

绿色认知无线电自适应参数调整*

郑仕铨^{1)2)†} 杨小牛¹⁾²⁾

1)(西安电子科技大学通信工程学院, 西安 710071)

2)(通信信息控制和安全技术重点实验室, 嘉兴 314033)

(2011年9月26日收到; 2011年12月14日收到修改稿)

提出了绿色认知无线电自适应参数调整问题模型, 并提出了基于粒子群算法的调整方法, 通过仿真对所提方法性能进行了分析. 结果表明不同服务质量 (quality of service, QoS) 要求情况下, 本文所提方法均能在满足 QoS 要求的前提下尽可能减少系统总的发射功率, 从而达到了降低能量消耗的目的.

关键词: 认知无线电, 绿色通信, 自适应参数调整, 粒子群算法

PACS: 84.40.Ua

1 引言

近年来, 随着信息和通信技术的不断发展和应用, 由此带来的能量消耗问题受到广泛关注. 有报告指出, 通信数据量每 5 年翻 10 倍, 能量消耗每年增加 16%—20%, 由此带来的对环境的影响将不容忽视^[1]. 另一方面, 能量相关的经济成本也占据了电信市场网络运营商近一半的运营成本, 而且比例还在逐渐上升^[2]. 因此, 人们提出了绿色通信技术来解决上述问题. 采用绿色通信技术优化无线通信的能量效率, 不仅能够降低对环境的影响, 还能够降低整个网络成本, 具有很好的经济效益和社会效益^[1,2].

认知无线电 (cognitive radio, CR) 是一项有望缓解无线频谱资源短缺、频谱利用率低下的智能无线通信技术^[3-6]. 由于其能够对周围环境和系统内部状态进行感知、学习和自适应决策, 它也被认为是实现绿色通信的一项重要技术^[2]. 本文将旨在实现绿色通信的认知无线电称为“绿色认知无线电”. 绿色认知无线电的首要目标是如何根据外部环境需求调整自身工作参数来实现绿色通信. 针对这一问题, 本文重点研究绿色认知无线电的自适应参数调整技术, 即如何调整无线电参数, 使之

在满足通信需求的情况下尽可能降低系统的能量消耗. 已有的关于认知无线电自适应参数调整的研究针对的是一般意义上的认知无线电的情况 (如文献 [7] 以及我们先前的研究成果^[3,5]), 还没有涉及针对绿色通信的绿色认知无线电. 因此, 本文将自适应参数调整扩展到绿色认知无线电, 提出问题模型和解决方法.

本文主要贡献如下: 1) 提出了绿色认知无线电的自适应参数调整问题模型, 将绿色认知无线电自适应参数调整建模为约束单目标优化问题; 2) 提出基于粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 的方法来解决绿色认知无线电的自适应参数调整问题, 提出了适应度衡量方法并给出了详细的算法步骤; 3) 对所提方法进行了仿真分析, 结果表明本文方法能够在保证服务质量 (quality of service, QoS) 的前提下, 大幅度降低系统的发射功率, 从而达到了节约能量消耗的目的.

2 绿色认知无线电的自适应参数调整

2.1 问题模型

正如“绿色”的含义所在, 绿色认知无线电的主要目标是最小化能量 (功率) 消耗. 然而, 如果基本

* 通信信息控制和安全技术重点实验室基金资助的课题.

† E-mail: lianshizheng@126.com

的 QoS 不能得到满足, 那么最小化功率消耗将没有任何意义, 因为发射功率可能太低, 将导致基本的通信功能也不能保证. 因此, 本文将绿色认知无线电的自适应参数调整问题建模为带约束条件的功耗最小化问题:

$$\begin{aligned} & \min P_c(a), \\ & \text{约束条件: QoS要求, 监管限制, 硬件约束等,} \end{aligned} \quad (1)$$

其中 a 表示待调整的参数, 比如载波频率、发射功率、调制样式等等, $P_c(a)$ 表示给定 a 的情况下的系统功耗. (1) 式中的 QoS 要求的例子包括最大比特错误率 (bit error rate, BER)、最小数据速率、最小延迟等, 它们通常是 a 的函数. 这些 QoS 与具体的应用有关, 比如传输大量数据文件的用户关心的是 BER 和数据速率, 而视频用户关心的是网络延迟; 传输电子邮件并不需要很高的数据速率, 但是宽带视频则需要高流量. 除了 QoS 要求外, 绿色认知无线电还需要满足本地监管限制. 工作在不同频带的设备通常要满足不同的监管限制. 另外, 硬件还会对认知无线电的决策做出约束. 例如, 即使正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 能够提供更好的数据速率, 但是如果无线电模拟前端不支持这么宽的带宽, 那也不能被采用.

对于给定的绿色认知无线电系统和给定的频率及地理位置, 监管约束和硬件限制通常保持不变, 但是 QoS 要求却会随着用户需求的变化随时变化. 当 QoS 要求发生改变后, 绿色认知无线电必须能够优化其工作参数来尽可能在保证新的 QoS 要求的前提下最小化功率消耗, 从而达到节能和环保的目的.

2.2 多载波系统问题模型

以上建模的是绿色认知无线电中的一般意义上的自适应参数调整问题模型, 本节将以多载波通信系统为例给出具体的问题模型, 本文后续仿真中均采用该多载波系统进行分析. 设多载波绿色认知无线电系统包含 N 个子载波数, 可调参数包括发射功率、调制样式和调制进制数. QoS 要求为目标 BER 和目标数据速率. 该多载波绿色认知无线电的自适应参数调整问题可以表示成选择发射功率和调制样式、在满足 QoS 要求下使得系统总发

射功率最小:

$$\begin{aligned} & \min \sum_{i=1}^N P_i, \\ & \text{st. } BER \leq BER_{\text{tar}}, DR \geq DR_{\text{tar}}, \end{aligned} \quad (2)$$

其中, P_i 是第 i 个子载波的发射功率, BER_{tar} 是目标 BER, DR 表示数据速率, DR_{tar} 表示目标数据速率. 注意对于不同的应用, BER_{tar} 与 DR_{tar} 不同.

3 基于粒子群算法的调整方法

本文提出采用 PSO 求解 (2) 式所示的多载波绿色认知无线电自适应参数调整问题. PSO 是一种智能优化算法 [8,9], 我们先前的研究成果中已将 PSO 用于解决认知无线电决策引擎 [5]、协作频谱感知 [10]、动态频谱分配 [11] 等问题. 设粒子群中粒子个数为 S , 则在一个 D 维的搜索空间中, 粒子 i ($1 \leq i \leq S$) 在第 t 次迭代时的位置信息可以表示为 $\mathbf{x}_i^t = [x_{i1}^t, x_{i2}^t, \dots, x_{iD}^t]$, 速度信息表示为 $\mathbf{v}_i^t = [v_{i1}^t, v_{i2}^t, \dots, v_{iD}^t]$, 粒子 i 到目前为止所经历的最好位置为 $\mathbf{p}_i^t = [p_{i1}^t, p_{i2}^t, \dots, p_{iD}^t]$, 群体中所有粒子到目前为止所经历过的最好位置为 $\mathbf{p}_b^t = [p_{b1}^t, p_{b2}^t, \dots, p_{bD}^t]$, 其中 b 为具有最优位置粒子的索引.

本文提出的基于 PSO 的绿色认知无线电自适应参数调整中, 每一个粒子的位置表示一种可能的解. $\mathbf{x}_i^t = [x_{i1}^t, x_{i2}^t, \dots, x_{iD}^t]$ 与待调整参数之间的映射关系如图 1 所示, 其中 L_j 表示参数 a_j 所需的二进制编码位数. L_j 数值由 a_j 的取值范围和所需求解精度决定.

粒子适应度衡量是本文所提算法的核心. 本文提出如下适应度衡量方法:

$$\begin{aligned} fit &= \left(NP_{\max} + 1 - \sum_{i=1}^N P_i \right) \\ & \times f \left(\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N BER_i \right)^{-1}, BER_{\text{tar}}^{-1} \right) \\ & \times f \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N DR_i, DR_{\text{tar}} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

其中, fit 表示适应度值, BER_i 和 DR_i 分别表示第 i 个子载波的 BER 和数据速率. 函数 $f(.,.)$ 定义为

$$f(x, \alpha) = \frac{1}{2} (\tanh(\sigma (\log(x/\alpha) - \eta)) + 1), \quad (4)$$

其中 σ 和 η 是两个常数. 本文选择 σ 和 η 使得当 $x/\alpha = 1$ 时, $f(x, \alpha) = 0.95$; $x/\alpha = 0.1$ 时, $f(x, \alpha) = 0.01$. 图 2 给出了这种情况下 $f(x, \alpha)$ 的曲线图. 从图中可以看出, 当 x 超越目标值 α 时, 与 $x = \alpha$ 相比, 所增加的值非常有限; 然而, 当 x 没有达到目标值 α 时, 与 $x = \alpha$ 时的情况相比, $f(x, \alpha)$ 减少得非常快. 因此, 在 (3) 式中, 如果平

均 BER 高于目标 BER 或者平均数据速率没有达到目标数据速率, 则对该解的惩罚较大, 从而使 (2) 式中的约束条件在粒子适应度衡量中得以体现. 另外, 由 (3) 式可知, 当粒子所能实现的总发射功率越小, 其适应度越大. 因此随着 PSO 迭代的进行, 能够在尽可能满足约束条件下逐步降低发射功率, 朝着 (2) 式的最优解方向演化.

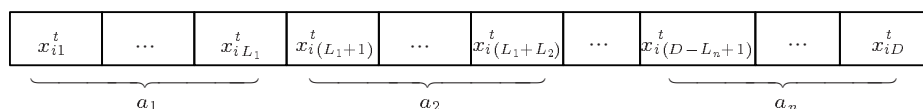


图 1 粒子位置与参数之间的对应关系

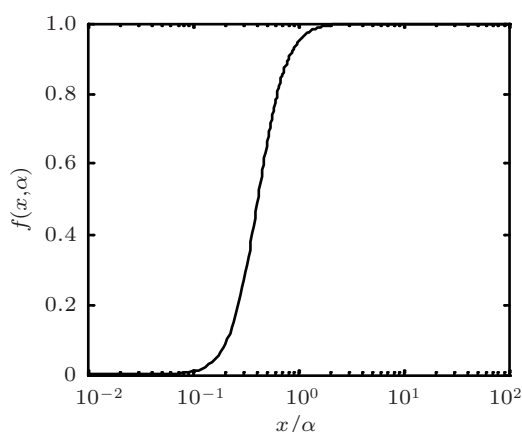


图 2 $f(x, \alpha)$ 曲线

本文提出的基于 PSO 的绿色认知无线电自适应参数调整算法流程如下:

1) 令 $t = 0$, 随机产生 x_{id}^t 和 v_{id}^t , 其中 $x_{id}^t \in \{0, 1\}$, $v_{id}^t \in [-V_{\max}, +V_{\max}]$, $1 \leq d \leq D$, 从而得到 $\mathbf{x}_i^t = [x_{i1}^t, x_{i2}^t, \dots, x_{iD}^t]$, $1 \leq i \leq S$;

2) 根据 (3) 式计算各个粒子的适应度, 令 $\mathbf{p}_i^t = \mathbf{x}_i^t$, 并使 $\mathbf{p}_b^t = [x_{b1}^t, x_{b2}^t, \dots, x_{bD}^t]$, 其中 b 为具有最高适应度的粒子的索引;

3) 令 $t = t + 1$, 根据如下公式更新 v_{id}^t ^[8]:

$$v_{id}^t = v_{id}^{t-1} + c_1 r_1 (p_{id}^{t-1} - x_{id}^{t-1}) + c_2 r_2 (p_{bd}^{t-1} - x_{id}^{t-1}), \quad (5)$$

其中 c_1 和 c_2 为学习因子 (也称加速常数), r_1 和 r_2 为分布于 $[0, 1]$ 间的随机数. 如果 $v_{id}^t > V_{\max}$, 则令 $v_{id}^t = V_{\max}$, 如果 $v_{id}^t < -V_{\max}$, 则令 $v_{id}^t = -V_{\max}$;

4) 随机产生均匀分布于 $[0, 1]$ 间的随机数, 如果其小于 $\text{sig}(v_{id}^t)$, 则令 $x_{id}^t = 1$, 否则令 $x_{id}^t = 0$, 其中 $\text{sig}(v_{id}^t) = 1 / (1 + \exp(-v_{id}^t))$;

5) 根据 (3) 式计算每个粒子的适应度值, 对于粒子 i , 如果其适应度大于 \mathbf{p}_i^{t-1} 的适应度, 则令 $\mathbf{p}_i^t = \mathbf{x}_i^t$, 否则 $\mathbf{p}_i^t = \mathbf{p}_i^{t-1}$; 如果其适应度大于 \mathbf{p}_b^{t-1} 的适应度, 则令 $\mathbf{p}_b^t = \mathbf{x}_i^t$; 如果没有哪个粒子的适应度大于 \mathbf{p}_b^{t-1} 的适应度, 则令 $\mathbf{p}_b^t = \mathbf{p}_b^{t-1}$;

6) 如果达到最大迭代次数, 算法终止; 否则, 跳至步骤 3).

算法终止时, \mathbf{p}_b^t 即为所找到的最终解, 其对应的参数可以用于配置绿色认知无线电, 使其在满足 QoS 要求的前提下以尽可能低的发射功率进行通信.

4 仿真结果及分析

算法仿真实验中子载波数为 32, 系统可调参数包括发射功率和调制方式. 发射功率共有 64 种可能取值, 范围设置为 0—25.2 dBm, 间隔为 0.4 dBm. 可选调制方式包括 BPSK (二进制相移键控), QPSK (正交相移键控), 16QAM 和 64QAM. 每个子载波信道均可选择不同的发射功率和调制方式. 这种多载波系统参数调整寻优空间为 256^{32} , 数量级达 10^{77} . 之所以选择这么大的寻优空间是为了测试本文所提算法的高效寻优能力. 仿真中还假设符号速率为 100 ksps, 星座图采用格雷码分配, 信道类型为加性高斯白噪声 (additive white Gaussian noise, AWGN) 信道, 噪声基底为 -90 dBm, 发射机和接收机之间的固定路径损耗为 72 dB, 除此之外, 还假设各个子载波经历随机衰减, 产生 $[0, 1]$ 之间的随机数表示某个子载波的增益. 为测试算法性能, 考虑三种不同的 QoS 要求, 如表 1 所示. 其中模式 1 用于语音通信, 模式 2 用于视频通信, 模式 3 用于低

速数据传输.

表 1 QoS 要求

	模式 1	模式 2	模式 3
BER_{tar}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-6}
DR_{tar}	10 kbps	300 kbps	200 kbps

仿真中, PSO 参数选择如下: $c_1 = c_2 = 2$, $V_{max} = 4$. 需要指出的是, 参数 c_1 和 c_2 用来控制粒子本身的记忆和群体记忆之间的相对影响, 代表每个粒子推向自身最优和群体最优位置的能力, 一般取 $c_1 = c_2 = 2$ ^[9]. V_{max} 限定粒子位置取 1 的最大概率以及粒子位置取 0 的最小概率, 同时也反映解的变异概率. V_{max} 越大, 变异的可能性越小, 探索新的解的能力将越小; 但是 V_{max} 也不能取太小, 否则容易陷入局部最优. 我们在图 3 中给出了模式 3 下 V_{max} 取不同值时的算法性能, 图中是 20 次独立试验的平均结果. 可以看出, $V_{max} = 2$ 和 $V_{max} = 6$ 时算法性能均比 $V_{max} = 4$ 时差, 因此, $V_{max} = 4$ 是一个较优的选择, 本文后续仿真也将采用该参数配置.

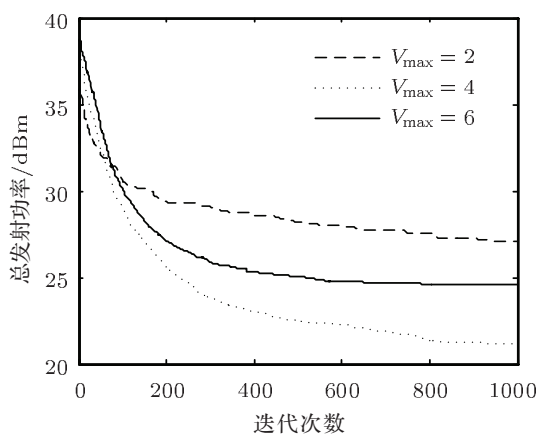


图 3 不同 V_{max} 下算法性能 (模式 3)

图 4 给出了 PSO 随着迭代次数的进行所得到的总发射功率, 图中是 20 次独立试验的平均结果. 由图可知, 三种模式下, 总发射功率均随着迭代的进行不断减少, 算法终止时, 所得到的总发射功率要远远小于可能的最大总发射功率 (最大可能总发射功率为 $10 \log_{10} ((10^{25.2}/10) * 32) \approx 40.25$ dBm),

从而达到了节能的目的. 表 2 给出了 20 次实验算法最终所得 (即 1000 次迭代后) 的平均 BER、平均数据速率、平均总发射功率以及总发射功率的标准差. 对比表 1 和表 2 可知, 各种模式下的 QoS 要求均已达到, 说明本文提出的基于 PSO 的方法能够在满足 QoS 的前提下尽可能降低发射功率. 另外, 从标准差还可以看出, 本文提出的方法具有较好的稳定性.

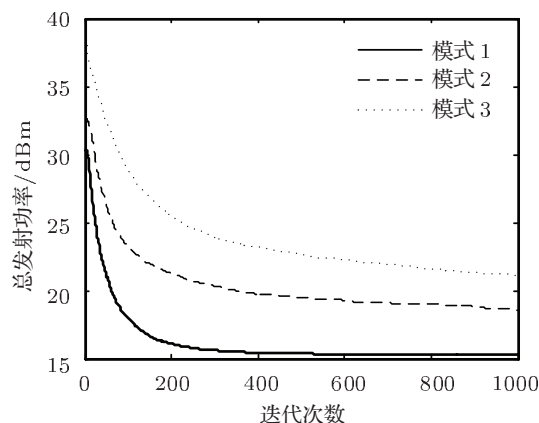


图 4 PSO 优化所得总发射功率随迭代次数的变化关系

表 2 PSO 所得 BER、数据速率及总发射功率

	模式 1	模式 2	模式 3
所得 BER	0.0044	4.878×10^{-4}	2.992×10^{-7}
所得数据速率/kbps	145.780	313.75	229.531
所得总发射功率/dBm	15.3172	18.5893	21.1102
标准差	0.0309	0.8256	0.6811

5 结论

绿色认知无线电是一种旨在实现绿色通信的认知无线电技术. 为了尽可能提高能量效率, 降低能量消耗, 绿色认知无线电需要根据外部环境需求自适应调整工作参数以寻求最佳的参数组合. 本文提出了绿色认知无线电自适应参数调整问题模型, 并提出了基于粒子群算法的调整方法, 提出了自适应衡量机制, 通过仿真对所提方法性能进行了分析. 结果表明本文所提方法均能在满足 QoS 要求的前提下尽可能减少系统总的发射功率, 从而达到了降低能量消耗的目的, 有利于保护环境.

- [1] Gür G, Alagöz F 2011 *IEEE Network* **25** 50
- [2] He A, Ammann A, Tsou T, Chen X, Datla D, Gaedert J, Newman T R, Hasan S M S, Volos H I, Reed J H, Bose T 2011 *J. Commun.* **6** 340
- [3] Zhao Z J, Zheng S L, Shang J N, Kong X Z 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6760 (in Chinese) [赵知劲, 郑仕链, 尚俊娜, 孔宪正 2007 物理学报 **56** 6760]
- [4] Zhao Z J, Peng Z, Zheng S L, Xu S Y, Lou C Y, Yang X N 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1358 (in Chinese) [赵知劲, 彭振, 郑仕链, 徐世宇, 楼才义, 杨小牛 2009 物理学报 **58** 1358]
- [5] Zhao Z J, Xu S Y, Zheng S L, Yang X N 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5118 (in Chinese) [赵知劲, 徐世宇, 郑仕链, 杨小牛 2009 物理学报 **58** 5118]
- [6] Zheng S L, Lou C Y, Yang X N 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3611 (in Chinese) [郑仕链, 楼才义, 杨小牛 2010 物理学报 **58** 3611]
- [7] Newman T R, Barker B A, Wyglinski A M, Agah A, Evans J B, Minden G J 2007 *Wireless Communications and Mobile Computing* **7** 1129
- [8] Kennedy J, Eberhart R C 1997 *The Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, New Jersey, 1999 p4104
- [9] Kennedy J, Eberhart R C 1995 *IEEE International Conference on Neural Networks*, New Jersey, 1995 p4591
- [10] Zheng S, Lou C, Yang X 2010 *Electronics Letters* **46** 1525
- [11] Zhao Z, Peng Z, Zheng S, Shang J 2009 *IEEE Transactions on Wireless Communications* **8** 4421

Parameter adaptation in green cognitive radio*

Zheng Shi-Lian^{1)2)†} Yang Xiao-Niu¹⁾²⁾

1) (School of Communications Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

2) (Science and Technology on Communication Information Security Control Laboratory, Jiaxing 314033, China)

(Received 26 September 2011; revised manuscript received 14 December 2011)

Abstract

The model for parameter adaptation problem in green cognitive radio and a particle swarm optimization based solution are proposed. Simulations are conducted to show the performance of the proposed method. Results show that given different quality of service (QoS) requirements, the proposed method can reduce the total transmit power of the system while maintaining the QoS requirements. Thus the goal of reducing energy consumption is reached.

Keywords: cognitive radio, green communications, parameter adaptation, particle swarm optimization

PACS: 84.40.Ua

* Project supported by the Foundation of Science and Technology on Communication Information Security Control Laboratory.

† E-mail: lianshizheng@126.com