

## 共光路百赫兹激光测月系统主回波重叠的研究

皮晓宇, 伏红林, 翟东升, 李荣旺, 张海涛, 李祝莲, 李语强

(中国科学院云南天文台, 云南昆明 650011)

**摘要:** 高重频激光测月技术是月球激光测距的一个重要发展趋势, 对获得更多的激光测月数据具有重要意义。在之前的 10 Hz 测月频率基础上, 中国科学院云南天文台开发了共光路百赫兹激光测月系统。然而在共光路系统中, 存在发射激光光子的主波时刻与接收激光光子的回波时刻相重叠的现象, 影响了对回波光子的探测。文中从信号时序角度对主回波重叠现象进行了分析, 研究了光子飞行时间与重叠现象间的关联性。利用某天的月面反射器的轨道预报对系统的重叠发生比率进行了模拟, 得出了当天观测时段内整体的重叠发生率约为 8%。同时开展了基于每个发射时刻的分段模拟, 结果与前者吻合。对微调转镜转速以避免主回波重叠的方法进行了分析, 开展了对应的转镜转速调整试验, 结果表明当重叠发生时, 对转速进行适量调整可以避免主回波重叠。

**关键词:** 激光测月; 共光路; 高重频; 主回波重叠

中图分类号: P129 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20190467

## Study on transmitting/echo signal overlapping in common-optical-path 100 Hz-rate LLR system

Pi Xiaoyu, Fu Honglin, Zhai Dongsheng, Li Rongwang, Zhang Haitao, Li Zhulian, Li Yuqiang

(Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011, China)

**Abstract:** In Lunar Laser Ranging (LLR), higher repetition rate is an important trend for development, which is also of great significance for acquiring more LLR data. Based on the previous 10 Hz ranging rate system, a 100 Hz lunar ranging system with common-optical-path structure was developed by Yunnan Observatories, CAS. However, overlapping of the transmitting/echo signals exists in such a common-optical-path system, and seriously disturbs echo-photon detection. In the paper, the overlapping phenomenon was analyzed from the perspective of time sequence, and the correlation between the overlapping and the Time of Flight (TOF) was studied. Overlapping in the system was simulated with the orbital prediction of a lunar retro-reflector of a certain day, and the general overlapping ratio was approximately 8% for the observational duration. Sectional simulation based on each transmitting epoch was also performed, its result was consistent with the previous one. The method of avoiding overlapping by slightly adjusting rotating-mirror's speed was analyzed, and corresponding experiment was carried out, as proper speed adjustment turned out to be a solution when the overlapping happened.

**Key words:** LLR; common-optical-path; high repetition rate; transmitting/echo signal overlapping

收稿日期: 2020-02-10; 修订日期: 2020-03-19

基金项目: 国家自然科学基金天文联合基金 (U1631134, U1431116, U1731112)

作者简介: 皮晓宇 (1986-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事卫星激光测距等方面的研究工作。Email: pixiaoyu@ynao.ac.cn

## 0 引言

激光测月 (Lunar Laser Ranging, LLR) 是通过测量激光光子从地面观测站到月面角反射器的往返时间计算地月距离的技术手段, 对于研究天文地球动力学、地月科学、月球物理学和引力理论等具有重要意义<sup>[1-3]</sup>。2018 年, 云南天文台成功实现了国内首次月球激光测距, 使用的是转镜共光路结构与 10 Hz 的测距重复频率<sup>[4]</sup>。

在测距系统中, 发射的激光脉冲称为主波, 目标反射的光子称为回波。由于地月平均距离约 38 万 km, 远大于地球附近空间目标的轨道高度, LLR 对望远镜的指向性有极高的精度要求, 利用共光路能够确保收发光路的一致性<sup>[5-6]</sup>。在云南天文台开发的共光路结构中, 通常使用转镜进行发射光路与回波光路的高速切换。

转镜在结构上包括了电机、反射镜面以及挡片等, 反射镜面上存在小孔以便于主波穿过, 转镜在测距过程中以固定频率持续转动。在主波发射时, 激光穿过转镜上的小孔进入到发射光路中; 此时在接收端由于探测器距离门为关闭状态, 不会对入射光子进行响应<sup>[7]</sup>。在回波接收时, 回波光光子进入望远镜光路并在转镜上反射, 最后到达探测器; 此时距离门处在开启状态, 探测器可以对入射光子进行探知。在此类结构中, 主回波重叠会对回波采集产生严重影响。

主回波重叠, 是指主波发射时也是回波返回的时刻, 此时转镜位于激光穿孔位置, 会导致: (1) 回波难以进入接收终端; (2) 主波杂散光较强, 会进入接收端, 若距离门此时开启, 探测器会产生剧烈的响应, 在软件用户界面上表现为采集到极为强烈的噪声。在使用超导探测器的情况下, 强烈的杂散光甚至可能导致超导器件失去超导态。而相较于传统的 10 Hz 测月频率, 在 100 Hz 的情况下, 重叠现象将更为频繁地出现。

在以合作目标 (地球轨道卫星) 作为测距对象时, 有过对主回波重叠情况的模拟<sup>[8]</sup>。鉴于合作目标属于近地目标, 而测距频率为 1 kHz, 其对于测月实验的参考价值有限。在总体上国内外相关的研究相对较少。文中从信号时序的角度对主回波重叠进行模拟, 分析其产生的原因, 研究在观测时段内应对主回波重

叠的手段, 对于同类型的激光测距系统的开发具有重要意义。

## 1 对重叠的分析

作为分析的前提条件, 系统中存在以下基本情况:

### (1) 回波时刻点的界定

进行 100 Hz 的激光测距时, 主波与回波呈现的一一对应关系相对明显。回波可能会由于传播发生脉冲展宽, 或由于目标的复杂反射面产生多重回波脉冲的情况<sup>[9]</sup>。短时间内较集中的回波脉冲群组都可以认为是由单一一次主波发射造成的一组回波。在文中的分析中, 回波时刻以单个测距周期内探测器响应输出的第一个脉冲信号为准。

### (2) 采用 TOF 理论值的模拟与实际的差别

光子的飞行时间 (Time of Flight, TOF) 是指测距时激光光子从测站发射、被目标反射、最后返回测站所需的时间, 剔除系统延迟后, 可用于计算测站与目标之间的距离。目标与测站间的理论回波时刻来自于测距目标的轨道预报, 理论回波时刻与实际测量的回波时刻间的偏差称为残差。以 1 km 级的预报精度为例 (实际预报精度通常优于此值), 根据真空中光速计算, 其对应的残差范围达到约 3 微秒 ( $1\ 000\ \text{m}/(3 \times 10^8\ \text{m/s})$ ), 而转镜的穿孔时段通常为几百微秒甚至达到毫秒量级, 前者远小于后者, 且该影响随着测距精度的提升而更加微小, 故利用 TOF 理论值进行计算是有效可行的。

### (3) 转镜与信号时序

测距过程中转镜的位置以及主回波重叠的情况见图 1, 测距时的信号时序见图 2。以穿孔时段表示转镜上的孔经过发射光轴路径位置所需的时间。

在图 2 的时序中, 在  $n$  时刻 ( $n$  为整数) 时, 转镜产生了同步信号时刻  $R(n)$ , 对应地产生了激光脉冲的主波时刻  $T(n)$ , 主波时刻总是位于穿孔时段内。穿孔时段 (Hole-pass) 是转镜上的开孔经过发射光轴所需时间, 起始于  $R'(n)$ , 持续时间为  $t_w$ 。回波时刻  $E(n)$  表示回波返回到探测器的时刻,  $E(n)$  与  $T(n)$  间满足:

$$E(n) - T(n) = TOF(n) \quad (1)$$

重叠在时序上的表现为, 回波时刻  $E(n)$  存在于穿孔时段中间。造成重叠的通常是第  $n$  时刻产生的主波, 经过长时间传播得到的  $E(n)$ , 落在了后续某个周

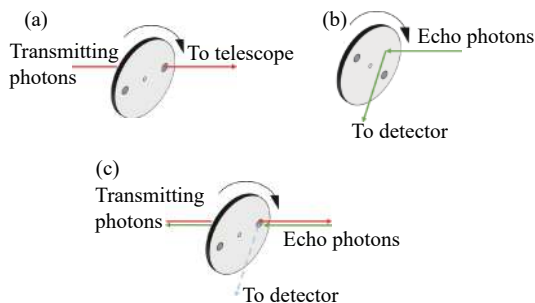


图 1 转镜位置与主回波重叠。(a) 正常的发射; (b) 正常的接收; (c) 主回波重叠

Fig.1 Rotating mirror's position and transmitting/echo signal overlapping. (a) Normal transmitting; (b) normal receiving; (c) transmitting/echo signal overlapping

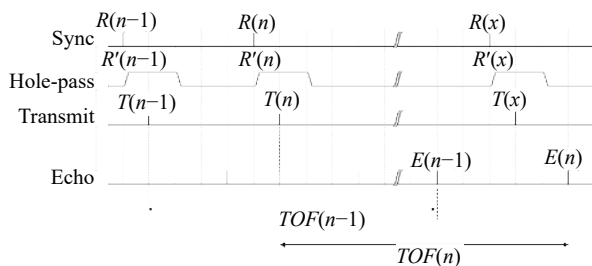


图 2 测距信号时序

Fig.2 Time sequence of signals in ranging

期的穿孔时段内,产生了主回波的重叠。

图 3 显示了重叠发生时系统的信号时序。一方面,作为转速稳定的同步信号  $R(n)$ ,以  $t$  代表转镜周期,转镜上开孔数量为 2,在转镜转速  $r=3\ 000\ \text{r/min}$  情况下, $t$  为  $0.01\ \text{s}$ ( $100\ \text{Hz}$  频率)。 $R(n)$  与  $n$  存在关系:

$$R(n) = n \times t \quad (2)$$

以  $R'(n)$  代表主波开始穿孔的时刻,  $t_r$  代表该时刻与转镜同步信号间延时,则:

$$R'(n) = R(n) + t_r \quad (3)$$

另一方面,一次测距实验中,在时间序列上一定存在一个与测距目标当前时刻的 TOF 值所对应的  $m(n)$  值,  $m(n)$  为整数,使得:

$$m(n) \times t < TOF(n) \leq (m(n) + 1) \times t \quad (4)$$

由于系统中是由转镜同步信号  $R(n)$  触发激光器产生主波  $T(n)$ ,二者间延时以  $t_s$  表示,则:

$$T(n) = R(n) + t_s \quad (5)$$

根据公式 (2) 和公式 (5),作为按照固定频率产生的激光发射主波时刻序列,  $T(n)$  满足:

$$T(n + m(n)) - T(n) = m(n) \times t \quad (6)$$

由此可得重叠发生时的回波时刻条件,  $t_w$  作为穿孔时段时长。对于在  $n$  时刻的激光脉冲产生的回波  $E(n)$ ,则当:

$$R'(n + m(n)) < E(n) \leq R'(n + m(n)) + t_w \quad (7)$$

时,发生主回波重叠,如图 3 所示。

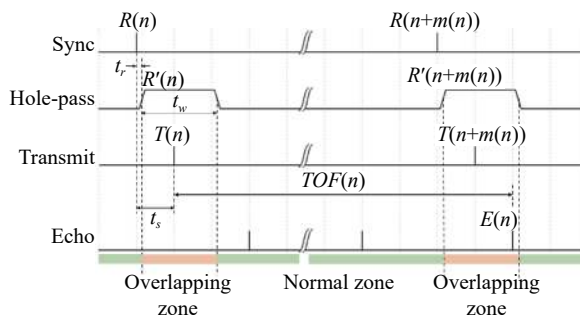


图 3 转镜穿孔时段时序

Fig.3 Hole-passing time in time sequence

结合前文分析,将公式 (1)~(6) 代入公式 (7),逐步推导,可得:

$$R(n + m(n)) + t_r < E(n) \leq R(n + m(n)) + t_r + t_w \quad (8)$$

$$\begin{aligned} n \times t + m(n) \times t + t_r &< T(n) + TOF(n) \cdots \\ \cdots &\leq n \times t + m(n) \times t + t_r + t_w \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} n \times t + m(n) \times t &< R(n) + t_s + TOF(n) - t_r \cdots \\ \cdots &\leq n \times t + m(n) \times t + t_w \end{aligned} \quad (10)$$

将式中延迟量统一为综合延迟  $t_d$ ,令:

$$t_d = t_s - t_r \quad (11)$$

则公式 (10) 可简化为:

$$m(n) \times t - t_d < TOF(n) \leq t_w - t_d + m(n) \times t \quad (12)$$

若是将整个过程理想化,假设综合延迟项  $t_d=0$ ,则条件可进一步简化为:

$$m(n) \times t < TOF(n) \leq t_w + m(n) \times t \quad (13)$$

它表示了目标所对应 TOF 的变化,也即目标与测站间距离的变化是产生重叠现象的主要原因。在任一时刻  $n$ ,当 TOF 相对于测距整周期时段的差值小于转镜穿孔时段时,会发生主回波重叠。根据以上推导,参考目标预报,可模拟出百赫兹激光测距系统对目标进行测距时主回波重叠现象的情况。

## 2 主回波重叠的模拟

共光路百赫兹激光测月的主要目标之一是月面

角反射器 Apollo-15, 从其某日的轨道预报中提取 TOF 值与时间信息作为输入量进行模拟。

(1) 整体模拟

根据上文公式推导, 以公式 (12) 中右侧部分作为重叠区域上限 UB(Upper Bound), 左侧部分作为下限 LB(Lower Bound), TOF 曲线位于重叠区域中时表示会发生主回波重叠现象。模拟的结果如图 4 所示。对序列进行统计, 可得当天观测时段内主回波重叠的比率为约 8%, 该值为重叠部分在当天预报的 TOF 曲线中的占比, 会随着 TOF 曲线与重叠区域的相对位置变化而改变。

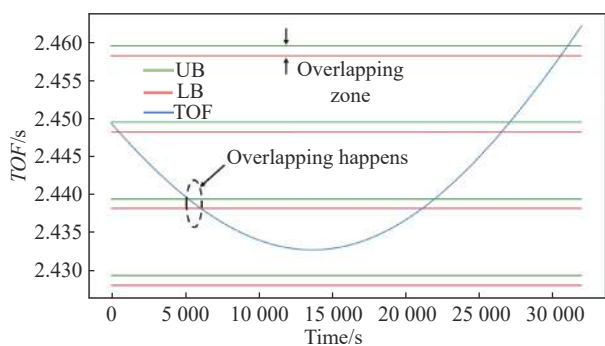


图 4 整体重叠情况模拟

Fig.4 General overlapping simulation

(2) 分段模拟

通过插值计算出每一点主波发射时刻  $T(n)$ , 结合  $TOF(n)$  得到其对应回波序列  $E(n)$ 。对于每个  $E(n)$ , 找到其附近  $R'(x)$  判定是否发生重叠。 $R'(x)$  可以通过寻找  $E(n)$  附近的  $T(x)$  来确定。可能的  $T(x)$  为与  $E(n)$  相邻的主波时刻如图 5 所示。

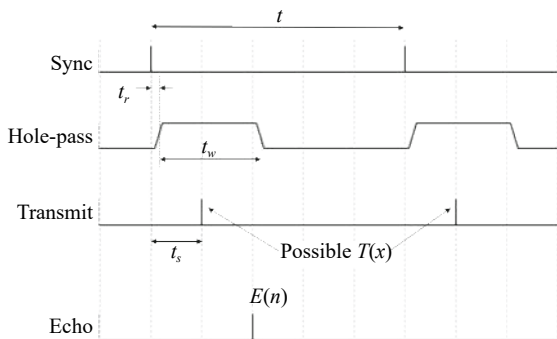


图 5 时序上的  $E(n)$  与  $T(x)$

Fig.5  $E(n)$  and  $T(x)$  in time sequence

通过结果统计, 整合后可以得到所截取时段内主

回波重叠发生率变化曲线, 如图 6 所示。图中在特定时段出现了必定出现主回波重叠的“峰”, 数量为 5, 考虑到分段时舍弃了数组末尾, 出现峰的数量与位置和图 4 中模拟情况相符合。

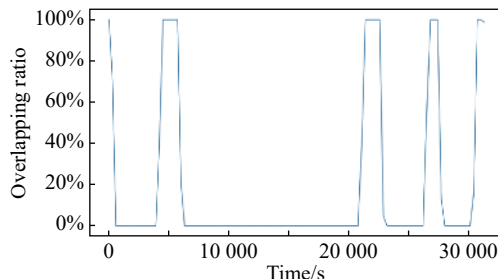


图 6 主回波重叠发生率随时间变化曲线

Fig.6 Curve of transmitting/echo signal overlapping ratio changing with time

### 3 重叠的应对方式研究

根据模拟结果, 在百赫兹的激光测月过程中, 主回波重叠是在特定时段内必定发生的。对公式 (12) 重新进行分析。其中  $TOF(n)$ 、 $m(n)$  都是只与当前时刻关联的数值, 无法改变;  $t_d$  为综合延迟项;  $t_w$  为穿孔时段的持续时间,  $t$  为周期, 二者与转镜转速息息相关。

由此可以得到避开主回波重叠方法的两个调整点: (1) 综合延迟; (2) 转镜转速。二者的效果均为改变了重叠区域上下限  $(m(n) \times t - t_d)$  与  $(t_w - t_d + m(n) \times t)$ , 从而引起重叠位置的偏移, 以此避免特定时段中的重叠现象。

但在实际观测过程中, 仪器增加的延迟难以保证精度, 而延时设备自身的信号抖动也会造成抖动的积累。较为便捷的方式为调节转镜转速。转镜转速的调整量需考虑后续激光器所需触发信号的输入要求, 在一定范围内进行调整。

(1) 转速调整模拟

转速的改变也将引起激光发射周期  $t$  和穿孔时段  $t_w$  的改变。由于转镜上两个开孔占据了孔心所处转动圆周长度中固定的弧长, 故  $t_w$  与  $t$  的比值总是一个固定的值。转速的增加或减小引起了  $t$  与  $t_w$  的减小或增加, 导致了重叠区域  $(m(n) \times t - t_d)$  至  $(t_w - t_d + m(n) \times t)$  在坐标系统中整体向下或向上移动, 使得原本会发生重叠的 TOF 曲线对应位置发生偏移, 从而避开重叠

区域。

仿真改变转镜转速对主回波重叠现象的规避效果,结果如图 7 所示。

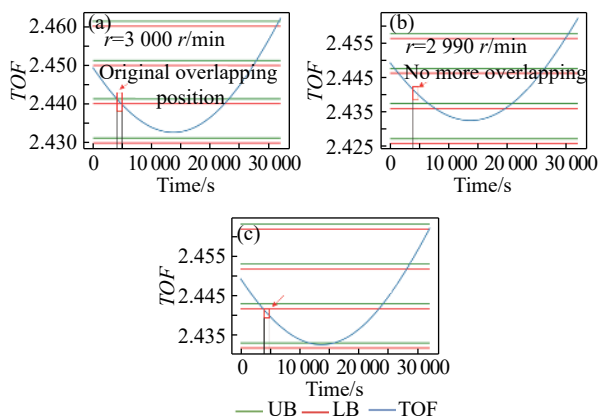


图 7 转速调整造成的重叠上下限移动

Fig.7 Overlapping boundaries shifting due to rotational speed adjustment

由图 7 可以看出,转速的调整引起了重叠区域上下限相较于 TOF 曲线发生偏移,使得原本可能发生主回波重叠的时段改变了发生时刻;其中图 7(a) 为初始情况下(无转速调整)的重叠情况,图 7(b)、7(c) 分别表示了转速变动为-10 与 +10 r/min 情况下重叠区域与 TOF 曲线的相对位置关系,由于转速变动引起了重叠区域偏移,原本发生重叠的位置 ( $n=5\ 000$  附近) 在转速变动后(见图 7(b)、(c)) 已经脱离了重叠区域。

图 8 表示了转速的调整范围与当日预报测距时段内重叠整体发生率的关系。横坐标为转速调整量从-30 r/min 至+30 r/min(主波信号频率偏移-0.6~0.6 Hz),纵轴表示了目标预报内整体的重叠发生率。对重叠的整体规避效果与目标的 TOF 值相关,转速的微调可以避开特定时段内重叠的发生,但对预报时段整体的重叠发生率的影响却较为复杂。以转速调整+10(图 7(c) 情况) 为例,此时虽然避开了  $n=5\ 000$  点附近的重叠现象,但由于 TOF 曲线有更多的部分处在下方的重叠区域,导致了整体的重叠发生率反而增加了(见图 8,由 0 位置的小于 10% 升到了+10 位置的 25%)。而对应地,存在着减小重叠发生率的转速最佳值,但由于其与预报 TOF 曲线的紧密联系,并非一个固定的值。故转速调整最好作为临时的手段,在经过理论重叠的时间点后调整回原状。

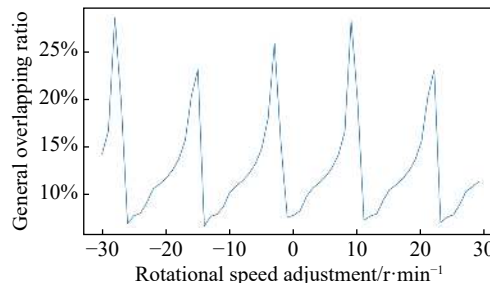


图 8 转速调整量与整体主回波重叠发生率变化关系

Fig.8 Relation between rotating speed adjustment and the transmitting/echo signal overlapping ratio

转镜转速的调整,改变了转镜周期和穿孔时段时长,由此导致了重叠区域上下限的偏移,继而引起了重叠发生时刻的变动,对此加以利用可避免特定时段内重叠的发生。

(2) 转速调整实验

在预报当日的实验进行了调整转镜转速实验,用于观察调整转镜转速对于回波接收的影响,调整过程中观测到了如图 9 所示的情况。

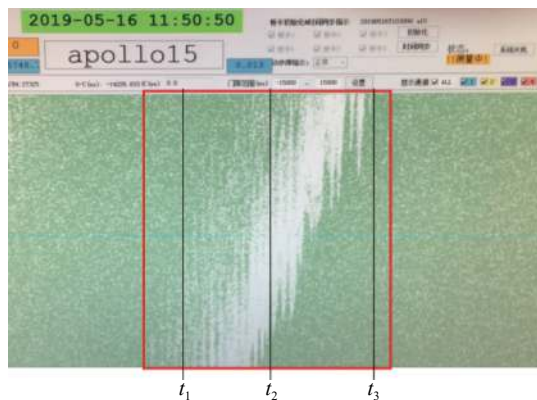


图 9 实验中出现主回波重叠现象

Fig.9 Transmitting/echo signal overlapping during experiment

图示实验时间为 UTC-11: 50,当日预报开始时间为 UTC-10: 30。实验时刻对应到图 4 的模拟曲线上,为横轴坐标  $n=4\ 800$  点附近,大致处于重叠发生的时刻范围。

屏幕主要区域(绿色底板部分)显示的是测距中回波点残差值(纵轴)相对于时间(横轴)的变化,白点表示在与主波进行匹配后的,处在识别信号门限内的回波时刻点。可见图中出现了大块白点区域(图 9 中红框区),表示探测器收到了极强的噪声,噪声随着时间呈现了倾斜向上的趋势。图 10 根据所示三个时

间点进行分析说明。

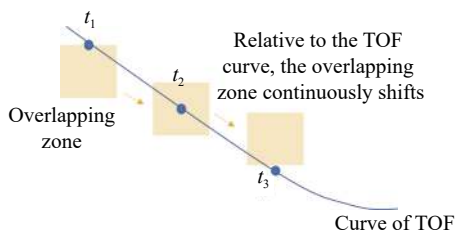


图 10 对主回波重叠现象的分析

Fig.10 Analysis on the transmitting/echo signal overlapping

在数据采集时段内转镜转速一直在调整过程中,通过之前的模拟,转速调整是可视作将重叠区域相对于 TOF 曲线进行移动。在  $t_1$  时刻重叠区域移动到了当前 TOF 点上,发生了重叠现象,探测器接收到主波的强烈杂散光;在  $t_2$  时,由于转速持续在调整,重叠区域保持在移动,与 TOF 的相对位置逐渐变化,在屏幕上造成了噪点随时间缓慢向上的形状,此时 TOF 也一直处在重叠区域内;到了  $t_3$  时刻,TOF 逐渐脱离重叠区域。在红框后方,由于避开了主回波重叠的时段,采集端接收到的噪声水平恢复正常。转速的改变引起了重叠区域上下限的变动,使其在时间轴上产生偏移,于是造成了白点区域缓慢向上移动的情况。

转速的适量调整可避开主回波重叠,从而可以根据预报对重叠进行提前预判,并在适当时刻进行转速的微调,减少重叠对实验的影响。

#### 4 结 论

文中根据采用转镜的共光路百赫兹激光测月中的主回波重叠现象开展了研究,对信号时序进行了理论计算分析,并采用整体模拟与分段模拟两种方法对主回波重叠现象进行了模拟,得出了测距时段内出现主回波重叠的情况。通过对主回波重叠成因进行分析,研究了改变转镜转速对回避主回波重叠的作用,并在实际观测中验证其效果,对于今后激光测月系统

的设计具有许多参考价值。

#### 参考文献:

- [1] James G W, Slava G T, Dale H J, et al. Lunar laser ranging science: Gravitational physics and lunar interior and geodesy [J]. *Advances in Space Research*, 2005, 37(1): 67-71.
- [2] He Yun, Liu Qi, Tian Wei, et al. Study on laser ranging for satellite on the second lagrange point of Earth-Moon system [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, 4(2): 130-137. (in Chinese)
- [3] Men Tao, Shen Zhao, Xu Rong, et al. Development status and tendency of space target laser ranging technique [J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(12): 1451-1457. (in Chinese)
- [4] Li Yuqiang, Fu Honglin, Li Rongwang, et al. Research and experiment of lunar laser ranging in Yunnan Observatories [J]. *Chinese J Lasers*, 2019, 46(1): 188-195. (in Chinese)
- [5] Murphy T W, Adelberger E G, Battat J B R, et al. The apache point observatory Lunar laser ranging operation: instrument description and first detections [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2008, 120(863): 20-37.
- [6] Battat J B R, Murphy T W, Adelberger E G. et al. The apache point observatory lunar laser-ranging operation(APOLLO): Two years of millimeterprecision measurements of the earth-moon range [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2009, 121(875): 29-40.
- [7] Zhang L. Quasi-gated superconducting nanowire single-photon detector [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2017, 27(2): 1-6.
- [8] Zhang Haitao, Li Zhulian. Simulation of overlapping between main wave and echo in common optical-path high repetition rate laser ranging [J]. *Astronomical Research & Technology*, 2013, 10(2): 147-151. (in Chinese)
- [9] Liu Yuan, An Ning, Fang Cunbo, et al. Influence of shape effect of angle reflector on ranging precision of satellite laser ranging system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(11): 65-71. (in Chinese)