

高空平台不稳定性对 HAPS 通信性能影响建模与分析

管明祥¹, 郭 庆², 顾学迈²

(1. 深圳信息职业技术学院电子通信技术系, 广东深圳 518029; 2. 哈尔滨工业大学电子与信息工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘 要: 由于高空平台不可能静止驻留在空中, 平台打转、摇摆等状态就会对 HAPS(High Altitude Platform Stations)通信性能产生关键影响. 目前的研究都处在假设平台稳定或调整波束指向能够补偿由于高空平台移动造成的剩余指向误差, 存在很大的局限性, 不能真实反应实际情况. 本文通过建模把平台的不稳定性带来的影响反应到无线链路上, 解决平台不稳定性等造成收发信号随机变化大而无法通信或通信质量差的问题. 并通过仿真分析验证本文提出模型的正确性.

关键词: 高空平台站; 不稳定; 无线链路; 性能影响

中图分类号: TN926. 3

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2012) 10-1948-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.10.007

Model and Evaluation for Performance Effects by Instability of HAP for HAPS Communication

GUAN Ming-xiang¹, GUO Qing², GU Xue-mai²

(1. Department of Electronic Communication Technology, Shenzhen Institute of Information Technology, Shenzhen, Guangdong 518029, China;

2. School of Electronic and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract: Obviously the HAP doesn't keep stationary all long and the HAP state of rotation and swing will impact the performance of HAPS communication seriously. By far, all the research work assumed that the high altitude platform is stationary and offset caused by movement of the high altitude platform is compensated. Therefore traditional method can not resolve the problems caused by the instability of high altitude platform and effects on the performance of HAPS communication by instability of high altitude platform are researched profoundly. A wireless link model which reflects the states of HAP is proposed and the problems caused by the instability of high altitude platform are resolved. Lastly the validity of the model proposed this paper is proved by numerical analysis and simulation.

Key words: high altitude platform stations; instability; wireless link; performance effect

1 引言

近 20 余年来, 移动通信的发展非常迅速. 移动通信要解决的根本问题是使人们在任何时间和任何地点都能进行各种通信问题, 包括在运动中的通信问题. 近来, 又有一种新的移动通信手段出现. 它就是高空平台通信(HAPS, High Altitude Platform Stations)^[1~3]. 一般来说, 高空平台通信网络是指在近地空间的高度约 20~100 km, 由长驻空间 5~10 年, 准静止、可装载一定规模有效载荷的高空平台(HAP, High Altitude Platform)所构成的网

络, 在近地空间范围内使用稳定的通信平台作为微波中继站, 与地面控制设备、入口设备以及多种无线用户构成的通信系统, 高空平台既可以与卫星地面综合组网, 也可以单独与地面组网, 如图 1 所示. 其中通信平台与地球自转保持同步, 可长期驻留空中. 高空平台通信利用良好的电波传输特性, 通过平台实现地面用户之间、平台之间或平台与卫星之间的通信连接, 具有布局灵活、应用广泛、成本低廉、安全可靠等优点^[4,5]. 由高空平台构成的信息系统将是新一代的无线通信系统, 它融合了陆地和卫星通信系统的优势, 又不同程度地避免

了两者的缺点,在通信领域的应用得到了广泛认同.在一个高空平台覆盖范围内,仍然可以采用蜂窝网结构组织通信^[6,7].

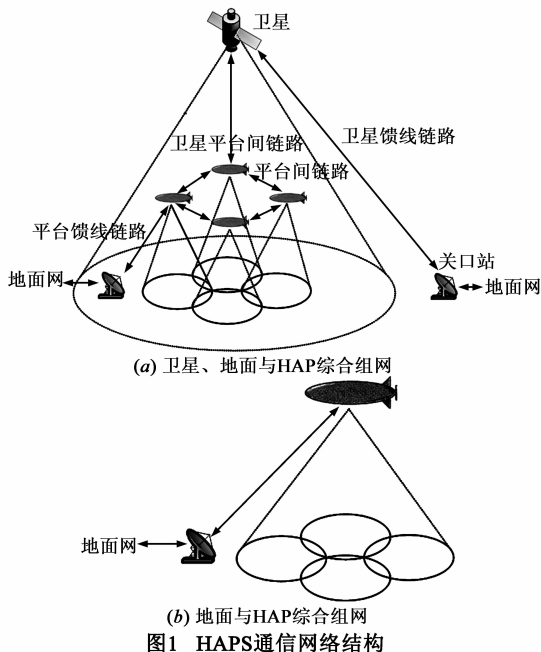


图1 HAPS通信网络结构

本文主要关注平台不稳定性对 HAPS 通信性能影响.高空平台通信中的一个潜在问题是平台位置的不固定.文献[8]中考虑由 HAPS 构成的 UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) 无线网络,从系统级特性来研究平台水平移动性的影响.文中对移动性对系统容量、呼损的影响及软切换率进行了仿真.最后,试验证明,不稳定的影响可以由一种简单的推进装置来均衡,以此来保持性能.该模型的缺点为仅仅简单考虑水平移动,不能反映 HAP 运动特性,而仅考虑 HAP 运动特性而不考虑链路特性,研究显然欠妥.文献[9]中提出,对于高空平台,采用环形蜂窝的多波束扫描天线阵列比传统的蜂窝形要好.环形蜂窝可以减弱平台竖直轴向旋转带来的影响.该模型的缺点是仅仅从天线设计及小区覆盖角度来应对平台运动,没有考虑 HAPS 链路特性,没有从链路上验证模型的正确性.文献[10]中提出一种适用于 HAPS UMTS 功率资源共享的自适应软切换算法.该算法在仅考虑平台移动情况下,根据平台下行链路输出功率和每个基站下行链路输出功率,调整移动终端的软切换限度 (SHO margin).很显然没有从链路上解决平台不稳定性对 HAPS 性能带来的影响.

因此,文献中对 HAPS 无线链路分析等基于地面蜂窝小区基站固定或高空平台处于静止状态,或者假设平台静止不动或调整波束指向能够补偿由于高空平台移动造成的剩余指向误差.或者考虑平台运动为一种

简单平移,并通过运动补偿来消除平台移动带来的通信影响.没有从链路本质上解决平台不稳定性对 HAPS 性能带来的影响,而在通信网的设计和维护过程中,链路质量作为网络可靠性的一项重要性能指标^[11],许多学者对此作了大量的研究.文献[12]研究了 CDMA 系统通过功率控制来提高链路质量,从而提高系统容量.而功率控制存在一定的误差将导致链路质量下降,因此,文献[13]提出非理想功率控制来提高基于 CDMA 的 HAPS 系统的链路质量,并显著提高系统容量,但缺点为没有考虑平台不稳定状态对 HAPS 性能的影响.通过上述文献分析,目前对 HAPS 通信研究中,没有出现同时考虑平台不稳定性及链路质量对 HAPS 通信性能的影响的研究.因此,本文研究思路为通过深入研究 HAPS 通信链路特性,把平台的不稳定反映到链路特性中,并通过非理想功率控制来应对平台不稳定状态对 HAPS 通信链路带来的影响.本文给出了 HAP 不稳定情况下 HAPS 通信链路模型,并且通过仿真与性能分析来验证本文提出模型的正确性.

2 平台不稳定性分析

由于目前没有实际的高空平台应用系统,不能确切的给出平台的具体运动模式.但可以肯定的是,由于风或压力变化等的作用,平台一定会处于非静止状态,为了保证通信的可靠性,平台上必定装有控制装置,维持平台在一种准静止状态.一般来说平台平移或上下升降容易控制,所以本文考虑平台的不稳定状态分为二种,一种为平台竖直轴向旋转,另一种为平台在偏离平衡点的左右摆动.

2.1 平台旋转

平台竖直轴向旋转示意图如图 2 所示.为了减轻由于平台的转动带来的影响,主要问题在于天线的设计,通过二维阵列天线扫面环形小区来解决平台旋转带来的问题.该设计有效地减少了由于平台转动带来的用户切换和用户位置更新,不用考虑平台旋转的情况,而且需要的蜂窝数量也远小于传统的蜂窝覆盖^[14].

2.2 平台偏离平衡点左右摆动

高空平台上面带有稳定装置来补偿平台偏离平衡

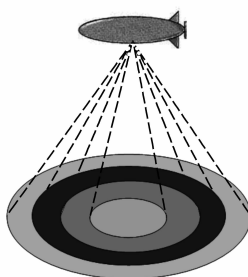


图2 平台竖直轴向旋转示意图

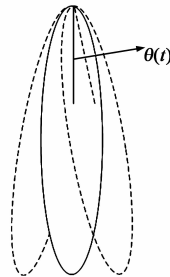


图3 平台偏离示意图

点的左右摆动,确保平台的准静止状态,见图3所示.平台将在偏离平衡点一定的范围内摇摆,假设平台偏离平衡点的角度为 $\theta(t)$,根据高斯随机过程特性, $\theta(t)$ 满足高斯随机过程或正态过程.高斯过程在不同时刻的取值是不相关的,高斯过程在任一时刻上的样值是一个一维高斯随机变量,其一维概率密度函数可表示为:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

式(1)中, a 为高斯随机变量的数学期望, σ 为标准方差. 由于平台偏离平衡点的左右摆动来保持一个准静止状态,显然 $\theta(t)$ 满足均值为 0 与标准方差为 σ 的高斯随机变量. 式(1)可以写为:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

这样通过 $\theta(t)$ 的变化就能简单表述高空平台的摇摆情况,均值为 0 说明了平台的准静止状态.

3 平台不稳定状态下 HAPS 通信链路建模

首先考虑平台静止状态下 HAPS 的链路模型,考虑不均匀波束增益函数和莱斯信道衰落共同作用的情况.为精确起见,作为一个影响不明显的因素(传播损耗)也把它考虑在内.这是考虑到在低仰角通信时,同一波束内近平台一端与远离平台一端的不同用户的传播损耗还是有较大差别的.根据文献[13]可知,在理想功率控制下,上行链路质量表达式为:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{W}{R_b} \frac{P_{ci}}{(1-\beta)I_{intra} + I_{inter} + N} \quad (3)$$

其中, P_{ci} 为理想功率控制情况下高空平台接收到的第 i 个用户的信号功率, R_b 为信息比特率, W 为发射带宽, I_{intra} 是来自相邻小区接入用户的干扰, I_{inter} 是来自同一小区接入用户的干扰. β 代表平台天线多用户检测技术(MUD)的效率,在本文中不采用多用户检测技术,取 $\beta = 0$.

式(3)中 I_{intra} 可以表示为:

$$I_{intra} = \sum_{i=1}^{M_{10}} P_{c1} + \sum_{j=1}^{M_{20}} P_{c2} + \dots + \sum_{j=1}^{M_{n0}} P_{cn} \quad (4)$$

其中, M_{10} 代表参考小区内业务 1 的用户数,同样 M_{20} 代表参考小区内业务 2 的用户数, M_{n0} 代表参考小区内业务 n 的用户数.

在估算 I_{inter} 之前,顺便提到 HAPS 的一个独特特性.在 HAPS 系统中,所有的天线排列在平台下方,天线之间的距离不过几米,因此,用户信号到达平台所有的天线经历的自由空间传输损耗相同.为了计算来自相邻小区的区间干扰,首先给出不同小区之间干扰的几何关系如图 4 所示.在此,由于天线尺寸相对于高空平台的高度而言可以忽略,假设各小区所对应的天线处

于同一位置.图 4 中 φ_{ij} 和 $\varphi_{0,ij}$ 分别表示移动用户和它的服务小区以及参考小区视轴之间的夹角.

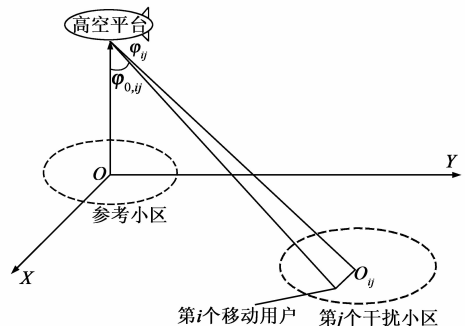


图4 HAPS通信不同小区间干扰的几何关系图

下面关于链路预算的关系式以 dB 来衡量,平台第 j 根天线 BS_j 接收到的该覆盖范围内的第 i 个用户的信号功率为:

$$(P_{Rji})_{dB} = (P_{Ti})_{dB} - (L_{ji})_{dB} + (G_{Rji})_{dB} + (G_{Tji})_{dB} \quad (5)$$

其中 $(P_{Ti})_{dB}$ 为用户发射功率, $(L_{ji})_{dB}$ 表示传输损耗, $(G_{Rji})_{dB}$ 和 $(G_{Tji})_{dB}$ 分别表示接收和发射天线增益. BS_0 接收到的该覆盖范围内第 i 个用户的信号功率为:

$$(P_{ROi})_{dB} = (P_{Ti})_{dB} - (L_{0i})_{dB} + (G_{ROi})_{dB} + (G_{TOi})_{dB} \quad (6)$$

其中 $(P_{Ti})_{dB}$ 为用户发射功率, $(L_{0i})_{dB}$ 表示传输损耗, $(G_{ROi})_{dB}$ 和 $(G_{TOi})_{dB}$ 分别表示接收和发射天线增益. 由于在 HAPS 系统中,每个用户到平台天线经历的衰落相同,故有 $(L_{ji})_{dB} = (L_{0i})_{dB}$, $(G_{Tji})_{dB} = (G_{TOi})_{dB}$, 联合等式(5)和(6),消除 $(G_{TOi})_{dB}$ 有:

$$(P_{ROi})_{dB} = (G_{ROi})_{dB} - (G_{Rji})_{dB} + (P_{Rji})_{dB} \quad (7)$$

又因为 BS_j 收到的功率为 P_{ci} , 可以得到

$$(P_{ROi}) = \frac{G_{ROi}}{G_{Rji}} P_{c1} \quad (8)$$

因此可以得到 I_{inter} 为:

$$I_{inter} = \sum_{j=1}^K \left\{ \sum_{i=1}^{M_{1j}} \frac{G_{ROi}}{G_{Rji}} P_{c1} + \sum_{j=1}^{M_{2j}} \frac{G_{ROi}}{G_{Rji}} P_{c2} + \dots + \sum_{i=1}^{M_{nj}} \frac{G_{ROi}}{G_{Rji}} P_{cn} \right\} \quad (9)$$

K 为参考小区周边小区数, M_{1j} 为 j 小区内业务 1 的用户数, M_{2j} 为 j 小区内业务 2 的用户数, M_{nj} 为 j 小区内业务 n 的用户数.

由于高空平台的摆动导致了无线链路理想功率控制失效,下面通过无线链路非理想功率控制来表征平台动态变化情况.文献[13]明确指出,CDMA 系统中功率控制的误差可以建模为均值为 0 正态分布的随机变量,这刚好与平台偏离平衡点摆动的角度分布相对应.因此,平台偏离平衡点左右摆动时,可以把平台的动态变化情况反应到系统的上行链路中.结合式(3)可以得到 HAP 左右摆动时的非理想功率控制的上行链路质量表示为:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{W}{R_b I_{intra} + I_{inter} + N} P_{\alpha} e^{\theta_k} \quad (10)$$

θ_k 表示均值为 0 与标准方差为 σ_p 的高斯随机变量,非理想功率控制下平台天线接收功率可以表示为 $P_{\alpha} e^{\theta_k}$. 因此,本文以 θ_k 的 dB 值说明因为平台不稳定性造成的功率控制误差而导致的接收功率的变化.

4 模型性能仿真与分析

本文假设系统提供两种业务,从文献[15]中选取了两种典型业务,如表 1 所示:信号能量与业务比特速率的比值为每种业务需要的最小每比特能量 E_b ,因此,业务 2 所需要最小比特能量 $(E_b/N_0)_{min}$ 小于业务 1.

表 1 业务分类

参数	业务 1	业务 2
信息比特率	12.2kbps	64kbps
E_b/N_0 需求最小值	5dB	2dB
功率因子	0dB	4.2dB
典型应用	语音	交互数据

式(4)中 I_{intra} 可以表示为:

$$I_{intra} = \sum_{i=1}^{M_{10}} P_{c1} e^{\theta_k} + \sum_{j=1}^{M_{20}} P_{c2} e^{\theta_k} \quad (11)$$

其中, M_{10} 代表参考小区内业务 1 的用户数,同样 M_{20} 代表参考小区内业务 2 的用户数.

式(9)中 I_{inter} 可以表示为:

$$I_{inter} = \sum_{j=1}^K \left\{ \sum_{i=1}^{M_{1j}} \frac{G_{R0i}}{G_{Rji}} P_{c1} e^{\theta_k} + \sum_{j=1}^{M_{2j}} \frac{G_{R0i}}{G_{Rji}} P_{c2} e^{\theta_k} \right\} \quad (12)$$

K 为参考小区周边小区数, M_{1j} 为 j 小区内业务 1 的用户数, M_{2j} 为 j 小区内业务 2 的用户数.

下面给出非理想功率控制对上行链路产生的影响,不同的 σ_p 代表了平台偏离平衡点的程度,图 5 给出了在不同的 σ_p 下中断概率 P_0 与小区中业务 1 的用户数关系,业务 1 的码速率 $R_b = 12.2\text{kbps}$,在上节中已经介绍.当 $P_0 = 10^{-2}$,每 0.5dB 的功率控制误差将会导致在容量上约减少 10 个左右用户.图 6 给出了在不同的 σ_p 下中断概率 P_0 与小区中业务 2 的用户数关系,业务 2 的码速率 $R_b = 64\text{kbps}$,在上节中已经介绍.当 $P_0 = 10^{-2}$,每 1dB 的功率控制误差将会导致在容量上约减少

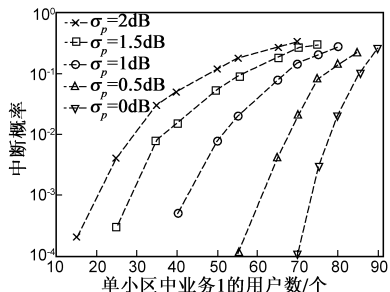


图 5 不同 σ_p 值时中断概率与单小区业务 1 的用户数之间的关系

6 个左右用户.

为了说明由于高空平台的准静止状态等造成的功率控制误差对系统性能的影响,图 7 中说明了在是否理想功率控制条件下中断概率 ($P_0 = 10^{-2}$) 与系统的呼叫接入关系.对于非理想功率控制,平台天线接收业务 1 用户和业务 2 用户信号功率标准方差分别为 $\sigma_{p1} = 1\text{dB}$, $\sigma_{p2} = 0.5\text{dB}$,业务 1 用户的 σ_p 偏大的原因主要是考虑此类用户和业务 2 用户相比具有更高的移动性.轴线坐标表示小区的平均用户数,可以从图 7 中很明显看出,每个小区同一时刻所能容纳的每种业务的用户数有限,一种业务的用户数与另一种业务的用户数成近似线性关系.而且系统容量受非理想功率控制的影响很大.

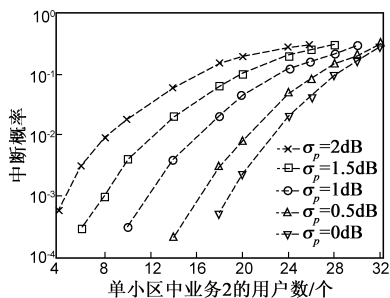


图 6 不同 σ_p 值时中断概率与单小区业务 2 的用户数之间的关系

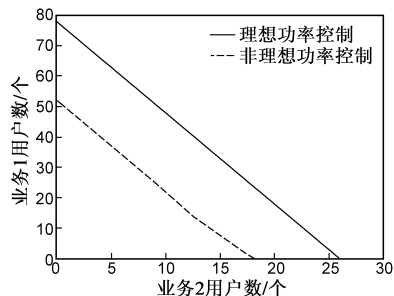


图 7 在理想与非理想功率控制下单小区业务 1 用户与业务 2 用户的关系

下面将分析本文提出的模型是否能规避平台不稳定状态带来的影响.考虑了 HAPS 系统独特的位置特性,即用户到多个基站的传输损耗相同.在 HAPS 系统中,平台天线与其覆盖小区内的用户进行连接通信.

为简化仿真模型,选取采用和地面蜂窝系统类似的正六边形小区扩展,本文的仿真采用了 $K = 7$ 的正六边形蜂窝分布模型.呼叫到达服从泊松分布模型,当呼叫接入网络后,呼叫服务时间服从指数分布.呼叫开始时,用户终端的位置服从均匀分布,运动方向在 $[0^\circ, 360^\circ]$ 之间随机分布.用户改变方向的时间间隔服从指数分布,并且业务 1 用户与业务 2 用户改变方向的时间间隔均值分别为 40s 和 80s(业务 2 用户移动速度小).移动用户改变方向后的运动方向服从在 $[-45^\circ, 45^\circ]$ (参考改变前的方向)的均匀分布.其他的参数已经在

表1中描述.表2对剩余的仿真参数给予了说明.并且假设 $P_{c1}/P_{c2} = 4.2\text{dB}$, $W = 5\text{MHz}$, $\beta = 0$, 小区半径为 3km .

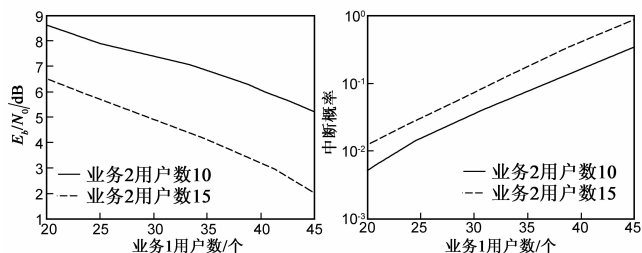
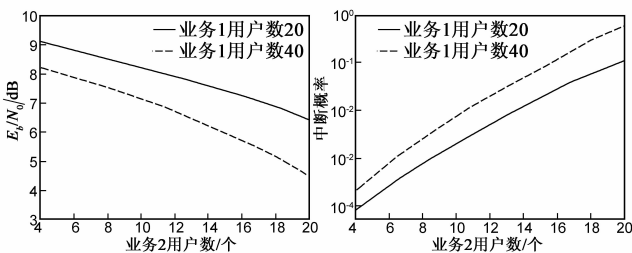
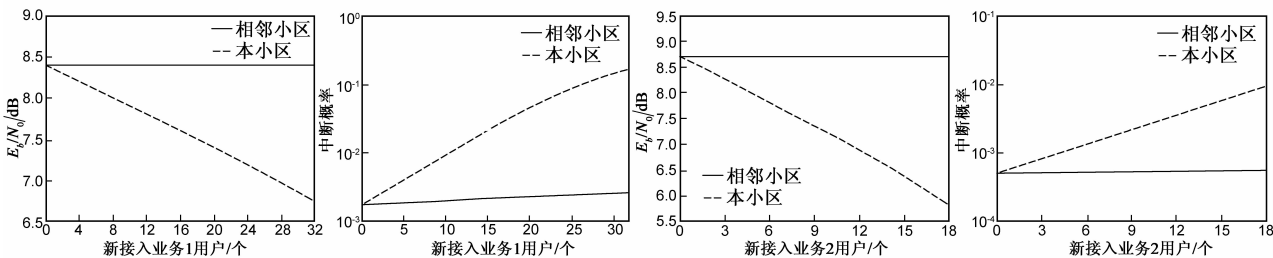
表2 仿真参数

参数	业务1	业务2
到达新呼叫比例	75%	25%
平均呼叫服务持续时间	120s	500s
用户最小速度	0m/s	0m/s
用户最大速度	20m/s	5m/s
σ_p	1dB	0.5dB

图8描述了 E_b/N_0 和中断概率 P_o 与每个小区业务1用户数的函数关系图,此时业务2用户数保持常数不变.相对图8而言,图9描述了 E_b/N_0 和中断概率 P_o 与每个小区业务2用户数的函数关系图,此时业务1用户数保持常数不变.从图9中可以看出,尽管业务2用户数对信号的 E_b/N_0 产生更大的影响,但上行容量受

限主要通过业务1用户的 QoS 需求来(通过 P_o 反应).即业务1用户的中断概率比业务2用户的中断概率大.从仿真中可以看出,业务1用户呼叫中断概率都在 10^{-2} 以下,远远满足系统的需求.由于业务2用户呼叫中断概率极低,都在 10^{-5} 以下.

图10说明了接入同一小区或相邻小区的新用户对正在服务中的用户 E_b/N_0 和 P_o 的影响.两种不同业务类型用户的接入中,业务2用户接入对同一小区中正在通信的用户产生影响更大,业务2用户接入将对同一小区中正在通信的服务 E_b/N_0 产生 0.14dB 的衰减,而业务1用户接入仅对同一小区中用户的服务平均 E_b/N_0 产生 0.05dB 的衰减,而且新接入的用户呼叫对相邻小区的平均 E_b/N_0 和中断概率 P_o 的影响很小.因此,从总体性能上考虑,采用了平台不稳定链路模型很好地规避平台不稳定对 HAPS 通信带来的影响.

图8 中断概率, E_b/N_0 与单小区业务1用户的关系图9 中断概率, E_b/N_0 与单小区业务2用户的关系图10 同一或相邻小区的新接入用户对服务中的用户 E_b/N_0 和 P_o 的影响

5 结论

由于高空平台的不稳定性导致平台接收信号的变化,严重影响 HAPS 通信性能,需要采取特定的措施来避免平台不稳定状态对 HAPS 通信性能的影响.本文重点对高空平台通信的不稳定状态链路特性进行分析,并在链路特性中反应平台不稳定状态带来的影响.通过建模把平台的不稳定特性通过上行链路的非理想功率控制来体现.解决平台不稳定等造成接收信号随机变化大导致 HAPS 通信困难的问题,消除平台不稳定对 HAPS 通信性能的影响.通过数据分析与仿真证明了本文模型的正确性.

参考文献:

[1] D Grace, M H Capstick, M Mohorcic, J Horwath. Integrating

users into the wider broadband network via high altitude platforms [J]. IEEE Wireless Communications, 2005, 12(5): 98 - 105.

[2] Yiming Liu, Grace D, Mitchell P D. Exploiting platform diversity for GoS improvement for users with different high altitude platform availability [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(1): 196 - 203.

[3] 牛志升,刘嵩,吴佑寿.基于多建筑阻挡概率的平流层多径信道模型[J].电子学报,2004,32(12A):132-135.
NIU Zhi-sheng, LIU Song, WU You-shou. A blockage based channel model for high altitude platform communications [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(12A): 132 - 135. (in Chinese)

[4] Anastopoulos M P, Cottis P G. High altitude platform networks: A feedback suppression algorithm for reliable multicast/broadcast services [J]. IEEE Transactions on Wireless Com-

- munications, 2009, 8(4): 1639 – 1643.
- [5] Holis J, Pechac P. Elevation dependent shadowing model for mobile communications via high altitude platforms in built-up areas [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008, 56(4): 1078 – 1084.
- [6] Guan Mingxiang, Yuan Fang, Guo Qing. Performance of coverage and wireless link for HAPS communication [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Wireless Communications and Signal Processing [C]. USA: IEEE Press, 2009. 681 – 684.
- [7] Horak P, Pechac P. A study on the possibilities of providing signal coverage for wireless systems from high altitude platforms [A]. Proceedings of the 3rd European Conference on Antennas and Propagation [C]. Berlin: IEEE Press, 2009. 1395 – 1398.
- [8] 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
- [9] Y Foo, W Lim, R Tafazolli. Centralized downlink call admission control for high altitudes platform station UMTS with on-board power resource sharing [A]. Proceedings of the IEEE 56th Vehicular Technology Conference [C]. Vancouver, Canada, 2002, 1. 549 – 553.
- [10] Song Liu, Zhisheng Niu, Youshou Wu. Impact of platform motion on soft handover in high altitude platform IMT-2000 system [A]. Proceedings of the 57th IEEE Vehicular Technology Conference [C]. USA: IEEE Press, 2003, 4. 1964 – 1968.
- [11] 陈勇, 胡爱群. 通信网中链路重要性的评价方法 [J]. 电子学报, 2003, 31(4): 573 – 575.
CHEN Yong, HU Ai-qun. Evaluation method for link importance in communication networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(4): 573 – 575. (in Chinese)
- [12] 夏巍, 林亚平, 何海珍. 一种支持 QoS 的 WCDMA 混合神经网络反向链路功率控制算法 [J]. 电子学报, 2005, 33(10): 1853 – 1856.
XIA Wei, LIN Ya-ping, HE Hai-zhen. QoS guarantees for the uplink power control of WCDMA systems using hybrid neural network techniques [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(10): 1853 – 1856. (in Chinese)
- [13] Karapantazis S, Pavlidou F N. Impact of imperfect power control multiuser detection on the uplink of a WCDMA high altitude platform system [J]. IEEE Communications Letters, 2005, 9(5): 414 – 416.
- [14] Mostafa Nofal, Mohiy Hadhood, Moawad Dessouky, Yasser Albagory. A novel cellular structure for stratospheric platform mobile communications [A]. Proceedings of the 19th National Radio Science Conference [C]. USA: IEEE Press, 2002. 21 – 29.
- [15] S Karapantazis, F N Pavlidou. The role of high altitude platforms in beyond 3G networks [J]. IEEE Personal Communications, 2005, 12(6): 33 – 41.

作者简介:



管明祥 男,汉族,1979年5月生于湖北公安县.深圳信息职业技术学院电子通信技术系通信技术专业教研室主任,讲师,博士.主要从事无线通信、HAPS通信、物联网理论及应用等研究.
E-mail: gmx2020@126.com



郭庆 男,汉族,1964年2月生于黑龙江哈尔滨市.哈尔滨工业大学电子与信息工程学院通信工程系副主任,教授,博导.主要从事卫星通信测控、数据通信和无线通信传输等研究.



顾学迈 男,汉族,1957年10月生于黑龙江哈尔滨市.哈尔滨工业大学电子与信息工程学院副院长,教授,博导.主要从事指挥控制系统信息传输、微小卫星测控和军事通信网络技术等研究.