

400MHz帯 国内向PLL化無線機

400MHz Band Synthesized Radio for Japan Domestic Market

井 口 正 士⁽¹⁾ 酒 井 常 男⁽²⁾ 中 條 良 和⁽³⁾
Masashi Iguchi Tsuneo Sakai Yoshikazu Chujo

上 岡 広 明⁽⁴⁾ 田 中 国 次⁽⁵⁾ 横 尾 信 昭⁽⁶⁾
Hiroaki Ueoka Kunitsugu Tanaka Nobuaki Yokoo

要 旨

400 MHz 帯の国内業務用無線機市場では、近年行われたナロー化も定着してきているが、それにもまして最近混雑の度合いを深めている。このため無線機の電波の質の良否が問われ、送信時の隣接チャネル漏洩電力、受信相互変調特性や隣接チャネル選択度特性の優れた無線機が要求されている。一方では、高周波素子の急速な発達を背景として、無線機の発振方式に水晶制御PLLシンセサイザ方式を用いて、従来の水晶発振方式の無線機と同等の性能を得る事が、技術的に可能となってきた。

今回開発を行った95形400 MHz帯PLL化無線機は、国内業務用無線機に要求される電波の質にかかわる諸性能の維持、向上を図りつつ、水晶制御PLLシンセサイザ方式を採用する事によって得られる、ユーザへの即納体制の確立、将来予想される多チャネル化対応などのメリットを、最大限に活かせるように配慮して設計を行ったものである。

Since the narrowed channel use for 400 MHz band was introduced in 1982, a great increase of mobile radio makes it very crowded. The recent technology has been changing mobile radios from crystal controlled over PLL synthesized system. Under these situation mobile radios are required better qualities, such as the adjacent channel power on TX, the RX intermodulation and the adjacent channel selectivity.

In these circumstances, the new 95 series mobile radio was developed in order to satisfy all demands by users, dealers and manufacturer. This synthesized mobile radio has all specifications required for business radio.

Especially PLL synthesized circuit allows the radio to pursue quick delivery and multiple channels possible.

(1)~(5) 無線技術部

(6) 第二機構技術部

1. ま え が き

我が国における移動無線機の技術動向は、最近になり大きな変革期を迎えている。MCA、パーソナル無線機の出現、400 MHz 帯 業務用無線機の狭帯域化、さらには水晶発振てい倍方式の無線機から水晶制御 P L L シンセサイザ方式の無線機への変化等である。

特に業務用無線機の市場で水晶制御 P L L シンセサイザ方式無線機が登場したことは、大きな変化であり、これは近年電波法改正により水晶制御 P L L 方式が認可されたことや、パーソナル無線の普及によって高周波用素子が急速に発達したことで実現が可能となってきた。これによって個々の周波数に対応した水晶振動子を必要としなくなり、周波数の変更を短時間で行うことが可能となるためにユーザに対し即納体制をとることができる。

また、近年の業務用無線機は、データ伝送に対しても、その処理機能を装備したものが必要とされている。

今回開発を行った400 MHz 帯 P L L 無線機は、以上のようなニーズを背景にして国内業務用無線機の厳しい規格を満足すべく、VCOの特性を向上し、総合的に水晶発振てい倍方式に比較して同等以上の高性能を実現し、さらに今後増加が予想されるデータ伝送に対しても対応可能なものとなっている。

本論文では、95形 400 MHz 帯 P L L 無線機の概要、特長及び設計上の要点について述べる。

2. 開発のねらい

今回の開発に際し、ねらいを次の点に置いた。

- 1) 水晶制御 P L L シンセサイザ方式を採用し、納期短縮、即納体制とする。
- 2) 今後さらに混雑が予想されるため、相互変調

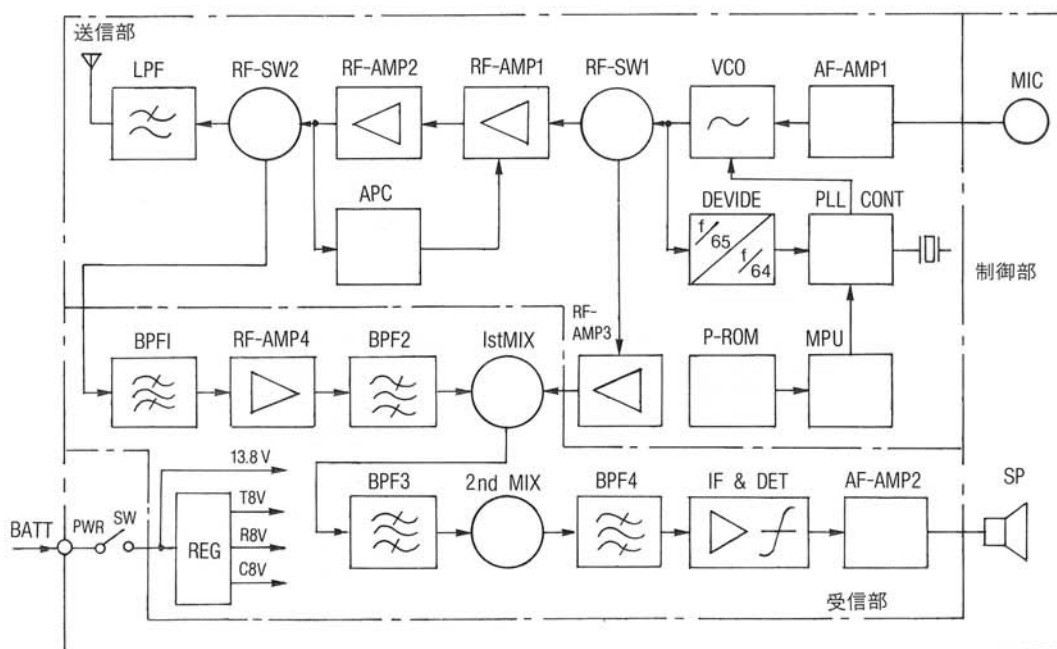


図-1 FTM40-595AT形無線機ブロックダイアグラム

Fig. 1 Block diagram of FTM40-595AT.

特性、隣接チャネル選択度特性を向上させる。

- 3) データ伝送対応可能とする。
- 4) 将来予想される多チャネル化に対応できる設計とする。

3. 装置の概要

本装置は、大きく分けると送信部、受信部、制御部から構成されている。送信部の中に VCO 部、PLL 部が含まれ、受信部にはオブションとしてトーンスケルチ部が付加できる。

きょう体構造は H 形断面を持つ一体成形アルミダイカスト製である。

本装置のブロックダイアグラムを図-1に、外観を図-2に示す。

3.1 装置の動作

3.1.1 PLL シンセサイザ部

PLL シンセサイザ部は VCO 部、PLL 部から成り、送信時には搬送波信号を、受信時には第一局発信号を発生する。

1) VCO 部

コルピッツ形発振回路を用い、発振トランジスタには $1/f$ 雑音の少ない接合形 FET を使用して高 C/N を実現している。また V-F 変換は、可変容量ダイオードを 2 個直列に使用し、スプリアスの除去を行っている。

2) PLL 部

PLL 部は、高周波用 2 モジュラスプリスケラ、PLL コントローラ、LPF、および基準周波数発振器により構成されている。VCO 出力はプリスケラにより約 5 MHz に分周され、PLL コントローラに供給される。ここでさらに分周され基準周波数と位相比較がなされた後、位相同期がかけられる。

3.1.2 送信部

送信部は、変調オーディオ回路、励振電力増幅部、終段電力増幅部、APC 回路、LPF により構成されている。マイクよりの音声信号は、変調オーディオ回路により振幅制限、高音域制限を受けたのち VCO 部に入り変調をかける。PLL シンセサイザ部からの 400 MHz 帯信号は、励振電

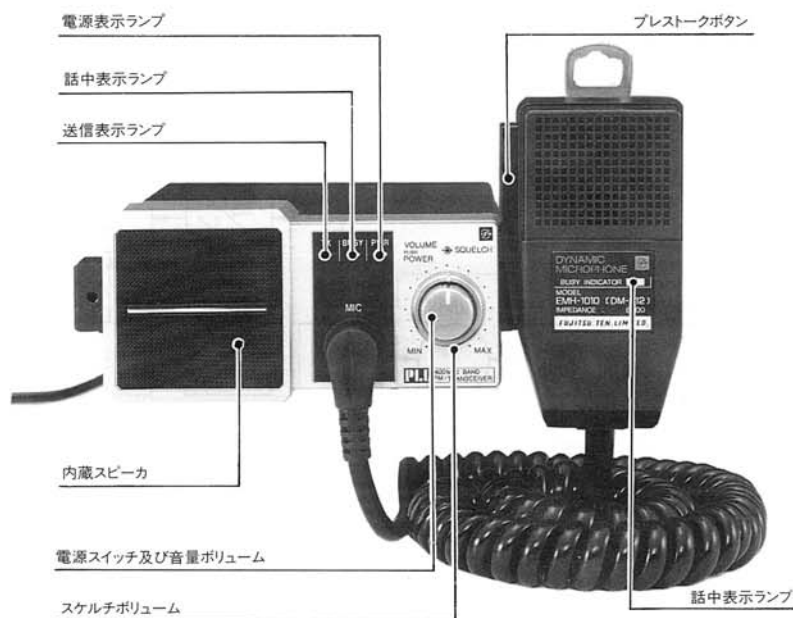


図-2 FTM40-595AT 形無線機外観図

Fig. 2 Exterior view of FTM40-595AT.

力増幅部を経て終段電力増幅部に入り、A P C 回路にて出力を一定にし、L P F により高調波成分を除去され希望周波数の送信出力 5 W を空中線に供給する。

3. 1. 3 受信部

受信部は、高周波部、変換器、中間周波部、復調器、音声電力増幅部、スケルチおよびオプションとしてのトーンスケルチ部により構成されている。空中線よりの受信信号は、B P F を通過して高周波増幅部を経て、変換器で第一局発信号と混合されて第一中間周波信号となる。この信号は水晶フィルタをとおり増幅されたのち変換器により第二中間周波信号となり、セラミックフィルタで所要帯域に制限され復調器で F M 検波される。復調信号は、音声電力増幅で増幅しスピーカを駆動する。スケルチ回路は復調信号の雑音成分を検波して音声増幅回路を断続させ、無信号時の雑音がスピーカより出ないように制御する。

3. 1. 4 制御部

本装置の外筐前面が操作パネルとなっていて、すべての操作が行える。

制御部は、電源スイッチ、音量ボリューム、スケルチボリューム、電源表示ランプ、送信表示ランプ、話中表示ランプ、スピーカ等で構成されている。また外部接続用として、前面にマイク接栓、右側面に外部スピーカジャック、背面には空中線接栓、電源接栓、トーンスケルチ用マイクハンガー接栓がある。

3. 1. 5 トーンスケルチ部

トーンスケルチは、同一搬送波周波数を使用する場合に、他局の通話を聞こえない様にするために使用する。受信部とコネクターコネクタで接続することが可能で、ネジ 1 本できょう体に固定される。各種の方式があるためにオプション装備とし、必要に応じて付加する。最近では、送信時間を制限するような機能が市場ニーズとして出てお

り、当社でも「プレス時限回路」という名称でトーンスケルチと同様にオプションとして付加することが可能である。

3. 2 装置の仕様

本装置の定格を表-1に、性能を表-2に示す。

3. 3 装置の特長

- 1) 400 MHz 帯 直接発振方式の採用により、送信てい倍段、受信局発てい倍段が不要となりこのためてい倍スプリアスが発生しなくなった。
- 2) 送信時は搬送波周波数を、受信時は第一局発周波数を発振する送受切換形の V C O の採用により、V C O の小形化、単純化をはかった。
- 3) 送信部、受信部の特性を決定する V C O 出力信号の C N 比を改善するために $1/f$ 雑音の少ない接合形 F E T を発振トランジスタとして採用した。
- 4) P L L シンセサイザ部の L P F において、通過特性切換形ラグリードフィルタを採用することにより、ロックインタイムの短縮をはかり、データ伝送に必要な時間を短縮した。
- 5) 400 MHz 帯 直接 F M 変調方式により、送信変調歪率の大幅な改善が可能となった。
- 6) 大容量 R O M の採用
 - ① 大容量のバイポーラ P-R O M を採用し、400 MHz 帯 簡易無線周波数を記入済としたため、簡易無線について即納体制をとることが可能となった。
 - ② 多くのチャンネル周波数データをメモリで記憶するために、将来の多チャンネル化にも容易に対応可能である。
- 7) 終段電力増幅部に H I C 化されたパワーモジュールを採用することにより、部品点数の削減、信頼性の向上をはかった。
- 8) 受信部において、第一変換器に D B M (ダブルバランスドミキサ)を採用し、相互変調特性を改善した。これにより今後さらに増大する混

雑による妨害の低減が可能である。

- 9) 受信高周波増幅器において、ストレート2段アンプ構成とすることで、より高感度を実現。さらに増幅度を可変としたために、妨害を受けた場合の感度低下が容易に行える。
- 10) 一体成形アルミダイカスト製きょう体の採用により放熱効率を向上した。

4. 設計の要点

本装置は、400 MHz 帯 国内業務用無線機として、当社初のPLL方式の無線機であり、特に厳しい規格により規制されているためにVCO位相雑音の低減および受信妨害除去特性の改善に留意して開発を行った。

4.1 PLLシンセサイザ部

4.1.1 VCO位相雑音の低減

VCO出力を送信時は搬送波信号、受信時は第一局発信号として使用するために、無線機の電波の質を決定するのがこのVCO出力信号であるといえる。発振器における雑音の中には振幅雑音成分と位相雑音成分が存在するが、400 MHz 帯の場合では、振幅雑音成分はほとんど見られずに位相雑音が大半を占めている。このため400 MHz 帯の発振器においては、位相雑音の低減を行わなければならない。

位相雑音は、中心周波数からの離調が5 kHz以上の周波数では、ショット雑音、熱雑音が支配的であるが、5 kHz以下では周波数に反比例した $1/f$ 雑音が発生する。この $1/f$ 雑音は、必然的に発生するショット雑音、熱雑音とは異なり、回路方式、能動素子、部品実装状態により低減することが可能である。

今回のVCOの開発では、 $1/f$ 雑音の低減を念頭に置いて考察を行い、実験を進めた。その結果次のことが得られた。

1) 回路方式

400 MHz 帯 直接発振方式の場合、発振コイルの動作Qを低下させないように、リアクタンス制御回路を単純化する。

2) 能動素子

リアクタンス制御回路のQがある程度確保されているならば、近傍の雑音量は能動素子の $1/f$ 雑音の発生量により決定される。この特性においては、バイポーラ形トランジスタに比較して、接合形FETの方が優れているといえる。

3) 部品実装状態

VCO部と他の回路のアースを分離する。特に発振器のアースに対して、他の雑音発生源のアース電流の流入を防ぐような工夫が必要となる。また高インピーダンスの部分におけるアースについても非常に大切である。

以上の結果 得られた実験値を図-3に示す。約2.5 kHz 離調点でのC/Nが、接合形FETを用いたVCOでは、バイポーラ形トランジスタに対して、約20 dBのC/N改善がなされていること

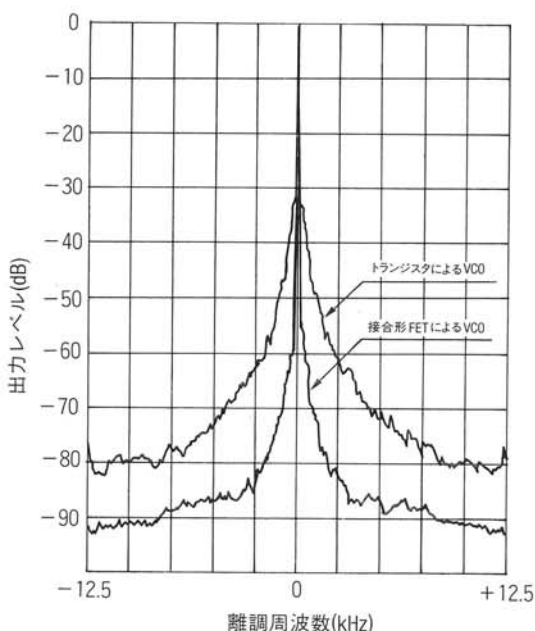


図-3 位相雑音

Fig. 3 Phase noise.

がわかる。さらに 10 kHz 離調点では、接合形 FET の場合、約 10 dB の改善がなされており、特性的に、満足できるものであると考えられる。

4. 1. 2 PLL ロックインタイムの短縮

最近の国内業務用無線機では、データ伝送に使用される度合いが大きく、そのデータ伝送に使用されている時間が問題となってくる。データ伝送の多くは、プレストークスイッチを押した時にデータが送出される。

本装置の場合には、VCO が送受切換形であるために、受信から送信に移るとき（プレストークスイッチを押したとき）に VCO 周波数が第一中間周波数だけ変化する。このとき PLL がロックするまでに時間がかかり、さらにアンロック状態での送信を禁止するためロック信号が出てから少しの時間、マイコンによってウェイティングがかかっている。このため従来の水晶発振形の無線機に比較して、ロックインタイム、ウェイティングタイムだけ時間が多くかかる。データが送出されている間は音声変調がかからないので、プレストークスイッチを押してからデータを送出し終るまでの時間は短い方が望ましい。このことから次のような考察、実験を行った。

通常 PLL 回路のループフィルタは、ラグリードフィルタによって構成され、このフィルタの特性によってロックインタイムが決定される。この特性を変更することによってロックインタイムを短縮することは可能であるが、この特性は PLL 回路のさまざまな特性により決定されているの

で、これを変えると他の特性に悪影響を及ぼす可能性がある。そこでロック状態では本来の特性で動作し、ロックイン過程においてロックインタイムが短縮される動作をするラグリードフィルタの変形回路を採用した。ラグリードフィルタは図-4 のように R_1 、 R_2 、 C によって構成され、 R_1 が小さくなれば PLL の系としての固有周波数 W_n が高くなりロックインタイムは短縮される。このため R_1 を 2 個に分けて (R_1 と R_s)、ロックイン過程において 1 個の抵抗 (R_s) を切り離すスピードアップ回路を付加した。これにより他の特性に影響を及ぼすことなくロックインタイムを短縮することができた。

4. 2 受信部

4. 2. 1 相互変調特性の改善

従来の国内業務用無線機では、受信部の相互変調特性について非常に厳しい規格が設けられており、この規格を満足するべく下記のような改善を行った。ただし昭和 61 年 6 月 1 日付の電波法改正により、海上移動業務に使用する無線機を除いて受信機の規格は受信副次発射強度のみとなり、あとは撤廃された。しかしながら、今後さらに混雑するであろう国内業務用無線機の市場においては、相互変調特性や、後述する隣接チャネル選択度特性の優れた無線機が必要になると考えられる。

1) DBM の採用

受信部における第一変換器は、その無線機の受信相互変調特性の良し悪しを決定する部分であるといえる。そこで本装置では、第一変換器に DB

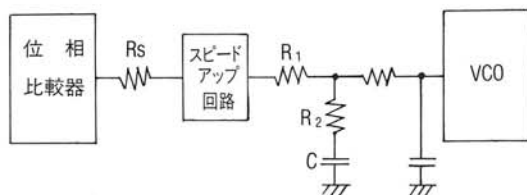


図-4 ループフィルタ
Fig. 4 Loop filter.

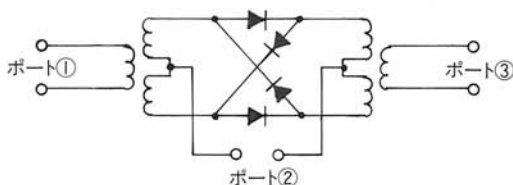


図-5 ダブルバランスドミキサ
Fig. 5 Double balanced mixer.

Mを採用し相互変調特性の改善を行った。

DBMは、図-5のように2個の位相分配器と4個のダイオードから構成され、3個のポート（端子対）を持っている。ポート①に大きな交流信号を加えた場合、ダイオードを通じて電流が流れ、交流信号の極性が反転するごとに電流の流れるダイオードが切替る。この時、ポート②に小さな信号があったならば、ダイオードがONするたびに反転をくり返ししながらポート③に出力される。このことを周波数で考えると、ポート③の出力には、ポート②の信号が、ポート①の信号の極性により位相反転をくり返ししながら出力される。これにより、理論的には元の周波数は出力に現われずに2つの周波数の和と差の成分のみが出力に現われ、周波数変換が行われる。

2) ダイプレクサの使用

上述のDBMを正常に動作させるためには、各ポートを一定のインピーダンスで終端しなければいけない。特に大切なのは出力側で、全周波数に於て一定のインピーダンス（本装置では50Ω）に整合し、第一中間周波数を50Ωで終端して取り出さなくてはならない。この場合使用されるのが図-6に示す、バンドパス形のダイプレクサと呼ばれる回路である。図で示されるように、共振周波数（第一中間周波数）では、第一中間周波部の入力インピーダンスを50Ωにすることで、DBMの出力を50Ωに終端できる。その他の周波数ではR₁の50Ωで終端される。この回路において全周波数

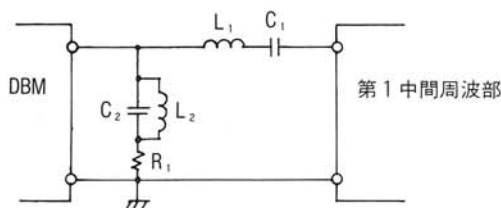


図-6 ダイプレクサ
Fig. 6 Diplexer.

を50Ωで終端するためには、2つの共振回路、直列共振回路、並列共振回路のQを一定にすれば良い。これは次の式で表わされる。

$$\text{直列共振回路 } Q = \frac{W_0 L_1}{Z_0} = \frac{1}{W_0 Z_0 C_1}$$

$$\text{並列共振回路 } Q = \frac{Z_0}{W_0 L_2} = W_0 Z_0 C_2$$

これらが等しいので

$$\frac{W_0 L_1}{Z_0} = \frac{1}{W_0 Z_0 C_1} = \frac{Z_0}{W_0 L_2} = W_0 Z_0 C_2$$

Z₀: 特性インピーダンス

Q: quality factor

L₁, L₂: インダクタンス

W₀: 角周波数

C₁, C₂: キャパシタンス

以上によりDBMを正常に使用することが可能であり、DBMは非常に大きなレベル(+10 dBm程度)の第一局発信号をポート①に加えて、ダイオードをON状態にし飽和領域に追い込んだ上で、小さな受信信号をポート②に加えることによ

—— デュアルゲートMOS-FETによる変換器
---- DBMを用いた変換器

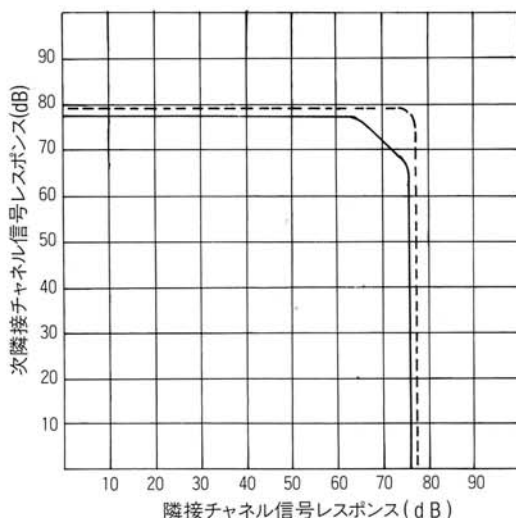


図-7 相互変調特性

Fig. 7 Inter modulation distortion.

り、ダイオードが常に飽和領域以上で動作するため非常に歪の少ない出力がポート③に現われる。

出力信号の歪は、トランジスタや、FETを使用した変換器に比較して非常に優れた特性を示している。図-7にDBMを使用した場合と、デュアルゲート MOS-FET による第一変換器を使用した場合の3信号法受信相互変調特性の実験値を示す。

4. 2. 2 隣接チャネル選択度特性の改善

受信部の特性において、相互変調特性と同様に重要であるのが、隣接チャネル選択度である。これは、12.5 kHz離れた隣のチャネルによりどの程度妨害を受けるかという度合いであり、特に簡易無線等においては、ごく近い場所で隣接チャネルが使用される可能性が大きいために重要である。この特性は、最初に隣接波が減衰させられるフィルタ、則ち第一中間周波部の水晶フィルタにより大半が決定される。

このため、今回6ポールの水晶フィルタを採用

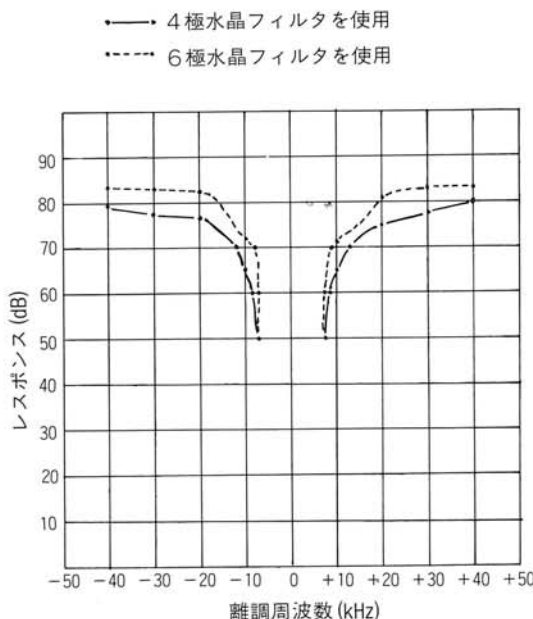


図-8 隣接チャネル選択度

Fig. 8 Adjacent channel selectivity.

した。これは従来の4ポールの水晶フィルタに比較して減衰域での特性が優れている。さらに、この部分では、プリント基板への実装時において飛び越しによる減衰特性の劣化を防がなければいけない。

以上により、図-8に示すように隣接チャネル選択度特性が改善される。さらに、これに伴って第一中間周波段以降での歪の影響が小さくなるために、相互変調特性も向上する。

4. 3 マイコンおよびデータROM

4. 3. 1 マイコン

95形PLL無線機では、図-9で示す機能を有したマイコンを搭載している。

1) 初期化

ハードウェアの初期化を行い、無線機を設定されたチャネルの受信状態にする。

2) データの送出

プレストークスイッチをONした場合は、送信周波数データを、プレストークスイッチをOFFした場合は受信周波数データを送出する。さらに将来の多チャネル化に対応のために、チャネル切換スイッチによる処理機能も備えている。

3) 送信許可

本マイコンは、送信禁止命令が優先されておりプレストークスイッチがONになり、送信周波数データが送出されてPLLシンセサイザがロックインしたことが確認された時のみ送信が許可される。しかも、ロック完了信号を受けてから、約30 msecのウェイトタイムを設けている。

4. 3. 2 データROM

周波数データメモリ用のROMは、2k bitのバイポーラP-ROMを採用している。1周波数について送受各19 bitのシリアルデータが必要であり、このROMでは、32チャネル分のデータをメモリできる。アドレスを指定することによって、希望するチャネルの周波数データを送出できる。

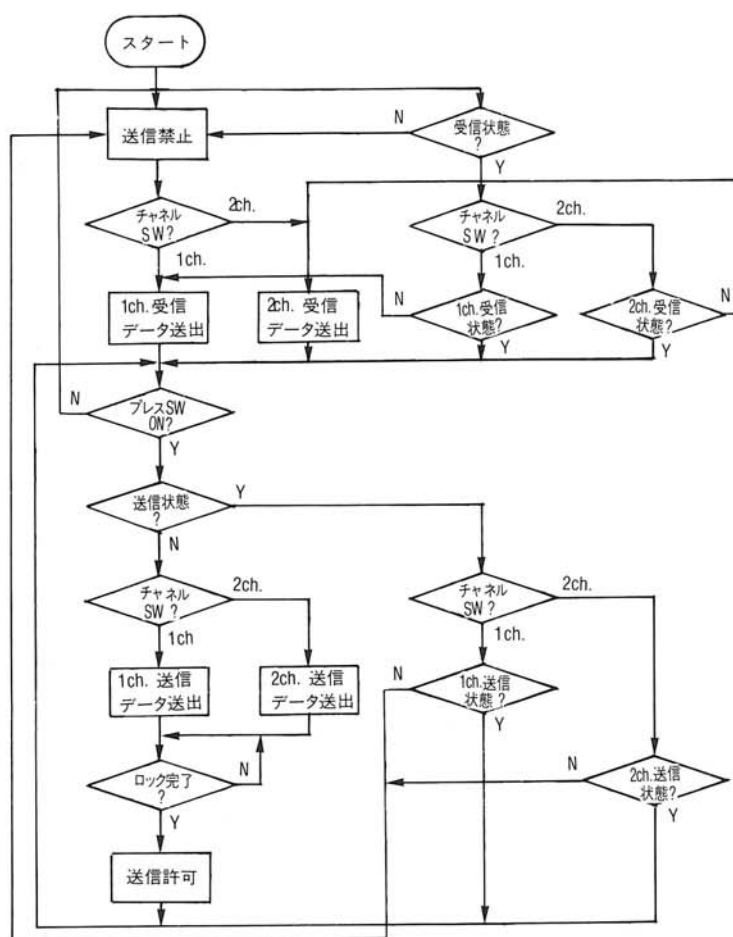


図-9 ゼネラルフローチャート

Fig. 9 General flowchart.

4. 4 トーンスケルチユニット

400 MHz 帯 国内業務用無線機の利用形態は、最近特に混雑の度を増してきており、簡易無線では同一地区内での同一波の割り当て比率が高まり、激しい所では、同一波の使用ユーザが30局にものぼる場合がある。このような状態では、他グループの通話が聞こえるために、トーンスケルチ方式を採用することによって、他グループの通話を聞こえないようにする方法がとられている。

トーンスケルチ方式は、多種の方式があるが代

表的なものに表トーンスケルチがある。これは、送信搬送波に音声変調と共にトーン信号（E I A J 規格に定められた33波のトーン周波数のうちの1波）を重畳し、受信側では、このトーン信号が検出された場合にのみ受信音声出力を出すような検出回路および音声ミュート回路を備えた受信機としておく。これによって自局の信号が受かった場合にのみ音声を出力することが可能である。ただし他局と搬送波周波数もトーン信号も同一の場合は、他局の通話も聞こえてしまう。則ち同一波

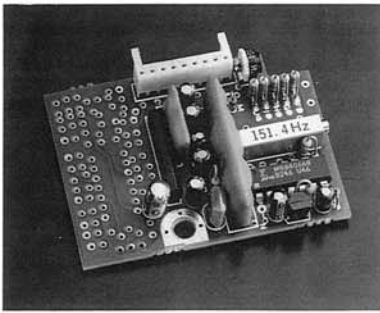


図-10 トーンスケルチ外観図
Fig. 10 Exterior view of Tone-squelch.

の場合はトーン信号を異るものにしなければいけない。

本装置の場合、表トーンスケルチだけでなく集中基地で使用される裏トーンスケルチや、片トーンスケルチ、クロストーンスケルチ等が実装可能であり、受信プリント基板とコネクタで接続される。さらに各種のトーンスケルチを一枚のプリント基板上で切換えることが可能である。また、トーンスケルチ基板の片側半分に、プレス時限ユニ

ットを搭載することも可能である。プレス時限ユニットは、プレストークスイッチを連続で長い時間押ししたり、何度もくり返して押ししたりすると、ハンドマイクのプレストークスイッチを押しても無線機が送信にならないようにする。これは、同一波を使用している場合の妨害を防ぐ意味で使用される。最近では、タクシー業界等において需要が急増している。図-10に本装置に付加して使用するトーンスケルチの外観を示す。

4.5 きょう体構造

本装置はH形断面の一体成形アルミダイカスト製のきょう体を使用している。このため、送信部の最終電力増幅部や、定電圧回路、受信音声増幅部等における能動素子の放熱器としてきょう体を使用することができ、効率的な放熱が行える。

特に送信VCO部や、受信高周波ヘリカルフィルタ部では、外部よりの影響をシャ断する必要がある、シールドとして一体成形アルミダイカストのシールドケースを用いている。また、この部分

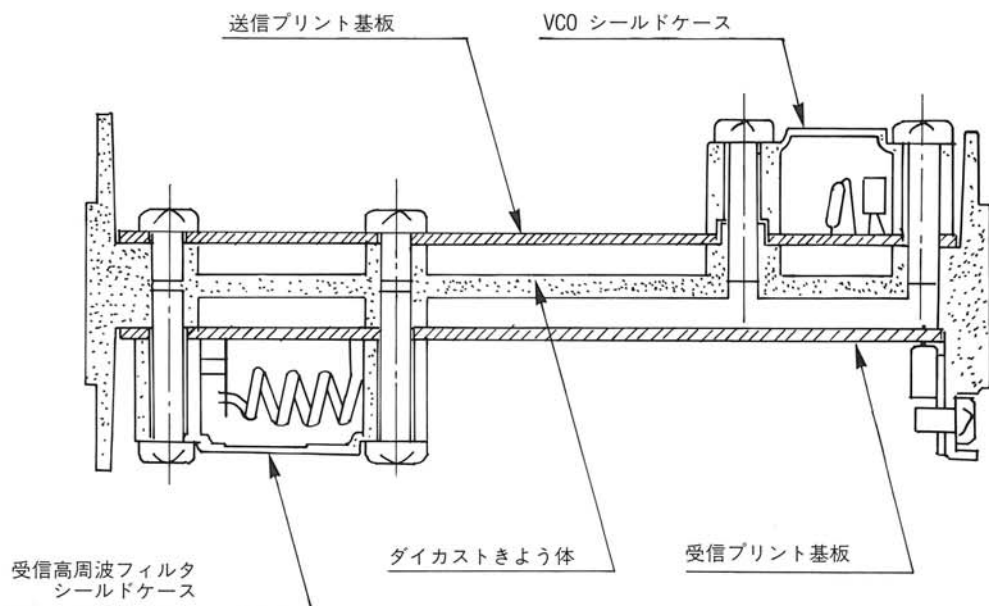


図-11 きょう体構造
Fig. 11 Structure of chassis.

では振動に対しても十分な考慮が必要である。そのため、図-11 に示すようにきょう体とシールドケースにより、プリント基板をサンドイッチするような構造とし、ネジ径は4mm、ネジ穴間隔は最大でも40mm程と短かくしている。これにより、プリント基板が振動することを防ぎ、信頼性の向上につながっている。

5. あ と が き

以上により、今回開発を行った95形400MHz帯国内向PLL化無線機の特長、設計の要点を中心に紹介してきたが、ここで得られた技術、ノウ

ハウを次期新機種、さらにはポータブルタイプの無線機に応用すると共に、小形化、高性能、ローコストに留意して開発を行い、今後市場のニーズの的確な把握と製品への迅速な展開を行い、ニーズに合致した無線機の開発に努力してゆきたい。

参 考 文 献

- 1) V. Manassewitsch 著、永井淳訳：周波数シンセサイザ設計マニュアル、日本技術経済センタ
- 2) 森永隆広監修：移動通信、‘理論と設計’、日本通信学会

参 考

昭和61年3月末現在での国内における無線局の施設総数は、3,813,604局である。このうち国内業務用無線機と呼ばれているものは、局種が基地局、陸上移動局、簡易無線局であり、全体の75.1%を占めている。中でも簡易無線局が非常に多く全体の49.1%を占める。これは、最近になりパーソナル無線による局が増加したためと考えられる。

図-12に用途別の施設状況を示す。図中ハッチングを施した部分が当社のターゲット業種である。

る。ただし、官公庁、地方公共団体を除く免許人（その業種で、その他の免許人と称される民間業者）に限られる。局数詳細は下記による。

- 1) タクシー業者 : 207,340局
- 2) 各種業務 : 312,906局
- 3) 簡易無線 : 635,714局
- 4) パーソナル無線 : 1,235,752局

郵政省通信政策局情報管理課発表の61年3月末現在の無線局施設状況報告表より抜粋。

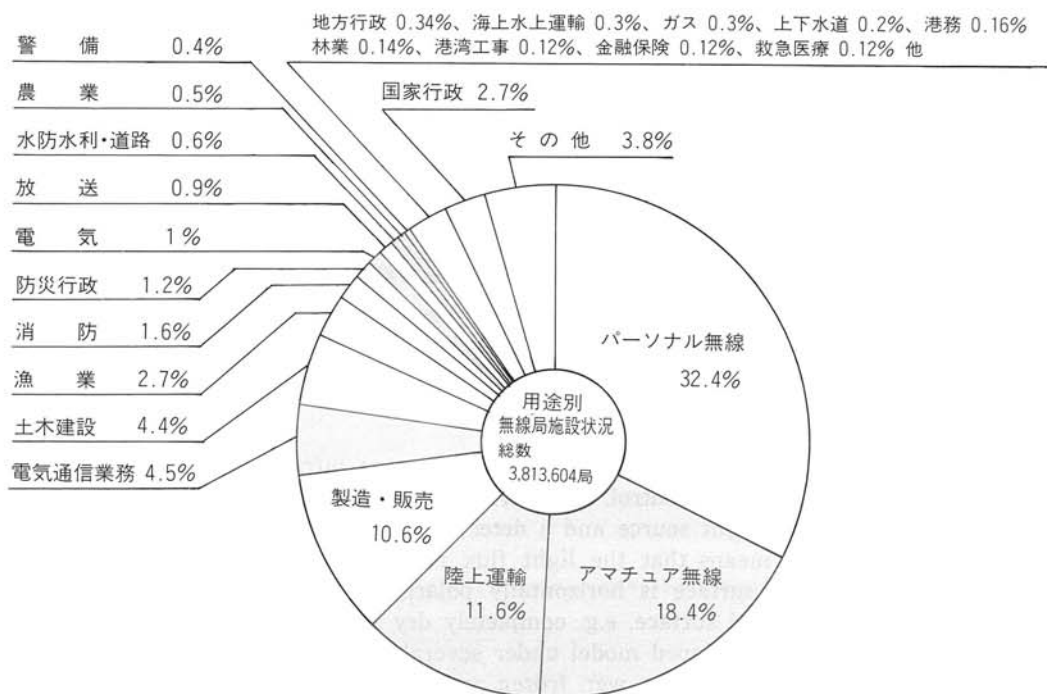


図-12 無線局の用途別施設状況

Fig. 12 Classified radio category.