

基于空间信息的射频隐身数据链最优能量控制算法

杨宇晓^{1,2}, 周建江², 陈卫东¹, 张雷³

(1. 南京航空航天大学高新技术研究院, 南京 210016; 2. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京 210016;
3. 西安卫星测控中心, 西安 710043)

摘要: 为提高数据链的低被截获性能, 提出了一种基于空间信息的射频隐身数据链最优能量控制算法。以数据链目标飞行区域的威胁因子为先验知识, 基于数据链的实时空间信息, 分析了影响数据链性能的各个参数, 将辐射功率、开机时刻作为优化变量, 以最小化辐射功率函数和最小化能量消耗函数作为目标, 利用混合混沌粒子群优化算法对数据链通信模型进行优化, 选取使两个目标函数最小的解作为最优解。仿真结果表明, 算法与目前常见的数据链恒定功率辐射方法相比, 在满足可靠通信的前提下, 辐射功率较小, 消耗能量较少, 具有较好的射频隐身性能。

关键词: 射频隐身; 数据链; 能量控制; 混合混沌粒子群优化算法

中图分类号: TN918.91 文献标识码: A 文章编号: 1000-1328(2013)07-1008-06

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2013.07.017

An Optimal Energy Control Algorithm for Radio Frequency Stealth Datalink Based on Spatial Information

YANG Yu-xiao^{1,2}, ZHOU Jian-jiang², CHEN Wei-dong¹, ZHANG Lei³

(1. Academy of Frontier Science, NUA, Nanjing 210016, China;

2. College of Electronic and Information Engineering, NUA, Nanjing 210016, China;

3. Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710043, China)

Abstract: In order to increase the lower interception performance of the datalink, an optimal energy control algorithm based on the spatial information is proposed in this paper. Radiation power and starting time are selected as optimized variables, which are based on the threat factor of the target region and the real-time spatial information of the datalink. A mathematical model of multi-objective optimization is established to achieve minimum radiation power and energy cost. The hybrid chaotic particle swarm optimization (HCPSO) is used for the optimization of the energy control, and the solution which minimizes the two target functions is selected as the optimization solution. Compared with the constant radiation power method, the simulation results show that the proposed algorithm consumes less energy and has better performance of RF stealth.

Key words: Radio frequency stealth; Datalink; Energy control; HCPSO

0 引言

近年来,随着雷达等相关技术的发展,无源探测

系统对主动射频辐射源的探测能力已大大提高,对载有多种主动辐射源的飞行器平台(飞机、卫星等)构成了严重威胁。为了提高这些飞行器平台的生存

收稿日期:2012-11-06; 修回日期:2013-03-05

基金项目:国防预研基金(1004-NCG11001);中央高校基本科研业务费专项资金资助和江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CXZZ11_0212_4015-56XZA12046);江苏省“物联网与控制”优势学科建设资金资助

能力,必须对数据链、雷达等主动辐射源进行射频隐身设计^[1-2]。

数据链是一种实时传输与处理传感器、指控和武器系统之间格式化信息(包括战场态势信息、指挥控制信息等)的综合信息系统^[3-5],一旦数据链信号被敌方截获,将使飞行器受到严重威胁。因此,研究具有良好射频隐身能力的数据链最优能量控制算法具有十分重要的理论和现实意义。

基于射频隐身理论,目前可采用的能量控制策略主要有两类:最小功率策略和最小驻留策略。最小功率策略要求数据链在任何时间都以系统所需的最小功率向外辐射,目的是使辐射信号始终保持在截获接收机门限值以下,目前许多数据链都没有功率管理能力,从来都是发射最大峰值功率^[6]。最小驻留策略则假设数据链在工作过程中总会被探测到,该策略是要使数据链暴露时间尽可能短。因此,在保证任务的前提下,应尽可能减少数据链辐射功率及工作时间,即对数据链的能量消耗进行编程管理,以改善数据链的射频隐身性能,提高其生存能力。

本文从数据链最小功率策略和最小驻留策略入手,提出了一种基于空间位置信息的射频隐身数据链最优能量控制算法。以数据链目标飞行区域的威胁因子为先验知识,基于数据链的实时空间信息,分析了有效通信距离、工作时间等因素对数据链射频隐身性能的影响,并将辐射功率、开机时刻作为优化变量,建立射频隐身数据链目标函数,利用混合混沌粒子群优化算法^[7-8]对数据链通信模型进行了优化。仿真结果表明,在保证数据链可靠通信前提下,本文提出的算法能够有效减小数据链辐射功率,减少消耗能量,有利于提高数据链的射频隐身性能。

1 混沌粒子群优化算法

基于对鸟群捕食行为的仿生,Kennedy 等人于1995年提出了粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法。该算法属于基于群体智能的随机优化算法,具有简单、易实现、执行速度快等优点^[9-10],但基本粒子群算法存在后期收敛精度差、容易陷入局部最优等缺点。为解决这些缺点,文献[8]提出一种自适应的混合混沌粒子群优化算法(HCPSO),在粒子群与种群最优解小于门限值时,

进行混沌搜索,搜索到较优解则取代当前粒子。

混沌是在非线性系统中由于内在随机性而产生的外在复杂表现,具有随机性、遍历性和规律性等特点,它能在一定的范围内按自身的规律不重复地遍历所有状态。将混沌运动与粒子群算法结合起来,可利用混沌运动的遍历性,扩大粒子的搜索范围,从而使算法跳出局部最优解。

2 射频隐身数据链最优能量控制算法

本文提出的射频隐身数据链最优能量控制算法,利用数据链的实时空间位置信息,对辐射功率进行自适应控制,使其始终为系统所需的最小值。并根据数据链目标区域的威胁程度,对数据链的工作时间进行编程管理,减少其能量消耗。

该算法主要包含以下6个部分。

2.1 空间位置信息转化为距离信息

最小功率策略要求数据链的有效通信距离始终为系统所能承受的最大通信距离。因此,要将飞行器平台广泛采用的WGS-84大地坐标系^[11]下空间位置信息转化为距离信息。

假设数据链和指挥台站坐标分别为 $A(\theta_1, \varphi_1, h_1)$ 和 $B(\theta_2, \varphi_2, h_2)$,则其在地球表面的投影为 $A'(\theta_1, \varphi_1)$ 和 $B'(\theta_2, \varphi_2)$,为便于计算,建立点 $C'(\theta_1, \varphi_2)$,如图1所示。

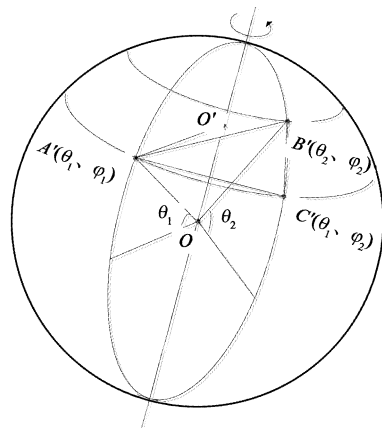


图1 数据链与指挥台站间位置关系

Fig. 1 The positional relationship of datalink and command post

考虑到指挥台站覆盖范围有限,数据链只能在其附近区域活动,由几何知识可进行如下近似:

(1) $A'C'$ 、 $B'C'$ 的直线距离近似等于其劣弧长

度,即:

$$A'C' \approx \widehat{A'C'} \quad (1)$$

$$B'C' \approx \widehat{B'C'} \quad (2)$$

(2) $A'C'$ 与 $B'C'$ 近似垂直,即:

$$A'C' \perp B'C' \quad (3)$$

则距离 AB 为:

$$AB = \sqrt{A'C'^2 + B'C'^2 + (h_1 - h_2)^2} \quad (4)$$

其中:

$$A'C' = |\varphi_2 - \varphi_1| \cdot d \cdot \cos\left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2}\right) \quad (5)$$

$$B'C' \approx \widehat{B'C'} = |\theta_2 - \theta_1| \cdot d \quad (6)$$

其中 $d = (2\pi \times R_E)/360$, R_E 为地球半径。

2.2 威胁因子及目标区域分级

最小驻留时间是数据链能量控制的另一个可用策略,其核心是尽可能减少数据链的工作时间,提高其射频隐身性能。本文将目标飞行区域的威胁程度作为先验知识,并在此基础上引入归一化威胁因子 σ 来表征区域的威胁程度。因此,可根据先验知识对目标区域进行分级,当目标区域威胁程度较高,威胁因子 σ 较大时,则关闭数据链发射机。假定数据链工作策略为:

当 $\sigma < 0.3$ 时,数据链在目标区域内全时段工作,即 $K = 1$;

当 $0.3 \leq \sigma < 0.7$ 时,数据链在目标区域内半时段工作,即 $K = 0.5$;

当 $0.7 \leq \sigma$ 时,数据链在目标区域内全时段静默,即 $K = 0$;

K 为目标飞行区域内的数据链工作时间系数。

2.3 数据链辐射方程

假设数据链发射功率为 P_T ,数据链发射天线增益为 G_T ,数据链馈线损耗为 L_T ,数据链其它损耗(如电磁兼容滤波器的插损等)为 L_o ,指挥台站在距离数据链天线 R 处,则指挥台站处功率密度 S_1 为:

$$S_1 = \frac{P_T G_T}{4\pi R^2 L_T L_o} \quad (7)$$

若指挥台站接收系统馈线损耗为 L_R ,天线有效接收面积为 A_R ,则指挥台站接收机入口功率为:

$$P_R = \frac{A_R S_1}{L_R} = \frac{A_R P_T G_T}{4\pi R^2 L_T L_R L_o} \quad (8)$$

考虑到接收天线增益 $G_R = \frac{4\pi A_R}{\lambda^2}$,则:

$$P_R = \frac{\lambda^2 P_T G_T G_R}{(4\pi R)^2 L_T L_R L_o} \quad (9)$$

对式(9)取对数后为:

$$P_R = P_T + G_T + G_R - L_T - L_R - L_o - L_p \quad (10)$$

其中 L_p 为自由空间损耗:

$$L_p = 20\lg(4\pi/c) + 20\lg f + 20\lg R \quad (11)$$

2.4 构造约束条件

射频隐身数据链是在保证可靠通信的前提下,尽可能提高其射频隐身性能,即通信可靠性是射频隐身数据链的内涵要求。由于通信可靠性和射频隐身性能对辐射功率的要求是相悖的,因此必须在两者之间进行平衡,使辐射功率始终为数据链系统可靠通信所需的最小值。

若指挥台站接收机的灵敏度为 P_L ,只有 $P_R \geq P_L$ 时,数据链系统才能正常通信,为保证可靠性,一般还需在链路中保留余量 m ,因此数据链可靠通信的约束条件为:

$$P_R \geq P_L + m \quad (12)$$

2.5 建立最优能量控制算法目标函数

(1) 最小功率策略要求数据链在任何时间都以可靠通信所需的最小功率向外辐射能量,则其被截获的概率越低,射频隐身性能越好。建立最小化辐射功率目标函数:

$$L_1 = P_R - P_L - m \quad (13)$$

其中, P_R 为指挥台站接收机入口功率, P_L 为指挥台站接收机灵敏度, m 为链路余量。在式(12)的约束条件下,该目标函数值越小,获得的射频隐身效果越好。

(2) 数据链在实现任务时消耗的能量越少,被敌方无源探测系统截获的概率也越低,因此数据链在始终以最小功率辐射的同时,应利用最小驻留策略控制数据链的工作时间,并选取最佳开机时刻,减少其能量消耗。建立最小化能量消耗目标函数:

$$L_2 = \sum_{i=1}^n \int_{t_i}^{t_i+T_i K} P_T dt \quad (14)$$

其中, n 是将目标区域按威胁程度分级后的区域数目, t_i 为第 i 个区域内的开机时刻, T_i 为第 i 个区域的飞行时间, K 为区域内工作时间系数, P_T 为辐射功率。该目标函数值越小,则数据链消耗能量越少,射

频隐身效果越好。

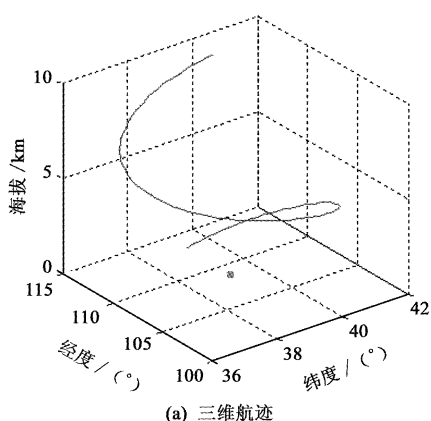
2.6 优化数据链能量控制模型

调用 HCPSO 优化算法,将数据链辐射功率,每个目标区域内开机时刻作为优化参数,构造数据链最小化辐射功率函数和最小化能量消耗函数,在满足约束条件的前提下,使得两个目标函数最小。在迭代结束后,选取使得两个目标函数最小的解作为最优解。

3 仿真结果与分析

3.1 仿真参数设置

HCPSO 优化算法控制参数设置为:种群数为



50,迭代次数为 200。指挥台站以西安为例设为 (108、39、0.37),数据链及指挥台站接收机参数按照文献[12]中提出的 Link16 收发系统参数设定,链路余量取 2dB。

数据链端参数为:工作频率 $f = 1215\text{MHz}$,发射天线增益 $G_T = 1\text{dB}$,最大发射功率 $P_{Tmax} = 200\text{W}$,馈线损耗 $L_T = 1\text{dB}$,其他损耗 $L_o = 2\text{dB}$;

指挥台站端参数为:接收天线增益 $G_R = 5\text{dB}$,接收灵敏度 $P_L = -95\text{dBm}$,馈线损耗 $L_R = 1\text{dB}$ 。

3.2 飞行航迹

假定飞行器某次飞行的航迹如图 2 所示。

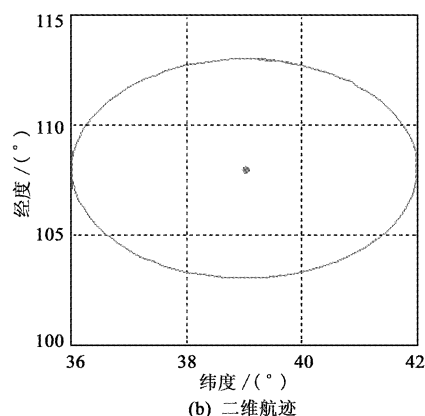


图 2 飞行器航迹

Fig.2 Flight path planning

如图 2(b)所示,将目标区域划分为 9 个子区域,指挥台站位于中心区域,与飞行航迹相关的有 8 个子区域(左上角为区域 A,区域按顺时针方向编号),8 个子区域分区如表 1 所示。

表 1 目标区域划分

Table 1 Division of target region

目标区域	起始点		结束点	
	纬度/(°)	经度/(°)	纬度/(°)	经度/(°)
A	36.28	110.0	38.00	112.7
B	38.00	112.7	40.00	112.7
C	40.00	112.7	41.78	110.0
D	41.78	110.0	41.35	105.0
E	41.35	105.0	40.00	103.3
F	40.00	103.3	38.00	103.3
G	38.00	103.3	36.56	105.0
H	36.56	105.0	36.28	110.0

各个子区域的威胁因子和开机时间系数作为先验知识,如表 2 所示。

3.3 仿真结果

为验证射频隐身数据链最优能量控制算法的有效性,本文将射频隐身方法与目前常见的数据链恒定最大功率辐射方法进行了对比。

仿真 1. 与恒定功率方法能量消耗比较

根据 3.2 节的飞行航迹进行仿真计算,射频隐身方法和恒定功率方法在整个目标飞行区域消耗的总能量如图 3 所示,可以看出射频隐身方法有效降低了能量消耗。

仿真 2. 与恒定功率方法通信性能比较

由射频隐身理论可知,数据链的可靠通信是射频隐身的内涵要求,本文所提出的射频隐身方法满足式(12)约束条件,因此,可以实现数据链的可靠通信。利用射频隐身方法和恒定功率方法,分别计算系统的链路余量,并取均值后,如表 3 所示。

表2 威胁因子和开机时间系数
Table 2 Threat factor and coefficient of starting time

参数名称	目标区域							
	A	B	C	D	E	F	G	H
威胁因子 σ	0.2	0.5	0.3	0.6	0.8	0.4	0.6	0.7
开机时间系数 K	1	0.5	0.5	0.5	0	0.5	0.5	0

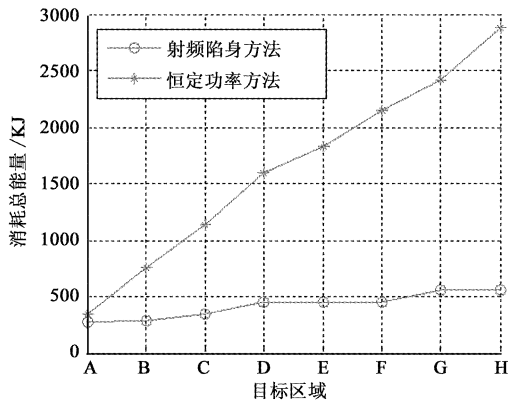


图3 总能量消耗
Fig. 3 Total energy cost

表3 数据链系统链路余量

Table 3 The link margin of datalink system

功率控制方法	链路余量/dB
射频隐身方法	2.001
恒定功率方法	6.786

由表3可知,射频隐身方法和恒定功率方法均可满足系统的链路余量要求,实现可靠通信,但射频隐身方法更节省系统资源,综合性能更优。

仿真3. 优化变量对算法性能的影响

射频隐身数据链最优能量控制算法将辐射功率、开机时刻作为优化变量进行迭代运算。辐射功率和开机时刻分别为固定值和最优值时,其消耗总能量如图4、图5所示。由仿真结果可知,辐射功率和开机时刻为迭代计算的最优值时,目标区域内消耗的总能量更小,其射频隐身性能更好。

4 结论

本文从提高数据链射频隐身性能角度入手,提出了一种射频隐身数据链最优能量控制算法。该算法基于飞行器实时空间位置和目标区域的威胁因子信息,以最小化辐射功率函数和最小化能量消耗函数作为目标,利用混合混沌粒子群优化算法对数据链通信模型进行了优化。仿真结果表明,本算法在

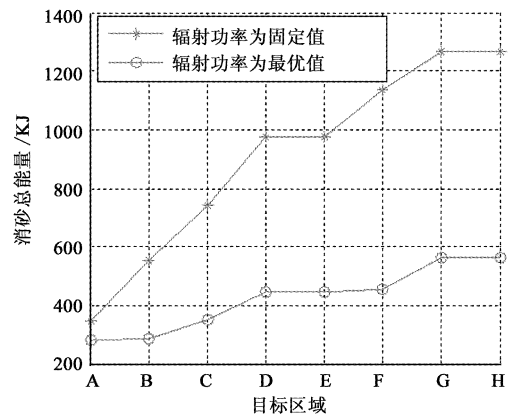


图4 辐射功率对消耗总能量影响
Fig. 4 Effect of radiation power on total energy cost

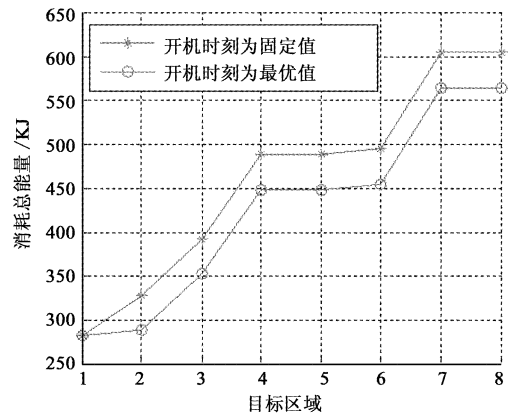


图5 开机时刻对消耗总能量影响
Fig. 5 Effect of starting time on total energy cost

满足可靠通信的前提下,具有较好的射频隐身性能,可以有效提高飞行器平台的生存能力。

参 考 文 献

[1] Gao J Y. Analysis of low probability of intercept (LPI) radar signals using the wigner distribution[D]. Monterey: Post Graduate School, 2002.

[2] 张贞凯, 周建江, 汪飞, 等. 机载相控阵雷达射频隐身时最优搜索性能研究[J]. 宇航学报, 2011, 32(9): 2023 - 2028. [Zhang Zhen-kai, Zhou Jian-jiang, Wang Fei, et al. Research on optimal search performance of airborne phased array radar for radio frequency stealth[J]. Journal of Astronautics, 2011, 32

- (9);2023-2028.]
- [3] Chacon M, Esteve M. Design and implementation of a simulation platform for link-16 networks using NS-2 [C]. Information Systems and Technologies, Madrid, Spain, June 20 - 23, 2012.
- [4] McCabe L. Operator-in-the-loop experimentation: Providing combat utility measures [C]. Military Communications Conference, Maryland, USA, November 7 - 10, 2011.
- [5] Wang L Y, Xue W, Luo W Z. Model analysis of link-16 based on global grid reference model[C]. 2011 International Conference on Computer Science and Network Technology, Harbin, China, December 24 - 26, 2011.
- [6] Lynch D J. 射频隐身导论[M]. 沈玉芳译. 西安:西北工业大学出版社,2009.
- [7] 胥小波, 郑康锋, 李丹, 等. 新的混沌粒子群优化算法[J]. 通信学报, 2012, 33(1):24 - 30. [Xu Xiao-bo, Zheng Kang-feng, Li Dan, et al. New chaos-particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Communication, 2012, 33(1):24 - 30.]
- [8] Meng H J, Zheng P, Wu R Y, et al. A hybrid particle swarm algorithm with embedded chaotic search [C]. The 2004 IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems, Singapore, December 1 - 3, 2004.
- [9] Modares H, Alfia A, Naghibi S, et al. Parameter estimation of bilinear systems based on an adaptive particle swarm optimization [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2010, 23(7): 1105 - 1111.
- [10] Karakuzu C. Parameter tuning of fuzzy sliding mode controller using particle swarm optimization [J]. International Journal of Innovative Computing, 2010, 6(10): 4755 - 4770.
- [11] Sankowski M. Reference model of aircraft movements in geodetic coordinates [C]. International Radar Symposium, Leipzig, Germany, September 7 - 9, 2011.
- [12] 顾宁平, 赵芦生. Link-16 数据链有效通信距离分析[J]. 现代电子工程, 2009, 2: 53 - 55. [Gu Ning-ping, Zhao Lu-sheng. Research of effective communication distance for link-16 [J]. Modern Electronic Engineering, 2009, 2: 53 - 55.]

作者简介:

杨宇晓(1984 -),男,博士研究生,助理研究员,主要从事射频隐身技术、卫星通信等。

通信地址:江苏省南京市御道街29号(210016)

E-mail:yyx_nuaa@163.com

(编辑:余 未)