

绿色蜂窝网络的频谱效率与能效函数

朱近康, 许莉

(中国科学技术大学 电子工程与信息科学系, 安徽 合肥 230027)

摘要: 为了给绿色蜂窝网络的研究和设计提供一个基本的基准或判断依据, 对存在多小区干扰和越区切换情况下蜂窝网络的网络传输能力(网络频谱效率)和能量效率函数(能效函数)进行了研究, 揭示了蜂窝网络的功率开销与频谱效率之间的关系。首先, 给出了蜂窝网络能效函数的定义, 并在此基础上提出了小区干扰深度和越区切换的动力学模型, 进而论证了存在多小区干扰和越区切换情况下的蜂窝网络频谱效率, 并推证了数学表达式。最后, 求解了蜂窝网络的能效函数, 讨论了相关参数对它的影响和数值结果分析, 为绿色蜂窝网络的研究和设计, 提供了有益的分析依据和基础。

关键词: 蜂窝网络的频谱效率; 蜂窝网络的能效函数; 小区干扰深度; 越区切换动力学模型; 绿色无线移动通信
中图分类号: TN929.53 文献标识码: A 文章编号: 1000-436X(2013)01-0001-07

Spectrum-efficiency and energy-efficiency functions of green cellular networks

ZHU Jin-kang, XU Li

(Department of Electronic Engineering and Information Science, USTC, Hefei 230027, China)

Abstract: To provide a research and design standard for green cellular networks with the presence of multi-cell interference and handover cases, the network transmission capacity (network spectral efficiency) and energy efficiency functions of the cellular network was researched, and the relationship between the power consumption and the spectrum efficiency in the cellular networks was revealed. First, the energy efficiency function of the cellular networks was defined. Based on this, the cell interference depth and the handoff dynamic model of cellular networks were proposed, and then the network spectrum-efficiency of the cellular networks was analyzed in the presence of multi-cell interference and handoff, and its mathematical expression was derived. Finally, the energy-efficiency function of the cellular networks and its numerical results were deducted and discussed. These results will provide a useful theoretical basis for green design of cellular networks.

Key words: spectrum-efficiency of cellular networks; energy-efficiency function of cellular networks; cell interference depth; handoff dynamic model; green wireless mobile communications

1 引言

节约能源和保护环境是当今人类社会生活面临的重大课题。有资料表明, 信息通信行业的能量消耗巨大, 信息通信技术产业已经成为全球第 5 大耗能产业。近年高速发展的无线移动通信, 特别是

随着通信用户的急剧增长、各种通信业务的高速发展、通信网络规模的不断扩张和无线基站的数量增多等因素, 使得移动网络功耗惊人, 面临着越来越大的节能压力。因此, 绿色无线移动通信是重要的研究课题和发展方向, 是亟待研究发展的重大前沿课题^[1,2]。

收稿日期: 2011-12-05; 修回日期: 2012-05-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61172088); 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(SS2012AA011702)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(61172088); The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (SS2012AA011702)

对节能减排的绿色无线通信研究是从 21 世纪开始的。特别是 2008 年以来,无线通信网络和覆盖的节能研究与分析急剧增加,在节能蜂窝小区设计^[2]、移动网络的耗能分析^[3]、LTE 基站系统的节能潜力^[4]、基站覆盖管理的节能^[5]等方面,绿色无线网络的 4 个基本关系^[6]以及功率自适应的 ARQ 等技术研究^[7],反映了现有移动通信网络的节能研究进展。但到目前为止,对绿色移动通信的研究还比较分散,如何看待和评价蜂窝网络的节能效果还没有一个公认可信的基本基准或判断依据。基于此,本文针对移动通信蜂窝小区覆盖的网络结构,在存在多小区干扰和越区切换的情况下,研究蜂窝网络的传输能力和能量效率函数,揭示了蜂窝网络的功率开销与频谱效率之间的关系。为此,本文在给出蜂窝网络能效函数定义的基础上,提出小区干扰度量参数——小区干扰深度,并描述越区切换的动力学模型,论证蜂窝网络的网络频谱效率,进而求解蜂窝网络的能效函数,讨论相关参数对它的影响。这些将为蜂窝网络的绿色设计提供有益的分析依据和研究基础。

2 蜂窝网络能效函数

定义无线通信的基站能效函数 Q_B 为基站能实现的传输能力(频谱效率)与基站的发送功率之比。

$$Q_B = \frac{C/B}{P_0} \quad (1)$$

其中, C/B 是基站能达到的单位频带的频谱效率,即信道传输容量与信道带宽之比; P_0 是基站的发送功率。 Q_B 表示基站单位频带的单位发送功率能实现的传输能力。

按香农容量定理,在接收端的接收信号功率 P_r 和噪声干扰功率 N 已知的情况下,单位频率能获得的传输容量(传输能力),即频谱效率为

$$\frac{C}{B} = \text{lb} \left(1 + \frac{P_r}{N} \right) \quad (2)$$

可见,式(2)给出能实现的频谱效率,仅仅依赖于接收信噪比。接收信号功率 P_r 的大小,决定于发送功率的大小,但在接收信噪比相同情况下,式(2)不能直接反映发送功率的改变对频谱效率的影响。

首先,假定无线信号在理想传播条件下传播,按照能量守恒定理,自由空间无损耗传播,

如果发送点发送功率为 P_0 ,均匀辐射传播到距离为 r 接收点,其覆盖面积为 $A(r^2)$,那接收点的信号功率密度^[8]为

$$s_A = \frac{P_0}{A(r^2)} \quad (3)$$

接收天线的有效面积 A_a 为

$$A_a = \frac{l^2 G}{4\pi} \quad (4)$$

其中, G 是接收天线的方向性增益(全向天线, $G=1$)。 λ 是收发信号的波长,有 $\lambda=c/f$, c 是传播速度(光速 $c=3 \times 10^8 \text{m/s}$), f 是收发信号的频率。那么,基站信号传播到距离为 r 的接收机接收信号功率为

$$P_r = s_A A_a = \frac{l^2 G}{4\pi A(r^2)} P_0 \quad (5)$$

相应的发射信号功率为

$$P_0 = \frac{4\pi A(r^2)}{l^2 G} P_r \quad (6)$$

因此,基站的频谱效率可以改写为

$$\frac{C}{B} = \text{lb} \left(1 + \frac{l^2 G}{4\pi A(r^2) N} P_0 \right) \quad (7)$$

这样,基站的能效函数 Q_B 为

$$Q_B = \frac{\text{lb} \left(1 + \frac{l^2 G}{4\pi A(r^2) N} P_0 \right)}{P_0} \quad (8)$$

例 1 如果使用信号频率 $f=2\text{GHz}=2 \times 10^9 \text{Hz}$, $\lambda=0.15\text{m}$ 。发送天线辐射为全向均匀的球面模型,传播距离 r 时,覆盖面积 $A(r^2)=4\pi r^2$,天线增益 $G=1$,有干扰背景的噪声功率 $N=-70\text{dBmW}$ ($=10^{-7}\text{mW}$) 时,图 1 给出了接收信噪比为 10dB,频谱效率为 $C/B=3.46\text{bit/s/Hz}$ 时,在不同小区半径下,基站发送功率 $P_0(\text{W})$ 与能达到的能效函数 $Q_B(\text{bit/s/Hz/mW})$ 的相互关系。结果表明,尽管接收端的接收信噪比不变,频谱效率也不变,但小区半径不同,会使得需要的发送功率不同,能达到的能效函数也就明显不同。小区半径越小,所需发送功率越小,能效函数越高。

基于上述分析,定义蜂窝网络的能效函数 Q 为在给定覆盖面积内所有基站能获得的传输能力(频谱效率)总和与所有基站的发送功率开销之比,即

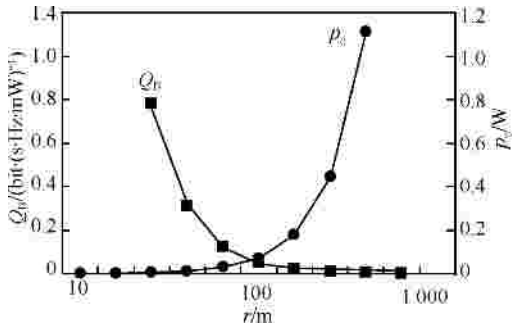


图 1 接收信噪比为 10dB, C/B=3.46bit/s/Hz 时, 不同 r 的 P_o 与 Q_e 的关系

$$Q = \frac{\sum_{m=1}^M C_m / B}{\sum_{m=1}^M P_{0(m)}} \quad (9)$$

其中, M 是给定覆盖面积内的小区数, B 是所有小区使用相同的频率带宽, C_m 是第 m 个小区的传输容量, $P_{0(m)}$ 是第 m 个小区基站所需的发送信号功率。利用上述分析, 给定覆盖面积内, 第 m 个基站小区的半径为 $r_{(m)}$, 其覆盖面积为 $A(r_{(m)}^2)$, 天线的方向性增益为 $G_{(m)}$, 则蜂窝网络的能效函数为

$$Q = \frac{\sum_{m=1}^M \text{lb}\left(1 + \frac{l^2 G_{(m)}}{4\pi A(r_{(m)}^2) N_{(m)}} P_{0(m)}\right)}{\sum_{m=1}^M P_{0(m)}} \approx \frac{\sum_{m=1}^M \text{lb}\left(\frac{l^2 G_{(m)}}{4\pi A(r_{(m)}^2) N_{(m)}} P_{0(m)}\right)}{\sum_{m=1}^M P_{0(m)}}, \quad (2^{C/B} \gg 1) \quad (10)$$

其中, $N_{(m)}$ 是第 m 个小区接收点的噪声干扰功率。显然, 随着给定覆盖面积内蜂窝网络小区数 M 的增加, 所有基站能获得的总传输能力增加。但蜂窝网络的能效函数 Q 值却不一定随 M 明显变动。 Q 要大, 那 $r_{(m)}$ 和 $N_{(m)}$ 值要小。因此, 在 $r_{(m)}$ 给定情况下, $N_{(m)}$ 值的大小成为提高蜂窝网络能量效率函数 Q 值的关键因素。

3 蜂窝网络频谱效率

蜂窝网络频谱效率是整个蜂窝网络的所有小区在单位频带能实现的有效传输容量能力的总和。对蜂窝网络的小区无缝覆盖, 在给定的网络覆盖范围内, 有 M 个小区均使用同一频段, 重复利用, 网络频谱效率会随着 M 的增大而提高。但是, 使用同一频段将带来明显的同频干扰, 按前述分析, 小区

间干扰是影响频谱效率的重要因素。另外, 蜂窝网络的各小区也要预留传输容量资源来支持移动用户的越区切换, 这也是造成实际有效频谱效率降低的另一重要因素。

3.1 小区干扰深度

研究图 2 所示的蜂窝网络小区结构, 同频使用时, 小区间的干扰就十分值得关注。为此, 提出一个度量多小区间干扰程度的参量——小区干扰深度, 定义为小区受邻近小区干扰的面积与小区面积之比, 记为 s_{ir} , 如图 3 所示, 有

$$s_{ir} = S_J / S_r \quad (11)$$

其中, S_J 表示邻近小区信号从小区边缘深入本小区内形成干扰的径向距离 J_r 所占面积, 如图 3 中的灰色区域; S_r 是半径为 r 的本小区的面积。

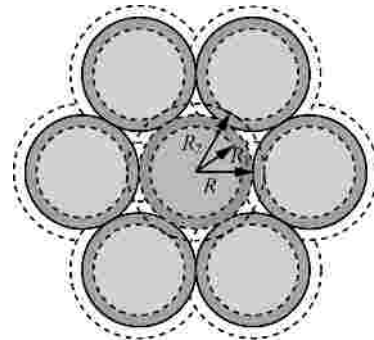


图 2 蜂窝小区覆盖

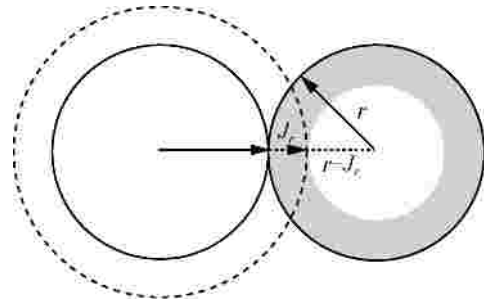


图 3 小区干扰深度示意

因此, 小区干扰深度 s_{ir} 为

$$s_{ir} = S_J / S_r = \frac{\pi(r^2 - (r - J_r)^2)}{\pi r^2} = \frac{2J_r}{r} - \frac{J_r^2}{r^2} = 1 - \left(\frac{r - J_r}{r}\right)^2 \quad (12)$$

其中, J_r 是从小区边缘深入进小区内受干扰的径向距离, 则 $J_r < r$ 。 J_r 的大小决定于到达小区边缘的信号强度和基站发送天线对覆盖区域外的信号泄漏抑制程度。在小区边缘最低解调信噪比相同的

情况下，到达小区边缘的信号强度越小，对覆盖区外的信号抑制越强，小区干扰深度就越小，与小区半径 r 的关系不大。

考虑小区干扰深度的影响，蜂窝网络的能效函数的噪声干扰能量 $N_{(m)}$ 可以表示为

$$N_{(m)} = \begin{cases} N_{I_r(m)} + N_{0(m)}, & \text{在受干扰的 } S_j \text{ 区域内} \\ N_{0(m)}, & \text{在受干扰的 } S_j \text{ 区域外} \end{cases} \quad (13)$$

在此情况下，蜂窝网络的能效函数式(9)中的网络频谱效率为

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^M C_m / B &= \sum_{m=1}^M \text{lb} \left(1 + \frac{l^2 G_{(m)}}{4p A(r_{(m)}^2) N_{(m)}} P_{0(m)} \right) \\ &\approx \sum_{m=1}^M s_{I_r} \text{lb} \left(\frac{l^2 G_{(m)}}{4p A(r_{(m)}^2) (N_{I_r(m)} + N_{0(m)})} P_{0(m)} \right) + \\ &\quad \sum_{m=1}^M (1 - s_{I_r}) \text{lb} \left(\frac{l^2 G_{(m)}}{4p A(r_{(m)}^2) N_{0(m)}} P_{0(m)} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

上式表明，在蜂窝网络的 M 个小区重复使用同一频段的无缝覆盖情况下，如果小区干扰深度相同，网络频谱效率是随 M 的增加而增大，呈线性增长。

例 2 蜂窝网络由相同频率($f=2\text{GHz}=2 \times 10^9\text{Hz}$, $\lambda=0.15\text{m}$)的 M 个相同小区构成，小区半径 r 的覆盖面积 $A(r^2)=\pi r^2$ 。假定，基站发送天线信号超出覆盖区域进入邻近小区后，该信号受到一定程度的抑制(比如，采用智能天线对覆盖区域外的抑制或采用干扰抵消处理对进入小区的干扰信号抑制等)，其对进入小区的干扰信号按 $1/J_r$ 衰减抑制， J_r 为干扰信号进入邻近小区的径向距离。如果进入邻近小区 J_r 区域的干扰信号强度相对于小区边缘信号功率强度有明显衰减，其衰减程度称为小区边缘干扰区域的信干比(SIR)。图 4 给出了干扰区域 SIR 分别为 10dB、16dB、20dB 时，不同小区半径下的小区干扰深度 s_{J_r} 。数据表明，小区半径越小，小区干扰深度就越大；小区边缘干扰区域的信干比越高，小区干扰深度也越大。

3.2 越区切换的动力学模型

针对蜂窝网络，为研究用户移动情况下所需要的功率开销和频谱效率之间的关系，笔者提出了蜂窝网络用户在小区间移动的越区切换动力学模型。

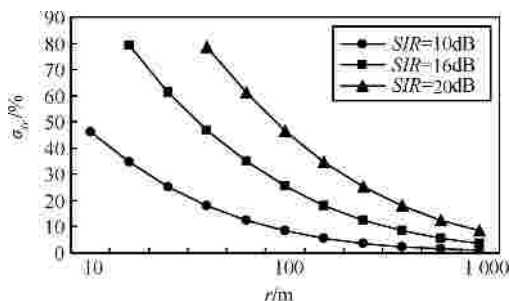


图 4 不同 SIR 下的小区干扰深度

假定蜂窝网络的小区半径为 r ，小区面积为 πr^2 。用户在蜂窝小区内均匀分布。设用户的移动速度为 e ，切换时间为 t_0 ，那么，在这个时间内，移动用户的活动半径为

$$D = et_0 \quad (15)$$

移动用户占用的活动空间(移动空间)就是半径为 D 的一个圆，占用面积是 πD^2 ，如图 5 所示。移动用户的越区切换如图 6 所示。

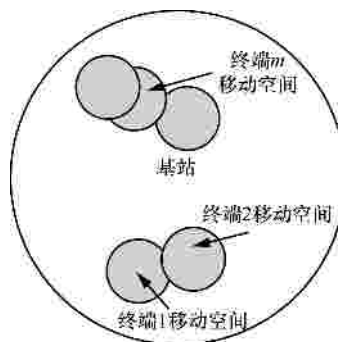


图 5 小区用户的移动空间

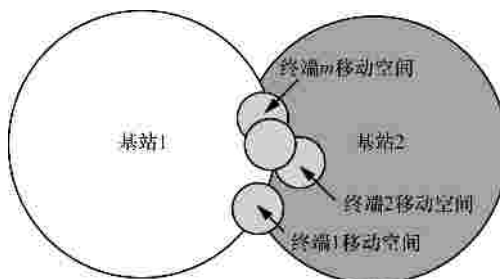


图 6 移动用户的越区切换示意

如果用户密集，移动空间会有相互重叠，设移动重叠指数为 k ： $k=1$ 表示各移动空间彼此相连而不重叠， $k>1$ 表示有移动空间的重叠， $k<1$ 表示各移动空间分离，用户越少分离距离越大。因此，半径为 r 的小区，能容纳的移动用户数 H 为 $H=(\text{小区面积}/\text{用户移动空间}) \times k = (\pi r^2 / \pi D^2) k = kr^2 / D^2$ (16) 这里，移动用户的活动半径必须小于小区半径，即

$$D < r \quad (17)$$

移动用户到达小区边缘后，可能进入邻近小区，出现越区切换。一个小区边缘会有多少移动用户可能越区切换呢？假定移动用户在小区边缘均匀分布进入切换。小区边缘长为小区周长， $2\pi r$ 。移动用户的移动速度为 e ，切换处理时间也就是观测时间为 t_0 ，则在小区边缘占用的最大长度为 $2D$ ， D 如式(15)所示。小区边缘要越区切换的用户数至少有

$$L_{\min} = (\text{小区边缘周长} / \text{用户活动空间直径}) \times k \\ = (2\pi r / 2D) k = k\pi r / D \quad (18)$$

也就是说，一个小区为了处理移动用户的越区切换，至少必须留出 L_{\min} 的用户接入能力供越区切换用，占用了小区的传输容量资源，从而减少了小区的用户接纳能力，即降低了小区的频谱效率。

因此，蜂窝网络的小区结构，在面对移动用户的越区切换需求时，小区间用户越区切换占用容量资源比例 q 至少是

$$q_{\min} = (\text{边缘越区切换用户数}(L_{\min}) / \text{小区容纳的用户数}(H)) = pD / r \quad (19)$$

那么，因用户越区切换，小区能接纳用户接入的有效传输容量比例最大为

$$f_{\max} = 1 - q = 1 - pD / r \quad (D < r/p) \quad (20)$$

其中， D 与移动速度 e 有关，移动越快， D 越大，占用传输容量资源的比例就越高。图 7 给出了在用户的移动空间半径 $D=1.0\text{m}$ 、 1.5m 、 2.0m 、 2.5m (切换处理时间为 80ms ，相当于用户移动速度分别为 45km/h 、 67.5km/h 、 90km/h 、 112.5km/h) 时，小区能接纳用户接入的有效容量比例。小区半径小于 100m 后，有效容量比例会急剧下降， D 越大，下降越快，小区能实际接纳的用户数就越少，有效频谱资源效率就越低。

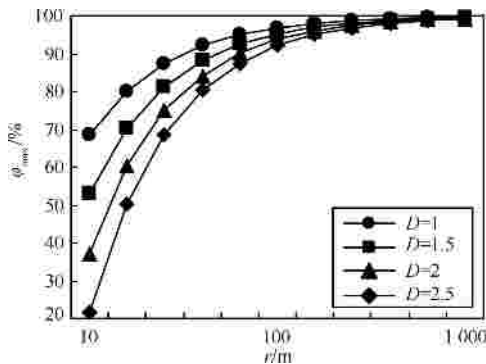


图 7 小区接纳用户的有效容量比例

3.3 蜂窝网络频谱效率

蜂窝网络频谱效率是整个蜂窝网络的所有小区在单位频带能实现的有效传输容量能力的总和。蜂窝网络在给定覆盖面积内有 M 个小区，其中，第 m 个小区能支持的传输能力为 C_m ，若用户流量一定， C_m 就对应小区能接纳的用户数。 C_m 越大， M 越大，能接纳的用户数就越多。

由于移动用户在小区间作越区切换，各小区必须预留一定数量的信道容量资源供越区切换使用，这就使小区的实际用户接纳能力下降。基于前述分析结果，在越区切换下，小区能接纳用户的容量资源如式(20)所示。因此，小区的用户能接纳的有效用户数 C_{me} 为

$$C_{me} = f_{\max} C_m = (1 - q) C_m = (1 - pD/r) C_m \quad (21)$$

那么，在蜂窝网络中移动用户越区切换情况下，蜂窝网络的频谱效率函数为

$$\sum_{m=1}^M C_m / B \approx \sum_{m=1}^M (1 - pD/r_m) \text{lb} \left(\frac{P_{0(m)}^2 G_{(m)}}{4p A(r_{(m)}^2) N_{0(m)}} \right) \quad (22)$$

由于出现越区切换的环境都是存在邻小区干扰的多小区结构，研究蜂窝网络频谱效率，还需要同时反映多小区干扰的影响。考虑到小区干扰深度所影响的传输容量比例为 s_{lr} ，在越区切换用户占用的传输容量资源比例 q 小于 s_{lr} 的情况，即

$$s_{lr} > q = pD/r \quad (23)$$

综合式(14)和式(22)，蜂窝网络频谱效率为

$$\sum_{m=1}^M C_m / B \approx \sum_{m=1}^M (s_{lr} - pD/r_m) \text{lb} \left(\frac{P_{0(m)}^2 G_{(m)}}{4p A(r_{(m)}^2) (N_{lr(m)} + N_{0(m)})} \right) + \sum_{m=1}^M (1 - s_{lr}) \text{lb} \left(\frac{P_{0(m)}^2 G_{(m)}}{4p A(r_{(m)}^2) N_{0(m)}} \right) \quad (24)$$

如果

$$s_{lr} < q = pD/r \quad (25)$$

则干扰深度范围内的容量资源会全部被用来预留留给越区切换，蜂窝网络频谱效率为

$$\sum_{m=1}^M C_m / B \approx \sum_{m=1}^M (1 - pD/r_m) \text{lb} \left(\frac{P_{0(m)}^2 G_{(m)}}{4p A(r_{(m)}^2) N_{0(m)}} \right) \quad (26)$$

显然，蜂窝网络频谱效率与每个小区的频谱效率有关，与网络覆盖范围内的小区数有关。

4 蜂窝网络的能效函数

按照定义,蜂窝网络能效函数是在给定网络覆盖范围内的蜂窝网络频谱效率与总的发送功率之比,如式(9)所示。由于移动网络的多小区结构和对用户越区

$$Q \approx \frac{\sum_{m=1}^M (s_{lr} - pD/r_{(m)}) \text{lb} \left(\frac{\lambda^2 G_{(m)}}{4pA(r_{(m)}^2)(N_{lr(m)} + N_{0(m)})} P_{0(m)} \right) + \sum_{m=1}^M (1 - s_{lr}) \text{lb} \left(\frac{\lambda^2 G_{(m)}}{4pA(r_{(m)}^2)N_{0(m)}} P_{0(m)} \right)}{\sum_{m=1}^M P_{0(m)}} \quad (27)$$

$s_{lr} < pD/r$ 时,即小区干扰深度小于用户的移动空间,能效函数为

$$Q \approx \frac{\sum_{m=1}^M (1 - pD/r_{(m)}) \text{lb} \left(\frac{\lambda^2 G_{(m)}}{4pA(r_{(m)}^2)N_{0(m)}} P_{0(m)} \right)}{\sum_{m=1}^M P_{0(m)}} \quad (28)$$

其中, P_0 是基站发送功率, $A(r^2)$ 是基站发送信号的覆盖面积(半径为 r), G 是天线增益, λ 是发送信号波长, s_{lr} 是小区干扰深度, D 是用户移动空间半径, N_{lr} 是干扰功率, N_0 是背景噪声功率, M 是给定网络覆盖范围内的小区基站数。直观看上述结果,给定覆盖面积内的小区数越多,网络频谱效率就越高,蜂窝网络的能效函数也相应提高。但由于邻近小区干扰和越区切换的影响,小区密集到一定程度后,网络频谱效率和能效函数不一定会继续提高,要仔细考察。

例 3 考虑与例 1 和例 2 相同的基站信号参数,蜂窝网络由相同频率($f=2\text{GHz}=2 \times 10^9\text{Hz}$, $\lambda=0.15\text{m}$)的 M 个相同小区构成,小区半径 r 的覆盖面积 $A(r^2)=\pi r^2$,天线增益 $G=1$ 。基站发送天线对覆盖区域外信号的抑制能力按 $1/J_r$ 衰减,用户的移动空间半径 $D=1.5\text{m}$ (相当于用户移动速度为 67.5km/h)。背景噪声功率 $N_0=-100\text{dBmW}$ ($=10^{-10}\text{mW}$),干扰信号功率 N_{lr} 是来自邻近小区边缘接收信号功率的渗透,用小区边缘干扰区域信干比的大小程度来核算。

考虑给定网络覆盖范围为半径=1 000m 的圆,面积为 $\pi \times 10^6\text{m}^2$ 。如果就用一个半径为 1 000m 的小区覆盖, $M=1$ 。如果小区半径=100m,在 $\pi \times 10^6\text{m}^2$ 内可容纳小区数 $M=100$ 。如果小区半径=10m,在 $\pi \times 10^6\text{m}^2$ 内可容纳小区数 $M=10\ 000$ 。图 8 给出了基站发送功率 $P_0=1\text{W}$,小区边缘干扰区域的信干比 SIR 分别为 10dB、16dB 和 20dB 时,随着小区半径由大变小,其蜂窝网络频谱效率值的变动。图 9 给出了基站发送功

切换的支持,各小区都存在邻近小区干扰对频谱效率的影响,都存在支持越区切换造成小区有效用户支持能力(有效频谱效率)和蜂窝网络频谱效率的降低,如式(26)所示。因此,蜂窝网络的能效函数为 $s_{lr} > pD/r$ 时,即小区干扰深度大于用户移动空间,能效函数为

率 $P_0=1\text{W}$,小区边缘干扰区域的 SIR 分别为 10dB、16dB 和 20dB 时,随着小区半径由大变小,蜂窝网络的能效函数由小到大再由大变小的走向。

图 8 和图 9 的数据表明,在小区边缘干扰区域的信干比给定时,蜂窝网络的网络频谱效率和能效函数随着小区半径由大变小,都有由小到大再由大变小的变化。随着对小区边缘干扰区域的信干比要求的提高,网络频谱效率的最大值出现在半径为 10~25m 区间。显然,不是小区越小、小区数越多,网络频谱效率就越高。蜂窝网络能效函数的最大值出现在半径为 40~250m 区间,更小的小区半径将使蜂窝网络的能效函数值急剧减少。

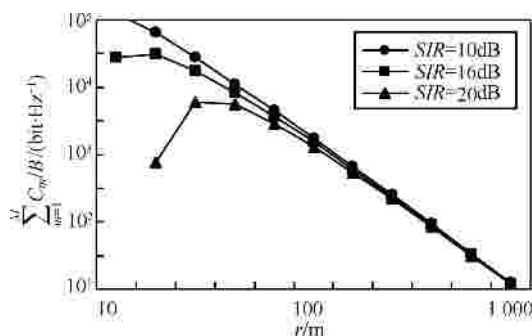


图 8 蜂窝网络的频谱效率($P_0=1\text{W}$, $D=1.5$)

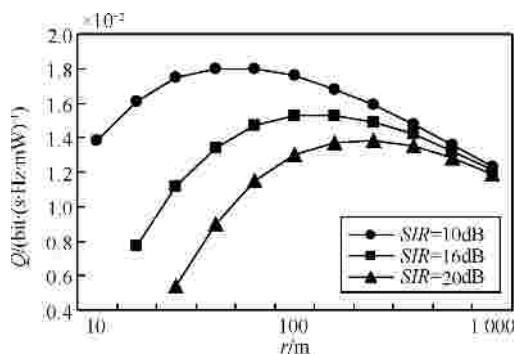


图 9 蜂窝网络的能效函数($P_0=1\text{W}$, $D=1.5$)

从图 8 和图 9 可以看出,蜂窝网络的网络传输能力(网络频谱效率)和能效函数与给定覆盖

范围内的小区半径紧密相关，小区半径越小、小区数目越多，网络频谱效率就越高，能效函数也越高。但小区小到一定程度后，随着邻近小区干扰深度加大和越区切换开销增加，蜂窝网络频谱效率和能效函数会急剧下降，且能效函数的下降更为明显。

5 结束语

本文针对蜂窝小区覆盖的网络结构，研究了存在多小区干扰和越区切换情况的蜂窝网络传输能力和能量效率函数，给出了蜂窝网络的能效函数的定义和表述，提出了度量小区干扰程度的小区干扰深度和描述越区切换的动力学模型，并分析了不同条件下的相关结果，论证了多小区干扰和越区切换下的蜂窝网络频谱效率，进而推证了蜂窝网络的能效函数，给出了相关数值结果。在蜂窝网络给定覆盖面积内，小区半径越小，小区数目越多，在小区基站发送功率一定情况下，综合各个小区能力的网络频谱效率会越高。分析结果表明，随着小区半径的逐渐变小，小区干扰深度和切换开销明显增大，网络频谱效率的增长将会出现下降。蜂窝网络的能效函数也会随着小区半径越来越小而出现明显下降。这些结果将为蜂窝网络的绿色设计提供有益的分析依据和研究基础。

参考文献：

- [1] 邬贺铨. 绿色移动通信展望—代《绿色无线移动通信专辑》序[J]. 中国科学技术大学学报, 2009, 39(10):1-2.
WU H Q. Prospect of green mobile communication—preface of album for green wireless mobile communications[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2009, 39(10):1-2.
- [2] 尤肖虎, 王京, 张平等, 对绿色无线移动通信技术的研究和思考[J]. 中国科学技术大学学报, 2009, 39(10):1009-1015.
- YOU X H, WANG J, ZHANG P, *et al.* Study and ideas for green wireless mobile communications[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2009, 39(10):1009-1015.
- [3] GRANT P, MCLAUGHLIN S, AGHVAMI H, *et al.* Green radio-towards sustainable wireless networks[EB/OL]. <http://www.see.ed.ac.uk>, CR review, 2009.
- [4] GOZALVEZ J. Long-term evolution: 1Gbit/s and beyond[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2010, 5(3):7-14.
- [5] NIU Z S, WU Y Q, GONG J, *et al.* Cell zooming for green cellular networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2010, 48(11):74-79.
- [6] CHEN Y, ZHANG S Q, XU S G, *et al.* Fundamental trade-offs on green wireless networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(6):30-37.
- [7] ZHAO M, ZHOU W Y, ZHU J K. Analysis of energy efficiency for packet-based transmission[A]. IEEE WCNC'2012[C]. Paris, France, 2012.
- [8] SCHWARTZ M. Mobile Wireless Communications[M]. New York: Cambridge University Press, 2005.

作者简介：



朱近康 (1943-), 男, 四川内江人, 中国科学技术大学教授、博士生导师, 主要研究方向为绿色无线移动通信、高效无线通信技术、无线移动通信信号处理等。



许莉 (1983-), 女, 山东临清人, 中国科学技术大学博士生, 主要研究方向为无线移动通信中的空时编码。