

# 数据链中功率控制的改进算法

董玉浩<sup>1</sup>, 赵学军<sup>1</sup>, 袁修久<sup>1</sup>, 贺刚<sup>2</sup>, 王明芳<sup>1</sup>, 李嘉林<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学 研究生院, 西安 710038; 2. 中国人民解放军 9272 部队, 上海 210406)

**摘要:**在数据链通信系统中,为增强全网的低截获率特性和低干扰率特性,需要在增加网络吞吐量和减小节点功率消耗之间取得最优策略。针对数据链系统中通常采用的 CDMA 技术中的功率控制问题,提出了基于动态博弈的功率控制模型,该模型中各节点在每次迭代更新功率值时考虑了博弈方的更新次序,获取的是其他节点干扰的最新动态信息,从而能使博弈方更快达到均衡功率。在分析对比后得出了动态博弈与静态博弈模型的不同,通过仿真验证了该功率控制方法在保证系统各节点不增加功率资源的情形下,能大幅度提升达到均衡功率的速度,使数据链系统具备更强的稳定性。

**关键词:**数据链系统;物理层;码分多址;功率控制;动态博弈

**本文引用格式:**董玉浩,赵学军,袁修久,等.数据链中功率控制的改进算法[J].兵器装备工程学报,2019,40(7):144-147.

**Citation format:**DONG Yuhao, ZHAO Xuejun, YUAN Xiujiu, et al. Improved Algorithm for Power Control in Data-Link System[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(7): 144-147.

**中图分类号:**TN911.22

**文献标识码:**A

**文章编号:**2096-2304(2019)07-0144-04

## Improved Algorithm for Power Control in Data-Link System

DONG Yuhao<sup>1</sup>, ZHAO Xuejun<sup>1</sup>, YUAN Xiujiu<sup>1</sup>, HE Gang<sup>2</sup>, WANG Mingfang<sup>1</sup>, LI Jialin<sup>1</sup>

(1. Graduate School of Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. The No. 92728<sup>th</sup> Troop of PLA, Shanghai 210406, China)

**Abstract:** In order to make the whole network in the data-link system have lower intercepting and low interference rate characteristics, network throughput should be maximized while the power consumption of nodes is reduced. Considering the power control problem of CDMA technology, a power control model based on dynamic game was proposed in this paper. Each node takes into account the updating order of the game party in each update of the power value, so it gets the latest dynamic interference information of other nodes. This method enabled the game player to reach a balanced power faster. The difference between the dynamic game model and the static game model was also proposed in this paper. Under the condition that every node in the system does not increase power resources, the power control method was verified by simulation. The conclusion is that the average number of iterations is reduced by 42.5% and the data link system is more stable.

**Key words:** data-link system; physic floor; code division multiple access; power control; dynamic game-theory

在无人机协同作战的过程中,机间需要高效手段来实现通信,而数据链(Data Link)可以为这些机间通信提供技术支

持,提高数据链网络的吞吐量,优化发射功率是主要选择之一。

**收稿日期:**2019-01-02; **修回日期:**2019-02-25

**作者简介:**董玉浩,硕士研究生,主要从事计算数学与军用仿真研究, E-mail: 821387717@qq.com。

**通讯作者:**赵学军,副教授, E-mail: zywczywcc@163.com。

文献[1]提出了一种新的功率控制手段,并给出了选择信道的方法。为了可以在满足 QoS 需求的同时提高网络的吞吐量<sup>[2]</sup>,各方面的研究都在进行,本文的研究基于功率优化。功率优化与节点的动态博弈紧密相关,为了得出各博弈方在信干比固定时所采用的发射功率的分布情形,Stefano Buzzi 等<sup>[3]</sup>定义了一个效用函数,用来量化模型的优化结果。在文献[4-5]中,Yun Zhu 等选择适当的发射功率来实现冲突的减少和网络连通性的巩固,改进了优化网络的拓扑结构,整体增强了功率优化的互联和相关性。Giacomo Bacci 等在文献[6-7]中提出自适应调整发射功率的方法实现吞吐量的最大化,以轻微的代价换取了算法的快速收敛。文献[8]采用一个适当的方法改变代价因子的值。文献[9]中的结论显示,选择合适的效用函数能使功率水平更低,同时达到更高的吞吐量。在文献[10]中,贺刚采用组合代价函数的形式,提出了一种基于博弈论的功率控制方法,保证了无人机之间数据链系统的低截获,并有效地提高了其抗干扰能力。

针对博弈方参与博弈进行功率更新时的次序,本文提出了基于动态博弈模型的功率控制方案,该算法在更新功率值时考虑了更新次序,以获取的其他博弈方的当前信息,有效提高了算法的收敛速度,有利于提高数据链系统的公平性和稳定性。

## 1 功率控制算法

### 1.1 模型建立

在 AWGN 信道下建立无人机作战编队的信道模型,对于接收节点终端,其信干比 SIR 可表示为:

$$\gamma_i = G \frac{h_i p_i}{\sum_{j=1, j \neq i}^N h_j p_j + \sigma^2} \quad (1)$$

其中:扩频增益  $G = W/R_i$ ,  $W$  表示 chip 速率; $R_i$  表示节点  $i$  的信息传输速率; $N$  表示编队中共享无线信道的节点数, $h_i$  表示节点  $i$  的信道增益, $p_i$  表示节点  $i$  的发射功率水平, $\sigma^2$  表示 AWGN 信道下的接收机背景噪声。

博弈论中的纳什均衡点即为每个节点的收益都得到帕累托改善的平衡点,为了不断地提高收敛速度,尽快最小功率优化问题的最优解,可以加入惩罚函数(代价函数)。假设此时存在功率向量  $P' = [p'_1, p'_2, \dots, p'_N]$ ,使各节点功率满足:

$$J_i(p'_i, p'_{-i}) \geq J_i(p_i, p'_{-i}), \forall p_i, i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

式中: $J_i$  表示节点  $i$  在考虑链路增益时的实际效用函数(或称最终效用函数); $p_i$  仍表示节点  $i$  的发射功率水平; $p'_{-i}$  表示除第  $i$  个节点以外的功率向量。

当节点  $i$  的功率大于最优功率时,可以定义惩罚函数模型如下:

$$J_i^c(p) = u_i(p) - c_i(p) \quad (3)$$

其中,未施加惩罚的效用函数为

$$u_i(p) = u_i \arctan(1 + \gamma_i) \quad (4)$$

式中, $c_i(p)$  是代价函数或称惩罚函数。

采用链路增益代价函数:

$$c_i(p) = \delta h_i p_i \quad (5)$$

加入代价函数后的实际效用函数模型:

$$J_i^c(p_i, p_{-i}) = u_i \arctan(1 + \gamma_i) - \delta h_i p_i \quad (6)$$

其中, $\delta$  为实比例系数,该模型将会主要惩罚功率大的节点。

### 1.2 动态博弈论下的功率控制

静态博弈的接电功率值选择应满足:① 在策略空间  $[0, p_{\max}]$  内;② 效用函数达到  $G_1: \max_{p_i \in P} f_i(p_i, p_{-i})$ 。假设第  $k+1$  次迭代时节点掌握的信息为  $I$  和  $I_{-i}$ ,其值分别由以下两式给出:

$$I_{-i}(k+1) = \sum_{k \neq i}^N h_k p_k + \sigma^2 \quad (7)$$

$$I(k+1) = \sum_{k=1}^N h_k p_k + \sigma^2 \quad (8)$$

由式(7)与式(8)可以看出,节点  $i$  在博弈过程中每次进行信息迭代更新时,采用的信息是上一轮迭代的信息,而不是当前最新的信息,故而最终结果不是当前的最佳值。

为解决这个问题,必须及时更新其他节点的功率干扰信息,因此,在这里提出基于动态博弈的功率控制,当节点更新自身功率时,可获取其他节点对其最新的动态干扰信息,节点  $i$  第  $k+1$  次更新时掌握的动态信息可以被表示为:

$$I_{-i}^*(k+1) = \sum_{j=1}^{i-1} p_j(k+1) + \sum_{j=i+1}^N p_j(k) h_j \quad (10)$$

$$I^*(k+1) = \sum_{j=1}^{i-1} p_j(k+1) + \sum_{j=i}^N p_j(k) h_j \quad (11)$$

由式(10)、式(11)可知,由于每个节点在更新当前功率值时,所采用的其他节点的信息值是离当前时间最近的干扰信息,效益函数的优化效果更好。

## 2 子博弈完美纳什均衡

完美均衡的概念在文献[11]中被提出,根据动态博弈理论,子博弈完美纳什均衡是由完美信息动态博弈得到的均衡解。子博弈指每个当前需更新功率的节点与在它之后将更新的节点构成的一个博弈组合。换句话说,系统中的  $N$  个节点构成  $N$  个子博弈,若存在一组功率向量  $p'$ ,它对每个节点构成的子博弈都达到纳什均衡, $p'$  即为该博弈的子博弈完美纳什均衡。各个子博弈采用相同的效益函数时,所对应节点的策略空间也保持相同。

根据文献[10]中的三个定理以及贺刚等对均衡解存在性、可扩展性的证明,可知动态博弈功率控制能使各节点的发射功率达到帕累托最优,即存在完美纳什均衡。通过可扩展性可知模型中的实际效用函数值收敛于唯一的解,且此时满足  $\alpha J_i^c(p_i) \geq J_i^c(\alpha p_i)$ ,其中系数  $\alpha$  会在仿真时给出。

下面将通过仿真证明其具有更快的收敛速度,即在数据链的应用当中,能使战机编队的通信在更短的时间内达到稳定。

### 3 算法仿真及结果分析

#### 3.1 算法迭代步骤

在动态博弈模型下,得到应用于数据链系统的分布式功率控制算法,其流程如下:

步骤 1:初始化。 $p(t=0) = p$ ,  $p \in [0, p_{\max}]$ , 迭代次数  $k=0$ ;

步骤 2:当  $k=k+1$  时,每个节点依次计算两式的值:

$$p'_i = \frac{1}{(G_i - 1)h_i} [v_i - I]$$

式中,  $v_i = \frac{G_i u_i}{\delta} I_{-i} - I_{-i}^2$  表示节点  $i$  的由此更新每个节点的最新功率值,效用因子  $u$  的取值会在仿真中给出,所得均衡解

为  $r_i(p) = \min(p'_i, p_{\max})$ 。

步骤 3:判决是否终止迭代。终止的条件是  $p(t_k) = p(t_{k-1})$ , 此时的发射功率为  $p(t_k)$  不满足终止条件则令  $k = k+1$ , 并返回步骤 2, 直至满足终止条件。

#### 3.2 仿真结果及性能分析

假设在半径 200 km 的任务区域中,5 架无人机构成以作战编队,它们与预警机的距离分别是:  $dist = [150, 170, 180, 190, 200]$  (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 (仅供仿真参考)。采用以上参数,采用 Matlab 分别对静态博弈和动态博弈功率控制进行仿真,得到图 1、图 2 和图 3 的性能曲线图。

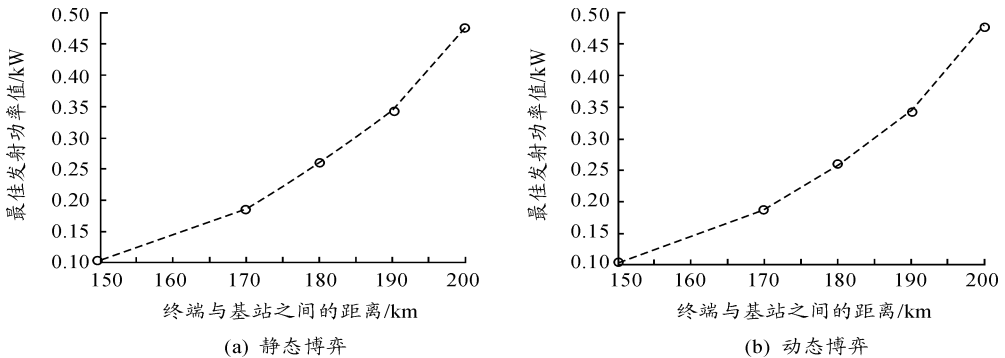


图 1 静态博弈与动态博弈不同距离节点达到均衡时的功率曲线

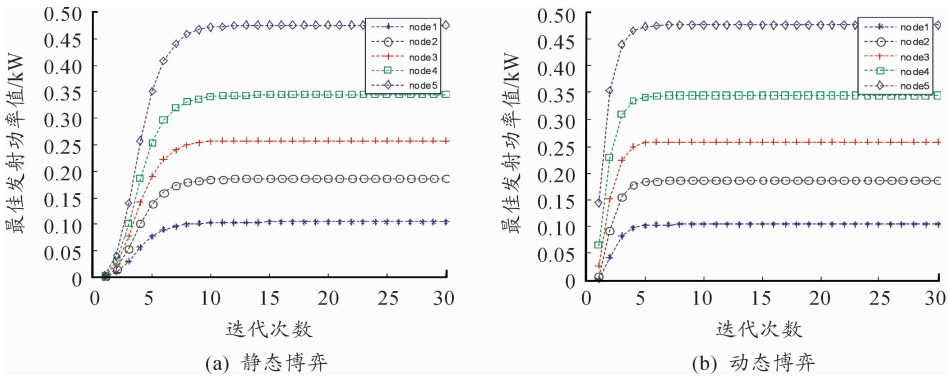


图 2 静态博弈与动态博弈功率控制收敛曲线

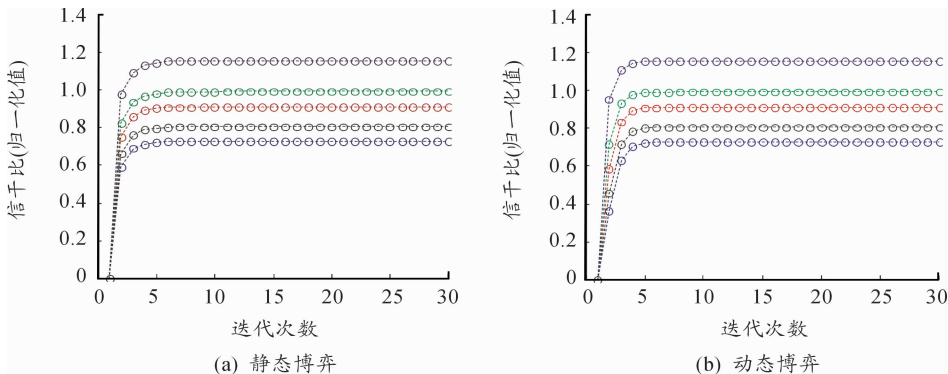


图 3 静态博弈与动态博弈 SIR (信干比) 收敛曲线

图1所示为不同距离的节点达到均衡时的发射功率,其中图1(a)为静态博弈功率控制下用户达到均衡时的最终发射功率,图1(b)为动态博弈功率控制下用户达到均衡时的最终发射功率,由图所示可知,两种博弈情形的均衡状态下,动态博弈无需牺牲发射功率。

图2、图3所示分别为各节点发射功率和信干比 SIR(归一化)收敛到稳定值时的迭代次数曲线,其中图2(a)与图3(a)分别为静态博弈情形下发射功率和信干比 SIR 达到稳定值时的迭代次数曲线,其中图2(b)与图3(b)分别为动态博弈情形下发射功率和信干比 SIR 达到稳定值时的迭代次数曲线,比较图2、图3所示的两种博弈模型,两种情况下同一个节点发射功率和信干比 SIR 都能收敛到同样的均衡值,与静态博弈相比,动态博弈中功率从初始值达到收敛需要的迭代次数明显减少,即功率的收敛速较快,原因在于动态博弈情形下,各节点所获得的信息是最新更新的信息,所以能更快地达到均衡点。这对于要求快速、准确的数据链通信系统而言,是非常好的解决方案。

表1列出了每个节点达到收敛需要的迭代次数。由表可知,动态博弈算法达到均衡时所需迭代次数大幅减少,如节点1、节点2、节点3静态博弈算法下需要的次数为15次,而在动态博弈算法下只需9次,节点4、节点5降低的次数近1/2,所有节点的平均迭代次数除低了42.5%。由此可知,动态博弈算法可以大幅度改善功率控制的收敛性能。

表1 动态博弈与静态博弈模型性能对比

博弈模型	节点1	节点2	节点3	节点4	节点5	平均所需迭代次数
动态博弈	9	9	9	9	10	9.2
静态博弈	15	15	15	17	18	16

## 4 结论

针对 CDMA 通信系统的功率控制问题,本研究在静态博弈功率控制模型的基础上,引入动态博弈,让每个参与博弈的通信节点获取最新的信息,使各节点更加理性。通过理论分析和仿真对比都表明,在不牺牲其他性能的情况下,基于动态博弈的功率控制算法比静态博弈功率控制算法的平均收敛速度提升了42.5%,这对于要求快速、准确的数据链通信系统有一定的价值。

## 参考文献:

[1] 张文秋,丁文锐,刘春辉.一种无人机数据链信道选择和功率控制方法[J].北京航空航天大学学报,2017,43(3):583-591.

[2] HAYKIN S. Brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2005,23(2).

[3] BUZZI S, SATURNINO D. 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.

[4] ZHU Y, XU Y, LIU L, et al. A Power Control Algorithm Based on Non-cooperative Game for Wireless Sensor Networks[C]//International Conference on Computational and Information Sciences. IEEE Computer Society, 2011: 718-721.

[5] XIAO Y, BI G, NIYATO D. A Simple Distributed Power Control Algorithm for Cognitive Radio Networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(11): 3594-3600.

[6] BACCI G, LUISE M. Game-Theoretic CDMA Power Control for Code Acquisition during Network Association[C]//IEEE International Conference on Communications. IEEE, 2011:1-5.

[7] HEDAYATI K, RUBIN I. 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.

[8] ZHANG L, ZHANG S, WU L, et al. A Nash game algorithm for distributive power control with faster convergence in cognitive radio[C]//International Conference on Communications and Information Technologies. IEEE Press, 2009: 93-96.

[9] LI P, SHAO S, YANG L, et al. A Novel Power Control Game Algorithm for Cognitive Radio[C]//International Conference on Communications and Mobile Computing. IEEE, 2010:149-153.

[10] 贺刚,柏鹏,彭卫东,等.数据链中基于组合代价函数的博弈功率控制[J].江西师范大学学报(自然科学版),2012(6):615-618.

[11] 黄涛.博弈论教程:理论·应用[M].北京:首都经济贸易大学出版社,2004.

[12] YATES R D. A framework for uplink power control in cellular radio systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2002,13(7):1341-1347.

[13] 任建英.用逆向归纳法求解动态博弈问题[J].中小企业管理与科技旬刊,2009(15):126-127.