

# 激光雷达在空间交会对接中的应用\*

杨春平\*\* 吴健 何毅

(电子科技大学应用物理所 成都 610054)

**【摘要】** 介绍了激光雷达在空间交会对接中的应用,讨论了激光雷达作为一种交会敏感器的基本原理及其被用于测距、测速、测角和姿态测量的具体实现方案。

**关键词** 空间交会对接; 激光雷达; 激光应用; 激光测量

中图分类号 O434.14

在航天器与空间站的交会和对接过程中,一般将空间站称为“目标飞行器”,是被动的;将航天器称为“追踪飞行器”,是主动的。交会对接过程分为如图1所示的三个阶段<sup>1]</sup>。

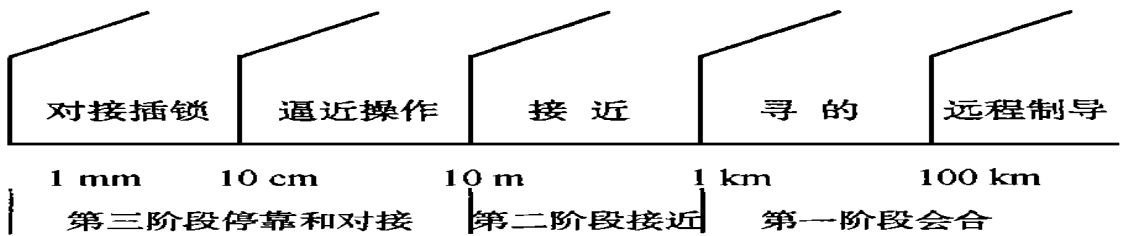


图1 交会对接飞行阶段的划分

追踪飞行器进入轨道后,在GPS导引和地面的遥控下,在距离目标飞行器约100 km处捕获到目标飞行器,并开始确定测量信息和与目标飞行器建立通信联系,转入自动寻的阶段。可见,飞行器要进行空间对接必须先进行交会(100 km~10 m),然后进行对接(10~0 m)。空间交会对接不仅在理论上,而且在技术上都是相当复杂的。特别是交会对接测量系统和传感器的研究在当前和今后一段时间都是一个关键研究课题。

自主交会对接范围为100 km~0 m,国外通常的做法是采用微波雷达(100 km~200 m)、激光雷达(20 km~10 m)、光学成像传感器(200~3 m)和对接敏感器(10~0 m)四种不同敏感器完成全过程交会对接测量任务。虽然这些敏感器在一定程度上互为备份,提高了测量系统的可靠性。但是这种测量系统结构复杂,在目标飞行器还必须装有应答机。为了捕获目标飞行器和测量相对姿态,一般还装有多部天线,整个测量系统敏感器种类多,投资大,设备比较复杂,重量和体积较大,功耗较高。所以美国、俄罗斯、欧洲空间局及日本等都在发展激光交会雷达,其中特别发展用于几十 km 至 0 m 的复合式激光雷达。这种交会雷达测量精度高、功耗小,体积也较小。

本文从理论和实验两方面入手,研究空间交会对接中的激光交会雷达系统,揭示应用于此领域的微波和激光交会雷达的优缺点和差异,有助于系统的研制和提高交会对接的可靠性。

## 1 国外研究概况、水平和发展趋势

美国在60年代初期首次为“双子座计划”研制微波交会雷达,作用范围为450 km~150 m,可以测出目标航天器的方位角、仰角和距离与速率,并可以数字形式送入导航计算机。在阿波罗飞船进行登月舱和指令服务舱交会对接时,采用X波段单脉冲比幅连续波雷达。美国航天飞机的交会雷达是Ku波段脉冲多普勒雷达,并且具有通信收发功能,以时分方式工作。70年代美国成功研前已

1999年5月14日收稿

\*国家863高科技项目,项目号:863-2-2-4-7

\*\*男 33岁 硕士 讲师

经在进行激光交会雷达和光学敏感器等自主交会对接测量设备的研制。前苏联交会对接测量系统基本上采用无线电测量设备——微波雷达,有时也采用闭路电视系统,能在屏幕上给出前方飞行器沿滚动轴的方向图像。为使对接系统更加完善,并且具有更高技术性能,前苏联也将激光技术用于空间交会对接,重点发展激光交会雷达。欧洲空间局虽至今尚未实现在轨交会对接,但从 80 年代初就开始研究自主交会对接测量技术和传感器,其中中短程采用激光雷达,目前正在研制激光交会雷达。80 年代后期日本也开始研制交会对接测量系统和传感器,主要是扫描式激光雷达。可见,微波雷达作为远距离交会测量手段比较适合,而在中近距离上采用激光交会雷达则优于微波雷达。

由于近期激光技术的继续发展,采用大功率半导体激光器和改进扫描机构性能,提高跟踪精度以及在目标飞行器上设置协作目标,从而使复合式激光雷达作为交会对接全过程的测量传感器成为了可能。目前这些传感器大部分还在试验和研制阶段。

表 1 给出了 80 年代以来交会对接激光雷达传感器一览表。

表 1 激光雷达在空间交会对接中的应用一览表

系统名称	报道时间	作用距离	工作方式
激光对接系统	美国约翰逊空间中心 1986 年报道	远距离 22 km ~ 110 m 近距离 100 ~ 0 m	CW 半导体激光器作为光源,光电二极管作为接收器件,检流计式扫描装置,姿态测量由 PSD 和 Wallstion 棱镜来完成
多目标和单目标定向传感器	NASA 1986 年报道	多目标 100 ~ 6 m 单目标测量 6 ~ 0 m	析象管为接收器件,相位式测距,远距离用析象管测角
用于空间交会对接的扫描激光雷达	日本东京宇航研究所 1987 年报道	远距离 20 km ~ 200 m 近距离 200 ~ 0 m	CW—GaAlAs 激光二极管作光源,硅 APD 构成四象限检测器用作接收器件,利用相位法测距,用检流计扫描装置
用于自主交会对接的光电传感器	德 MBB 公司 1983 年报道	20 km 接近	CW—GaAlAs 半导体激光器作为光源,硅 APD 作接收器件,检流计扫描装置,姿态测量由 CCD 完成。
用于交会对接跟踪激光雷达	日本电气、三菱电机公司 1989 年报道	30 km ~ 0.2 m 近距离 CCD 成象	GaAs 激光二极管,四象限检测器和 CCD 成象,音频测距。
交会对接光学敏感器系统	日本 NASDA 公司 1995 年报道	600 ~ 0.3 m	半导体激光连续测距 CCD 成象
有源传感器用于空间交会对接 <sup>[2]</sup>	美国 NASA 1997 年报道	110 ~ 0 m 仰角 $\pm 8^\circ$ 方位角 $\pm 10.5^\circ$	850nm 半导体激光器脉冲照射,目标安装角反射器,CCD 成象检测。

目前美、俄所实现的空间交会对接都需要宇航员的手动介入,而在未来的许多太空任务如卫星服务计划、空间站自动补给、深空探索、无人飞船等,则需要无人式的自主交会对接<sup>[3]</sup>。因此美、俄、日及欧洲空间局都在发展自主自动交会对接测量系统,特别是复合式激光雷达测量系统。

80 年代以来,我国激光雷达技术获得了显著的发展,取得了许多科研成果,基本建立了激光测距、测速、定位和成像等理论模型和实验系统,完全可以将激光技术应用于我国不久将进行的无人自主空间交会对接。

## 2 激光雷达在空间交会对接中的应用

在实际的空间交会对接中,当相对距离大于 100 m 时,航天员可通过机载微波交会雷达和潜望镜来获得两航天器之间的相对位置。随着两航天器的逼近,当相对距离小于 100 m 时,由于硬件的限制,微波雷达不能为最后逼近提供足够精度的测量信息。由于激光本身的波束窄、相干性好、工作频率高等优点,激光雷达能在交会阶段直到对接的整个过程(20 km ~ 0 m)中提供高精度的相对距离、速度、角度和角速度的精确测量,因此它既能用于目前的自动寻的、接近和最后的手动逼近操作过程,又能为未来无人交会对接任务提供自主导航的扩展功能。

### 2.1 激光雷达系统的组成

激光雷达一般由下列部分组成:激光源、发射与接收光路、信号处理、扫描跟踪机构、目标反射器和检测器等<sup>4,9</sup>。激光雷达系统的组成如图 2 所示。

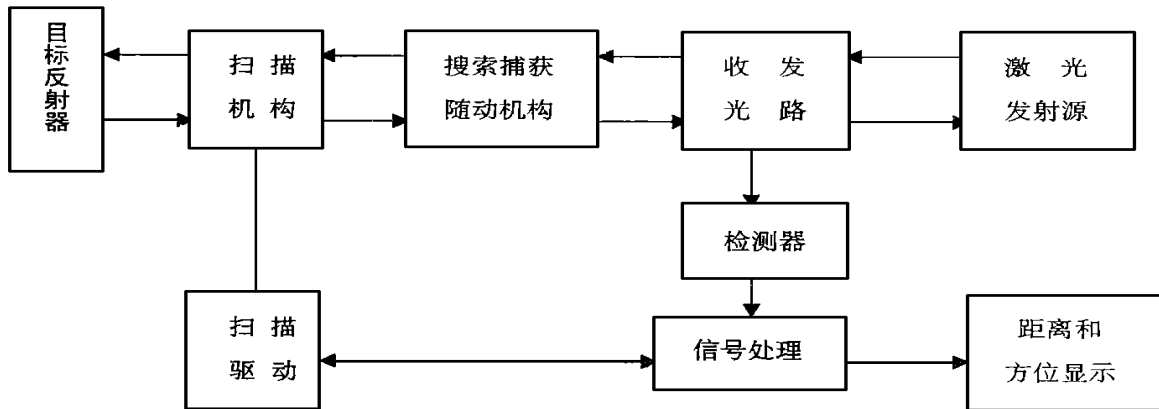


图 2 激光雷达系统

扫描跟踪机构可完成大角度的光束偏转,从而使雷达能在较大范围内扫描、捕获、最后跟踪目标飞行器。这种机构大都由两自由度框架组成,框架上固定了反射镜,使光束偏转。由于偏转对象是光束,所以机构可作得十分精巧、细致,不象微波雷达随动跟踪天线那样笨重复杂。

目标反射器安装在目标飞行器上,一般用角反射器三个相互垂直的反射镜组成),从而使目标反射器将雷达天线射出的光束按原方向反射回去。此时目标的位置和姿态信息由激光雷达光学接收天线接收,然后进行检测和数据处理。

### 2.2 在空间交会对接中的激光雷达工作原理

激光雷达的测距、测速和测角原理与微波雷达基本相同<sup>6</sup>。因此用于空间交会对接的激光雷达包含连续波测距器和位置敏感器两个部分<sup>4,7</sup>。这两部分通过共用光学装置混合起来,其光学系统工作原理和传输波形如图 3 所示。

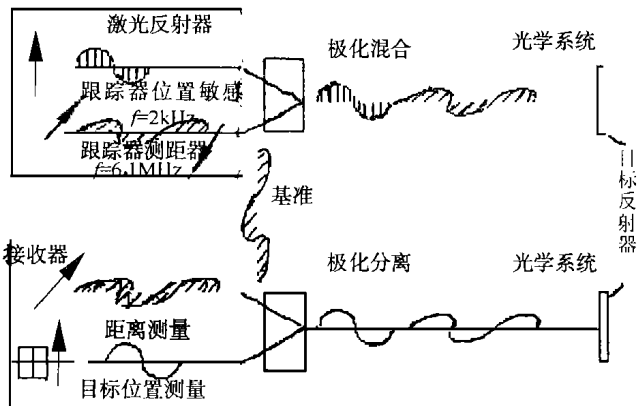


图 3 距离敏感器的工作原理

用激光二极管分别发射测量距离和位置的激光光束,经极化混合光学系统,进入目标反射器,然后光束再反射出来,经分光到距离和位置接收器。为了区别测距和测位置信息,分别把光信号调制在  $f_1$  和  $f_2$ , 其中测距工作频率  $f_1$  为几 MHz 到几百 MHz,可以利用边带频率的相位延迟之差测距。图 4 为其实现结构图。

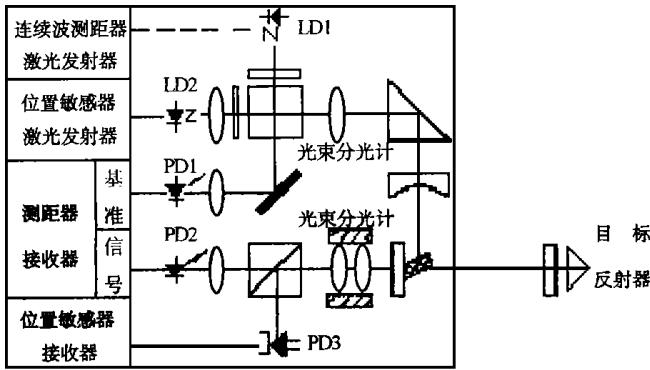


图 4 距离敏感器技术实现结构

图中 PD1、PD2 和 PD3 为光电二极管，它们把光信号转变为电信号。PD1 检测连续波测距基准信号，PD2 检测目标反射器反射回来的信号，两个信号相比可得出相位差。

激光雷达比较可靠和精确的测速方法是测量回波信号的多普勒频移。该方法有两种，第一种要求发射的激光束用几 kHz~1 GHz 的频率  $f_0$  去调制，回波信号的多普勒频率  $f_d$  由下式表示

$$f_d = \frac{2v}{c} f_0$$

式中  $c$  为光速； $v$  为距离变化率； $f_0$  为调制频率。只要测出  $f_d$ ，利用公式  $v = f_d c / (2f_0)$  即可测量目标飞行器的相对速度，由于调制技术限制，此方法测量灵敏度不高。第二种方法采用激光光频的多普勒频率，即上式  $f_0$  用激光频率来代替，则可以进一步提高灵敏度和测速精度（优于 1 mm/s）。

激光雷达对目标的角跟踪可采用圆锥扫描法和单脉冲法。激光雷达向目标飞行器发射激光信号，经目标反射回来，通过光学系统投射到四象限光电探测器上。如果目标反射回来的光信号与测量光轴有一角偏差，则投射在光电探测器上的光斑在四个象限上的面积不同，经处理后得到相应角误差信号，从而得到两个飞行器的相对方位角和仰角。

现在，激光雷达也能用于最后的手动逼近和对接阶段，此时主要用来测量相对姿态。激光测距技术比较成熟，但是激光测量姿态角是一项技术难点。在近距离（约 100 m）一般采用光学成像敏感器实现。

光学成像敏感器由安装在追踪飞行器上的成像装置（如 CCD 摄像机、红外摄像机）和安装在目标器上的特征光点（如激光二极管或无源光点角反射器）两部分组成。根据安装在目标飞行器上特征光点的数目和位置，有以下方法：1）三个特征光点在目标飞行器对接平面内成等腰直角三角形排列；2）三个特征光点在目标飞行器对接平面内成等边三角形排列；3）三个特征光点在与目标飞行器对接垂直的平面内成等边三角形排列，其中一个安装在对接轴上；4）四个特征光点在目标飞行器对接平面内成正方形排列；5）四个特征光点，其中三个特征光点在目标飞行器对接平面内成等腰三角形排列，另一个安装在对接轴上<sup>[5]</sup>；6）五个特征光点，其中四个特征光点在目标飞行器对接平面内成正方形排列，另一个安装在对接轴上；7）三个不在一条直线上的特征光点在目标飞行器对接处根据需要任意布局。

根据 1997 年 NASA 报道<sup>[5]</sup>，美国马歇尔太空飞行中心用于近距离的自主交会对接系统的激光雷达测量相对姿态的主要方法是直接照射法：在激光雷达上安装 CCD 照相机（响应波长为 800 nm 和 850 nm），采用宽发散角（29°）的 800 nm 和 850 nm 脉冲激光光束直接照射按照 5）方式排列在目标飞行器上的边角反射器阵列（吸收 800 nm，反射 850 nm），然后根据 CCD 相机上成像的光点或图像，经数据处理成为相对距离和姿态<sup>[2]</sup>。随着 CCD 面阵的像素增多，数据处理和软件的改善，这种方法可以获得较高精度。

影响光学成像敏感器姿态测量精度的主要因素有：1）特征光点数目和布局：原则上光点数目越多和光点与摄像机构成的体积越大，测量精度越高；2）摄像机数目和安装位置：从原理上说摄像机数目越多，测量精度越高。但通常采用双摄像机已足够，此时可以克服光点本身位置安装带来的误差和避免算法多解。另外，从空间设备量来说，减少设备总会受到总体设计师的欢迎；3）镜头焦距与几何失真、图像采集 A/D 误差与靶面分辨率和成像中心定位误差；4）不同算法与算法数值误差也是影响测量结果的一个重要因素。

国外大量实验表明: 相对距离越长, 姿态测量误差越大; 在长距离( $> 10\text{ m}$ ), 测量姿态精度比测量距离精度高; 在短距离( $< 10\text{ m}$ ), 测量距离精度比测量姿态精度高。

### 3 结束语

激光雷达在空间交会对接应用方面, 不仅可以作为远距离交会测量手段, 也可以作为近距离交会对接敏感器。与微波雷达相比, 它具有以下特点: 1) 窄波束: 用实际可实现的天线孔径, 可得到极窄的激光波束, 从而提高测角分辨率; 2) 大宽带: 高的工作频率使激光雷达能获得大信号带宽, 从而提高测距的精度和测角分辨率。3) 测速灵敏度高: 因激光雷达工作频率高, 从而提高了多普勒测量的灵敏度; 4) 固态化: 采用固体激光器可获得高可靠性, 可使体积小、重量轻和功耗低; 5) 可以比较方便地测量飞行器的相对姿态角。

另外, 激光雷达还可以做到无机械运动机构, 同时在空间基本上没有无线电传输损耗和衰减等。因此激光雷达比较适用作为空间交会对接敏感器, 特别在中、近距离更为突出。

### 参 考 文 献

- 1 林来兴. 空间交会对接. 北京: 国防工业出版社, 1995
- 2 Howard Richard T., Cole Helen J. Automatic rendezvous and docking system test and evaluation. SPIE, 1997, 3065: 9~131
- 3 林来兴. 一种用于交会对接全过程的测量敏感器——复合式激光雷达. 航天控制, 1992, 4: 41~47
- 4 Kachmar P M, Chu W, Poluchko R J. 激光导航敏感器在自动交会中的应用. 控制工程, 1996, 4: 26~29
- 5 Philip Calhoun. A solution to the problem of determining the relative 6 DOF state for spacecraft automated rendezvous and docking. SPIE, 1995, 2 466: 175~184
- 6 吴 健. 激光雷达—机遇与挑战. 电子科技大学学报, 1994, 23(增): 1~7
- 7 林来兴. 自主交会对接测量系统和对接敏感器. 航天控制, 1991, 4: 40~45

## Application of Laser Ladar in Space Rendezvous and Docking

Yang ChunPing    Wu Jian    He Yi

(Inst. of Applied Physics UEST of China Chengdu 610054)

Zhang Wei

**Abstract** In this paper, the application of laser radar in space rendezvous and docking is introduced. The principle of how a laser radar works as a rendezvous detector, and the way it is implemented in detecting range, speed and angle are discussed.

**Key word** space rendezvous and docking; laser radar; laser application; laser measure