

測距式レーダの構成とその特性

倉 茂 周 芳 ・ 福 島 茂

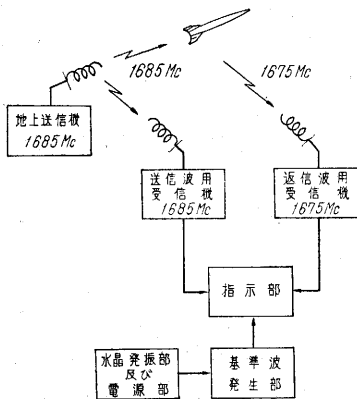
1. は し が き

ロケットの飛しょう航跡を電氣的に観測するものとして、昭和 32 年 4 月の秋田におけるロケット実験以来、自動追跡型レーダが用いられているが、その後数回の実験において記録の正確さ、操作の難易および観測の成功率等の点で、いろいろ問題があることが知られ、さらにこれらの点で安全な方法が計画されて、測距式レーダが製作されることになった。

2. 概 要

さきに使用されている自動追跡型レーダは、観測本部の地上基地にある送信機より送信パルス（周波数 1,685 Mc/パルス幅 1 μ s、繰返し 500%）を出し、ロケットに搭載されたトランスポンダからの返信パルス（周波数 1,675 Mc）を受けることにより、自動的にロケットまでの距離とその方位、高度角を記録紙に記録するものであるが、この測距式レーダでは、上記の設備を利用しそれらになら影響を与えることなく、各観測点からロケットまでの距離を測定し、カメラに記録させることによって各秒ごとの距離のデータを得ることができる。これら三点以上の観測点からロケットまでの距離のデータをもとにして計算または作図を行えば、ロケットの飛しょう航跡を求めることができるが、観測点を増加し、その地点をうまく選定することによって精度は極めて良くなると共に、距離が遠くなるにつれてますますその精度が向上する。

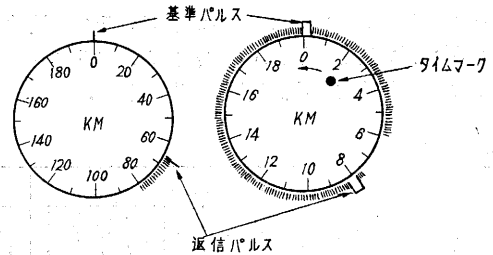
第 1 図に示すように、指示部のブラウン管（J スコープ）には一周が 20 km



第 1 図 総合系統図

のものと 200 km のものがある、この円形スイープを作る正弦波は周波数精度の高い水晶発振器によって制御されている。2 台の受信機によって地上よりロケットに送られる電波を受信して得たパルス（以下基準パルスと称す）と、ロケットに搭載されたトランスポンダから送り返される電波を受信して得られたパルス（以下返信パルスと称す）とをそれぞれ J スコープの中心電極に加え

ることにより、第 2 図のような記録が得られる。指示された距離は、地上送信機よりロケットを経て観測点に至



第 2 図 距離の指示

る距離と地上送信機から観測点までの距離の差を示すもので、20 km J スコープのみを 8% のカメラに撮影している。なお時間を示す輝点が J スコープ距離目盛の内側で 1 秒ごとに反時計方向に回転していて、距離のデータと同一画面で撮影されるようになっている。地上送信機を制御する水晶発振器の周波数と、観測点にある水晶発振器の周波数とが完全な整数比でないとき、すなわち送信機の繰返し周波数 500% と円スイープの繰返し 500% とが一致していないときは、J スコープの像は時計方向にまたは反時計方向にゆっくり回転するが、観測点の水晶を微調整すれば、ほぼ完全に静止させることができる。信号対雑音比の良好なときは、スイッチを自動に倒しておけば、自動的にこの像を撮影できるが、S/N 比の悪いときでもスイッチを手動に倒し、指示部のハンドルを操作することにより、記録を得ることができる。

3. 参 考 諸 元

測距式レーダに必要な機器として地上送信機およびレーダトランスポンダはすでに紹介されているが説明の便宜上あらためてここにその諸元を示す。

(1) 地上送信機

送信周波数	1,685 Mc
送信出力	10 kW 尖頭値
送信パルス幅	1.0 μ s
繰返し周波数	500%
送信アンテナ利得	8 db (直線偏波に対して)
指向性	35° 半値角
定在波比	1.4 以下 1,660 Mc から 1,700 Mc まで

(2) トランスポンダ

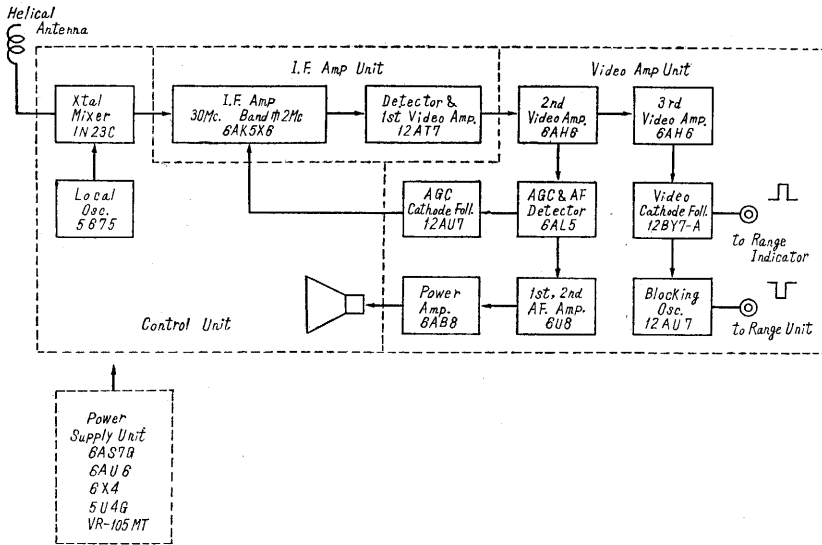
受信周波数	1,685 Mc
送信周波数	1,675 Mc

送信パルス幅 1.0 μ s
 送信出力 80W
 送信アンテナ利得 0 db
 同期感度 75 dbm

4. 受信機

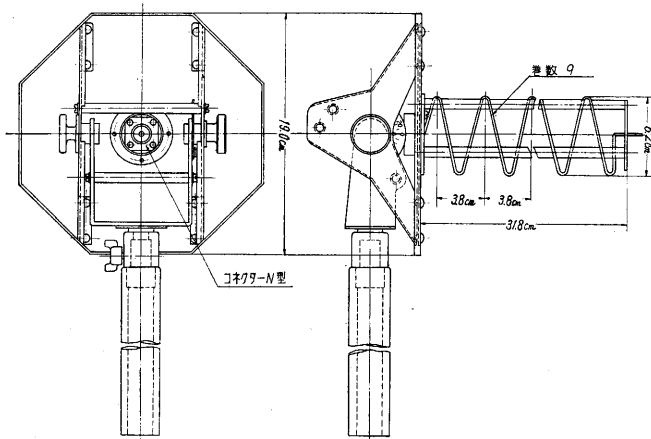
2台の受信機共に同じ構成で、受信方式はクリスタルミキサを用いるスーパーヘテロダインである。第3図の系統図によって、その概略を説明する。

ヘリカルアンテナで捕えられた電波は、その周波数より30 Mc 低い局部発振器からの出力と、クリスタルミキサにおいて混合され中間周波に変換される。



第3図 受信機系統図

中間周波増幅部にて大きく増幅検波された信号は、第1ビデオ増幅器を経て正のパルスとなり、低容量の短い同軸線路によって、次のビデオ増幅部に送られる。ここで信号は第2、第3ビデオ増幅器を経てさらに増幅され、正のパルスとなり、カソードフォロアによってインピー



第4図 受信アンテナ

ダンス 950 Ω のビデオケーブルに接続され、指示部に送られる。また第3ビデオ増幅器のカソード側出力は、負のパルスであるが、このパルスをピーク検波する AGC 検波回路では、パルスの尖頭値に比例した負の直流電圧を得て、これをカソードフォロアに送り、出力インピーダンスを下げ、中間周波部にフィードバックすることにより AGC 動作を行う。また AF 検波回路は 500% のパルスをピーク検波し、積分回路の時定数をその周波数に選ぶことにより鋸歯状波を作り、その信号はさらにフィルタを通して正弦波に近い波形に直され、制御パネルのスピーカーに送られ音によるモニタも行うことができる。

制御パネルには局部発振周波数微調用のダイヤルをはじめ、各スイッチ指示計器等があって、このパネルで操作を行うようになっている。

受信機の諸元は下記の通りである。

受信可能周波数

1,660 Mc ~ 1,700 Mc

中間周波数 30 Mc

中間周波帯域幅 3.2 Mc

雑音指数 13 db 以下

受信アンテナ利得 8 db

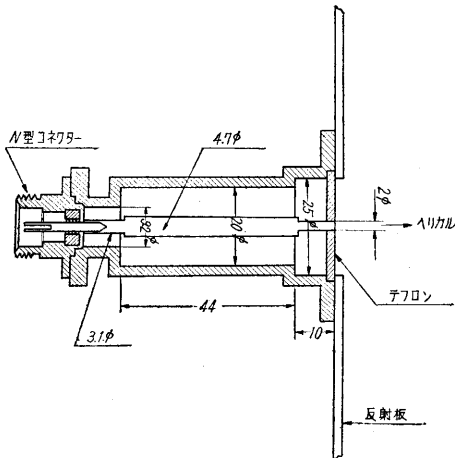
5. 受信機の回路と動作

(1) 受信アンテナ

ロケットからの電波は直線偏波でスピンのため、ヘリカルアンテナを採用している。構造は第4図に示すようなもので、2段に伸縮できる構造の木製の三脚に取りつけられ、運搬の時は三脚とアンテナは取りはずして別々の収容箱に収められる。アンテナインピーダンスは約 150 Ω で 50 Ω 給電線との整合は第5

図に示すように、 $\frac{1}{4}$ 波長同軸変成器を用いた。定在波比は未調整のとき 1.6 であったが、ヘリックスの立上り部分を反射板に近づけ、最初の一巻のピッチ角を小さくすることにより、周波数 1,660 Mc から 1,700 Mc の範囲で 1.2 以下となっている。ヘリックス立上り部分に水滴が付着すると性能が劣下するが、外側にポリエチレンの袋をかぶせておけば、この上に水滴が付着しても定在波比には、ほとんど影響なく 1.1 から 1.2 に変化する程度である。

(2) クリスタルミキサ 高周波コネクタのすぐ近くにスタブをおき、さらにそれより $\frac{3}{8}\lambda$ の位置に鉱石およびスタブをおいた構造のもので、局部発振との結合はできるだけ弱くし

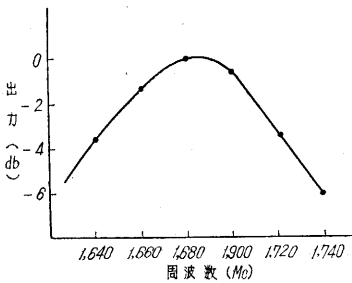


第 5 図 λ/4 同軸変成器

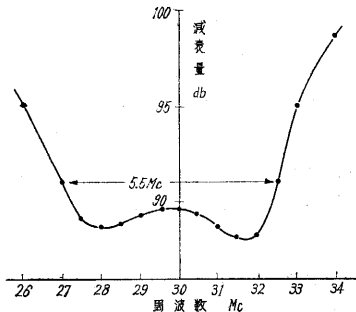
て、信号が局発側に漏れて S/N 比を悪くしないようにしている。鉍石電流が $300 \mu A \pm 100 \mu A$ になるように、結合を選んだときの S/N 比は最良で、このときの周波数特性は第 6 図に示される。

(3) 中間周波増幅部 初段増幅器は、雑音指数の小さい 6AK5 使用のカソード回路とし、入力変成器は第 7 図に示すような特性の二重同調型コイルを使用した。また本部に設置されるレーダの受信機では、第 4, 5 増幅器は中間周波ゲート回路とし、6AS7 の第 3 グリッドに基準波発生部よりのゲートパルスを与えて、返信パルスを受ける受信機に基準パルスが受信されないようにしている。

(4) AGC 回路 第 8 図にその回路を示す。V₁ のカ



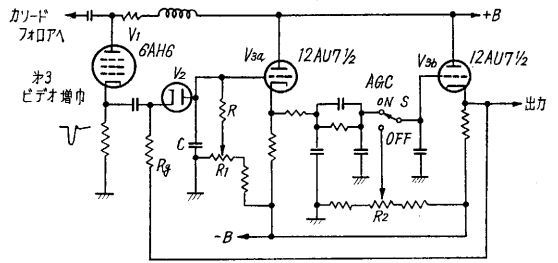
第 6 図 ミクサー周波数特性



第 7 図 入力変成器周波数特性

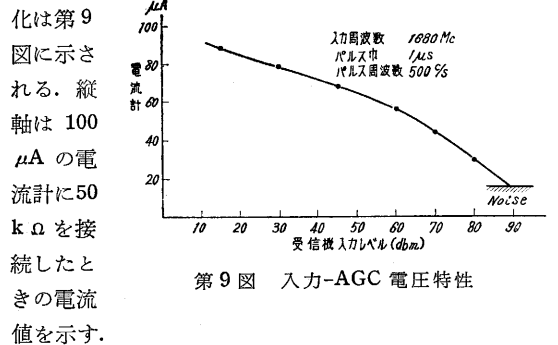
ソード側は、負のパルスで、V₂ により C が一度その尖頭値まで充電されるときは、V_{3b} のカソードも同電位だけ負となり、抵抗 R_g を通して V₂ のカソードに、その電位がフィードバックされ、充電される電圧はいつもパルス尖頭値に比例するようにしている。V_{3a} と V_{3b} の間にある回路は、AGC の時定数を決

めるフィルタで、R₁ は AGC 利得調整、R₂ は AGC on-off スイッチを off としたとき、その電圧を手動調整



第 8 図 AGC 回路

できる可変抵抗である。信号入力レベルに対する AGC 電圧の変



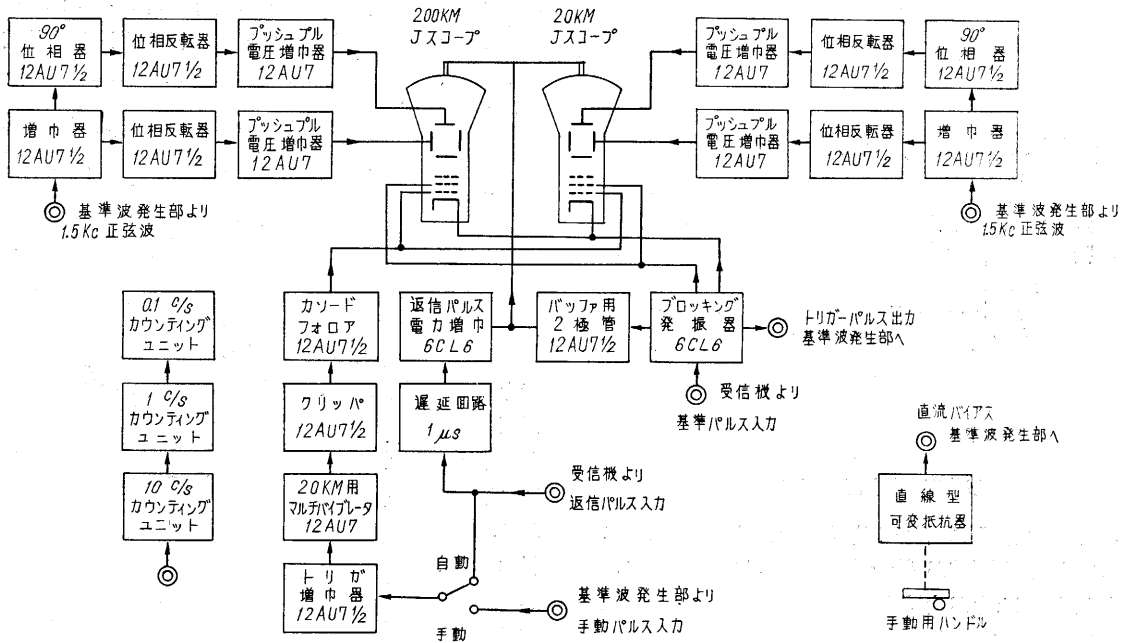
第 9 図 入力-AGC 電圧特性

6. 指示部

系統図に示すように、二つの J スコープの偏向板には位相の 90° 異なった正弦波が加えられ、一方は 1.5 kc すなわち、一周が 200 km、他は 15 kc、すなわち 20 km の円スイープを行っている。これらの正弦波は、基準波発生部より与えられ、指示部では一度増幅された後 90° の位相器に加えられ、両者はさらに位相反転器を経た後、それぞれのプッシュプル増幅器の格子に加えられている。基準パルスは、ブロッキング発振器をトリガーして、その出力は J スコープの中心電極に加えられ、一部はカソードおよび第 3 グリッドに加えられて、常にその位置を明示している。返信パルスが受信されると、これは 20 km マルチバイブレータをトリガーして第 2 図に示すような記録がとれる。スイッチを手動に倒せば 20 km マルチバイブレータは後に述べるように、基準波発生部の手動トリガーパルスによってトリガーされ、指示部のハンドルを回転することにより、任意の位置で 20 km の範囲を見ることができる。

(1) 90° 位相器 第 11 図にその回路とベクトル図を示す。各回路定数が図のように定められているとき、90° 位相差を与えるような R の値は、次のようになる。

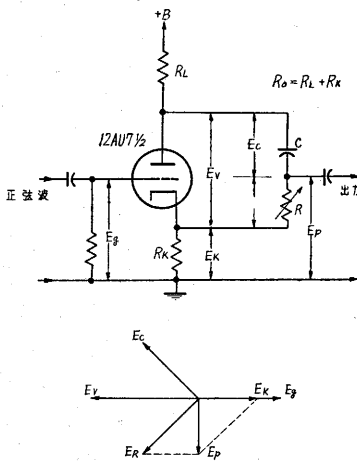
$$R = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\left(\frac{R_0 r_p}{R_0 + \mu R_k + \gamma_p} \right)^2 + \frac{R_0 \gamma_p}{\omega^2 C^2 (R_0 - R_k)}} - \frac{R_0 \gamma_p}{R_0 + \mu R_k + \gamma_p} \right\} \quad (1)$$



第10図 指示部系統図

ここでその周波数における C のリアクタンスは R_0 に比して十分大きいとして $\frac{R_0 r_p}{R_0 + \mu R_k + r_p}$ の項を無視すれば上式は下のようになる。

$$R = \frac{1}{\omega C} \sqrt{\frac{R_k}{R_0 - R_k}}, \quad R_L = R_k \quad \text{なら} \quad R = \frac{1}{\omega C} \quad (2)$$

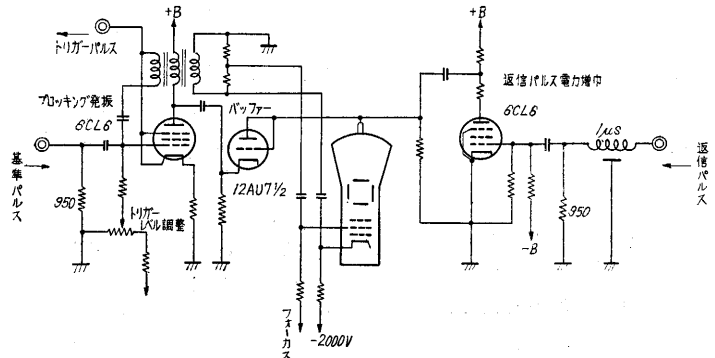


第11図 90°位相器とベクトル

いま信号が格子に与えられると、カソードの電圧 E_K はグリッドの電圧 E_G と同位相で、 R が (2) 式のようにえらばれるときは、 R の両端の電圧 E_R は真空管の両端の電圧 E_V より 45° だけ位相が進んでいる。 E_V はまた E_G より 180° だけ位相が進んでいる。したがって出力 E_P は E_R と E_K の和であるからベクトル図に示すような関係になる。

(2) 信号増幅部 第12図は、基準パルスおよび返信

パルスを整形または増幅して、Jスコープの各電極に必要な信号を与える回路を示す。基準パルスが受信機より 950Ω のビデオケーブルによって指示部まで送られると、このパルスはブロッキング発振器をトリガーして、パルス幅 $1 \mu s$ の立上りの良いパルスとなる。このプレート側出力をそのままJスコープの中心電極に加えたのでは、返信パルス側の出力によってブロッキング発振器がプレートからトリガーされるので、2極管を通して加

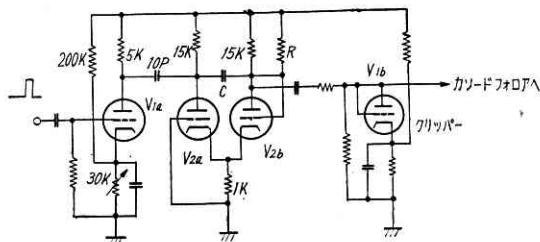


第12図 信号増幅部回路

えその影響を防いでいる。基準パルスは常にその位置を明示することが必要なのでその期間だけカソードに負のパルスを加えて輝度変調を行っているが、そのとき第2グリッドにも適当な電圧のパルスを加えて像のぼけるのを防いでいる。

(3) 20 km 用マルチバイブレータ この回路はカソード結合型の単発マルチバイブレータで、第13図のように V_{1a} のパルス増幅器に正のパルスが与えられると、そ

のプレート出力は負となり、これは V_{2a} のプレートからさらに C を通って V_{2b} のグリッドに与えられ、いままで導通状態にあった V_{2b} をカットオフにする。そのため V_{2a} のカソードの電位が下がり V_{2a} が導通状態となる。その後この状態が C と R によって定められた期間だけ継続した後、 V_{2b} は導通状態、 V_{2a} はカットオフとなって動作は完了する。このパルス幅は 20 km J スコープのうち 18 km の範囲を明るくするために R を調整して 60 μs にしている。このようにして得られた出力はクリ



第 13 図 20 km 用マルチバイブレータ

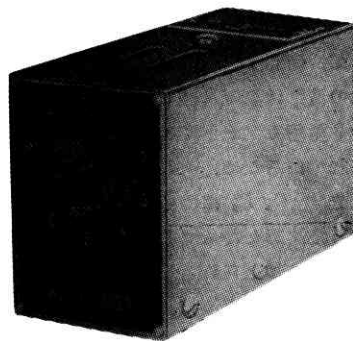
ップャーを通してさらに良好な波形とし、カソードフォロアを経て各 J スコープの第 1 グリッドに与えられ輝度変調を行う。

(4) カウンティングユニット 第 14 図に示すように 6AV6 のパルス増幅器と計数放電管 4CG-10A とを一つのユニットにまとめ、GT 管ソケットにて電源を供給できるようにしたものである。使用規格は第 1 表に示す。

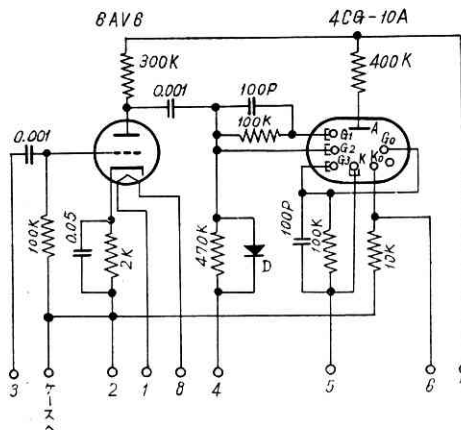
第 1 表 使用規格

陽極電圧	約 380 V
陽極電流	約 2 mA
バイアス電圧	約 +30 V
ヒーター電圧	6.3 V (DC, AC)
ヒーター電流	0.3 A
入力電圧	約 +3 V
入力波形	矩形波またはそれに準ずる波形
最高応答速度	20,000 PPS

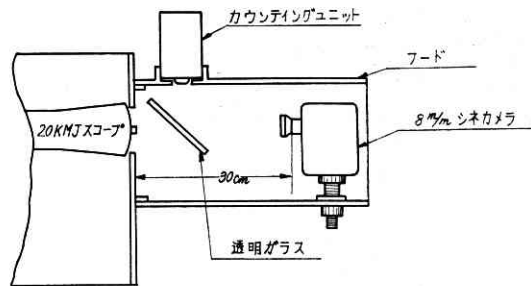
(5) タイムマークとその基準 タイムマークを示す輝度は第 15 図のようにカウンティングユニットをガラス面に反射させて



第 14 図 カウンティングユニット



20 km J スコープの中央に像を作らせ、これを 8% シネカメラに撮影している。本部にあるレーダではロケットのスタートのスタート信号を有線を受けて、そのときからカウンティングユニットを動作させることによって正確な射発時間を知ることができるが、他の観測点ではこのような方法は実行できないので、あらかじめカウンティングユニットは動作させておき、発射前数秒で地上送信を 1 秒間停止し返信パルスの消失した記録をとることによって本部のレーダによる記録と対比して発射の時刻を合致させる。

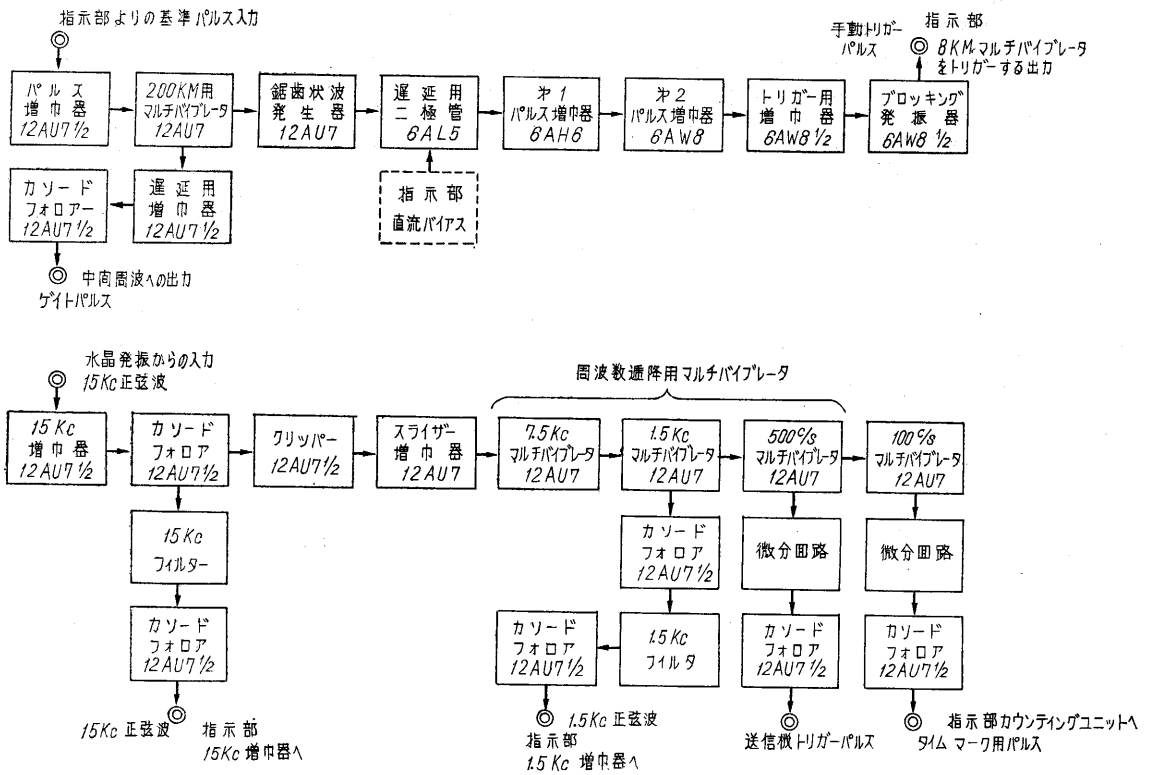


第 15 図 タイムマーク投射の方法

7. 基準波発生部

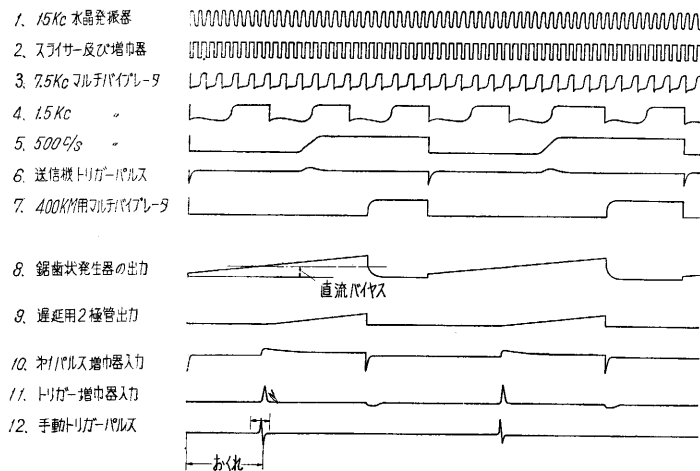
本部は 15 kc の水晶発振器を原器とし円形スイープに必要な 15 kc および 1.5 kc の正弦波、送信機をトリガーするための 500% の負のパルス、およびカウンティングユニットを駆動させるタイムマーク用 100% の正のパルスを作るいわゆる基準波発生回路と、基準パルスより任意の遅れをもち、指示部のハンドルによってその遅れを制御するような手動トリガーパルス発生回路とに大別できる。

(1) 基準波発生回路 実効値約 1V の 15 kc 正弦波を一度増幅し、カソードフォロアによって 15 kc のフィルタに送られる。このフィルタは π 型のローパスフィルタを 2 段につないだもので、並列誘導を行い無限大の減衰を与える周波数を 30 kc および 45 kc にえらんである。したがって J スコープに送られる 15 kc は歪率 0.5% 以下のものである。カソードフォロアの出力はさらに増幅器を通しクリップおよびスライスすることによって矩形波とし、この立上りによって次段の周波数通降用マルチバイブレータを同期させる。これらの関係を第 17 図に示す。このマルチバイブレータは最も基本



第 16 図 基準波発生部系統図

的なグリッド結合型のもので、波形の立下りを良好にするためにプレートおよびグリッド抵抗は低い値をえらんでいる。なお 100% マルチバイブレータはプレートおよびグリッドの抵抗を大きくして、結合コンデンサの容量が大きい値になることを避け、波形の立上りも良好になるようにしている。500% および 100% のマルチバイブレータ出力を微分し、前者は負のパルス、後者は正のパルスをとることによって送信機トリガ用パルスとタイムマーク用パルスを得ることができる。



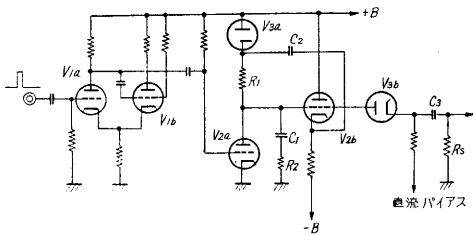
第 17 図 基準波発生部出力波形

1.5 kc 正弦波は 1.5 kc のマルチバイブレータ出力を 15kc の場合と同様カソードフォロアとバンドパスフィルタを通して得られる。

(2) 手動トリガーパルス発生回路 第 18 図は鋸歯状波によって遅延を得る回路である。V₁は 400 km 用マルチバイブレータで、V_{2a} は基準パルスが与えられてから 1.5ms の間は、完全にカットオフとなり、そのプレート電圧は次第に増大するが、C₂ によるフィードバックのため R₁ の両端の電圧は一定となる。したがって C₁ に流れる電流は一定であるから R₁ を流れる電流を i とすれば、τ sec 後の C₁ の両端の電圧 e_τ は

$$e_{\tau} = \frac{i}{C} \tau$$

となって、時間に対して直線の変化をする。この波形は第 17 図 8 のようになる。V_{2a} の 2 極管カソードには直流バイアスが加えられているため、その出力波形は 9 のようになり C₂ R₂ によって微分されると 10 のような波形となって第 1 パルス増幅器のグリッドに加えられる。このようにして得られたパルスは直流バイアスを変化させることによってその位置を適当にずらせることができるから、直流バイアス電源とし



第 18 図 鋸歯状波による遅延回路

て指示部の直線型ポテンショメータを用いれば、その回転角に比例した遅れを得ることができる。

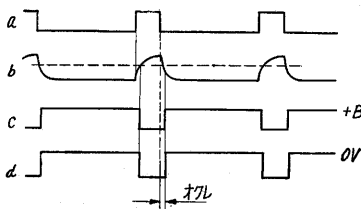
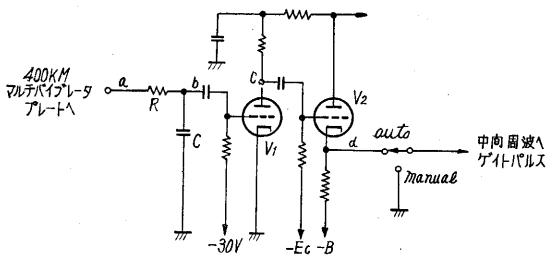
(3) ゲートパルスを得る回路 地上送信機の出力はトランスポンダに比して十分大きいので、たとえ両者の周波数が異なっても同時に受信される場合がある。このようなときはレーダのスイッチを自動に倒すと不都合が起るからトランスポンダ用の受信機へゲートパルスを送り基準パルスを消して返信パルスのみを得る必要がある。第 19 図はその回路で 400km マルチバイプレータからの出力を RC による積分回路を通してわずかに遅らせ、これを増幅整形することによってゲートパルスを得ている。V₂ はカソードフォロアでグリッドのバイアス E_c を加減することによって C 図のようにパルスの正の部分が丁度 0V になるように定める。このようなパルスを実間周波ゲート回路に送ることによって、受信機は基準パルスより約 5 μs 遅れた位置から 400 km までの範囲を受信できることになる。

8. 水晶発振部

この部分は東洋通信機株式会社の制作によるもので、以下技術課石坂謙三氏の記事により概略を説明する。

水晶発振部は水晶発振器、緩衝増幅器および電源とからなり、その主要性能は次の通りである。

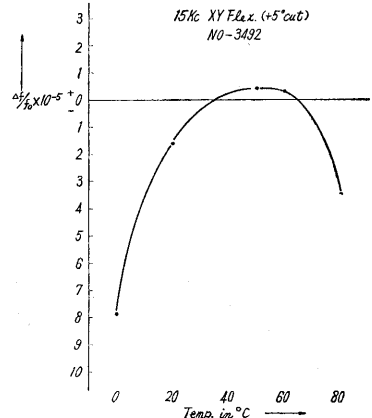
発振周波数および偏差 15 kc ± 1 × 10⁻⁶ 以内



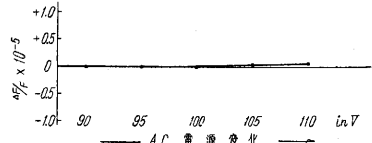
第 19 図 ゲートパルスを得る回路と波形

周波数安定度 1 × 10⁻⁶ 以内
出力および変動 0 db ± 0.17 db
歪率 34 db 以内

水晶発振子は XY 屈曲振動を行う細長い棒状振動子で、金の蒸着電極を有し線支持した上ガラス容器内に真空封入してあり、Q は約 1.5 × 10⁵ である。周波数温度特性

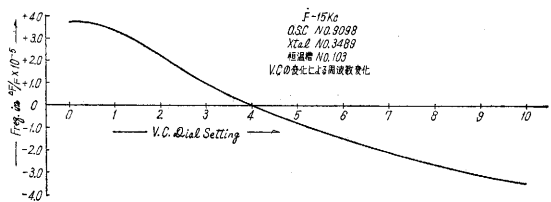


第 20 図 周波数-温度特性



第 21 図 入力電圧 (AC 100V) 変化による周波数変化

る。発振周波数の微細調整は水晶振動子と直列に接続される可変容量により行なう。この関係を第 22 図に示す。図の横軸は 50 pF 可変容量のダイヤル目盛を、縦軸は比発振周波数である。



第 22 図 VC の変化による周波数変化

9. あとがき

以上測距式レーダは 33 年 5 月のロケット実験において試作第 1 号の実用化試験を行い、その後回路の一部を変更し、現在は男鹿半島の寒風山上をはじめ、秋田県由利郡の各観測点に設置されて、6 月の実験では一応の成果を納めた。終りに本装置の計画に終始ご指導を頂いた生産技術研究所高木教授、野村助教授、また設計および試験に当って常にご援助下さった黒川助教授、協力を頂いた関係会社、製作担当の柏木氏をはじめ同僚諸氏に感謝する。(1958. 8. 10)