



探月三维成像激光雷达设计

黄隆钤

2020 年 11 月

目录

1 总述	1
2 背景：月球相关信息	1
3 星载三维成像探月激光雷达系统设计	2
3.1 设计要求	2
3.2 激光器设计	2
3.2.1 激光谐振腔设计	2
3.2.2 月面扫描	4
3.3 探测系统设计	5
3.3.1 接收光学天线	5
3.3.2 光电探测器	5
3.3.3 信号处理模块	6
3.3.4 数据处理系统	6
3.4 系统总体设计	7
4 地基三维成像探月激光雷达系统设计	7
4.1 设计要求	7
4.2 激光器设计	7
4.2.1 激光谐振腔设计	7
4.2.2 发射光学系统	8
4.2.3 月面扫描	8
4.3 探测系统设计	10
4.3.1 接收光学天线	10
4.3.2 光电探测器	11
4.4 系统总体设计	11
5 设计过程中的一些困惑	11

1 总述

本文为光电子学的大作业二，设计星载三维成像激光雷达系统和地基三维成像激光雷达系统。

激光雷达是一种可以精确、快速获取目标三维空间信息的主动探测技术，具有测量精度高、抗干扰能力强以及系统易小型化等优点。[1]

激光雷达探月系统应包括激光发射系统和回波探测系统，其中激光发射系统包括激光器和激光扫描装置。回波探测系统包括接收光学天线、光子探测装置和数据处理系统。接收光学天线和光子探测装置用来探测激光发射后的反射回波。数据处理系统用来对激光探测数据进行处理和三维重建，从而构建完整的月球表面容貌。

考虑到激光雷达系统设计的复杂性以及雷达技术的成熟程度，本文偏向根据分辨率的要求确定激光雷达的几个重要参数，关于数据处理、三维成像等技术细节可参照雷达现有的成熟技术。

2 背景：月球相关信息

- 月球直径 $D_{\text{月}} = 3474.8\text{km}$
- 月球质量 $M_{\text{月}} = 7.349 \times 10^{22} \text{ kg}$
- 月球永远都是一面朝向我们，这一面习惯上称为正面（潮汐锁定）。因此月球的自转周期与月球绕地球公转的周期相同，有 $T = 27.32\text{天}$
- 地球与月球的平均距离是 384403.9 千米；月球与地球近地点的距离是 36.3 万千米；与地球远地点的距离是 40.6 万千米。
- 月球赤道的自转速度为 $v_{\text{自}} = 4.627\text{m/s}$
- 地球与月球围绕共同质心运转，共同质心距地心 4700 千米，为地球半径的 3/4 处
- 月球本身不发光，只反射太阳光。月球亮度随日、月间角距离和地、月间距离的改变而变化。平均亮度为太阳亮度的 1/465000，亮度变化幅度从 1/630000 至 1/375000。满月时亮度平均为 -12.7 等。它给大地的照度平均为 0.22 勒克斯，相当于 100 瓦电灯在距离 21 米处的照度。

- 月面不是一个良好的反光体，它的平均反照率只有 7%，其余 93% 均被月球吸收。月海的反照率低，约为 9%。月面高地和环形山的反照率为 17%，看上去山地比月海明亮。

3 星载三维成像探月激光雷达系统设计

3.1 设计要求

- 横向分辨率 0.1km，纵向分辨率 1m
- 绕月卫星的高度为 300km，考虑绕月速度

3.2 激光器设计

选用调 Q 式 $\text{Nd}^+:\text{YAG}$ 固体脉冲激光器，工作波长为 1064nm。

3.2.1 激光谐振腔设计

频率带宽 考虑到纵向分辨率的要求，对激光的发射频率宽度，需有

$$\Delta R_{\text{纵}} = c \frac{\Delta t}{2} < 0.1\text{km} \implies \Delta t < 0.667\mu\text{s} \implies \delta\nu > \frac{1}{\Delta t} = 1.5\text{MHz}$$

脉冲间隔 须保证足够短的脉冲间隔以避免回波的丢失：

$$1/\nu_F < c/2h \implies \nu_F > 2h/c = 500 \text{ Hz.}$$

为保证纵向分辨率，还需要：

$$v_{\text{自}} \cdot 1/\nu_F < \Delta R_{\text{纵}} \implies \nu_F > 4.65 \text{ Hz.}$$

细度 取谐振腔细度 $\mathcal{F} = 150$ ，则有：

$$\mathcal{F} \approx \frac{\pi}{\alpha_r d} \implies \alpha = 0.26\text{m}^{-1}$$

以及频率间隔

$$\delta\nu = \frac{\nu_F}{\mathcal{F}} \implies \nu_F > 0.225 \text{ GHz}$$

由 $\nu_F = c/2d$ 可估计谐振腔长度

$$d = \frac{c}{2\nu_F} < 0.667 \text{ m.}$$

体积 可选取激光谐振腔体积为 $V = 80\text{mm} \times 7\text{mm} \times 5\text{mm}$ 。

腔镜 令一个腔镜反射率为 1, 另一个腔镜反射率为 R , 设不考虑分布损耗系数 α_s 时, 系统损耗系数

$$\alpha_r = \frac{1}{2d} \ln \frac{1}{R} = \frac{1}{2d} \ln \frac{1}{1-T} \implies T = 1 - e^{-2d\alpha_r} \approx 4.1\%,$$

即另一腔镜的反射率为 95.9%。控制高斯光束束腰半径 $W_0 = 4 \text{ mm}$, 因此腔镜直径约 10mm。

出射光束设计 假设出射光束为高斯光束, 其束腰半径为 $W_0\text{mm}$, 可用孔径光阑进行限制。为了减小到达月球的光斑大小 $R_{\text{斑}}$, 在激光器后增加发射望远镜扩束系统, 假设扩束系统的放大率为 M , 则 $\theta' = \theta/M, W'_0 = MW_0$, 则

$$R_{\text{斑}} = W'_0 + h \cdot \theta' = MW_0 + \frac{\lambda}{\pi MW_0} \cdot h \geq 2\sqrt{\frac{\lambda h}{\pi}}.$$

理论上到达月球光斑的直径最小为 $2 \cdot R_{\text{斑}} = 1275.02 \text{ mm}$, 设出射光束束腰半径 $W_0 = 5 \text{ mm}$, 这时扩束系统最佳放大率

$$M_{\text{best}} = \sqrt{\frac{\lambda h}{\pi W_0^2}} = 63.751.$$

因此近似取扩束系统放大率 $M = \frac{f_1}{f_2} = 64$ 。

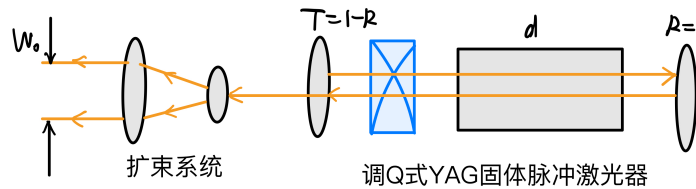


图 1: 发射光学系统

3.2.2 月面扫描

为了获取完整的月球表面数据，需要进行月面扫描，考虑月球的自转以及携带激光雷达的卫星绕月速度。

绕月速度与绕月周期

$$\begin{aligned}\frac{GM_{\text{月}}m}{(R_{\text{月}}+h)^2} &= m \frac{v^2}{R_{\text{月}}+h} \\ \implies v &= 1551.1 \text{ m/s} \approx 1.55 \text{ km/s} \\ T &= \frac{\pi D_{\text{月}}}{v_{\text{月}}} = 7042.843 \text{ s}\end{aligned}$$

绕月圈数 考虑到月球的自转周期 $T_{\text{自}} = 27.32$ 天/圈，一个周期内携带激光雷达的卫星的绕月圈数为

$$N \approx 27.32 \cdot 1.55 \cdot 10^3 \cdot 3600 \cdot 24 / (\pi \cdot 3474.8 \cdot 10^3) = 335.15 \text{ 圈}$$

位移速度 卫星绕月每圈的扫描长度需要达到大约

$$\Delta l = R_{\text{月}} \Delta \theta = R_{\text{月}} \cdot 2\pi / 335.15 = 32571.7 \text{ m},$$

因而为了获取完整的月面数据，每秒的扫描长度需达到

$$\delta l = \Delta l / T = 4.625 \text{ m}.$$

如果不考虑月球自转速度，扫描分辨率与扫描完整性之间存在矛盾：为了完成月面扫描，需要控制激光的扫描速度：激光器每秒的扫描角度 $\Delta \theta$ 应大于等于

$$\delta l / h = 1.5416 \cdot 10^{-5} \text{ rad},$$

即扫描角速度 $\omega \geq 1.5416 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$ 。

考虑到纵向分辨率的要求，还需要对扫描速度进行进一步的控制：每秒的位移长度不应超过纵向分辨率。因此扫描角速度

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = \frac{\delta R_{\text{纵}}}{h} \leq R \implies \omega \leq 3.33 \times 10^{-6} \text{ rad},$$

这就出现了矛盾。

事实上，考虑到照射到月面上的光斑直径大于 0.025 m 以及月球的自转速度 4.6 m/s ，恰好可以利用月球的自转实现自动扫描，从而省去繁杂的激光扫描装置。

3.3 探测系统设计

3.3.1 接收光学天线

接受光学天线需要尽可能多地收集从目标返回地激光能量，并送入后面的光电探测器。因而将接收光学天线设计为望远镜结构。信号光经过月面的反射，到达天线时产生的回波光斑最小半径约为

$$R_{\text{回}} = W'_0 + 2h \cdot \theta' = MW_0 + \frac{2h\lambda}{\pi MW_0} \geq 2\sqrt{\frac{2\lambda h}{\pi}} = 901.574\text{ mm}$$

由于光斑较大，其波前可近似为平面波。

为了尽可能多地收集回波激光能量，取接收望远镜的直径 $D_{\text{收}} = 1804\text{ mm}$ 。考虑到光子运动时间 $\Delta t = 2h/c = 2\text{ ms}$ 以及这段时间的卫星位移 $\Delta l = v \cdot \Delta t \approx 3.1\text{ m}$ ，将接收光学天线中心放置于激光发射系统之前 3.1 m 处。

另外，可在接收光学天线中加入 1064 nm 窄带滤光片，以滤除与回波方波长不同的噪声光子的效果；

3.3.2 光电探测器

利用内光电效应中的雪崩效应，选取雪崩光电二极管（APD）作为光电探测器。对 APD 进行列阵以增大光电探测器对探测（感光）面积。列阵间距和总长可根据实际成本和空间大小进行取值。

由于月面反射率较低（平均反射率 %7），需要进行微弱光信号的探测。采取**外差检测**（相干检测）[2] 方法，引入本振光，利用本振光和信号光的干涉记录信号光的信息。对于外差检测，光探测器输出的中频功率正比于信号光和本振光平均功率的乘积，因而只要本振光功率足够大，对极微弱光信号仍能得到可观的中频输出。

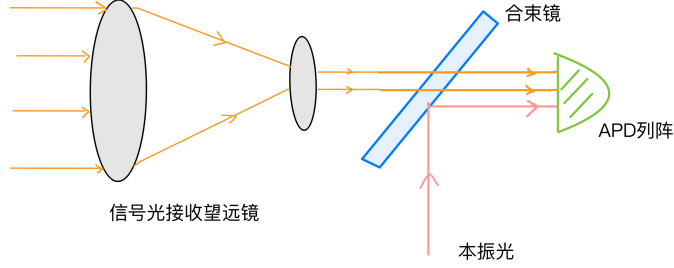


图 2: 接收光学系统

由于输出本振光为高斯光束，利用高斯光束艾里斑相干激光雷达光学天线与探测器最佳匹配关系 (考虑空间失配角情况下使系统外差效率 η_H 最大的高斯光束模场半径最佳值)[2]

$$W \approx 0.77 \frac{\lambda f}{d},$$

设望远镜系统的前镜直径为 D_1 , 后镜直径为 D_2 , 两镜焦距分别为 f_1, f_2 , 则有 $D_1 = D_{\text{收}} = 835 \text{ mm}$, $D_2 = W = 0.77\lambda f_1/D_1$, 且 $D_2/D_1 = f_2/(f_1 - f_2)$, 由此得到两透镜的尺寸参数。可根据空间大小对前透镜焦距 f_1 进行取值, f_1 一旦确定, f_2 和 D_2 均可确定。

3.3.3 信号处理模块

对光电探测器所得到的光电流进行匹配滤波、放大和 AD 转换处理, 然后送入数据处理系统进行分析。此部分不作详细分析和设计, 可参考成熟的雷达系统中的信号处理模块。

3.3.4 数据处理系统

对探测到的数据进行处理, 以进行月球表面的三维高精度重建。对光电流的分析可根据相干激光雷达方程, 此部分不作详细分析与设计。需要指出的一点是, 处理后可以得到一定分辨率的三维重建地图, 接下来可参考 [3] 在数据处理系统中部署深度学习模块以进行三维重建地图的快速增强, 由于是行星探测, 可结合 NASA 的相关数据集进行模型的迁移训练。

3.4 系统总体设计

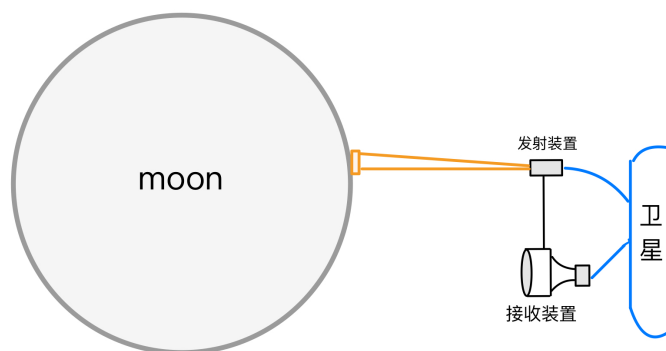


图 3: 星载探月激光雷达总体设计

4 地基三维成像探月激光雷达系统设计

4.1 设计要求

- 分辨率: 横向分辨率 1km, 纵向分辨率 10m
- 考虑地月相对速度

4.2 激光器设计

对于地基探月激光雷达, 需要考虑大气窗口。由于 1064nm 波段的大气吸收率较低, 因而同样可以选取调 Q 式 $\text{Nd}^{+}:\text{YAG}$ 固体脉冲激光器。

4.2.1 激光谐振腔设计

由于地月距离非常大, 平均约 384403.9km, 光来回所用时间约为 $t = 2h/c = 2.563\text{ s}$, 系统对激光脉冲频率的要求较低。可以采取和星载激光雷达激光器相同参数的激光谐振腔:

- $V=80\text{mm}\times 7\text{mm}\times 5\text{mm}$

- $\mathcal{F} = 150$
- 腔镜反射率 $R_1 = 1, R_2 = 95.9\%$
- 腔镜直径 10mm

另外，为了减少能量的浪费，可以适当降低脉冲频率。如控制频率在 $f_0 = 1/t = 3.9 \text{ Hz}$ 的数倍左右。

4.2.2 发射光学系统

对月地最远距离 $h_m = 40.6 \times 10^{10} \text{ mm}$ 进行计算，理论上到达月球光斑的直径最小为 $2R_{\text{斑}} = 4\sqrt{\frac{\lambda h_m}{\pi}} = 46904.97 \text{ mm}$ ，设初始束束腰半径 $W_0 = 5 \text{ mm}$ ，扩束系统最佳放大率

$$M_{\text{best}} = \sqrt{\frac{\lambda h_m}{\pi W_0^2}} = 2345.25,$$

近似取扩束系统放大率 $M = M_1 M_2 = 35 \times 67 = 2345$ 。即扩束系统由两个望远镜实现，放大倍率依次为 35 和 67。

4.2.3 月面扫描

由于月球的潮汐锁定，无法对月球背面进行探测。考虑到月球自公转速度约 1.02 km/s 以及地球自转速度 466 m/s ，在地球参考系下，可以看作月球以 $v = 554 \text{ m/s}$ 的速度进行绕地旋转。

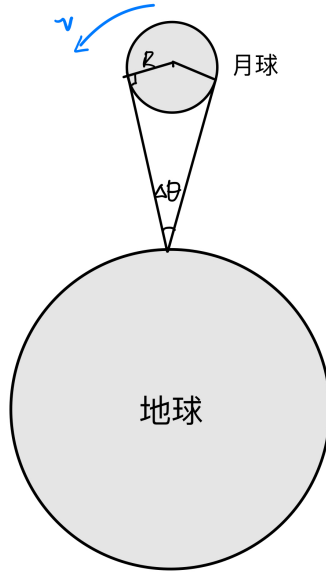


图 4: 地月关系示意图

为实现月面扫描，需控制激光进行快速扫描。总扫描角度

$$\Delta\theta = 2 \arcsin \frac{R}{R+h} = 9.039 \times 10^{-6} \text{ rad}.$$

首先需要使雷达装置与月球在一定时间内同步旋转，即有旋转角速度

$$\omega_{\text{ladar}} = v/(R+\bar{h}) = 1.2068 \times 10^{-6} \text{ rad/s}$$

,

为了达到纵向分辨率的要求，需要激光扫描速度

$$\omega_{\text{laser}} \cdot \bar{h} < \Delta R_{\text{纵}} \implies \omega_{\text{laser}} < 2.6014 \times 10^{-5} \text{ rad/s}.$$

假设同步旋转的时间为 T , 设 $T = 3s$, 然后使用以摆镜扫描等光机扫描装置控制即光进行扫描, 扫描角速度

$$\omega_{\text{laser}} = \Delta\theta/T = 3.013 \times 10^{-6} \text{ rad/s}.$$

因此，可取激光扫描角速度 $\omega_{laser} = 3.013 \times 10^{-6} \text{ rad/s}$ 。

可以看到，由于月地距离非常远，需要超高精度的旋转装置以控制扫描。可能需要开发以 MEMS 微机电系统或者 NEMS 纳机电系统为核心的高精度位移控制。

4.3 探测系统设计

探测系统中的信号处理和三维重建模块不进行详细设计，可参考雷达系统成熟的技术。接下来主要对接收光学系统和光电探测器进行设计和选型。

4.3.1 接收光学天线

接收光学天线用来将回波光束变换为适合探测器要求的光束，并尽可能地消除噪声光子。到达天线时的回波光斑最小半径约为

$$R_{\text{回}} = W'_0 + 2h \cdot \theta' = MW_0 + \frac{2h\lambda}{\pi MW_0} \geq 2\sqrt{\frac{2\lambda h}{\pi}} = 33166.82 \text{ mm} \approx 33.2 \text{ m}$$

显然是无法将回波波面完全接收的。根据实际情况，可取接收望远镜前镜直径 1.2 m ，配以聚焦和准直透镜以使回波光束与光电探测器口径匹配。

参考云南天文台激光测距雷达的设计 [4]，在接收光学系统中小孔光阑和 1064nm 窄带滤光片。小孔光阑用于减小接收视场，滤除与回波方向不同的噪声光子；窄带滤光片可滤除与回波光波长不同的噪声光子。

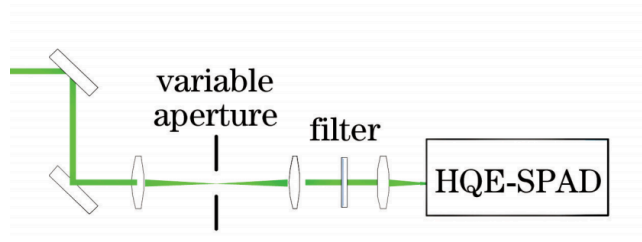


图 5: 探测系统示意图

4.3.2 光电探测器

由于月地距离极大，而回波光光子数与距离的四次方成正比 [4]，因而减小很多。光电探测器需选用高量子效率单光子雪崩探测器 (HQE-SPAD)，以探测从月面返回的亚单光子信号。

4.4 系统总体设计

考虑到地球自转速度约 $v = 466 \text{ m/s}$ ，地基探月的激光发射器应与回波探测系统相隔 $x = v\Delta t = 1184.358 \text{ m}$ 。

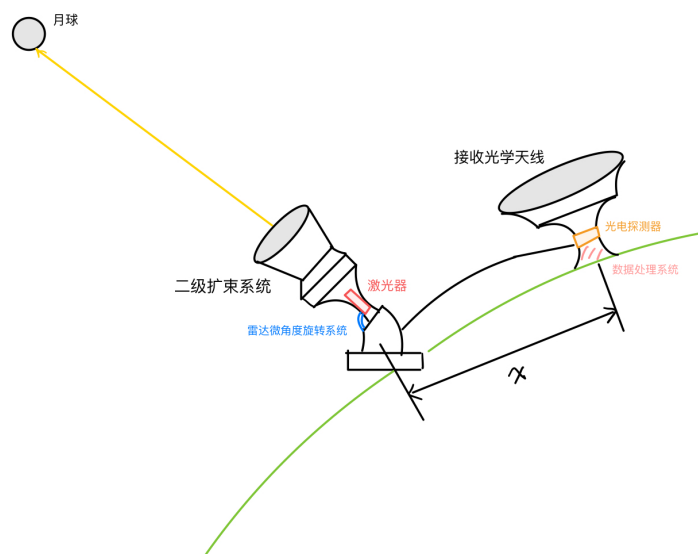


图 6: 地载探月激光雷达总体设计

5 设计过程中的一些困惑

- 激光谐振腔的泵浦选型或制造需要确定哪些参数
- 考虑到地球自转速度约 $v = 466 \text{ m/s}$ ，地基探月的激光发射器应与回波探测系统相隔 $x = v\Delta t = 1184.358 \text{ m}$ ，而云南天文台的激光测距系统中激光器和探测器是共轴的。[4]
- 关于激光雷达的扫描、扫描装置还有一些疑惑

- 关于激光雷达的数据处理有所疑问

参考文献

- [1] 刘博, 于洋, 姜朔. 激光雷达探测及三维成像研究进展 [J]. 光电工程, 2019, 46(7), 190167
- [2] 王春晖, 陈德应. 激光雷达系统设计 [J].
- [3] Shan T, Wang J, Chen F, et al. Simulation-based Lidar Super-resolution for Ground Vehicles[J]. arXiv preprint arXiv:2004.05242, 2020.
- [4] 张海涛, 皮晓宇, 叶贤基, 等. 云南天文台月球激光测距研究与实验 [J]. 中国激光, 2019, 46(1).
- [5] Baltsavias E P. Airborne laser scanning: basic relations and formulas[J]. ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing, 1999, 54(2-3): 199-214.
- [6] Wehr A, Lohr U. Airborne laser scanning—an introduction and overview[J]. ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing, 1999, 54(2-3): 68-82.
- [7] <https://svs.gsfc.nasa.gov/11271>
- [8] <https://www.rp-photonics.com/lidar.html>