

NGSO 星座 Q/V 波段星间链路干扰规避技术*

张 钊^{1,2} 姚秀娟¹ 高 翔¹
智 佳¹ 王 静¹

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 随着大规模星座系统的发展, 近地轨道空间频轨资源越来越紧缺。随之而来的星载通信链路干扰风险不容忽视, 已成为今后星座系统设计需要重点考量的指标之一。在规避干扰的前提下, 保证星座系统的工作性能至关重要。针对大规模非静止轨道(NGSO)星座系统星间链路存在的干扰风险问题, 提出了基于干扰、受扰链路夹角的干扰规避方法。以 Starlink 的 Q/V 波段星间链路为例, 定义了系统效率与工作效率, 研究不同干扰规避方法与建链策略下系统的鲁棒性。仿真结果表明, 基于受扰链路夹角的干扰规避方法能够在不同建链策略下将系统干扰噪声比 I/N 超限时长分别从 5.79% 和 16.75% 降至 0, 并且不影响工作链路。这种仿真方法对于类似具有星间链路的大规模 NGSO 星座系统的干扰规避具有借鉴意义。

关键词 星间链路, Starlink, 干扰规避, 非地球同步轨道, 仿真

中图分类号 TN972

Interference Analysis on Q/V Band ISL between NGSO Constellation Systems

ZHANG Zhao^{1,2} YAO Xiujuan¹ GAO Xiang¹
ZHI Jia¹ WANG Jing¹

1(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract With the development of large-scale constellation system, low-Earth-orbit space frequency orbit resources are increasingly scarce. The subsequent risk of space-borne communication link interference cannot be ignored, and it becomes one of the key indicators to be considered in the future constellation system design. On the premise of avoiding interference, it is crucial to ensure the working perfor-

* 中国科学院空间科学战略性先导科技专项资助(XDA15060100)

2022-03-01 收到原稿, 2022-10-26 收到修定稿

E-mail: zhangzhao19@mails.ucas.ac.cn

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

mance of constellation system. Intersatellite link has great interference risk in large scale NGSO constellation systems. To solve that, the interference avoidance methods based on the interfering and interfered angle are proposed. Taking the Starlink with Q/V band as an example, the working efficiency and anti-interference efficiency of the system are defined, and the robustness of the system under different interference avoidance methods and chain building strategies is studied. Simulation results show that the interference avoidance based on the interfered angle can reduce the I/N overrun time ratio from 5.79% and 16.75% to 0 respectively under different link building strategies, without affecting the working link. This simulation method can be a reference for large-scale NGSO constellation interference avoidance with intersatellite links.

Key words Inter-satellite link, Starlink, Interference avoidance, NGSO, Simulation

0 引言

随着大规模星座系统的迅速发展,近地轨道空间的频轨资源越来越紧缺。随之而来的星载通信链路干扰风险不容忽视,成为今后星座系统设计需要考虑的重点内容之一。如何在规避干扰的前提下保证星座系统的工作性能是重要的研究课题。文献 [1] 总结了星间链路相关技术的发展历程。

利用较高的工作频段能够满足星间链路大吞吐量的业务需求。当前很多研究工作^[2-5]都是针对 GSO 与 NGSO 系统之间的干扰开展的。Meng 等^[6]从干扰时间方面对星间链路的干扰进行了可视化分析,结合 LEO 卫星参量研究不同场景下的干扰情况。Anzagira 等^[7]分析了小卫星集群中的可见光星间链路,给出在发射端缓解太阳辐射干扰以及接收端采用连续干扰消除缓解信号干扰的方法。Wang 等^[8]通过半物理仿真,降低了星间激光链路干涉的风险。Leyva-Mayorga 等^[9]提出一种跨平面星间链路的算法,分析了有无干扰情况下系统对随机资源的分配情况。

当前有关大规模星座的文献资料中,对于异轨星间链路的干扰规避技术研究较少。本文以 SpaceX 公司向 ITU 申请的含有星间链路的星座为例,分析其异轨星座星间链路的建链情况,并提出两种干扰规避方法。

1 同异轨道面建链约束

1.1 同轨道面建链约束

同轨道面时,星间链路如图 1 所示。其中, A 和 B 分别表示同轨道面的两颗卫星, O 为地心, C 为

O 到 AB 连线的垂足,设地球半径为 R,大气层有效厚度为 H,通常取 $H = 80 \text{ km}$ ^[10]。

此时 A 和 B 两星几何可视的约束为

$$d_{OC} > R + H. \quad (1)$$

其中, d_{OC} 为地心 O 到星间链路的距离,由三角关系^[11]可知

$$d_{OC} = \sqrt{r^2 - \left(\frac{d_{AB}}{2}\right)^2}. \quad (2)$$

式中, d_{AB} 表示卫星 A 与 B 的距离, r 为其轨道半径。几何建链约束为

$$d_{AB} < 2\sqrt{r^2 - (R + H)^2}. \quad (3)$$

设卫星 A 与 B 的天线覆盖区域是半顶角为 θ 的圆锥形。在图 2 中, A 与 B 卫星不在对方的天线覆盖范围内,因此不可建链。显然,当 A 与 B 卫星天线覆盖范围的圆锥母线重叠时,二者天线刚好互相可视,如图 1 所示。天线建链约束^[12]为

$$\frac{d_{AB}}{2} > r \cos \theta. \quad (4)$$

综上所述,同轨道面时星间链路的建链约束可表示为

$$2r \cos \theta < d_{AB} < 2\sqrt{r^2 - (R + H)^2}. \quad (5)$$

1.2 异轨道面建链约束

异轨道面时,卫星间链路如图 3 所示,当 A 与 B 卫星链路与大气外层相切时,二者刚好可见。此时几何建链约束为

$$d_{OC} > R \text{ 或 } d_{AB} < d_{OA}. \quad (6)$$

$\triangle OAB$ 面积为

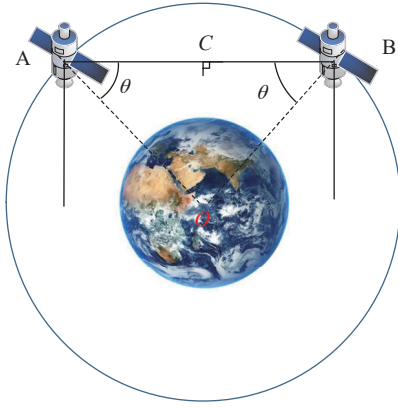


图 1 同轨道面星间链路

Fig. 1 Inter-satellite link within an orbit

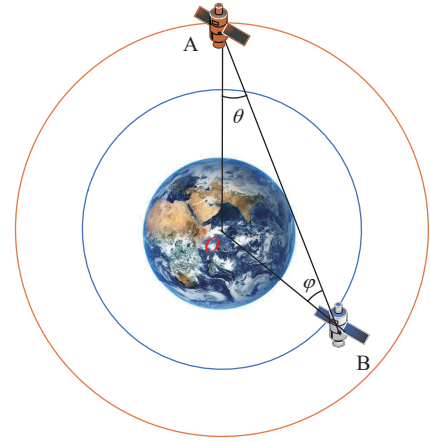


图 3 异轨道面星间链路

Fig. 3 Inter-satellite link between different orbit

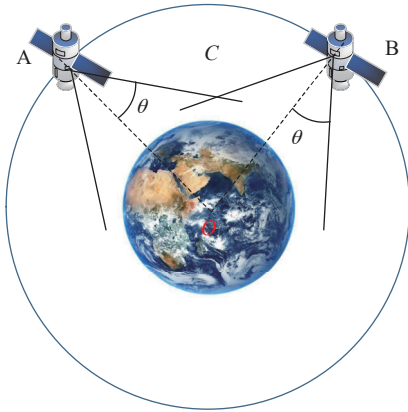


图 2 同轨道面天线不可见

Fig. 2 Antenna invisible within an orbit

$$S = \frac{1}{2} |\mathbf{AB} \times \mathbf{OA}| = \frac{1}{2} |\mathbf{AB}| \cdot d_{OC}. \quad (7)$$

地心 O 到星间链路的距离为

$$d_{OC} = \frac{|\mathbf{AB} \times \mathbf{OA}|}{|\mathbf{AB}|}. \quad (8)$$

设卫星 A, B 天线覆盖范围分别为 Ω_1, Ω_2 的圆锥形, $\triangle OAB$ 的面积为

$$S = \frac{1}{2} |\mathbf{AB} \times \mathbf{OA}| = \frac{1}{2} |\mathbf{AB}| \cdot |\mathbf{OB}| \cdot \sin \varphi = \frac{1}{2} |\mathbf{AB}| \cdot |\mathbf{OA}| \cdot \sin \theta. \quad (9)$$

$\triangle OAB$ 两边夹角分别为 θ 和 φ , 有

$$\theta = \arcsin \frac{|\mathbf{AB} \times \mathbf{OA}|}{|\mathbf{AB}| \times |\mathbf{OA}|}, \quad (10)$$

$$\varphi = \arcsin \frac{|\mathbf{AB} \times \mathbf{OA}|}{|\mathbf{AB}| \cdot |\mathbf{OB}|}. \quad (11)$$

天线建链约束为

$$\Omega_1 \geq \theta, \quad \Omega_2 \geq \varphi. \quad (12)$$

综上所述, 异轨道面时星间链路建链约束可表示为

$$\begin{cases} R \leq \frac{|\mathbf{AB} \times \mathbf{OA}|}{|\mathbf{AB}|} \text{ 或 } |\mathbf{AB}| < |\mathbf{OA}|, \\ \Omega_1 \geq \arcsin \frac{|\mathbf{AB} \times \mathbf{OA}|}{|\mathbf{AB}| \cdot |\mathbf{OA}|}, \\ \Omega_2 \geq \arcsin \frac{|\mathbf{AB} \times \mathbf{OA}|}{|\mathbf{AB}| \cdot |\mathbf{OB}|}. \end{cases} \quad (13)$$

2 链路预算与干扰建模

2.1 链路预算及干扰评估指标

链路预算用以评估建链所需功率情况, 而干扰是评估链路间同频串扰严重程度的参量。常见的评估指标有载波噪声功率比 C/N 、干扰噪声功率比 I/N 、载波干扰功率比 C/I 、等效功率通量密度 (Equivalent Power Flux Density, 定义符号 δ_{EPFD}) 等, 上述指标定义如下^[13]:

$$\frac{C}{N} = \frac{P_{1,t} G_{1,t}(0) G_{1,r}(0)}{kTW} \left(\frac{\lambda_1}{4\pi d_i} \right)^2, \quad (14)$$

$$\frac{I}{N} = \frac{P_{1,i} G_{1,i}(\theta_{1,i}) G_{1,r}(\theta_{2,i})}{kTW} \left(\frac{\lambda_2}{4\pi d_i} \right)^2, \quad (15)$$

$$\frac{C}{I} = \frac{P_{1,t} G_{1,t}(0) G_{1,r}(0) (\lambda_1/d)^2}{P'_{1,i} G_{1,i}(\theta_{1,i}) G_{1,r}(\theta_{2,i}) (\lambda_2/d_i)^2}, \quad (16)$$

$$\frac{C}{I+N} = \frac{P_{1,t} G_{1,t}(0) G_{1,r}(0) (\lambda_1/4\pi d)^2}{P'_{t,i} G_{t,i}(\theta_{1,i}) G_{t,i}(\theta_{2,i}) (\lambda_2/4\pi d_i)^2 + kTW}, \quad (17)$$

$$\delta_{\text{EPFD}} = \sum_i \left[\frac{P_i G_{t,i}(\theta_i) G_{r,i}(\varphi_i)}{4\pi d_i^2 G_{r,\max}} \right]. \quad (18)$$

式中, $P_{t,i}$ 为第 i 条干扰链路的发射功率, P_i 为基带内第 i 条干扰链路的发射功率, $P_{1,t}$ 为数传信号的发射功率; $G_{t,i}(\theta)$ 为第 i 条干扰链路的发射增益, $G_{r,i}(\theta)$ 为第 i 条干扰链路的接收增益, $G_{1,t}(\theta)$ 为通信链路的发射增益, $G_{1,r}(\theta)$ 为通信链路的接收增益, $G_{r,\max}$ 为最大接收增益; λ_1 为通信信号的波长, λ_2 为干扰信号的波长, k 为玻尔兹曼常数, d_i 为第 i 条干扰链路的欧几里得距离, d 为通信链路的长度, W 为信号带宽。

2.2 仿真输入参量

依据 SpaceX 在 ITU 所申报的资料 USASAT-NGSO-2A, USASAT-NGSO-5 星座的轨道参数作为输入, 其中 5 系列有三种轨道, 分别以 5A, 5B, 5C 表示(见表 1)。

表 1 中 Starlink-5 期有三种轨道, 分别为 Starlink-5A, 5B, 5C, 其在 ITU 官网呈现在一份申报资料中。天线方向图为 ITU-REC-1528^[14], 空口参数列于表 2^[15]。

2.3 干扰场景建模

以 Starlink-5B 对 Starlink-5A 的下行链路即 HEO 对 LEO 的干扰为例, 其星座节点如图 4(a)所示, 外层为 5B 星座, 内层即为 5A 星座。图 4(b)给出了下行链路干扰状态。M, N, O, P 四个卫星节点中, M 位于 5B 轨道 (HEO), N, O, P 均处于低轨 5A 轨道

表 1 Starlink 轨道输入参量
Table 1 Starlink orbit input parameters

参量	数值			
轨道面	2A	5A	5B	5C
近地点/km	13892.3	1056	27354.9	31571.5
远地点/km	13892.3	1056	44221.4	40004.7
半长轴/km	13892.3	1056	35788	35788
倾角/(°)	25	54	63.4	63.4
离心率	0	0	0	0
轨道面数量	3	11	5	5
卫星数/轨	1	12	2	1

(LEO), 是三个相邻的卫星。工作链路 MO、干扰链路 MN, MP, 当 M 星与 O 星进行通信时, 其波束也会辐射到 N 星和 P 星的接收端, 进而造成干扰。

在此干扰场景中, 设定干扰链路夹角为 θ_1 , 表示了发射端天线指向与干扰链路的夹角; 受扰链路夹角为 θ_2 , 表示了接收端天线指向与干扰链路的夹角。由式 (15) 可知, 影响卫星间链噪比的参量有发射天线功率 $P_{T,i}$, 发射天线增益 $G_{T,i}(\theta)$, 接收天线增益 $G_{R,i}(\theta)$,

表 2 天线空口参数

Table 2 Antenna radio parameters

参量	数值	
天线类型	发射端	接收端
波束名	LIMT	LIMR
频率/GHz	50	50
带宽/MHz	900	900
主瓣增益/dBi	48	45.4
效率/(%)	60	60
峰值功率/dBw	18.5	17
噪声/K	—	627

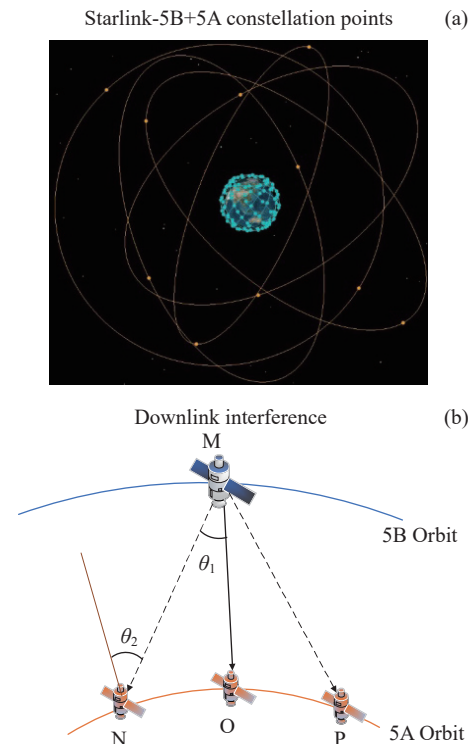


图 4 星座与链路建模

Fig. 4 Constellation and link modeling

干扰链路欧几里得距离 d_i , 通信频率 f , 信号带宽 W 。

其中, 通信频率与信号带宽在所申请的卫星系统中都是固定值, 而链路欧氏距离呈周期性变化。此外, 从表2中可见, 收发天线的主瓣增益都大于 45 dBi, 而发射天线峰值功率仅有 18.5 dBw, 可见在此系统中, 收发天线增益是主要的影响因素, 即干扰链路夹角和受扰链路夹角对干扰的规避至关重要。

3 基于链路夹角的干扰规避方法

这里所涉及的 Starlink 星座采用 ITU-REC-1528 型天线方向图, 其天线增益随离轴角的变化如图5所示。图5中 G_t 和 G_r 分别为发射天线增益和接收天线增益, 当离轴角达到 3° 时, 二者会降低约 16 dBi, 对应的 I/N 也会降低 16 dB, 因此可通过卫星姿态调整或天线机动进行干扰规避。

这里重点研究基于干扰链路夹角和受扰链路夹角的星间链路干扰规避方法。

3.1 基于干扰链路夹角的干扰规避方法

在下行链路中, 通过调整发射端干扰链路夹角的干扰规避方法流程如图6(a)所示。

工作链路判断是否建链($C/N > 10$ dB), 若正常建链, 则继续判别发射端(M星)对接收端(O星)的同轨道相邻两节点(N星、P星)的干扰强度是否超限($I/N > -12.2$ dB), 若干扰超限, 则通过卫星姿态调整或天线机动等形式让 θ_1 大于规避角 φ , 从而降低干扰值。

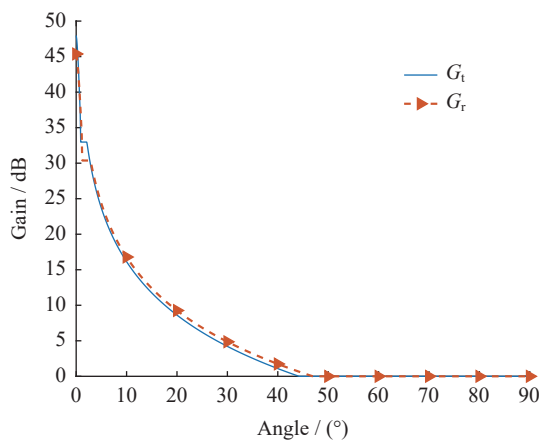


图5 Starlink 天线增益随离轴角的变化

Fig. 5 Starlink antenna gains varies with off-axis angle

在 t 时刻, 设定两套星座系统中满足建链约束的可视链路共有 N 个, 计算所有可视链路通信余量 C/N , 以及这些链路对其相邻链路的干扰程度 I/N , 其中 C/N 高于最低阈值 10 dB 的链路数量记为 k_1 , I/N 低于超限阈值-12.2 dB 的链路数量记为 k_2 。

为衡量星座系统的鲁棒性, 设定星座瞬时工作效率为

$$\eta_1 = \frac{k_1}{N}. \quad (19)$$

星座瞬时抗干扰效率为

$$\eta_2 = \frac{k_2}{N}. \quad (20)$$

在总仿真时长 T 内, 星座的工作效率为

$$H_1 = \sum_{t=1}^T \frac{\eta_1}{T}. \quad (21)$$

星座的抗干扰效率为

$$H_2 = \sum_{t=1}^T \frac{\eta_2}{T}. \quad (22)$$

采用基于干扰链路夹角的干扰规避方法时, 星座系统的鲁棒性如图7(a)所示, 从图中可以看出, 随着干扰链路夹角从 0° 增大至 3° , 星座系统的抗干扰效率可以从最初的 94.15% 提升至 100%; 然而系统的工作效率却受到了较大影响, 当 φ 达到 0.5° 时, 工作链路的 C/N 会低于 10 dB, 原因是发射端天线的机动降低了工作链路方向的天线增益, 进而导致载噪比 C/N 降低。这会影响星座系统的正常工作。

3.2 基于受扰链路夹角的干扰规避方法

通过调整接收端受扰链路夹角的干扰规避方法流程如图6(b)所示。

工作链路判断是否建链($C/N > 10$ dB), 若正常建链, 则继续判别发射端(M星)对接收端(O星)同轨道相邻两节点(N星、P星)的干扰强度是否超限($I/N > -12.2$ dB), 若干扰超限, 则O星通过同轨道星间链路对相邻两星(N星、P星)发送识别码, 相邻星收到识别码之后通过卫星姿态调整或天线机动等形式让 θ_1 大于规避角 φ , 从而降低干扰值。

当采用基于受扰链路夹角的干扰规避方法时, 星座系统的鲁棒性如图7(b)所示, 从图中可以看出, 随着受扰链路夹角从 0° 增大至 3° , 星座系统的抗干扰效率可以从最初的 94.15% 提升至 100%, 而星座系统的

工作效率并没有受到太大影响。原因是干扰链路接收端天线的机动对工作链路的通信余量影响较小。

在图 4(b)所示场景中, M 星处于 HEO 轨道, 而 N, O, P 星均处于 LEO 轨道, 并且 LEO 星座节点多达 132 个, 而 HEO 节点仅有 10 个。由于外层星座节点相对于内层星座节点更稀疏, 调整 HEO 干扰链路夹角的干扰规避方法牺牲了系统的工作效率, 相比之下, 调整 LEO 受扰链路夹角的干扰规避方法能够在保证星座系统工作效率受影响较小的前提下, 提升系统的抗干扰效率。

在外层星座节点稀疏的情况下, 采用基于受扰链路夹角的干扰规避方法, 能够有效降低对内层星座的干扰超限时长。因此, 这里采用基于受扰链路夹角的

干扰规避方法, 对不同建链策略下的星座系统鲁棒性进行分析研究。

4 实验结果与分析

4.1 天线最大可视角

根据 1.2 节的建链约束, 评估 NGSO 星座之间链路距离以及轨道半长轴对天线最大可视角度的函数影响。

图 8 给出了天线最大可视角度与星间链路距离的函数关系, 图中 4 条曲线分别对应 Starlink-2A, 5A, 5B, 5C 系列的函数, 可以看出, 随着星间链路距离的提升, 天线最大可视角随之减小, 随着星座轨道

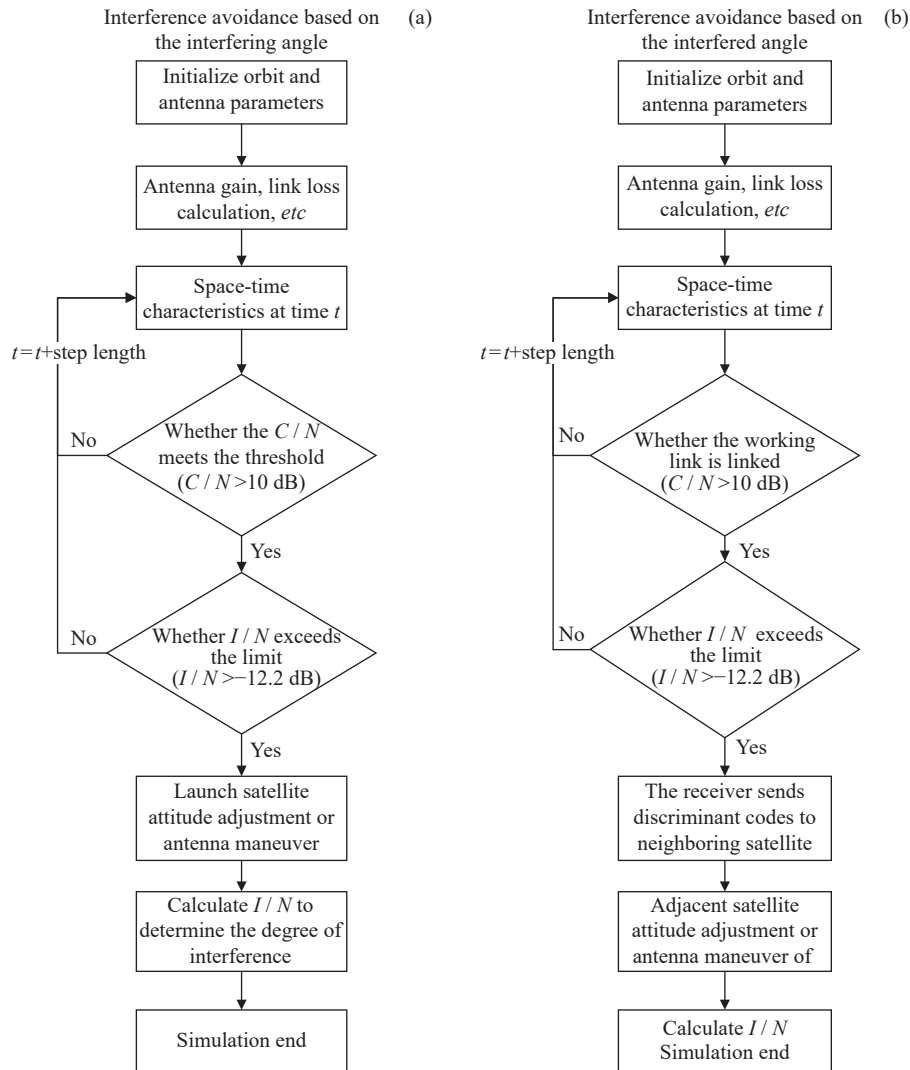


图 6 干扰规避流程

Fig. 6 Interference avoidance flow chart

半径变大,这一减小趋势逐渐放缓。

图 9 给出了天线最大可视角度与轨道半长轴的函数关系,图中粉色虚线为地球半径,可以看出,随着轨道半长轴的增大,天线最大可视角随之减小。

图 10 给出了 θ_1 的时序图,图中粉色虚线为 $\theta_1=3^\circ$ 。对于累计概率函数 $P(\theta_1 \leq X)$, X 不同取值下对应的概率列于表 3。

4.2 固定节点映射星间链路

根据 2.3 节的干扰模型,选取干扰噪声比 I/N 为评估参量。评估 Starlink-5 期 B 系列星座与 Starlink-5 期 A 系列星座星间链路在不同建链策略下的系统鲁棒性。

在图 4(b)所示场景中,假定 O 星具有信道优先权,只要工作链路 MO 满足建链条件,此链路必须保持通信。在此情景下,分析工作链路 MO 对 O 星相

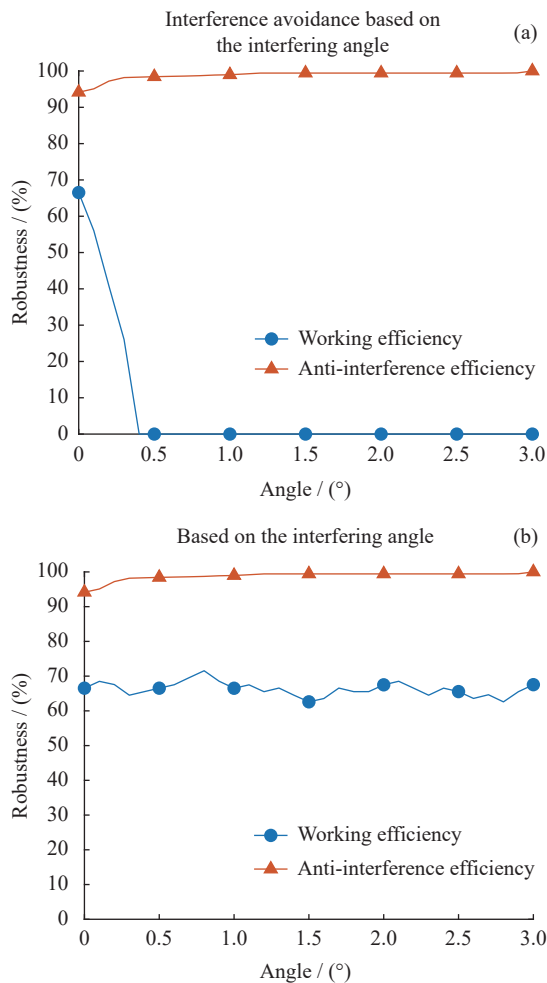


图 7 两种方法星座鲁棒性对比

Fig. 7 Constellation robustness under two methods

邻节点 N 星和 P 星的干扰情况,其 I/N 的累计概率分布(CDF)如图 11(a)所示。仿真时长为 1 个恒星日,步长 1 s,干扰阈值为 -12.2 dB(图 11 中粉色虚线)。

从图 11(a)可以看出,未进行干扰规避前,工作链路 MO 在可建链的时间内有 5.79% 的时长对相邻星干扰超限。采取受扰链路夹角的干扰规避方法后,不同规避角对应的效果也有所差异。 $\varphi=0.5^\circ$,干扰超限时长降至 2.08%; $\varphi=1^\circ$,干扰超限时长降至 0.35%; $\varphi \geq 2^\circ$,干扰超限时长降至 0。

4.3 最近距离映射星间链路

在图 4(b)所示场景中,设 M 星始终与 LEO 星座

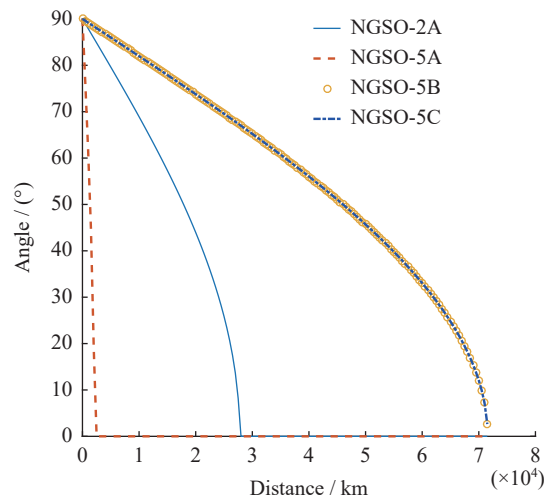


图 8 同轨道面天线可视角

Fig. 8 Antenna angle between same orbit

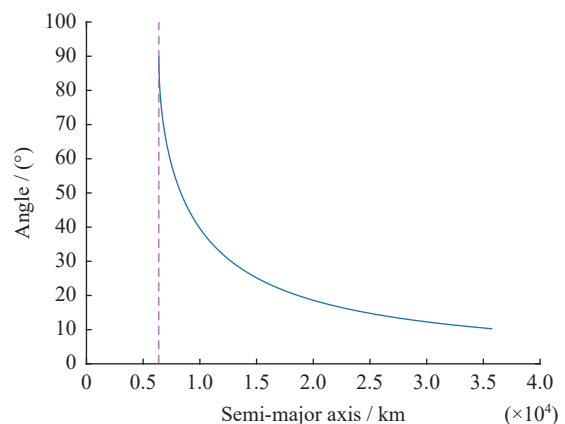


图 9 异轨道面天线可视角随半长轴的变化 (粉色虚线为地球半径)

Fig. 9 Antenna angle between different orbit varies with the semi-major axis (The pink dotted line is the radius of the Earth)

中距离最近的一颗星建立星间链路,即 O 星是随着时间推移动态变化的节点。在此情景下,分析工作链路 MO 对 O 星相邻节点 N 星和 P 星的干扰情况,其 I/N 的累计概率分布(CDF)如图 11(b)所示。仿真时长为 1 个恒星日,步长 1 s,干扰阈值为 -12.2 dB(图 11 中粉色虚线)。

从图 11(b)可以看出,未进行干扰规避前,工作链路 MO 在可建链的时间内有 16.75% 的时长对相邻星干扰超限。采取受扰链路夹角的干扰规避方法后,不同规避角对应的效果也有所差异。 $\varphi = 0.1^\circ$,干扰超限时长降至 1.40%; $\varphi \geq 0.2^\circ$,干扰超限时长降至 0。

可以明显看到,这种情景下,只需要规避角 φ 稍微增大,就可以将干扰降至阈值以下。这是因为 M 星始终选取最近的 LEO 节点建链,其对应的干扰链路夹角 θ_1 也始终处于最大区间内,因而 I/N 比固定节点

映射的建链策略有所降低。

由于 ITU 资料对于卫星申报的星间链路建链策略没有具体说明,在设定的两种情景下,这里分析研究了采用基于受扰链路夹角的干扰规避方法前后,星间链路对接收星相邻节点干扰噪声比的累计概率分布。

5 结论

针对大规模星座系统异轨星间链路存在的干扰风险问题,提出了基于干扰、受扰链路夹角的干扰规避方法。选取 Starlink 申报的搭载有 Q/V 波段卫星间业务的 5 期星座为例,定义了系统工作效率与抗干扰效率,对不同干扰规避方法与建链策略下系统的鲁棒性进行仿真分析。结果表明,在不影响工作链路的前提下,基于受扰链路夹角的干扰规避方法能够在不同建链策略下将系统干扰时长分别从 5.79% 和 16.75%

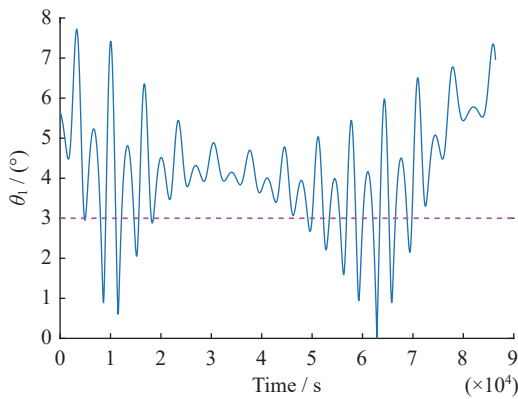


图 10 θ_1 时序图 (粉色虚线为 $\theta_1=3^\circ$)

Fig. 10 Timing diagram of θ_1 (The pink dotted line corresponds to $\theta_1=3^\circ$)

表 3 θ_1 累计概率
Table 3 Cumulative probability of θ_1

$X/(\circ)$	概率/(%)
1	1.38
2	5.05
3	14.09
4	43.24
5	75.01
6	91.41
7	97.23
8	100

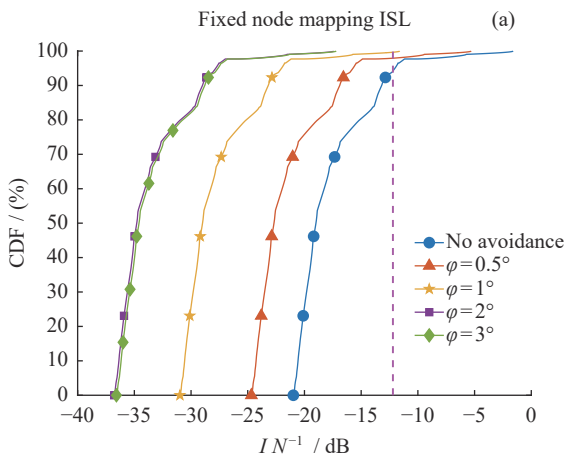
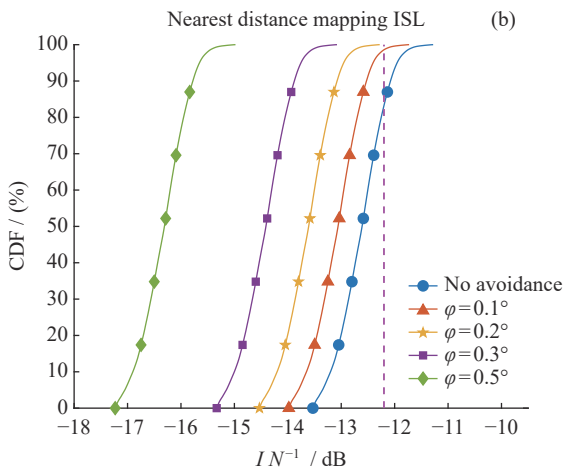


图 11 不同场景下 I/N 概率密度分布

Fig. 11 CDF of I/N in different scenarios

降至 0。

在外层星座节点稀疏的情况下,采用基于受扰链路夹角的干扰规避方法,能够有效降低对内层星座的干扰超限时长。此方法对于类似具有星间链路的大规模 NGSO 星座系统的干扰规避具有借鉴意义。

参考文献

- [1] LIU Xiangnan, ZHAO Zhuo, LI Xiaoliang, *et al.* Research status and key technologies analysis of inter-satellite link[J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2019, **40**(4): 1-9 (刘向南, 赵卓, 李晓亮, 等. 星间链路技术研究现状及关键技术分析[J]. *遥测遥控*, 2019, **40**(4): 1-9)
- [2] JIA M, LI Z, GU X M, *et al.* Joint multi-beam power control for LEO and GEO spectrum-sharing networks[C]//2021 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Xiamen: IEEE, 2021: 841-846
- [3] SUI Y, DONG X C, YIN P, *et al.* Modeling and analysis of radio frequency interference impacts from geosynchronous SAR on low earth orbit SAR[C]//2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS. Brussels: IEEE, 2021: 1666-1669
- [4] LI Wei, WEI Wenkang, LIU Chang, *et al.* Interference analysis simulation method based on spatial position probability for NGSO communication constellation system[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2021, **36**(3): 483-490 (李伟, 魏文康, 刘畅, 等. 基于空间位置概率的NGSO通信星座干扰仿真分析研究[J]. *电波科学学报*, 2021, **36**(3): 483-490)
- [5] GU P, LI R, HUA C Q, *et al.* Dynamic cooperative spectrum sharing in a multi-beam LEO-GEO co-existing satellite system[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, **21**(2): 1170-1182
- [6] MENG S Y, JIA M, GUO Q, *et al.* Inter satellite link interference detection and analysis of NGSO satellite system[C]//Proceedings of the 12 th International Conference on Wireless and Satellite Systems. Springer, 2021: 1-11
- [7] ANZAGIRA A, EDMONSON W W, AMANOR D N. LED-based visible light intersatellite communication for distributed space systems[J]. *IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems*, 2021, **2**(3): 140-147
- [8] WANG Y K, MENG L Q, XU X S, *et al.* Research on semi-physical simulation testing of inter-satellite laser interference in the China Taiji space gravitational wave detection program[J]. *Applied Sciences*, 2021, **11**(17): 7872
- [9] LEYVA-MAYORGA I, SORET B, POPOVSKI P. Inter-plane inter-satellite connectivity in dense LEO constellations[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, **20**(6): 3430-3443
- [10] OSORO O B, OUGHTON E J. A techno-economic framework for satellite networks applied to low earth orbit constellations: assessing Starlink, OneWeb and Kuiper[J]. *IEEE Access*, 2021, **9**: 141611-141625
- [11] LIU Lin. Orbit Theory of Spacecraft[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000: 7-8 (刘林. 航天器轨道理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 7-8)
- [12] BHATTACHERJEE D, SINGLA A. Network topology design at 27, 000 km/hour[C]//Proceedings of the 15 th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies. Orlando: Association for Computing Machinery, 2019: 341-354
- [13] LI Wei, PAN Ji, YAN Kang, *et al.* Research on frequency compatibility of collaboration-based large-scale NGSO constellations[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2020, **43**(6): 110-117 (李伟, 潘冀, 严康, 等. 基于协作的大规模NGSO星座间频率兼容共存研究[J]. *北京邮电大学学报*, 2020, **43**(6): 110-117)
- [14] ITU. ITU-R-REC-S. 1528 Satellite antenna radiation patterns for non-geostationary orbit satellite antennas operating in the fixed-satellite service below 30 GHz[S]. 2001. https://www.itu.int/rec/R-REC-S.1528/_page.print
- [15] ITU-DB, Space network systems online[EB/OL]. (2017-06-22)[2022-02-15]. <https://www.itu.int/sns/database.html>