

移动通信の基盤技術 その1

2 移动通信における適応信号処理

移动通信の普及とサービスの高度化に伴って、デジタル信号処理に基づく無線信号の適応信号処理が注目されている。近年、適応等化をはじめとして、ブラインド等化、ダイバーシチ、干渉キャンセル、誤り訂正符号化などが総合的に発展しつつある様子がうかがえる。本稿では、適応等化を中心に技術動向を整理し、移动通信における適応信号処理の現状と今後の課題を明らかにする。

すずき ひろし
鈴木 博

まえがき

移动通信の本格的普及に備えて、周波数を有効に利用でき、サービスの高度化に柔軟に対応できるデジタル移動無線伝送技術の開発が進められている^{1)~3)}。マルチパス移動伝搬においても数十kb/s程度までは、屋外においても選択ダイバーシチによって実用的伝送特性が得られている⁴⁾。しかしながら、さらに高速・高品質な伝送を実現するためには変動する波形

歪を本質的に克服する必要がある。デジタル信号処理による適応等化が必要である^{5)~8)}。本稿では、フェージング移動無線伝送路における適応等化を中心に適応信号処理技術について現状と課題を整理する。

まず、第2節では、フェージング伝送路のモデル化と最適受信について整理する。次に、第3節では適応等化方式について特徴を明らかにする。第4節では、移动通信における適用条件および具体化のための技術的課題について述べる。第

5節では適応等化の拡張として干渉キャンセルを中心とした信号処理技術について述べる。

フェージング伝送路のモデル化と最適受信

■伝搬路モデルと最適受信

等化技術は、符号間干渉がある伝送路における最適伝送技術の一分野と考えられる^{9)~13)}。最適受信は伝搬路のモデル化を基礎としている。移动通信における伝搬路モデルは解析の目的によって異なるが、以下では単純化して、定常ガウスプロセスとみなす^{14)~21)}。伝搬路のインパルスレスポンスから決まる受信波の相関関数は伝搬路を記述する重要なパラメータであり、コヒーレント帯域幅とディレイスプレッドが求められる。相関関数を用いて図1のように最尤受信機を形成することができる¹⁷⁾。一般に相関関数から直交関数系が生成でき、この関数系に対応した信号系列は統計的に独立しているので、ダイバーシチ伝送系を形成できる。このように導出された最適受信機は、さらに、キャリアを再生できるコヒーレント形と、キャリア位相が不確定なノンコヒーレント形に分類できる。

直交関数系の選び方によって様々な伝送方式が考えられ、コヒーレント形では、等化方式^{22)~30)}、直接拡散方式³¹⁾、コヒー

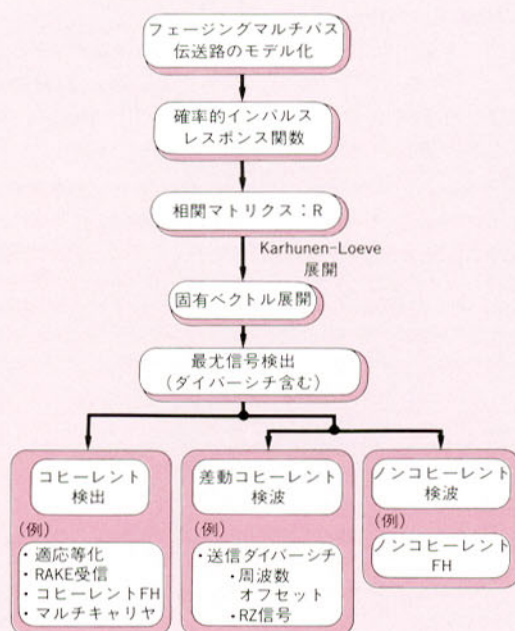


図1 マルチパス伝送路と受信技術

レント周波数ホッピング(FH:Frequency Hopping)方式, コヒーレント・マルチキャリア方式などがある。また, ノンコヒーレント形では, ノンコヒーレント高速FH(FFH:Fast FH)方式³¹⁾がある。

遅延検波方式は差動符号化信号が2シンボルにわたる直交信号となるのでノンコヒーレント方式と等価である。直交信号として, 2周波信号を用いれば送信ダイバーシチ方式²⁾, RZ信号を用いれば耐多重変調方式³²⁾が導かれる。

■最適受信の伝送特性

伝送理論により, 最適受信機の原理的な性能が求められる。コヒーレント形では最大比合成特性となり, 誤り率の下界は整合フィルタの理論から与えられる^{17),18)}。一方, ノンコヒーレント形では, 2乗則合成特性となり, コヒーレント形よりもやや劣化する¹⁷⁾。

情報理論によっても Gallager の上界とランダム符号化を適用して誤り率の上界が求められている^{19)~21)}。また, 合成 E_b/N_0 を一定とすると最適ブランチ数が存在する^{17),20),21)}。

等化方式と
適応アルゴリズム

上述したように等化器は, 符号間干渉(ISI:Inter-Symbol Interference)がある伝送路におけるコヒーレント最適受信器として位置付けられる。図2に示すように等化方式には線形等化(LE:Linear

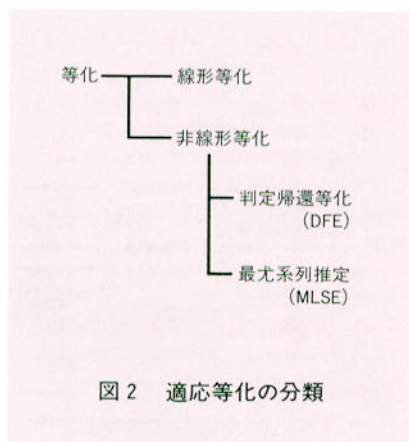


図2 適応等化の分類

Equalization), 判定帰還形等化(DFE: Decision Feedback Equalization), 最尤系列推定(MLSE:Maximum Likelihood Sequence Estimation)の3種類がある。これらの基本的なアイデアは, 図3に示した理想的なISI キャンセラで統一的に記述することができる³³⁾。この図においてタップ w_0 は存在しない($w_0=0$), $N_1=N_2=0$ のときにはLE, $N_1=0, N_2 \neq 0$ のときにはDFE, $N_1 \neq 0, N_2 \neq 0$ のときには整合フィルタ受信となる。整合フィルタ受信はMLSEにより近似的に実現できる。さらにMLSEはビタビアルゴリズムにより効率的に実現できる。図4に代表的な等化方式, 適応アルゴリズムをまとめて示す。

■線形等化方式

線形等化は, パーシャルレスポンス信号伝送を含む歪の厳しい伝送路では十分な特性が得られず, また, 収束性が悪くなる^{34),35)}。そこで, 信号をラティスフ

ィルタで直交展開して, 最急降下法の二次傾斜を正規化する方法が知られている^{35)~38)}。この方法は, カルマン係数により, 最急降下法の帰還量を調整することと等価である。

線形等化における最も重要な概念は, タイミングジッタを吸収できる分数間隔形等化である^{39)~44)}。この概念はDFE, MLSEでも利用される。

■非線形等化方式

ISI キャンセラにおいて N_1 または N_2 が0でない場合には, 理想信号をもとに干渉成分がキャンセルされる。実際には, 理想信号として, DFEでは判定した信号を用い, MLSEでは信号候補が用いられる。これらの非線形処理を伴う等化は非線形等化といわれる。

- ① DFE: DFEは簡単な構成であり, かつ効果も高い^{45)~47)}。通常, フィードフォワードフィルタ(FFF)とともに最適化される^{48),49)}。予測フィルタを用いた構成との等価性⁵⁰⁾, ラティス形との組み合わせ⁵¹⁾などが知られている。固定無線伝送において最小位相(MP:Minimum Phase)と非最小位相(NMP:Non-MP)における有効性が明らかにされている⁵²⁾。
- ② MLSE: 非線形等化の原理的な有効性が最大事後確率(MAP:Maximum a posteriori probability)推定により示された後⁵⁸⁾, 実用的な方法として, ビタビアルゴリズム(VA)を用いたMLSEが提案された⁵⁹⁾。VA

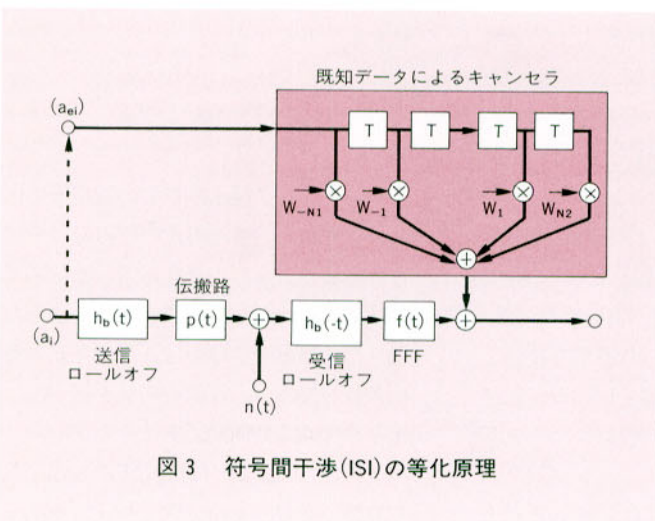


図3 符号間干渉(ISI)の等化原理

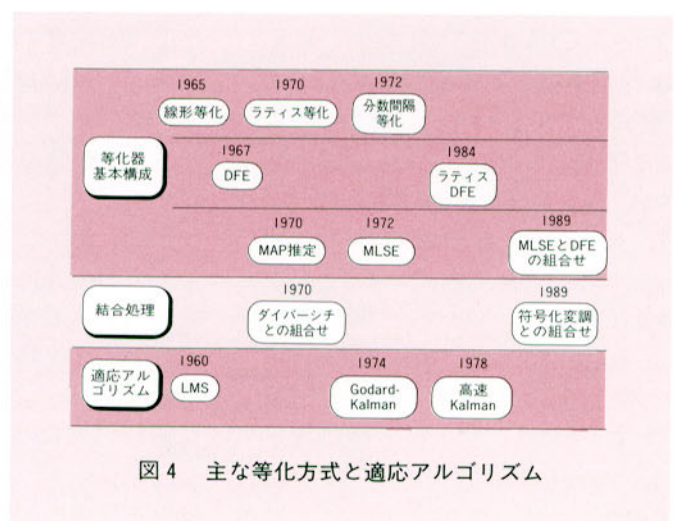


図4 主な等化方式と適応アルゴリズム

を用いるには、ブランチメトリックを計算する誤差が白色でなければならない⁶⁰⁾。整合フィルタと白色化フィルタの縦続フィルタがDFEのFFFをゼロ・フォーシングアルゴリズムで制御することにより得られる。白色化フィルタは信号の統計的性質である十分に性を保存している。適応処理の方法^{61),62)}、実際の性能^{63),64)}などの報告が数多くある。MLSEの欠点は、状態数および処理量が、ディレイスプレッドに関して指数関数的に増大することである。状態数の低減には判定帰還との組み合わせ^{65),66)}、各状態のパス履歴を帰還するもの^{66)~68)}などがある。なお、2つのトレーニング信号を用いて、1つのバーストを前と後からDFEで等化することにより、MLSEとほぼ同等な効果が得られる⁵⁶⁾。

等化の新しい試みとして、遅延検波による方法^{80)~82)}、受信リミタ増幅を用いる方法⁸⁰⁾、最適化を神経回路で行う方法⁸³⁾が検討されている。

■適応アルゴリズム

適応アルゴリズムについては、すでに体系化された多くの解説がある^{84)~88)}。適応等化の研究により、①LMS(Least Mean Squares)における μ の選択法⁸⁹⁾、②カルマンフィルタの高速収束性⁹⁰⁾、③カルマンフィルタの高速計算法⁹¹⁾、④トレーニング手法⁹²⁾、⑤数値演算の安定性⁹³⁾などが明らかにされてきた。これらのカルマンフィルタでは生成過程にランダムウォークモデルが用いられており、逐次最小2乗(RLS: Recursive Least Squares)アルゴリズムと等価である⁷⁵⁾。またDFEにおいて、ラティス、高速カルマン、およびRLSが比較検討されており、十分な精度があれば高速カルマンが収束、安定性の面で優れていることが結論されている⁹⁴⁾。トレーニング長については、自己相関性の良い信号を用いればタック数と同じシンボル長で相関行列がほぼ収束するので、フル・ランクの正規方程式の解が存在し、アルゴリズムが収束する⁸⁸⁾。

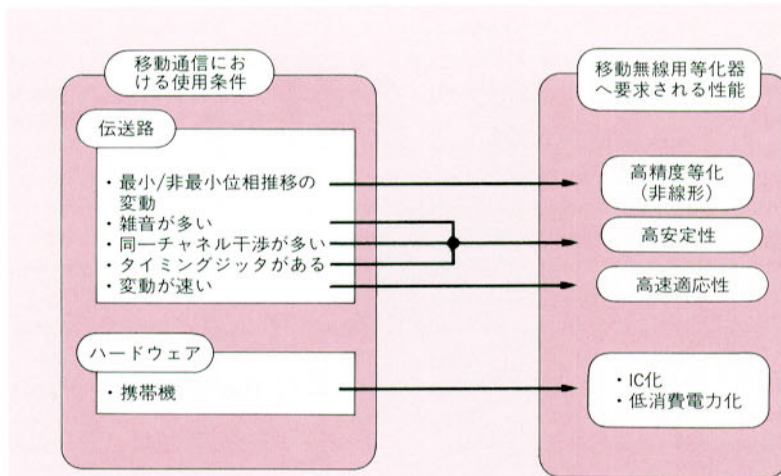


図5 移動通信の特徴と等化器への要求条件

移動通信への適用条件と技術的課題

■適用条件

移動無線用等化器の適用条件と要求条件をまとめると図5のようになる。現在の適用分野としては300kb/s程度と40kb/s程度の2つの伝送方式に分けられる。後者はディレイスプレッドの大きさより適応アルゴリズムの高速化が厳しく、前者ではその逆になる。高速アルゴリズムを精度よく行うためにはMLSEが有利である。一方、遅延量が多いときには、状態数の低減という観点からパスフィードバック形のDFEを組み合わせたものが有利と考えられる。

■技術的現状と課題

移動無線用等化方式としては、非線形等化が検討されてきた。DFE形では文献53)~57)、MLSEでは文献69)~79)がある。適応アルゴリズムには遅延が伴うので、その影響を解析したものがあ^{95)~98)}。

これらの検討により、40kb/s程度の移動通信用適応等化器の性能は大幅に向上した。新しく提案された等化方式RLS-MLSEにおける特性改善に有効な技術を図6に示す^{75)~78)}。等化器を用いる伝送路は図7のように、①変復調器⁹⁹⁾、②キャリア同期回路^{100)~105)}、③タイミング同期回路^{106),107)}などから構成されており、それぞ

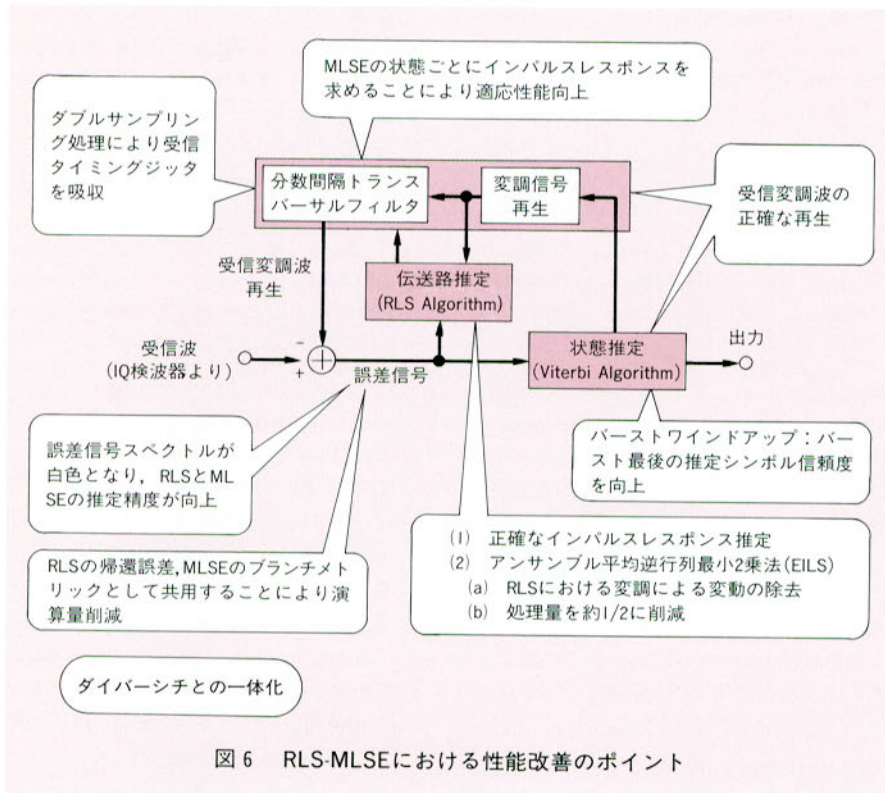
れ、精度の高いものが要求される¹⁰⁸⁾。また、従来の移動無線用受信系はリミタ増幅系であるが、バーストAGC増幅系を形成する必要があり、実用性については検討の余地が残されている。^{109)~112)}。

■適応信号処理の高度化

フェージング伝送路における伝送特性をさらに改善するための等化を含む信号処理として、①ダイバーシチとの一体化^{113)~119)}、②干渉キャンセラとの一体化^{120)~125)}、③符号化変調との一体化^{126),127)}が考えられる。図8に示す干渉のうち等化器が対象としてきたものはISIだけであるが、ACI、CCIを含めた研究が望まれる。バーストにおけるトレーニング信号の冗長性を小さくするために、ブラインド等化^{128),129)}の技術を取り込むことも重要な課題である。符号化との一体化ではCDMAへのDSPの応用も注目に値する^{130),131)}。

むすび

フェージング伝送路における最適受信という観点から適応等化の位置付けを明らかにした。また、等化方式と適応アルゴリズムを分類し、特徴を明らかにした。さらに、移動通信における等化方式の適用条件を整理し、技術的現状を述べた。キャリア周波数同期、タイミング同期、バーストAGCなど周辺機能の高性能化も重要である。また、ダイバーシチ、干



COST 207 working group on propagation", Inter. Conf. on Digital Land Mobile Radio Commun. Venice, pp. 18-27 (July 1987)

6) Stjernvall, J. E., B. Hedberg, and S. Ekemarh: "Radio test performance of a narrowband TDMA system", IEEE VTC'87, pp. 293-299 (June 1987)

7) D'Aria, G., V. Zingarelli: "Results on Fast-Kalman and Viterbi adaptive equalizations for mobile radio with CEPT/GSM system characteristics", IEEE GCOM'88 (1988)

8) 鈴木博: "無線通信", 電子情報通信学会編: デジタル信号処理ハンドブック, オーム社 (1993)

【信号推定理論】

9) Van Tree, H. L.: "Detection, Estimation, and Modulation Theory, Part I and III", John Wiley & Sons (1968, 1971)

10) "Special Issues on Detection Theory and Its Application", Proc. IEEE, Vol. 58, 5 (May 1970)

11) Proakis, J. G.: "Digital Communications, 2nd ed., McGraw-Hill (1989)

12) Scharf, L. L.: "Statistical Signal Processing, Addison-Wesley (1991)

13) 砂原善文: "確率システム理論", 電子情報通信学会 (1979)

14) Bellow, P. A.: "Characterization of randomly time-variant linear channels", IEEE Trans. Commun. Syst. pp.360-393 (Dec. 1963)

15) Brayer, K.: "Data Communications via Fading Channels", IEEE Press (1975)

渉キャンセラ, 符号化変調との一体化処理は将来動向として重要である。

移動通信における適応信号処理は、適応アルゴリズムを中心とする統計的信号処理、デジタル処理ASIC、高集積・低消費電力化されたアナログ無線回路等の技術的進歩に強く依存し、今後の飛躍的発展が期待される分野である。

文 献

【移動無線の現状】

1) Jakes, W. C. Jr., (ed.): "Microwave Mobile Communications", 1974,

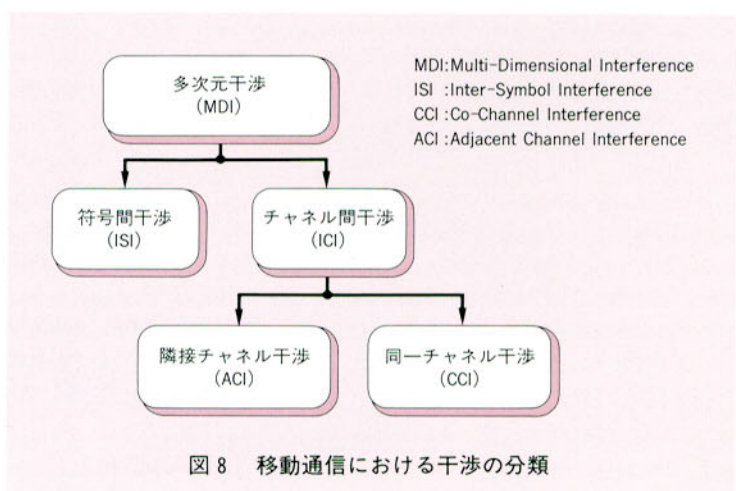
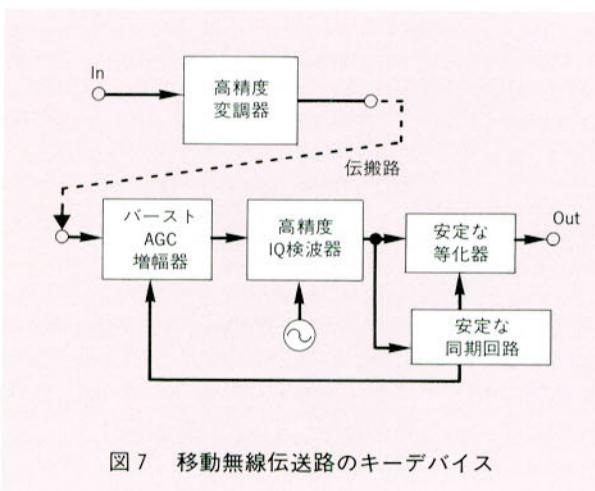
John Wiley & Sons.

2) Hirade, K.: "Mobile-radio communications", in K. Feher (ed.): Advanced Digital Communications, Ch. 10, 1987, Prentice-Hall.

3) 服部武, 鈴木博: "移動通信におけるデジタル信号処理技術の動向と展望", 1988 信学秋季全大, SB-6-1.

4) Adachi, F., and K. Ohno: "BER performance of QDPSK with post detection diversity reception in mobile radio channels", IEEE Trans. on Vehic. Tech., 40, 1, pp. 237-249 (Feb. 1991)

5) Lorentz, R. W.: "Activities of the



- 16) Turin, G. L.: "An introduction to matched filter", IRE Trans. Inform. Theory, IT-6, pp. 311-329 (June 1960)
- 17) Schwartz, M., W. R. Bennett, S. Stein: "Communication Systems and Techniques", McGraw-Hill (1966)
- 18) Mazo, J. E.: "Exact matched filter bound for two-beam Rayleigh fading", IEEE Trans. Commun., COM-39, 7, pp. 1027-1030 (July 1991)
- 19) Gallager, R. G.: "Information Theory and Reliable Communication", John Wiley & Sons (1968)
- 20) Kennedy, R. S.: "Fading Dispersive Communication Channels", John Wiley & Sons (1968)
- 21) Richters, J. S.: "Communication Over Fading Dispersive Channels", MIT Tech. Report 464 (Nov. 1967)
- 【等化方式一般】**
- 22) Lucky, R. W., J. Salz, E. J. Weldon, Jr.: "Principles of Data Communication", McGraw-Hill (1968)
- 23) Proakis, J. G.: "Advances in equalization for inter-symbol interference", in A. J. Viterbi (ed.) Advances in Communication Systems, Vol. 4, Academic Press, pp. 123-198, (1975)
- 24) 辻井重男, 鎌田一雄: "伝送における適応技術-自動波形等化-", 信学誌, Vol. 58, 10, pp.1092-1100 (1975)
- 25) Honing, M. L., D. G. Messerschmitt: "Adaptive Filters", Kluwer Academic Publishers (1984)
- 26) Qureshi, S. U. H.: "Adaptive equalization", Proc. IEEE, 53, pp.1349-1387 (Sept. 1985)
- 27) 村野和雄, 海上重之: "情報通信におけるデジタル信号処理", 昭晃堂, (1987)
- 28) 三瓶政一: "デジタル陸上移動通信のための適応等化器", 電波研季報, Vol. 33, 167, pp. 93-130 (1987-6)
- 29) Mulgrew, B., C. F. N. Cowan: "Adaptive Filters and Equalizers", Kluwer Academic Publishers (1988)
- 30) 佐藤洋一: "線形等化理論", 丸善 (1990)
- 31) Viterbi, A. J.: "Spread spectrum communications - myths and realities -", IEEE Commun. Mag., Vol.17, pp. 11-18 (May 1979)
- 32) Ariyavisitakul, S., S. Yoshida, F. Ikegami, and T. Takeuchi: "A novel anti-multipath modulation technique"; DSK, IEEE Trans. Commun., COM-35, pp.1252-1264 (Dec. 1987)
- 33) Mueller, M. S., and J. Salz.: "A unified theory of data-aided equalization", Bell Syst. Tech. J., pp. 2023-2038 (Nov. 1981)
- 【線形等化】**
- 34) Lucky, R. W.: "Automatic equalization for digital communication", Bell Syst. Tech. J., Vol. 44, pp. 547-588 (April 1965)
- 35) Chang, R. W.: "A new equalizer structure for fast start-up digital communication", Bell Syst. Tech. J., pp.1969-2014, July-August (1971)
- 36) Gitlin, R. D., and F. R. Magee, Jr.: "Self-orthogonalizing algorithms for accelerated convergence of adaptive equalizers", IEEE Trans. Commun., COM-25, pp.666-672 (July 1977)
- 37) Satorius, E. H., and J. D. Pack.: "Application of least squares lattice algorithms to adaptive equalization", IEEE Trans. Commun., COM-29, pp. 136-142 (Feb. 1981)
- 38) Friedlander, B.: "Lattice filters for adaptive processing", Proc. IEEE, Vol. 70, pp.829-867 (Aug. 1982)
- 【分数間隔形等化】**
- 39) 佐藤洋一: "タイミング位相ずれを吸収する自動等化法", 信学技報 CS74-23 (1974)
- 40) Guidoux, L.: "Egaliseur autoadaptif a double echantillonnage": L'Onde Electrique, Vol. 55, pp. 9-13, (Jan. 1975)
- 41) Ungerboeck, G.: "Fractional tap-spacing equalizer and consequences for clock recovery in data modems", IEEE Trans. Commun., COM-24, pp. 856-864 (Aug. 1976)
- 42) Gitlin, R. D., and S. B. Weinstein.: "Fractionally spaced equalization: an improved digital transversal equalizer", Bell Syst. Tech. J., Vol. 60, pp. 275-296 (Feb. 1981)
- 43) 府川和彦, 鈴木博: "RLS-MLSEのタイミングオフセット特性補償法", 信学技報 RCS92-32 (1992)
- 44) 岡ノ上和弘, 後川彰久, 古谷之綱: "サンプリング位相ずれに強い分数間隔サンブル型MLSE受信器", 信学技報 RCS92-33 (1992)
- 【判定帰還形等化】**
- 45) Austin, M. E.: "Equalization of dispersive channels using decision-feedback", IEEE ICC'67, p.218 (1967)
- 46) George, D. A., R. R. Bowen, and J. R. Storey.: "An adaptive decision feedback equalizer", IEEE Trans. Commun. Tech., COM-19, pp. 281-293 (June 1971)
- 47) Price, R.: "Nonlinearly feedback-equalized PAM vs. capacity for noisy filter channels", IEEE ICC'72, pp. 22-12-22-17 (June 1972)
- 48) Salz, J.: "Optimum mean-square decision feedback equalization", Bell Syst. Tech. J., Vol. 52, pp. 1341-1373 (Oct. 1973)
- 49) Duttweiler, D. L., J. E. Mazo, and D. G. Messerschmitt: "An upper bound on the error probability in decision feedback equalization", IEEE Trans. Inform. Theory, pp.490-497 (July 1974)
- 50) Belfiore, C. A., and J. H. Park, Jr.: "Decision feedback equalization", Proc. IEEE, Vol. 67, pp.1143-1156 (August 1979)
- 51) Ling, F., and J. G. Proakis: "Adaptive lattice decision feedback equalizers -Their performance and application to time-variant multipath channels", IEEE Trans. Commun., COM-33, pp. 348-356 (April 1985)
- 52) Shafi, M., and D. J. Moore: "Further results on adaptive equalizer improving for 16QAM and 64 QAM digital radio", IEEE Trans. on Commun., COM-34, 1, pp. 59-66 (Jan. 1986)
- 53) 中島牧人, 三瓶政一: "判定帰還形適応等化器による陸上移動通信の周波数選択性フェージング補償特性", 信学論(B-II), J72-B-II, 10, pp.515-523 (1989-11)
- 54) 本間光一, 上杉充, 椿和久: "TDMA デジタル移動通信における適応等化", 信学論(B-II), J72-B-II, 11, pp.587-594 (1989-11)
- 55) 上田隆, 鈴木博: "フィードバックレーニングRLSアルゴリズムによる移動通信用判定帰還形等化器", 信学論(B-II), J72-B-II, 11, pp.718-726, (1990-11)
- 56) 東明洋, 鈴木博: "デジタル移動通信用2重等化方式の提案と特性", 信学論(B-II), J74-B-II, 3, pp.91-100, (1990-11)
- 57) 荒庸二郎, 萩原春生: "ARモデルに基づく選択性フェージング伝送路の適応等

- 化”, 信学論 (B-II), J72-B-II, 11, pp. 699-707 (1990-11)
- 【最尤系列推定】**
- 58) Abend, K., and B. D. Fritchman : “Statistical detection for communication channels with intersymbol interference”, Proc. IEEE, 58, pp. 779-785 (May 1970)
- 59) Forney, G. D., Jr. : “Maximum-likelihood sequence estimation of digital sequences in the presence of intersymbol interference”, IEEE Trans. Inform. Theory, IT-18, pp. 363-378 (May 1972)
- 60) Forney, G. D., Jr. : “The Viterbi algorithm”, Proc. IEEE, Vol. 61, pp. 268-278 (March 1973)
- 61) Ungerboeck, G. : “Adaptive maximum-likelihood receiver for carrier-modulated data-transmission systems”, IEEE Trans. Commun., COM-22, pp. 624-636 (May 1974)
- 62) Magee, F. R., Jr., and J. G. P. Roakis. : “Adaptive maximum-likelihood sequence estimation for digital signaling in the presence of intersymbol interference”, IEEE Trans. Inform. Theory, IT-19, pp. 120-124 (Jan. 1973)
- 63) Qureshi, S. U. H., and E. E. Nehwall. : “An adaptive receiver for data transmission over time-dispersive channel”, IEEE Trans. Inform. Theory, IT-19, pp. 448-457 (July, 1973)
- 64) Falconer, D. D. and F. R. Magee, Jr. : “Adaptive channel memory truncation for maximum likelihood sequence estimation”, Bell Syst. Tech. J., Vol. 52, pp. 1541-1562 (Nov. 1973)
- 65) Lee, W. U., and F. S. Hill. : “A maximum likelihood sequence estimator with decision feedback equalization”. IEEE Trans. Commun. Tech., COM-25, pp. 971-979 (Sept. 1977)
- 66) Eyuboglu, M. V. and S. U. H. Qureshi : “Reduced-state sequence estimation with set partitioning and decision feedback”, IEEE Trans. Commun., Vol 36, 1, pp. 13-20 (Jan. 1988)
- 67) 鈴木博 : “移動通信用GMSK最尤受信機の構成と特性”, 信学技報 CS88-2, (1988-5)
- 5)
- 68) Duel-Hallen, A., and C. Heegard : “Delayed decision feedback sequence estimation”, IEEE Trans. Commun., Vol. 38, pp. 428-436 (1989)
- 69) 久保博嗣, 村上圭司, 藤野忠 : “高速フェーシング伝送路のための適応形最尤系列推定器”, 1990 信学秋季全大, B-283.
- 70) Seshadri, N. : “Joint data and channel estimation using fast blind trellis search techniques”, IEEE GCOM '90 pp.1659-1663 (Dec. 1990)
- 71) 岡ノ上和弘 : “適応型ビタビMLSE受信機の追従性向上に関する一検討”, 1991年信学春季全大, SB-4-4.
- 72) 府川和彦, 鈴木博 : “ディジタル移動無線用適応RLS-MLSE”, 1991信学秋季全大, SB-4-1 (1991-9)
- 73) Raheli, R., A. Polydoros and C. Tzou : “The Principle of per-survivor processing”: A general approach to approximate and adaptive MLSE, IEEE GCOM '91 pp.1170-1175 (Dec. 1991)
- 74) 古谷之綱, 後川彰久, 伊佐浩史, 佐藤洋一 : “ブラインドビタビ等化方式の一提案”, 1991信学春季全大, A-141.
- 75) 府川和彦, 鈴木博 : “逐次最小2乗形適応最尤系列推定 (RLS-MSLE) — 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 (1993-4)
- 76) 府川和彦, 鈴木博 : “移動無線における逐次最小2乗形適応最尤系列推定 (RLS-MLSE)の特性”, 信学論 (B-II), J75-B-II, pp.535-546 (1992-8)
- 77) 府川和彦, 鈴木博 : “無線伝搬路の高次状態変数モデルによる逐次最小2乗形適応最尤系列推定”, 信学論 (B-II), J75-B-II, pp.415-423 (1992-7)
- 78) 府川和彦, 鈴木博 : “予測同期検波方式”, 信学技報 RCS92-93 (1992-11)
- 79) 岡田実, 三瓶政一 : “内挿型伝搬路推定法を用いたDDFSE等化器の周波数選択性フェーシング補償特性”, 信学論 (B-II), J73-B-II, 11, pp.727-735 (1990-11)
- 【等化の新しい試み】**
- 80) 赤岩芳彦, 小浜輝彦, 近藤洋 : “非同期検波を用いた移動通信路のための適応等化器”, 1991 信学春季全大, B-387 (1991-3)
- 81) 鈴木博, 府川和彦 : “遅延検波形適応系列推定 (DD-ASE)”, 信学論 (B-II), J76-B-II, 2, pp.71-78 (1993-2)
- 82) 中島達弘, 府川和彦, 堀越淳, 鈴木博 : “多重遅延検波形適応系列推定 (MDD-ASE)”, 信学論 (B-II), J-76-B-II, 7, pp.573-583 (1993-7)
- 83) Provence, J. D. : “Neural network implementation for maximum-likelihood sequence estimation of binary signals in Gaussian noise”, IEEE Inter. Conference on Neu. Net., pp.703-714 (1987)
- 【適応アルゴリズム】**
- 84) Anderson, B. D. O., J. B. Moor: “Optimal Filtering”, Prentice-Hall (1979)
- 85) Widrow, B., S. D. Stearns: “Adaptive Signal Processing”, Prentice-Hall (1985)
- 86) Alexander, S. T.: “Adaptive Signal Processing, Springer-Verlag, 1986
- 87) Orfanidis, S. J.: “Optimum Signal Processing”, 2nd ed. McGraw-Hill (1988)
- 88) Haykin, S.: “Adaptive Filter Theory”, 2nd ed., Prentice-Hall (1991)
- 89) Gersho, A. : “Adaptive equalization of highly dispersive channels”, Bell Syst. Tech. J., Vol. 48, pp. 55-70 (Jan. 1969)
- 90) Godard, D. N. : “Channel equalization using a Kalman filter for fast data transmission”, IBM J. Research and Development, Vol. 18, pp. 267-273 (May 1974)
- 91) Falconer, D. D., and L. Ljung. : “Application of fast Kalman estimation to adaptive equalization”, IEEE Trans. Commun., COM-26, pp.1439-1446 (Oct. 1978)
- 92) Qureshi, S. U. H. : “Fast start-up equalization with periodic training sequences”, IEEE Trans. Inform. Theory, IT-23, pp. 553-563 (Sept. 1977)
- 93) Hsu, F. M. : “Square-root Kalman filtering for high speed data received over fading dispersive HF channels”, IEEE Trans. Inform. Theory, IT28, 5, pp. 753-763 (Sept. 1982)
- 94) Mueller, M. S. : “Least-squares algorithms for adaptive equalizers”, Bell Syst. Tech. J., Vol. 60, pp. 1905-1925 (Oct. 1981)
- 95) Widrow, B., J. R. Glover, Jr., J. M. McCool, J. Kaunitz, C. S. Williams, R. H. Hearn, J. R. Zeidler, E. Dong, Jr., and R. C. Goodlin : “Adaptive noise cancelling: princi-

- ples and applications”, Proc. IEEE, Vol.63, pp. 1692-1716 (Dec. 1975)
- 96) Widrow, B., J. M. McCool, M. G. Larimore, and C. R. Johnson, Jr.: “Stationary and nonstationary learning characteristics of the LMS adaptive filter”, Proc. IEEE, Vol.64, pp. 1151-1162 (August 1976)
- 97) Eleftheriou, E., and D. D. Falconer.: “Tracking properties and steady-state performance of RLS adaptive filter algorithm”, IEEE Trans. Acous. Speech and Sig. Proc., ASSP-34, 5, pp.1097-1110 (Oct. 1986)
- 98) 鈴木博, 府川和彦: “移動無線伝送 RLS型適応等化器に関する動作特性解析”, 信学論 (B-II), J76-B-II, 4, pp.189-201 (1993-4)
- 【周辺機能】**
- 99) 鈴木博, 吉野仁: “アフィン変換線形ひずみ補償—移動無線通信における等化を含む線形信号伝送への応用—”, 信学論 (B-II), J75-B-II, 1, pp.1-9, (1992-1)
- 100) Kobayashi, H.: “Simultaneous adaptive estimation and decision algorithm for carrier modulated data transmission systems”, IEEE Trans. Commun. Technol., COM-19, pp. 268-280 (June 1971)
- 101) Falconer, D. D.: “Jointly adaptive equalization and carrier recover in two-dimensional digital communication systems”, Bell Syst. Tech. J., 55, pp. 317-334 (March 1976)
- 102) 芹澤陸, 榎原勝己: “カルマンアルゴリズムを用いたマルチパス等化器の高速変動伝送路等化特性の一検討”, 1989信学秋季全大 B-517.
- 103) 村上圭司, 上田幸治, 藤野忠: “選択性フェージング下での適応等化器の周波数追従特性”, 1989 信学秋季全大 B-518.
- 104) 山本裕理, 松岡剛史, 大西博, 牧本三夫: “移動通信用マルチパス等化器と周波数オフセット補償の一検討”, 1990春季信学全大 B-311.
- 105) 吉野仁, 上田隆, 鈴木博: “キャリア・アクティベーション・トレーニング (CAT) 形移動通信用等化器の提案と特性—高性能キャリア周波数オフセット補償”, 信学論 (B-II), J74-B-II, 9, pp.479-489 (1991-9)
- 106) Mazo, J. E.: “Optimum timing phase for an infinite equalizer”, Bell Syst. Tech. J., 54, pp. 189-201 (Jan. 1975)
- 107) Salz, J.: “On mean-square decision feedback equalization and timing phase”, IEEE Trans. Commun. Technol., COM-25, pp.1471-1476 (Dec. 1977)
- 108) 府川和彦, 鈴木博: “高速ディジタル移動通信における移動局従属同期回路の高精度化”, 信学技報 RCS88-57, (1989-1)
- 109) 高橋憲一, 松岡剛史, 山本裕理, 大西博, 牧本三夫: “バーストAGCの構成と等化器への影響の一検討”, 1991信学秋季全大 SB-4-7 (1991-10)
- 110) 上田隆, 鈴木博: “選択性フェージング移動無線伝送路におけるAGC最適時定数”, 信学論 (B-II), J74-B-II, pp.734-736 (1991-12)
- 111) 富里繁, 鈴木博: “ディジタル信号処理による包絡線再生形リミタ増幅受信方式”, 1992 信学秋季全大, B-262.
- 112) 岡ノ上和弘, 後川彰久, 富田秀穂, 古谷之綱: “極座標信号入力形移動通信用等化器の特性”, 1992信学秋季全大, B-264.
- 【等化を含む信号処理】**
- 113) Brady, D. M.: “An adaptive coherent diversity receiver for data transmission through dispersive media”, IEEE ICC’70, pp. 21-35 to 21-39 (June 1970)
- 114) Mosen, P.: “Feedback equalization for fading dispersive channels”, IEEE Trans. Inform. Theory, IT-17, pp.56-64 (Jan. 1971)
- 115) Mosen, P.: “Fading channel communications”, IEEE Commun. Mag., pp.16-25 (Jan. 1980)
- 116) Suzuki, H.: “Performance of a new adaptive diversity-equalization for digital mobile radio”, Electronics Letters, 26, 10, pp.626-627, (May 1990)
- 117) 鈴木博: “トランスバーサル合成ダイバーシチ等化処理方式の伝送特性に関する理論検討”, 信学技報, RCS90-16 (1990-9)
- 118) Balaban, P., J. Salz: “Dual diversity combining and equalization in digital cellular mobile radio”: IEEE Trans. Vehic. Tech., 40, pp. 342-354 (May 1991)
- 119) Sheen, W. Ho, and G. L. Stuber: “MLSE Equalization and decoding for multipath - fading channels”, IEEE Trans. Commun., 39, No. 10, pp. 1455-1464 (Oct. 1991)
- 120) 大鐘武雄: “セルラ基地局のアンテナ指向性制御による周波数利用効率の改善”, 信学技報 RCS-8 (1993-5)
- 121) 神保宣久, 菊間信良, 稲垣直樹: “タイムドアダプティブアレーアンテナのシストリック構成”, 信学技報AP91-110 (1992-1)
- 122) 吉野仁, 鈴木博: “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 (1993-7)
- 123) 吉野仁, 鈴木博: “RLS-MLSEを拡張した適応干渉キャンセラ”, 信学技報 RCS92-120 (1993-1)
- 124) Van Etten, W.: “Maximum likelihood receiver for multiple channel transmission systems”, IEEE Trans. Commun., COM-24, pp. 276-283 (Feb. 1976)
- 125) 鈴木博: “最小2乗合成ダイバーシチ受信における信号伝送特性—希望波合成と干渉キャンセルとの関係—”, 信学論 (B-II), J75-B-II, pp.524-534 (1992-8)
- 126) Chevillat, P. R., and E. Eleftheriou: “Decoding of Trellis-encoded signals in the presence of interference and noise”, IEEE Trans. Commun., COM-37, 7, pp.669-676 (July 1989)
- 127) 久保博嗣, 村上圭司, 森谷陽一, 藤野忠: “高速フェージングに適した等化と複号を結合した適応形最尤系列推定”, 信学技報 RCS92-66 (1992-9)
- 128) Sato, Y.: “A method of self-recovering equalization for multilevel amplitude modulation”, IEEE Trans. Commun., COM-23, pp. 679-682 (June 1975)
- 129) 府川和彦, 鈴木博: “ブラインド・ビタビアルゴリズムを用いた適応干渉キャンセラ”, 信学技報 RCS-93-10, (1993-5)
- 130) 富里繁, 府川和彦, 鈴木博: “コヒーレントハイブリッドDS-FFH CDMA 方式”, 信学技報 RCS92-109 (1993-1)
- 131) 富里繁, 府川和彦, 鈴木博: “非線形干渉キャンセラを適用したコヒーレントハイブリッドDS-FFH CDMA 方式”, 信学技報 RCS93-22 (1993-6)