

约束条件下导航卫星激光星间链路可视性算法

董明佶^{1,2}, 林宝军^{1,3,4}, 刘迎春³, 周黎莎^{1,2,3}

(1.中国科学院 光电研究院, 北京 100094; 2.中国科学院大学, 北京 100049;
3.中国科学院 微小卫星创新研究院, 上海 201203; 4.上海科技大学, 上海 201203)

摘要:结合激光星间链路的技术特点和卫星偏航姿态对激光链路指向的影响, 推导了基于导航星历的坐标旋转算法, 优化了卫星偏航姿态的控制策略。通过建立导航卫星平台、激光终端捕获跟踪性能以及轨道动力学等可视性约束条件模型, 计算出各卫星在目标时段内的可视情况。

关键词:激光通信; 星间链路; 导航卫星; 星间可视性

中图分类号: V474.2; TP393 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2018)05-0054-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2018.05.014

Visibility algorithm for navigation satellite intersatellite laser links under constraint conditions

DONG Mingji^{1,2}, LIN Baojun^{1,3,4}, LIU Yingchun³, ZHOU Lisha^{1,2,3}

(1. China Academy of Sciences Institute of Optoelectronics, Beijing 100094, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Shanghai Engineering Center for Microsatellites, Shanghai 201203, China;
4. Shanghai Tech University, Shanghai 201203, China)

Abstract: A coordinate rotation algorithm based on navigation ephemeris is introduced according to the technical characteristics of inter-satellite laser links. A control strategy of satellite yaw attitude is also optimized considering its effect on laser link direction. Then, a constraint condition model of visibility is set up considering three constraints: the satellite platform, the performance of laser terminal and the orbit dynamics to calculate the visibility status in target period of each satellite.

Key words: laser communication; inter-satellite link; navigation satellite; inter-satellite visibility

0 引言

导航卫星的星间链路需同时满足系统星间通信与星间测量的双重需求, 其中星间通信可以实现导航卫星的组网, 使地面与星座中任何一颗卫星均可进行通信; 星间测量则可以实现导航卫星的星间测距, 使系统具备自主定轨能力。目前, 全球导航卫星系统(GNSS)星间链路以微波时分体制链路为主^[1]。激光星间链路与微波链路相比, 具有传输速率快、通信容量大、抗干扰能力强、易实现轻量化和高精度测量等特点^[2], 已成为星间链路的研究与应用热点。ESA 主导

的 Sentinel-1A 环境监测卫星、俄罗斯的 GLONASS 系统均开展了激光星间链路实验^[3,4]。导航卫星通过搭载激光星间链路, 可实现高速星座组网, 提升系统数据传输能力, 获取连续、高精度的星间测距数据, 提高系统自主定轨性能, 并可利用高精度时频传递功能, 提高系统授时性能^[5]。

1 激光星间链路可视性研究背景

导航卫星激光星间链路组网首先需解决链路双向可视问题。由于激光星间链路束散角小、通信距离远、卫星之间几何关系时变及存在轨道误差等对星间链路的动态特性要求较高, 并且卫星导航系统为保证卫星本体坐标系的 X 轴与 Z 轴位于“太阳-地球-卫

收稿日期: 2018-01-15。

基金项目: 国家重大专项资助项目(批准号: SYDH04)资助。

作者简介: 董明佶(1985-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为航天科学与技术、空间信息网络方面。

星”平面内,需要不断调整偏航角度^[6],导致同轨、异轨以及不同层卫星间的空间几何关系变化较为复杂,需对星间几何特性进行定量分析。

针对导航卫星可视性问题,石磊玉等人^[7]提出了一种星间可视性的解析算法,通过理论推导解算目标卫星的可视卫星集合。针对激光星间链路可视问题,赵馨等人^[8]分析了 Walker24/3/2 星座的可通性、链路距离、多普勒频移、提前量等激光星间链路特性。余侃民等人^[9]针对高轨/中轨/低轨多层卫星网络结构,对同层、异层间激光链路俯仰角、方位角以及距离参数进行了仿真,结果表明激光终端水平扫描性能是影响激光星间链路性能的主要因素。上述分析并未利用导航卫星携带的星历信息较为精确地求解星间可视性,且未考虑卫星平台偏航姿态等约束条件对星间可视性的影响,这正是本文要解决的问题。

2 基于导航星历的坐标旋转算法

导航卫星携带的广播星历是在地固系下拟合完成的,而激光星间链路指向控制所采用的坐标系常为本体坐标系,需将二者转换至同一坐标系下进行链路特性计算。利用文献[10]中的方法可得到本星和它星在地固系下的位置和速度矢量,并将其经地球自转角速度修正后转换为赤道坐标系下的位置矢量 (r_0', r_1') 和速度矢量 (v_0', v_1') 。然后,将本星赤道坐标系转换至中间坐标系下,该中间坐标系原点与赤道坐标系一致,3轴指向与卫星本体坐标系一致,设转换矩阵为 R ,则本星在中间坐标系下的位置矢量为 $Z=(0,0,-|r_1'|)$,它星在中间坐标系下的位置矢量为 $R_1'=(X_1', Y_1', Z_1')=R \times r_1'$,本星在中间坐标系下的速度矢量为 $V_0'=(V_{x0}', V_{y0}', V_{z0}')=R \times v_0'$,它星在中间坐标系下的速度矢量为 $V_1'=(V_{x1}', V_{y1}', V_{z1}')=R \times v_1'$ 。

由于卫星受偏航姿态控制的影响,因此它星相对于本星的位置矢量变化与偏航角有关,速度矢量变化与偏航角速度有关。设本星偏航角为 ψ ,偏航角速度为 ψ' ,则它星在本星本体坐标系下的位置矢量为:

$$R_1 = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = R_\psi \times (R \times r_1' - Z) = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \left\{ \begin{bmatrix} v_0' \times r_0' / |v_0' \times r_0'| \times (-r_0' / |r_0'|) \\ v_0' \times r_0' / |v_0' \times r_0'| \times r_0' \\ -r_0' / |r_0'| \end{bmatrix} \times r_1' - Z \right\} \quad (1)$$

在绕地运动和偏航姿态的影响下,中间坐标系和本星本体坐标系随时间分别作绕 y 轴和 z 轴的旋转运

动,需对本体坐标系下的速度矢量进行旋转修正,修正后的速度矢量为:

$$V_1 = (V_{x1}, V_{y1}, V_{z1})^T = (V_{x1}' + \frac{V_{x0}'}{|r_1'|} \times Z_1' + \psi' \times Y_1, V_{y1}' - \psi' \times X_1, V_{z1}' - \frac{V_{x0}'}{|r_1'|} \times X_1')^T \quad (2)$$

求得它星在本体坐标系下的俯仰角:

$$\alpha = \arctan(Z_1 / \sqrt{X_1^2 + Y_1^2}) \quad (3)$$

$$\text{方位角: } \beta = \begin{cases} \arctan(Y_1 / X_1), & X_1 > 0 \\ \arctan(Y_1 / X_1) + \pi, & (X_1 < 0) \cap (Y_1 > 0) \\ \arctan(Y_1 / X_1) - \pi, & (X_1 < 0) \cap (Y_1 < 0) \end{cases} \quad (4)$$

俯仰角速度:

$$\alpha' = \frac{(\cos\alpha) \times V_{z1} - (\sin\alpha) \times ((\cos\beta) \times V_{x1} + (\sin\beta) \times V_{y1})}{|R_1|} \quad (5)$$

$$\text{方位角速度: } \beta' = \frac{(\cos\beta) \times V_{y1} - (\sin\beta) \times V_{x1}}{\sqrt{X_1^2 + Y_1^2}} \quad (6)$$

3 激光星间链路可视性约束条件

由于建立导航卫星激光星间链路需满足双向可视性约束,即本星至目标卫星和目标卫星至本星的激光星间链路均需满足可视性约束条件。激光星间链路可视范围与卫星平台及轨道动力学俯仰-方位约束相关,综合考虑导航卫星对星间链路测量、通信及自主定轨的需求,星载激光终端安装位置通常位于卫星对地面。卫星平台俯仰-方位约束主要由射频天线和部件遮挡引起;轨道动力学俯仰-方位约束主要由本星偏航姿态及它星位置速度变化导致的链路指向角度及角速度变化,从而影响终端跟踪性能;此外,还需考虑地球遮挡因素、因此需对卫星本体坐标系下的激光星间链路可视性约束条件进行分析。

可视状态下,它星在本体坐标系下的激光星间链路俯仰角应满足: $\alpha \in [\alpha_s, \alpha_e]$,其中 α_s 为卫星平台所支持的最小俯仰角, $\alpha_e = \arccos(R / (R+H))$ 为受地球遮挡影响的最大可视俯仰角, R 为地球半径, H 为本星轨道高度;激光星间链路的方位角和方位角速度应满足:在本星偏航姿态和它星位置动态变化的影响下,能够有效与它星建立激光星间链路。

4 偏航姿态控制

根据式(5)、式(6)可知,星间链路指向俯仰角速度和方位角速度均与偏航角速度相关。卫星根据太阳方

位进行偏航姿态调整过程中,卫星沿偏航角方向最大转动角速度过大,激光终端无法实现有效捕获与跟踪。以M38卫星为例,如图1(a)、图1(b)所示,当 β 角接近 0° 时,卫星偏航角速度最大值接近 $2.3^\circ/\text{s}$,不利于激光终端的有效捕跟。因此,需设置姿态调整过程中偏航角的最小值 $\beta_{\min}$,即当 β 角的绝对值小于 $\beta_{\min}$ 时,按照 $\beta_{\min}$ 进行最小偏航姿态控制。本文的仿真过程取 $\beta_{\min}=5^\circ$,如图1(c)所示,优化后的偏航角速度最大值降低为 $0.15^\circ/\text{s}$ 。

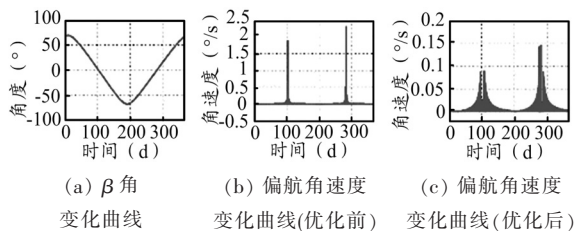


图1 一年周期内M38卫星 β 角与偏航角速度变化情况

5 可视性仿真分析

5.1 仿真环境

本文的仿真环境采用BDS中含有24颗MEO卫星及3颗IGSO卫星的导航星座^[4],其中:MEO星座为Walker 24/3/1构型,轨道高度21528km,轨道倾角 55° ;IGSO卫星轨道高度35786km,轨道倾角 55° ,分布在3个轨道面内,升交点赤经分别相差 120° ,3颗卫星的星下点轨迹重合,交叉点经度为东经 118° 。为了便于仿真分析,将MEO卫星编号为M[i][j],其中 $i \in \{1,2,3\}$,为轨道面编号; $j \in \{1,2,3,4,5,6,7,8\}$,为轨道面内卫星编号;IGSO卫星编号为I1、I2、I3。

5.2 星间可视性分析

MEO星座中异轨面卫星之间俯仰-方位变化情况以M38 $\leftrightarrow$ M11为例,如图2(a)、图2(b)所示;同轨面卫星之间俯仰-方位角的变化情况以M38 $\leftrightarrow$ M36为例,如图2(c)、图2(d)所示。由图2(a)、图2(c)可知,M38 $\leftrightarrow$ M11与M38 $\leftrightarrow$ M36卫星双向俯仰角与俯仰角速度变化情况一致;由图2(b)、图2(d)可知,在卫星偏航姿态影响下,M38 $\leftrightarrow$ M11与M38 $\leftrightarrow$ M36卫星双向方位角以及方位角速度变化情况并不一致,当激光星间链路因可视性约束条件受限使得单向无法建链时,则整条链路均无法建链,因此MEO卫星之间建立激光星间链路时应同时考虑双向可视性约束条件。经进一步仿真,可知一年周期内M38 $\leftrightarrow$ M11卫星激光星间链路角度与角速度变化范围:俯仰角 $33.9^\circ \sim 64.5^\circ$,俯仰角速度 $0 \sim 0.004^\circ/\text{s}$,方位角 $-180^\circ \sim +180^\circ$,方位角速度 $0 \sim$

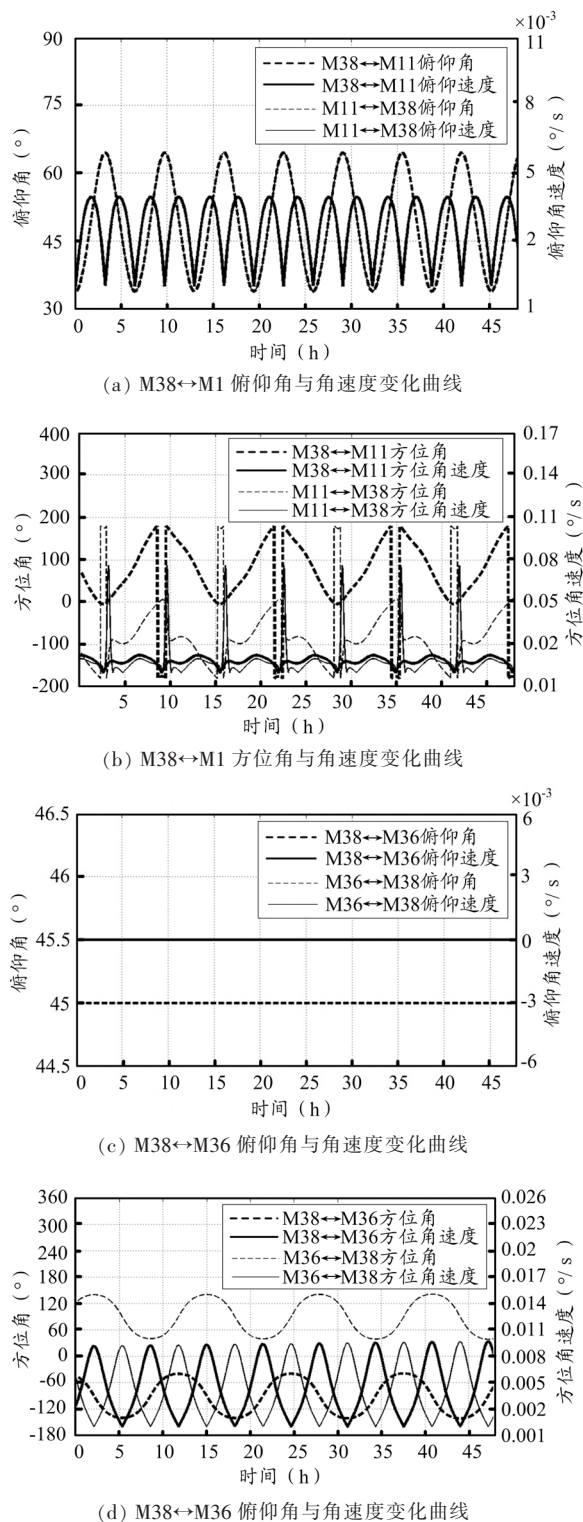


图2 某48h内M38卫星与同轨及异轨卫星的俯仰-方位变化情况

$0.102^\circ/\text{s}$;一年周期内M38 M36卫星激光星间链路角度与角速度变化范围如下:俯仰角 45.0° ,俯仰角速度 $0^\circ/\text{s}$,方位角 $-175.1^\circ \sim +175.1^\circ$,方位角速度 $0 \sim 0.089^\circ/\text{s}$ 。

MEO卫星与IGSO卫星的俯仰-方位变化情况以M38 $\leftrightarrow$ I1为例,如图3所示。由图3可知,M38 $\leftrightarrow$ I1卫

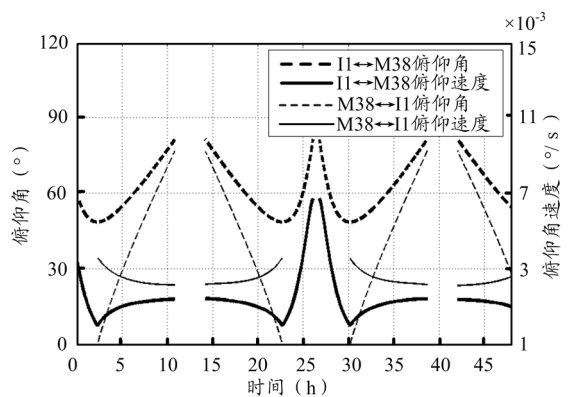
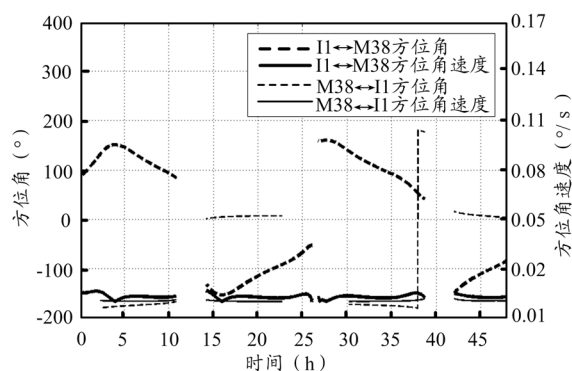
(a) M38 $\leftrightarrow$ I1 俯仰角与角速度变化曲线(b) M38 $\leftrightarrow$ I1 方位角与角速度变化曲线

图3 某48小时内M38卫星与IGSO卫星的俯仰-方位变化情况

星双向俯仰角与俯仰角速度、双向方位角与方位角速度变化情况均不一致,因此当MEO与IGSO卫星之间建立激光星间链路时仍需同时考虑双向可视性约束条件。经进一步仿真,一年周期内M38 $\leftrightarrow$ I1卫星激光星间链路角度与角速度变化范围如下:俯仰角 $0^{\circ}\sim 76.8^{\circ}$,俯仰角速度 $0.002\sim 0.0036^{\circ}/s$,方位角 $-180^{\circ}\sim +180^{\circ}$,方位角速度 $0\sim 0.003^{\circ}/s$;一年周期内I1 $\leftrightarrow$ M38卫星激光星间链路角度与角速度变化范围如下:俯仰角 $48.5^{\circ}\sim 81.3^{\circ}$,俯仰角速度 $0\sim 0.0068^{\circ}/s$,方位角 $-180^{\circ}\sim +180^{\circ}$,方位角速度 $0\sim 0.072^{\circ}/s$ 。

根据上述分析方法,可得一年周期内M38卫星与星座内其它卫星之间俯仰/方位角及其角速度的动态变化范围,如表1所示。由于Walker星座具有对称性,因此只需分析M38与第一轨道面卫星的可视关系,即可代表与其它异轨面卫星的可视性。由表1可知,M38卫星与M16(M22)、M17(M23)卫星建链时,俯仰角最小值分别为 5.147° 和 10.641° ;与IGSO卫星建链时,俯仰角最小值为 0° 。因此,卫星平台天线及部件遮挡可能对上述卫星的星间链路可视性造成影响。在偏航姿态控制下,M38星间链路的俯仰-方位角速度最大值均小于 $0.115^{\circ}/s$,星载激光终端跟踪角速度性能只需优于 $0.115^{\circ}/s$ 即可满足星间链路角速度动态变化要求。

表1 M38卫星激光星间链路动态变化范围

星间链路	俯仰角($^{\circ}$)	方位角($^{\circ}$)	俯仰角速度($^{\circ}/s$)	方位角速度($^{\circ}/s$)
M38 $\leftrightarrow$ M11(M28)	33.900–64.476	-179.999–180.000	0.000–0.00395	0.000–0.10198
M38 $\leftrightarrow$ M12(M27)	42.858–76.788	-179.999–180.000	0.000–0.00462	0.000–0.10581
M38 $\leftrightarrow$ M13(M26)	44.352–76.788	-179.999–180.000	0.000–0.00504	0.000–0.09000
M38 $\leftrightarrow$ M14(M25)	37.700–69.488	-180.000–180.000	0.000–0.00409	0.000–0.09149
M38 $\leftrightarrow$ M15(M24)	25.524–56.100	-179.999–179.999	0.000–0.00395	0.000–0.09898
M38 $\leftrightarrow$ M16(M23)	10.641–47.142	-179.998–179.999	0.000–0.00462	0.000–0.11427
M38–M17(M22)	5.147–45.648	-180.000–179.998	0.000–0.00504	0.000–0.09000
M38 $\leftrightarrow$ M18(M21)	20.512–52.300	-180.000–180.000	0.000–0.00409	0.000–0.09149
.....				
M38 $\leftrightarrow$ M31(M37)	22.500	-175.125–175.113	0.000	0.000–0.08910
M38 $\leftrightarrow$ M32(M36)	45.000	-175.125–175.113	0.000	0.000–0.08910
M38 $\leftrightarrow$ M33(M35)	67.500	-175.125–175.113	0.000	0.000–0.08910
M38 $\leftrightarrow$ M34	由于地球遮挡不可视			
M38 $\rightarrow$ I1	0.000–76.788	-180.000–180.000	0.002–0.00361	0.000–0.00300
M38 $\rightarrow$ I2	0.000–76.786	-179.997–179.999	0.000–0.00788	0.000–0.01566
M38 $\rightarrow$ I3	0.001–76.788	-179.999–179.991	0.000–0.00862	0.000–0.02345

根据第3节的分析,由于可视性约束条件的限制,链路在某些时段内可能无法建链,从而影响建链总时长,因此需分析约束条件对链路可视率的影响。图4所示为一年周期内,M38卫星在不同约束条件下,与星座内各异轨面卫星链路在的可视率曲线,由图可知,周

期内可与M38持续建链的卫星数量与俯仰角约束的变化成正比,与俯仰角及方位角速度约束的变化成反比,当约束条件同时满足:俯仰角约束 $\leq 6^\circ$,俯仰角速度约束 $\geq 0.014^\circ/\text{s}$,方位角速度约束 $\geq 0.115^\circ/\text{s}$ 时,M38可与12颗异轨面MEO卫星持续建立激光星间链路,而与3颗IGSO卫星在周期内无法建立持续链路。

6 结束语

为了保证激光星间链路的指向精度,本文利用导航星历并结合卫星偏航姿态对激光终端跟踪性能的影响,通过坐标旋转的方法将各卫星地固系下坐标转化至卫星本体坐标系,得到了它星相对于本星的俯仰方位角度和角速度。对可视性约束条件模型进行了设计与分析,给出了各卫星在目标时段内的可视性判别。以北斗导航卫星系统(BDS)中MEO和IGSO卫星星座为例,对激光星间链路俯仰/方位特性及可视性规律进行了定量分析,总结了一年周期内MEO-MEO和MEO-IGSO卫星链路的俯仰/方位角度、角速度的变化情况以及不同约束条件下的链路可视性规律。

参考文献:

- [1] 王冬霞,辛洁,薛峰,等. GNSS星间链路自主导航技术研究进展及展望[J]. 宇航学报,2016,37(11):1279-1288.
- [2] 曾智龙,刘兴,孙晖,等. 空间激光通信最新进展及发展建议[J]. 光通信技术,2017,41(6):1-5.
- [3] ESA. Laser link offers high-speed delivery [EB/OL]. (2014-12-05) [2017-05-06]. http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Laser_link_offers_high-speed_delivery.
- [4] PASYNKOV V V, SADOVNIKOV M A, SUMERIN V V, et al. The concept and preliminary results of use of satellite laser ranging for GLONASS accuracy improvement [C/OL]//The 18th International Workshop on Laser Ranging,Fujiyoshida, 2013.<https://cddis.nasa.gov/Iw18/docs/papers/Session4/13-02-10-Pasinkov.pdf>.
- [5] 姚渊博,蒙艳松,边朗,等. 空间激光时频传递技术研究现状及趋势[J]. 空间电子技术,2017,14(5):12-16,21.
- [6] 叶世榕,夏凤雨,赵乐文,等. 偏航姿态对北斗精密单点定位的影响分析[J]. 测绘学报,2017,46(8):971-977.
- [7] 石磊玉,欧钢,顾青涛,等. 基于星上天线仰角约束的星间可视卫星集解析算法[J]. 国防科技大学学报,2011,33(4):97-101.
- [8] 赵馨,牛俊坡,刘云清,等. 导航卫星中激光通信/测距一体化技术及链路特性分析[J]. 激光与光电子学进展,2015,52(7):060601.
- [9] 余侃民,李勇军,吴继礼,等. 多层卫星网络激光星间链路空间特性仿真[J]. 电讯技术,2010,50(10):87-92.
- [10] 周善石,王解先. GPS广播星历与历书的精度比较[J]. 工程勘察,2006(9):69-70,74,49.
- [11] 中国卫星导航系统管理办公室. BDS-SIS-ICD-2.1北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件——公开服务信号[S/OL]. (2016-11-30) [2017-10-08]. <http://www.beidou.gov.cn/>.

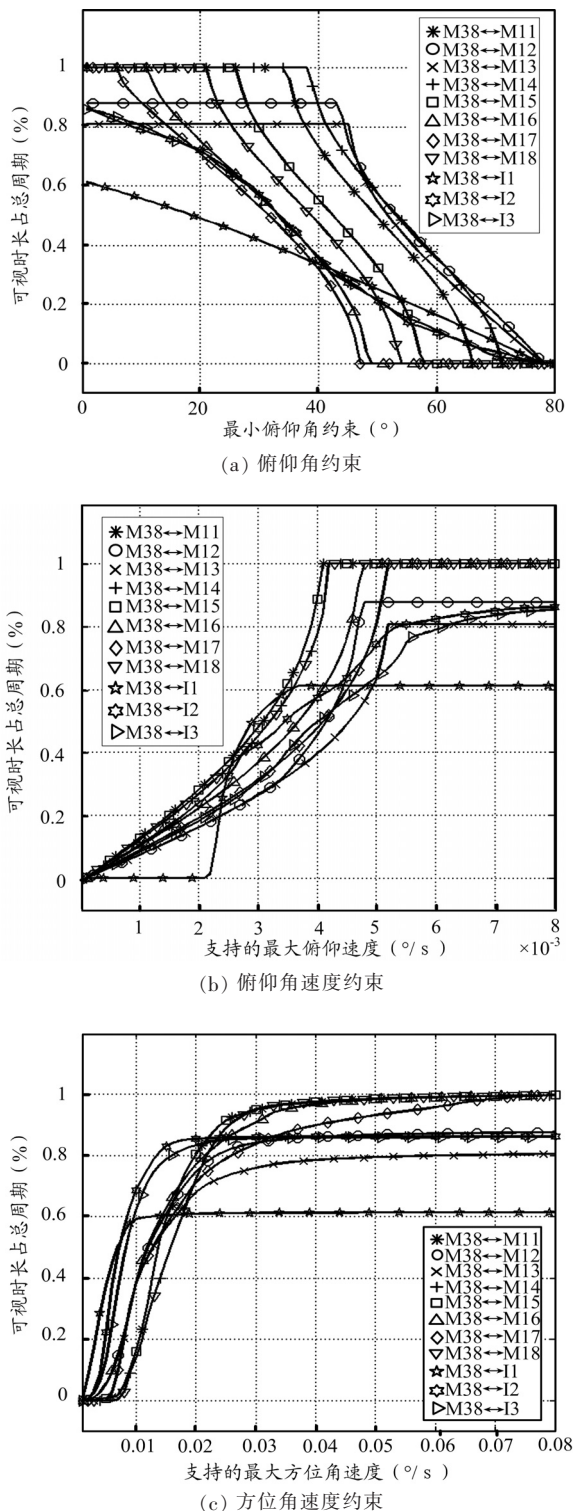


图4 约束条件下M38卫星与星座内各异轨面卫星链路可视率关系曲线