズの定理から導出される。受信波のレプリカ生成を行うためのカルマンフィルタは、次に指数重み付き逐次最小2乗アルゴリズム (Recursive Least Squares: RLS)に変換される。カルマンフィルタにおける生成プロセスの分散マトリクスに、観測された推定値を代入することにより変換が行われる。これにより伝搬路に対するパラメトリックな仮定を一切排除している。このようにして得られた適応MLSEをRLS-MLSEと呼んでいる。RLS-MLSEにおける相関行列は、図8に示したトランスバーサルフィルタの入力信号の相関行列に等しい。この入力信号は信号成分のみでなく雑音成分を含んでいないので、相関行列の値は送信符号系列の相関行列に収束してくる。そこで、RLS-MLSEで最も計算処理量の多い逆行列演算を削除するために、この相関行列を理論的に導出可能なその収束値にはじめから置換する方法が考えられている (ア

(iv) 伝送路推定のためのカルマンフィルタについては、後述する方法によりカルマンフィルタをLMSに等価変換し、処理量を大幅に低減している。

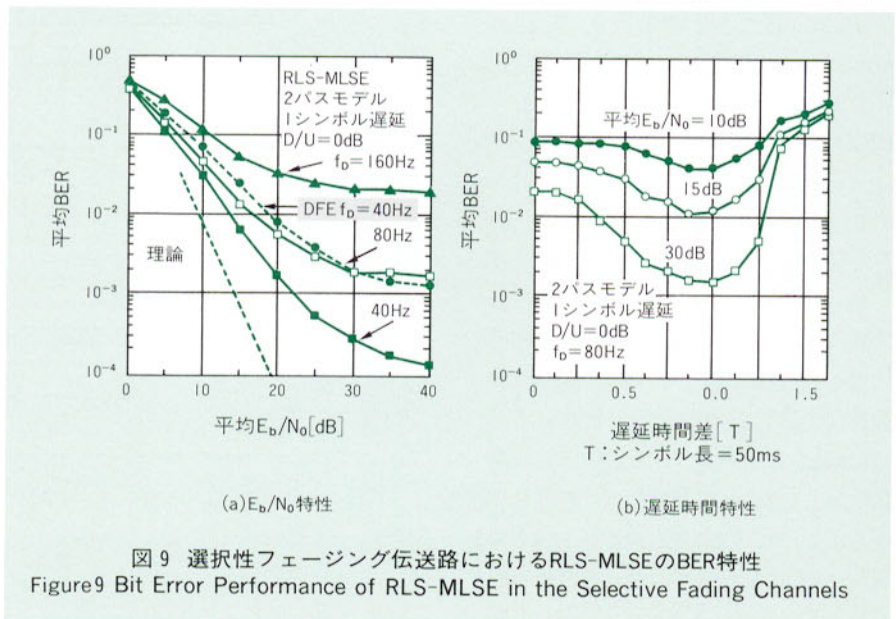
以上のような適応MLSEは移動通信の様々な復調法に適用できる⁵⁾。具体的には、①予測アルゴリズムを採用したキャリア再生により高性能化した同期検波方式、②選択性フェージング条件における遅延検波出力を適応的に等化しながら検波する方式、③最適合成制御によるダイバーシチ受信方式、④トレリス符号化変調における等化と復号の一括処理、⑤後述する干渉キャンセラ、などへの応用が報告されている。

■特性例

選択性フェージング条件における適応MLSEのBER特性を図9に示す^{5,7,9)}。2パスの遅延時間差はシンボル間隔Tで、各インパルスレスポンスは独立にレイリー変動していると仮定している。計算機シミュレーションで得られた特性は、理論的に導出されるものとほぼ一致している。さらに、マルチパスフェージングシミュレータを用いた伝送実験によっても確認されている。

図9のBER特性は、(a)が E_b/N_0 特性、(b)は遅延時間差特性である。前者は適応MLSEがDFEよりも優れた特性となるこ

と、後者は、1シンボル遅延条件ではパスダイバーシチ効果が観測されることを示している。このパスダイバーシチ効果は、2波が同時に低レベルとなる確率が1波受信の場合より小さくなるために得られるものであり、2波モデルにおける単一パルス最適伝送特性に関する厳密な理論値とよく一致している¹⁰⁾。図10は、2次の状態変数モデルによる追従性の改善を示している。このモデルは、インパルスレスポンスの自己回帰 (Auto Regressive: AR) モデルだけでなく、その変化の差分、すなわち速度成分、につい



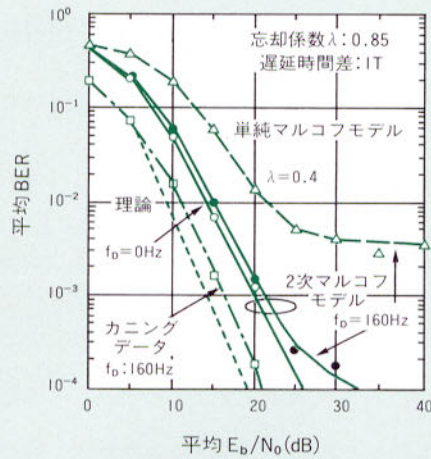


図10 高次状態変数モデルによるRLS-MLSEの適応性の向上
Figure10 Performance Improvement of Adaptation of RLS-MLSE by Higher Order State Variable Model

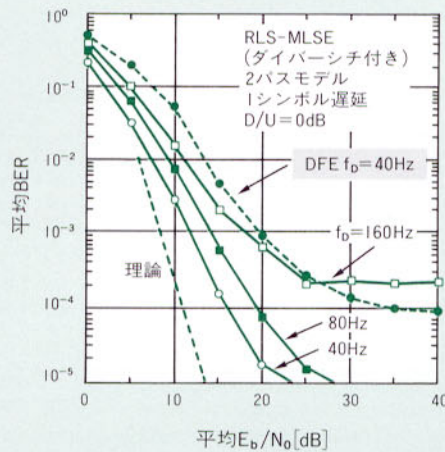


図11 2ブランチダイバーシチ受信によるRLS-MLSEのBER特性の改善
Figure11 Performance Improvement of RLS-MLSE by Two Branch Diversity Reception

ると考えられる。そのため、干渉による劣化を抑えることができる適応干渉キャンセラの適用可能性が検討されている。また、適応干渉キャンセラを積極的にシステムに導入し、加入者収容能力の向上を目指す研究も行われている。符号間干渉は希望波が遅延したものであるから直接波と合成することによりSNRの最大化が可能であるのに対して、同一チャネル干渉は希望波とは全く異なる信号であり、受信波からその成分を除去することが基本である。キャンセルの方法は等化と同様に線形と非線形に分類できる。

線形キャンセルの観点からアダプティブアレーが図12のように様々に研究されている¹¹⁻¹³⁾。例えば、システムの検討例として、基地局用として8エレメントのサークル状アレーを送受に用いることにより、スペクトル利用効率向上が期待できることが報告されている¹⁴⁾。アレーが形成する適応的なビームによるスペースの分割は、従来の面的なセルという概念ではなく、伝搬路のパスに添った線的な適応的なセルが形成されることを意味している (Path Division Multiple Access : PDMA)¹⁵⁾。

通常のアダプティブアレーには最小平均2乗誤差 (Minimum Mean Square

ンサンプル平均逆行列最小2乗法: EILS)。このEILSでは、送信符号に相関がなければ逆行列が単純な対角行列となりLMSが導出される。

上述した適応等化方式のBER特性は、遅延成分があるときには、それによるひずみを考慮してSNRを最大化する最適受信を行うとともに、パスダイバーシチ効果が加わるので、いわゆる遅延検波方式に比べて大幅に優れている。しかしながら、その遅延成分がないときには、適応信号処理における追従性が遅延検波に及ばないため、遅延検波の方が良い特性となる。そこで、これら2つの検波方式をバーストごとに適応的に選択する方法も

検討されている。この方法では適応信号処理によるディレイスプレッドセンサが重要なキーコンポーネントとなる⁵⁾。

実際の移動通信への適用では、特に携帯機への導入が難しい課題となる。伝送特性と消費電力を勘案して構成を最適化する必要がある。すでに非常に多くのサブオプティマムな構成法が提案されている。

干渉キャンセラにおける適応信号処理

■アダプティブアレーとICE

移動通信の発展に伴って、セルが高密度となり、従来のセル配置設計だけでは制御不可能な同一チャネル干渉が発生す

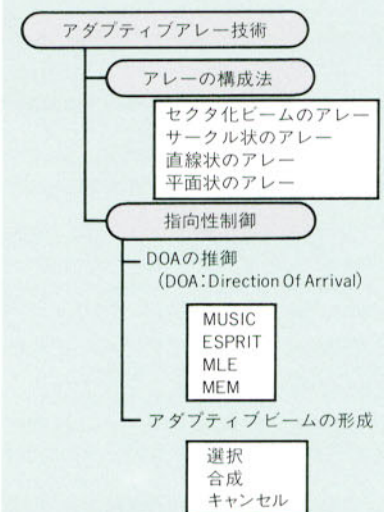


図12 移動無線におけるアダプティブアレー技術
Figure12 Adaptive Array Techniques for Mobile Radio

Error: MMSE) 規準が採用されることが多い。この場合の2乗誤差成分は雑音および干渉波の電力和であり、MMSEではこれら両者の和を最小化する。したがって、雑音成分が大きければダイバーシチ合成のように動作し、また干渉成分が大きければアレーの指向性パターンが干渉波の入射方向にヌルを形成したキャンセラになる。このような最適合成ダイバーシチは、干渉がないときには最大比合成ダイバーシチと等価となる。もし、希望波のトレーニング信号が既知の場合には、その成分の出力を保持するという拘束条件付きでキャンセラ出力を最小化するというアルゴリズムを使うことができる¹⁶⁾。

図13(a)に示すアダプティブアレーは、DFE形のダイバーシチ受信方式と見ることも可能で、干渉キャンセルとともに希望波の等化も兼ね備えている⁹⁾。同一チャネル干渉の除去は線形合成で行い、符号間干渉については非線形処理で等化している。そこでこのように2つの機能を備えたものを以下では干渉キャンセル等化器 (Interference Cancelling Equalizer: ICE)と呼ぶことにする。アダプティブアレーでは、アンテナ指向性のヌル点を干渉方向に調整することにより、干渉キャンセルを行っている。しかしながら、このような線形合成に基づく線形ICEはサブ最適と考えられる。なぜなら、希望波と干渉波がほぼ同一方向から到来すると、両者を区別することができなくなり、希望波抽出能力が大幅に劣化するためである。一方、最尤推定の観点から非線形ICEが導出され、これは最適受信方式となる^{17,18)}。図13(b)に示すMLSE形の非線形ICEでは、同一方向からの干渉波が重畳されていても一定の条件では希望波を分離することができる。図14にRLS-MLSEを適用した非線形ブラインドICEの特性を示す。フェージング環境で平均CIRが-10dB程度でも平均BERが 2×10^{-3} 程度となる。MLSE形のICEは基地局のマルチユーザ信号検出法として有望であり、今後その可能性の検討が続けられると考えられる。

■CDMA方式における直交化処理

DS-CDMA移動通信方式は同一キャリア周波数を隣接ゾーンでも繰り返し利用できるという大きなメリットを有しており、近年多くの研究成果が報告されている²⁾。しかしながら、各ユーザが使用するコードの間に相互相関があり、この不完全な直交性のために、逆拡散のプロセスで干渉が発生し、伝送特性および周波数利用効率が大幅に劣化する。そのため、この干渉を除去する多数の方法が提案さ

れている。線形と非線形のアプローチがあるが、以下では前者に限定する。

表2はDS-CDMA用線形干渉キャンセラを分類して、その基本構成をまとめたものである¹⁹⁻²²⁾。同表に示したキャンセラのうち、最適合成の原理を用いたものはMMSE規準によるアンテナダイバーシチ受信と同じ作用を利用している。インプリメンテーションは2通りある。1つは整合フィルタの逆拡散出力を合成する

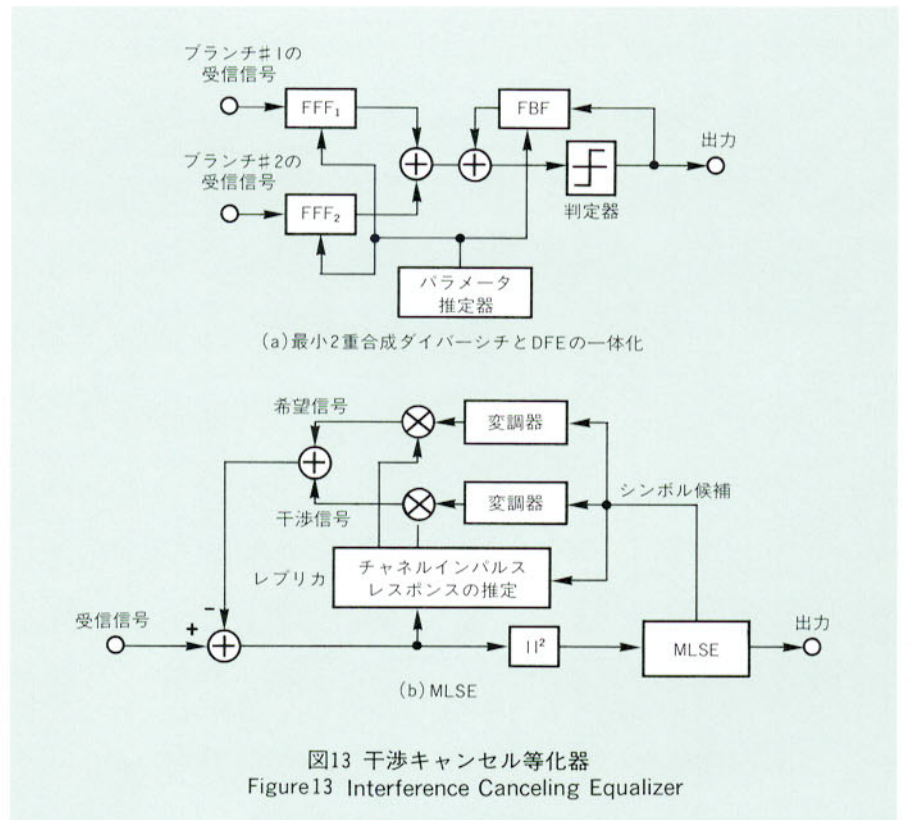


図13 干渉キャンセル等化器
Figure13 Interference Cancelling Equalizer

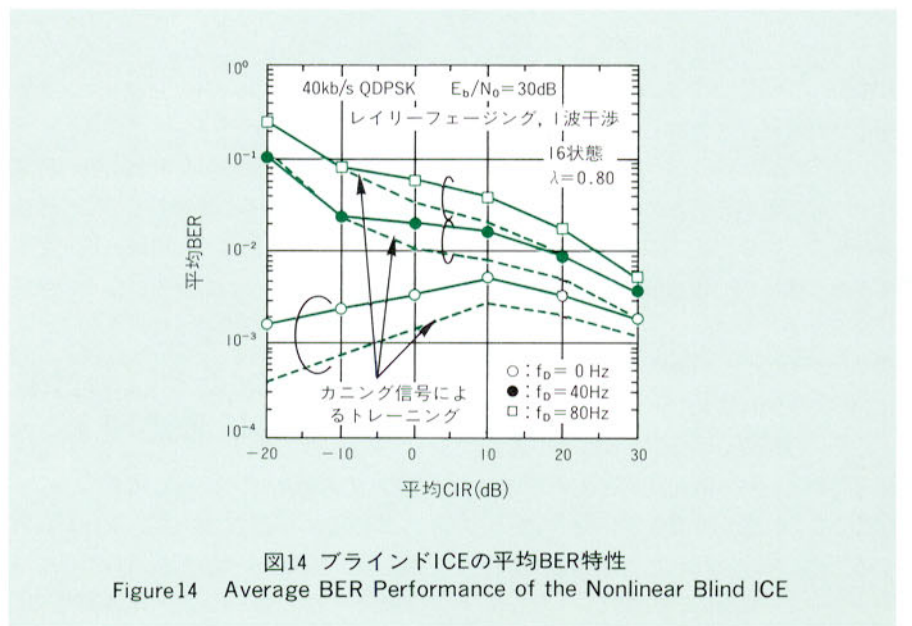


表2 DS-CDMA線形干渉キャンセラの比較
Table 2 Comparisons of DS-CDMA Interference Concellers

原理	構成(文献番号)	適応処理に用いる基準信号	雑音を除いた判定前の信号
最適合成	整合フィルタ+合成器 ¹²⁾ (逆拡散)	再生データ	振幅と位相を正規化した逆拡散データ信号
	トランスバーサルフィルタ ¹⁹⁾ (逆拡散&合成)		
直交化	整合フィルタ+デコリレータ ²⁰⁾ (逆拡散) [+任意の検波方式]	実用的なアルゴリズムはない	入力の振幅と位相を保存したデコリレータされた逆拡散信号
	トランスバーサルフィルタ ^{21,23)} (逆拡散&合成) [+遅延検波etc.] [+信号再生器]	逆拡散された一定レベルの再生データ	振幅と位相を正規化した直交化された逆拡散データ信号
	トランスバーサルフィルタ ²²⁾ (逆拡散&合成) [+任意の検波方式]	不要	入力の振幅と位相を保存した直交化された逆拡散信号

もの、もう1つは逆拡散と合成の2つの線形処理をトランスバーサルフィルタ1つで実現するものである。最適合成ではマルチパスによって遅延分散した希望波の信号エネルギーを線形合成して収集している。しかしながら、フェージングが高速になるとキャンセル性能を維持しながら、希望波と干渉波の個々の変動に追従しながら線形合成する処理は非常に難しくなる。

そこで、サブ最適な受信方法ではあるが実現性の高い方法として、信号の直交化を行う研究が進められている。この方法では、干渉波だけでなく、希望波の異なる遅延成分もキャンセルするのでSNR最大化の観点からは不利になる。しかしながら、この方法はコード間相関のみを直交化しており、伝搬路のインパルスレスポンスとは無関係であるから、個々の信号のフェージング変動を追従する必要がないという大きなメリットがある。直交化で代表的なデコリレーションは、ゼロフォーシングアルゴリズムまたは長時間平均した受信波の相互相関行列の逆行列を求めることにより実現できる²⁰⁾。ただし、呼の発生、終了、伝搬路の変化により、特定ユーザが受信する拡散コードはゆっくりではあるが変化するので、この拡散コードの変化に対応して、直交化のパラメータも適応的に変える必要がある。デコリレータはこのような適応性を有していないので、新しい適応的

な直交化アルゴリズムが研究されている²¹⁻²³⁾。

無線回路における自動調整

将来の移動通信システムは、ユーザの多様な通信モードの要求に応えるため、その仕様は高度かつ複雑なものになっていくと考えられる。そのため図15に示した基本構成に用いられる部品においても複雑な機能を持つようになり、しかもコンパクト、低消費電力かつ高精度が要求されると予想される。上述した等化器あるいは干渉キャンセラを理想的に動作させるためにも、各伝送部品の高精度化が要求される。そのような部品において、適応アルゴリズムを用いた自動キャリブ

レーションは重要な技術になると考えられる⁵⁾。

□線形処理のための部品

(1) 線形変調方式における送信増幅器
PSK, QAMなどの線形変調方式では、送信電力増幅器にA級などの線形増幅器が用いられる。移動通信においては、ひずみによる帯域外スペクトル抑圧に関する規定が厳しいので、バイアス用電力を多く供給してひずみの発生を抑えている。DCからRFへのパワー変換効率を下げずにひずみを抑える技術が研究されているが、電力増幅器の動作は、経年変化、バイアスや温度の変動に対して比較的敏感であるから、ひずみ抑圧回路を最適状態に維持するためには適応アルゴリズムが重要な役割を果たすと考えられる²⁴⁾。

(2) 自動利得制御(AGC)増幅器

多値QAM検波、等化、干渉キャンセルなどでは、受信した信号をAD変換用の適切なレベルに線形増幅する必要がある。受信側にAGC増幅器が用いられる。図16には3種類のAGC増幅器を示す。(a)はフィードバック形、(b)はフィードフォワード形、(c)は包絡線再生形を示す⁵⁾。従来のAGC増幅器ではフィードバックループが形成されているが、バーストモード動作では立ち上がり特性に工夫をする必要がある。包絡線再生形は増幅器の基本がリミタ増幅器であり、高速応答性に優れている。しかしながら、振幅の瞬時変動分を再生するためにアンチログ処理を要す

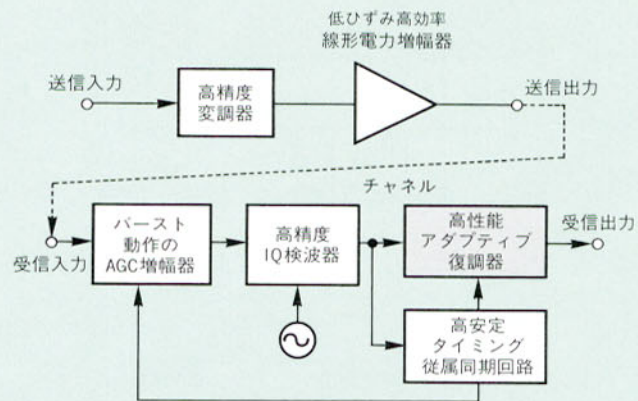


図15 無線部品に対する要求条件
Figure15 Requirements for Radio Components

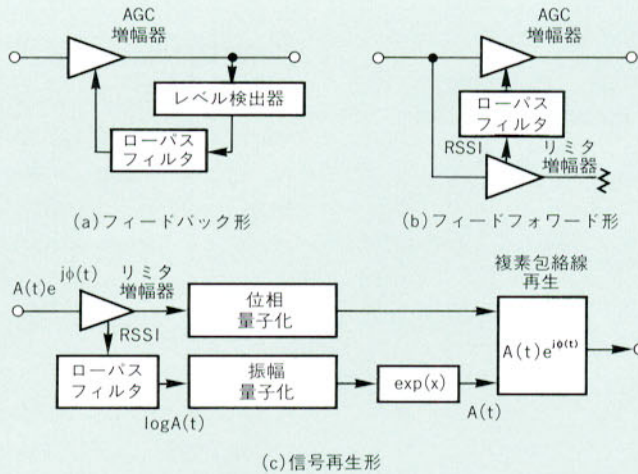
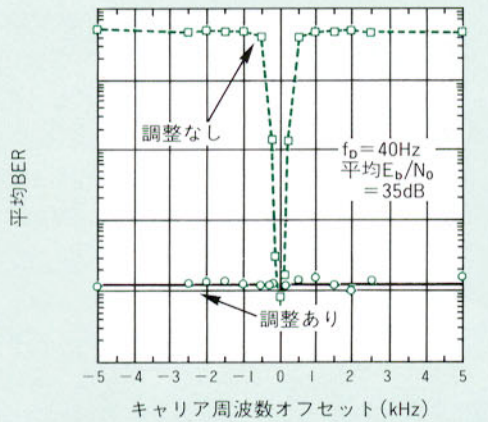
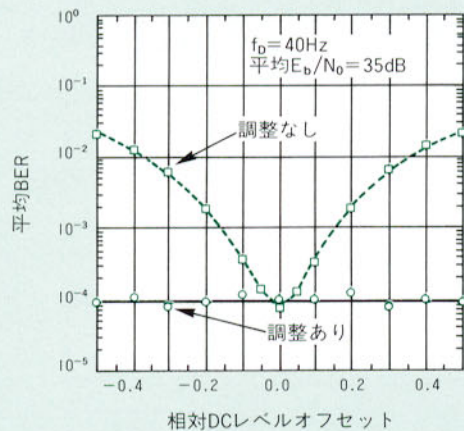


図16 AGC増幅器の基本回路構成
Figure16 Basic Circuits of AGC Amplifiers



(a) キャリア・アクション・トレーニング (CAT) によるキャリア周波数オフセットの自動調整



(b) アフィン・ディストーション・コンペンゼーション (ADC) によるDCオフセットの自動調整

図17 適応信号処理を用いた自動補正によるDFEの特性改善例
Figure17 Adaptive DFE Performance Improvement of Automatic Compensation by Adaptive Signal Processing

る。このアンチログパラメータは使用条件によって変動するので、その自動キャリブレーションを必要としている。

■復調における前処理

適応信号処理では、処理出力信号の基準信号からの誤差を求め、その平均電力が最小になるように処理する。したがって、以下のように、復調におけるチャンネルモデルに含まれていない何らかの原因によって誤差が発生したときには、伝送特性に大きな劣化が発生する。

(1) キャリア周波数オフセット

送受ローカル発振器のキャリア周波数の公称値からの偏差は、Q信号の復調などの適応信号処理において大きな劣化要因となる⁵⁾。図17(a)はBERが劣化する様子を示している。図が示すように周波数オフセット補償の効果は非常に大きい。補償には、DSPによるベースバンドでの信号の逆回転処理、あるいはローカル周波数の微調整が行われる。同図に示した補償法では、最小2乗法を用いた適応アルゴリズムによりトレーニング区間だけで高精度にオフセット周波数を測定している。したがって、1バーストで補償が完了する。このときのわずかな誤差は引き続き行われるLMSによる補償でほぼ完全に除去される。

(2) 同相および直交成分歪

復調処理のために、同相および直交成分を抽出する処理において3種類のひずみが発生する⁵⁾。DCレベルのオフセット、振幅レベルのアンバランス、そして $\pi/2$ 移相器の不完全性による直交の不完全性である。これらのひずみは複素信号処理をベースにした等化処理では補償できない。変調器および復調器における適応信号処理によりひずみ成分を抽出し、その成分が除去されるように補償アルゴリズムを形成することができる。変復調動作を止めないでDCオフセットを自動補償する方法について、実験で得られた補償効果を図17(b)に示す。

結 論

移動通信における無線信号処理

(RSP) で用いられる適応信号処理について整理し、その概要を述べた。RSPの1レイヤである同相直交レイヤにおける適応信号処理は、今後の高度な移動通信システムの最適信号伝送系の形成に不可欠である。TDMAにおける適応MLSEの実験的な研究からわかるように、適当なモデリング、厳密なアルゴリズム導出、そして精度の高い部品を適用することにより、ほぼ理想的な特性が得られる。厳密な理論的導出により、最尤系列推定によるブラインドアルゴリズムに到達する。このアルゴリズムは今後も様々な応用でその実用性が検討されると考えられる。移動無線伝送における適応信号処理の研究により、ダイバーシチ、干渉キャンセル、等化、誤り訂正などが融合した高度なRSP技術が形成されつつある。アダプティブアレー、適応直交化なども将来のシステムにおいて重要な技術になる可能性がある。実際の応用、特に携帯電話においては消費電力も重要な設計要素であり、低消費電力化と親和性の高い技術が選択されていくと考えられる。その際、単に理想的な特性だけでなく、サブオプティマな構成とのトレードオフも十分考慮されるべきである。

文 献

- 1) K. Raith, J. Uddenfeldt : "Capacity of digital cellular TDMA systems", IEEE Trans. Vehic. Tech., 40, pp.323-332 (1991)
- 2) K. S. Gilhousen, I. M. Jacobs, R. Padovani, A. J. Viterbi, L. A. Weaver, C. E. III Wheatly : "On the capacity of cellular CDMA systems", IEEE Trans. Vehic. Tech., 40, pp.303-312 (1991)
- 3) S. U. H. Qureshi : "Adaptive equalization," Proc. IEEE, 53, pp.1349-1387, Sept. 1985
- 4) S. Sampei : "Development of Japanese adaptive equalizing technology toward high bit rate data transmission in land mobile communications", IEICE Trans. Commun., E74, 6, pp.1512-1521 (1991)
- 5) H. Suzuki : "Adaptive signal processing for optimal transmission in mobile radio communications", IEICE Trans, on Communi. vol. E77-B, no. 5, pp.535-544 (1994)
- 6) Y. Sato : "Blind equalization and blind sequence estimation," IEICE Trans, on Communi. vol. E77-B, no. 5, pp.545-556 (1994)
- 7) 府川, 鈴木 : "逐次最小2乗形適応最尤系列推定: RLS-MLSE 最尤推定理論の移動無線への応用," 信学論B-II, J76-B-II, 4, pp.202-214 (1993)
- 8) K. Okanou, A. Ushirokawa, H. Tomita and Y. Furuya : "A fast tracking adaptive MLSE for TDMA digital cellular systems", IEICE Trans. on Communi., vol. E77-B, no. 5, pp.557-565 (1994)
- 9) 吉野, 鈴木 : "移動無線におけるDFE形トランスバーサル合成ダイバーシチ方式のキャンセル特性 メトリック合成との比較," 信学論B-II, J76-B-II, 7, pp.584-595 (1993)
- 10) J. E. Mazo : "Exact matched filter bound for two-beam Rayleigh fading," IEEE Trans. on Communi., COM-39, 7, pp.1027-1030 (1991)
- 11) J. H. Winter : "Optimum combining in digital mobile radio with cochannel interference," IEEE Jour. Select. Area in Communi., vol. SAC-2, pp.538-539 (1984)
- 12) 鈴木 : "最小2乗合成ダイバーシチ受信における信号伝送特性 希望波合成と干渉波キャンセルとの関係," 信学論B-II, vol. J75-B-II, pp.524-534 (1992)
- 13) 鷹尾, 他 : "空間領域における適応信号処理とその応用技術論文特集," 信学論B-II, vol. J75-B-II, 11, pp.711-870 (1992)
- 14) T. Ohgane : "Spectral efficiency improvement by base station pattern control for land mobile cellular systems", IEICE Trans. on Communi., vol. E77-B, no. 5, pp.598-605 (1994)
- 15) 鈴木, 平出 : "バス分割多元接続方式 (PDMA) 移動通信方式", 信学技報, RCS93-84 (1994)
- 16) O. L. Frost, III : "An algorithm for linearly constrained adaptive array processing", Proc. IEEE, 60, 8, pp.926-935 (1972)
- 17) 吉野, 府川, 鈴木 : "RLS-MLSEによる適応干渉キャンセラ", 信学論B-II, J76-B-II, 2, pp.74-84 (1994)
- 18) 村田, 吉田, 竹内 : "トレリス符号化同一チャンネル干渉波キャンセル方式", 信学技報, RCS93-75 (1993)
- 19) M. Abdulrahman, D. Falconer and A.U.H. Sheikh : "Equalization for interference cancellation in spread spectrum multiple access systems", Proc. 42nd Vehic. Technol. Conf., pp.71-74 (1992)
- 20) R. Lupas and S. Verdu : "Near-far resistance of multiuser detectors in asynchronous channels", IEEE Trans. Commun., 38, 4, pp.496-508 (1990)
- 21) S. Yoshida, A. Ushirokawa, S. Yanagi and Y. Furuya : "DS/CDMA adaptive interference canceller on differential detection in fast fading channel", IEEE 44th Vehicular Technology Conf. pp.780-784 (1994)
- 22) K. Fukawa and H. Suzuki : "Orthogonalizing Matched Filter (OMF) detection for DS-CDMA mobile radio systems", IEEE Globecom '94, pp.385-389 (1994)
- 23) 安藤, 三木, 佐和橋 : "DS-CDMA下りチャンネルにおけるパイロット参照型coherent直交化フィルタ", 信学技報, RCS95-6 (1995)
- 24) T. Nojima, S. Nishiki and K. Chiba : "High efficiency transmitting power amplifiers for portable radio units", IEICE Trans. Commun., E74, 6, pp.1563-1570 (1991)