

# デジタル信号処理を採用した高性能短波帯受信機

High-performance HF band Receiver using DSP Technology

UDC 621.396.62 : 621.3.029.55 : 621.317.35

大塚 敏正	Toshimasa Otsuka	情報通信事業本部	通信システム事業部	技術部
對馬 直樹	Naoki Tsushima	情報通信事業本部	通信システム事業部	技術部
村上 徹	Toru Murakami	情報通信事業本部	通信システム事業部	技術部
舟窪 雅人	Masato Funakubo	情報通信事業本部	通信システム事業部	技術部
福田 善雅	Yosimasa Fukuda	情報通信事業本部	通信システム事業部	技術部
阿部 進	Susumu Abe	情報通信事業本部	通信システム事業部	技術部

## 1 はじめに

PDC, PHSを始めとする携帯電話の普及により無線通信は我々の日常生活の一部となっており、次世代移動通信であるIMT2000やMMAC等の研究もますます盛んになっている。このような状況の中で、電波の不法利用による公衆通信システムへの悪影響の排除や、さらなる電波の有効利用を可能とする技術の推進が不可欠となっている。

そのため、正しい電波利用の管理・指導を行うための制度改革や機材などの導入<sup>1)</sup>が行われているが、より高精度で柔軟性のある電波監視機材の研究も各方面で行われている。例えば到来電波の混信、マルチパスなどの状況を推定するMUSIC法<sup>2)</sup>や、ESPLIT法<sup>3)</sup>などの高性能電波到来方向推定技術ならびにさまざまなデジタル通信波を自在に受信できることを目的とするソフトウェアラジオ<sup>4)</sup>などの研究の動き等がこれである。

また次世代の通信システムにおいてはアダプティブアンテナ等の技術を駆使して不要電波の除去や有効電波へのビーム選択受信などを行う、きめの細かい無線通信システムの研究が盛んである<sup>5)</sup>。

これら次世代の技術はいずれも到来電波の位相・振幅成分をデジタル信号処理演算により解析し、所定の目的を達成しようとするものであるため、電波を受信する受信部の基本性能には従来にまして精密な周波数変換性能や復調性能が要求されている。

アンリツは短波帯、V/U帯および準マイクロ波帯の各種の電波監視用受信機を開発・製造し、次世代システムに対応で

きる受信機の研究を継続して来たが、このたび筆者らは短波帯向けに中間周波段以降の回路をデジタル信号処理化し、受信時の位相群遅延歪みと相互変調特性に優れた電波監視用受信機を開発したので、その開発方針、方式および性能について述べる。図1にRR111A受信機の外観を示す。



図1 RR111A 受信機外観  
External view of RR111A

## 2 基本方針

短波受信機を高性能電波到来方向推定装置等へ応用するためには、中間周波信号出力における位相の群遅延偏差を極力少なくする必要があり、目標性能を帯域幅3kHzにおいて30 $\mu$ s以下とした。この性能を従来方式の水晶フィルタにて実現することは事実上不可能であり、デジタル信号処理を駆使した中間周波フィルタ回路を設計する必要があった。さらに筆

者らは、アナログ回路で構成されていた部分をデジタル化することは機器の高性能化と共に小型化およびローコスト化に繋がることから、フィルタ回路に留まらず AGC 回路・復調回路等の中間周波数域以降の全回路をデジタル信号処理により実現することとした。

中間周波フィルタをデジタル信号処理で実現するため、受信信号は A/D 変換によるデジタル化の以前では緩やかな帯域制限しか行うことができない。このため、比較的広帯域の信号を A/D 変換可能なレベルまで増幅する必要があるが、この信号を従来回路のまま増幅を行うと受信機の相互変調特性を劣化させることになる。今回の開発では高周波回路や周波数変換回路等の基本回路ブロックにおける相互変調性能を大幅に改善させ、受信機総合の相互変調特性値をアナログ方式の受信機より更に向上させることを目標とした。

主な性能の目標を以下に示す。

- (1) 受信周波数範囲 90 kHz ~ 30 MHz / 同調分解能 1 Hz
- (2) 中間周波フィルタ群遅延偏差：  
規格 80 μs, 目標 30 μs 以下
- (3) インターセプトポイント：  
規格 + 20 dBm 以上, 目標 + 25 dBm 以上

### 3 構成

本機の構成を図2に、特徴を以下に示す。

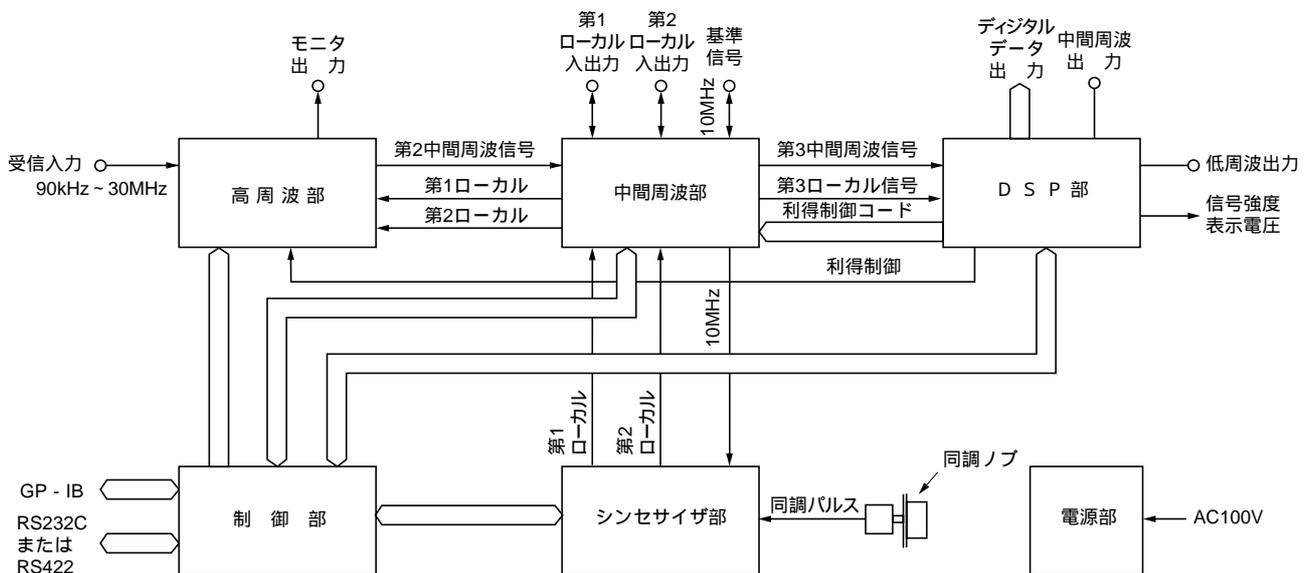


図2 RR111Aの構成  
Block diagram of RR111A

(1) 第1中間周波数を受信周波数範囲の上限以上に設定するアップコンバージョン方式を採用し、上限と下限の比が300以上におよぶ受信周波数範囲を一つの系統でカバーした。

(2) トリプルスーパーヘテロダイン方式を採用し、受信信号の周波数を十分に低い周波数に変換したため、3次相互変調歪がフルスケールに対して - 98 dB 以下の低歪の A/D 変換器を採用できた。

(3) シンセサイザの制御には専用の CPU を使用し、周波数切換え時間を短縮し、遅れのない滑らかな同調ノブの操作感覚を実現した。

(4) 受信選択度を決定するバンドパスフィルタ機能・AGC 機能・復調機能および信号強度の検出機能をデジタル信号処理により実現し、急峻な選択度特性と平坦な群遅延特性および低歪の復調性能を得た。

(5) 高周波部および中間周波部の利得を制御することにより、受信機入力レベルの 150 dB 以上の変化に対して直線性を確保した。

(6) 第1ローカル信号および第2ローカル信号の外部への出力または入力を備え、MUSIC法などのマルチチャネル受信を必要とする方向探知システムへの対応を可能にした。

#### 3.1 高周波部

高周波部は、受信入力信号を周波数 455 kHz の第2中間周波数に変換する部分である。

図3にその系統を示す。

受信入力段には強力な妨害波や外来雑音の影響を軽減する減衰器とセルフテストのための発振器を備えた。

本機の第1周波数変換回路のために、3次インターセプトポイントが+30 dBm以上の相互変調特性を持った低損失のミキサと、100 MHz以上の周波数でも大振幅(約20 Vpp)のローカル信号をミキサに供給できる駆動回路を新たに開発した。また、第1周波数変換回路と第1中間周波フィルタの間に挿入される増幅器は特に低雑音、低歪が要求されるが、本機では雑音指数を悪化させずに多量の負帰還をかけられる回路を開発し採用した。

以上により、第1周波数変換回路以降の雑音指数は最大12 dBと低い値が実現できたため、第1周波数変換回路の前段に高周波増幅器を挿入しない状態で十分な感度が得られた。そのため、特に高感度が必要な場合のみ利得約6dBの増幅器が挿入できる設計とした。

ミキサのインターセプトポイントの向上と、第1周波数変換回路以前の増幅器の省略により、全体のインターセプトポイントが従来機に比較し10 dB以上改善できたため、従来機では比帯域1.5倍程度のバンドパスフィルタを切替えていたプリセレクタを省略し、カットオフ約32 MHzのローパスフィルタのみで十分な妨害波除去能力が得られた。

利得制御のための可変減衰器はPINダイオードにより構成される。この減衰器は、減衰量可変のための直流電流を正確に制御することで、減衰量の大小にかかわらず低いVSWR値(1.5以下)を維持することができた。これにより、利得を可変した場合の位相特性の変化を最小限に留められた。

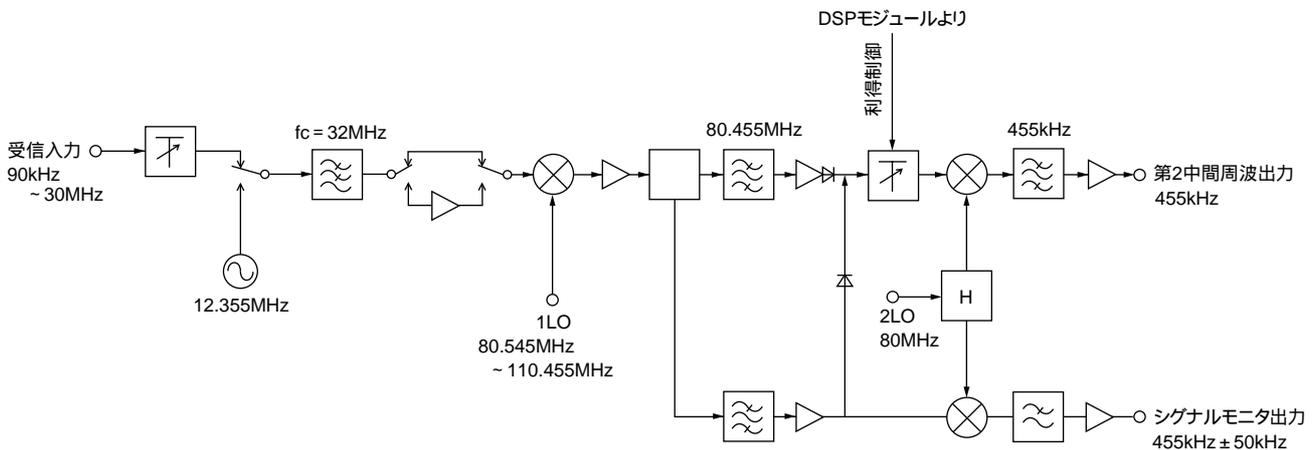


図3 高周波部の構成  
Block diagram of RF section

第1中間周波フィルタ以降に使用する増幅器についても十分な負帰還をかけて歪を低減し、帯域内相互変調特性を改善した。

### 3.2 中間周波部

中間周波部は、第2中間周波数を第3中間周波数である25 kHzに変換する部分である。図4にその系統を示す。

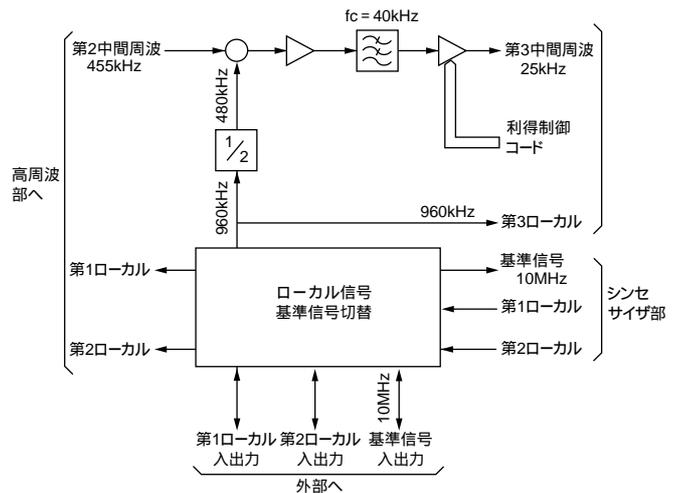


図4 中間周波部の構成  
Block diagram of IF section

本機は、帯域幅として最大20 kHzまでを有する。

帯域幅は第3IF信号をDSP部が処理することで決定される。そのため、高周波部でのアナログフィルタによる帯域幅は20kHzより広くする必要がある。したがって強力な近接妨害波が前記アナログフィルタの帯域内に存在すると、第3中間周波数付近に変換され、その高調波がDSP部の処理帯域内に落ち込むことが考えられる。この現象はスプリアスレスポンス

特性を悪化させるので、第3周波数変換回路以降は高調波歪を60 dB以下に低減する必要がある。本機の第3周波数変換回路のために第3中間周波数の出力に対する高調波レベルの低減比が80 dB以上得られるミキサを開発した。

第3中間周波の増幅器には高速広帯域のオペレーショナルアンプを採用し、多量の負帰還をかけて歪を70 dB以下に減少させた。

これらの歪低減のための対策は、帯域内相互変調特性および振幅変調信号に対する復調歪特性の改善にも役立ち、AMモードでの復調歪は従来機に比較し約15 dB改善した。

また、この第3中間周波の増幅器は、利得を可変する必要がある。そのため、デジタル信号により正確に利得を設定できる回路を開発した。

### 3.3 DSP部

#### 3.3.1 ハードウェア

本DSP受信機では、アナログデバイス社の浮動小数点DSPファミリーの最上位デバイスであるADSP-21062を採用した。図5にその系統を示す。

図3に示される高周波部のバンドパスフィルタは、群遅延をなるべく少なくするために緩やかな遮断特性のアナログフィルタを使用しているため、エイリアシングを生じないようにするために第3IFの中心周波数は少なくとも25 kHz程度にする必要があった。

この中心周波数に対して高速処理のためのソフトの実現を

考慮した場合、A/D変換器のサンプリングレートは入力を中心周波数の4倍の100 kHz程度となり、高速処理が可能なDSPが必要であった。

本DSPの採用理由は、上記の高速・高精度信号処理に必要な以下のような機能を有していたことによる。

(1) オンチップ上にDMAを内蔵し、サンプリングごとに必要となるデータ取得ルーチンのオーバーヘッド十数サイクルをDMAチェーンを使用することで分散することができ、1サンプル当たりわずか2,3サイクルのオーバーヘッドで処理可能であった。

(2) 開発当時最高速の33 MHzというクロックで動作可能であった。

(3) サブルーチンコール時にカーネルとなるレジスタ全てに裏レジスタが用意されておりコンテキストスイッチングを高速に行えた。

(4) 算術演算をパイプラインを使用せずに全て1オペレーションで実行可能であった。

(5) 浮動小数点演算を並列に3命令の実行が可能で、最大100MFLOPSの高速処理が可能であった。

(6) 浮動小数点演算をサポートしているため広ダイナミックレンジかつ高精度の信号処理が可能であった。

表1に、本DSP周りのハードウェア構成するための主要諸元を示す。

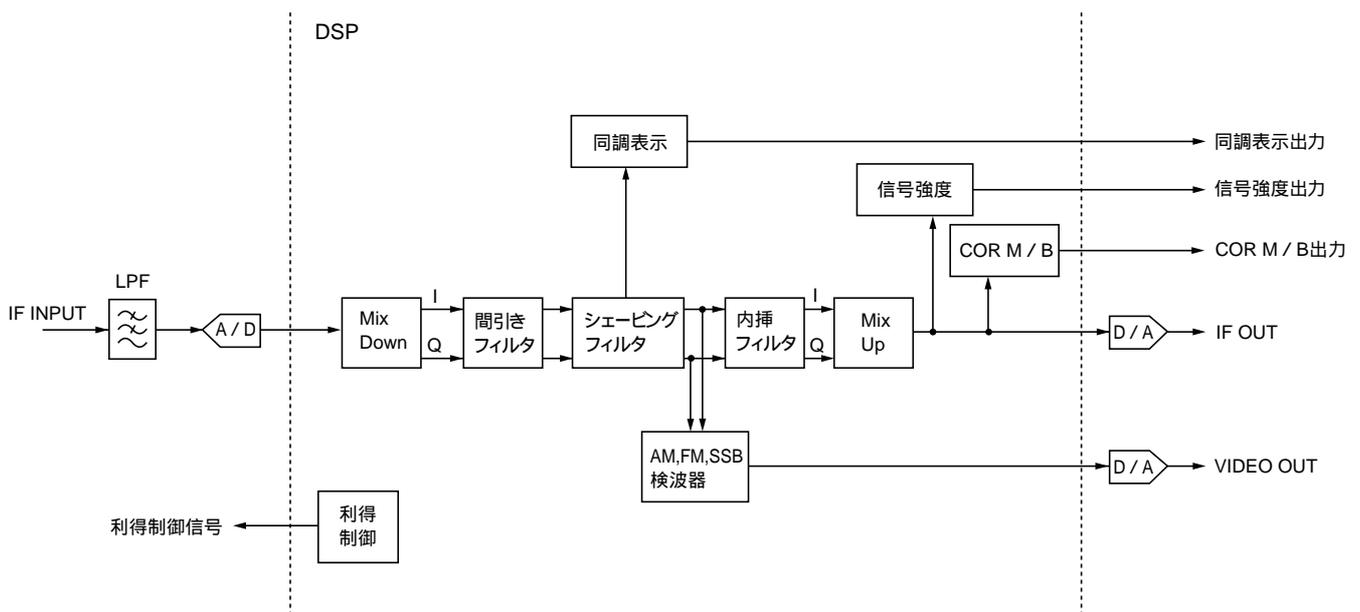


図5 信号処理のブロック図

Block diagram of digital signal processing

表1 DSP部の主要諸元  
Specification of DSP

A/Dサンプリングレート	100kHz
DSP	ADSP-21062(アナログ・デバイス社) 2Mbitのメモリを内蔵
DSPマスタークロック	33MHz

### 3.3.2 信号処理ソフトウェア

#### 1) バンドパスフィルタ

DSP内部でのフィルタリング処理は、FIRフィルタを使用しているため、演算処理における過程では、群遅延歪みを発生しない。

間引きフィルタおよび、また内挿フィルタを多段構成することで、アナログフィルタでは不可能な急峻な遮断特性を持つバンドパスフィルタを実現できた。

#### 2) 復調

本受信機において、復調はDSP内部での信号処理で実現している。尚、各復調方式は、下記のように行った。

##### (1) AM復調

AM復調は、同相成分(Ich)および直交成分(Qch)、それぞれを二乗し、その後加算し、平方根をとる事で、従来のアナログのAM復調で用いる復調方式と比較して、低歪みかつ高精度のAM復調を実現した。(図6)

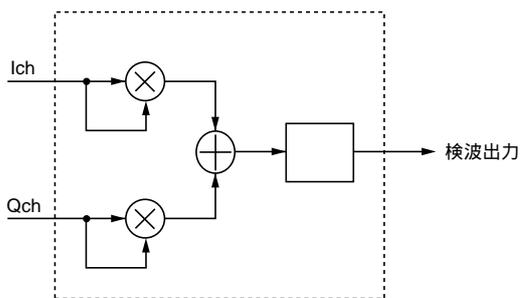


図6 AM復調ブロック  
Block of AM demodulator

##### (2) FM復調

信号の同相成分(Ich)と直交成分(Qch)より信号の位相を検出し、1シンボル前の信号との位相差を復調出力として得る。その結果アナログのFM復調で使用する弁別器を用いた方式と比較すると低歪み高精度のFM復調を実現した。(図7)

##### (3) SSB復調

SSB復調方式は、同相成分(Ich)および直交成分(Qch)に、DSP内部作成のビート信号(BFO)を掛けることで実現した。(図8)

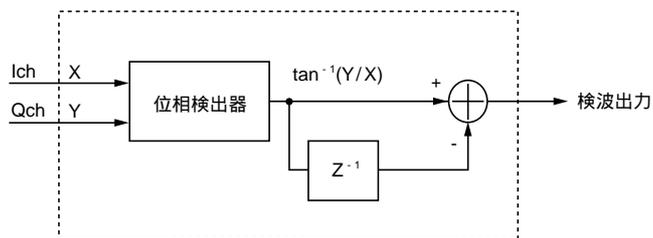


図7 FM復調ブロック  
Block of FM demodulator

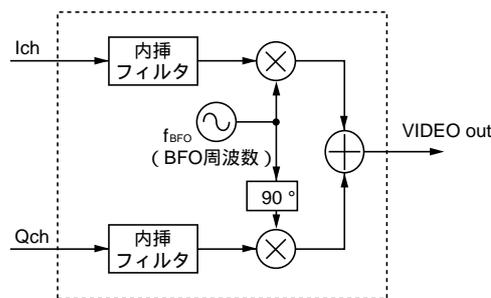


図8 CW, USB, LSB復調ブロック  
Block of CW, USB, LSB demodulator

### 3.4 シンセサイザ部

シンセサイザ部は、10 MHzの基準信号から第1ローカル周波数および第2ローカル周波数を合成する。図9にその系統を示す。

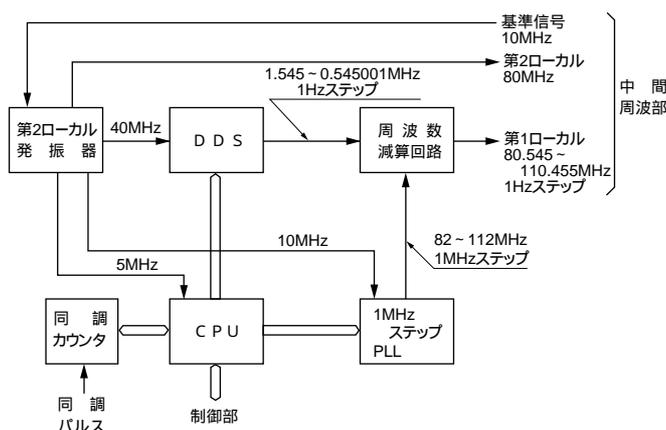


図9 シンセサイザ部の構成  
Block diagram of SYNTHESIZER

受信周波数の100 kHz桁以下に相当する周波数をダイレクトデジタルシンセサイザ(以下DDSと略す)が合成し、1 MHz桁以上をフェーズロックドロープ(以下PLLと略す)にて合成し、両周波数を周波数減算回路にて減算し、第1ローカル周波数を合成する構成とした。したがってPLLは高い基準周波数(1 MHz)に少ない分周比(112以下)で動作すること

が可能となった結果、高信号純度が得られ(図16参照)、周波数の高速切換え(シンセサイザ部で約40 msec)が可能になった。

シンセサイザ部には専用にCPUを備え、周波数制御を高速化した。その結果、同調ノブの回転に対する受信周波数の追従の遅れが大幅に減少し、滑らかな同調感覚が得られた。

## 4 性能

### 4.1 感度および相互変調特性

一般に、感度(雑音指数)と相互変調特性は相反する性能であり、両特性を高い水準で両立することが大切である。図10に本機の感度および図11に本機の3次インターセプトポイントを示す。

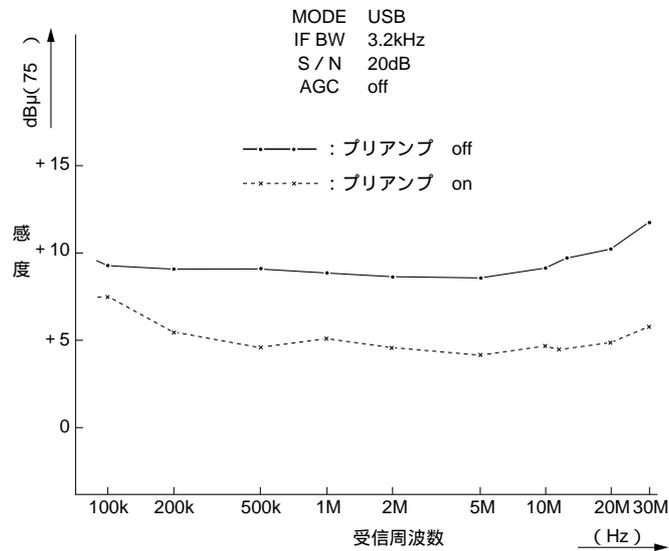


図10 感度  
Sensitivity

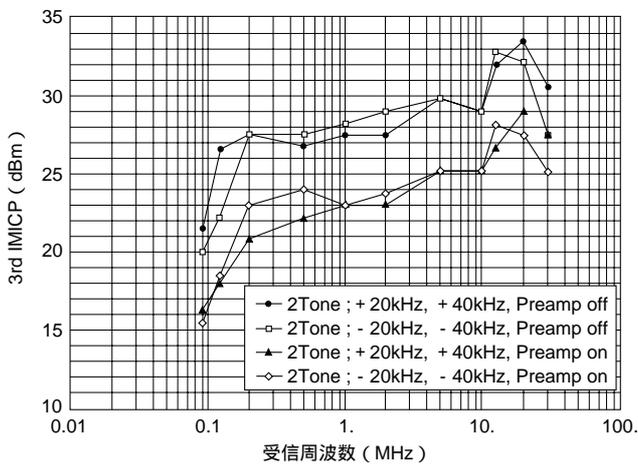


図11 3次インターセプトポイント vs. 受信周波数  
3rd order intercept point

プリアンブOFFの状態では、感度は従来機と同等であり、インターセプトポイントでは従来機に比較し約10 dBの改善が実現できた。また、プリアンブONの状態では、感度は従来機より約3 dB改善し、インターセプトポイントでも約5dB改善する結果が得られた。

### 4.2 受信帯域幅特性および群遅延偏差

受信帯域幅および群遅延偏差は主に中間周波部に使用されるバンドパスフィルタによって決定される。従来のアナログ式フィルタでは、減衰を急峻にする程、群遅延偏差は大きくなり、両立は困難であった。

本機では、バンドパスフィルタをデジタル信号処理により構成し、従来のアナログフィルタでは両立不可能な急峻な減衰特性と平坦な群遅延特性を実現した。表2に各帯域幅でのシェープファクタを、図12に周波数特性の一例と図13に群遅延特性の一例を示す。

表2 各帯域のシェープファクタ  
Shape factor

帯域幅	シェープファクタ	備考
0.1 kHz	1.46	シェープファクタ = 66 dB 帯域幅 / 6 dB 帯域幅
0.3 kHz	1.47	
1 kHz	1.15	
3.2 kHz	1.13	
6 kHz	1.13	
12 kHz	1.13	
20 kHz	1.16	

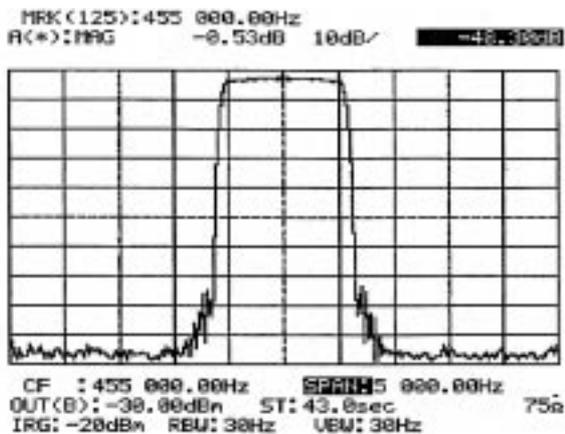
### 4.3 信号強度直線性

本機は、高周波部および中間周波部での利得の制御と、DSP部での演算補正の組合せにより、入力端で -150 dBm 以下から 0 dBm の範囲で直線性を確保している。この範囲内の -127 dBm から 0 dBm の間では、入力レベルの dBm 値に比例した直流電圧を出力できる。図14にその特性を示す。

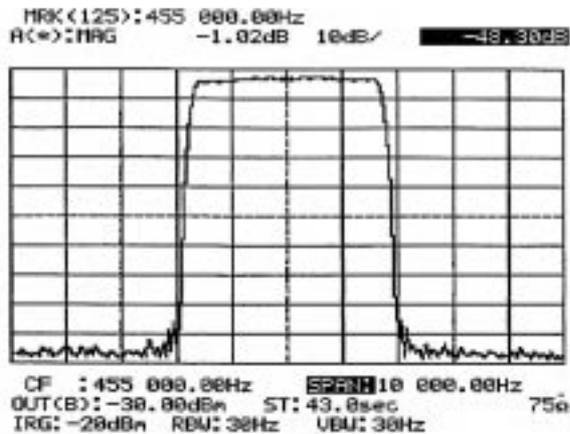
### 4.4 帯域内相互変調特性

従来機では AGC 機能および復調機能はアナログ回路により実現されていたが、この回路での歪が、復調歪および帯域内相互変調の主な原因となっていた。本機では、これらの機能がすべてデジタル信号処理により実現されているため、原理的にも良好な特性が期待できる。この特性を生かすため、入力端から A/D コンバータまでのアナログ回路での歪を極力減少する様配慮した。特性の一例を図15に示す。

この特性は従来機に比較し約20 dB改善されている。

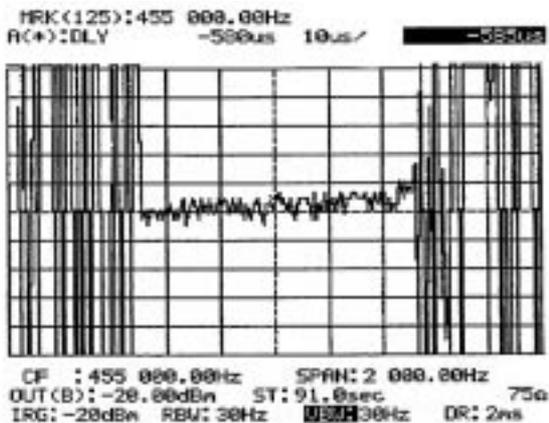


IF 1kHz  
横 500Hz/div 縦 10dB/div

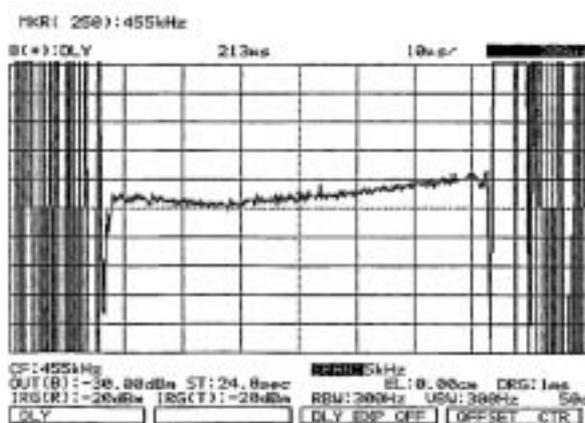


IF 3.2kHz  
横 1kHz/div 縦 10dB/div

図12 選択度特性  
Selectivity



IF 1kHz  
横 200Hz/div 縦 10 μs/div



IF 3.2kHz  
横 500Hz/div 縦 10 μs/div

図13 群遅延特性  
Group delay

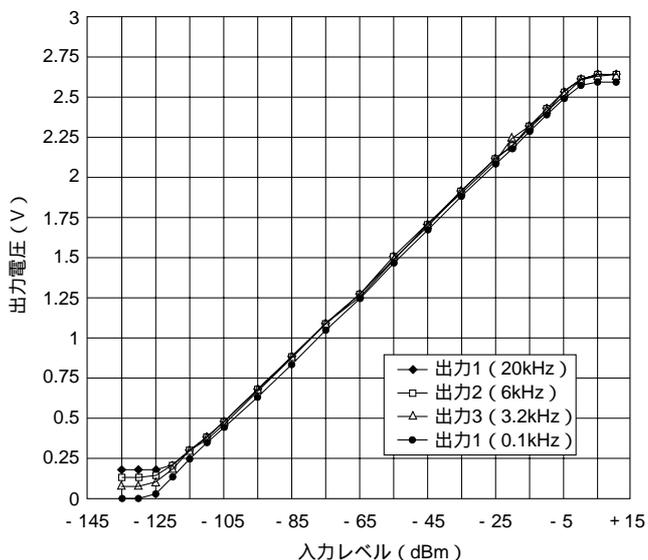


図14 入力レベル 信号強度出力  
Input level - DC voltage characteristics

#### 4.5 ローカル信号純度

本機のローカル信号のSSB位相雑音特性を図16に示す。

## 5 機能

### 5.1 メモリ機能

本機のメモリ機能は、十分な記憶容量を有すること、記憶内容の編集が容易であることを主眼として設計した。記憶容量は1,000チャンネル分を搭載した。記憶できる受信機設定状態は、受信周波数、電波形式、中間周波帯域幅、AGC時定数およびBFO周波数であり、記憶内容は、インターフェースを通じてパソコン等の外部機器へ転送できる。この機能により、未知の電波を捕捉したときの受信機設定状態を即座に記憶させ、さらにパソコンに転送し、整理およびファイル化すると

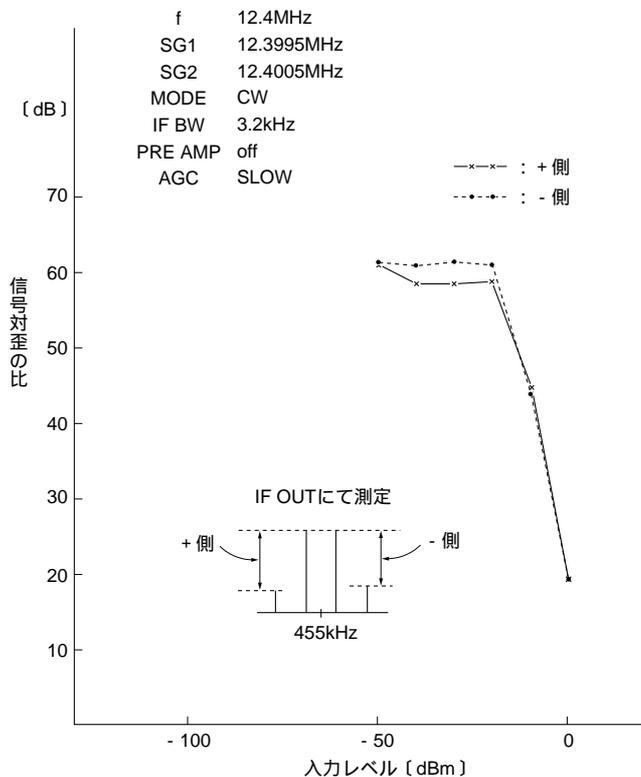


図15 帯域内3次相互変調  
Inband intermoduration

いった用途にも使用できる。

### 5.2 プリセットスキャン

本機は、メモリ機能により記憶（プリセット）された受信機設定状態を順次読み出して受信するプリセットスキャン機能を持たせた。プリセットスキャンのグループは、30組まで設定でき、1組あたり、50チャンネルまで登録できる。1チャンネルあたりの滞留時間は0.2秒～300秒で、正面パネルから設定でき、信号受信によりスキャンを停止させることもできる。

### 5.3 スイープスキャン

スイープスキャンは、指定されたスタート周波数とストップ周波数の間を、指定された周波数増分だけ順次周波数を増加させながら、受信を行う機能である。通常は、ストップ周波数に達するとスタート周波数から、再度スキャンを開始するが、信号が受信されるとその周波数でスキャンを停止させることもできる。スイープスキャンは未知の周波数の電波を捕捉するのに有効な機能であるが、スキャンする周波数範囲内にあるすべての電波でスキャンが停止するのでは不便である。本機では、あらかじめ周波数範囲を指定しておけば、その範囲を飛ばしてスキャンできるスキップ機能を備えた。スイープスキャングループは、30組まで設定可能で、1組あた

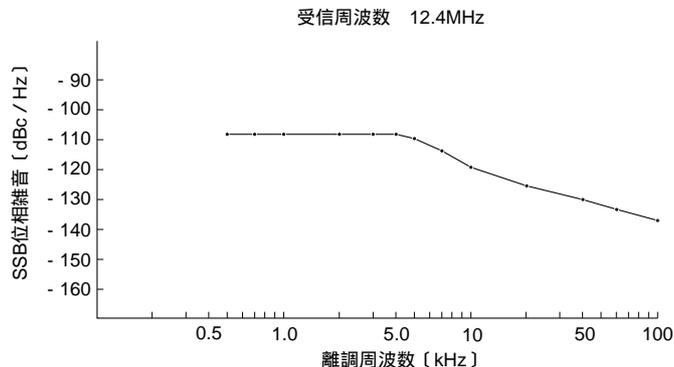


図16 ローカルSSB位相雑音  
SSB phase noise of local oscillator

り、10範囲までスキップ周波数範囲を登録できる。

### 5.4 自己診断機能

本機には、故障が発生した場合どのモジュールが異常なのかを判断する機能を内蔵した。自己診断機能が起動されると、まず制御部のメモリチェックが行われたのち、高周波部に内蔵された試験用発振器が起動され、受信周波数が自動的に試験周波数に設定される。制御部は、試験用発振器の信号がどのモジュールの出力まで到達しているかを検出し、出力のないモジュールを不良と判断する。結果は、正面パネルに表示される。また、この自己診断機能は遠隔制御によっても起動することが可能で、結果は外部インタフェースを通して制御器側へ返送することができる。これにより無人の受信所に設置された本機を、他の場所から故障診断することを可能にした。

### 5.5 リモートコントロール機能

本機のラインアップとしては、オールインワンタイプのRR111A受信機の他に、リモートコントロールを前提としたハンドオフ受信機（操作表示部を持たない）であるRR112A受信機と専用遠隔操作器であるRC157A制御器がある。このRC157Aは1台で15台までのRR111A受信機またはR112A受信機を制御できる。また、周波数チューニングつまみのダイアルパルスを直接伝送することにより、リモートコントロールでも周波数同調のリアルタイム性を維持している。さらに、信号強度や同調表示信号も専用出力を有しているため、RC157A制御器にリアルタイム表示が可能である。

リモートコントロール用インタフェースとして、GP-IBとシリアルインタフェース（RS-232CまたはRS-422）の両方を標準装備とし、両方のインタフェースから同時制御が可能である。したがって、RC157A制御器の他、各種コントローラや周

表3 主要規格  
Specification

受信周波数範囲	90kHz ~ 30MHz		
周波数分解能	1Hz		
受信モード	AM , FM , USB , LSB , CW		
CW 感度	10 $\mu$ V 以下 (受信周波数 1.6 MHz 未満) 2 $\mu$ V 以下 (受信周波数 1.6 ~ 30 MHz) IF BW : 0.3 kHz , S / N : 20 dB , プリアンプ : ON , AGC : OFF		
SSB 感度	10 $\mu$ V 以下 (受信周波数 1.6 MHz 未満) 3 $\mu$ V 以下 (受信周波数 1.6 ~ 30 MHz) IF BW : 3.2 kHz , S / N : 20 dB , プリアンプ : ON , AGC : OFF		
AM 感度	30 $\mu$ V 以下 (受信周波数 1.6 MHz 未満) 10 $\mu$ V 以下 (受信周波数 1.6 ~ 30 MHz) IF BW : 3.2 kHz , S / N : 20 dB , 1 kHz 30%変調 , プリアンプ : ON , AGC : OFF		
帯域幅	帯域幅	6 dB 通過帯域幅	66 dB 減衰帯域幅
	0.1kHz	0.10 ~ 0.15 kHz	0.25 kHz 以下
	0.3kHz	0.27 ~ 0.30 kHz	0.55 kHz 以下
	1 kHz	1.0 ~ 1.2 kHz	1.5 kHz 以下
	3.2kHz	3.2 ~ 3.8 kHz	4.5 kHz 以下
	6 kHz	5.8 ~ 7.0 kHz	8.0 kHz 以下
	12kHz	10 ~ 13 kHz	18 kHz 以下
	20kHz	17 ~ 22 kHz	26 kHz 以下
群遅延時間偏差	帯域幅	帯域内範囲	群遅延時間偏差
	1 kHz	受信周波数 $\pm$ 400 Hz	80 $\mu$ s 以下
	3.2 kHz	受信周波数 $\pm$ 800 Hz	80 $\mu$ s 以下
3次インターセプトポイント	+ 10dBm 以上 (受信周波数 1.6 MHz 未満) + 20dBm 以上 (受信周波数 1.6 ~ 30 MHz 未満) プリアンプ : ON		
AGC 静特性	出力レベル偏差 6 dB 以下 , 入力レベル 6 ~ 100 dB $\mu$		
AGC 応答特性	AGC速度	アタック時間	レリース時間
	FAST	10 ms 以下	0.3 ~ 0.5 s
	SLOW	15 ms 以下	3 ~ 5 s
			備考 IF BW : 3.2 kHz 入力レベル 13 dB $\mu$ 93 dB $\mu$
イメージ妨害比	70 dB 以上		
BFO可変範囲	$\pm$ 10 kHz 以上 , 1 Hz ステップ		
周波数安定度	$\pm 3 \times 10^{-7}$ 以内 (0 ~ 40 )		
メモリチャンネル数	1000		
プリセットスキャン速度	約5チャンネル/秒		
スイープスキャン速度	約5ステップ/秒		
制御インタフェース	GP-IB および RS-232C または RS-422		
電 源	AC 90 ~ 132V 120 VA 以下		
使用温度範囲	0 ~ 40		
寸法・重量	480W x 149H x 389D mm		15kg

辺装置と組み合わせて、広範な各種受信システムの構築を可能とした。いずれのインタフェースでも、電源投入、音量、表示器輝度調整を除くすべての受信機操作の設定および受信機の設定状態、動作状態、受信信号レベル、警報状態の読み出し等をリモートコントロールで行うことができる。

受信機出力信号をデジタル的に信号処理するシステムに対応させるため、高速デジタル信号出力を有している。これは、16ビット、100kHzサンプルのCMI方式IF/VIDEOデジタル出力で、対数圧縮などの変換をせずに後段の信号処理部に直接取り込むことができる。

## 6 主要規格

本機の主要規格を表3に示す。

## 7 むすび

デジタル信号処理技術を採用した短波帯電波監視用受信機の開発を行い、当初目標を達成した。

従来アナログ信号処理により構成していた部分をデジタル化することで理想的な受信・復調性能を得ることに成功した。

無線通信機器において受信部のデジタル信号処理化は高性能化、価格、信頼性などの面からますます重要な技術となっている。業務用広帯域受信機という高感度、高精度な分野に適用して従来のアナログ信号処理をしのぐ性能を実現した

ことは、利用分野の一層の拡大につながるものと考える。

今後は適用周波数範囲や処理帯域幅を拡張し、V/UHF帯以上の受信機にもこの技術を適用させ、受信基本性能の向上を図ることで、高性能到来方向推定や各種デジタル無線通信波のユニバーサル復調などの高度なシステムに対応してゆく所存である。

## 参考文献

- 1) 中島恭一他：“電波監視システム DEURAS” アンリツテクニカル71号 1996年5月
- 2) RALPH O. SCHMIDT：“Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation” IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS PROPAGATION, VOL. AP-34, No.3, March 1986
- 3) RICHARD ROY and THOMAS KAILATH：“ESPRIT-Estimation of Signal Parameters Via Rotational Invariance Techniques”，IEEE TRANSACTIONS ON ACOUSTICS, SPEECH AND SIGNAL PRICESSING, VOL37, No.7, JULY 1989
- 4) “Software Radios特集号”，IEEE Communications Vol. 33, No.5, May 1995
- 5) 唐沢好男，猪股英行：“通信用デジタルビームフォーミングアンテナ-見えてきたインテリジェントアンテナとしての将来-” 電子通信情報学会 Vol.78, No.9, 1995年9月