

# 多光束连续扫描卫星光通信捕获技术的系统容错性分析

赵顾颢<sup>1</sup>, 赵尚弘<sup>1</sup>, 蒙文<sup>1</sup>, 王翔<sup>1</sup>, 朱子行<sup>1</sup>, 陈晨<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学电讯工程学院, 陕西 西安 710077; 2. 西安计量技术研究院, 陕西 西安 710068)

**摘要** 多光束连续扫描卫星光通信捕获技术的系统误差主要出现在时间信息的反馈和探测部分。通过分析目标位置与圆心距离的计算公式, 绘制出不同扫描位置探测概率随均方差和步进时长的变化趋势。从中得出的结论是, 将目标卫星出现概率最大的区域安排在扫描轨迹中靠后的位置可以有效减少误差产生。对一个扫描周期内识别概率进行数值仿真表明, 当系统对时间信息的探测精度要达到  $4 \times 10^{-3}$  s 时, 系统误差概率将小于 1%。

**关键词** 卫星光通信; 捕获; 容错性; 识别概率

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.02.011

**中图分类号** TN243 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)02-0052-05

随着卫星光通信技术日趋成熟, 卫星间的捕获技术逐渐成为研究的热点与难点。在这方面国内外研究人员作了大量工作<sup>[1-4]</sup>。作者曾经提出过一种基于多光束连续扫描的卫星光通信捕获技术<sup>[5]</sup>。在双光束<sup>[6]</sup>和三光束<sup>[7]</sup>2种方案下该技术的捕获时间均比传统方式减少 90% 以上。由于使用了比传统方式更多的扫描信标光, 该技术使得系统的复杂度相对更高。为了了解新技术在复杂度较高的条件下对误差的修正能力, 本文对该技术的容错性进行了研究, 计算了扫描路径上不同位置的探测概率, 分析了一个扫描周期内的正确识别概率。结果表明系统识别精度只需要达到  $10^{-3}$  量级, 正确识别概率即可达到 99% 以上。

## 1 多光束扫描方案

多光束连续扫描的捕获过程如下: 将不确定区看成一个平面, 目标卫星在平面上概率分布。选取若干不重合的点作为圆心, 这些点坐标位置已知。以相同数量的信标光围绕这些圆心同时由内向外进行扫描, 见图 1。每完成一圈扫描, 半径增加一个单位, 称为一个步进。经过一段时间的扫描之后, 这些信标光将被目标卫星上的光学天线探测到。在每次探测到信标光的同时, 目标卫星使用星载无线电设备向主动方卫星发送无线电信号。主动方卫星通过接收到无线电信号的时间以及扫描开始时间可以计算出目标卫星在不确定区平面上与各圆心之间的距离。加上圆心点的位置已知, 通过计算可以确定目标卫星的具体位置从而建立光连接。容易得出, 目标点与圆心的距离为:

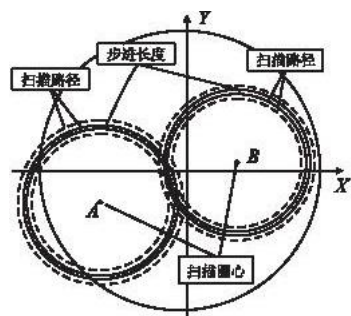


图 1 多光束扫描方式示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multi-beam scanning

$$S = \left[ \left( \frac{(t_1 - t_0 - T') - L/c}{(360/v) + t} \right) \right] \lambda \quad (1)$$

\* 收稿日期: 2010-10-27

基金项目: 国家“863”计划资助项目(2007AA01Z293)

作者简介: 赵顾颢(1986-), 男, 浙江杭州人, 博士生, 主要从事卫星光通信 ATP 技术研究。

E-mail: zghlupin@163.com

式中: $t_0$  为扫描开始时间, $t_1$  为主动方卫星接收到无线电信号的时间, $T'$  为目标卫星处理扫描信号的时间, $L$  为星间链路距离, $c$  为自由空间中电磁波传播速度。 $v$  为信标光扫描角速度, $360/v$  为信标光扫描一圈所消耗的时间, $t$  为扫描步进时间, $\lambda$  为步进长, $[ ]$  为取整符号。

以上的目标卫星到各扫描圆心的距离的公式中使用了取整计算,这是因为采用圆形扫描方式。在一个扫描周期中,圆周轨迹上的任何一个点到圆心的距离是相等的。对于通过扫描时间来计算目标到圆心距离的主动方卫星而言,每个扫描周期代表同一个距离值。绘制扫描过程见图 2。图中 2 个粗线之间的距离代表一个扫描周期,细线段与下一个粗线断之间代表扫描步进所耗的时长。主动方卫星在图中第  $n$  个扫描周期上的  $t_n$  时刻接收到无线电信号,则代表信标光扫过了  $n\lambda$  的距离。

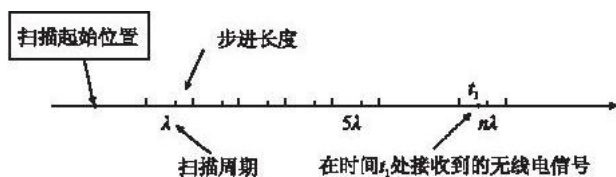


图 2 系统容错示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the system fault - tolerant

## 2 扫描轨迹上不同位置的正确探测概率

由于各种因素的误差,主动方卫星探测到应答信号的时间可能与实际值有一定误差。这里将探测值的分布概率称为探测概率。主动方根据实际探测值计算目标卫星与扫描圆心的距离这一过程称为识别,识别值与实际值相一致的几率称为识别概率。

由于影响探测概率分布的因数较多,且目前没有条件作相关实验。为了定性的研究新算法的容错性,本文假设系统对单个扫描位置的探测概率服从高斯分布,均方差为  $\sigma$ 。由于扫描周期的特点,不同的探测位置探测概率互不相同。且该概率随步进时长和误差概率均方差的变化而改变, $x$  点处识别概率公式如下:

$$\rho_x = \int_0^{\frac{360}{v} + t} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx \quad (2)$$

首先讨论系统对单个扫描位置的探测概率分布。取一个扫描周期进行研究,见图 3,  $AC$  代表一个完整的扫描周期,  $AB$  为一个扫描时长,  $BC$  代表一个步进时长。在无误差的情况下,主动方卫星只可能在  $AB$  区域内接收到反馈信号。系统产生误差时,主动方卫星探测到的反馈时间以实际扫描时间为中心,服从某种概率分布。根据算法设计,一个扫描周期代表同一距离值,只要实际测量时间在  $AC$  区域内,即可认为该误差可以被接受。

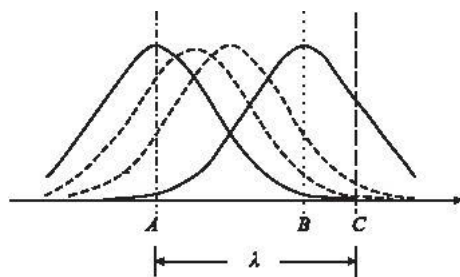


图 3 探测概率分布

Fig. 3 Detection probability distribution

对不同情况下探测概率进行仿真,图 4(a) - (d) 依次表示在扫描速度为  $3\ 000^\circ/\text{s}$  的情况下,系统探测概率均方差  $\sigma$  为 0.02, 0.05, 0.1, 0.2 时各位置的探测概率与步进时长的关系。从图中可以看出,探测概率随着  $\sigma$  值增大而减小,而随着步进时长的增大而增大。因此,提高系统精度和增加步进时长能够有效地提高探测概率。但是,由于步进时长的增加将会影响整体捕获效率,所以在工程实践中步进时长的选择应该参考目标卫星分布概率,不确定区域大小,系统误差概率均方差等多方面因素。

另外由图中可以看出,当步进时长较大时,一个扫描时长中越靠近步进位置的扫描点被正确探测的概率越大,即图 3 中越靠近  $B$  的扫描位置。这表明在实际的应用中,将目标卫星出现概率最大的位置安排在一个扫描轨迹的后半部分,可以减小误差的产生。

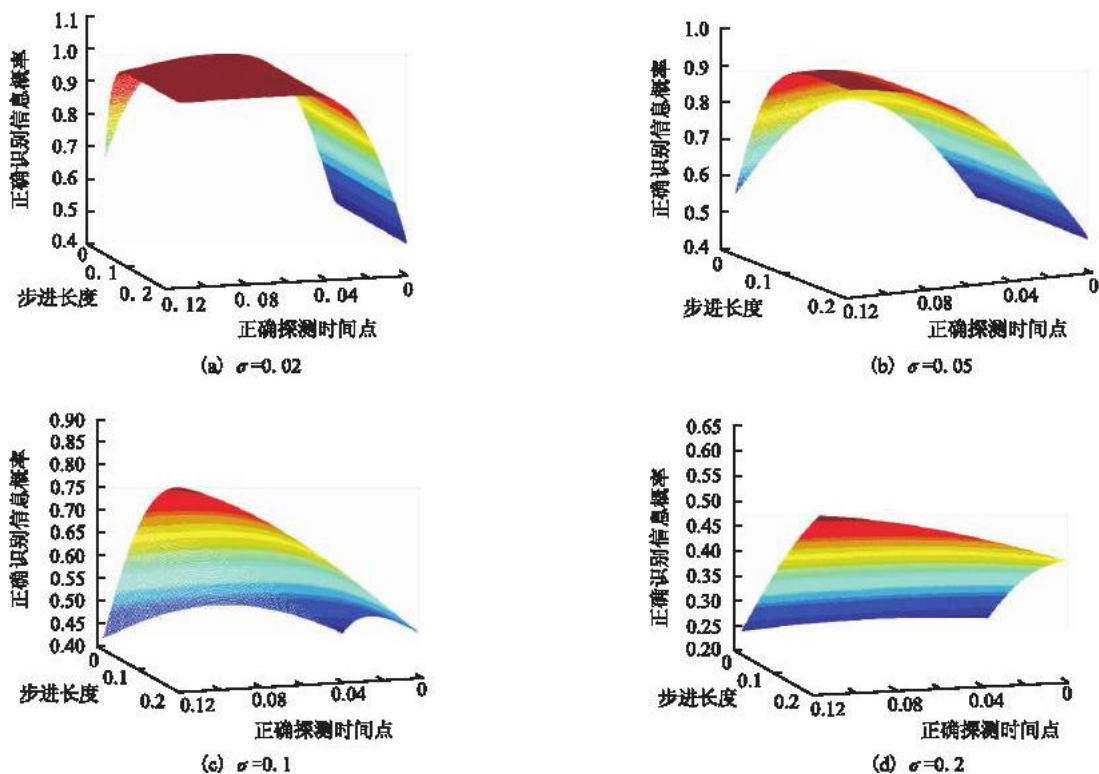


图4 不同位置探测概率与步进时长的关系

Fig.4 The relationship between probability of detection at different positions and step length

### 3 系统正确识别概率

如前文所述,系统通过判断一个扫描时间的长短来计算目标卫星到扫描圆心的距离。因此,要得出主动方在一个周期内正确识别时间信息的概率,只需要对一个扫描时长内的各扫描位置上的探测概率进行积分即可:

$$\rho_r = \int_0^{\frac{360}{v}t} \frac{v}{360} \int_{0-y}^{\frac{360}{v}-y+t} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx dy \quad (3)$$

式中: $v$ 为信标光扫描角速度, $t$ 为步进时长。

从上式中可以看出,识别概率 $\rho_r$ 大小与探测概率均方差,扫描速度以及步进长度均有关。图5(a)给出了在不同的扫描速度下识别概率与探测概率均方差的关系。可以看出,在 $\sigma$ 较低时,各扫描速度下系统均可达到极高的正确识别概率。随着 $\sigma$ 的升高,不同扫描速度的正确识别概率下降速度不同。当 $\sigma$ 达到0.1 s时,扫描速度为1 000°/s的时间信息识别概率为88.89%,而扫描速度为10 000°/s的时间信息识别概率仅为57.14%。

图5(b)为不同的步进时长下正确识别概率与探测概率均方差的关系,在 $\sigma$ 为0.004 s处时间识别概率均可达到最大值。当 $\sigma$ 增大时,识别概率随之减小,并且步进时长越长,识别概率越高。另外,容易注意到,图中左侧识别概率随着均方差的增加以极陡峭的斜率增长,这与识别概率方程相违背。通过分析认为这是由于使用的MATLAB仿真软件积分精度有限,在积分下限较小时无法正确得出计算结果。

为了便于分析仿真结果,将扫描速度为3 000°/s,步进时长为0.2 s条件下的部分识别精度对应得识别概率列表如下。

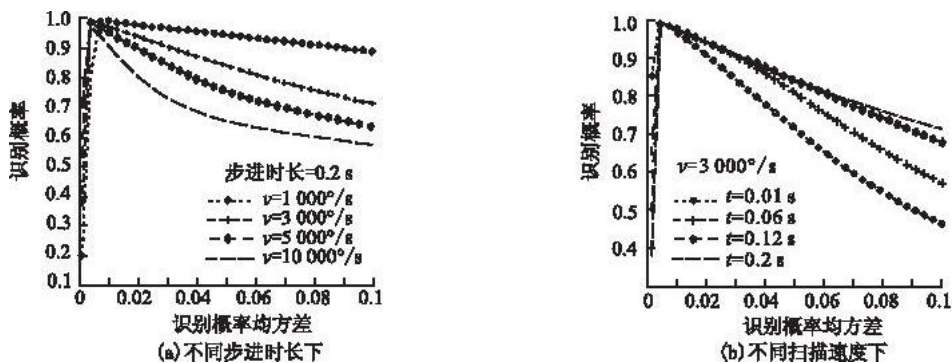


图 5 探测概率均方差与时间信息识别概率的关系

Fig. 5 The relationship between MSE of error probability and the time information recognition probability

表 1 部分探测概率均方差下的识别概率

Tab. 1 The recognition probability under part of the MSE of error probability

识别精度/ $10^{-3}$	1	4	5	10	22	31	46	64	100
识别概率(%)	37.76	99.29	98.96	97.30	93.31	90.32	85.38	79.95	71.31

由此可以得出以下结论,正确识别时间信息的概率随着  $\sigma$  取值的增大而减小,当  $\sigma$  取  $4 \times 10^{-3}$  s 时,识别概率为 99.29%;当  $\sigma$  取 0.01 s 时,识别概率为 97.30%;当  $\sigma$  取 0.031 s 以上时,识别概率开始下降到 90% 以下。从以上数据可以得出结论:全系统的探测精度只需要达到  $10^{-3}$  s 量级即可使得识别误差降到 1% 以下。在实际操作中,当探测概率均方差在  $4 \times 10^{-3}$  s 以下时,其他参数对识别概率的影响较小,可以适当提高扫描速度,减小步进长度以换取良好的捕获效率。当探测概率均方差上升至 0.01 s 左右时其他参数对识别概率的影响迅速增大,此时应当降低扫描速度,增加步进长度以满足捕获识别概率的需求。

## 4 结束语

本文对多光束连续扫描的卫星光通信捕获技术的系统容错性进行了研究,分析了扫描路径上不同位置的捕获概率,计算了全系统的容错性能。仿真结果表明,多光束连续扫描的卫星光通信捕获技术通过一个时间段来代表一个距离值的方案设计可以大大减少对主动方卫星探测灵敏度的要求。并且对于系统中产生的各种时间上的误差有一定的修正作用,该技术有效提高了系统的容错性和探测成功率。

## 参考文献:

- [1] Ulich Bobby L. Overview of acquisition, tracking, and pointing system technologies[J]. SPIE,1988,887:40-63.
- [2] 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,2005.  
LUO Tong. The research on acquisition and tracking technologies of ATP system in optical inter-satellite communications[D]. Chengdu:University of electronic science and technology of China,2005. (in Chinese)
- [3] 罗彤,胡渝,李贤,等. 星间光链路(OISLs)中捕获系统分析及仿真[J]. 应用光学,2002,23(1):6-9,17.  
LUO Tong, HU Yu, LI Xian, et al. Analysis and simulation on acquisition system for optical inter-satellite links[J]. Journal of applied optics,2002,23(1):6-9,17. (in Chinese)
- [4] Scheinfeild M, Kopeika N S. Acquisition system for microsattellites laser communication in space[J]. SPIE,2000,3932:166-175.
- [5] 赵顾颢. 基于多光束连续扫描的卫星光通信捕获技术研究[D]. 西安:空军工程大学,2009.  
ZHAO Guhao. Study of acquisition technology based on multi-beam continuous scanning of laser satellite communication[D]. Xi'an:Air force engineering university,2009. (in Chinese)
- [6] 赵顾颢,蒙文,李勇军,等. 一种新型的双光束扫描卫星光通信捕获技术[J]. 光学技术,2009,35(5):664-667.  
ZHAO Guhao, MENG Wen, LI Yongjun, et al. A new type of acquisition technology based on dual-beam scanning of laser satellite communication[J]. Optical technique,2009,35(5):664-667. (in Chinese)
- [7] 赵顾颢,蒙文,赵尚弘,等. 基于三束光连续扫描的卫星光通信捕获技术[C]//空军工程大学电讯工程学院 2009 年学术年会论文集. 西安:空军工程大学,2009:94-97.  
ZHAO Guhao, MENG Wen, ZHAO Shanghong, et al. Acquisition technology based on three beams scanning of laser satellite

communication[C]//Air force engineering university the telecommunication engineering institute, academic annual. Xi'an; Air force engineering university, 2009, 94-97. (in Chinese)

- [8] 李勇军, 赵尚弘, 胥杰, 等. 瑞利振动下空间光通信误码率研究[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2006, 7(5): 48-50.  
LI Yongjun, ZHAO Shanghong, XU Jie, et al. Research on BER of laser satellite communication system under Rayleigh vibration [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2006, 7(5): 48-50. (in Chinese)

(编辑: 徐楠楠)

## Analysis of Fault Tolerance of the Acquisition Technology Based on Beams Scanning of Laser Satellite Communication

ZHAO Gu-hao<sup>1</sup>, ZHAO Shang-hong<sup>1</sup>, MENG Wen<sup>1</sup>, WANG Xiang<sup>1</sup>, ZHU Zi-hang<sup>1</sup>, CHEN Chen<sup>2</sup>

(1. Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xian 710077, China; 2. Xi'an Institute of Measurement and Testing Technology, Xi'an 710068, China)

**Abstract:** The systematical error of the multi-beam continuum scanning of laser satellite communication mainly arises from the time information feedback and detection part. By analyzing the formula for computing the distance between the target location and the scanning centre, the variation trend of the detection probabilities on different scanning locations with the trend of MSE and the step length is drawn. A conclusion is found that arranging the area of the largest probability of the target satellite appearing on the later position of the scanning tracks can reduce errors happening. The digital simulation of identification probability in a scanning cycle shows that when the system time detection precision reaches  $4 \times 10^{-3}$  s, the error probability will be less than 1%.

**Key words:** satellite communication; acquisition; fault tolerance; identification probability

(上接第 11 页)

## Prognostic Framework and Approach for Electronic Equipments

LI Bin<sup>1,2</sup>, HU Lei-gang<sup>1</sup>, XIAO Ming-qing<sup>1</sup>

(1. Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Military Representative Office of Air Force Jiangsu, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** To treat with accumulative damage brought by environmental stress, a prognostic framework and a prediction method for electronic equipments are proposed, which cover the whole life cycle of the electronic equipments. The conception of prognostic capability is put forward for the first time. The design for prognostic ability is carried out by adopting auxiliary software eXpress at the design phrase of equipment. With the working data of equipment in practical environment, three improved neural networks are studied to predict the developing trend of characteristic parameters. By fusing single prediction methods with multi-rules, one combined fault prediction method based on information entropy theory is proposed to enhance the reliability of prediction results. The application of prognostic framework to one type of electronic equipment has verified the feasibility of the framework. And the prediction results show that the combined prediction method is stronger than single prediction methods in robust ability and stability.

**Key words:** fault prediction; prognostic capability; information entropy; combined forecast