

# ドップラ追尾受信装置

齋藤 成文\*・野村民也・佐藤 嘉一\*\*  
小塩 立吉\*\*・泉谷 敏之\*\*

## 1. は し が き

人工衛星軌道決定の追尾方式として、ドップラ効果に着目することは、スプートニク 1 号打上げ以来多くの衛星に試みられてきた。特に Johns Hopkins 大学 [1] においてその積極的利用の研究が行なわれ、これらの方式は Transit [2] における TRANET システムへと発展した。わが国においてミュー型ロケットによる科学衛星追尾方式としてのドップラ追尾方式の可能性が SA-10 小委員会を中心に検討され、昭和 40 年に 136 MHz ドップラ受信装置 [3] が試作され、その後本方式の実用性を確認するため、鹿島、下里、内之浦を結んで、米国の衛星を対象に 136 MHz 帯の追尾実験が行なわれ、所要の精度をもって衛星の軌道要素の算定が可能であることが確められた。この結果を基に、東京大学内之浦、科学技術庁勝浦、沖縄に 3 局を配置したドップラ追跡網が完成した。このシステムは 136,400 MHz の 2 波のドップラ計測を主にし、それに角度のデータを併用するシステムである。

本報告書は新たに設置された 400 MHz ドップラ追尾受信装置を中心に、内之浦ドップラ追尾局の概要、ドップラの追尾方式誤差分析、受信装置の動作、性能等について述べたものである。ドップラ測定方式には 136,400 MHz 共、3 GHz に換算して計測する方式を採用、装置個有誤差 0.1 m/sec r. m. s. 以下を得ている。

## 2. 内之浦ドップラ追尾装置の構成

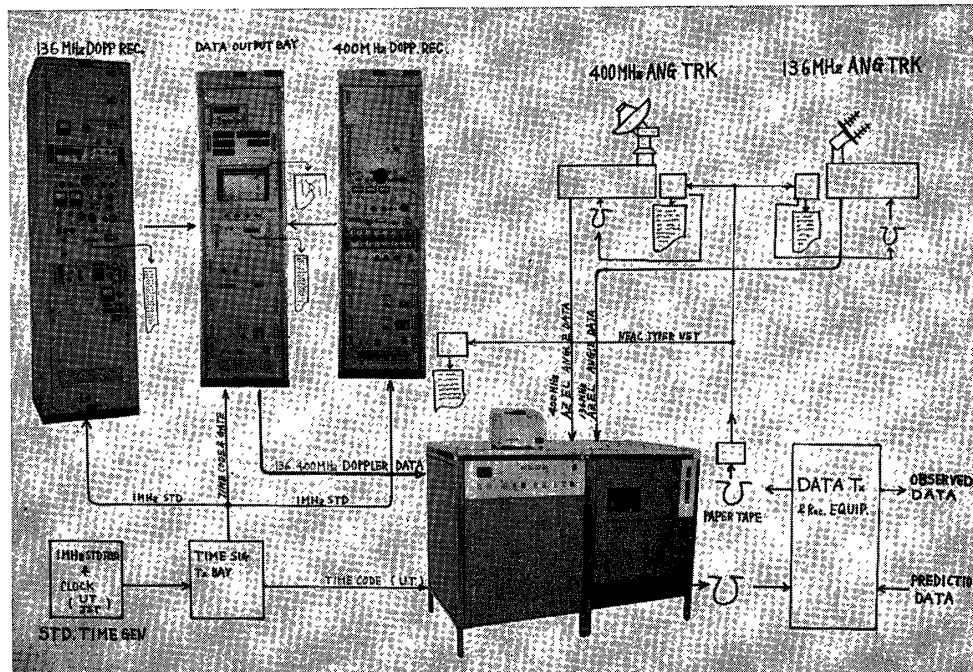
内之浦ドップラ追尾装置の構成は、第 1 図に示すとおりで、科学衛星テレメータセンタにおかれた 136,400 MHz ドップラ追尾受信装置から得られるドップラ・データを主体とし、400 または 136 MHz の角度データおよび UT 時刻を、紙テープ作製装置に伝送し、ここで 2 秒間に 1 回の割合で 8 単位 ISO コードでテープをせん孔する。このテープを用いて、データは東大宇宙研および東京三鷹の宇宙開発推進本部の軌道計算センタに向け、それぞれ 50 ボー、および 200 ボーのデータ伝送回線を通して伝送される。一方、軌道計算センタからは、これらのデータによって計算された軌道予報値が同じデータ伝送装置で送られ、せん孔テープに打ち出される。その内容は NEAC TYPER 回線により KSC 内各センタに伝送され、テープの複製および印字が行なわれる。

このほかドップラデータはドップラ出力装置に設けられた簡易ラインプリンタでリアルタイムで印字されると共に、自動平衡記録計にドップラ周波数（相対速度）およびドップラ周

---

\* 併任教授（東大生産研）

\*\* 日本電気株式会社



第 1 図 内之浦ドップラ追尾装置ブロック図

波数変化率（相対加速度）の二つのアナログ記録が描かれる仕組みとなっている。

### 3. ドップラ追尾方式誤差分析

位相同期ループを用いると、普通の比例制御による AFC 方式に比し、周波数制御誤差が 0 であり、等価帯域幅を狭くし高感度が得られるなどの特徴がある。誤差の要因は次の 4 項目に分類され、それぞれについて 400 MHz 帯の装置について分析を行なった結果を第 1 表に示す。

- 1) 位相同期ループ系の誤差,
- 2) ドップラ計測系の誤差
- 3) 衛星による誤差,
- 4) 電波伝ぱんによる誤差

この結果から装置の個有誤差は相対速度に換算して 0.1 m/sec r. m. s. 以下とし得ることは明らかである。むしろ誤差の主要原因は搭載発振器の安定度、および電離層屈折効果にあることがわかる。搭載発振器の安定度は高品質の水晶発振器の搭載により大幅な向上が期待される。電離層屈折効果は、136 MHz および 400 MHz のそれぞれにおけるドップラ計測の結果から、電離層内の屈折率の周波数依存性を利用して、データ処理の段階で除去する仕組みになっている。Transit のように 2 周波が互いにコヒーレントである場合 [4] に比し処理の過程は繁雑であるが、現在は電波割当の制約もあって、独立の 2 周波となっている。

136 MHz 帯に対する誤差分析も同時に行なわれたがその結果を要約すると、電離層屈折効果自体は周波数に反比例するため約 3 倍となり、一方ドップラ周波数変化幅は逆に 1/3 になるため、結局電離層の影響によるドップラ計測誤差は約 9 倍となる。装置の他の部分の誤差もドップラの変化幅が小さいため、カウンタの量子化誤差以外はいずれもやや増加する傾

第 1 表 400 MC 帯ドップラ追尾方式誤差分析表

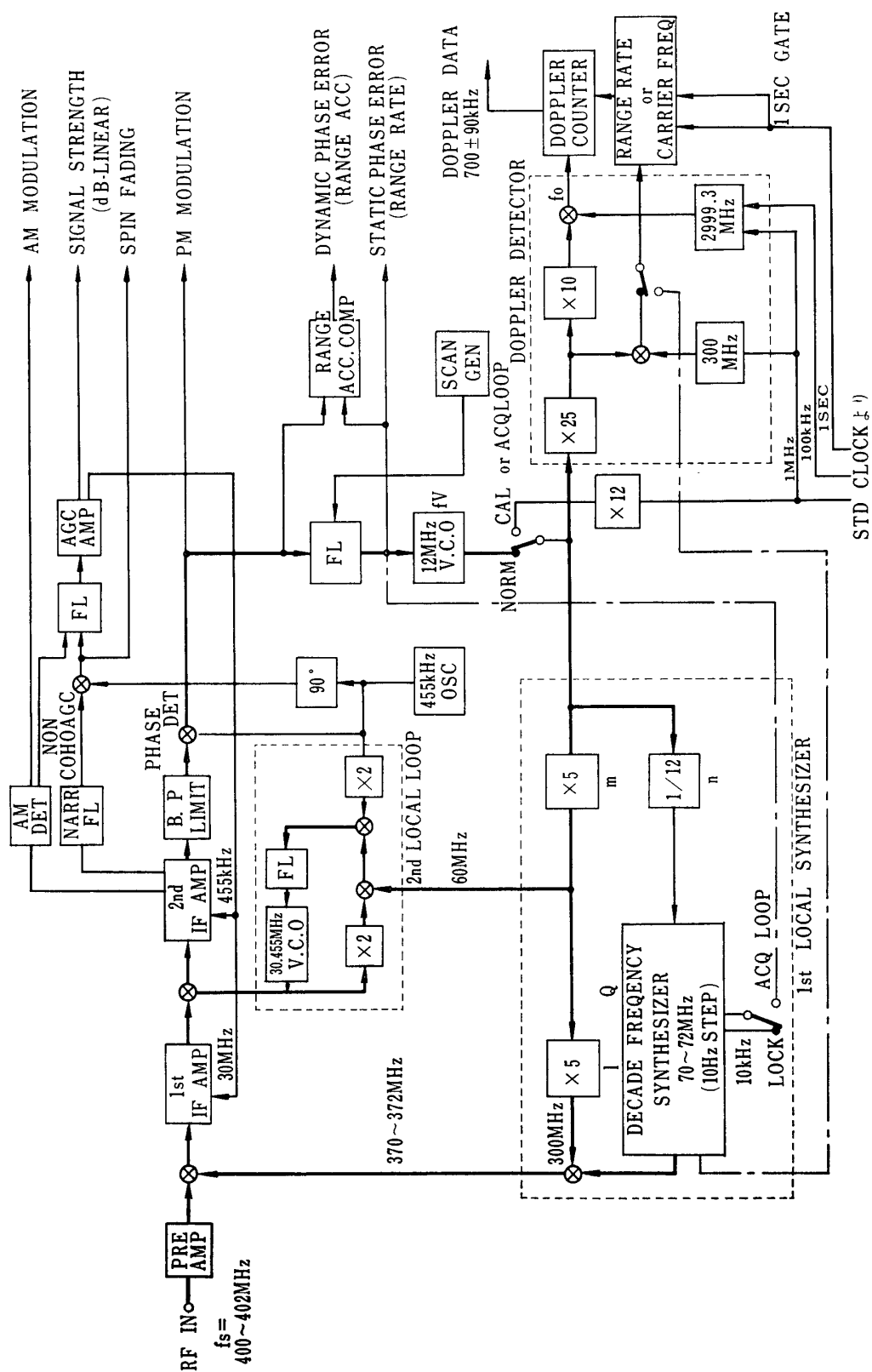
	誤 差 の 原 因	定常誤差 (r. m. s.)	雑音誤差 (r. m. s.)	備 考
1	位相同期ループ系の誤差 1) VCO 位相雑音によるもの 2) VCO および回路安定度によるもの 3) 熱雑音によるもの 4) レベル変動に基づく位相変動によるもの 5) " ループ利得変動によるもの 小 計	m/sec — — — — —	m/sec 0.019 neg 0.021 0.004 0.0022 0.0285	—140 dbm の場合 20 dbp-p 2 秒周期フェー ジング
2	ドップラ計測系の誤差 1) 標準周波数設定誤差 2) 標準時刻装置周波数安定度 3) " 時刻較正誤差 4) " パルスジッタ 5) ドップラ計測系内部ジッタ 6) ドップラ カウンタの量子化誤差 小 計	0.021 0.015 *(10m sec) — — — 0.026	— 0.006 — 0.01 0.0014 0.03 0.032	* 直接速度誤差にはなら ない
	装置系誤差 計	0.026	0.0425	
3	衛星による誤差 1) 搭載発振器の定常偏差 2) " 安定度 3) 搭載発振器の位相変動  4) スピンによる誤差 5) 位相同期ループの追尾誤差 小 計	0.152 3.0 —  neg 3.0	— — 0.022  * — 0.022	$1 \times 10^{-5}$ の定常偏差を仮定 $1 \times 10^{-8}$ と仮定 変調中の推定値  * 送信側が楕円または直 線偏波のときは検討を要 する
4	電波伝ぱんによる誤差 1) 大気圏の屈折効果によるもの 2) 電離層の " 3) 多径路伝ぱん誤差  小 計	— 0.94 — 0.94	— — 0.015 0. 0.015	W. H. GUIER 氏の論文 の最大値 2 周波補正計算 により除去できる
	総合誤差	3.13	0.048	

向となる。

#### 4. 各装置の動作概要

##### 4.1 400 MHz ドップラ追尾受信装置

##### 4.1.1 ドップラ計測ループの構成



## 第2図 400 MHz ドップラ追尾受信装置ブロック図

この受信装置のブロック図は第 2 図のとおりであり、周波数シンセサイザを位相同期ループ内におき、信号周波数を常に 12 MHz の VCO の発振周波数に逡分変換する方式を採り、次の特徴をもっている。

- 1) 使用周波数に無関係に、同じ周波数でドップラ効果が測定できる。
- 2) RANGE RATE (相対距離変化率) を直読することができる。
- 3) 中間周波数が一定となり、狭帯域濾波器の使用が可能である。
- 4) 受信装置内に誤差の原因がない。

位相同期ループ内のシンセサイザは入出力が位相同期しており、位相検波基準信号の変動は第 2 局発振ループにより打ち消されるため入力周波数  $f_s$  は (1) 式のとおり  $f_v$  に逡分変換される。

$$f_s = \left( l \cdot m + Q \cdot n + \frac{m}{2} \right) f_v \quad (1)$$

ただし、 $f_s$ : 受信周波数,  $f_v$ : VCO 周波数,  $Q$ : シンセサイザ周波数 (MHz)  
 $l, m, n$ : 第 2 図中に示す値。

送信周波数を  $f_{s00}$  とした場合、シンセサイザはこの周波数を受信する際、 $f_v$  として 12 MHz がえられる周波数に設定する。本装置の具体的数値を用いると、

$$f_{s00}(\text{MHz}) = 330 + Q \quad (1)'$$

$$Q = 70 \sim 72 \text{ MHz}$$

したがって、シンセサイザは送信周波数から 330 MHz 低い値に設定するのが基準である。実際には  $f_{s00}$  現状のような one-way 方式では正確には決まらない。実際の送信周波数を  $f_{s0}$  とし、nominal な送信周波数、すなわち、それによってシンセサイザの設定が行なわれている周波数を  $f_{s00}$  とし、その差を  $\Delta f_{s0}$  とすると、ドップラカウンタで計測される周波数  $f_D$  は (2) 式で示される。

$$f_D = 7 \times 10^5 + \frac{\Delta f_{s0}}{f_{s00}} \times 3 \times 10^9 - \frac{1}{C} \frac{dR}{dt} \left( 1 + \frac{\Delta f_{s0}}{f_{s00}} \right) \times 3 \times 10^9 (\text{Hz}) \quad (2)$$

ただし  $dR/dt$ : 距離変化率,  $C$ : 光速度

もし  $\Delta f_{s0}$  が 0 であれば、(2) 式から明らかなように、ドップラカウンタは 700 kHz を中心に、3 GHz に対するドップラ効果を計測する。

以上が基本の計測部分であるが、装置には実際の運用上の利便のため、別に 300 MHz 相当の点に RANGE RATE カウンタが置かれ予測データと比較しながら追尾ができるようにしてある。またシンセサイザの設定が大きな誤差をもち、受信周波数がなかなか見つからない場合のあることを考慮して、受信周波数を直読する目的で、ACQ (捕捉) ループが設けられている。これは鎖線で示すようにシンセサイザの原振を標準周波数に切替え、シンセサイザの 10 kHz のけたの同期をはずしこれを VCO として位相同期ループを作り、シンセサイザの出力周波数により、信号周波数を直読するものである。

位相同期ループの等価帯域幅の選定は、低高度衛星の加速度の追尾に必要な 13 Hz を含み、打上げ時の位相変動を考慮し、5~160 Hz に選んでいる。また、リサージュによる位相同期確認のため、第 2 中間周波信号に約 100 Hz の濾波器をおき、-150 dBm においても

位相同期の確認ができる。

#### 4.1.2 FALSE LOCK [6] の防止

CW の信号を捕捉する際でも、ビート状態のまま“位相同期”となる現象があり、これを FALSE LOCK と呼んでいる。

この現象は、位相検波器に現われたビート周波数で VCO が周波数変調され、その第 1 側波の位相が、中間周波帯域濾波器により回転し、あるビート周波数で、PULL IN の DC 電圧が 0 をよぎり、“位相同期”の状態となるものである。この現象を防ぐためには低次の濾波器を使用することが必要であるが、混信分離の要求と矛盾する。本装置では低次狭帯域、高次広帯域の濾波器の組合せを用い効果を上げている。この現象の実例については 5 項で述べる。

#### 4.1.3 相対速度、加速度のアナログ記録

位相同期ループは I 型サーボループに相当し、位相加速（周波数定速変化）入力に対し (3) 式の位相誤差を生ずる。

$$\Delta\phi \doteq \frac{df/dt}{\omega_n^2} + \frac{df/dt}{G} t \quad (3)$$

$\omega_n$ : ループ特性角周波数,  $G$ : ループ利得。

第 1 項は加速度比例項、第 2 項は加速の結果生じた速度に比例する項である。本装置ではこの二つの項を分離する方式を開発し、自動平衡記録計により、それぞれ衛星の相対速度および相対加速度を記録することができるようにした。記録の結果が定量的な意味をもちうようにするため、位相同期ループの諸定数を厳密に設定した。

#### 4.1.4 その他

本受信装置の前置増幅器には、2SC 568 を使用し、NF=4 dB 以下を得ているほか、演算増幅器はすべて NEC マイクロパック  $\mu$ PC-53 によって IC 化しているなど、リサーチ観測のためのオシロスコープを除き、すべてトランジスタ化されている。このほか信号レベルが AGC メータで直読できる dB-Linear AGC 方式を用いており、信号レベルの直読性と、応答特性の定量化が得られている。なお AGC 回路には NON COHO AGC 回路を付加している。

信号捕捉のため自動掃引引き込み回路、と記憶回路が設けられ、信号の FADE OUT の場合には FADE OUT 直前の周波数を中心に掃引することができ、再捕捉を容易にしている。

このほか取得データの品質については、COHO AGC 信号の有無による判定を常時行ない、データ送出時より過去 2 秒間に位相同期がはずれた場合はこのデータの送出を停止すると共にその次のデータの送出も止める論理を設け、異常誤差の発生を防いでいる。

#### 4.2 ドップラ出力装置

この装置は 136,400 MHz ドップラカウンタ、紙テープ作成装置へのインターフェース、時刻信号の 10 進 CODE 変換器、記録計、プリンタなどから成っている。ドップラカウンタの CODE は、1・2・4・8 BCD を使用し、リレーバッファ増幅器を経て紙テープ作成装置に伝送する。ラインプリンタは、UT 時刻とドップラデータ、信号品質をリアルタイムで

最高 2 秒に 1 回印字する。記録計は前述の相対速度および加速度のデータを記録する。

#### 4.3 136 MHz ドップラ追尾受信装置

この装置は昭和 40 年に製作されたものであるが、今回 400 MHz 系の設置にともない、出力データの形式を、これと同じ 3 GHz 変換方式に変更するなどの改修工事を行ない、このシステムに使用されている。

#### 4.4 関 連 装 置

ドップラ計測のための周波数標準、およびカウンタ用ゲートは、新設された標準時刻装置から送られる。この装置はドップラ計測系誤差分析にみられるように高安定度が要求され、ルビジュウムおよび水晶の標準発振器が用いられている。このほか先に述べた、紙テープ作成装置、136, 400 MHz 角度追尾系がある。

### 5. 性 能

#### 5.1 400 MHz ドップラ追尾受信装置性能諸元

- 1) 受信周波数 400~402 MHz, 10 Hz step
- 2) 雑音指数 4 dB 以下
- 3) 実用最低受信電力 -140 dBm
- 4) 受信方式 ダブルスーパー位相同期方式
- 5) 映像信号抑圧比 40 dB 以上
- 6) 等価雑音帯域幅 5~160 Hz 切替 (スレシホールド時の設計値)
- 7) 静的位相誤差 (強信号時)  
     $3 \times 10^{-5}$  の周波数偏移に対し  $6^\circ$  以下
- 8) 第 2 中間周波帯域幅  
    位相同期チャンネル 約 4 kHz  
    AGC チャンネル 約 300 Hz  
    リサーチ回路 約 100 Hz
- 9) AGC 静特性  
    信号電力 -140~-70 dBm に対し、信号出力偏差 3 dB 以下
- 10) AGC 帯域幅  
    約 0.3~10 Hz 切替
- 11) ドップラ検出方式  
    3 GHz 換算方式とし  
    装置個有誤差 0.1 m/sec r. m. s. 以下
- 12) ドップラデータ出力  
    周波数  $700 \pm 90$  kHz 以上  
    CODE 1・2・4・8 BCD  
    データ間隔 2 秒
- 13) レンジレートカウンタ  
    相対速度を 1 m/sec 単位、正員の極性付で表示する。

## 14) ラインプリンタ

UT 時刻	6 けた
ドップラデータ	6 けた
データ品質	1 けた
データ番号	1 けた

## 15) アナログ記録

相対速度, 加速度を分離記録.

## 5.2 実 測 デ ー タ

## 1) 装置系誤差

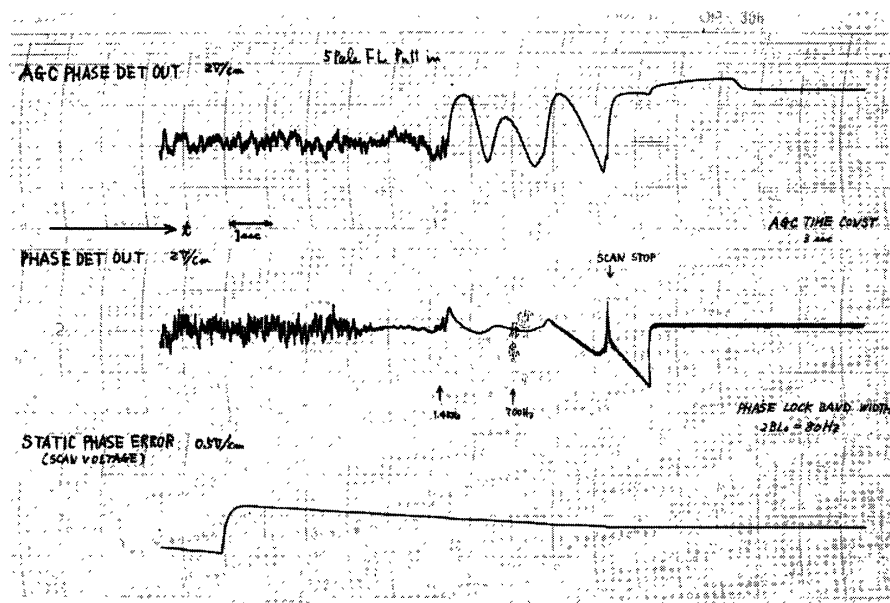
136, 400 MHz の両者について, 標準周波数を信号周波数に通倍して受信する方法で実測を行なった結果は下記のとおりである.

136 MHz 帯	9.4 cm/sec r. m. s.
400 MHz 帯	2.6 cm/sec r. m. s.

この結果は誤差分析表の 1, 2 項の合計から 1—(3), 2—(1) 項等を除いた値に相当しており, ほぼ設計段階の性能が実現できたと考えられる.

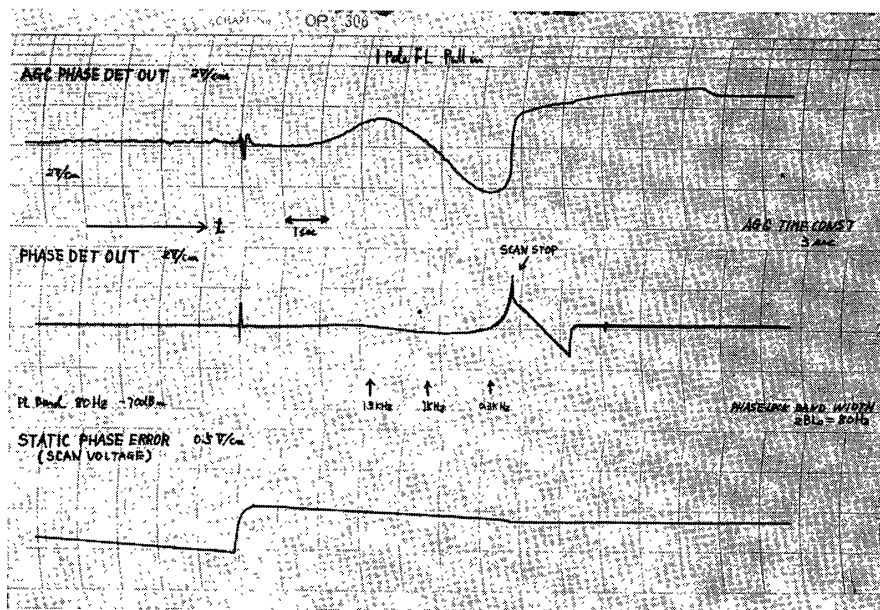
## 2) FALSE LOCK 現象

先に述べた FALSE LOCK 現象につき, 136 MHz の場合に測定した結果を第 3 図に示す. この測定はトラッキングフィルタに SCAN 電圧を重畳し, PULL IN する過程を示しており, LOCK ON 直前に SCAN 電圧を切りはなす方法を採用した. (このため LOCK ON 直前にスパイクが発生している.) a) は 5 pole のメカニカルフィルタを使用した場合, b) は 1 Pole のフィルタを使用した場合であり, 2 か所以上あった FALSE LOCK がほとんど見られなくなり PULL IN 範囲も拡大した. 400 MHz 帯はこの結果に基づき設計を行ない, 3 kHz 以内では FALSE LOCK を生じないようにになっている.



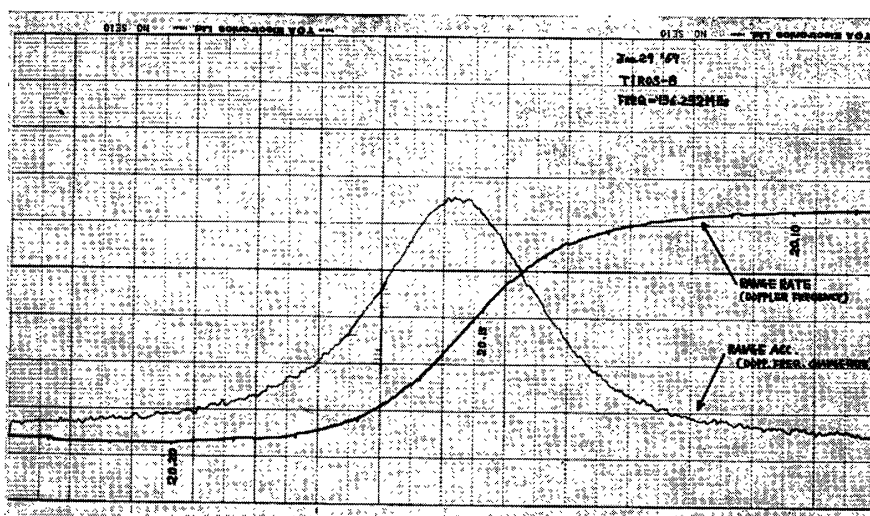
a) 5 Pole フィルタ使用の場合 (改良前)





b) 1 Pole フィルタ使用の場合 (改良後)

第 3 図 FALSE LOCK 現象



第 4 図 相対速度、加速度のアナログ記録例

## 3) 相対速度、加速度のアナログ記録

衛星の相対速度、加速度を分離して記録する方法を先に述べたが、この実例を示せば、第 4 図に示すとおりである。このデータは本方式開発中のものである。この方式を使うと加速度誤差を見て適切な帯域幅を選ぶことができる。

1969 年 5 月 19 日 宇宙工学

## 参 考 文 献

- [ 1 ] W. H. Guier and G. C. Weiffenbach : "The Doppler Determination Orbits", NASA Conference on Orbit and Space Trajectory Determination (1959)
- [ 2 ] R. B. Kershner : "The Transit System" The Johns Hopkins University, Applied Physics Laboratory reports (1961)
- [ 3 ] 斎藤, 野村ほか, "ドップラ追尾受信装置" 昭 41. 電気通信全国大会 985
- [ 4 ] G. C. Weiffenbach : "Measurement of Doppler Shift of Radio Transmissions from Satellites", Proc. of Inst. of Radio Engineers. (1960)
- [ 5 ] W. H. Guier : "The Tracking of Satellite by Doppler Methods", The Johns Hopkins University, Applied Physics Laboratory Reports (1958)
- [ 6 ] F. M. Gardner : "Phase Lock Techniques" John Wiley & Sons, Inc. (1967)