

平台水平移动对高空平台通信系统性能的影响

李树锋, 魏急波, 马东堂

(国防科学技术大学电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 基于飞艇或飞行器的高空平台(HAP)通信系统面临的一个主要的挑战是平台位置保持。平台保持准静止位置的代价较大。因而,通常建议平台保持在一个位置圆柱内。本文推导终端采用固定指向天线时平台水平最大偏移距离计算公式,并分析有限和无限呼叫持续时间条件下覆盖区蜂窝内呼叫的切换概率。研究表明,平台最大水平偏移距离随着终端波束带宽的增大而增加;相同的波束带宽条件下,平台高度越低,要求的最大偏移距离越小。此外,当最大偏移距离较小时,平台的水平移动只在蜂窝边界附近区域产生切换,且越靠近边界呼叫切换概率越大。蜂窝内平均呼叫切换概率随着平台最大偏移距离的增加而增大;呼叫持续时间内平台移动距离越大,蜂窝内平均呼叫切换概率越大。当呼叫持续时间或平台速度趋于无穷大时,切换概率达到最大值。

关键词 高空平台;切换;水平移动

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.03.016

中图分类号 TN929.5 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)03-0073-05

高空平台(High Altitude Platform, HAP)通信系统利用高度为 17-21 km 的同温层平台为地面终端提供 3G/4G 移动或者宽带无线接入等通信业务^[1-4]。与陆地蜂窝系统相比, HAP 通信系统具有覆盖区域宽、路径损耗特性良好、配置成本低等优势,在地震、台风等灾害发生且地面通信基础设施被摧毁时能够快速配置、快速恢复通信业务;与卫星通信系统相比, HAP 通信系统具有视距链路损耗小、传播延迟短、系统建设成本低、不受轨道资源限制、便于更新维护和回收等优势^[5-6]。HAP 通信系统将在未来通信基础设施中将扮演重要角色。

HAP 可以是无人飞艇、无人飞行器或有人飞行器^[1]。通常,置于同温层的飞艇可以利用定位装置和推进系统保持位置,在服务区上空与地面成相对准静止状态。但是当平流层突然出现强气流时,飞艇可能会以可变速度向任意方向运动,偏离原来方位,从而影响 HAP 通信系统的性能。此外,飞行器在同温层不像飞艇那样保持准静止,通常是在服务区上空绕某一固定位置飞行。ITU-R 建议 HAP 应保持在半径为 400 m,高度为 700 m 的圆柱内^[7]; HeliNet 项目建议基于飞行器的 HAP 应在 99% 的时间内保持在高度为 3 km 半径为 4 km 的位置圆柱内^[8]。由于平台的非稳定性和由系统维护而引起的平台更替等原因,需要采用切换技术来保证业务的连续性。研究表明平台内切换频率与平台速度有关,平台速度越大,平台内切换越频繁^[9]。文献[10]提出一种方法预测由 HAP 水平漂移而引起的蜂窝移动,研究表明大部分终端在平台平移后需要执行切换来保持给定的载干比,对特定的平移距离和载干比,存在一个终端天线最优指向角来最小化切换概率。文献[11]研究了采用推进位置保持机制时的平台非稳定性对 HAP UMTS 系统性能的影响,研究表明采用一种简单的推进机制就可以降低平台非稳定性对系统性能的影响。

本文假设理想的平台多波束和终端波束,根据高空平台和终端系统构成的几何模型,推导终端采用固定波束宽度天线时平台水平最大偏移距离计算公式,并分析有限和无限呼叫持续时间条件下覆盖区蜂窝内呼

* 收稿日期:2010-09-07

基金项目:教育部博士点基金资助项目(20094307110004)

作者简介:李树锋(1980-),男,辽宁绥中人,博士生,主要从事高空平台通信系统、无线资源管理研究。

E-mail:lishufeng_nudt@hotmail.com

叫的切换概率。

1 高空平台运动属性

基于飞艇或飞行器的高空平台面临的一个主要的挑战是保持平台位置。特定高度的风速属性随着纬度和季节变化。通常可获得与图 1 类似的风速随高度变化的属性^[12]。大气层的风速随着高度增加而增加,在同温层底部,风速随着高度的增加而降低,在大约 25 km 时达到最小值,然后又随着高度的增加而增加。高空平台的运行高度一般选择在 17 - 22 km,这段同温层在世界大部分地区具有相对温和的风速和波动,更高高度的同温层空气更加稀薄,不利于保持平台位置。同时,这个高度在民航航线之上。

与卫星沿预定轨道运行不同,HAP 的运动有 6 个自由度,包括关于 X、Y 和 Z 轴的平移,绕 X、Y 和 Z 轴的转动(即倾斜、摇摆和偏航),见图 2。实际上,HAP 可进行 6 个自由度中的任意(或组合)的运动,只要它保持在特定的边界内。本文只分析平台水平移动对系统性能的影响。

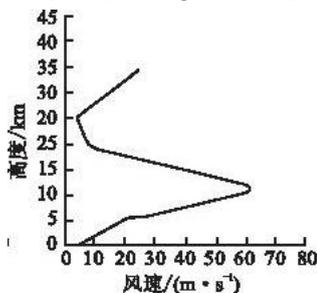


图 1 风速和高度的关系

Fig. 1 Winds velocity versus altitudes

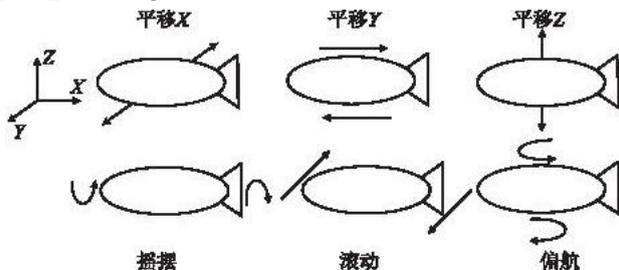


图 2 HAP 的 6 种基本运动方式

Fig. 2 Six basic movements for the HAP

2 HAP 水平最大偏移距离

当 HAP 在 X-Y 平面内水平移动时,蜂窝形状不变、大小不变,只是位置发生变化。如图 3 所示,HAP 初始位置为 A 点(0, 0, h),在地面投影为 O, HAP 向左最多偏移距离 D 到 A'点(-D, 0, h),向右最多偏移 D 到 A''点(D, 0, h)。HAP 在地面的脚印半径为 R,服务区半径为 R_s。为了使得 HAP 在某个水平范围内(以 HAP 沿 X 轴平移为例,运动区间为[-D, D])移动时始终覆盖服务区,则服务区的半径 R_s 必须小于或等于 R - D。服务区内某个蜂窝中心在 O 点,随着 HAP 的移动,蜂窝将可分别向左侧和右侧最多偏移 D。置于 U 点(x_u, y_u, 0)的终端采用点波束指向 HAP 起始位置 A 点。

根据对称特性,考虑 HAP 沿 X 轴方向移动,运动过程中任意点坐标为(x, 0, h),终端的波束带宽为 θ₀,为了确保 HAP 移动过程中终端与 HAP 的通信链路不中断,平台横坐标 x 必须满足如下不等式:

$$f(x) = \frac{x_u(x_u - x) + y_u^2 + h^2}{\sqrt{(x_u^2 + y_u^2 + h^2)((x_u - x)^2 + y_u^2 + h^2)}} \leq \cos(\theta_0/2) \quad (1)$$

式中 $\sqrt{x_u^2 + y_u^2} \leq R_s$ 。

求解方程 $f(x) = \cos(\theta_0/2)$, 得出方程的 2 个实根:

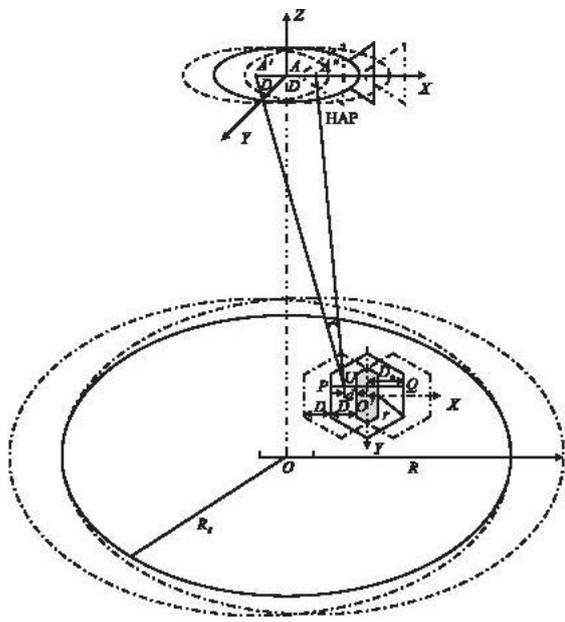


图 3 HAP 水平移动模型

Fig. 3 Horizontal movement model for the HAP

$$x_{1,2} = \frac{-x_u d_u^2 \sin(\theta_0/2)^2 \pm d_u^2 \sqrt{\sin(\theta_0/2)^2 \cos(\theta_0/2)^2 (d_u^2 - x_u^2)}}{\cos(\theta_0/2)^2 d_u^2 - x_u^2} \quad (2)$$

式中 $d_u^2 = x_u^2 + y_u^2 + h^2$ 。

x_1, x_2 两者较小的根 x_{\min} 决定了终端所处位置对 HAP 最大偏移的约束。由式(2)可以得出当终端处于覆盖中心时, HAP 最大偏移取最小值, 且有:

$$x_{\min} = h \tan(\theta_0/2) \quad (3)$$

不同 HAP 高度情况下 HAP 最大移动距离与终端波束带宽的关系见图 4。可以看出要求的 HAP 最大偏移距离随着终端波束带宽的增大而增加。相同的波束带宽条件下, HAP 高度越低, 要求的最大偏移距离越小。

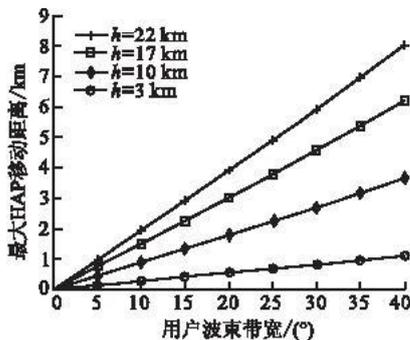


图 4 HAP 最大平移距离与终端波束带宽的关系

Fig. 4 User beamwidth versus maximum HAP horizontal moving distance

3 服务区内的呼叫切换概率

3.1 有限呼叫持续时间条件下的呼叫切换概率

如图 3 所示, 在蜂窝移动过程中, 终端 U 发起的呼叫可能跨越移动中的蜂窝边界, 而引起切换。设 HAP 运动轨迹如下: 从初始位置首先向右移动 D , 然后向左移动 $2D$, 再向右移动 $2D$, 如此往复。蜂窝与 HAP 有相同的运动方式, 且运动周期为 $4D$ 。假设终端的呼叫持续时间为 T , 平台运动速度为 v , 则在 T 时间内平台运动距离为 Tv 。过 U 点与运动方向平行的直线与蜂窝相交的线段 PQ 长为 $2D_0$ 。根据对称性, 只需分析对蜂窝称轴左侧终端。考虑以 HAP 左边界运动到终端所在位置为起点, 距离为 $4D$ 的一个运动周期。由于 HAP 匀速运动, 终端发起呼叫的位置 x 在 $[0, 4D]$ 内均匀分布。当蜂窝运动到最右端时终端距离最近的蜂窝边界的距离为 d 。图 5 给出了 2 种情况下一个 HAP 运动周期中可能发生切换的时刻。下面分 2 种情况讨论呼叫发生切换的概率。

1) 当 $D_0 < D$, 且 $d > (D - D_0)$, $d < 2(D - D_0)$ 时, 呼叫可能发生切换的时刻见图 5(a)。可以看出如果终端在 2 个切换时刻中间发起呼叫, 则该呼叫将不会发生切换。因此, 呼叫发生切换的概率可通过下式计算:

$$P_h^u = 1 - \frac{1}{4D} \int_0^{2d} P(Tv < (2d - x)) dx - \frac{1}{4D} \int_{2d}^{2d+2D_0} P(Tv < (2d + 2D_0 - x)) dx - \frac{1}{4D} \int_{2d+2D_0}^{4D-2D_0} P(Tv < (4D - 2D_0 - x)) dx - \frac{1}{4D} \int_{4D-2D_0}^{4D} P(Tv < (4D - x)) dx \quad (4)$$

设 T 服从均值为 $1/\mu$ 的指数分布, 则:

$$P_h^u = 1 - \frac{1}{4D} \int_0^{2d} (1 - \exp(-\mu(2d - x)/v)) dx - \frac{1}{4D} \int_{2d}^{2d+2D_0} (1 - \exp(-\mu(2d + 2D_0 - x)/v)) dx - \frac{1}{4D} \int_{2d+2D_0}^{4D-2D_0} (1 - \exp(-\mu(4D - 2D_0 - x)/v)) dx - \frac{1}{4D} \int_{4D-2D_0}^{4D} (1 - \exp(-\mu(4D - x)/v)) dx \quad (5)$$

经化简后得:

$$P_h^u = v_m/D - v_m(\exp(-2d/v_m) + 2\exp(-2D_0/v_m) + \exp(-(4D - 2d - 4D_0)/v_m))/4D \quad (6)$$

式中 $v_m = v/\mu_0$

2) 当 $D_0 > D$, 或 $d > 2(D - D_0)$ 时, 呼叫可能发生切换的时刻见图 5(b)。切换概率可通过下式计算:

$$P_h^u = 1 - \frac{1}{4D} \int_0^{2d} P(Tv < (2d - x)) dx - \frac{1}{4D} \int_{2d}^{4D} P(Tv < (4D - x)) dx = 1 - \frac{1}{4D} \int_0^{2d} (1 - \exp(-\mu(2d - x)/v)) dx - \frac{1}{4D} \int_{2d}^{4D} (1 - \exp(-\mu(4D - x)/v)) dx \quad (7)$$

经化简后得:

$$P_h^u = v_m/2D - v_m(\exp(-2(D - d)/v_m) + \exp(-2(D + d)/v_m))/4D \quad (8)$$

可以看出呼叫发生切换的概率与蜂窝最大偏移距离 D 、呼叫当前位置、平均呼叫持续时间内的蜂窝移动距离 v_m 等参数有关。当蜂窝半径为 3.0 km, D 为 1.0 km 时,蜂窝内终端切换概率分布见图 6。显然,蜂窝中心附近区域呼叫将不经历切换,蜂窝的移动只在蜂窝边界附近产生切换,且越靠近边界呼叫切换概率越大。但是,在靠近蜂窝的上端和下端处存在最大的切换概率位置,从这 2 个位置向外侧切换概率降低。

根据终端在蜂窝范围内的切换概率分布,可以计算出整个蜂窝内终端的平均切换概率:

$$P_h = \frac{\iint P_h^u dx dy}{1.5\sqrt{3}r^2} \quad (9)$$

当半径为 3 km 时,不同 v_m 取值条件下蜂窝内平均呼叫切换概率随蜂窝最大偏移距离的变化曲线见图 7。可以看出,蜂窝范围内的平均呼叫切换概率随着 HAP 最大偏移距离的增加而增大。同时相同 HAP 最大偏移距离条件下,HAP 移动速度越大(v_m 越大),蜂窝范围内的呼叫平均切换概率越大。当 v_m 趋于无穷大时,切换概率达到最大值。

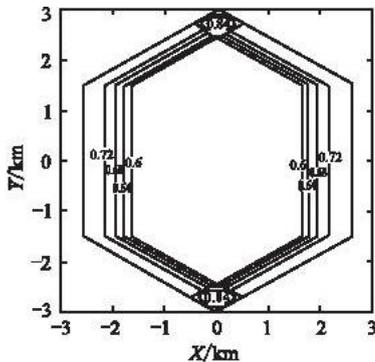


图 6 蜂窝范围内呼叫切换概率分布

Fig. 6 Handover probability distribution in a cellular range

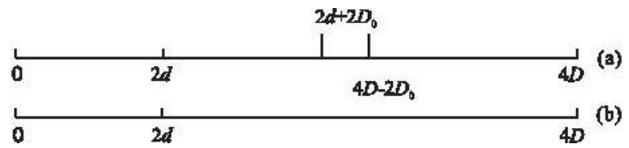


图 5 HAP 运动周期中可能发生切换的时刻

Fig. 5 Possible handover time in a HAP moving cycle

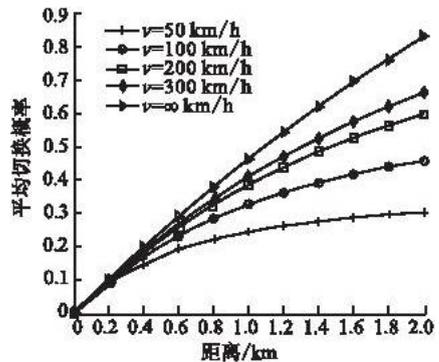


图 7 HAP 水平移动引起的蜂窝内终端切换概率

Fig. 7 User handover probability introduced by HAP horizontal movement

3.2 无限呼叫持续时间条件下的平均呼叫切换概率

当终端的呼叫持续时间或者 HAP 移动速度为无穷大时,只要在 HAP 运动周期 $4D$ 内蜂窝边界经过 U 点,则 U 发起的呼叫均会经历切换。如图 7 所示,当 HAP 沿横轴平移时,服务区中只有向左和向右最大偏移蜂窝重叠区(阴影区域)内的呼叫不发生切换。设终端在服务区均匀分布,每个蜂窝中由 HAP 移动而引起的切换占蜂窝内呼叫总数的比例等于原蜂窝除去重叠区的区域面积与整个蜂窝面积之比,可通过下式计算:

$$P_h = \frac{(0.5r - D/\sqrt{3})(1.5r - D/\sqrt{3})}{0.75r^2} \quad (10)$$

4 结束语

HAP 通信系统兼具陆地蜂窝通信系统和卫星通信系统的优势,在未来通信基础设施中将扮演重要角色。本文假设理想的平台多波束和终端波束,根据高空平台和终端系统构成的几何模型,推导终端采用固定波束宽度天线时平台水平最大偏移距离计算公式,并分析有限和无限呼叫持续时间条件下覆盖区蜂窝内呼叫的切换概率。研究表明,平台最大水平偏移距离随着终端波束带宽的增大而增加;相同的波束带宽条件下,平台高度越低,要求的最大偏移距离越小。此外,当最大偏移距离较小时,平台的水平移动只在蜂窝边界附近区域产生切换,且越靠近边界呼叫切换概率越大。蜂窝内平均呼叫切换概率随着平台最大偏移距离的增加而增大;呼叫持续时间内平台移动距离越大,蜂窝内平均呼叫切换概率越大。

参考文献:

- [1] Karapantazis S, Pavlidou F N, Broadband communications via high - altitude platforms: a survey[J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2005, 7 (1): 2 - 31.
- [2] 孙震强. 一种有效的抗震应急通信系统:高空平台系统[J]. 电信科学, 2008, 24 (6): 15 - 18.
SUN Zhenqiang. An effective emergency communications systems: high altitude platform system[J]. Telecommunications science, 2008, 24(6): 15 - 18. (in Chinese)
- [3] El Jabu B, Steele R, Aerial platforms: a promising means of 3G communications [C]//IEEE VTC. [S. l.]:IEEE press, 1999: 2104 - 2108.
- [4] Wu G, Miura R, Hase Y. A broadband wireless access system using stratospheric platforms [C]//Proceedings of globecom 2000 San Francisco:IEEE press, 2000: 225 - 230.
- [5] Djuknic Goran M, Freidenfelds John. Establishing wireless communications services via high - altitude aeronautical platforms: a concept whose time has come? [J]. IEEE communications magazine, 1997, 9: 128 - 135.
- [6] Widiawan 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.
- [7] ITU - R F1500 - 2000. Referred characteristics of systems in the fixed service using high altitude platforms operating in the bands 47.2 - 47.5 GHz and 47.9 - 48.2 GHz [S].
- [8] Grace D, Thornton J, Konefal T, et al. Broadband communications from high altitude platforms: the helinet solution [C]//Wireless personal mobile conference. Alborg, Denmark: [s. n.], 2001: 75 - 80.
- [9] Katzis K, D, Pearce A J, Grace D. Impact of high altitude platform movements on cellular handover [C]//International workshop on high altitude platform systems. Athens, Greece: [s. n.], 2005.
- [10] Thornton J, Grace D. effect of lateral displacement of a high - altitude platform on cellular interference and handover [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2005, 4(4): 1483 - 1490.
- [11] Axiotis D I, Theologou M E, Sykas E D. The effect of platform instability on the system level performance of HAPS UMTS [J]. IEEE communications letters, 2004, 8(2): 111 - 113.
- [12] Tozer T C, Grace D. High - altitude platforms for wireless communications [J]. Electronics & communication engineering, 2001, 13 (3): 127 - 137.

(编辑:徐楠楠)

The Effect of the Platform Horizontal Displacement on the Performance of HAP Communication System

LI Shu - feng, WEI Ji - bo, MA Dong - tang

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Platform position maintaining is a major challenge for the airship or aircraft based High Altitude Platform (HAP) communication systems. The platform maintaining a stationary position will introduce a high price. Hence, a position cylinder is suggested for the position maintaining of the platform. This paper derives the computation formula for the maximum distance of the HAP horizontal displacement when a fixed pointing antenna is adopted at the terminal, and simultaneously the handover probability in a cellular of the service area under limited and un - limited average call durations is analyzed. The study results show that the maximum distance for the HAP horizontal displacement increases with the user beam - width. Under the condition of the same beam - width, the higher the altitude of the platform, and the smaller the maximum distance for the platform displacement is required. Moreover, the horizontal displacement can only generate handover in the area near the edge of the cellular. The calls which are nearer to the cell edge have higher handover probability. The average handover probability increases with the maximum distance for the HAP displacement. The larger the HAP displacement during the call duration, the greater the average handover probability is. When the call duration time and the platform speed tend to infinite, the handover probability reaches to the maximum value.

Key words: High Altitude Platform (HAP); handover; horizontal displacement