

## 蜂窝小区边缘同频嵌入垂直覆盖的网络性能

朱近康, 邓娜, 赵明

(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:** 提出一种在蜂窝小区边缘同频嵌入垂直覆盖的新型混合小区网络结构, 具有抑制小区间干扰和提高边缘信干比等优点。该网络结构是以不改变目前蜂窝网络“水平覆盖”结构的前提下, 在小区边缘干扰区域同频嵌入天线波束为垂直向下的微小基站, 称作“垂直覆盖”, 因此易于实际操作和实现。首先分析了蜂窝小区水平覆盖的干扰深度, 垂直覆盖基站的干扰特性及各自的频谱效率。随后, 针对提出的蜂窝小区边缘同频嵌入垂直覆盖的网络结构, 分别研究了混合小区的水平覆盖中心区域和垂直覆盖小区边缘区域的频谱效率。结果表明, 提出的新型混合小区网络结构, 能有效抑制蜂窝小区间干扰, 改善小区边缘性能, 实现更高的频谱效率。

**关键词:** 水平覆盖; 垂直覆盖; 小区干扰深度; 嵌入垂直覆盖的混合小区网络; 蜂窝小区边缘频谱效率; 混合小区网络的频谱效率

中图分类号: TN929.53

文献标识码: A

## Performance of cellular network embedded in the cell edge with vertical coverage by co-frequency

ZHU Jin-kang, DENG Na, ZHAO Ming

(Department of Electronic Engineering & Information Science, University of Science & Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract:** A new hybrid cellular network structure is proposed, where the small base stations equipped with the downward vertical coverage of antenna beam are embedded in the cell edge of current cellular using the same frequency, thereby suppressing the inter-cell interference and improving the signal to interference ratio in the cell edge. Specifically, the radio coverage of these small stations is called vertical coverage, and the coverage of current cellular is called horizontal coverage. Since the proposed network structure does not modify the current cellular network infrastructure, it is easy to operate and implement. The cell interference depth and the interference characteristics in the horizontal coverage and the vertical coverage, as well as their spectral efficiencies are analyzed respectively. Then, the spectral efficiencies of the cell center and the cell edge with vertical coverage are investigated concerning on the proposed new hybrid cellular network structure. The results show that the new hybrid cellular network structure proposed can suppress inter-cell interference and improve cell-edge performance effectively, while achieving higher spectral efficiency.

**Key words:** horizontal coverage; vertical coverage; cell interference depth; hybrid cellular network embedded with vertical coverage; cell-edge spectral efficiency; spectral efficiency of hybrid network

### 1 引言

无线移动通信的发展, 从第一代移动通信到现在的第四代移动通信, 蜂窝小区网络结构未曾发生

过根本性的改变, 至今一直沿用 Bell 实验室提出的正六边形小区 (近似为圆形) 无缝覆盖方式, 小区基站位于小区中心全向 (或扇区) 发送或接收通信信号。在这种方式下, 天线的发送信号可近似为在

收稿日期: 2013-08-17; 修回日期: 2013-11-20

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, 2014AA01A702)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (61172088); The National High Technology Research & Development Program of China (863 Program)(SS2012AA011702, 2014AA01A702)

水平方向上向外辐射传播,称为“水平覆盖”。在这种水平覆盖方式下,信号在到达小区边缘后会继续传播扩散进入邻近小区,从而造成小区间干扰,严重影响通信性能和频谱效率。为此,近年来出现了许多相关技术的研究,如协作通信、MIMO、超蜂窝小区等,都可用于提高传输能力和频谱效率<sup>[1-3]</sup>。针对降低小区间干扰的研究解决方案,有2种方法比较突出。第一,有效的小区边缘干扰协调技术,具体地,在小区边缘区域适当增加频率资源,可以提高边缘干扰区域的传输能力却难以提高频谱效率<sup>[4]</sup>。第二,文献[5,6]提出主动天线技术(active antenna),即基站根据实际需求形成多波束智能天线,其针对小区边缘和受干扰区域的波束向下倾斜覆盖,改善边缘覆盖性能和提高传输能力,但需要实时估计和复杂处理。另外,网络MIMO和协作技术用于改善小区边缘干扰特性,也被广泛研究,如文献[7,8]。网络MIMO是把周边几个基站的收发纳入对小区边缘用户的支持、协作通信,提高边缘用户的传输能力,但这是以占用周边基站传输能力为代价,总体效率不见得提高。因此,研究能够同时使用蜂窝网络现有频段(简称同频),并通过简便有效的方法抑制蜂窝小区的边缘干扰且提高小区边缘的频谱效率,变得十分重要和迫切。

现在的蜂窝小区水平覆盖的致命问题,是电波到达小区边缘会继续进入邻区形成干扰。这种干扰只有渗入邻区后随传播距离的增加而减弱,除此别无其他方法可改变。因此,若是针对同频覆盖的场景,要提高小区边缘的信干比,重叠覆盖是一种可选方式。此外,参考现在在中低轨卫星通信的多波束天线<sup>[9]</sup>和高空气球平流层通信<sup>[10]</sup>中所采用的垂直覆盖,即电波由高空向地面垂直发送形成覆盖,若天线波束的旁瓣边缘收敛快,则覆盖区边缘外的临近区域的干扰渗透就会降低,对临区的干扰可以通过改善天线特性来降低,这对于地面蜂窝网络的重叠覆盖是值得借鉴的。

本文把卫星通信的垂直覆盖原理应用到地面蜂窝网络作重叠覆盖,提出将配置垂直向下定向天线的微小基站嵌入到水平覆盖的蜂窝小区边缘,构成同频嵌入垂直覆盖的混合小区网络,从而抑制干扰,提高性能。本文首先分析了蜂窝小区水平覆盖的干扰深度,垂直覆盖基站的干扰特性及各自的频谱效率。随后,针对在蜂窝小区边缘同频嵌入垂直覆盖的混合小区网络结构,分别研究了混合小区的

水平覆盖中心区域和在蜂窝小区边缘的垂直覆盖区域的频谱效率。结果表明,提出的混合小区网络结构,能有效抑制蜂窝小区间干扰,改善小区边缘性能,实现更高频谱效率的无线移动通信。提出的混合小区网络结构,不改变当前的蜂窝网络基础设施,易于操作和实施。

## 2 水平覆盖与干扰深度

蜂窝网络的正六边形小区结构,是迄今一直沿用的覆盖方式。如果基地位于小区中心,全向水平对外发送,可近似为圆形覆盖,简称为“水平覆盖”。如果使用相同频率,水平覆盖的发送信号到达小区边缘后,会继续传播进入邻近小区,形成干扰,如图1所示。

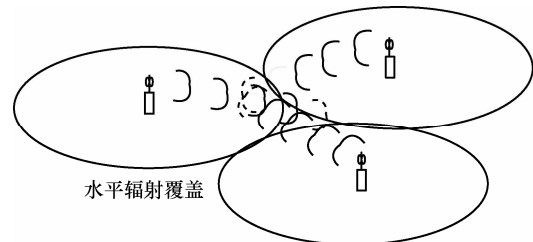


图1 蜂窝网络的小区覆盖

假设小区半径为 $R$ ,进入邻近小区外缘的径向距离 $R_j$ 之内都存在不可忽视的干扰,则定义 $R_j$ 为小区干扰深度,用以清晰描述水平覆盖的小区边缘受干扰的区域<sup>[11]</sup>,如图2所示。

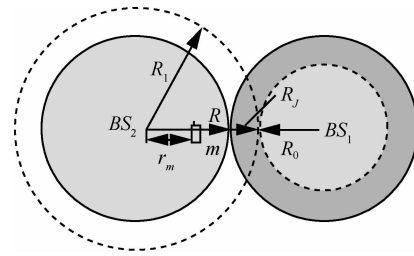


图2 小区干扰深度

小区干扰深度 $R_j$ 是邻近小区基站信号进入本小区外缘成为干扰信号,至其深入本小区内信号功率衰减到期望信干比 $SIR$ 的径向距离,即

$$R_j = R_1 - R = R - R_0 \quad (1)$$

其中, $R$ 是小区半径, $R_1$ 是基站信号进入邻近小区衰减至期望信干比 $SIR$ 的传播距离, $R_0$ 是未受小区干扰的区域半径。

假定移动用户 $m$ 距基站发送点的距离为 $r_m$ ,

$r_m \leq R$ , 接收天线的等效面积为  $A_R$ , 所需接收信号功率为  $P_{re}$ , 那么, 当基站全向发送, 达到接收功率  $P_{re}$  的覆盖面积为  $\pi(r_m)^2$  时, 按照能量守恒定律, 所需的发送功率为

$$P_{0(m)} = \frac{4\pi^2 r_m^2}{\lambda^2 G_R} P_{re} = \frac{\pi r_m^2}{A_R} P_{re} \quad (2)$$

其中,  $A_R = \frac{\lambda^2 G_R}{4\pi}$ ,  $\lambda$  是发送信号波长,  $G_R$  是用户接收天线增益,  $A_R$  是用户接收天线的等效面积, 在  $\lambda$  和  $G_R$  给定的情况下,  $A_R$  是一个常数。当这个发送信号继续往前传播, 到达小区边缘  $R$  的接收信号功率为  $P_{r(R)} = P_{re} r_m^2 / R^2$ , 是进入邻近小区的干扰信号。如果信号在白噪声信道传播, 期望信干比  $P_{re} / P_{r(R_1)} = SIR$ , 那移动用户  $m$  发送的信号进入邻近小区形成的小区干扰深度为

$$R_{J(m)} = \begin{cases} 0 & , r_m \leq R / \sqrt{SIR} \\ (\sqrt{SIR} r_m - R) & , r_m > R / \sqrt{SIR} \end{cases} \quad (3)$$

在蜂窝小区使用相同频率和小区内用户均匀分布情况下, 用户  $m$  距离基站  $r_m$  的概率为  $(2r_m/R^2)dr_m$ , 其中,  $dr_m$  是位置  $r_m$  上的微元, 则小区的平均干扰深度为

$$R_{Ja} = \int_{R/\sqrt{SIR}}^R (r_m \sqrt{SIR} - R) \frac{2r_m}{R^2} dr_m = \frac{1}{3} (2\sqrt{SIR} + \frac{1}{SIR} - 3)R \quad (4)$$

图 3 给出了同频蜂窝网络在移动用户接收功率相同情况下, 邻近小区受干扰程度  $R_{Ja}/R$  (小区平均干扰深度与小区半径之比) 与信干比  $SIR$  的关系。图 3(a) 表示小区平均干扰深度随期望  $SIR$  增大而近似地呈指数增长。图 3(b) 表示处在小区不同位置所能获得的频谱效率, 越靠近小区边缘, 频谱效率越低。

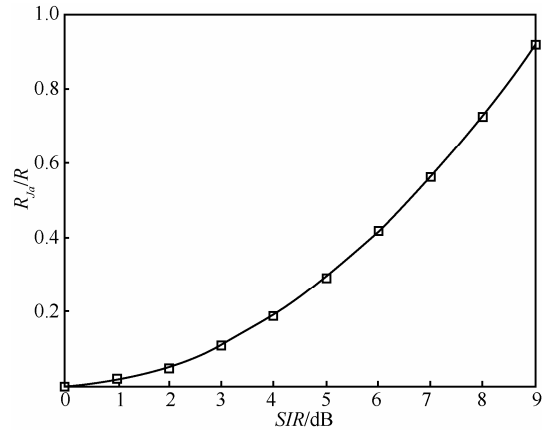
考虑蜂窝网络在密集城区, 信号传播遵从瑞利衰落信道模型<sup>[12]</sup>。如果进入邻近小区的干扰功率  $P_j \geq P_{re}/SIR$  (期望信干比的干扰功率), 则距基站为  $r_m$  的移动用户  $m$  的信号渗透进邻近小区干扰深度 ( $R_j = R_1 - R$ ) 内, 其信号功率大于  $P_j$  的概率为

$$P_{J(m)}(\sqrt{P_j} \geq \sqrt{P_{re}/SIR}) = \exp\left(-\frac{P_{re}/SIR}{P_{r(R_1)}}\right) = \exp\left(-\frac{R_1^2}{r_m^2 SIR}\right) \quad (5)$$

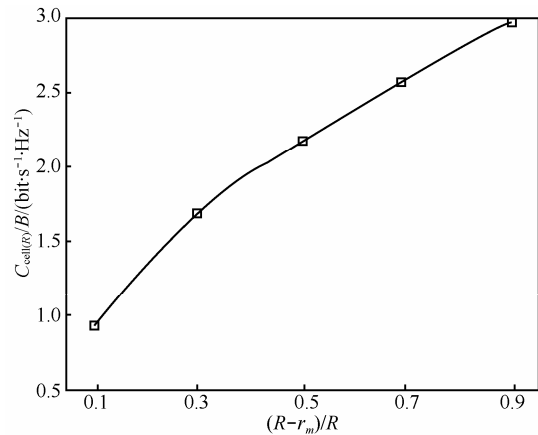
因此, 当考虑  $r_m$  分布在  $0 \sim R$  区间, 且用户均

匀分布时, 在期望信干比  $SIR$  下, 渗透进邻近小区的信号功率大于  $P_j$  的概率<sup>[13]</sup> (与平均干扰深度  $R_{Ja}$  出现概率相对应) 为

$$P_{R_{Ja}}(\sqrt{P_j} \geq \sqrt{P_{re}/SIR}) = \int_{\Delta R}^R \exp\left(-\frac{R_1^2}{r_m^2 SIR}\right) \frac{2r_m}{R^2} dr_m = \int_{\Delta R^2}^{R^2} \exp\left(-\frac{R_1^2}{r SIR}\right) \frac{1}{R^2} dr \quad (\Delta R \rightarrow 0) \quad (6)$$



(a) 小区平均干扰深度



(b) 小区不同深度频谱效率

图 3 邻近小区受干扰程度与信干比的关系

图 4 给出了  $SIR=4$  dB、6 dB 和 10 dB 情况下的出现概率值与受干扰程度  $R_{Ja}/R=(R_1-R)/R$  的关系。如果以出现概率 30% 为限, 期望信干比  $SIR=6$  dB 的受干扰程度约 0.5,  $SIR=9$  dB 的受干扰程度为 1, 大于图 3 所示的白噪声信道。

基于上述分析, 考虑出现概率以 30% 为限的小区干扰深度, 同频应用, 蜂窝小区受邻近小区干扰的区域与小区面积之比为

$$\sigma_{lr} = (\pi R^2 - \pi(R - R_j)^2) / \pi R^2 = 1 - \left(1 - \frac{R_j}{R}\right)^2 \quad (7)$$

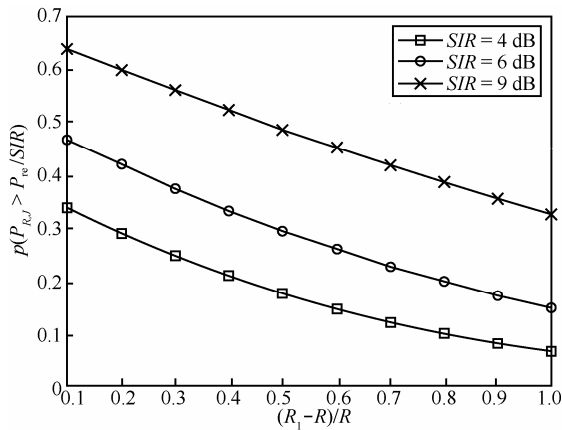


图 4 干扰大于期望的概率与干扰深度  $R_j$  的关系

那么, 在受干扰区中平均信干噪比为  $P_{re}/(N_0B + P_{Ja})$ , 而在受干扰区之外的信噪比为  $P_{re}/(N_0B)$ 。因此, 水平覆盖的蜂窝小区网络, 在半径为  $R$  的小区频谱效率<sup>[9]</sup>为

$$\begin{aligned} \left(\frac{C_{cell(R)}}{B}\right)_{F=1} &= \sigma_{lr} \text{lb} \left(1 + \frac{P_{re}}{(P_{Ja} + N_0B)}\right) + \\ &\quad (1 - \sigma_{lr}) \text{lb} \left(1 + \frac{P_{re}}{N_0B}\right) \\ &= \left(1 - \left(1 - \frac{R_j}{R}\right)^2\right) \text{lb} \left(1 + \frac{P_{re}}{(P_{Ja} + N_0B)}\right) + \\ &\quad \left(1 - \frac{R_j}{R}\right)^2 \text{lb} \left(1 + \frac{P_{re}}{N_0B}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

这样以  $SNR$  为基准, 考虑出现概率以 30% 为限的小区干扰深度, 接收功率  $P_{re} = SNR \cdot N_0B$ , 在不同期望信干比下, 水平覆盖蜂窝小区能实现的频谱效率各不相同。图 5 表明了无小区干扰、有小区干扰的期望信干比为 6 dB、8 dB 时各自的频谱效率。当无小区干扰时, 频谱效率随  $SNR$  增加直线上升。

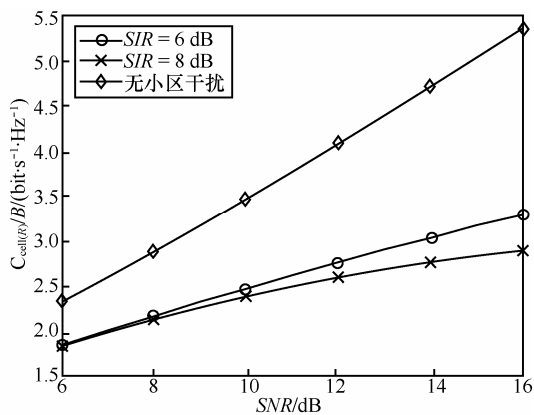


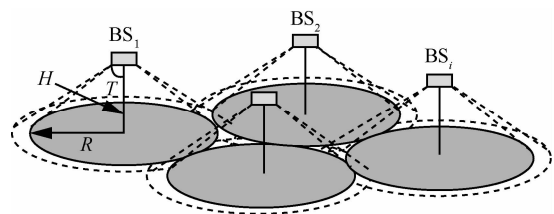
图 5 水平覆盖蜂窝小区的频谱效率

而在有小区干扰的情况下, 期望信干比  $SIR$  越高, 频谱效率下降越快, 最后趋于不变。在接收功率对应的信噪比  $SNR$  为 10 dB 和 15 dB 时, 期望信干比  $SIR=6$  dB 的频谱效率为 2.5 bit/s/Hz 和 3.2 bit/s/Hz, 期望信干比  $SIR=8$  dB 的频谱效率为 2.4 bit/s/Hz 和 2.8 bit/s/Hz, 与无小区干扰时的 3.5 bit/s/Hz 和 5.0 bit/s/Hz 相比, 差距较大。

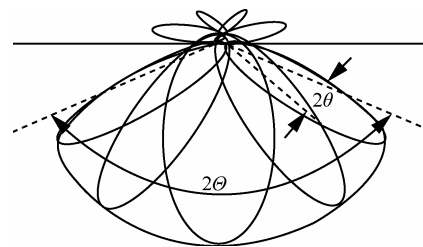
### 3 地面垂直覆盖与干扰特性

地面垂直覆盖是把卫星通信的垂直覆盖原理应用到地面基站的覆盖, 具体是基站配置垂直向下定向天线, 并向地面发送信号以覆盖目标小区。小区彼此同频使用, 可以构成无缝覆盖的小区网络结构, 如图 6(a)所示。图 6(b)是垂直覆盖天线波束, 最好由具有陡峭边缘窄波束的合成天线形成。如果基站天线高为  $H$ , 基站发送天线波束宽为  $2\theta$ , 覆盖小区半径为  $R$ , 有

$$R = H \tan \theta \quad (9)$$



(a) 地面垂直覆盖小区结构



(b) 垂直覆盖天线波束

图 6 垂直覆盖小区网络结构

这样小区的覆盖面积为  $\pi R^2$ , 小区中心距发送天线的垂直距离为  $H$ , 小区边缘距发送天线的距离为  $H/\cos\theta$ , 如果  $\theta=60^\circ$ , 那  $H/\cos\theta=2H$ 。

垂直覆盖天线波束同任何天线波束一样, 有下降边缘。如果天线波束边缘越陡峭、衰减越快, 泄漏到临近小区的干扰区域就越小。如图 6(b)所示, 如果合成天线的波束宽  $2\theta$ , 其中边缘窄波束宽  $2\theta(2\theta < 2\theta)$ , 那么, 依据电波与天线原理<sup>[14]</sup>, 边缘波束的半功率点到第一零点的夹角近似于  $\theta$ , 那半

功率点衰减至-10 dB 功率点的夹角约为  $\theta/2$ , 也就是波束边缘进入邻近小区的边缘夹角为  $\theta/2$ , 构成对邻近小区的干扰。因此, 地面垂直覆盖渗透进邻近小区的期望信干比是 10 dB 的小区干扰深度为

$$\begin{aligned} R_{J(10\text{dB})} &\approx H(\tan(\Theta + \theta/2) - \tan \Theta) \\ &\approx H \tan(\Theta + \theta/2) - R \end{aligned} \quad (10)$$

由于地面垂直覆盖基站的天线不高, 则覆盖区域不会太大。在非密集高楼城区, 遮盖物不多, 反射折射少, 则覆盖区域被视为相对开阔地带, 采用垂直覆盖的方案是可行的。若移动用户  $m$  距离覆盖小区中心为  $d_m \leq R$ , 定向天线的覆盖角  $\varphi_m \leq \Theta$ , 在功率控制下, 用户接收功率不变  $P_{re}$  (与  $d_m$  无关)。那么, 基站的发送功率  $P_{0(\text{dm})}$  与  $d_m$  有关, 小区边缘的接收信号功率为  $P_{r(\text{dm-edge})}$ , 它们分别为

$$P_{0(\text{dm})} = \frac{\pi H^2 / \cos^2 \varphi_m P_{re}}{A_m} \quad (11)$$

$$P_{r(\text{dm-edge})} = \frac{A_m P_{0(\text{dm})}}{\pi H^2 / \cos^2 \Theta} = \frac{\cos^2 \Theta}{\cos^2 \varphi_m} P_{re} \quad (12)$$

移动用户与天线垂直线的夹角  $\varphi_m$  在  $(0, \Theta)$  区间均匀分布, 到达小区边缘的平均信号功率为

$$\begin{aligned} P_{ra(\text{edge})} &= \frac{1}{\Theta} \int_0^\Theta \frac{\cos^2 \Theta}{\cos^2 \varphi_m} P_{re} d\varphi_m \\ &= \frac{1}{\Theta} \cos^2 \Theta \tan \Theta P_{re} = \frac{\sin 2\Theta}{2\Theta} P_{re} \end{aligned} \quad (13)$$

这个功率就是进入临近小区边缘的干扰信号功率, 即  $P_{ra(\text{edge})} = P_{J(\text{edge})}$ 。该信号功率按天线窄波束主瓣边缘衰减能力衰减, 从波束边缘功率-3 dB 点到第一零点的夹角为  $\theta$ , 衰减斜率近似表示为  $-P_{0(3\text{dB})}/\theta$ , 进入邻近小区的干扰信号平均功率

$$\begin{aligned} P_{Ja(\varphi)} &= \frac{1}{\Theta} \int_0^\Theta \frac{\cos^2 \Theta}{\cos^2 \varphi_m} P_{re} d\varphi_m - \\ &\int_0^\varphi \frac{1}{\theta} \frac{1}{\Theta} \int_0^\Theta \frac{\cos^2 \Theta}{\cos^2 \varphi_m} P_{re} d\varphi_m d\varphi \\ &= \left(1 - \frac{\varphi}{\theta}\right) \frac{\sin 2\Theta}{2\Theta} P_{re} \end{aligned} \quad (14)$$

那么, 实现平均信干比  $SIR_a = P_{re}/P_{Ja(\varphi)}$  所对应的偏离波束边缘-3 dB 功率点的夹角  $\varphi_{SIR_a}$ , 为

$$\varphi_{SIR_a} = \frac{\theta}{2} \left(1 - \frac{2\Theta}{SIR_a \sin 2\Theta}\right) \quad (15)$$

因此, 达到平均信干比  $SIR_a = P_{re}/P_{Ja(\varphi)}$  的小区平

均干扰深度, 有

$$\begin{aligned} R_{J(SIR_a)} &= H(\tan(\Theta + \varphi_{SIR_a}) - \tan(\Theta)) \\ &= H \left( \tan \left( \Theta + \frac{\theta}{2} \left(1 - \frac{2\Theta}{SIR_a \sin 2\Theta}\right) \right) - \tan \Theta \right) \end{aligned} \quad (16a)$$

及

$$\begin{aligned} R_{J(SIR_a)} / R &= ((\tan(\Theta + \varphi_{SIR_a}) - \tan \Theta) / \tan \Theta) \\ &= \frac{\tan \left( \Theta + \frac{\theta}{2} \left(1 - \frac{2\Theta}{SIR_a \sin 2\Theta}\right) \right) - \tan \Theta}{\tan \Theta} \end{aligned} \quad (16b)$$

这个分析结果表明, 在任意用户接收信号相同的情况下, 垂直覆盖密集小区受干扰程度 ( $R_{J_a}/R$ ) 与小区基站高度  $H$  无关, 也就是与小区半径无关。

图 7 给出了地面垂直覆盖的密集小区受干扰程度 ( $R_{J_a}/R$ ) 与期望信干比 ( $SIR$ ) 的关系。结果表明, 小区受干扰程度依赖于定向天线的边缘窄波束宽  $2\theta$  的大小, 期望  $SIR$  对小区干扰深度的影响较小。 $2\theta=20^\circ$  时,  $SIR=10\sim 20$  dB, 小区受干扰程度都在 20% 左右, 与水平覆盖相比, 在相同小区干扰深度内, 能实现较高的信干比。

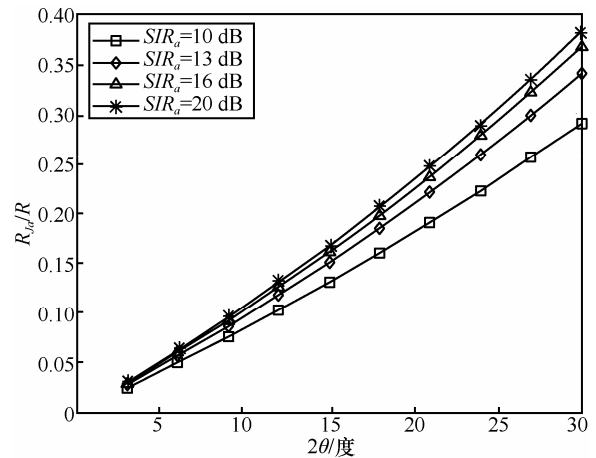


图 7 不同期望信干比的平均干扰深度

这样地面垂直覆盖的密集小区同频使用, 参考式(7), 受邻近小区干扰的区域与小区面积之比为

$$\sigma_{I-ver} = (\pi R^2 - \pi(R - R_{J(SIR_a)})^2) / \pi R^2 = 1 - \left(1 - \frac{R_{J(SIR_a)}}{R}\right)^2 \quad (17)$$

同理, 垂直覆盖小区半径为  $R$  的小区频谱效率

$$\left( \frac{C_{\text{ver}(R)}}{B} \right)_{P_{\text{相同}}} = \left( 1 - \left( 1 - \frac{R_{J(SIR_a)}}{R} \right) \right) \text{lb} \left( 1 + \frac{P_{\text{re}}}{(P_{\text{Ja}} + N_0 B)} \right) + \left( 1 - \frac{R_{J(SIR_a)}}{R} \right) \text{lb} \left( 1 + \frac{P_{\text{re}}}{N_0 B} \right) \quad (18)$$

图 8 给出了采用垂直覆盖在  $2\Theta=120^\circ, 2\theta=20^\circ$  时, 按用户接收功率相同、同频使用能实现的频谱效率。结果表明, 无小区干扰的频谱效率随  $SNR$  增加而线性增加, 而有小区干扰时, 会有所降低, 但减少不多。如果选择信噪比  $SNR=10 \text{ dB}$ 、 $20 \text{ dB}$  和  $30 \text{ dB}$ , 无小区干扰的频谱效率分别是  $3.5 \text{ bit/s/Hz}$ 、 $6.7 \text{ bit/s/Hz}$ 、 $10.0 \text{ bit/s/Hz}$ 。当期望平均干扰在  $SIR=10\sim 20 \text{ dB}$  范围, 能获得的频谱效率分别近似在  $3.4 \text{ bit/s/Hz}$ 、 $6.0 \text{ bit/s/Hz}$ 、 $8.0 \text{ bit/s/Hz}$  左右, 与期望信干比的相关性较小。

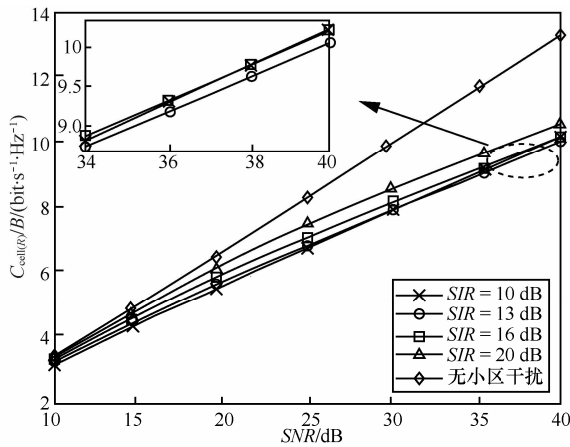


图 8 地面垂直覆盖小区的频谱效率

综合上述分析, 水平覆盖与垂直覆盖的蜂窝小区结构, 各自具有不同优势。显然, 水平覆盖能够满足不同小区面积大小要求, 大区覆盖, 组网方便。但是它很难抑制小区信号对临近小区的水平渗透, 因此期望实现的信干比不可能高, 单一路径传输的频谱效率在  $2\sim 3 \text{ bit/s/Hz}$  之间 (如图 5 所示), 传输效率低。而对于垂直覆盖, 地面天线高度不可能太高, 小区覆盖面积会不大, 更适合定点覆盖。垂直覆盖小区间干扰完全决定于垂直天线波束的旁瓣性能, 这就为改进提供了可能。由此, 垂直覆盖可实现的信干比高, 单一路径传输的频谱效率可在  $3\sim 10 \text{ bit/s/Hz}$  之间 (如图 8 所示), 传输效率高。因此, 综合利用水平覆盖和垂直覆盖, 是实现方便组网和高速频谱效率的有效方法。

#### 4 小区边缘嵌入垂直覆盖的混合小区网络

基于现有水平覆盖蜂窝网络的组网方便和垂直覆盖可获得较高信干比和高速传输的特点, 本文提出一种联合水平覆盖和垂直覆盖共存的混合小区网络结构。该网络结构是在现有水平覆盖的蜂窝小区边缘同频嵌入地面垂直覆盖基站, 这样使小区网络的边缘能力会明显得到改善从而提高频谱效率和传输能力。

图 9 是蜂窝网络小区边缘嵌入垂直覆盖的混合小区网络结构, 白色小区 (中心白色、边缘灰白) 是现有蜂窝网络的半径为  $R$  的水平覆盖小区 (简称  $R$  小区), 小区受干扰的区域是  $R$  小区外缘的灰白色部分, 干扰径向深度为  $R_J$ 。小区没受干扰区域是  $R$  小区中心的白色部分, 半径为  $R_0=R-R_J$ 。

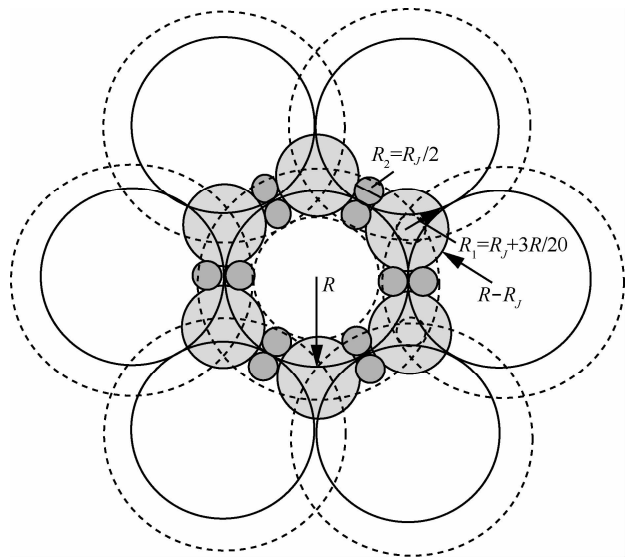


图 9 蜂窝小区边缘嵌入垂直覆盖的混合小区结构

在 3 个  $R$  小区的干扰交界区域, 嵌入一个半径为  $R_1$  的垂直覆盖小区, 简称  $R_1$  小区, 如图灰色小区所示, 有

$$R_1 \approx R_J + 3R/20 \quad (R_1 < R) \quad (19)$$

而相邻 2 个  $R$  小区间的干扰区剩余部分, 即  $R_1$  小区未能完全覆盖的干扰区域, 嵌入半径为  $R_2$  的更小垂直覆盖小区, 简称  $R_2$  小区, 如图中的深灰色小区, 有

$$R_2 \approx R_J/2 \quad (20)$$

若  $R_1$  小区已经完全覆盖干扰区域, 则无需嵌入

$R_2$  小区。所提的混合小区网络，与原蜂窝小区网络区别是拥有多个小区基站重叠覆盖，分别是：1 个  $R$  小区，2 个  $R_1$  小区（6 个  $R_1$  小区的 1/3），6 个  $R_2$  小区。

提出的混合小区网络结构中， $R$  小区的受干扰边缘区域有垂直覆盖，水平覆盖仅在非干扰的中心区域有效，其半径为  $R_0 = R - R_J$  的中心区域(与图 2 相同)。此时， $R$  小区基站仅覆盖半径为  $R_0$  的非干扰区域，设  $k=R_J/R$  为小区干扰深度比，如果其值比较小，那非干扰  $R_0$  中心区域的发送信号造成的小区干扰深度可近似为

$$R_{0J} = kR_0 = k(1-k)R \approx R_J \quad (21)$$

如果  $k \leq 0.2$ ，上述近似误差不超过 4%，近似是合理且可取的。参考图 3 选取  $R_J=20\%R$ ，那  $R_0=0.8R$ 。另外，垂直覆盖  $R_1$  小区半径为  $R_1 = R_J + 3R/20 \approx 0.35R$  和  $R_2$  小区半径为  $R_2=0.1R$ 。

这样，原单一水平覆盖的蜂窝小区就变成由  $R_0$  小区的水平覆盖、 $R_1$  和  $R_2$  小区的垂直覆盖的混合

$$C_{cell(R_0)} / B = \begin{cases} \sigma_{IrR_0-ver1} \text{lb} \left( 1 + \frac{P_{re}}{P_{Ja(\varphi)R_1} + N_0B} \right) + (1 - \sigma_{IrR_0-ver1}) \text{lb} \left( 1 + \frac{P_{re}}{N_0B} \right) \\ (1 - \sigma_{IrR_0-ver1}) \text{lb} \left( 1 + \frac{P_{re}}{N_0B} \right), P_{re} \leq (P_{Ja(\varphi)R_1} + N_0B) \end{cases} \quad (23)$$

考虑混合小区结构中的水平覆盖  $R_0$  小区，则其面积为  $A(R_0)=\pi R_0^2$ ，假设天线增益  $G_r = 1$ ，信号频率为  $f=2 \text{ GHz}=2 \times 10^9 \text{ Hz}$ ， $\lambda=0.15 \text{ m}$ ，背景噪声功率(热噪声+外部噪声)  $N_0B=-70 \text{ dBmW}=10^{-7} \text{ mW}$ ， $R_0$  小区的接收信噪比  $SNR = P_{re}/N_0B$ ，基站最大发送功率  $P_{0(\text{cell})} \approx 1754.6 P_{re} R_0^2$ 。另外，垂直覆盖  $R_1$  小区基站的天线高度  $H_1=R_1/\tan\Theta$ 、半径  $R_1 \approx R_J + 3R/20$ 、信噪比  $SNR_{ver1} = P_{re-ver1}/(N_0B)$ ；垂直覆盖  $R_2$  小区基站的天线高度  $H_2=H_1/2$ 、半径  $R_2=R_J/2$ ，在  $R$  小区干扰背景的信干噪比  $SNIR_{ver2} = P_{re-ver2}/(P_{Ja(R_0)} + N_0B)$ 。假设用户接收功率相同、同频使用且水平覆盖的期望信干比  $SIR=6 \text{ dB}$ ，图 10 比较了原单一水平覆盖小区、混合网络中的  $R_0$  覆盖小区以及无小区干扰(单一基站) 3 种情况下的频谱效率。结果表明，在蜂窝小区边缘嵌入垂直覆盖后，小区的中心区域可以获得更高的频谱效率，明显优于单一蜂窝小区结构的性能。

由于  $R_1$  小区间彼此不相邻，则相互无干扰，此外  $R_2$  远小于  $R_1$ ，可忽略  $R_2$  小区对  $R_1$  小区的干扰。

那么，计算  $R_0$  小区受干扰特性，主要考虑重叠在小区边缘的垂直覆盖给与的干扰。计算  $R_1$  小区和  $R_2$  小区的受干扰特性时，要考虑临近水平覆盖和垂直覆盖给与的干扰。对  $R_0$  小区，有来自垂直覆盖的  $R_1$  小区的干扰， $R_1$  小区半径为  $R_1 \approx R_J + 3R/20$ ，按图 3 可选  $R_J=20\%R$ ，则  $R_1 \approx R_J + 3R/20 \approx 0.35R$ 。那么， $R_1$  小区对  $R_0$  小区造成的干扰程度为

$$\begin{aligned} \sigma_{IrR_0-ver1} &= (\pi R_0^2 - \pi(R_0 - R_{J_1(SIR_c)})^2) / \pi R_0^2 \\ &= 1 - \left( 1 - \frac{R_{J_1(SIR_c)}}{R_0} \right)^2 \end{aligned} \quad (22)$$

同理，垂直覆盖  $R_2$  小区造成的干扰程度，其  $R_2$  小区半径为  $R_2=R_J/2=0.1R$ ，它形成的干扰深度为  $R_{2J}=(0.1 \sim 0.2)R_2=(0.01 \sim 0.02)R$ ，那  $\sigma_{IrR_0-ver2}$  就在 2%~4%之间，可以忽略。那么，按式(8)，在混合覆盖下的原蜂窝  $R$  小区内的  $R_0$  小区区域的频谱效率为

因此， $R_1$  小区仅受来自蜂窝小区的  $R_0$  区域的干扰，则其受干扰的程度为

$$\begin{aligned} \sigma_{Ir-ver1(R_0)} &= (\pi R_1^2 - \pi(R_1 - R_{Ja(R_0)})^2) / \pi R_1^2 \\ &= 1 - \left( 1 - \frac{R_{Ja(R_0)}}{R_1} \right)^2 \end{aligned} \quad (24)$$

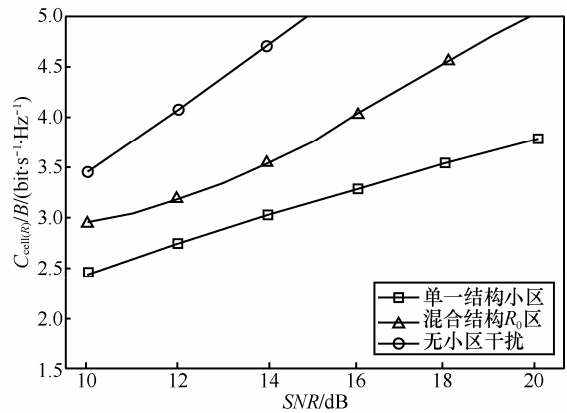


图 10 单一结构与混合结构的  $R$  小区的频谱效率

再考虑垂直覆盖  $R_2$  小区的干扰情况。首先，

由于整个  $R_2$  小区都处在  $R$  小区的边缘干扰区域,  $R_0$  小区区域对它的干扰, 可视为干扰背景噪声。其次, 还有来自  $R_1$  小区 (占 1/2)、有来自相邻  $R_2$  小区 (占 1/4) 的干扰。因此,  $R_2$  小区受到的干扰程度为

$$\begin{aligned}\sigma_{Ir-ver2} &= 1 - \left( 1 - \left( \frac{R_{J(SIR_0)-R_1}}{2R_2} + \frac{R_{J(SIR_0)-R_2}}{4R_2} \right) \right)^2 \\ &\approx 1 - \left( 1 - \frac{R_{J(SIR_0)-R_1}}{2R_2} \right)^2\end{aligned}\quad (25)$$

由此, 按式(18)垂直覆盖的  $R_1$  小区的频谱效率为

$$\begin{aligned}C_{R_1}/B &= \sigma_{Ir-ver1(R_0)} \text{lb} \left( 1 + \frac{P_{re-ver1}}{(P_{Ja(R_0)} + N_0B)} \right) + \\ &\quad (1 - \sigma_{Ir-ver1(R_0)}) \text{lb} \left( 1 + \frac{P_{re-ver1}}{N_0B} \right)\end{aligned}\quad (26)$$

同理, 垂直覆盖的  $R_2$  小区的频谱效率为

$$\begin{aligned}C_{R_2}/B &= \sigma_{Ir-ver2} \text{lb} \left( 1 + \frac{P_{re-ver2}}{(P_{Ja(\varphi)R_1} + P_{Ja(R_0)} + N_0B)} \right) + \\ &\quad (1 - \sigma_{Ir-ver2}) \text{lb} \left( 1 + \frac{P_{re-ver2}}{(P_{Ja(R_0)} + N_0B)} \right)\end{aligned}\quad (27)$$

图 11 给出了在与图 10 相同的条件下,  $R_1$  小区和  $R_2$  小区的频谱效率。这是同频嵌入垂直覆盖后, 蜂窝小区边缘能获得的频谱效率。无论是  $R_1$  小区还是  $R_2$  小区, 都明显高于水平覆盖  $R_0$  区域能实现的频谱效率。图 11 中, 由于  $R_2$  小区同时受到来自  $R$  小区及  $R_1$  小区的干扰, 因此在  $SNR$  较低时,  $R_2$  小区的频谱效率要比  $R_1$  小区低些。

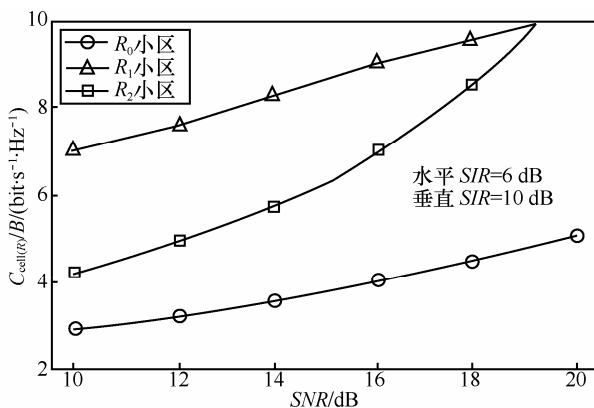


图 11 垂直覆盖的  $R_1$  小区和  $R_2$  小区频谱效率

## 5 结束语

本文把卫星移动通信的垂直覆盖方法, 应用到地面蜂窝网络来改善小区边缘的覆盖特性, 具体地, 是将垂直向下定向天线的微小基站, 嵌入到水平覆盖的蜂窝小区边缘受干扰区域, 使用与水平覆盖基站相同的频段, 构成一种新型的同频嵌入垂直覆盖的混合小区网络, 从而抑制蜂窝小区间干扰, 提高频谱利用性能。本文提出的混合小区网络结构, 不改变当前的蜂窝网络基础设施, 易于操作和实施。

本文利用“小区干扰深度”概念, 明确给出了水平覆盖的蜂窝小区内不同区域的干扰性能, 在小区边缘可实现的频谱效率很低。同理, 针对垂直向下定向天线所形成的垂直覆盖小区, 分析了它的覆盖性能和频谱效率。结果表明, 这 2 种覆盖各有优势和不足。水平覆盖适用于多种不同大小区域的覆盖, 但频谱效率不高; 而对于垂直覆盖, 垂直天线电波扩散渗透到邻近小区极少, 干扰极低, 而地面天线不高, 覆盖面积不大, 更适合定点覆盖。因此, 结合两者优势, 本文提出了在蜂窝小区边缘同频嵌入垂直覆盖的混合小区网络结构, 分析了混合小区网络的水平覆盖小区中心区域和垂直覆盖小区边缘区域的频谱效率的表达式。仿真计算结果表明, 提出的混合小区网络结构, 在  $R$  小区中心  $R_0$  区域的频谱效率可达到 3.76 bit/s/Hz ( $SNR=15$  dB), 而单一水平覆盖的小区频谱效率仅为 3.16 bit/s/Hz ( $SNR=15$  dB), 提高了 0.6 bit/s/Hz。在蜂窝小区边缘嵌入垂直覆盖后,  $R_1$  小区的频谱效率可达 8.66 bit/s/Hz ( $SNR=15$  dB), 比  $R_0$  区域内提高 5 bit/s/Hz。同时,  $R_2$  小区的频谱效率也可达 6.25 bit/s/Hz ( $SNR=15$  dB), 提高近 2.5 bit/s/Hz。结果充分说明, 提出的混合小区结构能改善小区边缘效率, 提高性能。这种水平与垂直重叠覆盖的方法, 还可以应用到蜂窝网络的热点地区, 提高热点区域的信干噪比, 实现高速传输性能。

## 参考文献:

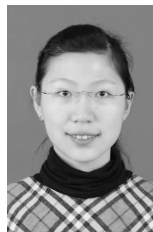
- [1] 朱近康. 新兴发展的无线通信技术和网络[J]. 中国科学技术大学学报, 2008, 38(7): 735-744.  
ZHU J K. New wireless communication technology and networks[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2008, 38(7): 735-744.

- [2] BEIJNER H. The importance of in-building solutions in third-generation networks[J]. Ericsson Review, 2004,(2):90-97.
- [3] NIU Z S, WU Y Q, GONG J, *et al.* Cell zooming for cost-efficient green cellular networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2012, 16(6): 74-79.
- [4] KIMURA D, SEKI H. Inter-cell interference coordination (ICIC) technology[J]. Fujitsu Scientific & Technical Journal, 2012, 48(1): 89-94.
- [5] SAUR S, HALBAUER H. Exploring the vertical dimension of dynamic beam steering[A]. IEEE MC-SS'2011[C]. Herrsching, Germany, 2011.111-115.
- [6] ZHANG W R, WU Y, ZHOU R. Active antenna system: utilizing the full potential of radio sources in the spatial domain[EB/OL]. <http://www.huawei.com/en/static/AAS-129092-1-197969>.
- [7] GESBERT D, HANLY S, HUANG H, *et al.* Multi-cell MIMO cooperative networks: a new look at interference[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2010, 28(9):1380-1408.
- [8] ZHANG J, CHEN R H, ANDREWS J G, *et al.* Networked MIMO with clustered linear precoding[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009,8(4):1910-1921.
- [9] TIEZZI F. Overview of automotive antennas for satellite mobile communications[A]. EuCap: European Conference on Antennas and Propagation Barcelona[C]. 2010.
- [10] TOZER T C, GRACE D. High-altitude platforms for wireless communications[J]. Electronic & Communications Engineering Journal, 2001, 13(3): 127-137.
- [11] 朱近康, 许莉, 绿色蜂窝网络的传输能力与能效函数[J]. 通信学报, 2013, 34(1):1-7.
- ZHU J K, XU L. Spectrum-efficiency and energy-efficiency function of green cellular networks[J]. Journal on Communications, 2013, 34(1): 1-7.
- [12] MARVIN S K, MOHAMED-SLIM A. Digital Communication over Fading Channels[M]. Wiley-IEEE Press, 2004.
- [13] SCHWARTZ M. Mobile Wireless Communications[M]. Cambridge University Press, 2005.
- [14] BALANIS C A. Antenna Theory: Analysis and Design[M]. 3rd Edition, John Wiley & Sons Inc, 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、新一代高效无线移动通信、无线移动通信信号处理等。



**邓娜** (1988-), 女, 吉林长春人, 中国科学技术大学博士生, 主要研究方向为中继协作通信、绿色通信、异构网络覆盖。



**赵明** (1976-), 男, 安徽铜陵人, 中国科学技术大学讲师, 主要研究方向为绿色通信、中继技术及异构网络等。