

异构无线网络中多模终端多接入选择机制研究

范文浩^{1,2}, 刘元安^{1,2}, 吴帆^{1,2}

(1. 北京邮电大学 无线通信与电磁兼容实验室, 北京 100876; 2. 北京邮电大学 电子工程学院, 北京 100876)

摘要: 为进一步提升多模移动终端的传输性能和服务连续性, 设计了一种利用异构无线网络多无线传输分集进行多网络同时接入和并行传输的多模终端多接入选择机制, 该机制应用指数平滑方法处理已测量参数; 使用状态转移模型管理终端多个网卡的接入选择策略; 采用效用函数动态平衡终端功耗与传输速率。仿真结果表明与传统切换式接入选择相比, 所提出的方法显著减少了不必要的接入重选次数, 并在保证终端功耗与吞吐量的前提下提高了传输能效。

关键词: 网络接入选择; 异构无线网络; 多无线传输分集; 并行传输; 指数平滑法; 状态转移; 效用函数

中图分类号: TN915.07

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)07-0183-08

Research on multi-access selection mechanism for multi-mode terminals in heterogeneous wireless networks

FAN Wen-hao^{1,2}, LIU Yuan-an^{1,2}, WU Fan^{1,2}

(1. Wireless Communications and EMC Laboratory, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. Dept. of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Aiming at further promoting the multi-mode terminal's transmission performance and service continuity, a multi-access selection mechanism for multi-mode terminals which exploits the multi-radio transmission diversity of the heterogeneous wireless networks for accessing multiple networks simultaneously and executing parallel transmission was designed. The mechanism applied exponential smoothing method to process the measured parameters; used state transition models to manage access selection strategies of terminal's multiple network interface cards; adopted utility functions to dynamically balance terminal's power consumption and transmission speed. Simulation results demonstrate the decrease of unnecessary re-selections, the enhancement of transmission energy efficiency under the premise of the guarantee of terminal's power consumption and throughput compared with the traditional switched access selection.

Key words: network access selection; heterogeneous wireless networks; multi-radio transmission diversity; parallel transmission; exponential smoothing method; state transition; utility function

1 引言

在多种无线通信技术及相关标准持续飞速发展的趋势下, 异构无线网络的并存现状正逐渐向着

系统集成与相互协作的方向发生变革。下一代无线网络系统将会融合多种无线接入技术, 并具备统一的数据链路层与其他相关的上层功能模块^[1-4], 为用户获取一致的网络服务提供丰富的无线接口, 从而

收稿日期: 2011-10-08; 修回日期: 2012-05-31

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目 (2010ZX03002-005-02, 2010ZX03006-005-02, 2012ZX03001001-002); 江苏省科技基金资助项目 (BC2010018); 北京市共建基金资助项目

Foundation Items: The National Science and Technology Major Project (2010ZX03002-005-02, 2010ZX03006-005-02, 2012ZX03001001-002); The Technology Project of Jiangsu Province (BC2010018); The Cooperation Program of Beijing

进一步推动无线网络接入的技术模式与商业模式的深层转化。

与传统同构无线网络相比，异构无线网络中无线接入技术的异构性为终端网络接入选择机制引入了一些新的特性。配备多个网络接口卡（以下简称网卡）的多模移动终端能够感知周围多种无线接入技术的存在并且必要时在它们中进行接入选择和转换。传统的多模移动终端从多个无线网络中仅选择接入其中一个获取网络服务，之后在运行中根据所处通信环境和其他条件将当前网络连接垂直切换^[5]至另一网络。为了进一步接近“始终最佳连接”的移动通信目标，利用多无线传输分集^[1,3,6,7]，多模移动终端可选择同时接入多个无线网络并使用合适的调度策略在所有已连接链路上进行数据的并行传输，由于对多个无线网络的并行利用，该方式可以有效地提高终端的传输性能。

异构无线网络接入选择算法的研究已经取得了一些有价值的成果，基本可以归类为基于终端控制、网络控制以及二者的混合或变种方法。在终端控制的网络接入选择方法中，移动终端负责自主完成网络参数测量、网络接入选择决策和接入过程。由于移动终端能够有效地收集其自身和其周围无线环境的相关信息，并且适合以此信息在本机直接处理决策和执行接入，因此这种方式的网络接入选择具有较高的效率。为了提高移动终端的传输性能并改善其服务质量，多种算法相继提出，它们一般基于策略驱动、模糊逻辑、神经网络、多属性决策和上下文感知概念等^[8-10]，但这些研究大量集中于垂直切换方式并仅使用单链路进行数据传输。在多无线网络接入与并行传输方面，文献^[11]提出了一种涉及到在多个无线接入网络中并行传输的算法，其中多参数策略驱动与集合的概念被应用于所设计的面向进程的决策制定机制。尽管如此，着重于多无线传输分集的网络接入选择机制的研究目前仍然不足，因此很有必要在该领域展开新方法的研究并对已有方法进行改进。

为有效利用异构无线网络的多无线传输分集，本文提出了一种基于多模终端控制的多网络接入选择机制。该机制由本文设计的系统框架承载运行，其启动受终端接收信号强度值控制，其决策执行受终端网卡数据传输的吞吐量和功耗的测量值影响。本文使用指数平滑法处理已测量参数，以减少无线环境的波动而带来的网络重复选择；设计终

端网卡状态转移模型，根据终端网卡状态将网卡归类于不同的状态空间从而进行接入选择判决；考虑多模终端在数据传输时不同的能量限制和吞吐量需求，将它们分别参数化为高低边界阈值，通过效用函数在阈值限定范围内动态平衡终端功耗与传输速率，在限制多模终端传输能耗和保证传输连续性的前提下最大化传输能效。

2 多模终端多接入选择系统框架

多模移动终端配备有多个网卡，以满足通过不同无线接入技术访问网络服务的需求。在本文所提出的多模终端多接入选择机制中，多模终端全权负责网络参数测量、网卡状态转移、接入选择决策计算与执行过程的管理。以上功能均由多模终端中各个无线接入技术的网卡管理模块与多模终端系统中的多接入选择管理模块负责实施，由上述模块组成的终端多接入选择系统框架如图 1 所示。

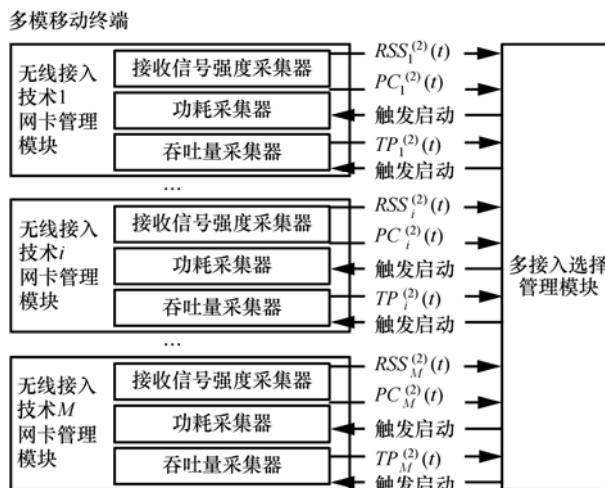


图 1 终端多接入选择系统框架

2.1 网卡管理模块

对于任意无线接入技术（RAT, radio access technology） i ，其网卡管理模块采用跨层设计方法，集成了接收信号强度采集器、功耗采集器和吞吐量采集器 3 个子模块，负责在系统各层测量、计算和收集终端对 RAT i 的接收信号强度、网卡功耗与数据吞吐量的原始信息，然后经指数平滑法计算后，将它们提交给多接入选择管理模块。

由于无线环境的复杂性和不稳定性，并受到信道质量、网络负载和其他因素突发变化而带来的严重影响，RAT 的接收信号强度和吞吐量的测量经常会产生大量瞬时陡变值。因此，基于这种对参数瞬

时离散、重复测量的决策可能引发乒乓效应，从而带来不必要的网络频繁重选和系统性能下降。指数平滑法是一种产生平滑时间序列值的统计方法，它以固定时间间隔对目标对象当前的测量值和过去的计算值分别分配按指数递减的平滑权重，其中平滑权重的数量由参与当前值计算的过去计算值数量决定。本文使用单平滑参数的二次指数平滑法，可以表述为

$$\begin{cases} x^{(2)}(k\Delta T_x) = \alpha x^{(1)}(k\Delta T_x) + (1-\alpha)x^{(2)}((k-1)\Delta T_x), & k > 0 \\ x^{(1)}(k\Delta T_x) = \alpha x(k\Delta T_x) + (1-\alpha)x^{(1)}((k-1)\Delta T_x), & k > 0 \\ x^{(2)}(0) = x^{(1)}(0) = x(0), & k = 0 \end{cases} \quad (1)$$

对象 x 在以非负整数索引 $k = 0$ 为起点且以 ΔT_x 为时间间隔的时间序列中， $x(k\Delta T_x)$ 、 $x^{(1)}(k\Delta T_x)$ 和 $x^{(2)}(k\Delta T_x)$ 分别为时刻 $k\Delta T_x$ 的测量值、单平滑参数一次和单平滑参数二次平滑指数法计算值。 α 是范围为 $(0,1)$ 的平滑参数。

采用平滑指数法后，接收信号强度和吞吐量的测量可显著减少不必要的网络接入选择频率和由此产生的成本。假设多模移动终端的网卡集合为 $M = \{1, \dots, M\}$ ，在时刻 t 时，RAT i ($i \in M$) 网卡的接收信号强度 $RSS_i(t)$ 、网卡功耗 $PC_i(t)$ 和数据吞吐量 $TP_i(t)$ 值分别由终端的信号检测电路、电源管理电路和协议栈组件测定。随后，经单平滑参数二次指数平滑计算后， $RSS_i^{(2)}(t)$ 、 $PC_i^{(2)}(t)$ 和 $TP_i^{(2)}(t)$ 被提交到多接入选择管理模块。

2.2 多接入选择管理模块

多接入选择管理模块通过模块间指令交互和数据传输来与各网卡管理模块交互信息。它负责检测每个网卡的状况，处理每个网卡的状况转移并在进行决策计算后执行网络选择。

出于节约终端能量的考虑，多接入选择管理模块通过发送触发命令，控制各网卡管理模块中的功耗采集器和吞吐量采集器的启动与关闭。当满足条件 $RSS_i(t) \geq RSS_i^{th_low}$ 时，功耗采集器和吞吐量采集器就会被激活；反之，当满足条件 $RSS_i(t) < RSS_i^{th_low}$ 时，功率消耗采集器和吞吐量采集器就会被关闭。其中阈值 $RSS_i^{th_low}$ 是 RAT i 网卡进行正常数据传输操作所需的接收信号强度的下限值。

另外，作为多模终端多接入选择系统运行的触发点，接收信号强度采集器需随网卡一同启动，并一直保持在工作状态中。

3 多模终端多接入选择算法

本文所提出的多模终端多接入选择系统的核心算法，通过将图 2 所描绘的多模移动终端各个网卡的状况转移模型封装到多接入选择管理模块中运行的，实现对网络接入选择管理灵活和高效的抽象。

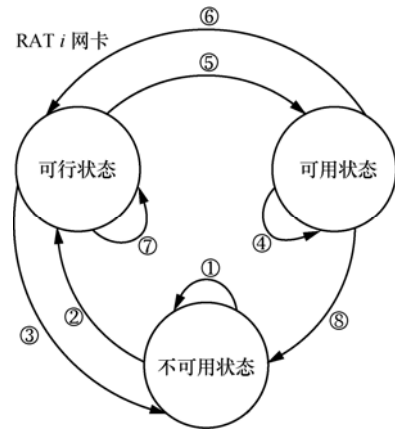


图 2 终端 RATi 网卡状态转移模型

多接入选择管理模块采用 3 个状态空间来统一管理每个网卡的 3 个状态（不可用状态、可行状态与可用状态），具体情况如下。

3.1 不可用空间

不可用空间 (unavailable space) 包含已关闭网卡、未侦测到无线网络信号的已开启网卡或者所侦测到的接收信号强度值低至不能保证正常数据传输的已开启网卡。该空间可描述为

$$U = \{i \mid RSS_i(t) < RSS_i^{th_low}, i \in M\} \quad (2)$$

网卡的功耗采集器和吞吐量采集器在该状态下保持关闭。

3.2 可行空间

可行空间 (feasible space) 包含所侦测到的接收信号强度值足以保证正常数据传输的已开启网卡。该空间可描述为

$$F = \{i \mid RSS_i(t) \geq RSS_i^{th_low}, i \in M\} \quad (3)$$

网卡的功率消耗采集器和吞吐量采集器在该状态下被激活，并且开始将 $PC_i^{(2)}(t)$ 和 $TP_i^{(2)}(t)$ 提交至多接入选择管理模块。

3.3 可用空间

可用空间 (available space) 包含正在进行数据单链路传输的单个可行网卡或者正在进行多链路并行传输的多个可行网卡。定义 J 为 F 的任意一个

大小为 I 的子集, $TP_J(t)$ 与 $PC_J(t)$ 分别指在时刻 t , 集合 J 中网卡参与 (并行) 传输的数据吞吐量和功耗。由此, 在时刻 t , 基于单位功耗的数据吞吐量得出的终端数据传输能效可以由以下效用函数给出

$$E_J(t) = I \frac{TP_J(t)}{PC_J(t)}, \quad J \subseteq F \quad (4)$$

可用空间表示在终端能耗最高限制和数据吞吐量最低需求下, 可行空间 F 的所有子集中具有最高数据传输能效的网卡集合, 可描述为

$$A = \arg \max_J (E_J(t)) \quad (5)$$

约束于

$$\begin{cases} PC_J(t) \leq PC^{\text{th_high}} \\ TP_J(t) \geq TP^{\text{th_low}} \end{cases}, \quad J \subseteq F \quad (6)$$

其中, 阈值 $PC^{\text{th_high}}$ 用于传输的终端功耗上限值, 以避免由传输能耗过高导致的终端能量快速下降; 阈值 $TP^{\text{th_low}}$ 表示终端为确保传输需求所需吞吐量的下限值, 以保证终端的数据传输速率满足终端业务需求, 并避免在网络重选后数据传输速率发生大幅衰落。根据式(5)和式(6), 在数据传输过程中, 在以上 2 个阈值划定的范围内动态平衡功耗和传输性能, 在限制多模终端传输能耗和保证传输连续性前提下最大化传输能效。从可行空间 F 的子集中筛选出的满足功耗限制与吞吐量需求, 并具有最大数据传输能效的单个或多个网卡, 会被选中用于单链路传输或多链路并行传输。

3.4 网卡状态转移

由于终端移动性、能量、网络服务质量、接收信号强度、功耗和吞吐量值会随着终端自身条件和其所处外部环境的改变而不断变化, 因而会引发如图 2 所示的事件, 导致网卡状态的转移。

当 RAT i 网卡满足式 (2) 中所示条件时, 将引发事件①、③、⑧ (如图 2 所示), 网卡由以上事件转移为或者停留在不可用状态; 当 RAT i 网卡满足式 (3) 中所示的条件时, 将引发事件②和⑦, 网卡由以上事件转移为或者停留在可行状态; 当 RAT i 网卡满足式 (5) 和式 (6) 所示的所有条件时, 将引发事件④和⑤, 网卡由以上事件转移为或者停留在可用状态; 当 RAT i 网卡不满足式 (5) 和式 (6) 中所示的任意条件时, 将引发事件⑥, 网卡由该事件转为可行状态。

4 性能评估

4.1 仿真模型与参数

本文所提出系统的性能评估是在 4 个采用不同 RAT 的基站与一个支持以上所有 RAT 的多模移动终端的场景下进行仿真进行的。为了便于仿真计算, 终端的平面移动轨迹可拉伸为直线, 将仿真平面拓扑转化为直线拓扑模型。如图 3 所示, 假设 4 个基站均工作于不同频段, 相互之间无干扰, 分别采用 RAT 1、RAT 2、RAT 3 和 RAT 4, 并沿直线排布于总距离为 D 的路径上, 相邻基站间距离为 $D/3$, 终端在该路径上均处于各个基站的有效信号覆盖范围内, 且忽略在网络重选过程中的时延与各项开销。从时刻 0 起始, 多模移动终端从 RAT 1 基站向 RAT 4 基站方向直线移动, 在移动过程中终端与各基站交互并进行数据传输, 当终端移动至 RAT 4 处时, 仿真结束。

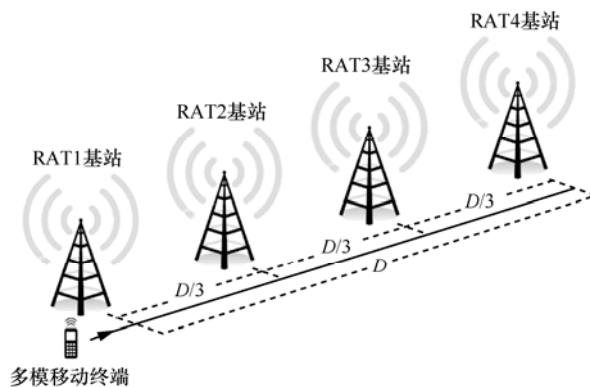


图3 仿真场景示意

根据文献[12]中描述的无线信道传播模型, 与基站距离为 d 处的路径损耗简化为

$$PL_i(d) = PL_i^0 + 10n \lg(d/d_0) + X(\mu_{PL}, \delta_{PL}) \quad (7)$$

其中, RAT i 基站的 PL_i^0 和 n 是依赖于无线环境、RAT 及其基站特性的参考距离 d_0 处的路径损耗和路径损耗指数。 $X(\mu_{PL}, \delta_{PL})$ 是满足高斯分布的均值为 μ_{PL} , 方差为 δ_{PL} 的随机阴影衰落。因此, 假设 RAT i 基站的固定发射功率为 P_i^{th0} , 则与该基站距离为 d 处的终端接收信号强度 RSS_i 可以由式(8)得到。

$$RSS_i(d) = P_i^{\text{th0}} - PL_i(d) \quad (8)$$

另外, 为保证数据正常传输, RAT i 基站所需的最小接收功率阈值为 P_i^{th0} , 因而与该基站距离为 d 处的终端的传输功率 P_i^{tr} 可以由式(9)得到

$$P_i^{\text{tr}}(d) = P_i^{\text{th0}} + PL_i(d) \quad (9)$$

因此，终端功耗 $PC_A(t)$ 可简化为

$$PC_A(t) = \sum_{i \in A} PC_i^{(2)}(t) \quad (10)$$

$$PC_i(t) = PC_i^{th0} + PC_i^{no} + \beta_i P_i^u(t) \quad (11)$$

其中， $PC_A(t)$ 是可用空间 A 中每个网卡的平滑功耗 $PC_i^{(2)}(t)$ 之和； $PC_i(t)$ 由终端固定发射功耗 PC_i^{th0} 、固定接收功耗 PC_i^{no} 与时刻 t 时的 $P_i^u(t)$ 与实际功耗转换系数 β_i 的乘积组成。

本文使用香农信道容量公式计算多模移动终端的 RAT i 网卡在时刻 t 时的吞吐量 $TP_i(t)$ 表示为

$$TP_i(t) = \lambda_i(t) \gamma_i B_i \text{lb} \left(1 + \frac{RSS_i(t)}{N} \right) \quad (12)$$

其中， B_i 是 RAT i 基站为终端分配的带宽；终端的噪声功率 N 理想化为加性高斯白噪声； $\gamma_i \in (0,1]$ 表示由 RAT i 的上层协议开销引起的损耗比率； $\lambda_i(t) \in (0,1]$ 表示在时刻 t 吞吐量的实际利用率。

在多链路并行传输中，考虑到非最优的分组调度策略带来的传输损耗，多模移动终端的实际吞吐量 TP_A 可近似为在 A 中的每个 RAT i 网卡平滑处理后的吞吐量之和与损耗因子 ρ 的乘积

$$TP_A(t) = \rho \sum_{i \in A} TP_i^{(2)}(t) \quad (13)$$

仿真中参数设置如表 1 所示，参数设定具体参考文献[13~15]中的相关标准。

4.2 指数平滑法分析

本文通过仿真不同无线衰落环境下终端在移动全过程中其 RAT 1 网卡的接收信号强度触发频率，研究指数平滑法的作用效果。使 δ_{PL} 从 0dB 逐

渐增加到 10dB 来逐渐加剧信道变化幅度，如图 4 所示，经过单参数一次和单参数二次指数平滑法处理的接收信号强度超过 $RSS_i^{th,low}$ 的触发次数相比于未使用指数平滑法的有较大幅度的下降，其中，单参数二次指数平滑法进一步降低了终端接收信号强度的突变情况。

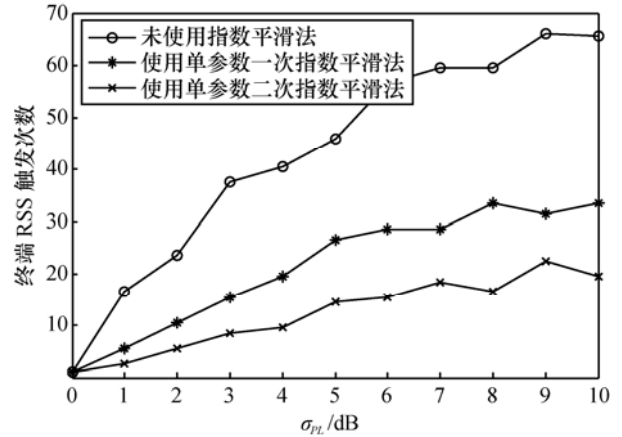


图 4 δ_{PL} 变化下的终端 RSS 触发次数

4.3 并行与切换式传输分析

为了表征各基站特性，本文对全程接入单一 RAT 基站时，终端吞吐量和能耗随距离的变化情况进行仿真，结果如图 5 和图 6 所示。

分别对在默认 $PC^{th,high}$ 与 $TP^{th,low}$ 参数下采用本文所提出算法的终端多链路并行传输（以下简称并行传输）的网络接入选择与传统的单链路切换式传输（以下简称切换式传输）的网络接入选择进行了仿真评估。网络接入选择结果如图 7 所示，与切换

表 1

仿真参数

参数类型	参数值	参数类型	参数值			
			RAT 1	RAT 2	RAT 3	RAT 4
α	0.5	PL_i^0	50dB	45dB	40dB	55dB
D	2000m (默认值)	$RSS_i^{th,low}$	-105dBm	-108dBm	-103dBm	-102dBm
n	3	P_i^{th0}	30dBm	35dBm	45dBm	40dBm
μ_{PL}	0	P_i^{no}	-103dBm	-108dBm	-105dBm	-106dBm
δ_{PL}	5dB (默认值)	PC_i^{no}	20mW	12mW	15mW	18mW
d_0	100m	PC_i^{th0}	17mW	9mW	12mW	15mW
ρ	0.9	β_i	200	140	160	180
$PC^{th,high}$	110mW (默认值)	γ_i	0.65	0.75	0.7	0.8
$TP^{th,low}$	3.5Mbit/s (默认值)	B_i	0.35MHz	0.3MHz	0.25MHz	0.4MHz

式传输下依次接入各基站相比，在并行传输下，多模终端在仿真过程中经历了同时接入多个基站并在移动中进行重选的过程。

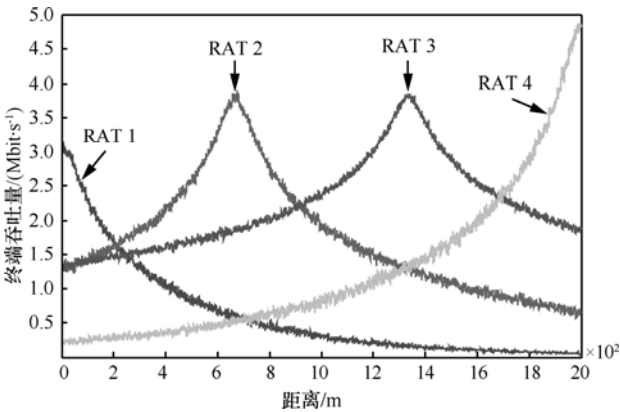


图 5 全程接入单一 RAT 基站时终端吞吐量随距离的变化情况

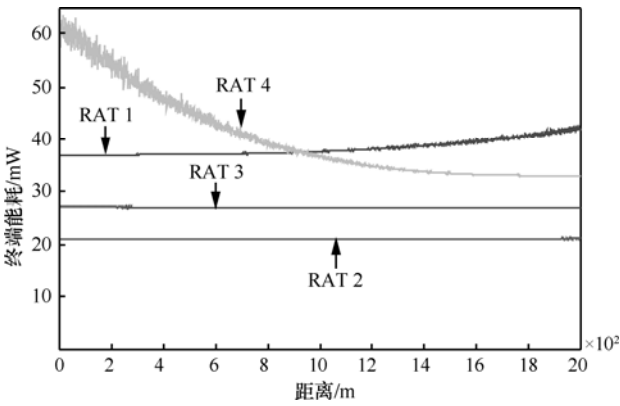


图 6 全程接入单一 RAT 基站时终端能耗随距离的变化情况

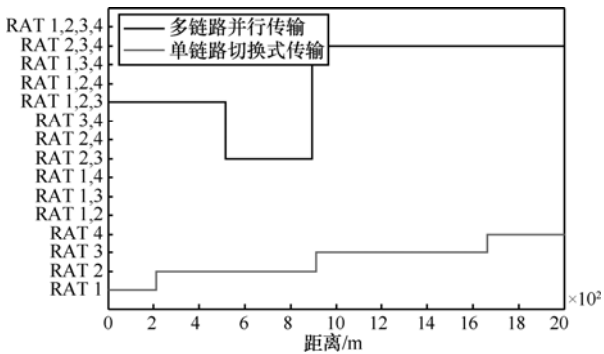


图 7 默认参数下并行传输与切换式传输终端网络接入选择

同时使用 RAT 1, 2, 3 网卡、RAT 2, 3 网卡与 RAT 2, 3, 4 网卡进行并行传输的终端数据传输能效曲线如图 8 所示（为便于辨识，其余组合已省略）。可见，算法始终选择传输能效最高的 RAT 组合，因此终端在移动过程中分别在位置 A 与位置 B 处进行网络接入重选，之后接入对应的基站。

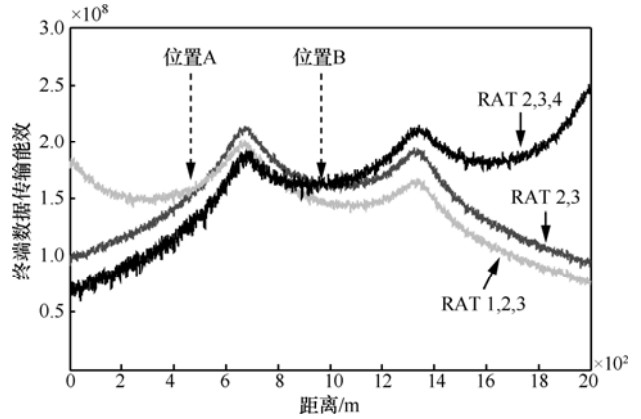


图 8 默认参数下并行传输终端数据传输能效

并行传输与切换式传输下终端吞吐量与能耗情况如图 9 和图 10 所示，可见前者明显能够为终端提供更高的数据传输速率，提升终端业务的数据传输性能，但同时也相应增加了传输能耗，降低了终端的待机时间。另外，由于算法在终端功耗限制 PC^{th_high} 与吞吐量需求 TP^{th_low} 之间动态平衡，因此并行传输的终端吞吐量始终未低于 3.5Mbit/s，功耗始终未高于 110mW。

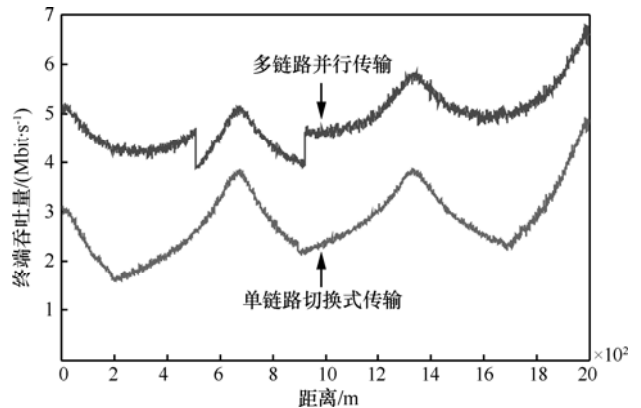


图 9 默认参数下并行传输与切换式传输终端吞吐量

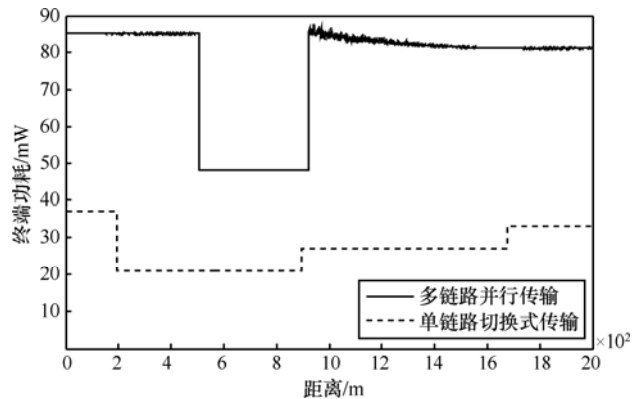


图 10 默认参数下并行传输与切换式传输终端能耗

4.4 功耗与吞吐量阈值参数分析

为评估在不同终端功耗限制与吞吐量需求下的算法性能，本文对使用 $PC^{th_high} = 150mW$ ， $TP^{th_low} = 4.25Mbit/s$ （以下简称参数设置 1）与 $PC^{th_high} = 70mW$ ， $TP^{th_low} = 2Mbit/s$ （以下简称参数设置 2）2 种参数下的并行传输分别进行了仿真。多模终端网络接入选择结果如图 11 所示，前者由于较高的能耗限制值和吞吐量需求，因此在仿真过程中使用了同时 4 种 RAT 网卡并行传输以增大终端吞吐量；后者则相反，全程仅同时使用 2 种 RAT 网卡并行传输以降低终端能耗。

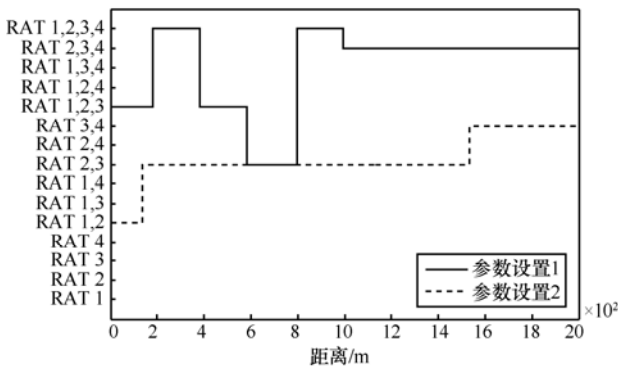


图 11 不同功耗限制与吞吐量需求下的并行传输终端网络接入选择

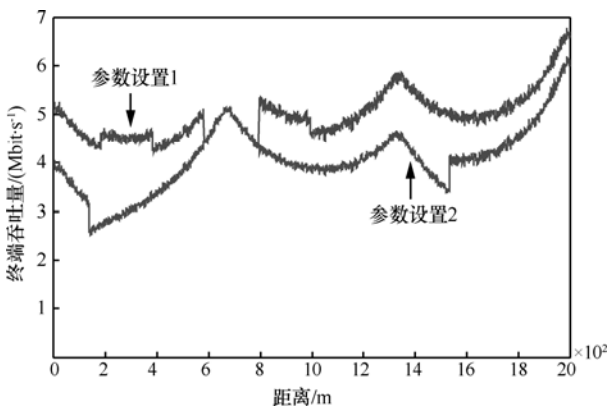


图 12 不同功耗限制与吞吐量需求下的并行传输终端吞吐量

2 种参数设置下的并行传输终端吞吐量与能耗情况如图 12 和图 13 所示，其中，参数设置 1 的终端吞吐量始终未低于 4.25Mbit/s，功耗始终未高于 150mW；参数设置 2 的终端吞吐量始终未低于 2Mbit/s，功耗始终未高于 70mW，均满足各参数限制条件。可见，应用本算法，多模终端可通过对阈值 PC^{th_high} 和 TP^{th_low} 的设置来反映终端业务对传输能耗的限制与传输速率的基本需求，进而影响并行传输的并发度。 PC^{th_high} 越低，意味着可用于传输的能量越低， TP^{th_low} 越低，意味着可保证终端业务正

常运行所需的传输速率越低，因此并行传输所需的并发度就越低，参与并行传输的 RAT 就越少；反之， PC^{th_high} 越高，意味着为传输提供的可用能量越高， TP^{th_low} 越高，意味着可保证终端需要更高的传输速率来保证业务正常运行，因此并行传输所需的并发度就越高，参与并行传输的 RAT 也就越多。另外， PC^{th_high} 与 TP^{th_low} 也同时保证了在网络重选后终端能耗与吞吐量满足基本需求，不至于引起大幅衰落，防止终端能耗过载并保持终端业务的数据连续性。

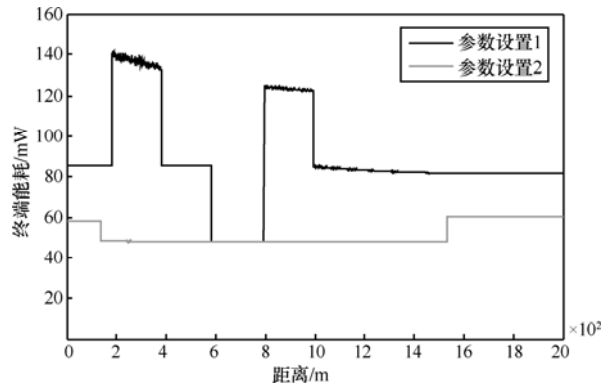


图 13 不同功耗限制与吞吐量需求下的并行传输终端能耗

5 结束语

异构无线网络的终端多接入选择机制是发起并维持多模移动终端多链路并行传输的核心过程，该机制根据相应算法，从终端配备的所有可行的无线接入技术中选择一个合适的组合参与传输，从而提升终端服务连续性和传输性能。因此，有必要对该领域展开详尽的研究。为了有效地利用多无线接入网络中的多无线电传输多样性，本文提出了一种基于异构无线网络的终端多接入选择机制，该机制通过指数平滑方法处理已测得的网卡接收信号强度、功率消耗和吞吐量参数，通过状态转移模型管理由事件触发引起的网卡状态变化，通过效用函数在终端功耗与吞吐量阈值范围内平衡终端能耗和数据传输速率，以此选择参与并行传输的网卡。与传统的切换式传输方法相比，仿真结果显示该机制能够显著减少不必要的重复选择，并在保证终端功耗与吞吐量的前提下明显提高终端数据传输性能。

参考文献：

[1] DIMOU K, AGÜERO R, BORTNIK M, *et al.* Generic link layer: a solution for multi-radio transmission diversity in communication networks beyond 3G[A]. IEEE VTC-2005 Fall[C]. 2005. 1672-1676.

[2] SACHS J, AGÜERO R, BERG M, *et al.* Migration of existing access networks towards multi-radio access[A]. IEEE VTC-2006 Fall[C]. 2006. 1-5.

[3] BERRGGREN F, BRIA A, BADIA L, *et al.* Multi-radio resource management for ambient networks[A]. IEEE PIMRC 2005[C]. 2005. 942-946.

[4] FERRUS R, SALLENTO O, AGUSTI R, *et al.* Interworking in heterogeneous wireless networks: comprehensive framework and future trends[J]. IEEE Wireless Communications, 2010, 17(2): 22-31.

[5] MCNAIR J, ZHU F. Vertical handoffs in fourth-generation multinet environments[J]. IEEE Wireless Communications, 2004, 11(3): 8-15.

[6] KOUDOURIDIS G P, KARIMI H R, DIMOU K. Switched multi-radio transmission diversity in future access networks[A]. IEEE VTC-2005 Fall[C]. 2005. 1672-1676.

[7] YAVER A, KOUDOURIDIS G P. Utilization of multi-radio access networks for video streaming services[A]. IEEE WCNC 2009[C]. 2009. 1-6.

[8] 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.

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

[10] MÁRQUEZ-BARJA J, CALAFATE C T, CANO J C, *et al.* An overview of vertical handover techniques: algorithms, protocols and tools[J]. Computer Communications, 2011, 34(8): 985-997.

[11] YANG K, GONDAL I, QIU B. Context aware vertical soft handoff algorithm for heterogeneous wireless networks[A]. IEEE VTC-2008 Fall[C]. 2008. 1-5.

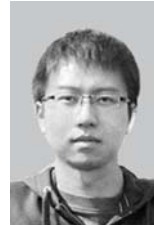
[12] SARKAR T K, JI Z, KIM K, *et al.* A survey of various propagation models for mobile communication[J]. IEEE Antennas Propagation Magazine, 2003, 45: 51-82.

[13] EDGE, HSPA, LTE americas white paper[EB/OL]. <http://www.4gamericas.org>.

[14] IEEE 802.11 standards[EB/OL]. <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.11.html>.

[15] IEEE 802.16 standards[EB/OL]. <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.16.html>.

作者简介:



范文浩 (1986-), 男, 青海西宁人, 北京邮电大学博士生, 主要研究方向为智能移动终端、无线网络接入与无线传感器网络关键技术等。



刘元安 (1963-), 男, 四川乐至人, 博士, 北京邮电大学教授, 主要研究方向为宽带移动通信、电磁兼容与无线网络接入技术等。



吴帆 (1981-), 女, 广西柳州人, 博士, 北京邮电大学讲师, 主要研究方向为无线传感器网络与无线网络接入技术等。

(上接第 182 页)

[21] KAWAMOTO M, INOUE Y, LIU R. Blind deconvolution algorithms for MIMO-FIR channels driven white but fourth-order colored signals[A]. Proc 34th Asilomar Conf Signal, Systems, and Computers[C]. 2000. 1202-1206.

[22] XAVIER J, BARROSO V, MOUNT J. Closed-form correlative coding (CFC2) blind identification of MIMO channels: Isometry fitting to second order statistics[J]. IEEE Trans Signal Processing, 2001, 49(5): 1073-1086.

[23] BRADARIC I, PETROPULU A, DIAMANTARAS K. Blind MIMO FIR channel identification based on second-order spectra correlations[J]. IEEE Trans Signal Processing, 2003. 51(6): 1668-1674.

[24] LIU R W, INOUE Y. Direct blind deconvolution of multichannel

systems[A]. Proc ISCAS'99[C]. 1999. 49-52.

作者简介:



郭滨 (1965-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 长春理工大学副教授, 主要研究方向为智能信号处理与无线通信。



白雪梅 (1976-), 女, 黑龙江齐齐哈尔人, 博士, 长春理工大学讲师, 主要研究方向为智能信号处理。