

文章编号: 0258-7025(2004)08-0975-04

卫星间光通信中多场扫描捕获的仿真优化

陈云亮, 于思源, 马 晶, 谭立英, 王 骥

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 在实际的卫星间光通信中, 为保证对目标进行确定性捕获, 需要采用多场扫描方式。多场扫描范围是多场扫描捕获的关键性参数, 需要进行详细的分析。在已经建立的卫星光通信单场捕获模型的基础上, 首先对卫星间光通信的多场捕获扫描问题进行了理论分析和模型建立, 并以此为依据对多场扫描中的扫描范围的确定进行了研究。分析结果表明, 为获得最短的总平均捕获时间需要对扫描范围进行最优化选择。为了便于工程应用, 对此问题进行了数值仿真, 基于仿真结果给出了多场扫描捕获中最优化扫描范围的确定经验公式。

关键词 光通信; 卫星光通信; 多场分行扫描; 仿真

中图分类号 929.13 **文献标识码** A

Simulation and Optimization of Multi-Field Scanning Acquisition in Intersatellite Optical Communications

CHEN Yun-liang, YU Si-yuan, MA Jing, TAN Li-ying, WANG Qi

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract In the practice intersatellite optical communication (IOC), the method of multi-field scanning is needed to capture the goal satellite. And the scanning range is a key parameter of multi-field scanning, so the precise study of it is needed. Based on the constructed theoretical single-field scanning model, the theoretical analysis has been preceded and a theoretical model of multi-raster scanning has been founded too. According to this model, the results of analysis proved that there is an optimization in the selection of scanning range, in order to achieve a shortest acquisition time. And for the convenience in practice, a numerical simulation has been carried on. With the presented simulation results, an experimental formula to choose the optimum scanning range in multi-raster scanning has also been proposed.

Key words optical communication; intersatellite optical communications; multi-raster scanning; simulation

1 引 言

与微波通信相比, 卫星间光通信具有信息量大、天线体积小、抗干扰能力强以及保密性好等优点^[1]。美国、日本、欧洲等已全面开展了此方面的研究与试验^[2~4]。由于传输光信号束宽非常窄, 瞄准、捕获和跟踪(Pointing, Acquisition and Tracking, PAT)问题一直是卫星间光通信链路建立关键过程, 是进行后通信的起点, 因此 PAT 技术是卫星光通信的关键技术之一。

天线扫描捕获主要用于两星之间链路的建立以

及链路中断时的恢复。目前国外有关卫星光通信捕获的文献中多为系统原理结构和性能参数介绍, 对捕获和扫描中所存在的相关理论问题, 如捕获性能和扫描区域的相互制约关系等, 均未见报道。以色列的 Michael Scheinfeild 等提出了几种可应用于卫星间光通信的扫描方式^[5], 但对扫描方式的性能差别未进行分析。文献[6]建立了卫星间光通信中单场捕获的理论模型, 分析了扫描中影响捕获的主要因素, 如扫描范围、扫描行间距等。文献[7]研究了单场捕获过程中天线扫描方式的选择问题。这些工

收稿日期: 2003-04-03; 收到修改稿日期: 2003-05-23

作者简介: 陈云亮(1977—), 男, 哈尔滨工业大学物理电子学博士研究生, 主要从事卫星光通信相关研究。E-mail: lightlum@sohu.com

作中均只针对单场扫描问题进行分析,即分析通过设置单场扫描范围的大小来获得所要求的捕获概率,而没有考虑多场扫描问题。

在实际的卫星间光通信中,为保证对目标进行确定性捕获,需要采用多场扫描方式。多场扫描范围是多场扫描捕获的关键性参数。本文在上述工作的基础上,对卫星间光通信的多场捕获扫描问题进行了理论分析和模型建立,并以此为依据对多场扫描中的扫描范围的确定进行了研究。

2 多场扫描理论分析

多场扫描定义为:终端天线在一个预设的不确定性区域内对目标进行扫描,扫描过程中如果捕获目标立即转入捕获完成状态,否则重复进行单场扫描直到捕获目标。由此定义,多场扫描模型是建立在单场捕获理论的基础之上的。

影响捕获的主要因素有:瞄准误差、轨道误差、姿控误差、热形变误差、装配校正误差等。通常可以认为这些量之间是独立的,定义合成的角度偏差为固定偏移量 $\vec{\sigma}_i$ 。若假设这些误差独立且同分布,则根据中心极限定理, $\vec{\sigma}_i$ 在俯仰和方位角度方向的分量独立且符合标准正态分布,对应的二维概率分布函数为

$$f(\theta_v, \theta_h) = f(\theta_v) f(\theta_h) = \frac{1}{2\pi\sigma_v\sigma_h} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\theta_v^2}{\sigma_v^2} + \frac{\theta_h^2}{\sigma_h^2}\right)\right] \quad (1)$$

其中, σ_v 和 σ_h 分别为误差量在两个角方向上的均方差。通常在俯仰和方位两个角方向的分布函数是对称的,即 $\sigma_v = \sigma_h = \sigma_\theta$ 。设固定偏移量 $\vec{\sigma}_i$ 取值的二维概率分布函数为 $f(\theta_v, \theta_h)$, 与扫描角度量有关的捕获天线扫描时间函数为 $T(\theta_v, \theta_h)$ 。单场天线扫描捕获的捕获概率 P_s 和平均捕获时间 ET_s 分别为

$$P_s = \iint_{\Omega_u} f(\theta_v, \theta_h) d\theta_v d\theta_h \quad (2)$$

$$ET_s = ET(\theta_v, \theta_h) = \iint_{\Omega_u} T(\theta_v, \theta_h) f(\theta_v, \theta_h) d\theta_v d\theta_h \quad (3)$$

其中, Ω_u 为扫描的角度范围。在实际情况中每一个单场扫描目标位置的随机变量可以被认为是独立同分布的。这样对于多场捕获情况,将多场扫描看作是多个单场扫描的顺次进行。以 A_i 表示第 i 场扫描捕获成功的事件, \bar{A}_i 表示第 i 场扫描捕获失败的事件, 则多场扫描捕获成功的事件为

$$B_n = A_1 + \bar{A}_1 A_2 + \dots + \bar{A}_1 \bar{A}_2 A_3 + \dots + \bar{A}_{n-1} A_n \quad (4)$$

可得到多场扫描捕获成功的概率为

$$P_M = P(B_n) = P(A_1) + P(\bar{A}_1 A_2) + \dots + P(\bar{A}_1 \bar{A}_2 \dots \bar{A}_{n-1} A_n) \quad (5)$$

由于多场扫描中各个场次的捕获过程是相互独立的,则(5)式还可以表示为

$$P_M = P(A_1) + P(\bar{A}_1)P(A_2) + \dots + P(\bar{A}_1)P(\bar{A}_2)\dots P(\bar{A}_{n-1})P(A_n) \quad (6)$$

设各个场次扫描的范围和方式相同,考虑式(2),最终可得出多场扫描捕获成功概率的表达式

$$P_M = \sum_{i=1}^n P_s (1 - P_s)^{i-1} \quad (7)$$

多场扫描的平均捕获时间 ET_M 为

$$ET_M = E(T_1 | A_1) + E(T_2 | \bar{A}_1, A_2) + \dots + E(T_n | \bar{A}_1, \bar{A}_2, \dots, \bar{A}_{n-1}, A_n) \quad (8)$$

若单场的全场扫描时间为 T_u , 则

$$ET_M = ET_s P_s + (T_u + ET_s)(1 - P_s)P_s + \dots + [(n-1)T_u + ET_s](1 - P_s)^{n-1} P_s \quad (9)$$

当扫描场次 $n \rightarrow \infty$ 时,多场扫描的捕获成功概率 $P_M \rightarrow 1$, 则

$$ET_M = ET_s P_s + \sum_{i=2}^{\infty} [ET_s + (i-1)T_u] \times (1 - P_s)^{i-1} P_s \quad (10)$$

由于 $0 < P_s < 1$, (10) 式中的级数是收敛的,因此

$$ET_M = ET_s + \left(\frac{1 - P_s}{P_s}\right) T_u \quad (11)$$

3 数值仿真优化

由式(11)可以看出,多场捕获扫描的平均捕获时间与各个单场扫描的平均捕获时间和捕获概率有关。以分行扫描为例进行分析,图 1 给出了单场分行扫描光束捕获天线视场中心的扫描轨迹示意图。

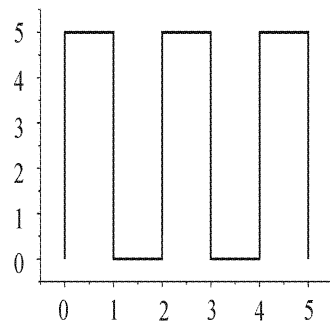


图 1 扫描轨迹示意图

Fig. 1 Diagram of scanning path

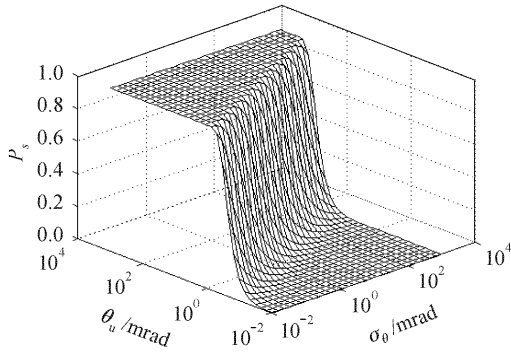


图 2 单场扫描概率分布

Fig. 2 Probability distribution of single-field scanning

以扫描范围的中心为原点,以扫描在俯仰和方位两个方向的角位移为坐标轴,建立平面直角坐标系。设单场扫描的角度范围为立体角 Ω_u ,对应的平面角为 θ_u 。根据文献[6]的结果,可由式(1)和(2),得到单场捕获的概率式(12),数值计算结果如图 2。

$$P_s = 1 - \exp\left(-\frac{\theta_u^2}{8\sigma_\theta^2}\right) \quad (12)$$

由图 2 可见,单场捕获概率 P_s 随单场扫描范围 θ_u 的增加而增加。但当扫描范围增加到一定水平时(相应于图中的转折点),捕获概率的增加趋缓。亦即单场扫描时加大扫描范围可以提高单场捕获概率,但 θ_u 增加到一定值以后, P_s 受加大扫描范围的影响不大。

当捕获探测器视阈中心的坐标为 (θ_v, θ_h) 时,分行扫描的时间函数为^[7]

$$T(\theta_v, \theta_h) \approx \frac{1}{V_{\text{scan}}} \begin{cases} \frac{1}{2} \left(\frac{\theta_u + 2\theta_v}{I_\theta} \theta_u + \theta_u - 2\theta_h \right) & \theta_h \downarrow \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\theta_u + 2\theta_v}{I_\theta} \theta_u + \theta_u + 2\theta_h \right) & \theta_h \uparrow \end{cases} \quad (13)$$

式中 V_{scan} 为扫描的角速率, I_θ 为扫描的行间距, $\theta_h \downarrow$ 和 $\theta_h \uparrow$ 分别表示当前时刻方位角减少和增加两种情况。将式(13)代入式(3),可求得单场分行扫描的平均捕获时间表达式(14),数值计算结果见图 3。

$$ET_s = \frac{\theta_u^2 + 2\theta_u I_\theta}{2I_\theta V_{\text{scan}}} \left[1 - \exp\left(-\frac{\theta_u^2}{8\sigma_\theta^2}\right) \right] \quad (14)$$

图 3 中可以看出单场平均捕获时间也存在转折点,这说明扫描过程中存在优化的可能, ET_s 随目标不确定范围的增加而降低。需要明确的是,实际系统设计是根据一定的捕获概率确定扫描范围的, ET_s 随 σ_θ 的增加而减小的实质是捕获概率的降低。

由(12)式可以看出为保证更高的单场扫描捕获概率,需要增大扫描范围 θ_u 。又由(13)式, θ_u 的增加

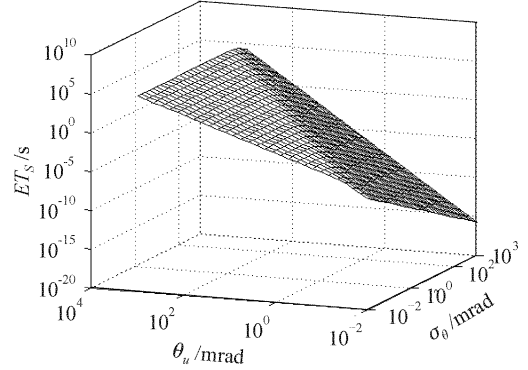


图 3 单场平均捕获时间

Fig. 3 Mean acquisition time ET_s of single-field scanning

将引起单场扫描时间 T_u 的增加。由(11)式,多场扫描平均捕获时间受 P_s 和 T_u 两者制约。从物理意义解释,即扫描范围过小,则单场捕获概率过低,故需要进行更多场次的扫描;扫描范围过大,扫描场次将降低,但每场扫描时间增加从而导致多场扫描时间增加。因此,多场捕获与单场捕获最大的不同就在于存在一个最优的扫描范围使得相同概率分布下多场扫描平均时间最小,即扫描范围的最优化问题。

为解最优化问题,可将(12),(14)式代入(11)式并取 $T_u = T(\theta_u/2, \theta_u/2)$ (假设方位角增加时单场扫描完成),得到 ET_M 再对 θ_u 求偏导,令其等于 0

$$\frac{\partial ET_M(\theta_u)}{\partial \theta_u} = \frac{1}{2I_\theta V_{\text{scan}}} \frac{\partial}{\partial \theta_u} \left\{ (\theta_u^2 + 2I_\theta \theta_u) P_s(\theta_u) + 2(\theta_u^2 + I_\theta \theta_u) \left[\frac{1 - P_s(\theta_u)}{P_s(\theta_u)} \right] \right\} = 0 \quad (15)$$

对方程(15)求解即可得到 θ_u 的最优解,但显然方程为一超越方程,很难求到解析解。因此以 $ET_M(\theta_u)$ 为目标函数,进行非线性目标函数的一维最优化搜索,得到确定概率分布下的最优化结果 θ_u 和 ET_M 。为选择优化算法首先计算 ET_M 如图 4,计算中取参数为 $V_{\text{scan}} = 6$ mrad/s, $I_\theta = 0.6$ mrad, $\sigma_\theta = 0 \sim 70$ mrad, $\theta_u = 0.01 \sim 1000$ mrad。

由图 4 可见,在通常实际系统参数范围内,平均捕获时间为单峰函数,所以选择共轭梯度法来进行最优化搜索,这样可以保证在良好的最优化结果的同时有高的收敛速度,平均捕获时间 ET_M 最优化结果如图 5,最优化扫描范围 θ_u 见图 6。

由图 5 可见,随 σ_θ 的增大,平均捕获时间 ET_M 增加。这说明,在最优化情况下,随目标分布不确定性的增加,平均捕获时间呈现近线性增加,这是由其物理本质所决定的。从图中还可以得到,随扫描行间距 I_θ 增加, ET_M 急剧减小,这说明增大扫描间隔可

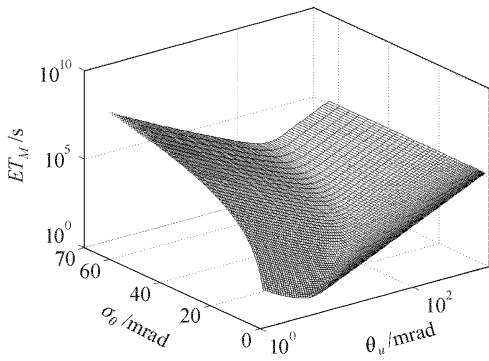


图 4 多场扫描平均捕获时间

Fig. 4 Mean acquisition time of multi-field scanning

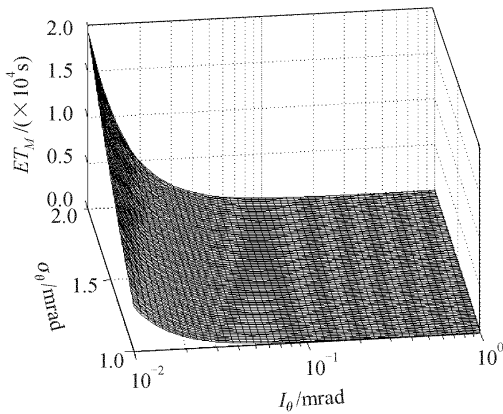


图 5 最优化多场扫描平均捕获时间

Fig. 5 Optimum mean acquisition time of multi-field scanning

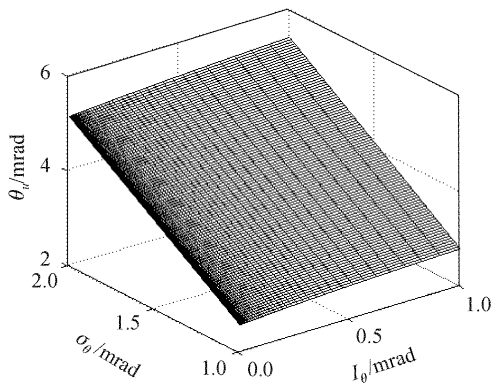


图 6 最优平均捕获时间下的最优扫描范围

Fig. 6 Optimum scan area at optimum mean acquisition time

以明显降低平均捕获时间。需要明确的是, I_θ 的确定必须满足在一定光斑大小的情况下对扫描范围全覆盖, 可以近似认为 I_θ 与光束束宽成正比, 增大 I_θ 需加大光束束宽。由于星间距离通常在 10^6 m 以上, 因此增大 I_θ 将导致接受端光强度急剧下降。所以,

在实际终端设计中通常根据满足接收探测器灵敏度条件确定光束束宽和扫描行间距 I_θ 。对捕获性能的控制将通过扫描范围 θ_u 最优化实现, 即图 6 所示结果。

图 6 中不同的扫描行间距下最优扫描范围变化不明显。由图 6 中还可以看出, 最优 θ_u 与 σ_θ 近似呈线性关系。根据(15)式, θ_u 最优化结果仅与 σ_θ 和 I_θ 有关, 利用计算结果对 σ_θ 进行线性拟合, 对 I_θ 进行二次多项式拟合可以得到如下公式

$$\theta_u = 2.55\sigma_\theta + 0.34I_\theta - 0/13I_\theta^2 \quad (16)$$

利用(16)式可以在实际卫星光通信系统设计中确定最优扫描范围。(16)式在 $I_\theta < 1$ mrad 范围内误差平均值为 9.56×10^{-3} mrad, 标准偏差 1.02×10^{-2} mrad。由(16)式估算值所对应的平均捕获时间与最优捕获时间之间误差的平均值为 5.41×10^{-4} s, 标准偏差为 3.63×10^{-4} s。

4 结 论

通过建立多场扫描理论模型, 并对理论模型进行分析可知多场扫描中为了使总扫描时间最小化需要对扫描范围进行优化。通过数值仿真的结果分析给出了多场扫描中扫描范围优化选取的经验公式, 由此公式可以确定在实际卫星光通信系统设计中相应的系统参数。

参 考 文 献

- 1 Robert G. Marshalek, G. Stephen Mecherle, Paul R. Jordan. System-level comparison of optical and RF technologies for space-to-space and space-to-ground communication links circa 2000 [C]. *SPIE*, 1996, **2699**:134~145
- 2 Shinhak Lee, James W. Alexander, Muthu Jeganathan. Pointing and tracking subsystem design for optical communications link between the international space station and ground [C]. *SPIE*, 2000, **3932**:150~157
- 3 Keizo Nakagawa, Akio Yamamoto. Performance test result of LUCE (laser utilizing communications equipment) engineering model [C]. *SPIE*, 2000, **3932**:68~76
- 4 Caroline Racho, Angel Portillo. Characterization and design of digital pointing subsystem for optical communication demonstrator [C]. *SPIE*, 1999, **3615**:250~262
- 5 Michael Scheinfeld, N. S. Kopeika, Raviv Melamed. Acquisition system for microsatellites laser communication in space [C]. *SPIE*, 2000, **3932**:166~175
- 6 Yu Siyuan, Ma Jing, Tan Liying *et al.*. Experimental study of acquisition with antenna scanning in intersatellite laser links [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(6):498~502
- 7 Yu Siyuan, Gao Huide, Ma Jing *et al.*. Selection of acquisition scan methods in intersatellite optical communications [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **B11**(5):364~368