

数据链中基于组合代价函数的博弈功率控制

贺 刚¹, 柏 鹏¹, 彭卫东¹, 周万银², 苏 兮¹, 林晋福¹, 王明芳³

(1. 空军工程大学科研部信息中心, 陕西 西安 710051; 2. 空军工程大学训练部, 陕西 西安 710051;
3. 空军工程大学导弹学院, 陕西 三原 713800)

摘要: 针对数据链系统中功率控制问题, 提出了一种基于博弈论的功率控制方法. 采用组合代价函数的形式, 使网络吞吐量最大化的同时节点功率消耗较小, 减少了网络的功率消耗, 提高了能量使用效率, 并且相对非线性代价函数而言, 运算复杂度小, 便于实现. 仿真结果显示: 所提出的功率控制方法能达到较好的通信性能, 同时有快速收敛的特性, 有效地提升了机间数据链系统的低截获和抗干扰能力.

关键词: 博弈论; 数据链系统; 功率控制; 低截获

中图分类号: TN 92

文献标志码: A

0 引言

现代常规战争的制胜关键是夺取空中优势, 而空中优势需要安全基地、隐身作战能力、协同作战能力和超视距打击能力来保障. 机间数据链(IFDL)系统主要用于作战飞机编队之间协同作战, 实现高速飞行的作战飞机之间实时、抗截获数据动态自组网和交换.

在不同的通信系统中, 功率控制的目的不同. 在数据链通信系统中, 功率控制主要用于抑制各节点间的通信干扰、增加系统容量、改善系统服务质量(QoS)、提升低截获性能及隐身作战能力. 博弈论是研究理性决策主体间发生冲突时的决策及均衡问题, 着重于问题的分布式求解, 近年来博弈论广泛应用于研究分布式无线资源管理^[1-3]. 文献[4]分析并建立了通信系统的博弈框架, 包括功率控制和干扰避免; Stefano Buzzi 等^[5]为各博弈方定义一个效用函数, 分别研究了在信干比为固定值时发射功率的分布情形, 以及发射功率为固定值时信干比的分布情形; Zhu Yun 等^[6-7]通过选择适当的发射功率改进网络拓扑结构, 减少冲突, 巩固网络连通性; Giacomo Bacci 等^[8-9]通过自适应调整发射功率最大化网络吞吐量.

上述文献研究的主要是应用博弈论在认知无线电系统中的无线资源管理. 本文将博弈理论应用于数据链系统功率控制中, 建立了数据链通信系统的非合作博弈模型, 提出了基于组合代价函数的分布式非合作博弈功率控制(distributed non-cooperative power control based on game theory, DNPCG)算法, 并证明了所建立博弈模型的纳什均衡点的存在性和唯一性, 仿真

结果表明该算法可有效控制各节点发射功率, 增加系统容量, 有利于提升数据链隐身作战能力.

1 系统模型

针对一个作战编队, 通信系统在 AWGN 信道下, 建立通信系统的模型. 在时刻 $s \in [t_0, T]$, 接收节点的终端信干比 SIR 可表示为 $\gamma_i = Gh_i p_i / \left(\sum_{j=1, j \neq i}^N h_j p_j + \sigma^2 \right)$, 其中 N 为通信编队内共享无线信道的节点数, h_i 为节点 i 的信道增益, p_i 为节点 i 的发射功率水平, σ^2 为在 AWGN 信道下的接收机背景噪声, $G = W / R_i$ 为通信系统内的扩频增益, W 为 chip 速率(扩频带宽), R_i 为节点 i 的传输速率.

在基于博弈论的研究方法中, 系统中各节点的目标就是最大化自身的效度, 关键在于找到效用函数的纳什均衡点, 使每个节点的收益得到帕累托改善. 当各节点处于纳什均衡点处时, 任何节点想通过单方面改变策略以获取更大的增益, 这样的努力是无效的. 因此, 各节点在这些平衡点处, 得到一个最终的功率 $P' = [p'_1, p'_2, \dots, p'_N]$, 使各节点功率满足 $J_i(p'_i, p'_{-i}) \leq J_i(p_i, p'_{-i}), \forall p_i, i = 1, 2, \dots, N$, 其中 J_i 表示节点 i 的效用函数, p'_{-i} 表示除第 i 个节点以外的功率.

2 基于组合代价函数的非合作功率控制博弈

博弈论可以分为合作博弈与非合作博弈, 两者

的区别在于博弈方在博弈过程中是否能够达成一个具有约束力的协议, 如果不能, 则称非合作博弈. 合作博弈强调集体主义、团队理性, 非合作博弈则强调个人理性和个体最优决策. David Goodman 等^[10]首先提出非合作功率控制博弈 (non-cooperative power control game, NPG).

2.1 效用函数和代价函数

采用 NPG 方法获得的均衡解并不是最优的, 因为非合作关系导致每个用户都致力于通过调整发射功率以实现自身效用的最大化, 却忽视了对系统中其它用户产生的干扰. 因此学者又提出在非合作博弈中采用代价函数的机制(non-cooperative power control game via pricing, NPCGP). 它使得各节点在通信过程中隐含了博弈的行为, 使每个节点的收益得到帕累托改善. 在使各节点发射功率达到纳什均衡点的思路中, 采用代价函数的目标就是让链路质量好的节点受到的惩罚多一些, 让链路质量差的节点少受些惩罚, 一般采用的代价函数为非负的凸函数. 于是考虑以下的带有代价函数的非合作功率控制数学模型为

$$J_i^c(p) = u_i(p) - c_i(p), \quad (1)$$

其中 $u_i(p)$ 为系统中节点 i 的效用函数, $c_i(p)$ 为相应的代价函数, 于是求解(1)式中纳什均衡解等价于对所有节点的功率解向量的最优化问题, 即求解 $\max_{p_i \in P_i} J_i^c = u_i(p) - c_i(p)$, 在此选取的效用函数 $u_i(p) = u_i \arctan(1 + \gamma)$, 代价函数的选取没有特定的形式, 通常为发射功率的函数, 有线性代价函数和非线性代价函数, 线性代价函数具有形式简单、运算量小等优点, 但其解向量往往不是全局最优; 采用非线性代价函数可以得到全局较优的功率值, 但计算复杂度高, 难于实现.

考虑到让链路质量好的用户受到的惩罚多一些, 而让链路质量差的用户少受惩罚. 于是提出链路增益代价函数, 亦称为组合代价函数 $c_i(p) = \delta h_i p_i$, 于是得到一个新的非合作博弈功率控制模型为 $f_i(p_i, p_{-i}) = u_i \arctan(1 + \gamma_i) - \delta h_i p_i$, 其中 δ 为比例系数, 为一个实常数. 在该博弈中每个节点受到的惩罚是由发射功率和链路增益同时决定的, 当节点发射功率越高时, 链路增益相应就越大, 结果受到的惩罚就越大.

2.2 功率控制博弈模型纳什均衡点的存在性和唯一性

在博弈模型中, 每个节点都同时在其发射功率的策略空间 $[0, p_{\max}]$ 中选择相应的功率值来优化效用函数, 即找到满足 $G_1: \max_{p_i \in P_i} f_i(p_i, p_{-i})$ 的功率值, 节点 i 在每次更新自身的功率时采用的值是上一次更新得到的结果, 即节点掌握的信息为 I 和 I_{-i} , 其值分

别由 $I = \sum_{k=i}^N h_k p_k + \sigma^2$, $I_{-i}(k+1) = \sum_{k \neq i}^N h_k p_k + \sigma^2$ 给出.

为证明该博弈模型下功率控制存在纳什均衡点, 先给出 3 个基本定理, 再由此证明其存在性和唯一性.

定理 1 如果 1 个静态博弈满足下面 2 个条件, 那么此博弈一定存在纳什均衡: (1) 策略空间是欧氏空间的 1 个非空的、闭的、有界的凸集; (2) 效用函数在其策略空间上连续, 且为拟凸函数.

定理 2 由文献[10] Yates 证明如果在算法中满足 $p^{(k+1)} = f(p^{(k)})$ 的一个固定点存在, 并且 f 满足以下的 3 个条件: (1) 正性: $f(p) \geq 0$; (2) 单调性: $p \geq p' \Rightarrow f(p) \geq f(p')$; (3) 可扩展性: $\forall \alpha \geq 1$, $\alpha f(p) \geq f(\alpha p)$; 那么函数 f 将是能收敛到唯一的一个固定点的标准向量函数.

考虑任意第 $i(i \in N)$ 级博弈, 节点 i 单独决策, 其采用的更新信息集为前 $i-1$ 个节点与后 $N-i$ 个节点前一次信息之和, 其效益函数为

$$f_i(p_i, p_{-i}) = u_i \arctan(1 + \gamma_i) - \delta h_i p_i. \quad (2)$$

对 p_i 求一阶偏导可得功率最大值为

$$p_i' = \frac{1}{(G_i - 1)h_i} [v_i - I], \text{ 其中 } v_i^2 = \frac{G_i u_i}{\delta} I_{-i} - I_{-i}^2. \text{ 将(2)式}$$

对 p_i 求二阶偏导可得 $\frac{\partial^2 f_i}{\partial p_i} = \frac{-2u_i G_i^2 h_i^2 (1 + \gamma_i)}{I_{-i}^2 [1 + (1 + \gamma_i)^2]} < 0$,

$\forall i \in N$, 这说明如果存在 p_i' , 那么就有唯一的 p_i' . 所以子博弈满足定理 1, 因为功率的取值空间为 $[0, p_{\max}]$, 所以得到其均衡解为 $r_i(p) = \min(p_i', p_{\max})$. 接下来

只需证明 p_i^* 满足定理 2, 设 $\varphi(p_i') = p_i' = \frac{1}{(G_i - 1)h_i} [v_i - I]$, 对该式, 只要为参数 δ 选择恰当的值, 就能使

$r_i(p)$ 满足正性: $\varphi(p_i') > 0$; 由于 $I = \sum_{k=i}^N h_k p_k + \sigma^2$,

$v_i^2 = \frac{G_i u_i}{\delta} I_{-i} - I_{-i}^2$, 且 $I_{-i}^2 < I_{-i} < I < 1$, I 、 I_{-i} 为 p_i 的

线性函数, 所以只需讨论 $\varphi(I, v_i)$ 的单调性, 设任意 $I_1 > I_2$, 同时有 $1 > v_{i1} > v_{i2}$, 得

$$\varphi(I_1, v_{i1}) - \varphi(I_2, v_{i2}) = \frac{1}{(G_i - 1)h_i} [(v_{i1} - I_1) - (v_{i2} - I_2)] \Rightarrow$$

$$\varphi(I_1, v_{i1}) - \varphi(I_2, v_{i2}) > \varphi(I_1, v_{i1}^2) - \varphi(I_2, v_{i2}^2) \Rightarrow$$

$$\varphi(I_1, v_{i1}^2) - \varphi(I_2, v_{i2}^2) = \frac{1}{(G_i - 1)h_i} [(v_{i1}^2 - I_1) - (v_{i2}^2 - I_2)]. \quad (3)$$

将 $v_i^2 = \frac{G_i u_i}{\delta} I_{-i} - I_{-i}^2$ 代入 (3) 式得 $\varphi(I_1, v_{i1}^2) - \varphi(I_2, v_{i2}^2) > 0$, 所以单调性得证. 对于扩展性, 设任意

$a > 1$, 有 $a\varphi(p_i) - \varphi(ap_i) = (\frac{a}{G_i-1})[(\sqrt{\frac{G_i u_i}{\delta}} I_{-i} - I_{-i}^2 - I) - (\sqrt{\frac{G_i u_i}{a\delta}} I_{-i} - I_{-i}^2 - I)] > 0$, 可得其可扩展性。

3 算法仿真及结果分析

3.1 算法迭代步骤

模型的迭代流程如图1所示。

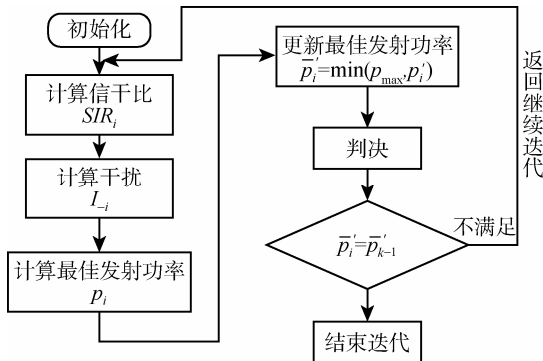


图1 功率控制算法流程图

信息迭代更新步骤为:

(1) 初始时刻设置各节点的发射功率, 使 $p(t=0) = \underline{p}$, $\underline{p} \in [0, p_{\max}]$, 同时给迭代次数 k 赋初始值使 $k=0$ 。

(2) 当 $k=k+1$ 时, 求出本次迭代的最佳发射功率值, 在 NPCGP 模型中分别计算 $\gamma_i = \frac{W}{R} \frac{p_i h_i}{\sum_{j \neq i} p_j h_j + \sigma^2}$,

$I_{-i} = \sum_{k \neq i} h_k p_k + \sigma^2$, $v_i^2 = \frac{G_i \lambda_i}{a} I_{-i} - I_{-i}^2$, $p_i' = \frac{1}{(G_i - 1) h_i} [v_i - I]$, $\bar{p}_i' = \min(p_i', p_{\max})$ 的值, 由此更新 3 种博弈模型中每个节点的最新功率值。

(3) 如果 $p(t_k) = p(t_{k-1})$ 停止, 即为纳什均衡发射功率向量 $p(t_k)$, 否则使 $k=k+1$, 返回步骤(2), 直到得到均衡解。

3.2 仿真结果及性能分析

考虑一个作战飞机编队, 共 5 架战机在半径为 200 km 的区域内执行任务, 与预警机的距离分别为: $dist = [150, 170, 180, 190, 200]$ (km), 基站处接收噪声功率 $\sigma^2 = 5 \times 10^{-12}$ kW; 扩频增益 G_i : $W/R = 1000$; 最大发射功率: 1 kW; 系数: $\alpha = 5 \times 10^9$; 效用因子 $u = [20, 24, 30, 35, 46]$; 路径增益 h_i : $h_i = 0.097/d_i^4$; 功率上限 $p_{\max} = 1$ kW。采用以上参数, 采用 Matlab 对基于博弈论的功率控制算法进行性能仿真。

图2为在相同场景下 NPG 和 NPCGP 算法达到均衡点时功率与节点到基站距离的曲线, 图3为 NPGP

各节点发射功率收敛到稳定值时的迭代次数曲线。从图2和图3可以看出各节点在经过平均 10 次迭代后均能够达到稳定的功率值, 在各节点达到纳什均衡点处, 最优发射功率远小于最大发射功率, 并且距离基站越近的节点其发射功率越小, 说明基于博弈的功率控制算法能有效降低发射功率, 节约功耗, 增大系统容量。并且与 NPG 算法相比, NPGP 算法降低了节点的发射功率, 这是由于增加代价函数、惩罚盲目提升发射功率的节点, 适当平衡各方利益所带来的结果。

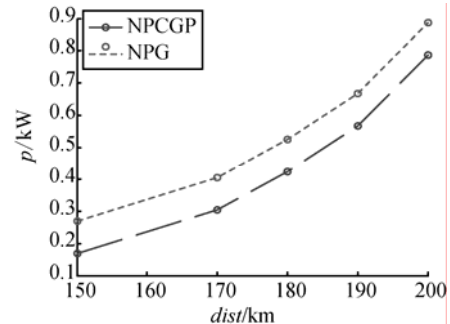


图2 不同节点的发射功率与通信距离关系图

图4为各节点信干比收敛到稳定值时的迭代次数曲线。从图4中可看出, 各节点在经过不到 10 次迭代后均能收敛到稳定的 SIR 值, 距离基站越远的节点所能获得更高的 SIR , 这说明基于博弈的功率控制算法, 所有节点都能获得较好的性能, 并且对于距离较远的节点具有更好的公平性。

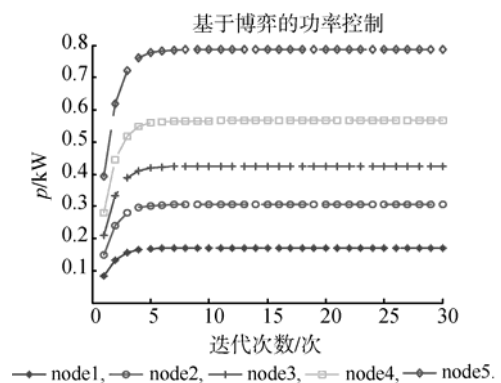


图3 基于博弈的功率控制收敛曲线

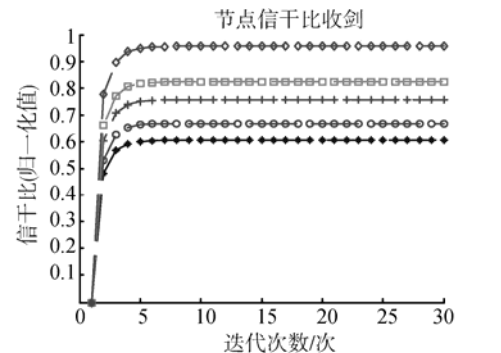


图4 各节点信干比收敛曲线

4 结论

为进一步提升数据链的低截获率和低干扰率特性,讨论了数据链物理层采用 CDMA 技术,使同一时隙多条链路进行通信,增加时隙复用率.针对 CDMA 通信系统的功率控制问题,本文提出基于博弈的功率控制算法考虑了不同节点间共享频谱资源的公平性,该方法使各节点满足一定 QoS 需求的同时使网络吞吐量最大化,极大降低了节点功率消耗,减少了网络的能量消耗,提高了能量效率.

5 参考文献

- [1] Wang Beibei, Wu Yongle. Game theory for cognitive radio networks [J]. Computer Networks, 2010, 54(4): 2537-2561.
- [2] Hakim K, Jayaweeras K, El-houayek G, et al. Efficient dynamic spectrum sharing in cognitive radio networks: centralized dynamic spectrum leasing [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(9): 2956-2967.
- [3] Xing Y, Chandramouli R. Stochastic learning solution for distributed discrete power control game in wireless data networks [J]. Networking, IEEE/ACM Transactions on, 2008, 16(4): 932-944.
- [4] Neel J. Analysis and design of cognitive radio networks and distributed radio resource management algorithms [D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2006.
- [5] Stefano Buzzi, Daniela Saturnino. A game-theoretic approach to energy-efficient power control and receiver design in cognitive CDMA wireless networks [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2011, 5(1): 137-150.
- [6] Zhu Yun, Xu Youyun, Lu Lu, et al. A power control algorithm based on non-cooperative game for wireless sensor networks [EB/OL]. [2012-02-19]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6086299.
- [7] Xiao Yong, Bi Guoan, Dusit Niyato. A simple distributed power control algorithm for cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(11): 3594-3600.
- [8] Giacomo Bacci, Marco Luise. Game-theoretic CDMA power control for code acquisition during network association [EB/OL]. [2012-02-19]. <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5962620&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F5962386%2F5962409%2F05962620.pdf%3Farnumber%3D5962620>.
- [9] Kian Hedayati, Izhak Rubin. A robust distributive approach to adaptive power and adaptive rate link scheduling in wireless mesh networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(1): 275-283.
- [10] Goodman D, Mandayam N. Power control for wireless data [J]. IEEE Personal Commun Mag, 2000, 7: 48-54.

The Power Control Based on Game-Theory with Combination Price Function in Data-Link System

HE Gang¹, BAI Peng¹, PENG Wei-dong¹, ZOU Wan-yin², Su Xi¹, LIN Jin-fu¹, WANG Ming-fang³

(1. Information Centre of Research and Development Section, Air Force Engineering University, Xi'an Shanxi 710051, China; 2. Training Department, Air Force Engineering University, Xi'an Shanxi 710051, China; 3. Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan Shanxi 713800, China)

Abstract: In the data-link system, carries on the control to various fighter planes emissive power, can cause the entire net to have low probability of interception and the low disturbance rate characteristic. In view of data chain system in power control question, This article proposed based on the game theory power control method, has used the combination price function form, this method causes the network volume of goods handled maximization at the same time diplomatic agent selects the power dissipation to be small, reduced the network power dissipation, enhanced the energy efficiency, and the relative non-linear price function says, the operation order of complexity is small, is advantageous for the realization. The simulation result showed, proposed the power control method can achieve the good correspondence performance, simultaneously has the rapid convergence characteristic, has effectively promoted machine the data chain system low interception and anti-jamming ability.

Key words: game-theory; data-link system; power control; low interception

(责任编辑: 冉小晓)