

寄稿

無線ベースバンド通信 究極のワイヤレス情報通信をめざして

電気通信大学 教授
唐 沢 好 男



前稿では、近年のワイヤレス情報通信技術の元気の源とも言える「MIMO(送受信の双方にアレーアンテナを用いる伝送方式)」を取り上げ、高性能・高機能を生み出す不思議さを探検した⁽¹⁾。本稿では、近場の技術からもう少し目を先に向け、究極のワイヤレス情報伝送技術として筆者らが研究を進めている「無線ベースバンド通信」を紹介する。この技術の解説を通じて、ワイヤレス通信の未来技術として期待が高まっているソフトウェア無線・コグニティブ無線に迫ってみたい。

1. “無線ベースバンド通信” ことはじめ

ベースバンドの連続信号を、キャリア(搬送波)に乗せずにそのままアンテナから送り出したらどうなるのだろうか？

1995年、筆者が関西文化学研都市“けいはんな”にあるATR光電波通信研究所に身を置いていたころ、その翌年4月に発足予定のATR環境適応通信研究所の研究テーマを検討する会議に参加していた。その中で、キャリアに乗せずに情報を送る無線通信「無線ベースバンド通信(当時はキャリアレス無線通信と呼んでいた)」が、基礎研究(=海のものとも山のものともわからないものをわかるようにする研究?)を標榜するATRのテーマに相応しいと考え、これを提案した。世はおりしもギガビット伝送が無線にも言われ始めた時代。情報そのものがマイクロ波の周波数領域にあり、キャリアに乗せなくても情報自らがアンテナから出てゆけるのではないかと考えたのが事の始まり。図1はこのイメージである。同図(a)は情報がキャリアによって運ばれる変調信号、その究極は、波の一山一山に情報を乗せること(同図(b))、それはもう、情報そのものをそのまま送る無線ベースバンド伝送である(同図(c))。

ATRでの新研究テーマに取り上げたものの⁽²⁾、具体的な研究着手に至らず、そうこうしているうちに、レーダ分野で培われてきたインパルス無線を技術の核としたUWB(ウルトラワイドバンド)がワイヤレス通信分野を席卷するところとなり^{(3), (4)}、その技術の中に無線ベースバンド通信のアイデアも埋没していった。しかし、UWBがPAN(パーソナルエリアネットワーク)の担い手として、IEEEでの標準化作業が進むにつれ、インパルス無線タイプからマルチキャリア無線タイプに変遷して行き、無線ベースバンド伝送技術とは距離を大きくする方向に進んできた⁽⁵⁾。

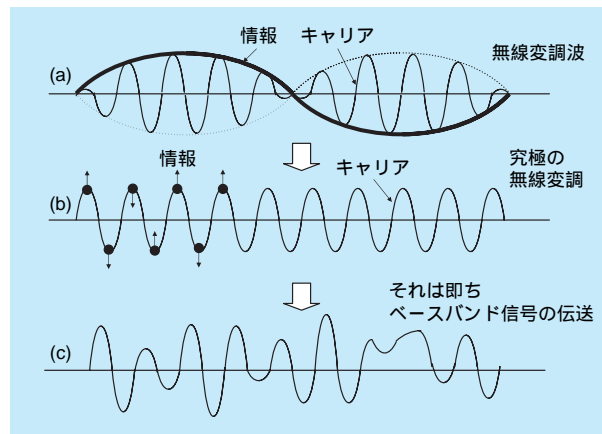


図1 変調信号伝送とベースバンド伝送

一方、筆者も1999年大学に職を得たのを機に、心の片隅にあった無線ベースバンド通信を研究として取り組んでみたいと思うようになった。その折り、非常に嬉しいことに、大学院学生北川淳一君が本テーマを希望し、かつその研究遂行に執念を持って取り組んでくれた^{(6), (7)}。

本稿では、究極のワイヤレス情報伝送技術として筆者らが研究を進めている「無線ベースバンド通信」を紹介する。この技術の解説を通じて、ワイヤレス通信の未来技術として期待が高まっているソフトウェア無線・コグニティブ無線に迫ってみたい。

2. 原 理

従来の無線通信が、情報を電波というキャリアに載せて送る通信であるとしたら、無線ベースバンド通信はデータそのものがキャリアの役割も果たしていると解釈できる。無線通信は、マルコーニのチャレンジングな実証実験や、フェッセンデンが初めて変調概念を導入して行った音声伝送以来百年余がたち、衛星通信や携帯電話システムに代表されるように、その発展には目を見張るものがある。しかしながら、その基本パラダイム、すなわち、情報をキャリアに乗せてアンテナから送る仕組み、は100年来、実はほとんど変わっていないことにも気づくであろう。無線ベースバンド通信を、今後100年の転換点にとの思いもあった。

情報を電圧波形として表しているベースバンド信号は、例えばそのパルス周期が T_0 であった場合、およそ $\pm 1/T_0$ Hzの範囲に周波数成分を持つ。いかなるアンテナからも直流信号を放出することはできないので、0 Hz周波数付近の成分を生み出す連続同一符号(例えば、1,1,1,1といった)の発生を抑えなければならない。このため、直流成分を持たないように工夫された符号化がいくつかあり、図2に示すマンチェスター符号もその一つである。マンチェスター符号は2パルス($2T_0$)で1ビットを伝送するので伝送レートは半分になるが、比帯域の大きいアンテナを選べば十分伝送可能な信号になる。

キャリアを用いて情報を伝達する従来の無線システムでは、振幅と位相を持つ複素数で表される信号(IQ信号)を、キャリアの振幅と位相に寄せ、実数領域の信号としてアンテナに送り出すことができるが、無線ベースバンド通信ではキャリアを持たないので、送り出すベースバンド信号も実数領域の信号になる。無線ベースバンド伝送における時間領域の信号表現と周波数領域の表現の関係を図3にまとめている。実数信号である時間領域信号は、フーリエ変換により正の周波数と負の周波数に共役の関係を持つ複素数信号として周波数領域で表現できる。この信号が、伝搬チャネルを経由して受信アンテナに届く。時間領域では、送信信号 $s(t)$ も、伝搬特性(インパルス応答特性) $h(t)$ も、雑音 $n(t)$ も、受信信号 $r(t)$ もすべて実数であり、次式の関係式で結ばれる。

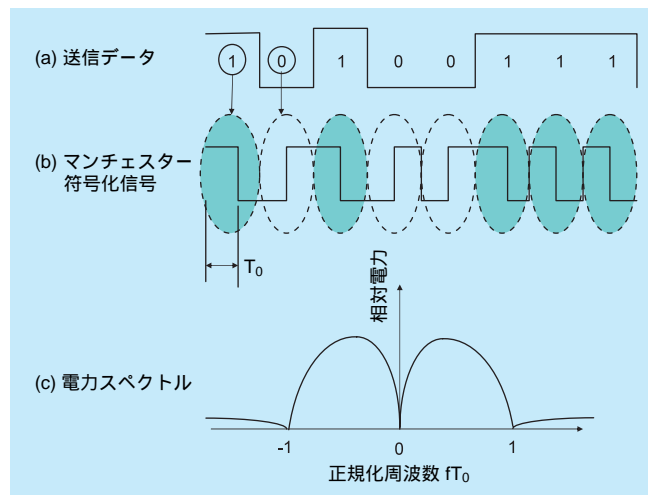


図2 マンチェスター符号と周波数スペクトル
(直流分が生じていないことがわかる)

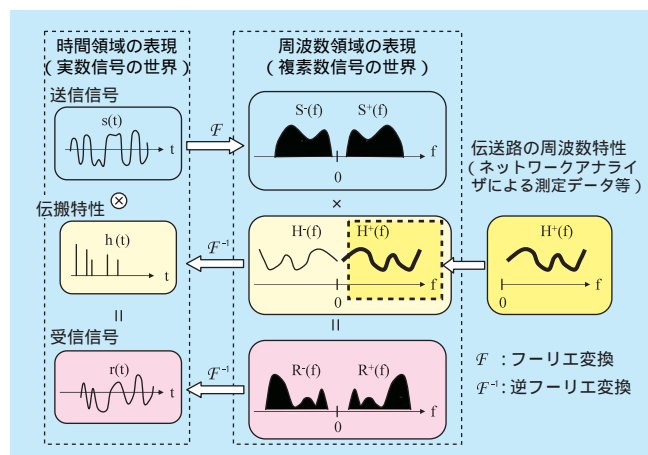


図3 無線ベースバンド伝送の各部の信号
(時間領域 vs. 周波数領域)

$$r(t) = h(t) \otimes s(t) + n(t)$$

ここで \otimes は畳み込み積分を表す(図3では熱雑音の付加を省いている)。一方、伝搬特性は、例えば、ネットワークアナライザを用いて周波数特性を測定したとすると、周波数の関数として複素数(振幅と位相を持った信号)で求められる。一見、実数信号との整合性に悩むところであるが、図3のように整理してみると、その関係が容易に理解できるであろう。

図2(c)のスペクトルからわかるように、たとえマンチェスター符号を用いてもその占有帯域幅は比帯域的な意味できわめて広い。これはすなわち、周囲に電波干渉を与えるシステムになり、周波数有効利用の観点から、実用性にきわめて難があると気づく。同様の悩みを共有するUWBでは、出力レベルを規定値以下に抑えて、他のシステムと共存する形態をとっている。無線ベースバンド通信においても、干渉を与えないという観点からは、未開拓周波数であるテラヘルツ領域や、微弱無線による超近距離通信に当面活路を見出さなければならない。本稿の第4章で、別の視点で、ソフトウェア無線概念に基づくその具体的な利用イメージを提示する。

3．超広帯域伝送の原理実証

実際の伝送実験を紹介する。図4はその実験系である。送信信号にはデジタル信号発生器を、受信機にはデジタルオシロスコープ(DSO)を、また、送受信のアンテナには直径・高さともに約1mのディスクアンテナを用いた。このアンテナは100MHz～500MHz帯においてVSWRが2.0以下となる広帯域性を有している。伝送実験は電波暗室内で行い、送受のアンテナを含めた伝送路の周波数特性はネットワークアナライザで測定した。図5は実際に伝送した送信信号(a)と受信信号(b：実線)の波形を示している。パルス幅2ns、2パルスで1ビットの情報を運ぶので250Mbpsの伝送である。図の範囲では、マンチェスター符号化により“100010011010111”の情報を送っている。同図(b)の点線はネットワークアナライザで測定したチャンネルの周波数特性をコンピュータに取り込み、計算機内で伝送波形をシミュレーションした結果である。実線と点線の両受信波形が良く一致しているので、伝送路の特性だけ把握しておけば、実際のデータ伝送特性評価は、計算機内で行うことができることを示している。この後者の方法により、SN比20dBでBER 10^{-3} の伝送特性が得られることを確認している⁽⁶⁾。

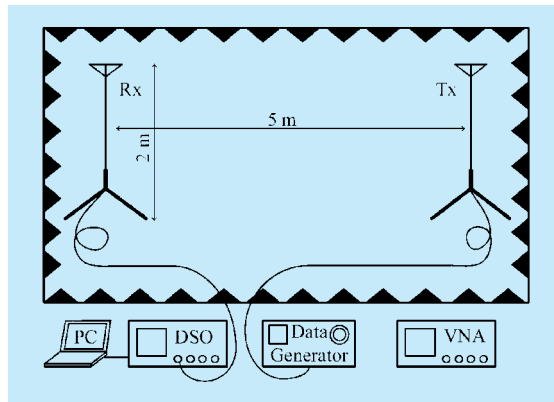


図4 無線ベースバンド伝送実験系

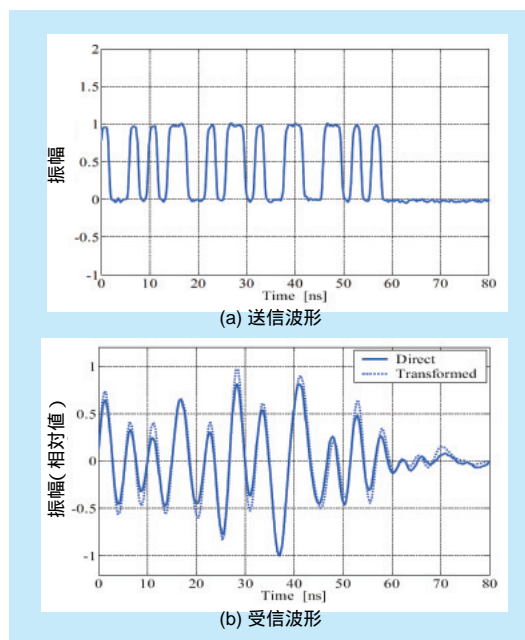


図5 送信波形と受信波形

マンチェスター符号化されたベースバンド信号を送るには、どのくらいの比帯域のアンテナが必要であろうか。コンピュータシミュレーションにより、アンテナに求められる帯域幅は、パルス幅 T_0 の信号に対して、 $0.2/T_0 \leq f \leq 0.6/T_0$ であればよいことを確かめている⁽⁶⁾。このときのアンテナの比帯域幅(帯域幅/中心周波数)は1.0になる。

その後、通過帯域(VSWR < 2dB)が1GHz~6GHzのディスコーンアンテナ(アンテナ直径、高さとも約10cm)を新たに試作し、2.5Gbpsの伝送を実現している(アンテナを含む実測チャネルの特性を取り入れた計算機シミュレーション実験⁽⁷⁾)。

以上の結果から、アンテナサイズと伝送速度の関係は以下で与えられる。

アンテナサイズ	伝送レート
(1m) ♪	250 Mbps(実データ伝送で確認)
(10cm) ♪	2.5 Gbps (実チャネル特性データを用いたコンピュータシミュレーションで確認)
(1cm) ♪	25 Gbps(上記より推定)

無線ベースバンド通信は、周波数X GHzで動作する送受信装置でX Gbpsオーダの通信を可能とすることに特徴がある。マルチパス環境には本質的に弱いですが、直接波とマルチパス波電力の比が15dB以上であれば、等化や誤り訂正技術を併用せず、BERが 10^{-4} 程度以下で伝送可能である⁽⁷⁾。

4. 未来の姿：環境適応性に優れた究極のソフトウェア無線

図2(c)のスペクトルからわかるように、このままでは、周りに干渉を与えるシステムとなり、用途が特殊形態に限られる。例えば、テラビット伝送など未使用周波数帯での利用、周囲の電波が遮蔽された干渉フリーの環境での利用などである。電波法上の規制をクリアし、かつ、他システムとの共存を得てゆくシステムとしては、微弱電波による超近距離通信への応用が考えられる。装置内ボード間のワイヤレスコネクションなどである。

このような、特殊環境での用途から、より一般的なシステムへの応用を考えてみたい。

IT技術の進歩とともに、デジタル信号処理の力が年々アップしている。無線機器ではデジタル信号処理部がどんどんアンテナに近づきつつある。信号処理を電波のままで行うアダプティブアレー(電波信号処理アダプティブアレー)もできるようになってきた⁽⁸⁾。ソフトウェア無線は、プログラミングによって種々の無線機の機能を実現するコンセプトであり、パソコンにアンテナがついたイメージである。その最大のメリットは、フレキシビリティ、すなわち環境適応性である。

その究極の姿が図6である。送受信装置は環境認識手段により、時々刻々利用できる周波数帯を把握している。フレームを構成して、利用できる周波数帯に対応する位置にデータを配置し、これを実数信号を出力する直交変換(例えば、逆離散コサイン変換(IDCT))し、ディジタル・アナログ変換器(DAC)を介してアンテナから送り出すイメージである。これは、OFDMによる変調操作と共通するが、違いは、デジタル信号処理で得た信号をRF帯にアップコンバートして送り出すのではなく、そのままアンテナから出すことである。すべての無線機が、カバーする周波数帯(例えば1~2GHz帯)を共有し、お互いに電波環境の認識、すなわち周波数の利用状況を把握して、最適な周波数に情報を乗せて伝送する。これは、コグニティブ無線の概念⁽⁹⁾とも共通する。

陽な意味でのキャリアを持たない「無線ベースバンド通信」、その機能をプログラミングによって実現する「ソフトウェア無線」、そして、環境を認識して利用可能な周波数帯を自ら選択する「コグニティブ無線」、これらの概念が一体化した新たなワイヤレスシステムに筆者はその将来性を見ている。

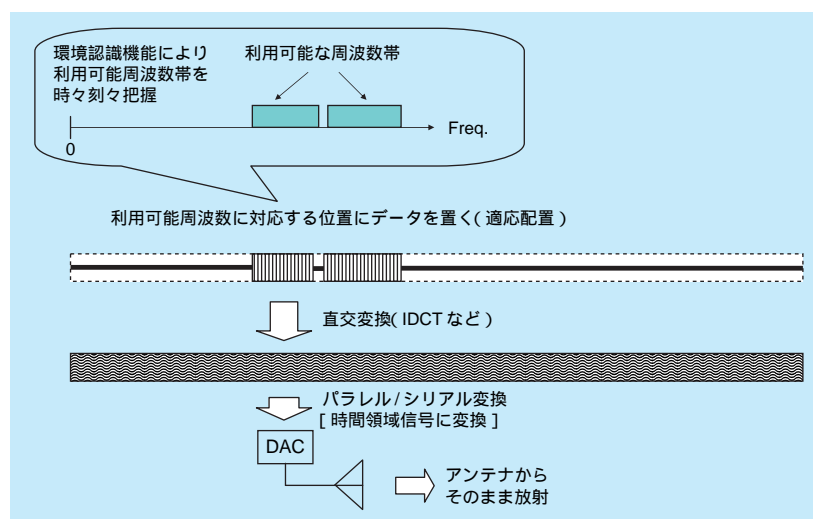


図6 環境適応型ソフトウェア無線システム

なお、この後半で紹介したOFDM伝送 (= マルチキャリア伝送) 概念を無線ベースバンド伝送に含めるのは、違和感を覚える読者も多いと思う。しかし、デジタル信号処理によって作り出した信号を高周波に乗せない、という点で広い意味のベースバンド信号のワイヤレス伝送であると理解いただきたい。

参考文献

- (1) 唐沢好男：“MIMOのふしぎ探検”，電興技報, no. 40, pp. ii-ix, 2006.12.
- (2) 小宮山牧兒：“ATR環境適応通信研究所の研究内容の紹介”，ATR Journal, vol. 23, pp. 7-10, 1996.
- (3) M.Z. Win and R.A. Scholtz：“Impulse radio: How it works”，IEEE Comm. Lett., vol.2, no. 2, p.36-38, 1998.
- (4) X. Shen, M. Guizani, R.C. Qiu, and T. Le-Ngoc：“Ultra-wideband”，Jhon Willey & Sons, 2006.
- (5) 原 晋介：“IEEE 802.15ワーキンググループにおける標準化動向”，信学会通信ソサイエティマガジン, No.2, pp. 103-107, 2007.
- (6) J. Kitagawa, T. Taniguchi, and Y. Karasawa：“Wireless baseband transmission experiments”，IEICE Trans. Commun., vol. E89-B, no. 6, pp. 1815-1824, June 2006.
- (7) 北川淳一・谷口哲樹・唐沢好男：“実信号解析を用いた無線ベースバンド伝送のマルチパス環境下での伝送特性”，信学論C, vol. J89-C, no. 12, pp. 1066-1078, 2006.
- (8) 神田明彦他：“地上デジタル放送の移動体受信における電波信号処理型最大比合成ダイバーシチ”，信学論C, vol. J90-C, no. 12, 2007.12(予定)
- (9) S. アシュレー：“電波渋滞を避ける賢い無線”，日経サイエンス2006年6月号, pp. 106-115, (原典：Cognitive Radio, Scientific American, March 2006)

【著者紹介】

昭52京都大学大学院修士課程了。同年国際電信電話(株)(現KDDI)入社。同社研究所にて、電波伝搬・アンテナ・デジタル伝送方式の研究に従事。平11電気通信大学教授。平17, 18同大学先端ワイヤレスコミュニケーション研究センター(AWCC)センター長。工学博士。電子情報通信学会(信学会)フェロー。平10電波功績賞, 平18国際コミュニケーション基金(ICF)優秀研究賞, 平18信学会論文賞(2件), 平19信学会通信ソサイエティ Best tutorial paper award等受賞。