

基于多跳中继的宽带接入网组网成本性能分析^{*}

彭海兰, 蔡 杰, 由 磊, 张 勇, 宋 梅

(北京邮电大学 电子工程学院, 北京 100876)

摘 要: 利用成本分析模型及等性能成本比较方法对基于多跳中继的宽带无线接入网络部署进行了量化分析, 并与传统单跳网络部署进行了仿真比较。结果显示, 基于中继的网络部署在保证性能的前提下能有效地降低组网成本, 增强网络边缘吞吐量, 扩大基站覆盖范围。进一步分析表明, 无线资源配置方法也对网络的成本增益有一定的影响。复用技术能进一步改善中继网络的成本效益, 并有效提升网络性能。

关键词: 多跳中继; 宽带接入; 成本模型; 等性能曲线; 复用技术

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2009)02-0677-03

Cost performance analysis of multi-hop relay based broadband access network

PENG Hai-lan, CAI Jie, YOU Lei, ZHANG Yong, SONG Mei

(School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: This paper provided a qualitative performance assessment of relay based broadband wireless access network in comparison to traditional single-hop deployment. Used cost model and iso-performance curve to analyze and simulate the cost of network deployment. The results show that the deployment of relay can provide an opportunity to reduce the network deployment cost substantially, enhance the cell edge throughput and extend the cell range. The qualitative results further prove that the reuse of relay link between the RS and the BS will help to improve the cost efficiency of the relay based network deployment.

Key words: multi-hop relay; broadband access; cost model; iso-performance curve; reuse technology

0 引言

下一代无线移动通信系统主要目的就是给移动用户提供无处不在的宽带无线接入。然而基于传统蜂窝架构的接入网络覆盖范围却受到了诸多因素的限制, 如载波频率超过 3.4 GHz 时信号急剧衰减、有限的传输功率、不利的无线传播环境等。因此, 传统的单跳蜂窝无线网络要达到充分的覆盖, 就需要很高的基站(BS)部署密度。这样, 宽带无线系统的部署成本(基本建设费用和运营费用)就会急剧增加。此外, 网络中的可用最大吞吐量也取决于距离 BS 的远近, 处于基站覆盖边缘的用户吞吐量较低, 无法达到无线宽带广泛覆盖的目的; 另一方面, 发送功率一定的用户(SS 或 MS), 其接收信号的信号干扰噪声比(SINR)也会随着与 BS 间距的增加而降低, 所获得的数据传输速率也随之下降。

为了有效地解决上述问题, 需要对网络结构、部署场景等进行一定的改进。将多跳中继技术集成到传统蜂窝架构中, 是宽带无线接入网络很有潜力的架构改进措施^[1]。

IEEE 802.16 标准制定组织已成立移动多跳中继技术^[2]小组 802.16j, 研究在 802.16 系统中采用多跳中继技术的可行性。多跳中继是 IEEE 802.16 系统扩大覆盖范围、提高吞吐量和系统容量的一个有效方案, 且中继基站的复杂性可以远远低于传统接入网络基站的复杂性。首先, 中继的覆盖范围半径可

以是 200 ~ 500 m, 这意味着与基站相比, 中继的发送功率可以大大降低, 进而降低中继功率放大器的成本。其次, 中继与基站是通过无线链路连接的, 不需要额外的骨干网接入设备, 这就降低了安装费用, 缩短了部署周期。再次, 中继的部署位置比 BS 更灵活, 无须像 BS 那样为其专门建立发射塔, 降低了建设成本和维护成本。在特定性能需求下, 覆盖范围和吞吐量性能的提升也可以对配置成本的减少起到平衡作用, 从而大大改善 IEEE 802.16 系统的经济成本。因此, 中继功能使得网络性能迅速提升, 并能降低系统运营成本。这些优点使宽带无线接入的市场越来越广阔^[3]。

目前, 很少有基于多跳中继的宽带接入网络组网成本性能方面的研究。文献[4]主要研究了支持多媒体服务的无线基础架构网络的成本结构, 分析了基础设施成本及频谱开销成本。文献[5]研究了 3G 蜂窝通信系统 WCDMA 中基站特性及成本架构之间的关系, 主要是宏基站、微基站、微微基站的选择与配置, 以及如何达到一定的系统容量及覆盖的问题。文献[6]研究的是将多跳蜂窝与传统的单跳蜂窝系统相结合, 引入固定中继, 通过定义期望服务水平, 在达到该水平的基础上获得成本增益, 主要研究基于蜂窝的 TDMA 和集中式 STDMA 两种资源配置策略。

本文在以上参考文献的基础上, 借鉴其成本分析模型, 主要研究基于多跳中继技术的宽带无线接入网络, 对基于 802.16 并采用 OFDMA 多址接入技术的网络成本性能进行分析, 在保

收稿日期: 2008-04-08; 修回日期: 2008-07-06 基金项目: 国家“863”计划资助项目(2007AA01Z226)

作者简介: 彭海兰(1985-), 女, 湖北荆州人, 硕士研究生, 主要研究方向为下一代宽带无线网络、无线多跳网络(penghailan926@gmail.com); 蔡杰(1983-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为移动互联网、下一代网络; 由磊(1980-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为下一代网络、多跳网络、无线资源管理; 张勇(1975-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为移动通信、宽带无线接入网; 宋梅, 女, 教授, 主要研究方向为未来移动通信、下一代网络

证单位面积上吞吐量及覆盖范围的前提下,获得最佳性价比,并与传统单跳蜂窝接入网络通过仿真进行成本性能比较。

1 系统模型

1.1 物理层和传播模型

对于所有的接入链路,即无线接入点(BS或RS)与用户终端(MS)间的链路,本文使用如下非视距信道衰落模型^[7,8]:

$$PL = [44.9 - 6.55 \times \lg(h_{BS})] \times \lg(d[m]) + 34.46 + 5.38 \times \lg(h_{BS}[m]) + 20 \times \lg(f[GHz]/5)$$
 (1)

其中:假设无线接入点的高度 $h_{BS} = 25\text{ m}$,用户终端的高度 $h_{MS} = 1.5\text{ m}$ 。系统中,物理层采用正交频分多址技术(OFDMA),带宽为 100 MHz ,中心频率为 $f = 3.95\text{ GHz}$,系统带宽被分为 104 个子载波。

对于基于中继的宽带无线接入网络,假设BS与RS间的中继链路为视距传输,且无干扰。其信道衰落模型采用理想的自由空间传播衰落模型^[9]:

$$L_{fs} = 32.44 + 20 \lg(d[m]) + 20 \lg(f[GHz])$$
 (2)

设BS的发送功率为 46 dBm ,RS的发送功率为 37 dBm ,链路水平映射使用低密度奇偶校验(LDPC)码,码字长为 288 bit ,且有很好的链路自适应。

1.2 中继和无线资源管理

以两跳系统为例分析,假设系统中的中继都只在某个特定的时域收发,因此每个时隙只有一个无线接入点处于活动状态。已知多跳链路的容量可表示为

$$\varphi_{\text{multi-hop}} = 1 / (\sum_{i=1}^N 1/\varphi_{RLi} + 1/\varphi_{AL})$$
 (3)

其中: φ_{RLi} 表示中继链路上的容量; φ_{AL} 表示接入链路上的容量。

由式(3)可知,两跳链路容量可以用下式表示:

$$\varphi_{2\text{-hop}} = 1 / (1/\varphi_{RL1} + 1/\varphi_{AL})$$
 (4)

每跳链路容量根据如下香农公式计算得出

$$\varphi = B \log_2(1 + \text{SINR})$$
 (5)

其中: B 为每个子载波的信道带宽; SINR 为该链路上的信噪比。对于两跳中的中继链路,由于相邻子载波信道带宽有二分之一相互重叠,子载波带宽为系统带宽的 $2/(N+1)$ 。用系统带宽来计算中继链路信道容量时,容量公式应为

$$\varphi_{RLi} = 2/(N+1) B_w \log_2(1 + \text{SINR}_{RLi})$$
 (6)

下层的多址接入技术采用时分多址接入(TDMA),也就是说所有的活动节点在时域上共享频率资源。另外,假设所有的RS都在同一时隙可用,但是与BS不在同一时隙,也就是说RS与BS之间没有干扰。如果中继系统有两个RS,这种方法允许两个RS在同一时间为两个不同的MS服务,但是BS在同一时间却只能服务于一个MS。

假设BS的复用因子为3,为了分析简便,同样假设为时间复用。RS与BS间的中继链路上的资源与BS的资源有关,即中继链路资源的复用系数也为3。中继链路在时域上是相互独立的。因此,在基于中继的网络中,当有 N 个MS, N 个RS,且每个MS与一个RS相连时,其系统容量可以表示为

$$\varphi_{\text{sys}} = N / (\sum_{i=1}^K 1/\varphi_{RLi} + 1/\varphi_{AL})$$
 (7)

其中,如果中继链路在时域上没有复用,即复用因子为1,则 $K = N$;若有三条中继链路可以在时域上复用,则 $K = \lceil N/3 \rceil$ 。因此,该无线资源分配(RRM)方法,对于微节点来说,复用系

数只有1;但是对于宏基站来说,复用系数却是3。在量化的吞吐量计算中,可以看出BS的频谱效率的换算系数也为3。

在该模型中,从系统负载的角度考虑,MS每次都与最优的无线接入点相连,该接入点既可以是BS也可以是RS。也就是说考虑复用增益,如果MS与RS相连时可以获得更高的吞吐量,那么它就与RS相连。

1.3 应用场景

图1为基于中继的蜂窝网络。BS使用全向天线,且配置在小区的中央。六个中继站均匀分布在BS周围,且处于蜂窝小区边缘位置。由此,小区边缘的用户获得的信号干扰噪声比(SINR)得到了明显提高,从而提高了用户的吞吐量。此外,边缘地区的RS有一定的覆盖范围,因此也扩大了整个网络的小区覆盖范围。图中BS周围的中继节点数可以根据仿真场景变化,多个小区BS与BS间距在 $500 \sim 1\,000$ 变化。

2 成本分析模型

在成本分析中,通常使用绝对值去估算某个特定系统的成本,但是在比较两个可选择的系统时,并不一定要计算出每个系统成本值,相对成本同样也可以评价两个系统的优劣。以下的成本分析模型使用相对成本,无须BS和RS的实际成本值,只需要知道单个BS与单个RS成本的比值 r 即可。

2.1 成本模型

定义系统单位面积上的平均结构成本为

$$C = C_{BS} \rho_{BS} + C_{RS} \rho_{RS}$$
 (8)

其中: C_{BS} 和 C_{RS} 分别是单个BS和单个RS的成本; ρ_{BS} 和 ρ_{RS} 是系统中单位面积上所部署的BS和RS的个数。在该模型中,传统的蜂窝网络可被视为无RS的系统,因此其成本可以表示为

$$C_0 = C_{BS} \rho_{BS,0}$$

网络中可以通过不同的部署方案达到同样的性能,即可以通过BS与RS的不同组合(ρ_{BS}, ρ_{RS})来达到同样的性能。若保证总体性能为定值,以(ρ_{BS}, ρ_{RS})组合为变量,在保证一定性能的前提下,可以得到一条连续的曲线,称之为等性能曲线,如图2所示。其中点 $D(\rho_{BS,0}, 0)$ 和点 $C(\rho_{BS}, \rho_{RS})$ 是曲线上两个离散的点,前者表示传统的单跳蜂窝网络,后者表示基于中继的多跳网络。为了比较两个系统,定义两者的相对结构成本为

$$C_0/C = C_{BS} \times \rho_{BS,0} / (C_{BS} \rho_{BS} + C_{RS} \rho_{RS})$$
 (9)

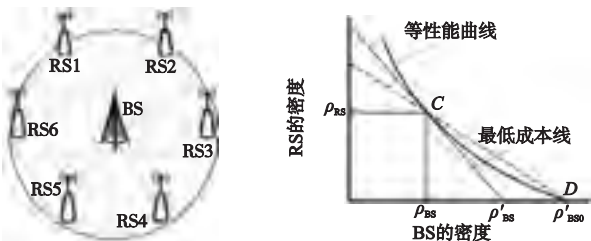


图1 BS为全向天线的中继网络部署 图2 最低成本线与等性能曲线

根据该模型可知,只要对结构成本大于1,即 $C_0/C > 1$,就说明基于中继的多跳网络在满足同等性能的前提下成本更低。换言之,只要满足以下条件即可:

$$r = C_{BS}/C_{RS} > \rho_{RS} / (\rho_{BS,0} - \rho_{BS})$$
 (10)

不等式的右边可以被看做网络中设备的限制条件,该限制条件取决于无线网络组网方案。如图2所示,已知等性能曲线

时,当斜率为 $-C_{BS}/C_{RS}$ 的直线(最低成本线)与等性能曲线相切时,该切点即为成本最低点,即保证最高性价比时 BS 与 RS 的最佳配置比例点^[4]。从式(10)可以看出,最低成本线斜率的绝对值应大于通过点 $D(\rho_{BS,0},0)$ 和点 $C(\rho_{BS},\rho_{RS})$ 所形成的直线的斜率绝对值;否则,根据该成本模型与图 2 得到的就是传统的单跳蜂窝网络成本效益最高。

2.2 等性能成本比较

选择单位面积的频谱效率(area spectral efficiency, ASE) [bps/MHz/km²] 作为系统的性能标准,不同的组网架构、不同的 (ρ_{BS},ρ_{RS}) 组合可以达到同样的网络性能。当然,不同的组网将有不同的组网成本。基于中继的网络架构可以增加系统容量,同时还可以扩大网络的覆盖面积,因此在减少 BS 的同时适当地增加 RS,可以维持 ASE 不变。

通过成本模型和图 2 可知,最低成本线的斜率可表示为

$$-r = -C_{BS}/C_{RS} = -\rho_{RS}/(\rho'_{BS} - \rho_{BS}) \tag{11}$$

其中: $(\rho'_{BS},0)$ 为最低成本线与 x 轴的交点; ρ'_{BS} 表示在最优中继配置的成本条件下,传统单跳蜂窝网络中 BS 的密度,该点是根据最低成本线引入的一个虚拟点,用来衡量站点频谱效率调整,并对获得的成本收益进行定量分析。

通过成本模型可以得到最佳性价比网络配置,同时,也可以用式(12)来量化地比较等性能成本,称之为成本增益。

$$\text{Cost_Gain} = [\rho_{BS,0}C_{BS} - (\rho_{BS}C_{BS} + \rho_{RS}C_{RS})]/(\rho_{BS,0}C_{BS}) = 1 - [(\rho_{BS} + \rho_{RS}/r)]/\rho_{BS,0} = 1 - \rho'_{BS}/\rho_{BS,0} \tag{12}$$

3 仿真分析

根据以上的分析,本章在已知等性能曲线的条件下,与单跳网络架构进行比较,定量地分析了基于中继的网络架构可能获得的成本增益。等性能曲线的密度归一化为单跳网络中单位面积上所需要的 BS 个数,即 BS 的密度。总体性能值分别取 2 和 1.5 bps/MHz/km²,小区中至少有 2 Mbps 的可用吞吐量。RS 部署在 BS 与 MS 中间,起中继增强作用。

3.1 等性能曲线

图 3 为本文应用场景的等性能曲线。ASE 分别取 2 和 1.5 bps/MHz/km²,虚线为最低成本线,设 $r = C_{BS}/C_{RS} = 10$,因此最低成本线斜率为 -10 。根据图 3 可知,在已知等性能曲线时,根据 r 即可确定该场景的最低成本配置。最低成本线一定时,所需的网络性能不同,等性能曲线也不同,最低成本线与等性能曲线的切点值也不一样,即 ASE 越小, r 值相同的情况下,所需要的 BS 和 RS 的配置密度值越小。

3.2 吞吐量分析

图 4 为中继增强的蜂窝网络与传统蜂窝网络边缘吞吐量的比较。其中,基于中继的网络中继链路在时域上无复用。据图可知,只要部署合理,RS 可以增强网络边缘的吞吐量,使得处于小区边缘的用户可以获得足够的数据传输速率;同时还可以扩大基站的覆盖范围。其中,RS 可以灵活布置,除了吞吐量较低的边缘位置,还可以用在基站的阴影区域。

3.3 基于中继组网的成本增益

图 5 为基于中继组网的成本增益与性能之间的关系,以及无线资源配置对成本的影响。从图中可以看出,随着单位面积上系统容量的增加,成本增益提高,也就是基于中继组网的网

络成本相对降低。同时,当在中继链路上时域复用时,中继链路容量会增加,整体性能可以得到提升,因此体现在成本上就是成本增益的提高。

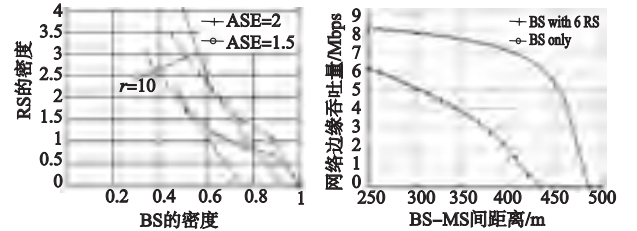


图3 中继增强的蜂窝网络等性能曲线

图4 网络边缘吞吐量比较

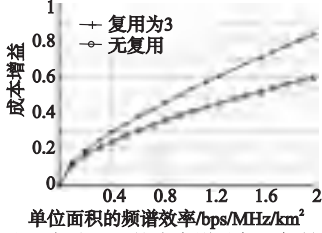


图5 基于中继组网的成本增益与目标性能比较

4 结束语

本文主要分析了基于多跳中继的宽带无线接入网络的整体网络性能及成本增益,并与传统单跳网络部署进行了比较。通过仿真分析比较可知,基于中继的部署有利于提升网络性能,增加网络边缘用户吞吐量,并扩大覆盖范围;同时,在保证目标性能的前提下,也可以获得一定的成本增益。

无线资源分配方法也对成本增益及性能的提高有一定的影响。本文只分析了复用技术对其影响。除此之外,天线技术、协同分集技术、不同的组网策略等必定也会对网络性能及成本产生一定的影响,这些可以作为下一步的研究方向和内容。

参考文献:

[1] PABST R, WALKE B H, SCHULTZ D C, et al. Relay-based deployment concepts for wireless and mobile broadband radio[J]. IEEE Communication Magazine, 2004, 42(9):80-89.

[2] PETERSON R, JOHNSSON K. Harmonized definitions and terminology for 802.16j mobile multihop relay [EB/OL]. (2006-10). <http://ieee802.org/16/relay/index.html>.

[3] IEEE 802.16 Working Group Officers. IEEE Std 802.16j. baseline document for draft standard for local and metropolitan area networks part 16: air interface for fixed and mobile broadband wireless access systems; multihop relay specification [EB/OL]. (2007-06). <http://ieee802.org/16/relay/index.html>.

[4] ZANDER J. On the cost structure of future wideband wireless access [C]//Proc of IEEE Vehicular Technology Conference. Phoenix: IEEE press, 1997:1773-1776.

[5] JOHANSSON K, FURUSKAR A, KARLSSON P, et al. Relation between base station characteristics and cost structure in cellular systems [C]//Proc of IEEE Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Stockholm: IEEE Press, 2004:2627-2631.

[6] TIMUS B. Cost analysis issues in a wireless multihop architecture with fixed relays [C]//Proc of IEEE Vehicular Technology Conference. Stockholm: IEEE Press, 2005:3178-3182.

[7] KYOSTI P, MEINILA J, HENTILA L, et al. IST-4-027756 WINNER II D1.1 V1.1: WINNER II interim channel models [EB/OL]. (2006-11). <http://www.ist-winner.org/>.

[8] 吴伟陵,牛凯. 移动通信原理[M]. 北京:电子工业出版社, 2005.

[9] 郭梯云,郭国扬,李建东. 移动通信[M]. 修订版. 西安:西安电子科技大学出版社,2000.