

一周波多段ロケット同時追尾レーダ方式

齋藤 成文・野村民也・倉茂周芳
 福島 茂・小羽根澄夫・瓜本信二

1. ま え が き

ロケットの性能が向上してきたので、ロケットの特性を解析するために、測定精度の向上、観測の多角性および観測の安定性を要求されるようになった。すなわち多段ロケットの観測において、メインおよびブースタロケットの運動の同時観測等の要求である。本システムはこの要求に従い開発したものであるが、ロケットの特性を測定するためにトランスポンダを利用しているの、そのアンテナ、周波数の割当、トランスポンダの規格化および地上設備等の関係上「同一周波数による」ことを特徴とするシステムである。現在「鹿児島宇宙空間観測所」においてこのシステムを観測に供しているの、その報告をする。

2. 概 要

本システムの考え方は、地上のレーダ相互間の送信パルスの位相を固定し、飛しょう体よりの返信パルスをレーダ個々において個々のゲートパルスにより撰別し、自己の送信パルスに対する返信々号のみを受信して観測するという事である。すなわちレーダ1が送信パルス T_1 を発射し、飛しょう体より T_1 の返信パルス E_1 が帰ってきたとき、レーダ1は E_1 のみを撰別しこの信号を利用して角度の追跡、距離の追跡あるいはテレメータリング等を行なうのである。地上に他のレーダ2および3が存在するとももちろんそれらの送信パルス T_2 および T_3 に対する返信パルス E_2 および E_3 が同一飛しょう体より地上に帰ってくる。これらの信号は同一搬送周波数なるゆえに他のレーダに対し干渉を及ぼす可能性はあるが、本システムではレーダ2および3の個々において、ゲートパルス G_2 および G_3 によりそれぞれ返信パルス E_2 および E_3 のみを撰別し、相互間の干渉を防いである。

3. 総 合 動 作

(1) シ ス テ ム

鹿児島宇宙空間観測所においてレーダは第1図に示すように配されている。まだ第3レーダは設備されていないが、本システムでは3回線まで同時観測することができるが、第3レーダの設置予定位置は第1図に示すように第2レーダの隣である。3回線までの許容容量とは地上レーダ3台にて飛しょう体に搭載されているトランスポンダ1台、2台あるいは3台の同時観測が可能であるということの意味する。3台の地上レーダにて飛しょう体に搭載された1台のみのトランスポンダを観測する場合は、2台のレーダがバックアップ的動作を行なって観

測の安定性を増し、しかも観測点の相異から細かいロケットの運動を解析することができる。3台の地上レーダで3台のトランスポンダを同時に観測する場合は三つのステージのロケット飛しょう特性を同時に観測できるのであって、多段ロケットのように最終段ロケットの飛しょう特性はその前段までのブースタロケットの特性の結果であるものに対しては、非常に有効な観測システムである。

(2) レーダの仕様

第1レーダと第2レーダの距離間隔は約2kmで、ロケットランチャ点は約300mの位置にある。第1レーダの概略性能は第1表に示すように送信繰返し周波数は83.3c/s、最大観測距離は1800kmである。このレーダは既に設置され観測に供されていたのであるが、このレーダを含んだ本システムに沿ったレーダとして第2レーダの性能を第2表のように定めた。このレーダについては詳しく本報告において後述されている。

(3) 系 統 図

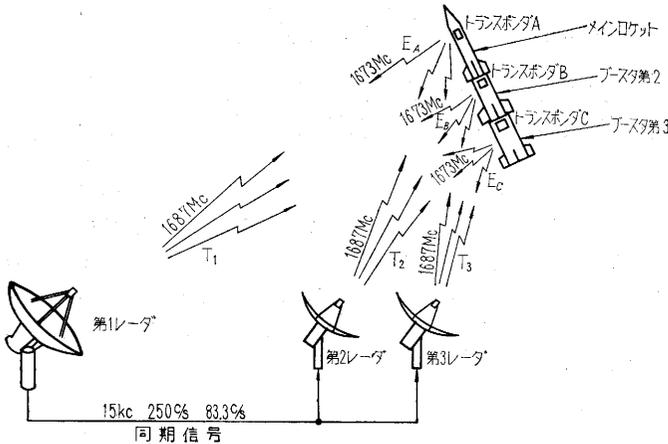
システムの総合系統図を第1図に示す。第1レーダは本システムの基準であって、すべての同期信号を発する。同期信号の周波数は15kc、250c/sおよび83.3c/sであって、第2および第3レーダはこれらの信号により

第1表 第1レーダ規格

| 項 目 | 仕 様 |
|--------------|----------|
| 送 信 周 波 数 | 1687 Mc |
| 受 信 周 波 数 | 1673 Mc |
| 送信パルス繰返し周波数 | 83.3 c/s |
| 送 信 出 力 | 500 kW |
| アンテナローピング周波数 | 7.5 c/s |
| パ ラ ボ ラ 径 | 4 m |

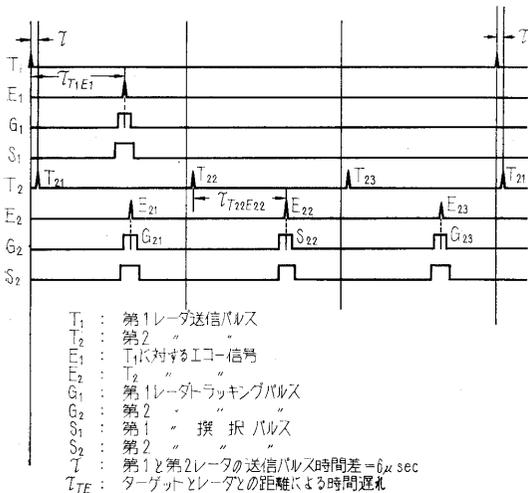
第2表 第2レーダ規格

| 項 目 | 仕 様 |
|---------------|--------------|
| 送 信 周 波 数 | 1687 Mc |
| 受 信 周 波 数 | 1673 Mc |
| 送信パルス繰返し周波数 | 250 c/s (基本) |
| 送 信 出 力 | 10 kW |
| アンテナローピング周波数 | 25 c/s |
| パ ラ ボ ラ 径 | 2 m |
| 送 信 パ ル ス 切 替 | 可 |
| トラッキングゲート切替 | 可 |
| 送信パルス位相切替 | 可 |



第1図 総合システム図

同期される。第2および第3レーダは個々としても完全に動作するものであるが、本システム内で動作する時は、距離基準信号を持たない不完全なレーダとして働く。15kcの同期信号は第2および第3レーダにおいては同期信号というより距離基準信号としての役割をし、各レーダにおけるすべてのパルスの精密な位相はこの15kcの信号により規定される。第2および第3レーダはこの15kcの信号だけを受けても普通のレーダとして動作することができる。250c/sおよび83.3c/sの信号により第2図に示すような位相関係に各レーダの送信パルスT、選択パルスSおよびトラッキングパルスGを作る。簡単のために二つのレーダの信号関係を示している。第2レーダの送信パルスT₂は第1レーダの送信パルスT₁の1周期内に3本ある。このT₁の1周期を三分割することにより、3台のレーダにて同時に3台のトランスポンドを観測することができる。もし4回線同時観測を希望するならば、T₁の1周期を四分劃しなければならない。T₂およびG₂のサフィックスはT₁に対す



第2図 レーダ2台の各パルス位相関係

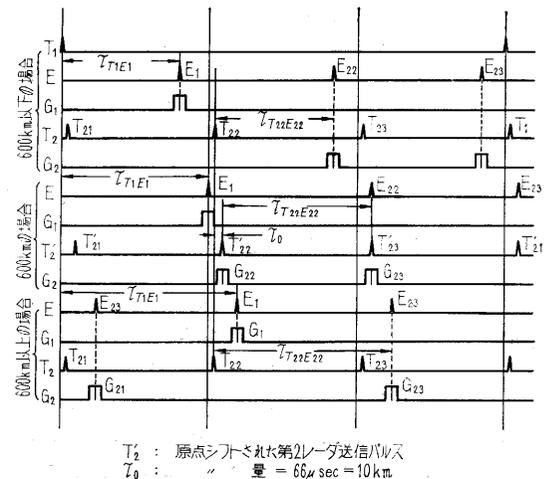
る順番を示す。第2レーダは特別な性能を有していて、簡単なスイッチ操作により自由にT₂₁, T₂₂およびT₂₃とG₂₁, G₂₂およびG₂₃を取捨選択でき、サフィックスの異なるパルスによっても観測できる。たとえばT₂₁とG₂₂の組合せ、あるいはT₂₂とG₂₁のようなもので、前者は600kmより1200kmまた後者は1200kmから1800kmまでの観測に用いられる。

(4) 原点シフト

第1レーダの観測可能距離は1800kmであるが、上記のように一周期を三分割することにより送受信の周波数を変えているにもかかわらず第2あるいは第3レーダの送信信号が第1レーダに600km間隔に飛び込むのは避けられない。したがって第1レーダは600kmごとに他のレーダよりの干渉を受ける可能性があるが、本システムではこの可能性をT₂あるいはT₃の原点シフトにより防いでいる。すなわち第1レーダのトラッキングゲートG₁が約595kmに到達すると原点シフト信号を第2および第3レーダに送り第3図のようにT₂およびT₃を10kmだけシフトしてT_{2'}およびT_{3'}とする。G₁が600kmを越し約605kmになるとシフト信号がなくなりT₂およびT₃に復帰する。すなわちG₁がT₂およびT₃を横切るとき強制的にT₂およびT₃をずらしてG₁とT₂およびT₃が同一時間に重なる事を避けている。

(5) トランスポンドの識別

地上レーダの区別はT₁の一周期を三分割したパルスにより行なっているが、飛しよう体のトランスポンドの識別は返信パルスの遅延時間により行なっている。普通のトランスポンドはトリガ信号が到達するとただちに返信パルスを発するのであるが、本システムでは識別のために個々の遅延時間を設けそれぞれのトランスポンド



第3図 原点シフト説明図

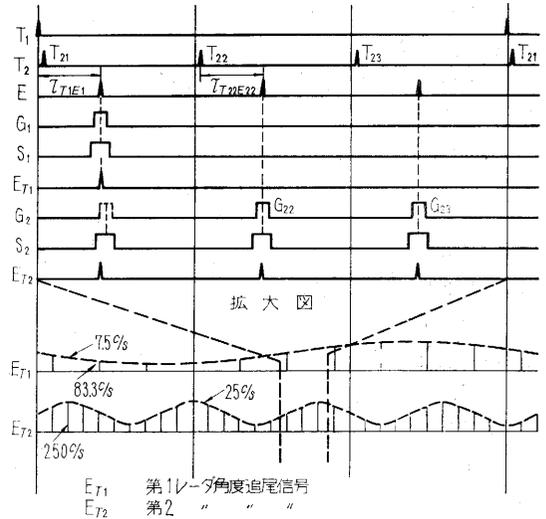


第 4 図 トランスポンダの識別遅延説明図

は個有時間後返信パルスを送る。3 台のトランスポンダを同時観測するときには、この識別遅延は約 50 および 100 μsec である。遅延時間の多い方のトランスポンダを後段のロケットに使用する。すなわち最大遅延のトランスポンダを常にいちばん速く飛ぶメインロケットに搭載する。したがって第 4 図のようにロケットが切り離される以前、あるいは以後いずれの場合でも 3 台のトランスポンダの返信パルスの時間差は常に識別遅延時間差以上である。今識別遅延 0 および 50 μsec の 2 台のトランスポンダを使用する場合、ロケット分離前はこの二つの返信パルスの時間ズレは 50 μsec であるが、分離後メインロケットは加速され時間ズレは大きくなり最終的には飛しょう時間が同じだとしても飛しょう距離の差だけ生じる。地上レーダはこの遅延差による返信パルスの時間ズレを利用して識別する。

(6) レーダ追尾信号

地上レーダは自動追尾型であるため角度信号と距離信号を得なければならない。距離信号はトラッキングゲート G と返信パルス E との時間差により得ている。しかし角度信号は地上レーダがロービング型である故返信パルス E の振幅の放絡線により得ている。第 1 レーダのアンテナロービング周波数は 7.5 c/s であるので T_1 の 1 周期に 1 本の信号すなわち 83.3 c/s の E_1 の振幅を利用することにより質の良い角度信号を得られる。しかし第 2 および第 3 レーダのアンテナロービング周波数は 25 c/s であるので 250 c/s の返信パルスすなわち E_{21}, E_{22} および E_{23} あるいは E_{31}, E_{32} および E_{33} の全部を必要とする。第 5 図に示すように角度信号は撰択ゲート S にてピックアップして得ている。この撰択ゲート S とトラッキングゲート G とは同一時間に存在するが、信号 S は常に



第 5 図 角度追尾信号説明図

250 c/s のパルス信号であるに反し、信号 G はスイッチ操作により間引くから 83.3 c/s のパルス信号になることもある。距離追尾信号は返信パルスとトラッキングゲートパルス G との時間差を比較して直接得ているので、また距離追尾信号の同波数成分は 10 c/s 以下という低いものなので、83.3 c/s の比較信号でも十分質の良い追尾信号が得られる。したがって第 2 および第 3 レーダにおいては、角度追尾信号は常に 250 c/s の撰択ゲートにより、また距離追尾信号は最低 83.3 c/s にもなるトラッキングゲート G により撰択される。本システムにおいてはトラッキングゲート G によりエコー信号 E を送信パルス T よりの時間軸上において捕捉追跡し、G と同一時間軸上にある撰択パルス S を E との同時性を保たせしめて S により E を撰択せしめて角度追尾を行なうものである。

4. 信号位相の考察

次にこのレーダシステムにより実際の観測状況を想定しそのときの信号の位相関係を考えてみる。その観測状況は次のようなものが考えられる。

- (1) 2 台のレーダでトランスポンダ 1 台を載せたロケットを追跡する場合
- (2) 2 台のレーダで 2 台のトランスポンダをそれぞれ異なる飛しょう体に載せ同時に観測する場合
- (3) 3 台のレーダで 3 台のトランスポンダを載せた三つの飛しょう体を同時に観測する場合

このほかの場合も考えられるがすべての場合がこの三つのケースにより推定できるので、代表例として上記の状態を考えてみる。

- (1) 2 台のレーダにて 1 台のトランスポンダを観測する場合

この場合の信号の位相関係を第 6 図に示すが、図中の T_{21} はロケットがランチャ上にある場合は使用せずロケットが相当距離に行なった後使用する。これは T_{21} を

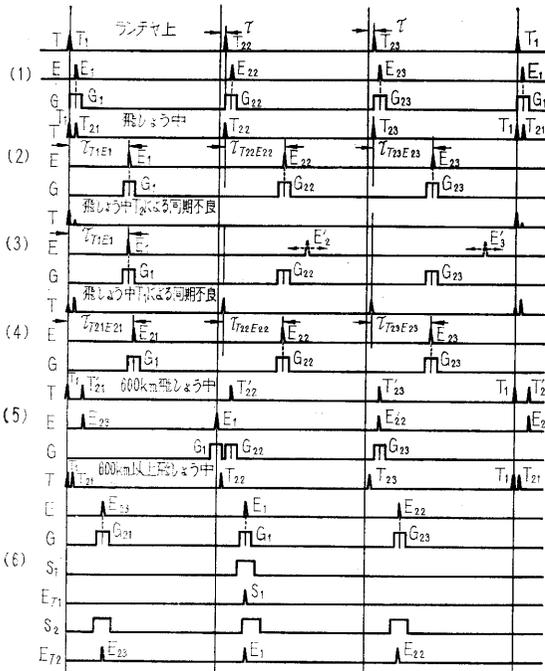
だけ遅らしている関係上ロケットがランチャ上にある場合 E_1 と同時もしくはそれよりも少し遅れて生じるので、第1レーダにて E_1 を追跡せずに T_{21} を捕捉する可能性があるためである。第2レーダはトラッキングゲート G_{22} および G_{23} を利用する。第1および第2レーダの所用の直距離信号はそれぞれ T_{1E_1} と $T_{22E_{22}}$ および $T_{23E_{23}}$ である。 E_1 は第2レーダにおいても受信でき E_{22} および E_{23} の傍に生じるが、 T_{21E_1} は所要信号でないので G_{21} を消して観測する。ロケットが飛しょう後 T_{21} をも発射するが、すべてが正常に動作している場合 T_{21} はなんら効果を上げない。すなわち T_1 はロケットがいかなる位置に来て必ず T_{21} よりも先にロケットに到達し、トランスポンダを同期してエコー信号 E_1 を生じる。この T_{21} は第1レーダに異常が起こった場合の対策である。すなわち第6図(4)に示すように T_1 がなんらかの障害によりロケット上のトランスポンダを同期させることができない場合、 T_{21} が効果を発揮してトランスポンダを同期させる。トランスポンダは約 220 c/s の目走周波数を有し地上よりの送信々号により同期し返信パルスを生成するので、もしこの場合 T_{21} がないとトランスポンダの同期が歯抜けとなって同期感度が低下する恐れがある。この場合 G_2 は正確な直距離を示すが G_1 は約 τ だけ異なる値を示す。反対に第2レーダがなんらかの障害によりトランスポンダを同期させることができなかった場合第6図(3)のような状態となって E_{22}' および E_{23}' はトランスポンダの自走信号となって、約 220 c/s

のトランスポンダを 83.3 c/s の T_1 で同期させることになってトランスポンダの同期感度は低下するが、この場合 T_1 の同期能力は T_2 の約 200 倍もあるので問題ではない。この場合 G_1 は正確は直距離を示すが G_2 と E_2 の間に時間的ズレを生じて測距はもちろんできず、その上撰択パルス S_2 による返信パルスの取り出しもできないので、角度追尾ができなくなる。これらの結果はすべて第2レーダの送信パルス T_2 の事故により誘起されたものでシステムの欠陥ではない。ロケットが 600 km を越えるとき図の(5)に示すように第1レーダにより T_2 を移相させて T_2' とするので G_1 との干渉は起こらない。したがって G_1 は正確に測距を行なうが G_2 は T_2' と丁度重なって測距はできない。 T_{23} に対する返信パルスは T_1 の後にいるのでトラッキングゲート G_{22} を G_{21} に切り換える必要がある。図の(6)に示すように 600 km を越えると原点シフトはなくなり、再び T_2 に戻って G_1 との干渉を防ぎ第1および第2レーダとも正常に観測が行なえる。この場合 T_{22} および T_{23} の返信パルス E_{22} および E_{23} はそれぞれ T_{23} および T_{21} の後に生ずる。したがって送信パルスと一つずつサフィックスのズレたトラッキングゲートで距離測定を行なう。角度追尾信号は撰択パルス S_1 および S_2 により第1および第2レーダにおいてそれぞれ返信々号より取り出された 83.3 c/s および 250 c/s の E_{T_1} および E_{T_2} である。返信々号 E_1 は T_1 に同期しているゆえ、 S_2 とは τ だけ位相がずれているが S_2 のパルス幅は E_1 を取り出すに十分だけ広く取っている。したがって E_{T_1} および E_{T_2} とも質の良い角度追尾信号を得られる。

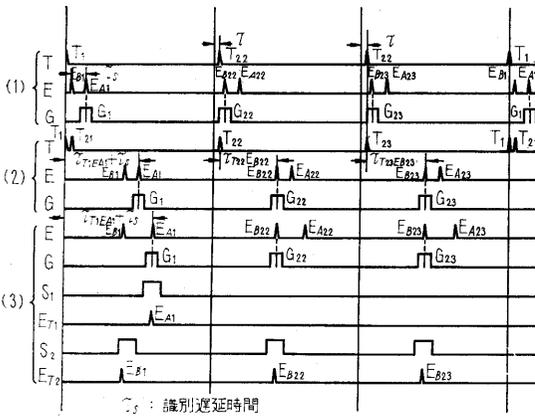
以上のように、地上レーダ2台が正常に動作している場合、あるいは1台が正常でない場合でも他のレーダには少しの障害も及ぼすことなく観測が行なえる。

(2) レーダ2台にて2台のトランスポンダを観測する場合

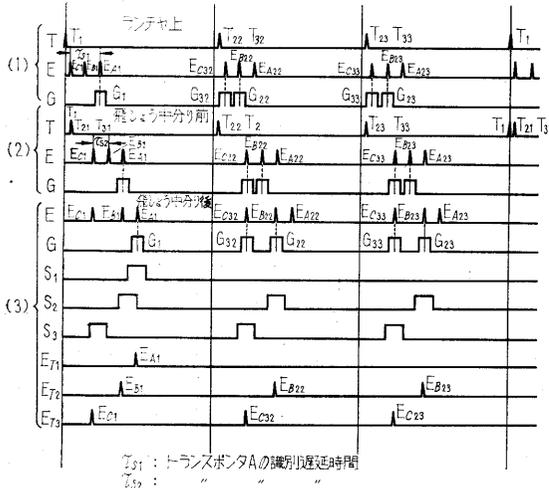
この場合の信号パルスの位相関係を第7図に示す。2台のトランスポンダAおよびBは識別遅延 50 および 0 μ sec を有するもので、それぞれメインおよびブースタロケットに搭載される。メインロケットは必ずブースタより速くに飛ぶので、第1レーダにより追跡される。ロケットの分離前二つのトランスポンダはほとんど同一の所にあるゆえ第7図の(1)に示すように E_B は E_A より識別遅延差だけ先に生ずる。第1レーダは E_{A1} を第2レーダは E_{B22} および E_{B23} を捕捉し観測する。距離測定には E_{A22} , E_{A23} および E_{B1} は使用しない。分離後図の(3)に示すようにメインロケットは必ずブースタより早く速くに飛ぶので、いっそう E_A は E_B より遅れて時間的に重ならないので相互干渉は起こさない。撰択パルス S_1 および S_2 によりそれぞれ E_{A1} と E_{B1} , E_{B2} および E_{B3} を取り出してそれぞれのレーダにおいて質の良い角



第6図 レーダ2台にてトランスポンダ2台を追跡する場合の信号位相図



第 7 図 レーダ 2 台にてトランスポンダ 1 台を追跡する場合の信号位相図



第 8 図 3 台のレーダにて 3 台のトランスポンダを観測する場合の信号位相図

度追尾信号 E_{T1} および E_{T2} を作ることができる。地上レーダ相互間の干渉は第 6 図と同様ないと考えられる。

(3) 3 台のレーダにて 3 台のトランスポンダを観測する場合

この信号の位相関係は第 8 図に示す。3 台のトランスポンダ A, B および C は識別信号としてそれぞれ 100, 50 および 0 μsec の遅延時間を有していて、それぞれメインロケット, 2 段目ブースタおよび 1 段目ブースタに搭載され使用される。第 1, 第 2 および第 3 レーダはそれぞれトランスポンダ A, B および C を観測するものとする。第 3 レーダはまったく第 2 レーダと同性能の特性を有している。ロケットがランチャ上にある場合、図の (1) に示すように第 1, 第 2 および第 3 レーダはそれぞれ T_{11} , T_{22} , T_{23} , T_{32} および T_{33} を出しトランスポンダを同期させる。 T_{22} と T_{32} および T_{23} と T_{33} は

レーダの位置の関係上同一時刻に発射される。それぞれのレーダはトラッキングパルス G_{11} , G_{22} , G_{23} , G_{32} および G_{33} を使用して返信々号 E_{A1} , E_{B22} , E_{B23} , E_{C32} および E_{C33} を捕捉追跡して距離の観測を行なう。ロケットが飛しようすると 4 (1) と同様に T_{21} および T_{31} をも発射し T_{11} の不測の事故に備える。識別遅延信号 τ_{S1} および τ_{S2} により容易に G により E_A , E_B および E_C の撰択はできる。初段ブースタが分離すると E_A および E_B は E_C よりロケットの間隔だけ遅れる。600 km 通過時の原点シフトおよび角度追尾信号の撰択はすべて 4 (1) 項および 4 (2) 項と同様に考えられる。地上レーダの事故による影響も 4.1 (3) および (4) と同様に考えられレーダ相互間の干渉は考えられない。

5. 得 失

前項までに述べたように、本方式にてレーダによる 3 回線までの同時観測ができるのであるが、この方式の得失を考えてみる。利点は同一周波数により上述のような観測ができるということであるが、その後には次のような欠点と考えられる。

- (1) 主ロケットに搭載するトランスポンダに識別信号としての遅延を持たさなければならない。
- (2) レーダ相互間を同期するために同期信号ラインを設備しなければならない。
- (3) 第 2 レーダが複雑化する。

(1) はロケットの距離測定の精度の中に識別遅延時間の精度が関連してくることを意味する。50 μsec 以上という大きい遅延を要求されるので、容積の関係上受動素子を使うわけにいかず後述される如き半導体素子回路を開発したが、現在使用温度範囲以内で 0.5 μsec 程度の精度が得られ解決されたと考えられる。(2) は避けたい事項であるが、他の目的でもレーダ相互間に伝達ケーブルを必要とするので、その中の一対を拝借して使用している。(3) については別項にて説明されるが、あまり複雑化せずに目的を達した。以上の結果本方式はロケット観測には非常に有効と考えられる。

6. あとがき

鹿児島島のロケット観測ではほとんど 4 (1) 方式で観測を行なっているが、最近実験を行なった RT-150 および L-3-1 号機の観測においては 4 (2) 方式を利用した。L-3 型機はご承知のように高度 1000 km にも達したのであるが、予想通りレーダ相互間になんら干渉も起こさず観測できたことは非常な喜びであった。いまだ 4 (3) 方式による観測の結果は得ていないが、今までの結果より十分可能性があると推定できる。

終わりに本方式の作成に多大のご指導をたまわった宇宙航空研の高木教授に深くお礼を申し上げる。

(1964 年 9 月 22 日受理)