

高空平台不稳定运动对小区切换性能的影响

王晓鹏¹, 周家喜², 李乐天¹, 周武旻¹

(1. 中国科学技术大学电子工程与信息科学系, 安徽合肥 230026; 2. 中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽合肥 230088)

摘要: 高空平台(high-altitude platform station, HAPS)通信系统具有部署灵活、覆盖范围大等优势,可以广泛应用于多种通信场景,受到了研究者的关注. 受平流层湍流影响, HAPS 不可避免地会在一定范围内运动,为此讨论了垂直运动和倾斜运动对用户切换概率的影响. 首先建立了一个更符合实际状况的地面覆盖模型,给出了数学表达;然后基于所提模型分析了这两种运动方式下的用户通信切换概率;最后与现有小区覆盖模型对切换概率的估算结果进行对比,验证了该模型的可行性.

关键词: 高空平台通信; 小区切换; 不稳定运动

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A doi: 10.3969/j.issn.0253-2778.2020.01.06

引用格式: 王晓鹏,周家喜,李乐天,等. 高空平台不稳定运动对小区切换性能的影响[J]. 中国科学技术大学学报,2020,50(1):49-56.

WANG Xiaopeng, ZHOU Jiayi, LI Letian, et al. The effect of haps unstable movement on cellular handover performance[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2020, 50(1): 49-56.

The effect of haps unstable movement on cellular handover performance

WANG Xiaopeng¹, ZHOU Jiayi², LI Letian¹, ZHOU Wuyang¹

(1. Department of Electronic Engineering and Information Science, University of Science and Technology of China, Hefei 23026, China;
2. The 38th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei 230088, China)

Abstract: The high-altitude platform station (HAPS) communication system has its unique advantages such as flexible deployment and large coverage. It can be widely used in a variety of communication scenarios in the future and has attracted the attention of researchers from various countries. Under the influence of stratospheric wind, HAPS will inevitably move within a certain range. In this paper, two modes of movement affected by path loss are discussed; vertical movement and swing movement. First, a more realistic ground coverage model is established and its calculation formulas are derived. Then, based on this coverage model, the handover probability of these two movement modes is calculated and analyzed, and is compared with the handover probability estimated using the existing coverage models. The results verified the validity of the proposed model.

Key words: HAPS communication; cellular handover; unstable movement

收稿日期: 2019-05-22; 修回日期: 2019-08-26

基金项目: 基于临近空间的空天地一体化无线传输技术研究项目资助.

作者简介: 王晓鹏,男,1994年生,硕士生,研究方向:空天地通信、无线通信, E-mail: wxp9402@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 周武旻,博士/教授. E-mail: wyzhou@ustc.edu.cn

0 引言

高空平台 (high-altitude platform station, HAPS) 部署在高度 17~25 km 的平流层, 可以作为中继节点或空中基站, 具有覆盖范围广、部署灵活、低时延、大容量、信道条件良好等特点^[1-2], 广泛应用于地面通信系统能力不足或应急通信等场景。

高空平台在平流层可能会受到短时气流影响, 发生不稳定运动。根据国际电信联盟 (International Telecommunication Union, ITU) 标准的建议, HAPS 运动位置保持在半径 400 m、高度 ± 700 m 的圆柱范围内^[3]。平台的运动可以分解为水平、垂直、旋转、倾斜 4 种运动, 不同的运动方式会造成小区覆盖范围、用户接收功率的变化, 对通信性能产生影响^[4]。

目前, 许多研究者就 HAPS 不稳定运动对切换性能的影响进行了研究。文献[5]在等波束宽度覆盖模型下, 考虑了地球曲率, 仿真分析了旋转运动对用户切换概率的影响, 指出在旋转运动中, 越外层小区受旋转运动影响越大; 文献[6-7]根据六边形小区覆盖模型, 计算分析了 HAPS 在水平、旋转运动中的切换概率; 文献[8]依据等覆盖面积模型, 采用蒙特卡罗法计算交叠面积, 分析了倾斜运动时的切换概率。

现有对 HAPS 通信系统的切换概率的分析中, 大多采用等覆盖面积模型或等波束宽度模型。基于圆形或正六边形小区的等覆盖面积模型分析方法简单, 但属于理想模型, 不能很好地指导实际工作; 等波束宽度模型主要根据天线方向性增益的衰减特性提出, 但因 HAPS 距地较远, 所以覆盖区域内各位置路径损耗的不同应该被考虑, 而文献[5]中的地球曲率则并非影响覆盖范围的重要因素, 是可以忽略的。

针对现有研究的缺陷, 本文提出了考虑路径损耗的 HAPS 小区覆盖模型, 分析了路径损耗对地面覆盖的影响, 推导了小区覆盖和 HAPS 不稳定运动造成地面小区相对位置漂移的相关数学表达式。因在垂直和倾斜两种不稳定运动中, 地面小区覆盖区域形状和大小受路径损耗和天线方向性增益变化会发生改变, 故着重分析了这两种运动方式对小区切换产生的影响。

1 系统模型

1.1 小区覆盖模型

1.1.1 现有小区覆盖模型

为提高系统容量, HAPS 通信系统采用定向天线阵列为地面多小区覆盖提供服务。一个定向天线波束按照一定俯仰角和方位角指向地面, 在地面投射出一个小区, 若若干个小区共同组成了 HAPS 的覆盖区域。

现有对 HAPS 切换性能进行分析的文献, 多采用等覆盖面积模型或等波束宽度模型进行分析, 如图 1 和图 2 所示。等覆盖面积模型一般采用小区形状为圆形和正六边形进行分析, 每个小区的覆盖面积相等; 等波束宽度模型即每个天线各点波束的半功率波束宽度相等, 根据此覆盖模型, 天线中心指向距 HAPS 下点 O 越远, 其小区面积越大, 且在波束宽度一定的情况下, HAPS 位置越高, 每个小区覆盖面积越大。

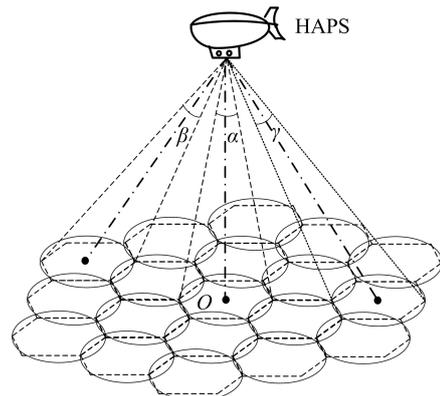


图 1 等覆盖面积模型

Fig. 1 Equal cell area coverage model

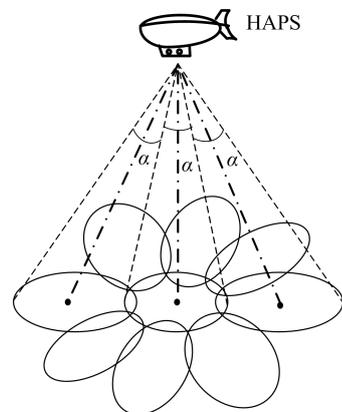


图 2 等波束宽度模型

Fig. 2 Equal beam-width coverage model

在实际情况下,因 HAPS 部署高度较高、单个小区覆盖范围较大,各小区之间以及单个小区中心和边缘之间路径差较大,所以路径损耗会对地面小区覆盖产生影响.受到天线方向性增益和路径损耗的共同影响,天线投射在地面上形成的小区覆盖范围不可能是严格的圆形和正六边形.另外,当 HAPS 发生不稳定运动时,路径损耗的变化也会对小区形状和大小产生影响,因此若使用现有模型对 HAPS 不稳定运动状态下的切换概率进行分析,所得到的结果是不准确的.针对这些缺陷,本文提出了考虑路径损耗的 HAPS 小区覆盖模型.

1.1.2 考虑路径损耗的小区覆盖模型

考虑到为使每个小区有较均等的服务范围^[9],我们同样采用蜂窝小区的排布方式来排布小区中心点,如图 3 所示.相邻小区间距为 d ,第 p ($p=0,1,2,\dots$)层中沿逆时针方向的第 q ($q=1,2,3,\dots$)个小区用标号 (p,q) 表示.每层小区都由一个正六边形小区环组成, (p,q) 小区是位于该层六边形环的第 n_s 条边上的第 c' 个小区,则 $n_s=1+\lfloor (q-1)/p \rfloor$, $c'=q-(n_s-1)p$,因此其小区中心点 $C_{p,q}$ 到 HAPS 下点 O 的距离 $g_{p,q}$ 可以表示为

$$g_{p,q} = \sqrt{(pd)^2 + ((c'-1)d)^2 - 2pd^2(c'-1)\cos\frac{\pi}{3}} \quad (1)$$

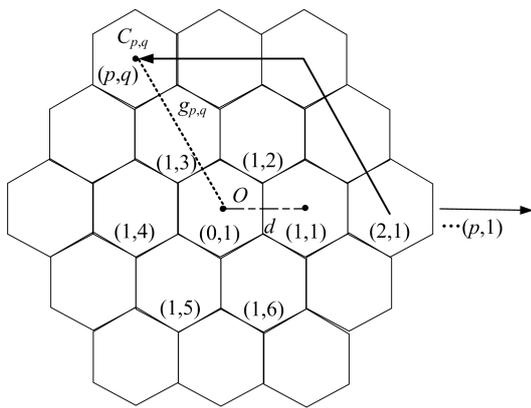


图 3 小区排布示意图

Fig. 3 Arrangement of cellular

设 HAPS 部署高度为 h ,小区 (p,q) 的中心点 $C_{p,q}$ 的俯仰角 $\theta_{p,q}$ 和方位角 $\varphi_{p,q}$ 如图 4 所示,其推导公式为

$$\left. \begin{aligned} \theta_{p,q} &= \arctan \frac{g_{p,q}}{h} \\ \varphi_{p,q} &= \arcsin \frac{(c'-1)d \sin \frac{\pi}{3}}{g_{p,q}} + (n_s - 1) \frac{\pi}{3} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

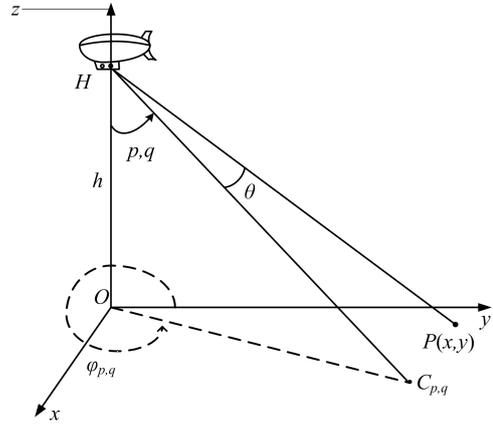


图 4 小区中心点俯仰角和方位角

Fig. 4 Elevation and azimuth angles of cell center point

实际情况中,地面小区边界受天线方向性增益和路径损耗的共同影响.设小区 (p,q) 中心点 $C_{p,q}$ 的坐标为 $(x_{p,q}, y_{p,q})$, $P(x,y)$ 为地面任意一点,其到 HAPS 的连线 HP 与小区 (p,q) 的天线中心指向 $HC_{p,q}$ 的夹角 θ 可以表示为

$$\theta = \arccos\left(\frac{xx_{p,q} + yy_{p,q} + h^2}{\sqrt{x^2 + y^2 + h^2} \cdot \sqrt{x_{p,q}^2 + y_{p,q}^2 + h^2}}\right) \quad (3)$$

根据文献[9]的结果,点 P 处获得的天线方向性增益近似为

$$D(\theta) = \frac{321g_2}{2\theta_{3dB}^2} (\cos\theta)^n \quad (4)$$

式中, θ_{3dB} 为天线方向性增益衰减 3 dB 的角度. HAPS 信号在自由空间中可以认为是视距传播, HAPS 到地面任意一点 $P(x,y)$ 的距离为 $d_{HP} = \sqrt{x^2 + y^2 + h^2}$,则路径损耗可以由自由空间传播损耗公式计算得到,即

$$L_{fs}(\text{dB}) = 32.4 + 20\lg d_{HP}(\text{km}) + 20\lg f(\text{MHz}) \quad (5)$$

设用户接收信号功率的门限为 P_{rth} , HAPS 天线发射功率为 P_t ,当 (p,q) 小区中心点一定时,天线方向性增益 D 和路径损耗 L_{fs} 均为 P 点坐标 (x,y) 的函数,则小区 (p,q) 的边界可表示为

$$P_t + D(x,y) - L_{fs}(x,y) = P_{rth} \quad (6)$$

图 5 表示小区 (p, q) 的覆盖区域, 小区中心点为 $C_{p,q}$, A, B, D 为覆盖区域的顶点, 其与天线中心指向 $HC_{p,q}$ 的夹角分别为 $\theta_a, \theta_b, \theta_d$. 虽然小区中心点按照蜂窝小区模型进行排布, 但实际情况中, 在天线方向性增益和路径损耗的共同影响下, 小区覆盖区域近似于椭圆而非正六边形. 设 ρ 为小区中心接收信号功率与用户接收信号功率门限之比, 该区域的长轴和短轴可以通过公式近似计算, 即

$$\left. \begin{aligned} r_L &= h(\tan(\theta_{p,q} + \theta_b) - \tan(\theta_{p,q} - \theta_a)) \\ r_S &= \frac{2\sqrt{1 - \rho^{\frac{2}{n+2}}}}{\cos\theta_{p,q} \cdot \rho^{\frac{1}{n+2}}} \end{aligned} \right\} (7)$$

式中, θ_a, θ_b 可以由等下式计算得到.

$$\left. \begin{aligned} \cos^n\theta_a \cdot \cos^2(\theta_{p,q} - \theta_a) &= \cos^2\theta_{p,q} \cdot \rho \\ \cos^n\theta_b \cdot \cos^2(\theta_{p,q} + \theta_b) &= \cos^2\theta_{p,q} \cdot \rho \end{aligned} \right\} (8)$$

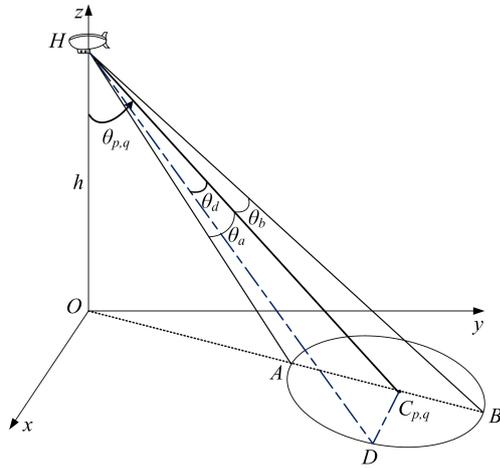


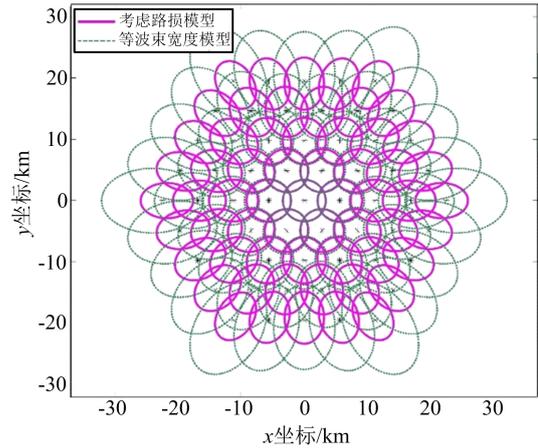
图 5 小区覆盖区域示意图

Fig. 5 Schematic diagram of cell coverage model

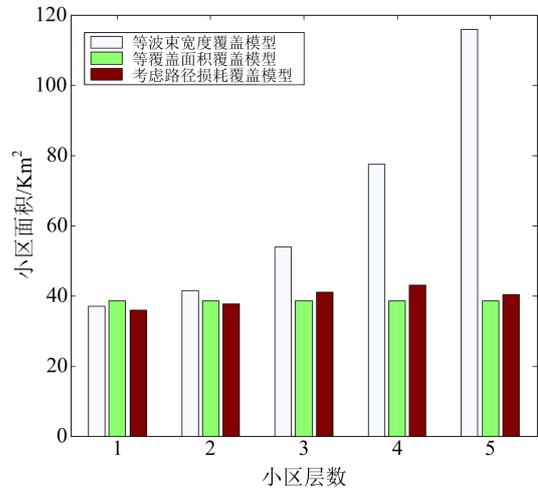
图 6(a) 为考虑路径损耗模型和等波束宽度模型的小区覆盖范围对比图, 反映了路径损耗对小区覆盖范围的影响, 图 6(b) 则表示不同覆盖模型下每层小区覆盖面积. 由图 6 可以看出, 路径损耗对小区覆盖面积有较大影响, 越外层小区受路径损耗影响越大, 在本文提出的覆盖模型中, 随着小区层数的增加, 小区覆盖面积呈先增加后降低的趋势, 而在等波束模型下, 越外层小区覆盖面积越大, 等覆盖面积模型下, 各层小区大小相等.

1.2 HAPS 通信系统中的用户切换概率

HAPS 通信系统中, 用户发生小区切换有两种原因: 一种是用户运动导致其不同小区覆盖区域间跨越; 另一种是平台发生不稳定运动导致小区位置漂移和形状变化, 使用户在不同小区间切换. 本文



(a) 路径损耗对小区覆盖范围影响



(b) 不同模型小区覆盖面积

图 6 不同模型下小区覆盖对比图

Fig. 6 Coverage comparison for different model

只考虑后一种情况造成的切换.

系统中用户的切换概率与用户静止状态小区归属、切换判决策略有关, 本文分析基于最大接收信号强度和最低接收信号门限两种类型的切换概率. 其中, 基于最大接收信号强度的切换策略是最基本的切换策略, 而基于最低接收信号门限的切换概率则是用户通过切换判决策略判定切换概率的下限. 分析这两种切换概率对设计切换判决策略有实际指导意义.

假设 HAPS 最初位于静止状态, 用户按照最大接收信号强度选择接入小区, 设用户 i 从各小区接收到的信号功率值矩阵为 $\mathbf{P}_i = [P_i^{(0,1)}, P_i^{(1,1)}, P_i^{(1,2)}, \dots, P_i^{(p,q)}]$, 则静止状态下小区 (p, q) 服务的用户集为

$$U_{p,q} = \{i \mid \max(\mathbf{P}_i) = P_i^{(p,q)}, P_i^{(p,q)} \geq P_{rth}\} \quad (9)$$

第 (p, q) 小区静止状态下服务的用户数量为

$$N^{ini} = \text{card}(U_{p,q}) \quad (10)$$

当 HAPS 发生不稳定运动后, 用户 i 从各小区接收到的信号功率值矩阵为 $\mathbf{P}'_i = [P'_i^{(0,1)}, P'_i^{(1,1)}, P'_i^{(1,2)}, \dots, P'_i^{(p,q)}]$, 若采用基于最大信号强度的切换策略, 用户选择信号功率最强的小区接入, 则 (p, q) 小区服务的用户集可以表示为

$$U'_{p,q} = \{i \mid \max(\mathbf{P}'_i) = P^{(p,q)'}_i, P^{(p,q)'}_i \geq P_{rth}\} \quad (11)$$

在此情况下, 发生切换的用户数为

$$N_{p,q}^{ho-1} = \text{card}(U_{p,q} - (U_{p,q} \cap U'_{p,q})) \quad (12)$$

我们定义这时的切换概率为第一类切换概率, 公式表示为

$$P_{p,q}^{ho-1} = N_{p,q}^{ho-1} / N^{ini} \quad (13)$$

当以最低接收信号门限作为切换判决依据时, 若 HAPS 发生不稳定运动, 用户接收原小区信号功率值依然高于用户的最低接收信号门限, 则用户保持在原小区不切换. 静止状态下接受小区 (p, q) 服务, 运动后仍可接受该小区服务的用户集为

$$U_{p,q}^{nh} = \{i \mid \max(\mathbf{P}_i) = P_i^{(p,q)}, P_i^{(p,q)} \geq P_{rth}\} \quad (14)$$

因此, 需要进行切换用户数为

$$N_{p,q}^{ho-2} = \text{card}(U_{p,q} - U_{p,q}^{nh}) \quad (15)$$

我们定义此时的切换概率为第二类切换概率, 公式表示为

$$P_{p,q}^{ho-2} = N_{p,q}^{ho-2} / N^{ini} \quad (16)$$

1.3 HAPS 不稳定运动对小区覆盖的影响

HAPS 四种不稳定运动方式对地面小区覆盖的影响不同, 水平运动和旋转运动并不改变 HAPS 到每个小区的距离, 在这两种运动方式下, 地面小区仅发生位置改变; 而在垂直运动和倾斜运动中, HAPS 到各小区距离发生了改变, 造成地面每个小区的形状和大小都随运动过程发生动态变化, 因此本文主要研究这两种运动方式对地面小区覆盖以及用户切换概率产生的影响.

1.3.1 倾斜运动

对于倾斜运动, 不同方向的倾斜运动对小区覆盖的影响基本一致, 因此我们只探讨 HAPS 绕 y 轴逆时针方向倾斜造成的影响. 图 7(a) 为 HAPS 倾斜运动示意图, 倾斜运动会造成小区中心点位置和 HAPS 到各小区距离的变化, 从而导致路径损耗变化, 使得小区形状发生改变. HAPS 经过一定角度的倾斜运动后, (p, q) 小区中心点位置由 $C_{p,q}$ 漂移

至 $C'_{p,q}$. 设 HAPS 的初始状态为水平态, 倾斜运动角度为 $\Delta\omega$, 倾斜运动前后 (p, q) 小区中心点变化的几何关系如图 7(b) 所示.

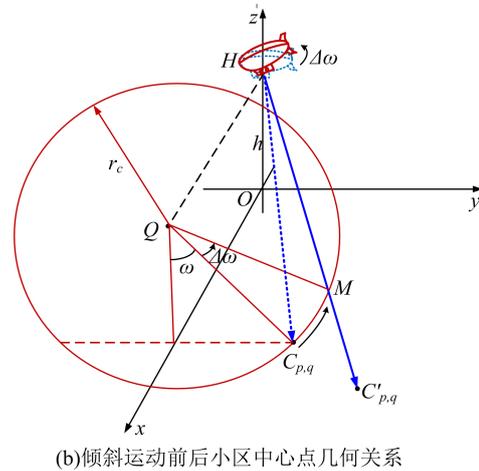
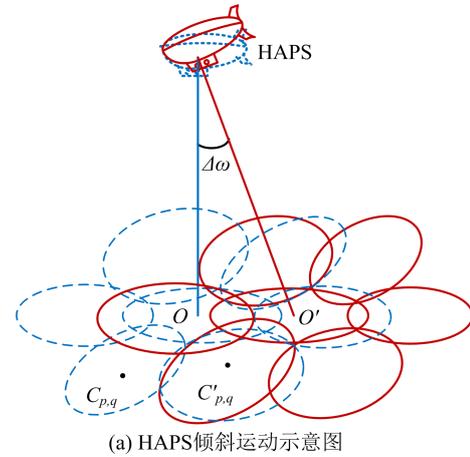


图 7 倾斜运动对地面小区覆盖影响

Fig. 7 Effect of swing movement on ground cell coverage

图 7 中, h 为 HAPS 部署高度, 倾斜运动前小区 (p, q) 中心点为 $C_{p,q}(x_{p,q}, y_{p,q})$, 辅助圆 Q 所在平面过点 $C_{p,q}$ 与 $y-O-z$ 平面平行, 在 HAPS 绕 y 轴逆时针倾斜 $\Delta\omega$ 时, 该天线中心指向点沿圆 Q 由 $C_{p,q}$ 旋转 $\Delta\omega$ 至点 M , 则 HM 为倾斜运动后的天线中心指向, 其延长线与水平地面的交点 $C'_{p,q}$ 为倾斜运动后的小区中心点. 辅助圆的圆心 Q 坐标为 $(0, y_{p,q}, h)$, $QC_{p,q}$ 与 Q 到水平地面的垂线之间的夹角 ω 可以表示为

$$\omega = \arctan \frac{x_{p,q}}{h} \quad (17)$$

则辅助圆 Q 的半径 r_c 可以表示为

$$r_c = \frac{h}{\cos\omega} \quad (18)$$

倾斜运动后, 天线中心指向点 M 的坐标为

$$\left. \begin{aligned} x_M &= r_c \sin(\omega + \Delta\omega) \\ y_M &= y_c \\ z_M &= h - r_c \cos(\omega + \Delta\omega) \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

由此,可以推导出倾斜运动后 (p, q) 小区中心点 $C'_{p,q}(x'_{p,q}, y'_{p,q})$ 坐标为

$$\left. \begin{aligned} x'_{p,q} &= \frac{x_M}{h - z_M} \cdot h \\ y'_{p,q} &= \frac{y_M}{h - z_M} \cdot h \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

则在倾斜运动过程中,小区中心移动距离为

$$\Delta d = \sqrt{\frac{r_c^2 \sin^2 \Delta\omega + (\cos\omega - \cos(\omega + \Delta\omega))^2 y_{p,q}^2}{\cos^2(\omega + \Delta\omega)}} \quad (21)$$

图 8 表示 HAPS 绕 y 轴逆时针倾斜 $\Delta\omega = 5^\circ$ 时的小区覆盖情况. 由图 8 可以看出,在考虑路径损耗的模型下,倾斜运动导致小区覆盖区域漂移、小区形状发生变化. 当 HAPS 绕 y 轴逆时针倾斜时,位于 $x > 0$ 侧的小区中心间距增大,受路径损耗增大的影响,外层小区面积减小,小区交叠区域缩小,小区间甚至出现覆盖真空区域;位于 $x < 0$ 侧的小区中心间距缩小,受路径损耗减小影响,外层小区面积增大,小区间交叠面积增大. 在基于现有覆盖模型的分析中,因不考虑路径损耗的变化,当 HAPS 绕 y 轴逆时针倾斜时, $x > 0$ 侧小区面积增大; $x < 0$ 侧小区面积缩小,这是不符合实际情况的.

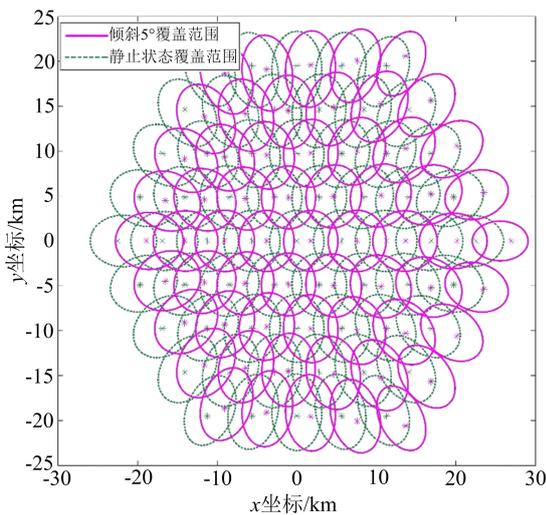


图 8 倾斜运动 5° 时小区覆盖范围

Fig. 8 Cell coverage when the swing angle $\Delta\omega = 5^\circ$

1.3.2 垂直运动

在 HAPS 经历垂直运动的过程中,上升运动会导致小区中心点外移,路径损耗也相应增加,反之亦

然,因此覆盖范围的增大或减小是不确定的. 当飞艇位置发生垂直变化后,地面每个小区中心点的俯仰角和方向角均不发生变化,但是小区中心点坐标发生改变,小区 (p, q) 经过垂直运动后的中心点 $C'_{p,q}(x'_{p,q}, y'_{p,q})$ 坐标可以表示为

$$\left. \begin{aligned} x'_{p,q} &= (h + \Delta h) \cdot \tan\theta_{p,q} \cdot \cos\varphi_{p,q} \\ y'_{p,q} &= (h + \Delta h) \cdot \tan\theta_{p,q} \cdot \sin\varphi_{p,q} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

式中, Δh 为 HAPS 垂直运动的高度. 经过垂直运动后,小区 (p, q) 中心移动的距离为

$$\Delta d = \Delta h \tan\theta_{p,q} \quad (23)$$

图 9 为小区 $(4, 3)$ 在飞艇高度为 19 km、20 km、21 km 时的覆盖范围图. 由图 9 可见,上升运动中,外侧小区会因路径损耗的增大导致小区位置外移,覆盖面积略有下降;而在等波束宽度和等覆盖面积模型中,上升运动都会造成每个小区覆盖面积成比例地增加,这导致使用这两种现有覆盖模型对切换概率进行估计时会出现偏差.

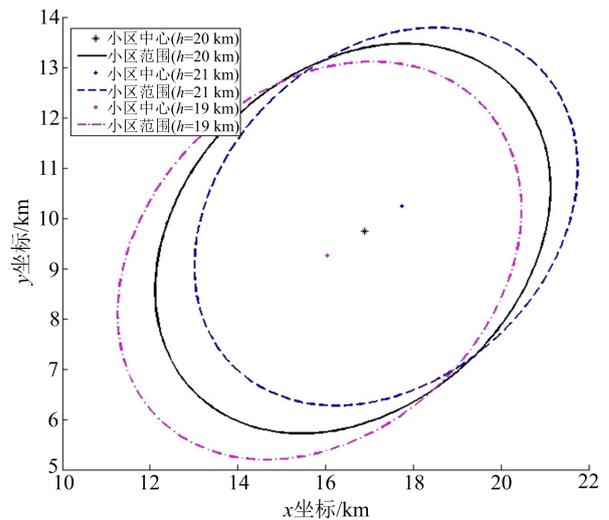


图 9 HAPS 不同高度时 $(4, 3)$ 小区覆盖范围

Fig. 9 Coverage area of the cell $(4, 3)$ when HAPS at different attitude

2 仿真与分析

设 HAPS 部署高度为 20 km, 小区中心间距 5.6 km, 小区层数为 5, 用户在覆盖范围内服从均匀分布^[10]. 仿真上述两类切换概率, 并与等波束宽度模型和等覆盖面积模型下仿真得出的切换概率进行对比. HAPS 垂直运动和倾斜运动下切换概率的仿真结果如图 10 和图 11 所示.

由图 10, 11 可以看出, 在与等覆盖面积模型的对比中, 在两种不稳定运动下, 等覆盖面积模型对切

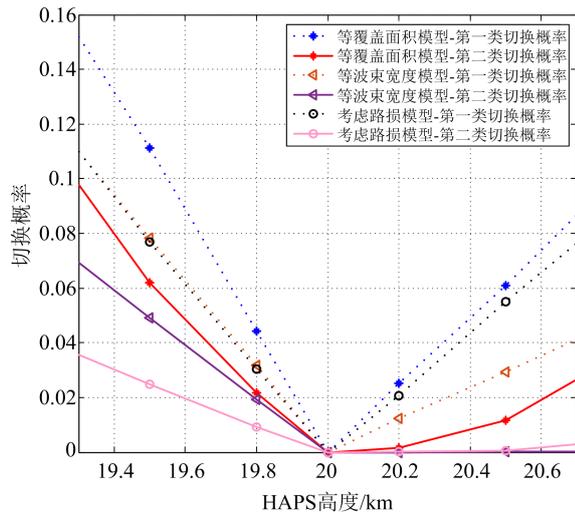


图 10 垂直运动切换概率

Fig. 10 Vertical movement handover probability

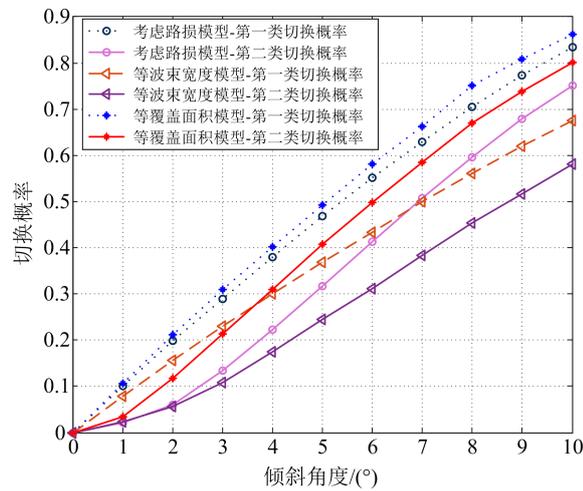


图 11 倾斜运动下的切换概率

Fig. 11 Swing movement handover probability

换概率的估算均比本文模型略高,主要是由于在考虑天线方向性增益和路径损耗的条件下,小区近似椭圆形,其与相邻小区的交叠面积比规则圆形小区间交叠面积更大,造成切换概率的降低。

在与等波束宽度模型的对比中,我们可以发现,在垂直运动中,不论是否考虑路径损耗,下降运动对切换概率的影响都大于上升运动。这一点在本文模型中表现得没有现有等波束宽度模型明显,原因是路径损耗的降低抵消了一定天线方向性增益降低带来的影响,使得小区面积在下降运动中减小程度降低,降低了切换概率。此外,在等波束宽度覆盖模型中,上升运动的第二类切换概率保持在非常低的水平,远低于本文提出的覆盖模型,原因是该模型下,因不考虑路径损耗,随着 HAPS 高度的增加,每

个小区的覆盖面积成比例增大,产生较大的小区交叠区域,导致切换概率被严重低估。在倾斜运动中,切换概率在等波束宽度覆盖模型中也被低估,主要因为若不考虑路径损耗,小区间距增大的方向小区覆盖范围也增大,所以在此模型下倾斜运动没有造成较多的覆盖真空区域。

总的来说,在本文提出的考虑路径损耗的覆盖模型中,垂直运动高度越高、倾斜角度越大,系统中用户的切换概率也越大。系统切换概率对倾斜运动比垂直运动要敏感,两种运动中,第二类切换概率均明显低于第一类切换概率。这说明相对于位置保持,HAPS 的姿态控制技术更为关键。为了获得更接近第二类切换概率的性能,应采用有效的切换策略以降低系统的切换概率和链路失效率。

3 结论

HAPS 作为一种新兴的通信设施,可以作为中继节点或高空基站,具有许多独特的优势和广泛的应用场景,但 HAPS 受大气湍流影响可能发生不稳定运动,地面小区覆盖范围会出现动态变化,从而造成地面用户发生小区切换。本文建立了考虑路径损耗的 HAPS 小区覆盖模型,分析了垂直运动和倾斜运动中路径损耗变化对小区覆盖范围的影响。在所建立覆盖模型的基础上,仿真分析了这两种运动对系统用户切换概率的影响,并与现有文献使用的覆盖模型进行对比。仿真结果显示,倾斜运动比垂直运动对 HAPS 切换概率影响更大,第一类切换概率远大于第二类切换概率,说明 HAPS 的姿态平衡控制较为重要,且适当的切换策略能够有效降低切换概率和链路失效率,分析方法和结果对 HAPS 通信系统的研究和应用有一定指导意义。由于 HAPS 通信平台受实际天气活动和环境影响,故本文提出的模型与实际情况也存在一定偏差。下一步工作中,可进一步考虑雨衰、云层、电离活动、阴影效应等因素对 HAPS 覆盖范围的影响并进行外场测试验证,使模型更贴近实际情况。

参考文献 (References)

[1] TOZER T C, GRACE D. High-altitude platforms for wireless communications [J]. Electronics & Communication Engineering Journal, 2001, 13 (3): 127-137.
 [2] WIDIWAN A K, TAFAZOLLI R. High altitude platform station (HAPS): A review of new

- infrastructure development for future wireless communications [J]. *Wireless Personal Communications*, 2007, 42(3): 387-404.
- [3] ITU-R F.1500, Preferred characteristics of systems in the fixed service using high altitude platforms operating in the bands 47.2-47.2 GHz and 47.9-48.2GHz [S], 2000.
- [4] 何攀峰, 程乃平. 高空平台通信系统中的小区切换技术综述[J]. *装备学院学报*, 2017, 28(1): 97-104.
HE Panfeng, CHENG Naiping. Overview of cell handover technique in high altitude platform communication system [J]. *Journal of Equipment Academy*, 2017, 28(1): 97-104.
- [5] ALBAGORY Y, NOFAL M, GHONEIM A. handover performance of unstable-yaw stratospheric high-altitude stations [J]. *Wireless Personal Communications*, 2015, 84(4): 2651-2663.
- [6] 李树锋. 高空平台通信系统中呼叫允许控制与切换技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
LI Shufeng. Studies on cell admission control and handover techniques for high altitude platform communications systems [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
- [7] 李树锋, 魏急波, 马东堂. 平台水平移动对高空平台通信系统性能的影响[J]. *空军工程大学学报 (自然科学版)*, 2011, 12(3): 73-77.
LI Shufeng, WEI Jibo, MA Dongtang. Impact of horizontal platform movement on the performance of high-altitude platform communication systems [J]. *Journal of Air Force Engineer University*, 2011, 12(3): 73-77.
- [8] HE Panfeng, CHENG Naiping, CUI Jianhua. Handover performance analysis of cellular communication system from high altitude platform in the swing state[C]// *IEEE International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP)*. Beijing, China: IEEE, 2016: 407-411.
- [9] THORNTON J, GRACE D, CAPSTICK M H, et al. Optimizing an array of antennas for cellular coverage from a high altitude platform[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2003, 2(3): 484-492.
- [10] HE Panfeng, CHENG Naiping, Ni Shuyuan. Improved LMS predictive link triggering for handover in HAPS communication system[C]// *Proceedings of the 8th International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP)*. Yangzhou, China: IEEE, 2016: 1-5.