

研究ノート

下里 SLR 観測の新手法

黒川隆司^{*1}, 福良博子^{*1}, 久間裕一^{*1}, 井城秀一^{*1}, 田中郁男^{*1}, 鈴木充広^{*1}, 長岡 継^{*2}, 江河有聡^{*3}

Newly developed methods for SLR observation at Simosato Hydrographic Observatory

Takashi KUROKAWA^{*1}, Hiroko FUKURA^{*1}, Yuichi KYUMA^{*1}, Hidekazu INOSHIRO^{*1},
Ikuro TANAKA^{*1}, Michihiro SUZUKI^{*1}, Mitugu NAGAOKA^{*2}, Asato EGAWA^{*3}

Abstract

In satellite laser ranging (SLR) observation the distance to an artificial satellite is measured from round-trip travel time of a laser pulse which is transmitted from the station, reflected at the corner cube reflectors on the surface of the satellite and then received back at the station. The ranging accuracy depends on how accurately the specific point of returned pulse is identified. A simple method to identify such a point by detecting the leading edge of a transmitted and a received pulse has been degrading the ranging accuracy because of 'time walk' caused by variation of signal intensity. In order to reduce the time walk, two new techniques were introduced at Simosato Hydrographic Observatory in 2006 : namely, the methods named Triple Threshold Screening (TTS) and Constant Mid-signal Detection (CMD). The authors intend to verify both of them are effective in improvement of ranging accuracy in this paper. The principle of these techniques and some examples of their effectiveness are given.

1 はじめに

第五管区海上保安本部下里水路観測所では 1982 年より人工衛星レーザー測距 (Satellite laser ranging : SLR) 観測を行っている。観測開始から現在までの 24 年間に世界の SLR 観測とその関連技術は長足の進歩を遂げており、ことに測距精度の向上は著しく、精度の一つの指標である測距データの single shot RMS の残差 (以下, RMS と呼ぶ) は当初の十数 cm から 1 cm を切る段階へと進んできており、下里水路観測所もその流れの中にあって、常に精度向上の取り組みを行ってきている。

本稿は下里水路観測所において 2006 年途中から採用した SLR の精度向上のための二つの新手法について紹介するものである。

2 従来の測距手法 (リーディングエッジ方式) について

SLR はレーザー光を発射し、次に人工衛星に取り付けられた逆反射プリズムによって反射されたこの光を捉え、発射から反射光受信までの往復時間を測定することにより、人工衛星までの距離を測定する観測である。発射したレーザー光とその反射光はそれぞれ電気信号 (スタート信号, ス

†Received 13 December 2006 ; Accepted 01 February 2007.

*1 第五管区海上保安本部下里水路観測所 Shimosato Hydrographic Observatory 5th R.C.G. Hqs

*2 第七管区海上保安本部 7th R.C.G. Hqs

*3 第三管区海上保安本部 3th R.C.G. Hqs

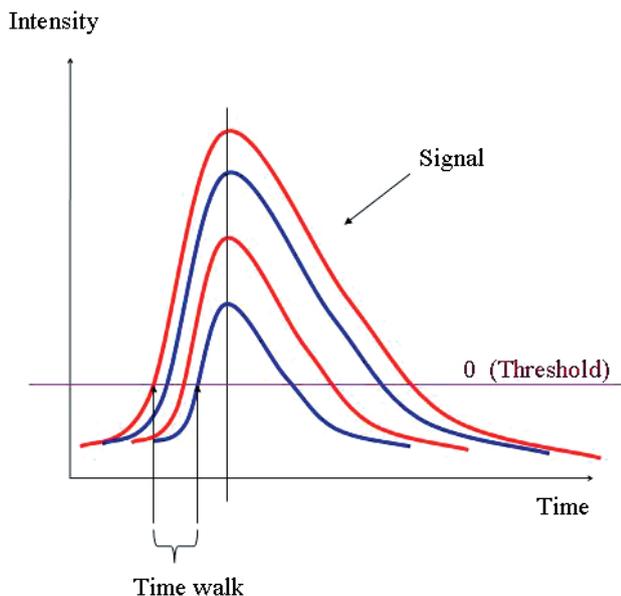


Fig. 1 Concept of leading edge detection technique.

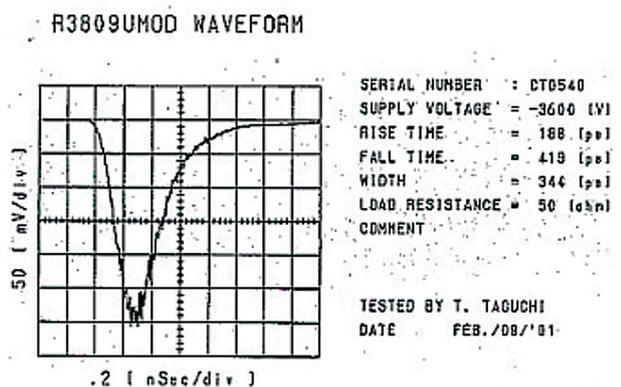


Fig. 2 Actual waveform of a stop signal. (Photomultiplier tube (PMT), manufactured by Hamamatsu Photonics K.K.)

トップ信号)に変換される。

従来の観測では信号の「立ち上がり（実際には信号の電圧極性がマイナスなので立ち下がり）」の電圧がある一定の閾値に達した瞬間をスタート及びストップとし、両者の時間間隔から衛星までの距離を測定している。

この手法では信号の強弱により、閾値に達するまでの時間にバラつき（Time walk）が生じ、それが精度の劣化を引き起こす大きな要因となる（福良・藤田，1999）（Fig. 1）。下里水路観測所において実際に受信光検出に使用している検出器（Microchannel Plate Photomultiplier Tube : MCP-PMT）に短いパルス状の光（継続時間 50 ps）

を照射した際の出力信号波形（浜松ホトニクス株式会社，2001）を Fig. 2 に示す。

3 三段階閾値評価法（TTS法）について

3.1 概要

TTS法は衛星からのリターン信号が十分に強く、多数の光電子が検出できることを前提としている。この法はシングル光子又は少数の光電子の信号である可能性がたかいクラス A の信号の除去や、人工衛星からの受信信号から信号強度の均質なデータのみを抽出することにより Time walk を小さく抑える手法である。（Fig. 3）

3.2 詳細

通常レーザー測距装置は、受信信号のレベルが一定の閾値以上となる全てのデータを測距データとして採用している。ここで Fig. 3 の①～④の信号であるが、大気の影響、トラッキングエラーなどにより反射波の受信強度が個々に変動（州崎・橘，1980）し、大きな Time walk が生じることが精度悪化の原因となっている。

ここで3階の閾値を設けて信号強度を A~D の4のクラスに分け、特定のクラスのデータのみを採用することで信号強度の均質なデータを得て、Time walk を小さくし、精度向上を図るのが TTS (Triple Threshold Screening) 法である。

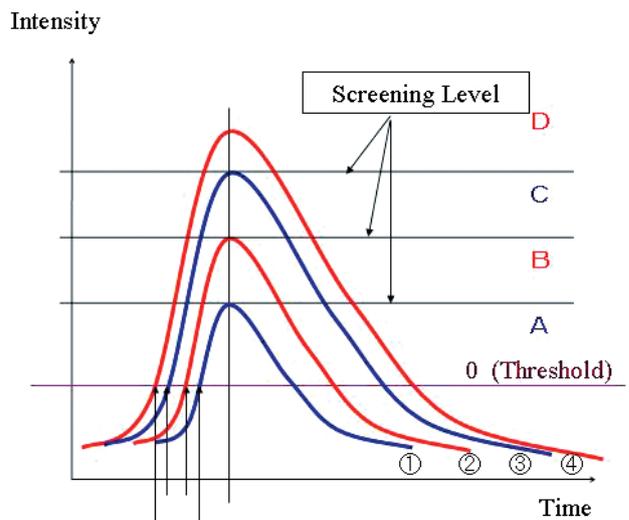


Fig. 3 Concept of Triple Threshold Screening (TTS) technique.

仮に Fig. 3 で C 区間のみの採用とした場合、立ち上がりの瞬間の変動は②と閾値との交点、③と閾値との交点の時間差分だけとなり測距精度は向上する。

なお TTS 法による特定クラスのデータ選択はデータ取得後のオフライン処理によって行われる。この際比較に用いるキャリブレーションデータについても TTS 法による選択を行い、衛星測距と同一クラスのデータによって比較している。

TTS 法の着想と人工衛星レーザ測距システムの実装方式については [附録] 参照

3.3 利点及び欠点

TTS 法を用いる利点としては、信号強度の強い信号のクラスと弱い信号のクラスとを分離処理することによって、どのクラスの精度が良いかを調べることができる。

またそれぞれのクラスに分類されたデータの数を調べることによって実際の観測において受信する衛星からの反射光の強度分布の情報を得ることが出来る。反射光の強度分布のパターンは衛星までの距離や衛星毎の逆反射プリズムの配置パターン等の影響を受けるものと予想されるが、実際にそれが現れるのか否かは興味深い問題である。この問題の検証は今後の課題である。

一方 TTS 法を用いる欠点は受信したデータを更に取り捨選択するので最終的に採用されるデータ数は減少する点である。

3.4 結果

次の図は従来手法 (Fig. 4 (a)) と、TTS 法 (Fig. 4 (b)) で同じ観測データ (測地衛星あじさい) を処理した結果の残差グラフ (最小二乗法により測距値に多項式近似をおこない、残差の標準偏差の 3 倍以上の残差を持つデータの削除) である。

従来手法の処理後の RMS が 19 mm であるのに対して TTS 法で選択したデータの処理後の RMS は 11 mm で、約 40% の改善が見られた。この傾向はノーマルポイントデータについても同

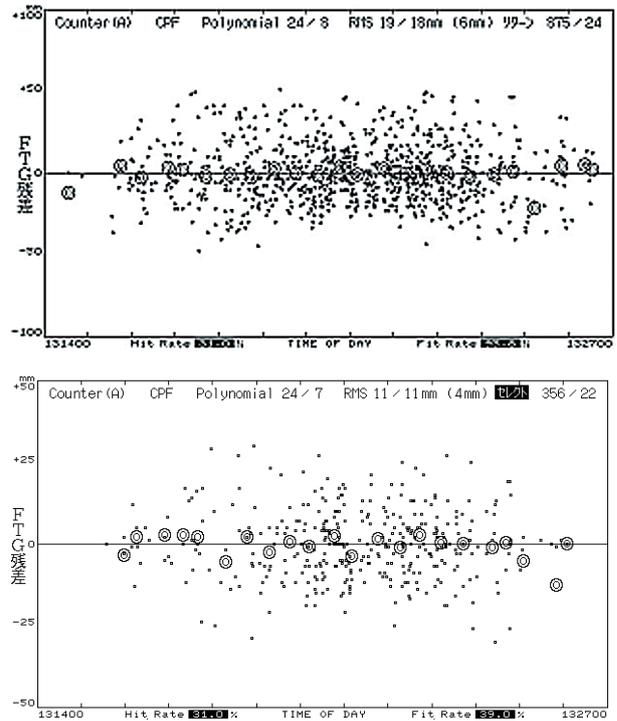


Fig. 4 (a) Residual plot of AJISAI observation under conventional technique, (b) same plot under TTS technique.

様で、TTS 処理前後で RMS は 18 mm から 11 mm に向上している。

一方処理後のデータ数は従来手法 875 に対して、TTS 法は 356 と 60% 減少しており、TTS 法の欠点もはっきりと現れている。

TTS 法により分類されるデータのクラスと測距値の関係については、測地衛星 LAGEOS-1, 2 のデータから測得データ数の多かった 5 観測について、分類された A~D のクラス全てのデータで処理した結果の残差から、A~D クラスそれぞれのデータを抽出し、残差の傾向を調べる方法で検討した。結果は信号の弱いクラスほど残差がプラス側に偏り、その量は隣り合ったクラス間で 1~2 cm の差 (ただし数値自体は TTS の設定値によって変化する。) となった。

この結果は TTS 法の原理から予想される結果であり、TTS 法の有効性を示している。

4 信号不動中点検出法 (CMD 法) について

4.1 概要

CMD (Constant Mid-signal Detection) 法は信

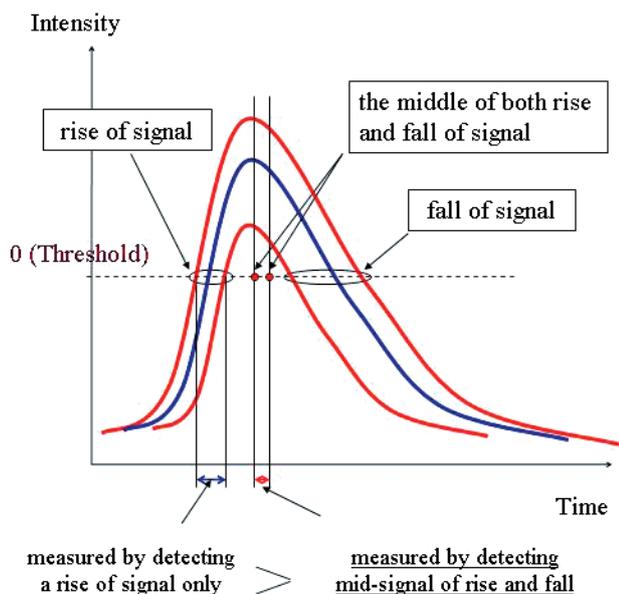


Fig.5 Concept of Constant Mid-signal Detection (CMD) technique.

号強度の変動による Time walk の影響を僅少化するための手法である。スタート信号、ストップ信号の立ち上がり立ち下がりが信号波形のピークの左右で対称形であると仮定すれば、立ち上がり立ち下がりの位置を測定してこれを平均した位置は、信号波形の波高値に無関係に常に波形のピーク的位置を表す。完全に左右対称でないとしても、近似的に左右対称と見なせる波形 (Fig. 2) であれば、従来手法より信号の強度変化の影響を小さく出来ることが期待できる。CMD 法はこの仮定に基づいて考案された手法である。(Fig. 5)

4.2 詳細

光を電気信号に変換する PMT からの出力信号は、Fig. 5 のような立ち上がりより立ち下がり側がやや広がる形状をしており立ち上がり信号と立ち下がり信号の双方のタイミングを検出することにより、その中央を見つけ出しこの信号中央を受信信号として扱い測距値を算出することによって、ランダムな受信強度変化に伴う受信信号の立ち上がりに生じる Time walk による誤差を僅少化することが期待出来る。

具体的には、PMT からの出力信号の立ち上が

りと立ち下がりを検出し各々の信号に基づく測距値を得た後に二つの値の平均値として測距値を求める。

但し、この手法が効果を発揮するためには、受信信号波形が近似的に左右対称と見なせるものであること及び受信強度 (の違い) によって不規則に乱れないこと、すなわち受信強度が変動しても受信波形は相似的に変化するという二点が前提となる。下里水路観測所の SLR システムにおいて CMD 法導入に先立つ予備的観測を行ったところ、衛星測距の結果も地上標的を用いた実験の結果も、その多くが CMD 法の前提条件を満たす波形を示した。

CMD 法では衛星測距と地上標的の測距では波形が異なる場合、正しい測距データが得られない問題が予想されるが、この点に関しては立ち上がり立ち下がりの中点位置を、立ち上がり立ち下がりの距離の差の 1/2 を補正して得られる擬似的な leading edge 位置に置き換える操作を、衛星測距データと地上標的の測距データ双方に施すことによって解決した。

4.3 利点及び欠点

CMD 法を用いる利点は記録された一つ一つのデータの信号強度の変動を僅少化するため、この手法の処理によって観測されたデータ数が減少することは無いことから、記録されたデータ数が少ない観測においても有効に利用できること及び、観測中にレーザー出力が変動してしまったような場合でも観測結果に及ぼす悪影響を小さく押さえる効果があるという利点がある。また原理的に、必ず従来の leading edge による測距データも記録していることから、従来の方式によるデータの比較によるチェックが容易だという利点もある。

一方、CMD 法の欠点は観測する人工衛星によって RMS の改善効果に大小の差があり、かえって RMS を悪化させる場合がある点である。この欠点はことに「あじさい」に関して顕著である。

4.4 結果

次の図は従来手法 (Fig.6 (a)) と, CMD 法 (Fig.6 (b)) で同じ観測データ (測地衛星ラジオス2) を処理した結果の残差グラフである。

従来手法の処理後の RMS が 13 mm であるのに対して CMD 法で選択したデータの処理後の RMS は 9 mm で, 約 30% の改善が見られた。

一方処理後のデータ数は従来方式 1808 に対して, CMD 法は 1683 と 10% も減少しておらず, CMD 法の利点もはっきりと現れている。

測距値に関しては, CMD 法と従来方式での測距値を直接比較した結果, 懸念されていた衛星の違いによる値の違いは認められなかった。ノーマルポイントデータについても比較してみると, 観測データ同様 RMS が 13 mm から 9 mm に向上しており良好な結果といえる。

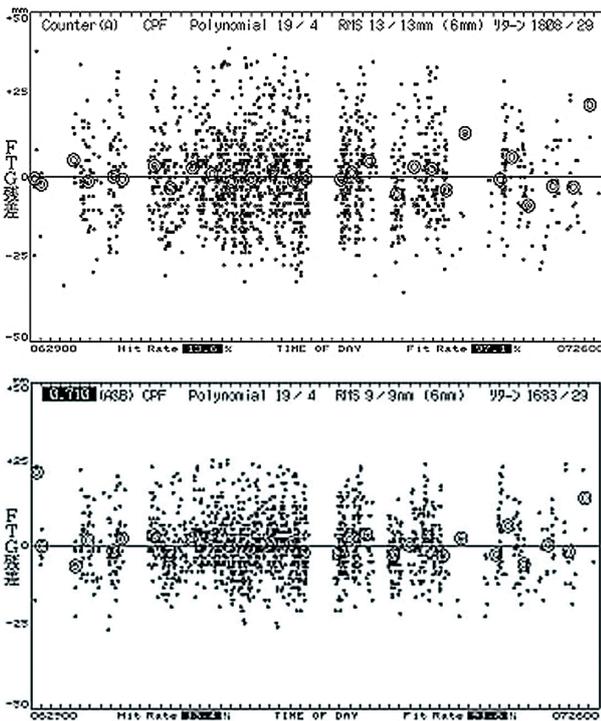


Fig.6(a) Residual plot of Lageos-II observation under conventional technique, (b) same plot under CMD technique

5 まとめと考察

CMD 法は, 「あじさい」においては有効な場合とそうでない場合がある。この点に関しては, 「あじさい」が大型の球形の衛星であること, プ

Table.1 Residual RMS and data number of AJISAI and Lageos-II observations

AJISAI 2006.10.12	Residual RMS(mm)	data number
LEADING EDGE	19(18)	875(24)
TTS	11(11)	356(22)
CMD	14(14)	892(24)
TTS•CMD	8(9)	356(22)

LAGEOS- II 2006.10.24	Residual RMS(mm)	data number
LEADING EDGE	13(13)	1808(29)
TTS	8(8)	543(26)
CMD	9(9)	1683(29)
TTS•CMD	6(7)	503(25)

リズムの配置が均一でないこと (佐々木, 1986) などの影響によって, 信号強度の変動と波形の相似性の変化の関係が崩れているためではないかと考えているが, まだ結論に至るだけの資料が得られておらず, 今後一層の研究が必要である。

また, 今回はストップ信号に対してのみ適用しているが CMD 法はスタート信号に適用しても改善が見込まれる技術であるから, スタート信号にも利用すればよりよい結果が生まれるかもしれない。この点に関しても今後の研究課題である。

TTS法に関しては, 全ての衛星に関して一定の効果が得られるが, 良い結果を得るためには有効なデータとして抽出するクラスの範囲を狭める必要があり, 元々の観測データ数自体が少ないものについては, 適用することが難しい方式である。また, 3つの閾値の設定は状況に合わせて変更することが難しく, 観測途中での大気状態の変化や, レーザー出力の変動といった要因での信号強度変化に対してはこれを除去することが出来ないという問題があり, 改良が望まれる。

TTS法, CMD法は初期の試験の段階から, 本年の半ばには実運用による効果の検証の段階へと進んでいる。まだまだ改善の余地は有るものの, 現時点でも Table. 1 に示したように両方式の併用によって従来手法に比べて RMS を 1/2 にまで改善出来ており, いずれも非常に有効な手法であ

ると評価できる。

謝 辞

本手法の実現にはユニバース株式会社、電応システム株式会社の努力によるところが大きい。佐々木稔氏（前第十管区海上保安本部次長）には要所において的確な助言を頂きました。独立行政法人情報通信研究機構大坪俊通氏は試験データの予備的評価を快く引き受けてくださいました。たゆまぬ努力により、貴重なデータの蓄積を続けてこられた歴代職員の方々にこの場を借りて深く感謝申し上げます。

要 旨

レーザー光を発射（送信）し、これが人工衛星表面の逆反射プリズムで反射されて再び観測点に戻る（受信）までのレーザー光の往復時間を測定することによって人工衛星までの距離を測定する人工衛星レーザー測距（SLR）観測では送受信信号のそれぞれの時刻をいかに正確に決定できるかによって観測精度の良否が決定される。SLRにおいて広く使われる送受信信号の Leading Edge を検出して信号の時間位置を決定する方式では、信号強度の強弱によって Time walk を生じて測距精度の悪化をまねいていた。下里水路観測所では測距精度の悪化の原因となる Time walk を低減し、測距精度を高めるために三段階閾値評価法（TTS）と信号不動中点検出法（CMD）と呼ぶ二つの新手法を 2006 年より取り入れて、その有用性を検証してきた。その結果、両手法とも測距精度向上に有効であることが示されたので、両手法の原理とその効果の実例を示した。

参考文献

- 佐々木稔（1986），国産測地衛星 GS-1 の完成，**水路部技報**，4，1-3。
州崎保司，橋篤志（1980），人工衛星における光パルスの検知時刻と誤差，**電気通信学会論文誌 Vol. 63-C NO. 8** 501-506
福良博子，藤田雅之（1999），下里水路観測所 SLR

データの測距バイアスについて解析，**水路部技報**，17，51-54

浜松ホトニクス株式会社（2001），試験成績表（MCP-PMT R 3809 UMOUD），11 pp

附 録

TTS（Triple Threshold Screening）

SLR の受信信号は微弱で光電子ゆらぎがあること、拡がり角度の狭小なビームを使用するためわずかな追尾エラーで反射光は大きく変動すること、衛星の複数反射器の反射光どうしが干渉し強弱が生ずること、大気ゆらぎの影響を受けることなどにより波形と波高値は大きく変動する。このため一定閾値を有する受信部で Time walk が生じ、測距誤差の要因となっている（1）。

信号波高値の変動による Time walk を消去するのに CFD（Constant Fraction Discriminator）（2）という手法があるが、これは受信信号（パルス）を二分岐し、一方を反転（極性を変え）して遅延をかけ、その後 2 つの信号波形を足し合わせるときに Time walk が最小となるゼロクロスポイントで検知をなすものであり CFD は先進的な SLR の多くに採用されている。

しかしこの手法が完全に機能するのは、波高は変動するが波形には変化がないということが前提になるため、波形変動を来たす単一光電子レベルまたはそれに近い信号が混在するような場合には効果は減じられる。

これらの問題を改善する方法として我々は TTS（Triple Threshold Screening）という方式を開発した。改善の前提として、SLR では受信信号強度の変動は避けられないこと、測距は必ずしも全てのデータを取得する必要はない、という認識をベースにしている。その方法は、変動する信号をレベル分けして、一定レベル間の信号を選択、抽出する機能を付加して測距をなすものである。具体的には通常 1 つの閾ユニットの受信系に代り、レベルの異なる 3 つの閾ユニットの系を構成し、選択すべきレベルに設定した二つのレベル間の信号のみを抽出する機能を付加する。第一の

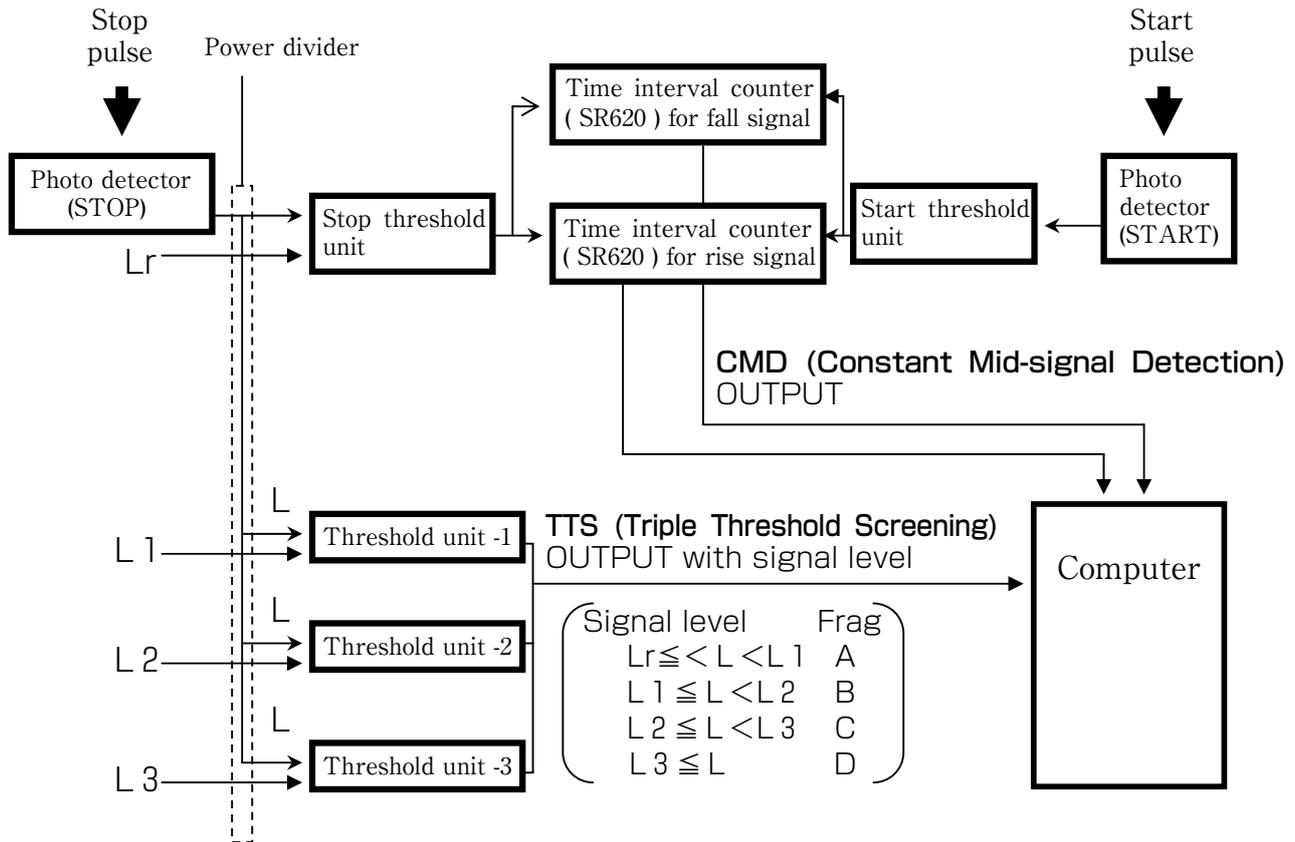


Fig. A New configuration of TTS and CMD for Simosato SLR

閾値ユニットの閾値を L_1 、第二のそれを L_2 、第三のそれを L_3 とするとき $L_1 < L_2 < L_3$ となる設定をなし、信号のレベルが L_2 と L_3 の間にある信号のみを抽出し、その信号をレベル L_1 の閾値ユニットで検出して測距をなす。この方式で試作した TTS による予備テストにおいて、LAGEOS の通常測距で RMS: ~ 30 mm の条件下で TTS を適用して、上下の極端に外れる信号を排除することで、それが 10 mm レベルに改善されることが分かった。

実際の SLR への適用にあたっては、新たに採用された新コンパレータとの整合性、従来方式との比較評価のため、選定した信号を測距信号とする代わりに、TTS を従来の閾回路に併設して 1 ショットごとの信号波高値の識別に適用し、それぞれの信号にフラグを付けて記録し、オフライン処理する方式をとった。

Fig.A にこの形での TTS の回路構成を示す。図において検知器 (MCP PMT) からの信号はパ

ワーデバイダにより 4 等分岐され、その一つはストップ閾値ユニットを経て、測距カウンターに入力する。残りの 3 分岐出力は TTS の 3 つの閾値ユニット -1, 2, 3 に入力し、比較レベル L_1 , L_2 , L_3 で検知される。測距のスタート信号はスタート検知器とスタート閾値ユニットを経て、測距カウンターに入力される。測距カウンターからの出力測距データはショットごとに計算機に送り込まれる。同時に 3 つの閾値ユニット -1, 2, 3 のレベルの判定出力も計算機に送り込まれる。計算機は以上の入力を処理して、レベル判定結果をフラグ化 (A, B, C, D) して測距データに添付する。この結果測距データは 4 つのレベルに分けて抽出することが可能になる。