

GEO 与 LEO 间激光通信轨道特性仿真

徐春风^{1,2}, 韩成², 姜会林¹

- (1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;
2. 长春理工大学 计算机科学技术学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 为了优化 GEO 与 LEO 间激光通信系统的性能, 建立了卫星通信轨道特性仿真模型。通过对一年内卫星数据的分析可知, 卫星通信终端间的多普勒频移变化范围约为 $\pm 5 \times 10^9$ Hz, 可以使用多普勒频移补偿方法减少 GEO 与 LEO 之间的多普勒频移影响。对于相干通信, 终端必须进行频移补偿; 提前量角的范围大于激光束散角, 因此终端需要进行提前量补偿, 激光通信系统可根据提前量角对视轴进行提前修正, 以减少相对速度对激光通信的影响; 太阳干扰和地球遮挡的时间较长, 应该进行卫星组网以改善可通率, 在通信过程中应根据通信终端时间, 优化两个通信终端的工作流程; GEO 和 LEO 终端的视轴变化情况不同, 因此应该为卫星设计不同结构。

关键词: 卫星间激光通信; 多普勒频移; 提前量; 可通率

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0822008

Simulation of orbit characteristic between GEO and LEO laser communication

Xu Chunfeng^{1,2}, Han Cheng², Jiang Huilin¹

- (1. School of Photo-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. School of Computer Science and Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to optimize the performance of GEO and LEO laser communication system, the simulation model of satellite communication orbit characteristic was established. The simulation model was designed. Through analysis of satellite data within one year, the range of Doppler frequency shift of satellite communication terminal is $\pm 5 \times 10^9$ Hz, Doppler frequency shift compensation method can be used to reduce the influence of Doppler frequency shift between GEO and LEO. For coherent communication, frequency shift must be compensated by terminal. The range of point-ahead was larger than laser beam divergence angle, so the lead angle should be compensated by terminal, in order to reduce the influence of relative velocity on laser communication; the laser communication system need amend early according to point-ahead of LOS, the sun interference and earth occlusion have a longer time, satellite network should be carried out to improve the available probability, in the communication process the work flow of

收稿日期: 2015-12-12; 修订日期: 2016-01-11

基金项目: 国家自然科学基金(91338116)

作者简介: 徐春风(1977-), 女, 讲师, 博士生, 主要从事激光通信中大气传输特性的研究及仿真的设计。Email: xcf@cust.edu.cn

导师简介: 姜会林(1945-), 男, 中国工程院院士, 教授, 主要从事光学系统总体设计、光电仿真技术、激光通信技术等方面的研究。

Email: HLJiang@cust.edu.cn

通讯作者: 韩成(1978-), 男, 副教授, 博士, 主要从事计算机仿真、图像处理等方面的研究。Email: hancheng@cust.edu.cn

the two communication terminals was optimized based on the communication terminal time; LOS changing situation of GEO and LEO terminal was different, so different structures of the satellite should be designed.

Key words: GEO and LEO laser communication; Doppler frequency shift; point-ahead; available probability

0 引言

卫星激光通信被誉为新一代的空间通信技术,具有数据率高、通信容量大的独特优势,是满足现代社会对信息快速、实时传输需求的最佳途径。卫星激光通信是未来航天科技的必争领域,因此大力发展卫星激光通信技术对拥有空间主动权具有重要意义。星间激光通信链路作为未来信息高速公路的通信链路,是实现天地一体化高速实时光通信网络的关键,具有重要的经济和战略地位。在卫星激光通信的链路中,星间高速激光通信链路是主干链路,是未来天地一体化高速实时光通信网络中的重要组成部分。典型的星间链路包括:同步轨道(Geosynchronous Earth Orbits, GEO)卫星与低轨(Low Earth Orbits, LEO)卫星间链路、GEO卫星与GEO卫星间链路、LEO卫星与LEO卫星间链路。用户星获得的大量数据,由于可通率较低,无法将有用信息全天时、高速地传输到地面站,只能通过中继卫星传输到地面站,因而GEO与LEO激光通信链路得到了各国的关注。LEO星座间的相干光通信系统也受到了广泛的关注与研究^[1-2],美国、欧洲等还制定了一系列空间激光通信计划^[3-5]。与美国和日本等国家相比,国内对卫星光通信的研究起步较晚,很多高校和科研机构都开展了卫星光通信技术的研究,并取得了一定的成就。

随着卫星间激光通信技术的发展,国内外学者在LEO卫星或GEO卫星与地面间激光通信^[6]、卫星激光通信终端控制系统捕获跟踪瞄准技术^[7]、天地一体化信息网络技术^[8]、太阳辐射影响^[9-10]等方面取得了一些研究成果。但是对于轨道半径为几百千米的低轨卫星,一天绕地球大约十几圈,由于地球遮挡和轨道倾角的限制,每次卫星与地面站的可通信时间为几分钟,再考虑太阳干扰、轨道倾角、天气等因素,

LEO与地面站的可通信时间极少,对于大量的传输数据,只能通过GEO中继卫星传输到地面站。由此可知,LEO与GEO间的激光通信在星间激光通信系统中具有十分重要的地位。文中针对LEO与GEO通信链路,分析了多普勒频移、提前量、太阳干扰、地球遮挡情况,并在此基础上给出LEO与GEO激光通信的可通率。

1 理论模型

为了便于分析GEO与LEO的轨道特性,设GEO卫星用A表示,A在t时刻的位置用 (x_{at}, y_{at}, z_{at}) 表示、速度用 (v_{ax}, v_{ay}, v_{az}) 表示,LEO卫星用B表示,B在t时刻的位置用 (x_{bt}, y_{bt}, z_{bt}) 表示、速度用 (v_{bx}, v_{by}, v_{bz}) 表示,地球用O表示,太阳用S表示,S在t时刻的位置信息用 (x_{st}, y_{st}, z_{st}) 表示。在t时刻,向量 \overrightarrow{AB} 、 \overrightarrow{AO} 、 \overrightarrow{BO} 、 \overrightarrow{AS} 、 \overrightarrow{BS} 可由公式(1)表示。

$$\begin{cases} \overrightarrow{AB} = (x_{bt} - x_{at}, y_{bt} - y_{at}, z_{bt} - z_{at}) = (x_{abt}, y_{abt}, z_{abt}) \\ \overrightarrow{AO} = (-x_{at}, -y_{at}, -z_{at}) = (x_{aot}, y_{aot}, z_{aot}) \\ \overrightarrow{BO} = (-x_{bt}, -y_{bt}, -z_{bt}) = (x_{bot}, y_{bot}, z_{bot}) \\ \overrightarrow{AS} = (x_{st} - x_{at}, y_{st} - y_{at}, z_{st} - z_{at}) = (x_{ast}, y_{ast}, z_{ast}) \\ \overrightarrow{BS} = (x_{st} - x_{bt}, y_{st} - y_{bt}, z_{st} - z_{bt}) = (x_{bst}, y_{bst}, z_{bst}) \end{cases} \quad (1)$$

1.1 多普勒频移仿真模型

对GEO与LEO间激光通信来说,为了进行高速传输,绝大多数系统采用相干通信技术,这对频差的稳定度提出了更严格要求,而两颗卫星间的相对速度会产生多普勒频移,因此,多普勒频移会引起相位差值的变化,影响相干解调,提高误码率。为此,对多普勒频移的分析是十分必要的。对于空间激光通信,发送端和接收端相对运动引起光斑波长变化,将引起光波的多普勒频移。设光源在 \bar{v} 方向上以速率v运动,而光波的传播方向与 \bar{v} 夹角为 θ 。对观察者而言,光波的多普勒频移量可由公式(2)表示,式中, $\beta = v/c$,

c 为光速, f 为激光的主频。在此基础上, 利用参考文献[11]提出的多普勒频移补偿方法, 可以减少 GEO 与 LEO 之间的多普勒频移影响。

$$\Delta f = \left(\frac{\sqrt{1-\beta^2}}{1-\beta\cos\theta} - 1 \right) f \quad (2)$$

对于 GEO 与 LEO 间激光通信系统, 设在 t 时刻, 向量 \overrightarrow{AO} 和 \overrightarrow{BO} 间的夹角为 σ , 那么可得公式(3), 其中 $\sigma \in [0, \pi]$, A 和 B 的相对速度可由公式(4)表示。向量的夹角为:

$$\cos\sigma = \frac{(x_{aot}x_{bot} + y_{aot}y_{bot} + z_{aot}z_{bot}) / \sqrt{x_{aot}^2 + y_{aot}^2 + z_{aot}^2} \times \sqrt{x_{bot}^2 + y_{bot}^2 + z_{bot}^2}}{\sqrt{x_{aot}^2 + y_{aot}^2 + z_{aot}^2} \times \sqrt{x_{bot}^2 + y_{bot}^2 + z_{bot}^2}} \quad (3)$$

$$v_{abr} = \sqrt{v_{axt}^2 + v_{ayt}^2 + v_{azt}^2} - \sqrt{v_{bxt}^2 + v_{byt}^2 + v_{bzt}^2} \cos(\pi - \sigma) \quad (4)$$

A 与 B 间光波传输的方向为向量 \overrightarrow{AB} 的方向, 设在 t 时刻, 向量 \overrightarrow{AB} 与法向量 \overrightarrow{AO} 的夹角为 ϕ_t , 那么可得公式(5), 其中 $\phi_t \in (0, \pi/2)$, 则可得 $\theta_t = \pi/2 - \phi_t$, 其中 θ_t 为在 t 时刻光波的传播方向与两颗卫星相对速度的夹角。

$$\cos\phi_t = \frac{(x_{abt}x_{aot} + y_{abt}y_{aot} + z_{abt}z_{aot}) / \sqrt{x_{abt}^2 + y_{abt}^2 + z_{abt}^2} \times \sqrt{x_{aot}^2 + y_{aot}^2 + z_{aot}^2}}{\sqrt{x_{abt}^2 + y_{abt}^2 + z_{abt}^2} \times \sqrt{x_{aot}^2 + y_{aot}^2 + z_{aot}^2}} \quad (5)$$

$$\begin{cases} w = t + \Delta t \\ \cos\alpha_t = (x_{abw}x_{abt} + y_{abw}y_{abt} + z_{abw}z_{abt}) / \sqrt{x_{abw}^2 + y_{abw}^2 + z_{abw}^2} \sqrt{x_{abt}^2 + y_{abt}^2 + z_{abt}^2} \end{cases} \quad (8)$$

1.3 太阳干扰仿真模型

两颗卫星进行激光通信时, 如果通信视轴与太阳间的夹角过小, 那么太阳光将使探测器中的信噪比变小, 甚至淹没通信信号, 大大提高通信误码率, 甚至无法通信, 因此, 必须考虑太阳对视轴的干扰情况, 并进行分析。为了计算太阳对通信的干扰情况, 根据公式(9)计算向量 \overrightarrow{AB} 和 \overrightarrow{AS} 在 t 时刻的夹角。如果计算得到的夹角小于设定的阈值夹角, 那么记录此时的时间。这些时间即为太阳干扰时间, 此期间无法进行激光通信。

$$\cos\langle \overrightarrow{AB}, \overrightarrow{AS} \rangle = \frac{(x_{abt}x_{ast} + y_{abt}y_{ast} + z_{abt}z_{ast}) / \left(\sqrt{x_{abt}^2 + y_{abt}^2 + z_{abt}^2} * \sqrt{x_{ast}^2 + y_{ast}^2 + z_{ast}^2} \right)}{\sqrt{x_{abt}^2 + y_{abt}^2 + z_{abt}^2} * \sqrt{x_{ast}^2 + y_{ast}^2 + z_{ast}^2}} \quad (9)$$

1.4 地球遮挡仿真模型

LEO 在绕着地球移动的过程中, 在某些时间, LEO 与 GEO 的通信视轴会被地球遮挡, 导致通信失

1.2 提前量仿真模型

虽然光的传播的速率高达 3×10^8 m/s, 但当激光光束在相距较远的两台光端机间传输时, 从光发射到光接收, 将引起一定时间延迟。若两个光端机存在一定的相对线速度, 这就导致主动端发射的激光信号抵达被动方后, 再按跟踪的方向返回时, 由于两个延时时间和相对运动, 将引起一定的视轴指向误差, 此角度误差定义为提前量角。如同猎人在射击飞行的猎物时, 其瞄准方向不应是猎物当前的角度, 而应考虑子弹有限速度引起的时间延迟和猎物的飞行速度, 需要在当前的位置超前瞄准一样。由于通信光束的束散角非常狭窄, 需要对此提前量角进行纠正, 否则将引起通信激光能量损失或无法接收到激光。

两个光端机的相对运动线速率差为 ΔV , 二者相距 L , 激光单程传输时间延迟 Δt 为:

$$\Delta t = L/c \quad (6)$$

对于 GEO 与 LEO 间激光通信系统, 卫星的位置可以通过星历表获得, 因此, 激光传输延迟 Δt 可由公式(7)表示, A 在 t 时刻的提前量角 α_t 如公式(8)所示。激光通信系统可根据提前量角对视轴进行提前修正, 以减少相对速度对激光通信的影响。

$$\Delta t = \sqrt{(x_{bt1} - x_{at1})^2 + (y_{bt1} - y_{at1})^2 + (z_{bt1} - z_{at1})^2} / c \quad (7)$$

败, 通信终端需要重新指向、捕获、跟踪以建立链路。因此, 对地球遮挡情况进行分析是十分必要的。为了计算地球是否遮挡了激光通信链路情况, 首先根据公式(10)计算 A 与 B 在 t 时刻构成的直线, 然后构建经过地球且与直线垂直的平面, 如公式(11)所示; 根据公式(10)和公式(11)计算交点, 用 $D(x_d, y_d, z_d)$ 表示, 如果地球到 D 的距离大于地球半径, 或者地球到 D 的距离小于地球半径并且 D 不在线段 AB 上, 那么这期间即为地球不干扰激光通信, 可以进行激光通信。

$$\frac{x_a - x_{at}}{x_{abt}} = \frac{y_a - y_{at}}{y_{abt}} = \frac{z_a - z_{at}}{z_{abt}} \quad (10)$$

$$x_{abt}(x_t - x_{st}) + y_{abt}(y_t - y_{st}) + z_{abt}(z_t - z_{st}) = 0 \quad (11)$$

1.5 视轴变化仿真模型

空间激光通信的典型伺服机构可以分为平面反射镜伺服结构、潜望周扫伺服结构、望远镜伺服结构等。选择什么样的伺服机构需要首先分析不同的链

路特性,其中视轴转动的范围、转动速度、转动加速度是需要分析的主要因素。

设向量 \overrightarrow{AB} 在 t_1 时刻用 $\overrightarrow{AB_1}$ 表示,在 $t_2(t_2=t_1+\Delta t)$ 时刻用 $\overrightarrow{AB_2}$ 表示,在 $t_3(t_3=t_2+\Delta t)$ 时刻用 $\overrightarrow{AB_3}$ 表示,

$$\begin{cases} \overrightarrow{AB_1}=(x_{abr1}, y_{abr1}, z_{abr1}) \\ \overrightarrow{AB_2}=(x_{abr2}, y_{abr2}, z_{abr2}) \\ \overrightarrow{AB_3}=(x_{abr3}, y_{abr3}, z_{abr3}) \\ \overrightarrow{AB_4}=(x_{abr4}, y_{abr4}, z_{abr4}) \\ \cos \theta_{11}=(x_{abr1}x_{abr2}+y_{abr1}y_{abr2}+z_{abr1}z_{abr2})/(\sqrt{x_{abr1}^2+y_{abr1}^2+z_{abr1}^2} \sqrt{x_{abr2}^2+y_{abr2}^2+z_{abr2}^2}) \\ \cos \theta_{12}=(x_{abr2}x_{abr3}+y_{abr2}y_{abr3}+z_{abr2}z_{abr3})/(\sqrt{x_{abr2}^2+y_{abr2}^2+z_{abr2}^2} \sqrt{x_{abr3}^2+y_{abr3}^2+z_{abr3}^2}) \\ \cos \theta_{13}=(x_{abr3}x_{abr4}+y_{abr3}y_{abr4}+z_{abr3}z_{abr4})/(\sqrt{x_{abr3}^2+y_{abr3}^2+z_{abr3}^2} \sqrt{x_{abr4}^2+y_{abr4}^2+z_{abr4}^2}) \end{cases} \quad (12)$$

2 GEO 与 LEO 轨道特性仿真

为了分析 GEO 与 LEO 激光通信轨道特性,首先选择一颗东经 77°的地球同步轨道卫星和一颗低轨道卫星(LEO 轨道高度 500 km,轨道倾角 45°,升交点赤经为 0°)作为分析对象,然后利用卫星仿真工具包(Satellite Tool Kit)获取地球同步轨道卫星、低轨道卫星和太阳从 2015 年 3 月 1 日到 2016 年 2 月 29 日间的位置和速度信息(信息的更新速度为 1 min),LEO 卫星运行方向与地球自转一致,最后在此基础上,对卫星的多普勒频移和提前量、太阳干扰、地球遮挡、视轴变化情况进行分析。

2.1 多普勒频移仿真分析

由于 LEO 的周期较短,卫星间的多普勒频移呈现近似周期的变化,因此,选择 2015 年 3 月 1 日一整天的数据进行分析,得到两颗卫星的多普勒频移如图 1 所示。从图 1 可知,两颗卫星的多普勒频移的变化范围约为 $\pm 5 \times 10^9$ Hz,多普勒频移将导致入射光

在 $t_4(t_4=t_3+\Delta t)$ 时刻用 $\overrightarrow{AB_4}$ 表示,那么两个通信终端的视轴变化角 θ_{11} 、 θ_{12} 、 θ_{13} 如公式(12)所示,在 t_1 和 t_2 时刻视轴变化的速度分别为 $(\theta_{12}-\theta_{11})/\Delta t$ 、 $(\theta_{13}-\theta_{12})/\Delta t$,视轴变化的加速度为 $(\theta_{13}-2\theta_{12}+\theta_{11})/(\Delta t)^2$ 。

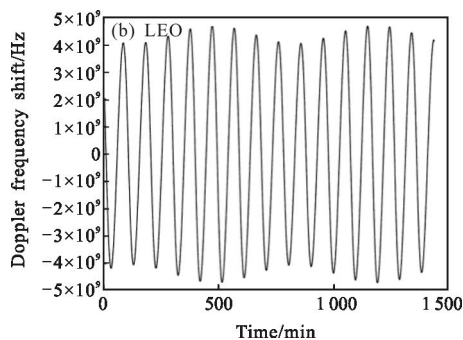


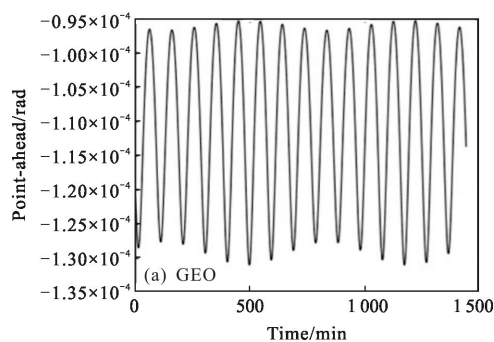
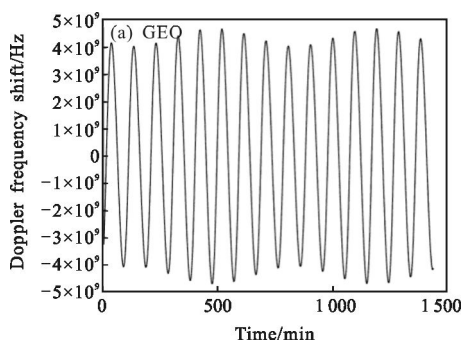
图 1 GEO 与 LEO 多普勒频移分析图

Fig.1 Doppler frequency shift analysis of GEO and LEO

束的波长漂移,进而破坏相干条件,需要接收单元具备自动频率补偿功能。

2.2 提前量仿真分析

从前面的分析可知,通信平台指向的提前量可以根据通信平台的位置计算得到,如图 2 所示。从图 2 可知,卫星指向的提前量角的范围约为 $\pm 130 \mu\text{rad}$ 。对于几十微弧度的束散角,必须要进行提前量的补偿,



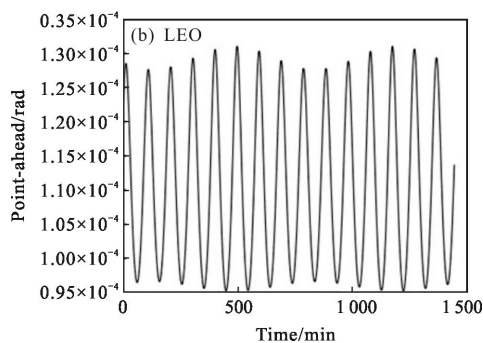


图 2 GEO 与 LEO 提前量分析图

Fig.2 Analysis diagram of point-ahead of GEO and LEO

由于提前量伺服仅纠正接收与发射的偏差,而且补偿范围不大,所以通常将提前量伺服单元放置在激光发射光路中。

2.3 太阳干扰仿真分析

如果 GEO 卫星为数据的接收端,那么当太阳与 LEO 在 GEO 卫星的同侧,且 GEO、太阳构成的直线与通信视轴的夹角小于截止角时,太阳将对 GEO 接收的信号造成严重干扰,并使通信中断。这个截止角可以根据通信光机遮光罩的设计进行估计^[10],文中设截止角 15° ,得到的 GEO 在一年的时间内,受太阳干扰的时间如图 3 所示。从图 3 可知,太阳对激光通

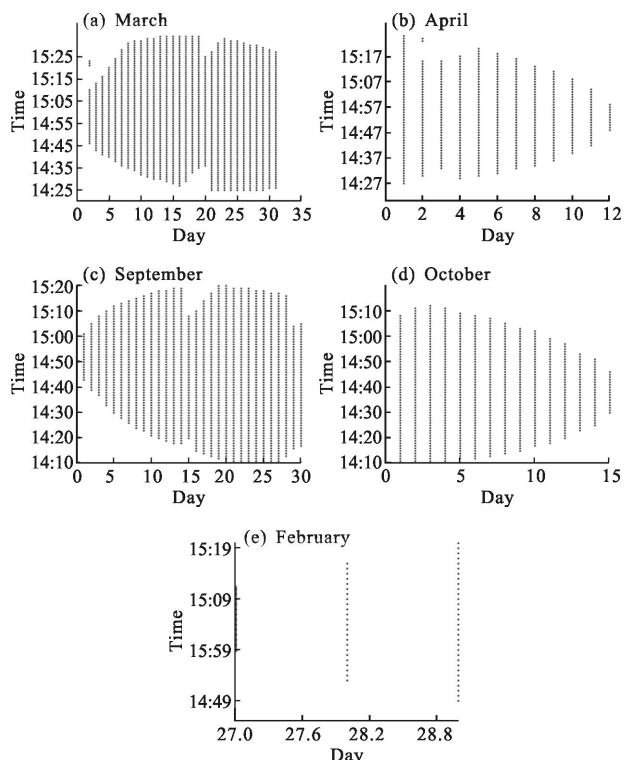


图 3 GEO 与 LEO 太阳干扰情况分析图

Fig.3 Analysis diagram of sun interference between GEO and LEO

信视轴的干扰主要发生在春秋两季下午 2 点至 3 点,持续时间不超过 1 h,经过统计可知太阳影响时间为 4 708 min。

为了分析太阳干扰影响的时间,选取 LEO 轨道高度分别为 400 km、600 km、800 km,轨道倾角分别为 30° 、 45° 、 60° ,计算激光通信视轴受太阳干扰的时间,如表 1 所示。从表中可知,一年中激光通信视轴受太阳干扰的概率接近 1%。

表 1 太阳干扰时间分析

Tab.1 Analysis of available probability of sun interference

LEO	GEO	Time/m	Probability
LEO400_30	GEO77	4 667	0.90%
LEO400_45	GEO77	4 636	0.89%
LEO400_60	GEO77	4 576	0.88%
LEO600_30	GEO77	4 622	0.89%
LEO600_45	GEO77	4 564	0.88%
LEO600_60	GEO77	4 456	0.86%
LEO800_30	GEO77	4 613	0.89%
LEO800_45	GEO77	4 548	0.87%
LEO800_60	GEO77	4 370	0.84%

2.4 地球遮挡仿真分析

由于卫星都是按照一定的周期运行,LEO 的周期比较短,一天包括十几个周期,因此文中分析了一个整天的数据,得到地球遮挡激光通信视轴的情况如图 4 所示。从图 4 可知,LEO 运行的每个周期都会出现地球遮挡情况,每次持续时间大约 40 min。在这段时间内,激光通信系统处于工作死区,无法进行通信,系统应根据死区情况提前进行中断通信和重新捕获的工作,尽可能提高工作效率。

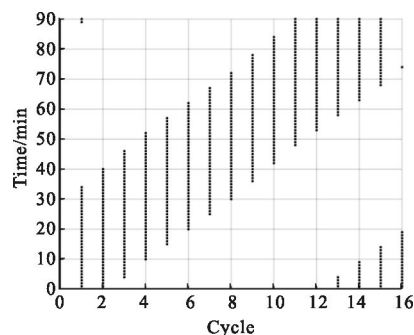


图 4 GEO 与 LEO 地球遮挡情况分析图

Fig.4 Analysis diagram of earth baffle of GEO and LEO

为了分析地球遮挡影响的不可通率, 选取 LEO 轨道高度分别为 400 km、600 km、800 km, 轨道倾角分别为 30°、45°、60°, 在一个 LEO 卫星的周期内, 地球遮挡激光通信视轴的概率如表 2 所示。从表 2 可知, 地球遮挡的概率超过 50%。

表 2 不可通率分析

Tab.2 Analysis of unavailable probability

LEO	GEO	Circle/m	Available probability
LEO400_30	GEO77	92	45.70%
LEO400_45	GEO77	92	44.60%
LEO400_60	GEO77	92	43.50%
LEO600_30	GEO77	96	47.90%
LEO600_45	GEO77	96	46.90%
LEO600_60	GEO77	96	45.80%
LEO800_30	GEO77	100	49.00%
LEO800_45	GEO77	100	49.00%
LEO800_60	GEO77	100	48.00%

2.5 视轴变化仿真分析

当 GEO 与 LEO 进行激光通信时, 由于不同轨道上卫星的位置和姿态随着时间不断变化, 引起通信视轴转动的角度不断变化。为了设计合理的伺服转台结构, 必须先分析通信视轴的变化范围、变化速度和加速度, 以确定伺服转台的指向范围和跟踪能力。通过对一天数据的分析, 得到视轴的转动范围 GEO 卫星通信终端视轴转动的范围约为 20°, LEO 卫星通信终端视轴转动的范围约为 360°。相应视轴的变化速度和加速度如图 5 和图 6 所示, 底部的代

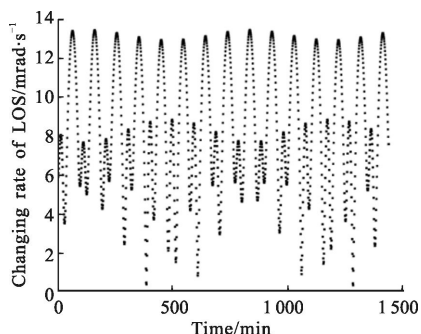


图 5 GEO 与 LEO 激光通信视轴的变化速度分析图

Fig.5 Velocity variation analysis of LOS between GEO and LEO laser communication

表可通视, 顶部代表不可通视。在可以通视的条件下, 视轴变化的最大速度约为 8.86 mrad/s, 视轴变化的最大加速度约为 0.76 mrad²/s; 综上所述, GEO 卫星通信终端和 LEO 卫星通信终端的伺服转台应该采用不同结构。

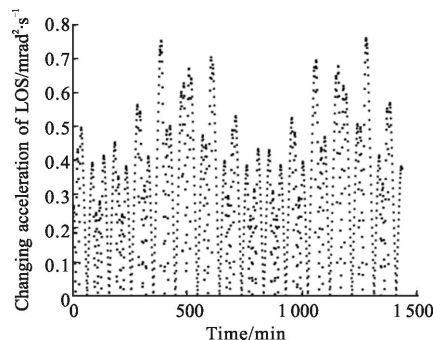


图 6 GEO 与 LEO 激光通信视轴变化的加速度分析

Fig.6 Acceleration changing analysis of LOS acceleration between GEO and LEO laser communication

3 结论

通过建立的卫星通信轨道特性仿真模型, 对多普勒频移、太阳干扰、地球遮挡和视轴变化进行了仿真分析。假设采用文中提出的抑制或补偿方法可以忽略多普勒频移、提前量、视轴变化对可通率的影响, 那么只需考虑太阳干扰和地球遮挡对可通率的影响, 通过对 GEO 与 LEO 卫星在一年的时间内的轨道特性进行综合分析后可知, 单颗 GEO 与 LEO 间激光通信的可通率仅为 43%~48%。为了提高卫星间通信的可通率应该进行卫星组网, 以改善地球遮挡和太阳干扰的影响, 同时应对通信终端时间和重新开始捕获的时间进行综合分析, 以进一步提高可通率; 根据对通信视轴的分析, GEO 卫星上的通信终端和 LEO 卫星上的通信终端必须采用不同的结构; 通过对卫星多普勒频移和提前量的分析可知, 通信终端必须对多普勒频移和提前量进行适当补偿。

参考文献:

- [1] Erkmen B I, Moision B E, Brinbaum K M. A review of the information capacity of single-mode free-space optical communication[C]//SPIE, 2010, 7587: 0N-1-12.
- [2] Toshiyuki Ando, Eisuke Haraguchi, Kenichi Tajima, et al. Coherent homodyne receiver with a compensator of Doppler shifts for inter orbit optical communication [C]//SPIE, 2011,

- 7923: 0J-1-11.
- [3] Hemmati H, Farr W H, Biswas A, et al. Deep-space optical terminals(DOT)[C]//SPIE, 2011, 7923: 0C-1-10.
- [4] Shiro Yamakawa, Tatsuyuki Hanada, Hiroki Kohata, et al. JAXA' s efforts toward next generation space data-relay satellite using optical inter-orbit communication technology[C]//SPIE, 2010, 7587: 0P-1-6.
- [5] Tatsuyuki Hanada, Shiro Yamakawa, Hiroki Kohata. Study of optical inter-orbit communication technology for next generation space data-relay satellite [C]//SPIE, 2011, 7923: 0B-1-6.
- [6] Sun Jianfeng, Hou Peipei, Ma Xiaoping, et al. Orthogonal Phase Modulation with self homodyne detect laser communication method for the satellite-to-ground link [C]//SPIE, 2015, 9614: 0Y1-6.
- [7] Wang Weibing, Wang Tingfeng, Guo Jin. Analysis for optoelectrical acquisition tracking and pointing control technology on satellite[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(6): 879-888. (in Chinese)
王卫兵, 王挺峰, 郭劲. 星载光电捕获跟踪瞄准控制技术分析[J]. 中国光学, 2014, 7(6): 879-888.
- [8] Jiang Huilin, Liu Xianzhu, Hu Yuan, et al. Several key problems of space-ground[J]. 2014, 35(s1): 96-100. (in Chinese)
姜会林, 刘显著, 胡源, 等. 天地一体化信息网络的几个关键问题思考[J]. 兵工学报, 2014, 35(s1): 96-100.
- [9] Lou Yan, Zhao Yiwu, Tong Shoufeng, et al. Solar radiation impact on GEO satellite to ground laser communication [J]. *Computer Simulation*, 2015, 32(3): 234-237. (in Chinese)
娄岩, 赵义武, 佟首峰, 等. 太阳直射对 GEO 卫星和地面站通信的影响[J]. 计算机仿真, 2015, 32(3): 234-237.
- [10] Li Xiaoming, Zhang Lizhong, Han Cheng, et al. Design of optimization-baffle for GEO laser communication[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(9): 0905006. (in Chinese)
李小明, 张立中, 韩成, 等. GEO 激光通信光端机遮光罩优化设计[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0905006.
- [11] Li Feilong, Lu Chao, Li Wei, et al. HPOP-based Doppler Frequency-Shift and Time-Delay of Polar Orbit Constellation Satellite[J]. *Communications Technology*, 2016, 49(1): 18-23. (in Chinese)
李飞龙, 卢超, 李薇, 等. 基于 HPOP 的低轨星座多普勒与时延研究[J]. 通信技术, 2016, 49(1): 18-23.