

广播通信融合网络能效分析

申呈洁¹, 芮贇^{2,3}, 钱国明¹, 黄飞², 李明齐²

(1. 南京邮电大学 电子科学与工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 中国科学院 上海高等研究院, 上海 201210;
3. 东南大学 移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要: 针对广播通信融合网络的性能分析问题, 提出了一种新的系统模型及能效分析方法。从用户请求业务角度出发, 将请求的业务分类为热门与非热门业务。并基于随机空间网络模型, 将融合网络中的蜂窝基站与用户建模为 2 个独立的空间泊松点过程 (PPP) 随机分布, 而广播大塔位于服务区域中心。通过考虑广播网的覆盖范围及蜂窝网的中断概率推导出广播与通信融合网络下系统的能量效率 (EE) 闭合表达式, 进一步讨论热门业务概率对融合网络能效的影响。仿真结果表明, 基于讨论的融合系统模型, 并考虑了通用场景下的基站和用户密度, 当热门业务超过总业务的 5% 后, 融合网络能效相比于单蜂窝网络有显著提高。这种新的系统模型及能效分析方法为后期分析融合网络总体性能奠定了基础。

关键词: 融合网络; 能效; 泊松点过程; 热门业务

中图分类号: TN914

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)05-0160-07

Energy efficiency analysis of broadcast and communication converged network

SHEN Cheng-jie¹, RUI Yun^{2,3}, QIAN Guo-ming¹, HUANG Fei², LI Ming-qi²

(1. College of Electronic Science and Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210096, China;
2. Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academic of Sciences, Shanghai 201210, China;
3. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: A novel system model and energy efficiency analysis method were studied to solve the problem of the performance analysis of broadcast and communication converged network. From the perspective of the user request, the business could be classified as the popular part and the non-popular part. Based on the random spatial network model, cellular base stations and users were modeled as two independent spatial Poisson point processes (PPP), while the broadcast tower was assumed to locate in the center of service regions. By further exploiting the coverage of broadcast network and the outage probability of cellular network, the closed-form expression of the converged network energy efficiency (EE) was derived, and the impact of popular business probability to the energy efficiency was discussed. Simulation results show that assuming the mentioned converged system model and the general density of BS and user, the energy efficiency of converged network would be significantly improved compared to pure cellular network when the probability of popular businesses is more than 5%. The novel model and energy efficiency analysis method provide the foundation for the study of the overall performance of the converged network.

Key words: converged network; energy efficiency; Poisson point process; popular business

收稿日期: 2013-07-16; 修回日期: 2013-10-11

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (“863” 计划) 重点基金资助项目(2011AA01A105, 2012AA011704); 上海市科委基金资助项目(11DZ1500500, 13DZ1511200); 中科院重点部署基金资助项目(KGZD-EW-103); 国家自然科学基金资助项目(61302093); 东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金资助项目(2013D07)

Foundation Items: The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2011AA01A105, 2012AA011704); Project of Science and Technology Commission of Shanghai Municipality (11DZ1500500, 13DZ1511200); Project of CAS Key Development (KGZD-EW-103); The National Natural Science Foundation of China(61302093); Open Research Fund of National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University(2013D07)

1 引言

随着数字技术的不断发展和网络传输的速度加快,综合了语音、数据、图像的多媒体信息服务成为了人们追求信息交流多样化的趋势。在未来无线网络中,单独依靠传统广播网或双向通信网,都无法实现移动信息业务的最优化传输。实现广播网和双向通信网的融合,是解决移动信息业务数据量快速增长和无线网络传输容量受限之间矛盾的有效途径。它可以提升服务质量,降低运营成本,实现有限资源的合理利用^[1]。

现有关于广播通信融合网络的性能分析主要集中于容量及覆盖范围的分析。文献[2]研究了广播单播融合网络工作于同一频段的传输机制,提出基于覆盖架构的能进行单播信号无干扰接收的脏纸编码(DPC)方法,同时引入混合可获得数据对,结合广播的中断概率及单播的总速率,证明了混合系统的区域速率当单播信号以OFDMA方式传输时有上界。文献[3]从信息论的角度分析了基于正交频分复用(OFDM)的广播单播混合系统容量,推导了广播与单播业务采用正交分配和非正交分配时的混合系统容量的闭式解。文献[4]分析了融合网络中发射功率与覆盖范围的关系、相同功率下广播大塔与蜂窝小塔覆盖范围的关系及覆盖比例因子取值不同时对系统评估指标的影响。

目前在无线网络中,用户移动信息业务总需求中66%以上来源于视频业务。通过智能搜索,发掘出绝大多数用户关注的只是少量主体内容,通过广播网络将这少量主体内容推送到客户端,将极大提高业务分发效率。而广播网针对主体内容内容进行传输,对用户而言仅消耗一份功率,因此分析融合网络的能效(EE)将更能客观体现融合网络的性能优势。

常见的蜂窝基站建模有维纳模型与六边形网格模型^[5-9]。维纳模型假定每个基站与目标用户之间都有增益且2个相邻小区间用户的增益相同,这种模型过于简单且失去了实际模型的特性。六边形网格是普遍采用的模型,但随着网络规模越来越大,这种模型将难于分析。通过考虑基站位置的随机性,将其建模为泊松点过程而不是假设将基站放置在确定性规则网格上,这种方法更符合于实际网络且便于分析中断概率与覆盖范围^[10]。但文献[10]中分析蜂窝网络模型只考虑了基站分布,假设每个

基站有至少一个用户进行服务,而忽略了考虑用户的密度与分布。然而,在一个实际的网络中,并不是所有的基站都是激活的,即有可能在某些蜂窝小区中没有激活用户,因此这会对分析网络的干扰及性能产生影响。且当基站的密度增加时,这种影响变得更加突出。因此将用户建模为与基站独立的泊松点过程(PPP),便于分析用户密度产生的影响^[11-13]。

本文结合广播网与蜂窝网的融合特性,提出一种新的融合网络建模及能效分析方法。首先基于随机空间网络模型,将融合网络中的蜂窝基站与用户建模为2个独立的泊松点过程随机分布,而广播大塔位于服务区域中心。根据用户对不同业务请求概率的不同,将请求业务分类为热门与非热门业务。然后,通过考虑广播网的覆盖范围及蜂窝网的中断概率推导出广播与通信融合网络下系统的能量效率闭合表达式。最后给予表达式分析热门业务概率对融合网络能效的影响。

2 系统模型

2.1 网络模型

本文分析广播与蜂窝融合网络覆盖区域 S 。由于广播网的广域覆盖特性,为了便于下文进行理论分析,只考虑一个广播基站,且广播基站位于服务区域中心,如图1所示。将蜂窝基站及用户建模为2个独立的泊松点过程随机分布于 S 中,记为 Φ_b 、 Φ_u ,密度记为 λ_b 、 λ_u 。考虑下行传输,将用户请求业务分类为热门业务与非热门业务,对于请求热门业务的用户由广播大塔进行服务,请求非热门业务的用户由最近的蜂窝基站进行服务。本文中假设广播网络与蜂窝网络工作于不同频段,不考虑广播网络与蜂窝网络之间存在的干扰。设融合网络总带宽为 B_0 ,定义带宽分配因子 $\varepsilon(0 < \varepsilon < 1)$,则广播网络所占带宽为 εB_0 ,蜂窝网络占带宽为 $(1 - \varepsilon)B_0$ 。

2.2 用户业务模型

广播与蜂窝融合系统为一个随机服务系统,服务对象是系统中有业务请求的用户,广播与蜂窝的传输链路称为服务中心。由于服务中心服务的用户众多且用户间请求相互独立,假设服务台共有 M 种业务选择, i 为所有业务在系统中点击率从高到低的排列号。根据数据研究^[14],用户对业务的选择服从Zipf分布,即用户请求不同业务 i 的概率为 $p_i = (1/i)^\theta / \sum_{i=1}^M (1/i)^\theta$,其中, θ 为倾斜因子,其

大小反映用户对业务的偏爱程度，不同的 θ 对应不同的 Zipf 分布。当 $\theta=0$ 时，Zipf 分布简化为均匀分布；当 $\theta=1$ 时，Zipf 分布近似于 80-20 原则。由文献[15~17]可知，80% 用户请求的多媒体业务集中在 10%~20% 的业务上，即 80-20 原则。因此，本文中取 $\theta=1$ 。由于广播网的广域覆盖特性，将这 10%~20% 的业务由广播网进行广播传送将有效节省传输带宽，从而显著提高了频谱利用率。但若广播网承担过多的传输，传输周期变长，将影响用户体验度。为了定量分析广播传输业务量大小对融合网能效的影响，本文将请求概率高于门限值 ψ 的多媒体业务称为热门业务，低于该门限值的多媒体业务则称为非热门业务^[18]。

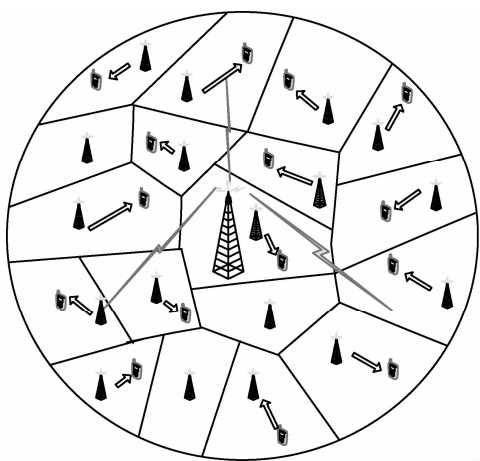


图 1 融合系统模型

推论 1 设门限值 ψ ，若 $p_i \geq \psi$ ，则称此业务 i 为热门业务；若 $p_i < \psi$ ，则称为非热门业务。定义热门业务数占服务中心业务总数的比例为热门业务概率 P_p ， P_{np} 表示非热门业务概率。则

$$P_p = \frac{1/[(\ln M + C) \times \psi]}{M} \quad (1)$$

$$P_{np} = \frac{M - 1/[(\ln M + C) \times \psi]}{M} \quad (2)$$

其中， $C=0.577\ 22\dots$ 为一个无理数，称作欧拉初始，专为调和级数所用。

进一步定义 P_x 为用户请求热门业务的概率， P_y 为用户请求非热门业务的概率。可得

$$P_x = \frac{\ln(P_p M) + C}{\ln M + C} \quad (3)$$

$$P_y = \frac{\ln(1/P_p)}{\ln M + C} \quad (4)$$

3 融合网络容量分析

3.1 广播网络有效容量

假设在单位时间内 S 中所有用户都有业务请求。已知用户密度及用户请求热门业务概率，则请求热门业务的用户密度为 $\lambda_u P_x$ 。由于广播网在其覆盖范围内，每个用户所接收的信息量相同，因此广播网在带宽为 ϵB_0 下传输的有效信息容量为

$$R^b = A_b \lambda_u P_x R(\text{MCS}) \epsilon B_0 \quad (5)$$

其中， A_b 为广播网的覆盖面积。由于用户服从空间泊松点过程，则 $A_b \lambda_u P_x$ 表示覆盖面积 A_b 区域内请求热门业务的用户数。考虑未编码情况， $R(\text{MCS}) = bi(1 - \text{Ber})$ ， bi 为广播网传输调制方式， Ber 为误比特率。

设广播网的传输功率为 P_b ，参照文献[19]，可得

$$P_b = -\frac{\ln(5\text{Ber})\sigma_n^2(2^{bi} - 1)}{1.6d^{-\alpha}} \quad (6)$$

其中， σ_n^2 为噪声方差， d 为广播网覆盖半径， α 为传输路径衰减因子，由式 (6) 可得

$$bi = \text{lb}\left(1 + \frac{P_b 1.6d^{-\alpha}}{-\ln(5\text{Ber})\sigma_n^2}\right) \quad (7)$$

本文假设广播网采用 QPSK 调制方式可满足用户需求，则 $bi=2$ 。由于 P_b 、 σ_n^2 值固定，可得广播网覆盖半径为

$$d_b = \left[\frac{-3\ln(5\text{Ber})\sigma_n^2}{1.6P_b}\right]^{\frac{1}{\alpha}} \quad (8)$$

广播网有效信息容量为

$$R^b = 2\pi d_b^2 \lambda_u P_x (1 - \text{Ber}) \epsilon B_0 \quad (9)$$

3.2 蜂窝网络有效容量分析

记蜂窝网络覆盖区域总面积为 $A_c = \pi d_c^2$ 。将 A_c 划分为两部分：一部分为与广播网共同覆盖区域，另一部分为蜂窝网单独覆盖区域。

如图 2 所示，在广播网与蜂窝网共同覆盖区域内，请求热门业务的用户由广播网服务，请求非热门业务的用户由最近的蜂窝网服务。在蜂窝网单独覆盖区域内，所有用户请求的业务均由蜂窝网服务。因此求蜂窝网的有效信息容量需对这两部分分别进行分析。

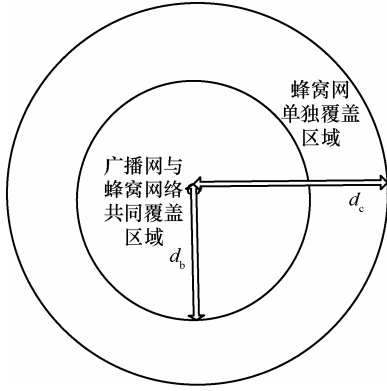


图 2 融合网络覆盖示意

记覆盖半径为 d_b 的区域面积为 $A_b = \pi d_b^2$, (d_b, d_c) 的区域面积为 $A_c = A_c - A_b$ 。则蜂窝网络有效容量为 $R_{d_b}^c + R_{(d_b, d_c)}^c$ 。

先求 d_b 覆盖范围内蜂窝网的有效容量 $R_{d_b}^c$ 。设请求非热门业务用户接收到所服务蜂窝基站 Y 的功率为 $S_Y = P_c h_y r^{-\alpha}$, 其中, P_c 为每个蜂窝基站的发送功率, h_y 为瑞利衰落随机变量, r 为蜂窝基站与用户间距离。则请求非热门业务用户受到的干扰为 $I = \sum_{Y \in \Phi_b \setminus \{Y\}} P_c h_y R^{-\alpha}$, 其中, R 为用户 M 至其他蜂窝基站间的距离。假设蜂窝基站为干扰受限网络, 不考虑噪声干扰, 可得用户接收到的信干比为 $SIR = S_Y / I$ 。记用户接受到的信干比小于阈值 T 时, 用户发生中断, 可得中断概率为 $P_{out} = Pr(SIR < T)$ 。参照文献[12]可得区域 A_b 中用户的中断概率为

$$P_{out}^1 = 1 - \frac{1}{1 + P_j^1 \beta} \quad (10)$$

其中, P_j^1 为区域 A_b 中蜂窝基站的激活概率,

$$\beta = T^{\frac{2}{\alpha}} \int_{T^{-\frac{\alpha}{2}}}^{\infty} \frac{1}{1 + x^2} dx。$$

由于蜂窝基站与用户位置的独立性及用户请求业务的随机性, 因此存在一些蜂窝基站所在小区内没有用户或没有用户进行非热门业务请求, 将这些蜂窝基站称作非激活基站, 并将有非热门业务请求的基站称作激活基站。

由于请求非热门业务的用户密度为 $\lambda_u P_y$, 且蜂窝基站与用户分别服从空间泊松点过程, 则区域中用户请求非热门业务的事件一次都没有发生的过程服从指数分布, 即 $e^{-\lambda_u P_y x}$, 其中, x 为任一 Voronoi 小区面积^[7]。

参照文献[20], 为了便于求得闭合表达式, 在泊松随机曲面中取 Voronoi 小区的分布函数约等于

$$f_s(x) \approx \frac{3.5^{3.5}}{\Gamma(3.5)} \lambda_b^3 x^2 \exp(-3.5 \lambda_b x) \quad (11)$$

因此在区域 A_b 内用户请求非热门业务的事件没有发生的概率 (非激活基站概率) 为

$$P_{nj}^1 = \int_0^{\pi d_b^2} e^{-\lambda_u P_y x} f_s(x) dx$$

$$= K \left(\frac{\lambda_b}{m_1}\right)^3 [2 - e^{-m_1 \pi d_b^2} ((m_1 \pi d_b^2)^2 + 2m_1 \pi d_b^2 + 2)] \quad (12)$$

其中, $K = \frac{3.5^{3.5}}{\Gamma(3.5)}$ 为常数, $m_1 = 3.5 \lambda_b + \lambda_u P_y$ 。

进一步可得蜂窝基站的激活概率为

$$P_j^1 = 1 - P_{nj}^1 \quad (13)$$

则在 d_b 范围内蜂窝网的有效容量为

$$R_{d_b}^c = A_b \lambda_b P_j^1 (1 - P_{out}^1) \text{lb}(1 + T)(1 - \varepsilon) B_0 \quad (14)$$

再求 A_c 内蜂窝网的有效容量 $R_{(d_b, d_c)}^c$ 。由于在 A_c 区域内无热门业务非热门业务之分, 所有用户的业务请求都由蜂窝网进行传送。

定义 P_{nj}^2 为 A_c 内基站没有用户进行服务请求的概率, 可得

$$P_{nj}^2 = \int_{\pi d_b^2}^{\pi d_c^2} e^{-\lambda_u x} f_s(x) dx$$

$$= K \left(\frac{\lambda_b}{m_2}\right)^3 [e^{-m_2 \pi d_b^2} ((m_2 \pi d_b^2)^2 + 2m_2 \pi d_b^2 + 2) - e^{-m_2 \pi d_c^2} ((m_2 \pi d_c^2)^2 + 2m_2 \pi d_c^2 + 2)] \quad (15)$$

其中, $m_2 = 3.5 \lambda_b + \lambda_u$, $P_j^2 = 1 - P_{nj}^2$, $P_{out}^2 = 1 - \frac{1}{1 + P_j^2 \beta}$ 。

因此, 在 (d_b, d_c) 覆盖范围内蜂窝网的有效容量为

$$R_{(d_b, d_c)}^c = A_c \lambda_b P_j^2 (1 - P_{out}^2) \text{lb}(1 + T)(1 - \varepsilon) B_0 \quad (16)$$

所以当广播网采用 QPSK 调制方式时, 蜂窝网的有效信息容量为

$$R^c = R_{d_b}^c + R_{(d_b, d_c)}^c$$

$$= [A_b \lambda_b P_j^1 (1 - P_{out}^1) + A_c \lambda_b P_j^2 (1 - P_{out}^2)] \text{lb}(1 + T)(1 - \varepsilon) B_0 \quad (17)$$

4 融合网络能效分析

4.1 融合网络能效

定义融合网络能效为融合网络有效信息容量与网络所消耗的功率及占用带宽的比例，为

$$\eta_{EE} = \frac{R_{\text{hybrid}} / B_0}{P_{\text{hybrid}}} = \frac{[R_{\text{QPSK}}^b + R_{d_b}^c + R_{(d_b, d_c)}^c] / B_0}{P_c(A_b \lambda_b P_j^1 + A_c \lambda_b P_j^2) + P_b} \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1} \cdot \text{J}^{-1} \quad (18)$$

4.2 单蜂窝网能效

考虑融合网络极限情况，令阈值 $\psi = 1$ ，则热门业务概率 $P_p \rightarrow 0$ ，此时所有用户的业务请求都由蜂窝网进行发送，广播网不进行任何传输，则融合网络简化为单蜂窝网络，蜂窝网所占带宽为 B_0 。令单蜂窝网络基站激活概率为 P_j^1 ， $P_j^1 = 1 - P^c$ ，则

$$\eta_{EE} = \frac{A_b \lambda_b P_j^1 (1 - P_{\text{out}}^1) + A_c \lambda_b P_j^2 (1 - P_{\text{out}}^2) + 2A_b \lambda_u P_x (1 - \text{Ber})}{2[P_c(A_b \lambda_b P_j^1 + A_c \lambda_b P_j^2) + P_b]} \quad (22)$$

$$\frac{\partial \eta_{EE}}{\partial P_j^1} = \frac{[A_b \lambda_b \frac{1}{1 + P_j^1 \beta} + A_b \lambda_b P_j^1 \frac{-\beta}{(1 + P_j^1 \beta)^2}] [P_c(A_b \lambda_b P_j^1 + A_c \lambda_b P_j^2) + P_b]}{2[P_c(A_b \lambda_b P_j^1 + A_c \lambda_b P_j^2) + P_b]^2} - \frac{P_c A_b \lambda_b [A_b \lambda_b P_j^1 \frac{1}{1 + P_j^1 \beta} + L]}{2[P_c(A_b \lambda_b P_j^1 + A_c \lambda_b P_j^2) + P_b]^2} \quad (23)$$

其中， $L = A_c \lambda_b P_j^2 (1 - P_{\text{out}}^2) + A_b \lambda_u P_x (1 - \text{Ber})$ 。令分子等于 $f(P_j^1)$ ，则

$$\frac{\partial f(P_j^1)}{\partial P_j^1} = \frac{[-2A_b \lambda_b \beta (1 + P_j^1 \beta)] [P_c(A_b \lambda_b P_j^1 + A_c \lambda_b P_j^2) + P_b]}{(1 + P_j^1 \beta)^4} < 0 \quad (24)$$

已知 $P_j^1 \in (0, 1)$ ， $f(P_j^1)$ 为关于 P_j^1 的减函数，且 $\lim_{P_j^1 \rightarrow 0} f(P_j^1) < 0$ ，可得 $f(P_j^1) < 0$ 。又因为 $2[P_c(A_b \lambda_b P_j^1 + A_c \lambda_b P_j^2) + P_b] \geq 0$ ，可得 $\frac{\partial \eta_{EE}}{\partial P_j^1} < 0$ ， η_{EE} 为关于 P_j^1 的减函数。

由于在区域 A_b 内随着热门业务概率的提升，则请求热门业务的用户数增加，非热门业务用户数减少，则蜂窝基站激活概率 P_j^1 随之减少。 η_{EE} 为关于 P_j^1 的减函数，因此可得 η_{EE} 与 P_p 呈正比关系，即随着热门业务概率的增加，融合网络能效随之递增。

$$P^c = \int_0^{\pi d_c^2} e^{-\lambda_u x} f_s(x) dx = K \times \left(\frac{\lambda_b}{m_2}\right)^3 \times [2 - e^{-m_2 \pi d_c^2} ((m_2 \pi d_c^2)^2 + 2m_2 \pi d_c^2 + 2)] \quad (19)$$

因此单蜂窝网的有效信息容量为

$$R^c = [A_c \lambda_b P_j^c (1 - P_{\text{out}}^c) \text{lb}(1 + T)] \times B_0 \quad (20)$$

其中， $P_{\text{out}}^c = 1 - \frac{1}{1 + P_j^c \beta}$ ， $A_c = \pi d_c^2$ 。

所消耗的功率为 $P^c = A_c \lambda_b P_j^c P_c$ ，其中， $A_c \lambda_b P_j^c$ 表示 A_c 中进行传输的蜂窝基站数目。

可得单蜂窝网的能效为

$$\eta_{EE} = \frac{(1 - P_{\text{out}}^c) \text{lb}(1 + T)}{P_c} \quad (21)$$

4.3 热门业务概率对融合网络能效影响

取 $\varepsilon = 1/2$ ，即广播网与蜂窝网占用带宽相同。

令 $T = 1$ ，则可得

5 数值仿真

假设路径损耗指数 $\alpha = 3.5$ ，SIR 阈值 $T = 1$ 。考虑通用场景下的基站与用户密度，设基站密度 $\lambda_b = 1.2 \times 10^{-3} / \text{m}^2$ ，用户密度 $\lambda_u = 10^{-3} / \text{m}^2$ ，进一步假设蜂窝基站发射功率 $P_c = 46 \text{ W}$ ，广播基站发射功率 $P_b = 600 \text{ W}$ ，误比特率 $\text{Ber} = 1 \times 10^{-7}$ ，噪声功率 $\sigma_n^2 = -97.5 \text{ dBm}$ ，服务中心业务总数 $M = 100$ 。针对广播覆盖范围与蜂窝覆盖范围不同这一情况，设置蜂窝覆盖范围 $d_c = 12 \text{ km}$ ，而广播覆盖范围则由发送功率及其调制方式所动态确定。

1) 取 $\varepsilon = 1/2$ ，分析热门业务概率 P_p 对融合网

络能效的影响。

由图 3 可知，随着 P_p 的不断上升，融合网络能效不断递增，当 P_p 超过所有业务总量的 5% 后，融合网络能效大于单蜂窝网能效。对于 P_p 的范围，即 Ψ 因子的设置对融合网络系统性能有重要影响，若此值设置过大， P_p 则过小，广播网传输的请求很少，而蜂窝网负担将很重，性能接近单蜂窝网情况，能效较低。若 Ψ 因子设置过小，则广播网承担大部分传输，传输周期长，用户体验度不高。因此，合理的 Ψ 因子设置能在 2 个网络中均衡分布数据流量以更好地满足用户请求。由于本文没有分析当 P_p 不断增加后所引起的广播发送周期长而造成的用户体验度下降情况，因此可得在一定范围内，随着 P_p 的增加，融合网络能效随之提升。

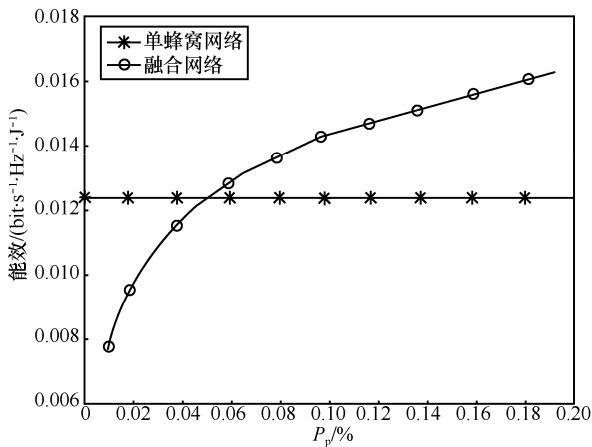


图 3 融合网络与单蜂窝网络能效对比

2) 带宽分配因子 ϵ 对融合网络能效的影响。如图 4 所示，当热门业务概率 P_p 大于 5% 后，

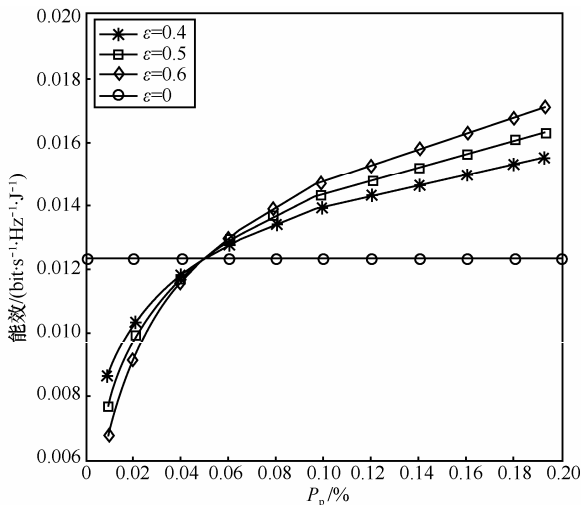


图 4 带宽分配与能效关系

融合网络能效高于单蜂窝网络能效。随着 ϵ 的增加，即更多的带宽分配给广播网使用，融合网络能效越高。因此部署融合网络时，在满足蜂窝网传输所需带宽情况下，将更多的带宽供广播网使用可有效提高融合网能效。

6 结束语

本文从用户请求业务角度出发，结合用户请求业务的 Zipf 分布，将请求的业务分类为热门与非热门业务。基于随机空间网络模型，通过考虑广播网的覆盖范围及蜂窝网的中断概率推导出广播与通信融合网络下系统有效信息容量，并得出系统的能量效率闭合表达式。进一步分析热门业务概率对融合网络能效的影响。仿真结果表明，基于文中讨论的融合系统模型，并考虑了通用场景下的基站和用户密度，当热门业务概率超过 5% 后，融合网络能效高于单蜂窝网络能效。同时当热门业务概率超过 5% 后，在满足蜂窝网传输所需带宽情况下，将更多的带宽供广播网使用可有效提高融合网能效。本文提出的广播通信融合网络能效分析方法为后期分析融合网络总体性能奠定了基础，且系统模型在广播通信融合网络分析中具有一定的通用性。

由于用户请求的热门业务存在着时间段不断更新的问题，且一个蜂窝基站所覆盖范围内存在多个用户同时请求的情况，这进一步增加了融合系统的分析难度。将不同时间段内热门业务建模为一个生灭过程，且考虑多用户请求、用户模式选择以及融合系统能效和频谱效率的折中考虑是将来需要进一步研究的内容^[21,22]。

参考文献:

- [1] 封松林, 解伟. 下一代广播电视网无线系统[J]. 中兴通讯技术, 2011, 17(4): 14-18.
FENG S L, XIE W. Next-generation broadcast network wireless systems[J]. ZTE Technology Journal, 2011, 17(4): 14-18.
- [2] LI H X, LIU B, LIU H. Transmission schemes for multicarrier broadcast and unicast hybrid systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(11): 4321-4330.
- [3] 贡超, 刘广宇, 杨曾等. 基于 OFDM 的广播单播混合系统容量分析[J]. 天津大学学报, 2010, 43(3): 199-202.
YUN C, LIU G Y, YANG Z, et al. Capacity analysis of OFDM based broadcast and unicast hybrid system[J]. Journal of Tianjin University, 2010, 43(3): 199-202.
- [4] HUANG F, LIU Z, RUI Y, et al. Coverage performance and comparison between broadcasting and cellular system[A]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference[C]. Shanghai, China,

2013. 35-38.
- [5] CORNILLET N, CRUSSETT M, H'ELARD J F. On the hybrid use of unicast/broadcast networks under energy criterion[A]. Proceedings of IEEE 23rd International Symposium on Personal[C]. Sydney, Australia, 2012. 1256-1261.
- [6] CORNILLET N, CRUSSETT M, H'ELARD J F. Optimization of the energy efficiency of a hybrid broadcast/unicast network[A]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference[C]. Shanghai, China, 2013. 39-44.
- [7] WYNER A D. Shannon-theoretic approach to a Gaussian cellular multiple-access channel[J]. IEEE Trans Inf Theory, 1994, 40(11):1713-1727.
- [8] SHANMAI S, WYNER A D. Information-theoretic considerations for symmetric, cellular, multiple-access fading channels-parts I & II[J]. IEEE Trans Inf Theory, 1997, 43(11):1877-1911.
- [9] SOMEKH O, SHANMAI S. Shannon-theoretic approach to a Gaussian cellular multi-access channel with fading[J]. IEEE Trans Inf Theory, 2000, 46: 1401-1425.
- [10] ANDREWS J G, BACCELLI F, GANTI K R. A tractable approach to coverage and rate in cellular networks[J]. IEEE Trans Commun, 2011, 59(11): 3122-2134.
- [11] LI C, ZHANG J, LETAIEF K B. Energy efficiency analysis of small cell networks[A]. IEEE International Conference on Communications[C]. Budapest, Hungary, 2013.4404-4408.
- [12] LEE S, HUANG K. Coverage and economy of cellular networks with many base stations[J]. IEEE Communication Letters, 2012, 16(7): 1038-1040.
- [13] CAO D X, ZHOU S, NIU Z S. Optimal base station density for energy efficient heterogeneous cellular networks[A]. IEEE International Conference on Communications[C]. Ottawa, Canada, 2012. 4379-4383.
- [14] VAIDYA N H, HAMEED S. Scheduling data broadcast in asymmetric communication environments[J]. Wireless Network, 1999, 5: 171-182.
- [15] DAN A, SITARAM D, SHAHABUDDIN P. Scheduling policies for an on-demand video server with batching[A]. Proceedings of ACM International Conference on Multimedia[C]. New York, USA, 1994. 15-23.
- [16] DAN A, SITARAM D, SHAHABUDDIN P. Dynamic batching policies for an on-demand video server[J]. Multimedia Systems, 1996,4(3): 112-121.
- [17] GAO L X, KUROSE J, TOWSLEY D. Efficient schemes for broadcasting popular videos[J]. IEEE Computer Society Press, 2002, 8: 284-294.
- [18] 王慧, 梁立涛, 张平. 数字广播和通信移动融合网络的性能分析[J]. 北京工业大学学报, 2008, 34(1):43-47.
- WANG H, LIANG L T, ZHANG P. Performance analysis of digital broadcasting and communication mobile converged network[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2008, 34(1): 43-47.
- [19] WANG Z Y, HE C, HE A. Robust AM-MIMO based on minimized transmission power[J]. IEEE Communication Letters, 2006, 10(6): 432-434.
- [20] FERENCA J S, NEDA Z. On the size distribution of Poisson voronoi cells[J]. Physica A: Stat Mechanics and Its App, 2007, 385(2): 518-526.
- [21] RUI Y, ZHANG Q T, DENG L, *et al.* Mode selection and power optimization for energy efficiency in uplink virtual MIMO systems[J]. IEEE Journal of Selected Areas in Communications, 2013, 31(5): 926-936.
- [22] DENG L, RUI Y, CHENG P, *et al.* A unified energy efficiency and spectral efficiency tradeoff metric in wireless networks[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(1):55-58.

作者简介:



申呈洁 (1988-), 男, 江苏南通人, 南京邮电大学硕士生, 主要研究方向为三网融合、绿色通信。

芮赞 [通信作者] (1983-), 男, 江苏溧阳人, 中国科学院上海高等研究院副研究员, 主要研究方向为三网融合、无线通信、绿色通信。E-mail: ruiy@sari.ac.cn。

钱国明 (1964-), 男, 浙江绍兴人, 南京邮电大学教授, 主要研究方向为无线通信技术、软件无线电。

黄飞 (1973-), 男, 四川达州人, 中国科学院上海高等研究院助理研究员, 主要研究方向为三网融合、宽带无线通信。

李明齐 (1971-), 男, 江西南昌人, 中国科学院上海高等研究院研究员, 主要研究方向为三网融合、宽带无线通信、软件无线电。