

异构无线网络环境下的切换触发时间选择算法

闫继垒, 李建东, 赵林靖

(西安电子科技大学 综合业务网理论和关键技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘 要: 对移动用户在异构网络环境下的切换触发时间选择问题进行了研究。首先对移动终端触发切换的时间选择问题进行了理论分析, 找到了最佳切换触发时间所应满足的条件。然后在切换耗时估计和接收信号强度预测的基础上, 提出了一种预测最佳切换触发时间的算法。仿真结果表明, 本算法能够有效降低用户的分组丢失概率和切换失败概率。

关键词: 异构网络; 切换; 触发时间; 预测

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2011)11-0126-07

Handover trigger time selection algorithm in heterogeneous wireless networks environment

YAN Ji-lei, LI Jian-dong, ZHAO Lin-jing

(State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The handover trigger time selection problem for mobile user in the heterogeneous networks environment was discussed. Firstly, theoretical analysis of the handover trigger time selection was presented and the constraint which the optimal handover trigger time should satisfy was obtained. Then, an algorithm was proposed to predict the optimal handover trigger time based on the estimation of handover delay and the prediction of received signal strength. Simulation results show that this algorithm can effectively reduce the packet loss ratio and the probability of handover failure.

Key words: heterogeneous network; handover; trigger time; prediction

1 引言

随着无线通信行业的发展, 各种无线接入网络纷纷涌现, 如 WLAN、WiMAX、Bluetooth 等, 它们与传统的蜂窝网络一起组成了一个复杂的异构无线网络环境。与此同时, 无线终端也从单接口模式向多模化发展, 即具备多种网络接口, 能够同时接入不同类型的无线网络。然而, 由于覆盖范围有

限, 任何一种网络都不可能满足所有移动用户的需求。因此, 如何保证用户在移动过程中能够获得持续有效的通信服务成为了目前人们研究的重点。

切换技术是保证移动用户业务连续性的重要手段。目前对于切换问题的研究主要集中于 2 方面: 切换目标网络选择^[1-3]和切换触发时间选择^[4-7]。文献 [1,2]都对异构网络环境下的垂直切换目标网络选择决策算法进行了总结和分类, 对比了不同方法的实

收稿日期: 2011-07-31; 修回日期: 2011-11-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60902032); 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(2009CB320404); 国家杰出青年科学基金资助项目(60725105); 国家科技重大专项基金资助项目(2010ZX03005-003); 长江学者和创新团队发展计划基金资助项目(IRT0852); 高等学校学科创新引智计划基金资助项目(B08038)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (60902032); The National Basic Research Program of China (973 Program)(2009CB320404); The National Science Fund for Distinguished Young Scholars (60725105); The National Science and Technology Major Specific Project of China (2010ZX03005-003); PCSIRT(IRT0852); The 111 Project(B08038)

现复杂度和有效性。文献[3]通过合理地定义效用函数，移动用户能够在切换次数和吞吐量上获得很好折中。文献[4]和文献[5]以媒质无关切换(MIH, media independent handover)为基础，能够根据用户的移动速度设定相应的切换触发门限，但是在用户移动速度变化的场景下就很难准确得到终端切换触发门限值，适用性较差。文献[6]和文献[7]都是利用终端接收的信号强度来预测在当前服务网络中的接收门限，从而确定切换触发时间，不同的是文献[6]采用了LMS(least mean square)模型进行预测，文献[7]采用了AR(auto-regression)模型进行预测。本文首先理论分析了最佳切换触发时间应满足的条件，该条件适用于终端在具有不同网络重叠覆盖情况下的异构网络间进行切换。然后在对切换耗时进行估计的基础上，利用自回归模型对用户终端接收到当前服务网络和切换目标网络的信号强度进行预测，从而获得最佳切换触发时间的预测值。仿真结果表明，本文方法能够准确预测终端的最佳切换触发时间，降低切换失败概率和用户的分组丢失概率。

2 系统模型

2.1 问题建模

移动用户进行切换的目的是为了保证其正在进行的业务的连续性。衡量切换性能的 2 大指标是切换失败概率和分组丢失概率，即如何在保证成功切换的前提下最小化用户业务的分组丢失。因此，切换触发时间选择可以建模为如下的优化问题：

$$\min P_{\text{loss}}(t) \quad (1)$$

$$\text{s.t. } P_{\text{hr}}(t) = 0 \quad (2)$$

其中， $P_{\text{loss}}(t)$ 是在 t 时刻触发切换时用户业务的分组丢失概率， $P_{\text{hr}}(t)$ 是在 t 时刻触发切换时的切换失败概率。

在如图 1 所示切换场景中，用户从网络 N_1 的 BS 处以恒定速度 v_0 向网络 N_2 的 AP 运动。假设用户在 t 时刻与 BS 的距离为 d_1 ，与 AP 的距离为 $d_2 = L - d_1$ ，则此时终端接收到 2 个网络的信号强度值(dB)分别为

$$RSS_1(t) = P_1(d_1) + C_{\delta_1} = P_1(v_0 t) + C_{\delta_1} \quad (3)$$

$$RSS_2(t) = P_2(d_2) + C_{\delta_2} = P_2(L - v_0 t) + C_{\delta_2} \quad (4)$$

其中， $P_1(d_1)$ 为终端与 BS 距离为 d_1 时接收到 N_1 的平均功率； $P_2(d_2)$ 为终端与 AP 距离为 d_2 时接收到

N_2 的平均功率； C_{δ_1} 和 C_{δ_2} 为信号在传输过程中受到的阴影衰落影响，它们分别服从均值为 0、标准差为 δ_1 和 δ_2 的正态分布(dB)。

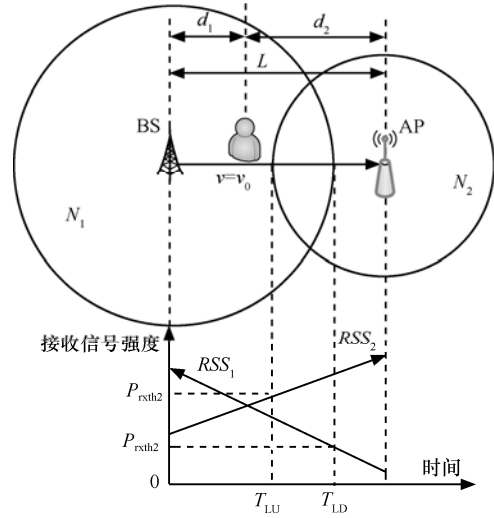


图 1 用户切换

定义终端能够正确解调接收信号数据的最小接收信号强度值为其在该网络下的接收灵敏度。假设用户终端在 N_1 中的接收灵敏度为 P_{rsth1} ，在 N_2 中的接收灵敏度为 P_{rsth2} ，终端执行切换所需要的时间为 T_h 。若不考虑阴影衰落等因素造成的接收信号强度波动($C_{\delta_1} = C_{\delta_2} = 0$)，那么 $RSS_1(t)$ 为单调递减函数， $RSS_2(t)$ 为单调递增函数。很明显，为了避免用户切换失败，终端必须在 $T_1 = T_{\text{LU}} - T_h$ 和 $T_2 = T_{\text{LD}} - T_h$ 之间触发切换，其中， T_{LU} 为终端接收到 N_2 的信号强度值恰好上升到 P_{rsth2} 的时间， T_{LD} 为终端接收到 N_1 的信号强度值恰好下降到 P_{rsth1} 的时间。即切换触发时间 t 必须满足

$$T_1 \leq t \leq T_2 \quad (5)$$

用户业务的分组丢失是由于终端接收到网络的信号强度小于终端的接收灵敏度所导致的。在 N_1 中，终端接收的信号强度值为 $RSS_1(t) = P_1(v_0 t) + C_{\delta_1}$ ，由于 C_{δ_1} 服从均值为 0、标准差为 δ_1 的正态分布，因此 $RSS_1(t) < P_{\text{rsth1}}$ 的概率为 $P\{RSS_1(t) < P_{\text{rsth1}}\} = \int_{-\infty}^{P_{\text{rsth1}} - P_1(v_0 t)} \frac{e^{-x^2/2\delta_1^2}}{\delta_1 \sqrt{2\pi}} dx$ 。同理有 $P\{RSS_2(t) < P_{\text{rsth2}}\} = \int_{-\infty}^{P_{\text{rsth2}} - P_2(L - v_0 t)} \frac{e^{-x^2/2\delta_2^2}}{\delta_2 \sqrt{2\pi}} dx$ 。为了避免切换失败，终端需要在 $[T_1, T_2]$ 之间触发切换，此时用户业务的分组

丢失由 2 部分组成: 切换完成前在 N_1 中的分组丢失和切换完成后在 N_2 中的分组丢失。假设终端在 t 时刻触发切换, 此时用户的分组丢失概率可以表示为

$$P_{\text{loss}}(t) = \frac{\int_{T_1}^{t+T_h} \int_{-\infty}^{P_{\text{rxth1}}-P_1(v_0 y)} \frac{e^{-x^2/2\delta_1^2}}{\delta_1\sqrt{2\pi}} dx dy + \int_{t+T_h}^{T_2} \int_{-\infty}^{P_{\text{rxth2}}-P_2(L-v_0 y)} \frac{e^{-x^2/2\delta_2^2}}{\delta_2\sqrt{2\pi}} dx dy}{T_2 - T_1} \quad (6)$$

所以优化模型进一步变为

$$\min P_{\text{loss}}(t) = \frac{\int_{T_1}^{t+T_h} \int_{-\infty}^{P_{\text{rxth1}}-P_1(v_0 y)} \frac{e^{-x^2/2\delta_1^2}}{\delta_1\sqrt{2\pi}} dx dy + \int_{t+T_h}^{T_2} \int_{-\infty}^{P_{\text{rxth2}}-P_2(L-v_0 y)} \frac{e^{-x^2/2\delta_2^2}}{\delta_2\sqrt{2\pi}} dx dy}{T_2 - T_1} \quad (7)$$

$$\text{s.t. } t \geq T_1 \quad (8)$$

$$t \leq T_2 \quad (9)$$

2.2 最佳切换触发时间

将上述目标函数(7)对 t 求导, 得到:

$$\frac{dP_{\text{loss}}(t)}{dt} = \frac{1}{T_2 - T_1} \cdot \left(\int_{-\infty}^{P_{\text{rxth1}}-P_1(v_0(t+T_h))} \frac{e^{-x^2/2\delta_1^2}}{\delta_1\sqrt{2\pi}} dx - \int_{-\infty}^{P_{\text{rxth2}}-P_2(L-v_0(t+T_h))} \frac{e^{-x^2/2\delta_2^2}}{\delta_2\sqrt{2\pi}} dx \right) \quad (10)$$

在把上式再对 t 求导, 得到:

$$\begin{aligned} & \frac{d^2 P_{\text{loss}}(t)}{dt^2} \\ &= \frac{1}{T_2 - T_1} \left\{ \left(\frac{e^{-[P_{\text{rxth1}}-P_1(v_0(t+T_h))]^2/2\delta_1^2}}{\delta_1\sqrt{2\pi}} \right) \left(-\frac{dP_1(v_0(t+T_h))}{dt} \right) \right\} - \\ & \frac{1}{T_2 - T_1} \left\{ \left(\frac{e^{-[P_{\text{rxth2}}-P_2(L-v_0(t+T_h))]^2/2\delta_2^2}}{\delta_2\sqrt{2\pi}} \right) \left(-\frac{dP_2(L-v_0(t+T_h))}{dt} \right) \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

在用户从网络 N_1 的 BS 处以恒定速度 v_0 向网络 N_2 的 AP 运动的过程中, $P_1(v_0(t+T_h))$ 是 t 的单调递减函数, $P_2(L-v_0(t+T_h))$ 是 t 的单调递增函数, 即: $\frac{dP_1(v_0(t+T_h))}{dt} < 0$, $\frac{dP_2(L-v_0(t+T_h))}{dt} > 0$,

所以有 $\frac{d^2 P_{\text{loss}}(t)}{dt^2} > 0$ 恒成立。根据凸优化理论^[8], 可以

确定上述优化问题是一个凸问题。令 $\left. \frac{dP_{\text{loss}}(t)}{dt} \right|_{t=t_{\text{opt}}} = 0$,

t_{opt} 为理论上的最佳切换触发时间, 则有

$$\int_{-\infty}^{P_{\text{rxth1}}-P_1(v_0(t_{\text{opt}}+T_h))} \frac{e^{-x^2/2\delta_1^2}}{\delta_1\sqrt{2\pi}} dx = \int_{-\infty}^{P_{\text{rxth2}}-P_2(L-v_0(t_{\text{opt}}+T_h))} \frac{e^{-x^2/2\delta_2^2}}{\delta_2\sqrt{2\pi}} dx \quad (12)$$

由于 N_1 和 N_2 是相邻网络, 它们所处的地理环境基本相同, 终端接收到 2 个网络基站的信号强度受到的阴影衰落影响基本相当, 故而可以假设 $\delta_1 = \delta_2$, 则有

$$P_{\text{rxth1}} - P_1(v_0(t_{\text{opt}} + T_h)) = P_{\text{rxth2}} - P_2(L - v_0(t_{\text{opt}} + T_h)) \quad (13)$$

如图 1 所示, 终端在 T_{LU} 时刻接收到网络 N_2 的信号强度恰好为该网络的接收灵敏度, 即有 $P_2(L - v_0 T_{\text{LU}}) = P_{\text{rxth2}}$, 而此时终端也一定处在网络 N_1 的覆盖范围内, 即有 $P_1(v_0 T_{\text{LU}}) \geq P_{\text{rxth1}}$ 。由于 $P_1(v_0 t)$ 是 t 的单调递减函数和 $P_2(L - v_0 t)$ 是 t 的单调递增函数, 并结合式(13), 证明 $t_{\text{opt}} + T_h \geq T_{\text{LU}}$ 。同样, 可以证明 $t_{\text{opt}} + T_h \leq T_{\text{LD}}$ 。又由于 $T_{\text{LU}} = T_1 + T_h$, $T_{\text{LD}} = T_2 + T_h$ 故而 $T_1 \leq t_{\text{opt}} \leq T_2$ 。最终可以看出, 满足原优化问题(7)、(8)、(9)的终端最佳触发切换时间 t_{opt} 一定满足式(14):

$$P_1(v_0(t_{\text{opt}} + T_h)) - P_2(L - v_0(t_{\text{opt}} + T_h)) = P_{\text{rxth1}} - P_{\text{rxth2}} \quad (14)$$

实际无线环境中, 终端接收到网络的信号强度是受到路径损耗和阴影衰落 2 部分影响, 为此式(14)可以转化为如下最优性条件:

$$\left| \text{RSS}_1(t_{\text{opt}} + T_h) - \text{RSS}_2(t_{\text{opt}} + T_h) - (P_{\text{rxth1}} - P_{\text{rxth2}}) \right| \leq \varepsilon \quad (15)$$

其中, ε 为一个很小的正数。

3 算法设计

根据前面的分析, 为了能够准确地预测最佳切换触发时间, 终端首先需要对切换所需要的时间 T_h 进行估计, 根据估计结果确定进行信号强度预测的步长。然后终端采用自回归(AR)模型分别预测其接收到 2 个网络的信号强度, 若预测值满足式(16),

那么 t 时刻就是最佳切换触发时间的预测值，即 $\hat{t}_{opt} = t$ 。

$$\left| \widehat{RSS}_1(t + \hat{T}_h) - \widehat{RSS}_2(t + \hat{T}_h) - (P_{rxth1} - P_{rxth2}) \right| \leq \varepsilon \quad (16)$$

其中， \hat{T}_h 为切换耗时的估计值， $\widehat{RSS}_1(t + \hat{T}_h)$ 和 $\widehat{RSS}_2(t + \hat{T}_h)$ 分别为终端在 t 时刻预测其在 $t + \hat{T}_h$ 时刻接收到 N_1 和 N_2 的信号强度值。

3.1 切换耗时估计

用户在异构网络之间进行切换时，多模终端可以同时使用不同的网络接口进行通信。因此终端在与切换目标网络基站建立连接的过程中，可以继续使用与原网络基站之间的链路进行数据传输。切换耗时^[9]可以分为原接口耗时 (T_{h1}) 和新接口耗时 (T_{h2})，即 $T_h = T_{h1} + T_{h2}$ 。其中， T_{h1} 又包括：链路层的获取目标网络信息时间 (T_{h1-nbr}) 和切换告知时间 (T_{h1-ind})，以及网络层的切换时间 (T_{FH})，即 $T_{h1} = T_{h1-nbr} + T_{h1-ind} + T_{FH}$ ； T_{h2} 包括：扫描切换目标网络时间 (T_{h2-scn}) 和切换执行时间 (T_{h2}^*)，即 $T_{h2} = T_{h2-scn} + T_{h2}^*$ 。在终端执行切换时，原网络接口和新网络接口可以同时进行，所以总的切换耗时如下：

$$T_h = T_{h1-nbr} + T_{h2-scn} + \max(T_{h1-ind} + T_{FH}, T_{h2}^*) \quad (17)$$

在文献[10]提出的分层分布式网络资源管理架构的基础上，对用户在异构网络之间的切换耗时 (T_h) 进行估计。如图 2 所示，用户由 GSM 网络向 WiMAX 网络切换，各环节的耗时估计值分别为 $\hat{T}_{h1-nbr} = 2(\phi\sigma + \theta + \theta + H_{NN}\theta + \theta)$ 、 $\hat{T}_{h1-ind} = 2(\phi\sigma + \sigma + \sigma + H_{MR}\sigma + \sigma)$ 、 \hat{T}_{FH} 、 $\hat{T}_{h2-scn} = 2(\phi\sigma)$ 、 $\hat{T}_{h2}^* = \hat{T}_{ng} + \hat{T}_{cap} + \hat{T}_{key} + \hat{T}_{reg}$ ，其中， σ 表示单位信息在相邻物理实体之间的传输时延， ϕ 表示无线链路中可能存在传输碰撞等导致的时间开销， θ 表示相邻功能实体之间的传输时延， H_{MR} 为 GSM 网络的移动交换中心 (MSC) 与 WiMAX 网络的 Router 之间的跳数， H_{NN} 为管理 2 个网络的网络重构管理器 (NRM) 之间的跳数。 \hat{T}_{FH} 为网络层切换的时延，根据所采用的具体切换协议而定。 \hat{T}_{ng} 、 \hat{T}_{cap} 、 \hat{T}_{key} 和 \hat{T}_{reg} 分别为 WiMAX 网络的同步和搜索、基本能力协商、关键信息交互和鉴权、注册时间^[9]。

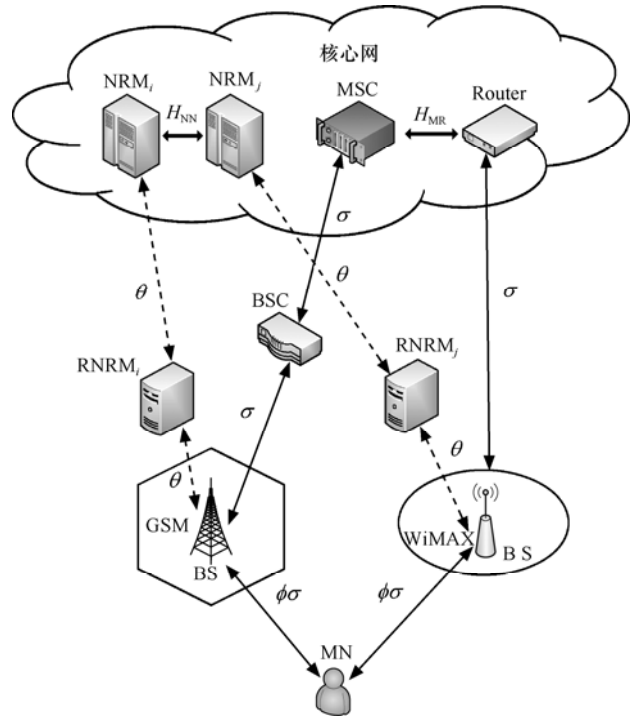


图 2 切换耗时估计

3.2 预测模型

在获得切换耗时估计结果之后，采用 AR 模型^[11]分别对终端接收到当前服务网络和切换目标网络的信号强度进行预测，预测模型如图 3 所示。终端以 T_{samp} 为间隔对其接收到网络的信号强度进行采样，将得到的采样值 $X = \{x(n), x(n-1), \dots, x(n-p+1)\}$ 作为输入序列。若终端切换耗时的估计值为 \hat{T}_h ，则其进行接收信号强度预测的预测步长 K 可以通过式(18)确定：

$$K = \left\lceil \frac{\hat{T}_h + \Delta t}{T_{samp}} \right\rceil \quad (18)$$

其中， Δt 为预测余量， $\Delta t \geq 0$ 。

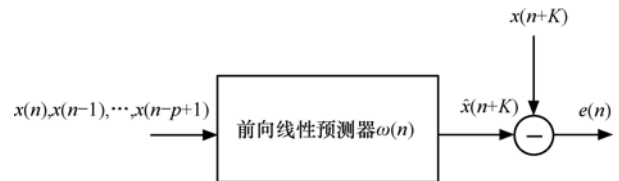


图 3 AR 预测模型

AR 模型的预测结果如下所示：

$$\hat{x}(n+K) = \sum_{i=0}^{p-1} w_{opt}(i)x(n-i) \quad (19)$$

其中， $W_{opt} = \{w_{opt}(0), w_{opt}(1), \dots, w_{opt}(p-1)\}$ 为采用最小

均方误差准则时得到的预测器的最佳权系数向量。

由于终端在短时间间隔内采样得到的接收信号强度会有比较大的波动，为预测带来一定的难度。因此采用加权平滑(WMPM)方法^[12]对采样得到的信号强度进行处理，具体如下：

$$y(n) = \alpha y(n-1) + (1-\alpha)x(n) \quad (20)$$

其中， α ($0 \leq \alpha \leq 1$)为平滑系数， $y(n)$ 为加权平滑后的信号强度值。

3.3 最佳切换触发时间预测

前面分析了最佳切换触发时间的预测值 \hat{t}_{opt} 应满足式(16)，在切换耗时估计结果和 AR 模型预测接收信号强度的基础上，具体的预测步骤如下。

1) 用户发起切换请求，首先对终端的切换耗时进行估计，得到估计结果 \hat{T}_h 。

2) 终端监测其接收到 N_2 网络的信号强度，直至监测到该信号强度大于设定的预测门限值 P_{mit} 时为止，此时的时间为 T_{mit} 。

3) 终端以 T_{samp} 为周期对接收到 N_1 和 N_2 的信号强度分别进行采样，得到采样序列 X_1 和 X_2 ；然后采用加权平滑方法进行处理，得到信号强度序列 Y_1 和 Y_2 。

4) 通过 \hat{T}_h 确定预测步长为 K ，分别将 Y_1 和 Y_2 将作为自回归模型的输入，得到预测值 $\hat{y}_1(n+K)$ 和 $\hat{y}_2(n+K)$ 。若预测值满足式(21)就停止预测，否则继续利用下一组采样序列进行预测，直至该式满足时为止。

$$|\hat{y}_1(n+K) - \hat{y}_2(n+K) - (P_{rxth1} - P_{rxth2})| \leq \varepsilon \quad (21)$$

5) 预测结束时刻就是最佳切换触发时间的预测值，即 $\hat{t}_{opt} = T_{mit} + nT_{samp}$ 。

4 性能仿真

考虑用户由 GSM 网络基站向 WiMAX 网络基站移动的场景，GSM 采用 Okumura-Hata 路径损耗

模型^[13]，WiMAX 采用 Cost231-Hata 路径损耗模型^[13]，分别如下所示：

$$L(\text{dB}) = 69.55 + 26.16 \lg f_c - 13.82 \lg h_b - \alpha(h_m) + (44.9 - 6.55 \lg h_b) \lg d \quad (22)$$

$$L(\text{dB}) = 46.3 + 33.9 \lg f_c - 13.82 \lg h_b - \alpha(h_m) + (44.9 - 6.55 \lg h_b) \lg d \quad (23)$$

其中， f_c 为载波频率(MHz)， h_b 为基站发射天线高度(m)， h_m 为移动终端天线高度(m)， $\alpha(h_m) = 3.2[\lg 11.75h_m]^2 - 4.97$ 为市区天线校正因子(dB)， d 为基站与移动终端之间的距离(km)。各网络参数的具体设置与文献[13]一致，如表 1 所示。

表 1 信道传输模型参数设置

网络类型	载波频率 /MHz	基站高度 /m	终端高度 /m	基站发射功率/dBm	接收机灵敏度 /dBm	覆盖半径 /km
GSM	900	50	1.5	43	-100	3
WiMAX	2 500	50	1.5	53	-90	1.5

在 GSM 网络与 WiMAX 网络覆盖状况如图 4 所示变化时，对比以下几种切换触发时间选择算法的性能。

固定门限触发 (TH) 算法：根据文献[4]， $P_{LGD} = \eta P_{rxth1}$ ($\eta > 1$)， P_{LGD} 表示触发链路即将下降信号(LGD)的信号强度值。一旦终端监测到其接收到 N_1 的信号强度低于 P_{LGD} 时，就触发切换过程。

单一预测当前服务网络信号强度(SP)算法：根据文献[5]，终端只预测其接收到 N_1 的信号强度，预测步长为 K ，若预测值小于 P_{rxth1}^c ，就触发切换过程，其中， P_{rxth1}^c 为补偿后终端在 N_1 中的接收灵敏度。

本文算法 (PS)：终端分别预测接收到 N_1 和 N_2 的信号强度，最终确定最佳切换触发时间的预测值 \hat{t}_{opt} 。

由于导致终端接收信号强度波动的阴影衰落是服从正态分布的，在统计意义上其均值为 0，因此可以把满足式(14)的切换触发时间作为理想最佳

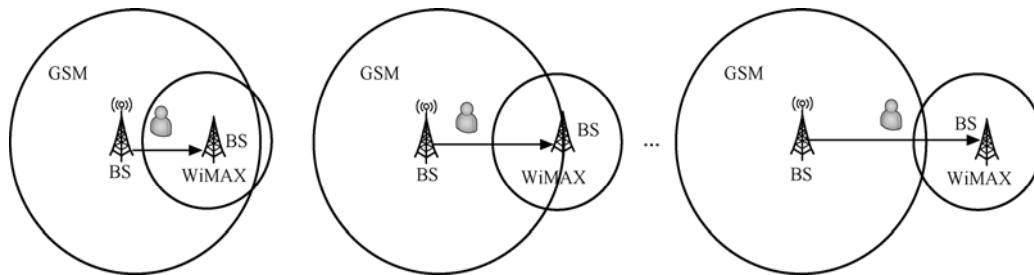


图 4 网络覆盖状况变化

切换触发时间，并把在此时触发的切换的性能作为衡量各种算法的基准。

仿真时的具体参数设置：终端的移动速度为 $v_0 = 10\text{m/s}$ ，信号强度采样的间隔为 $T_{\text{samp}} = 10\text{ms}$ ，终端开始预测接收信号强度的门限 $P_{\text{init}} = -95\text{dB}$ ，切换耗时估计值设定为 $\hat{T}_h = 200\text{ms}$ ，预测余量 $\Delta t = 0$ ，加权平滑系数 $\alpha = 0.9$ ，预测结束门限 $\varepsilon = 0.5$ 。假设信号受到阴影衰落的影响服从均值为 0、方差为 4 的正态分布(dB)。PS 算法采用 10 阶的 AR 预测模型，SP 算法采用 5 阶的 LMS 预测模型，接收灵敏

$$P_{\text{loss}} = \begin{cases} 1, & t < T_1 \\ \frac{\text{sum}\{T_k \mid P_1(T_k) < P_{\text{rxth}1}, T_1 \leq T_k \leq t + \hat{T}_h\} + \text{sum}\{T_k \mid P_2(T_k) < P_{\text{rxth}2}, t + \hat{T}_h < T_k \leq T_2\}}{(T_2 - T_1)}, & T_1 \leq t \leq T_2 \\ \frac{\text{sum}\{T_k \mid P_1(T_k) < P_{\text{rxth}1}, T_1 \leq T_k \leq T_2\}}{(T_2 - T_1)}, & t > T_2 \end{cases} \quad (24)$$

度补偿系数为 $c = 1$ ，TH 算法中 LGD 信号门限设置为 $\eta = 1.5$ 。

采用 MATLAB 仿真软件对比不同的切换触发时间选择算法，考察以下 2 种切换性能指标：切换失败概率和用户的分组丢失概率。切换失败有以下 2 种原因：用户在完成切换前，终端接收到 N_1 的信号强度就已经下降到接收灵敏度之下；用户在切换完成后，终端接收到 N_2 的信号强度尚未达到接收机灵敏度要求。根据终端选择的切换触发时间 t 的不同，用户的分组丢失概率如式(24)所示：

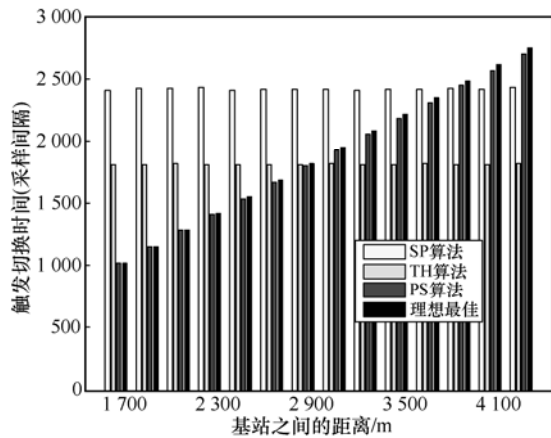


图 5 切换触发时间对比

图 6 给出了不同切换触发时间选择算法的切换失败概率。理想最佳切换触发时间总是能够保证用户成功切换。在基站间距较大时，由于 TH 算法选择的切换触发时间较早，切换完成后终端接收到 WiMAX 的信号强度尚未达到接收灵敏度要求，因此具有很高的切换失败概率。在基站间距离较小

时，由于 SP 算法选择的切换触发时间较晚，切换完成前终端接收到 GSM 的信号强度可能就已经低于接收灵敏度，从而会存在一定的切换失败概率；当基站间距离变大时，切换完成后终端接收到 WiMAX 的信号强度尚未达到接收灵敏度要求就变成了用户切换失败的主要原因。PS 算法选择的切换触发时间最接近于最佳触发时间，只是在网络基站间距较大时，会由于预测误差的影响导致用户出现一定的切换失败现象。

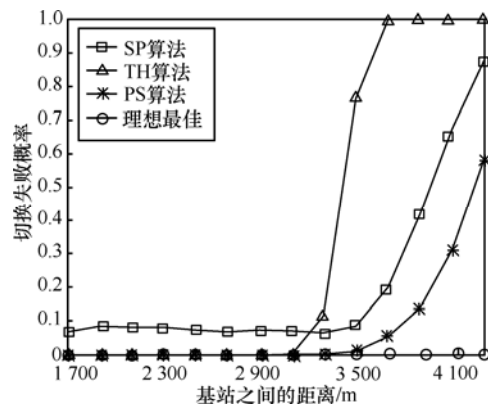


图 6 切换失败概率对比

图 7 给出了不同切换触发时间选择算法下用户的分组丢失率。最佳切换触发时间能够最小化用户的分组丢失概率。随着基站之间距离变大，TH 算法和 SP 算法都会过早触发切换，根据式(24)，用户的分组丢失概率与切换失败概率基本一致。而 PS 算法能够有效地降低用户的分组丢失率。

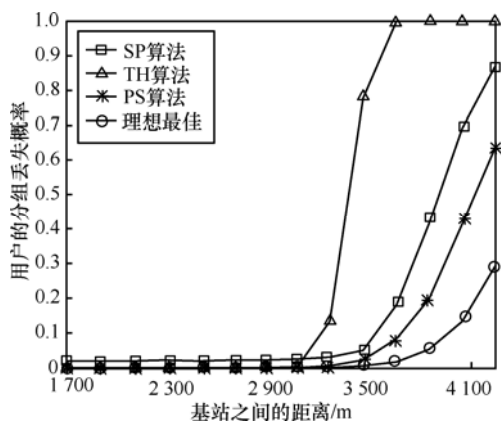


图 7 用户分组丢失概率对比

5 结束语

分析了移动用户在异构网络环境下的切换触发时间选择问题，给出了在理想最佳切换触发时间点处，终端接收到切换前后 2 种网络的信号强度所应满足的条件。在切换耗时估计和信号强度预测的基础上，提出了一种最佳切换触发时间的预测算法。仿真结果表明，本算法能够有效地降低用户的切换失败概率和分组丢失率。在网络重叠覆盖区域变化的情况下，具有较好的适应性。

参考文献:

[1] KASSAR M, KERVELLA B, PUJOLLE G. An overview of vertical handover decision strategies in heterogeneous wireless networks[J]. Computer Communications, 2008, 31(10): 2607-2620.

[2] YAN X H, AHMET Y, NARAYANAN S. A survey of vertical handover decision algorithms in fourth generation heterogeneous wireless networks[J]. Computer Networks, 2010, 54(11):1848-1863.

[3] LEE D, HAN Y, HWANG J. QoS-based vertical handoff decision algorithm in heterogeneous systems[A]. Personal, Indoor and Mobile Radio Communications[C]. Helsinki, Finland, 2006.

[4] WOON S, GOLMIE N, SEKERCIOGLU Y A. Effective link triggers to improve handover performance[A]. Personal, Indoor and Mobile Radio Communications[C]. Helsinki, Finland, 2006.

[5] MA C, FALLON E, QIAO Y S. VOSHM-a velocity optimized seamless handover mechanism for WiMAX networks[A]. The 9th IT & T Conference[C]. Dublin, Ireland, 2009.

[6] YOO S J, CYPHER D, GOLMIE N. LMS predictive link triggering for seamless handovers in heterogeneous wireless networks[A]. Military Communications Conference[C]. Orlando Florida, 2007.

[7] PARK J, LIM Y. A handover prediction model and its application to link layer triggers for fast handover[J]. Wireless Personal Communications, 2010, 52(3):501-516.

[8] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex Optimization[M]. Cambridge, UK: Cambridge Univ Press, 2004.

[9] YOO S J, CYPHER D, GOLMIE N. Predictive handover mechanism based on required time estimation in heterogeneous wireless networks[A]. Military Communications Conference[C]. San Diego, CA, 2008.

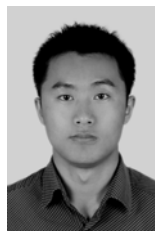
[10] 盛敏. 认知无线网络网间资源联合管理系统架构子报告[R]. 2010. SHENG M. Joint Resource Management System Architecture in Cognitive Wireless Networks[R]. 2010.

[11] 张树京, 齐立心. 时间序列分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003. ZHANG S J, QI L X. Time Series Analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.

[12] MELIA T, OLIVA A, SOTO I. Analysis of the effect of mobile terminal speed on WLAN/3G vertical handovers[A]. Global Telecommunications Conference[C]. San Francisco, CA, 2006.

[13] 吴伟陵, 牛凯. 移动通信原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005. WU W L, NIU K. Mobile Communication Principle[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.

作者简介:



闫继垒 (1986-), 男, 河北承德人, 西安电子科技大学博士生, 主要研究方向为认知无线网络和异构无线网络中的资源管理。



李建东 (1962-), 男, 江苏阜宁人, 博士, 西安电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为宽带移动通信、认知无线电和网络、自组织网络、宽带无线 IP



赵林靖 (1976-), 女, 陕西西安人, 西安电子科技大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为软件无线电、认知无线电、认知网络、宽带无线传输等。