

環境適応通信

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

キーワード：情報通信 (info-communication), ワイヤレス通信 (wireless communication), 環境適応通信 (adaptive communication), ソフトウェア無線 (software radio), 電波伝搬 (wave propagation), 適応信号処理 (adaptive signal processing).

JL 0007/02/4107-0469 © 2002 SICE

1. はじめに

今世紀はIT (情報技術) の時代と言われている。その先陣となって目覚ましい発展を遂げつつあるのがインターネットや携帯電話に代表される情報通信である。情報通信の理想は、いつでも・どこでも・誰とでも、送りたい情報・受けたい情報が当たり前になり取りでき、それを支えているネットワークの存在がそれを利用する人 (ユーザ) の意識に上らないこと、と言われている。一方で、ユーザ数の爆発的な増加や伝送情報の高速・広帯域化に伴う通信需要の増大、移動通信に見られる劣悪な電波伝搬環境など、理想の実現を阻む要因もきわめて多い。ユーザからは見えない舞台裏にはこの理想実現を支える技術の総力が結集されている。その中でも「適応信号処理技術」と「システム制御技術」は重要な役割を担っている。そこで、本特集号では、情報通信、適応信号処理、制御の3つをキーワードとして、「情報通信を支える適応信号処理と制御」のテーマでいくつかのホットな話題を取り上げている。

特集では、まず全体を「環境適応通信」ととらえた総論の後、さらなる発展が期待される3つの情報通信システム：インターネット・移動通信・ソフトウェア無線の技術基盤と将来の展望について総括的な解説が行われる。つぎに、情報通信の高度化や通信ネットワークを利用した遠隔制御技術等を支えるシステム制御に関する5件の解説と適応信号処理が重要な役割を果たすワイヤレス情報通信に焦点を当てた適応信号処理技術に関する4件の解説が行われる。

本総論では、この広範な技術の中からワイヤレス情報通信に的を絞って、適応信号処理が求められる背景を述べる。その根源には複雑な電波伝搬の問題があり、その電波を有効に利用したいという目的がある。移動通信の技術の大部分は電波伝搬の問題克服のためにあると言っても過言ではない。ダイナミックに変化する電波環境や通信環境に対してアダプティブに動作するシステムをここでは「環境適応通信」と呼びたい。

2. ワイヤレス情報通信の仕組み

1895年イタリアのマルコーニは火花放電に基づく送信機の出力をアンテナにつなぎ、2.4 km を隔てた相手受信

機に向けてバースト状電波を発射した。その歴史的な試みの中に、今日の無線通信の基本的コンセプト (パラダイム) の骨格を見とることができる。そのパラダイムとは、送りたい情報をそれを運ぶことができる乗り物 (キャリア：電波や光、マルコーニの場合は電波の一種である雑音) に乗せ、それをアンテナという玄関から空間に送りだし、受信側では、逆の手順によって情報を受け取るという方式である。その後の無線伝送技術は、このパラダイムの下で、伝送効率の向上すなわち周波数の有効利用の観点から、さまざまなブレイクスルーが重ねられ、目覚ましい発展を遂げてきたわけである。図1は無線通信による情報伝達の仕組みを物流システムと対比させてまとめたものである。実際の移動通信では受信側 (図の右側) が基地局になり、ユーザまでは地上系通信ネットワーク (公衆電話網、インターネット網など) を介してさらに複雑であるがその部分を省いている。この無線区間の伝送技術として、以下のものが挙げられる。【かっこ】は物流システムに置き換えたときの役割である。

(1) 高能率符号化技術【パッケージングの技術】

音声や映像のようなアナログ情報をサンプリング (標本化) して「1」と「0」で構成されるディジタル信号に変換することを符号化、その逆の操作を復号化と言う。その際、情報が有する特徴 (発生頻度やスペクトルなど) を利用して冗長な部分を削ぎ落として行う符号化が情報源符号化、伝送路での伝搬劣化に耐性を有するように誤り訂正機能を盛り込む符号化が伝送路符号化である。これらを総称して、高能率符号化技術と呼ぶ。

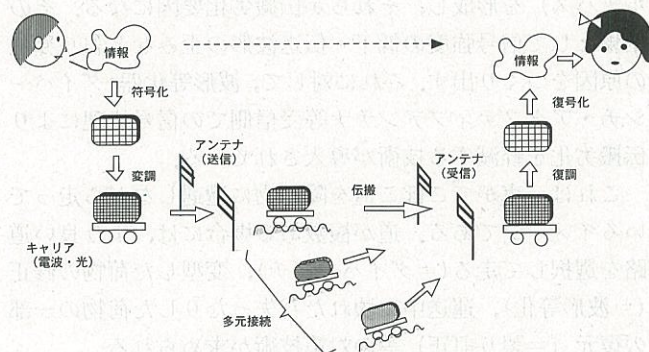


図1 ワイヤレス情報伝達の仕組み

物流にたとえると、荷物（＝情報）のパッケージングである。送りたい品物のむだを省いて小型軽量にまとめ（＝情報源符号化し）、その中に荷崩れ（＝伝搬劣化）に強い緩衝材や壊れたときに復元できる修理部品を入れ（＝誤り訂正符号を加え）、運搬しやすい形にすることに対応する。

（２）変復調技術【パッケージングされた荷物を車に積み込む技術、またその車から降ろす技術】

符号化されたベースバンド情報を電波に乗せる技術を変調と言う。電波は周波数と位相と振幅で表わされるので、そのうちのどれか一つまたはいくつかの値をわずかにずらすことで情報を乗せて送ることができる。周波数・位相・振幅に変化を与えて情報を乗せるのがおのおの周波数変調（FM）・位相変調（PM）・振幅変調（AM）である。

たとえば、パッケージングされた小包を車に積み込む技術である。車の荷台の面積は情報の帯域幅に相当し、積み荷の高さが単位帯域あたりの伝送ビット数である。積み荷を高くすると一度に運ぶ量を多くできるが、道路状態が悪い（＝伝搬劣化が大きい）と荷崩れを起こしやすい（＝誤りが発生しやすい）。

（３）アンテナ技術【門の働き。荷物を積んだ車を目的地に向けて送り出す技術、到着した車を迎え入れる技術】

アンテナは装置と空間とのインタフェースで、電波を空間に効率良く放射する（あるいは到来してきた電波を受信する）働きをする。指向性のあるアンテナは電波の通り道を選び、かつ、伝送効率を上げて雑音に強いシステムを実現する。アンテナの指向性を適応的に制御するアダプティブアンテナでは、所望信号を取り込み、かつ、不要信号を受け付けけない働きをもつ。

物流での役割は門である。目的方向に向けて車を送りだし、あるいは到来方向の範囲を限定して車を受け入れる。通過する車の荷物を調べ、欲しいものだけ通し、不要なものは通さない、すなわち関所の働きをする高度なもの（＝アダプティブアンテナ）もある。

（４）電波伝搬と伝搬劣化対策【道路状況が悪い状態での車の走行、また、道路上の障害物を避けて通る技術】

移動通信では、伝搬路の遮蔽、それに伴う電波の回折、さらには、反射・散乱が多数回繰り返されて多重経路（マルチパス）を形成し、それらが伝搬劣化要因になる。その結果として信号強度の低下・伝送波形の歪みなど誤り発生の原因をつくり出す。これに対して、波形等化器・ダイバーシチ・アダプティブアンテナ等受信側での信号処理により伝搬劣化を軽減する技術が導入されている。

これは、車がでこぼこ道を障害物に遭遇しながら走っているイメージである。道が複数ある場合には、より良い道路を選択して走る（＝ダイバーシチ）、変型した荷物の修正（＝波形等化）、運送中に壊れたり失ったりした荷物の一部の復元（＝誤り訂正）等の対策技術が求められる。

（５）多元接続技術【信号機などによる交通整理】

複数のユーザが同時に通信をしようとしたとき、お互いの混信によって通信不能になることを防ぎ、かつ限られた周波数の中で、可能な限りユーザ数を多くしようとする技術である。異なる周波数をユーザに割り当てる周波数分割多元接続（FDMA）、時間的にぶつからないように各データを時間圧縮して、送信タイミングを制御する時間分割多元接続方式（TDMA）、周波数も時間も重複するがそれを直交符号で拡散しておのおのの符号で区別する符号分割多元接続方式（CDMA）などがある。

物流では荷物を乗せた自動車が道路上でぶつからず、スムーズな走行を実現するための交通整理にあたる。空いているレーンを指定してそこを走らせる（FDMA）、あるいは信号機で整理し、順番を決めて通過させる方法（TDMA）などがある。

（６）より高い周波数帯の開拓【運搬能力アップを目指した大型車の開発】

無線通信の場合、変調波の比帯域（＝信号帯域幅と搬送波周波数との比）はたかだか１～２％である。１０Mbpsの伝送であれば搬送波は１GHzでもよいが、１Gbpsの伝送にはミリ波（波長がmm帯の電波）がほしい。しかし、高い周波数に移行するに従って、見通し外での電波の伝搬が困難になり、また、帯域が広くなるに従って、マルチパスによる伝搬遅延のばらつきの影響が深刻になる。

物流でたとえば、運搬車両の大型化である。１トン車が５トン、１０トンと積み荷容量を増やしていく姿である。走る道路も整備が必要になり、通行上の問題が多くなる。

これらの技術は、無線通信インフラのための技術として、よりインテリジェントな機能の実現へと進んでいる。電波の伝搬状態や利用状況などの環境に応じて、無線局が使用する周波数、電力、周波数帯域幅、通信方式、ルーティング等を動的（ダイナミック）に変化させることによりネットワークとしての柔軟性をもたせ、電波利用の効率的・質的向上を目指すものである。このような柔軟性に富んだ通信のイメージは「環境適応通信」と呼ぶのがふさわしいであろう。また、それは同時に「ソフトウェア無線」の理想の姿でもあろう。

本特集号ではこれら個々の技術が取り上げられている。

３．適応信号処理技術の源： 電波伝搬劣化

静止衛星通信のような、見通しの良い環境での通信や、光ファイバー通信のようにキャリア（＝光）の通り道がガイドされている通信では、電波伝搬上の問題は少ない。これに対して、移動通信に見られるマルチパス伝搬ではどうか？ 以下の４つの特徴を挙げることができる。

i) 距離の増加とともに受信強度は急激に弱くなる。ii) 広い角度範囲から多数の電波が到来する。iii) 異なるドッ

プラーシフトを受けた多数の電波が到来する。iv) 到達時間の異なる多数の電波が到来する

これらの性質は、信号強度・到来角度・ドップラー周波数・遅延時間に広がり（スプレッド）をもたらすことになる。このうち、ii)～iv)に対応する量の広がり、場所・時間・周波数の領域で選択性と呼ばれる特性の不均一性を生み出し、図2のように3つの量の選択性として整理できる。これらの性質が、通信にどのように影響を与えるかを見てみよう。

(1) 距離の増加とともに受信強度は急激に弱くなる

非常にたくさんの実測データを調べた結果から、平均受信電力の送受信点間距離特性は距離の3.5～4乗に反比例することが知られている²⁾。自由空間の電波伝搬が距離の2乗に反比例することと比較すると、その減衰量がかなりの大きくなるのが理解できる。たとえば、距離が10倍になると自由空間伝搬では20 dB弱くなる（ $=1/100$ になる）のに対して、移動通信環境では35～40 dBも減衰を受ける（ $=1/3,000 \sim 1/10,000$ になる）ことになる。これは、あくまで平均的なものであり、実際には、同じ1 kmの地点であっても、その地点が密集地で電波の遮蔽が大きいところと比較的見通しの良いところでは受信強度も大きく異なる。そのばらつきの標準偏差は6～8 dBと言われており、ピーク・ピークの変動では20 dB以上にもなる。さらにその上に20 dBを超える瞬時変動（レイリーフェージングと呼ばれる）が加わるので、場所ごとの受信強度の差は100 dBオーダのきわめてダイナミックレンジの広いものとなる。

基地局設置や回線設計においては、この場所に依存した伝搬損の正確な見積もりが求められるが、伝搬構造の複雑さを考えれば、それがきわめて難しいだろうことが容易に

理解いただけると思う。

(2) 広い角度範囲から多数の電波が到来する

図2では3本しかパスを書いていないが、実際には、さまざまな強さをもつ多数の波が角度的の広がりをもって到来している。角度的に広がりをもって到来する波は、おのこの電波の位相関係により、空間に定在波環境を作る。この結果、波長スケールでの比較的狭いエリアに信号強度の強弱のパターンをつくり出す。ある場所では、電波の強度が低いのに、ほんの少し離れた場所では電波が強いということもありうる。このような選択性を場所の選択性と呼ぼう。この性質を積極的に利用するのが、スペースダイバーシチやアダプティブアンテナと呼ばれる技術である。

(3) 異なるドップラーシフトを受けた多数の電波が到来する

図2で端末の移動を考える。各パスで到来角度に依存して搬送波周波数が異なるドップラーシフトを受けるので、周波数領域においてスペクトルが広がり、それが信号の振幅や位相の時間変動（マルチパスフェージング）として現われる。このような選択性を時間の選択性と呼ぼう。良好な通信を維持するためには、時間的な変動に対して十分追従するような適応制御が行われる。

(4) 到達時間の異なる多数の電波が到来する

マルチパス波はおのこの異なる経路を通して到来してきたものであるため、経路の長さに依存して、受信アンテナへの到達時間の差が生じる。最初に到来したものを基準にするとそれ以降の波は遅延波になるので、到達時間のばらつきは遅延の広がりとして表現される。遅延の広がりがデジタル伝送信号の1シンボルの時間長（1つの変調状態が持続される時間）に比べて無視できない大きさになると、波形歪による符号間干渉誤りが生じる。符号間干渉誤りが起きるフェージング環境は、伝送信号の周波数帯域内で、伝送路の周波数特性が一樣でないので、周波数選択性フェージングと呼ばれる。

この性質は、広帯域な情報を伝送したい場合に生じる本質的なもので、送信電力を大きくしても解決ができない。そのため、トランスバーサルフィルタなどを用いた時間領域や周波数領域での適応信号処理に基づく対策が採られる。

図3は典型的な市街地環境におけるマルチパス伝搬路の周波数特性とその場所的変化を表わしている。2 GHzを中心とした4 MHzの帯域内にいくつかのディップ（伝送特性の落ち込み）が見られる。これが伝送波形の歪みをもたらす。その特性もわずか10 cmの変化で大きく変わってしまうため自動車のように高速走行の移動体では、時間的な変動も非常に激しい。移動通信の適応信号処理技術とは、図3のような周波数領域や空間領域で生じている不均一性を平坦にして良好な通信を実現する技術と言ってもよい。

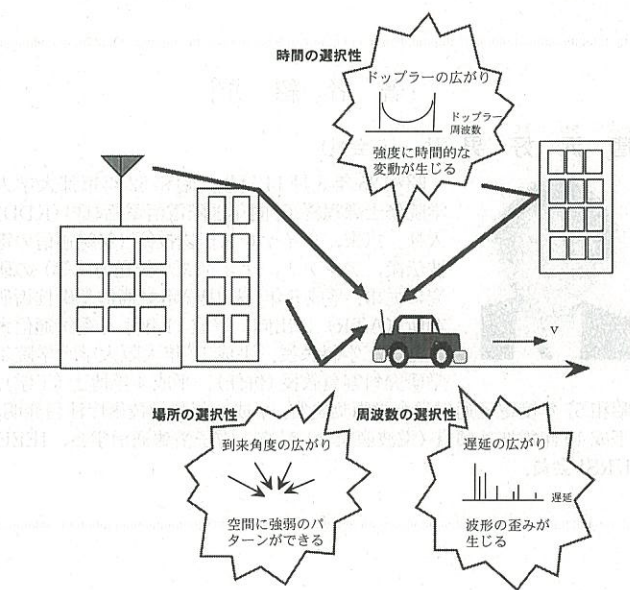


図2 移動通信の電波伝搬の特徴

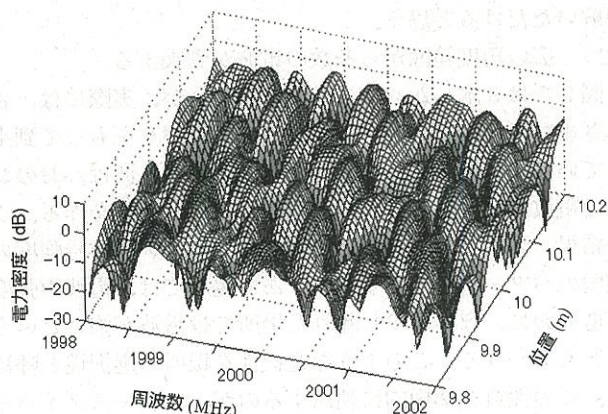


図3 市街地環境における伝搬チャネルの周波数特性とその空間変化

4. 高効率伝送技術の系譜

伝送上の問題発生の源が電波伝搬にあることを述べた。ここを起点にマルチパスフェージングと干渉波除去に関する技術の系譜を簡単に述べたい。

マルチパス伝搬によって生じる伝搬遅延の広がり広帯域伝送を阻む要因になる。その対策は、無線装置が個別に行うものと、フェージングに耐性を有する通信方式を採用する方法とに大別できる。前者には歪んだ波形を元に戻す波形等化、遅延波を不要波とみなして除去するアダプティブアンテナなどがある。後者には、遅延波の分離・再合成が可能なスペクトル拡散方式（その応用であるCDMA）、広帯域信号を狭帯域に分割して伝送するマルチキャリア伝送方式（その代表としてのOFDM）などがある。

実際の通信では、希望波のみでなく干渉波も存在し、かつそれらがマルチパス信号となって入射するので、電波環境は非常に複雑である。このようなときに力を発揮するのがアダプティブアンテナであり、干渉キャンセラーである。CDMAでは、直交性の優れた符号をお互いがもち合うことにより、それ自身が干渉に対して強い方式になっている。

5. より高速に、よりフレキシブルに

本特集号で扱う情報通信のテーマは幅広くかつ奥も深いので、本稿では、適応信号処理が大きな役割を担うワイヤレス情報通信に焦点を当て、その仕組みと適応信号処理が求められる背景を述べた。

送受信したい情報が広帯域になるに従って、それを阻む要因である電波伝搬、特にマルチパス伝搬劣化をいかに克服するかが鍵である。個別の対策として波形等化器・干渉キャンセラー・アダプティブアンテナなどがあり、伝送方式上の対策としてスペクトル拡散やそれをベースとしたCDMA、マルチキャリア伝送方式（OFDM）などの技術が

開発されている。また、ソフトウェア無線、環境適応通信というキーワードに代表されるように、装置・システム・ネットワークが柔軟性をもつことへの比重が高まっている。本総論ではこれらの系譜を概観した。また、本特集号では、これらの技術、および、デジタル制御・ロバスト制御に代表されるシステム制御技術に対して詳しい解説が行われている。

図1に示したように情報はキャリアによって運ばれることを述べた。1本の光ファイバーの中を数十ギガビットの情報が飛び交う時代であり、無線も将来はギガビット伝送に向かうであろう。ギガビットと言えばそれはもうこれまで電波として空間を飛んでいる高周波信号と何ら変わるものではない。それならばその情報をアンテナから直接飛ばす通信も考えられるであろう。筆者らは、このギガビットクラスの情報をキャリアに乗せず直接送受信する方式を「キャリアレス無線伝送」と呼び、その将来に夢を抱いてきた¹⁾。おりしも、アンテナから超短パルスを送信する超広帯域伝送：UWB（Ultra WideBand、あるいはImpulse Radio）⁴⁾に対して、米国FCC（Federal Communications Commission）の認可が本年2月に降りたというホットニュースが伝えられている。情報通信のさらなる発展に期待していただきたい。（2002年4月5日受付）

参考文献

- 1) 環境適応通信というネーミングは、関西学研都市（京都府精華町）に1996年に生まれたATR環境適応通信研究所に由来している。筆者もその設立時に参加しその理念を共有している。この研究所設立時の紹介記事は：小宮山牧兒：ATR環境適応通信研究所の研究内容の紹介、ATRジャーナル、23（1996.06）
- 2) 奥村、進士（監）：移動通信の基礎、信学会（1986）
- 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) K. Siwiak：Ultra-wide band radio：A new PAN and positioning technology、IEEE VTS News、4/9（Feb. 2002）

[著者紹介]

唐 沢 好 男 君（正会員）



昭和25年8月14日生。昭和52年京都大学大学院修士課程終了。同年国際電信電話（株）（KDD）入社。以来、ワイヤレス伝送技術（無線通信の電波伝搬、アンテナ、デジタル伝送方式等）の研究に従事。平成5年（株）国際電気通信基礎技術研究所（ATR）に出向。平成11年より電気通信大学電子工学科教授。平成12年大阪大学大学院工学研究科客員教授（併任）。平成4年博士（工学）。昭和57年度電子通信学会学術奨励賞。平成9年科学技術庁注目発明。平成10年電波功績賞（電波産業会）受賞。電子情報通信学会、IEEE、URSI会員。