

doi: 10.3788/gzxb20144302.0206004

# 空地激光通信系统中捕获子系统仿真

刘鹏<sup>a,b</sup>, 王晓曼<sup>b</sup>, 韩成<sup>a,c</sup>, 褚影<sup>b</sup>

(长春理工大学 a. 空间光电技术研究所; b. 电子信息工程学院; c. 计算机科学技术学院, 长春 130022)

**摘 要:** 针对空地激光通信系统, 推导了复合光栅螺旋扫描捕获方法所需的最大捕获时间、平均捕获时间和捕获概率的计算公式, 建立了捕获性能仿真模型, 分析了捕获时间和捕获概率的关系, 以及空中平台的相对速度对捕获系统的影响和抑制方法. 仿真结果表明, 当通信终端的捕获不确定区域为 50 mrad, 扫描重叠因子为 0.12 时, 捕获探测器的信噪比大于 6 时, 空地激光通信系统总的捕获概率优于 95%, 最大捕获时间约为 36 s, 平均捕获时间约为 12 s.

**关键词:** 无线光通信; 空地激光通信; 计算机仿真; 捕获系统; 捕获不确定区域; 捕获时间; 捕获概率

中图分类号: TN929.12

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)02-0206004-6

## Simulation of Acquisition Subsystem in Space-ground Optical Communication System

LIU Peng<sup>a,b</sup>, WANG Xiao-man<sup>b</sup>, Han Cheng<sup>a,c</sup>, CHU Ying<sup>b</sup>

(a. Institute of Space Photo-electronic Technology; b. Institute of Electronic Information Engineering;  
c. Institute of Computer Science and Technology, Changchun University of Science and Technology,  
Changchun 130022, China)

**Abstract:** For space-ground optical communication, computational formulas for maximum acquisition time, mean acquisition time and acquisition probability were presented which were used by the multiplex raster spiral method. The simulation model of acquisition were established, the relation between the acquisition time and acquisition probability were analyzed, and effects which caused by the relative velocity of air communication platform to acquisition simulation were also discussed. The simulation results show that when acquisition area of uncertainty of communication terminal is 50 mrad, scanning overlap factor is 0.12 and signal-to-noise ratio of acquisition detector is more than 6, the acquisition probability of space-ground optical communication system is better than 95%, and the maximum acquisition time is about 36 s and the mean acquisition time is about 12 s.

**Key words:** Wireless optical communication; Space-ground optical communication; Computer simulation; Acquisition system; Acquisition uncertainty region; Acquisition time; Acquisition probability

**OCIS Codes:** 060.2605; 060.4510; 140.0140

## 0 引言

随着信息时代的到来, 社会各方面的发展和应用的新技术迫使通信技术向多方式、多频段、多领域和综合化的方向发展. 对准、捕获、跟踪 (Acquisition Pointing Tracking, APT) 系统是自由空间激光通信系

统的重要组成部分, 也是进行激光通信的前提和保证. 由于通信距离长, 激光的束散角小等原因, 所以要实现两个通信终端的对准、捕获和跟踪是非常困难的. 对于空地激光通信系统, 通常采用飞机或飞艇作为空中通信搭载平台, 由于搭载平台的位置和姿态不确定, 需要采用如 GPS/INS 捷联导航单元进行位置和姿态的实

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (No. XXXXXXXX) 资助

第一作者: 刘鹏 (1982-), 男, 助理研究员, 博士研究生, 主要研究方向为空间激光通信. Email: louis585760@126.com

导师: 王晓曼 (1956-), 女, 教授, 博导, 主要研究方向为光电信息检测、图像处理和大气激光通信等. Email: liup@cust.edu.cn

通讯作者: 韩成 (1978-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为计算机仿真. Email: hancheng@cust.edu.cn

收稿日期: 2013-04-16; 录用日期: 2013-11-05

<http://www.photon.ac.cn>

时测量和解算,并进行一段时间的初始对准.由此产生的初始对准误差导致空地激光通信系统的捕获不确定区域比较大<sup>[1]</sup>.不仅如此,两个通信终端较大的相对运动角速度将降低捕获概率,增加捕获时间<sup>[2]</sup>.因此,如何根据初始对准误差,选择适当的捕获方式和扫描方法,实现快速高概率的捕获过程是空地激光通信系统的关键技术之一<sup>[3]</sup>.

目前,星间、深空、星空、地面间激光通信系统中的星间相干光通信<sup>[4-6]</sup>、车辆间激光通信<sup>[7]</sup>、基于GPS的星地激光通信捕获对准技术<sup>[8]</sup>、GPS/INS技术在静态激光通信初始捕获中的应用<sup>[9]</sup>、星间激光通信不确定区域扫描补偿技术<sup>[10]</sup>、捕获控制系统<sup>[11]</sup>、大气湍流和云层对激光通信的影响<sup>[12-13]</sup>等方面已经开展了一些研究.相对于其它激光通信系统,空地激光通信链路被认为是最复杂的链路之一,因此开展研究的时间较晚,研究成果主要围绕跟踪准确度和误码率<sup>[14-15]</sup>.本文针对

空地激光通信,提出了采用复合光栅螺旋扫描捕获方法的捕获系统所需要的平均捕获时间和捕获概率的计算方法,分析了捕获时间和捕获概率的关系,以及空中平台的相对速度对捕获系统的影响和抑制方法.

## 1 空地激光通信捕获方法

为了实现快速高概率的捕获,首先对自由空间激光通信终端的束散角、接收视场角、捕获不确定区域、通信距离、通信终端的特点和应用环境等因素进行综合分析,选择合理的捕获方法,即捕获方式和扫描方法.

两个通信终端的视轴保持在同一条直线上是进行自由空间激光通信的前提,因此,两个通信终端需要相互配合才能实现两端捕获.目前,在空间激光通信系统中,通常采用的捕获方式有四种<sup>[16]</sup>.根据捕获不确定区域 $\theta_b$ 、激光束散角 $\theta$ 和接收视场角 $\theta_f$ 的关系及其它要求可以选择合理的捕获方式,如表1.

表1 不同捕获方式对比分析

Table 1 Comparative analysis of different acquisition mode

Acquisition mode	Relationship between $\theta$ & $\theta_b$	Relationship between $\theta_f$ & $\theta_b$	Communication distance	Launch power
Staring/staring	$\theta > \theta_b$	$\theta_f > \theta_b$	Far	High
Staring/scanning	$\theta > \theta_b$	$\theta_f < \theta_b$	Far	High
Scanning/staring	$\theta < \theta_b$	$\theta_f > \theta_b$	Further	Low
Scanning/scanning	$\theta < \theta_b$	$\theta_f < \theta_b$	Further	Low

在确定合理的捕获方式后,通信终端如果需要在一定范围(捕获不确定区域)内进行扫描捕获,必须合理地选择扫描方法.目前,在空间激光通信系统中,通

常采用的扫描方法的优缺点如表2,扫描路径如图1<sup>[16]</sup>.

表2 不同扫描方法对比分析

Table 2 Comparative analysis of different scanning method

Scanning method	Advantage	Disadvantage
Raster scan as shown in subgraph a of Fig. 1	Easy realization, higher acquisition probability, no dead zone	Short acquisition time
Spiral scan as shown in subgraph b of Fig. 1	High acquisition probability	Difficult realization with dead zone
Spiral scan as shown in subgraph c of Fig. 1	Higher acquisition probability, Easy realization, no dead zone	Nothing
Rosette scan as shown in subgraph d of Fig. 1	High acquisition probability	With dead zone
Lessajou's figur scan as shown in subgraph e of Fig. 1	High acquisition probability	Difficult realization with dead zone

对于空地激光通信系统来说,存在较大的开环捕获不确定区域,如果采用大视场、大束散角进行开环捕获,需要抑制天空背景光并提高激光器的发射功率,才

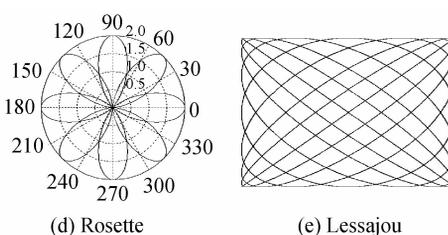
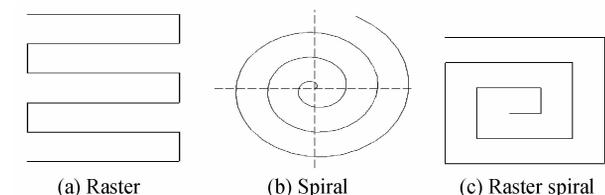


图1 捕获扫描方法  
Fig. 1 Scanning method

能实现高概率探测.因此,一般情况下,空地激光通信系统的激光束散角和探测器接收视场角都小于捕获不确定区域.在这种情况下,“扫描/扫描”是比较适合的扫描方式,但是这种扫描方式在增加捕获时间的同时又降低了捕获概率.因此,采用复合光栅螺旋扫描捕获方法捕获信标光斑<sup>[2]</sup>.

## 2 空地激光通信捕获性能分析

捕获时间和捕获概率是自由空间激光通信捕获系统的主要技术指标.在确定捕获方式和扫描方法后,再根据系统的其他参量和理论公式即可以推测捕获时间和捕获概率.

### 2.1 捕获时间

空地激光通信系统的捕获时间可以分为最大捕获时间和平均捕获时间.采用复合光栅螺旋扫描捕获方法所需要的最大捕获时间为

$$T_{\max} \approx \left[ \frac{\theta_A^2}{\theta_{Ab}^2 \times (1-k_A)^2} \right] \times (T_B + \Delta t) \quad (1)$$

式中  $\theta_A$  为地面通信终端需要扫描的捕获不确定区域,  $\theta_{Ab}$  为地面通信终端的信标光束散角,  $k_A$  为地面通信终端扫描时的重叠系数,  $\Delta t$  是为了在跳步扫描和连续扫描切换时,保持两个通信终端的一致性,保证两个通信终端的协调工作而设计的,  $T_B$  为空中通信终端完全覆盖一次捕获不确定区域的时间,其表达式为

$$T_B \approx \left[ \frac{\theta_B^2}{\theta_{Bf}^2 \times (1-k_B)^2} \right] \times T_{Bd} \quad (2)$$

式中  $\theta_B$  为空中通信终端需要扫描的不确定区域的大小,  $\theta_{Bf}$  为空中通信终端的接收视场角,  $T_{Bd}$  为空中通信终端的每个扫描点的驻留时间,  $k_B$  为空中通信终端扫描时的重叠系数.

为了计算空地激光通信系统的平均捕获时间,首先将地面通信终端需要扫描的捕获不确定区域分成  $n$  个区域,将空中通信终端需要扫描的捕获不确定区域分成  $m$  个区域.空地激光通信平均捕获时间为

$$\bar{T} \approx \sum_{i=1}^n \bar{P}_i \times (i-1) \times (\bar{T}_B + \Delta t) n = \left[ \frac{\theta_A^2}{\theta_{Ab}^2 \times (1-k_A)^2} \right] \quad (3)$$

$$\bar{T}_B \approx \sum_{i=1}^m \bar{P}_i \times (i-1) \times T_{Bd} \quad m = \left[ \frac{\theta_B^2}{\theta_{Bf}^2 \times (1-k_B)^2} \right] \quad (4)$$

式中  $\bar{P}_i$  为光斑落在捕获不确定区域的  $i$  区的平均概率.

### 2.2 捕获概率

复合光栅螺旋扫描捕获方法可以看成多次的“凝视/扫描”捕获方式和光栅螺旋扫描方法的结合.因此,作连续光栅螺旋扫描的空中通信终端第一次覆盖捕获不确定区域的捕获概率可表示为

$$P_B^1 = P_{Ba} \times P_{Bs} \times P_{Bd} \quad (5)$$

式中  $P_{Ba}$  为空中通信终端的统计覆盖率,  $P_{Bs}$  为空中通信终端的扫描覆盖率,  $P_{Bd}$  为空中通信终端的探测概

率.空中通信终端第  $n$  次光栅螺旋扫描捕获成功的概率为

$$P_B^n = (1 - \sum_{i=1}^{n-1} P_B^i) P_B^1, 2 \leq n \leq \left\lceil \frac{\theta_B^2}{\theta_{Bf}^2 (1-k_B)^2} \right\rceil \quad (6)$$

作跳步光栅螺旋扫描的地面通信终端的捕获概率为

$$P_A = P_{Aa} \times P_{As} \times P_{Ad} \quad (7)$$

式中  $P_{Aa}$  为地面通信终端的统计覆盖率,  $P_{As}$  为地面通信终端的扫描覆盖率,  $P_{Ad}$  为地面通信终端的探测概率.

#### 2.2.1 统计覆盖率

通过文献[1-2]的分析可知,由于存在各种随机误差和系统误差,所以系统在完成初始对准后,存在初始对准误差,此误差决定了捕获不确定区域的大小.根据分析可知,在方位和俯仰两个方向上偏移角度的均方差并不相同.因此,假设在方位和俯仰方向上的误差来源独立且同分布,根据中心极限定理,误差服从均值为零的正态分布,进一步进行推导可以得到固定偏移量的二维分布服从瑞利分布.统计覆盖率主要由初始对准误差和捕获不确定区域的大小决定,即

$$P_a = \iint_{\Omega} f(\theta_v, \theta_h) d\theta_v d\theta_h \quad (8)$$

式中  $\theta_v$  和  $\theta_h$  分别为在方位和俯仰两个角方向上的偏移角度,  $\Omega$  为捕获不确定区域,显然,在一定统计覆盖率的要求下,方位和俯仰两个方向上的偏移角度的均方差决定了捕获不确定区域的大小.

#### 2.2.2 扫描覆盖率

在扫描捕获过程中,通信两端处于开环扫描阶段,系统存在着各种误差,它们主要来自搭载平台的振动误差和伺服控制单元的指向误差.在扫描捕获不确定区域时,虽然通过宽带、低漂移的速率陀螺为核心器件的主动视轴稳定技术,可以对低频、大幅度扰动进行有效抑制,但是两个相邻扫描区域间仍然会存在漏扫区域,导致光斑或接收视场不能完全覆盖捕获不确定区域,最终影响捕获概率.因此,在运动和振动的条件下,为了对捕获不确定区域进行有效地覆盖,可以使用扫描重叠因子来提高扫描覆盖率.重叠因子的选取可以由信标光束散角或接收视场角扫描覆盖不确定区的概率来确定<sup>[16]</sup>,即

$$k = \frac{2\sigma_{\text{error}} \sqrt{2(-\ln(1-P_{\text{scan}}))}}{\theta} \quad (9)$$

式中  $\sigma_{\text{error}}$  为在径向方向上发射或接收视轴偏差的均方差,  $\theta$  为信标光的束散角或接收视场角,  $P_{\text{scan}}$  为扫描覆盖率.

#### 2.2.3 探测概率

探测概率主要与探测器的信噪比有关,在自由空间激光通信系统中,通常选用 CCD 作为捕获探测器.假设 CCD 噪音信号统计服从标准的正态分布,如果采用强度调制/直接探测方式,根据虚警率、丢失率和探

测概率的定义可知,对于 CCD 探测器的一个像元来说,探测概率可表示为

$$P_{\text{det}} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{(I_{\text{threshold}} - i_{\text{AV}})^2}{2(i_{\text{NI}}^2 + i_{\text{AV}})} \right) I_{\text{threshold}} \geq i_{\text{AV}} \quad (10)$$

$$P_{\text{det}} = \frac{1}{2} (1 + \operatorname{erf} \left( \frac{(I_{\text{threshold}} - i_{\text{AV}})^2}{2(i_{\text{NI}}^2 + i_{\text{AV}})} \right)) I_{\text{threshold}} \leq i_{\text{AV}} \quad (11)$$

式中  $i_{\text{AV}}$  为 CCD 接收到的平均信号,  $I_{\text{threshold}}$  为 CCD 的阈值电流,  $i_{\text{NI}}$  为 CCD 均方噪音电流。

### 2.3 搭载平台的相对速度对捕获系统性能的影响

空地激光通信系统在进行复合光栅螺旋扫描时,搭载平台的振动和平台间的相对速度是影响捕获系统性能的主要因素。其中相邻扫描区域间的重叠区域,可以减少振动对捕获概率的影响,提高捕获扫描过程中两个相邻扫描区域边缘的安全性。相对速度对捕获系统的影响与相对速度的大小和通信距离有关。在相对速度不变的条件,远距离激光通信系统,如星间激光通信、星空激光通信、星地激光通信等,每秒钟由相对速度引起的视轴偏差很小,可忽略,但由于远距离的激光通信系统的束散角和视场角都比较小,扫描时间比较长,随着捕获时间的增加,在扫描捕获的后期累计的误差会比较大<sup>[2]</sup>;对于通信距离比较近的激光通信系统,如空地激光通信、地面间激光通信等,每秒钟由相对速度引起的视轴偏差较大,为了减少这些影响,可以增大捕获不确定区域,但这势必会增加捕获时间,而捕获时间的增加反过来又会降低系统的捕获概率。所以在扫描捕获的过程中,为了提高捕获概率的同时尽量不增加捕获时间,最好的办法是根据相对速度调整原有的扫描捕获路径,使整个扫描区域朝着相对速度的方向偏移。偏移量的大小由相对速度在不确定区域平面上的投影分量、两个通信终端的距离和当前的捕获时间决定<sup>[11]</sup>,即

$$\begin{cases} CX = TV_x/L \\ CY = TV_y/L \end{cases} \quad (12)$$

式中的  $T$  为当前捕获时间,  $V_x$  和  $V_y$  分别为相对速度在水平和俯仰方向上的分量,  $L$  为通信距离;偏移量的方向由相对速度的方向决定。

## 3 仿真结果与分析

花费更少的时间,更高效地对光斑进行捕获是捕获系统的追求目标,但捕获时间和捕获概率相互影响。空地激光通信系统采用复合光栅螺旋扫描捕获方法,以及带速度补偿的优化扫描方法,可以实现快速高概率的捕获过程。

### 3.1 捕获概率

在空地激光通信系统中,设两个通信终端完成初始对准后,在水平和俯仰方向上,初始对准误差的标准差分别为 8 mard 和 1 mard。在此基础上,根据式(8)可

以得到不同大小的捕获不确定区域与捕获统计覆盖概率的关系,如图 2 所示。从图 2 可知,通信终端的捕获不确定区域为 50 mard 时,一个通信终端的捕获统计覆盖率优于 99.5%,所以两个通信终端总的捕获统计覆盖率优于 99%。

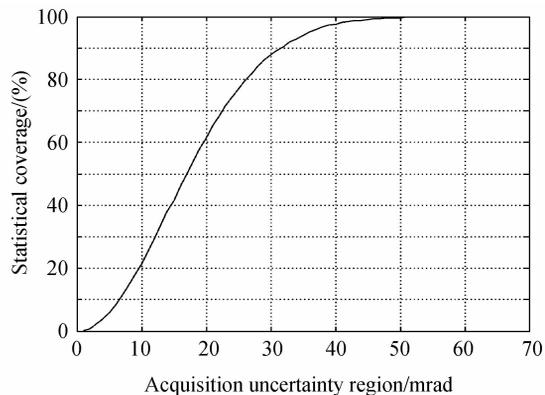


图 2 捕获不确定区域与统计覆盖率间的关系

Fig. 2 Relation of acquisition uncertainty region and statistical coverage

根据激光通信光端机的设计参量,假设空中通信终端的接收视场角为 19 mrad,在径向方向上接收视轴偏差的均方差为 0.4 mrad,根据式(9)对接收视场角扫描覆盖捕获不确定区的概率进行仿真,得到附加重叠因子与扫描覆盖率的关系,如图 3 所示。由图 3 可知,由于系统存在各种误差和干扰,若没有采用扫描重叠因子,扫描时相邻扫描点会出现漏扫情况;扫描覆盖率随扫描重叠因子的增大而增大,当  $k$  取 0.12 时,空中通信终端的捕获系统的扫描覆盖率优于 98%。由于地面通信终端搭载在静止平台上,可忽略扫描覆盖率。

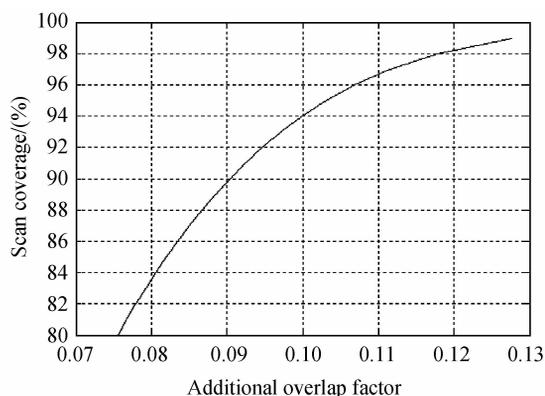


图 3 附加重叠因子与扫描覆盖率的关系

Fig. 3 Relation of additional overlap factor and scan coverage

空地激光通信中的信标光成像在粗跟踪 CCD 靶面上的光斑大小约为 2 或 3 个像元。在仿真系统中,假设 CCD 的阈值电流为噪音信号均方根的 3 倍。运行仿真计算可以得到在不同的 CCD 信噪比 (signal noise ratio-SNR) 条件下的捕获探测概率,如图 4 所示。从图 4 中可知,当信噪比大于 6 时,一个通信终端的捕获探测概率优于 99%,而双端捕获探测概率优于 98%。

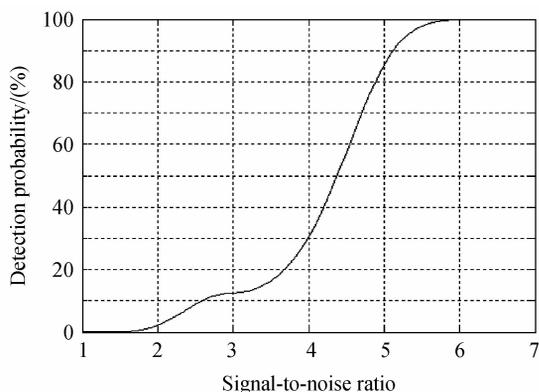


图4 信噪比与探测概率的关系

Fig. 4 Relation of signal-to-noise ratio and detection probability

综上所述,当通信终端的捕获不确定区域为 50 mrad时,两个通信终端总的捕获统计覆盖率优于 99%;当  $k$  取 0.12 时,空中通信终端的扫描覆盖率大于 98%;当信噪比大于 6 时,双端捕获探测率优于 98%,因此,空地激光通信系统总的捕获概率优于 95%.

### 3.2 捕获时间

根据对捕获概率的要求以及前面的分析,设空中通信终端需要扫描的捕获不确定区域为 50 mrad,重叠系数为 0.12. 假设接收视场角为 19 mrad,根据式(2),估计空中通信终端完全覆盖一次捕获不确定区域的时间为 4 s. 如果不考虑速度等因素干扰的影响,空中激光通信终端进行光栅螺旋扫描的路径图是对称的,如图 5 所示. 从图 5 可知,空中通信终端完全覆盖一次捕获不确定区域共需要 9 步. 空中平台上的通信终端进行光栅螺旋扫描捕获不确定区域的时间约为 36 s,此即为系统的最大捕获时间.

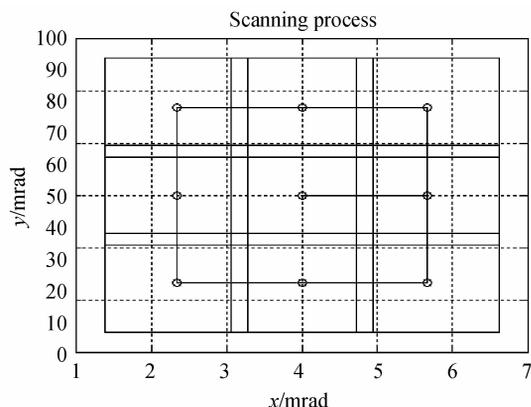


图5 普通光栅螺旋扫描路径

Fig. 5 Normal path of raster spiral scanning

不考虑相对速度的影响,根据式(3)和式(4)将捕获不确定区域分成如图 5 中的 9 个子区域,光斑落在每个子区域的概率如表 3,平均捕获时间约为 12 s.

如果考虑搭载平台的相对速度对捕获系统性能的影响,设通信距离为 50 km,空中平台的运动速度在捕获不确定区域平面的 X 轴正方向的投影分量为 20 m/s,

表 3 光斑落在捕获不确定区域的子区域的概率  
Table 3 Probability of spot on sub-region of acquisition uncertainty region

Subdomain	Probability
1	0.53
2	0.10
3	0.02
4	0.09
5	0.02
6	0.10
7	0.02
8	0.10
9	0.02

根据式(12)可以得到在水平方向和俯仰方向上每秒钟需要补偿的角度,采用优化的捕获算法得到如图 6 的捕获扫描路径. 通过图 5 与图 6 的对比可知,考虑相对速度的影响,如果仍然采用普通的光栅螺旋扫描方法,为了实现 95% 的捕获概率,需要增加捕获不确定区域,从而增加最大捕获时间和平均捕获时间. 如果采用优化的光栅螺旋扫描方法,所需的扫描的捕获不确定区域几乎没有变化,空中通信终端完全覆盖一次捕获不确定区域也只需要 9 步,因此,最大捕获时间和平均捕获时间基本不变.

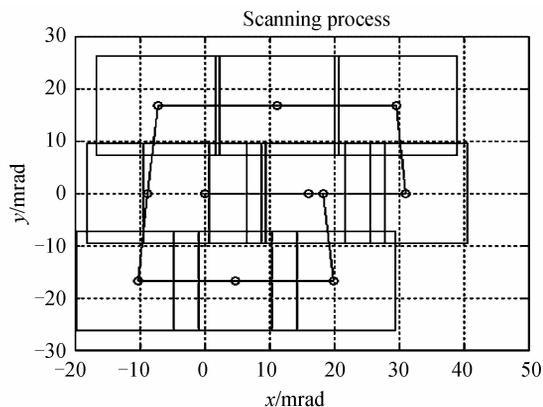


图6 优化的扫描路径

Fig. 6 Optimized path of raster spiral scanning

## 4 结论

为了进行快速高概率的捕获,采用复合光栅螺旋扫描捕获方法,并推导了最大捕获时间、平均捕获时间和捕获概率的计算公式;根据捕获概率的要求,计算捕获不确定区域的大小,扫描重叠因子和捕获探测器的信噪比,然后根据相对速度,仿真出两个通信终端可对速度补偿的扫描路径,进而得到最大捕获时间、平均捕获时间和捕获概率.

### 参考文献

- [1] HAN Cheng, TONG Shou-feng, Chen Zhan-dong, et al. Analysis of influence of GPS/INS system errors on pointing algorithm in space optical communication[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(4): 650-654.

- 韩成, 佟首峰, 陈展东, 等. GPS/INS 系统误差对空间激光通信对准算法的影响分析[J]. 红外与激光工程, 2009, **38**(4): 650-654.
- [2] HAN Cheng, BAI Bao-xing, YANG Hua-min, *et al.* Study and simulation of laser communication acquisition system in mobile platform-to-satellite [J]. *Journal of System Simulation*, 2009, **21**(18): 5923-5926.  
韩成, 白宝兴, 杨华民, 等. 机动平台与卫星间激光通信捕获系统仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2009, **21**(18): 5923-5926.
- [3] JIANG Hui-lin, LIU Zhi-gang, TONG Shou-feng, *et al.* Analysis for the environmental adaptation and key technologies of airborne laser communication system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36s**, 299-302.  
姜会林, 刘志刚, 佟首峰, 等. 机载激光通信环境适应性及关键技术分析[J]. 红外与激光工程, 2007, **36s**, 299-302.
- [4] TOSHIYUKI A, EISUKE H, KENICHI T, *et al.* Coherent homodyne receiver with a compensator of doppler shifts for inter orbit optical communication [C]. SPIE, 2011, **7923**: 79230J.
- [5] JOSEPH K, ABHIJIT B, KEITHER W, *et al.* Data products for the OCTL to OICETS optical link experiment [C]. SPIE, 2010, **7587**: 75870C.
- [6] ZHANG Jing, FU Xiu-hua, PAN Yong-gang. Design and fabrication of satellite laser communication filter coating [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(3): 303-306.  
张静, 付秀华, 潘永刚. 卫星激光通信滤光膜的研制[J]. 光子学报, 2012, **41**(3): 303-306.
- [7] LIN Zhi-qi, SONG Guo-ming, LIU Tao, *et al.* Modulation schemes of mobile atmosphere laser communication between autos [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(2): 334-338.  
林志琦, 宋国明, 刘涛, 等. 车辆间大气激光移动通信调制方式研究[J]. 光子学报, 2009, **38**(2): 334-338.
- [8] ZUO Tao, AI Yong, NIE Gui-gen, *et al.* Research on acquisition and pointing in optical communication between satellite and ground station based on GPS [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2010, **21**(8): 1184-1188.  
左韬, 艾勇, 聂桂根, 等. 基于 GPS 的星地激光通信捕获对准研究[J]. 光电子·激光, 2010, **21**(8): 1184-1188.
- [9] ZHAO Xue, MU Yi-ning, JIANG Fei-ou, *et al.* Application of GPS/INS technology in the initial capture of static laser communication [J]. *Laser & Infrared*, 2012, **42**(5): 505-509.  
赵雪, 母一宁, 姜非欧, 等. GPS/INS 技术在静态激光通信初始捕获中的应用[J]. 激光与红外, 2012, **42**(5): 505-509.
- [10] WANG Li-hui, MENG Li-xin, LI Yong-hao, *et al.* Research on compensation technology for uncertain region scanning in intersatellite laser communications [J]. *Study on Optical Communications*, 2012, **172**(4): 64-66.  
王利辉, 孟立新, 李咏豪, 等. 星间激光通信不确定区域扫描补偿技术研究[J]. 光通信研究, 2012, **172**(4): 64-66.
- [11] HAN Cheng, BAI Bao-xing, ZHAO Xin, *et al.* Acquisition control system of free space laser communication [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(1): 91-95.  
韩成, 白宝兴, 赵馨, 等. 自由空间激光通信捕获控制系统 [J]. 红外与激光工程, 2009, **38**(1): 91-95.
- [12] HAJJARIAN Z, KAVEHRAD M. Using MIMO transmissions in free space optical communications in presence of clouds and turbulence [C]. SPIE, 2009, **7199**: 71990V.
- [13] TYSON R, SCIPIONI M, GBUR G, *et al.* Production and propagation of a modulated optical vortex through atmospheric turbulence [C]. SPIE, 2009, **7200G**.
- [14] HAN Cheng, BAI Bao-xing, YANG Hua-min, *et al.* Primary environment influence factors to tracking precision in space-ground laser communication [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(1): 89-94.  
韩成, 白宝兴, 杨华民, 等. 空地激光通信跟踪准确度主要外界影响因素研究[J]. 光子学报, 2010, **39**(1): 89-94.
- [15] LI Xiao-feng. Influence of mirror thermal distortion on performance of space-to-ground laser communication links [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(3): 369-372.  
李晓峰. 镜面热变形对空地激光通信链路性能的影响[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(3): 369-372.
- [16] LUO Tong. The research on acquisition and tracking technologies of ATP system in optical intersatellite communications [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2004, 33-36.  
罗彤. 星间光通信 ATP 中捕获、跟踪技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2004, 33-36.