

17

レーザーレーダによる人工衛星の測距実験

*Experiments of Sattelite Ranging with a Laser*

日立，東京天文台レーザーレーダ実験グループ

*Laser Group of Hitachi and Tokyo Astrononical  
Observatory*

日立製作所

*Hitachi Ltd*

東京天文台

*Tokyo Astronomical  
Observatory*

1972. 7. 26

# 目 次

1. ま え が き	2
2. 装 置	3
3. 受信確率と測距値のゆらぎ	10
3.1 受信確率	10
3.2 測距値のゆらぎ	11
4. む す び	30

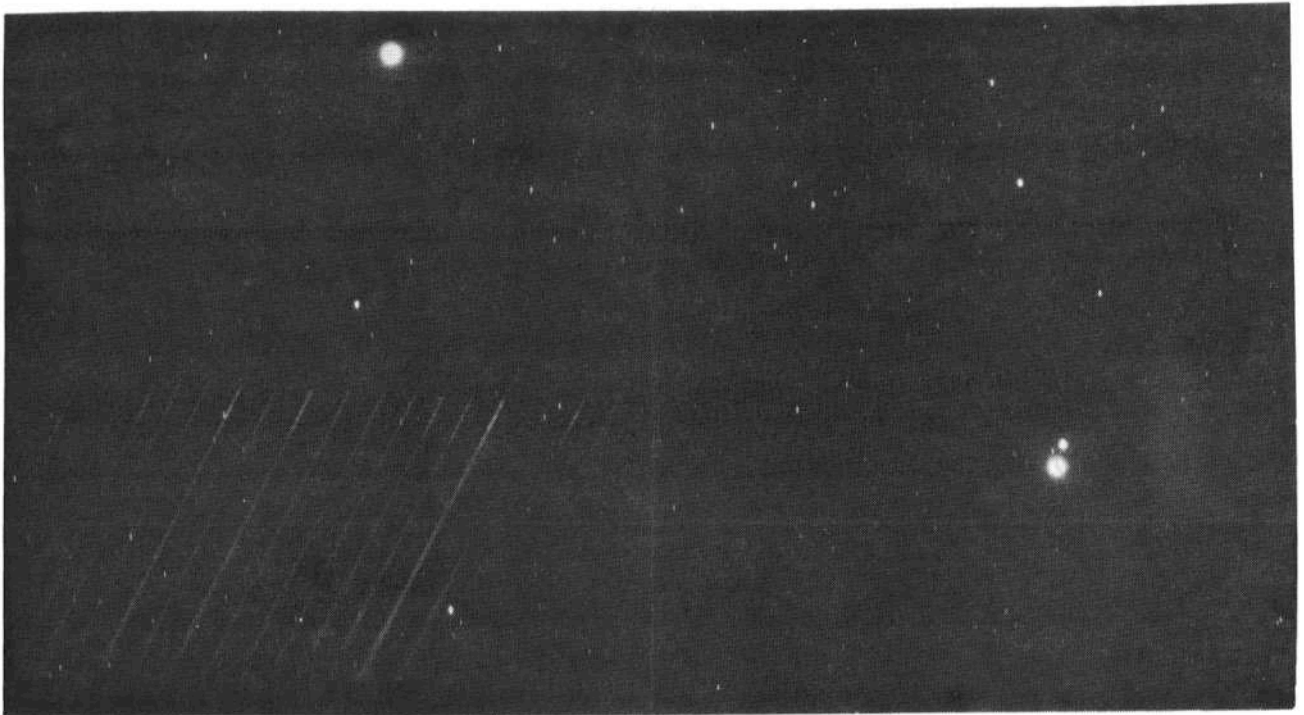


Fig 1 レーザ光線を発射して、人工衛星を追跡しているときにペーカーナンカメラで撮影したもの。衛星は淡い直線となってレーザービームの先に写っている。

1969. 6. 9. 22<sup>h</sup> 49<sup>m</sup> 05<sup>s</sup> 2475 レコーディングフィルム

露出20秒 衛星はGEOS-B

## レーザーレーダによる人工衛星の測距実験

### 1. まえがき

パルスレーザを用いる測距用レーザーレーダシステムは、人工衛星や月などの測距実験によって、天文学、測地学などの分野で、特に有用性の認識が深められてきている。<sup>(1)</sup> レーザレーダが天体を対象とするような大遠距離の測距手段として、十分実用的であることが実証された意義は大きく、現在天文学、測地学関係者などにより種々観測目的への応用と実用化へのアプローチが行なわれており、“レーザー天文学”ともいふべき新しい学術分野が開かれつつある。

我々は1968年12月に東京天文台堂平山観測所に日立製作所、東京天文台、東大宇宙航空研究所の3者協同開発による人工衛星測距用レーザーレーダ装置を設置して、数年間にわたる実験を行ない、システムのハードおよびソフトウェアの実用化開発を進め、この種のレーザーレーダ技術の勉強をしてきた。同装置は実験装置ではあるが、現在同天文台において改良が加えられ徐々に実用機としての形態をととのえつつある。本報告では堂平観測所における実験、システムの概要を述べるとともに実験で得られたデータの一部を紹介する。また実験を通じて検討してきた測距用パルスレーザレーダの動作特性の基本である、受信確率と計測値のゆらぎについて、受信信号の波形をガウス形、受信器からの出力ゆらぎをポアソン形とした理論的解析結果と測距データについて考察する。

## 2. 装 置

堂平山観測所に設置したレーザーシステムはレーザー送受信系、トラッキングベデスタル系、測距データ処理系の3つのサブシステムから構成される。レーザー送信系はレーザー発振器、同電源、冷却水循環装置、レーザーコリメータから構成される。Fig 2 にこれを示す。レーザーはルビーを用いたQスイッチ方式によるジャイアントパルス発振で、パルス繰返しは1秒1回、ピーク出力約20 MW、パルス巾50 nsである。レーザービームの拡がり角はエキスパンダー構造のコリメータにより0.6~5.6 m rad まで変えられるようになっている。実験は多くの場合1 m rad で行なっている。コリメータには送信系と受信系の光軸を一致させるための照準調整用の接眼部が付けてある。レーザー発振器とコリメータ間にはレーザー光の一部をとり出すビームスプリッターがあり、分けられた光の一部をフォトダイオードで受けて、その出力パルスを送受信時間、計測用カウンターのスタート信号として用いている。

受信部はFig 3 に示すようにカセグレン式受信鏡、接続光学系、光電子増倍管を使った光電変換部より成る。衛星からの反射光は微弱光になるので極力外部背景光を切るため受信鏡の視野角を小さくできるように受信鏡の焦点距離は比較的長くしてある。カセグレン構成で5 mとした。集められた光束は視野絞り、光フィルターを経て光電子増倍管に達する。フィルターは赤外フィルター干渉フィルター、ニュートラルフィルターが種々条件に応じて挿入できるようになっているが、衛星測距の場合は干渉フィルターのみ使用している。受信鏡にもレーザービームと光軸合せをするための切換構造の照準用接眼部が付けてある。

人工衛星にレーザー光を照射し、その反射光を受信するためにはレーザービームおよび受信光学系の光軸を衛星に向けて、高精度で指向させることのできるトラッキングベデスタルが必要である。トラッキングベデスタルは電子計算機によってあらかじめ計算した毎秒の衛星位置にしたがって動かし、人工衛星を自動追跡できるものを使用している。ベデスタルの形式は初期Az, El の2軸方式を使っていたが、この方式は衛星が天頂付近を通過するとき、Az角を急速度で旋回させることが必要になり、トラッキングエラーを生じやすいという欠点があった。このため生ずる問題が大きかったので、Az, El 軸の他にトラッキング軸を一軸追加して、3軸構造とする改造を行なった。この改造により衛星のトラッキングは十分楽に行なえるようになった。現在では自動追跡によらなくとも、あらかじめ

予測された軌道に沿ってトラッキング軸が動くように  $Az, El$  を設定して、案内望遠鏡で衛星を捕えて、マニュアル操作で追跡できるようになった。Fig 4にこのようにして風船衛星バジオスのトラッキングを行なったときの例を示す。トラッキングベDESTALにカメラを取付けて、背景の星とともに衛星を撮影したものである。

測距データ処理系の構成を Fig 5 に示す。レーザ光の往復時間計測には水晶振動子を使った  $100\text{MHz}$  のカウンターを使用している。なおレーザは回転鏡式  $Q$  スイッチを用いているためクロックパルスに厳密に同期して、ジャイアントパルスを発生することができず、数  $ms$  の時間遅れを伴う。これは毎秒約  $8\text{ km}$  の速さで航行している衛星の測距では観測時刻ずれとして問題になってくるので、後で補正できるように、クロックパルスからレーザ発振までの時刻を  $10\mu s$  の精度で測定するカウンターを置いている。また受信信号の  $S/N$  を高くするため、レンジゲートを使用しているが、これは近距離からの強い散乱光、外部背景光、光電子増倍管の暗電流雑音を効果的に除去する。レンジゲートは時々刻々衛星軌道に沿って  $1\text{ ms step}$  で変化できるようにしてあるが、強い受信光が期待できる近距離衛星に対しては大気散乱反射光のみ除去する目的で、一定値に固定して使っている。

以上が装置の概要であるが装置を設置してある場所は埼玉県の大平山、東京天文台観測所内の関東平野を見下す標高約  $800\text{ m}$  の山腹にあり、大気透明で人工衛星の観測には適している場所である。観測室から約  $900\text{ m}$  離れた剣ヶ峰山頂に Fig 6 に示す  $m$  角の地上標的が設けてあり、システムの内部遅延時間の測定、光学系の光軸調整に使っている。この標的には夜間でも使用できるように観測室から発射したレーザパルスの指令で各々光学系すなわちレーザ、受信鏡、ガイド望遠鏡の位置に相当する場所に照準用ランプが点灯するようになっている。また  $10\text{ km}$  の距離にある武甲山山頂にも逆反射器を置いてテスト用としている。他にも見通しのきく数ヶ所にテスト用標的を置いて種々実験ができるようにしてある。

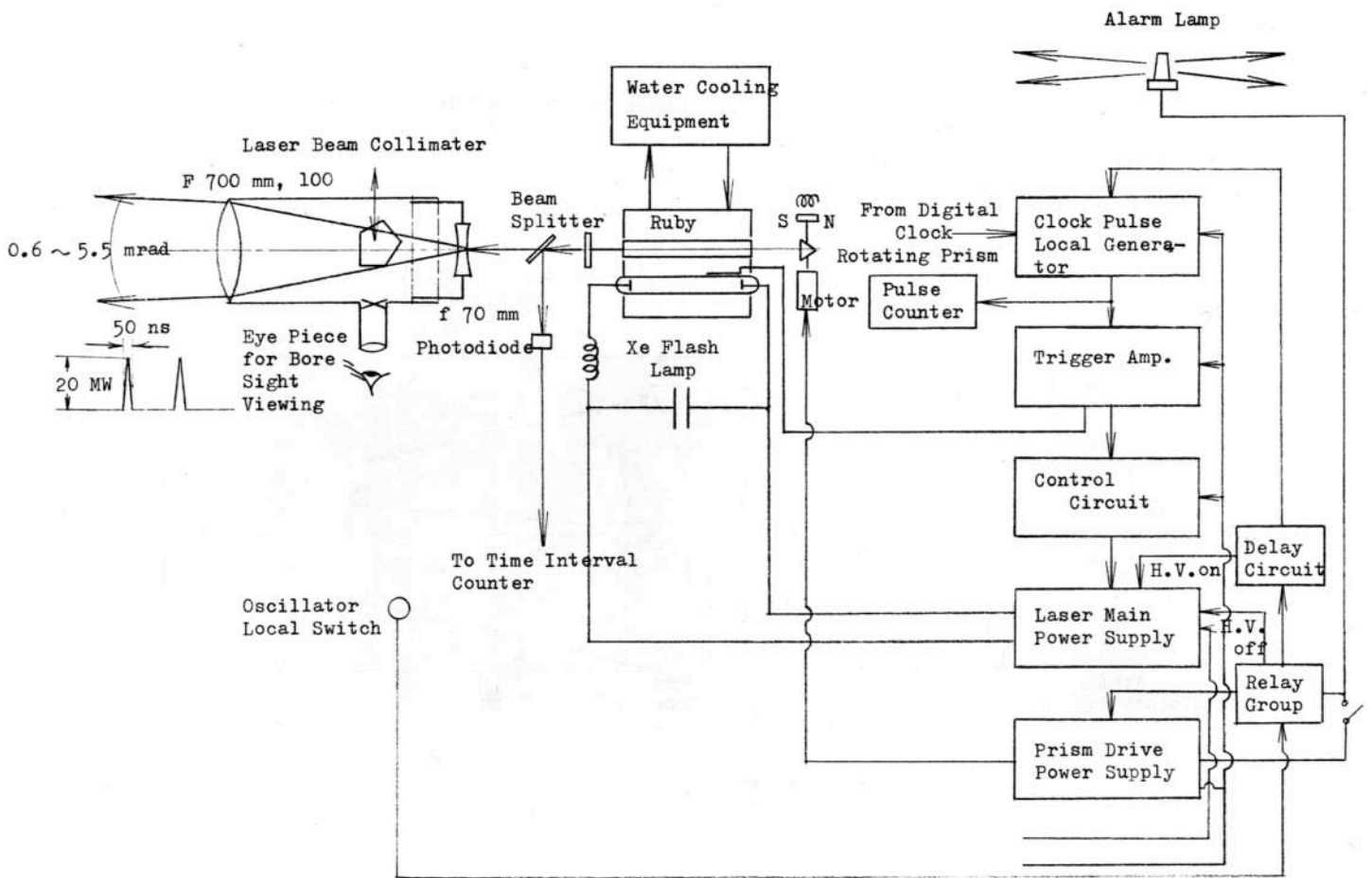


Fig. 2 Block diagram of laser transmitter

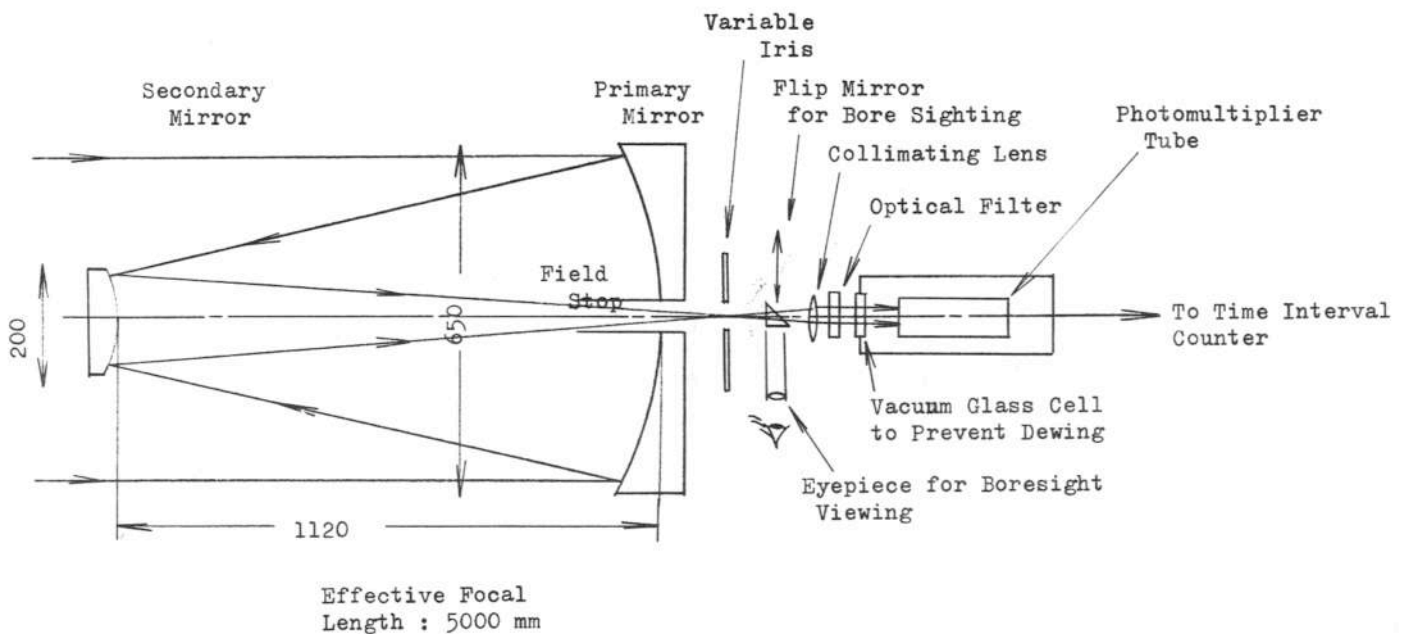


Fig. 3 Schematic diagram of laser receiver



Fig 4 改造した3軸トラッキングベデスタルによる衛星追跡  
 の例。衛星は風船衛星パジ奥斯  
 タイム露出：30秒

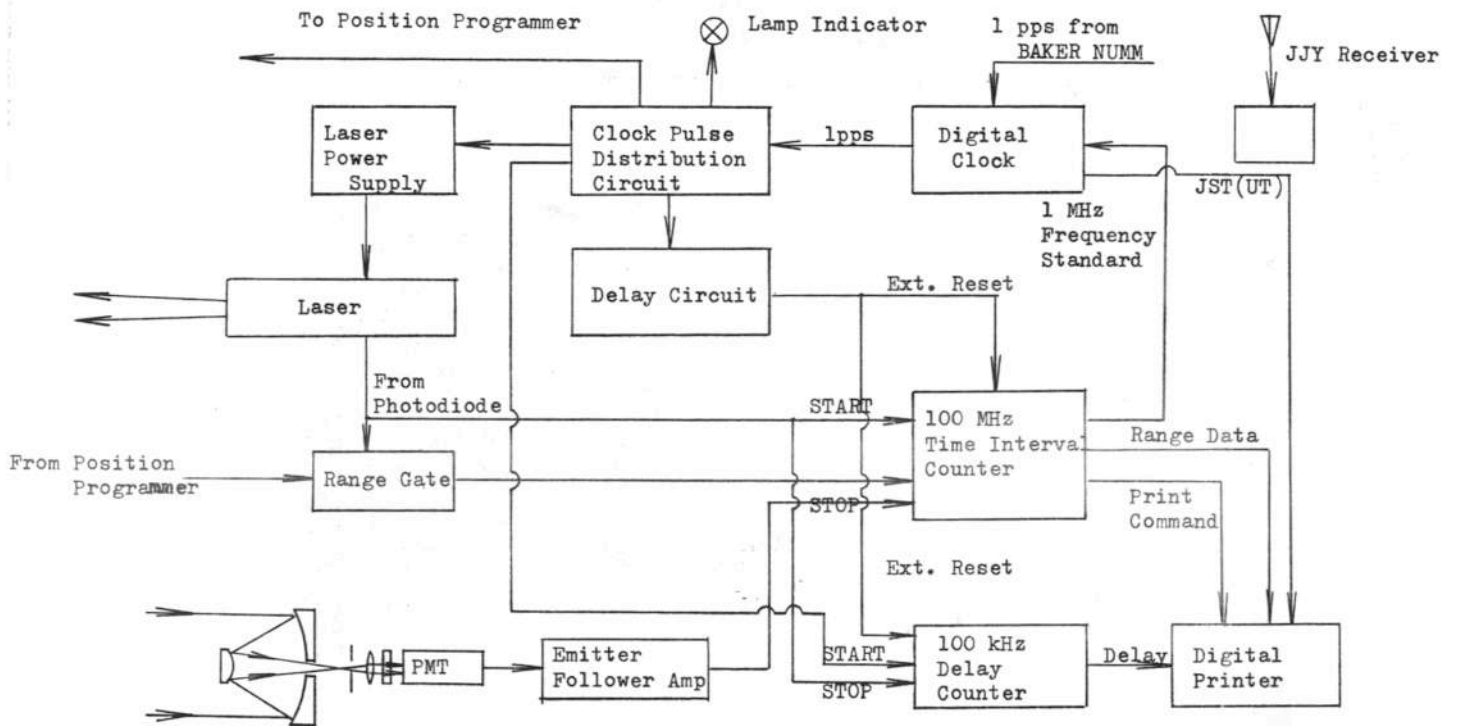


Fig. 5 Block diagram of ranging system.

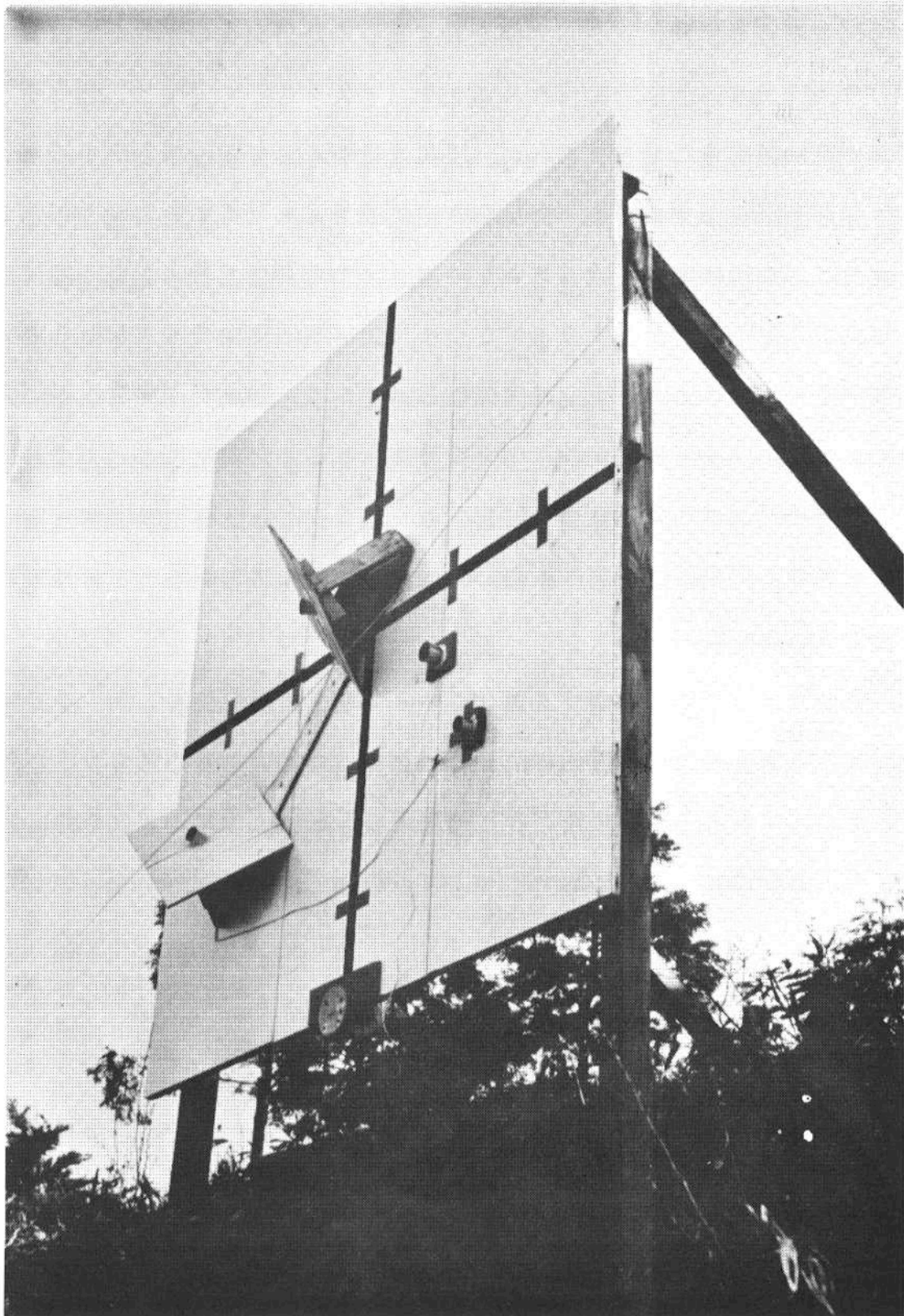
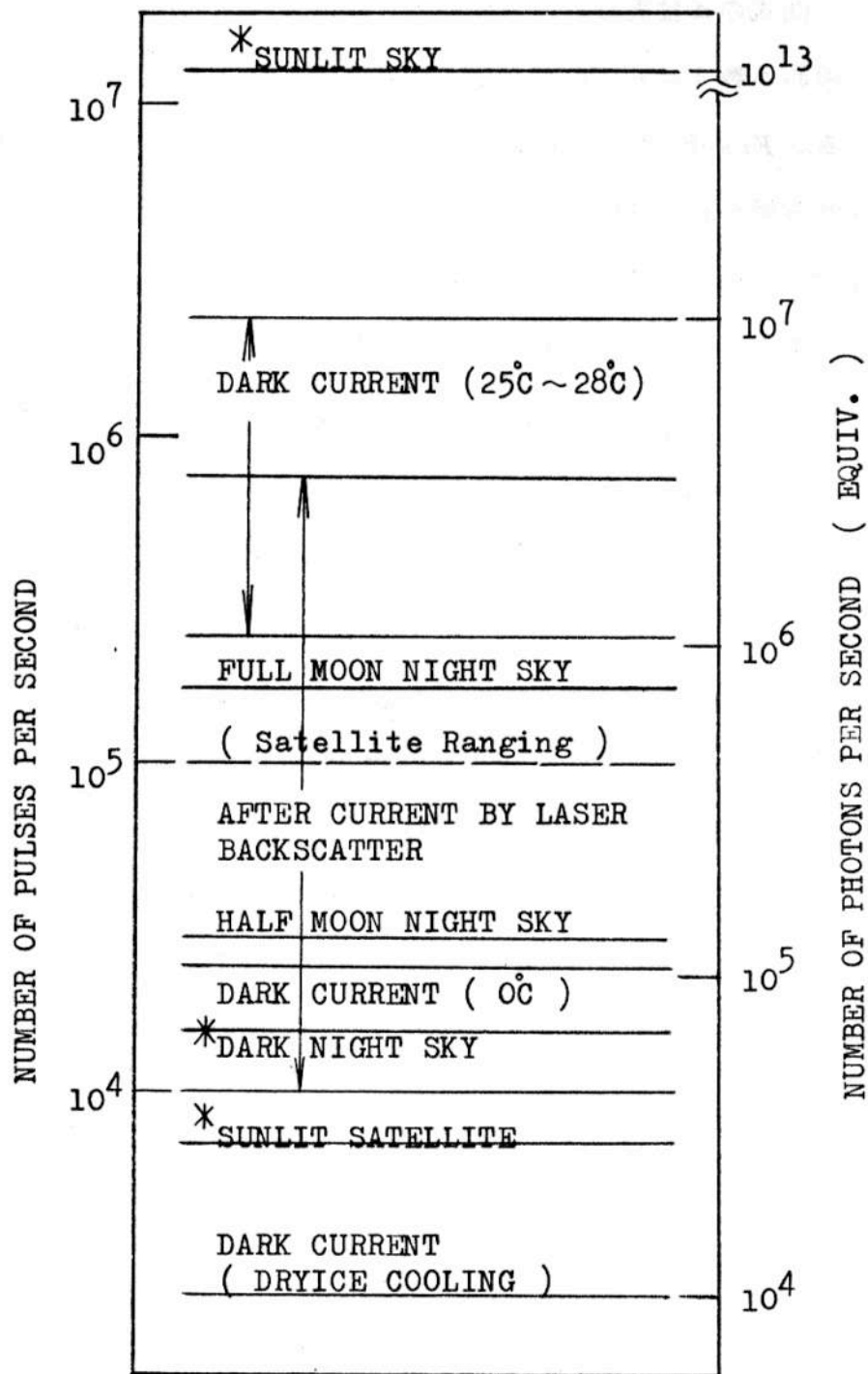


Fig. 6 The target for optical alignment.





Conditions

Photomultiplier RCA-7265  
 Effective of receiving optics  $2600 \text{ cm}^2$   
 Field angle 4 mrad  
 Optical filter band width 70 Å ( 6943 Å )  
 Efficiency of receiving optics 0.34

\*:SAO DATA ( Conversion in DODAIRA SYSTEM )

Fig. 7 Background noise in DODAIRA SYSTEM.

#### 4. むすび

以上人工衛星測距用レーザーダシステムの実験装置の概要とシステムに期待される受信率および測距値のゆらぎについて述べた。実験を通じて衛星測距用レーザーダシステムが十分実用装置として構成できる見通しを得た。実用機に対しては次のような構想を提言したい。現在のシステムは全体に大型に過ぎるので受信鏡の大きさは30 cmから40 cm程度とし、トラッキングベDESTALを含む送受信光学系の小形化を計る。受信鏡を小形化することによる受信能力の低減は量子効率の高い光電子増倍管を使いだけでも十分補ない得る。トラッキングベDESTALは3軸または4軸構造とし、1, 2軸はAz, Elでトラッキング軸の設定用とし、3軸をトラッキング軸、4軸はトラッキング軸の修正用とし、トラッキング精度の向上を計る。目標精度は0.1 m rad以下とする。レーザーのパルス巾はPTM techniqueなどの手法を採用し、1 nsから数 nsとし、同時にカウンターの分解能は1000 MHzを使用することにより受信率と精度の向上を計る。

このようにして精度は1 ns (= 15 cm)を目標とする。さらに屋間の測距をできるようにすることも検討すべき課題で、S/N的には受信できるという計算結果もあるので可能性はある。以上のような構想に基づき、さらに実験結果に基づく細かい点の種々改善を行なったシステムを製作することにより、かなり性能の向上が実用機には期待できると確信する。

測距用パルスレーザーダの原理は、単純であるが、人工衛星や月など数千から数十万 kmにある天体の距離が数 mから数10 cmの精度で測定できるということは画期的なことであり、このような精度での測定によって得られる知見はきわめて広く、位置天文学、測地学、地球物理学など各方面に大きな影響をもたらすものである。

また人工衛星や月測距のレーザーダによる精密観測に寄せられる期待の中には光速度や重力定数の不変性の問題など、物理学の本質を問う内容が含まれており、ここにレーザーダの観測装置として他にかえ難い有用性が認められるとあってよいと思う。実用的には地球上の大規模な精密測地システムへの応用の可能性があることから地殻変動、ひいては地震の予知のための観測などへの期待もある。

このようなわけで我国においてもレーザーダ観測に対するいっそう活発な研究が行なわれることを期待したい。

## 文 献

- (1) 古在由秀：“国際測地学協会報告”海洋科学，4，1，P13，(January 1971)
- (2) 洲崎保司，橘 篤志：“レーザによる人工衛星測距の受信確率について”量子エレクトロニクス研究会資料，QE-71-37(1971-11)
- (3) 三宅清秀，洲崎保司：“光パルス測距システムにおける測距値の補正について”47年度電子通信学会全国大会，929
- (4) *Helen S. Hopfield: "Tropospheric range error at the zenith"*  
*Committee on space research, Fourteenth plenary meeting, 17 June - 2 July 1971, Seattle, Washington, U.S.A.*
- (5) 千葉孝雄，元木紀雄，杉浦幸雄：“大気中を伝搬するレーザビームの SPOT DANCING”電子通信学会論文誌，54-B，2，P77~84(2月1971)
- (6) *C.G. Lehr, M.R. Pearlman, J.L. Scott and J. Wöhn: "Laser satellite ranging"* This paper for presentation at the symposium on laser applications in the Geosciences, June 30 to July 2, 1969
- (7) *C.G. Lehr, M.R. Pearlman and J.L. Scott: "A photographic technique for improved laser ranging accuracy, This paper for presentation at the Geos 2 Review meeting, Goddard Space Flight Center, June 1970*
- (8) *W.J. Rundle: "A ruby laser modified for pulse transmission mode cavity dumping, J-A, P, 39, 11, pp5338~5339 (October 1968)*

## 謝 辞

本研究は通産省の補助金を受けて行なわれたものである。また研究を進めるに当っては東京大学生産技術研究所の斉藤成文教授，東北大学電気通信研究所の稲場文男教授の御指導を得たことを記し，お礼申し上げます。