

アダプティブアンテナからソフトウェアアンテナへ

唐 沢 好 男*

*電気通信大学 電気通信学部 電子工学科
東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

*Dept. Electronic Eng., The University of Electro-Communications,
1-5-1, Chofugaoka, Chofu, Tokyo, Japan

*E-mail: karasawa@ee.uec.ac.jp

1. アンテナに求められる働き

移動通信（モバイル情報通信）では、利用者の動きに制約を与えないよう、情報の運搬には電波が用いられる。規則正しく振動する波をわずかに乱して乗せられる情報量には限りがある。特に画像の伝送や大規模なデータベースへのアクセスをたくさんの人が同時に行えば、送りたい情報量が膨大になり、電波の周波数はいくらあっても足りなくなる。そこで、限られた周波数を有効に使い、干渉波が存在する中でも欲しい情報だけ正確にとり出す技術が求められている。情報の出入り口でその働きをするのがアンテナである。

筆者らは、新しい時代のモバイル情報通信に求められる知能と変身の術を備えたアンテナ「ソフトウェアアンテナ」を提案している^{1),2)}。ソフトウェアアンテナは必要な性能を必要最小限のハードウェア/ソフトウェアリソースで実現することを目的とし、「時々刻々変化する環境の正確な認識（環境認識）」、その認識した結果に基づく「最適な適応信号処理アルゴリズムの選択（アルゴリズムダイバーシティ）」、「その選択されたアルゴリズムを自らのソフト/ハードを再構成して実現するデジタルビームフォーミング（適応変身）」の3つの機能を基本要素としている。

本稿では、ソフトウェアアンテナのベースとなるアダプティブアンテナの概要を述べた後、ソフトウェアアンテナの概念、具体的な構成例を紹介する。

2. アダプティブアンテナ：それは Ichiro 選手のようにしなやかに

2.1 アダプティブアンテナとは

図1は移動通信の電波環境を示している。希望波も干渉波も遮蔽・反射・回折を受けることにより、複雑な多重伝搬路（マルチパス伝搬路）を経て受信局に到達する。本誌の総論や文献³⁾でも述べているように、マルチパス伝搬によって、i) 信号強度の時間的変動、ii) 信号強度の場所的変動、iii) 広帯域信号に対する波形歪みが発生する。i) と ii) は信号レベル低下に伴う熱雑音による誤り、iii) は信号帯域内に生じる伝送路の周波数特性が作用する符号間干渉による誤りをもたらす。このうち、特に ii) と iii) についての強力な対策がアダプティブアンテナ（アダプティブア

キーワード：移動通信（mobile radio communication）、アダプティブアンテナ（adaptive antenna）、ソフトウェアアンテナ（software antenna）、アルゴリズムダイバーシティ（algorithm diversity）、マルチパスフェージング（multipath fading）。
JL 0007/02/4107-0519 © 2002 SICE

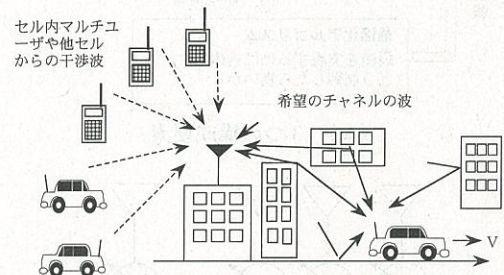


図1 移動通信の電波環境

レーとも呼ばれる）である。アダプティブアンテナには、干渉波到来方向にヌル（受信感度0）点を作り、干渉波を受信しないようにする機能、遅延波を時間的に分離合成して歪んだ希望波を元の正常波形に戻す機能などを実現することができる。以下この具体的な構成を見てみよう。

2.2 アダプティブアンテナを構成する3つの要素

通信用のアンテナは受信の機能と送信の機能が具備されている。アダプティブアンテナも同様であるが、その動作の説明は受信系で行うのがわかりやすい。そこで、以下ではすべて受信系での説明になっている。

アダプティブアンテナは電波を複数のアンテナで受信し、この出力を用いて信号処理を行い希望信号（以下これを所望波と呼ぶ）を取り出す機能をもつ。個々のアンテナを素子アンテナ、全体をアレーアンテナと呼ぶ。素子アンテナは空間に連続的に存在する電磁界を離散的に拾い上げるセンサーの働きをもつ。近年のアダプティブアンテナの大部分は信号処理から振幅位相制御までのすべての機能をデジタル信号処理で行うデジタルビームフォーミング（DBF）アンテナになっている。図2はアダプティブアンテナの基本構成であり、(a)は信号処理部の主要な3つの構成要素をブロックで表わしている。DBFアンテナの場合、図2(a)の構成において、アンテナとアナログ/デジタル変換器（A/D）の間には、増幅器・帯域制限フィルタ・周波数変換器・など高周波回路（アナログ回路）が入るが、図ではそのすべてを省略している。

アダプティブアレーの機能を実現する信号処理部は、その働きから、「規範（指導原理）」、「最適化アルゴリズム（アダプティブアルゴリズム）」、「ビーム形成（信号合成）」の3つに大別される。「規範」とは、受信信号の何に注目して、

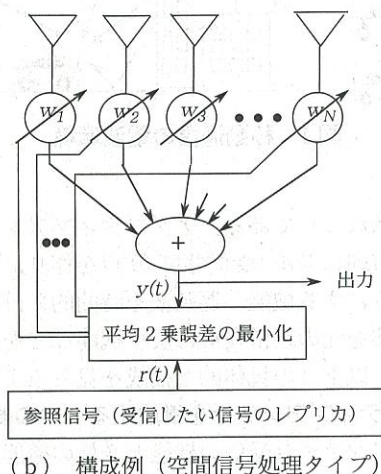
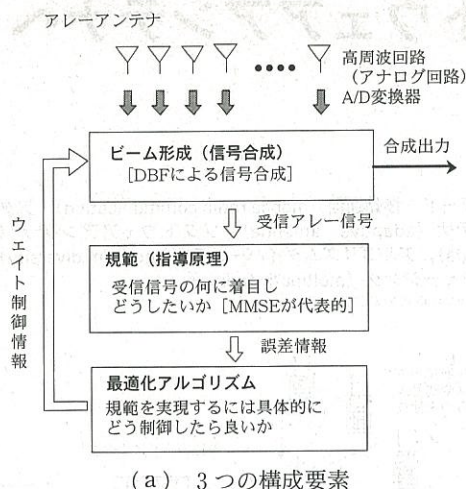


図2 アダプティブアンテナの基本構成

それをどうしたいかという目的を定める部分、「最適化アルゴリズム」とはその目的遂行の具体的手順を与える部分(アンテナのウェイトを具体的に更新してゆく部分)、「ビーム形成」とは、そのようにして得られたウェイトを用いて信号の合成を行う部分、である。

図2(b)は規範・アダプティブアルゴリズム・ビーム形成方法の代表的なものを組み合わせたアダプティブアンテナの構成例である。

「規範」は最小平均2乗誤差法 (Minimum Mean Square Error: MMSE) が代表的である^{4),5)}。MMSE はあらかじめ所有している参照信号 (=レプリカ) とアンテナ合成出力との誤差を評価関数とし、この平均2乗誤差が最小になることを目的とする規範である。MMSE 規範に基づく制御では、誤差を最小とする制御ウェイト(図2(b)の w) を理論的に求めることができ、ウィーナ解と呼ばれている。

参照信号が得られない場合には、伝送信号に特徴付けられる性質があるならば、それを利用する規範もある。たとえば、FSK (デジタル周波数変調)、PSK (デジタル位相変調) のような定包絡線方式あるいはそれに近い変調方式に対しては、包絡線レベルが一定であることを事前知識

として、包絡線変動を最小化する規範 (および最適化アルゴリズム) があり、CMA (Constant Modulus Algorithm) と呼ばれている⁶⁾。

規範に基づき、その実現を目指してウェイトを制御するアルゴリズムが「最適化アルゴリズム」であり、MMSE に対しては、最急降下法に基づく LMS (Least Mean Square) アルゴリズム⁷⁾ と過去のサンプル値を用いて最適化を図る再帰的最小2乗法: RLS (Recursive Least-Squares) アルゴリズム⁸⁾ がよく用いられる。LMS は演算規模が小さいが収束に時間がかかること、RLS は演算は複雑であるが、収束が速いことが特徴である。

アダプティブアンテナに用いられる規範や最適化アルゴリズムはここで述べた以外にも数多くある。詳しくは文献8)を見てほしい。

最後の段階は、決定したウェイトを用いて受信信号を得る「ビーム形成」である。アレーアンテナは空間領域に連続的に存在する信号 (電磁波) のセンサーであり図2 (b) のように、アンテナ出力をウェイトをかけて合成する構成において、そのウェイトを求める計算は空間領域信号処理 (以下、空間信号処理) と呼ばれる。空間信号処理によって、 N 素子のアンテナでは、最大 $N-1$ 方向にヌル (感度 0) 点を作ることができ、 $N-1$ 波の不要波を除去することができる。空間信号処理の場合には、所望波であっても参照信号のタイミングに対して遅延の大きい波は無相関波、すなわち干渉波とみなされ除去する動作になる。

素子アンテナ出力に対して制御可能なウェイトをタップ付き遅延回路 (tapped delay line: TDL) を用いて時間領域にも拡張した信号処理は時間・空間領域信号処理 (以下、時空間信号処理) と呼ばれる。所望波の遅延波を不要波として除去することなく、信号として取り込む働きをもたせることができる^{9),10)}。

なお、時間領域の信号処理 (以下、時間信号処理) は伝送路で歪んだ波形を元に戻す等化技術である。時空間信号処理型のアダプティブアレーは空間信号処理に基づくアダプティブアレーアンテナの技術と時間信号処理に基づく等化器の技術が融合したものと位置付けられる。

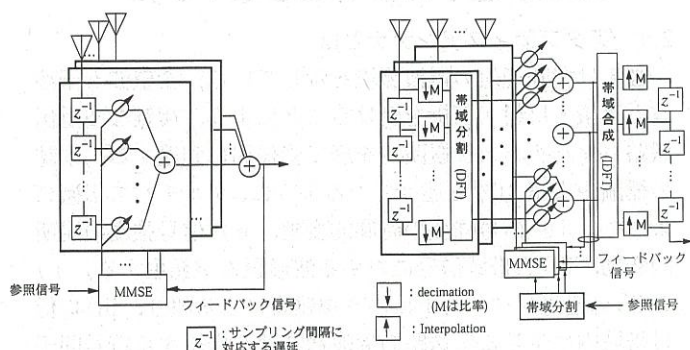


図3 時空間信号処理アダプティブアレー

図3は時空間信号処理型アダプティブアレーの代表的な構成例である。(a)はTDL型の基本構成、(b)は時間領域信号処理の部分を離散フーリエ変換(DFTまたはFFT)を用いて周波数領域に変換し、各帯域ごとにアダプティブ動作を行ってウェイトの最適化を行う構成である¹¹⁾。アンテナ素子数を N 、時間領域のタップ数を M とすると、(a)では収束までにおおよそ $(MN)^3$ に比例する演算が必要であるのに対し、(b)では $(MN)^3$ に比例する程度であり、大幅な計算量の低減が実現できる¹²⁾(たとえば $M=32$ では約 $1/1000$)。 (a)の構成ではアダプティブアルゴリズムが最終信号に対して働くのに対し、(b)では各帯域ごとに行われているので、これに起因して、性能面で(b)は(a)に比べてやや劣る^{12),13)}。これについては送信信号に工夫を入れることで、性能劣化を押さえる対策も提案されている¹⁴⁾。

アダプティブアンテナの動作を野球のバッターにたとえてみたい。大リーグのIchiro選手は選球眼鋭く着実にヒットを生み出している。Ichiro選手の中には、ピッチャーの投球から打って走るまでの一連の状況に対して、適切な動作を実現するアルゴリズム(=Ichiroアルゴリズム)があると思ってよいであろう。そのアルゴリズムが優れているので、すばらしい結果を生み出していると理解できる。しかしやはりその1つのアルゴリズムだけでは状況の多様性に対処できないこともまた事実である。

3. ソフトウェアアンテナ：あるときIchiro あるとき松井に；それは忍者が変身するように

3.1 ソフトウェアアンテナとは

これまで多くの研究開発によって、さまざまなフェージング対策や干渉波抑圧方式が提案され、ダイバーシチ、アダプティブアンテナ、干渉波抑圧方式、波形等化器、RAKE(CDMA)受信等、強力な効果を有する方式が実用になっている^{15),16)}。しかし、いずれの方法(規範やアルゴリズム)も適用環境に得意不得意があり、どんな環境にも万能(ユニバーサル)といえるものはない。仮にあったとしても、そのような信号処理は空間(多数のアレー素子)と時間(長いTDL)の両領域で複雑な構成(フル装備)を必要とし、すべての通信チャンネルがフル装備では装置規模が膨大になる。

そこで、実効的にそのような働きを目指したものが、ソフトウェアアンテナである¹⁾。環境(電波環境、通信環境)の変化に対して、“on-the-fly”状態(=リアルタイム)で最も適したアルゴリズムへの変身を行いながら通信を行う。個々のアルゴリズムをさらに上位の階層で制御する方法であり、アルゴリズムダイバーシチと呼んでいる。アルゴリズムダイバーシチを行うためには、環境の変化に追従して、アンテナがソフト(アルゴリズム)・ハード(論理結線回路)の両方でダイナミックに自己変革を遂げる機能(適応変身)が求められる。複数のアンテナ素子で構成され、個々のア

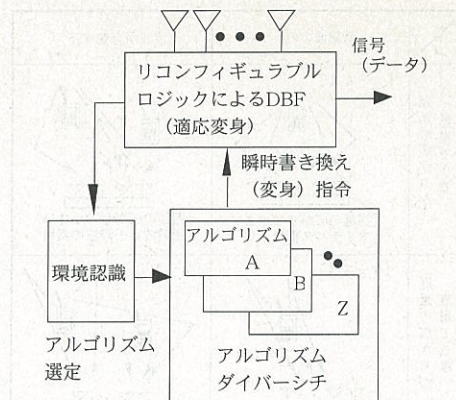


図4 ソフトウェアアンテナの基本構成

ルゴリズムが有する制約を越えた信号処理によって環境に適応し、カメレオンのように(カメレオンは見かけだけであるがもっと本質的に)自分自身を変えて行くアンテナ、このように知能と変身の術を備えたアンテナ(Kaleidoscopic Intelligent Antenna)がソフトウェアアンテナである。

図4は移動通信の基地局アンテナを想定したソフトウェアアンテナの構成例である。(i)環境の変化を的確に判断して瞬時に最適なアルゴリズム(ここでは、規範や構成を含む広い意味でのアルゴリズム)を見い出す機能、(ii)さまざまな環境を想定してあらかじめ用意されている複数のアルゴリズム、(iii)選択されたアルゴリズムを瞬時に実装して機能を発現するリコンフィギュラブルロジック回路(FPGA, DSP等)、よりなる。多数の通信チャンネルが収容され、その1つ1つにソフトウェアアンテナの機能(=求められる性能を必要最小限のリソースで実現する)が働けば、基地局全体としては統計多重効果(あるいは大群効果)によって総計として必要になる回路規模や演算量は著しく減少できるであろう。

Ichiro選手はしなやかにヒットを打つが、一発ホームランを狙いたいときは巨人の松井選手であろう。状況の変化に応じてバッターボックスのIchiro選手がいつの間にか松井選手に変身し、さらにつぎつぎと…。規範や最適化アルゴリズム、さらにはアンテナ構成がつぎつぎに変身、これがソフトウェアアンテナのイメージである。

3.2 アルゴリズムダイバーシチ

ソフトウェアアンテナの1つの動作イメージを示す²⁾。あくまで、1つの例であって、これに囚われるものではないことを知った上で見ていただきたい。

さまざまな環境において干渉波の中から所望信号を最大SNR(信号対雑音電力比)で取り出すこと(MMSE)を規範とし、必要最小限のリソース(メモリやゲート)でそれを実現することを目指す。

図5は電波の環境を干渉波の有無、遅延の広がりの有無の組合せによって4つのケースに分類したものである。電波環境認識部では、干渉波の有無については空間信号処理

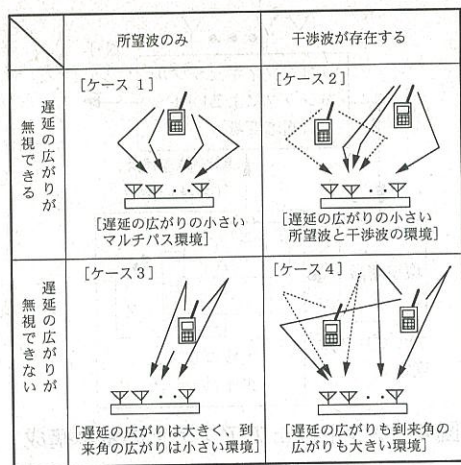


図5 移動通信の電波環境分類

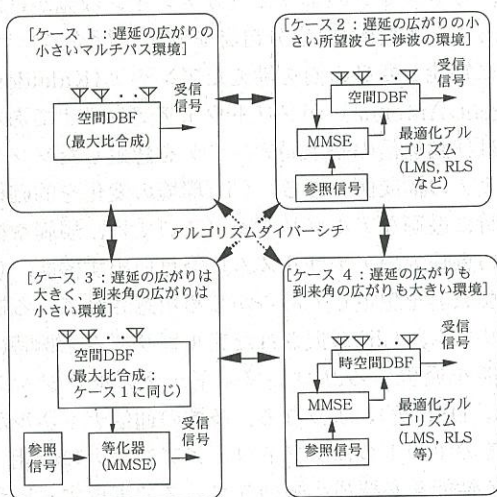


図6 各ケースに対応する受信側構成

によって、遅延波の有無については時間領域の信号処理によって判定できる。空間信号処理では素子アンテナ出力間のすべての組合せに対して相関を求めこれをまとめた相関行列を利用する。この相関行列の固有値を調べると干渉波の有無が判定できる。また、時間領域において自己相関を調べることによって遅延の影響の有無が判定できる。この処理は環境認識部で行う。

図6は各ケースに対応する回路構成とアルゴリズムの例である。図5のケース1には空間領域での最大比合成、ケース2は空間領域のアダプティブアレー動作、ケース3は時間領域の信号処理、すなわち波形等化、ケース4には時間・空間領域の信号処理機能が求められる。干渉抑圧やフェージング対策を強力に行おうとすれば、ケース4に見られるように、機能の向上と共に構成も複雑になる。また、ウェイトの収束時間も長くなる。ゆえに、ケース4の環境といえども、たとえばケース2の対策として示した空間信号処理で必要な性能が得られるならば、当然そちらを採用すべきであろう。

移動通信の場合、電波の環境は通信中に目まぐるしく変わってゆく。基地局に近いところでは、干渉問題のないケース1であっても、交差点では遠方からの干渉波が道路に沿って伝搬しケース2、あるいは最悪のケース4になることもある。しかもそれが短時間に変化することもある。電波環境の認識をリアルタイムに行い、認識結果に基づきアルゴリズム（や規範、構成）を切り替えてゆく動作がアルゴリズムダイバーシチである。

構成がフレキシブルでないと、万全を期すために全通信チャネルに対して、ケース4に対応できる時空間信号処理構成を適用しなければいけなくなる。しかし、それは非常に非効率・不経済である。ソフトウェアアンテナは必要に応じて必要な構成に組み替えることを特徴とするので、たとえば多くのユーザチャネルを収容する基地局においても、信号処理部の全体のリソースを非常に有効に利用できる可能性を有する。

4. 事例：突発的に発生する強い干渉波に耐性を有するソフトウェアアンテナ

アダプティブアルゴリズムの適応変身（アルゴリズムダイバーシチ）の働きがわかる最もシンプルな例を示そう。アレーアンテナで所望波を自動追尾するシステムを考える。マルチパス環境下において最大比合成（＝最大SNRを実現する）による受信がなされているシステムでもよい。ここに、突発的に所望波より遙かに強い干渉波が入射する状況を考える。突然不法電波が発射されたときなどに、この状況が生まれる。前節で述べたケースにおいて、ケース1から突然ケース2、しかもその干渉波が非常に強い（たとえば100倍といった）場合である。このケースを筆者らは文献17)で詳しく取り扱っている。ここでは、これを簡単に紹介したい。

基本構成を図7に示す。このアレーアンテナは常時各素子の出力の相関行列を求め、その固有値と固有ベクトルを常に監視している。

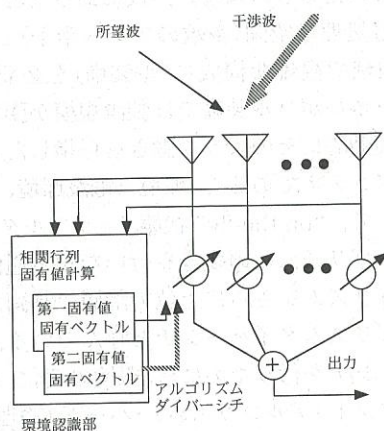


図7 突発的に強い干渉波が入射する環境に対して適応変身するソフトウェアアンテナ

通常時(ケース1)には、1つの固有値のみが大きな値をもち、それに属する固有ベクトルをアンテナのウェイトとして出力を得る。この出力は最大SNR受信を実現している。すなわち、1つの方向からの入射であれば自動追尾に、マルチパス環境であれば最大比合成受信になる。

このようなとき、別の方向から突発的に干渉波が入射すると、すなわちケース2になると、大きな値をもつ固有値が2つになる。このとき、最大固有値に属する固有ベクトルをウェイトとする出力は所望波対干渉波電力比SIRが劣化し、通信が不能になる。このとき、固有値モニタの情報に基づきアンテナウェイトを相関行列の第2固有値に属する固有ベクトルに切り替える。そこにはSIRの反転した信号、SIRが1/100(=-20dB)であればほぼSIRが100(=20dB)の信号が現れる。このように環境認識部で相関行列の固有値を監視して状況を判断し、最適なアルゴリズムに変身することで良好な通信を維持できる。

5. 今後の課題

移動通信の基地局アンテナへの導入が期待されているアダプティブアンテナ、その機能をさらに柔軟なものにするソフトウェアアンテナの技術を紹介した。アダプティブアンテナの歴史は古く、最適化理論を中心とした理論基盤もかなり確立されているが、通信用として実用されているのは、まだPHS(パーソナルハンディホンシステム)の基地局アンテナとしてのみである。

しかしその実現のカギを握っているディジタル信号処理デバイス(DSP, FPGA, ASIC)などシーズとなる技術に進展著しいものがあり、かつ、CDMA(符号分割多元接続方式)やOFDM(直交周波数分割多重)など広帯域情報伝送方式にとっての周波数有効利用にニーズが増している。その両者のタイミングが合致してアダプティブアンテナ利用の気運が盛り上がっている。

研究開発の重要性からは、以下の項目をあげることができよう。

- 1) 送信側アダプティブアンテナのウェイト制御法。特に送受信で周波数が異なり、受信側で学習したウェイトが送信側でそのまま使えないシステム(ダウンリンクビームフォーミング)。
- 2) 次世代の通信方式として期待が高まっているマルチキャリア変調方式(OFDM)に適用可能なアダプティブアンテナ
- 3) 基地局ばかりでなく移動局にもアダプティブアレーを取り入れ、双方でアダプティブ制御を行う高機能な情報伝送を実現するMIMO(Multiple-Input Multiple-Output)方式に対する情報伝送方式(時空間符号化伝送方式)
- 4) よりフレキシブルな情報伝送方式、環境適応通信を

実現するソフトウェアアンテナ

情報通信システムそのものがフレキシブルなものになりつつある。その代表が環境適応通信であり、ソフトウェア無線である。ここで紹介したソフトウェアアンテナはその実現の一翼を担うものとして今後の展開がおおいに期待できる。(2002年4月1日受付)

参考文献

- 1) Y. Karasawa, T. Sekiguchi and T. Inoue: The software antenna: A new concept of Kaleidoscopic antenna in multimedia radio and mobile computing era, IEICE Trans. Commun., E 80-B, 1214/1217 (1997)
- 2) Y. Karasawa, Y. Kamiya, T. Inoue and S. Denno: Algorithm diversity in a software antenna, IEICE Trans. Commun., E 83-B, 1229/1236 (2000)
- 3) 唐沢, 井上: 統計モデルをベースとしたリアルタイム移動伝搬環境生成, 信学誌, 83, 884/888 (2000)
- 4) R. T. Compton: Adaptive Antennas, Prentice-Hall, Inc., New Jersey (1988)
- 5) S. Haykin: Adaptive filter theory, Prentice-Hall, Inc. (3rd Ed.) (1996)
- 6) J. R. Treichler and B. G. Agee: A new approach to multipath correction of constant modulus signals, IEEE Trans. Acoust. Speech & Sig. Proc., ASSP-31, 459/472 (1983)
- 7) B. Widrow: Adaptive antenna system, Proc. IEEE, v 55, 2143/2159 (1967)
- 8) 菊間信良: アレーアンテナによる適応信号処理, 科学技術出版 (1998)
- 9) A. J. Paulraj and C. B. Papadias: Space-time processing for wireless communications, IEEE Signal Proc. Mag., 49/83 (1997)
- 10) R. Kohno: Spatial and temporal communication theory using adaptive antenna array, IEEE Personal Commun., 5, 28/35 (1998)
- 11) 神谷, 唐沢: アダプティブアレーにおける時間領域信号処理と周波数領域信号処理の収束特性に関する特徴比較, 信学技報, A, P 98-19, 17/22 (1998)
- 12) 神谷, ほか: サブバンド信号処理に基づくアダプティブアレーアンテナの開発, 信学論 (A), J 82-A, 867/874 (1999)
- 13) Y. Zhang, et al.: Performance analysis of subband arrays, IEICE Trans. Commun., E 84-B, 2507/2515 (2001)
- 14) 唐沢, 篠澤: サイクリックプレフィックスを付加したデータ伝送方式とサブバンド信号処理型アダプティブアレー, 信学論 (B), 85-B, 90/96 (2002)
- 15) 鈴木 博: 高機能ワイヤレス情報伝送技術, 計測と制御, 41-7, 524/529 (2002)
- 16) Y. Ogawa and T. Ohgane: Advances in adaptive antenna technologies in Japan, IEICE Trans. Commun., 84-B, 1704/1712 (2001)
- 17) 畑中, 唐沢: 突発的に発生する強い干渉波に耐性を有するソフトウェアアンテナ, 信学論 (B) (2002.07 予定)

[著者紹介]

唐 沢 好 男 君 (正会員)

(本号 p. 472 参照)

