

11. 東京天文台におけるレーザレーダによる月測距計画について

Lunar Laser Ranging Project at the Tokyo

Astronomical Observatory

古在由秀 土屋 淳 富田弘一郎

Yoshihide KOZAI Atsushi TSUCHIYA Kōichirō TOMITA

東京大学 東京天文台

Tokyo Astronomical Observatory, University of Tokyo

Mitaka near Tokyo JAPAN

§1 まえがき

昭和48年度より東京天文台で月測距用レーザレーダの建設が始まったので、それについて計画の概略を述べる。

月の測距は始め、その天球上の位置を測角によって求め、天体力学理論から求める、間接的方法しかなかった。それによる精度は高々10km位であった。

1950年代になつて、電波レーダによる直接的測距が試みられ、精度は1km位に向上した。

1960年代末のアポロ計画の重要なテーマの一つとして、レーザレーダによる月測距があり、逆反射器が月面に設けられた。これによる測距精度は10cmの桁となり、近い将来に1cmに達する可能性がある。

月面上の逆反射器は、その百米圏のみでなく、ソ連のロケットによってフランス製のものも運ばれ、今の所、その数は6個ある。それを第1表に示す。

第1表

ロケット	日 時	場 所	逆反射器の至, 個数 等			
			至	個数	有効面積	散乱角
アポロ 11号	July 16 '69	静かの海	3.8 ^{cm}	100	0.11 m ²	4"
" 12	Nov. 14 '69	サーバヤIIIの傍	3.8	100	0.11	4
" 14	Jan. 31 '71	フラマウ高地	3.8	100	0.11	4
" 15	July 30 '71	ハドレー峡谷	3.8	300	0.33	4
ルナ 17	Nov. 10 '70	ルノフォート上	不詳			
18	Sept. 2 '71	" "	"			

この様な高精度の測距から、月の運動理論、世界的な測地網の確立が期待され、ひいては地球変形や極運動等の諸問題に重要なデータを提供する。

§2 信号強度と雑音

信号強度は、よく知られたレーダ方程式で求められるが、雑音のうち、いわゆる“月の昼間”の部分の輝度による分が重要である。

先づ、送信レーザ光が帰って来た時の受信エネルギー P_r は次式で与えられる。

$$P_r = P_0 \frac{16\sigma\rho}{\pi^2 R^4 \theta^2 \Omega^2} T^2 A_e \quad (1)$$

- 但し
- P_0 : 送信エネルギー (J)
 - R : 距離 (m)
 - θ : 送信ビーム巾 (rad.)
 - Ω : 逆反射器の散乱角 (rad.)
 - σ : " の有効面積 (m^2)
 - ρ : " の反射率
 - T : 大気の透過率
 - A_e : 受信鏡の有効面積 (m^2)

この P_r を $h\nu$ で割れば受信フォトン数になる。

例として、 $P_0 = 5 \text{ J}$, $R = 3.8 \cdot 10^8 \text{ m}$, $\theta = 5 \cdot 10^{-5} (= 10'')$, $\Omega = 2 \cdot 10^{-5}$, $\sigma = 0.3 \text{ m}^2$, $\rho = 0.5$, $T = 0.7$, $A_e = 2 \text{ m}^2$ とすると、波長 0.7μ 位で受信フォトン数は約 200 個である。

次に空の明るさを考えよう。天文では空の明るさを、等価的に一平方度にある 10 等星の数で表わし S_{10} (イステン) と呼ぶ。普通この値は 100 ~ 300 位である。空による入射雑音エネルギーは次式で与えられる

$$P_s = S_{10} \cdot F_{10} \left(\frac{\theta'}{a}\right)^2 B A_e T \quad (2)$$

- 但し
- F_{10} : 10 等星の Flux Density として $3.64 \cdot 10^{-16} \text{ J} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$
 - θ' : 受信ビーム巾 (rad.)
 - a^2 : 1 平方度を rad^2 に変換する定数として約 $4 \cdot 10^{-4}$
 - B : バンド巾 (A)

例として $S_{10} = 1,000$, $B = 10 \text{ A}$, $\theta' = 5 \cdot 10^{-4} (= 100'')$, $A_e = 2 \text{ m}$, $T = 0.7$ とし、かなり悪条件を仮定しても $P_s = 1.1 \cdot 10^4 \text{ Photon/sec}$ となる。受信系は、月からの信号が期待される限られた時間中でしか動作させない(その中は高々 $100 \mu \text{ sec}$ である)ので、空の雑音は無視できる。

逆反射器が月の昼間の部分にある時は、月面の輝度が著るし、雑音も高くなる。満月の月面からの雑音入力 P_L は、月面平均等輝度分布の内相と仮定すると次式で与えられる。

$$P_L = F_L \cdot \left(\frac{\theta'}{b}\right)^2 B \cdot A_e \cdot T \quad (3)$$

- 但し
- F_L : 月の Flux Density として $3.64 \cdot 10^{-5} \text{ J} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$
 - b^2 : 月の角面積として約 $8 \cdot 10^{-5} \text{ rad}^2$

例として $B = 1 \text{ A}$, $\theta' = 10^{-4} (= 20'')$, $A_e = 2 \text{ m}^2$, $T = 0.7$ の時、 $P_L = 2.2 \cdot 10^8 \text{ Photon/sec}$ となる。これは、10 msec の時間中で、確率的に 2.2 個のフォトンが来るということである。

地上が昼間の場合の空の輝度は、太陽からの距離、天候に支配されるが、大体、月面の輝度と同じと考えてよい。

又当然、月が夜の即ちに逆反射器がある時は条件は圧倒的によくなる。

これ以外に、レーザー光が月面に当って散乱する部分、光電管雑音等もあるが、更に無視できる程度に小さい。

§3 送受信光学系

送信光学系は、前節(1)式の θ と所定の値となる様、レーザービームを絞る必要がある。レーザー自体のひろがり角を ω 、レーザーの最終出力部の口径を d 、送信光学系の対物レンズの径を D とした時、

$$D/d \geq \omega/\theta \quad (4)$$

を満足しなると、いわゆる“けられ”を生ずる。設計目標値として、 θ は5秒角とし、 D は約40cmの反射鏡をオフアクシス、カセグレン系として使う。これによって普通のカセグレン系の中心部でのレーザービームの損失を防ぐ。

架台は赤道儀式架台に変更する軸を設け、月の追尾の便を図る。(第1図)

受信光学系は、口径3.8mの金属鏡とし、ジュラルミン材の上にカーボンメッキを施し、これを光学研磨し、Al蒸着后、SiO₂被膜をつける。カセグレン系とし、最小錯乱円は5"角を目標とする。架台は経緯儀式とする。(第2図)

送受信望遠鏡は、運転は計算機制御を考へ、精度2秒角を目標とする。

§4 データ処理系統

第3図に現在の基礎的試案を示す。この系は大別して、次の系統に分ける。即ち、1)レーザー光が月を往復する時間を計測する部分、2)その計測の際、雑音を誤動作しないう為、月からの反射が予想される時刻まで偽作をおさえるArming回路、3)レーザーの発射時刻を計測する部分、4)光電管の出力の、時間に対するパルス分布を測定する部分、5)時計と各種の制御回路、及び6)出力処理部である。

前節の望遠鏡の運転制御、2)のArmingの偽作時間の計算、出力の処理、特に4)の出力の統計処理等の為、小型計算機をオンラインで使う事を検討中である。

5)の時計は、必要を設置する予定の東京天文台菅平山麓測所の水晶時計に運動し、その水晶は更にVHFによって三鷹のセシウムにつながつている。精度は10 μ sec以内である。

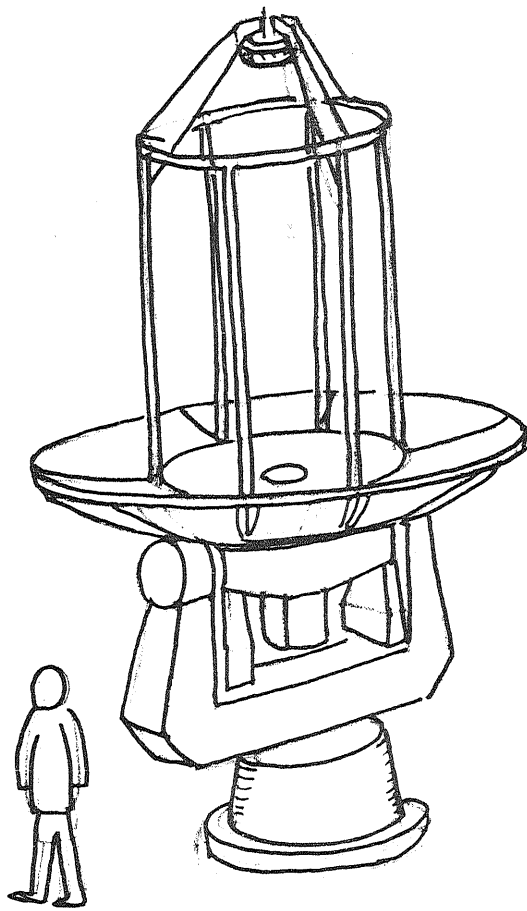
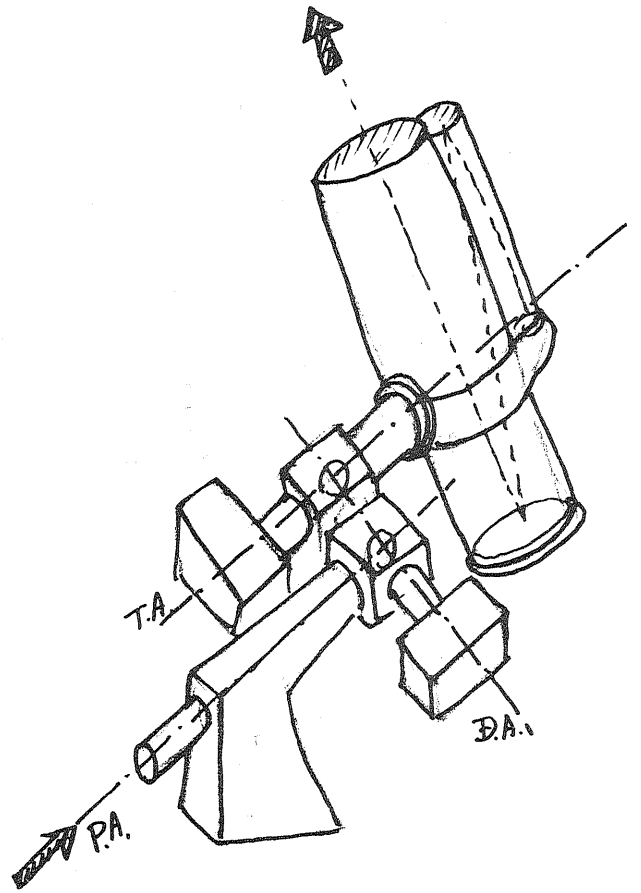


图 2 接收望远镜



P.A. : 仰轴
D.A. : 东摇轴
T.A. : 追尾轴

图 1 发送望远镜

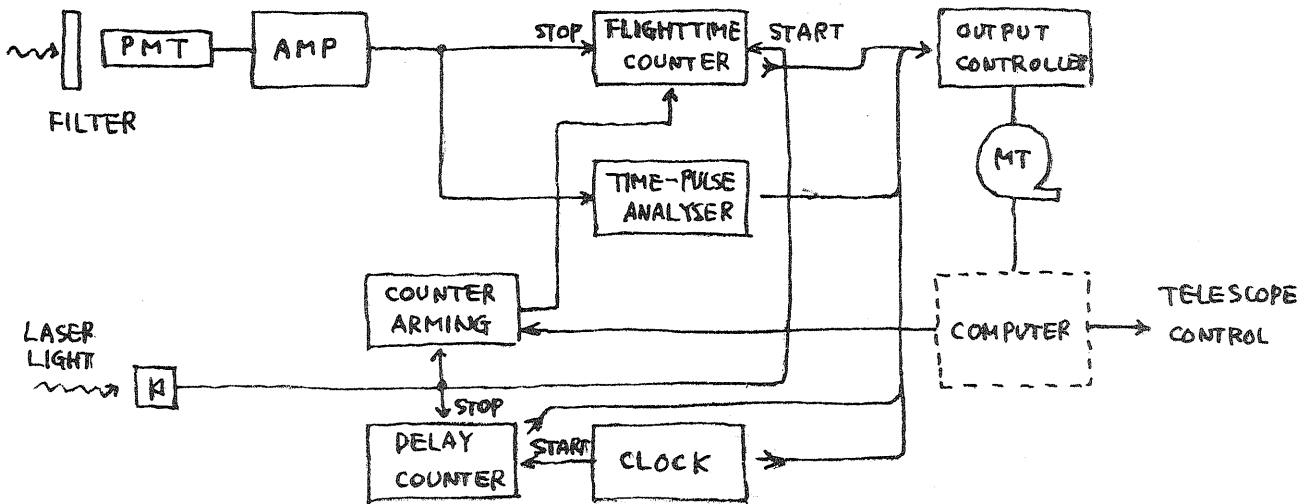


图 3 (a) F-1 处理系统