

## 基于不规则蜂窝网络拓扑模型的位置管理研究<sup>\*</sup>

赵小敏, 郎美亚, 陈庆章<sup>+</sup>

(浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310014)

### Research on Location Management Based on Irregular Cellular Network Topology Model

ZHAO Xiao-Min, LANG Mei-Ya, CHEN Qing-Zhang<sup>+</sup>

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

+ Corresponding author: E-mail: qzchen@zjut.edu.cn

Zhao XM, Lang MY, Chen QZ. Research on location management based on irregular cellular network topology model. *Journal of Software*, 2010,21(6):1353–1363. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3480.htm>

**Abstract:** Most strategies of location management are based on the hypothesis that the cellular network is regular in size, shape and distribution. This paper proposes a location management strategy based on irregular cellular network topology, including macro-cell, micro-cell and pico-cell. The terminal will compute the physical distance between the current cell and the last reported cell by regrouping neighbor cells and comparing the CCs (cell coordinates) which are broadcasted by each base station. In the paper a dynamic location update algorithm based on distance and direction angle is presented. Finally, the formula for the total cost of location management between two paging arrivals is deduced by a semi-Markov decision process. The numerical analysis shows that the total costs of location updating and paging of individuation sector location management scheme is superior to that of circle location cell when the mobile user moves frequently.

**Key words:** location management; cell regrouping; cell coordinate; physical distance

**摘要:** 针对当前大多数位置管理策略的研究都是假设在同大小、同形状、同分布的蜂窝网络下实现的,提出了基于不规则分布的蜂窝网络结构(包括宏蜂窝、微蜂窝、微微蜂窝)的位置管理策略,通过将邻近的蜂窝重组并根据基站广播的蜂窝坐标 CC(cell coordinates)计算当前所在蜂窝到当前位置区最后报告所在蜂窝的实际距离,并提出了基于实际距离和方向角的动态位置更新算法.最后,通过半马尔可夫决策过程推导两次寻呼到达间的位置管理总代价计算公式.数值分析结果表明,当移动用户运动特性很强时,选择个性化的扇形位置管理策略在位置更新与寻呼总代价上优于无个性的圆形位置区.

**关键词:** 位置管理;蜂窝重组;蜂窝坐标;实际距离

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

近年来,随着信息技术的迅速发展和信息服务的日趋完善,个人通信服务(personal communication services,

<sup>\*</sup> Supported by the Special Program for the Science and Technology Plan of Zhejiang Province of China under Grant No.2007C13064 (浙江省重大科技专项和优先主题计划项目); the Natural Science Foundation of Zhejiang Province of China under Grant No.Y106113 (浙江省自然科学基金)

Received 2008-05-02; Revised 2008-07-08; Accepted 2008-10-08; Published online 2009-06-26

简称 PCS)网络的用户数猛增,而 PCS 网络的带宽有限,为了支持越来越多的用户,不得不缩小蜂窝(cell).缩小蜂窝虽然能够提高频率带宽的重复利用率,但却会导致位置管理开销的增加.位置管理的主要目的是跟踪及定位移动终端(mobile terminal,简称 MT),它是 PCS 网络中的一个挑战性问题<sup>[1]</sup>.为了跟踪及定位移动终端,通信网络覆盖区域被分成许多位置区(location area,简称 LA),每个位置区由一组蜂窝组成,每个蜂窝配置了一个基站对这个蜂窝内的所有移动终端进行服务.位置管理主要涉及到两个基本操作:位置更新和寻呼.位置更新使网络知道用户的大概位置,以便为到达的呼叫确定路由;位置寻呼是根据网络中的位置信息向移动终端所在的区域发寻呼消息.显然,位置更新和寻呼二者在占用资源方面是对立的,各种位置管理策略也都是在位置更新和寻呼代价间寻找一个平衡点.

现有的位置管理主要有静态和动态两种方案.静态方案中,有明确的 LA 划分和边界,每个 LA 包含若干个蜂窝,LA 的划分是固定不变的,典型的有 GSM 和 IS-41 系统.但是在静态方案中,LA 的划分有不可克服的硬边界,导致移动终端可能在平稳低速运动时却发生频繁剧烈的位置更新问题,即乒乓效应.动态方案中,位置更新过程依赖于移动用户的呼叫和移动特性,不存在明确 LA 划分和边界.当前主要有基于时间、基于运动、基于距离这 3 种动态位置更新方案.文献[2]提出了自适应门限方案,移动终端每个单位时间  $T$  发射一次更新消息,这里,参数  $T$  不是一个常量,而是随着蜂窝上行控制信道的信令负载发生变化.文献[3]首次提出基于距离的位置更新方案,被认为是 3 种动态位置更新最有效的方案.但是,该策略的实现非常困难,移动终端必须知道蜂窝网络的拓扑结构.文献[4,5]提出了一种基于蜂窝识别码(cell identification code,简称 CIC)的简单实现策略.文献[6,7]提出了一种可预测的基于距离的更新方案,每次更新过程中,移动终端报告它的位置和速度,由系统预测终端的未来位置.文献[8]提出了一种基于路径的更新方案,指出更新消息发送运动历史数据而不是当前位置.运动历史数据是移动终端上次更新后所经过区域的标识的列表.文献[9-11]提出了基于方向的自适应位置更新方案,移动终端的方向可以通过简单的计算得出,当移动终端的方向改变或者超过预设的门限值时执行位置更新.文献[12]提出了基于蜂窝网拓扑结构的追踪用户的新机制,移动终端只有进入特定的小区(reporting cells)中时才执行位置更新.

虽然各种位置管理策略都有一定的优点,但是当前大多数位置管理策略都是基于一种蜂窝同大小、同形状、同分布的规则模式的假设,例如,二维的蜂窝网络结构一般使用网状或者六边形的蜂窝结构.尽管结构化的蜂窝拓扑图简化了分析计算,但它们严重脱离日益复杂的 PCS 网络的实际特征,不能准确描述蜂窝网络实际拓扑模型,而且也不具有普遍性.实际上,蜂窝的大小依赖于基站传输功率、天线传输模式、终端接收灵敏度、无线传播环境及邻近蜂窝数等.针对以上问题,本文设计了包括宏蜂窝、微蜂窝、微微蜂窝的不规则分布的网络拓扑模型.通过将邻近的蜂窝重组并根据基站广播的蜂窝坐标(cell coordinates,简称 CC)<sup>[13]</sup>计算当前所在蜂窝到当前位置区最后报告所在蜂窝的实际距离(physical distance)(m 或 km),并提出了改进的基于实际距离和方向角的动态位置更新算法,根据移动用户的历史移动规律、网络呼叫率、移动终端平均速度、蜂窝大小等因素自适应调整扇形覆盖的个性化位置区大小.最后,本文通过半马尔可夫决策过程推导两次寻呼到达间的位置管理总代价计算公式并给出数值分析结果.

## 1 拓扑模型设计

蜂窝拓扑通常被用来表示蜂窝网络的覆盖范围.二维的蜂窝网络结构一般使用网状或者六边形的蜂窝结构,本文只针对六边形的蜂窝结构进行研究,并且为了说明清晰,假定每一个基站控制一个而且仅仅一个蜂窝.

### 1.1 不规则蜂窝网络拓扑模型

在下一代移动通信系统中,为了支持更多的用户或更高的带宽,增加频率复用,增加了微蜂窝和微微蜂窝甚至超微蜂窝等不同大小的蜂窝,从而导致蜂窝的分布将是不规则的.为了更贴近现实,本文设计了宏蜂窝、微蜂窝、微微蜂窝同时存在的不规则分布的网络拓扑结构,如图 1 所示.

从图 1 我们可以看出,不规则分布的蜂窝网络拓扑结构中包含了宏蜂窝、微蜂窝、微微蜂窝 3 种模型:宏蜂窝用于满足室外环境下低呼叫流量、高移动性业务的需求;微微蜂窝则用于满足市区高呼叫流量、低移动性

业务的需求;而微蜂窝能够满足中级程度业务密度用户的需求.因此,该网络能够通过多种蜂窝模型来提供多样化的服务满足各种不同业务的需求,这在日趋复杂的移动网络环境中(特别是在市区)显得尤为重要.

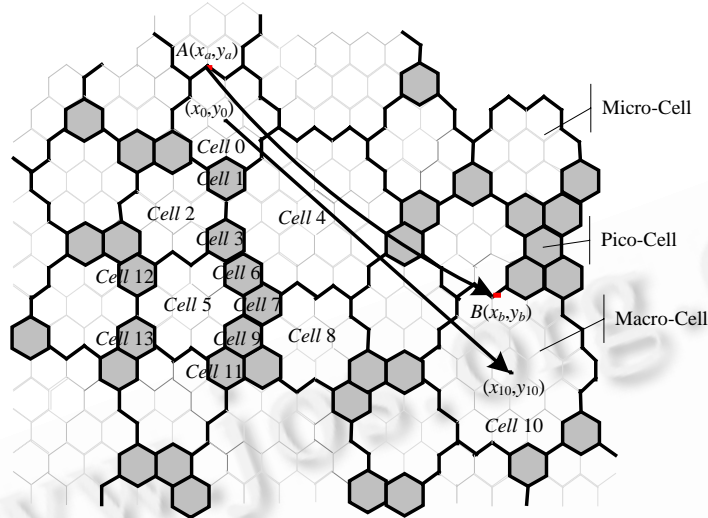


Fig.1 Irregular cellular network topology model

图 1 不规则分布的蜂窝网络拓扑模型

## 1.2 蜂窝坐标(cell coordinates,简称CC)

大多数基于距离的位置更新算法都是通过用以标识蜂窝地理位置反映邻近关系的 CIC 来判断移动终端的运动距离(蜂窝个数)是否已超过距离门限值<sup>[4,5]</sup>.这种算法比较简单,但是其实现比较困难,移动终端必须要知道整个蜂窝网络拓扑结构才能根据蜂窝个数计算当前所在蜂窝与当前 LA 最后报告的蜂窝间的距离.而且在蜂窝大小不一的网络中,用蜂窝个数计算距离不准确.为了解决该问题,本文采取计算当前所在蜂窝与当前 LA 最后报告的蜂窝间的实际距离,将该距离与距离门限值的比较作为是否进行位置更新的决策因素之一.

CIC 用于识别 LA 内的蜂窝,也反映了与邻近蜂窝间的关系,但是,CIC 仅仅是一个由 MSC 决定的 2 字节的 BCD 编码,它并不包含蜂窝的实际信息(如形状、大小、地理位置等),这无疑会给计算当前所在蜂窝与当前 LA 最后报告的蜂窝间距离带来困难.为此,本文引入了蜂窝坐标 CC 的概念<sup>[13]</sup>.

首先选定一个参考位置,例如市中心点,蜂窝  $i$  实际中心位置为参考位置以东  $x_m$ (或 km)偏北  $y_m$ (或 km),我们将该蜂窝  $i$  的位置坐标记为  $CC(x_i, y_i)$ .特别地,我们将当前 LA 最后报告的蜂窝标记为蜂窝 0,位置坐标记作  $CC(x_0, y_0)$ ,并将其与距离门限值  $D$  一起存储在终端设备上.每个蜂窝的 BTS 定时地广播该蜂窝的位置坐标 CC 而不再是 CIC.当移动终端进入一个蜂窝时,根据监听到的广播消息 CC 判断是否要进行距离计算操作.

当监听到的蜂窝 CC 与终端缓存中的  $CC(x_i, y_i)$ 不同时,表明移动终端已进入一个新的蜂窝  $j$ ,此时就要判断当前所在蜂窝是否位于 LA 内.首先要进行的就是距离计算操作,计算当前所在蜂窝  $j$  与 LA 最后报告的蜂窝 0 之间的实际距离  $d_{0,j} = \sqrt{(x_j - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2}$ .

需要特别说明的是,蜂窝的实际中心位置不必是六边形的几何中心位置.事实上,移动终端也并不是到了六边形蜂窝的几何中心位置点才监听到该蜂窝 CC 消息的,如果该蜂窝 BTS 发射的信号很强,在移动终端蜂窝重选后,移动终端在邻蜂窝时就选择监听该蜂窝公共控制信道 BCCH 上的消息了.由此可见,蜂窝的中心位置应该可以看作是蜂窝上甚至是蜂窝外的任何一点.如图 1 所示,蜂窝 0 与蜂窝 10 之间的精确距离为  $d_{0,10} = \sqrt{(x_{10} - x_0)^2 + (y_{10} - y_0)^2}$ .但实际上,移动终端最后报告的位置是在蜂窝 0 的边上 A 点位置,而且移动终端还未到蜂窝的几何中心位置,即在 B 点时就已经监测到蜂窝 CC 的变化,所以实际的距离应该为

$$d_{A,B} = \sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2}.$$

这里,我们把实际距离  $d_{A,B}$  与精确距离  $d_{0,i}$  的差记为  $\Delta d$ ,即  $\Delta d = |d_{A,B} - d_{0,i}|$ ,在蜂窝同大小、同形状、同分布的规则模式的结构化拓扑网络模型中, $\Delta d$  最大值为六边形蜂窝两对角间的距离.通过在六边形结构化拓扑网络中分析,当  $d_{0,i}$  从  $\Delta d$  增加到  $5\Delta d$  时, $\Delta d$  平均值从  $0.11\Delta d$  迅速下降到  $0.02\Delta d$ .随着  $d_{0,i}$  的不断增大, $\Delta d$  趋于 0,此时,精确距离与实际距离几乎可以等同<sup>[13]</sup>.文献[14]用统计图分析出随机图拓扑网络中,近似 90% 的最优距离门限为 5 个左右的蜂窝.

因此我们可以得出:这里精确距离与实际距离之间的平均误差可以接受,精确距离的计算值可以代替实际距离与距离门限值比较.

### 1.3 蜂窝重组

随着大量微蜂窝、微微蜂窝的引入,频率复用容量大为增加,但同时也使得移动终端边界穿越次数有所增加,从而导致大量的距离比较计算,进而对移动终端的电量、计算能力以及存储容量等要求也相应提高.

我们在计算终端当前所在蜂窝与当前 LA 最后报告的蜂窝间的实际距离时已经分析过,蜂窝的实际中心位置不必是六边形的几何中心位置,可以是蜂窝边上或蜂窝外的任何一点.也就是说,终端在蜂窝边上或蜂窝外的一点上监听到的蜂窝 CC 与在该蜂窝几何中心位置监听到的 CC 可以是一样的,精确距离与实际距离之间的平均误差可以接受.

基于此,我们提出了将微微蜂窝与邻近的微蜂窝或宏蜂窝重组的方法.微微蜂窝半径一般为 10m~100m 之间,相对于宏蜂窝(半径一般为几千米)或微蜂窝(半径一般为几百米)来说,它可以看作是宏蜂窝或微蜂窝外的一点,将该微微蜂窝基站广播的蜂窝 CC 设为与之重组的微蜂窝或宏蜂窝的 CC.例如图 1 中,蜂窝 0 基站广播的蜂窝坐标为  $CC(x_0, y_0)$ ,蜂窝 1 基站广播的蜂窝坐标为  $CC(x_1, y_1)$ .如果将蜂窝 1 与蜂窝 0 重组后,蜂窝 1 基站广播的蜂窝坐标也为  $CC(x_0, y_0)$ ,蜂窝 1 就相当于是在蜂窝 0 外的一点,差别仅仅在于蜂窝 1 本身也设立了基站广播该蜂窝坐标,移动终端在蜂窝 1 时连接到蜂窝 1 的 BCCH 上,而不是从蜂窝 0 监听 CC.

微微蜂窝可以与微蜂窝或宏蜂窝重组,但问题是,当微微蜂窝处于多个微蜂窝和宏蜂窝之间时,它应该与哪个蜂窝重组呢?图 1 中,微微蜂窝 1、微微蜂窝 3、微微蜂窝 6、微微蜂窝 7 介于微蜂窝 0、微蜂窝 2、微蜂窝 5、微蜂窝 8 和宏蜂窝 4 之间,不同的重组可能会导致不同的结果.因此,我们对蜂窝重组制订了一些参考规则:

(1) 当微微蜂窝与微蜂窝和宏蜂窝同时相邻时,微微蜂窝一般与微蜂窝重组.图 1 中,微微蜂窝 1、微微蜂窝 3、微微蜂窝 6、微微蜂窝 7 虽然都与宏蜂窝 4 相邻,但它们都不应与宏蜂窝 4 重组.因为比起半径为几千米的宏蜂窝来,微微蜂窝几百米的半径相对来说就要小得多,微微蜂窝中心坐标与微蜂窝中心坐标更接近一些,将微微蜂窝坐标 CC 设为与其邻近的微蜂窝的蜂窝坐标误差更小.

(2) 微蜂窝水平或垂直划分时重组的微微蜂窝一般都在同侧,而且其数目一般不应超过 3 个.如图 1 所示,微微蜂窝 3、微微蜂窝 6、微微蜂窝 7、微微蜂窝 9、微微蜂窝 11~微微蜂窝 13 都与微蜂窝 5 相邻.但事实上,微微蜂窝 3 与微微蜂窝 11 在纵坐标上,微微蜂窝 7 与微微蜂窝 12、微微蜂窝 13 在横坐标上都至少相差 1 个微蜂窝的跨度,如果都一起与微蜂窝 5 重组,就是给它们设一样的蜂窝坐标 CC,这样终端纵然会大大减少距离计算比较操作,但实际上,终端可能已经移动了很远的距离,却因没有进行距离比较而导致 LA 划分不均衡.

(3) 设定一个基本方向,例如微微蜂窝总是尽量与负纵轴方向上相邻的微蜂窝重组,使得整个网络总体的重组方向一致以减小坐标误差.

由于我们研究的是不规则的蜂窝网络拓扑结构,仅仅靠上面几条参考规则有时并不能完全适用到所有的微微蜂窝重组.所以,其他具体情况我们就以接近实际坐标为原则.总之,蜂窝的重组总是以减小与实际坐标的误差为目标.

## 2 位置管理方案设计

现有的动态位置管理方案中,一般采用圆形 LA 模型,即以最后报告所在蜂窝为中心、以某一数值  $R$ (实为

蜂窝个数)为半径的圆形区域,并根据移动用户的运动特性将圆形 LA 内的蜂窝划分为多个寻呼区(paging area,简称 PA)按顺序寻呼.在以圆形 LA 为模型的动态位置更新策略中,LA 随移动用户运动特性的不同而更新其半径,不同半径的圆形 LA 也确实一定程度上适应了移动用户不同的运动特性,如速度和移动距离等.但是,在寻呼延迟很小时,划分多个 PA 按顺序寻呼策略就不可采取,而如果在整个圆形 LA 内寻呼又会造成极大的浪费.因此,我们考虑直接采取反映移动用户运动特性的个性化 LA 来进行位置更新,然后在寻呼时采用寻呼延迟最小的一步寻呼策略对个性化 LA 内的所有蜂窝同时寻呼来优化位置管理策略.

现实生活中,大多数移动用户有着自己比较稳定的生活方式,其运动也通常是有目的地朝某个目标前进,相对于向各方向等概率运动的随机游走模型来说,采用运动方向性较强的移动模型将更突出个体特性,也更切合实际.由于移动用户的运动具有较强目的性,因此我们认为,用户在移动过程中总是向前运动的可能性最大,反向折回的可能性最小,其他方向按一定比例分布.前向移动模型的基本思想是考察移动终端的运动轨迹,终端向持续一个方向运动得越多,也就表示向该方向运动的趋势越大,沿原方向继续向前的概率也越大.所以本文认为,前向移动模型相对随机游走模型更能客观地描述实际环境中移动终端的微观运动.

综合上述各种分析,本文提出基于实际距离和方向角的动态位置更新策略.该策略的核心思想是根据移动用户的历史移动规律、网络呼叫率、移动终端平均速度、蜂窝大小等因素自适应调整个性化位置区大小,形成一组以扇形张角为 $\alpha$ 、半径为 $R$ 的扇形覆盖的蜂窝 LA,扇形 LA 的圆心为移动终端最后一次报告所在的蜂窝,开口方向为终端前两次报告所在蜂窝指向最后报告所在蜂窝的连线方向.如图 2 所示,其中 $\theta$ 为扇形对称轴方向, $\beta$ 为最后报告所在蜂窝到当前所在蜂窝的方向角.

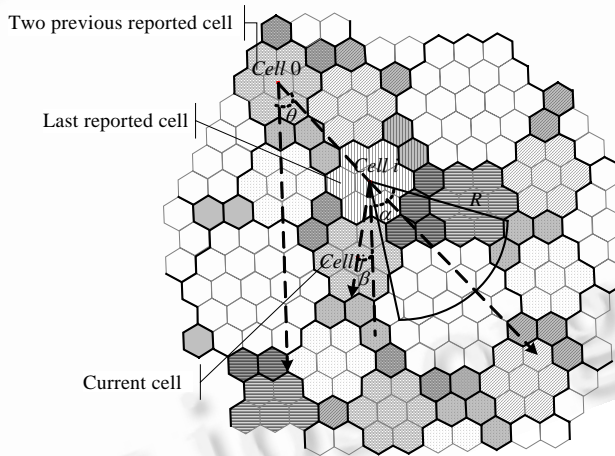


Fig.2 Individuation sector cellular LA

图 2 个性化扇形蜂窝 LA

扇形 LA 位置管理方案中移动终端的具体处理过程如下:

(1) 移动终端开机初始化,初始 LA 为以当前终端所在蜂窝为圆心,实际地址就是该蜂窝所在的重组蜂窝的蜂窝坐标,以指定距离  $R$ (米或千米)为半径的圆形所覆盖的蜂窝.缓存当前所在蜂窝的蜂窝坐标  $CC(x_0, y_0)$ ,将该最后报告所在的蜂窝记录为当前 LA 中心.

(2) 移动终端运动或驻留,定时从基站监听广播消息,得到当前所在蜂窝的蜂窝坐标  $CC$ .

(3) 判断监听到的蜂窝坐标  $CC$  与移动终端缓存的蜂窝坐标  $CC(x_0, y_0)$  是否相同:如果相同,则回到步骤(2)继续监听;否则,转步骤(4).

(4) 缓存移动终端当前所在蜂窝的蜂窝坐标  $CC$ ,判断当前所在蜂窝是否位于当前 LA 内:如果是,则回到步骤(2)继续监听;否则,转步骤(5).判断蜂窝是否处于当前 LA 内的算法见算法 1.

(5) 向网络报告位置更新,其中报告内容包括:终端设置的扇形半径  $R$  和扇形张角  $\alpha$  以及扇形对称轴方向角

$\theta$ ,其中 $\theta$ 为终端通过蜂窝坐标CC计算前两次报告所在蜂窝到最后报告所在蜂窝,也就是当前LA中心的方向角.

(6) 记录当前所在蜂窝为当前LA中心,回到步骤(2)继续监听.

算法1. 移动终端判断蜂窝是否处于当前LA内算法.

步骤1.通过蜂窝坐标CC计算当前所在蜂窝到当前LA中心的实际距离,记作 $d$ ;

步骤2.通过蜂窝坐标CC计算当前LA中心到当前所在蜂窝的方向角,记作 $\beta$ ;

步骤3.比较 $d$ 与 $R$ ,若 $d > R$ ,转步骤5;若 $d \leq R$ ,转步骤4;

步骤4.比较 $|\beta - \theta|$ 与 $\alpha/2$ ,若 $|\beta - \theta| > \alpha/2$ ,转步骤5继续判断;否则,转步骤6结束判断;

步骤5.判定为当前所在蜂窝不在当前LA内,结束;

步骤6.判定为当前所在蜂窝在当前LA内,结束.

由于采用反映移动用户运动特性的个性化扇形LA,本文采取了寻呼延迟最小的一步寻呼策略,只在个性化扇形LA区所覆盖的蜂窝内一步寻呼将极大地减少寻呼代价,从而达到优化位置管理策略的目的.

### 3 性能分析

#### 3.1 半马尔可夫决策过程

位置管理的核心问题就是实现位置更新和寻呼传递代价的平衡,减少它们的总代价.各种位置更新和寻呼机制的效率可以根据其在固定时间内引入的运行负载来评价.马尔可夫模型是最早广泛用于对不同位置管理机制进行仿真评估的模型之一,该模型假设用户或留在原蜂窝,或按一定的概率分布移动到相邻蜂窝,其过程为当前状态只受前一状态影响,以 $t$ 时刻的状态向量和概率转移矩阵就可以决定 $t+1$ 时刻的状态向量.但是,马尔可夫模型主要的不足是没有考虑用户的移动历史特性<sup>[15]</sup>.

本文提出基于实际距离和方向角的动态位置更新算法,将根据移动用户的历史移动规律、网络呼叫率、移动终端平均速度、蜂窝大小等因素,需终端自适应调整扇形覆盖的个性化LA大小.因此,我们考虑采用半马尔可夫决策过程来描述位置追踪问题,并计算两次寻呼到达间的位置管理总代价.所谓半马尔可夫过程是指各状态的自我循环次数单独指定,是一个有限状态的离散马尔可夫过程.之所以用半马尔可夫决策过程而不是用马尔可夫过程表示状态之间的关系,是因为每个状态的循环次数应该用从实际终端测得的转移概率曲线来控制,而对于马尔可夫过程,每个状态的循环次数依靠状态之间的转移概率,不容易控制.

#### 3.2 总代价计算公式推导

本文中的公式推导过程使用了大量的符号,为说明方便,符号注释说明如下:

$t_n$ :第 $n$ 决策时刻

$T$ :下一次寻呼到达时刻

$X_n$ :第 $n$ 决策时刻终端的状态

$Y_n$ :第 $n$ 决策时刻进行的操作

$U(X_n, Y_n)$ :第 $n$ 决策时刻,给定状态 $X_n$ 且进行 $Y_n$ 操作时的代价函数

$\phi(T)$ :下一次寻呼到达前的最后一次决策时刻

$P(X_{\phi(T)})$ :一次终端寻呼的代价函数

$C_u$ :单位位置更新代价

$C_p$ :单位寻呼代价

$\lambda$ :两次寻呼到达的间隔时间服从指数为 $\lambda$ 的分布

$f(v)$ :速度概率密度函数

$g(\beta)$ :方向角概率密度函数

$A_c$ :平均蜂窝面积

$\eta$ :两次位置更新间隔时间

$E[\bullet]$ :•的期望值

在如图 3 所示的时序图中, $t_0=0$  表示上一次寻呼到达时刻,随机变量  $T$  则表示下一次寻呼到达时刻。 $t_0, t_1, t_2, \dots$  表示各个决策时刻,移动终端根据其当时的状态信息  $X_n$ ,例如终端所在蜂窝到当前 LA 中心的实际距离  $d$ ,从当前 LA 中心到当前所在蜂窝的方向角  $\beta$ 、终端运动速度  $v$ 、蜂窝坐标 CC 等,遵循判断蜂窝是否处于当前 LA 的算法规则,判定是否进行位置更新操作.随机变量  $Y_n$  表示在  $n$  决策时刻选择的操作, $Y_n=1$  标记为位置更新操作, $Y_n=0$  标记为不进行任何操作,终端继续定时监听广播消息.

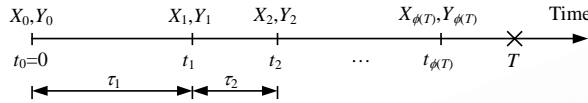


Fig.3 Timing diagram

图 3 时序图

总代价计算公式推导过程中,我们引入了两个代价函数,即位置更新代价函数  $U(X_n, Y_n)$ 和寻呼代价函数  $P(X_{\phi(T)})$ . $U(X_n, Y_n)$ 表示在  $n$  决策时刻给定状态为  $X_n$  且进行  $Y_n$  操作时的代价,因此, $Y_n$  选择的操作不同,代价也不一样,即

$$\begin{cases} U(X_n, 1) = C_\mu, & Y_n = 1 \\ U(X_n, 0) = 0, & Y_n = 0 \end{cases} \quad (1)$$

这里, $C_\mu$ 表示单位位置更新所需代价.从图 3 我们可以知道, $\phi(T)$ 为下一次寻呼到达时刻  $T$  之前的最后一次决策时刻, $P(X_{\phi(T)})$ 表示一次寻呼代价,寻呼代价跟寻呼策略和 LA 大小密切相关.我们采用基于个性化扇形 LA 的一步寻呼策略,所以考虑以 LA 的面积作为衡量寻呼代价的标准.假设平均蜂窝面积为  $A_c$ ,则确定 LA 内需要寻呼的蜂窝数.

本文提出的基于实际距离和方向角的动态位置更新算法,将根据移动用户的历史移动规律、网络呼叫率、移动终端平均速度、蜂窝大小等因素自适应地调整扇形覆盖的个性化 LA 大小,认为用户总是按照前向移动模型运动.因此,我们引入了  $f(v)$ 和  $g(\beta)$ 两个参数分别表示终端移动速度概率密度函数和从当前 LA 中心到终端当前所在蜂窝的方向角概率密度函数,并且  $f(v) \begin{cases} \geq 0, & v \geq 0 \\ = 0, & v < 0 \end{cases}, g(\beta) \begin{cases} \geq 0, & -\frac{\pi}{2} \leq \beta \leq \frac{\pi}{2} \\ = 0, & \text{其他} \end{cases}$ .

我们设  $V = \int_0^\infty \frac{f(v)}{v} dv$ ,  $\omega = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{g(\beta)}{\beta} d\beta$ , 则两次位置更新间隔时间  $\eta$  表示为

$$\eta = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^\infty \alpha R \frac{f(v)g(\beta)}{v\beta} dv d\beta = \omega V \alpha R.$$

即两次位置更新间隔时间  $\eta$  是关于扇形张角  $\alpha$ 、半径  $R$ 、速度  $v$  和方向角  $\beta$  的变量.

两次寻呼到达间的位置管理总代价记为  $C_T$ ,计算公式推导过程如下:

$$E[C_T] = E[C_U] + E[C_P] = E \left\{ \sum_{n=0}^{\phi(T)} U(X_n, Y_n) + P(X_{\phi(T)}) \right\} \quad (2)$$

设两次寻呼到达的间隔时间服从指数为  $\lambda$  的分布,所以公式(2)可以写为

$$E[C_T] = E \left\{ \int_0^\infty \left[ \sum_{n=0}^{\phi(T)} U(X_n, Y_n) + P(X_{\phi(T)}) \right] \lambda e^{-\lambda t} dt \right\} \quad (3)$$

令  $k$  代表下一次寻呼到达时刻  $T$  之前的最后一次决策时刻,即  $\phi(T)=k$  代入公式(3):

$$\begin{aligned}
 E[C_T] &= E\left\{ \sum_{k=0}^{\infty} \int_{t_k}^{t_{k+1}} \left[ \sum_{n=0}^k U(X_n, Y_n) + P(X_k) \right] \lambda e^{-\lambda t} dt \right\} \\
 &= E\left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=n}^{\infty} \int_{t_k}^{t_{k+1}} U(X_n, Y_n) \lambda e^{-\lambda t} dt + \sum_{k=0}^{\infty} \int_{t_k}^{t_{k+1}} P(X_k) \lambda e^{-\lambda t} dt \right\} \\
 &= E\left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=n}^{\infty} \int_{t_k}^{t_{k+1}} U(X_n, Y_n) \lambda e^{-\lambda t} dt + \sum_{k=0}^{\infty} P(X_k) \int_{t_k}^{t_{k+1}} \lambda e^{-\lambda t} dt \right\}.
 \end{aligned}$$

因为  $\sum_{k=n}^{\infty} \int_{t_k}^{t_{k+1}} (\cdot) dt = \int_{t_n}^{\infty} (\cdot) dt$ , 所以,

$$\begin{aligned}
 E[C_T] &= E\left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \int_{t_n}^{\infty} U(X_n, Y_n) \lambda e^{-\lambda t} dt + \sum_{k=0}^{\infty} P(X_k) (e^{-\lambda t_k} - e^{-\lambda t_{k+1}}) \right\} \\
 &= E\left\{ \sum_{n=0}^{\infty} U(X_n, Y_n) \int_{t_n}^{\infty} \lambda e^{-\lambda t} dt + \sum_{k=0}^{\infty} P(X_k) (e^{-\lambda t_k} - e^{-\lambda t_{k+1}}) \right\} \\
 &= E\left\{ \sum_{n=0}^{\infty} U(X_n, Y_n) e^{-\lambda t_n} + \sum_{k=0}^{\infty} P(X_k) (e^{-\lambda t_k} - e^{-\lambda t_{k+1}}) \right\} \\
 &= E\left\{ \sum_{n=0}^{\infty} U(X_n, Y_n) e^{-\lambda t_n} + \sum_{n=0}^{\infty} P(X_n) (e^{-\lambda t_n} - e^{-\lambda t_{n+1}}) \right\}
 \end{aligned} \tag{4}$$

将公式(1)代入得:

$$\sum_{n=0}^{\infty} U(X_n, Y_n) e^{-\lambda t_n} = C_{\mu} \sum_{k=1}^{\infty} e^{-\lambda t_k} = C_{\mu} \lim_{k \rightarrow \infty} (e^{-\lambda t_1} + e^{-\lambda t_2} + e^{-\lambda t_3} + \dots + e^{-\lambda t_k}) \tag{5}$$

其中,  $t_k$  为位置更新时刻.

因为  $\eta$  为两次位置更新间隔时间, 即  $\eta = t_k - t_{k-1}$ , 且  $t_0 = 0$ , 所以公式(5)可以写为

$$\sum_{n=0}^{\infty} U(X_n, Y_n) e^{-\lambda t_n} = C_{\mu} \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{e^{-\lambda \eta} [1 - (e^{-\lambda \eta})^k]}{1 - e^{-\lambda \eta}} = C_{\mu} \frac{e^{-\lambda \eta}}{1 - e^{-\lambda \eta}} = \frac{C_{\mu}}{e^{\lambda \eta} - 1} \tag{6}$$

因为  $C_p$  表示单位寻呼代价, 也就是寻呼一个蜂窝小区的信令负载, 而且假设平均蜂窝面积为  $A_c$ , 我们能够确定 LA 内一步寻呼的蜂窝数为  $\frac{\alpha R^2}{2A_c}$ , 所以,

$$\begin{aligned}
 \sum_{n=0}^{\infty} P(X_n) (e^{-\lambda t_n} - e^{-\lambda t_{n+1}}) &= \frac{C_p \alpha R^2}{2A_c} \sum_{n=0}^{\infty} (e^{-\lambda t_n} - e^{-\lambda t_{n+1}}) \\
 &= \frac{C_p \alpha R^2}{2A_c} \lim_{n \rightarrow \infty} (e^{-\lambda t_0} - e^{-\lambda t_1} + e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2} + \dots + e^{-\lambda t_n} - e^{-\lambda t_{n+1}}) \\
 &= \frac{C_p \alpha R^2}{2A_c} \lim_{n \rightarrow \infty} [1 - e^{-\lambda(\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \dots + \tau_{n+1})}] \\
 &= \frac{C_p \alpha R^2}{2A_c}
 \end{aligned} \tag{7}$$

其中,  $\tau_1, \tau_2, \dots$  为各蜂窝驻留时间.

将公式(6)、公式(7)代入公式(4), 得到位置管理总代价计算公式为

$$E[C_T] = E\left[ \frac{C_{\mu}}{e^{\lambda \eta} - 1} + \frac{C_p \alpha R^2}{2A_c} \right] = E\left[ \frac{C_{\mu}}{e^{\lambda \omega V \alpha R} - 1} + \frac{C_p \alpha R^2}{2A_c} \right] \tag{8}$$

### 3.3 数值分析与性能比较

#### 3.3.1 数值分析

由公式(8)可知, 两次寻呼到达间的位置管理总代价  $C_T$  与扇形张角  $\alpha$ 、平均蜂窝面积  $A_c$  和扇形半径  $R$  有关, 而扇形半径  $R$  与距离门限(distance threshold, 简称 DT)有关. 所谓距离门限是指移动终端进行一次位置更新时所



在小区到上次更新时所在小区的距离,我们用数值结果分析比较不同张角、不同平均蜂窝面积条件下两次寻呼到达间的  $C_T$  和距离门限 DT 的关系.为便于计算分析,我们设定参数值为  $C_{\mu}=10, C_p=1, \omega=3/\pi, V=10, \lambda=0.1$ .

图 4 描述了不同距离门限  $R$  值时,两次寻呼到达间的位置管理总代价.这里,我们假设平均蜂窝面积为  $A_c=0.65$ ,相当于等面积六边形半径大约为  $0.5\text{km}$  的蜂窝.该图表明张角一定时,两次寻呼到达间的位置管理总代价随着半径  $R$  的增大而增大,优化距离门限  $R$  值大约在  $1.5\text{km}\sim 3\text{km}$ (相当于  $3\sim 6$  个平均半径为  $0.5\text{km}$  的蜂窝)时,两次寻呼到达间的位置管理总代价比较小.相同距离门限值时,张角  $\alpha$  值过大或过小都会增大总代价值.当  $\alpha$  趋于  $0$  时,个性化扇形 LA 成为了直线形 LA.线性 LA 对方向极敏感,移动终端有转向运动或摆动时,终端会频繁触发更新,仅在终端长时间直线运动时,效率才能提高;当  $\alpha$  趋于  $2\pi$  时,个性化扇形 LA 等同于圆形 LA,在相同寻呼面积的前提下,圆形 LA 为了顾及所有方向,半径明显小于扇形 LA 的半径,因此也会增加更新次数,从而导致位置管理代价值提高.

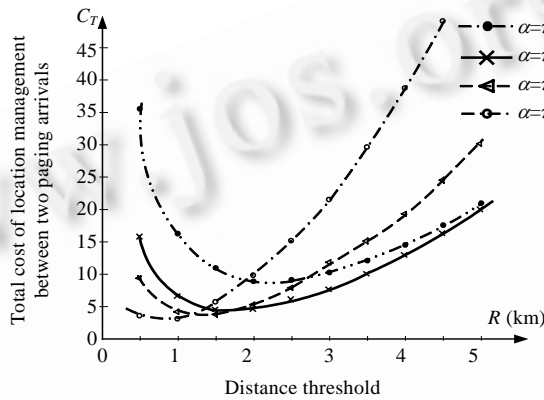


Fig.4 Relationship between  $C_T$  and DT under different  $\alpha$

图 4 不同  $\alpha$  下,  $C_T$  与 DT 的关系

图 5 和图 6 描述不同平均蜂窝面积  $A_c$  与两次寻呼到达间的位置管理总代价之间的关系,其中,  $r_c$  为等面积六边形蜂窝的半径,选取张角  $\alpha=\pi/3$ .从两图中我们可以知道,当平均蜂窝面积  $A_c$  值急剧减小,也就是半径  $r_c$  很小时,两次寻呼到达间的位置管理总代价则大幅度地上升,这相当于是实际网络中微微蜂窝、微蜂窝的个数比较多的情况;当  $A_c$  值急剧增大,也就是半径  $r_c$  很大时,两次寻呼到达间的位置管理总代价则大幅度减小,这就相当于实际网络中宏蜂窝的个数比较多的情况.

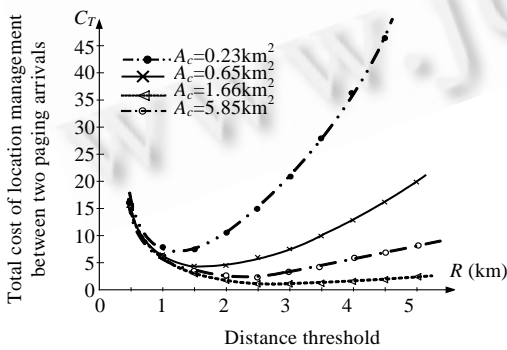


Fig.5 Relationship between  $C_T$  and DT under different  $A_c$

图 5 不同  $A_c$  下,  $C_T$  与 DT 的关系

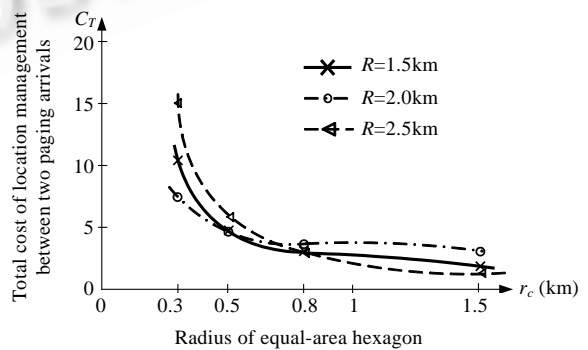


Fig.6 Relationship between  $C_T$  and  $r_c$  under different DT

图 6 不同 DT 下,  $C_T$  与  $r_c$  的关系

### 3.3.2 性能比较

目前,很多文献提出了移动位置管理在各种假设条件下的理论分析模型和算法,但大多数文献的建模方法都是考虑某种特殊模型的抽象,因此,其位置管理代价算法的结果往往不具有可比性.本文提出基于实际距离和方向角的扇形动态位置区更新和一步寻呼策略,在上节中对位置管理总代价作了具体的数值分析,性能较文献

[13]中基于距离的圆形动态位置区更新和一步寻呼策略(位置管理总代价计算公式为  $C_{total} = k \left( \frac{C_{\mu}}{\lambda R \omega} + \frac{C_p \pi R^2}{A_c} \right)$ ,

其中  $k$  为寻呼率)相比,相同条件情况下, $\lambda$  越小,即寻呼到达率  $1/\lambda$  越大,本文提出的位置管理方案的总代价  $C_T$  要比其  $C_{total}$  小很多.如图 7 所示,说明当移动用户运动特性很强时,选择个性化的扇形位置管理策略在位置更新与寻呼总代价上优于圆形位置区的管理策略.

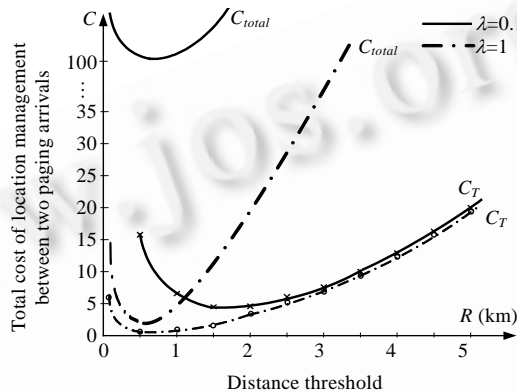


Fig.7 Relationship between  $C_T$  and DT under different  $\lambda$

图 7 不同  $\lambda$  下,  $C_T$  与 DT 的关系

## 4 结 论

移动性位置管理是移动计算(mobile computing)领域的一个挑战性问题.本文提出基于不规则分布的网络拓扑模型的位置管理策略,并给出实际距离和方向角的动态位置更新算法,自适应调整扇形覆盖的个性化位置区大小,从而降低移动性位置管理的总代价.通过半马尔可夫决策过程推导两次寻呼到达间的位置管理总代价计算公式并给出数值分析结果,证明了当移动用户运动特性很强时,选择个性化的扇形位置管理策略在位置更新与寻呼总代价上优于无个性的圆形位置区,这对于评价与优化移动位置管理策略具有重要的意义.

### References:

- [1] Akyildiz LF, Ho JSM, Lin YB. Movement-Based location update and selective paging for PCS networks. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 1996,4(4):629–638.
- [2] Naor Z, Levy H. Minimizing the wireless cost of tracking mobile users: An adaptive threshold scheme. In: *Proc. of the INFOCOM'98*. San Francisco: IEEE Computer Society Press, 1998. 720–727. [http://www.comsoc.org/confs/ieee-infocom/1998/papers/06b\\_1.pdf](http://www.comsoc.org/confs/ieee-infocom/1998/papers/06b_1.pdf)
- [3] Bar-Noy A, Kessler I, Sidi M. Mobile users: To update or not to update? *Wireless Networks*, 1995,1(2):175–195.
- [4] Zhang JY. A cell ID assignment scheme and its applications. In: *Proc. of the 2000 Int'l Workshop on Parallel Processing*. Washington: IEEE Computer Society Press, 2000. 507–512. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/6987/18831/00869156.pdf>
- [5] Naor Z, Levy H, Zwick U. Cell identification codes for tracking mobile users. *Wireless Networks*, 2002,8(1):73–84.
- [6] Liang B, Haas ZJ. Predictive distance-based mobility management for PCS networks. In: *Proc. of the INFOCOM'99*. San Francisco: IEEE Computer Society Press, 1999. 1377–1384. <http://www.comm.utoronto.ca/~liang/publications/Infocom99.pdf>

- [7] Liang B, Haas ZJ. Predictive distance-based mobility management for multidimensional PCS networks. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2003,11(5):718-732.
- [8] Bhattachary A, Das SK. LeZi-Update: An information-theoretic approach to track mobile users in PCS networks. In: *Proc. of the 5th Annual ACM/IEEE Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking*. New York: ACM Press, 1999. 1-12. <http://www.scs.carleton.ca/~adhocnow/NETWORKS/Das99.pdf>
- [9] Hwang HW, Chang MF, Tseng CC. A direction-based location update scheme with a line-paging strategy for PCS network. *IEEE Communications Letters*, 2000,4(5):149-151.
- [10] Zheng J, Regentova E. An enhanced direction-based location update scheme for PCS networks. In: *Proc. of the Vehicular Technology Conf. Piscataway: IEEE Press, 2004. 3555-3559. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/2220/29231/01318885.pdf>*
- [11] Ou DX, Dong DC, Liu WZ. Location management model based on movement directions for PCS network. *Journal of Tongji University*, 2003,31(12):1467-1471 (in Chinese with English abstract).
- [12] Hac A, Zhou X. Location strategies for personal communication networks: A novel tracking strategy. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1997,15(8):1425-1436.
- [13] Ng CK, Chan HW. Enhanced distance-based location management of mobile communication systems using a cell coordinates approach. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2005,4(1):41-55.
- [14] Wong VWS, Leung VCM. An adaptive distance-based location update algorithm for next-generation PCS network. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2001,19(10):1942-1953.
- [15] Zheng J, Zhang Y, Wang L, Chen J. Adaptive location update area design for wireless cellular networks under 2D Markov walk model. *Elsevier Computer Communications*, 2007,30:2060-2069.

#### 附中文参考文献:

- [11] 欧冬秀,董德存,刘文政.PCS网络中基于方向的自适应位置管理模型.同济大学学报,2003,31(12):1467-1471.



赵小敏(1976 - ),男,浙江文成人,博士生,讲师,主要研究领域为网络与计算机通信,传感器网络,网络安全.



陈庆章(1955 - ),男,博士,教授,CCF 高级会员,主要研究领域为网络与计算机通信,计算机支持的协同工作,传感器网络.



郎美亚(1982 - ),女,硕士,主要研究领域为移动计算,无线网络.