

基于空间位置的混合频谱共享系统功率分配研究

蔡艳¹, 张晶², 朱洪波¹

- (1. 南京邮电大学 通信与信息工程学院 江苏省无线通信重点实验室, 江苏 南京 210003;
2. 南京邮电大学 电子科学与工程学院 江苏省无线通信重点实验室, 江苏 南京 210003)

摘 要: 针对次用户空间位置分布的随机性, 提出空域混合 Overlay/Underlay 频谱共享模型以提高无线频谱利用率。根据次用户在不同空间位置对主用户的干扰, 在主用户干扰容限约束下推导出次用户工作于 Overlay 状态和 Underlay 状态的空间区域; 以最大化系统容量为准则建立认知系统功率优化分配模型, 推导出次用户的最优功率分配方案, 进而得到认知系统可获得的最大容量; 理论和仿真结果表明, 基于空间位置的混合频谱共享系统可以获得比 Overlay 系统更高的容量。

关键词: 无线通信; 频谱共享; 认知无线电; 功率分配

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)02-0104-07

Power allocation of hybrid spectrum sharing based on the spatial location

CAI Yan¹, ZHANG Jing², ZHU Hong-bo¹

- (1. Key Laboratory of Wireless Communications of Jiangsu Province, College of Telecommunications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;
2. Key Laboratory of Wireless Communications of Jiangsu Province,

College of Electronic Science and Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: Based on the random spatial location of the secondary user, a spatial hybrid spectrum sharing model which combines overlay with underlay was proposed to improve spectrum utilization. Considering the different location of secondary user, the interference received by primary receiver was analyzed and the work regions of the overlay and underlay were deduced under the primary user average interference constraint. The power allocation model was built under the criterion of maximizing the system average (ergodic) capacity. Furthermore, the optimal power allocation scheme was deduced as well as the maximum achievable capacity of the spatial hybrid spectrum sharing system. Analysis and simulation results indicate the hybrid spectrum sharing system has higher capacity than single overlay system.

Key words: wireless communication; spectrum sharing; cognitive radio; power allocation

1 引言

快速发展的无线通信技术为信息社会的发展带来了机遇, 但是随着宽带无线应用的推广, 无线频谱资源日趋紧张, 频谱资源匮乏已成为未来无线通信发展的制约因素。研究^[1,2]表明, 很多授权频段大

部分时间空闲, 实际的频谱利用率非常低, 例如, 3 GHz 以下频段的频谱空白率超过 60%, 频谱资源缺乏更多是由于现有的静态频谱管理与分配策略造成的。为此, 美国联邦通信委员会(FCC)提出了动态频谱共享的概念来解决无线频谱资源短缺问题。动态频谱共享技术允许非授权用户——次用户(secondary

收稿日期: 2013-02-22; 修回日期: 2013-06-06

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(2013CB329005); 江苏“973”基金资助项目(BK2011027); 国家自然科学基金资助项目(61101104, 61271237); 南京邮电大学基金资助项目(NY211055)

Foundation Items: The National Basic Research and Development Program of China(973 Program)(2013CB329005); Jiangsu 973 Project (BK2011027); The National Natural Science Foundation of China(61101104, 61271237); The Project of Nanjing University of Posts and Telecommunications(NY211055)

user)在不过分干扰授权用户——主用户(primary user)通信的情况下,智能地接入授权频段,可以极大提高频谱效率和系统容量。以认知无线电(CR, cognitive radio)^[3-5]为基础的动态频谱共享技术已成为极具潜力的未来无线通信频谱解决方案。

基于认知无线电技术,文献[6]将频谱共享方式分为:机会频谱接入(OSA, opportunistic spectrum access)和共存式频谱共享(SS, spectrum sharing)方式,分别对应于文献[7]中的Overlay和Underlay方式。Overlay系统中,次用户对主用户频段进行频谱感知(spectrum sensing)^[8],利用“频谱空穴”进行机会接入。而Underlay系统允许次用户在确保主用户干扰容限的前提下与主用户共用同一频段。针对Overlay系统,文献[9]研究了信道信息感知不完全的条件下,认知网络的功率和信道资源分配问题。文献[10]在确保主用户不受干扰的基础上,通过设计频谱感知时长使得次用户网络吞吐量达到最大。而文献[11]分析了多种衰落信道下的Underlay系统容量。文献[12]讨论了在主用户中断约束条件下的Underlay共享系统功率分配问题。上述研究均针对单一的Overlay或Underlay系统展开,Overlay系统中次用户仅能在检测到“频谱空穴”时发送信号,否则存在用户碰撞引起的次用户切换或通信中断问题。Underlay系统不用考虑频谱是否空闲,可在任意时间内发送,但其发射功率将受到主用户干扰容限的限制,次用户不能获得较高的速率。文献[13,14]结合Underlay与Overlay方案提出了混合式频谱共享模型。在此模型中,当次用户请求接入时,首先进行频谱感知,若存在空闲信道,即以较高的发射功率工作于Overlay状态,可获得较高的速率;若没有空闲信道,次用户也可接入信道,并以能避免对主用户干扰的较低功率进行发射。因此,无论主用户是否工作,信道是否空闲,次用户都可随时接入授权频段进行发射,在整个时间段内进行动态功率发射,以较高的效率实现主次用户的频谱共享,与单一的共享方式相比,系统容量有所提高。文献[13]考虑单对主用户及次用户链路的情况下,根据频谱检测概率,提出基于感知的混合频谱共享模型,并求解混合共享系统的最大容量。文献[14]针对多个主次用户情况,采用马尔科夫过程对信道活动进行建模,得到次用户在Overlay和Underlay状态的时间比率,在容量最大化准则下对混合式频谱共享系统的功率分配进行建模,得到了次用户的最优功率分配策略。

但文献[13,14]仅是针对空间位置固定的次用户,从时域角度实现了混合频谱共享,未考虑次用户在空间中的移动性。不同于上述情形,本文考虑次用户在空间进行移动带来位置变化的情况,针对次用户空间位置分布的随机性,提出基于空间位置的混合频谱共享模型,当次用户随机出现在共享系统的区域内并移动时,通过一定的定位技术(如文献[15]及其参考文献中提出的使用GPS定位或检测主用户发射信号)获得与主接收机之间的距离,根据该距离确定当前所处的工作区域,动态调整发射功率,根据发射功率的受限情况分别以Overlay和Underlay方式进行工作,实现混合式频谱共享。并进一步基于系统容量最大化的准则建立认知系统功率优化分配模型,推导出次用户的最优功率分配方案,进而得到认知系统可获得的最大容量;并通过仿真对理论结果进行验证。

2 系统模型

考虑频谱共享系统中主网络采用频分多址接入(FDMA)方式,例如,GSM网络或基于FDMA技术的网络,次网络为分布在相同区域的无线ad hoc网络。主系统拥有 M 个带宽为 B 的授权频段,每个频段在某个时刻仅提供给一个授权用户使用,同时主网络开放所有频段给次用户共享,每个频段在某时刻仅允许一次用户接入,次用户在确保主用户通信质量的前提下与主用户共享该频段,次用户发射机具有自适应的功率调整功能。由于对单一频段而言,某个时刻仅能有一个授权用户和一个次用户使用,所以可简化考虑网络中仅有一对主用户和一对次用户处于活动的状态,假设主用户接收机位于区域中心,共享系统区域半径为 R 。基于空间区域划分的频谱共享认知网络模型如图1所示。

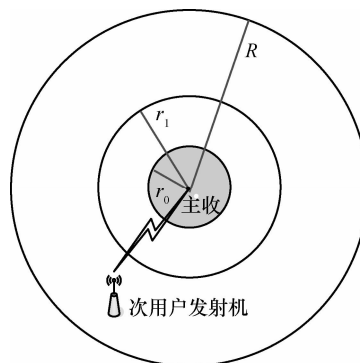


图1 基于空间区域划分的频谱共享认知网络模型, 3个区域对应3种工作状态

根据次用户在不同位置处产生的干扰必须低于主用户的干扰容限约束, 可将网络区域划分为 3 个不同的次用户工作状态区域。\$r_0\$ 为主用户的保护区域半径, 当次用户出现在半径 \$r_0\$ 的区域之内时, 禁止次用户发送信号; 当次用户远离主用户, 出现在半径 \$r_1\$ 的区域之外, 即使次用户以最大发射功率发送信号, 对主用户的干扰都可被忽略, 在此区域内, 次用户功率仅受发射功率约束, 即以 Overlay 方式进行工作; 而当次用户出现在半径 \$r_0\$ 和 \$r_1\$ 之间的区域时, 在发射功率和主用户干扰容限的共同约束下, 在此区间内次用户功率随距离变化动态调整, 即以 Underlay 方式进行工作。

由于次用户可根据自己的位置分布动态地在 Overlay 和 Underlay 状态间切换, 本文称上述频谱共享模式为基于空间位置的混合 Overlay/Underlay 频谱共享。由于次用户的位置随机分布及其对主接收机的干扰状况决定次用户的工作状态及发射功率的转换, 因此, 下面将分析次用户在不同空间位置对主用户的干扰, 并在主用户干扰容限约束下推导出次用户工作于 Overlay 状态和 Underlay 状态的空间区域分界。

3 不同工作状态的空间区域划分

假设次用户随机出现在网络区域中, 次用户与主接收机之间的距离为 \$r\$, 根据上文, \$r\$ 服从 \$[0, R]\$ 的均匀分布, \$r\$ 的概率密度函数为

$$f_r(r) = \frac{2r}{R^2} \quad (1)$$

当次用户与主用户共享频段工作时, 主用户接收机处的总干扰 \$I_t\$ 为次用户引起的干扰和高斯噪声之和。

$$I_t = I(r) + N_0B = P_r r^{-\alpha} g_1 + N_0B \quad (2)$$

其中, \$I(r)\$ 是与主接收机相距 \$r\$ 的认知用户引起的干扰, \$N_0B\$ 为零均值加性高斯白噪声功率, \$P_r\$ 为次用户的发射功率, \$\alpha\$ 为路径损耗因子, \$g_1\$ 为次用户发射机到主接收机链路的小尺度功率衰减系数。当 \$r\$ 位于不同的范围时, 对主用户的干扰不同, 次用户可动态调整自身发送功率工作在 Overlay 或 Underlay 模式, 因此, 下文先根据主用户的干扰约束来确定次用户不同工作状态的区域划分, 即确定 \$r_0\$ 和 \$r_1\$。

假设 \$Q_{av}\$ 为主用户接收机的平均干扰功率容

限, \$P_{min}\$ 是认知用户的最小发射功率, 当次用户与主用户接收机之间的距离小于某个值时, 即使以最小发射功率工作, 其产生的干扰也会超过主用户接收机的干扰容限, 即

$$E[P_{min} r^{-\alpha} g_1 + N_0B] > Q_{av} \Rightarrow r < \left(\frac{P_{min} E[g_1]}{Q_{av} - N_0B} \right)^{1/\alpha} \quad (3)$$

定义此边界值为

$$r_0 = \left(\frac{P_{min} E[g_1]}{Q_{av} - N_0B} \right)^{1/\alpha} \quad (4)$$

因此, 要使次用户与主用户能够共享频谱共存工作, 次用户与主接收机之间的最小距离必不小于 \$r_0\$, 即 \$r_0\$ 为主用户的保护区域半径。

设定 \$P_{max}\$ 为次用户的最大发射功率。在次用户以最大发射功率工作时, 当其与主接收机之间的距离大于一定值时, 若对主用户产生的干扰远小于主用户接收机的平均干扰容限, 该干扰可以被忽略, 即

$$E[P_{max} r^{-\alpha} g_1 + N_0B] < Q_{av} \Rightarrow r > \left(\frac{P_{max} E[g_1]}{Q_{av} - N_0B} \right)^{1/\alpha} \quad (5)$$

由式(5)可定义式(6)

$$r_1 = \left(\frac{P_{max} E[g_1]}{Q_{av} - N_0B} \right)^{1/\alpha} \quad (6)$$

因此, 当次用户与主接收机距离大于 \$r_1\$ 时, 次用户不受主用户干扰约束, 此时次用户工作于空间 Overlay 方式。

综上, 当次用户随机出现在网络区域中, 并且与主用户共享频谱工作时, 当 \$r < r_0\$ 时, 禁止次用户发送信号; 当 \$r_0 \leq r \leq r_1\$ 时, 次用户可动态调整发射功率, 在符合主用户干扰容限条件下以 Underlay 方式与主用户共享频谱; 当 \$r_1 < r \leq R\$ 时, 次用户以不受主用户干扰约束的 Overlay 方式工作。因此, 次用户可根据与主接收机之间的距离转换工作状态, 动态调整发射功率, 实现基于空间位置随机分布的空域混合 Overlay/Underlay 频谱共享。下文将分析空域混合频谱共享系统的功率分配问题。

4 功率优化分配

由第 3 节的分析可知, 当 \$r_0 \leq r \leq r_1\$ 时, 次用户工作在 Underlay 方式下; 而当 \$r_1 < r \leq R\$ 时, 次用户工作在 Overlay 方式下。以最大化系统容量为准则,

同时考虑主用户的干扰约束和次用户的发射功率限制, 次用户处于空间位置 $r \in [r_0, r_1]$ 时可获得的容量为

$$C_{\text{under}} = \max_{P_u} \left\{ \mathbb{E}_{g_0} \mathbb{E}_{g_1} \left[B \text{lb} \left(1 + \frac{P_u(r, g_0, g_1) d^{-\alpha} g_1}{N_0 B} \right) \right] \right\}$$

$$\text{s.t. } \mathbb{E}_{g_0} \mathbb{E}_{g_1} [P_u(r, g_0, g_1)] < P_{\text{av}}$$

$$\mathbb{E}_{g_0} \mathbb{E}_{g_1} [r^{-\alpha} g_0 P_u(r, g_0, g_1)] < Q_{\text{av}} \quad (7)$$

而次用户处于空间位置 $r \in (r_1, R]$ 时可获得的容量为

$$C_{\text{over}} = \max_{P_o} \left\{ \mathbb{E}_{g_0} \mathbb{E}_{g_1} \left[B \text{lb} \left(1 + \frac{P_o(r, g_0, g_1) d^{-\alpha} g_1}{N_0 B} \right) \right] \right\}$$

$$\text{s.t. } \mathbb{E}_{g_0} \mathbb{E}_{g_1} [P_o(r, g_0, g_1)] < P_{\text{av}} \quad (8)$$

其中, $\mathbb{E}_x [g(x)] = \int_x f(x)g(x)dx$ 是随机变量函数 $g(x)$ 的期望, 而 $f(x)$ 是随机变量 x 的概率密度函数; $P_u(r, g_0, g_1)$ 和 $P_o(r, g_0, g_1)$ 分别表示次用户在 Underlay 和 Overlay 状态下的发射功率; d 为次用户发射机与其目标接收机之间的距离, r 为次用户发射机与主用户接收机之间的距离, α 为路径损耗因子, g_0, g_1 分别表示次用户发射机到其目标接收机与到相应主接收机链路的小尺度功率衰减系数, N_0 为信道加性噪声的功率谱密度; P_{av} 为次用户的平均发射功率容限, Q_{av} 为主用户接收机的干扰功率容限。

由于发射功率直接决定次用户最大可获得的容量, 因此, 式(7)和式(8)分别为次用户在 Underlay 状态和 Overlay 状态下的功率优化分配模型。首先求解式(7), 即 Underlay 状态下的次用户功率分配问题。采用拉格朗日乘法, 令

$$L(P_u, \lambda, \mu) = \mathbb{E}_{g_0} \mathbb{E}_{g_1} \left[B \text{lb} \left(1 + \frac{P_u(r, g_0, g_1) d^{-\alpha} g_1}{N_0 B} \right) \right] -$$

$$\lambda \left[\mathbb{E}_{g_0} \mathbb{E}_{g_1} (P_u(r, g_0, g_1)) - P_{\text{av}} \right] -$$

$$\mu \left[\mathbb{E}_{g_0} \mathbb{E}_{g_1} (r^{-\alpha} g_0 P_u(r, g_0, g_1)) - Q_{\text{av}} \right]$$

$$= \mathbb{E}_{g_0} \mathbb{E}_{g_1} \left\{ B \text{lb} \left(1 + \frac{P_u(r, g_0, g_1) d^{-\alpha} g_1}{N_0 B} \right) - \right.$$

$$\left. \lambda [P_u(r, g_0, g_1) - P_{\text{av}}] - \mu [r^{-\alpha} g_0 P_u(r, g_0, g_1) - Q_{\text{av}}] \right\} \quad (9)$$

其中, λ 和 μ 是拉格朗日因子。式(9)对 $P_u(r, g_0, g_1)$ 求导并令导数为 0, 可得到次用户在 Underlay 状态下的最优发送功率为

$$P_u^*(r, g_0, g_1) = \begin{cases} \frac{B}{(\lambda^* + \mu^* r^{-\alpha} g_0) \ln 2} - \frac{N_0 B}{d^{-\alpha} g_1}, & \frac{d^{-\alpha} g_1}{(\lambda^* + \mu^* r^{-\alpha} g_0) \ln 2} \geq N_0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

其中, λ^* 和 μ^* 分别由式(11)和式(12)得到

$$\iint_{\frac{d^{-\alpha} g_1}{(\lambda^* + \mu^* r^{-\alpha} g_0) \ln 2} \geq N_0} P_u^*(r, g_0, g_1) f_0(g_0) f_1(g_1) dg_0 dg_1 = P_{\text{av}} \quad (11)$$

$$\iint_{\frac{d^{-\alpha} g_1}{(\lambda^* + \mu^* r^{-\alpha} g_0) \ln 2} \geq N_0} r^{-\alpha} g_0 P_u^*(r, g_0, g_1) f_0(g_0) f_1(g_1) dg_0 dg_1 = Q_{\text{av}} \quad (12)$$

将式(10)代入式(7), 可得到 Underlay 状态下频谱共享系统可获得的最大容量为

$$C_{\text{under}} = \mathbb{E}_{g_0} \mathbb{E}_{g_1} \left[B \text{lb} \left(\frac{d^{-\alpha} g_1}{N_0 (\lambda^* + \mu^* r^{-\alpha} g_0) \ln 2} \right) \right] \quad (13)$$

下面求解式(8), 即 Overlay 状态下的次用户功率分配问题。与求解式(7)类似, 同样采用拉格朗日乘法, 令

$$L(P_o, \kappa) = \mathbb{E}_{g_0} \mathbb{E}_{g_1} \left[B \text{lb} \left(1 + \frac{P_o(r, g_0, g_1) d^{-\alpha} g_1}{N_0 B} \right) \right] -$$

$$\kappa \left[\mathbb{E}_{g_0} \mathbb{E}_{g_1} (P_o(r, g_0, g_1)) - P_{\text{av}} \right]$$

$$= \mathbb{E}_{g_0} \mathbb{E}_{g_1} \left\{ B \text{lb} \left(1 + \frac{P_o(r, g_0, g_1) d^{-\alpha} g_1}{N_0 B} \right) - \right.$$

$$\left. \kappa [P_o(r, g_0, g_1) - P_{\text{av}}] \right\} \quad (14)$$

其中, κ 是拉格朗日因子。式(14)对 $P_o(r, g_0, g_1)$ 求导并令导数为 0, 可得到次用户在空间 Overlay 状态下的最优发送功率为

$$P_o^*(r, g_0, g_1) = \begin{cases} \frac{B}{\kappa^* \ln 2} - \frac{N_0 B}{d^{-\alpha} g_1}, & \frac{g_1}{\kappa^* \ln 2} \geq \frac{N_0}{d^{-\alpha}} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

其中, κ^* 可由式(16)得到。

$$\iint_{\frac{g_1}{\kappa^* \ln 2} \geq \frac{N_0}{d^{-\alpha}}} P_o^*(r, g_0, g_1) f_0(g_0) f_1(g_1) dg_0 dg_1 = P_{\text{av}} \quad (16)$$

将式(15)代入式(8), 可得到空间 Overlay 状态下频谱共享系统可获得的最大容量为

$$C_{\text{over}} = \mathbb{E}_{g_0} \mathbb{E}_{g_1} \left[B \text{lb} \left(\frac{d^{-\alpha} g_1}{\ln 2 N_0 \kappa^*} \right) \right] \quad (17)$$

考虑次用户在整个网络中的位置随机分布, 对次用户的位置分布取平均, 得到空域混合频谱共享系统可获得的最大平均容量为

$$\begin{aligned}
 C_{av}(r) &= \int_0^{r_1} C_{\text{under}} f_r(r) dr + \int_{r_1}^R C_{\text{over}} f_r(r) dr \\
 &= \int_0^{r_1} E_{g_0} E_{g_1} \left[B \text{lb} \left(\frac{d^{-\alpha} g_1}{N_0 (\lambda^* + \mu^* r^{-\alpha} g_0) \ln 2} \right) \right] f_r(r) dr + \\
 &\quad \int_{r_1}^R E_{g_0} E_{g_1} \left[B \text{lb} \left(\frac{d^{-\alpha} g_1}{\ln 2 N_0 K^*} \right) \right] f_r(r) dr \quad (18)
 \end{aligned}$$

当次用户随机出现在网络区域中并在空间进行移动时,次用户可根据所处的位置确定工作区域和工作方式,计算对应的最优发射功率,动态调整发射功率以获取满足主用户干扰约束的最大容量。具体功率调整方案如下所示。

Step1 出现在频谱共享网络中的次用户依照已知的主网络的干扰容限要求,根据式(4)和式(6)计算出 r_0 和 r_1 。次用户通过一定的定位技术(如文献[15]及其参考文献中提出的使用 GPS 定位或检测主用户发射信号,限于篇幅,本文对这方面内容不做深入讨论)获得网络中主用户和自己的位置信息,计算出与主接收机之间的距离 r 。

Step2 次用户根据 r 确定自己的工作方式,若 $r < r_0$, 次用户不发送信号;若 $r_0 \leq r \leq r_1$, 次用户根据式(10)计算出发射功率,并以此功率进行传输,工作在 Underlay 状态;若 $r_1 < r \leq R$, 可直接调整发射功率为 P_{av} , 工作在 Overlay 状态。

Step3 未实现通信和需继续通信的次用户间隔一定时间重复步骤 Step 1~ Step 3, 直至传输得以完成。

5 仿真结果与分析

假设主用户接收机位于区域中心,共享系统区域半径为 R , 在区域的不同位置上随机放置单个次用户,取如表 1 所示的仿真参数,用 MATLAB 进行仿真可得到次用户在距区域中心不同半径位置处的最优发射功率和频谱共享系统容量。

表 1 仿真参数	
参数描述	数值
高斯白噪声功率 $N_0 B$	-80 dBmW
路径损耗因子 α	4
瑞利衰落系数 g_0, g_1	$\lambda=1$ 的指数分布
次用户最大发射功率 P_{\max}	30 dBmW
次用户最小发射功率 P_{\min}	5 dBmW
次用户平均发射功率限值 P_{av}	25 dBmW(320 mW)
共享系统区域半径 R	800 m
次用户发射机与其目标接收机距离 d	10 m

当主用户接收机的干扰功率容限 Q_{av} 取不同值时,得到如图 2 所示的仿真结果。

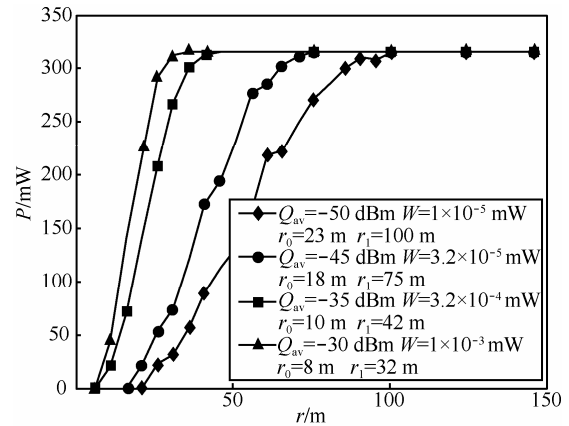


图 2 次用户最优发射功率 P 随次用户与主接收机距离 r 的变化曲线

图 2 给出了次用户最优发射功率 P 与次用户与主接收机距离 r 之间的关系,从图中可看出, $r < r_0$ 时, P 为 0,之后随着 r 的增大, P 逐渐增大,至 $r > r_1$ 后, P 趋于平均发射功率限值 P_{av} , 明显反映出当次用户逐渐远离主接收机时,次用户经历的 3 种工作状态,从不发送信号到功率 P 随距离调节增大的 Underlay 方式,直至 P 保持为 P_{av} 的 Overlay 方式。当 Q_{av} 变化时,对应的工作区域分界 r_0 和 r_1 随之变化,例如,当 $Q_{av} = -50$ dBmW, 对应的 r_0 为 23 m, r_1 为 100 m, 当 $Q_{av} = -30$ dBmW, 对应的 r_0 为 8 m, r_1 为 32 m, 当 Q_{av} 增大时,表明主接收机允许的干扰值增加,而当次用户发射功率一定时,对应的干扰距离减小,从而对应的 r_0 和 r_1 减小。从图 2 还可知,当 $r > r_1$ 时,次用户发射功率不受 Q_{av} 影响,大小等于平均发射功率限值 P_{av} , 因此,若次用户位于 r_1 之外,次用户获取位置信息后,可直接调节发射功率为 P_{av} , 从而大大减少系统的运算量。

图 3 给出了次用户位于距主接收机 r 处可获得的混合频谱系统最大容量,当次用户位于 r_0 与 r_1 之间时,工作在 Underlay 方式,发射功率随距离变大而增大,因而系统容量也随距离变大而增长,当 $r > r_1$ 时,次用户工作于 Overlay 方式,发射功率保持为固定的平均发射功率限值,系统容量也趋于对应的上限值。

与图 3 反映的单个位置处的容量不同,图 4 给出了整个系统覆盖区域 R 上的平均容量 C_{av} 。此例中 r_1 为 100 m, 图 4 上方的曲线表示 R 对基于空间位置的混合频谱共享系统平均容量的影响,从图中

可知, 当 $R < r_1$, C_{av} 随 R 小幅增长, 当 $R > r_1$, C_{av} 基本保持最大值不变, 这是因为在 $R < r_1$ 时, 整个区域中次用户以 Underlay 工作方式为主, 而当 $R > r_1$ 后, 区域中以 Overlay 工作方式为主的次用户增多。图 4 下方的曲线表示仅考虑 Overlay 方式工作时, C_{av} 随 R 的变化, 由图 4 可以看出, C_{av} 随 R 逐渐增大。由图 4 可知, 混合频谱共享系统平均容量大于单一 Overlay 系统的平均容量, 具有更高的频谱效率。

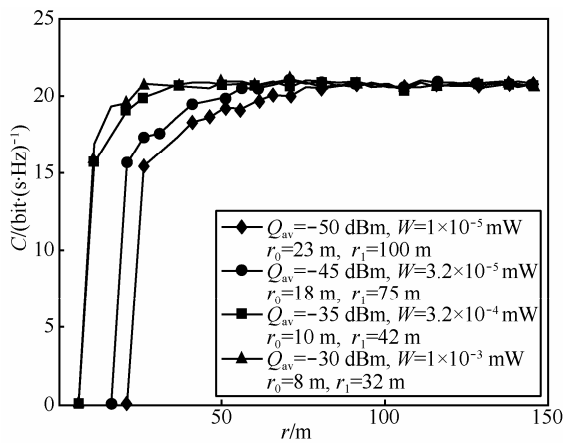


图3 次用户容量 C 随次用户与主接收机距离 r 的变化曲线

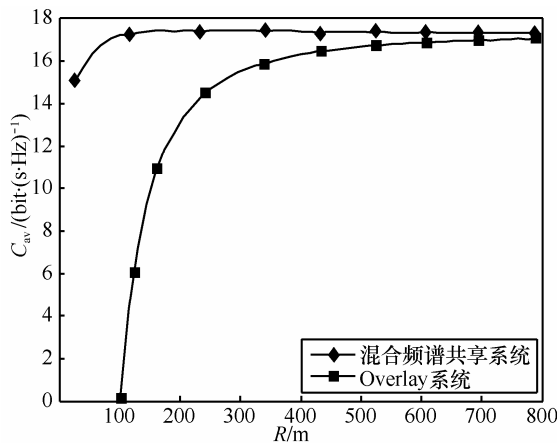


图4 混合频谱共享系统平均容量及 Overlay 方式平均容量随共享区域 R 的变化曲线

另外, 当 R 较大时, 混合频谱共享系统的系统平均容量与单一 Overlay 系统的平均容量基本一致, 说明在较大的覆盖区域中, 混合系统中 Underlay 方式影响非常小, 主要以 Overlay 方式为主, 且两者的 C_{av} 基本保持恒定值, 反映出当 R 扩大到一定程度后, 系统平均容量不再受覆盖区域大小的影响, 可对频谱共享系统网络的覆盖区域设计提供一定的参考依据。

6 结束语

相对传统的单一频谱共享模型, 新型的混合频谱共享模型是目前认知无线电领域的研究热点之一, 但目前的研究都针对空间位置固定的次用户, 从时域角度实现混合频谱共享。本文考虑次用户移动带来的位置变化, 提出基于空间位置的混合频谱共享模型, 并研究了该混合共享系统的功率分配问题。本文主要工作为: 1) 针对次用户空间位置分布的随机性, 提出空域混合 Overlay/ Underlay 频谱共享模型; 2) 在主用户干扰约束下推导出次用户工作于 Overlay 状态和 Underlay 状态的空间区域划分; 3) 以最大化系统容量为准则建立认知系统功率优化分配模型, 并得到最优功率分配方案。但本文的最优功率分配策略需要获取大量信道状态信息, 计算复杂度较大, 因此, 下一步将考虑研究物理层和 MAC 层相结合的跨层设计优化分配策略。

参考文献:

- [1] Federal Communications Commission, Spectrum Policy Task Force Report[S]. 2002. 2-135.
- [2] CABRIC D, DONNELL I D O, CHEN M S W, *et al.* Spectrum sharing radios[J]. IEEE Circuits and Systems Mag, 2006, 6(2): 30-45.
- [3] MITOLA J, MAGUIRE G Q. Cognitive radios: making software radios more personal[J]. IEEE Personal Commun, 1999, 6(4): 13-18.
- [4] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. IEEE J Select Areas Commun, 2005, 23(2): 201-220.
- [5] SONG M, XIN C S, ZHAO Y X, *et al.* Dynamic spectrum access: from cognitive radio to network radio[J]. Wireless Communications, IEEE, 2012, 19(1): 23-29
- [6] ZHANG R, LIANG Y C, CUI S G. Dynamic resource allocation in cognitive radio networks[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2010, 27(3): 102-114.
- [7] ZHAO Q, SADLER B M. A survey of dynamic spectrum access: signal processing, networking, and regulatory policy[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(3): 79-89.
- [8] YUCEK T, ARSLAN H. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications[J]. IEEE Commun Surveys & Tutorials, 2009, 11(1): 116-130.
- [9] XIE R, YU F R, JI H. Dynamic resource allocation for heterogeneous services in cognitive radio networks with imperfect channel sensing[J]. Vehicular Technology, IEEE Transactions, 2012, 61(2): 770-780.

- [10] LIANG Y C, ZENG Y H, PEH E C Y, *et al.* Sensing-throughput trade-off for cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(4): 1326-1337.
- [11] GHASEMI A, SOUSA E S. Fundamental limits of spectrum-sharing in fading environments[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(2): 649-658.
- [12] KANG X, ZHANG R, LIANG Y C, *et al.* Optimal power allocation strategies for fading cognitive radio channels with primary user outage constraint[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(2): 374-383.
- [13] KANG X, LIANG Y C, GARG H K, *et al.* Sensing-based spectrum sharing in cognitive radio networks[J]. IEEE Trans Veh Technol, 2009, 58(8): 4649-4654.
- [14] 张晶, 朱洪波. 混合式频谱共享系统功率分配研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(11): 2776-2780.
ZHANG J, ZHU H B. On power allocation of hybrid spectrum sharing[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(11): 2776-2780.
- [15] WANG L C, CHEN A. Effects of location awareness on concurrent transmissions for cognitive ad hoc networks overlaying infrastructure-based systems[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2009, 8(5):577-589.

作者简介:



蔡艳(1974-), 女, 四川南充人, 南京邮电大学讲师, 主要研究方向为无线通信与电磁兼容、宽带无线通信技术。



张晶(1980-), 女, 湖北襄樊人, 博士, 南京邮电大学讲师, 主要研究方向为无线通信与电磁兼容、宽带无线通信技术。



朱洪波(1956-), 男, 江苏扬州人, 博士, 南京邮电大学副校长、教授、博士生导师, 主要研究方向为无线通信与电磁兼容、移动通信与宽带无线技术、物联网技术。