

耿心怡, 陈睿, 王文鼎. 低轨卫星网的用户位置管理技术研究[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(10): 222-226. DOI: 10.20169/j. issn. 2095-2163. 241033

## 低轨卫星网的用户位置管理技术研究

耿心怡<sup>1</sup>, 陈睿<sup>1</sup>, 王文鼎<sup>1,2</sup>

(1 南京邮电大学 通信与信息工程学院, 南京 210003;

2 南京邮电大学 宽带无线通信与传感网技术教育部重点实验室, 南京 210003)

**摘要:** 低轨卫星通信系统作为非地面网络的典型代表, 凭借其低传输时延、低传输损耗、可全球覆盖和较强的抗毁性等特点成为全球移动通信系统的重要组成部分。位置管理作为移动性管理的一部分, 关系到整个系统的性能。然而低轨卫星的高速运动为位置管理技术的发展带来了诸多挑战, 同时海量用户的接入使得卫星跟踪和定位用户的信令开销猛增。本文针对低轨卫星的运动特征, 提出了基于星下点轨迹预测的位置区设计方法, 定义波束跟踪区列表作为位置管理的基本单元, 最后基于纳什议价法构建最优化模型, 使用 Matlab 平台进行代码编写和仿真验证, 在位置更新和寻呼的信令开销之间达到平衡。

**关键词:** 低轨卫星; 位置管理; 位置更新; 寻呼; 信令开销; Matlab

中图分类号: TN927

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2024)10-0222-05

## Study on the technology of UE location management for LEO-satellite Non-Terrestrial Networks

GENG Xinyi<sup>1</sup>, CHEN Rui<sup>1</sup>, WANG Wennai<sup>1,2</sup>

(1 School of Communications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China; 2 Key Laboratory of Broadband Wireless Communication and Sensor

Network Technology, Ministry of Education, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** Low Earth Orbit (LEO) satellite communication system, as a typical representative of Non-Terrestrial Networks (NTN), has emerged as a crucial component of global mobile communication systems for its short propagation delay, low transmission loss, worldwide coverage and high robustness. As a key technology in mobility management, location management has a profound impact on the performance of the entire network. However, the rapid movement of LEO satellites poses great challenges to the development of location management technology. Additionally, the access of a mega number of UEs increases the signalling overhead for the satellite to track and locate UEs. This research proposes the location area division strategy based on the prediction of sub-satellite point trajectory and defines Beam Tracking Area List (BTAL) as the basic unit for location management. An optimization problem is modelled based on the Nash bargaining solution to achieve a trade-off point between location update and the signalling overheads of paging.

**Key words:** LEO satellite; location management; location update; paging; signalling overheads; Matlab

## 0 引言

当今时代, 无线通信技术快速发展, 5G 承担着万物互联的使命。但受到地形地貌的限制, 传统的地面通信网络只能覆盖地表的一小部分, 因此无法满足人们日益增长的通信需求。非地面网络(Non-

Terrestrial Networks, NTN) 作为地面网络的补充和延伸应运而生, 能够为偏远山区、荒漠、海洋、极地和地震海啸等难以部署通信站的场所提供有效的 5G 接入, 具有通信覆盖范围广、通信距离远和组网方式灵活等优点, 为 5G 空天地海一体化服务的愿景提供了技术可能性<sup>[1]</sup>。

**基金项目:** 江苏省研究生科研与实践创新计划资助项目(KYCX21\_0724)。

**作者简介:** 耿心怡(1998-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 低轨道卫星通信与网络规划; 陈睿(1991-), 女, 博士研究生, 主要研究方向: 低轨道卫星通信与网络规划。

**通讯作者:** 王文鼎(1966-), 男, 教授, 主要研究方向: 通信网技术理论、通信网仿真与网络规划。Email: wangwn@njupt.edu.cn

收稿日期: 2023-05-19

NTN 接入网平台包括星载和机载平台, 其中在星载平台中, 低轨 (Low Earth Orbit, LEO) 卫星通信系统的轨道高度低、传输时延和链路损耗小, 是 5G 非地面网络的主要和典型实现形式, 也是未来卫星通信系统的重要发展方向<sup>[2]</sup>。然而单个低轨卫星的覆盖面积有限, 同时卫星的不断运动伴随地球的自转, 导致单颗低轨卫星的对地服务时间只有十几分钟, 这对用户位置管理提出了更高的要求。

位置管理分为位置更新和寻呼两个方面。其中, 位置更新保证网络能够追踪并定位用户终端的位置, 而寻呼负责将呼叫请求及时地传递给终端。在移动用户规模日益增长的背景下, 位置管理技术对网络中信令负载和数据库访问负荷的影响愈发显著。地面移动通信系统中, 影响位置管理的主要因素是用户的移动性, 而在 LEO 卫星通信系统中, 位置管理方案不仅要考虑卫星覆盖区域下的用户移动特性, 还要考虑卫星自身的运动特征。

针对卫星覆盖范围内的位置区概念, 文献[3]中提到了由于低轨卫星的高速运动导致其覆盖区域与地面位置区无法形成对应的问题, 并探讨了如何定义低轨卫星网络中的位置区。文献[4]探讨了 4 种基本的位置区划分方案, 包括基于用户地理位置、基于卫星波束足迹、基于地面信关站覆盖范围和基于卫星与地面信关站相结合的方案。文献[5]探讨了上述 4 种方案间的比较与权衡, 提出了按卫星与信关站覆盖区域相结合的方法进行星下位置区的划分, 从位置更新开销和寻呼带宽两方面分析该方案的性能。尽管该方案有效地解决了位置更新信令的长距离传输问题, 但没有从根本上解决因卫星运动而导致的用户位置更新频繁的问题。

为了避免以上问题, 学者们提出了 3 种基本的动态位置管理方法, 分别为基于距离、基于运动和基于时间的位置区划分方案。文献[6]充分利用低轨卫星的运动特性, 结合用户终端的地理位置信息, 提出了一种动态的位置区划分方案, 并根据卫星多波束模型, 提出了寻呼卫星及点波束确定的算法, 针对不同运动特性的用户进行模拟仿真, 得到其对应的最佳位置更新半径, 在该半径下可以实现最小的位置更新开销和最高的寻呼成功率。

目前 LEO 卫星通信系统的位置管理技术, 针对位置更新信令频繁、寻呼时延高、信令传输距离远以及信令开销高等问题展开研究, 但大部分已有的方案无法在每个方面都达到最佳性能, 且较少考虑位置更新与寻呼的信令资源分配问题。本文提出的位

置管理方法, 涉及星下位置区的划分和位置管理的信令开销权衡, 旨在解决现阶段 LEO 卫星通信系统的位置管理技术中存在的问题, 提供更高效率的低轨卫星通信服务。

## 1 低轨卫星网的位置管理方法

### 1.1 星下位置区设计

低轨卫星点波束在地面上形成连续的蜂窝小区, 在固定波束系统下, 波束天线的方向角无法进行自适应调控, 波束在地球表面投影的蜂窝小区将随卫星的运动而移动, 因此用户在波束小区间的切换尤为频繁<sup>[7]</sup>。本节基于固定波束系统, 进行 LEO 卫星通信系统的星下位置区设计。

低轨卫星的移动速度可以达到 6 ~ 8 km/s, 对地面用户来说, 所属波束小区的位置变化规律和变化方向很大程度上取决于星下点轨迹的移动, 且固定波束系统下小区间的排列关系较为稳定, 因此位置区可基于星下点轨迹预测进行设计。LEO 卫星通信系统中, 将位置区定义为波束跟踪区 (Beam Tracking Area, BTA), 定义同一卫星覆盖范围下的位置区集合为  $\xi$ , 波束小区与 BTA 之间有 2 种对应关系可选:

(1) 每个波束小区为一个 BTA。这种情况下, BTA 数量与波束数量相等, 属于一对一映射关系。定义 BTA 数量为  $N$ , 波束数量为  $B_{\text{num}}$ , 则  $N = B_{\text{num}}$ , 可以得到集合  $\xi = \{BTA_1, BTA_2, \dots, BTA_N\}$ 。这种位置区划分方式虽然简洁, 但卫星运动速度极快, 有可能导致用户完成位置注册之前就断开通信连接的情况, 只适用于卫星波束较少的系统。

(2) 多个波束小区为一个 BTA。实际 LEO 卫星通信系统中, 卫星的活跃波束通常不少于 40 个, 以 Iridium 系统为例, 48 个波束将形成 48 个地面蜂窝小区。若按每个波束小区为一个 BTA 的原则划分位置区, 同一卫星覆盖范围下将存在 48 个 BTA, 不仅无法解决位置更新信令频繁的问题, 也会对卫星的数据计算和存储能力造成挑战, 因此在波束小区与 BTA 之间形成多对一的映射关系。

轨道高度为 600 km 的低轨卫星运动速度约为 7.56 km/s, 而地面用户的移动速度远低于低轨卫星, 约为 3 km/s, 即使用户自身并未移动, 也会因为卫星波束小区的移动而被动发生波束切换。在不考虑高铁、飞机等高移动性用户终端的前提下, 可将用户的运动等效为与卫星反向的线性运动。星下位置区的划分原则为: 尽量将用户在一段时间内访问概

率最高的波束小区划分为同一位置区,如图1所示。

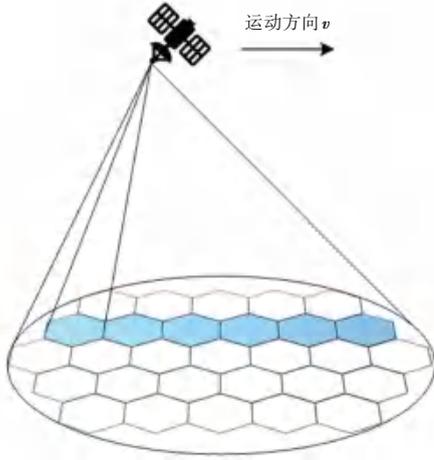


图1 基于星下点轨迹预测的位置区划分方案

Fig. 1 BTA segmentation based on satellite movement trajectories

## 1.2 波束跟踪区列表设计

在星下波束位置区设计的基础上,为了避免用户在相邻位置区反复横跳导致“乒乓效应”,定义波束跟踪区列表(Beam Tracking Area List, BTAL)为BTA的集合,用 $\Theta$ 表示,作为位置管理的基本单元。定义卫星运动方向的法线方向为 $n$ ,在位置区的划分中,已经考虑了用户在 $\pm v$ 方向的运动,但未考虑其在 $\pm n$ 方向的运动,因此构成BTAL时需尽可能多地将用户可能访问的BTA包含进来,分别在一对一映射和多对一映射情况下对BTAL的组合方案进行设计。

(1)波束小区与BTA之间为一对一映射关系。当波束数量较少时,选用该位置区设计方案,通过对位置区集合中的元素进行全组合构成BTAL。以波束数量为3为例,为了方便说明,将BTA按1~3编号,则位置区集合 $\xi = \{1,2,3\}$ ,可以得到 $\Theta = \{\{1\}, \{2\}, \{3\}, \{1,2\}, \{1,3\}, \{2,3\}, \{1,2,3\}\}$ 。

(2)波束小区与BTA之间为多对一映射关系。以图1给出的位置区设计方法为例,为了方便说明,将BTA按1~5进行编号,则位置区集合为 $\xi = \{1,2,\dots,5\}$ ,若对其进行全组合,可以得到 $2^5 - 1$ 种BTAL。但实际上,大多数用户在 $\pm n$ 上的移动距离并不会很远,因此在进行BTAL组合时,可以只考虑临近的BTA。BTAL反映了BTA的邻近程度,通过比较BTAL,若差值大于2,则不包含于同一个BTAL中。

应用上述原则,可以得到所有可能的BTAL组合(按顺序遍历,剔除重复的组合),见表1。

表1 所有可能的BTAL组合

Table 1 All possible BTAL combinations

BTA 编号	$\Theta$ 中包含该BTA的BTAL
1	$\{1\}, \{1,2\}, \{1,3\}, \{1,2,3\}$
2	$\{2\}, \{2,3\}, \{2,4\}, \{2,3,4\}$
3	$\{3\}, \{3,4\}, \{3,5\}, \{3,4,5\}$
4	$\{4\}, \{4,5\}$

## 2 动态BTAL分配策略

### 2.1 模型设计

BTAL是低轨卫星网位置管理的基本单元,BTAL的引入在一定程度上避免了“乒乓效应”,优化了位置管理操作的性能和信令开销。但需要注意的是,BTAL的不同分配方案会使位置更新和寻呼在信令资源的开销上呈现出一种此消彼长的竞争关系。本小节从成本角度出发,寻求一种有效的BTAL分配策略,在位置管理和寻呼的信令开销间实现均衡。

首先定义一个映射矩阵 $M$ ,用于表示BTA与BTAL之间的映射关系,元素 $m_{ij}$ 表示将 $BTAL_j$ 分配给位于 $BTA_i$ 中的用户的概率。用户在不同BTA中保存不同的BTAL信息,因此使用映射矩阵 $M$ 进行BTAL的分配是一种动态的分配策略。

为了得到一个最优映射矩阵 $M$ ,实现对位置管理信令开销的优化,以矩阵 $M$ 的元素 $m_{ij}$ 作为自变量,将位置管理操作的信令开销作为目标函数,建立最优化问题模型。需要注意的是,BTAL的分配需要考虑用户的移动特征等因素,构建模型的关键参数见表2。

表2 最优化模型关键参数

Table 2 Notations used to construct the optimization model

仿真参数	参数描述
$\xi$	BTA的集合
$\gamma$	UE的集合
$G$	UE的迁移矩阵
$T$	UE在不同BTA的滞留时间矩阵
$\alpha_k$	UE <sub>k</sub> 被寻呼的概率

表2中, $\xi$ 表示单个卫星覆盖范围下的BTA集合; $\gamma$ 表示单个卫星覆盖范围下的UE的集合;矩阵 $G$ 表示在不同BTA间迁移的UE数量,元素 $g_{ij}$ 表示从 $BTA_i$ 迁移到 $BTA_j$ 的UE数量。在卫星对地服务时间内,不同类型、不同移动速度的用户移动距离不同,因此单位时间内可能到达的BTA的概率也不同。令 $i$ 表示当前所处BTA的编号, $j$ 表示迁移后所处BTA的编号, $i$ 和 $j$ 的差越大,元素 $g_{ij}$ 的值越小。不失一般性,引入系数 $\lambda$ 来表示用户的不同移动特征, $\lambda$ 越大

表示用户移动速度越慢。针对具有不同移动特征的用户, 分别估算其迁移概率, 需用到的公式为:

$$\forall i, j \in \xi \wedge i \neq j, \quad g_{ij} = \frac{1}{\lambda \times |j - i|} \quad (1)$$

定义矩阵  $T$  为滞留时间矩阵, 其中元素  $t_{ij}$  表示  $UE_i$  在  $BTA_j$  逗留的时间。当 UE 不发生星间切换时, 单位时间内 UE 在所有  $BTA$  中的逗留时间之和是固定的。定义  $\tau$  和  $\rho$  分别为单次位置更新和寻呼的信令开销, 由于位置更新的信令链路建立成本更高, 且信令携带的信息更多, 因此位置更新的信令开销相对于寻呼更贵<sup>[8]</sup>。为了简化计算, 仿真时根据信道资源的占用情况将  $\tau$  和  $\rho$  之间设置为一个固定的比率。位置管理和寻呼信令的最大容量分别表示为  $T_{\max}$  和  $P_{\max}$ ,  $T_{\max}$  值取决于低轨卫星的带宽容量,  $P_{\max}$  值则与卫星的寻呼帧有关。

## 2.2 基于纳什议价的开销最优化问题

首先将位置管理流程作为主导因素, 以最小化位置更新信令开销为目的建立最优化模型:

$$\min \tau \times N_t$$

s. t.

$$(C1) \forall l \in \Theta, \forall i \in \xi \cap l, 0 \leq m_{il} \leq 1$$

$$(C2) \forall i \in \xi, \sum_{l \in \Theta} m_{il} = 1 \quad (2)$$

$$(C3) \forall l \in \Theta, \forall i \notin \xi \cap l, m_{il} = 0$$

$$(C4) \sum_{l \in \Theta} \sum_{i \in l} m_{il} \sum_{k \in Y} \alpha_k t_{ki} \sum_{j \in l} \eta_j \leq P_{\max}$$

其中, 约束条件(C1)表示给 UE 分配  $BTA_{l_i}$  的概率在 0 ~ 1 之间, 边界可取等; 约束条件(C2)表示网络对位于任意  $BTA$  的 UE, 分配可能的 BTAL 的概率之和为 1; 约束条件(C3)表示当 UE 位于  $BTA_i$  中时, 不会被分配不包含  $BTA_i$  的  $BTA_{l_i}$ ; 约束条件(C4)中,  $P_{\max}$  表示卫星最大寻呼容量。

其次, 将寻呼流程作为主导因素, 以最小化寻呼信令开销为目的建立最优化模型:

$$\min \rho \times N_p$$

s. t.

$$(C1) \sim (C3)$$

$$(C5) \forall i, j \in \xi \wedge i \neq j, \tau \times \max_{i \in l \wedge j \notin l} \sum_{i \in l \wedge j \notin l} g_{ij} m_{il} \leq T_{\max} \quad (3)$$

其中, 约束条件(C5)表示将位置更新信令控制在卫星最大带宽容量以内。

通过建立上述模型, 进一步说明了位置更新和寻呼的信令开销呈现出一种类似“跷跷板”的竞争关系。传统的加权求和法无法在 2 个竞争目标间做

到全面权衡, 因此引入纳什议价法 (Nash Bargaining Solution, NBS) 进行权衡问题的求解<sup>[9]</sup>。

NBS 属于合作博弈范畴, 能够兼顾集体利益和个人利益, 可以看作是 2 个参与者的竞争游戏, 试图通过谈判达成共识, 寻求一种均衡策略。使用 NBS 建立最优化问题的数学模型, 其几何解释如图 2 所示。模型表示具体如下:

$$\max \log(T_{\text{worst}} - t(\delta)) + \log(P_{\text{worst}} - p(\delta))$$

s. t.

$$(C1) \sim (C3),$$

$$(C6) \tau \times \max_{i \in l \wedge j \notin l} \sum_{i \in l \wedge j \notin l} g_{ij} m_{il} \forall i, j \in \xi \wedge i \neq j \leq t(\delta) \quad (4)$$

$$(C7) \rho \sum_{l \in \Theta} \sum_{i \in l} m_{il} \sum_{k \in Y} \alpha_k t_{ki} \sum_{j \in l} \eta_j \leq p(\delta)$$

$$(C8) t(\delta) \leq T_{\max}$$

$$(C9) p(\delta) \leq P_{\max}$$

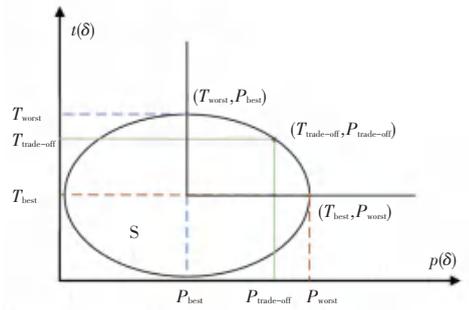


图 2 基于纳什议价的开销均衡模型

Fig. 2 Illustration of overhead model based on Nash bargaining solution

## 3 仿真结果分析

采用 Matlab 提供的 CVX 工具箱<sup>[10]</sup>作为凸优化问题的解决工具, 系统仿真参数见表 3。

表 3 系统仿真参数

Table 3 Simulation parameters

参数	取值
最大卫星波束数量 $B_{\text{num}}$	48
每个卫星对地服务时间/s	10
观测时间/s	20
终端数量	$10^6$
单次位置更新的信令开销 $\tau$	10
单次寻呼的信令开销 $\rho$	1
寻呼概率 $\alpha_k$	0 ~ 1
位置更新最大容量 $T_{\max}$	$10^6$
寻呼最大容量 $P_{\max}$	$6.4 \times 10^5$

通过仿真, 可以得到波束小区与  $BTA$  之间为一对一映射时的信令开销如图 3 所示。位置更新和寻呼的信令开销都随波束数量的增加而变大。一对一映射下, 可能的 BTAL 组合数随波束数量呈指数增长

趋势,当波束数量为10时,使用本地主机完成单次运算的时间为17 s,若波束数量继续增加,将无法在短时间内完成迭代,故不再增大波束数量的取值进行仿真。但不难看出,位置更新和寻呼的开销随波束数量增长幅度较大,只适用于波束数量少的场景。

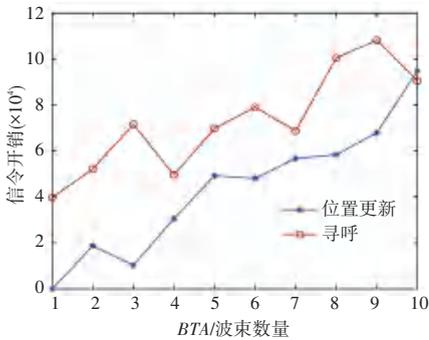


图3 一对一映射下的信令开销

Fig. 3 Signalling overhead under one-to-one mapping method

当卫星波束小区与BTA为多对一映射关系时,位置更新和寻呼的最大、最小、均衡开销的对比分别如图4、图5所示。2种信令开销都随波束数量的增多而平稳增长,且均衡开销介于最大开销和最小开销之间,这表明引入纳什议价法构建开销均衡模型可以有效地实现位置更新和寻呼信令开销间的平衡。

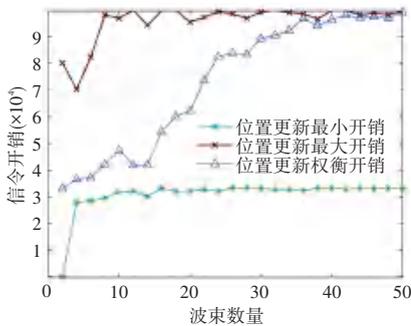


图4 多对一映射下的位置更新信令开销

Fig. 4 Location update signalling overhead under multi-to-one mapping

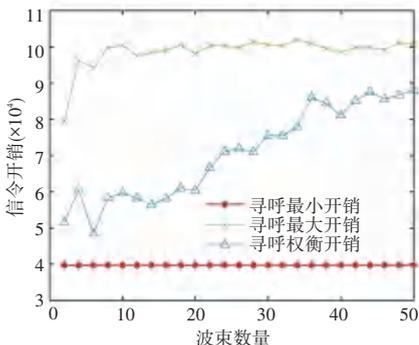


图5 多对一映射下的寻呼信令开销

Fig. 5 Paging signalling overhead under multi-to-one mapping

## 4 结束语

低轨卫星的快速移动为位置管理带来了诸多挑战,尤其是在海量用户接入的背景下,信令开销猛增。本文基于卫星运动轨迹,提出了低轨卫星的星下位置区设计方案,旨在减小位置更新频率,提高寻呼效率。同时针对位置管理的信令开销问题,提出动态BTAL分配策略,引入纳什议价法,建立位置管理的开销均衡模型,在位置更新和寻呼信令开销两个竞争目标之间取得平衡。Matlab仿真结果验证了上述方案和模型的有效性。

## 参考文献

- [1] 3GPP. Solutions for NR to support Non-Terrestrial Networks (NTN) (Release 16): TR 38.821 V1.1.0 [EB/OL]. [2020-01-01]. [http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38\\_series/38.821/38821-g00](http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.821/38821-g00).
- [2] LIANG J, LITING W, HAO D. Summary of research on satellite cooperative transmission technology in space information network [C]//Proceedings of the 2020 International Conference on Information Science, Parallel and Distributed Systems (ISPDs). Piscataway: IEEE, 2020: 56-58.
- [3] AKYILDIZ I F, MCAIR J, HO J S M, et al. Mobility management in next-generation wireless systems[J]. Proceedings of the IEEE, 1999, 87(5): 1347-1384.
- [4] NARENTHIRAN K, TAFAZOLLI R, EVANS B G. Evaluation of location tracking schemes for satellite UMTS [C]//Proceedings of the First International Conference on 3G Mobile Communication Technologies. London: IET, 2000: 381-386.
- [5] MCNAIR J. Location registration and paging in mobile satellite systems [C]//Proceedings of the Fifth IEEE Symposium on Computers and Communications. Antibes-Juan Les Pins, France: IEEE, 2000: 232-237.
- [6] 孙移星, 杨波, 唐伦, 等. 低轨卫星网络中基于用户位置的位置管理策略[J]. 计算机仿真, 2022, 39(12): 49-58.
- [7] RESTREPO J, MARAL G. Cellular geometry for world-wide coverage by non-geo satellites using "Earth-fixed cell" technique [C]//Proceedings of the 1996 IEEE Global Telecommunications Conference. London: IEEE, 1996: 2133-2137.
- [8] KYAMAKYA K, JOBMANN K. Location management in cellular networks: classification of the most important paradigms, realistic simulation framework, and relative performance analysis [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(2): 687-708.
- [9] NASH J. The bargaining problem [J]. Econometrica, 1950, 18: 155-162.
- [10] GRANT M, BOYD S. CVX: Matlab software for disciplined convex programming [EB/OL]. [2008-04-01]. <http://cvxr.com/cvx>, 2008. DOI:doi:10.1007/0-387-30528-9\_7.