

パルスレーザ測距における受信波の検知時刻と誤差
 Detection Times and Errors of Returned Signals
 for Pulsed Laser Ranging

洲崎 保 司 橋 篤 志
 Yasuzi Suzuki Atsushi Tachibana

日立製作所 戸塚工場
 Hitachi Ltd., Totsuka Works

1. はじめに

パルスレーザ測距システムは人工衛星や月と地球間などの大遠距離測距に威力を発揮しているが、その精度は周辺技術の進歩もあつて cm 級に達しつつある。しかしながら、このような精度を測距装置と標的のそれぞれの測定すべき基点間の距離の絶対値に対して得ようとする、測定値に含まれる各種遅延⁽¹⁾に対する補正が同程度以上の精度で行なわれなければならない。パルスレーザ測距システムに生ずる遅延には装置遅延、大気遅延、標的遅延などがある。装置遅延は距離が既知の地上標的を測距することで、大気遅延は途中経路の大気の屈折率を何らかの手段で知ることにより求められる。この二つの遅延量の決定方法も cm 級の精度を得ようとする、種々問題があるが、ここでは従来概念的にも議論の十分でない標的遅延の問題を人工衛星測距の例で検討する。人工衛星からの反射波は衛星の形状や表面の反射特性、レーザパルスの巾などによって決まる波形歪を持つと同時に、一般に衛星の測定すべき基点に対してずれを有する。この反射波を受信器が検知するときの検知時刻に符合する位置と衛星の基点間の距離が標的遅延に相当する。反射波形と衛星の基点の関係が知れば、標的遅延の問題は反射波の検知時刻とその誤差の問題に帰する。表面に一樣な反射特性を有する球形の衛星は波射波に一定の形が期待でき、かつ軌道運動の基になる重心がその中心に容易に設定し得るということもあつて測地用などのレーザ測距専用の衛星として

標準的な形となる動向にある。このような衛星の例としてLAGEOS(米)、STARLET(仏)、GS-I(日本：計画中)がある。そこで具体的な例として球形衛星からの反射波の検知時刻と誤差を論ずる。

2. 検知時刻と誤差

いまパルスレーザ測距システムの受信系の分解時間 t_B が人工衛星からの反射波の巾 τ_r より小さければ、この反射波は $m = \tau_r / t_B$ 個のレンジセルに分解することができる。波形内のレンジセルに時間軸に沿って前端より順次番号を付し任意の i 番のセルの波高値が受信器のスレシホールドレベルを越す確率を P_i とするとき任意の j 番目のセルの波高値が最初にスレシホールドレベル⁽²⁾を越す確率 P_j は次のように与えられる。

$$P_j = p_j \prod_{i=1}^{j-1} (1 - p_i) \quad (1)$$

これより反射波の検知時刻は確率 P_j が最大値をとるセルの位置 j_M に、誤差は j_M に関する j の2次モーメントの平方根 j_{rms} に符合することができる。^{(3)、(4)}

すなわち

$$j_{rms}^2 = \sum_{j=1}^m (j - j_M)^2 P_j \quad (2)$$

人工衛星の表面の全てに反射能があると考え

られる場合、反射波の先端は人工衛星の前端からの反射光に対応するので検知時刻 T_M 、誤差 T_{rms} は次のように表わされる。

$$T_M = T_f + t_B \cdot j_M \quad (3)$$

$$T_{rms} = t_B \cdot j_{rms} \quad (4)$$

ここに T_f は反射波の前端が検知器に到達する時刻を表わす。人工衛星の前端から基点までの距離を r として、基点から反射波があるとするとその到達時刻 T_o は次のように与えられる。

$$T_o = T_M + \left(\frac{2r}{c} - t_B \cdot j_M \right) \quad (5)$$

ここに c は光速度を表わす。 T_M はタイムインターバルカウンタにストップがかかる最大確率時刻に符合するので衛星の基点までの距離はこれに $2r/c - t_B \cdot j_M$ の補正をすることで求められることになる。衛星の観測方向の前端から基点までの距離 r が常に一定であるような衛星によれば単に j_M を知ることによって補正量の決定が可能となる。表面全体に一樣な反射能を有する球形ないし気球形の衛星はこのような条件を満たすであろう。これらの関係を図1に示す。

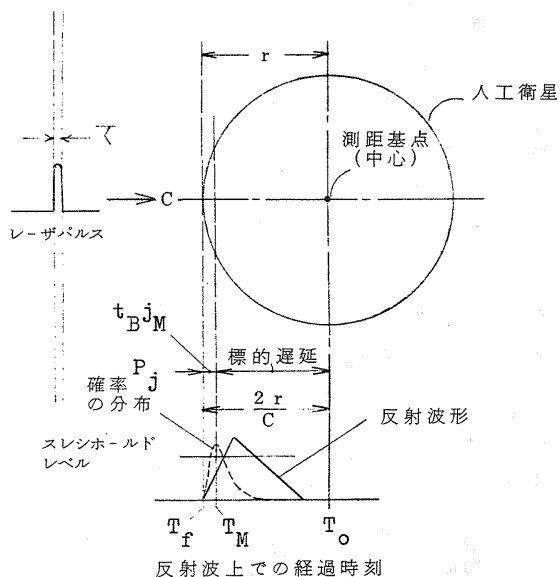


図1 検知時刻 T_M と標的遅延の関係

3. 反射波形

表面に一樣な分布で多数の逆反射器を搭載する半径 r の球形の衛星に対してパルス巾 τ のレーザーパルスを照射するとき、その反射波形はおよそ次の式で表わされる瞬時の反射面積 $\sigma_s(t)$ に比例する形として与えられる。

$$\begin{aligned} \sigma_s(t) = & \frac{A_o n c (t_2 - t_1)}{2r} - \frac{A_o n}{2i_c} \left[\sin \left\{ \cos^{-1} \left(1 - \frac{ct_2}{r} \right) \right\} \right. \\ & - \left(1 - \frac{ct_2}{r} \right) \cos^{-1} \left(1 - \frac{ct_2}{r} \right) - \sin \left\{ \cos^{-1} \left(1 - \frac{ct_1}{r} \right) \right\} \\ & \left. + \left(1 - \frac{ct_1}{r} \right) \cos^{-1} \left(1 - \frac{ct_1}{r} \right) \right] \end{aligned}$$

ただし

$$(a) \quad 0 < t (= t'/2) \leq \tau \text{ のとき} \\ t_1 = 0, \quad t_2 = \frac{t}{2}$$

$$(b) \quad \tau < t (= t'/2) \leq \frac{r}{c} (1 - \cos i_c) \text{ のとき} \\ t_1 = 0, \quad t_2 = t - \frac{\tau}{2}$$

$$(c) \quad t (= t'/2) \geq \frac{r}{c} (1 - \cos i_c) \text{ のとき} \\ t_1 = t - \tau \\ t_2 = \frac{1}{2} \left[\frac{r}{c} (1 - \cos i_c) + (t - \tau) \right] \quad (6)$$

ここに

A_o 1ヶの反射器の対称軸に光が入射するときの反射面積

n 反射器の数

c 光速度

i_c 反射面積が0になる反射器の入射角度

t レーザパルスの先端が衛星の前端に到達したときを基点とする時刻

t' 反射波の先端を基点とする反射波形内に仮定した時刻

をそれぞれ表わす。なお式(6)でレーザーのパルスは矩形波で、逆反射器の角度特性は直線近似した。 $\sigma_s(t)$ を用いて人工衛星からの時々刻々の受信信号の強さが計算できる。受信波内のレンジセル毎の平均受信光電子数の形として次式のレーザーレーダ方程式によって与えられる。

$$\bar{n}_i(t_i) = \frac{16 P_o A_r T^2 K_t K_r \eta t_B}{\pi^2 (\theta_t \theta_s)^2 R^4 h c} \bar{Q}_s(t_i) \quad (7)$$

ここに

- P_o レーザの出力
- A_r 受信鏡の面積
- T 大気透過率
- K_t 送信光学系の効率
- K_r 受信光学系の効率
- η 光電管の量子効率
- τ レーザの波長
- θ_t 送信レーザービームの拡がり角
- θ_r 衛星からの反射光の拡がり角
- R 衛星の距離
- h プランクの定数
- c 光速

である。

4. 数値例

式(6)ないし(7)に比例する形として与えられる受信波形の例として、表面に多数の逆反射器を一樣な分布で搭載する半径 $r = 5$ m の気球形衛星（日本で打上げが計画されている測地衛星 GS-1 相当）に対してパルス巾 $\tau = 200$ ps のレーザーを照射したときの反射波形を図2に示す。

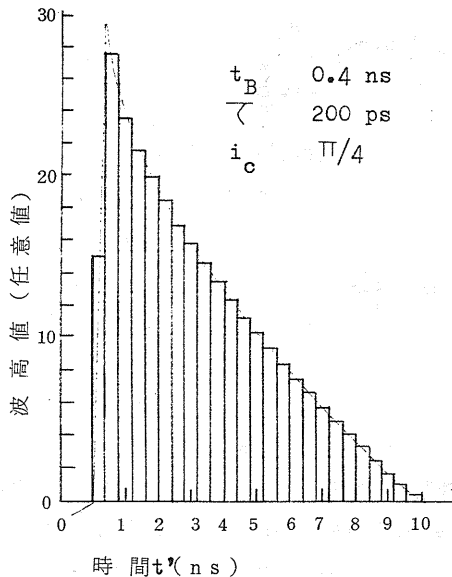


図2 反射波形の計算例

図2においてレンジセルの中は受信系の総合帯域巾として現在期待し得る最良の2.5GHzより $t_B = 0.4$ nsを仮定している。波形の先端すなわち最初のレンジセルの位置は衛星の表面の位置に符合し、衛星の中心（測距の基点）はそれより $2r/c$ すなわち33.3ns離れた位置にある。

図2の例についてレンジセル毎の波高値がポアソン分布するとして確率 P_i が次式で与えられるとするときの確率 P_j の計算結果を図3に示す。

$$P_i = \sum_{x=N_t}^{\infty} \frac{(\bar{n}_i)^x}{x!} \exp(-\bar{n}_i) \quad (8)$$

ここに N_t は等価光電子数で表わすスレシホールドレベルを示す。図3でパラメータとして信号の強さ \bar{N}_s をとっているがこれは次式で与えられる。

$$\bar{N}_s = \sum_{i=1}^m \bar{n}_i(t_i) \quad (9)$$

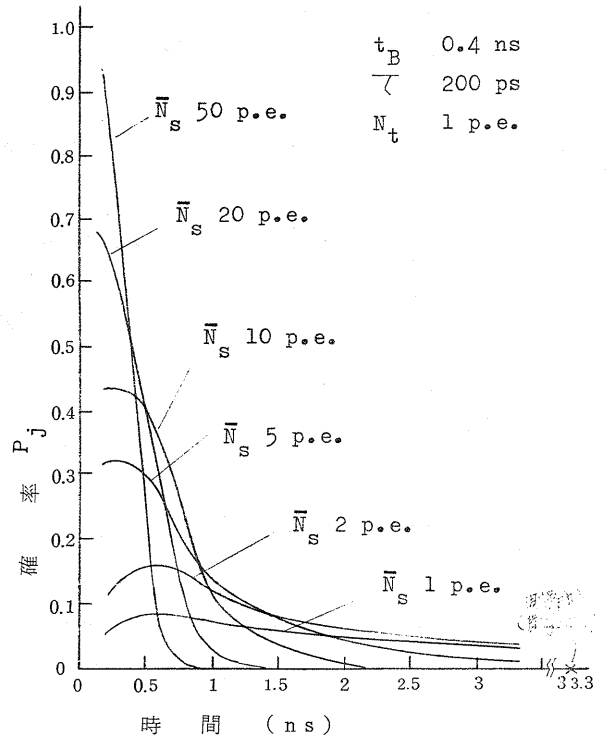


図3 確率 P_j の分布

この図はスレシホールド $N_t = 1$ p.e. の場合であるが曲線のピークの横軸における位置が検知時刻に対応し、曲線の拡がり誤差の大きさに対応する。この例ではレンジセルの中と波形の立上り

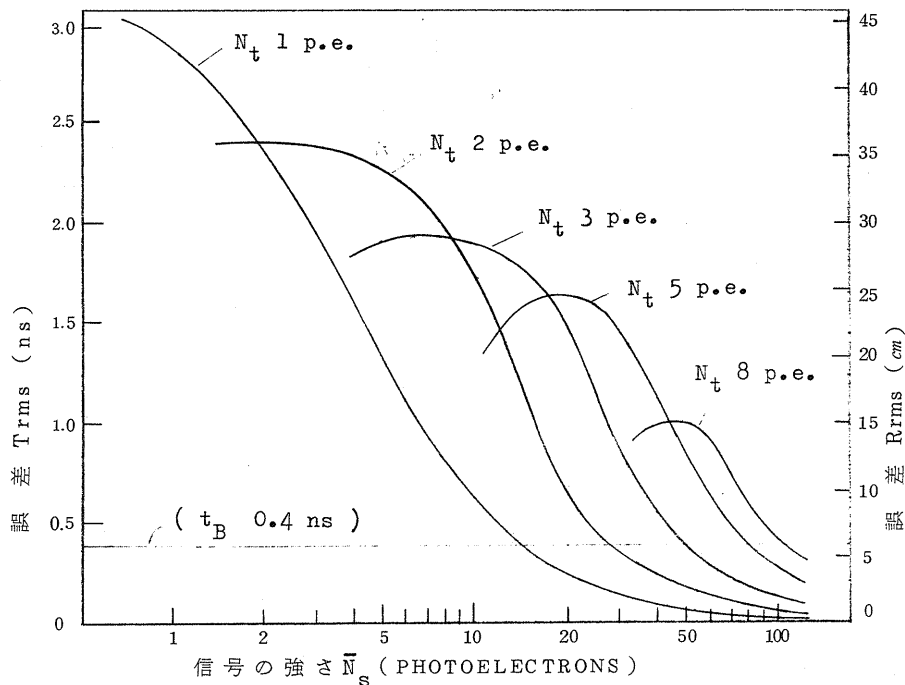
時間が近接しているのが顕著ではないが検知時刻は信号の強弱により前後する。立上りがなだらかな波形ほど当然ながらその量は大きくなる。この図の例のように受信器の分解時間（レンジセルの巾）に比して立上りの鋭い波形はこの点で好ましい波形といえる。しかし信号の強さによって検知時刻が変動することにより変わるのでcm級の精度を議論するにはこのことを十分考慮する必要がある。衛星の中心は分布の左端33.3ns（半径 $r = 5 \text{ m}$ を光が往復する時間に対応）のところであり、これを測距の衛星上の基点とすればこれと検知時刻の時間差が標的遅延ということになる。

次に図3の波形の例でスレシホールドレベルをパラメータとして信号の強さと式(2)、(4)で与えられる誤差の関係を計算した結果を図4に示す。この場合もレンジセル毎の波高値ゆらぎにポアソン分布を仮定している。

図よりスレシホールドレベルが低く、信号の強いほど誤差は小さくなる傾向が分る。スレシホールドが単一光電子レベルの場合には受信光電子数で15個以上得れば現在可能なシステムの最小分解能0.4ns（6cm相当）以下に誤差を押え得ることが分る。

5. むすび

パルスレーザ測距システムの装置としての精度は今後更に向上することが期待できる。それと同時にこれを実用化する上でここで述べたような測距値に伴う遅延に対する補正の問題がいっそう重要になってくる。ここではその一つである標的遅延に関する議論を行なったが今後さらに理論と実験の両面からの検討と同時に補正作業を含めた具体的なデータ処理方法の検討が望まれる。



← 図4. 誤差と信号の強さの関係

文 献

- (1) 土屋 淳：“レーザによる人工衛星の距離測定” 海洋科学, 10, 7, p557, 1978
- (2) 洲崎、橘：“パルスレーザ測距における光電子放出ゆらぎの影響” 信学論(C), 55-C, 11, 609, 昭48
- (3) R.S.Iyer：“Threshold detection in pulsed laser ranging” Appl.Opt. 15,6,p1349, June 1976
- (4) 洲崎、橘：“スレシホールド検知に関する一考察” 信学論(C), 60-C, 11, p736, 昭52
- (5) 洲崎、橘：“レーザによる人工衛星測距の受信率について” 信学論(B), 55-B, 10, p569, 昭47