

基于信道系数的认知网络节点选择算法

郭金淮¹, 范科峰², 张素兵²

(1. 94201 部队, 山东 济南 250002; 2. 中国电子技术标准化研究院, 北京 100007)

摘 要: 为改善认知网络通信性能, 根据机会协作通信技术思想, 提出了基于信道系数的认知网络节点选择算法, 并对算法性能进行了研究。结果表明, 该算法能够有效提高频谱资源利用效率、提升次网络吞吐量。

关键词: 认知网络; 协作通信; 分集增益; 能量增益; 时间增益

中图分类号: TN911.6

文献标志码: B

文章编号: 1000-436X(2012)Z2-0167-05

Node selection algorithm based on channel coefficient for cognitive network

GUO Jin-huai¹, FAN Ke-feng², ZHANG Su-bing²

(1. 94201 Army, Jinan 250002, China; 2. China Electronics Standardization Institute, Beijing 100007, China)

Abstract: To improve communication performance of cognitive network, according to the principle of opportunity cooperative communication, node selection algorithm based on channel coefficient for cognitive network was proposed and studied. Results show that the proposed algorithm can enhance spectrum utilize efficiency and improve network throughput effectively.

Key words: cognitive network; cooperative communication; diversity gain; energy gain; time gain

1 引言

无线通信与有线通信根本区别在于信道, 灵活性与方便性使无线通信系统得到了迅速发展。同时, 容量受限、可靠性差等不足限制了无线通信系统的应用。为解决无线通信系统的迅速发展与上述不足之间的矛盾, 需要充分利用无线信道资源, 包括频率、功率、时间、空间等, 具体可以从 2 个方面考虑: 一是有效利用闲置无线频谱资源、提高频谱资源使用效率; 二是充分利用可

用无线频谱资源, 增加系统容量与可靠性。无线信号的衰减与广播特性一方面造成了无线通信系统容量受限、可靠性差等不足, 另一方面为认知网络与协作通信技术的应用提供了基本条件。其中, 认知网络能够解决频谱分配与频谱使用之间矛盾, 有效利用闲置无线频谱资源, 实现频谱资源共享, 提高频谱资源的使用效率; 协作通信技术能够充分利用可用无线频谱资源、提高无线信道利用效率, 两者均成为无线通信领域的研究热点^[1~10]。认知网络通常由 2 种以上网络组成, 多

收稿日期: 2012-08-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61172053, 61202266, 61003234, 61001178, U0835004); 北京市自然科学基金资助项目(4102012); 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(2012AA011706); 国家科技支撑计划课题基金资助项目(2012BAI23B07); 广州市科技计划基金资助项目(11A11080275)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61172053, 61202266, 61003234, 61001178, U0835004); The Natural Science Foundation of Beijing Municipal (4102012); The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2012AA011706); The Key Technology Research and Development Program of China (2012BAI23B07) Guangzhou S&T Program (11A11080275)

跳、多节点是认知网络基本特征，同时协作通信技术多应用于多跳、多节点网络，因此认知网络特别适合在协作通信技术中使用。将协作通信技术应用于认知网络，可以提升网络性能，这方面研究日益受到关注^[2,3,11~13]，具体来说，协作通信技术应用与认知网络体现在 2 个方面：一是协作感知^[12,13]，二是协作通信^[2,3]。

为提高认知网络通信性能，采用机会协作通信技术思想，提出了基于信道系数的认知网络节点选择算法，并对算法性能进行了研究。

2 系统模型

系统模型包括网络模型、信道模型和性能指标。

2.1 网络模型

1) 主次网络位于同一区域，均采用时分多址通信方式，忽略其他网络干扰，如图 1 所示。

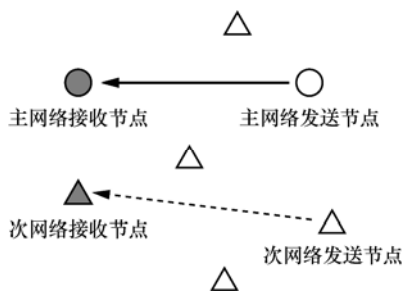


图 1 网络模型

2) 主网络接收节点受干扰温度限制，干扰功率不超过 B ，次网络正常通信要求节点接收功率不小于 P_R 。

2.2 信道模型

1) 主网络接收节点记 M ，次网络接收节点记 S ，次网络发送节点数为 m 、分别记为 $N_1, N_2, \dots, N_i, \dots, N_m$ 。

2) 次网络发送节点 N_i 与 M 间信道系数记 h_{Mi} 、与 S 间信道系数记 h_{Si} ，其中， $i=1, 2, \dots, L, m$ 。 h_{Mi} 、 h_{Si} 均服从独立同分布的瑞利衰落，信道慢衰落，衰落时间与单位数据帧长相同。不失一般性，采用归一化信道，信道能量为 1。

3) 次网络能够有效感知次网络发送节点与主（次）网络接收节点间信道状态。

2.3 性能指标

性能指标主要研究次网络获得的通信时间增益、信道分集增益、信道能量增益。

3 信道系数节点选择算法

机会协作通信技术通常考虑信道具体变化，利用无线信道衰落特性提高通信性能^[6,14,15]。基于机会协作通信技术思想提出信道系数节点选择算法。算法基本思想是考虑主次网络信道状态的动态变化，选择对主网络干扰小、与次网络接收节点间信道质量好的次网络发送节点通信。算法包括 2 部分，一是主网络闲时节点选择算法；二是主网络忙时节点选择算法。

3.1 主网络闲时节点选择算法

此时不考虑对主网络影响，选择信道质量最好的次网络节点进行通信。满足式(1)时，选择次网络发送节点 j 为通信节点。

$$|h_{Sj}|^2 = \max(|h_{Si}|^2) \quad (1)$$

其中， $i=1, 2, \dots, L, m$ 。即选择信道质量最优的次网络发送节点进行通信。

3.2 主网络忙时节点选择算法

结合系统模型，主网络忙时次网络发送节点选择需要满足 2 个准则，一是不影响主网络通信，二是最大限度地提高次网络通信性能。

不失一般性，考虑次网络发射节点 N_i ，发射功率 P_i ，其中， $i=1, 2, \dots, L, m$ 。要求不影响主网络通信、次网络能够正常通信的条件为

$$\begin{cases} P_i |h_{Mi}|^2 \leq B \\ P_i |h_{Si}|^2 \geq P_R \end{cases} \quad (2)$$

经整理，信道系数满足式(3)。

$$h_i \geq \frac{P_R}{B} \quad (3)$$

其中， $h_i = \frac{|h_{Si}|^2}{|h_{Mi}|^2}$ ，称 h_i 为信道系数比。

结合上述分析，具体算法描述如下。

满足如下条件时，选择次网络节点 j 为发送节点。

$$\begin{cases} h_j = \max(h_i) \\ h_j \geq \frac{P_R}{B} \end{cases}$$

其中， $i=1, 2, \dots, L, m$ 。即选择不影响主网络通信、次网络能正常通信，且信道系数比最大的次网络发送

节点，同时可以实现对主网络干扰的最小化。进一步地，根据文献[14]思想，可以对算法进一步优化，实现次网络发送节点选择的公平性设计，这里不再具体描述。

4 性能研究

结合上述内容，分析最大信道系数分布及最大信道系数比分布。在此基础上，对信道系数节点选择算法性能进行研究。

4.1 最大信道系数分布

结合式(1)，对 $\max(|h_{Si}|^2)$ 服从的分布进行分析，其中， $i=1,2,L,m$ 。令 $x_i = |h_{Si}|^2$ ，根据信道模型可知， x_i 服从参数为 1 的指数分布。其概率密度函数为

$$f_{x_i}(x) = \begin{cases} e^{-x}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}, \quad \text{分布函数 } F_{x_i}(x) = \begin{cases} 1 - e^{-x}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}.$$

进一步地，令 $y = \max(|h_{Si}|^2)$ ，得到最大信道系数分布函数为

$$F_y(y) = \begin{cases} (1 - e^{-y})^m, & y > 0 \\ 0, & y \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

4.2 最大信道系数比分布

本节包括 2 部分内容，一是信道系数比分布，二是最大信道系数比分布。

4.2.1 信道系数比分布

根据信道模型，可知 $|h_{Mi}|^2$ 、 $|h_{Si}|^2$ 均服从参数为 1 的指数分布，其中， $i=1,2,L,m$ 。下面求信道系数比 $h_i = \frac{|h_{Si}|^2}{|h_{Mi}|^2}$ 服从的分布。

不失一般性，令 $|h_{Si}|^2 = x$ ， $|h_{Mi}|^2 = y$ 。根据指数分布性质，得到

$$p_X(x) = \begin{cases} e^{-x}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}, \quad p_Y(y) = \begin{cases} e^{-y}, & y \geq 0 \\ 0, & y < 0 \end{cases}. \quad \text{令}$$

$h_i = c$ ，根据随机变量商的概率密度函数公式，得到 $p_{h_i}(c) = \int_{-\infty}^{\infty} p_{X,Y}(cy, y) |y| dy$ ，即 $p_{h_i}(c) = \int_0^{\infty} e^{-(c+1)y} y dy = (c+1)^{-2}$ ， $c > 0$ 。进一步得到信道系数比分布如式(5)所示。

$$F_{h_i}(c) = 1 - (c+1)^{-1} \quad (5)$$

其中， $c > 0$ 。

4.2.2 最大信道系数比分布

即求 $\max(h_i)$ 服从的分布，令 $\max(h_i) = x$ ，得到最大信道系数比分布如式(6)所示。

$$F_{\max(h_i)}(x) = [1 - (x+1)^{-1}]^m \quad (6)$$

其中， $x > 0$ 。

4.3 性能研究

较传统通信方式，研究信道系数节点选择算法对次网络性能的改进。主网络闲时，次网络性能改进与多用户分集技术相同，可以获得信道分集增益与能量增益，具体见文献[6]。下面研究主网络忙时次网络性能改进，包括通信时间增益、信道能量增益。

4.3.1 主网络忙时通信时间增益

指对于次网络来说，采用信道系数节点选择算法的通信时间与传统通信方式的通信时间之比值。不失一般性，以通信概率表示通信时间，即分析单位时间内的平均通信时间。

主网络忙时传统通信概率 p_{BC} 分析如下。

$$p_{BC} = p\left(h_i \geq \frac{P_R}{B}\right), \quad \text{其中}, \quad h_i = \frac{|h_{Si}|^2}{|h_{Mi}|^2},$$

$i=1,2,L,m$ 。根据信道系数比分布公式，得到

$$p_{BC} = \frac{B}{P_R + B}.$$

主网络忙时信道系数节点选择算法通信概率 p_{BS} 分析如下。

$$p_{BS} = p\left(h_j \geq \frac{P_R}{B}\right), \quad \text{其中}, \quad h_j = \max(h_i). \quad \text{根据最}$$

大信道系数比分布公式，得到 $p_{BS} = 1 - \left(\frac{P_R}{P_R + B}\right)^m$ 。

进一步地，得到主网络忙时通信时间增益为

$$G_{BT} = \frac{(P_R + B)^m - P_R^m}{(P_R + B)^{m-1} B} \quad (7)$$

4.3.2 主网络忙时信道能量增益

主网络忙时信道能量增益如式(8)所示。

$$G_{BE} = \frac{\mathbb{E}\left[|h_{Sj}|^2\right]}{\mathbb{E}\left[|h_{Si}|^2\right]} \quad (8)$$

其中， $\mathbb{E}[\cdot]$ 表示均值运算， h_{Sj} 表示采用信道系数节点选择算法时次网络发送节点与 S 间信道系数。难以得到 G_{BE} 显式解，第 5 节将对其进一步分析。

5 实例分析

主网络闲时信道分集增益、能量增益可见文献[6]。下面对主网络忙时通信时间增益、信道能量增益进行分析。

5.1 主网络忙时通信时间增益

不影响结果，忽略主网络干扰温度限制 B 及次网络正常通信接收功率 P_R 的具体取值，分析通信时间增益与两者比值 B/P_R 的关系。

5.1.1 通信时间增益与 m 关系

令 $B/P_R = 0.2$ ，采用信道系数节点选择算法通信时间增益与次网络发送节点数 m 关系如图 2 所示。

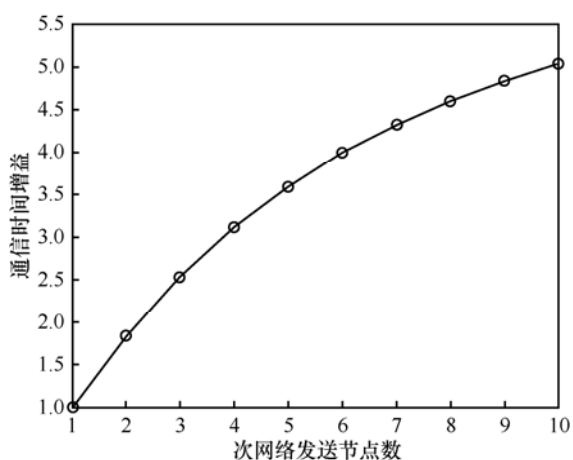


图 2 通信时间增益与次网络发送节点数关系

根据图 2 可以看出，通信时间增益随着次网络发送节点数 m 的增加而变大，同时通信时间增益存在瓶颈。结合式 (7)，下面分析通信时间增益与 m

关系。令 $B/P_R = r$ ，则 $G_{BT} = \frac{(1+r)^m - 1}{(1+r)^{m-1} r}$ ，以 m 为变量求导，得到 G_{BT} 导数：

$$G_{BT}' = \frac{r(1+r)^{2m-2} + (m-1)r(1+r)^{m-2}}{(1+r)^{2m-2} r^2}$$

显然导数大于 0，因此通信时间增益是 m 的增函数。进一步地， m 为 1 时， $G_{BT} = 1$ ， m 趋向无穷大时， $\lim_{m \rightarrow \infty} G_{BT} = \frac{1+r}{r}$ 。

根据上述分析，得到如下结论。

通信时间增益随着次网络发送节点数增加而变大；随着次网络发送节点数增加，通信时间增益增加趋势变慢；通信时间增益存在瓶颈，可得到极限值的显式表达式。

5.1.2 通信时间增益与 B/P_R 关系

令次网络发送节点数 $m = 5$ 、 $B/P_R = r$ ，分析通信时间增益与 r 关系。

根据图 3 可以看出，通信时间增益随着 r 的增加而减少。结合式(7)，下面分析通信时间增益与 r 关系。

$m = 1$ 时， $G_{BT} = 1$ 。

$m > 1$ 时，以 r 为变量对 G_{BT} 求导，得到 G_{BT} 导数如下。

$$G_{BT}' = \frac{(1+r)^{m-2} [1+mr - (1+r)^m]}{(1+r)^{2m-2} r^2}$$

显然分母大于 0，对于分子来说，其中， $(1+r)^{m-2} > 0$ ，根据二项式定理， $1+mr < (1+r)^m$ 。因此分子小于 0，即 $G_{BT}' < 0$ ，通信时间增益是 r 的单调递减函数。

进一步地，考虑取值范围 $0 < r < \infty$ ，下面分析其极限。

$$r \text{ 趋于 } 0 \text{ 时，得到 } \lim_{r \rightarrow 0} G_{BT} = \frac{(1+r)^m - 1}{(1+r)^{m-1} r} = m。$$

$$r \text{ 趋于无穷大时，得到 } \lim_{r \rightarrow \infty} G_{BT} = \frac{(1+r)^m - 1}{(1+r)^{m-1} r} = 1。$$

根据上述分析，得到如下结论。

主网络容忍的干扰功率越小、次网络通信要求的接收功率越大，通信时间增益越大，反之亦然；通信时间增益是 r 的单调递减函数，且存在极限。

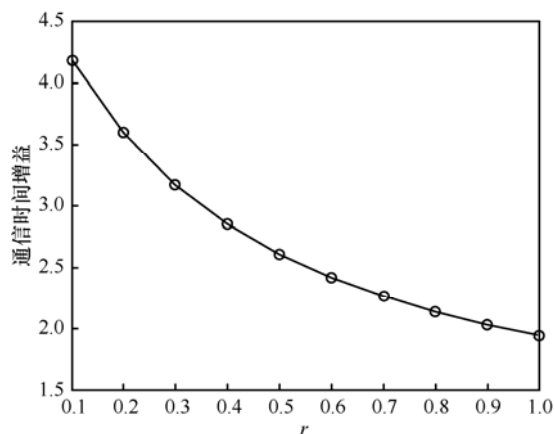


图 3 通信时间增益与 r 关系

5.2 主网络忙时信道能量增益

分析信道能量增益与次网络发送节点数关系，结合图 4 得到如下结论。

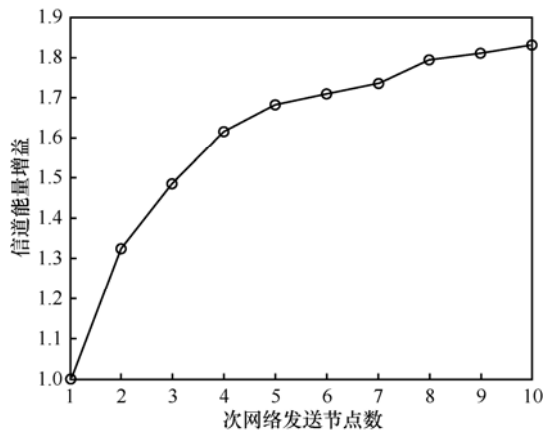


图 4 信道能量增益与次网络发送节点数关系

能量增益随着次网络发送节点数增加而变大,原因是基于最大信道系数比能够选择到较大的 $|h_{sr}|^2$;能量增益很快遇到瓶颈效应,原因是最大信道系数比需要综合考虑 $|h_{mi}|^2$ 与 $|h_{si}|^2$,对 $|h_{si}|^2$ 值提升有限。

6 结束语

基于机会协作通信技术思想,提出了认知网络节点选择算法并分析了算法性能。结果表明,该算法能够获得信道分集增益、信道能量增益、通信时间增益,有效地提高频谱利用效率、增加次网络吞吐量。

参考文献:

- [1] RABBACHIN A, QUEK T Q S, SHIN H, *et al.* Cognitive network interference[J]. *IEEE J Select Areas Commun*, 2011, 29(2):480-493.
- [2] 段志刚, 葛磊, 李崇瑞等. B3G/4G 中的协作通信及其在认知无线电中的应用[J]. *福建电脑*, 2010, 27(7):31-32.
DUAN Z G, GE L, LI C R, *et al.* Cooperative communication of B3G/4G and it's application in cognitive radio[J]. *Fujian Computer*, 2010, 27(7):31-32.
- [3] 褚御芝, 郑宝玉. 认知无线网络中一种基于放大转发的协作传输策略[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(3):509-514.
CHU Y Z, ZHENG B Y. A cooperative transmission scheme based on amplify and forward in cognitive radio networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(3):509-514.
- [4] STEVENSON C, CHOUINARD G, LEI Z D. IEEE 802.22: the first cognitive radio wireless regional area network standard[J]. *IEEE Communication Magazine*, 2009, 47(1):130-138.
- [5] LI X, CHEN M, LIU W. Application of STBC-encoded cooperative transmissions in wireless sensor networks[J]. *IEEE Signal Process Letters*, 2005, 12(2):134-137.
- [6] 郭金淮, 赵雄伟, 徐晓建等. 基于分集增益与能量增益的多用户分集性能研究[J]. *计算机科学*, 2007, 34(10):59-61.
GUO J H, ZHAO X W, XU X J, *et al.* Performance research of multi-user diversity technologies based on diversity gain and energy gain[J]. *Computer Science*, 2007, 34(10):59-61.
- [7] 刘忠军, 徐友云, 李默. 多 PC 协同下的认知网络仿真平台设计[J]. *计算机工程*, 2011, 37(1):122-124.
LIU Z J, XU Y Y, LI M. Design of cognitive network simulation platform under multi-PC collaboration[J]. *Computer Engineering*, 2011, 37(1):122-124.
- [8] 陈亮, 纪红, 李屹等. 认知网络中基于演化博弈的频谱感知技术[J]. *北京邮电大学学报*, 2012, 35(1):28-31.
CHEN L, JI H, LI Y, *et al.* Evolutionary game for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2012, 35(1):28-31.
- [9] DEVROYE N, VU M, CHUNG S Y, *et al.* Cognitive networks achieve throughput scaling of a homogeneous network[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2011, 57(8):5103-5115.
- [10] MA J, LI G Y. Signal processing in cognitive radio[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, 97(5):805-823.
- [11] ZHANG Q, JIA J C, ZHANG J. Cooperative relay to improve diversity in cognitive radio networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2009, 47(2):111-117.
- [12] 彭宵, 吴素文, 朱近康. 一种高效利用资源的协作感知方法[J]. *中国科学技术大学学报*, 2009, 39(10):1039-1044.
PENG X, WU S W, ZHU J K. A novel resource-efficient cooperative sensing method[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2009, 39(10):1039-1044.
- [13] 朱卿, 宋春林, 谈彩萍等. 基于多融合准则的双门限协作频谱感知算法[J]. *计算机应用*, 2011, 31(8):2040-2043.
ZHU Q, SONG C L, TAN C P, *et al.* Double-threshold cooperative spectrum sensing algorithm based on multi-fusion rule[J]. *Journal of Computer Applications*, 2011, 31(8):2040-2043.
- [14] VISWANATH P, TSE D N C, LAROIA R. Opportunistic beamforming using dumb antennas[J]. *IEEE Trans Inform Theory*, 2002, 48(6): 1277-1294.
- [15] BLETSAS A, KHISTI A, REED D P, *et al.* A simple cooperative diversity method based on network path selection[J]. *IEEE J Select Areas Commun*, 2006, 24(3):659-672.

作者简介:



郭金淮 (1979-), 男, 山东潍坊人, 博士, 94201 部队工程师, 主要研究方向为协作通信、认知网络、排队论等。

范科峰 (1978-), 男, 陕西礼泉人, 博士后, 中国电子标准化研究院高级工程师, 主要研究方向为信息处理、信息安全。

张素兵 (1973-), 男, 山西阳泉人, 博士后, 中国电子标准化研究院高级工程师, 主要研究方向为音视频、数字家庭。