

基于双窗口测量的蜂窝移动通信系统越区切换算法性能分析

唐万斌, 李少谦

(电子科技大学通信抗干扰技术国防重点实验室, 成都 610054)

摘 要: 本文提出了一种新的蜂窝移动通信系统越区切换测量算法, 该算法采用了两个长度不同的测量窗口, 有利于在切换时延和切换平均次数这对矛盾之间取得更为有效的平衡, 特别适用于需要对多个基站进行切换测量的情况. 同时本文给出了基于矩形窗口的双窗口切换测量算法数学分析模型, 及数值分析结果.

关键词: 切换测量; 平均切换次数; 交叉点; 切换时延; CDMA

中图分类号: TN92 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 11A-0141-04

Performance Analysis of Handoff Algorithms Using Dual-Window Measurements In Cellular Mobile Communication System

TANG Wan bin, LI Shao qian

(The National Communication Lab. of University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, 610054, China)

Abstract: This paper proposes a handoff algorithm using dual-window measurements in cellular mobile communication system. The proposed algorithm can provide a suitable balance of probability and delay of handoff. An analysis model of this algorithm is given in this paper. The proposed algorithm is especially fitted to the situation which mobile station needs to measure the signal strength from many base stations.

Key words: handoff measurement; mean handoff number; crossover point; handoff delay; CDMA

1 引言

在蜂窝移动通信系统中, 为了增加系统容量, 小区的覆盖范围将变得更小, 成为微小区, 微微小区, 这时, 频繁的切换使切换管理显得更为重要.

在第二代和第三代移动通信系统中, 广泛采用了移动台辅助的切换算法(MSHO)^[1]. 它是指由移动台测量各小区的信号能量强度, 当邻近小区的信号能量达到某一要求时, 则移动台通过上行链路向服务小区基站申请切换.

由于移动信道的影响, 移动台对各基站信号必须经过一个平均过程, 才能获得比较可靠的测量结果, 常见的平均窗口有矩形窗和指数窗两种, 由于指数窗较为复杂, 所以实际应用中一般采用简单的矩形窗平均. 同时, 为了避免切换过程中的“乒乓效应”, 在切换算法中引入了滞后参数. 通常, 衡量一种切换算法优劣的标准, 是看它能否在切换概率和切换时延这一对矛盾间取得合适的平衡. 窗口的大小, 滞后参数的设置都会影响到切换概率和切换时延. 在以往的切换算法^[2~4]中, 都采用的是单窗口平均方法, 本文将分析基于双窗口的切换算法的性能.

在 CDMA 蜂窝移动通信系统中特有的软切换过程中, 移动台需要测量有效集(active set)、候补集(candidate set)、邻集(neighbor set)中各基站的导频信号强度, 考虑到移动台结构的

复杂性, 这些测量都是分时共用一个接收机完成的, 如果对每个基站导频信号的测量时间过长, 会导致切换时延的增加. 采用本文中介绍的切换算法, 可以降低测量时间, 而切换概率不会有大的变化.

第二部分将推导基于双窗口的切换算法, 第三部分给出数值分析结果, 最后给出全文的结论.

2 算法分析

这里, 我们采用了一个简单通用的系统模型^[2]. 系统中有两个基站, A 和 B , 相距 D 米, 一个移动台以常速度沿两个基站间做直线运动. 移动台测量到的基站信号强度经过了路径损耗, 阴影衰落和瑞利衰落. 其中, 瑞利衰落的影响可以通过窗口平均消去. $a(d)$ 和 $b(d)$ 分别表示移动台接收到的基站 A 和基站 B 的信号强度, 单位为分贝, d 表示移动台与基站 A 间的直线距离.

$$a(d) = K_1 - K_2 \log(d) + u(d) \quad (1)$$

$$b(d) = K_1 - K_2 \log(D - d) + v(d), d \in (0, D)$$

其中 K_1 和 K_2 是路径损耗的参数, 在城市, K_2 的典型值为 30. $\{u(d)\}$ 和 $\{v(d)\}$ 表示阴影衰落, 它们是独立的, 同分布零均值稳态高斯随机过程. Gudmundson 指出, $u(d)$ 和 $v(d)$ 的自相关函数为指数分布^[5]. 即

$$\begin{aligned} E\{u(d_1) \cdot u(d_2)\} &= E\{\mathcal{U}(d_1) \cdot \mathcal{U}(d_2)\} \\ &= T_s^2 \exp\{-\lambda d_1 - d_2\} / d_0 \end{aligned} \quad (2)$$

d_0 表示了自相关随距离的衰落程度。

在移动台接收端, 使用矩形窗口或指数窗来平均测量到的信号能量。由于实际应用中通常采用矩形窗, 所以本文的分析也基于矩形窗口。移动台接收到的来自基站 A 和基站 B 的平均信号电平分别为:

$$\begin{aligned} \bar{a}(d) &= \frac{1}{d_w} \int_0^d a(d-x) dx \\ \bar{b}(d) &= \frac{1}{d_w} \int_0^d b(d-x) dx \end{aligned} \quad (3)$$

其中 d_w 为窗口长度。使用 $x(d)$ 表示接收到的两个基站平均信号电平之差:

$$x(d) = \bar{a}(d) - \bar{b}(d) \quad (4)$$

基于双窗口的切换算法描述如下: 一般情况下, 移动台使用窄窗口(长度为 d_{ws}) 搜索邻近小区的平均信号电平, 如果目前服务小区 A 与邻近小区 B 的平均信号电平之差 $x_s(d) > -h_s$, h_s 为采用窄窗口时的滞后参数, 则移动台搜索另一邻近小区 C , 但如果 $x_s(d) < -h_s$, 则移动台进一步扩宽平均窗口为 d_{ws} ($d_{ws} > d_{ws}$), 如果这时测得两基站的平均信号电平 $x_w(d) < -h_w$, h_w 为采用宽窗口时的滞后参数, 则发生切换, 否则退回搜索下一邻近小区 C 。

为了便于分析, 把基站 A 与基站 B 间的距离平分若干小段, 每段长 d_s , 用 d_k 表示移动台距小区 A 的距离 $d_k = kd_s$, $k = 1, 2, \dots, D/d_s$, 切换会在下列两种情况下发生:

(1) 在距离为 d_{k-1} 时, 与基站 A 保持通信, 但在距离 d_k 时, 下式满足: $x_s(d_k) < -h_s$ 且 $x_w(d_k) < -h_w$; (2) 在距离为 d_{k-1} 时, 与基站 B 保持通信, 但在距离 d_k 时, 下式满足: $x_s(d_k) > h_s$ 且 $x_w(d_k) > h_w$ 。

用 $P_{ho}(k)$ 表示在距离为 d_k 时发生切换的概率, $P_{B/A}(k)$ 表示从基站 A 切换到基站 B 的概率, $P_{A/B}$ 表示从基站 B 切换到基站 A 的概率, $P_A(k)$ 表示在距离为 d_k 时, 移动台与基站 A 通信的概率, $P_B(k)$ 表示在距离为 d_k 时, 移动台与基站 B 通信的概率。

根据以上定义有如下递推关系:

$$\begin{aligned} P_{ho}(k) &= P_A(k-1)P_{B/A}(k) + P_B(k-1)P_{A/B}(k) \\ P_A(k) &= P_A(k-1)(1 - P_{B/A}(k)) + P_B(k-1)P_{A/B}(k) \\ P_A(0) &= 1, P_B(0) = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

从上式可以看出, 只要得到 $P_{B/A}(k)$ 和 $P_{A/B}(k)$, 即可求得 $P_{ho}(k)$ 。

用 $A(k-1)$ 表示移动台在 d_{k-1} 处与基站 A 通信这一事件, $B(k)$ 表示移动台在 d_k 处与基站 B 通信这一事件, 则 $P_{B/A}(k)$ 可定义为:

$$\begin{aligned} P_{B/A}(k) &= P\{B(k) | A(k-1)\} = P\{x_s(d_k) < -h_s, \\ &\quad x_w(d_k) < -h_w | A(k-1)\} \end{aligned} \quad (6)$$

同理, $P_{A/B}(k)$ 可表示为:

$$\begin{aligned} P_{A/B}(k) &= P\{A(k) | B(k-1)\} = P\{x_s(d_k) > h_s, \\ &\quad x_w(d_k) > h_w | B(k-1)\} \end{aligned} \quad (7)$$

我们把事件 $A(k-1)$ 分为两个不相交的子事件: $A_1(k-1) = \{x_s(d_{k-1}) \geq -h_s\}$ 和 $A_2(k-1) = \{x_s(d_{k-1}) < -h_s, x_w(d_{k-1}) \geq -h_w\}$ 。

当 h_s 与 h_w 相差几个 dB 时, 我们可以认为:

$$P\{A_2(k-1)\} \ll P\{A_1(k-1)\} \quad (8)$$

同时, 由于当前两个状态的相关性远大于当前状态与过去状态之间的相关性, 所以

$$\begin{aligned} P\{x_w(d_k) < -h_w | x_s(d_{k-1}) \geq -h_s, x_s(d_k) < -h_s\} \\ \approx P\{x_w(d_k) < -h_w | x_s(d_k) < -h_s\} \end{aligned} \quad (9)$$

根据文献[4]的推导, 可以得到

$$P_{B/A}(k) \approx P\{x_s(d_k) < -h_s | x_s(d_{k-1}) \geq -h_s\} \times P\{x_w(d_k) < -h_w | x_s(d_k) < -h_s\} = P_1 \cdot P_2 \quad (10)$$

$$P_{A/B}(k) \approx P\{x_s(d_k) > h_s | x_s(d_{k-1}) \leq h_s\} \times P\{x_w(d_k) > h_w | x_s(d_k) > h_s\} = P_3 \cdot P_4 \quad (11)$$

其中:

$$P_1 = \frac{\int_{-\infty}^{-h_s} Q\left[\frac{-h_s - \mu_{x_s}(d_{k-1}) - \gamma_{ss}(t - \mu_{x_s}(d_k))}{\sigma_{x_s} \sqrt{1 - \gamma_{ss}^2}}\right] P_{x_s}(d_k)(t) dt}{Q\left[\frac{-h_s - \mu_{x_s}(d_{k-1})}{\sigma_{x_s}}\right]} \quad (12)$$

$$P_2 = \frac{\int_{-\infty}^{-h_s} \left[1 - Q\left[\frac{-h_w - \mu_{x_w}(d_k) - \gamma_{sw}(t - \mu_{x_s}(d_k))}{\sigma_{x_s} \sqrt{1 - \gamma_{sw}^2}}\right]\right] P_{x_s}(d_k)(t) dt}{1 - Q\left[\frac{-h_s - \mu_{x_s}(d_k)}{\sigma_{x_s}}\right]} \quad (13)$$

$$P_3 = \frac{\int_{-\infty}^{h_s} \left[1 - Q\left[\frac{h_s - \mu_{x_s}(d_{k-1}) - \gamma_{ss}(t - \mu_{x_s}(d_k))}{\sigma_{x_s} \sqrt{1 - \gamma_{ss}^2}}\right]\right] P_{x_s}(d_k)(t) dt}{1 - Q\left[\frac{h_s - \mu_{x_s}(d_{k-1})}{\sigma_{x_s}}\right]} \quad (14)$$

$$P_4 = \frac{\int_{-\infty}^{h_s} Q\left[\frac{h_w - \mu_{x_w}(d_k) - \gamma_{sw}(t - \mu_{x_s}(d_k))}{\sigma_{x_s} \sqrt{1 - \gamma_{sw}^2}}\right] P_{x_s}(d_k)(t) dt}{Q\left[\frac{h_s - \mu_{x_s}(d_k)}{\sigma_{x_s}}\right]} \quad (15)$$

P_1, P_2, P_3, P_4 的推导过程见附录, 其中 γ_{ss} 表示随机变量 $x_s(d_k)$ 和 $x_s(d_{k-1})$ 之间的相关系数, γ_{sw} 表示 $x_s(d_k)$ 和 $x_w(d_k)$ 之间的相关系数, μ 表示不同下标随机变量的均值, $\sigma_{x_s}, \sigma_{x_w}$ 分别表示 $x_s(d_k)$ 和 $x_w(d_k)$ 的均方差, $P_{x_s}(d_k)(t)$ 表示随机变量 $x_s(d_k)$ 的概率密度函数, 它服从高斯分布:

$$P_{x_s}(d_k)(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{x_s}} \exp\left[-(t - \mu_{x_s}(d_k))^2 / 2\sigma_{x_s}^2\right] \quad (16)$$

另外, Q 函数定义为:

$$Q(\beta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\beta}^{\infty} e^{-y^2/2} dy \quad (17)$$

3 数值分析结果

根据文献[2~4], 我们选择了通用的分析参数, 取两个基站间的距离为 $D = 2\text{km}$, 阴影衰落的标准方差 $\delta_s = 6\text{dB}$, 相关距离 $d_0 = 20\text{m}$, 采样距离 $d_s = 1\text{m}$, 常数 $K_1 = 0\text{dB}$, $K_2 = 30\text{dB}$. 两个平均窗口长度选为 $d_{as} = 15\text{m}$ 和 $d_{aw} = 30\text{m}$.

图 1 给出了采用单窗口和双窗口情形时平均切换次数与滞后参数之间的关系. 从中可以看出基于双窗口的平均切换次数介于两个单窗口 ($d_{as} = 15\text{m}$, $d_{aw} = 30\text{m}$) 的平均切换次数之间. 当 $h_w > h_s$ 时, P_{ho} 趋近于窗口长度为 30m 的单窗口算法的 P_{ho} , 当 $h_w < h_s$ 时, P_{ho} 趋近于窗口长度为 15m 的单窗口算法的 P_{ho} . 只要选择合适的 h_w 和 h_s ($h_w > h_s$) 参数, 双窗口切换测量算法的平均切换次数可以减小到接近于窗口长度为 d_{aw} 的单窗口测量算法的平均切换次数. 同时, 通过改变 h_w 和 h_s 参数的差值, 平均切换次数可以在一定范围内变化, 其作用等效于改变单窗口测量算法中的窗口大小.

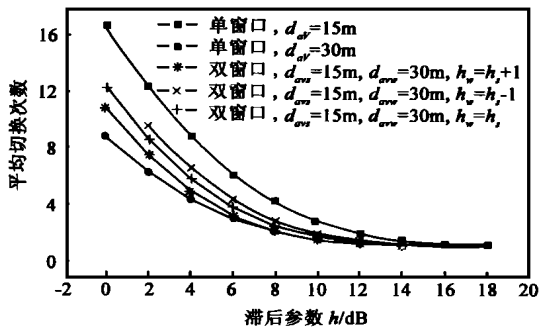


图 1 单窗口和双窗口测量时平均切换次数与滞后参数的关系

为了设定一个测量切换时延的标准, 我们采用了文献[2]、[4]中使用的交叉点(crossover point)的定义: 在交叉点上, 移动台与小区 A 保持通信的概率小于 0.5, 同时与小区 B 建立通信的概率刚好达到 0.5. 图 2 给出了采用单窗口和双窗口情形时, 交叉点与滞后参数的关系. 从中可看出, 采用双窗口的切换时延同样介于两个单窗口的切换时延之间, 当 $h_w > h_s$ 时, 切换时延趋于宽窗口的切换时延, 当 $h_w < h_s$ 时, 切换时延趋于窄窗口的切换时延. 只要选择合适的 h_w 和 h_s ($h_w < h_s$) 参数, 双窗口切换测量算法的切换时延可以减小到接近于窗口长度为 d_{as} 的单窗口测量算法的切换时延. 同时, 通过改变 h_w 和 h_s 参数的差值, 切换时延可以在一定范围内变化, 其作用等效于改变单窗口测量算法中的窗口大小.

在切换过程中的总时延 T_{total} 应该由三部分构成: T_{wait} , T_{measure} 和 T_{execute} . T_{wait} 表示由于移动台需要对多个基站进行搜索测量而造成的等待时延; T_{measure} 表示由测量窗口和滞后参数造成的测量时延; T_{execute} 表示切换执行时延.

本文中前一部分只考虑了 T_{measure} , 切换执行时延 T_{execute} 对于单窗口和双窗口切换算法来说是相同的, T_{wait} 则大不相同. 比如, 移动台需要对三个基站信号进行测量, 对基站 C 的测量将导致移动台从基站 A 切换到基站 B 的时间推后, 它等效于交叉点后移. 如果采用窗口长度为 30m 的单窗口测量算法, 由于移动台测量的随机性, 我们可以认为其交叉点的推移

服从均匀分布, 这样交叉点将增加 15m . 如果采用双窗口测量算法 ($d_{as} = 15\text{m}$, $d_{aw} = 30\text{m}$), 由于基站 C 的信号较弱, 一般对基站 C 的测量只在窄窗口下进行, 这样交叉点只增加 7.5m . 其中原理与多重停留串行搜索算法相似[6]. 与单窗口测量算法相比, 在相同的平均切换次数情况下, 基于双窗口测量的切换算法, 可以增加对各个基站的测量频率, 减小 T_{wait} , 使总时延 T_{total} 降低, 所以双窗口切换测量算法在多基站情况下的性能优于单窗口切换测量算法.

作为数值分析的重要用途, 是寻找平均切换次数与切换时延之间的最佳平衡点, 即如图 3 所示的“膝盖”的位置.

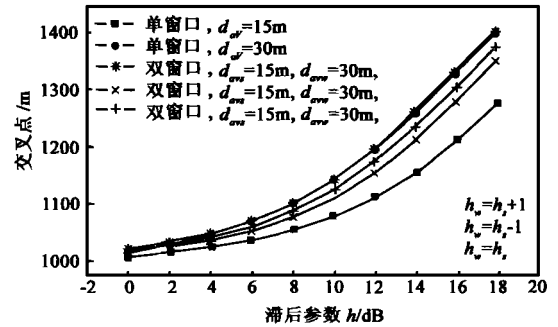


图 2 单窗口和双窗口测量时交叉点与滞后参数的关系

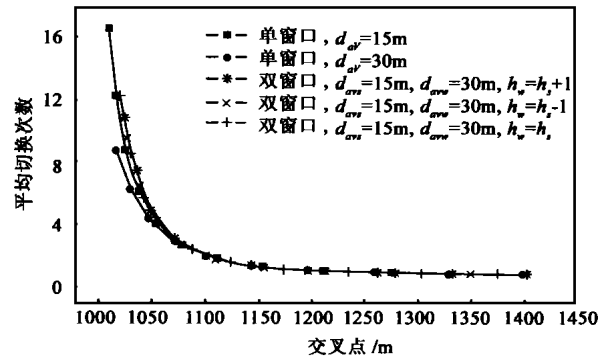


图 3 单窗口和双窗口测量时平均切换次数与交叉点的平衡曲线

4 结论

本文提出了基于双窗口测量的切换算法, 它可以为切换提供更有效的控制手段. 同时能有效减小对每个邻近基站的搜索测量时间, 减小切换时延, 减少切换失败概率. 在移动台对多个基站同时进行测量时, 双窗口切换测量算法具有比单窗口测量算法更好的性能.

本文同时给出了基于双窗口测量的切换算法的分析模型, 可以根据这一模型通过选取适当的平均窗口长度, 滞后参数, 优化系统的切换策略.

附录 P_1 、 P_2 、 P_3 和 P_4 的计算

在式(10)、(11)中给出了:

$$\begin{aligned} P_1 &= P\{x_s(d_k) < -h_s | x_s(d_{k-1}) \geq -h_s\} \\ P_2 &= P\{x_w(d_k) < -h_w | x_s(d_k) < -h_s\} \\ P_3 &= P\{x_s(d_k) > h_s | x_s(d_{k-1}) < h_s\} \\ P_4 &= P\{x_w(d_k) > h_w | x_s(d_k) > h_s\} \end{aligned} \quad (18)$$

我们先计算 P_1 :

$$P_1 = \frac{P\{x_s(d_k) < -h_s, x_s(d_{k-1}) \geq -h_s\}}{P\{x_s(d_{k-1}) \geq -h_s\}} = \frac{P_{12}}{P_{11}} \quad (19)$$

注意到 $x(d_{k-1})$ 符合高斯分布, 其均值和方差分别为:

$$E\{x_s(d_{k-1})\} = \mu_{x_s(d_{k-1})}, \quad \text{VAR}\{x_s(d_{k-1})\} = \sigma_{x_s}^2 \quad (20)$$

故:

$$P_{11} = Q((-h_s - \mu_{x_s(d_{k-1})})/\sigma_{x_s}) \quad (21)$$

同理, $x(d_k)$ 的均值和方差分别为:

$$E\{x_s(d_k)\} = \mu_{x_s(d_k)}, \quad \text{VAR}\{x_s(d_k)\} = \sigma_{x_s}^2 \quad (22)$$

$x_s(d_k)$ 和 $x_s(d_{k-1})$ 之间的相关系数定义为 γ_{ss} , 则 $Y_1 = x_s(d_k)$

和 $Y_2 = x_s(d_{k-1})$ 的联合概率密度函数为:

$$f_{Y_1, Y_2}(y_1, y_2) = \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sqrt{2}} e^{-\frac{(y_2 - m_y)^2}{2\sigma_2^2}} \right] \times \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi} \sqrt{1 - \gamma^2} \sigma_1} e^{-\frac{[y_1 - \gamma(\sigma_1/\sigma_2)(y_2 - m_y) - m_1]^2/2(1 - \gamma^2)\sigma_1^2}{1}} \right] \quad (23)$$

$$P\{Y_2 < -h_s, Y_1 > -h_s\} = \int_{-\infty}^{-h_s} Q\left(\frac{-h_s - \mu_{x_s(d_{k-1})} - \gamma_{ss}(t - \mu_{x_s(d_k)})}{\sigma_{x_s} \sqrt{1 - \gamma_{ss}^2}}\right) \cdot P_{x_s(d_k)} dt = P_{12} \quad (24)$$

由于 $x_w(d_k)$ 也符合高斯分布, 采用与上面相同的推导方法, 我们可以得到 P_2, P_3, P_4 .

参考文献:

- [1] Tero Ojanpera, Ramjee Prasad. Wideband CDMA for Third Generation Mobile Communications [M]. Artech House, 1998.

- [2] Rajiv Vijayan, M. Holzman. A model for analyzing handoff algorithms [J]. IEEE Trans. Veh. Technol., 1993, 42(3): 351-356.
- [3] Nevio Benvenuto, Fortunato Santucci. A least squares path loss estimation approach to hand over algorithms [J]. IEEE Trans. Veh. Technol., 1999, 48(2): 437-447.
- [4] Ning Zhang and M. Holzman. Analysis of handoff algorithms using both absolute and relative measurements [J]. IEEE Trans. Veh. Technol., 1996, 45(1): 174-179.
- [5] M. Gudmundson. Correlation model for shadow fading in mobile radio system [J]. Electron Lett., 1991, 27(23): 2145-2146.
- [6] A. J. 维特比. CDMA 扩频通信原理 [M]. 人民邮电出版社, 1997.

作者简介:



唐万斌 1973 年出生, 1998 年毕业于电子科技大学通信与信息工程学院, 获工学硕士学位。现为电子科技大学通信抗干扰技术国防重点实验室讲师。主要从事第三代移动通信系统关键技术研究。

李少谦 1957 年出生, 现为电子科技大学教授、通信抗干扰技术国防重点实验室副主任, 国家“863”个人通信技术专业专家组成员。主要研究领域包括移动通信、个人通信、扩频通信、抗干扰通信等。