

星间光通信无信标捕跟瞄技术

国爱燕,高文军,周傲松,程竟爽,何善宝

(北京空间飞行器总体设计部,北京 100094)

摘要: 无信标捕跟瞄技术以通信光为信标光,无需额外的信标光激光器,在重量和功耗受限的卫星光通信应用中更具优势。针对低轨小卫星平台星间光通信,对直接探测方式下的捕跟瞄链路进行功率预算分析,研究光通信终端的无信标捕跟瞄技术,设计捕跟瞄流程,并深入分析视轴抖动对捕获时间和捕获概率的影响,提出剩余不确定区域计算方法。结果表明:所设计的无信标捕跟瞄方法所需最大激光发射功率为 0.135 W,捕获时间为 30 s,捕获概率为 95%,能够满足低轨星间光通信链路要求。

关键词: 星间; 光通信; 捕跟瞄; 无信标; 链路预算

中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1022002

Beaconless acquisition tracking and pointing of inter-satellite optical communication

Guo Aiyan, Gao Wenjun, Zhou Aosong, Cheng Jingshuang, He Shanbao

(Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: As beaconless acquisition tracking and pointing (ATP) uses the same laser beam with communication, and needs no more extra laser equipment, it has advantages in inter-satellite optical communication application which limits weight and power consumption of laser communication terminals. For scenario of low earth orbit inter-satellite optical communication, beaconless ATP of small optical terminals based on intensity modulation and direct detection was studied. The link budget was calculated, and the ATP procedure was designed. The effect of boresight vibration on acquisition time and acquisition probability was analyzed, and the method of residual uncertainty cone calculation was presented. It shows that the maximum laser transmitting power required is 0.135 W, and beaconless acquisition time is 30 s with acquisition probability of 95%, which can meet requirements of low earth orbit inter-satellite optical communication links.

Key words: inter-satellite; optical communication; ATP; beaconless; link budget

收稿日期:2017-02-14; 修订日期:2017-03-21

基金项目:国家科技重大专项(GFZX0301010518-01)

作者简介:国爱燕(1984-),女,博士,主要从事卫星光通信方面的研究。Email: guoaiyan@126.com

0 引言

目前光通信系统的捕获方式主要分为两种:有信标和无信标。有信标指的是光通信终端发出的定位对方终端的信标光与通信光不同,仅用于捕跟瞄,是目前主要采用的捕获方式^[1-2]。无信标则是信标光与通信光相同,以通信光本身为信标光进行捕跟瞄。由于无信标捕跟瞄不需要额外的信标光激光器,能够减少激光通信终端的重量和功耗,在卫星光通信应用,特别是低轨小卫星平台光通信应用中更具优势。但是,由于通信光束散角比信标光小,在有限时间内完成不确定区域扫描、实现可靠捕获的难度更大,目前只有德国 TESAT 进行了星间无信标捕跟瞄的在轨验证试验^[3]。

TESAT 开发了二进制相移键控(BPSK)调制/相干检测的激光通信终端,工作波长 1 064 nm,口径 125 mm,峰值发射功率 0.8 W。2008 年 2 月 21 日开始,搭载该终端的德国合成孔径雷达卫星 TerraSAR-X 与美国的近红外试验卫星 NFIRE 进行星间通信试验。TerraSAR-X 和 NFIRE 共进行了 55 次 LEO-LEO 星间双向通信试验,每次通信链路的持续时间在 50~650 s 之间,链路距离最远为 4 900 km,初次捕获的不确定区域范围最大为 1 mrad,经过在轨修正后,不确定区域减小到 141 μ rad,平均捕获时间接近 59 s,其中,不确定区域扫描时间为 30 s,零差 BPSK 相位锁定时间为 28~29 s^[4-5]。

在低轨小卫星平台应用中,为了减小光通信终端复杂度,一般采用强度调制直接探测体制,在捕跟瞄过程中无需相位锁定,但接收灵敏度低于相干检测。

针对强度调制直接探测体制光通信终端,开展无信标捕跟瞄技术研究。通过分析低轨星间光通信可见时间,提出捕获时间要求,在 TESAT 的无信标捕跟瞄方法基础上,深入分析视轴抖动对不确定区域扫描时间和捕获概率的影响,提出剩余不确定区域计算方法,并针对直接探测情况下无信标捕跟瞄链路进行功率预算分析。

1 低轨星间光通信捕获时间要求

假设将要建链的光通信终端 A 与终端 B 完全

相同,所搭载的卫星平台也相同,只有轨道参数不同。卫星与终端本体坐标系定义如图 1 所示。卫星本体坐标系原点为卫星质心,Z 轴指向地心,X 轴垂直于卫星底面,指向运动方向,Y 轴由右手定则确定。终端安装在 X 面中心,原点为终端质心,Z 轴与卫星本体坐标系的 X 轴重合,Y 轴与卫星本体坐标系的 Y 轴重合,X 轴由右手定则确定。

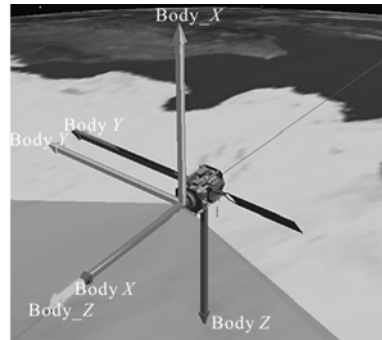


图 1 卫星和终端本体坐标系

Fig.1 Body fixed coordinates of satellite and laser communication terminal

搭载终端 A 的卫星轨道高度 500 km,倾角 97°,升交点赤经 86°E。搭载终端 B 的卫星轨道高度 772 km,倾角 98°,升交点赤经 128°。终端 A 和终端 B 的扫描范围为终端本体坐标 Z 向半球空间,星间作用距离小于等于 5 100 km。

利用 Satellite Tool Kit 对终端 A 和终端 B 的可见时间进行分析。在共计 82 天的时间段内,可见次数为 152 次,平均 1 天的可见次数为 1.85 次,连续两次可见时间间隔最短为 34 min。可见时间最短为 22.9 s,最长为 1 355.9 s,平均时间为 828.3 s,可见时间的累积概率分布如图 2 所示。假设要求可见次数中 80% 可用,则可见时间小于 391 s,如通信时间为 360 s,则捕获时间不应超过 31 s。

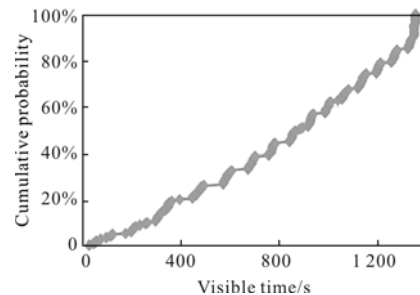


图 2 可见时间及其累积概率分布

Fig.2 Visible time and its cumulative probability distribution

2 捕跟瞄链路功率预算

强度调制直接探测链路方程为^[6-7]:

$$P_{rb}=P_{ib}\eta_{ib}G_{ab}L_{sb}G_{rb}\eta_{rb}\tau_{jb} \quad (1)$$

式中: P_{rb} 为探测器平均接收光功率; P_{ib} 为激光器的平均出瞳功率; η_{ib} 为发射光学系统效率,包括发射光路中各透镜组件的透过率、光束整形和耦合、相差引起的波前损失及望远镜系统遮拦等影响。通常情况下发射光学系统效率在 0.4~0.7 之间,在文中设为 0.5; G_{ib} 为发射光学天线增益; τ_{ab} 为传输路径上的大气损耗; L_{sb} 为自由空间传输损耗; G_{rb} 为接收光学天线增益; η_{rb} 为接收光学系统效率,接收的激光光束需要经过望远镜组件、反射镜、分光片、滤光片等,各环节都存在吸收与散射,以及空间光栏损耗等,取为 0.2; τ_{jb} 为指向误差损耗。

链路余量 LM 可表示为:

$$LM=P_{rb}-SNR\times P_s \quad (2)$$

式中: SNR 为探测器信噪比; P_s 为探测器灵敏度,InGaAs APD 在响应时间为 10 μ s 时的灵敏度为 -75 dBm^[8]。

探测器的信噪比要求取决于虚警率和探测概率要求,可利用宽带系统瞬时探测概率对虚警概率和探测概率进行分析。

探测器噪声电流服从标准正态分布^[9]:

$$p(i_n)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n}\exp\left(-\frac{i_n^2}{2\sigma_n^2}\right) \quad (3)$$

式中: σ_n 为噪声均方根, i_n^2/σ_n^2 等于信噪比 SNR 。

探测器的虚警概率为噪声电流大于阈值电流 I_{th} 的概率,可表示为:

$$p_{fa}=\int_{I_{th}}^{\infty} p(i_n)di_n=\int_{I_{th}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n}\exp\left(-\frac{i_n^2}{2\sigma_n^2}\right) di_n= \frac{1}{2}\operatorname{erfc}\left(\frac{I_{th}}{\sqrt{2}i_n}\right) \quad (4)$$

探测器的检测概率为信号电流 i_s 与噪声电流 i_n 之和大于 I_t 的概率,即 $i_s+i_n>I_t$,即 $i_n>I_t-i_s$,同理可得:

$$p_d=\int_{I_t-i_s}^{\infty} p(i_n)di_n=\int_{I_t-i_s}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n}\exp\left(-\frac{i_n^2}{2\sigma_n^2}\right) di_n= \frac{1}{2}\operatorname{erfc}\left(\frac{I_t-i_s}{\sqrt{2}i_n}\right) \quad (5)$$

由公式(4)和公式(5)可得,虚警概率为 10^{-3} ,探测概率为 99.99%时,所需 SNR 为 7。

工作波长为 1 550 nm、链路距离为 5 100 km 时,捕跟瞄的链路功率预算情况如表 1 所示(表 1 中,Tx 表示发射,Rx 表示接收),发射功率为 0.135 W 时,链路余量为 3.09 dB。其中,发射指向误差指的是在捕获过程中,高斯形光束的边缘刚刚进入探测器视场与光束中心对准探测器视场的增益差值。

表 1 捕跟瞄链路功率预算

Tab.1 ATP link power budget

Parameter	Value
Tx average power/W	0.135
Tx transmission loss	0.5
Tx diameter/m	0.1
Wavelength/mm	1 550
Tx antenna gain/dB	106
Range/km	5 100
Isotropic space loss/dB	-272
Rx antenna diameter/m	0.1
Rx antenna gain/dB	106
Rx transmission loss	0.2
Tx pointing loss/dB	-8.7
Ave power at Rx detector/dBW	-88.74
Pixels covered/dBW	4
Ave power at each detector/dBW	-93.46
Signal to noise ratio	7
Sensitivity of APD/dBW	-105
Link margin/dB	3.09

3 无信标捕跟瞄流程

捕跟瞄步骤包括:引导、捕获、跟踪、测量和瞄准,通常将上述过程称为 ATP。在光通信中,跟踪过程又细分为粗跟踪和精跟踪。

无信标 ATP 以信号光为信标光,以下统称为光束。由于光束发散角小于捕获不确定区域,光束需要在捕获不确定区域内扫描,同时为缩短捕获时间、简化捕获流程,要求捕获探测器视场角大于捕获不确定区域,即采用凝视-扫描捕跟瞄方式,捕跟瞄流程

如图 3 所示,分为 4 个步骤。

步骤 1(引导):根据预定参数,终端 A 指向终端 B,终端 B 指向终端 A,二者连线位于捕获不确定区

域内。

步骤 2(捕获):终端 A 发射光束 A,按照预定顺序由内至外在捕获不确定区域内扫描,终端 B 凝视探

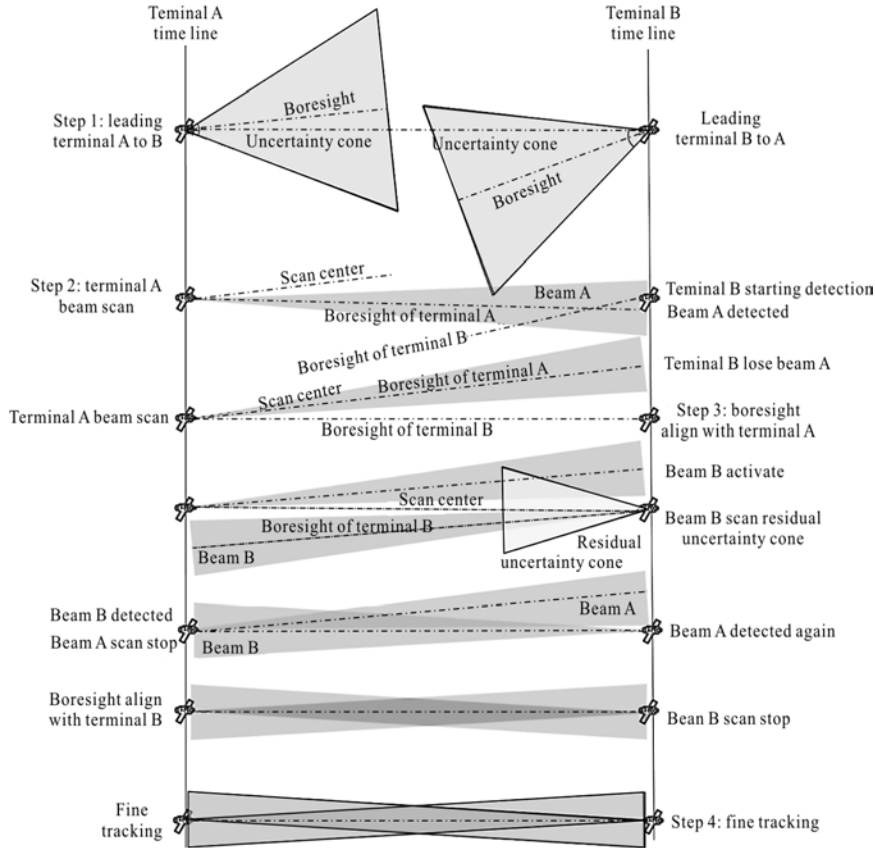


图 3 无线标捕跟瞄流程示意图

Fig.3 Schematic diagram of beaconless ATP procedure

测。一旦光束 A 进入终端 B 探测器,立刻被捕获到。

步骤 3(粗跟踪):终端 B 根据探测到的光束 A,调整视轴指向终端 A,启动光束 B 回射,并利用光束 B 扫描剩余不确定区域。终端 A 的光束 A 继续扫描,一旦探测到光束 B 立即停止扫描,调整视轴指向终端 B。

步骤 4(精跟踪、瞄准):终端 A 和终端 B 根据对方光束调整视轴指向,不断提高对准精度,直到光束满足通信要求。

4 捕获概率与捕获时间

在文中认为捕获过程从步骤 2 开始,到步骤 4 结束,要求总捕获概率大于 95%,总捕获时间小于 31 s。步骤 4 的捕获概率接近 1,捕获时间与步骤 2 和步骤 3 相比可忽略不计,因此主要针对步骤 2 和

步骤 3 的扫描时间和捕获概率进行分析。

4.1 步骤 2 的扫描时间与捕获概率

在步骤 2 中,光束 A 采用螺旋光栅复合方式扫描不确定区域,如图 4 所示。图中小圆圈为光束覆盖

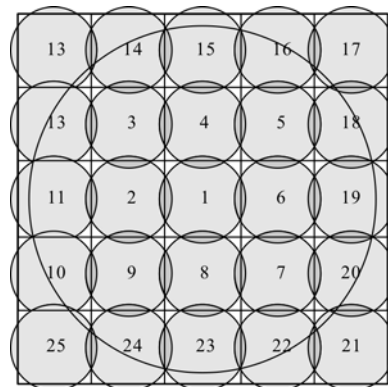


图 4 螺旋光栅复合扫描,重叠系数 15%

Fig.4 Spiral-raster scan, k_{oi} equals to 15%

范围,大圆圈为不确定区域范围,正方形及序号表示由内至外的扫描顺序。为减小视轴抖动的影响,两个光束覆盖范围的重叠区域应大于视轴抖动方差。

螺旋光栅方式的扫描时间可表示为:

$$T_{acp} = \left[\left(\text{roundup} \left(\frac{\theta_u}{\theta_b(1-k_{ol})} \right) \right)^2 \cdot T_d + T_{md} \right] N_t \quad (6)$$

式中: θ_u 为不确定区域范围; θ_b 为光束发散角; roundup 表示向上取整; k_{ol} 为重叠系数; T_d 为每个扫描位置的驻留时间,取决于电机扫描速度和捕获探测器响应时间; T_{md} 为从视轴从最后一个扫描位置回到初始位置所需的时间,取决于电机扫描速度; N_t 为扫描次数,为了提高扫描覆盖率,有时需要进行多次扫描。

根据在轨测量结果,光通信视轴抖动方差为 2~6.8 μrad 之间^[4-5]。为避免视轴抖动引起的失捕,取两个连续扫描的光束重叠角度为 6.8 μrad , 则重叠系数 $k_{ol}=6.8/\theta_b$ 。

为了实现快速扫描和捕获,在无信标捕跟瞄中通过精跟踪快速反射镜控制光束扫描,即振镜扫描,这就要求不确定区域不得大于振镜扫描范围。目前振镜偏转量程可达到 ± 1 mrad, 谐振频率大于 2 kHz, 则扫描速度大于 2 rad/s, 扫描时间为 $\theta_b/(2 \times 10^6)$ [s]^[10]。

捕获和精跟踪探测器均采用 InGaAs APD 光电二极管阵列,其响应时间可达到亚纳秒级,但响应时间越短,灵敏度越低,因此 APD 的响应时间不宜过短。在无信标捕跟瞄过程中对光束进行强度调制,调制速率不超过 0.1 Mbps, APD 响应时间为 10 μs , 每个扫描位置的脉冲数为 1 000 个,则驻留时间 $T_d = \theta_b / (2 \times 10^6) + 1\,000 \times 10^{-6}$ [s], 返回时间 $T_{md} = \theta_u \times \sqrt{2} / 2 / (2 \times 10^6)$ [s]。

为控制星载终端的体积和重量,假设星载终端光学口径为 100 mm, 其理想衍射极限角为 19.72 μrad , 由于像差、加工装配误差的影响,实际光束发散角都要大于理想衍射极限角,文中取光束发散角为衍射极限角的 1.08 倍,即 21.3 μrad 。

单次扫描时,捕获不确定区域与扫描时间的关系如图 5 所示,只有在不确定区域小于等于 797 μrad 时扫描时间才小于等于 31 s。

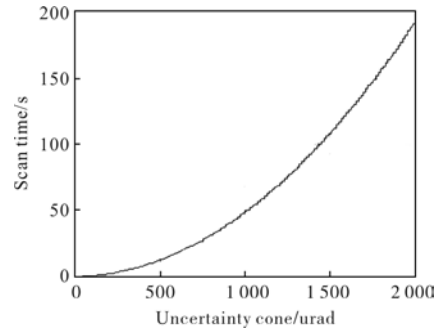


图 5 捕获不确定区域与扫描时间

Fig.5 Scan time verses uncertainty cone

捕获概率可表示为:

$$P_{acq} = P_u \times P_s \times P_D \quad (7)$$

式中: P_u 为不确定区域对目标视场覆盖率; P_D 为捕获探测器概率; P_s 为扫描过程视场覆盖率,与扫描方式和视轴抖动有关。

取视场覆盖率 $P_u=98.89\%$ ^[1], 探测概率 $P_D=99.99\%$ 。要使捕获概率大于 95%, 由公式(1)可得扫描的视场覆盖率 P_s 应大于 0.960 7。

在不考虑视轴抖动的情况下,螺旋光栅扫描的 P_s 可表示为(图 6):

$$P_s = 1 - \frac{(1-k_{ol}-\sin(\angle BOE))(1-k_{ol})-\angle BOA}{(1-k_{ol})^2} \quad (8)$$

式中: $\angle BOE = \arccos(1-k_{ol}/2)$; $\angle BOA = \pi/4 - \angle BOE$ 。

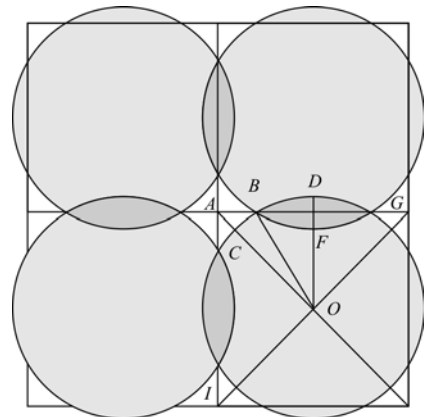


图 6 视场覆盖几何关系

Fig.6 Geometric relationship of scan coverage

由公式(8)可知,视场覆盖率只与重叠系数 k_{ol} 有关, k_{ol} 越大, P_s 越大。在 $\theta_u=797 \mu\text{rad}$ 、 $\theta_b=21.3 \mu\text{rad}$ 、 $k_{ol}=0.21$ 时,由公式(8)可得 $P_s=1$ 。考虑 6.8 μrad 视轴抖动后的视场覆盖情况如图 7 所示,此时 $P_s=98.25\%$, 则

由公式(2)可得步骤 2 的捕获概率为 97.15%。

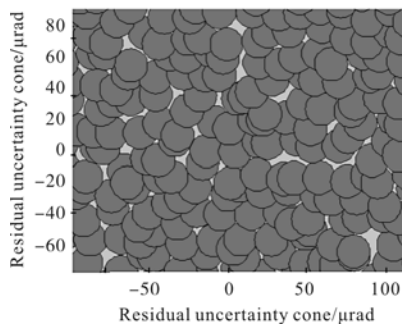


图 7 步骤 2 视场覆盖情况(局部)

Fig.7 Scan coverage (part) of step 2

4.2 步骤 3 的扫描时间与捕获概率

步骤 3 的捕获时间以终端 B 探测到光束 A 开始,到终端 A 探测到光束 B,停止扫描,再次将光束 A 指向终端 B 结束。在这个过程中,终端 A 和终端 B 同时在扫描,终端 A 扫描捕获不确定区域,终端 B 扫描剩余不确定区域。终端 A 的扫描时间恰好等于单次捕获不确定区域扫描的时间,终端 B 的扫描时间主要取决于剩余不确定区域的大小。

终端 B 根据探测器中光束 A 的位置,考虑提前指向角后,启动光束 B 回射。在不考虑视轴抖动的情况下,光束 B 应该能够准确指向终端 A 的位置,但受到视轴抖动的影响,实际上光束 B 的指向仍存在一定误差,这就导致存在剩余不确定区域。

假设视轴抖动方差为 σ ,则剩余不确定区域的大小可表示为:

$$\theta_{r-u}=2K\sigma \quad (9)$$

式中:常数 2 表示考虑正负两端分布; K 为包含因子, $K=2$ 时包含概率为 95%, $K=3$ 时包含概率为 99%。

已知要求总的捕获概率大于 95%,步骤 2 的捕获概率为 97.6%,则步骤 3 的捕获概率应大于 97.34%,因此包含因子 $K=3$ 。取视轴抖动方差 $\sigma=6.8 \mu\text{rad}$,则剩余不确定区域 $\theta_{r-u}=40.8 \mu\text{rad}$ 。

在 $\theta_b=21.3 \mu\text{rad}$ 、 $k_a=0.21$ 时,由公式(1)可得终端 B 单次扫描剩余不确定区域的时间为 0.132 s。

取视场覆盖率 $P_u=99\%$ 、探测概率 $P_D=99.99\%$ 。要使步骤 3 的捕获概率大于 97.34%,视场覆盖率应大于 98.3%。考虑视轴抖动后终端 B 扫描的视场覆盖情况如图 8 所示,视场覆盖率为 96.05%,显然无法满足要求。

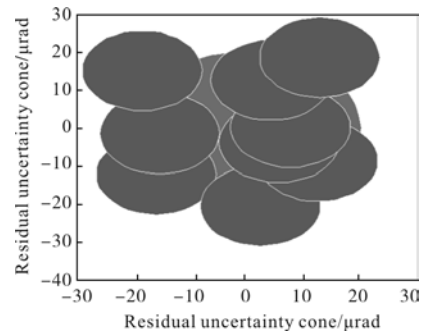


图 8 步骤 3 视场覆盖情况

Fig.8 Scan coverage of step 3

为提高扫描视场覆盖率,增加扫描次数,扫描次数为 2 时的视场覆盖率可达到 99.57%,则步骤 3 的捕获概率为 98.5%。

4.3 总捕获时间与总捕获概率

总的捕获时间为步骤 2 与步骤 3 扫描时间之和。捕获不确定区域为 $797 \mu\text{rad}$ 时,步骤 2 的扫描时间为 31 s,步骤 3 中终端 A 和终端 B 同时扫描,终端 A 扫描时间为 31 s,终端 B 扫描 2 次时间为 0.264 s,取其中较长时间,则步骤 3 扫描时间与步骤 2 相同,均为 31 s,总捕获时间为 $2 \times 31 = 62 \text{ s}$,显然无法满足小于 31 s 的要求。

针对上述问题,需通过减小不确定区域的方法缩短终端 A 的扫描时间,只要终端 A 单次扫描时间小于 $31/2=15.5 \text{ s}$,则总捕获时间就小于 31 s。由图 5 可知,捕获不确定区域为 $565 \mu\text{rad}$ 时,单次扫描时间为 15.23 s,则总捕获时间为 30.46 s,满足捕获时间小于 31 s 的要求。目前光通信终端入轨后的捕获不确定区域 $\sim 10 \text{ mrad}$,利用星地链路进行在轨指向误差修正后,捕获不确定区域可达到 $500 \sim 800 \mu\text{rad}$,因此能够满足星间无信标捕跟瞄要求^[4,11]。

总捕获概率为步骤 2 与步骤 3 捕获概率的乘积。捕获不确定区域为 $565 \mu\text{rad}$ 时,步骤 2 的扫描视场覆盖率为 97.56%,捕获概率为 96.57%。步骤 3 的捕获概率仍为 98.5%,总捕获概率为 $96.57\% \times 98.5\% = 95.12\%$,满足捕获概率大于 95% 的要求。

5 结论

针对低轨小卫星间光通信需求,开展基于强度调制直接探测体制光通信终端的无信标捕跟瞄技术研究。通过分析低轨星间可见时间分布,给出捕获时

间要求。对直接探测捕跟瞄链路进行了功率预算分析,在距离为 5 100 km 时,所需发射功率为 0.135 W,目前激光器功率水平能够实现。对无信标捕跟瞄流程进行了设计,提出了剩余不确定区域的计算方法,并利用上述方法对无信标捕获时间和捕获概率进行了分析。在捕获不确定区域小于 $565 \mu\text{rad}$ 时,捕获时间为 30.46 s,捕获概率为 95.12%,能够满足星间光通信建链要求。

参考文献:

- [1] Gu Jian, Ai Yong, Chen Jing, et al. Application of distribution observer for space optical communication PAT system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 0122003. (in Chinese)
顾健, 艾勇, 陈晶, 等. 扰动观测器在空间光通信 PAT 系统中的应用[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(1): 0122003.
- [2] Dong Dengfeng, Zhou Weihu, Ji Rongyi, et al. Design of precise tracking system of laser tracker [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(2): 309–318. (in Chinese)
董登峰, 周维虎, 纪荣祎, 等. 激光跟踪仪精密跟踪系统的设计[J]. 光学精密工程, 2016, 24(2): 309–318.
- [3] Uwe Sterr, Mark Gregory, Frank Heine. Beaconless acquisition for ISL and SGL, summary of 3 years operation in space and ground [C]//IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications, 2011: 38–43.
- [4] Berry Smutny, Hartmut Kaempfer, Gerd Muehlnikel, et al. 5.6 Gbps optical intersatellite communication link [C]//SPIE, 2009, 7199: 719906.
- [5] Renny Field, Carl Lunde, Robert Wong, et al. NFIRE-to-TerraSAR-X laser communication results: satellite pointing, disturbances, and other attributes consistent with successful performance [C]//SPIE, 2009, 7330: 73300Q.
- [6] Jiang Huilin, Tong Shoufeng. The Technologies and Systems of Space Laser Communication [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 236–237. (in Chinese)
姜会林, 佟首峰. 空间激光通信技术与系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 236–237.
- [7] Tong Shoufeng, Liu Yunqing, Jiang Huilin. Power analysis of APT coarse tracking link of free space laser communication system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(3): 322–326. (in Chinese)
佟首峰, 刘云清, 姜会林. 自由空间激光通信系统 APT 粗跟踪链路功率分析 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(3): 322–326.
- [8] Palais J C. Fiber Optic Communications [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015: 171–273.
- [9] Yang Yihe, Yue Min. Infrared Systems [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1989: 83–85. (in Chinese)
杨宜和, 岳敏. 红外系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1989: 83–85.
- [10] Cao Yang, Ai Yong, Li Ming. Situational experiment of fine tracking for satellite-to-ground optical communication [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2008, 29(5): 745–748. (in Chinese)
曹阳, 艾勇, 黎明. 星地光通信中的精跟踪模拟实验研究 [J]. 半导体光电, 2008, 29(5): 745–748.
- [11] Wu Feng, Yu Siyuan, Ma Zhongtian, et al. Correction of pointing angle deviation and in-orbit validation in satellite ground laser communication links [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(6): 0605008. (in Chinese)
武凤, 于思源, 马仲甜, 等. 星地激光通信链路瞄准角度偏差修正及在轨验证 [J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0605008.