

柔軟性を追求したソフトウェア受信機

Flexible Radio Receiver based on "Software Radio"

UDC No. 621.396.62 : 681.3.06

黒田 政廣

Masahiro Kuroda

研究所 情報セキュリティ技術プロジェクトチーム

細谷 晴彦

Haruhiko Hosoya

研究所 情報セキュリティ技術プロジェクトチーム

1 まえがき

近年、「ソフトウェア」という単語を形容詞として使う例をよく見かける。例えば、ソフトウェア無線（機）、ソフトウェア受信（機）、ソフトウェア・アンテナ、ソフトウェア・モデムなどである。「ソフトウェア」と言うとコンピュータプログラムの印象が強いが、「ソフトウェア」を形容詞として使用した場合のそれは、「ハードウェアを最小限にして、必要とされる信号処理のすべてまたは大部分をソフトウェアで実現すること」を意味する。

もちろん、このような考え方は以前からあったが、これが最近特に注目されるようになったのには、CPU（Central Processing Unit）やDSP（Digital Signal Processor）の急速な高性能化/低価格化/低電力消費化などの技術的発達为背景にあり、以前は非効率的と思われていた実現方法が反対に効率的になってきたからにほかならない。

本稿では上に掲げたものの中でソフトウェア受信（機）を中心に解説する。また、当研究所でソフトウェア受信機を開発したのでその概要を紹介する。

2 ソフトウェア無線

ソフトウェア無線とは英語のSoftware Radioの日本語訳で、簡単に言うとソフトウェアで実現する無線機のことである。具体的には無線機能のすべて、もしくは大部分をソフトウェアで実現する無線機のことである。もとより、すべての無線機能をソフトウェアで実現することは現在の技術水準では不可能なので、アンテナ部、RFフロントエンド部・RF電力増幅部、周波数変換部を除いたその他の部分をソフトウェアで実現する。

一般に無線機とは送信機能と受信機能を備えた装置を意味するので、ソフトウェア無線機といった場合はソフトウェアで実現した送受信機を意味する。ただし、後述するように送

信機能を容易に変更できる無線機は電波法上問題があるので、実用的には受信機能のみをソフトウェアで実現した無線機に限定されることが多い。このようなソフトウェア無線機はソフトウェア受信機と呼ばれる。本稿ではこのソフトウェア受信機を中心に述べる。

2.1 ソフトウェア受信機の定義

現在ソフトウェア受信機の定義として受け入れられているのは以下のようなものである。

- マルチバンド、マルチモード、マルチプロトコル受信機
 - 特別な変調方式に対応した専用復調器を持たない
 - 特別な符号化方式に対応した専用復号器を持たない
 - プログラマブル周波数変換機能を備えている
 - 多様な変調方式に対応できるプログラマブル復調機能を有する
 - 多様な符号化方式に対応できるプログラマブル復号機能を有する
 - IF帯域幅を柔軟に変更できる（可能なら実行時に任意の特性のフィルタを実現できる）
 - さまざまな受信パラメーターを手動または自動によって変更できる
 - プログラムダウンロード機能を有し、容易に受信機能を変更できる
 - 要するに、受信機能のすべてもしくは大部分をソフトウェアで実現し、極限まで柔軟性を追求した受信機のことである。したがって、単にアナログ処理をデジタル信号処理で置き換えた受信機はデジタル化受信機とかプログラマブル受信機などと呼び、ソフトウェア受信機と区別して呼んでいる。ただし、両者の境界は必ずしも明確ではない。
- ### 2.2 ソフトウェア受信機の長所と短所
- ソフトウェア受信機の長所はすべて受信機能をソフトウエ

アで実現したことに起因する。それらを列挙すると以下のようになる。

無線機能（受信機能）の変更が極めて容易に行える。

ハードウェアが単純な構成であるので、装置の開発は主にソフトウェアの開発になる。

ハードウェアの開発の完了を待たずにソフトウェアの開発に着手でき、かつ機能ブロック間のインターフェースを明確にして機能ブロック毎に分散して開発を進められるので開発期間の大幅な短縮が図れる。

ハードウェアと違ってソフトウェアは資産の再利用が容易なので、結果的に開発費用の軽減が図れる。

ソフトウェアの置き換えによって容易に機能の改善が図れ、その結果製品寿命を長くできる。また、開発時点で予想できなかった機能も後で容易に組み込むことができる。

ソフトウェア主体で装置ができていますので、機能確認のためのコンピュータシミュレーションが容易であり、場合によってはコンピュータシミュレーションで開発したソフトウェアをそのまま装置に組み込むことができる。

ハードウェアでは実現困難な機能も比較的容易に実現できる。

一方、ソフトウェア受信機ならではの欠点も存在する。それらを列挙すると以下のようになる。

専用ハードウェアを使用することはソフトウェア受信機の定義に反するので結果的に処理可能な帯域幅がA/D変換器とDSPまたはCPUの性能で制限される。しかもそれは概して低速である。

一般にデジタル信号処理はアナログ信号処理と比較して高性能化が容易であるが、しばしばアナログ信号処理では容易に実現できる性能を達成できないことがある。例えば、高ダイナミックレンジ化とかスプリアス特性などがそうである。

大部分のハードウェアをアクティブ素子で実現するので、概して消費電力が大きくなりがちである。一方、パッシブ素子は電力を消費しない。

汎用性や柔軟性を追求するあまり、装置がオーバースペックになりがちである。

装置がソフトウェア主体で出来上がっているので、ソフトウェア開発の負担が大きい。とりわけデジタル信号処理の豊富な知識と経験が必要とされる。

本稿ではソフトウェア受信機に限定して記述しているが、

ソフトウェア無線機、つまり送信機能を備えたソフトウェア無線機の場合、自由に送信機能の変更ができることから現行法令では無線局として許可されない可能性が大きい。したがって、送信機能を備えたソフトウェア無線機を実用化する場合、法令等の見直しが必須である。

2.3 ソフトウェア無線のブームを引き起こした時代背景

すでに見てきたように、ソフトウェアで無線機能を実現すると言っても特別に新しい技術がある訳ではない。確かに超高速高分解能A/D変換技術や超高速デジタル信号処理技術などの最先端技術を必要とする技術ではあるが、考え方そのものに特別新規性がある訳ではない。実際、すでに述べたソフトウェア無線の考え方は、恐らくデジタル信号処理が発達した初期のころからあったと思われる。にもかかわらず、ここ数年、異常ともいえるソフトウェア無線のブームが起こったのにはいくつかの理由が考えられる。それらのいくつかを以下に列挙してみることにする。

通信技術とコンピュータ技術の発達。

高速大容量信号処理技術の発達。主にA/D変換器の高速化と高分解能化。

電波資源の枯渇化によりデジタル通信方式の高度化が促進され、その結果高度なデジタル信号処理技術が必要とされるようになった。

多様化する通信方式、変復調方式、音声・画像の符復号化技術に対応するために、信号処理に柔軟性が要求されるようになった。

通信方式の複雑化によりハードウェアでの通信システムの実現が困難になってきた。

なんと言っても、ソフトウェア無線のブームを引き起こした最大の理由は、超高速/高分解能/広帯域A/D変換器が市場に出回って来たことである。例えば、1999年初頭に標準化速度65MSPS、量子化ビット数14-bit、入力帯域幅300MHzのA/D変換器が紹介されている。このような高性能A/D変換器が市場に出回ると、過去には非現実的と考えられていた数百MHz帯のIF信号を直接A/D変換してデジタル信号処理することが可能になる。このようにキーデバイスの発達がかつての常識を覆し、新しい視点での受信機または無線機の構成法に関する再検討を余儀なくしている。

3 ソフトウェア受信機を実現する上でキーとなる技術

ソフトウェアで受信機能を実現するというのは、受信処理

をデジタル信号処理で行うことを意味するので、信号がデジタル化されていることが基本である。デジタル信号処理によって従来のアナログ信号処理受信機がもっている性能を維持し、かつ柔軟性を追求するのは必ずしも容易ではない。性能的にも柔軟性の点からも満足できるソフトウェア受信機を実現する場合、以下に列挙するキー技術を実現することが必要となる。

高速標本化技術

高ダイナミックレンジ量子化技術

高速データ転送技術

大容量データ蓄積技術

高速デジタル信号処理技術

マルチプロセッシング技術

マルチCPUまたはマルチDSP技術

リアルタイム信号処理技術

デジタル変復調技術

音声・画像の符復号技術

高度なデジタル通信技術

広帯域アンテナ技術および広帯域受信技術

アレイアンテナ信号処理技術

4 開発要点

4.1 サンプルング方式

ソフトウェアで受信機能を実現すると言ってもすべてをソフトウェアで実現することはもとより不可能である。ソフトウェア受信機は換言すれば受信機能をソフトウェア、つまりデジタル信号処理で実現することであるから、無線信号をデジタル化することは必須技術である。無線信号のデジタル化をどこでするかによって現在では以下の3方式が考えられている。

4.1.1 RF サンプルング方式

RF サンプルング方式は文字どおりRF信号をアンテナ直下で直接サンプルングする方式である。直流から比較的高いRF信号まで一括してサンプルングするのは技術的に困難なばかりでなく、回路構成上得策ではない。したがって、通常はRF サンプルングする信号は前置フィルターによって帯域制限された信号であることが多い。

RF信号が帯域制限信号であるならばアンダーサンプルング技術が採用できる。実際、RF サンプルング方式ではアンダーサンプルング技術を使ってサンプルングすることが多い。RF

サンプルング方式の利点はアナログ信号処理回路を最小限にできる点にあるが、直接サンプルングできるRF周波数とサンプルング周波数がA/D変換器の性能で決定されるのが欠点である。量子化ビット数にもよるが現在の技術水準ではRF サンプルング方式で実現できるRF周波数の上限は2～3GHz（量子化ビット数が8ビットの場合）、または300MHz（量子化ビット数が12～14ビットの場合）である。

RF サンプルング方式によるソフトウェア受信機のブロック図を図1に示す。

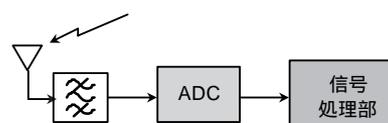


図1 RF サンプルング方式によるソフトウェア受信機のブロック図
Block diagram of RF sampling type Software Receiver

4.1.2 IF サンプルング方式

IF サンプルング方式は受信方式上の分類から言えばシングルコンバージョン受信方式に分類される。つまり、RF信号を周波数変換回路によってダウンコンバートまたはアップコンバートし、その変換後のIF信号をサンプルングする方式である。現在のソフトウェア受信機はこの方式を採用することが多い。

IF信号の比帯域、つまりIF信号の帯域幅とIF周波数との比（比帯域）を大きくとることは技術的に困難であるので、処理対象の信号の帯域幅が決まるとIF周波数の大よその値が決まる。一般的には上記比帯域の上限は0.1～0.2程度なので、例えばIF帯域幅が20MHzとするとIF周波数は100～200MHz程度となる。このような信号を直接サンプルングする場合、A/D変換器の入力帯域幅が上記IF周波数以上であることが必要である。

もとより、IF信号は帯域制限信号であるのでRF サンプルング方式と同様にアンダーサンプルング技術が採用できる。IF サンプルング方式は周波数変換回路を設けたことによってRF信号の周波数帯の制限を大幅に軽減する。局部発振器の周波数安定度などの性能が十分であれば、原理的にはRF信号の周波数帯の制限はない。実際的にはRF信号の周波数帯は数GHzから数十GHzまで、IF サンプルング技術によって処理できる。条件によっては光の領域までも同技術によって処理できる。

IF サンプルング方式はIF信号、つまり実信号（Real Valued Signal）をサンプルングする方式なので、受信信号処理で必要

とされる複素包絡信号 (Complex Envelope Signal) の抽出をデジタル信号処理で行う必要がある。複素包絡信号の抽出をデジタル信号処理で行うことから、アナログ信号処理で同処理を行う場合に問題になる直交度とIQバランスの問題を大幅に回避できる。このことがソフトウェア受信機をIFサンプリング方式で実現することの最も重要な動機づけとなっている。

デジタル信号処理では周波数推移 (Frequency Shift) とフィルタリングは容易に実行できるから、周波数変換回路で必要になる局部発振器の周波数シンセサイザの周波数設定分解能は比較的荒くて良い。このことは周波数シンセサイザの設計を容易にし、結果として実現回路の小型化、低廉化が達成できる。

IFサンプリング方式によるソフトウェア受信機のブロック図を図2に示す。

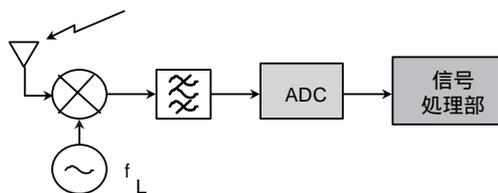


図2 IFサンプリング方式によるソフトウェア受信機のブロック図
Block diagram of IF sampling type Software Receiver

4.1.3 ベースバンドサンプリング方式

ベースバンドサンプリング方式はRF信号を周波数変換技術によってベースバンド信号に変換してからA/D変換する方式である。RF信号を直接ベースバンド信号に変換するのはRF信号の帯域幅を制限することから得策ではないので、通常はRF信号をいったんIF信号に変換してから、そのIF信号をベースバンド信号に変換する方法が用いられる。したがって、ベースバンドサンプリング方式は、受信方式の分類からいえばダブルコンバージョン受信方式と言うことになる。

この方式は複素包絡信号抽出 (直交復調) をアナログ信号処理で行うので直交度とIQバランスの問題があるのが欠点である。本方式とIFサンプリング方式とは直交復調をアナログ信号処理で行うかデジタル信号処理で行うかだけの違いである。

本方式ではIQ分離した後でサンプリングを行うのでIFサンプリング方式と比較してA/D変換の速度を半分にできるがA/D変換器は特性の一致したものが2個必要となる。サンプリング後の複素包絡信号の帯域幅で比較すると同じサンプリング速度のA/D変換器を用いてIFサンプリングした場合の2倍になる。

これはベースバンドサンプリング方式の唯一の利点である。そのためA/D変換器の変換速度の制限から広帯域信号処理が必要な場合には現在でもこの方式が用いられることがある。しかし、最近のA/D変換技術とデジタル信号処理技術の発達によってベースバンドサンプリング方式で実現することの必要性が少なくなってきたので、現在ではすたれた方式となっている。

ベースバンドサンプリング方式によるソフトウェア受信機のブロック図を図3に示す。

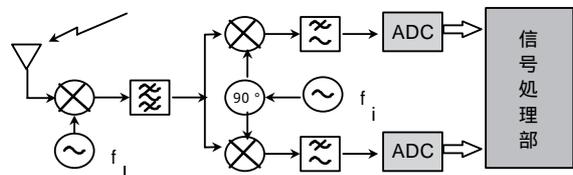


図3 ベースバンドサンプリング方式によるソフトウェア受信機のブロック図

Block diagram of Baseband sampling type Software Receiver

4.2 アンダーサンプリング技術

帯域幅B Hzの信号を標本化する場合、標本化定理から帯域幅の2倍以上、つまり2B Hz以上の標本化周波数で標本化しなければならない。ただし、この制限は被標本化信号のスペクトラムが直流を含むB Hzまで全帯域で存在することが条件である。IF信号のようにスペクトラムがIF周波数を中心に分布し、それ以外の帯域には実質的なスペクトラムが存在しない場合、これから述べるアンダーサンプリング技術が採用できる。ただしこの場合、スペクトラムの折り返しが生じるので、折り返しの結果、元のスペクトラムが重ならないように標本化周波数を慎重に選ぶ必要がある。

いまIF周波数 f_i 、帯域幅BのIF信号を標本化周波数 F_s で標本化する場合を考える。この場合、標本化後のスペクトラムが重ならない条件から標本化周波数 F_s は以下の条件、 $F_s > 2B$ を満たす必要がある。つまり、IF信号をアンダーサンプリング技術によって標本化する場合、標本化周波数はIF信号の周波数 f_i ではなくIF信号の帯域幅Bによって制限される。この場合、直流から f_i までのスペクトラムが何重にも折り返されてしまうが、もともと実質的なスペクトラムを有さない領域なので通常は問題にならない。しかし、IF信号が十分に帯

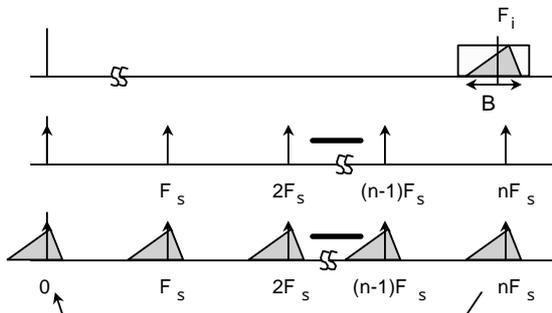


図4 アンダーサンプリングの概念図
Under sampling

域制限されていない場合この限りでないので注意が必要である。

図4にアンダーサンプリングの概念図を示す。ただし信号は複素包絡信号で表わしている。

4.3 複素包絡信号抽出

IFサンプリング方式によってソフトウェア受信機を実現する場合、複素包絡信号 (Complex Envelope Signal) の抽出は必須技術である。なぜなら一部の信号処理、例えば包絡線検波によるAM変調波の復調など、を除いて殆どの信号処理が複素包絡信号を必要とするからである。

実信号から複素包絡信号を抽出する方法にはいくつかあるが最も効率的な方法は標準化周波数の1/4の周波数で元の信号を周波数推移 (Frequency Shift) して、帯域幅が標準化周波数の半分のフィルタでフィルタリングして、最終的に標準化データを1:2で間引く方法 (Decimation) である。

推移周波数を標準化周波数の1/4に設定することは周波数推移処理を効率的に行うために極めて重要な条件である。一般に周波数推移処理は正弦関数および余弦関数を含んだ処理を必要とするが、これらの処理をデジタル信号処理で行うと複雑で時間のかかる処理となる。ところが、推移周波数をちょうど標準化周波数の1/4に選ぶと、これらの処理を大幅に軽減できる。それは正弦関数および余弦関数の引数が $\pi/2$ の整数倍の場合、関数値が0, 1, 0, -1, および1, 0, -1, 0の繰り返しになるので三角関数計算と周波数推移で必要とされる乗算を省略または符号反転の処理に置き換えることができるからである。

一方、周波数推移後の信号を帯域幅が標準化周波数のちょうど半分、つまり遮断周波数が標準化周波数の1/4の低域通過フィルタで帯域制限することも重要な条件である。窓関数手法によるFIR (Finite Impulse Response) 低域通過フィルタ

の設計理論によれば上記の条件で設計した奇数次フィルタのインパルス応答は原点を除いた偶数次の係数がゼロになることが知られている。FIRフィルタの計算量は概略フィルタの係数長の二乗に比例するので、上の条件で設計したフィルタの計算量を概略1/4にできる。ただし、窓関数手法によって設計したFIRフィルタは遮断特性が必ずしも十分ではないので、後の処理で十分な特性のフィルタでフィルタリング処理する必要がしばしば生じる。

帯域幅が標準化周波数の半分のフィルタはハーフバンドフィルタ (Half Band Filter, 以下HBFと略) と呼ばれている。周波数推移とHBFによってフィルタリングされた信号は標準化定理から標準化周波数を元の標準化周波数の1/2にできる。ただし、すでに述べたように窓関数手法により設計されたフィルタは遮断特性が十分ではないので、標準化周波数の軽減、つまり間引き処理によって遮断周波数近傍のスペクトラムが折り返し歪の影響を受ける。同フィルタの特性にもよるが概略 $\pm F_s \times 0.45 \sim 0.5$ の範囲が折り返し歪の影響を受ける。したがって、この領域の信号は実質的に使えない領域である。必要に応じて以後の処理でフィルタリングすることになるが、標準化前のIF信号がすでにIFフィルタによって帯域制限されていて折り返し歪を受ける領域にはもともと実質的なスペクトラムが存在しない場合、その必要がない。

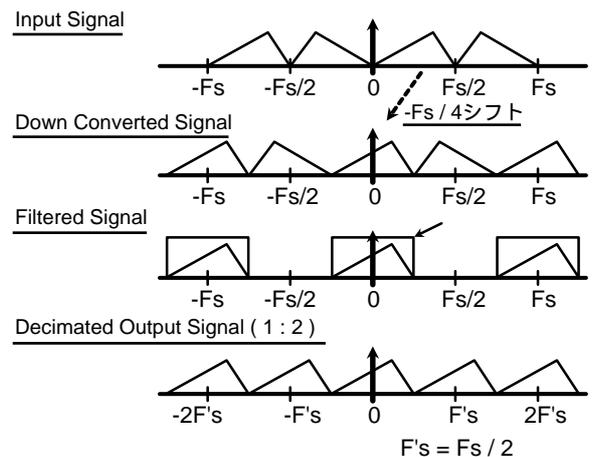


図5 HBFの格段のスペクトラム
Frequency shift by $F_s/4$ and 1:2 decimation after filtering

5 ソフトウェア受信機のハードウェア構成

開発したソフトウェア受信機は広帯域受信部、ソフトウェア受信部、および遠隔操作部の3部から成る。ソフトウェア受信部はディスプレイとキーボードを接続して遠隔操作部の機能を兼用することもできる。以下にソフトウェア受信機のシ

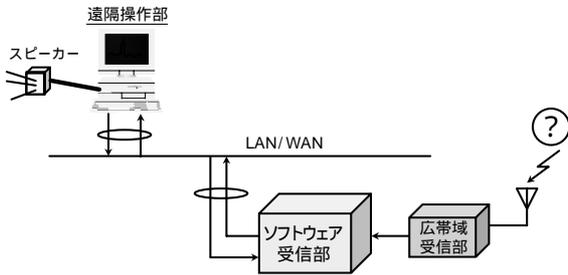


図6 ソフトウェア受信機のブロック図
Block diagram of Software Receiver

表1 広帯域受信部の主要性能
Specifications of UHF/VHF Receiver used in this System

<項目>	<仕様>
受信帯域幅	20 ~ 2,000MHz
同調分解能	10Hz
IF出力周波数	21.4MHz
IF出力レベル	- 13dBm
IF帯域幅	12kHz, 50kHz, 250kHz, 4MHz (opt)

システム図を示す。

5.1 広帯域受信部

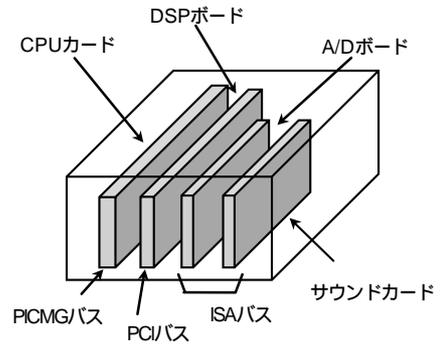
広帯域受信部は外部にIF信号を出力できるUHF/VHF受信機である。本受信部の主要性能を表1に示す。

本ソフトウェア受信機ではこの広帯域受信部をRFフロントエンド部として使用している。したがって、同受信部のIF帯域幅選択機能とチャンネル選択機能を除き、AM/FM復調機能などを含む多くの機能は使用していない。ただし、AGC (Automatic Gain Control) 機能は必要に応じて使用することができる。

5.2 ソフトウェア受信部

ソフトウェア受信部はIBM PC互換パーソナルコンピュータ(以下PCと略)上に構築した信号処理部で、本システムの中心を成すものである。標準構成のPCに後述するA/D変換ボード、DSPボード、およびサウンドボードを付加している。図7にソフトウェア受信部の構成図を示す。

今回は可搬性を考慮して特殊なケースを用いたが、前述のボード類を実装できるPCならば自由に選ぶことができる。ただし、本ソフトウェア受信部上で符号化音声の復号も行う場合、上記相当のCPUとRAMサイズが必要である。すでに述べたように、本受信部はディスプレイとキーボードを接続して遠隔操作部を兼用することもできる。今回は実装しなかったが、本受信部は原則として無人の環境でも動作しなければならないので、自動リブート機能(例えばウォッチドックタイ



- ケース
- 品名 IPC-6806P(ADVANTECH製)
- 1 PICMG/3 PCI/2ISA
- 393x166x178(mm) 150w
- CPUカード
- 品名 PCA-6159F(ADVANTECH製)
- PenMMX233MHz
- SCSI内蔵 RAM64MB
- VGA(VRAM2MB)
- 10BaseT
- A/Dボード(開発品)
- 12bit 51.2Msps
- Buffer 128k x 32bit
- DSPボード(Spectrum製)
- 品名 Darlington(800-00055)
- (PCI, 21062x2個, 128k x 48)
- 品名 SHARCPAC-DSP8(800-00029)
- (21062x8個)
- サウンドカード(CREATIVE製)
- SB16WS/DV

図7 ソフトウェア受信部の構成図
Configuration diagram of Software Receiver

マー)を組み込むなどしてハングアップ対策をとっておく必要がある。

5.2.1 A/D変換ボード

A/D変換ボードは、高速高分解能A/D変換器、HBF(Half Band Filter)、周波数推移回路、PLD(Programmable Logic Device)を主な構成要素とするフレキシブル高速高分解能A/D変換ボードである。

図8に今回開発したA/D変換ボードのブロック図を示す。

ここで、信号の流れに従って各回路ブロックの動作を説明する。広帯域受信部からのIF信号出力は本A/D変換ボードの

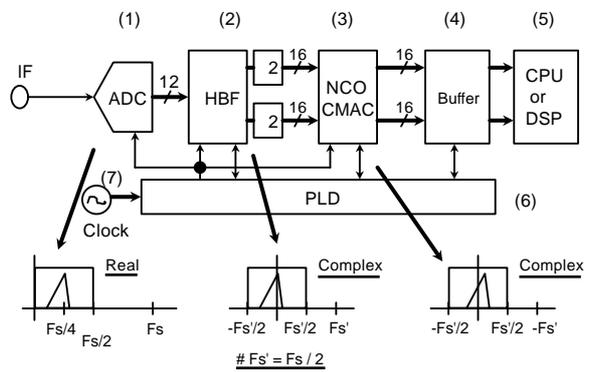


図8 A/Dボードのブロック図
Block diagram of A/D board

入力端子に導かれ、A/D変換器(1)によって標準化および量子化されデジタル信号となる。このときの標準化信号は基準発振信号をPLD(6)の中にプログラミングされたN分周回路によって作り出される。なお分周比を決定する整数NはISAバスまたはリンクポートを経由して外部から設定可能である。

前述のデジタル化された信号はHBF(2)に導かれ、そこで周波数が標準化周波数のちょうど1/4の互いに直交する2つの信号によって乗積検波(Product Detection)、つまりダウンコンバートされる。この時点で2つの乗積検波出力は一对で複素包絡信号の実数部信号と虚数部信号を構成する。

この一对の信号はそれぞれHBFに内蔵された遮断周波数が標準化周波数のちょうど1/4のFIR低域通過フィルタによってフィルタリングされる。さらに、低域通過フィルタから的一对の出力サンプルはそれぞれHBFに内蔵された間引き回路によって間引き率1:2で標準化データを間引かれる。

この間引き後のサンプルデータは複素乗算器(CMAC-Complex Multiplier Accumulator)(3)に導かれ、そこで周波数推移演算を施される。このときの推移周波数は、前述の複素乗算器に内蔵されたNCO(Numerically Controlled Oscillator)の発振周波数によって決定される。なお、NCOの発振周波数は前述のN分周器の分周数と同様に、ISAバスまたはリンクポートを経由して外部から制御される。

CMACによって周波数推移を受けたサンプルデータはBuffer(4)に導かれ、一旦蓄積される。このBufferは前述の標準化周波数に同期して動作する本ボード上のすべての回路と、標準化周波数とは非同期で動作する後段のCPUまたはDSPとの間のデータフローをスムーズにする重要な働きを担う。

以上がA/D変換ボードの動作である。これまでの説明を要約して以下に示す。

アナログ信号をデジタル信号に変換

入力信号を標準化周波数の1/4で周波数シフトし、HBFにより低域通過フィルタリングし、その後、間引き率1/2でサンプルデータの間引きを行いベースバンド複素信号を抽出

NCOにより任意の周波数を発生させ、CMACの複素乗算により信号を周波数シフトさせる

複素信号に変換されたデータの一時蓄積

CPUやDSPによる信号処理

5.2.2 DSPボード

ソフトウェア受信機の中心的役割を果たすのが本DSPボードである。本システムではDSPボードとしてPCIバス仕様のフルサイズボードを採用している。このボードには2個のアナログデバイス社製SHARC DSP(ADSP20160 or ADSP21062)が標準で搭載している。

さらに、本ボードは前述DSPを8個搭載したSHARC PACKを2枚まで装着することが可能である。したがって、1枚のDSPボードで最大18個までのSHARC DSPを搭載することができる。典型的なIBM PC互換機ではフルサイズのPCIボードを2枚まで搭載することができるので、本システムの最大DSP搭載能力は36個ということになる。

参考までにDSPソフトの開発環境およびランタイムソフトの概要を以下に示す。

コンパイラ	Analog Devices社製 g21kコンパイラ
ランタイムライブラリー	Spectrum社製 APEX-Pro for Windows NT

5.2.3 サウンドボード

復号後の音声データは原則として後述する遠隔操作端末で再生するので本ソフトウェア受信部では音の再生装置は必須ボードではないが、ソフトウェアの開発およびデバック上の利便性から音の再生装置を備えている。本システムではIBM PC互換機での事実上の業界標準サウンドボードであるところのCreative Sound Blaster 16を標準装備している。

5.3 遠隔操作端末部

遠隔操作端末部はシステムと人間のインターフェースを担う部分で、ソフトウェア受信部と同様にIBM PC互換PC上に実装される。表2に本開発で使用した遠隔操作端末部の主要性能を示す。

表2 遠隔操作端末部の主要性能
Specifications of PC used as Remote terminal

CPU	Pentium MMX 266 MHz
RAM	128 M Byte
HDD	4.3 G Byte
LAN	10 Base-T/100 Base-TX
Sound	Sound Blaster Pro
OS	Windows-98 and PC Unix (Linux)

本端末部はWindows 98環境およびPC Unix環境で動作するが、一部の機能はPC Unix環境でのみ動作するので、普通はPC Unix環境で動作させる。本端末部をWindows 98環境で使

用するときはTelnet等の端末ソフトを使用することになる。また、本端末部を使用して変調波解析を行う場合、X端末の機能が必要である。現時点でWindows 98環境上で動作する音声復号プログラムおよびリアルタイム音声再生プログラムは開発していない。

すでに述べたように、符号化音声の復号とリアルタイム音声再生は本端末で処理する必要があることから、本端末のCPUには比較的処理能力の高いものが要求される。Pentium MMX 200MHz相当が必要である。

現時点で本端末が対応している音声符号化方式を表3に示す。

表3 対応した音声符号化方式
Supported speech codecs

RAW 8-bit Linear (Offset Binary)	Fs = 5kHz - 44.1kHz, Mono or Stereo
RAW 16-bit Linear (Nat. Binary)	Fs = 5kHz - 44.1kHz, Mono or Stereo
Log-compressed	ITU-T G.711 μ -Law/A-Law 64kbit/s
ADPCM	ITU-T G.721/G.726 40/32/24/16kbit/s
CVSD M	64/56/48/40/32/24/16kbit/s

本システムではリアルタイム音声再生をする必要があることから、表3に掲げた音声符号化方式に対応した復号プログラムを開発した。線形音声データまたは符号化音声データは今回のソフトウェア受信機向けに特別に設計されたOSI参照モデルのアプリケーション層プロトコルに従って転送される。ただし、OSI参照モデルのトランスポート層以下のプロトコルにはTCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) を使用している。

復号プログラムの役割はLANを経由して送られてくるTCP/IPパケットを受信して、必要な符号化音声データを抽出し、復号し、最後にその復号化音声データを本端末部に実装された音声再生ボードにDMA (Direct Memory Access) 転送することである。

汎用性と利便性を考慮して復号プログラムは自動起動可能なデーモンプログラムとして設計した。

本システムで使用するDSPプログラムはWindows NT4.0環境で開発する必要があることから、本端末部にはDSPプログラムの開発環境は構築されない。したがって、あらかじめオフラインで開発したDSPプログラムのロードモジュールを本端末のハードディスクに保存しておき、必要に応じてPC Unix上で動作するプログラムローダーによって前述のDSPボードにダウンロードすることになる。

処理速度の関係で大部分の受信処理(復調処理その他)は

DSPボード上で処理されるが、本端末上のCPU処理能力で十分な場合はソフトウェア受信部を高機能A/D変換ボードとして使用し、受信処理を本端末部で行わせることができる。変調波の解析処理等の様に処理にリアルタイム性が必要ではない場合、むしろこの形態で処理することが多い。

参考に本システムを使用して 1/4-Shift QPSK 変調信号を解析した例を図9に示す。

6 ソフトウェア受信機の主要性能

開発したソフトウェア受信機の主要性能を表4に示す。

表4 ソフトウェア受信機の主要性能
Specifications of Software Receiver

<項目>	<仕様>
復調方式	アナログ AM, FM デジタル BPSK, QPSK, 1/4-Shift QPSK, 8-PSK, 16-QAM, FSK, MSK, GMSK
アクセス方式	FDMA (SCPC), TDMA
変調速度	10.24 M symbols/s Max. (= Fs \times 0.2)
音声符号化方式	ITU-T G.711 μ -Law/A-Law 64kbps, ITU-T G.721/G.726 40/32/24/16 kbps ADPCM, 64/56/48/40/32/16 kbps CVSD- M
対応プロトコル	RCR-STD-28 in Japan (Personal Handyphone System)
標準化周波数	51.2M samples/s Max.
IF入力周波数	100MHz Max.
解析帯域幅	20.48MHz Max. (= Fs \times 0.4)

表4から明らかなように現在固定/移動/衛星(衛星移動を含む)通信方式に採用されている代表的な変調方式を網羅している。処理可能なシンボルレート(変調速度)も10.24M symbols/s (QPSKで換算して20.48M bit/s、および16-QAM換算で40.96M bit/s相当)と現在実用化されている通信システムにも十分に対応できるスペックとなっている。ただし、処理可能な最大シンボルレートを決定しているのは解析帯域幅の上限値なのでロールオフ率によっては同数値は若干増える。

上に掲げたすべての条件でリアルタイム信号処理が可能な訳ではないが情報速度として32kbit/s ~ 64kbit/s相当の情報速度まではPHS (Personal Handyphone System) 信号リアルタイム復調/復号をDSP数個で処理できることで確認している。

情報速度の関係でリアルタイム処理ができない場合でも、ホストコンピュータのRAM (Random Access Memory) サイズの範囲内で大容量データ(複素包絡信号で数十Mサンプル)を連続蓄積できる能力を持っているので、本システムのアプリケーションの範囲をさらに広げるものと期待している。

7 むすび

これまでの説明から明らかとなり、ソフトウェア受信機の性能を決定しているのはDSPの信号処理能力よりむしろ、A/D変換器の標準化周波数と量子化ビット数である。

もちろん、A/D変換器を複数個並列に並べてPolyphase A/D変換することによってA/D変換の標準化速度を上げる技術は存在するが、これにしても限界が有るのは事実である。

一方、高速広帯域ソフトウェア受信機を実現する場合DSPの信号処理速度も重要なファクターではあるが、こちらの方の問題は必要に応じて数百個までのマルチDSP構成に適するDSP (SHARC DSP) の出現によってすでに克服していると言っている。

それにしても、標準化速度80M samples/s、量子化ビット数14-bit、入力帯域幅300MHzの仕様を誇るA/D変換器が小さなサイズ/低消費電力/低価格で市場に出回るとなると通信技術を代表に、あらゆる電気産業に与えるインパクトは決して少なくないと思われる。

まさに「材料は揃った、後はこれをどう料理するか」の心

境である。ややもするとソフトウェア受信、およびソフトウェア無線は「バベルの塔」と冷ややかな目で見られがちであるが、A/D変換の技術の発展を代表に周辺技術の成熟を見るにつけ、まさに好機到来の感があるのも事実である。過去の技術の発展の歴史を振り返ってみて、このこと的確かな手応えを感じる。

今回発表したソフトウェア受信機の性能は必ずしも満足できるものではないが、当研究所では、本開発を「バベルの塔」を「平凡な技術」にすべく「チャレンジ」の第一歩と位置付けて取り組んできた。今後は、今回開発したソフトウェア受信機をベースに市場の要求に応えるべく高性能ソフトウェア受信機の開発に取り組みたいと考えている。

参考文献

- 1) 細谷, 黒田, 塩入: “ソフトウェア受信機を考慮したハードウェア構成の検討” 1999年電子情報通信学会総合大会 論文番号B-5-78
- 2) 石井, 山本, 樋口: “電波監視を考慮したソフトウェア受信機の開発” 1998年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会 論文番号B-5-47

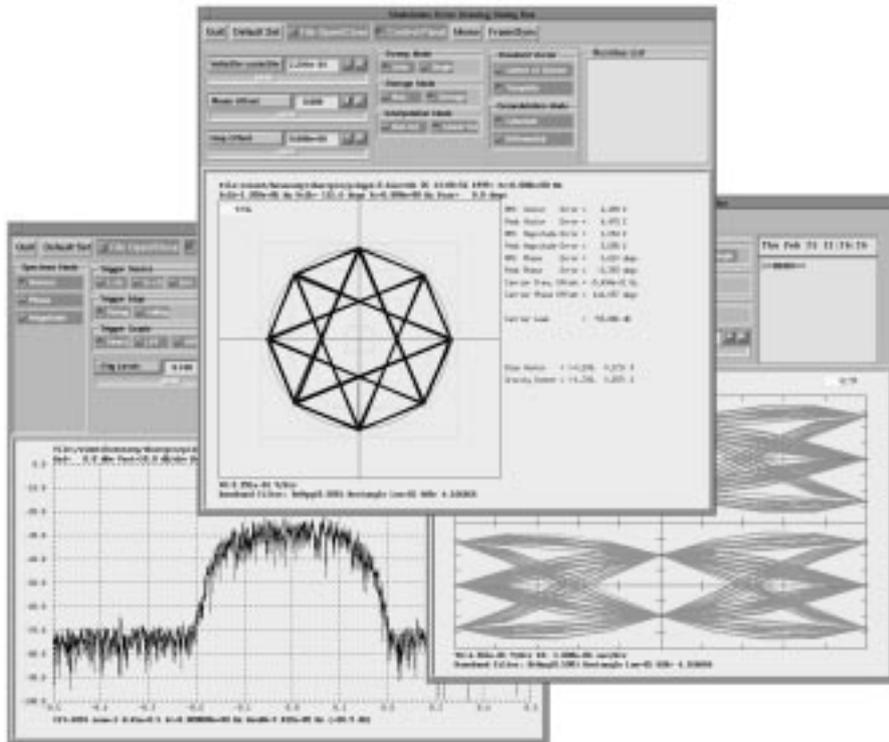


図9 解析画面のスナップショット
Snapshot of Analyzing display