

低轨卫星网络支持飞机用户的切换管理算法

陈炳才¹, 韩亚萍², 郭黎利¹, 聂伯勋³

(1. 哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 哈尔滨 150001; 2. 东北林业大学 理学院, 哈尔滨 150001;

3. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150001)

(pinch_chen@126.com)

摘 要:为解决低轨道卫星通信系统支持高速飞行的飞机用户无缝接入问题,基于动态多普勒频移技术,提出一种支持高速飞机用户的卫星网络切换管理算法。在分析低轨道卫星网络覆盖地面低速用户特性的基础上,针对飞机用户高速运动和卫星自身高速移动的特点,就处于低轨卫星覆盖下的飞机用户进行星间切换的管理算法深入分析,对算法原理及切换过程进行详细的阐述,并通过建立数学模型推导出飞机用户发生卫星切换的时刻和位置的数学表达式。最后,以类 Teledesic 系统为例,就该算法中切换门限值的选取对卫星系统性能及服务质量的影响进行仿真分析,证明了该算法的有效性。

关键词:低轨道卫星网络;卫星切换;切换管理;多普勒频移;资源预留

中图分类号: TN927; TP311 **文献标志码:** A

Handover management algorithm for satellite supporting aeronautical users

CHEN Bing-cai¹, HAN Ya-ping², GUO Li-li¹, NIE Bo-xun³

(1. College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang 150001, China;

2. College of Science, Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang 150001, China;

3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150001, China)

Abstract: To solve the problem of supporting aeronautical users to access satellite network of Low Earth Orbit (LEO) seamlessly, a novel handover algorithm based on dynamic Doppler shift was proposed. After analyzing the characteristic of satellite coverage for the grounded users with low velocity, the inter-satellite handover algorithm for aeronautical users covered by LEO satellites was researched in-depth, concerning the high velocity movement of users and the satellite. After detailed demonstration of the principal and process of the handover, the mathematical expressions of the time and position of aeronautic users when handover happens were derived out by establishing the mathematical model. Finally, with the Teledesic-like satellite system as an example, the authors analyzed the effect of the selection of time-to-handover on the performance of the system and its quality of service through the simulation, so that the validity of this algorithm was proved.

Key words: satellite network of Low Earth Orbit (LEO); satellite handover; handover management; Doppler shift; resource reservation

0 引言

随着不断增长的交互式实时多媒体业务和移动性的需求,卫星通信网必将成为全球移动通信系统(Universal Mobile Telecommunications System, UMTS)的重要组成部分,全球无缝覆盖、移动性和服务质量(Quality of Service, QoS)已经成为 UMTS 最重要的特征。低轨(Low Earth Orbit, LEO)卫星移动通信系统具有延时小和全球无缝覆盖等优点,逐渐成为支持全球个人通信的有力保障^[1-4]。在 LEO 卫星网络支持的用户中,飞机用户尤其是民航飞机用户可看作是一个集群用户,它借助内部网络将机上各种单个用户终端的业务,以多种接入方式,接入到机上的移动路由器上,并通过卫星网络接入 UMTS^[5]。但是在通信过程中,由于低轨卫星相对于地面的高

速移动和用户终端自身的移动性,飞机用户需要频繁地进行卫星切换。从飞机角度分析,虽然飞机用户可以通过机上携带的全球定位系统(Global Positioning System, GPS)进行自定位,但是在当前空中管理以地面信号为主、尚未利用卫星网络服务的民航系统中,这些自定位信息只是用于飞机飞行导航或供驾驶员作参考;而且目前的 GPS 卫星系统不具备通信功能,若要想让飞机上 GPS 设备接收到的自定位信息传给卫星通信网络还得经过卫星通信链路,需要损耗一定的传输时延、占用一定的带宽,更重要的是需要跨越两种卫星系统。

尽管民航飞机的航线在一定时间内是可预知的,但是由于天气原因以及其他各种可能出现的突发性因素,飞机可能并不完全按照预定航线飞行。更主要地,为了能满足机上各类单个用户的各种业务 QoS 要求,作为服务系统的卫星网络

收稿日期:2009-03-23;修回日期:2009-05-08。

基金项目:黑龙江省博士后基金资助项目(LBH-Z07218);哈尔滨工程大学基础研究基金资助项目(HEUFT07025)。

作者简介:陈炳才(1976-),男,福建漳平人,讲师,博士,主要研究方向:卫星通信、无线网络;韩亚萍(1963-),女,黑龙江哈尔滨人,教授,博士,主要研究方向:光电子;郭黎利(1955-),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士,主要研究方向:数字通信、扩频通信;聂伯勋(1956-),男,黑龙江哈尔滨人,副教授,主要研究方向:电液控制系统。

应该具备动态预测飞机当前飞行位置及何时将从一颗卫星的覆盖区进入另一颗卫星的覆盖区的能力,从而能够在系统级别上动态地进行资源上的预留,以保证这些业务的服务质量,同时又能提高资源的利用效率。因此,切换策略成为影响卫星支持飞机业务性能的重要因素^[6-7]。

1 LEO 卫星网络对地面用户切换原理

由于卫星相对地球表面的运动,在给定的呼叫期间,存在一条由所有加入连续切换序列的卫星形成的覆盖带。应用到卫星覆盖的“覆盖带”概念指的是地球上的一条带状区域。图1显示的是极轨道星座覆盖带的一个简单例子,图中描绘的卫星都处于同一轨道平面内。一个在线的用户终端在呼叫进行过程中可能更换波束,并最终更换卫星。进行中的呼叫从一个波束小区到下一个波束小区的转换被称为波束切换,而从一颗卫星到下一颗卫星的转换被称为卫星切换。在非同步轨道卫星(non-Geostationary Orbit, non-GEO)系统中,切换频率与地面上用户(低速用户)的速度无关,而受卫星速度(相应地受卫星星座的高度)的约束。因此,不管地面用户是固定的还是移动的,呼叫都将经历波束切换和卫星切换。若呼叫即将到达的波束小区没有空闲信道,则可能导致切换失败,从而导致该呼叫中断。此外,传播损耗也能引起呼叫中断。陆地蜂窝网络中,固定用户不存在切换失败,然而在 non-GEO 系统中,由于卫星的运动,固定用户也可能会出现切换失败。

每颗卫星的覆盖区含有重叠的相邻小区,覆盖小区形成层级组织,一层环绕一层,如图2所示。图中描述了两切换过程:波束小区切换和卫星切换。

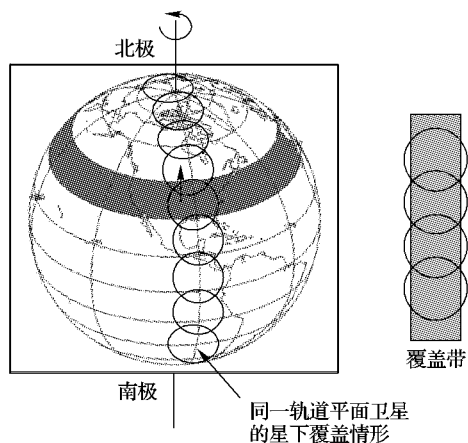


图1 覆盖带实例(极轨道星座)

2 切换管理概念及其评价指标

由于低轨卫星相对于地面的高速移动和用户终端自身的移动性,飞机用户需要频繁地进行卫星切换。切换技术与策略成为影响卫星多媒体系统性能的重要因素,也是当前的研究热点。切换管理是在阻塞概率 P_b 和强制中断概率 P_f 间寻求平衡的一项技术。其中,阻塞概率 P_b 为某个波束小区内被阻塞的呼叫请求数与总的呼叫请求数之间的比值;强制中断概率 P_f 为某个波束小区内因切换失败导致中断的呼叫数与总的切换呼叫数之间的比值。

为减小强制中断概率,经常采用切换前的资源预留方案,这种资源的预留可建立在对切换请求预测的基础上。这种方法虽然没有强制的延时出现,但预测的准确性和切换前预留时间的控制等都会直接影响到阻塞概率的大小。为了较好地解决早期资源预留导致系统阻塞概率大的问题,本文引入了“动态”的概念。“动态”一方面是指资源预留的短期性,另一方面也依赖于对实际切换请求的预测。通过多普勒技术去预测切换请求,然后在适当的时间内、在恰当的卫星上预留信道资源,以达到降低阻塞概率和强制中断概率的目的。我们将整个切换管理过程分为三大块:位置检测、信道预留和预留取消^{[3]34-36}。

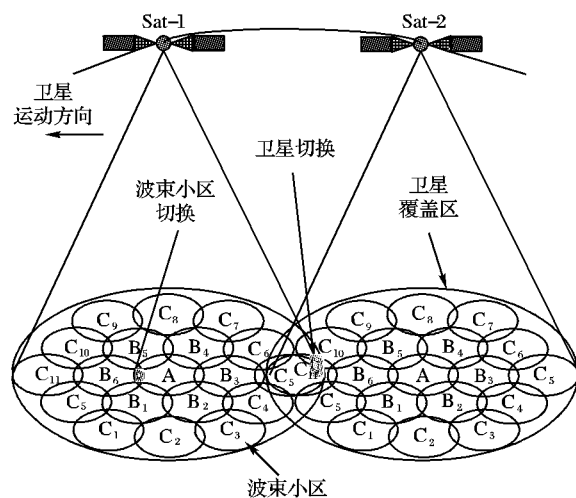


图2 卫星覆盖几何关系

表1 符号定义

符号	定义
P_b	阻塞概率
P_f	中断概率
R_E	地球半径
h	卫星高度
$\angle E_1$	t_1 时刻通过多普勒测出的仰角
$\angle E_2$	t_2 时刻通过多普勒测出的仰角
α	方位角
t_H	切换发生的时刻
t_{TH}	切换门限

通过计算终端位置,服务卫星就可以得到目的小区并进行信道资源的预留,这在考虑到实际中的蜂窝小区交叠和卫星运动时显得尤为重要。当目的小区属于不同的卫星时,服务卫星通过星际链路(Inter-Satellite Links, ISL)向目的卫星发送预留数据包,数据包的发送可基于合适的路由协议实现。目的卫星收到预留数据包后将会在相应的小区内预留信道,从而实现了卫星切换。在收到切换请求后,若目的小区存在空闲信道,则系统马上进行预留,否则请求将被排队直到目的小区中释放出空闲信道后再进行预留。

虽然切换过程发生在 t_H 时刻,但信道资源的预留却在 $t_4 = t_H - t_{TH}$ 时刻就发生了。其间,地球站可能会中止即将进行切换的呼叫,相应的切换请求将被取消。若在切换请求队列里没有了切换请求,即使信道已经被预留,波束小区也会立刻释放预留信道,让出宝贵的信道资源。

3 卫星对飞机的动态切换管理算法

3.1 飞机发生切换时间的确定

飞机用户的速度比起地面用户的速度要快得多,因此在利用卫星网络支持飞机用户业务时,就不能像对待地面用户那样将用户终端的运动速度忽略不计,而只考虑卫星的运动速度。图 3(a) 中卫星星下点在 t_1 、 t_2 和 t_3 时刻的位置分别为 A、D 和 C,点 B 为地面用户终端在三个时刻的位置,假定该位置不变。图 3(b) 示意卫星星下点(此时,星下点定义为卫星在飞机飞行高度上球面的星下点)在 t_1 、 t_2 和 t_3 时刻的位置变化。由于飞机的高速运动不能忽略,其在不同时刻的位置也不是固定不动的。

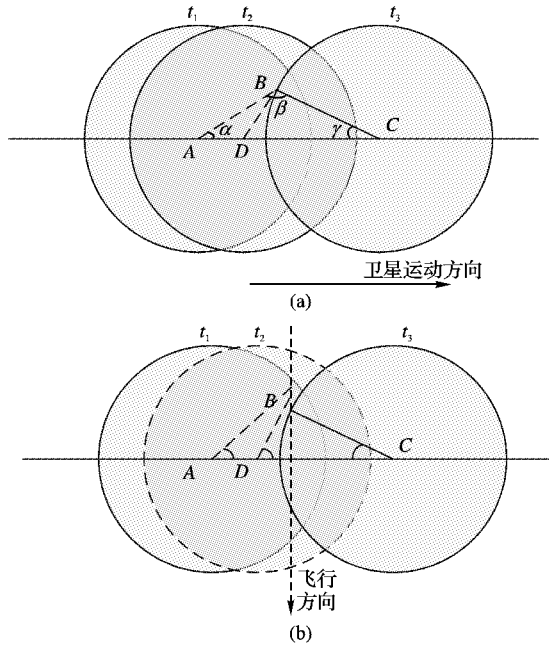


图 3 卫星星下点与飞机终端的相对位置变化过程

在充分考虑卫星运动速度和飞机飞行速度这两个因素的情况下,我们可以建立支持飞机业务的卫星切换系统的模型,如图 4 所示。

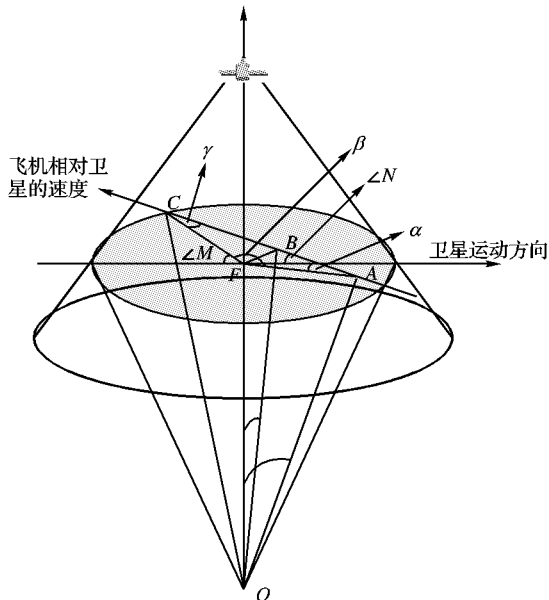


图 4 卫星与飞机相对运动的三维模型

为了便于分析,我们利用相对运动的原理,假定卫星星下点(以后星下点都指的是卫星在飞机高度球面上的映射点)为静止点,那么飞机就应该以卫星速度和自身飞行速度的合成速度相对卫星星下点作运动。具体地,我们对卫星服务飞机的情形作如下假设和定义:

- 1) 只考虑飞机巡航阶段的情况,并假定飞机在该卫星覆盖区内飞行方向和速度 v_p 保持不变;
- 2) 飞机在巡航阶段飞行高度 h 不变;
- 3) 卫星的轨道高度为 H ,运动速度为 v_s ;
- 4) 以 $h + R_E$ 为半径,地心为球心,做一个球面,将卫星的覆盖区域投影到此球面上。

那么,卫星的角速度为 $v_s / (H + R_E)$ 。于是,可以求得卫星在假设 d 中的球面上的线速度为 $(h + R_E) [v_s / (H + R_E)]$ 。此时,若知道飞机的飞行方向和速度值,就可以根据速度合成方法求出飞机相对卫星(假定卫星不动)的运动方向和速度 v_i ,合成后的角速度为 $v_i / (h + R_E)$ 。

通过检测多普勒频移,可以得到服务卫星的仰角。在不同时刻测量多普勒频移即可算出卫星运动方向和飞机之间的方位角。结合以上计算,可以推导出飞机飞离卫星覆盖区的时刻。图 4 中 A、B、C 分别为 t_1 、 t_2 、 t_3 时刻飞机相对卫星的位置, F 为卫星在假设的球面上覆盖区的圆心。则球面弧 FA、FB、AB 和 AC 对应的球心角 $\angle FA$ 、 $\angle FB$ 、 $\angle AB$ 和 $\angle AC$ 分别为:

$$\angle FA = \arccos \left[\frac{h + R_E}{R_E + H} \cos(\angle E_1) \right] - \angle E_1 \quad (1)$$

$$\angle FB = \arccos \left[\frac{h + R_E}{R_E + H} \cos(\angle E_2) \right] - \angle E_2 \quad (2)$$

其中, $\angle E_1$ 、 $\angle E_2$ 分别是 t_1 和 t_2 时刻通过多普勒频移测出的仰角,角距离如下:

$$\angle AB = \frac{v_i(t_2 - t_1)}{h + R_E} \quad (3)$$

在球面三角形 FAB 中运用余弦定理可得:

$$\alpha = \arccos \left[\frac{\cos(\angle FB) - \cos(\angle AB) \cos(\angle FA)}{\sin(\angle AB) \sin(\angle FA)} \right] \quad (4)$$

求出方位角 α ,即可算出切换的时刻。在球面三角形 ABC 中,角距离 $\angle FA$ 与 $\angle E_1$ 有关,而角距离 $\angle FC$ 与最小仰角 $\angle E$ 有关,根据正弦定理有:

$$\gamma = \arcsin \left(\frac{\sin(\angle FA) \sin(\alpha)}{\sin(\angle FC)} \right) \quad (5)$$

由 $\beta = 180 - \alpha - \gamma$ 算得 β 值,再根据正弦定理算出:

$$\angle AC = \frac{v_i t_H}{h + R_E} = \arcsin \left(\frac{\sin(\angle FC) \sin(\beta)}{\sin(\alpha)} \right) \quad (6)$$

$$t_H = \frac{h + R_E}{v_i} \arcsin \left(\frac{\sin(\angle FC) \sin(\beta)}{\sin(\alpha)} \right) \quad (7)$$

t_H 即是切换发生的时刻,而系统开始进行信道预留时刻为 t_4 ($t_4 = t_H - t_{TH}$)。其中, t_{TH} 就是要确定的时间间隔,称之为切换门限。在门限时间内系统必须完成信道的预留,为即将进行切换的用户终端准备好空闲的信道。

3.2 飞机发生切换时其地理位置的确定

定义 方位角 $\angle M = \gamma + \angle N$ 。其中, $\angle N$ 为飞机相对卫星运动的速度方向与卫星运动方向的反方向之间的夹角,有

序从而得到图像的特征序列。实验结果表明本方法对不同的几何攻击和常规图像处理操作效果较好,包括 JPEG 压缩、滤波、裁剪和随机扭曲等等。

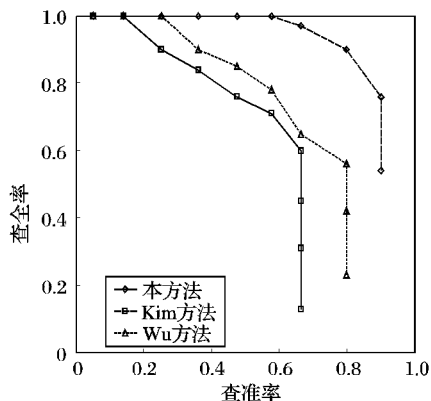


图 4 对比已有方法查全率和查准率曲线

然而,当图像经过直方图量化后,直方图的形状改变较大,本文的拷贝检测方法不甚理想。在未来的工作中,寻找更为鲁棒并且能精确表示图像内容的图像特征将是图像拷贝检测研究的首要问题。

参考文献:

- [1] HSIAO J-H, LI C-H, CHIU C-Y, *et al.* Effective content tracking for digital rights management in digital libraries[C]// Research and Advanced Technology for Digital Libraries, LNCS 4172. Berlin: Springer-Verlag, 2006: 415 - 425.
- [2] 王树梅, 赵卫东, 王志成. 一种鲁棒的自适应 DCT 域数字水印算法[J]. 微计算机信息, 2008, 6(3): 177 - 179.
- [3] 温秀梅, 宋淑彩, 庞慧. 一种抗几何攻击的鲁棒性图像水印嵌入算法[J]. 微计算机信息, 2006, 6(2): 149 - 150, 226.
- [4] SWAIN M J, BALLARD D H. Color indexing[J]. International Journal of Computer Vision, 1991, 7(1): 11 - 32.
- [5] HAMPAPUR A, HYUN K-H, BOLLE R. Comparison of sequence matching techniques for video copy detection[C]// Proceedings of the International Society for Optical Engineering. [S. l.]: SPIE, 2002, 4676: 194 - 201.
- [6] HSU W, CHUA T S, PUNG H K. Integrated color-spatial approach to content-based image retrieval[C]// Proceedings of the ACM International Multimedia Conference & Exhibition. New York: ACM, 1995: 305 - 313.
- [7] BHAT D N, NAYAR S K. Ordinal Measures for Image Correspondence[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(4): 415 - 423.
- [8] KIM C. Content-based image copy detection[J]. Signal Processing Image Communication, 2003, 18(3): 169 - 184.
- [9] WU M-N, LIN C-C, CHANG C-C. Image copy detection with rotating tolerance[C]// Proceedings of the International Conference Computational Intelligence and Security, LNAI 3801. Berlin: Springer-Verlag, 2005: 464 - 469.
- [10] PEREIRA S, PUN T. Robust template matching for affine resistant image watermarks[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(6): 1123 - 1129.
- [11] DUDA P, HART, D. STORK. Pattern Classification[M]. New York: Wiley-Interscience, 2001.

(上接第 2197 页)

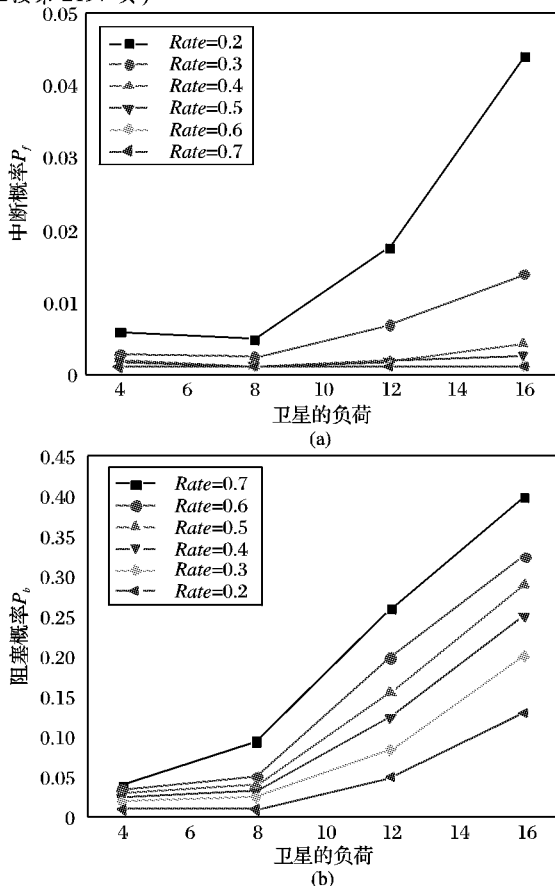


图 6 $Rate = t_{TH}/t_F$ 的改变对中断概率和阻塞概率的影响

参考文献:

- [1] REA D, PIERUCCI L. Next - generation mobile satellite networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(9): 150 - 159.
- [2] JAMALIPOUR A, TUNG T. The role of satellites in global IT: Trends and implications [J]. IEEE Personal Communications, 2001, 8(3): 5 - 11.
- [3] PAPAPETROU E, PAVLIDOU R N. QoS handover management in LEO/MEO satellite systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 46(3): 309 - 313.
- [4] CHEN B C, ZHANG N T, ZHOU T X. Research on handover algorithm to reduce the blocking probability in LEO satellite network [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2006, 17(1): 30 - 36.
- [5] CHE H, CHAN P M L, HU Y F. Design and analysis of QoS-enabled handover algorithm for aeronautical communication systems [C]// Proceedings of the 2nd International Symposium on Wireless Communication Systems. Siena: IEEE, 2005: 724 - 728.
- [6] 陈炳才, 张乃通, 周廷显. LEO 卫星网络中多媒体业务的切换策略[J]. 南京理工大学学报: 自然科学版, 2006, 30(6): 32 - 36.
- [7] KARAPANTAZIS S, PAVLIDOU F N. Design issues and QoS handover management for broadband LEO satellite systems [J]. IEEE Communications Proceedings, 2005, 152(6): 1006 - 1014.
- [8] ERCETIN O, BALL M O. Modeling study for evaluation of aeronautical broadband data requirements over satellite networks [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2005, 41(1): 361 - 370.