

通信の仕組みから機器 / アンテナ設計まで 製品開発に必要な技術を 的確に学ぶ分野別参考書

ワイヤレス技術は、多種多様で高度になっています。
やみくもに勉強しては時間ばかりかかり、追い付けません。
効率良く学ぶには、技術体系を知り、要所を押さえることが肝心です。
①無線通信システム、②無線通信機器、③アンテナ、の三つについて、
技術を整理するとともに、各技術の習得に役立つ書を紹介します。

根日屋 英之 アンブレット

近年のデジタル情報家電や身の回りの電子機器には、ワイヤレス機能を搭載しているものが増えてきました。また、大容量化のニーズは高く、通信速度が大幅に高速化しています。高速伝送技術はどんどん進歩しており、今後もさらに高度な通信方式が新しく出てくるでしょう。ワイヤレス装置を設計する技術者は、世の中についていくだけでも大変な時代になったといえます。

高度な技術を効率的に学ぶ

アマチュア無線が趣味であった筆者が小中学生だったころ(1960～1970年代)は、トランジスタ(半導体)の無線機もありましたが、まだ真空管の無線機も多く、かまぼこ板の上に受信機を自作したり、たばこの缶ケースでシールドをしたりと、趣味の世界とはいえ優雅な時代でした。

1971年に筆者が作った送信機は、ASK(amplitude shift keying)送信機、つまりモルルス符号の送信機であったり、AM(amplitude modulation)やFM(frequency modulation)というアナログ変調の音声の送信機で、現在ほどとっつきにくいものではありませんでした。

ワイヤレス製品の設計の仕事始めて10年ほど経った1990年代前半から、デジタル変復調方式へ

の移行が本格的に始まりました。当時、無線機に搭載できる安価なDSP(digital signal processor)の性能は、かろうじて変復調を行えるレベルでしたが、それでもたくさんのハードウェアを置き換えてしまったのは驚くべきことでした。

それ以降の技術進歩はすさまじく、大容量通信を行うための多値デジタル変調や多元接続技術がデジタル信号処理とともに発展しました。このため現在は、アンテナ、電子回路、信号処理用ソフトウェアが融合しており、ワイヤレス通信の技術者が勉強しなければならない領域は、とても広がっています。今の若い技術者は、学校を卒業して会社に入社したときに、技術があまりにも高度であると感じるのではないかと思います。アナログ回路設計から経験してきたベテランでさえ、システム全部を見渡せる技術者は非常に少なくなっているのですから、若手はもっと大変です。

ですから若手の技術者は、なるべく効率良く勉強する必要があります。学問に王道はありませんが、着実に進み、無駄を少なくすることはできます。進んでいることを実感できれば、やる気も出ます。それには何を学ぶべきか、全体の枠組みをつかんでおくことが大切です。

私が大学の学生や企業の若手技術者にワイヤレスについて教えるときは、①無線通信システム、②無線通信機器、③アンテナ、という三つのカテゴリを想定しています。これで全体像がつかめますし、

基本的な技術もそれぞれに分類できるからです。以下では、このカテゴリに沿って、基本と現場で役立つ実力を身に付けられる書籍や文献を紹介しましょう。

なお理論から教え始める人がいますが、ここでは実践(現場での設計)を重視します。理論的な勉強は非常に大切で、技術者たるもの知らねばならないことが結構あります。しかし、我々ワイヤレス製品を作り上げなければならない立場の機器メーカー側の技術者は、本能的に式の羅列の本よりは、実践的な設計に近い内容を論じている書籍や文献、雑誌、部品メーカーの技術資料などを選んで自分の身に気付くことがあるものなのです。

ワイヤレスの世界は、周囲の環境やバラつきなどが大きく影響するので、理論だけでは成り立たず現場の経験が必要になるのは当然のことです。それに、実践から理論を学んだ方が分かりやすい場合は多いものです。また、現在はCADやコンピュータ・シミュレーションを多用するのが現実的であり、この点も考慮して学ぶべきでしょう。こうした前提に立って、解説を始めることにしましょう。



無線通信システム

変復調や多元接続の技術を知る

前述のように近年は、大容量通信を行うための多値デジタル変調や多元接続技術を勉強しなければなりません。一方、ユビキタス構想のキー・デバイスであるRFIDなどのように、原始的な回路で設計し低消費電力設計を行わなければならない無線デバイスもあります。

このため、まずは無線機の要である(a) デジタル変復調、(b) 多元接続技術、(c) 個々の無線システム、を理解しておきましょう。

(a) デジタル変復調 要素技術から理解する

デジタル変復調は、決して特殊なものではありません。基本的にはアナログ変復調と同様で、搬

送波に変調をかける情報が“0”と“1”の2値になっただけと考えればよいのです。振幅変調(AM)系のASK、周波数変調(FM)系のFSK、位相変調(PM: phase modulation)系のPSK(phase shift keying)が基本になります。デジタル多値変調は、情報が2値から4値、8値…と増えるので各変調方式をアナログ的に考え、その途中段階の値を表現したり、また、途中段階の値を表現したASKとPSKを組み合わせて、より多くの情報を伝送したりします。

アナログ変調では情報が連続的に変化しますので、すべての値を忠実に伝送する必要があります。これに対し、デジタル変調では情報が離散的であり、伝送途中の信号劣化があっても受信側でその離散した値をうまく識別できれば問題ありません。すなわち、アナログ変調では“1”という値を受信側に正確に“1”の情報として伝えなければなりません。デジタル変調では“1”という値を伝送するときに、それが伝送路での信号劣化により受信側で“0.8”と復調されたとしても、受信側ではしきい値(例えば0.5)より大きければ“1”の情報として再生します。

従って、デジタル復調の評価はデジタル値をうまく分離して伝送されてきているかを確認することになります。アイパターンやコンスタレーションという視覚的なもの、符号誤り率(bit error rate)という数値的なもので評価します。こうしたデジタル変復調の基本は、『デジタル移動通信方式』(山内雪路著)で学ぶことができます。

今後は、環境に応じて無線機自体の機能がソフトウェアで変更できるソフトウェア無線(SDR: software defined radioとも呼ばれる)が出てきます。ソフトウェア無線であれば、ソフトウェアを書き換えることにより、1台でありながらいろいろな無線システムに対応できる無線機に変身します。従来の無線機は、通信方式ごとに専用の信号処理回路をハードウェアで用意していたため、機能の変更は簡単にはできませんでした。しかし、ソフトウェア無線では、このハードウェアに依存していた処理の大部分をソフトウェアで行うこととなります。ソフトウェア無線の概要を記した文献はあまり多くないようですが、『シミュレーションで学ぶディ



デジタル移動通信方式(山内雪路著)

ジタル信号処理——MATLABによる例題を使って身につける基礎から応用』(尾知博著)や『デジタル信号処理による通信システム設計——演算の実装から信号の変復調・誤り訂正まで』(西村芳一著)が参考になるでしょう。

(b) 多元接続 最新の大容量技術を概観

多元接続技術でよく知られているのは、時間的な分割によるTDMA (time division multiple access), 周波数での分割によるFDMA (frequency division multiple access), 符号での分割によるCDMA (code division multiple access) でしょう。

最近では、アンテナ技術を併用した空間の分割によるSDMA (space division multiple access), 直交している周波数分割によるOFDMA (orthogonal frequency division multiple access), 周波数帯域幅が変わってもサブキャリア間隔を一定にするSOFDMA (scalable OFDMA), マルチパス対策を強化したOFCDMA (orthogonal frequency CDMA) なども提案されています。

TDMAやFDMA,CDMAの書籍は多いのですが、SDMA以降の新しい多元接続技術に関してはまだ少ないようです。筆者は大学の講義で使う書籍や文献を探しましたがなかなか見つからず、講師をしている大学の出版局に尋ねても同種の文献が見当たらないということでしたので、自分で『ワイヤレスブロードバンド技術 IEEE802と4G携帯の展開, OFDMとMIMOの技術』(根日屋英之, 小川真紀著)を出版することになってしまいました。自分の本の宣伝になってしまい恐縮ですが、技術的な詳細よりは概要を知りたいときに参考になる本だと思います。今、話題の数Mビット/秒のモバイル高速通信から、注目を集めている100Mビット/秒超の大容量通信について解説しています。さらに、ソフトウェア無線で、送受信する周波数/通過帯域幅を自在に切り替える再構成可能なりコンフィギュラブル (reconfigurable) 無線や、無線機が周囲の電波環境を認識してその電波環境に適応した周波数/周波数帯域幅/変調方式/多重化方式/送信出力などを自ら選択して、周波数の利用効率を高めようというコグニティブ (cognitive) 無

線の概要も書いています。

(c) 個々の無線システム 4種類のワイヤレス技術を学ぶ

筆者は、現在の無線システムは、通信環境や用途により (c-1) シングルキャリア, (c-2) マルチキャリア, (c-3) UWB (ultra wideband) のような超広帯域通信, (c-4) 無線移動識別 (RFID), の四つに分類できていると思っています。以下ではこの分類に沿って解説します。

(c-1) シングルキャリア

シングルキャリアの無線システムは、現在主力の通信システムで、FM音声などの狭帯域無線通信やCDMAの基本技術であるスペクトラム拡散通信など一つの搬送波 (キャリア) を用いて信号を送送する方式です (P34~P53ページの「製品企画から量産開始まで全16工程の手順と勘所」参照)。

スペクトラム拡散通信は、周波数を広い範囲に拡散して、干渉を少なくするシステムです。その代表的な直接拡散方式の動作原理は、信号に広帯域の周波数分布を持つ雑音 (符号) を送信側で掛け算し周波数を広げてから、空間に雑音のような電波として送信します。空間で多くのスペクトラム拡散通信の電波が飛び交う中で、送信側で拡散した符号列と同じ符号列を有する受信機が混信した電波の中から目的の通信相手の電波を抽出し、相互に通信できるようにした多元接続技術をCDMAと呼びます。

筆者はCDMAを知ったとき、多元接続技術の中でもこんなすごいシステムがあるのかと非常に驚きました。今でもスペクトラム拡散通信やCDMAはシングルキャリア通信の主流ですので、皆さんもぜひ勉強しておきましょう。これらの基本がしっかり書いてある本として、『スペクトラム拡散通信——高性能デジタル通信方式に向けて』(山内雪路著)がおすすめです。

(c-2) マルチキャリア

所定の周波数帯域に複数の搬送波を用い、そのおのおのの搬送波に変調をかけて情報を伝送する地上デジタル放送やOFDM (orthogonal



ワイヤレス・ブロードバンド時代を創る WiMAX (庄納崇著)



UWB/ワイヤレスUSB教科書 (阪田史郎著)

frequency division multiplexing) などのマルチキャリアの通信は、今後の大容量通信の主力になるとみられています。

とりわけ重要なのがマルチキャリアの変復調です。ハードウェアでは回路が複雑になるので、ソフトウェアを利用するデジタル信号処理で実現します。比較的新しい技術で、前述のように参考文献もまだ少ない状況ですが、『ワイヤレス・ブロードバンド時代を創るWiMAX』（庄納崇著）が分かりやすいと思います。また、インターネット上でOFDMをキーワードとして検索すると多くの情報が出てきますので、探してみてください。ワンセグについて、一般的に広く書かれている本として、『1セグ放送教科書』（羽鳥光俊著）があります。

(c-3) UWBのような超広帯域通信

情報の伝送と同時に測距機能も有するUWBが話題になっています。ワイヤレスUSB (universal serial bus) として、また高分解能レーダとして注目されています。

UWBは、製品化の観点で見るとスペクトラム拡散通信方式やOFDM方式、技術的な観点では測距などが興味深いインパルス方式がポイントになると思います。それらは『UWB/ワイヤレスUSB教科書』（阪田史郎著）などを読むと理解できるでしょう。

(c-4) 無線移動識別 (RFID)

RFIDは、ユビキタス構想で注目されています。今、話題になっているので、最近文献も豊富です。RFIDは、電磁誘導型RFID (125kHz や13.56MHz) と電波通信型RFID (UHF帯や2.45GHz) に分かれます。

RFID全般については、『これでわかったRFID』（日本自動認識システム協会編）で概観できます。電磁誘導型RFIDを勉強したい場合は『トコトンやさしい非接触ICカードの本』（荻部浩著）、電波通信型RFIDについて勉強したい場合は、筆者が執筆し大学の講義の教科書として用いている『ユビキタス無線工学と微細RFID——無線ICタグの技術（第2版）』（根日屋英之、植竹古都美著）があります。



無線通信機器

現場で役立つ
基本回路を学ぶ

無線通信機器の設計で基本になるのは、高周波回路設計です。高周波の電子回路の勉強では、実際に作ってみることが大切です。機器メーカーの技術者は、常に時間に追われています。このため、勉強したくてもなかなか時間が取れません。自分の仕事を通して、現場で経験を積み重ねて学んでいくのが最善といえます。

まずは、ベテランの技術を見習う、盗むことが大事です。自分が作ると発振したり動作が不安定になったりしがちですが、同じ回路でもなぜかベテランが作るとうまく動く——その差が何かを探し出したり、分からないときも、とにかくベテランのまねをしてみたりすることがかなり大切です。

書籍で基本的な知識を学んでおけば、そういう経験が頭で整理でき、実力がどんどんついてきます。高周波回路については、集中定数回路設計、分布定数回路設計、増幅器や変復調器の回路例、デジタル変復調技術、シミュレーションの書籍を仕入れておくとい良いでしょう。

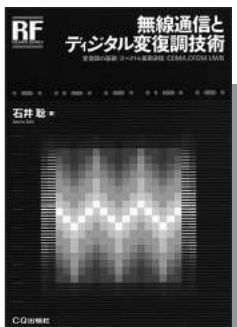
集中定数回路は、部品で回路を組んでいく世界です。『高周波技術センスアップ101——数M～数百MHzの高周波信号と上手につきあうために』（広畑敦著）が参考になります。分布定数回路は、プリント基板のパターンなどで実現します。『マイクロウェーブ技術入門講座 基礎編——マイクロストリップ・ラインの基礎からミキサ設計まで』（森栄二著）で学ぶことができます。

増幅器や変復調器の回路例については、『実験して学ぶ高周波回路——無線通信機の基本回路のすべて』（櫻井紀佳著）や『無線によるデータ変復調技術——ASKからCDMAまでデジタル変復調方式と無線モデム』（西村芳一著）が参考になります。

デジタル変復調技術は、最近ますます重要になっています。『無線通信とデジタル変復調技術』（石井聡著）や『RISC CPU (SH2) で実現する



これでわかった RFID
(日本自動認識システム協会編)



無線通信とデジタル変復調技術 (石井聡著)

DSP処理のノウハウ——変復調/フィルタ/FFT/SBC/DCT』(西村芳一著)で勉強できます。高周波回路のシミュレーションについては、『シミュレーションで始める高周波回路設計——GHz高周波信号のふるまいと回路の動作をパソコンで体験学習』(市川裕一著)がお薦めです。

このほかに推薦する無線回路の設計の参考書として、実践的な電子設計の雑誌が挙げられます。『トランジスタ技術』『Design Wave MAGAZINE』(共にCQ出版社)、無線専門誌、オーディオ専門誌などに参考となる記事が載っています。雑誌は単行本と異なり、その時々旬な部品を使った実験記事があります。また、回路設計者に向けた無料の雑誌や部品メーカーの技術情報にも、設計の基本的な考え方から具体的な設計に至るまで懇切丁寧に書かれたものが多くなってきました。

繰り返しになりますが、高周波回路設計の実力は、自分で考え自分で作らなければ身に付きません。筆者は小学生の時に、アマチュア無線に興味を持ちました。当時は少年漫画雑誌、ラジオ、テレビでもアマチュア無線の特集があり、一般的にも「ハム」として知名度がありました。凡人の筆者は、小学生のころは当然、難しい本などを読んでも分かりません。ともかく、東京の秋葉原(筆者は秋葉原の住人でした)に流れてくるアメジャンと呼ばれる米軍放出の無線機やラジオを、ノートを持ってスケッチに行ったり、初心者向けラジオ雑誌の実態配線図だけを見て、ともかくまねをしてラジオを作りました(回路図は読めなかった)。最初にスイッチを入れたときは、変なおいがして煙が出ましたが、回路を何度もチェックしてクリスタル・イヤホンから音が出てきたときの感激は今でも覚えています。

その後、大学の卒業研究でリニア・モーター・カーを研究し、自動車メーカーで自動車の電装装置を設計、24歳の時に電機メーカーに転職しましたが、それ以降は光通信や無線通信機器、アンテナ設計の仕事をしています。今でも仕事を楽しくできるのは、子供のころから実態配線図やアメジャンのまねをして、電磁波のイメージを感覚的に身に付けたことと、必ず動かせるという自信を得たことが大きいと思っています。

インターネット上でも文献に負けないくらい内容が濃く、有益な情報を公開しているWWWサイトがあります。前述のシミュレーションの本の著者である市川裕一氏のWWWサイト(<http://www1.sphere.ne.jp/i-lab/>)は、実践的な高周波回路設計の参考になります。私が大学で講義を持つようになった5年前に、実践的な設計を学生に教えたくて教科書を探したのですが、ピンとくる本が見つからず、市川氏から許可を頂いてこのWWWサイトの記事を教科書として使わせていただきました。その他、マスキシステムの設計支援のWWWサイト(<http://www.purple.dti.ne.jp/masuki-sys/page060.html>)、山添富雄氏のWWWサイト(http://jr6bij.hiyoko3.com/java_calc/)にも便利な設計ツールが満載です。



3 アンテナ

マルチアンテナの設計法を理解する

ワイヤレス製品は従来、狭帯域通信が主であったので、アンテナは共振回路として設計されていました。短波帯ラジオに接続するような受信用広帯域アンテナは受信する電力が非常に小さく、送信用に比べ高周波回路とのインピーダンス整合をそれほど厳密に設計する必要はありません。アンテナの利得が低くても、ラジオに入力される電波が雑音レベルよりもある程度強ければ、広帯域アンブを付加することによりアンテナの利得を補うことができました。ところが最近では、送受信共に高い性能を必要とするUWB用超広帯域アンテナが市場で求められるようになってきました。また、同じ空間で多くの無線機が共存してきたので、SDMA方式やMIMO (multiple input multiple output) 方式などマルチアンテナによる高性能化の研究が盛んで、実用化もされています。この技術はアンテナの知識に加えて、通信方式、電子回路、デジタル信号処理、電波伝搬特性などの知識も持ち合わせないと理解できません。

あらためて重要になってきたアンテナを基本か

ら学ぶときには、『アンテナ工学ハンドブック』（電子情報通信学会編）が定番です。また、『電波工学』（長谷部望著）もお薦めで、SDMA方式の基礎となるアレー・アンテナまで分かりやすく書かれているところが現状に合った本といえます（アレー・アンテナは長谷部氏の専門です）。

次に、アンテナの具体的な設計について参考になる本を紹介します。アンテナを技術的に解説している本では、電磁気学の式が多用されているか、逆にアマチュア無線のアンテナ製作集のように設計式が非常に少なく寸法図のみ書かれたものが多いようです。それぞれ大変役に立ちますが、まず具体的な設計事例が設計式と併記されている本を読みたいという方は、拙著『ユビキタス時代のアンテナ設計——広帯域、マルチバンド、至近距離通信のための最新技術』（根日屋英之、小川真紀著）を参考にしてください。また、アンテナもシミュレーションが設計支援ツールとして重要ですので、『パソコンによるアンテナ設計——アンテナ作りがやさしくなる楽しくなる』（小暮裕明、玉置晴朗、松田幸雄著）をお薦めします。

SDMA方式やMIMO方式など高機能化したアンテナ（フェーズド・アレー・アンテナやスマート・アンテナ）について参考になる本としては、『新世代ワイヤレス技術』（中嶋信生編）がかなり深い技術まで踏み込んで書いています。

また、東京工業大学の平野拓一氏のWWWサイトは、アレー・アンテナについて、アニメーションを多用して分かりやすく説明しています（<http://www-antenna.pe.titech.ac.jp/~hira/hobby/edu/em/array/index-j.html>）。

電波法の最新情報をキャッチする

ワイヤレス機器を設計するためには、電波法や業界団体の規格なども知る必要があります。電波法や規格などは逐次、最新情報を確認する必要がありますので、WWWサイトを参考にしましょう^{注1)}。文献としては『電波法令集』（電気通信振興会編）があります。電波法が変更されるとその部分が差し替えページとして送られてくる加除式の2冊組で、タイムリーに電波法の変更を知るには有益な文献です。



電波法令集（電気通信振興会編）

注1) 総務省が配布するメールマガジンをWWWサイト（http://www.soumu.go.jp/menu_00/melmaga/）から申し込んでみると、最新情報を毎日入手できます。

ここで紹介した書籍、文献一覧（紹介順）

①無線通信システム

デジタル移動通信方式

山内雪路著
東京電機大学出版局、2000年、2100円

シミュレーションで学ぶデジタル信号処理
——MATLABによる例題を使って身につける基礎から応用
尾知博著
CQ出版、2001年、2000円

デジタル信号処理による通信システム設計
——演算の実装から信号の変復調・誤り訂正まで
西村芳一著
CQ出版、2006年、3360円

ワイヤレスブロードバンド技術
IEEE802と4G携帯の展開、OFDMとMIMOの技術
根日屋英之、小川真紀著
東京電機大学出版局、2006年、2310円

スペクトラム拡散通信
——高性能デジタル通信方式に向けて
山内雪路著
東京電機大学出版局、2001年、2205円

ワイヤレス・ブロードバンド時代を創るWiMAX
庄納崇著
インプレス、2005年、2200円

1セグ放送教科書
羽鳥光俊著
インプレス、2005年、3990円

UWB/ワイヤレスUSB教科書
阪田史郎著
インプレス、2006年、3465円

これでわかったRFID
日本自動認識システム協会編
オーム社、2003年、2625円

トコトやさしい非接触ICカードの本
河部浩著
日刊工業新聞社、2003年、1470円

ユビキタス無線工学と微細RFID
——無線ICタグの技術
根日屋英之、植竹古都美著
東京電機大学出版局、2004年、2415円

②無線通信機器

高周波技術センスアップ101
——数M～数百MHzの高周波信号と上手につきあうために
広畑敦著
CQ出版、2003年、3150円

マイクロウェーブ技術入門講座 基礎編
——マイクロストリップ・ラインの基礎からミキサ設計まで
森栄二著
CQ出版、2003年、3780円

実験して学ぶ高周波回路
——無線通信機の基本回路のすべて
櫻井紀佳著
CQ出版、2003年、2520円

無線によるデータ変復調技術
——ASKからCDMAまで
デジタル変調方式と無線モデム
西村芳一著
CQ出版、2002年、2520円

無線通信とデジタル変復調技術
石井聡著
CQ出版、2005年、3360円

RISC CPU (SH2) で実現する
DSP処理のノウハウ
——変復調/フィルタ/FFT/SBC/DCT
西村芳一著
CQ出版、2000年、2310円

シミュレーションで始める高周波回路設計
——GHz高周波信号のふるまいと回路の動作をパソコンで体験学習
市川裕一著
CQ出版、2005年、3360円

トランジスタ技術
CQ出版社、月刊

Design Wave MAGAZINE
CQ出版社、月刊

市川裕一氏のWWWサイト
<http://www1.sphere.ne.jp/i-lab/>

マスキシステムのWWWサイト
<http://www.purple.dti.ne.jp/masuki-sys/page060.html>

山添富雄氏のWWWサイト
http://jr6bij.hiyoko3.com/java_calc/index.php

③アンテナ

アンテナ工学ハンドブック
電子情報通信学会編
オーム社、1980年、1万8900円

電波工学
長谷部望著
コロナ社、2005年、2940円

ユビキタス時代のアンテナ設計
——広帯域、マルチバンド至近距離通信のための最新技術
根日屋英之、小川真紀著
東京電機大学出版局、2005年、2415円

パソコンによるアンテナ設計
——アンテナ作りがやさしくなる楽しくなる
小暮裕明、玉置晴朗、松田幸雄著
CQ出版、1998年、2520円

新世代ワイヤレス技術
中嶋信生編
丸善、2004年、4305円

平野拓一氏のWWWサイト
<http://www-antenna.pe.titech.ac.jp/~hira/hobby/edu/em/array/index-j.html>

電波法の最新情報
電波法令集
電気通信振興会編、2006年、7245円

総務省のメール・マガジン
申し込みのWWWサイト
http://www.soumu.go.jp/menu_00/melmaga/