

文章编号:1001-9081(2009)12-3207-04

基于中继技术的 B3G/4G 蜂窝网络成本优化模型

韦云凯,毛玉明,于 秦

(电子科技大学 通信与信息工程学院, 成都 610054)

(ykwei@uestc.edu.cn)

摘 要:为了降低基于中继技术的 B3G/4G 网络建设成本,通过分析网络建设成本与基站、中继节点数量比之间的关系,提出了成本效率模型。由成本效率模型推导出等成本直线,并将之与等容量曲线结合,进一步提出了成本优化模型。该模型明确地为 B3G/4G 蜂窝网络建设方案的评估与优化提供了直接有效的分析模型。仿真结果表明,在同样的系统容量和覆盖范围需求下,该模型可以有效分析网络建设成本,确定成本最优点。

关键词:中继节点;成本效率;等成本直线;等容量曲线;成本优化

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A

Cost optimization model of relay-based B3G/4G cellular network

WEI Yun-kai, MAO Yu-ming, YU Qin

(School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 610054, China)

Abstract: In order to reduce the construction cost of relay-based B3G/4G cellular network, by analyzing the relationship between the network construction cost and the ratio of base stations and relay nodes, this paper conducted a cost-efficiency model, from which an iso-cost line was derived. Combination of iso-cost line and the capacity curve led to a cost optimization model. For the first time, this model explicitly provides an effective model for cost assessment and optimization of B3G/4G cellular network construction. The simulation results demonstrate that the cost optimization model can effectively decrease network construction cost based on the same system capacity and coverage requirements.

Key words: Relay Node (RN); cost efficiency; iso-cost line; iso-capacity curve; cost optimization

0 引言

B3G/4G (Beyond 3rd Generation/4th Generation) 移动通信网络的显著特点之一是支持更高的系统容量,从而为更多用户提供更高的接入速率。要实现这样的目标,除了采用更多新技术(如 MIMO、OFDM 和 CoMP 等)之外,还需要在单位面积上部署更多的基站^[1-2],这将导致网络建设成本的迅速提高。

蜂窝移动通信领域领先的标准化组织第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)已经确定在未来移动通信中引入中继(Relay)技术来降低网络建设成本^[3-4]。但是采用中继技术后,基站密度如何调整、中继节点与基站的数量如何配置,才能在保证系统覆盖范围和系统容量的同时降低网络建设成本,是亟待解决的一个关键问题。因此,对基于中继技术的蜂窝移动通信系统,建立网络建设成本的评估方法,寻找最优建设方案,对进一步的研究和标准化工作,具有非常重要的意义。

本文在介绍蜂窝移动网络成本研究相关工作的基础上,对网络建设成本与中继节点、基站数量比之间的关系进行了讨论,推出了成本效率模型,并将成本效率模型与等容量曲线结合,得到了成本优化模型。仿真结果表明,在同样的系统容量和覆盖范围需求下,该模型可以有效节约网络建设成本。

1 相关工作

文献[5]提出了一个简单的模型,该模型认为基础设施的建设和维护成本 C_{infra} 与基站数量 B 之间呈线性关系: $C_{\text{infra}} = c_1 + c_2 B$ 。考虑到带宽的使用费用,将模型修正为 $C_{\text{sys}} = c_1 + c_2 B + c_3 W_{\text{sys}}$, W_{sys} 为系统所用的带宽。该模型针对早期的蜂窝系统,并没有考虑在未来的蜂窝移动网络中采用了中继技术的情况。

文献[6]对上述模型进行了进一步的修正,将基站分成宏基站、微基站和微微基站,得出成本模型: $C_{\text{system}} = c_1 N_{\text{macro}} + c_2 N_{\text{micro}} + c_3 N_{\text{pico}}$, 其中 N_{macro} 、 N_{micro} 、 N_{pico} 和 c_1 、 c_2 、 c_3 分别表示上述三种基站的数量和成本。该模型只是给出了网络成本定量分析模型,并没有讨论如何调整不同类型基站之间的数量关系,从而降低网络整体建设成本。

文献[7]较早地将中继技术与蜂窝技术结合起来,综合考虑中继节点和基站之间的数量关系和成本收益问题。文献[8-9]延伸了这种思想,将系统架构优化带来的成本收益通过带宽的使用效率来表示,并且分别给出了有中继和无中继时的等效带宽使用效率 $\eta_{\text{eff}}(m)$ 和 $\eta_{\text{eff}}(0)$,据此推得引入中

继后的成本收益 $\text{Cost_benefit} = \frac{\eta_{\text{eff}}(m)}{\eta_{\text{eff}}(0)} = \frac{1}{1 + \frac{m}{r}}$, 其中 m 为

中继节点和基站的数量比, r 为基站和中继节点的成本比。由

收稿日期:2009-06-15;修回日期:2009-08-11。

基金项目:国家科技重大专项(2008ZX03003-005);国家 863 计划项目(2007AA01Z227);中国博士后科学基金资助项目(20080431278)。

作者简介:韦云凯(1979-),男,山东临沭人,博士研究生,主要研究方向:无线通信网络、网络生存性;毛玉明(1956-),男,四川德阳人,教授,博士生导师,主要研究方向:网络体系结构与协议、宽带通信网、无线通信网;于秦(1974-),女,四川南充人,讲师,博士,主要研究方向:无线网络、信息安全。

于 m, r 均为正数, 因此, 通过上式得到的成本收益恒小于 1, 与“同等系统性能需求下, 降低建设成本”的初衷相违背。这是由于引入中继之后, 基站的覆盖范围可以获得延伸, 而该模型没有充分考虑这种延伸效应。

2 成本效率模型

在某个特定区域中, 部署系统容量满足一定条件的蜂窝网络, 可以有多种不同的实施方案, 这些方案会对应着不同的成本预算。由于达到的效果相同, 因此成本越低的方案, 成本效率越高。

2.1 覆盖效率

为符合 3G/4G 的表述习惯, 基站和中继节点分别用 eNB (eNode B) 和 RN (Relay Node) 表示。假设在传统蜂窝网络中, 一个 eNB 的覆盖范围为 Cov , 引入 RN 之后, 每个 eNB 的有效覆盖范围用 Cov_{eff} 表示, 则引入 RN 之后在覆盖范围上的增益可以表示为覆盖效率 $Cov_Efficiency$:

$$Cov_Efficiency = \frac{Cov_{eff}}{Cov} \quad (1)$$

由于网络总覆盖范围相同, 因此 eNB 的有效覆盖范围与密度成反比。所以式 (1) 等效于:

$$Cov_Efficiency = \frac{\rho_{eNB}(0)}{\rho_{eNB}(m)} \quad (2)$$

其中: m 表示蜂窝网络中 RN 与 eNB 的数量比; $\rho_{eNB}(m)$ 表示在 RN 与 eNB 数量比为 m 时, 单位面积上 eNB 的密度, 当 $m = 0$ 时即为 $\rho_{eNB}(0)$, 表示无中继蜂窝网络中 eNB 的密度。

2.2 成本效率

成本效率 $Cost_Efficiency$ 表示在相同的系统容量和覆盖范围下, 有中继蜂窝网络与无中继蜂窝网络建设成本比的倒数, 即:

$$Cost_Efficiency = \frac{\text{无中继蜂窝网络成本}}{\text{有中继蜂窝网络成本}} = \frac{\rho_{eNB}(0) \cdot C_{eNB}}{\rho_{eNB}(m) \cdot C_{eNB} + \rho_{RN}(m) \cdot C_{RN}} \quad (3)$$

其中: C_{RN} 和 C_{eNB} 分别表示单个 RN 和 eNB 的部署成本, $\rho_{RN}(m)$ 表示在 RN 与 eNB 数量比为 m 时, 单位面积上 RN 的密度。由于密度比即为单位面积上的数量比, 因此 $\rho_{RN}(m) = m\rho_{eNB}(m)$ 。

对式 (3) 分子分母同除以 $\rho_{eNB}(m) \cdot C_{eNB}$ 可得:

$$Cost_Efficiency = \frac{\frac{\rho_{eNB}(0)}{\rho_{eNB}(m)}}{1 + \frac{\rho_{RN}(m)}{\rho_{eNB}(m)} \cdot \frac{C_{RN}}{C_{eNB}}} \quad (4)$$

部署单个 RN 和 eNB 站点的成本比, 可用 r 表示, 即:

$$r = \frac{C_{RN}}{C_{eNB}} \quad (5)$$

将式 (2)、(5) 代入式 (4), 得

$$Cost_Efficiency = \frac{Cov_Efficiency}{1 + mr} \quad (6)$$

式 (6) 成本效率模型有两方面的意义: 1) 为验证已有方案的经济性提供了一个简单实用的模型。一般而言, 要验证一个有中继蜂窝网络建设方案在成本上是否优于无中继蜂窝网络, 需要对两种网络都进行建模和成本计算, 根据得到的成本

进行比较。采用了此模型之后, 由于在确定的方案中, m, r 和 $Cov_Efficiency$ 都是已知数值, 将这些数值代入成本效率模型, 如果最后得到的 $Cov_Efficiency < 1$, 则表明该方案在成本上比无中继蜂窝网络更低; 反之, 则表示成本增加, 这时可以调整中继节点部署方式、部署密度等, 对建设方案进行优化。

2) 基于本式可获得等成本直线, 这为第 3 章将等成本直线与等容量曲线结合, 进一步推出成本优化模型奠定了基础。

3 成本优化模型

在保持总覆盖面积和系统容量不变的情况下, 如果以无中继蜂窝网络中 eNB 密度为 $\rho_{eNB}(0)$ 时的系统性能为基准, 则随着 m 的增加, $\rho_{eNB}(m)$ 值将会逐渐降低, 但在 m 值增加速度大于 $\rho_{eNB}(m)$ 值降低速度的情况下, $\rho_{RN}(m) = m\rho_{eNB}(m)$ 的值会相应增大, 从而保持整体的系统性能不变。图 1 所示的等容量曲线^[7,10]描述了在相同性能的情况下, eNB 和 RN 密度之间的关系。

图 1 等容量曲线上的每一个点都表示在达到相同的系统容量和覆盖范围的条件下, 不同的 eNB、RN 密度组合。

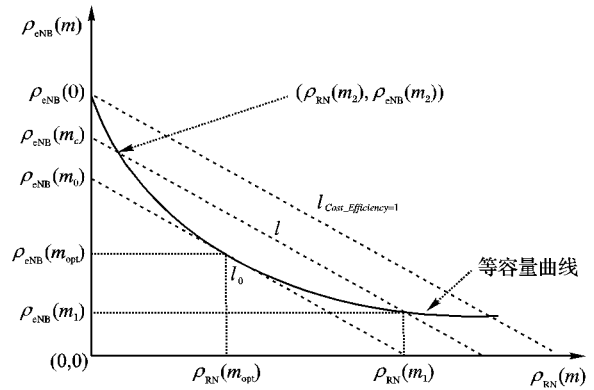


图 1 等容量曲线

在不考虑系统容量和覆盖范围的情况下, 假定式中的 $Cost_Efficiency$ 等于 1, 将式 (2) 代入到式 (6) 可得:

$$\rho_{eNB}(m) = -r\rho_{RN}(m) + \rho_{eNB}(0) \quad (7)$$

在 r 为定值的情况下, 式 (7) 所描绘的直线为一条等成本直线, 其斜率为 $-r$, 如图 1 中直线 $l_{Cost_Efficiency=1}$ 所示, 该直线与纵轴相交于点 $(0, \rho_{eNB}(0))$ 。

考虑到一般性, 则任意一条与纵轴相交于 $(0, \rho_{eNB}(m_c))$ 点的等成本直线 l 可表示为:

$$\rho_{eNB}(m) = -r\rho_{RN}(m) + \rho_{eNB}(m_c) \quad (8)$$

定理 等成本直线 l_0 与等容量曲线相切于一点 $(\rho_{RN}(m_{opt}), \rho_{eNB}(m_{opt}))$, 在等容量曲线上所有点中, 该切点所对应的网络建设方案的总成本最低。

证明 设任意等成本直线 l 与等容量曲线交于点 $(\rho_{RN}(m_1), \rho_{eNB}(m_1))$ 和 $(\rho_{RN}(m_2), \rho_{eNB}(m_2))$ 点, 与纵轴交于点 $(0, \rho_{eNB}(m_c))$, 根据等成本直线的特点可知, 这两点所代表的系统方案成本等于点 $(0, \rho_{eNB}(m_c))$ 的成本。用 $(0, \rho_{eNB}(m_0))$ 表示 l_0 与纵轴的交点, 由于 $\rho_{eNB}(m_c) \geq \rho_{eNB}(m_0)$, 即这两点所代表的系统方案成本大于等于 l_0 与等容量曲线相切点 $(\rho_{RN}(m_{opt}), \rho_{eNB}(m_{opt}))$ 的成本。证毕。

为了与一般的等成本直线相区别, 将等成本直线 l_0 称为等成本切线。根据以上分析, 与传统蜂窝系统相比, 基于中继的蜂窝系统在相切点 $(\rho_{RN}(m_{opt}), \rho_{eNB}(m_{opt}))$ 的成本效率可

以表示为:

$$Cost_Efficiency = \frac{\rho_{eNB}(0)}{\rho_{eNB}(m_0)} \quad (9)$$

将此切点 m 的取值 m_{opt} 代入式(6),结合式(9),可得:

$$m_{opt} = \frac{\rho_{eNB}(m_0)Cov_Efficiency - \rho_{eNB}(0)}{r\rho_{eNB}(0)} \quad (10)$$

由式(10)得到的 m_{opt} 所对应的蜂窝网络建设方案,在符合系统容量和覆盖范围需求的方案中,是成本最低的。相关参数数值的确定如下:

1) r 为部署单个 RN 与 eNB 站点的成本比,包括设备本身成本、站点部署成本、配套设备成本以及光纤铺设成本。如果考虑运营成本,则还需要包含站点占地租赁、维护、运作、耗电等产生的费用。

2) $Cov_Efficiency$ 目前通常采用 eNB 设备和 RN 设备的经验数值。

3) $\rho_{eNB}(m_0)$ 和 $\rho_{eNB}(0)$ 依据等容量曲线确定,而等容量曲线的获得是个难点,在目前的研究中,还没有可用的模型。本文通过模拟的方式近似获得。

4 等容量曲线的获得

虽然在文献[7,10]中通过实验和仿真得出了等容量曲线的走向,但是目前的研究中还无法确定等容量曲线的准确模型。为了获得等容量曲线,从而获得最终的成本优化模型,可以采用如下步骤^[11]:

1) 根据目标地区的面积及用户密度确定所需的覆盖面积(km^2)和容量密度(bps/km^2)。

2) 选择初始的 eNB 配置,均匀分布在整個覆盖范围内,此时不配置 RN。

3) 调整 eNB 密度:

a) 如果系统容量低于预定值,增加 eNB 密度;

b) 如果系统容量高于预定值,降低 eNB 密度。

4) 重复第 3) 步,直到满足预定的系统容量密度和覆盖面积。在此步骤中,可以获得预定系统性能下必需的 eNB 密度,以及完全由 eNB 构成的网络的成本。

5) 降低 eNB 密度。此时网络提供的系统容量将会低于预定目标,需要在网络中加入 RN 进行弥补。

6) 增加 RN。需要的 RN 的数量取决于 RN 的特性(如发射功率等)和部署方式(如高度等)。开始的时候可以设置每个小区(cell)一个 RN。

7) 计算这种部署方式下,在指定覆盖范围上的容量密度。

8) 调整 RN 的密度:

a) 如果系统容量达不到预定目标,增加 RN 密度;

b) 如果系统容量过高而超出了预定目标,降低 RN 密度;

9) 重复第 8) 步直到满足预定的容量密度和覆盖范围。这样就得到了一个由 eNB 和 RN 混合组成的系统,可以提供满足需求的性能。

10) 重复第 5)~9) 步,直到在预定的覆盖面积和系统容量下,已经有足够的点可以用来绘出一个平滑的 RN 密度与 eNB 密度关系曲线,即确定覆盖面积下的等容量曲线。

11) 一旦等容量曲线得以确定,采用第 3 章所描述的成本优化模型,就可以得出系统建设成本最低的 RN 与 eNB 的比

率,并确定成本最优的系统建设方案。

5 仿真与验证

仿真环境中的常规参数,如 RN、eNB 规格、站间距、路径衰落等采用文献[12]中设定的值。覆盖面积为 $100 km^2$,系统容量密度为 $2.5 Mbps/km^2$, $Cov_Efficiency$ 采用文献[13]中的数值。

针对 3GPP 和 WINNER II 项目定义的层二 RN,WINNER II 中对这些成本进行了统计,结果显示单个 RN 的部署成本(CAPEX,资本性支出)为 1.1 万欧元,eNB 为 31.05 万欧元。故 C_{RN} 与 C_{eNB} 之比 $r = 0.03543$ 。

如图 2 所示,等容量曲线与等成本直线相切于点(28, 2.03),此时 RN 与 eNB 的密度比为 13.79。根据仿真结果,在成本最优的情况下,成本效率 $Cost_Efficiency = 4.61/3.02 = 152.65\%$ 。与单纯采用 eNB 建设网络相比,可以节约 34.49% 的成本。

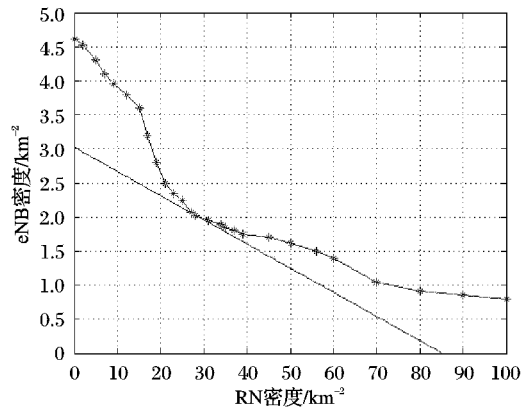


图 2 不计入运营成本($r = 0.03543$)

如果进一步将运营成本考虑在内,假定基础设施可以使用 10 年,根据文献[11]中的数值,10 年中的运营成本(OPEX)每个 eNB 为 32.57 万欧元,每个 RN 为 1.7 万欧元。结合前文所述的部署成本, $r = 0.04495$ 。

如图 3 所示,当考虑运营成本时,RN 运营成本与建设成本相比,在总成本中占的份额多一些,因此等成本直线斜率变大。等容量曲线与等成本直线相切于点(27, 2.065)点,并分别与纵轴交于(0, 4.61)点和(0, 3.28)。根据仿真结果,在成本最优的情况下,RN 与 eNB 的密度比为 13.10,成本效率 $Cost_Efficiency = 4.61/3.28 = 140.55\%$ 。与无中继蜂窝网络相比,可以节约 28.85% 的成本。

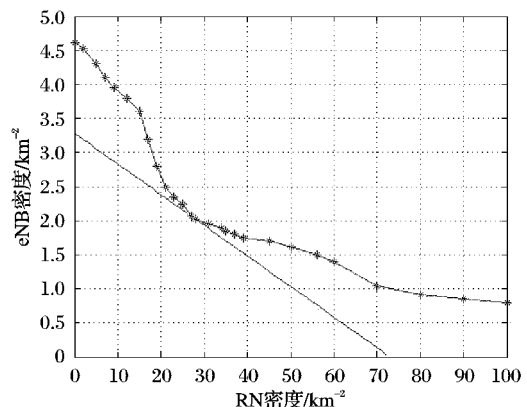


图 3 计入运营成本($r = 0.04495$)

6 结语

本文通过分析 B3G/4G 蜂窝移动网络中 RN 节点和 eNB 数量之间的变化关系,得出了成本效率模型,该模型可评估计划中的网络建设方案在成本上的优劣。在此基础上结合等容量曲线进一步推导出的成本优化模型,能够从理论上计算网络建设成本最优点。在实际应用中,由于等容量曲线仍没有可用的模型,通常可以通过模拟的方法近似获得。仿真部分对成本优化模型进行了验证,根据仿真结果可知,虽然本文以“相同系统容量和覆盖面积下的蜂窝移动网络建设成本”为出发点,但是最终得到的模型同样适用于将建设成本与运营成本综合考虑的情况。

参考文献:

- [1] International telecommunication Union. Requirements related to technical performance for IMT advanced radio interface(s), ITU-R M 2134[R]. Geneva: ITU, 2008.
- [2] International Telecommunication Union. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced, ITU-R M 2135[R]. Geneva: ITU, 2008.
- [3] PABST R, WALKE B H, SCHULTZ D C, *et al.* Relay-based deployment concepts for wireless and mobile broadband radio [J]. IEEE Communications Magazine, 2004, 42(9): 80–89.
- [4] DOPPLER K, WIJTING C, VALKEALAHTI K. On the benefits of relays in a metropolitan area network [C]// IEEE 67th Vehicular Technology Conference. Washington, DC: IEEE, 2008: 2301–2305.
- [5] ZANDER J. On the cost structure of future wideband wireless access [C]// IEEE 47th Vehicular Technology Conference. Washington,

DC: IEEE, 1997, 3: 1773–1776.

- [6] JOHANSSON K, FURUSKAR A, KARLSSON P, *et al.* Relation between base station characteristics and cost structure in cellular systems[C]// IEEE 15th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Washington, DC: IEEE, 2004, 4: 2627–2631.
- [7] TIMUS B. Cost analysis issues in a wireless multihop architecture with fixed relays [C]// IEEE 61st Vehicular Technology Conference. Washington, DC: IEEE, 2005, 5: 3178–3182.
- [8] MOBERG P, SKILLERMARK P, JOHANSSON N. Performance and cost evaluation of fixed relay nodes in future wide area cellular networks [C]// IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Washington, DC: IEEE, 2007: 1–5.
- [9] Wireless World Initiative New Radio II. Relaying concepts and supporting actions in the context of CGs, IST-4-027756 WINNER II D3.5.1 v1.0 [R]. Berlin: WINNER II, 2006.
- [10] SCHULTZ D C, WALKE B. Fixed relays for cost efficient 4G network deployments: An evaluation [C]// IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Washington, DC: IEEE, 2007: 6–10.
- [11] Wireless World Initiative New Radio II. Assessment of relay based deployment concepts and detailed description of multi-hop capable RAN protocols as input for the concept group work, IST-4-027756 WINNER II D3.5.2 v1.0 [R]. Helsinki: WINNER II, 2007.
- [12] 3rd Generation Partnership Project. Evolved Universal Terrestrial Radio Access, TR 36.814 v1.0.0 [R]. Biarritz: 3GPP, 2009.
- [13] BENIERO T, REDANA S, HAMALAINEN J, *et al.* Effect of relaying on coverage in 3GPP LTE-advanced [C]// IEEE 69th Vehicular Technology Conference. Washington, DC: IEEE, 2009: 1–5.

(上接第 3206 页)

代码的织入可有效地提高仿真代码的重用性,进而减少了代码的长度和变量个数。

表 2 代码长度和变量数的测试数据

仿真包名称	代码行数		变量个数	
	仿真 1	仿真 2	仿真 1	仿真 2
RWA	3816	2473	247	172
opticalgrid	2 869	1 223	386	225
wavebandwidth	807	502	94	59
aspectgrid	0	764	0	68
总计	7 492	4 962	727	524

通过以上的仿真结果可知,面向方面的开放网格服务架构 AO-OGSA 可使网格服务中各个横切关注点分离,降低了网格应用中各个模块的耦合度,并且在代码层次上使得软件的架构清晰明了,方便网格应用软件开发和后期维护,具有良好的综合性能。

3 结语

融入 WSRF 的 OGSA 是网格技术发展的必然趋势,本文将面向方面的思想和 OGSA 技术结合起来,提出了一种面向方面的开放网格服务架构 AO-OGSA,以此分离网格服务中横切关注点和核心关注点,为代码交织和代码分散问题提出了可行的解决方案。仿真结果表明,AO-OGSA 可以降低各个模块之间的耦合度,提高网格应用的开发效率,减轻网格开发的

工作力度。

参考文献:

- [1] 龚育昌,张敏,乔磊,等.一种基于组件的 aspect-oriented 编程框架[J].小型微型计算机系统,2008,29(7):1225–1229.
- [2] WU S, TAO Y C, XU Z Q. PBJIM: Plugin-based job interoperation mechanism for heterogeneous grid systems[C]// Proceedings of the 6th International Conference on Grid and Cooperative Computing. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2007: 830–840.
- [3] MARCIO E F M, PAULO H M M, NABOR C, *et al.* An aspect-oriented programming model for bag-of-tasks grid applications [C]// Proceedings of the Seventh IEEE International Symposium on Cluster Computing and the Grid. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2007: 789–794.
- [4] PARNAS D L. On the criteria to be used in decomposing systems into modules [J]. Communications of ACM, 1972, 15(12): 1053–1058.
- [5] COLYER A, CLEMENT A. Eclipse AspectJ 中文版: 利用 Eclipse 和 AspectJ 进行面向方面程序设计[M]. 钱竹青, 邹正武, 译. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [6] 周晓璐, 郑汉雄, 罗达. 事件驱动算法演示技术的面向方面实现[J]. 计算机科学, 2008, 35(12): 247–249.
- [7] 李森, 白勇, 张波. 基于领域特征的 AOP 编织实现方法[J]. 计算机科学, 2009, 36(2): 299–302.
- [8] 李炯, 卢显良, 董仕. 基于 GridSim 模拟器的网格资源调度算法研究[J]. 计算机科学, 2008, 35(8): 95–97.