

基于 SC-FDMA 的宽带认知无线网络中最优功率分配的研究

王振朝^{1,2} 马明磊¹ 李 延¹

(河北大学电子信息工程学院 保定 071000)¹ (河北省数字医疗工程重点实验室 保定 071000)²

摘 要 研究了基于单载波频分多址(SC-FDMA)的宽带认知无线网络中非授权用户(NU)的最优功率分配(OPA)问题。首先给出了基于 SC-FDMA 的宽带认知无线网络中非授权用户对授权用户的干扰功率模型。在此基础上,分别在下述两种约束条件下利用凸优化理论推导出了两种使非授权用户的和速率最大的最优功率分配(OPA)算法。约束条件一为:任一非授权用户的任一子载波对授权用户的干扰功率受限(IPCs);约束条件二为:所有非授权用户的所有子载波对授权用户的干扰功率受限(IPC)。仿真结果表明,与等功率分配(EPA)和传统最优功率分配(C-OPA)算法相比,所提出的算法显著提高了非授权用户的可达和速率。

关键词 SC-FDMA, 认知无线网络, 最优功率分配

中图分类号 TN914 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.4.009

Optimal Power Allocation in Broadband Cognitive Radio Networks Based on SC-FDMA

WANG Zhen-chao^{1,2} MA Ming-lei¹ LI Yan¹

(College of Electronic & Information Engineering, Hebei University, Baoding 071000, China)¹

(Key Laboratory of Digital Medical Engineering of Hebei Province, Baoding 071000, China)²

Abstract This paper studied the optimal power allocation problem of non-authorized user(NU) in broadband cognitive radio networks based on single-carrier frequency division multiple access(SC-FDMA). Firstly, we introduced the NU to authorized user(AU) interference power models of broadband cognitive radio networks based on SC-FDMA. On this basis, using convex optimization theory in the following two constraints, we derived two kinds of the optimal power allocation (OPA) algorithms to make the sum of rate of NU largest respectively. One constraint is any subcarrier's interference power constraints(IPCs) of any NU to AU. The other constraint is all NU's all subcarriers' interference power constraints(IPC) to AU. Simulation results show that compared with equal power allocation (EPA) and the traditional optimal power allocation (C-OPA) algorithm, the proposed algorithm significantly improves the achievable sum rate of NU.

Keywords SC-FDMA, Cognitive radio networks, Optimal power allocation

1 引言

近年随着通信技术的发展,提高有限的频谱资源利用率已成为无线通信技术进一步发展的关键课题。认知无线电技术被认为是一个提高频谱利用率的有效技术^[1]。所谓认知无线网络就是基于认知无线电技术的对频谱资源进行动态利用的无线通信系统。在认知无线网络中,为了保证授权用户对授权频段的优先使用权及其通信不被非授权用户干扰,对非授权用户的功率进行限制以减少非授权用户对相邻授权用户的干扰。在此基础上,在非授权用户之间进行合理的功率分配以使所有非授权用户的总和速率最大化。一般而言,认知无线网络中的最优功率分配算法就是在给定的限制条件下合理分配非授权用户的发射功率以使授权用户感受的干扰小于门限值,并使非授权用户的和速率最大等系统性能最优。

文献[2-5]研究了基于 OFDMA 的认知无线网络中的最优功率分配算法(OPA)。文献[3]研究了非授权用户功率受限和授权用户干扰门限给定条件下的非授权用户和速率最优优化算法,通过将限制条件转化为对每个正交子载波归一化速率限制,简化了问题的求解过程。文献[4]分别提出了一种非授权用户的和速率最优和次优的最优功率分配(OPA)算法,但是其只考虑了对授权用户的干扰限制,而忽略了非授权用户网络的功率限制。文献[5]提出了一种授权用户速率损失限制(RLC)和系统总传输功率限制下的最优功率分配算法,并且研究了 RLC 和 IPC 的关系。

相对于 OFDMA,单载波频分多址接入(SC-FDMA)具有低的 PAPR 和相似的复杂度,因而受到广泛关注,但基于 SC-FDMA 的宽带认知无线网络中的最优功率分配问题的研究还较少。与 OFDMA 不同,对 SC-FDMA 而言,非授权用户系统的和速率并不是所有子载波可达和速率的简单加合,所

到稿日期:2014-05-21 返修日期:2014-09-13 本文受河北省自然科学基金项目(F2014201168)资助。

王振朝(1958-),男,博士,教授,主要研究方向为下一代移动通信网和工业数据通信,E-mail:974318293@qq.com;马明磊(1988-),男,硕士生,主要研究方向为无线通信系统及功率分配算法;李 延(1990-),女,硕士生,主要研究方向为协作通信。

以基于 OFDMA 的 OPA 设计算法不能直接应用到 SC-FDMA 网络中。本文研究基于 SC-FDMA 的宽带认知无线网络中非授权用户 (NU) 发射功率的 OPA 算法。在本文中, 主要考虑任一非授权用户的任一子载波对授权用户的干功率受限 (IPCs) 和对所有非授权用户对授权用户所有子载波的总和干功率受限 (IPC) 两种约束条件, 以非授权用户的和速率最大为目标函数推导出了两个算法, 即非授权用户任一子载波对授权用户的干功率受限下的 SS-OPA (single user single subcarrier confined optimal power allocation) 算法和所有非授权用户的所有子载波对授权用户干功率受限下的 AA-OPA (all user all subcarrier confined optimal power allocation) 算法。

2 系统模型

假设在基于 SC-FDMA 的宽带认知无线网络中有 U 个非授权用户和一个授权用户, 这 $(U+1)$ 个用户利用 N_c 个子载波共享相同的频带。非授权用户的发射机装备一个单天线, 非授权用户和授权用户的接收机分别装备 N_s 和 N_p 个天线。这样的假设很符合一个 LTE 上行场景, 因为移动终端受到自身体积的限制不能负担多天线。非授权用户发射机的传输信号加上长度为 N_{cp} 的循环前缀 (CPs) 且 N_{cp} 满足: $N_{cp} \geq \max\{L_{ss}, L_{sp}\}$, 其中 L_{ss} 和 L_{sp} 分别表示非授权用户发射机和非授权用户接收机之间以及非授权用户发射机和授权用户接收机之间的信道冲激响应 (CIRs) 的最大长度。CP 使 CIRs 和传输信号的线性卷积转换到循环卷积。所以对于非授权用户 u , 非授权用户发射机和非授权用户接收机之间以及非授权用户发射机和授权用户接收机之间的时域信道矩阵分别是:

$$H_{s_s, i}^{[u]} = \text{blkcirc}[\hat{h}_{s_s, 0}^{[u]T}, \dots, \hat{h}_{s_s, L_{ss}-1}^{[u]T}, 0_{1 \times N_s(N_c - L_{ss} + 1)}]^{T^T}$$

$$H_{s_p, i}^{[u]} = \text{blkcirc}[\hat{h}_{s_p, 0}^{[u]T}, \dots, \hat{h}_{s_p, L_{sp}-1}^{[u]T}, 0_{1 \times N_s(N_c - L_{sp} + 1)}]^{T^T}$$

其中, $\text{blkcirc}[\hat{h}_{s_s, 0}^{[u]T}, \dots, \hat{h}_{s_s, L_{ss}-1}^{[u]T}, 0_{1 \times N_s(N_c - L_{ss} + 1)}]^{T^T}$ 表示由分块向量 $[\hat{h}_{s_s, 0}^{[u]T}, \dots, \hat{h}_{s_s, L_{ss}-1}^{[u]T}, 0_{1 \times N_s(N_c - L_{ss} + 1)}]^{T^T}$ 构成的块循环矩阵, $\hat{h}_{s_s, l}^{[u]} \in C^{N_s \times 1}$, $\hat{h}_{s_p, l}^{[u]} \in C^{N_p \times 1}$ 包含了相关连接的 CIRs 第 l 个抽头的增益。

在 SC-FDMA 系统中, 信号的处理过程如图 1 所示。由图可知, 时域信道 $H_{s_s, i}^{[u]}$ 和 $H_{s_p, i}^{[u]}$ 是由频域信道 $H_{s_s, j}^{[u]}$ 经过离散傅里叶逆变换 (IDFT) 得到的。因此 $H_{s_s, i}^{[u]}$ 和 $H_{s_p, i}^{[u]}$ 可以分解为 $H_{s_s, i}^{[u]} = (F_{N_c}^{\dagger} \otimes I_{N_s}) H_{s_s, j}^{[u]} F_{N_c}$ 和 $H_{s_p, i}^{[u]} = (F_{N_c}^{\dagger} \otimes I_{N_p}) H_{s_p, j}^{[u]} F_{N_c}$, 其中 F_{N_c} 表示 $N_c \times N_c$ 维的离散傅里叶变换矩阵, $F_{N_c}^{\dagger}$ 表示离散傅里叶变换矩阵的共轭转置矩阵, \otimes 表示克罗内克积也就是两个任意大小的矩阵间的运算, I_{N_s} 和 I_{N_p} 都是单位矩阵。 $H_{s_s, j}^{[u]} \in C^{N_s N_c \times N_c}$ 和 $H_{s_p, j}^{[u]} \in C^{N_p N_c \times N_c}$ 是信道的频域表示并且是块对角阵, 其中 $C^{N_p N_c \times N_c}$ 表示矩阵空间。经过时域信道 $H_{s_s, i}^{[u]}$, 非授权用户接收机接收到的去 CP 信号为:

$$y = \sum_{u=1}^U H_{s_s, i}^{[u]} x_i^{[u]} + n_i \quad (1)$$

其中, $n_i \in C^{N_s N_c \times 1}$ 是均值为 0、方差为 σ_n^2 的加性高斯白噪声 (AWGN) 向量。需要注意的是, 信号从授权用户发射机到非授权用户接收机的干扰已包含在 AWGN 向量中。

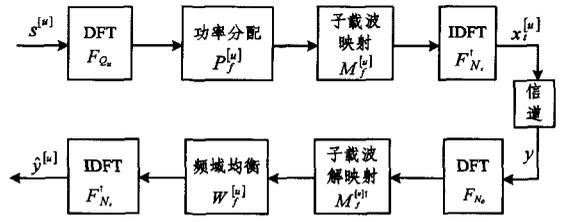


图 1 SC-FDMA 信号处理过程框图

图 1 示出了 SC-FDMA 发射机对信号的处理过程, 信息符号向量 $s^{[u]}$ 经过 Q_u 点的离散傅里叶变换 (DFT) 将信号变换到频域, 然后功率分配矩阵 $P_f^{[u]}$ 给不同非授权用户的子载波分配功率。经过子载波映射矩阵将 Q_u 点的 DFT 输出映射到 N_c 个正交子载波上, 最后经过 N_c 点的 IDFT 把信号又变换到到域。所以非授权用户 u 的传输信号可以表示为:

$$x_i^{[u]} = F_{N_c}^{\dagger} M_f^{[u]} P_f^{[u]} F_{Q_u} s^{[u]} \quad (2)$$

其中, $s^{[u]} \in C^{Q_u \times 1}$ 是服从均值为 0、方差为 1 的独立同分布的信息符号向量。 Q_u 是非授权用户 u 的数据块大小。 $P_f^{[u]} \in C^{Q_u \times Q_u}$ 是主对角元素为 $\sqrt{P_k^{[u]}}$ 的对角功率分配矩阵, 其中 k 表示第 k 个频域子载波, $k=0, \dots, Q_u-1$ 。 $M_f^{[u]} \in C^{N_c \times Q_u}$ 是子载波映射矩阵, 它的结构取决于子载波映射方案, 通常有集中式子载波映射和交织式子载波映射^[6]。

SC-FDMA 接收机对信号的处理流程: 将非授权用户接收机接收到的信号 y 通过 N_c 点的 DFT 模块转换到频域, 再经过子载波解映射模块解映射到已选定的非授权用户频带上, 然后用块对角频域均衡矩阵 $W_f^{[u]} \in C^{Q_u \times N_c}$ 对该频域信号进行均衡, 最后信号经过 Q_u 点的 IDFT 后又变换回到到域:

$$\hat{y}^{[u]} = [F_{Q_u}^{\dagger} W_f^{[u]} (M_f^{[u]*} \otimes I_{N_c}) (F_{N_c} \otimes I_{N_c})] y$$

$$= F_{Q_u}^{\dagger} W_f^{[u]} \bar{H}_{s_s, j}^{[u]} P_f^{[u]} F_{Q_u} s^{[u]} + F_{Q_u}^{\dagger} W_f^{[u]} n_j^{[u]} \quad (3)$$

其中, $\bar{H}_{s_s, j}^{[u]} = (M_f^{[u]*} \otimes I_{N_c}) H_{s_s, j}^{[u]} M_f^{[u]} \in C^{N_s Q_u \times Q_u}$ 是子载波解映射后非授权用户的频域信道矩阵。这是一个块元素为 $h_{s_s, k}^{[u]} \in C^{N_s \times 1} (\forall k)$ 的块对角矩阵。此外, $n_j^{[u]} = (M_f^{[u]*} \otimes I_{N_c}) F_{N_c} n_i \in C^{N_s Q_u \times 1}$ 是相应的频域噪声向量。在计算式 (3) 时用到了映射和解映射矩阵中 $(M_f^{[u]*} \otimes I_{N_c}) H_{s_s, j}^{[u]} M_f^{[u]} = 0 (\forall j \neq u)$ 的性质。

构造目标函数, 设误差向量为 $e^{[u]} = \hat{y}^{[u]} - s^{[u]}$, 可以得到误差协方差矩阵 $E^{[u]} \triangleq E[e^{[u]} e^{[u]*} \dagger]$,

$$E^{[u]} = F_{Q_u}^{\dagger} (W_f^{[u]} \bar{H}_{s_s, j}^{[u]} P_f^{[u]} P_f^{[u]*} \dagger \bar{H}_{s_s, j}^{[u]*} \dagger W_f^{[u]*} \dagger - W_f^{[u]} \bar{H}_{s_s, j}^{[u]} P_f^{[u]} - P_f^{[u]*} \dagger \bar{H}_{s_s, j}^{[u]*} \dagger W_f^{[u]*} \dagger + I_{Q_u} + \sigma_n^2 W_f^{[u]} W_f^{[u]*} \dagger) F_{Q_u} \quad (4)$$

从式 (4) 可以看出 $E^{[u]}$ 是个循环矩阵并且它的主对角线元素都是相等的, 这表明所有分配给非授权用户的子载波的均方误差 (MSEs) 是相等的, 均为 $MSE_n^{[u]} = T_r(E^{[u]})/Q_u$, 其中 $n=1, \dots, Q_u-1$ 。因此, 为了使 $MSE_n^{[u]}$ 最小可以得到最优频域均衡矩阵:

$$W_f^{[u]*} = (H_{s_s, j}^{[u]} P_f^{[u]} \dagger (H_{s_s, j}^{[u]} P_f^{[u]} P_f^{[u]*} \dagger H_{s_s, j}^{[u]*} \dagger + \sigma_n^2 I_{N_c} Q_u)^{-1} \quad (5)$$

把 $W_f^{[u]*}$ 带入式 (4) 得到:

$$E^{[u]} = F_{Q_u}^\dagger \left(\frac{1}{\sigma_n^2} P_f^{[u]} \dagger H_{s,f}^{[u]} \dagger H_{s,f}^{[u]} P_f^{[u]} + I_{Q_u} \right)^{-1} F_{Q_u} \quad (6)$$

应用矩阵运算的基本性质 $T_r(AB) = T_r(BA)$ 和 $F_{Q_u} F_{Q_u}^\dagger = I_{Q_u}$, 可以把 MSE 表示为:

$$MSE_n^{[u]} = \frac{1}{Q_u} T_r(E^{[u]}) = \frac{1}{Q_u} \sum_{k=0}^{Q_u-1} (\Psi_k^{[u]})^{-1}, \quad \forall n \quad (7)$$

其中, $\Psi_k^{[u]} = \frac{\|h_{s,k}^{[u]}\|^2 P_k^{[u]}}{\sigma_n^2} + 1 (\forall k)$. $\|\cdot\|$ 表示求矩阵的二范数. 利用信号干扰加噪声比 SINR 和 MSE 的关系^[7], 可以得到非授权用户每个符号可达和速率表达式:

$$R_u = \sum_{u=1}^U \log_2(1 + \text{SINR}_n^{[u]}) = - \sum_{u=1}^U \log_2 \left(\frac{1}{Q_u} \sum_{k=0}^{Q_u-1} (\Psi_k^{[u]})^{-1} \right) \quad (8)$$

式(8)建立了非授权用户的和速率与非授权用户子载波功率的关系, 在保证授权用户的相关连接不被干扰的情况下, 通过对非授权用户发射机进行合理的功率分配, 可以达到增大非授权用户的和速率的目的.

3 SS-OPA 算法

本节在所有非授权用户的传输功率总和受限, 以及非授权用户的任一子载波对授权用户的干扰功率受限的条件下, 利用凸优化理论推导使非授权用户的和速率最大的最优功率分配算法. 与文献[3-5]一样, 假设所有非授权用户都可得到完整的信道状态信息(CSI), 这些信息包括: 非授权用户发射机到非授权用户接收机的频域信道为 $h_{s,k}^{[u]}$, 非授权用户的发射机到授权用户接收机的频域干扰信道为 $h_{s,p,k}^{[u]} \in C^{N_p \times 1} (\forall k)$, 且可以由公式 $\bar{H}_{s,p,f}^{[u]} = (M_f^{[u]\dagger} \otimes I_{N_p}) H_{s,p,f}^{[u]} M_f^{[u]}$ 的第 k 块对角元素得到. 任一非授权用户的任一子载波对授权用户的干扰功率记为 I_{ss} , 并且 $I_{ss} = P_k^{[u]} \|h_{s,p,k}^{[u]}\|^2$. $I_{h,k}^{[u]}$ 是第 u 个非授权用户的第 k 个子载波对授权用户的干扰功率的最大容许值(阈值).

将式(8)目标函数的负号去除, 就变成了求原目标函数的最小值问题. 目标函数和约束条件为:

$$\begin{aligned} \min_{\{P_k^{[u]}, \forall k, u\}} & \sum_{u=1}^U \log_2 \left(\frac{1}{Q_u} \sum_{k=0}^{Q_u-1} (\Psi_k^{[u]})^{-1} \right) \\ \text{s. t.} & \sum_{k=0}^{Q_u-1} p_k^{[u]} \leq P_s^{[u]}, P_k^{[u]} \geq 0, \forall u, k, I_{ss} \leq I_{h,k}^{[u]}, \forall u, k \quad (9) \end{aligned}$$

$P_s^{[u]}$ 是第 u 个非授权用户发射机的功率消耗. 从式(9)可以看出所有非授权用户的所有功率变量 $P_k^{[u]} (\forall k, u)$ 只能通过目标函数耦合不能通过限制条件耦合. 因此, 在任一非授权用户的任一子载波对授权用户的干扰功率受限的情况下, 可以分别求得每个非授权用户的目标函数也就是 $\log_2 \left(\frac{1}{Q_u} \sum_{k=0}^{Q_u-1} (\Psi_k^{[u]})^{-1} \right)$ 的最小值. 因为这个函数是单调增函数, 所以可以去掉式 $\log_2 \left(\frac{1}{Q_u} \sum_{k=0}^{Q_u-1} (\Psi_k^{[u]})^{-1} \right)$ 的对数和常数 $\frac{1}{Q_u}$, 进而每个非授权用户的等价目标函数为

$$\min_{\{P_k^{[u]}, \forall k\}} \sum_{k=0}^{Q_u-1} (\Psi_k^{[u]})^{-1}, \quad \forall u \quad (10)$$

式(10)满足与式(9)相同的限制. 注意: 此时新的目标函数本质上就是非授权用户 u 的算数均方误差.

可以证明 $\sum_{k=0}^{Q_u-1} (\Psi_k^{[u]})^{-1}$ 的海赛矩阵是主对角元素非负的

对角矩阵, 所以它的海塞矩阵是半正定的. 因此式(9)的优化问题就是带有凸目标函数和相关限制的凸优化问题. 这个问题用拉格朗日函数表示为:

$$\begin{aligned} L(\lambda_u, \{\gamma_{ku}\}, \{\beta_{ku}\}, \{\rho_k^{[u]}\}) \\ = \sum_{k=0}^{Q_u-1} ((\Psi_k^{[u]})^{-1} + \lambda_u P_k^{[u]} - \beta_{ku} P_k^{[u]} + \gamma_{ku} P_k^{[u]} \|h_{s,p,k}^{[u]}\|^2 \\ - \gamma_{ku} I_{h,k}^{[u]}) - \lambda_u P_s^{[u]} \quad (11) \end{aligned}$$

其中, λ_u 是与总传输功率限制相关的非负拉格朗日乘子, β_{ku} 是与功率必须为非负数的限制相关的非负拉格朗日乘子, γ_{ku} 是与非授权用户每个子载波干扰功率限制相关的非负拉格朗日乘子.

通过使用凸优化理论中的 KKT 条件^[9], 对式(11)求 $P_k^{[u]}$ 的偏导, 并令偏导数等于 0. 可以得到功率优化的最优解:

$$P_k^{[u]*} = \min \left\{ \left[\sqrt{\frac{\sigma_n^2}{\lambda_u \|h_{s,p,k}^{[u]}\|^2} - \frac{\sigma_n^2}{\|h_{s,p,k}^{[u]}\|^2}} \right]^+, \frac{I_{h,k}^{[u]}}{\|h_{s,p,k}^{[u]}\|^2} \right\} \quad (12)$$

其中, 定义 $[x]^+ = \max(0, x)$, 需要注意的是, 如果不考虑 IPCs, 这个解与传统 SC-FDMA 的最优功率分配的解是相同的^[8].

因为每个非授权用户的功率限制是分开, 所以子梯度 λ_u 的值可以独立由 $\sum_{k=0}^{Q_u-1} P_k^{[u]} - P_s^{[u]}$ 给出, 利用凸优化理论的子梯度更新算法迭代更新得到最优的拉格朗日乘子 $\lambda_u^{[9,10]}$ 为:

$$\lambda_u^{[i+1]} = \lambda_u^{[i]} + \theta_1 \left[\sum_{k=0}^{Q_u-1} (P_k^{[u]*})^{[i]} - P_s^{[u]} \right]^+ \quad (13)$$

其中, θ_1 是迭代步长, $\lambda_u^{[i]}$ 是子梯度更新过程中第 i 次迭代的拉格朗日乘子, $(P_k^{[u]*})^{[i]}$ 是式(12)在给定 $\lambda_u^{[i]}$ 的条件下的解; 然后将最优拉格朗日乘子 λ_u 带入式(12); 再利用非授权用户 u 可以基于自身的信道状态信息 ($h_{s,k}^{[u]}, h_{s,p,k}^{[u]}$) 求得最优功率解 $P_k^{[u]*}$.

4 AA-OPA 算法

本节利用凸优化理论推导 AA-OPA 算法. 该算法是在总的传输功率受限、功率非负、所有非授权用户所有子载波干扰功率受限 3 个条件下以和速率为目标的最优功率分配算法. 与文献[3-5]一样, 假设非授权用户各自有完整的信道状态信息(CSI), 非授权用户发射机到非授权用户接收机的频域信道为 $h_{s,k}^{[u]}$, 非授权用户的发射机到授权用户接收机的频域干扰信道为 $h_{s,p,k}^{[u]} \in C^{N_p \times 1} (\forall k)$, 并且可以由公式 $\bar{H}_{s,p,f}^{[u]} = (M_f^{[u]\dagger} \otimes I_{N_p}) H_{s,p,f}^{[u]} M_f^{[u]}$ 的第 k 块对角元素得到. 所有非授权用户的所有子载波对授权用户的干扰功率的总和是 I_{AA} , 并且 $I_{AA} = \sum_{u,k} I_{ss}$. I_h 是所有非授权用户在整个频带上的所有子载波对授权用户的总和干扰功率阈值.

目标和约束条件为:

$$\begin{aligned} \min_{\{P_k^{[u]}, \forall k, u\}} & \sum_{u=1}^U \log_2 \left(\frac{1}{Q_u} \sum_{k=0}^{Q_u-1} (\Psi_k^{[u]})^{-1} \right) \\ \text{s. t.} & \sum_{k=0}^{Q_u-1} P_k^{[u]} \leq P_s^{[u]}, \forall u, I_{AA} \leq I_h, P_k^{[u]} \geq 0, \forall k, u \quad (14) \end{aligned}$$

由于所有非授权用户的所有功率变量不仅可以通过目标函数耦合, 而且可以通过式(14)的限制条件耦合, 因此问题就不能简化为解决每个非授权用户的单个问题了. 故所有功率变量必须要联合优化.

首先检查问题的凸面性。目标函数可以重新写为：

$$\sum_{u=1}^U \log_2 \left(\frac{1}{Q_u} \sum_{k=0}^{Q_u-1} \exp(-\log \Psi_k^{[u]}) \right)$$

有几个指数函数和对数一定是一个凸函数^[9]，所以目标函数也是关于 $P_k^{[u]} (\forall k, u)$ 的凸函数。另一方面这些限制都是关于 $P_k^{[u]} (\forall k, u)$ 的仿射函数，满足凸优化问题的条件，因此这是一个凸优化问题。该优化问题的拉格朗日函数为：

$$L(\lambda_u, \gamma, \{\beta_k^{[u]}\}, \{P_k^{[u]}\}) = \sum_{u=1}^U \left(\log_2 \left(\frac{1}{Q_u} \sum_{k=0}^{Q_u-1} (\Psi_k^{[u]})^{-1} \right) + \lambda_u \sum_{k=0}^{Q_u-1} P_k^{[u]} - \sum_{k=0}^{Q_u-1} \beta_{ku} P_k^{[u]} + P_k^{[u]} \right) + \gamma \sum_{k=0}^{Q_u-1} \|h_{sp,k}^{[u]}\|^2 - \lambda_u P_s^{[u]} - \gamma I_{th} \quad (15)$$

其中， γ 是与所有非授权用户的所有子载波对授权用户 IPC 相关的拉格朗日乘子。因为问题的凸面性，解式(14)就等价于解对偶问题^[7]：

$$\max_{\lambda_u \geq 0, \gamma \geq 0} g(\lambda_u, \gamma) \quad (16)$$

对偶函数

$$g(\lambda_u, \gamma) = \min_{\{P_k^{[u]} \geq 0\}} L(\lambda_u, \gamma, \{\beta_{ku}\}, \{P_k^{[u]}\}) \quad (17)$$

通过应用对偶分解，对于给定的 $\{\lambda_u, \gamma\}$ 可以把对偶问题分解为 U 个具有相同结构的子问题：

$$g(\lambda_u, \gamma) = \sum_{u=1}^U g'(\lambda_u, \gamma) - \gamma I_{th}$$

其中

$$g'(\lambda_u, \gamma) = \min_{\substack{P_k^{[u]} \geq 0 \\ P_k^{[u]} + P_k^{[u]} \|h_{sp,k}^{[u]}\|^2 - \lambda_u P_s^{[u]}}} \log_2 \left(\frac{1}{Q_u} \sum_{k=0}^{Q_u-1} \Psi_k^{[u]-1} \right) + \lambda_u \sum_{k=0}^{Q_u-1} P_k^{[u]} - \sum_{k=0}^{Q_u-1} \beta_{ku} P_k^{[u]} \quad (18)$$

对式(18)应用凸优化理论中的 KKT 条件可以得到最优解^[9]：

$$P_k^{[u]*} = \left[\frac{-1 + \sqrt{1 + \frac{4 \|h_{sp,k}^{[u]}\|^2 B_k^{[u]} (\lambda_u + \gamma) \ln 2}{2 \|h_{sp,k}^{[u]}\|^2 B_k^{[u]}}}} {2 \|h_{sp,k}^{[u]}\|^2 B_k^{[u]}} - \frac{\sigma_i^2}{\|h_{sp,k}^{[u]}\|^2} \right]^+ \quad (19)$$

$$\text{其中, } B_k^{[u]} = \sum_{j=1, j \neq k}^{Q_u} \Psi_j^{[u]-1}.$$

为了求解式(16)，就要找到对偶变量 $\lambda_u, \forall k, \gamma$ 的最优值。因为 λ_u 和 γ 的子梯度分别由 $\sum_{k=0}^{Q_u-1} P_k^{[u]} - P_s^{[u]}$ 和 $\sum_{k=0}^{Q_u-1} P_k^{[u]} \|h_{sp,k}^{[u]}\|^2 - I_{th}$ 给出，最优的拉格朗日乘子 $\lambda_u (\forall u)$ 可以利用式(13)得到，最优的拉格朗日乘子 γ 可以利用子梯度更新法即下式得到^[9,10]：

$$\gamma^{[i+1]} = \gamma^{[i]} + \theta_2 \left[\sum_{u=1}^U \sum_{k=0}^{Q_u-1} (P_k^{[u]*})^{[i]} \|h_{sp,k}^{[u]}\|^2 - I_{th} \right]^+ \quad (20)$$

其中， θ_2 是迭代步长， i 是迭代步数。在每次迭代中每个非授权用户需要自己的信道状态信息 (CSI) 和 $\gamma^{[i]}$ 来计算式(19)中的最优功率。首先把该功率传给一个中心节点，由式(20)计算出 $\gamma^{[i+1]}$ ，然后把该最优功率反馈给所有非授权用户。通过多次迭代求得最优的对偶变量 λ_u 和 γ 。把最优的对偶变量 λ_u 和 γ 带入式(19)就可以求出最优功率分配的解 $P_k^{[u]*}$ 。

5 仿真结果

本节对本文提出的 OPA 算法进行仿真。仿真参数：非授权用户数为 4，整个频带包含 $N_c = 256$ 个子载波。在集中式子载波映射方式下，分配给每个非授权用户 $Q_u = 64$ 个子载

波。授权用户和非授权用户的接收天线数分别为 $N_s = 2, N_p = 2$ 。假设所有的信道都是不相关的瑞利衰落信道。为了简便，假设 L_{ss}, L_{sp}, N_{cp} 都是 32。非授权用户的信噪比定义为： $SNR_{SU} = \frac{P_s^{[u]}}{N_c \sigma_n^2}$ ，其中所有的非授权用户发射机的功率消耗均为 $P_s^{[u]} (\forall u)$ 。对于任一非授权用户的任一子载波的 IPCs，定义 $I_{th,k}^{[u]} = \frac{I_{th}}{\sum_u Q_u}$ 。其中 $I_{th} = 14\text{dB}$ 和 $I_{th} = 18\text{dB}$ 是联合干扰阈值。

仿真结果是联合干扰功率阈值分别为 14dB 和 18dB 情况下的仿真，图 2 和图 3 表示了本文所提出的两种 OPA 算法和两种基本算法即基于 SC-FDMA 的等功率分配算法 (EPA) 以及传统最优功率分配算法 (C-OPA) 下非授权用户系统的可达和速率。其中两种基本算法与 SS-OPA 算法的限制条件相同。非授权用户发射机的发射功率超过授权用户所要求的干扰阈值时将被剪除。从图中可以观察到：AA-OPA 算法的和速率在所有信噪比条件下都明显大于 EPA 算法的和速率，在中等程度的信噪比下，本文提出的 SS-OPA 算法的性能要优于 EPA 和 C-OPA 算法，可以使非授权用户系统达到更高的和速率。在极低信噪比条件下，C-OPA 算法的性能接近于本文所提算法，但随着 SNR 的增加，功率切割使得 C-OPA 的性能出现衰减而明显劣化。在更高的 SNR 下，因为 IPCs 限制了非授权用户的传输功率，所以和速率会达到饱和状态。对比本文两种限制条件下的 OPA 算法，AA-OPA 算法表现的性能要比 SS-OPA 算法的要好，这是因为在功率分配中前者所引入的自由度要高于后者。

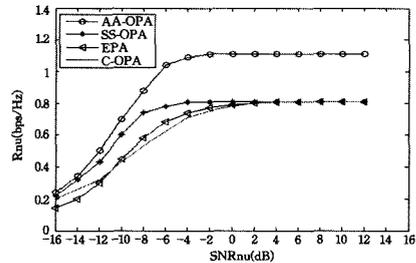


图 2 联合干扰阈值为 14dB 时不同功率分配方案的比较

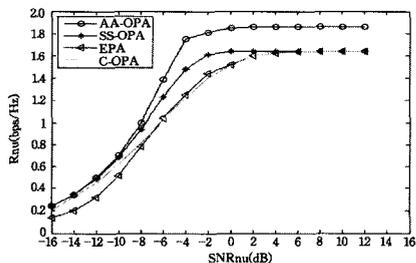


图 3 联合干扰阈值为 18dB 时不同功率分配方案的比较

结束语 本文研究了基于 SC-FDMA 的认知无线网络中的最优功率分配算法。为了保护授权用户的连接，分析了针对非授权用户的两种 IPC 限制条件，分别推导了在两种 IPC 限制条件下使非授权用户的和速率最大的两种功率分配算法 AA-OPA 算法和 SS-OPA 算法。仿真结果表明，与 EPA 和 C-OPA 算法相比，本文所提出的两种算法均提高了非授权用户的和速率，而 AA-OPA 算法又优于 SS-OPA 算法。

(下转第 88 页)

表 1 不同类型网络受到攻击前后的连通状态值(D值)

攻击类型	H 值				
	1.0	0.8	0.6	0.4	0.2
同配网络随机故障	0	0.05	0.11	0.13	0.18
同配网络故意攻击	0	0.12	0.22	0.25	0.28
中性网络随机故障	0	0.15	0.18	0.22	0.25
中性网络故意攻击	0	0.21	0.23	0.25	0.28
异配网络随机故障	0	0.25	0.27	0.36	0.42
异配网络故意攻击	0	0.27	0.28	0.38	0.42

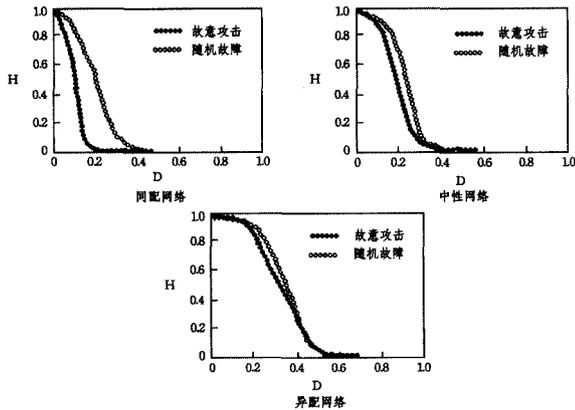


图 5 不同类型网络受到攻击前后的连通状态比较

从实验可以看出,对于同配网络,故意攻击和随机故障两种方式攻击对网络连通性的影响差别很大,中性网络次之,而在异配网络中对这两种攻击方式的影响差别较小,在受到攻击后其网络健壮性也要较同配网络和中性网络好很多,这也再次验证了理论分析中关于异配网络结构的稳定性和健壮性,即异配网络较同配网络具有更强的抗攻击能力。

理论分析和仿真实验表明,复杂网络的鲁棒性与其网络的稳定性有着正相关性,对于异配网络来说,其鲁棒性好,尤其是完全异配网络(即严格按照连通度大的结点总是与连通度小的结点相连),其鲁棒性最好;中性网络次之;同配网络的鲁棒性差,尤其是完全同配网络(即严格按照连通度大的结点总是与连通度更大的结点相连),鲁棒性最差。在网络中如果某个结点或某些特定的结点发生故障,则必然会造成整个网

络传输的瘫痪,因为这些重要的结点位置分布集中,在传输路径上又是关键结点,一旦出现故障无法找到替换的结点将造成网络传输路径的中断。由此可以得出结论:网络中不同类型结构对结点故障的鲁棒性起到决定性作用。

结束语 通过对复杂网络结构稳定性和鲁棒性的理论推导和分析可知,在异配网络中,其网络的结构是大范围内稳定的;在同配网络中,其网络结构是不稳定的;而在中性网络中,其网络结构不能简单判定为是否处于稳定状态,需根据网络节点连接的倾向性加以判断,网络中连接度大的结点总体倾向于与连接度小的结点相连,则可以判定网络状态是稳定的,否则是处于不稳定状态。对于相关网络的鲁棒性,通过仿真测试实验的结果表明,异配网络的鲁棒性最好,中性网络次之,同配网络的鲁棒性最差。除结点故障的鲁棒性外,复杂网络在其它相关方面的性能在将来需要做进一步的研究和验证工作。

参考文献

- [1] 谢希仁. 计算机网络(第五版)[M]. 北京:电子工业出版社,2009
- [2] 钟秋海. 现代控制理论[M]. 北京:高等教育出版社,2004
- [3] 汪小帆,李翔,陈关荣. 网络科学导论[M]. 北京:高等教育出版社,2012
- [4] Ugander J, Karrer B, Backstrom L, et al. The anatomy of the Facebook social graph [J]. 2011, arXiv:1111.4503v1
- [5] Hu H, WAang X. Evolution of a large online social network [J]. Phys. Lett. A, 2009, 373(12/13):1105-1110
- [6] Callway D S, Newman M E J, Strogate S H, et al. Network robustness and fragility, Percolation on random graphs [J]. Phys. Rev. Lett., 2000, 85(25):5468-5471
- [7] Cohen R, Erez K, Ben-Avraham D, et al. Breakdown of the internet under intentional attack [J]. Phys. Rev. Lett., 2001, 86(16):3682-3685
- [8] Newman M. Networks [M]. Cambridge, Cambridge University Press, 2010
- [9] 王林,戴冠中. 复杂网络的 Scale-free 性、Scale-free 现象及其控制[M]. 北京:科学出版社,2009

(上接第 59 页)

参考文献

- [1] Liang Y C, Chen K C, Li G Y, et al. Cognitive radio networking and communications: an overview [J]. IEEE Trans. Veh. Technol., 2011, 60:3386-3407
- [2] Mao J, Gao J, Liu Y, et al. Power allocation over fading cognitive MIMO channels: an ergodic capacity perspective [J]. IEEE Trans. Veh. Technol., 2012, 61:1162-1173
- [3] Bansal G, Hossain M J, Bhargava V K. Optimal and NUbptimal power allocation schemes for OFDM-based cognitive radio systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(11):4710-4718
- [4] Wang S. Efficient resource allocation algorithm for cognitive OFDM systems [J]. Communications Letters, IEEE, 2010, 14(8):725-727
- [5] Kang X, Garg H, Liang Y C, et al. Optimal power allocation for OFDM-based cognitive radio with new primary transmission

- protection criteria [J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2010, 9:2066-2075
- [6] Svensson T, Franky T, Falconer D, et al. B-IFDMA: a power efficient multiple access scheme for non-frequency adaptive transmission [C] // Proc. 2007 IST Mobile and Wireless Communications NUMmit, 2007
- [7] Cioff J M, Dudevior G P, Eyuboglu M V, et al. MMSE decision-feedback equalizers and coding: part I and II [J]. IEEE Trans. Commun., 1995, 43:2582-2604
- [8] Dang U, Ruder M, Schober R, et al. MMSE beamforming for SC-FDMA transmission over MIMO ISI channels [J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2011
- [9] Boyd S, Vandenberghe L. Convex Optimization [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004
- [10] Mokari N, Javan M R, Navaie K. Cross-layer resource allocation in OFDMA systems for heterogeneous traffic with imperfect CSI [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(2):1011-1017