

文章编号:1007-5321(2020)03-0066-06

DOI:10.13190/j.jbupt.2019-178

# 卫星组网系统下的多普勒频移估计与补偿

朱 军<sup>1</sup>, 李秋瑾<sup>1</sup>, 李 凯<sup>2</sup>, 王华俊<sup>3</sup>

(1. 安徽大学 电子信息工程学院, 合肥 230601; 2. 上海科技大学 创意与艺术学院, 上海 200135;

3. 中国科学院 上海微系统与信息技术研究所, 上海 200135)

**摘要:** 针对目前卫星移动通信系统中卫星组网能力欠缺等问题,在非地面网络基础上提出了一种基于虚拟卫星小区组网的多普勒频移估计和补偿算法。通过引入集中管理单元,移动终端能快速选择多普勒频移最小的卫星,同时根据传输时延和卫星星历对多普勒频移值进行估计、补偿、更新和再补偿。仿真结果表明,与传统算法相比,该算法有效降低了多普勒频移,提高了卫星通信链路的质量和接入成功率。

**关键词:** 卫星通信; 非地面网络; 虚拟小区; 多普勒频移; 地理信息

中图分类号: TN927.23

文献标志码: A

## Doppler Shift Estimation and Compensation under Satellite Networking System

ZHU Jun<sup>1</sup>, LI Qiu-jin<sup>1</sup>, LI Kai<sup>2</sup>, WANG Hua-jun<sup>3</sup>

(1. School of Electronic Information Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China;

2. School of Creativity and Art, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 200135, China;

3. Shanghai Microsystems, Chinese Academy of Sciences Institute of Information Technology, Shanghai 200135, China)

**Abstract:** Aiming at problems such as lack of satellite networking capabilities in current satellite mobile communication systems, a Doppler frequency shift estimation and compensation algorithm based on virtual satellite cell networking is proposed on the basis of non-terrestrial networks. By introducing a centralized control unit, the user equipment can quickly select the satellite with the smallest Doppler frequency shift, and at the same time, the Doppler shift value is compensated, updated and re-compensated according to the transmission delay and the satellite ephemeris. Simulations show that, compared with the traditional algorithm, this algorithm effectively reduces the Doppler frequency shift, and improves the quality of satellite communication links and access success rate.

**Key words:** satellite communication; non-territory networking; virtual cell; Doppler frequency shift; geographic information

卫星通信是诸如飞机通信、海上船舶和偏远地区回程等场景中最好的(甚至是唯一的)通信方案<sup>[1]</sup>。在大多数情况下,称为非地面网络(NTN, non-territory networking)的卫星通信网络,已被预测为第6代移动通信系统的重要组成部分,将与未来的地面网络无缝集成。但是,在非同步卫星移动通

信系统中,由于卫星相对地面的高速移动性,接收端接收到的频率与波源的实际频率存在较大的多普勒频移,增加了接收端解调难度,使得通信性能降低。特别是近地球轨道卫星通信,由于其具有更低的轨道和更快的移动速度(存在非常短的有效覆盖时间窗口),而产生非常严重的多普勒频移效应。因而,

收稿日期: 2019-08-28

基金项目: 安徽省科技重大专项项目(18030901010)

作者简介: 朱 军(1968—),女,副教授, E-mail: junzhu@ahu.edu.cn.

在 NTN 移动通信中,如何使用用户终端(UE, user equipment)快速、准确地接入通信卫星是个亟待解决的问题。

目前,多普勒频移估计与补偿的解决方案主要有 3 种:① 直接使用几何分析法,计算通信卫星和地面终端的相对运动速度,进而计算出多普勒频移值<sup>[2-3]</sup>;② 使用卡尔曼滤波频移估算算法<sup>[4-5]</sup>;③ 使用最大似然估计算法,对通信过程中的多普勒频移因子进行计算,并反馈到频率补偿模块,由频率补偿模块对发射信号频率进行预补偿,以达到收发双方频率同步的目的<sup>[6-7]</sup>。这些多普勒频移的估算及补偿方法可降低多普勒频移值,提高通信质量,但也存在一定的问题,例如不适用于所有轨道类型,未考虑时延,而且多数研究主要集中在多普勒频移的估计算法上,很少关注 UE 和(或)卫星上的多普勒频移补偿、更新和再补偿程序的新技术。

针对上述问题,基于虚拟卫星小区(VSC, virtual satellite cell)组网的近地球轨道(LEO, low earth orbit)卫星通信过程提出的方法,适用于直连和非直连 VSC 中的集中控制单元(CCU, centralized control unit)的 UE,在 2 种情况下分析了 CCU 与 UE 之间的交互方法和流程,利用 VSC 架构获取的信息来补偿 NTN 中非同步卫星通信场景下的多普勒频移。

# 1 算法详述

## 1.1 传统算法

传统的频率补偿模型如图 1 所示<sup>[8]</sup>。随着卫星通信的广泛使用,越来越多的移动用户访问 NTN,将导致两跳传输中的拥塞,增加传输错误,接收信号不准确,通信质量下降,进而导致多普勒频移补偿失败。然而,越来越多的卫星具备了许多先进的功能,可以通过卫星的星上处理(OBP, on board processing)<sup>[9]</sup>来估计和补偿多普勒频移。笔者提出了基于广播信道和上下行交互的 2 种方法,在 VSC 组网下实现 UE 快速选择最优多普勒频移的 LEO 卫星的解决方案,提高了更高的信号传输效率和准确性。

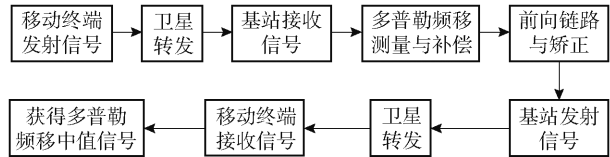


图 1 传统的多普勒频移补偿功能模块

## 1.2 基于 VSC 的算法

### 1.2.1 虚拟卫星小区

提出的 VSC 组网包括 CCU 和分布式单元(DU, distributed unit),可以分别对应于 3GPP NG-RAN (next generation-radio access network)架构中定义的 gNB-CU(next generation noteb-control unit)和 gNB-DU(next generation noteb-distributed unit)<sup>[10]</sup>。增强了协议程序、功能和基于 5G NG-RAN 架构的接口,以支持 NTN 的要求。CCU 和 DU 分离的结构对 UE 是透明的,并且与 5G NG-RAN 的架构兼容。部署在一个网元(NE, network element)的 gNB-CU 上的 CCU 负责管理来自特定区域中的多个 DU 的资源。

如图 2 所示,VSC 由集中控制单元 CCU 和多个分布式单元 DU 组成。地球同步轨道(GEO, geosynchronous orbit)卫星适合用作 CCU[见图 2(a)],因为它对地面 UE 和基站是相对静态的,并且在所有类型的卫星中具有最小的多普勒频移效应。此外,GEO 卫星具有更大的覆盖区域,有助于收集比 LEO 卫星更多的信息,因此可以管理更多的 DU 和 UE。由于 GEO 卫星与 UE 之间的距离相对较长,因此不适合在 GEO 卫星上执行延迟敏感的业务。基站也适合作为 CCU 服务器[见图 2(b)]。与 GEO 卫星相比,地面基站具有以下优点:延迟更短,空间上更接近 5G 核心网络,具有更好的可扩展性。然而,地面基站具有较小的空间覆盖范围,相比 GEO 卫星,需要 CCU 之间更频繁的互操作性。因此,可根据 NTN 要求,将 CCU 部署在 GEO 卫星或地面基站上。

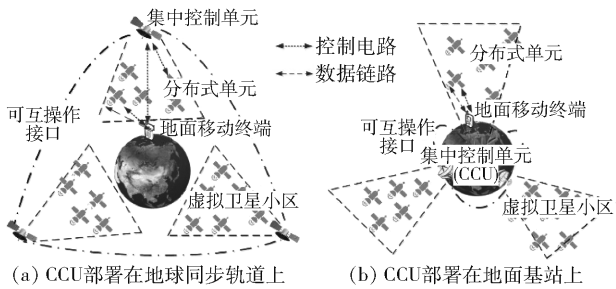


图 2 非地面网络虚拟卫星小区网络架构的原理

### 1.2.2 多普勒频移估计和补偿算法的实现

当 UE 访问 NTN 时,需要选择合适的 LEO,此时存在大量可能与之连接的 LEO 卫星,并且由于高多普勒频移效应,UE 很难快速访问最佳 LEO 卫星和波束。因此,可使用 CCU 协助 UE,以相对快的过程找到最佳的 DU,并帮助补偿 DU 和 UE 之间的多普勒频移。

### 1) UE 与 GEO 卫星直连的情况下的多普勒频移估计与补偿

UE 将其自身的位置、速度和所需的服务质量 (QoS, quality of service) 需求信息 (例如最大带宽, 最小多普勒频移和 GEO 卫星与 UE 自身之间的最小时延) 发送给为其服务的 CCU, VSC 中的所有 DU 也会周期性地将自己的星历信息发送给为其服务的 CCU. 由于 CCU 拥有 UE 和所有 DUs 的必要信息, 所以可以选择满足 UE 的 QoS 要求的 DUs 及其波束. CCU 还可以根据 UE 的移动速度、位置和 DU 的运动轨迹、位置和速度信息, 估算所选 DU 和 UE 之间的多普勒频移值. 基于 CCU 与 UE, CCU 和 DU 之间的传输时延对多普勒频移估计值进行补偿, 然后将多普勒频移的初始估计值分别发送到 DU 和 UE. 在发现多普勒频移估计不准确的情况下, UE 或 DU 还可以重新发送自己的位置、移动速度等信息给 CCU, 以请求对多普勒频移信息进行校正. 然后, CCU 将校正后的多普勒频移估计值反馈给 UE 或 DU.

### 2) UE 与 GEO 卫星不能直连的情况下的多普勒频移估计与补偿

对于一些 UE 无法实现和 CCU 双向通信的特殊情况, 例如 UE 发射功率有限 (无法与 GEO 卫星建立上行链路) 或只有 NTN 链路而没有 TN 链路到

基站, 利用 CCU 的协助, 将 VSC 覆盖的地理表面区域划分为不同的虚拟小区位置区域, 每个虚拟小区位置区域被分配了一个唯一 ID, 其被称为虚拟小区位置区域地址 (VCLID, virtual cell location area ID). 对于特定 CCU, VCLID 信息是恒定的. 然后将虚拟卫星小区子载波分组, 每组子载波使用一个表映射到 VCLID. 区域子载波映射表对于特定 CCU 也是恒定的. 子载波表的信息包括最佳 DU 的 ID, 其波束 ID、接入码、频率、最佳的 DU 和虚拟小区位置区域的某个地理点之间的多普勒频移估计值. 如果没有足够的子载波, 可以定义由 main-VCLID (MVCLID) 和 sub-VCLID (SVCLID) 组成的 2 级 VCLID. SVCLID 是虚拟单元位置区域中的子区域的 ID. 这些信息由 CCU 定期广播, 当 UE 接入虚拟卫星小区时, 就能接收该信息, 并且根据其地理位置信息, UE 知道可能访问的最佳的 LEO 卫星以及与最佳 LEO 卫星相关的多普勒频移估计值.

为便于理解, 区域子载波映射的示例如图 3 所示. CCU 覆盖的地理区域划分为 9 个虚拟小区位置区域, 并且每个虚拟小区位置区域被划分为 4 个子区域. 然后, CCU 的子载波被分成 9 组, 每个子载波组携带 4 个子区域信息. 因此, 可以建立一个具有  $9 \times 4$  的表格单元, 并由 CCU 定期进行广播.

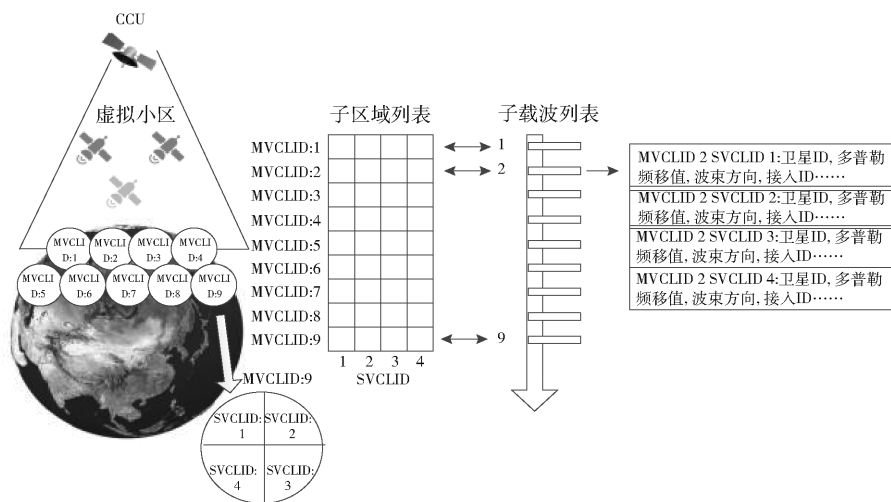


图3 区域子载波的示例和子载波表的信息

#### 1.2.3 多普勒频移估算

目前, 在空间通信系统中, 最常用的估计方法是利用升交点赤经  $\Omega$ 、轨道倾角  $i$ 、近地点俯角  $\omega$ 、轨道偏心率  $e$ 、轨道半长轴  $a$  和过近地点的时刻  $t_p$  六大轨道参数<sup>[11]</sup>, 确定其任何时刻的轨道运动规律, 计

算卫星的位置和速度. 利用卫星仿真软件搭建仿真系统架构, 得到基于 ECI 坐标系的卫星的位置  $[\mathbf{r}_s(x, y, z)]$ 、速度  $[\mathbf{v}_s(V_x, V_y, V_z)]$  的矢量数据和 UE 的经纬高  $(L, B, h)$  数据, 再根据坐标系之间的转换关系<sup>[12]</sup>, 得到 LEO 卫星和 UE 的相对位置和速

度,进而由多普勒的原始定义推导出多普勒估计的表达式,以下为推导过程.

对于 UEs,利用经度纬度和高度可得到 UEs 的地理位置矢量:

$$\mathbf{r}_r = \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N+h)\cos B\cos L \\ (N+h)\cos B\sin L \\ [N(1-e^2)+h]\sin B \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中:  $N = \frac{a}{(1-e^2\sin^2 B)^{\frac{1}{2}}}$ ,  $L$  表示经度,  $B$  表示纬度,  $h$  表示高度,  $\alpha$  和  $e$  分别表示总参考椭圆球体的长半轴和第一偏心率.  $\mathbf{r} = F(\mathbf{B})$ , 其中  $\mathbf{r}$  为 ECEF 位置矢量,  $\mathbf{B}$  为大地位置矢量. UE 的运动速度推导过程<sup>[13]</sup>如下:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$$

$$ds^2 = \left\| \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial B} \right\|^2 dB^2 + \left\| \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial L} \right\|^2 dL^2 + \left\| \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial h} \right\|^2 dh^2 \quad (2)$$

$F(\mathbf{B})$  变换的雅克比矩阵为

$$\mathbf{J}_F(\mathbf{L}, \mathbf{B}, \mathbf{h}) =$$

$$\begin{bmatrix} -(N+h)\cos B\sin L & -(R+h)\sin B\cos L & \cos B\cos L \\ (N+h)\cos B\cos L & -(R+h)\sin B\sin L & \cos B\sin L \\ 0 & (R+h)\cos B & \sin B \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\text{其中 } N = \frac{a}{(1-e^2\sin^2 B)^{\frac{1}{2}}}.$$

$$\mathbf{J}_F(\mathbf{L}, \mathbf{B}, \mathbf{h}) =$$

$$\begin{bmatrix} -\sin L & \cos L & 0 \\ \cos L & \sin L & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin B & \sin B \\ 0 & \cos B & \sin B \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} (N+h)\cos B & 0 & 0 \\ 0 & (R(B)+h) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{其中 } R(B) = \frac{a(1-e^2)}{(1-e^2\sin^2 B)^{\frac{3}{2}}}.$$

通过使用链规则,可以形成速度矢量:

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{L}} \frac{d\mathbf{L}}{dt} = \mathbf{J}_F(\mathbf{L}, \mathbf{B}, \mathbf{h}) \begin{pmatrix} \dot{L} \\ \dot{B} \\ \dot{h} \end{pmatrix} \quad (5)$$

通过链式规则将 UE 速度  $\frac{ds}{dt}$  引入式(5),有

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{d\lambda}{ds} \frac{ds}{dt} \quad (6)$$

式(2)中的线性元素现在可以用式(4)中给出

的对角矩阵中元素的平方来表示,有

$$dS^2 = (N+h)^2 \cos^2 B dL^2 + (R+h)^2 dB^2 + dh^2 \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \cos \gamma \sin \alpha ds \\ \cos \gamma \cos \alpha ds \\ \sin \gamma ds \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N+h) \cos B dL \\ (R+h) dB \\ dh \end{bmatrix} \quad (8)$$

所以 UE 的速度矢量  $\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{x}}{dt}$  成为

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{L}} \frac{d\mathbf{L}}{ds} \frac{ds}{dt} \quad (9)$$

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \frac{ds}{dt} \begin{pmatrix} -\sin L & \cos L & 0 \\ \cos L & \sin L & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin B & \cos B \\ 0 & \cos B & \sin B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \gamma \sin \alpha \\ \cos \gamma \cos \alpha \\ \sin \gamma \end{pmatrix} \quad (10)$$

其中:标量  $\frac{ds}{dt}$  表示地面移动终端沿其轨迹运动的速度. 标量 LEO 卫星和 UE 间的相对位置和相对速度为

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_s - \mathbf{r}_r \quad (11)$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_s - \mathbf{v}_r \quad (12)$$

由多普勒的原始定义得到多普勒频移  $f_D$  为

$$f_D = \frac{|\mathbf{v}|f}{c} \frac{\mathbf{r}\mathbf{v}}{|\mathbf{r}||\mathbf{v}|} = \frac{\mathbf{f}\mathbf{r}\mathbf{v}}{c|\mathbf{r}|} \quad (13)$$

## 2 仿真分析与结果

### 2.1 仿真参数

以 5G 网络、铱星系统、卫星仿真软件为参考平台搭建了实验仿真环境<sup>[14]</sup>,通过卫星仿真软件建立星座模型,3D 模型如图 4 所示. 其中,低轨卫星有 275 颗卫星,分布在 25 个轨道平面上,高度均在 780 km,每个卫星轨道上均匀地分布着 11 颗卫星. 每个轨道的升交点赤经参数如表 1 所示,奇数 and 偶

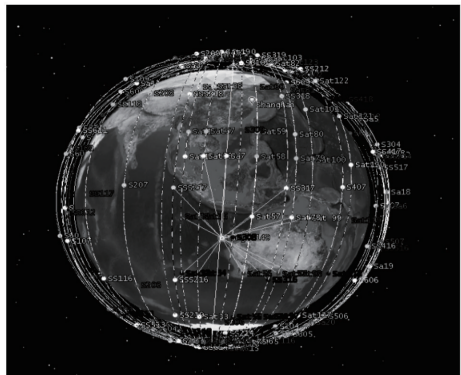


图4 卫星仿真 3D 图



数轨道的平近点角参数如表 2 所示. 地球半径设为 6 370 km,星间链路的载波频率 $f_c$  设为20 GHz.

表 1 25 个 LEO 卫星轨道参数分布

轨道数	升交点赤经/(°)	轨道数	升交点赤经/(°)
1	14. 4	14	201. 60
2	28. 8	15	216. 00
3	43. 2	16	230. 40
4	57. 6	17	244. 80
5	72. 0	18	259. 12
6	86. 4	19	273. 60
7	100. 8	20	288. 00
8	115. 2	21	302. 40
9	129. 6	22	316. 80
10	144. 0	23	331. 20
11	158. 4	24	345. 60
12	172. 8	25	360. 00
13	187. 2		

表 2 奇、偶数轨道卫星的平近点角参数

奇数轨道卫星的平交点 赤经角/(°)	偶数轨道卫星的平交点 赤经角/(°)
0	16. 364
32. 727	49. 091
65. 454	81. 818
98. 181	114. 545
130. 908	147. 272
163. 635	179. 999
196. 362	212. 726
229. 089	245. 453
261. 816	278. 180
294. 543	310. 907
327. 270	343. 634

2.2 仿真结果分析

2.2.1 不同算法下多普勒频移估计与补偿的对比

由仿真系统的设置参数以及式(13),可以计算出每个时刻 UE 和 LEO 卫星之间的多普勒频移变化值(这里取绝对值). 由于铱星系统的可视时间最大为 670 s,所以在卫星运行 24 h 内,选取连续运行 10 min 作为仿真时间参数. 如图 5 所示,横轴表示时间,纵轴表示 10 min 内移动通信过程中不同算法产生的多普勒频移值随着时间变化的情况.

由图 5 可以看到,所提出的算法在 10 min 内产生的多普勒频移最大值不超过 27 kHz,而多种传统方法(获取某一时刻与 UE 建立通信关系的卫星的方法与所提算法不同,而估算多普勒频移值方法相同的方法,可参考引言部分描述)下产生的多普勒

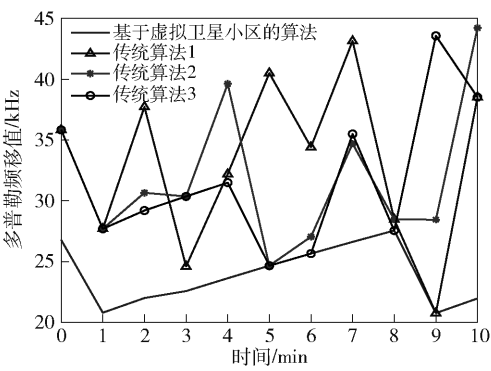


图 5 LEO 卫星和 UE 之间的多普勒频移值的对比

频移值是在 23 ~ 44 kHz 范围内波动. 因此,说明了所提出的算法缩短了 UE 和最佳 LEO 卫星的连接过程的时间,减少了移动通信过程中产生的多普勒频移值,提高了通信质量和通信效率.

2.2.2 多普勒频移与地理位置区域的关系

针对“一些 UE 无法直连 CCU 的特殊情况,将 VSC 覆盖的地理表面区域划分为不同的虚拟小区位置区域”,在提出算法的基础上,图 6 显示了需要划分出虚拟小区位置区域的范围大小和多普勒频移值的关系.

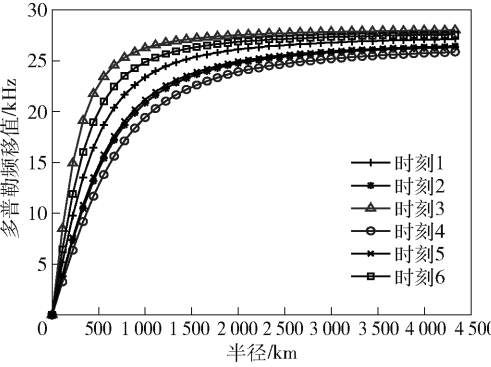


图 6 地理位置区域的范围与多普勒频移的关系

首先,选定某时刻上空的 LEO 卫星,将 LEO 卫星星下点区域取为 UE 的参考基点(仰角略大于 90°),半径设为 100 km,向外依次增大区域范围半径;然后,基于上述推导,仿真估算出该时刻 LEO 卫星分别与不同范围内的 UE 之间产生的多普勒频移值,并分析出区域范围的差异和多普勒频移值之间的关系. 如图 6 所示,横轴表示不同区域范围的半径,纵轴表示在多个不同时刻条件下不同地理区域范围内的 UE 和 LEO 卫星之间产生的多普勒频移值. 由图 6 可知,多普勒频移为 15 kHz 时支持的最大覆盖范围是 500 km;当覆盖范围是 1 000 km 时,

多普勒频移值大约是 22 kHz 左右,即区域范围越大,多普勒效应越严重。

对于不同经纬度的 UE,在移动通信过程中,LEO 卫星和 UE 之间产生的多普勒频移值也不同,如图 7 所示。以赤道上空的 LEO 卫星作为参考点,UE 均匀地分布在  $0^{\circ} \sim 40^{\circ}\text{N}$ ,  $90^{\circ}\text{E} \sim 140^{\circ}\text{E}$  范围内。如图 7 所示,在一定经纬度范围内,随着 UE 经纬度的增加,通信过程产生的多普勒频移值也会增加,且赤道附近的 UE 和 LEO 卫星之间产生的多普勒频移值最小。

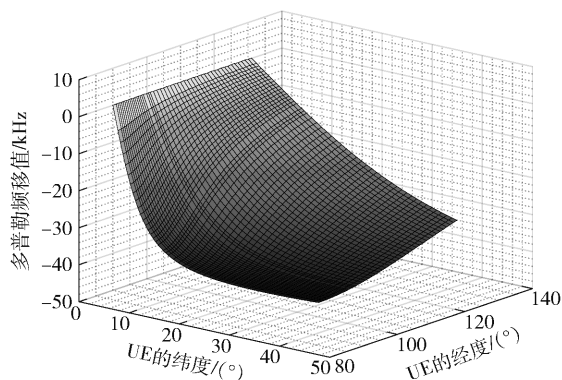


图7 UE 的经纬度与多普勒频移值的关系

### 3 结束语

针对不同能力的终端,笔者提出了基于广播信道和上下行交互的 2 种方法,在 VSC 组网下实现 UE 快速选择最优多普勒频移的 LEO 卫星的解决方案,具有改进的功效和准确性。与传统方法相比,实时星上处理的工作集中在 CCU 上完成,通过 CCU 进行测量、校正,补偿了系统中的多普勒频偏,满足了动态连续跟踪需要。由于 UE 在不同地理区域位置的多普勒频移值不同,所以,为解决不同地理位置对多普勒频移的影响也提供了仿真参考,一定程度上扩大了所提方案的应用范围。

### 参考文献:

- [1] Minoli D. Innovations in satellite communications and satellite technology: the industry implications of DVB-S2X high throughput satellites ultra HD M2M and IP, hoboken, NJ[M]. [S.l.]: Wiley, 2015: 2387-2396.
- [2] Hu Cheng, Tian Ye, Zeng Tao, et al. Adaptive secondary range compression algorithm in geosynchronous SAR [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth

- Observations and Remote Sensing, 2016, 9(4): 1397-1413.
- [3] Jayaprakasam S, Ma X, Choi J W, et al. Robust beam-tracking for wave mobile communications [J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(12): 2654-2657.
- [4] Koivisto M, Costa M, Werner J, et al. Joint device positioning and clock synchronization in 5G ultra-dense networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(5): 2866-2881.
- [5] Chan A C, Srinivasan V J, Lam E Y. Maximum likelihood doppler frequency estimation under decorrelation noise for quantifying flow in optical coherence tomography [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2014, 33(6): 1313-1323.
- [6] Linty N, Presti L. Doppler frequency estimation in GNSS receivers based on double FFT [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(2): 509-524.
- [7] Zhao Yongsheng, Zhao Congjun, Zhao Chuang. Joint delay-Doppler estimation for passive bistatic radar with direct-path interference using MCMC method [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2018, 12(1): 130-136.
- [8] Liu Jianfeng, Wang Hongsong, Li Yun. Compensation of Doppler frequency satellite mobile communication [J]. Journal of Chongqing University of Posts & Telecommunications (Natural Science Edition), 2014, 26(3): 1-8.
- [9] Lee Y, Choi J P. Performance evaluation of high-frequency mobile satellite communications [J]. IEEE Access, 2019, 7(1): 49077-49087.
- [10] 3GPP 38401. NG-RAN architecture description [S]. [S.l.]: 3GPP, 2018.
- [11] Dai Cuiqin, Zheng Guimin, Chen Qianbin. Satellite constellation design with multi-objective genetic algorithm for regional terrestrial satellite network [J]. China Communications, 2018, 15(8): 1-10.
- [12] Richard W M. Satellite orbits in digital communications with emphasis on data modems: theory, analysis, design, simulation, testing, and applications [M]. [S.l.]: Wiley, 2017: 1120-1128.
- [13] Barry Martin. B. 1. ECEF velocity vector [EB/OL]. London: Barry Martin, 2014[2019-06-27]. [http://www.aqqa.org/MH370/models/ECEF\\_velocity\\_vector.pdf](http://www.aqqa.org/MH370/models/ECEF_velocity_vector.pdf).
- [14] Zhang Liangliang, Ma Debao, Niu Chaoyang. Simulation and analysis of ACB'S photometric signature based on STK[J]. Proceeding of SPIE-the International Society for Optical Engineering, 2010, 7658(835): 56278-56332.