

认知网络中基于中继的频谱资源分配

张士兵, 张昊晔, 李雪, 包志华

(南通大学 电子信息学院, 江苏 南通 226019)

摘 要: 根据无线认知中继网络上、下行链路子载波的信道特性, 研究认知网络的频谱资源分配, 提出一种上、下行链路子载波联合优化的分配算法。该算法根据子信道增益差值因子的大小分配下行链路子载波, 以源节点和中继节点功率最小化为优化目标配对上行链路子载波, 以用户的实时需求分配子载波的比特和功率, 有效降低了系统的发射功率, 提高了系统吞吐量。仿真结果表明, 与启发—集中式和分布式辅助反馈传输功率分配算法比较, 该联合优化算法的单位比特功耗降低了 1.5~3 dB μ W, 误比特率性能提高了 1 个数量级左右。

关键词: 无线通信; 认知网络; 资源分配; 信道增益; 最优配对

中图分类号: TN915

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2011)11-0003-08

Relay-based resource allocation in cognitive networks

ZHANG Shi-bing, ZHANG Hao-ye, LI Xue, BAO Zhi-hua

(School of Electronics and Information, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: Based on the optimal pairing the subcarriers of uplink and downlink, a spectrum resource allocation algorithm was proposed according to the subcarrier characteristics of the uplink and downlink in cognitive relay networks. The algorithm allocated the subcarriers in downlink according to the difference of subchannel gains. It assigned the subcarriers in uplink to minimize the power of every source nodes and relay nodes, and distributed the bits and powers of all subcarriers to satisfy the immediate request. It could decrease the power transmitted and increase the throughput of the system. The simulation results show that the algorithm proposed reduces the per bit power by 1.5~3 dB μ W and improve the performance by one order of magnitude in bit error rate compared with the heuristic centralized scheme and distributed feedback-assisted-transmit power allocation algorithm.

Key words: wireless communications; cognitive network; resource allocation; channel gain; optimal pairing

1 引言

随着无线通信业务需求的快速增长, 可用的频谱资源变得越来越稀缺, 成为制约无线通信发展的瓶颈之一。现有的无线系统频谱资源在时域或空域上存在不同程度的闲置^[1], 认知无线电 (CR, cognitive radio) 应运而生。CR 的核心思想就是使得通信网络具有自我学习能力, 与自身周围环境交互信息、感知周围频谱环境, 进而达到利用周围空

闲频谱, 提高频谱使用率, 同时又可避免与授权用户发生冲突的目的^[2]。

在 CR 网络中, 由于电磁环境的不断变化, CR 节点检测到的空闲频谱不断变化; 同时用户的需求也是瞬间即变, 对空闲频谱的使用需求不尽相同。因此, 像传统注水法等静态频谱分配方式不再适用具有 CR 功能的无线网络频谱资源分配^[3]。CR 网络需要在频谱实时感知的基础上, 分析空闲频谱状态、预测新增信道容量, 结合 CR 用户服务质量(QoS,

收稿日期: 2011-08-22; 修回日期: 2011-11-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60872002, 61071086)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (60872002, 61071086)

quality of service) 需求进行频谱决策, 为当前用户选择最佳的传输参数。

早在 2005 年, IEEE 标准化协调组织 (SCC, standards coordinating committee) 就开始协商制定有关 CR 网络的动态频谱分配政策^[4]。该组织下设 6 个工作组, 分别就下一代无线系统与频谱管理技术、干扰共存分析、频谱动态接入、异构网络频谱资源优化框架等展开研究。鉴于正交频分复用 (OFDM, orthogonal frequency-division multiple) 在抗多径衰落方面的优越性, OFDM 技术得到了大家的青睐, 成为 CR 网络的最佳候选技术。基于 OFDM 的 CR 网络, 其基本思想就是将可用频带划分为若干个 OFDM 子载波, 在实际通信过程中利用没有被主用户 (PU, primary user) 占用的子载波传输数据。子载波的分配频谱感知和判决结果, 通过分配矢量方式实现。目前对 CR 网络的频谱资源管理研究主要集中在基于 OFDM 的 CR 网络。文献[5]利用次用户 (SU, secondary user) 感知的 PU 信息, 对 SU 的传输时间、功率等一些参数进行优化以获得系统的最大容量; 文献[6]根据 SU 的 QoS 需求、物理层特性, 导出了最佳自适应信道分配算法; 文献[7]提出了一种分布式的频谱资源分配算法, 显示了良好的公平性; 文献[8]则提出了一种支持异构网络业务的动态信道和功率分配算法。实际上, PU 往往可以容忍一些干扰, 文献[9~11]在可容忍干扰的约束下, 对可用的子载波进行优化分配, 提出系统容量最大化的频谱资源分配算法。频谱资源优化的另外一种思路就是将动态频谱资源分配与物理层或网络层的设计相结合, 比如, 与传输信号波形相结合^[12], 与协作感知相结合^[13~15], 与中继路由选择相结合^[16,17]等。但在这些研究成果中, 以系统最小发射功率为优化目标的不多。事实上, 在 CR 网络中, SU 或多或少地给 PU 带来一些干扰。特别是当 SU 较多时或存在隐含节点时, 由于频谱检测不可能百分之百正确, SU 不可避免地给 PU 带来一些有害干

扰, 因此 SU 的发射功率不得不加以限制^[18], 以降低对 PU 的影响。

本文以最小化系统发射功率为优化目标, 研究 CR 网络的频谱资源分配, 提出一种联合优化分配 (JOA, joint optimizing allocation) 网络上、下行链路子载波算法。本文第 2 节描述了基于中继的 CR 网络系统模型, 第 3 节给出了实现 JOA 算法的思路与流程, 第 4 节分析比较了仿真结果, 第 5 节对全文进行了总结。

2 系统模型

考虑一个单跳中继的 CR 网络系统, 系统的动态资源分配由控制中心 (基站) 完成, 如图 1 所示。系统采用 OFDM 进行传输, 既可以通过上行链路和下行链路 2 个路由中继传输, 也可以采用源节点和目标节点直接传输。在上行链路中, 源节点向中继节点发送传输数据信号; 在下行链路中, 中继节点采用前向解码 (DF, decode-and-forward) ^[19]转发方式将信号转发给目标节点。设系统有 M 个 PU, K 个 SU, N 个子载波。若采用能量检测进行频谱感知, 则 k^{th} 个 SU ($k=1, 2, \dots, K$) 对 n^{th} 个子载波 ($n=1, 2, \dots, N$) 频谱检测的虚警率和漏检率分别为

$$P_f^{k,n} = Q\left(\frac{\gamma - \sigma_0^2}{\sigma_n^2 / \sqrt{L/2}}\right) \quad (1)$$

$$P_m^{k,n} = 1 - Q\left(\frac{\gamma - (\sigma_0^2 + \sigma_s^2)}{(\sigma_0^2 + \sigma_s^2) / \sqrt{L/2}}\right) \quad (2)$$

其中, σ_0^2 是信道高斯白噪声的功率, σ_s^2 是零均值主信号的功率, γ 是能量检测频谱门限, L 是采样检测点数。

如果 CR 网络采用 OR 规则进行协作频谱检测^[20], 报告信道的错误概率为 p_e , 则系统对 n^{th} 个子载波频谱感知的虚警率和漏检率分别为

$$P_f^n = 1 - \prod_k \left[(1 - P_f^{k,n})(1 - p_e) + P_f^{k,n} p_e \right] \quad (3)$$

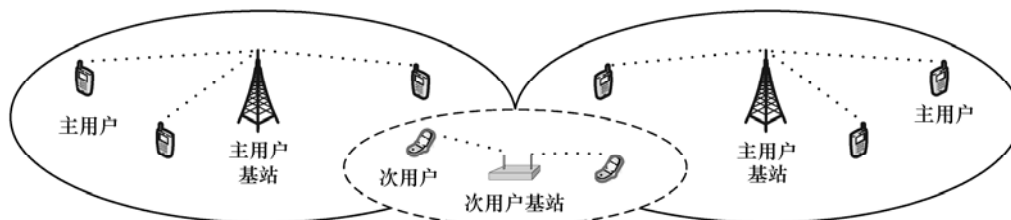


图 1 无线中继认知网络模型

$$P_m^n = \prod_k \left[p_m^{k,n} (1 - p_e) + (1 - p_m^{k,n}) p_e \right] \quad (4)$$

一般来说, 基于中继的动态资源分配需要解决 3 个问题: ①传输策略选择, 引入中继后, 用户间可以直接传输, 也可以通过中继转发传输, 为了提高通信质量, 降低通信成本, 应该选择最优的路径进行传输; ②子载波配对, 也就是上行链路子载波与下行链路子载波的配对; ③子载波比特、功率分配, 为配对好的上行链路和下行链路的子载波合理分配比特及其功率。

为方便起见, 采用 T 表示节点属性 ($T=2$; $t=1$ 表示源节点, $t=2$ 表示中继节点), $h_{k,n,u}$ 表示上行链路中子载波 n 对用户 k 的信道衰落系数, 用 $h_{k,n,d}$ 来表示下行链路中子载波 n 对用户 k 的信道衰落系数, $h_{k,n,s}$ 表示直传情况下子载波 n 对用户 k 的信道衰落系数。优化目标是在满足每个用户固定传输速率的前提下, 针对单跳无线中继 CR 网络, 寻找最优的频谱资源分配方案, 使得 CR 网络系统的总传输功率最小。

假设 $A_{t,k}^n$ 表示子载波 n 是否被用户 k 通过节点 t 占用的标识, 取值为 0 或 1 ($A_{t,k}^n = 1$ 表示用户 k 通过接入节点 t 在子载波 n 上进行中继传输, 否则为 0), $b_{t,k}^n$ 表示用户 k 在子载波 n 上的传输速率, $P_{t,k}^n$ 表示用户 k 通过节点 t 在子载波 n 上的发送功率。上述的优化问题可建模为

$$\min \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N A_{t,k}^n P_{t,k}^n$$

$$s.t. \begin{cases} \sum_{k=1}^K A_{t,k}^n = 1, & \forall n, t \\ \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N A_{t,k}^n = N, & \forall t \\ \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T A_{t,k}^n b_{t,k}^n = R, & \forall k \\ P_f^n \leq \bar{P}_f, & \forall n \\ P_m^n \leq \bar{P}_m, & \forall n \end{cases} \quad (5)$$

其中, 第 1 个约束条件表示每一条链路上每个子载波只能分配给一个用户, 避免了系统子载波使用的冲突, 第 2 个约束条件表示每一条链路上子载波总数的限制, 第 3 个约束条件表示各个用户的固定传输速率要求, 第 4 个约束条件表示系统虚警率(系统容量)的要求, 而第 5 个约束条件则表示系统漏检率(主信号的可忍耐干扰)的限制。

3 联合优化频谱分配算法

显然, 式(5)中的频谱资源最优分配联合考虑了子载波感知、传输策略选择、子载波配对以及传输比特和功率分配等, 是一个非线性优化问题, 直接求解复杂度很高。为此, 提出一个低复杂度的次优方案——基于差值选择和最优配对的频谱资源联合分配算法。该算法主要包含 3 个过程: ①根据差值因子分配下行链路子载波; ②采用最优配对分配上行链路子载波; ③传输策略选择及比特、功率最优分配。

3.1 下行链路的子载波分配

由于下行链路中各子载波信道增益是相互独立的, 若是根据信道的最大增益分配子载波, 则不得不将部分增益较差的子载波分配给相应的用户, 增益越低, 相应的发射功率越大。为了避免将衰落严重的子载波分配给用户, 减小系统总发射功率, 可以根据信道增益差值进行子载波优化分配。

设用户 k_1 和用户 k_2 在子载波 n 上加载的比特数分别为 $b_{k_1,n}$ 和 $b_{k_2,n}$, 其信道功率增益分别为 $g_{k_1,n}^2$ 和 $g_{k_2,n}^2$, 并满足 $g_{k_1,n}^2 < g_{k_2,n}^2$, 则将子载波 n 分配给用户 k_1 与分配给用户 k_2 导致的功率增量为

$$\Delta p_n = \frac{f_{k_1}(b_{k_1,n})}{g_{k_1,n}^2} - \frac{f_{k_2}(b_{k_2,n})}{g_{k_2,n}^2} \quad (6)$$

其中, $f_k(b)$ 为在给定误比特率 (BER, bit error rate) 情况下用户 k 加载 b bit 所需的接收功率。假设用户在子载波上加载的比特数相等, 即 $b_{k_1,n} = b_{k_2,n}$, 式(6)可简化为

$$\Delta p_n = f_{k_1}(b_{k_1,n}) \left(\frac{1}{g_{k_1,n}^2} - \frac{1}{g_{k_2,n}^2} \right) \quad (7)$$

令差值因子 $D(n) = \left(\frac{1}{g_{k_1,n}^2} - \frac{1}{g_{k_2,n}^2} \right)$, 有

$$\Delta p_n = f_{k_1}(b_{k_1,n}) D(n) \quad (8)$$

可见, 功率增量 Δp_n 与差值因子 $D(n)$ 成正比。 $D(n)$ 越大, 不同用户在子载波 n 上的功率差异越大, 该子载波越要优先分配。由此得到根据差值因子分配子载波的具体步骤。

1) 确定用户的子载波数

为简化分析, 假设系统每个 CR 用户传输速率需求相同。考虑到子载波分配的公平性, 将 N 个子

载波平均分配给 K 个用户, 每个用户分到的子载波数目为 $Num(k) = Floor(N/K)$, 其中 $Floor(\cdot)$ 表示取整。用户的子载波数目分配矩阵为

$$Num = [Num(1) \quad Num(2) \quad \cdots \quad Num(K)] \quad (9)$$

2) 根据差值因子分配子载波

设 \mathbf{A} 为子载波分配矩阵:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} & \cdots & A_{1,N} \\ A_{2,1} & A_{2,2} & \cdots & A_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{K,1} & A_{K,2} & \cdots & A_{K,N} \end{bmatrix} \quad (10)$$

如果将 n^{th} 个子载波分配给 k^{th} 个用户, 则 \mathbf{A} 中的元素 $A_{k,n} = 1$; 否则 $A_{k,n} = 0$ 。

根据各个子载波上每个用户的信道增益, 得信道功率增益矩阵

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_{1,1}^2 & g_{1,2}^2 & \cdots & g_{1,N}^2 \\ g_{2,1}^2 & g_{2,2}^2 & \cdots & g_{2,N}^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{K,1}^2 & g_{K,2}^2 & \cdots & g_{K,N}^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

进而求得其差值因子矩阵:

$$\mathbf{D} = [D(1) \quad D(2) \quad \cdots \quad D(N)] \quad (12)$$

其中,

$$D(n) = 1/\text{second max}_k(g_n^2) - 1/\text{max}_k(g_n^2) \quad n=1, 2, \cdots, N \quad (13)$$

$\text{second max}_k(g_n^2)$ 表示子载波 n 上次大信道增益。

在矩阵 \mathbf{D} 中寻找最大差值因子的子载波 n^* 及其对应子载波中的信道功率增益最大的用户 k^* 。将子载波 n^* 分配给用户 k^* , 即

$$A_{k^*,n^*} = 1 \quad (14)$$

鉴于子载波 n^* 已经分配给用户 k^* , 将信道功率增益矩阵 \mathbf{G} 中的第 n^* 列向量置零, 即

$$\mathbf{g}_{n^*}^2 = \begin{bmatrix} g_{1,n^*}^2 \\ g_{2,n^*}^2 \\ \vdots \\ g_{K,n^*}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

同时将信道功率增益矩阵 \mathbf{G} 中相应的第 k^* 行向量置零, 用户 k^* 退出系统的子载波分配。

根据修改后的信道功率增益矩阵 \mathbf{G} 重新计算尚未分配的子载波差值因子矩阵 \mathbf{D} , 再次分配剩余子载波。这个循环结束后, 若所有用户都已分配到

其所需的子载波数目后子载波尚有剩余, 则将剩余子载波分给各自信道增益最大值对应的用户, 并更新子载波分配矩阵 \mathbf{A} 及子载波数目分配矩阵 \mathbf{Num} , 从而确保系统的最大容量。

3) 子载波比特分配

子载波分配完之后, 在每个用户分到的子载波集合内, 按单用户的 Greedy 算法^[21]分配比特以减少发射功率。

4) 子载波优化

为了进一步降低系统总发射功率, 在两两用户之间寻找有效传输比特数相同的子载波, 并计算相应的发送功率。若 2 个用户互换等效子信道, 功率减少, 则这 2 个用户交换等效子信道, 否则不交换。即给定用户 k 和 k' , $k, k' \in \{1, \cdots, K\}$, 寻找相应的 n 和 n' , $n, n' \in \{1, \cdots, N\}$, 使得 $b_{k,n} = b_{k',n'}$ 。用户 k 和 k' 之间交换子载波 n 和 n' 后产生的功率增量为

$$\Delta p_{k,n',k',n} = f_k(b_{k,n}) \left\{ \left(\frac{1}{g_{k,n}^2} + \frac{1}{g_{k',n'}^2} \right) - \left(\frac{1}{g_{k,n'}^2} + \frac{1}{g_{k',n}^2} \right) \right\} \quad (16)$$

如果 $\Delta p_{k,n',k',n} > 0$, 则更新子载波分配矩阵 \mathbf{A} 中的元素, $A_{k,n} = 0, A_{k',n} = 0, A_{k,n'} = 1, A_{k',n'} = 1$; 否则 \mathbf{A} 不变。

3.2 上行链路的子载波分配

由于上行链路的信道衰落与下行链路的信道衰落不相关, 所以上、下行 2 个链路的子载波衰落有可能相差较大。若用户在上下行链路中采用相同子载波分配方案进行传输, 则会影响系统的传输性能^[22]。记用户 k 在 n^{th} 个子载波上源节点的发送功率为 $P_{n,s}$ 、中继节点的发送功率为 $P_{n,r}$, $\tau_u(n) = P_{n,s} (h_{k,n,u}^2 - h_{k,n,s}^2)$, $\tau_d(n) = P_{n,r} h_{k,n,d}^2$ 。基于中继最优子载波配对的思路就是根据 $\tau_u(n)$ 和 $\tau_d(n)$ 的大小, 分别对上、下行链路的子载波进行排序, 然后绑定上、下行链路的子载波。

设上行链路的子载波集合排序为

$$\tau_u(1) \leq \tau_u(2) \leq \cdots \leq \tau_u(N) \quad (17)$$

定义上行链路的 n^{th} 个子载波绑定下行链路的子载波索引为 χ_n 。如果

$$\tau_d(\chi_1) \leq \tau_d(\chi_2) \leq \cdots \leq \tau_d(\chi_N) \quad (18)$$

成立, 则 n^{th} 个子载波的配对方式为 (n, χ_n) 。

3.3 传输策略与比特、功率分配

在完成子载波分配和配对后, 考虑传输策略选

择及子载波比特、功率的最优分配。设 CR 网络中每个用户均分到的子载波数为 N_j , 且每个子载波上的目标 BER 均为 ber 。此时, 式(5)的优化目标可简化为在满足传输速率以及 BER 约束下最小化总发射功率的问题。

$$\min \sum_{n=1}^{N_j} P_n \quad (19)$$

$$s.t \begin{cases} \sum_{n=1}^{N_j} b_n = R \\ ber_n = ber \\ b_n \in \{0, 2, 4, \dots\} \end{cases}$$

其中, ber_n 表示 n^{th} 个子载波上的目标误比特率, R 表示用户的传输速率, b_n 和 P_n 分别表示用户在 n^{th} 个子载波上所分配的比特数和发射功率。显然, P_n 与误比特率 ber_n 和比特 b_n 都有关。

若 $|h_{k,z_n,d}| > |h_{k,n,s}|$, 用户 k 的最小化功率为^[23]

$$\begin{cases} P_{n,s} = \frac{N_0 (2^{b_n} - 1) \ln \frac{2}{25ber}}{1.6 (|h_{k,n,s}|^2 + |h_{k,n,u}|^2)} \\ P_{z_n,r} = \frac{N_0 (2^{b_n} - 1) \ln \frac{2}{5ber}}{1.6 (|h_{k,z_n,d}|^2)} - \frac{P_{n,s} |h_{k,n,s}|^2}{|h_{k,z_n,d}|^2} \end{cases} \quad (20)$$

否则, 用户 k 的最小化功率为

$$\begin{cases} P_{n,s} = \frac{N_0 (2^{b_n} - 1) \ln \frac{2}{5ber}}{1.6 (|h_{k,n,d}|^2)} \\ P_{z_n,r} = 0 \end{cases} \quad (21)$$

其中, N_0 为信道噪声功率谱密度。由此得到源节点每个子载波增加 2 bit 的功率增量。

$$\Delta P_{n,s} = \begin{cases} \frac{3N_0 2^{b_n} \ln \frac{2}{25ber}}{1.6 (|h_{k,n,s}|^2 + |h_{k,n,u}|^2)}, & |h_{k,z_n,d}| > |h_{k,n,s}| \\ \frac{3N_0 2^{b_n} \ln \frac{2}{5ber}}{1.6 (|h_{k,n,d}|^2)}, & \text{其他} \end{cases} \quad (22)$$

从而构成功率增量矩阵

$$\Delta P = [\Delta P_{1,s} \quad \Delta P_{2,s} \quad \dots \quad \Delta P_{N,s}] \quad (23)$$

在功率增量矩阵 ΔP 中寻找增量最小的子载波 n^* , 更新比特数 $b_{n^*} = b_{n^*} + 2$ 和功率 $P_{n,s}$, 并重新计算增量矩阵 ΔP , 再次寻找增量最小的新子载波, 直到满足用户的传输速率 R , 得到源节点各子载波的最优功率分配。

同理, 可以得到中继节点各子载波上的最优功率分配。

从式(22)和式(23)可以看出, 传输策略和子载波上比特、功率的最优分配是同时完成的。当每个用户分配到子载波及其比特和功率确定时, 用户的传输策略也就确定了。例如, 假设上行链路的子载波 1 和下行链路的子载波 2 配对, 分给用户 1。如果下行链路的子载波 2 的功率为 0, 就意味着上行链路的子载波 1 上的信息是采用直传方式进行的, 与中继子载波无关, 即子载波 1 选择了直传策略。由此得到联合资源分配算法的流程, 如图 2 所示。

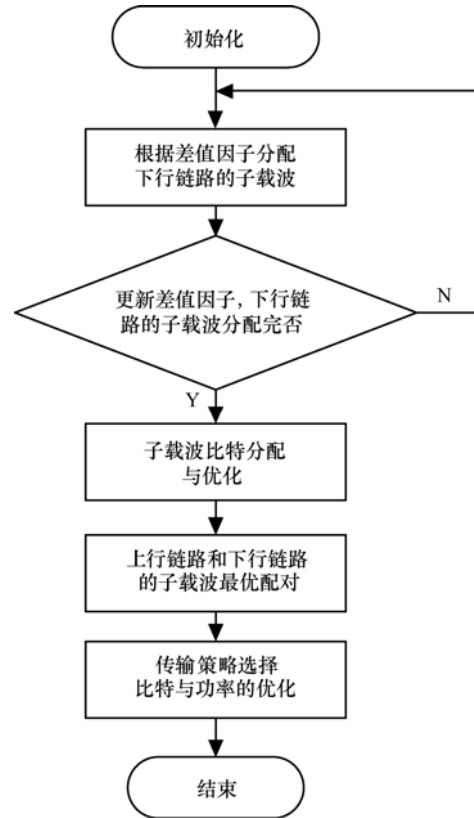


图 2 联合频谱资源分配算法流程

4 仿真结果与分析

在本节中对提出的频谱资源联合优化分配算法进行仿真, 并与文献[15]中的启发—集中式(HCS, heuristic centralized scheme)算法和文献[17]中的分

布式辅助反馈传输功率分配 (DFA-TPA, distributed feedback-assisted-transmit power allocation) 算法进行了比较。仿真是在一个 $2\text{km} \times 2\text{km}$ 的网络环境中进行, 次用户基站位于整个网络的中心, 在其有效覆盖半径 1km 的范围内随机分布了 20 个 CR 用户, 用户速率要求为 $64\text{bit}/\text{OFDM}$ 符号, 在一个超宽带子带内进行传输^[24], 频谱感知采用线性加权的能量检测^[25]感知主用户的存在, 虚警率和漏检率的上限均为 0.01。

图 3 给出本文提出的 JOA 算法与 HCS 算法、DFA-TPA 算法在不同误比特率情况下单位比特功耗性能比较。可以看出, 在相同误比特率要求下, JOA 算法的单位比特功耗要比 HCS 算法和 DFA-TPA 算法小 $1.5\sim 2\text{dB}$ 左右。或者说, 在相同单位比特功耗下, JOA 算法的误比特率性能要优于 HCS 算法和 DFA-TPA 算法 1 个数量级左右。显然, 由于 JOA 算法优化了子载波的分配顺序并根据信道差值因子分配子载波, 从而获得了更多的用户分集增益, 有效避免了上行链路中某一较好的子载波与下行链路中另一较差子载波配对情况的发生, 即有效避免了同一子载波资源匹配度不高的情形发生。由此可见, 子载波配对对 CR 网络系统性能影响十分明显, 有时甚至会严重影响子载波分配算法的效果。

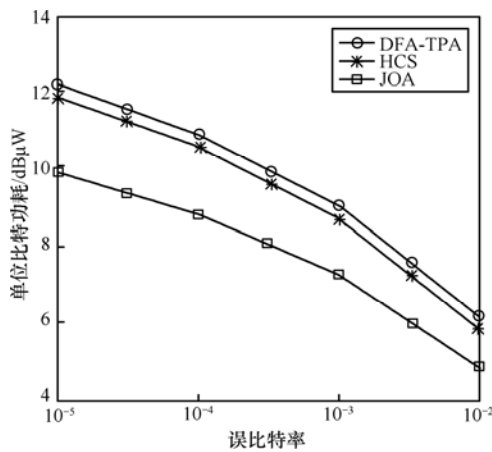


图 3 3 种算法在不同误比特率下的功耗比较

图 4 给出在误比特率为 10^{-4} 时, 不同用户传输速率情况下 3 种算法的单位比特功耗性能比较。虽然 JOA 算法、HCS 算法和 DFA-TPA 算法的单位比特功耗均随着用户速率要求的增加而递升, 但 JOA 算法所需的单位比特功率始终低于 HCS 算法和 DFA-TPA 算法 2dB 左右, 并且随着用户速率要求的增加, JOA 算法的改善效果更加明显。

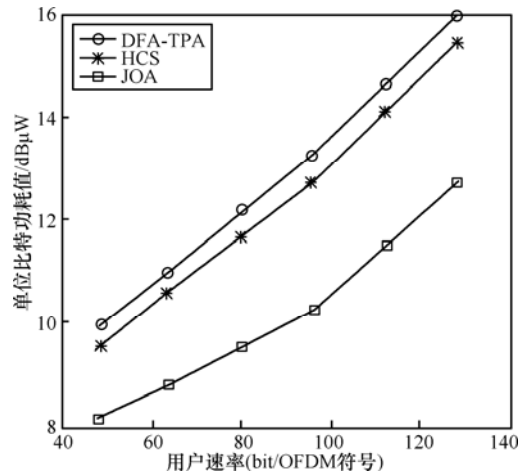


图 4 3 种算法在不同传输速率下的功耗比较

图 5 示意了在误比特率为 10^{-4} 时, 在不同用户数目情况下 3 种算法的单位比特功耗比较。从仿真图可以看出, 在用户数较多的情况下, JOA 算法与其他 2 种算法相比有显著的性能改善。当用户数为 30 时, HCS 算法和 DFA-TPA 算法所需的单位比特功耗约为 $13\text{dB}\mu\text{W}$, 而本文的 JOA 算法只需要 $10\text{dB}\mu\text{W}$ 左右, 节省功耗约 3dB 。同时也注意到, 随着用户数的增加, DFA-TPA 算法的单位比特功耗将逐步优于 HCS 算法, 而 JOA 算法的性能始终是最好的。

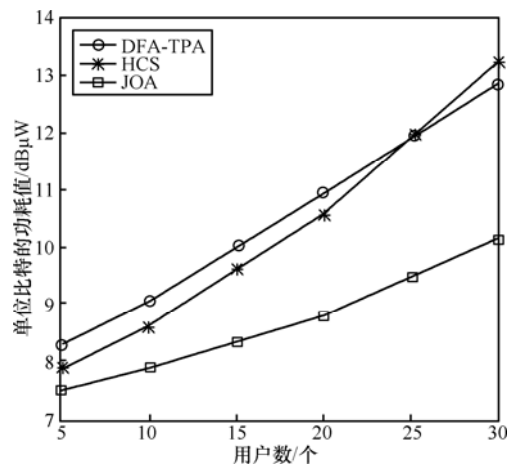


图 5 3 种算法在不同用户数下的功耗比较

JOA、HCS 和 DFA-TPA 这 3 种算法在不同用户功率下的吞吐量比较如图 6 所示。当用户功率为 -4dBW 时, JOA 算法的吞吐量比 HCS 算法高出 5% 左右, 比 DFA-TPA 算法高出 10% 左右; 当用户功率 10dBW 时, JOA 算法的吞吐量要比 HCS 算法高出 17% 左右, 比 DFA-TPA 算法高出 13% 左右。这说明用户功率越高, JOA 算法在吞吐量方面的优势

越明显。另一方面, 随着用户功率的增加, 3 种算法的吞吐量将趋于平稳。因此, 不能只靠增加用户发射功率来增加系统的吞吐量, 由此说明频谱资源分配算法对吞吐量具有相当的影响。

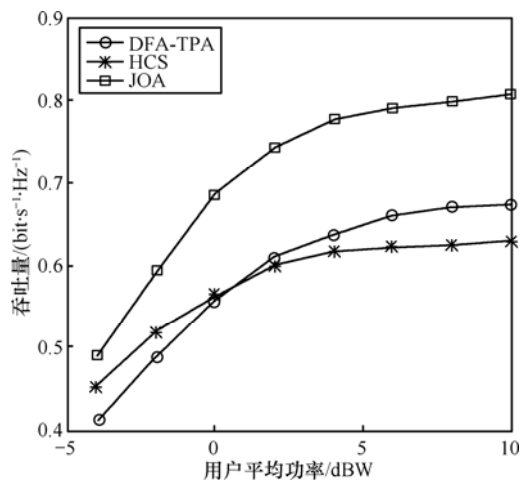


图 6 3 种算法在不同用户功率下的吞吐量比较

从图 3~图 6 的仿真结果中不难看出, 联合信道增益差值因子和最优配对的 JOA 算法减小了系统总发射功率, 很大程度上降低了对 PU 产生有害干扰的可能性, 提高了系统的 QoS。

5 结束语

本文研究了 CR 网络的频谱资源分配, 根据子信道增益差值因子和源节点、中继节点的最小化功率, 最优配对网络的上、下行链路, 提出了上、下行链路子载波联合优化的频谱分配算法。该算法根据信道增益差值因子分配下行链路的子载波, 采用最优配对分配上行链路的子载波, 并对上、下行链路的比特、功率进行最优分配, 有效避免了衰落严重的子载波分配给用户的情况, 减小了系统发射功率, 降低了对主用户的干扰, 提高了系统的吞吐量。

参考文献:

- [1] Federal Communications Commission. Spectrum Policy Task Force[R]. ET Docket No. 02-135, Nov. 2002.
- [2] MITOLA J. Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio[R]. Royal Inst Technol(KTH), Stockholm, Sweden, 1999.
- [3] WANG B, LIU K J R. Advances in cognitive radio networks: a survey[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2011, 5(1):5-23.
- [4] GRANDE L M. IEEE dynamic spectrum access policy standards

- work[A]. Proceedings of 2009 IEEE Military Communications Conference[C]. 2009.1-4.
- [5] ASGHARI V, AISSA S. Resource management in spectrum-sharing cognitive radio broadcast channels: adaptive time and power allocation[J]. IEEE Transactions on Communications, 2011, 59(5): 1446-1457.
- [6] MARQUES A G, WANG X, GIANNAKIS G B. Dynamic resource management for cognitive radios using limited-rate feedback[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(9):3651-3666.
- [7] ZHANG Y, LEUNG C. A distributed algorithm for resource allocation in OFDM cognitive radio systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(2):546-554.
- [8] XIE R, JI H, SI P, et al. Dynamic channel and power allocation in cognitive radio networks supporting heterogeneous services[A]. Proceedings of 2010 IEEE Globecom[C]. 2010.1-4.
- [9] HASAN Z, BANSAL G, HOSSAIN, et al. Energy-efficient power allocation in OFDM-based cognitive radio systems: a risk-return model[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(12):6078-6088.
- [10] ALMALFOUH S M, STIIBER G L. Interference-aware radio resource allocation in OFDMA-based cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(4): 1699-1713.
- [11] NGO D T, NGUYEN H H. Resource allocation for OFDMA-based cognitive radio multicast networks with primary user activity consideration[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(4): 1668-1679.
- [12] TIAN Z, LOTTICI V. Joint dynamic resource allocation and waveform adaptation for cognitive networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(2): 443-454.
- [13] 李美玲, 袁超伟, 李琳等. 使次系统容量最大化的协作频谱感知性能分析及优化[J]. 通信学报, 2011, 32(2):53-60.
- LI M L, YUAN C W, LI L, et al. Performance analysis and optimization of cooperative spectrum sensing for maximizing secondary throughput[J]. Journal on Communications, 2011, 32(2):53-60.
- [14] FAN R, JIANG H, GUO Q, et al. Joint optimal cooperative sensing and resource allocation in multichannel cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(2): 722-729.
- [15] WANG W, KASIRI B, CAI J, et al. Channel assignment of cooperative spectrum sensing in multi-channel cognitive radio networks[A]. Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Communications[C]. 2011.1-5.
- [16] LU Q, PENG T, WANG W, et al. Optimal route selection and resource allocation in multi-hop cognitive radio networks[A]. Proceedings of 2009 IEEE Globecom[C]. 2009.1-6.
- [17] MIETZNER J, LAMPE L, SCHÖBER R. Distributed transmit power allocation for multihop cognitive-radio systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(10): 5187-5201.

- [18] CUMANAN K, KRISHNA R, XIONG Z, *et al.* Multiuser spatial multiplexing techniques with constraints on interference temperature for cognitive radio networks[J]. *IET Signal Process*, 2010, 4(6): 666-672.
- [19] WANG W, YANG S, GAO L. Comparison of schemes for joint subcarrier matching and power allocation in OFDM decode-and-forward relay system[A]. *Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Communications*[C]. 2008.4983-4987.
- [20] ZHANG W, LETAIEF. Cooperative spectrum sensing with transmit and relay diversity in cognitive networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(12): 4761-4766.
- [21] LV N, YANG H C. Performance analysis of greedy subcarrier allocation schemes for OFDMA systems with adaptive modulation[A]. *Proceedings of 2010 IEEE 17th International Conference on Telecommunications*[C]. 2010. 190-195
- [22] WANG Y, QU X, WU T, *et al.* Power allocation and subcarrier pairing algorithm for regenerative OFDM relay system[A]. *Proceedings of 2007 IEEE 65th Vehicular Technology Conference*[C]. 2007.2727- 2731.
- [23] 王飞飞. 下一代无线通信系统中高效传输及协作通信关键技术的研究[D]. 北京邮电大学, 2010.
WANG F F. *Research on Efficient Transmission Technique and Cooperative Communication for Next Generation Wireless Communication Systems*[D]. Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010.
- [24] 张士兵, 张力军, 徐晨. 一种基于多带 OFDM 的超宽带通信系统[J]. *通信学报*, 2006, 27(3):79-85.
ZHANG S B, ZHANG L J, XU C. Ultra-wideband system based on multi-band OFDM[J]. *Journal on Communications*, 2006, 27(3):79-85.
- [25] ZHANG S B, BAO Z H. Linear combination-based energy detection algorithm in low signal-to-noise ratio for cognitive radios[J]. *European Transactions on Telecommunications*, 2011, 22(5): 211-217.

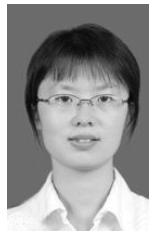
作者简介:



张士兵 (1962-), 男, 江苏海门人, 博士, 南通大学教授, 主要研究方向为超宽带无线通信、认知无线网络。



张昊晔 (1987-), 男, 江苏南通人, 南通大学硕士生, 主要研究方向为通信信号处理、认知无线网络。



李雪 (1985-), 女, 江苏江都人, 南通大学研究生, 主要研究方向为现代通信技术。



包志华 (1955-), 男, 江苏南通人, 硕士, 南通大学教授, 主要研究方向为现代通信理论与技术、通信专用集成电路设计等。