

# L-4S型のビーコン電波の追跡

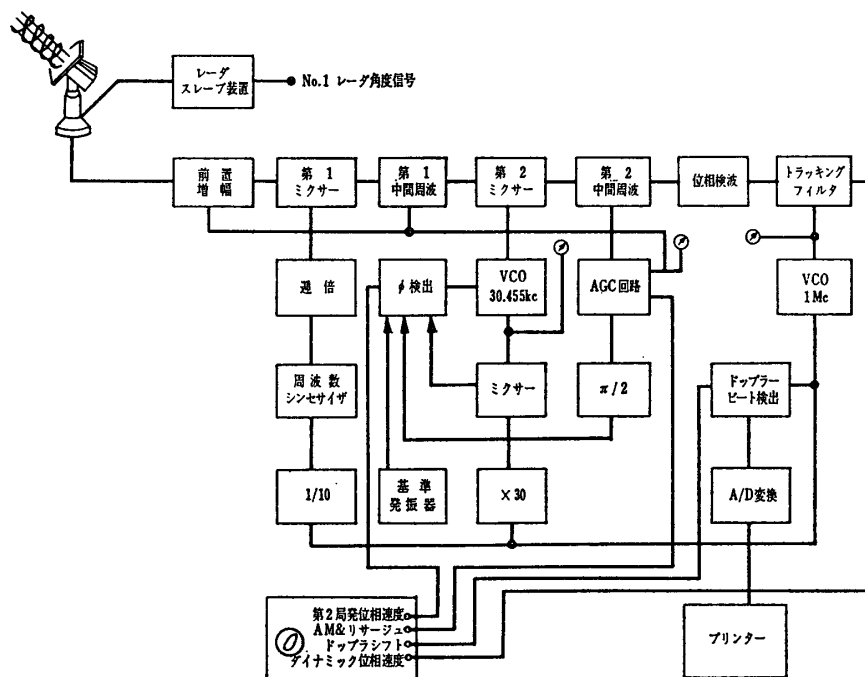
齋藤 成文 ・ 野村 民也 ・ 林 友直  
 長谷部 望 ・ 関口 豊 ・ 中島 邦宏  
 西本 博信 ・ 長江 幸昭

## 1. 序

L-4S型ロケットの4段目に搭載されているビーコン電波の周波数は、136.16 Mc/s と 296.7 Mc/s の二波である。

136.16 Mc/s の電波は 136 Mc/s 角度追尾装置とドップラー受信機で追跡し、角度情報とドップラー周波数の観測が行なわれている。角度情報は 18 mφ トラッキングテレメータに送られ、アンテナ引込み範囲内に入ると 296.7 Mc/s に対して自動追尾を行なうようになっている。

一方 296.7 Mc/s の電波は 18 mφ トラッキングテレメータの角度追尾用ビーコン電波である。このビーコン電波をキャッチして、18 mφ のテレメータアンテナを自動追尾させ、テレメータ信号を受けると共に、精度の高い角度情報を得ている。また同時にドップラー周波数の観測も行なっている。



第1図 136 Mc ドップラ周波数検出装置

## 2. ドップラー周波数追尾受信機

この装置は位相同期方式を用いたドップラー追尾受信装置である。系統図は第 1 図のとおりで、空中線から得られた入力信号は前置増幅器で低雑音増幅されたのち、同軸ケーブルで伝送され、更に 136 Mc/s 帯のまま増幅される。

136 Mc/s の信号は第 1 局発信号により 30 Mc/s の第 1 中間周波数になり増幅される。第 1 局発信号は周波数シンセサイザ出力 (33.3 Mc/s $\pm$ 200 kc/s, 100 c/s step) を 5 通倍して得られ、500 c/s ごとに設定できる。増幅後第 2 中間周波に変換され 455 kc になるが、第 2 局発信号は 1 Mc/s の VCO の発振周波数を 30 通倍し、これに位相検波基準信号の 455 kc/s を加えた 30.455 kc/s の基準波と位相検波される。

位相誤差出力はトラッキングフィルタを経て VCO を制御する。

VCO の出力は第 1 局発用シンセサイザおよび第 2 局発回路の両方に加えられて位相同期ループが完結する。

第 1 表 136 Mc/s 受信装置

|      |  | 角度追尾装置  | ドップラー周波数検出装置  |
|------|--|---|---|
| アンテナ | 方式<br>利得<br>偏波<br>駆動   | ターンスタイル八木 4 素子<br>15 dB (直一円)<br>直線(垂直)円(右施)<br>水平(左施)<br>DC プリントモータ  | ヘリカル 単素子<br>9 dB (円一直)<br>右施円偏波<br>DC プリントモータ   |
| 受信部  | 周波数<br>NF<br>方式<br>第 1 中間周波<br>帯域幅<br>VCO 安定度<br>VCO 可変範囲<br>第 2 中間周波<br>帯域幅<br>AGC 時定数<br>位相同期帯域幅<br>追尾表示<br>総合感度 | 136.16 Mc/s 他 4 波<br>5 dB 以下<br>ダブルスーパーヘテロダイン<br>位相同期検波<br>30 Mc/s<br>2 Mc/s<br>5 $\times$ 10 <sup>-7</sup><br>$\pm$ 4 kc/s<br>455 kc/s<br>2 kc (300 c/s)<br>1, 10, 100 sec<br>5, 10, 20, 40, 100 c/s<br>Open Loop (OL)<br>Locked Loop (LL)<br>-144 dBm | 136~137Mc/s, 500c/s ステップ<br>3 dB 以下<br>ダブルスーパーヘテロダイン<br>位相同期検波<br>30 Mc/s<br>500 kc/s<br>1 $\times$ 10 <sup>-6</sup> /day<br>$\pm$ 50 c/s<br>455 kc/s<br>2 kc/s (300 c/s)<br>3, 30, 300 sec<br>5, 10, 20, 40, 80 c/s<br>Auto Lock<br>Manual<br>-160 dBm |
| モニター | オシログラフ<br>カウンタ   | 位相同期観測用<br>ドップラービート観測用  | 位相同期観測用<br>ドップラービート観測用  |
| 記録機  | デジタル<br>プリンター  |   | 局番(3けた), 時刻(6けた)<br>ドップラー周波数(6けた)<br>識別(1けた)  |

AGC 信号は位相同期回路と直交した同期振幅検波により得られ増幅回路に加えられる。

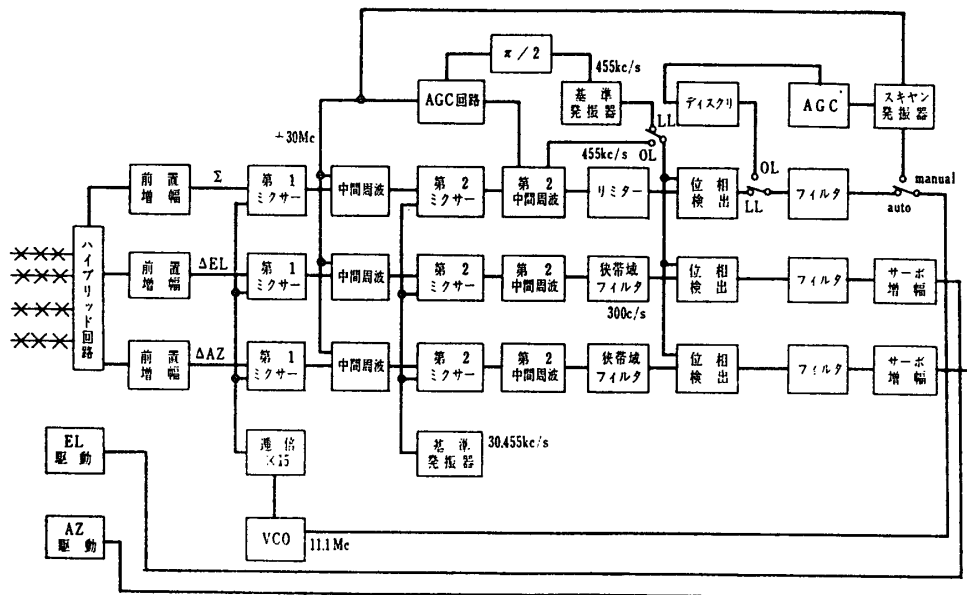
ドップラーの計測は VCO 出力を 1500 通倍して、常に 1500 Mc/s の搬送波に相当した精度で計測するようになっている。この 1500 Mc/s 搬送波相当のドップラー効果は 1 秒ゲートでドップラービート出力が周波数カウンタによって計測され、またこのほかにデジタル記録器によりデータを印字する。

以上のドップラー周波数追尾受信機の諸元は第 1 表に示してある。

### 3. 136 Mc/s 角度追尾装置

この装置はダブルスーパーヘテロダイン方式を用いた位相同期方式のビーコン電波角度追尾装置である。

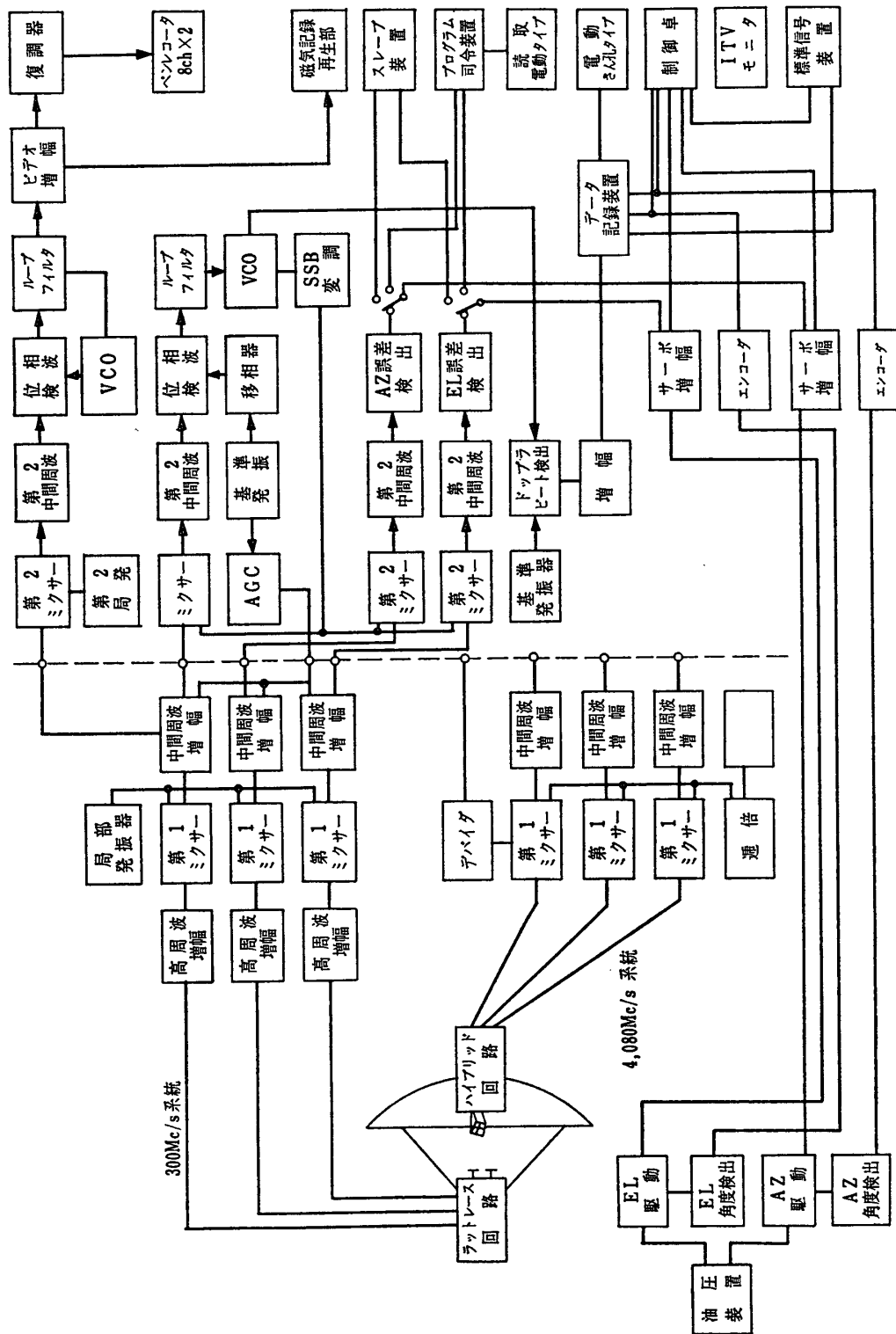
第 2 図に角度追尾装置の系統図を示す。この装置は、4 素子ターンスタイル八木アンテナ



第 2 図 136 Mc/s 角度追尾装置系統図

を用いたサイマルテナアスローピング方式を使用している。おのこののアンテナからの信号は、ハイブリッド回路により、和差信号、すなわち sum,  $\Delta EL$ ,  $\Delta AZ$  を作り出し前置増幅器で増幅されたのち、おのこのは、水晶発振の VCO を 15 通倍した第 1 局部発振器からの信号と、第 1 ミクサーで 30 Mc/s の第 1 中間周波数にして増幅される。さらに信号は 30.455 kc/s の水晶を用いた第 2 局部発振器により、第 2 ミクサーで 455 kc/s の第 2 中間周波数となり増幅される。この装置の場合、VCO はあらかじめ設定された周波数の水晶を用意して受信する。たとえば L-4 S の場合には、受信ビーコン信号が 136.16 Mc/s であるから、中間周波数分だけ高い 166.16 Mc/s の 1/15 の 11.077 Mc/s の水晶を使用している。

和信号は振幅制限後、455 kc/s の基準波で位相検波され、フィルタを経て VCO を制御することにより位相同期ループを構成している。



第 3 図 トラッキングテレメータ装置

一方角度信号は、狭帯域フィルタを経て同様に位相検出された後、フィルタを通してサーボ増幅され、アンテナを駆動し自動追尾を行なうようになっている。

この装置は自動追尾はもちろんのこと、2 m レーダおよびプログラム司令装置にスレーブすることもできる。

以上の角度追尾装置の諸元は第 1 表に示してある。

第 2 表 トラッキングテレメータ受信機

|           |                     | ロケット追尾用   | 衛星追尾用                 |
|-----------|---------------------|---|-----------------------|
| アンテナ      | 形式                  | サイマルテニアスローピング方式   | カセグレインサイマルテニアスローピング方式 |
|           | 周波数                 | 296.7 Mc/s  | 4079.3 Mc/s           |
|           | パラボラ直径              | 18 m  | カセグレイン反射鏡 2 m         |
|           | 開口角                 | 150°  | 150°                  |
|           | 一次放射器               | ターンスタイル   | ホーン                   |
|           | 利得                  | 30 dB   | 53 dB                 |
|           | 偏波                  | 右円偏波  | 左円偏波                  |
| 受信部       | 周波数                 | 296.7±0.05 Mc/s   | 4079.3±0.2 Mc/s       |
|           | 中間周波数               | 30 Mc/s   | 30 Mc/s               |
|           | 復調形式<br>帯域幅<br>総合感度 | 位相同期方式<br>500, 150, 50 c/s<br>-130 dBm                  |                       |
| 駆動装置      | 方式                  | 油圧サーボ駆動方式   |                       |
|           | 油圧発生装置              | 175 馬力ディーゼルエンジン EL, AZ 別駆動                              |                       |
|           | 最大角速度               | AZ: 3°/sec, EL: 1°/sec                                  |                       |
|           | 最大角加速度              | AZ: 3°/sec, EL: 1°/sec                                  |                       |
|           | 最大圧力                | 140 kg/cm <sup>2</sup>                                  |                       |
|           | 最大流量                | 440 l/cm <sup>2</sup>                                   |                       |
| 角度検出装置    | 方式                  | BCD デジタル伝送方式  |                       |
|           | 角度指示                | 単位: 度, けた数 6  |                       |
|           | 最小角度指示              | 0.005°  |                       |
| 電動タイプ     | ・                   | 局番(1けた), データ符号(3), EL(6), AZ(6)<br>時刻ドップラー周波数(8), 日付(3) |                       |
|           | サンプリング周期            | 10.60 sec 切替  |                       |
|           | 印字速度                | 500 字/分   |                       |
| プログラム司令装置 | 入力型式                | 6 単位せん孔テープ  |                       |
|           | 符号                  | 商用テレタイプ符号   |                       |
|           | 入力                  | 時刻(10進6けた), EL(10進6けた), AZ(10進6けた)                      |                       |
|           | サンプリング周期            | 30, 60 sec  |                       |
|           | テープリーダー             | メカニカル方式 500 字/分   |                       |
| 電動タイプ     | 印字読取 500 字/分        |   |                       |

#### 4. 18 mφ トラッキングテレメータ

この装置は 18 mφ パラボラアンテナを持ち、300 Mc/s 帯のロケット追尾と 4080 Mc/s 帯の人工衛星電波追尾の2系統のトラッキングができる。

トラッキングテレメータの系統図は第3図、諸元は第2表に示してある。

ロケット追尾の場合には、空中線装置の四つのターンスタイルアンテナによって受信された 296.7 Mc のビーコン電波を、ラットレース回路で和差信号に変換し、sum, ΔAZ, ΔEL 信号としておのおの増幅したのち、30 Mc/s の第1中間周波数に変換する。

人工衛星追尾の場合には、空中線装置はカセグレイン方式に変更される。一次ふく射器は4個のホーンアンテナで形成され、受信された 4080 Mc/s のマイクロ波信号は、ハイブリッド回路で sum, ΔAZ, ΔEL 信号としてとり出され、おのおのを前置増幅したのち、30 Mc/s の第1中間周波数に変換される。

sum 信号は追尾用ビーコン信号とテレメータ信号に分離される。テレメータ信号はテレメータ用の中間周波増幅器で増幅され、テレメータ受信機へ送られる。一方追尾用ビーコン信号は、他の ΔAZ ΔEL 信号と共に追尾受信機へ送られる。ここではビーコン信号のみ考える。

ビーコン用 sum 信号は追尾受信機の復調器に入り、第2局部信号で 1.4 Mc/s の第2中間周波数に変換、増幅されたのち、基準波 (1.4 Mc/s) によって位相検波され、ループフィルタを通して第2局部発振器の VCO 周波数を制御する。

VCO 出力は9通倍されて 31.4±0.2 Mc/s の第2局部信号となり、第2中間周波数を制御することにより位相同期ループを構成する。

一方 ΔAZ, ΔEL の信号は第2局部信号により第2中間周波数に変換され、増幅された後基準信号と入力信号とにより同期検波して AZ, EL の角度誤差信号を得、これを制御増幅器へ加えてアンテナを駆動している。

#### 5. ビーコン電波の追跡結果

ビーコン電波は上述のとおり 136.16 および 296.7 Mc/s の2周波が使用され、おのおのの角度追尾はもちろんのこと、ドップラー周波数が観測される。

ドップラー周波数は2秒間隔のデータとして得られ、そのデータから計算して内之浦から見たロケットの速度および直距離が算出される。

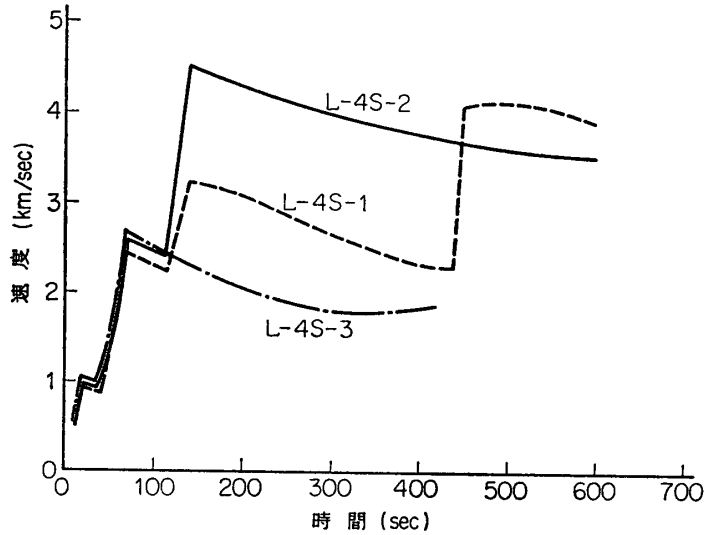
ドップラー周波数と速度との関係は次の式で表わされる。

$$V = (f_0 - f) \frac{C}{f + \beta}$$

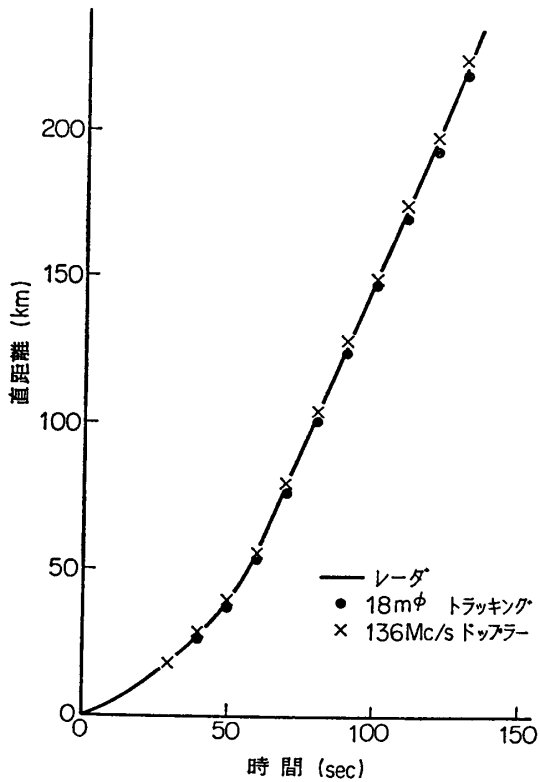
- ここで
- $f_0$ : ビーコン送信周波数
  - $f$ : ビーコン受信周波数
  - $C$ : 電波の速度  $2.99793 \times 10^8$  km
  - $\beta$ : 観測装置により定まる定数
    - $\beta = 296.3$  Mc/s (18 mφ)
    - $\beta = 1499.3$  Mc/s (136 Mc/s ドップラー)

136 Mc/s 角度追尾装置は1号機から3号機まで自動追尾し、レーダ・テレメータと同時刻まで追跡した。

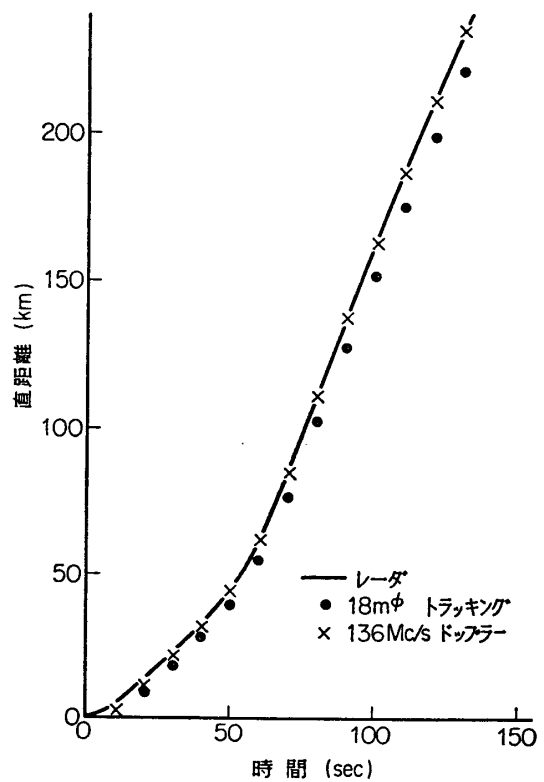
この装置はテレメータセンタの屋上にアンテナを設置しているため、発射点までの距離が近く、発射直後は角速度が大きいいため追跡できないので、約12~13秒の待ち受けで自動追尾に切り替えている。



第4図 内之浦から見たドップラー周波数より求めたロケットの相対速度



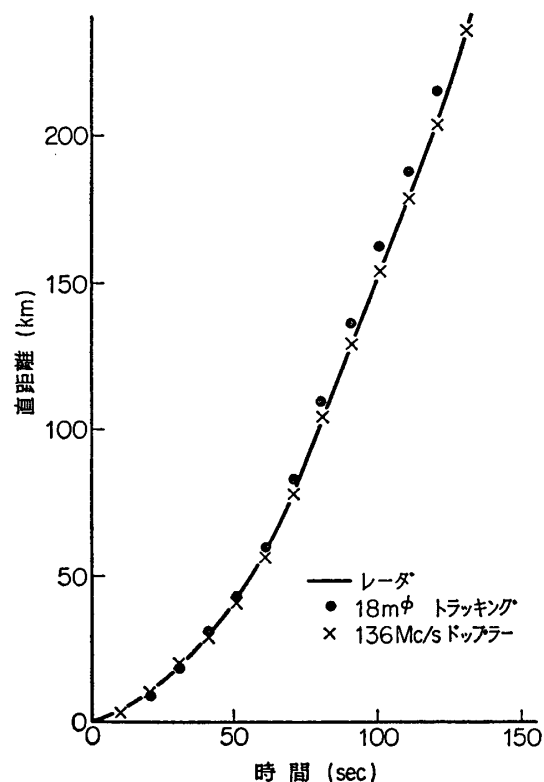
第5図 L-4S-1 レーダとの比較



第6図 L-4S-2 レーダとの比較

この装置の目的は発射時の追跡はもちろんであるが、2周目の衛星からのビーコン電波の到来方向をキャッチし、その位置を確認して他の機器へ角度情報を与えることである。

このアンテナ装置は実験用の仮設であるため、追跡角度精度は $0.5^{\circ}\sim 1.0^{\circ}$ である。次の



第7図 L-4S-3 レーダとの比較

実験までには本アンテナが完成し、気象センタに設置される予定である。

18m $\phi$  トラッキング装置は、発射時は第1または第2レーダにスレーブし、ビーコン信号をキャッチしたのち自動追尾に切り替えられる。第4段が衛星になった場合、第2周目以降は136 Mc/s 角度追尾装置からの情報のたすけをえて自動追尾を行なわせ、精度の高い角度情報を得ると共に衛星からのテレメータ信号を受けることとしている。この装置は $0.05^{\circ}\sim 0.1^{\circ}$ の誤差範囲で角度追跡を行なっている。

第4図はL-4S-1・2・3号機のドップラー周波数から計算した速度である。これは内之浦からロケットを見たときの相対速度であり、真のロケット速度ではないことに注意する必要がある。また1号機の第3段目の相対速度は3段目の方向が変化したため見かけ上2号機に比して低くでている。

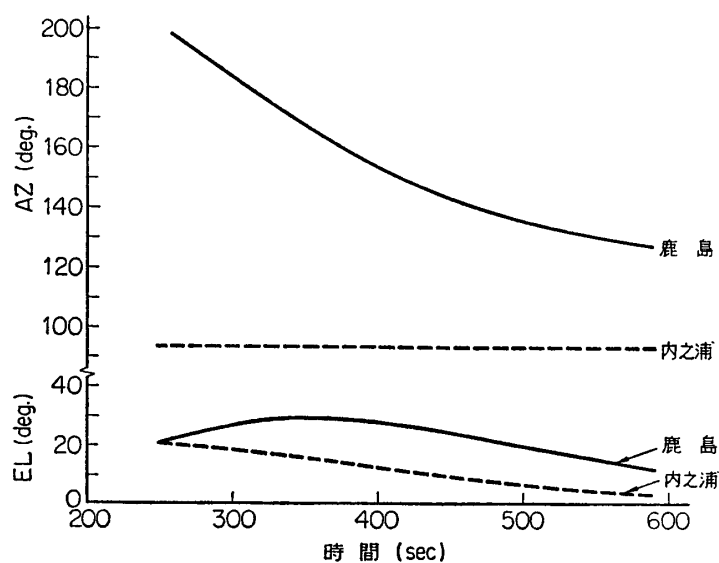
第5・6・7図はドップラー周波数(136 Mc/s・296.7 Mc/s)から積分して求めた直距離と、レーダの直距離とを比較したものである。この場合絶対的比較対象がないので、標準としてレーダの結果を考える。レーダは誤差として $\pm 0.2$  km程度の固定誤差が考えられるが、ドップラー周波数からの計算のように積分誤差は入らないので、一応標準と考えてよいと思う。

各ロケットの136.16 Mc/s・296.7 Mc/sの追跡結果をレーダと比較し、その二乗平均誤差を求めたのが第3表である。

第3表 ドップラー周波数の二乗平均誤差

| ロケット名称 | 追跡周波数<br>Mc/s | $\Delta R^2$ | 二乗平均誤差<br>$\Delta R$ km | 備 考  |
|--------|---------------|--------------|-------------------------|--|
| L-4S-1 | 296.7         | 26.522       | 5.15                    | 0~150秒までのデータを<br>レーダ結果と比較し、そ<br>の誤差分を二乗平均した<br>値 |
| L-4S-2 | 296.7         | 7.336        | 2.71                    |  |
|        | 136.16        | 1.322        | 1.15                    |  |
| L-4S-3 | 296.7         | 91.004       | 9.54                    |  |
|        | 136.16        | 0.417        | 0.65                    |  |





第 8 図 L-4S-2 号機の内之浦および鹿島の角度追跡結果

第 4 表 136 Mc ビーコン電波の受信レベル

| ロケット名称          | 角度追尾<br>dBm | ドップラー受信機<br>dBm | ロケット飛しょう直距離 |
|-----------------|-------------|-----------------|-------------|
| L-4S-1          | -90~-122    | -88~-123        | —           |
| L-4S-2          | -78~-135    | -85~-155        | 2100 km     |
| L-4S-3          | -40~-120    | -65~-150        | 860 km      |
| 最小追尾可能<br>受信レベル | -144        | -160            |             |

第 3 表からわかるように 136.16 Mc/s はドップラー周波数追尾用として特に周波数安定度を問題としているので、レーダと比較して 1 km 以内の誤差に入っている。

一方 296.7 Mc/s は、本来の目的が 18 mφ テレメータアンテナの自動追尾をさせることであり、その追跡による高精度の角度情報を得るためのものでドップラー測定 of 安定度に重きを置いていないので、おのずから差のある結果になっている。

第 8 図は L-4S-2 号機における内之浦と鹿島の電波研究所受信設備による角度追跡結果であり、鹿島からも十分角度追尾できることがわかった。

第 4 表に各ロケットの追跡に対する 136 Mc/s ビーコン電波の受信レベルの受信精囲が示されている。

角度追尾とドップラー受信機の受信レベルの違いは、使用したアンテナの違いによるものである。

## 6. 結 び

L-4S 型ビーコン電波の追跡について、追跡用機器の概要とその追跡結果について報告した。

136 Mc/s 角度追跡装置は、アンテナ系が仮設であって、本アンテナの設計資料をうるための予備実験であった。そのため、精度は  $1.0^\circ$  前後であったが、実験の目的は達した。18 m $\phi$  トラッキング装置は  $0.1^\circ$  前後の精度が期待できる。

ドップラー周波数の追尾では 136 Mc/s 一応現状としてはレーダと 1 km 前後の誤差であるが、ドップラー周波数から軌道計算するためにはもう少し安定度の向上が望まれる。

296.7 Mc/s ドップラー周波数はもともとあまり高い精度を目的として設計されていないので、他に比して精度が落ちる結果となっていることは当然である。しかし、今後もっと高い精度でドップラー周波数の観測ができるように改めれば、非常に有効になるものと期待される。

1968年10月31日 宇宙工学