

激光雷达扫描方式

袁光福^{1,2}, 马晓燮², 刘爽¹, 杨奇龙²

(1. 电子科技大学 光电科学与工程学院, 成都 611731; 2. 中国科学院 光电技术研究所, 成都 610041)

摘 要: 为实现激光束对空域的有效扫描和探测, 研究了栅形扫描、李萨茹形扫描、螺旋形扫描和六边形扫描四种常见的激光雷达扫描方式, 推导了相应的扫描方程, 讨论了参数的物理意义及调整方法; 重点研究了栅形扫描和六边形扫描方式下光斑的分布情况, 通过仿真分析了两种扫描方式下光束的漏扫率和重叠率, 结果表明, 在相同扫描条件下六边形扫描方式的漏扫区域最少。展示了基于上述研究内容的扫描控制系统实物图及扫描图案。分析总结了四种扫描方式的特点, 给出了每种扫描方式的适用情况及使用建议。

关键词: 激光雷达; 大气探测; 扫描方式

中图分类号: TN24

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202032.190382

Research on lidar scanning mode

Yuan Guangfu^{1,2}, Ma Xiaoyu², Liu Shuang¹, Yang Qilong²

(1. School of Photoelectric Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;

2. Institute of Photoelectric Technology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: Scanning lidar is widely used in atmospheric remote sensing detection and target capture. To realize the effective detection of lidar, this paper studies four common scanning modes of lidar: raster scanning, Lissajo scanning, spiral scanning and hexagonal scanning. The corresponding scanning equation is deduced, and the physical meaning and adjustment method of parameters are discussed. Aiming at the requirement of fine scanning in atmospheric remote sensing detection, the distribution of spot under raster scanning and hexagonal scanning is studied. The leakage rate and overlap rate of these two scanning modes are simulated and analyzed. The results show that under the same scanning condition, the leakage area of hexagonal scanning mode is the smallest. The physical image and scan pattern of scanning control system based on the above research are presented. Finally, the characteristics of these four scanning modes are summarized, and their application and suggestions are given.

Key words: lidar; atmospheric remote sensing detection; scanning mode

激光雷达具有波束窄、体积小、非接触测量等特点, 可探测云雾、气溶胶、空中风场、空气污染物、温湿度变化等多种参数^[1-3]。它采用光频段进行探测, 比毫米波高出几个数量级, 探测精度比微波雷达更具优势^[3]。因此激光雷达在大气探测、目标捕获等领域具有较广泛的应用前景。由于激光波束窄, 通常需要通过扫描来满足探测需求, 扫描控制系统成为激光雷达的重要组成部分。研究激光雷达扫描方式及扫描参数, 对提高激光雷达探测精度、探测效率、目标捕获概率等具有重要的意义。目前国内外常用的激光雷达扫描方式有栅形(Raster)扫描、李萨茹(Lissajo)形扫描、螺旋(Spiral)形扫描、六边形(Hexagon)扫描等^[4-7]。本文对这几种扫描方式进行分析, 并给出相应的扫描方程。

1 扫描方式介绍

1.1 栅形扫描

栅形扫描是沿水平或竖直方向往复顺序扫描的扫描方式, 其扫描轨迹如图 1 所示。栅形扫描先沿一个方向连续均匀扫描, 完成一行扫描后变换方向到达下一行, 再沿着相邻行的反方向扫描, 这个过程称为一个行周期的扫描。

在表示栅形扫描轨迹时可将行周期分为四个阶段, 通过调整这四个周期 T_1, T_2, T_3, T_4 的大小, 可以改变扫描行时间长短, 方程(1)~(4)分别对应 4 个扫描周期

收稿日期: 2019-09-24; 修订日期: 2019-12-11

作者简介: 袁光福(1987—), 男, 硕士, 从事光学测量研究; 670230520@qq.com。

通信作者: 马晓燮(1983—), 男, 研究员, 主要从事单光子测量方面的研究工作; maxiaoyu001@126.com。

$$\text{周期}T_1 \quad \begin{cases} x_n(t) = a(t - t_{n-1}) - A_x \\ y_n(t) = y_{n-1}(t_{n-1}) \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{周期}T_2 \quad \begin{cases} x_n(t) = x_n(t_{n-1} + T_1) \\ y_n(t) = y_n(t_{n-1} + T_1) + b(t - t_{n-1} - T_1) - A_y \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{周期}T_3 \quad \begin{cases} x_n(t) = A_x - a(t - t_{n-1} - T_2) \\ y_n(t) = y_n(t_{n-1} + T_2) \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{周期}T_4 \quad \begin{cases} x_n(t) = x_n(t_{n-1} + T_3) \\ y_n(t) = y_n(t_{n-1} + T_3) + b(t - t_{n-1} - T_3) - A_y \end{cases} \quad (4)$$

式中: $x_n(t), y_n(t)$ 表示扫描光斑中心位置的坐标; n 表示第 n 个行周期; 参数 a, b 表示水平和竖直两个方向上扫描距离随时间的变化率, 值越大扫描速度越快; A_x, A_y 表示扫描的范围。

栅形扫描具有如下特点: 扫描光斑分布均匀, 实现方式简单, 能较好地满足水平探测和垂直探测需求, 可用于目标搜索^[4]; 大多数扫描器件均可实现栅形扫描; 但当扫描速度较快、器件加速度性能不够时, 扫描图形容易变形。

1.2 李萨茹形扫描

李萨茹扫描图形是光束在两个垂直方向作三角函数运动的合成, 图2是李萨茹形扫描的轨迹图。

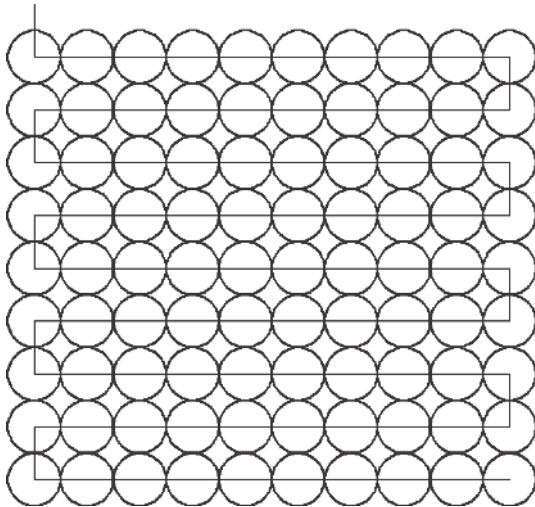


Fig. 1 Raster scanning pattern

图1 栅形扫描图

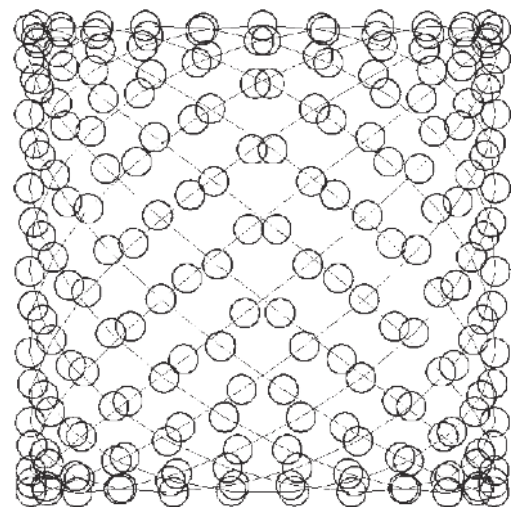


Fig. 2 Lissajou scanning pattern

图2 李萨茹扫描图

李萨茹扫描方程为

$$\begin{cases} x(t) = A_x \sin(\omega_x t) \\ y(t) = A_y \sin(\omega_y t + \varphi) \end{cases} \quad (5)$$

式中: A_x, A_y 表示扫描的幅值, 可以用来控制扫描图像的范围; ω_x, ω_y 是扫描频率, 通过调整该值来控制扫描的速度; ω_x/ω_y 是两个扫描方向的频率比, 是影响扫描图形的重要参数, 通过调整频率比可以改变扫描图形的花样, 当频率比为整数比时, 扫描图形为封闭稳定图形, 当频率比为最简整数比时, 单场扫描曲线不重合, 即相同扫描时间可覆盖更多的扫描空域, 因此在设置李萨茹扫描参数时一般将扫描频率设为最简整数比; φ 为两个方向扫描函数的相位差, 该值可以改变扫描曲线的疏密。

李萨茹扫描图具有如下特点: 扫描光斑分布不均匀, 中间疏边缘密; 加减速平稳, 扫描过程对天线结构的机械冲击影响小。此外李萨茹扫描方式对扫描器件有一定的选择性, 适合扫描行程与受力相关的非线性扫描器件, 如音圈电机、MEMS微振镜等使用李萨茹形扫描^[8]。

1.3 螺旋形扫描

螺旋形扫描是按照螺旋线方程进行扫描的一种扫描方式, 图3为螺旋形扫描图。

极坐标下的螺旋线扫描方程为

$$\begin{cases} r = \frac{\theta \Delta r}{2\pi} \\ \theta = kt \end{cases} \quad (6)$$

式中： Δr 为螺旋线距，改变 Δr 可以调整扫描线密度； θ 为扫描点的极角； k 为扫描光斑角速度参数。当 $\theta = kt$ 时，角度随时间线性变化，即每圈扫描的时间相同，由于靠近中心扫描半径较小，扫描相同长度路径停留的时间更长，光斑密度更大，因此对中心区域的覆盖率更高。由于实际扫描过程是对扫描器件两个垂直方向单独控制来实现的，进行扫描时需要将扫描方程转换到直角坐标系上来，直角坐标系中的扫描方程为

$$\begin{cases} x = \theta \cos \theta \Delta r / 2\pi \\ y = \theta \sin \theta \Delta r / 2\pi \\ \theta = kt \end{cases} \quad (7)$$

螺旋形扫描特点：扫描光斑分布不均匀，中间密边缘疏；扫描速度较稳定，加减速平稳，扫描过程对天线结构的机械冲击影响小。由于扫描中心区域光斑覆盖率高，常用于高斯分布的目标的捕获，因此在雷达的目标捕获中较为常见，现在已发展出变速螺旋扫描、螺距扫描等扫描方式^[9-10]。

1.4 六边形扫描

六边形扫描从待测区域中心处沿六边形的边往外扫，图4是六边形扫描的轨迹图，轨迹方程为

$$\begin{cases} x_{p1} = x_0 \\ y_{p1} = y_0 - 2rt_p/v \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} x_{p2} = x_{p1} + (p-1) \cdot 2r \cos\left(\frac{\pi}{6} - \frac{\pi}{12}\right) t_p/v \\ y_{p2} = y_{p1} + (p-1) \cdot 2r \sin\left(\frac{\pi}{6} - \frac{\pi}{12}\right) t_p/v \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} x_{pq} = x_{pq} + p \cdot 2r \cos\left[\frac{\pi}{6} + (q-3) \frac{\pi}{12}\right] t_p/v \\ y_{pq} = y_{pq} + p \cdot 2r \sin\left[\frac{\pi}{6} - (q-3) \frac{\pi}{12}\right] t_p/v \end{cases} \quad (10)$$

式中： x_{pq} ， y_{pq} 分别表示从中心往外扫描到第 p 圈的第 q 条边时光斑圆心的坐标。式(8)~(10)分别为第 p 圈第1,2,3~6条边的扫描方程； r 为中心六边形内切圆的直径，调整 r 可以控制扫描六边形的大小； v 为速度参数，调整该参数可控制扫描光斑移动的速度。

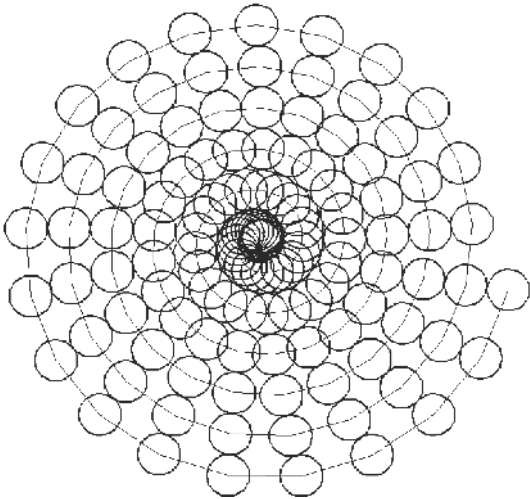


Fig. 3 Spiral scanning pattern

图3 螺旋扫描图

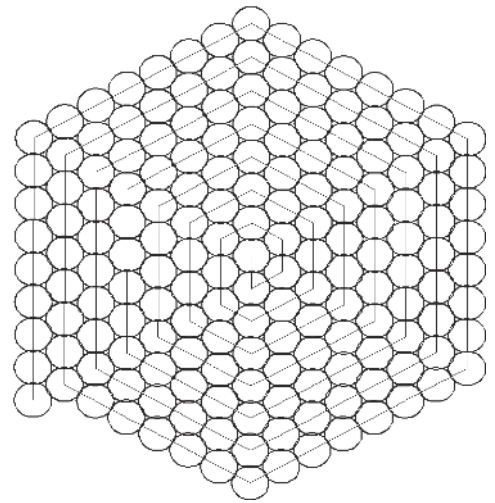


Fig. 4 Hexagon scanning pattern

图4 六边扫描轨迹图

六边形扫描特点为：扫描光斑分布均匀，重叠区域小，适用于对扫描空域覆盖率有较高要求的精细扫描场合；但当扫描速度较快、器件加速度性能不够时，扫描图形容易变形。

2 计算与仿真

扫描式激光雷达应用于一些精细探测场合对扫描光斑的分布有一定要求,常常需要考虑光斑的漏扫情况和重叠情况。由于李萨茹形扫描和螺旋形扫描为非均匀扫描,漏扫率和重叠率较大,本文重点对栅形扫描和六边形扫描进行仿真分析,讨论两种均匀扫描方式的光斑分布情况。

图5为六边形扫描光斑分布图,图中漏扫区为阴影区域,每个阴影区面积大小为 S_1 ,重叠区为黑色区域,面积为 S_2 。根据几何关系, S_2 为4倍扇形 ABD 与三角形 ΔABD 面积之差,线段 AB 的长度为 $2d$,该值是相邻两圈光斑中心的间距,则有

$$S_2 = 4(S_{ACD} - S_{\Delta ABD}) \quad (11)$$

其中

$$S_{ACD} = \arccos\left(\frac{|AB|}{|AD|}\right) \frac{\pi r^2}{2\pi} = \arccos\left(\frac{d}{r}\right) \frac{r^2}{2} \quad (12)$$

$$S_{\Delta ABD} = \frac{1}{2} AB \cdot BD = \frac{d}{2} \sin\left(\arccos\left(\frac{d}{r}\right)\right) r \quad (13)$$

由(11)~(13)可得

$$S_2 = 4\left[\arccos\left(\frac{d}{r}\right) \frac{r^2}{2} - \frac{d}{2} \sin\left(\arccos\left(\frac{d}{r}\right)\right) r\right] \quad (14)$$

漏扫区 S_1 为 ΔAEF 的面积减去光斑覆盖区域面积

$$S_1 = S_{\Delta AEF} - \left(3 \frac{\pi r^2}{6} - 3 \frac{1}{2} S_2\right) = \sqrt{3} d^2 - \frac{\pi r^2}{2} - 1.5 S_2 \quad (15)$$

当扫描的光斑足够多时,平均每个光斑对应3个重叠区和2个漏扫区,因此用六边形扫描一定空域时重叠率和漏扫率分别为

$$P_{\text{hex}} = \frac{3S_2}{\pi r^2} \quad (16)$$

$$Q_{\text{hex}} = \frac{2S_1}{\pi r^2} \quad (17)$$

图6为光斑漏扫率和重叠率随扫描线距变化的仿真结果,横坐标扫描线距相对于光斑半径的倍数,纵坐标为漏扫率或重叠率。从图中可以看出,当 $|AB| = \cos\frac{\pi}{6}|AD| = 0.866r$ 时,光斑刚好覆盖所有的区域,此时漏扫率为0,满足无漏扫条件,当线距与光斑半径相等时重叠率为0,此时光斑刚好无重叠。

用相同的方法可以计算出栅形扫描的重叠率和漏扫率,栅形扫描时每个光斑对应2个重叠区和1个漏扫区,

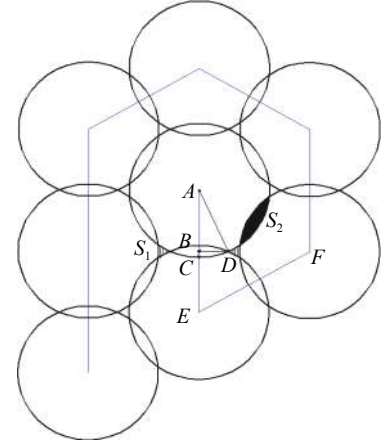
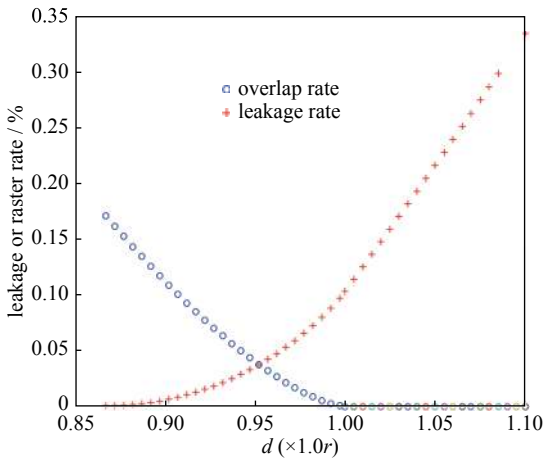
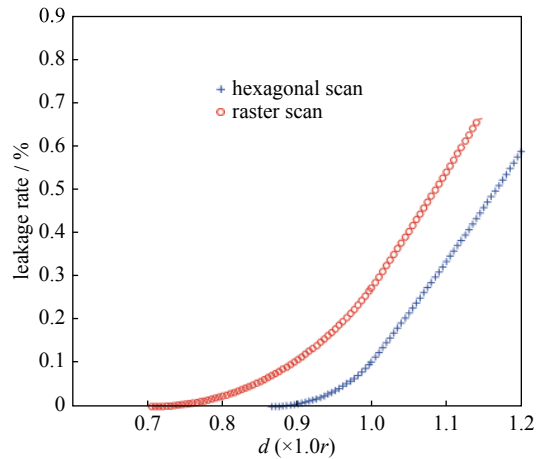


Fig. 5 Hexagonal scanning spot distribution map

图5 六边扫描光斑分布图



(a) leakage rate and overlap rate of raster scan



(b) comparison of the leakage rate of raster scan and hexagonal scan

Fig. 6 Comparison of leakage rate and overlap rate

图6 漏扫率、重叠率对比图

计算公式为

$$S_2 = 4 \left[\arccos\left(\frac{d}{r}\right) \frac{r^2}{2} - \frac{d}{2} \sin\left(\arccos\left(\frac{d}{r}\right)\right) r \right] \quad (18)$$

$$S_1 = (2d)^2 - \pi r^2 + 2S_2 \quad (19)$$

重叠率和漏扫率分别为

$$P_{\text{rst}} = \frac{2S_2}{\pi r^2} \quad (20)$$

$$Q_{\text{rst}} = \frac{S_1}{\pi r^2} \quad (21)$$

改变扫描间距,可以得出两种扫描方式的漏扫率变化情况,从图6可以看出,两种扫描方式的漏扫率都随着扫描线距增加,但六边形扫描的漏扫率更低,即用相同的光束发散角和扫描线距进行扫描时,六边形扫描方式的漏扫区域更少。

3 扫描方式的实现

依据上述激光雷达扫描方程,设计了一套激光雷达扫描控制系统,该系统由主控软件、扫描控制器、光束扫描装置等部分组成。其中主控制软件是一套C++语言开发的上位机软件,用于向用户提供激光雷达扫描控制界面,方便用户设置扫描方式、扫描参数、扫描命令等,并将用户设置的内容通过串口发送到扫描控制器中。该主控软件采用Visual Studio2010编程环境开发,界面如图7所示。



Fig. 7 Main control software interface

图7 主控软件界面

扫描控制器以DSP作为主控制芯片,芯片程序采用C语言开发。主要功能包括:接收主控软件的控制命令,采集音圈电机的位置反馈信号,通过计算产生满足扫描方程的码值驱动光束扫描装置工作等。图8为扫描控制系统扫描出的李萨茹图案,说明本文给出的扫描方程可以实现激光雷达的扫描。

4 结论

本文研究了栅形扫描、李萨茹形扫描、螺旋形扫描和六边形扫描四种常见的激光雷达扫描方式,推导了扫描方程,分析了光斑分布情况。其中栅形扫描光斑分布均匀,可用于水平探测和垂直探测,但当器件允许的最大加速度不能满足扫描方程加速度要求时,扫描图形会变形;李萨茹形扫描为非均匀扫描,扫描区域边缘密、中间疏;漏扫率、重叠率均较高,但扫描速度快,加减速平稳,对天线结构冲击小,可用于目标捕获等场合,适合于音圈电机、MEMS微振镜

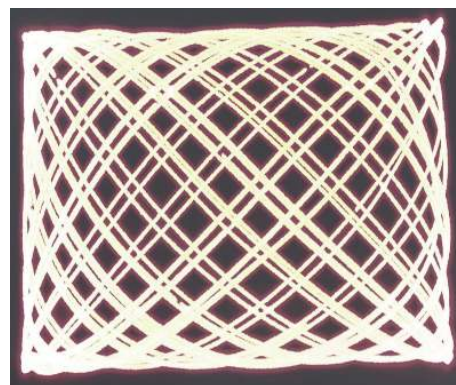


Fig. 8 Lissajous scanning pattern picture

图8 李萨茹形扫描图案

等二维扫描器件;螺旋形扫描为非均匀扫描,扫描速度较平稳,中间光斑覆盖率高,在雷达捕获目标中较为常用;六边形扫描为均匀扫描,光斑重叠率小、漏扫区域少,适用于需要精细探测的场合。

参考文献:

- [1] 王青梅, 张以谟. 气象激光雷达的发展现状[J]. *气象科技*, 2006, 34(3): 246-249. (Wang Qingmei, Zhang Yimo. Development of meteorological lidar[J]. *Meteorological Lidar Science and Technology*, 2006, 34(3): 246-249)
- [2] 陈超, 王章军, 宋小全, 等. 扫描式气溶胶激光雷达研制与观测研究[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47: 1230009. (Cheng Chao, Wang Zhangjun, Song Xiaoquan, et al. Development and observational studies of scanning aerosol lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47: 1230009)
- [3] 赵一鸣, 李艳华, 高雅楠, 等. 激光雷达的应用及发展趋势[J]. *遥测遥控*, 2014, 35(5): 3-6. (Zhao Yiming, Li Yanhua, Shang Ya'nan, et al. Application and development direction of lidar[J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2014, 35(5): 3-6)
- [4] 位寅生, 杨思亮. 单脉冲雷达扫描方式分析与仿真[J]. *系统工程与电子技术*, 2011, 33(2): 468-472. (Wei Yinsheng, Yang Siliang. Analysis and simulation of monopulse radar scanning modes[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(2): 468-472)
- [5] 马辰昊, 付跃刚, 宫平, 等. 一种激光雷达复合式扫描方法及试验[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(11): 3270-3272. (Ma Chenhao, Fu Yuegang, Gong Ping, et al. A composite scanning method and experiment of laser radar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3270-3272)
- [6] 李慧剑. 运动目标探测激光扫描系统设计与原理实验[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013: 28-30. (Li Huijian. Design and principle experiment of laser scanning system for moving target detection[D]. Xi'an: Xidian University, 2013: 28-30)
- [7] 张镭卿. 运动目标激光探测的捕获概率与跟踪算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014: 13-16. (Zhang Yunqing. Capture probability and tracking algorithm of moving target in laser detection[D]. Xi'an: Xidian University, 2014: 13-16)
- [8] 张大卫, 冯晓梅. 音圈电机的技术原理[J]. *中北大学学报*, 2006: 224-228. (Zhang Dawei, Feng Xiaomei. The technical principle of voice-coil actuator[J]. *Journal of Zhongbei University*, 2006: 224-228)
- [9] 冯国柱, 杨华军, 邱琪, 等. 螺旋式扫描在激光雷达系统中的仿真优化分析[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(2): 166-168. (Feng Guozhu, Yang Huajun, Qiu Qi, et al. Analyzing from simulation of optimizing the spiral scan in the laser radar system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(2): 166-168)
- [10] Chen Wenqing, Wang Jianbin, Wang Xuejun, et al. H. Detection probability analysis of airborne radar for marine target[C]//The 6th International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and Electromagnetic Compatibility Technologies(MAPE 2015). 2015: 730-733.