

低地球轨道卫星星座地球固定足印模式覆盖域切换方法

齐晓鑫, 宋宝军, 李勋

(空军工程大学防空反导学院, 陕西 西安 710100)

摘要: 在低地球轨道卫星星座中, 当采用地球固定足印模式时, 波束在覆盖域之间的切换会影响对地覆盖的仰角, 进而影响通信质量。针对地球固定足印模式下的覆盖域切换问题, 提出了一种覆盖域切换方法。首先, 设计了覆盖域划分机制, 使覆盖域拓扑保持规则性; 然后, 以最大限度地增大波束对地面的最小仰角为目标, 设计了切换时刻选择机制和目标覆盖域选择机制。所提方法考虑了极轨星座和倾斜轨星座的差异, 同时支持 2 种星座。以 OneWeb 和 Telesat 星座为仿真场景, 验证了所提方法。仿真结果表明, 所提方法能够有效增大波束对地面覆盖的最小仰角, 从而有助于提升链路质量。

关键词: 低地球轨道卫星星座; 地球固定足印; 覆盖域; 波束切换

中图分类号: TN92

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2024103

Coverage region switching method under earth-fixed footprint mode for LEO satellite constellation

QI Xiaoxin, SONG Baojun, LI Xun

Air Defense and Antimissile School, Air Force Engineering University, Xi'an 710100, China

Abstract: In low earth orbit (LEO) satellite constellations, when earth-fixed footprint mode is used, the switching of beams between coverage regions affects the elevation angle of the coverage, which in turn affects the communication quality. A coverage region switching method was proposed to address the coverage region switching problem in earth-fixed footprint mode. Firstly, a coverage region division mechanism was designed to keep the coverage region topology regular. Then, a switching time selection mechanism and a target coverage region selection mechanism were designed with the objective of maximizing the minimum elevation angle of the beams. The proposed method takes the differences between polar and inclined orbit constellations into account and supports both constellations. The OneWeb and Telesat constellations are used as simulation scenarios to validate the proposed method. The simulation results show that the proposed method can effectively improve the minimum elevation angle of the beams, which helps to improve the link quality.

Keywords: low earth orbit satellite constellation, earth-fixed footprint, coverage region, beam switching

0 引言

低地球轨道 (LEO, low earth orbit) 卫星星座能够实现全球无缝覆盖, 是地面网络的重要补充手段, 已成为未来空天地一体化网络的重要组成部分, 近年来受到各界的广泛关注^[1]。根据 LEO

卫星波束指向方式的不同, 卫星对地面的覆盖模式可以分为卫星固定足印模式和地球固定足印模式 2 种^[2]。在卫星固定足印模式中, 卫星波束的指向相对于卫星自身固定不动, 波束照射区域随着卫星的运动扫过地面; 在地球固定足印模式中, 卫星波束在一段时间内持续照射地面某一区域,

收稿日期: 2023-12-09; 修回日期: 2024-05-13

通信作者: 李勋, leeson_email@qq.com

当卫星远离当前区域时,其波束切换到另一区域,当前区域则由其他卫星波束进行覆盖。采用地球固定足印模式一方面可以有效减少卫星与地面用户之间的切换,从而减小信令开销,提高业务的稳定性;另一方面,固定区域形成一张固定的虚拟拓扑,可以通过与卫星节点的映射屏蔽卫星拓扑的动态性,简化星间路由的设计。随着星载相控阵列天线技术的进步,采用凝视波束实现地球固定足印模式成为可能^[3]。

地球固定足印模式中的固定区域通常被称为覆盖域或虚拟节点。现有文献从不同角度对采用覆盖域方式的LEO卫星网络进行了研究。文献[4]研究了覆盖域的设计以最大化轨间链路数目,并给出了节点失效情况下时间片的数目和长度。文献[5]提出了一种多状态虚拟网络,令卫星数目大于覆盖域数目,从而实现软切换。文献[6]提出了虚拟节点间水平方向星间链路的建立方式,从而增加可用的链路数目。文献[7]研究了地球固定足印模式下的移动性管理技术。文献[8-10]研究了采用虚拟节点策略时的路由算法。

在地球固定足印模式中,当卫星远离当前覆盖域时,需要将波束切换到新的覆盖域。对于覆盖域间的切换,现有文献通常简单地假设各个卫星在固定的时间间隔之后同步切换到下一个覆盖域,但没有给出具体的切换策略。然而,由于地球的自转,波束在覆盖域间的切换问题变得十分复杂,波束既需要在同轨道的覆盖域间进行切换,也需要在相邻轨道的覆盖域间进行切换。相比于卫星固定足印模式,地球固定足印模式下波束对地面照射的最小仰角较小,而覆盖域的划分、覆盖域切换时刻的选取、波束切换时目标覆盖域的选择均对波束仰角有影响,进而影响网络的服务质量。另外,极轨星座和倾斜轨星座具有不同的特点,需要有针对性地设计覆盖域切换方法。

本文对LEO卫星星座中地球固定足印模式下的覆盖域切换问题进行了研究,提出了具体的覆盖域切换方法。首先提出了覆盖域的划分机制,然后分别针对同轨道覆盖域间的切换和相邻轨道覆盖域间的切换提出了切换时刻的选择机制和目标覆盖域的选择机制。在设计具体机制时,考虑了极轨星座和倾斜轨星座的差异,使所提方法同时支持2种星座。基于实际星座OneWeb和Telesat的仿真表明,

所提方法能够有效增大波束对地覆盖的最小仰角,进而提升链路质量。

1 系统模型

1.1 LEO卫星星座

单层LEO卫星星座由均匀分布在若干轨道上的卫星构成。设轨道数为 P ,每个轨道上的卫星数为 M ,卫星总数为 $N = PM$ 。对卫星 i 进行编号,记为 (p_i^s, s_i^s) ,其中, p_i^s 为轨道号, $0 \leq p_i^s \leq P - 1$, s_i^s 为卫星号, $0 \leq s_i^s \leq M - 1$ 。设轨道倾角为 α ,同一轨道内相邻卫星间的相位差为 $\Delta\beta = \frac{2\pi}{M}$;相邻轨道卫星间的相位差 $\Delta\varphi$ 由相位因子 F 决定, $\Delta\varphi = \frac{2\pi F}{N}$,其中 $F = 0, \dots, P - 1$ 。相邻轨道间的升交点赤经差记为 $\Delta\theta$,对于极轨星座,各个轨道的升交点沿赤道上 180° 的范围排列,因此 $\Delta\theta \approx \frac{\pi}{N}$;对于倾斜轨星座,各个轨道的升交点沿赤道上 360° 的范围排列,因此 $\theta = \frac{2\pi}{N}$ 。LEO卫星星座示意如图1所示,参数及其含义如表1所示。在极轨星座中,第一轨和最后一轨上卫星的运动方向相反,因此存在所谓的“反向缝”。

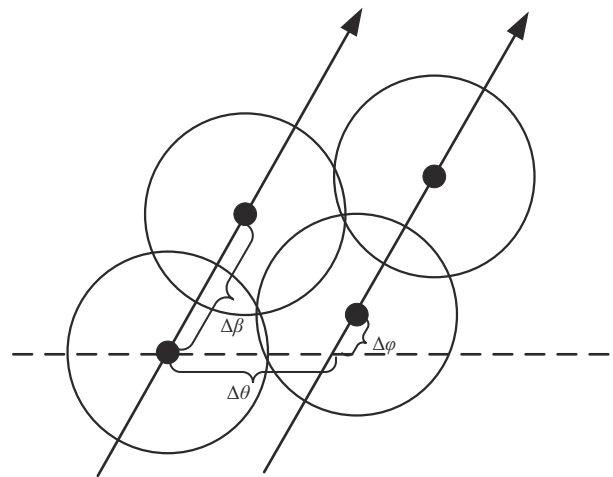


图1 LEO卫星星座示意

1.2 地球固定足印模式

假设卫星采用宽波束对地面进行覆盖。在地球固定足印模式中,将地面划分为若干个固定的覆盖域,覆盖域数目与卫星数目相同。在任一时刻,每个覆盖域被一个卫星的波束所覆盖。在预定的时刻,所有卫星的波束同步切换到下一个覆盖域。

表1 LEO卫星星座参数及其含义

参数	含义
P	轨道数目
M	每个轨道内的卫星数目
N	卫星总数目
α	轨道倾角
$\Delta\beta$	同一轨道内相邻卫星间的相位差
$\Delta\varphi$	相邻轨道卫星间的相位差
$\Delta\theta$	相邻轨道间的升交点赤经差
ω_s	卫星运行的角速度
ω_e	地球自转的角速度

在卫星固定足印模式下,卫星星下点始终与其覆盖域中心重合;在地球固定足印模式下,卫星波束在一段时间内持续照射一个覆盖域,因此卫星星下点会偏离覆盖域中心,导致波束对覆盖域边缘用户的仰角减小,继而链路损耗增加,影响通信质量。因此,在设计波束在覆盖域间的切换方案时,一个重要的原则是尽可能地避免波束对覆盖域的仰角过小。地球固定足印模式示例如图2所示。根据上述原则可知,覆盖方式1优于覆盖方式2。

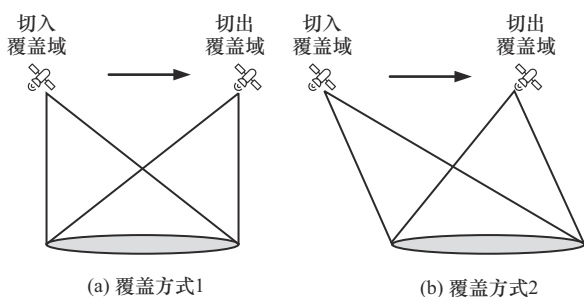


图2 地球固定足印模式示例

2 覆盖域划分

在采用地球固定足印模式的LEO卫星星座中,首先需要进行覆盖域的划分。在一个LEO系统中,通常会根据特定的覆盖需求进行星座参数的设计^[1],包括轨道数目、卫星数目、轨道高度、轨道倾角、波束张角大小等参数,这里的波束张角大小通常是针对卫星固定足印模式而言的。假设波束张角大小给定,波束在地面的照射范围为大小相等的圆形。选取某个初始时刻 t_0 ,该时刻各个卫星的星下点位于其波束照射范围的中心,以 t_0 时刻各个波束的照射范围作为地球固定足印模式下的覆盖域。从 t_0 开始,令覆盖域保持固定,卫星在预定的切换时刻进行覆盖域切换。

将第 i 个覆盖域记为 $R_i, i = 0, 1, \dots, N-1$,并将其编号为 (p_i^r, s_i^r) ,其中, p_i^r 为 R_i 所对应的初始卫星的轨道号, s_i^r 为 R_i 所对应的初始卫星的卫星号。将 p_i^r 相同的覆盖域称为一个“覆盖域轨道”,覆盖域轨道相对于地面固定,卫星轨道则由于地球的自转而相对于地面存在运动。 $p_i^r = 0$ 对应的覆盖域轨道与 $p_i^r = N-1$ 对应的覆盖域轨道之间存在反向缝,将其称为“覆盖域反向缝”。

为了便于覆盖域切换方案的设计,应使各个覆盖域构成的拓扑具有规则性,即任意相邻覆盖域轨道之间的相位差、角度应保持一致,并以此为依据进行初始时刻 t_0 的选取。接下来,分别讨论极轨星座和倾斜轨星座中初始时刻 t_0 的选取。

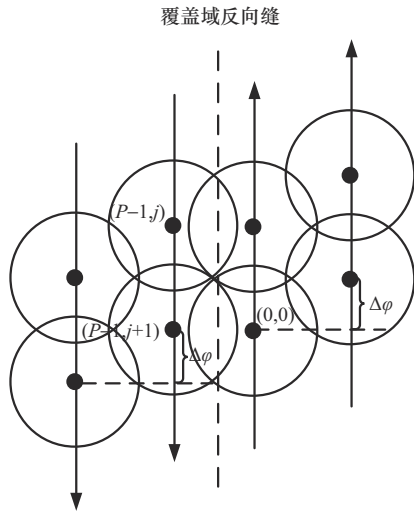
2.1 极轨星座中初始时刻的选取

在极轨星座中,通常令 $\Delta\varphi = \frac{\pi}{M}$,从而以最少的卫星数目或最小的覆盖域实现全球无缝覆盖^[12]。在这种情况下,同向运行的相邻轨道卫星间的相位差均为 $\Delta\varphi$ 。然而,反向缝两侧的卫星运动方向相反,卫星间的相位差持续变化。图3给出了2个不同时刻下极轨星座覆盖域的分布方式。若覆盖域分布如图3(a)所示,则各个卫星同步切换后,一部分卫星的覆盖方式如图2(a)所示,另一部分卫星的覆盖方式如图2(b)所示,无法保证仰角最优。因此,应选取合适的初始时刻,使覆盖域规则分布,即第一轨和最后一轨上卫星间的相位差为 $\Delta\varphi$,如图3(b)所示。

确定初始时刻的具体步骤如下。设 $t = 0$ 时刻卫星 $(0,0)$ 的相位为 0 ,则第 $P-1$ 轨上各个卫星的相位为 $\varphi_k^{P-1} = (P-1)\Delta\varphi + k\Delta\beta, k = 0, 1, \dots, M-1$ 。为了将 $P-1$ 轨上卫星的相位与卫星 $(0,0)$ 的相位相比较,需要将相位起点进行统一。由于第 0 轨和第 $P-1$ 轨的相位起始点沿赤道相隔 180° ,因此令卫星 $(0,0)$ 的相位为 π ,这相当于将卫星 $(0,0)$ “放到” $P-1$ 轨上。设 $\varphi_j^{P-1} \leq \pi < \varphi_{j+1}^{P-1}$,即 $t = 0$ 时刻卫星 $(0,0)$ 夹在卫星 $(P-1, j)$ 和 $(P-1, j+1)$ 之间。令

$$t_0 = \frac{\varphi_{j+1}^{P-1} - \Delta\varphi - \pi}{2\omega_s} \quad (1)$$

其中, ω_s 为卫星运行的角速度,则在 t_0 时刻,卫星 $(P-1, j+1)$ 与卫星 $(0,0)$ 的相位差为 $\Delta\varphi$,如图3(b)所示。令 t_0 为初始时刻,则得到的覆盖域拓扑呈规则性。



(a) 覆盖域非规则分布

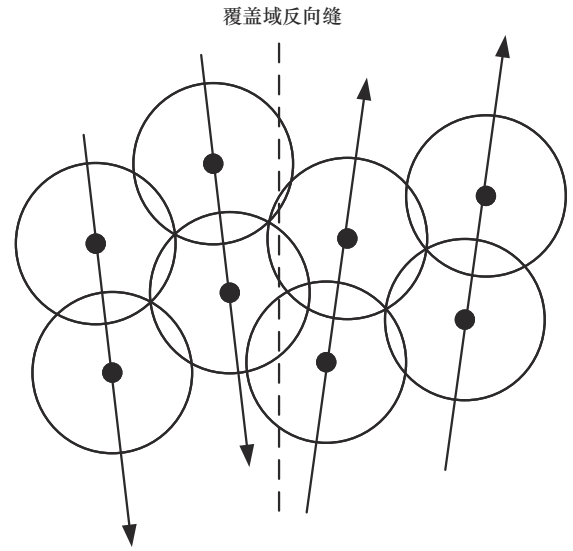
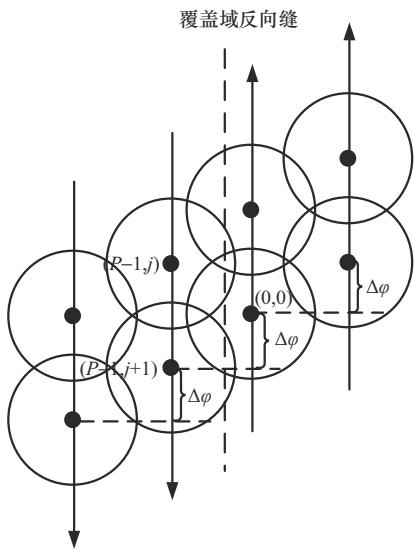


图 4 覆盖域反向缝两侧的覆盖域轨道



(b) 覆盖域规则分布

图 3 极轨星座覆盖域分布方式

在极轨星座中，轨道倾角通常并非严格的 90° ，而是略小于 90° ，以避免卫星在极点处的碰撞。因此，覆盖域反向缝两侧的覆盖域轨道将存在一定的夹角，如图 4 所示，从而影响覆盖域拓扑结构的规则性，在第 4 节的仿真验证中将会看到这一现象对波束最小仰角的影响。

2.2 倾斜轨星座中初始时刻的选取

在倾斜轨星座中，各个轨道的升交点沿赤道 360° 的范围排列，拓扑中不存在反向缝，任意 2 个相邻轨道间的相位差均为 $\Delta\varphi$ ^[13]。因此，以任意时刻作为初始时刻，均可保证覆盖域拓扑的规则性。

3 覆盖域切换方案

卫星在运行过程中，其波束需要在各个覆盖域之间进行切换。由于地球的自转，波束在覆盖域间的切换分为轨内覆盖域切换和轨间覆盖域切换。轨内覆盖域切换是指卫星的波束切换到同一覆盖域轨道的某一覆盖域；轨间覆盖域切换是指卫星的波束切换到相邻覆盖域轨道的某一覆盖域。接下来，分别针对轨内覆盖域切换和轨间覆盖域切换进行讨论，设计具体的覆盖域切换方案，包括切换时刻的确定以及目标覆盖域的确定。

3.1 轨内覆盖域切换

3.1.1 切换时刻的确定

直观上，卫星在一个轨道周期内会扫过一个覆盖域轨道内的 M 个覆盖域，因此，一种策略是将轨内覆盖域切换间隔设为

$$\Delta T_1 = \frac{2\pi}{M\omega_s} \quad (2)$$

图 5 为以 ΔT_1 为切换间隔时的轨内覆盖域切换，其中，相位 φ_1 与 φ_2 之间的时间间隔为 ΔT_1 。在极轨星座中，对于覆盖域 R 的照射，卫星在相位 φ_1 处切入覆盖域 R ，在相位 φ_2 处切出覆盖域 R ，这样使得在沿覆盖域轨道方向上，卫星可以最小限度地偏离覆盖域中心，从而增加仰角。注意到，由于地球的自转，卫星在照射覆盖域的过程中，在水平方向上相对于覆盖域也存在偏移。

对于倾斜轨星座，若仍以 ΔT_1 作为轨内覆盖域切换间隔，则随着时间的推移，卫星在沿覆盖域轨

道方向上会逐渐偏离覆盖域,如图5(b)所示。因此,应对 ΔT_1 进行修正。如图6所示,设 l_1 为覆盖域 R_1 和 R_2 沿轨道方向的对称轴, l_2 为覆盖域 R_2 和 R_3 沿轨道方向的对称轴,卫星应在 l_1 上 A 点切入覆盖域 R_2 ,在 l_2 上 B 点切出覆盖域 R_2 ,这样使得在沿覆盖域轨道方向上,卫星可以最小限度地偏离覆盖域中心,从而增加仰角。将此切换方式称为“沿轨道方向上的最优切换”,将 l_1 与 l_2 之间的区域称为覆盖域 R_2 “沿轨道方向上的最优区间”。

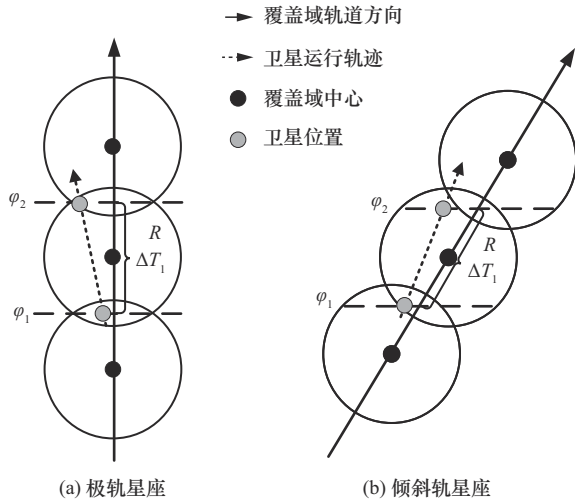


图5 以 ΔT_1 为切换间隔时的轨内覆盖域切换

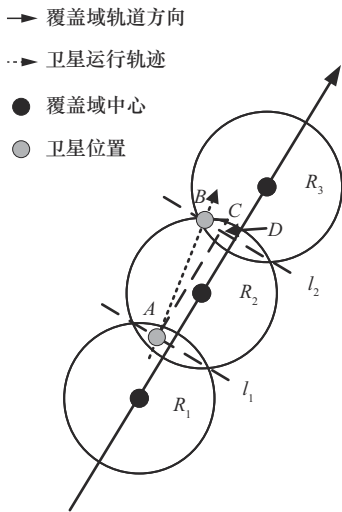


图6 轨内覆盖域切换间隔的计算

接下来,计算图6中 A 点和 B 点间的时间间隔 ΔT 。令 AC 平行于覆盖域轨道方向, BC 平行于赤道面, AC 与 l_2 相交于 D ,则有以下弧度值: $\theta_{AC} = \omega_s \Delta T$, $\theta_{AD} = \omega_s \Delta T_1$, $\theta_{BC} = \omega_e \Delta T$, 其中, ω_e 为地球自转角速度。 $\theta_{CD} = \theta_{AC} - \theta_{AD} = \omega_s (\Delta T - \Delta T_1)$,

根据 $\theta_{CD} = \theta_{BC} \cos \alpha$, 可得

$$\omega_s (\Delta T - \Delta T_1) = \omega_e \Delta T \cos \alpha \quad (3)$$

从而有

$$\Delta T = \frac{\omega_s \Delta T_1}{\omega_s - \omega_e \cos \alpha} \quad (4)$$

将式(2)代入式(4)可得

$$\Delta T = \frac{2\pi}{M(\omega_s - \omega_e \cos \alpha)} \quad (5)$$

因此,为实现沿轨道方向上的最优切换,应以 ΔT 为轨内覆盖域切换间隔。令 $\alpha=90^\circ$, 可得 $\Delta T = \Delta T_1$, 即极轨星座是式(5)的一个特例。

由于初始时刻卫星星下点位于覆盖域中心,因此,第一次轨内覆盖域切换发生在 $t_0 + \frac{\Delta T}{2}$ 时刻。该时刻之后,就要以 ΔT 为间隔进行轨内覆盖域切换。

3.1.2 目标覆盖域的确定

在进行覆盖域切换时,需要确定要切入的覆盖域,即目标覆盖域。设当前覆盖域为 (p^r, s^r) , 目标覆盖域为 (p_n^r, s_n^r) , 对于轨内覆盖域切换,在同一覆盖域轨道上选择目标覆盖域,因此 $p_n^r = p^r$ 。接下来,分别针对倾斜轨星座和极轨星座讨论 s_n^r 的选择。

1) 倾斜轨星座

对于倾斜轨星座,每条覆盖域轨道上卫星号递增的方向均与卫星运行方向一致,因此, $s_n^r = \text{mod}(s^r + 1, M)$ 。

2) 极轨星座

对于极轨星座,由于反向缝的存在,覆盖域轨道上卫星号递增的方向可能与卫星运行方向不一致。轨内切换目标覆盖域的确定如图7所示,初始时,各个卫星运行方向与其覆盖域轨道上卫星号递增的方向一致;当卫星跨越覆盖域反向缝时,卫星运行方向不变,而覆盖域轨道上卫星号递增的方向发生反转。因此,为了确定目标覆盖域,给每个卫星定义一个切换状态 State_i , $\text{State}_i = 0$ 表示覆盖域轨道上卫星号递增的方向与卫星运行方向一致, $\text{State}_i = 1$ 表示覆盖域轨道上卫星号递增的方向与卫星运行方向相反。切换规则如下。

①初始时,所有卫星的切换状态设为0。

②在进行轨内覆盖域切换时,若 $\text{State}_i = 0$, 则 $s_n^r = \text{mod}(s^r + 1, M)$; 若 $\text{State}_i = 1$, 则 $s_n^r = \text{mod}(s^r - 1, M)$ 。

③当发生轨间覆盖域切换后,若卫星跨越了覆盖域反向缝,则其切换状态反转。

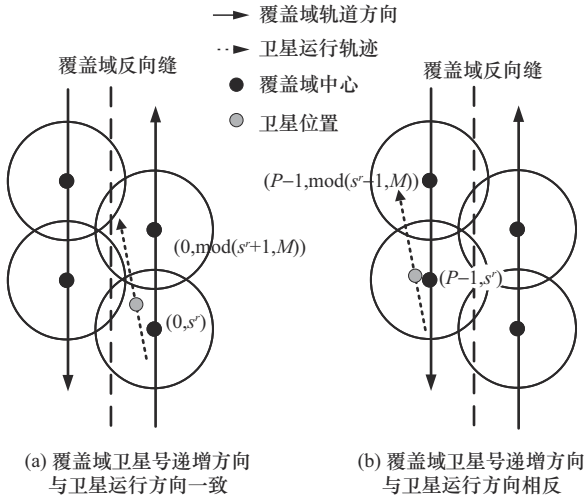


图 7 轨内切换目标覆盖域的确定

3.2 轨间覆盖域切换

由于地球的自转, 卫星星下点在沿赤道方向上会逐渐偏离覆盖域中心, 因此, 在适当的时刻需要将卫星波束切换到相邻覆盖域轨道上的某个覆盖域, 即进行轨间覆盖域切换。

3.2.1 切换时刻的确定

对于极轨星座, 各个覆盖域轨道沿赤道 180° 排列, 卫星在半个地球自转周期内会扫过 P 个覆盖域轨道; 对于倾斜轨星座, 各个覆盖域轨道沿赤道 360° 排列, 卫星在一个地球自转周期内会扫过 P 个覆盖域轨道。因此, 将轨间覆盖域切换间隔设为

$$\Delta T_{\text{inter}} = \begin{cases} \frac{\pi}{P\omega_e}, & \text{极轨星座} \\ \frac{2\pi}{P\omega_e}, & \text{倾斜轨星座} \end{cases} \quad (6)$$

通常 ΔT_{inter} 数倍于轨内覆盖域切换间隔 ΔT , 因此, 若干次轨内覆盖域切换后进行一次轨间覆盖域切换。由于初始时刻卫星星下点位于覆盖域中心, 因此, 第一次轨间覆盖域切换发生在 $t_0 + \frac{\Delta T_{\text{inter}}}{2}$ 时刻。该时刻之后, 以 ΔT_{inter} 为间隔进行轨间覆盖域切换。

3.2.2 目标覆盖域的确定

设当前覆盖域为 (p^r, s^r) , 轨间覆盖域切换的目标覆盖域为 (p_n^r, s_n^r) 。由于地球自西向东自转, 因此 $p_n^r = \text{mod}(p^r - 1, P)$ 。接下来, 讨论 s_n^r 的确定。在选择目标覆盖域时, 为了尽可能增加仰角, 应使卫星落入目标覆盖域沿轨道方向的最优区间内, 这可以通过相位的比较来实现。

轨间切换目标覆盖域的确定如图 8 所示。设卫星在 A 点进行轨间覆盖域切换, 则首先将 A 点映射到要切入的覆盖域轨道上, 即 A' 点。设卫星在 A 点的相位为 $\varphi_A(t)$, 则 A' 点的相位为 $\varphi_A(t) + \frac{\Delta\theta \cos \alpha}{2}$ 。设 p_n^r 对应的覆盖域轨道上各个覆盖域的中心与 A' 点的相位差为 $\Delta\varphi_R^i, i = 0, \dots, M - 1$, 则令

$$s_n^r = \arg \min_i \Delta\varphi_R^i \quad (7)$$

即选择相位差最小的覆盖域切入, 从而保证卫星落入覆盖域 (p_n^r, s_n^r) 沿轨道方向的最优区间内。

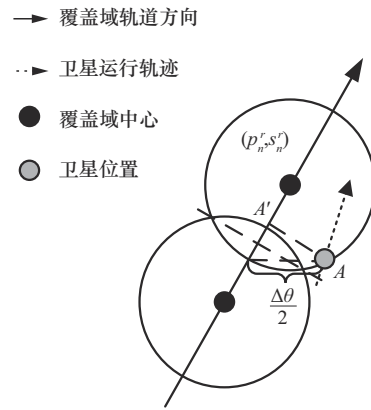


图 8 轨间切换目标覆盖域的确定

对于同一卫星轨道, 只需针对其中一个卫星利用式(7)求其目标覆盖域, 其他卫星的目标覆盖域依次顺延即可。

3.2.3 轨内切换时刻的调整

轨间覆盖域切换间隔 ΔT_{inter} 的选取考虑了地球自转导致的沿赤道方向上的位移。然而, 如图 8 所示, 在预定的轨间切换时刻, 卫星并不一定在 2 个覆盖域沿覆盖域轨道方向的对称轴上切入, 即不一定按沿轨道方向最优切换的方式切入目标覆盖域。因此, 在新的覆盖域轨道上, 若继续按 ΔT 为切换间隔进行轨内覆盖域切换, 则沿覆盖域轨道方向上会产生较大的偏移, 降低波束的仰角。

为解决此问题, 在每次轨间覆盖域切换后, 需要调整下一次轨内覆盖域切换的时刻, 使卫星在后续的轨内切换过程中满足沿轨道方向上的最优切换。轨内切换时刻的调整如图 9 所示。设卫星在 A 点进行了轨间覆盖域切换, 目标覆盖域为 R_1 , 覆盖域 R_1 和 R_2 沿覆盖域轨道方向上的对称轴为 l_1 , 则卫星应在 B 点进行下一次轨内覆盖域切换。

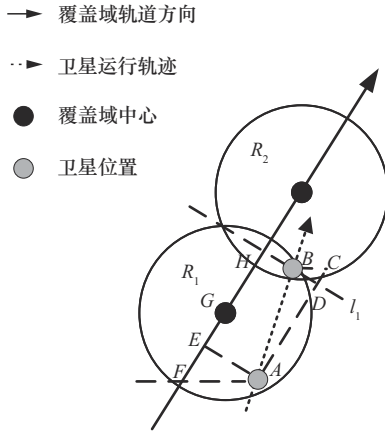


图9 轨内切换时刻的调整

设卫星在 A 点的时刻为 t ，接下来，计算从 A 点到 B 点之间的时间间隔，记为 $\Delta T'_i$ 。则有以下弧度值： $\theta_{AC} = \omega_s \Delta T'_i$ ， $\theta_{BC} = \omega_e \Delta T'_i$ ， $\theta_{AF} = \frac{\Delta \theta}{2}$ ， $\theta_{EF} = \theta_{AF} \cos \alpha = \frac{\Delta \theta \cos \alpha}{2}$ 。设卫星在 A 点处的相位为 $\varphi_A(t)$ ，覆盖域 R_1 中心 G 点的相位为 $\varphi_G(t)$ ，则 $\theta_{GF} = \varphi_G(t) - \varphi_A(t)$ ， $\theta_{AD} = \theta_{EH} = \theta_{GH} + \theta_{GF} - \theta_{EF}$ ，其中， $\theta_{GH} = \frac{\pi}{M}$ 。由 $\theta_{CD} = \theta_{AC} - \theta_{AD} = \theta_{BC} \cos \alpha$ 可得

$$\omega_s \Delta T'_i - \left(\frac{\pi}{M} + \varphi_G(t) - \varphi_A(t) - \frac{\Delta \theta \cos \alpha}{2} \right) = \omega_e \Delta T'_i \cos \alpha \quad (8)$$

从而求得

$$\Delta T'_i = \frac{\frac{\pi}{M} + \varphi_G(t) - \varphi_A(t) - \frac{\Delta \theta \cos \alpha}{2}}{\omega_s - \omega_e \cos \alpha} \quad (9)$$

因此，下一次轨内覆盖域切换时刻应为 $t + \Delta T'_i$ ，从而使卫星在后续的轨内切换过程中满足沿轨道方向上的最优切换。由于第 2 节中的覆盖域划分方式保证了覆盖域拓扑的规则性，因此只需选取网络中任一卫星来计算 $\Delta T'_i$ ，则所有卫星的下次轨内覆盖域切换保持同步，均发生在 $t + \Delta T'_i$ 时刻，此后，继续按照 ΔT 进行轨内覆盖域切换。

综上所述，卫星在覆盖域间的切换时刻按图 10 所示的方式进行排布。由于 ΔT_{inter} 并不一定是 ΔT 的整数倍，因此每次轨间切换后的 $\Delta T'_i$ 并不一定是相同的值。

3.3 覆盖域切换流程

综合第 2 节、第 3.1 节和第 3.2 节的内容，极轨星座和倾斜轨星座下的覆盖域切换流程分别如算法 1 和算法 2 所示。

算法 1 极轨星座下的覆盖域切换流程

根据式(1)计算初始时刻 t_0 ，将 t_0 时刻各卫星的波束照射区域作为覆盖域。根据式(5)计算轨内覆盖域切换间隔 ΔT ，根据式(6)计算轨间覆盖域切换间隔 ΔT_{inter} 。

- 1) 初始化各个卫星的切换状态 $\text{State}_i = 0, i = 0, \dots, N - 1$;
- 2) 令当前时刻 $t = t_0 + \frac{\Delta T}{2}$ ，下一次轨间切换时刻 $t_{\text{inter}} = t_0 + \frac{\Delta T_{\text{inter}}}{2}$ ，当前切换类型为轨内覆盖域切换；
- 3) 若当前切换类型为轨内覆盖域切换
- 4) for 卫星 $i = 0, \dots, N - 1$
- 5) 设卫星 i 的当前覆盖域为 (p^r, s^r) ，令 $p_n^r = p^r$;
- 6) 若 $\text{State}_i = 0$ ，则 $s_n^r = \text{mod}(s^r + 1, M)$ ，若 $\text{State}_i = 1$ ，则 $s_n^r = \text{mod}(s^r - 1, M)$;
- 7) 将卫星 i 切换到覆盖域 (p_n^r, s_n^r) ;
- 8) end for
- 9) 令 $t = t + \Delta T$ ，若 $t \geq t_{\text{inter}}$ ，则令 $t = t_{\text{inter}}$ ，当前切换类型为轨间覆盖域切换，否则，当前切换类型为轨内覆盖域切换；
- 10) 否则，当前切换类型为轨间覆盖域切换
- 11) for 卫星 $i = 0, \dots, N - 1$
- 12) 设卫星 i 的当前覆盖域为 (p^r, s^r) ，令 $p_n^r = \text{mod}(p^r - 1, P)$;
- 13) 根据式(7)计算 s_n^r ，将卫星 i 切换到覆盖域 (p_n^r, s_n^r) ;

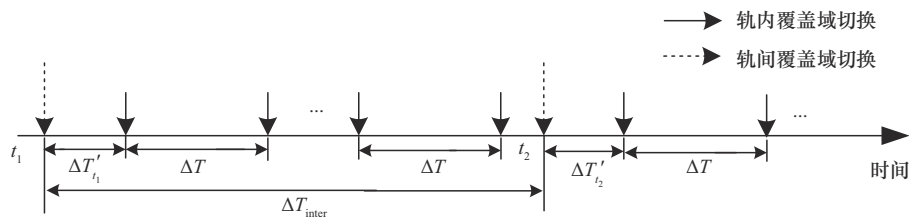


图 10 覆盖域切换时刻的排布

14) 若 $p_n^r = N - 1$, 即跨越了覆盖域反向缝, 则 State_i 反转;

15) end for

16) 根据式(9)计算下一次轨内切换间隔 $\Delta T_i'$, 令 $t = t + \Delta T_i'$, 当前切换类型为轨内覆盖域切换;

17) 转到步骤3)。

算法2 倾斜轨星座下的覆盖域切换流程

令 $t_0 = 0$, 将 t_0 时刻各卫星的波束照射区域作为覆盖域。根据式(5)计算轨内覆盖域切换间隔 ΔT , 根据式(6)计算轨间覆盖域切换间隔 ΔT_{inter} 。

1) 令当前时刻 $t = t_0 + \frac{\Delta T}{2}$, 下一次轨间切换时刻 $t_{\text{inter}} = t_0 + \frac{\Delta T_{\text{inter}}}{2}$, 当前切换类型为轨内覆盖域切换;

2) 若当前切换类型为轨内覆盖域切换

3) for 卫星 $i = 0, \dots, N - 1$

4) 设卫星 i 的当前覆盖域为 (p^r, s^r) , 令 $p_n^r = p^r$, $s_n^r = \text{mod}(s^r + 1, M)$, 将卫星 i 切换到覆盖域 (p_n^r, s_n^r) ;

5) end for

6) 令 $t = t + \Delta T$, 若 $t \geq t_{\text{inter}}$, 则令 $t = t_{\text{inter}}$, 当前切换类型为轨间覆盖域切换, 否则, 令当前切换类型为轨内覆盖域切换;

7) 否则, 当前切换类型为轨间覆盖域切换

8) for 卫星 $i = 0, \dots, N - 1$

9) 设卫星 i 的当前覆盖域为 (p^r, s^r) , 令 $p_n^r = \text{mod}(p^r - 1, M)$;

10) 根据式(7)计算 s_n^r , 将卫星 i 切换到覆盖域 (p_n^r, s_n^r) ;

11) end for

12) 根据式(9)计算下一次轨内切换间隔 $\Delta T_i'$, 令 $t = t + \Delta T_i'$, 当前切换类型为轨内覆盖域切换;

13) 转到步骤2)。

算法1和算法2均可在地面站执行, 这样可以提前计算一定时期内的切换时刻、各个卫星的目标覆盖域, 并将切换信息上注到星上。在系统运行过程中, 可根据实时监测到的卫星位置信息对切换时刻进行微调, 更新切换信息并重新上注给卫星。

对于极轨星座, 在极地附近, 由于卫星分布较为密集, 波束会产生大量的重叠, 可采用动态关闭波束的方法减小波束重叠造成的干扰并降低能耗^[14]; 对于倾斜轨星座, 由于存在2组运动方向相

互交叉的轨道^[15], 也会使波束大量重叠, 此时可以提供多重覆盖。本文所提方法与覆盖域之间的重叠问题互不影响, 所提方法对覆盖域进行编号, 并记录各覆盖域中心的位置, 波束在预定时刻在覆盖域间进行切换, 并在此基础上进行波束的动态关闭及多重覆盖的实现。

4 仿真验证

4.1 仿真设置

本节选取典型的极轨星座和倾斜轨星座对所提方法进行验证, 分别选取OneWeb第一阶段以及Telesat第一阶段的星座^[16], 星座参数如表2所示。由于现有LEO星座系统通常包含多层星座以实现其覆盖需求, 本节选取每个星座系统中的一层进行仿真验证。表2中的初始最小仰角对应于卫星固定足印模式下的最小仰角, 即在初始时刻卫星星下点处于覆盖域中心时的最小仰角。根据Telesat提交给联邦通信委员会的申请, 其最小仰角为 10° , 然而, 在此参数下, 若采用地球固定足印模式, 则会导致最小仰角小于 0° , 即存在卫星对地面终端不可见的情况, 因此, 表2对Telesat中的初始最小仰角参数进行了修改, 下文将对修改前和修改后的仿真结果进行对比。

表2 星座参数

参数	OneWeb	Telesat
轨道数目	12	20
每轨道内卫星数目	49	11
轨道高度/km	1 200	1 325
轨道倾角	87.9°	50.88°
相位因子	6	0
初始最小仰角	25°	28°

相比于卫星固定足印模式, 地球固定足印模式会减小波束覆盖的仰角, 本文所提方法旨在尽可能增大波束的最小仰角, 因此, 本节主要关注的指标是波束覆盖的最小仰角。选取星座中的一个卫星(0,0), 记录其在运行过程中对覆盖域的最小仰角变化, 观察周期为一天。

对于地球固定足印模式, 现有文献通常简单地假设各个卫星在固定的时间间隔之后同步切换到下一个覆盖域, 但没有给出具体的切换策略。本节将验证所提方法中关键环节的影响, 包括以下2个方面, 同时, 将地球固定足印模式与卫星固定足印模式下的最小仰角进行对比。

1) 轨内切换时刻的调整: 对比不采用 3.2.3 节轨内切换时刻调整机制时的性能, 即在轨内覆盖域切换后, 直接按照 ΔT 进行后续的轨内覆盖域切换。

2) 轨内切换间隔的选择: 对于倾斜轨星座, 对比采用式(2)计算的 ΔT_1 作为轨内切换间隔时的性能, 但式(2)未考虑卫星沿覆盖域轨道方向上的偏移。

4.2 仿真结果

图 11 给出了采用所提方法时 OneWeb 星座中卫星(0,0)的最小仰角变化, 同时显示了卫星固定足印模式下的最小仰角。从图 11 可以看到, 卫星固定足印模式下的最小仰角保持不变, 而地球固定足印模式下的卫星最小仰角持续变化, 并始终不超过卫星固定足印模式下的最小仰角。图 11 中左半部分相比于右半部分仰角下降较多, 这是由于仿真的星座为近极轨星座, 轨道倾角并非严格的 90° , 因此, 覆盖域反向缝两侧存在一定的夹角, 影响覆盖域拓扑的规则性, 从而导致波束仰角的下降。

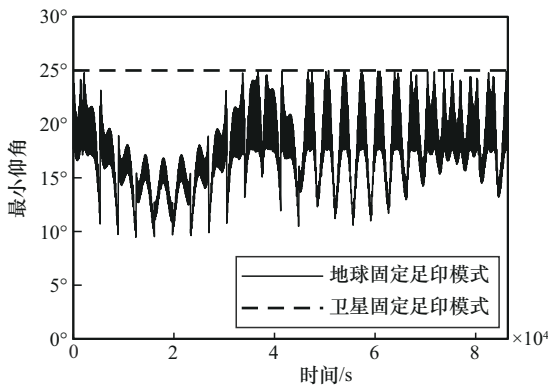


图 11 OneWeb 星座中卫星(0,0)的最小仰角变化

图 12 给出了不进行轨内切换时刻调整时的 OneWeb 星座中卫星(0,0)的最小仰角变化。从图 12 可以看到, 不进行轨内切换时刻调整将导致卫星无法始终处于沿轨道方向上的最优区间内, 从而使波束的最小仰角减小。

图 13 显示了从图 11 中截取的一个时间区间内卫星(0,0)在一个覆盖域轨道内的最小仰角变化, 其中, 一个波峰代表卫星对一个覆盖域的覆盖情况。卫星从 2 个覆盖域的对称轴处切入覆盖域, 在运行过程中, 卫星逐渐靠近覆盖域中心, 随后逐渐远离覆盖域中心, 因此最小仰角呈现先增大后减小的趋势。从图 13 中还可以看到, 在这一时段, 中

间位置处最小仰角较大, 两边位置处最小仰角较小, 这是由于卫星刚切入新的覆盖域轨道时, 在水平方向上偏离覆盖域中心较大, 随着卫星的运行, 卫星在水平方向上逐渐靠近覆盖域中心, 随后逐渐远离覆盖域中心。

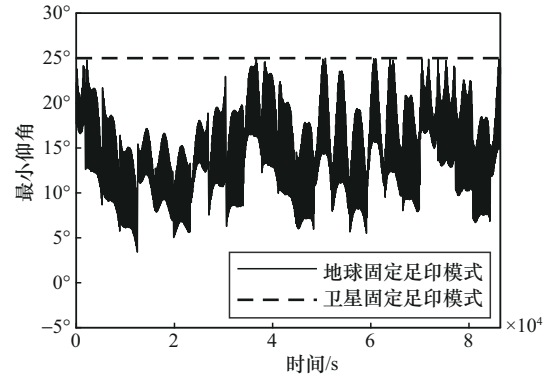


图 12 不进行轨内切换时刻调整时的 OneWeb 星座中卫星(0,0)的最小仰角变化

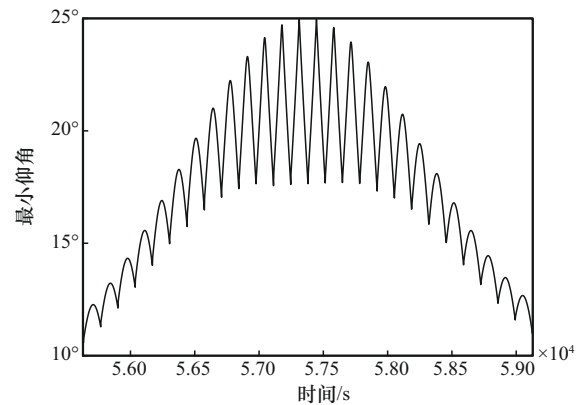


图 13 OneWeb 星座中卫星(0,0)在一个覆盖域轨道内的最小仰角变化

图 14 和图 15 给出了采用所提方法时 Telesat 星座中卫星(0,0)的最小仰角变化, 其中, 图 14 采用的初始最小仰角为 28° , 图 15 采用的初始最小仰角为 10° 。可以看到, 当初始最小仰角为 10° 时, 运行过程中最小仰角会减小到 0° 以下, 即存在卫星对地面终端不可见的情况。因此, 下文对 Telesat 星座的仿真均以 28° 为初始最小仰角。

图 16 给出了不进行轨内切换时刻调整时的 Telesat 星座中卫星(0,0)的最小仰角变化。从图 16 可以看到, 若不进行轨内切换时刻的调整, 则会出现最小仰角为负, 即卫星对地面终端不可见的情况。通过轨内切换时刻的调整, 可以最大限度地增大波束的最小仰角。

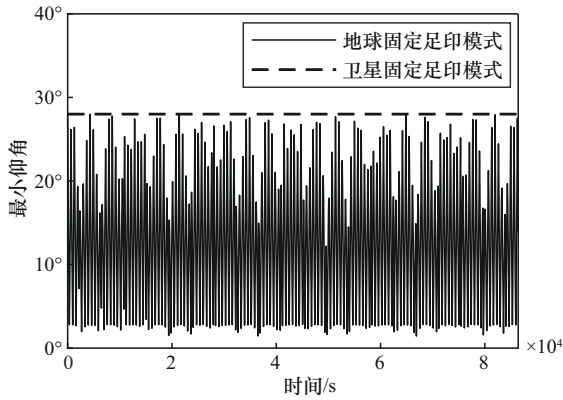


图 14 Telesat 星座中卫星(0,0)的最小仰角变化 (初始最小仰角为 28°)

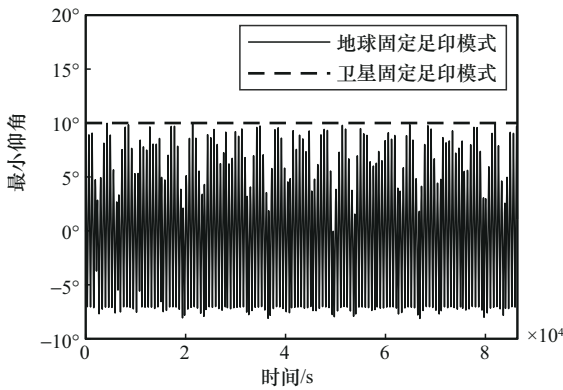


图 15 Telesat 星座中卫星(0,0)的最小仰角变化 (初始最小仰角为 10°)

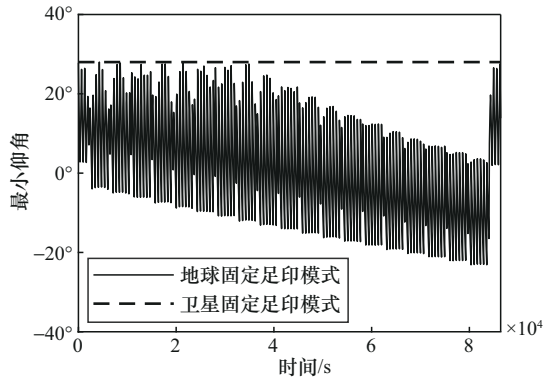


图 16 不进行轨内切换时刻调整时的 Telesat 星座中卫星(0,0)的最小仰角变化

图 17 给出了使用式(2)计算的 ΔT_1 作为轨内切换间隔时 Telesat 星座中卫星(0,0)的最小仰角变化。从图 17 可以看到,存在最小仰角为负,即卫星对地面终端不可见的情况。这是由于 ΔT_1 未考虑倾斜轨星座中轨道倾角的影响,使得卫星在沿覆盖域轨道方向上偏离覆盖域中心较大。而使用 ΔT 作为轨内切换间隔可以使卫星落入覆盖域沿轨

道方向上的最优区间内,从而尽可能地增大波束覆盖的仰角。

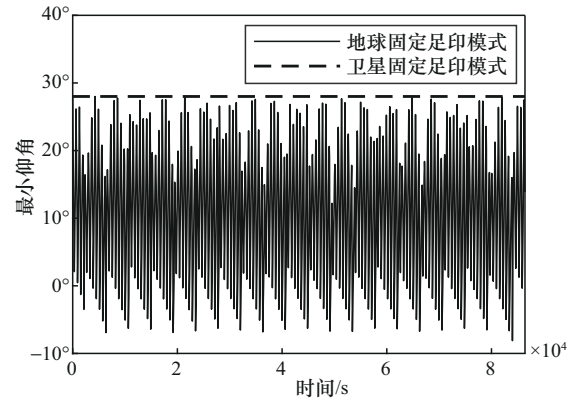


图 17 轨内切换间隔为 ΔT_1 时 Telesat 星座中卫星(0,0)的最小仰角变化

表 3 给出了地球固定足印模式 2 个星座下卫星(0,0)在一天内波束最小仰角的平均值、最小值和最大值,其中,最大值对应于卫星固定足印模式下的最小仰角,即卫星星下点处于覆盖域中心时的情形。对于不同的星座,相比于卫星固定足印模式,采用地球固定足印模式时的波束最小仰角存在不同程度的减小。其中,对于 Telesat 星座,采用卫星固定足印模式时的最小仰角为 28°,而采用地球固定足印模式时,最差情况下的最小仰角仅 1.4°,这是由于所选取的 Telesat 星座中每条轨道内的卫星数目较少,轨内覆盖域切换间隔 ΔT 较大,在卫星对一个覆盖域进行照射的开始以及结束阶段,卫星相对于覆盖域中心存在较大的偏离,从而波束仰角减小。因此,针对特定的星座,需要根据具体的星座构型、波束参数做出权衡,来选择合适的覆盖模式。

表 3 地球固定足印模式 2 个星座下卫星(0,0)在一天内波束最小仰角的统计值

星座	平均值	最小值	最大值
OneWeb	17.7°	9.5°	25°
Telesat	12.7°	1.4°	28°

5 结束语

本文针对 LEO 卫星星座中地球固定足印模式下的覆盖域切换问题进行了研究,提出了一种覆盖域切换方法,包括覆盖域划分机制、切换时刻选择机制和目标覆盖域选择机制,该方法适用于极轨星座和倾斜轨星座。针对典型 LEO 星座的仿真结果

表明, 所提方法能够有效增大波束对地覆盖的最小仰角, 从而有助于提升通信质量。

当采用地球固定足印模式时, 若卫星数目与覆盖域数目一致, 则卫星在同步切换的过程中会对地面的覆盖存在一定的中断。未来将进一步研究如何在保证软切换的基础上进行覆盖域间的切换。

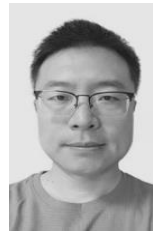
参考文献:

- [1] 陈全, 杨磊, 郭剑鸣, 等. 低轨巨型星座网络: 组网技术与研究现状[J]. 通信学报, 2022, 43(5): 177-189.
CHEN Q, YANG L, GUO J M, et al. LEO mega-constellation network: networking technologies and state of the art[J]. Journal on Communications, 2022, 43(5): 177-189.
- [2] 卢勇, 赵有健, 孙富春, 等. 卫星网络路由技术[J]. 软件学报, 2014, 25(5): 1085-1100.
LU Y, ZHAO Y J, SUN F C, et al. Routing techniques on satellite networks[J]. Journal of Software, 2014, 25(5): 1085-1100.
- [3] 张凤仪. 星载相控阵凝视波束成形技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
ZHANG F Y. Research on staring beamforming in spaceborne phased array[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [4] LU Y, SUN F C, ZHAO Y J. Virtual topology for LEO satellite networks based on earth-fixed footprint mode[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(2): 357-360.
- [5] KORÇAK Ö, ALAGÖZ F. Virtual topology dynamics and handover mechanisms in Earth-fixed LEO satellite systems[J]. Computer Networks, 2009, 53(9): 1497-1511.
- [6] CHEN Q, GUO J M, YANG L, et al. Topology virtualization and dynamics shielding method for LEO satellite networks[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(2): 433-437.
- [7] ZHANG Z N, ZHAO B K, YU W R, et al. Supporting location/identity separation in mobility-enhanced satellite networks by virtual attachment point[J]. Pervasive and Mobile Computing, 2017, 42: 1-14.
- [8] EKICI E, AKYILDIZ I F, BENDER M D. A distributed routing algorithm for datagram traffic in LEO satellite networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2001, 9(2): 137-147.
- [9] CHEN Q, CHEN X Q, YANG L, et al. A distributed congestion avoidance routing algorithm in mega-constellation network with multi-gateway[J]. Acta Astronautica, 2019, 162: 376-387.
- [10] LIU Z G, ZHU J, ZHANG J M, et al. Routing algorithm design of satellite network architecture based on SDN and ICN[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2019, 38(1): 1-15.
- [11] 龚宇鹏. 低轨巨型星座构型设计及覆盖分析方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
GONG Y P. Research on configuration design and coverage performance analysis of leo mega-constellation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [12] LUTZ E, WERNER M, JAHN A. Satellite systems for personal and broadband communications[M]. Berlin: Springer, 2000.
- [13] QI X X, ZHANG B, QIU Z L. A distributed survivable routing algorithm for mega-constellations with inclined orbits[J]. IEEE Access, 2020, 8: 219199-219213.
- [14] 刘帅军, 胡月梅, 范春石, 等. 低轨卫星星座动态波束关闭算法[J]. 通信学报, 2020, 41(4): 190-196.
LIU S J, HU Y M, FAN C S, et al. Dynamic beam shut-off algorithm for LEO satellite constellation[J]. Journal on Communications, 2020, 41(4): 190-196.
- [15] HANDLEY M. Delay is not an option: low latency routing in space[C]// Proceedings of the 17th ACM Workshop on Hot Topics in Networks. New York: ACM Press, 2018: 85-91.
- [16] PACHLER N, PORTILLO I D, CRAWLEY E F, et al. An updated comparison of four low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband[C]// Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-7.

作者简介



齐晓鑫 (1994-), 男, 山西大同人, 博士, 空军工程大学讲师, 主要研究方向为卫星网络组网技术。



宋宝军 (1982-), 男, 河北唐山人, 空军工程大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为雷达信号处理。



李勋 (1987-), 男, 陕西西安人, 博士, 空军工程大学讲师, 主要研究方向为网络流量分析、网络测量、SDN等。