

异构网络多网共存环境中网络资源分配技术的研究

朱文红¹ 任海军² 吴良俊² 吕琳洁² 王 博²

(广东电网有限责任公司电力调度中心通信管理部 广州 510600)¹

(重庆小目科技有限责任公司 重庆 401121)²

摘 要 现代社会经济的快速发展促使我国无线通信技术领域的技术不断进步,无线资源以及业务服务发展之间的矛盾也在这个过程中进一步加剧。多种类型的接入技术发展形成了异构网络环境,基于此形成的多网覆盖网络选择以及资源利用效率等研究逐步形成。异构网络中多网共存环境下的资源分配技术是当前阶段最重要的技术类型。异构网络中主要存在集中、分布以及混合结构类型模式。分布式模式作为其中一种应用性、适应性较强的模式,得到了较广泛的应用。因为多 RATs 覆盖条件下的属性信息本身具有较为复杂的特征,侧重从模糊逻辑视角形成了将用户作为中心内容的网络选择算法,并通过这种方式进行拓展,建立网络资源分配技术研究。

关键词 异构网络,多网环境,网络资源分配

中图法分类号 TN91 文献标识码 A

Research of Network Resource Allocation Technology in Heterogeneous Multinetwork Environment

ZHU Wen-hong¹ REN Hai-jun² WU Liang-jun² LV Lin-jie² WANG Bo²

(Department of Communication Management, Electric Power Dispatching Center, Guangdong Power

Grid Corporation, LTD, Guangzhou 510600, China)¹

(Chongqing Xiaomu Technology Corporation, LTD, Chongqing 401121, China)²

Abstract With the rapid development of modern social economy, the contradiction between the development of wireless communication technology, wireless resources and business services has become more and more intensified. Many types of access technologies have formed a heterogeneous network environment. Based on this, the resource allocation technology is the most important technology in the current stage. Because of the application of the property information under the condition of multi RATs, this paper mainly focused on the network selection algorithm, which will be used as the central content.

Keywords Heterogeneous network, Multinetwork environment, Network resource allocation

异构无线网络可以为用户提供十分重要的接入以及数据传输与多种类型业务的开发平台,同时随着现代社会经济以及通信技术的发展,无线接入技术的网络部署与使用逐渐得到了认可与推广。多种类型的蜂窝移动技术长期共存,2G、2.5G、2.75G、3G、3.5G 以及 4G 技术不断发展。现阶段,除了上述技术内容,还有其他多种类型的接入技术形成,其中包括了 IEEE 系列以及卫星移动通信等等。未来无线通信技术发展势必会更多地使用 RATs 技术,通过其覆盖满足技术需要。采用任何一种单一类型的 RAT 都无法真正满足用户在较高水平的传输速率以及低价方面的需要。本文主要研究的是异构网络环境中的网络资源分配技术。

1 异构无线网络

异构网络(Heterogeneous Network)是一种由不同制造商生产的计算机、网络设备和系统组成的网络,大部分情况下运行在不同的协议上,支持不同的功能或应用。

有关异构网络的研究最早可追溯到 1995 年美国加州大学伯克利分校发起的 BARWAN(Bay Area Research Wireless Access Network)项目,该项目负责人 R. H. Katz 首次将相互

重叠的不同类型网络融合起来以构成异构网络,从而满足未来终端的业务多样性需求^[1]。为了可以同时接入到多个网络,移动终端应当具备可以接入多个网络的接口,这种移动终端被称为多模终端。多模终端由于可以接入到多个网络中,因此涉及到不同网络之间的切换。与同构网络(Homogeneous Wireless Networks)中的水平切换(Horizontal Handoff, HHO)不同,这里称不同通信系统之间的切换为垂直切换(Vertical Handoff, VHO)。

随着经济与科技的高速发展,我国通信系统发展建设面临着新的机会与挑战。现阶段为用户提供具有针对性的新型业务以及为其提供便捷、高效的数据传输成为无线移动通信网络的新方向。目前投入商业应用的无线接入技术包括 2G 系统、3G 系统、3.5G 高速下行分组接入、4G 长期演进蜂窝移动技术等,另外还包括 IEEE 802 系统、数字通信等等。随着 3G、蜂窝覆盖以及 WLAN 覆盖的广泛应用,重复覆盖成为 RATs 中较典型的场景。多模用户终端能够在同一时间对多个 RATs 进行连接,从而提高了入网效率,也为运营商提供了更加有利的依据,通过利用 RATs 资源为用户提供高效、优质的服务。

朱文红 工程师,主要研究方向为通信调度运行管理、通信资源统计分析等。

在今后的无线通信建设中,将以在 RAT_s 覆盖下进行为主,而多个 RAT 的系统被称为异构无线网络。

不同 RAT_s 中其覆盖情况、数据传输速度、容量以及移动性支持、业务 QoS 支持等各个方面均存在较多的差异,同时也存在一定的互补作用。以卫星通信网为例,其优势在于覆盖率实现全球化,但通信速率相对较低;蜂窝移动网的优势在于能够在高速移动下满足一般速率的通信需求,但通信率不高;WLAN 邻域网的自身优势为传输速率较高,但不足在于不能实现无缝覆盖。不同 RAT 在能力以及特性上存在不同,任意一种单一的 RAT 无法满足用户的多方面需求,包括传输速率、价格以及覆盖范围等等,因此要充分发挥不同 RAT 的优势,以为用户提供优质服务。

美国 Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE 与 3GPP 不断加大开展关于异构网络的标准化工作的力度。同时 IEEE 802.21 进行异构接入网络间切换的交互标准化过程。3GPP LTE-Advanced 标准化协议中加入了 LTE 与 WLAN 融合网络互操作过程。

2 异构无线网络的关键技术

异构无线网络区别于传统单一 RAT 。在异构无线网络中需要应用的关键技术较多,主要包括以下几种。

2.1 网络融合构架

多 RAT 覆盖在网络构架设计中难度较大,同时要兼顾多用户业务需求,这也给网络无缝融合架构带来挑战。IP 协议支持多种 RAT ,能够为网路架构设计提供灵活性,所以在设计过程中要充分发挥 IP 的 HWN 的融合架构作用,充分解决其覆盖以及用户多业务需求问题。

3GPP 标准中包括 3GPP 系统以及 WLAN 融合架构,主要模式为松耦合与紧耦合,将两种模式优劣充分互补,提高技术优势。松耦合架构的主要理念在于保有两类网络特性的前提下,将 WLAN 作为 3GPP 网络的补充,因此将 RAT 中的垂直切换作为硬切换,实现难度较小,但不足在于业务容易出现间断性。紧耦合架构的主要思想在于实现 3GPP 网络核心网与 WLAN 之间的连接,目的在于提高业务连续性,但需要注意的是要增强核心网与协议栈设计,并对安全方面加以考虑,整体实现过程相对复杂。目前紧耦合架构可以实现不同 RAT 的无缝切换,因此在应用过程中受到更多的关注。

2.2 重配置技术

该技术主要是通过软件无线电以及认知无线电技术,根据异构接入环境实现多模用户网络结构设计,是支持多 RAT 的新型基站。软件无线电是无线通信领域的重要变革,在子模块化设计理念指导下,实现软件无线电技术的开放性,进一步提升了通信硬件平台的可拓展性。在该平台基础上运用相关软件方式进行物理层调制编码技术的改变,实现不同软件对不同通信协议的适应。认知无线技术是在软件无线电技术基础上实现的进一步优化,通过对环境感知变化的感知,调整系统参数,包括 RAT 、调制编码等。

2.3 无线资源管理

在异构环境中,不同 RAT 会直接对资源颗粒度造成影响,并对所管理的无线资源造成不同影响,这在异构网络无线资源管理中难度系数较高。与传统的单一的 RAT 相比,异构网络需要对无线资源实现统一管理,一般情况下主要是通过集中式、分布式或混合方式进行管理。资源管理部分主要

包括资源监测、决策以及执行几个部分,决策部分是重点。从资源管理算法应用角度来看,信道信息的获取是需要重点解决的问题,同时算法执行所需信令开销、不同 RAT 间同步等问题也十分重要。

2.4 移动性管理

以网络融合为前提的异构网络环境给移动性管理带来较大影响,其管理难度也相对较高。在不同的 RAT 中,多样性和复杂性是主要特征,若想要通过物理层与链路层对移动性进行管理,难度较大。因此,在传统管理层基础上的网络层中,要进行通用协议设计,以有效屏蔽不同 RAT ,提高位置管理效率,并实现切换管理、接入控制等移动性管理支持。

3 异构环境条件下的资源分配分析

无线资源管理研究不断创新与发展,到目前为止已经开始形成了有关异构环境与支持技术方面的研究。现阶段,无线资源管理运行模式主要可以划分为网络资源分配、上行的带宽分配与功率分配 3 种。

有关上行资源方面分配的研究,主要是关于最大化系统运行过程中的吞吐量,结合分配带宽的持续量变现状,又进一步形成了有关多种条件下的分配技术研究。技术研究方面,根据多种业务需求情况,形成了确保时延条件下的用户最小速率需求研究。

性能指标属于衡量用户公平以及吞吐量方面的重要参照指标,比例所具有的公平性十分重要。众多相关研究中多采用传统蜂窝系统以及中继系统等开展研究。

本文结合了多种业务需求下的上行联合网络资源分配问题进行研究,确定时延受限条件下用户速率需求目标,并尽可能地确保用户比例公平。通过建立优化模型,可以有效改善这种情况。

3.1 OFDMA 技术条件的模型技术分析

系统模型建立具体如下,在区域中主要拥有 N 种类型的无线接入覆盖方式,其中每一种类型为 $n \in \{1, 2, \dots, N\}$ 。现在,假设在区域领域中只能够存在一个接入点,也就是 (BS/AP),在整个区域中产生随机特征的 m 个用户终端,其中每个用户为 $m \in \{1, 2, \dots, M\}$ 。现在假设整个区域中用户终端属于多模类型的终端结构,也就是拥有处理无线接入技术的能力,与此同时,可以连接其他类型的无线网络。接入技术不同,实际获得的覆盖效果也就存在差异性,但是不同类型的接入技术也存在重复覆盖的情况。例如,如图 1 所示的不同类型无线接入数针对一定区域的覆盖情况,其中 UE_1 能够对 RAT_1 、 RAT_2 以及 RAT_3 等位置同时进行覆盖。

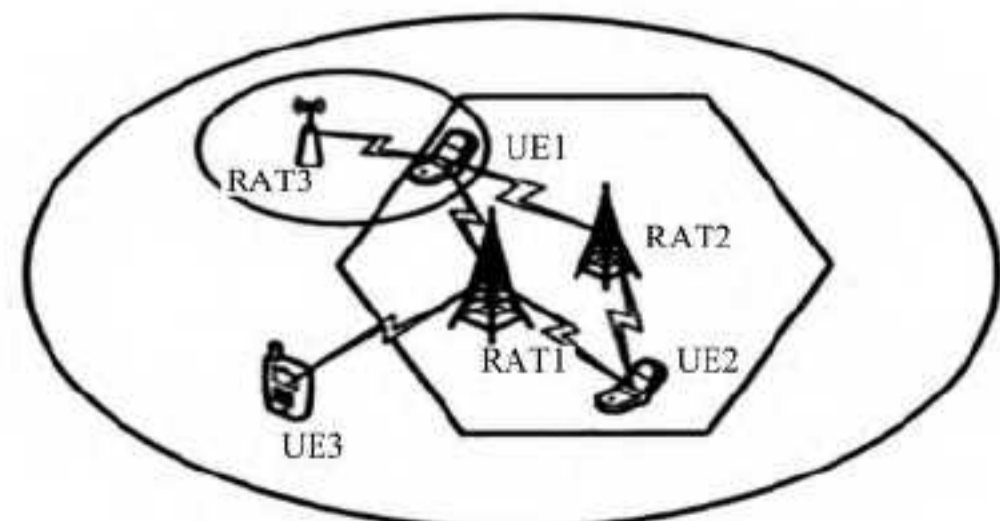


图 1 $N=3$ 时的系统示意图

OFDMA 技术作为一项十分成熟的技术类型,通过将其应用在多 RAT 异构上,能够有效降低用户之间造成的干扰。此时用户接入点中所产生的信干噪比就相当于信噪比值,可

以表示为

$$G_{mn} = \frac{|H_{mn}|^2}{N_{mn}} \quad (1)$$

其中, H_{mn} 以及 N_{mn} 具体表示的是在接入点中信道传递产生的函数以及造成的频谱密度值。现在做如下假设, 如果信道中进行一次发送, 且信道平坦, 此时用户通过 UE_m 到 RAT_n 产生的传输速率则可以表示成为,

$$R_{mn} = (1 - \eta_{mn}) \beta_n x_{mn} \log_2 \left(1 + \frac{g_{mn} p_{mn}}{x_{mn}} \right) \quad (2)$$

其中, x_{mn} 主要是指 RAT_n 完成带宽资源上行分配到 UE_m 的结果, p_{mn} 则主要是指 UE_m 到 RAT_n 产生的实际发送功率。

3.2 基于公平性效果的网络资源分配策略分析

3.2.1 主要问题表述

首先, 对 RAT 的接入进行假设, 通过 UE_m 到 RAT_n 产生的吞吐量情况通过公式可以表现为,

$$R_m = \sum_{n=1}^N (1 - \eta_{mn}) \beta_n x_{mn} \log_2 \left(1 + \frac{g_{mn} p_{mn}}{x_{mn}} \right) \quad (3)$$

综合分析用户比例所具有的公平性, 通常情况下, 会对最大化速率情况的对数和形成如下问题 (PL):

$$\begin{aligned} \max_{m=1}^M \sum \ln R_m &= \max_{m=1}^M \sum \ln \left(\sum_{n=1}^N r_{mn} \right) \\ &= \max_{m=1}^M \sum \ln \left(\sum_{n=1}^N (1 - \eta_{mn}) \beta_n x_{mn} \log_2 \left(1 + \frac{g_{mn} p_{mn}}{x_{mn}} \right) \right) \\ \text{s. t. a)} &\sum_{m=1}^M x_{mn} \leq X_n, \forall n \\ \text{b)} &\sum_{n=1}^N p_{mn} \leq P_m, \forall m \\ \text{c)} &x_{mn}, p_{mn} \geq 0, \forall m, n \\ \text{d)} &x_{mn} = k \Delta_n, k \in \{0, 1, \dots, \lfloor \frac{x_n}{\Delta_n} \rfloor\}, \forall m, n \end{aligned} \quad (4)$$

其中 X_n 以及 P_m 均主要表示的是总带宽约束以及总发送功率约束情况; Δ_n 则主要表示的是 RAT_n 中形成的资源单元分配整倍数情况。

由此, 可以注意几个方面的问题, 基于条件 d) 无法对问题 PL 求得最优解决方案。为此, 针对带宽分配过程中形成的变量 x_{mn} 完成了连续性的放松, 进而可以获得有关 PL' 的问题。通过 PL' 可以知道, 其中的目标函数主要是一种关于 $\{x, p\}$ 的凸函数, 因此, 可以形成最优解。这时的局部最优解就是整体最优解。为此, 针对带宽资源方便的调整也就具有了重要现实意义。通过对整个求解过程进行分析, 可以总结形成有关用户比例公平性方便的网络资源分配策略。

$$\begin{aligned} (PL') : \max_{m=1}^M \sum \ln R_m &= \max_{m=1}^M \sum \ln \left(\sum_{n=1}^N r_{mn} \right) \\ &= \max_{m=1}^M \sum \ln \left(\sum_{n=1}^N (1 - \eta_{mn}) \beta_n x_{mn} \log_2 \left(1 + \frac{g_{mn} p_{mn}}{x_{mn}} \right) \right) \\ \text{s. t. a)} &\sum_{m=1}^M x_{mn} \leq X_n, \forall n \\ \text{b)} &\sum_{n=1}^N p_{mn} \leq P_m, \forall m \\ \text{c)} &x_{mn}, p_{mn} \geq 0, \forall m, n \end{aligned} \quad (5)$$

定理 1 在问题 PL' 中, 目标函数主要是有关 $\{x, p\}$ 的凸函数类型。

证明: 目标函数表示为,

$$\sum_{m=1}^M \ln \left(\sum_{n=1}^N (1 - \eta_{mn}) \beta_n f(x_{mn}, p_{mn}) \right) \quad (6)$$

由此可知, 有关凸函数方面的基本形式,

性质 1 假设 f_1 以及 f_2 两个函数均为凸函数, 则 $f_1 +$

f_2 同样也属于凸函数,

性质 2 假设 f_1 以及 f_2 均为凸函数, 同时 f_2 递增, 则此时 $f_2(f_1)$ 表示的也是凸函数。

此时因为 \ln 函数中表示的是递增性质的凸函数, 为此, 结合上述两个基本性质, 则问题 PL' 中函数关系属于凸函数类型。

3.2.2 求解策略

需要确定问题 PL' 的函数,

$$\begin{aligned} L(x, p; \lambda, \mu) &= \sum_{m=1}^M \ln \left(\sum_{n=1}^N (1 - \eta_{mn}) \beta_n x_{mn} \log_2 \left(1 + \frac{g_{mn} p_{mn}}{x_{mn}} \right) \right) + \sum_{n=1}^N \lambda_n \\ &\quad \left(X_n - \sum_{m=1}^M x_{mn} \right) + \sum_{m=1}^M \mu_m \left(P_m - \sum_{n=1}^N p_{mn} \right) \\ &= \sum_{m=1}^M \left[\ln \left(\sum_{n=1}^N (1 - \eta_{mn}) \beta_n x_{mn} \log_2 \left(1 + \frac{g_{mn} p_{mn}}{x_{mn}} \right) \right) - \right. \\ &\quad \left. \sum_{n=1}^N \lambda_n x_{mn} - \mu_m \sum_{n=1}^N p_{mn} + \mu_m P_m \right] + \sum_{n=1}^N \lambda_n X_n \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n]$, $\mu = [\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m]$, 主要表示的是两项约束性条件的乘子向量; 同时, λ 在与接入点带宽两者之前形成了约束性关系的同时, μ 也会与用户端发送功率约束相关。

通过借助于 KKT 的条件可以得到结果,

$$\frac{\partial L}{\partial x_{mn}} = \frac{1}{R_m} (1 - \eta_{mn}) \beta_n \left(\log_2 \left(1 + \frac{g_{mn} p_{mn}}{x_{mn}} \right) - \frac{g_{mn} p_{mn}}{(x_{mn} + g_{mn} p_{mn}) \cdot \ln 2} \right) - \lambda_n \leq 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial L}{\partial p_{mn}} = \frac{1}{R_m} (1 - \eta_{mn}) \beta_n \frac{g_{mn} x_{mn}}{(x_{mn} + g_{mn} p_{mn}) \cdot \ln 2} - \mu_m \leq 0 \quad (9)$$

$$x_{mn} \frac{\partial L}{\partial x_{mn}} = x_{mn} \left(\frac{1}{R_m} (1 - \eta_{mn}) \beta_n \left(\log_2 \left(1 + \frac{g_{mn} p_{mn}}{x_{mn}} \right) - \frac{g_{mn} p_{mn}}{(x_{mn} + g_{mn} p_{mn}) \cdot \ln 2} \right) - \lambda_n \right) = 0 \quad (10)$$

$$p_{mn} \frac{\partial L}{\partial p_{mn}} = p_{mn} \frac{1}{R_m} (1 - \eta_{mn}) \beta_n \frac{g_{mn} x_{mn}}{(x_{mn} + g_{mn} p_{mn}) \cdot \ln 2} - \mu_m = 0 \quad (11)$$

$$\lambda_n \frac{\partial L}{\partial \lambda_n} = \lambda_n \left(X_n - \sum_{m=1}^M x_{mn} \right) = 0 \quad (12)$$

$$\mu_m \frac{\partial L}{\partial \mu_m} = \mu_m \left(P_m - \sum_{n=1}^N p_{mn} \right) = 0 \quad (13)$$

通过本关系式可以推导知道带宽分配以及功率分配两者之间的关系:

$$P_{mn} = x_{mn} \cdot \left[\frac{(1 - \eta_{mn}) \beta_n}{\ln 2 \cdot R_m \mu_m} - \frac{1}{g_{mn}} \right] \quad (14)$$

结束语 综上所述, 本文结合了异构网络环境中资源分配内容进行了深入性分析, 侧重对无线网络资源的分配策略进行了详尽阐述。借助 OFDMA 中的多 RAT 环境确保资源分配的公平性, 通过这种方式实现对用户最大化的公平。以分配带宽建立在资源单元最小单位为前提, 对带宽进行重新分配。同时, 也形成了有关多种地址接入技术的环境条件的资源分配。综合考虑到多种地址技术资源情况存在的差异, 为了便于研究, 本文将其统一映射到了可以实现的数据速率中, 针对优化目标, 通过默认接入的方式展开研究。希望通过本文的研究能够对这项技术的发展提供帮助。

参考文献

- [1] 王海涛, 付鹰. 异构网络融合——研究发展现状及存在的问题[J]. 数据通信, 2012(2): 18-21

[2] 王军, 李宁, 胡南, 等. 一种基于策略的混合式异构无线资源管理架构[C]//2008年中国通信学会无线及移动通信委员会学术年会论文集, 2008

[3] 董全, 李建东, 赵林靖, 等. 基于效用最大的多小区异构网络调度和功率控制方法[J]. 计算机学报, 2014(2):373-383

[4] Amin R, Martin J, Zhou Xue-hai. Smart Grid communication using next generation heterogeneous wireless networks[C]//2012 IEEE Third International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm). 2012:229-234

[5] Patel A, Aparicio J, Tas N, et al. Assessing communications technology options for smart grid applications[C]//2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm). 2011:126-131

[6] 田霖, 翟国伟, 黄亮, 等. 基于集中式接入网架构的异构无线网络资源管理技术研究[J]. 电信科学, 2013(6):25-31

[7] Brueck S. Heterogeneous networks in LTE-Advanced[C]//2011 8th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). 2011:171-175

[8] 张小朋, 邢远. 泛在网络理念下文化遗产信息化建设的研究[C]//区域特色与中小型博物馆——江苏省博物馆学会 2010 学术年会论文集, 江苏省博物馆学会, 2010

[9] 兴荣. 基于效用最大的多小区异构网络调度和功率控制方法[J]. 计算机学报, 2015(2):373-383

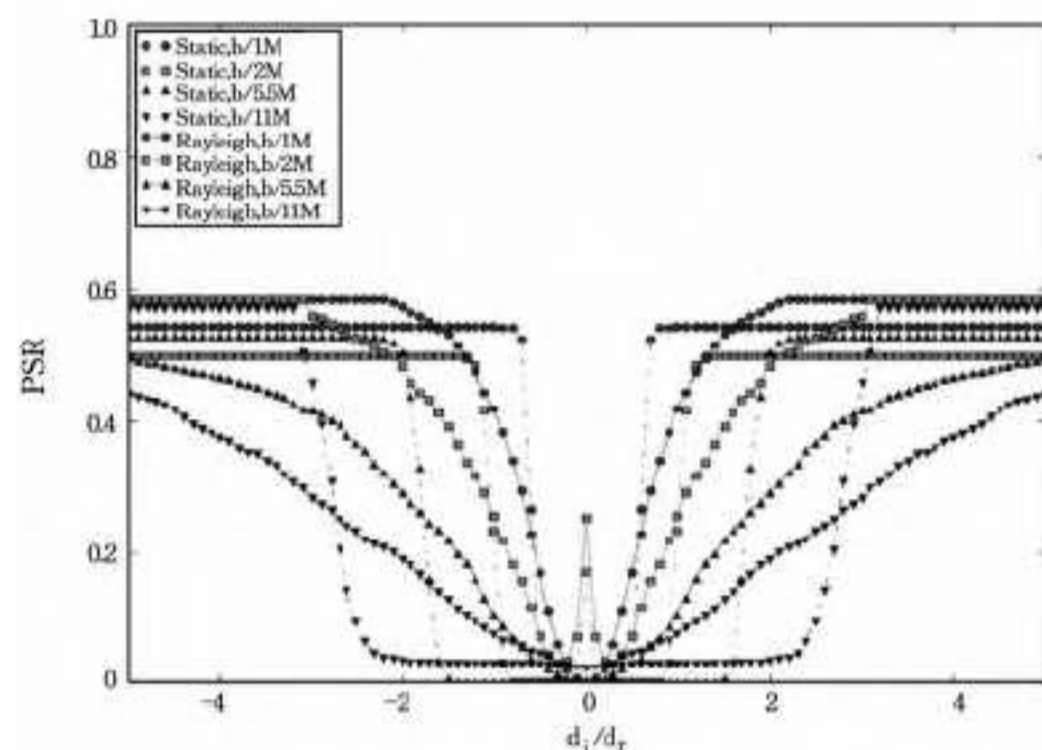
[10] 信息与电子科学与技术综合专题组. 2020年中国信息与电子科学与技术发展研究[C]//2020年中国科学和技术发展研究(上). 中国土木工程学会, 2004

(上接第 284 页)

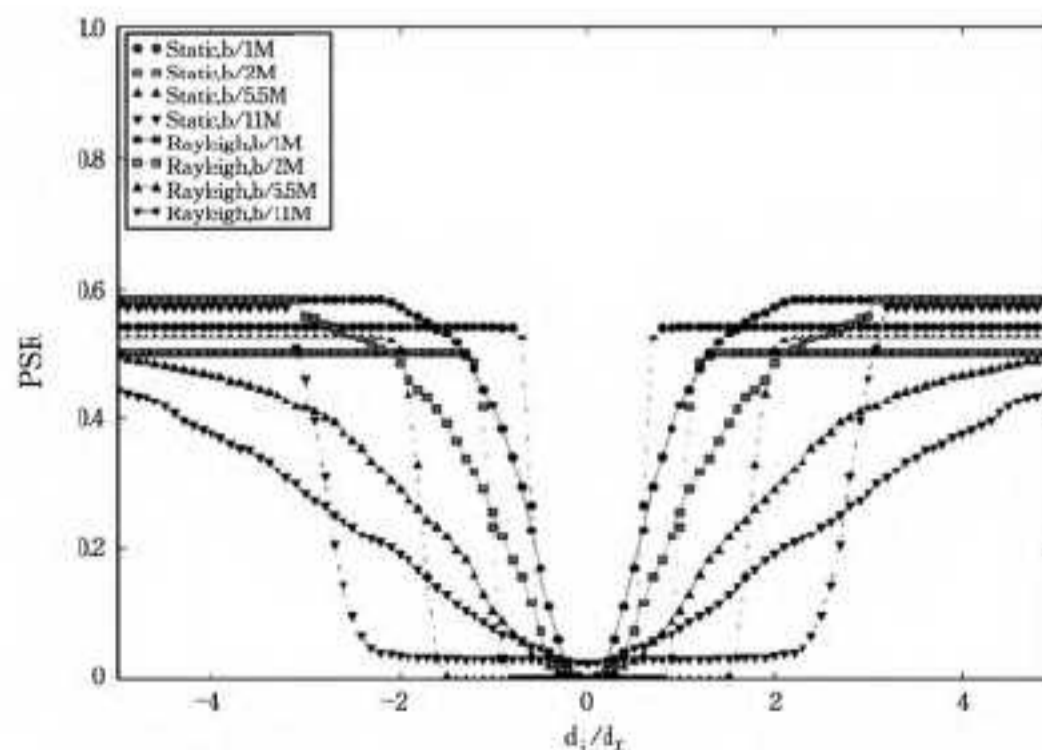
5 协议修改的建议

把 NS-3 的协议修改分为参数级、方法级和类级 3 种。这 3 种修改对源代码的了解程度从低到高。

参数级协议修改, 有时我们不满足于默认参数, 想对某个网络元素进行参数调整以查看其对性能的影响。NS-3 的仿真配置脚本是 C++ 程序, 可以在其中对任何网络元素设置参数。每个网络元素的各种参数通常存储于其所对应的对象的成员变量里。例如, 通过调用 YansWifiPhy 对象的 SetEdThreshold() 方法可以设置接收阈值 (即成员变量 m-edThresholdW 的值)。参数级的协议修改一般只涉及到对仿真配置脚本的修改。



(a) 原代码



(b) 代码修正后

图 3 在 $d_i/d_r=0$ 的 2Mbps (方形点) 异常大的分组接收成功率问题

方法级协议修改, 有时需要对某个类的方法进行改进。这时涉及到修改 NS-3 的源程序。操作步骤如下: 首先, 在 src 子目录下打开相关的类, 定位到相应的方法, 对其代码进行改

进, 然后, 在 NS-3 的主目录下运行 ./build.py, 对 NS-3 进行重新编译, 最后, 运行仿真脚本进行测试。

类级协议修改, 有时需要对类进行较大的修改以实现新协议。这类修改的难度大, 耗时长。因为 NS-3 的一个网络对象在工作中会用到许多其它对象, 所谓“牵一发而动全身”, 开发人员必须对所涉及的类的源代码有深入细致的理解, 才能保证改动不会导致逻辑错误。

这里演示一个方法级协议修改的实例——修改误码率计算方法。在仿真中我们注意到一个异常情况, 在图 2 的单干扰源拓扑中, 当干扰节点与接收节点在同一位置时 ($d_i/d_r=0$), SINR 极小, 误码率极高, 接收成功率接近 0, 但是无论在静态信道 (static) 还是瑞利衰落信道 (rayleigh) 下, 2Mbps 比特速率却给出了高达 25% 的分组接收成功率, 如图 3(a) 所示。仔细考察发现, 计算误码率的 DqpskFunction() 方法在此情况下给出大于 1 的误码率, 因此导致了式 (1) 中的分组接收成功率 PSR 反而大于 1。我们加入了当误码率大于 1 时将其置为 1 的一行代码, 纠正了这个问题, 如图 3(b) 所示。此问题将报告给相关开发者。

参考文献

[1] NS-3[OL]. <http://www.nsnam.org>

[2] Lacage M, Henderson T R. Yet another network simulator [C]//Proceeding from the 2006 workshop on ns-2: the IP network simulator (WNS2'06). ACM, 2006:12

[3] Pei G, Henderson T. Validation of ns-3 802.11b PHY model [Z]. Boeing Research Technology, 2009

[4] Pei G, Henderson T. Validation of OFDM error rate model in ns-3 [Z]. Boeing Research Technology, 2010

[5] Chen B, Yenamandra V, Srinivasan K. FlexRadio: fully flexible radios and networks [C]//NSDI'15. 2015:205-218

[6] Yu H, Bejarano O, Zhong L. Combating inter-cell interference in 802.11ac-based multi-user MIMO networks [C]//Mobicom'14. ACM, 2014:141-152

[7] Dale N, Lewis J. Chapter 7: Problem Solving and Algorithm, Computer Science Illuminated (5th edition) [M]. Jones & Bartlett Learning, 2012

[8] 王悦, 刘灿涛, 朱雷, 等. NS-2 无线物理层实现与衰落功能扩展研究 [J]. 计算机工程, 2014, 40(7):58-61

[9] 廖海帆. LTE 无线资源调度算法研究及 NS-3 仿真平台实现 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2015

[10] Wang Yue, Yue O C. A Tutorial of 802.11 Implementation in NS-2 [R/OL]. <http://www.docin.com/p-677082566.html>