

引用格式:肖东,江驹,余朝军,等.基于多目标遗传算法的异构无人机协同察打[J].电光与控制,2018,25(7):24-28. XIAO D, JIANG J, YU C J, et al. Multiple heterogeneous UAVs cooperative searching and attacking based on parallel NSGA-II algorithm[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(7):24-28.

基于多目标遗传算法的异构无人机协同察打

肖东, 江驹, 余朝军, 周俊
(南京航空航天大学, 南京 210016)

摘要:针对多架异构无人机在未知环境下协同执行搜索打击任务。考虑无人机和目标资源问题,采用了一种组建联盟方式来完成打击任务,建立了组建联盟的多目标优化模型,并提出了一种并行带精英策略非支配排序的遗传算法(NSGA-II)求解模型。通过具体的仿真验证了模型的合理性,分析了不同情况下的算法运行速度,并与传统方法进行对比,证明了并行NSGA-II具有很强的实时性,且提高了任务的完成效率。

关键词:无人机; 协同搜索打击; 组建联盟; NSGA

中图分类号: V279 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2018.07.005

Multiple Heterogeneous UAVs Cooperative Searching and Attacking Based on Parallel NSGA-II Algorithm

XIAO Dong, JIANG Ju, YU Chao-jun, ZHOU Jun
(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To deal with the problem of cooperation of multiple heterogeneous UAVs for target searching and attacking in unknown environment, and with consideration of the resources of the UAVs and the targets, a method of coalition formation was used to complete the task. A multi-objective optimization model was established, and a parallel Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II) was proposed to solve the problem. A simulation was carried out and an analysis was made to the running speed of the algorithm, which was compared with the traditional methods. The simulation results verified the rationality of the model, and showed that the parallel NSGA-II has a strong real-time performance and improves the efficiency of task performing.

Key words: UAV; cooperative search and attack; coalition formation; NSGA

0 引言

无人机具有零伤亡、高机动性、隐身性能好、费用低等优势,被广泛应用于作战环境中的搜索打击任务。然而面对日趋复杂的现代战场环境,单架无人机的性能受到载荷等限制,执行对多目标的作战任务必须要多架异构无人机协同才能完成。多架异构无人机能够有效执行对多目标搜索打击任务的前提是多无人机之间能够进行有效的任务分配^[1]。

针对任务分配问题,许多学者进行了研究并取得了

一系列成果,提出了诸如动态网络流优化^[2-3](DN-FO)、混合整数线性规划^[4-6](MILP)、多维多选择背包问题^[7](MMKP)及多无人机协同多任务分配问题^[8](CMTAP)、合同网^[9]等模型来解决任务分配问题。总的来说,上述方法存在着一些问题:现有无人机任务分配模型和方法中通常假设无人机是同构的并且不考虑资源的消耗,与实际作战不符;任务分配问题的求解方法实时性不高;需要预先知道目标的数量、位置等信息。然而多架无人机协同执行搜索打击任务时,由于环境的未知和不确定性,目标的数量、位置等信息对无人机来说事先是未知的。因而上述问题对传统的多无人机任务分配方法提出了挑战。

本文针对异构多架无人机对未知环境中的目标搜索打击,重点考虑了无人机的资源约束,提出了一种组建联盟的联合打击策略,设计了一种并行NSGA-II算法来快速建立联盟,且算法具有较高的实时性。

收稿日期:2017-08-23

修回日期:2017-09-07

基金项目:国家自然科学基金(61673209);南京航空航天大学研究生开放基金(kfj20160318)

作者简介:肖东(1994—),男,江西九江人,硕士生,研究方向为优化算法及无人机协同。

1 问题描述

在一片未知区域中有 M 个静止目标,使用 N 架异构无人机对目标进行搜索和打击,这些无人机是异构的,体现在它们的性能(飞行速度、最小转弯半径、传感器性能等)不同,以及携带不同种类和数量的任务资源。记无人机为 $A_i (i=1,2,\dots,N)$,假设一共有 n 种不同类型的任务资源,当前资源向量用 R_i^A 表示,即

$$R_i^A = (R_{i1}^A, R_{i2}^A, \dots, R_{in}^A) \quad (1)$$

式中, $R_{ip}^A (p \in \{1,2,\dots,n\})$ 表示无人机 A_i 所携带的第 p 种任务资源的数量。

当多架无人机开始执行搜索打击任务时,目标的信息对于无人机来说是未知的,无人机需要以一定的搜索方式对任务区域展开搜索,假定无人机探测距离为 r_i^s ,目标在距离无人机 r_i^s 以内会被发现,无人机发现目标时可以获知目标的位置和打击目标所需的资源向量,目标用 $T_j (j=1,2,\dots,M)$ 表示,对应的资源向量表示为

$$R_j^T = (R_{j1}^T, R_{j2}^T, \dots, R_{jn}^T) \quad (2)$$

式中, $R_{jp}^T (p \in \{1,2,\dots,n\})$ 表示打击目标 T_j 需要的第 p 种资源数量。若无人机联盟的每种资源总和都能满足打击目标需求,则能够完成对目标的打击。

无人机进入任务区域后对任务区域展开搜索,当无人机发现目标后,获得目标的位置信息和资源信息,并将其广播给其他无人机,然后组建联盟完成对目标的打击,组建联盟流程如图 1 所示。

当无人机 A_i 发现目标后,如果当前资源满足打击目标资源需求,则能够独立完成目标打击,否则无法独立完成目标打击,需要组建联盟与其他无人机共同来完成对目标的打击。组建联盟时无人机将目标所在位置信息和所需资源向量广播给其他无人机,当其他无人机接收到广播信息后,若自身拥有所需资源的任何一种,就做出回应反馈自身最早到达时间和当前资源向量;无人机 A_i 根据接收到其他无人机的反馈信息来组建联盟,如果联盟组建成功,就将联盟组建结果和到达时间发送给其他各架无人机,联盟成员根据到达时间自行规划路径,否则就将联盟组建失败信号广播出去。

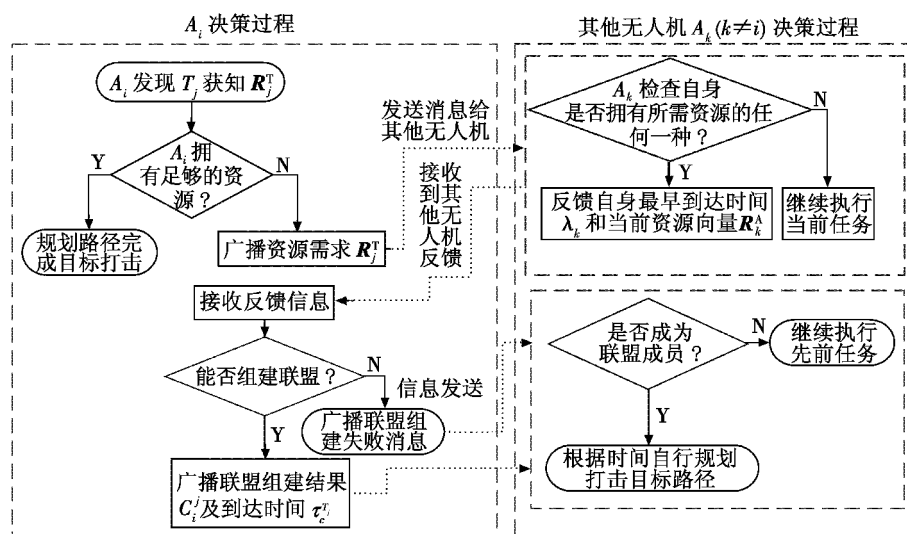


图 1 组建联盟流程图

Fig. 1 Flow chart of coalition formation process

2 组建联盟模型

当无人机 A_i 接收到其他无人机的反馈信息后,需要根据各架无人机的反馈信息选择合适的无人机。记返回信息的候选无人机集合为 A ,无人机 $A_k, A_k \in A$,最早到达时间为 λ_k 。无人机 A_i 对目标 T_j 攻击组成的联盟记为 $C_j^i, C_j^i \subseteq A$ 。 C_j^i 中无人机的选择需要考虑到如下约束和目标。

1) 资源约束。

要完成对目标的打击,对于任意一种 $p (p \in \{1,2,$

$\dots, n\})$,联盟成员的总和要大于打击目标所需资源,即

$$\sum_{k \in C_j^i} R_{kp}^A \geq R_{jp}^T \quad p = 1,2,\dots,n \quad (3)$$

2) 快速完成打击。

为了缩短打击任务的完成时间,发现目标后要求在最短时间内完成对目标的攻击。联盟中的各架无人机通过调节 Dubins 路径的半径来协调到达目标时间,实现同时到达目标所在位置,一起对目标发起攻击。整个联盟的到达时间是由联盟中最晚到达的无人机所决定的,联盟 C_j^i 到达时间可以表示为

$$\tau_c^{T_j} = \max_{k \in C_j^i} \lambda_k \quad (4)$$

3) 联盟规模小。

搜索打击任务的完成时间是由搜索时间和打击时间两部分构成,每次组建联盟时都使其规模尽可能小,使得更多的无人机参与对未知区域的搜索,在更短的时间内发现目标,从而缩短整个搜索打击任务的完成时间,用 $|C_j^i|$ 表示联盟 C_j^i 中无人机的架数。

综上,组建联盟优化模型可以表示为

$$\min_{C_j^i \subseteq A} \max_{A_k \in C_j^i} \lambda_k \quad (5)$$

$$\min_{C_j^i \subseteq A} |C_j^i| \quad (6)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{k \in C_j^i} R_{kp}^A \geq R_p^T \quad p = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

式(5)表示联盟到达的时间最短,式(6)表示联盟包含最少架无人机,式(7)表示联盟资源约束。

3 并行 NSGA-II

联盟的组建是一个多目标优化问题,多目标遗传算法的核心就是协调各目标函数之间的关系,找出使各目标函数能尽量达到比较优的最优解集——Pareto 最优解。

非支配排序遗传算法^[9](NSGA)是由 SRINIVA 和 DED 于 1995 年提出的。2000 年,他们对 NSGA 进行改进,提出 NSGA-II^[10],一种快速的非劣性排序方法:定义拥挤距离估计某个点周围的解密度取代适应值共享。NSGA-II 在 NSGA 基础上做出了 3 大改进。

1) 引入的快速非支配排序算法使计算复杂性从 $O(M \cdot N^3)$ 降至 $O(M \cdot N^2)$ 。

2) 具备精英保留机制。

3) 采用拥挤度比较算子代替了 NSGA 中的适应度共享算法。NSGA-II 进一步提高了计算效率和算法的鲁棒性。该算法得到的非劣解在目标空间分布均匀,收敛性和鲁棒性好,已成为多目标优化领域的基准算法之一。

考虑算法的实时性要求,本文进一步优化算法,引入了并行设计。参考 GA 的粗粒度模型^[11],将随机生成的初始种群分割成若干个子种群,各子种群按照 NSGA-II 算法进行迭代寻优;采用同步迁移策略,每经过一定的迭代代数时,向相邻子种群迁移发送最优解集,并用相邻种群迁入的最优粒子取代本子种群的最差粒子,从而引入其他子种群的优秀基因,快速丰富各子种群的多样性。算法达到停止条件之后,合并所有的子种群,对整个种群进行非劣排序,得到非劣解。图 2 为本文提出的并行 NSGA-II 算法流程。

用并行 NSGA-II 选择无人机组建联盟,采用二进制编码对候选无人机集合 A 进行编码,1 表示该无人机加入联盟,0 表示无人机不加入联盟。使用 NSGA-II

算法进行求解得到种群的非劣解集,联盟发起人 A_i 按照需求从非劣解集中选择出最合适的解作为本次联盟。

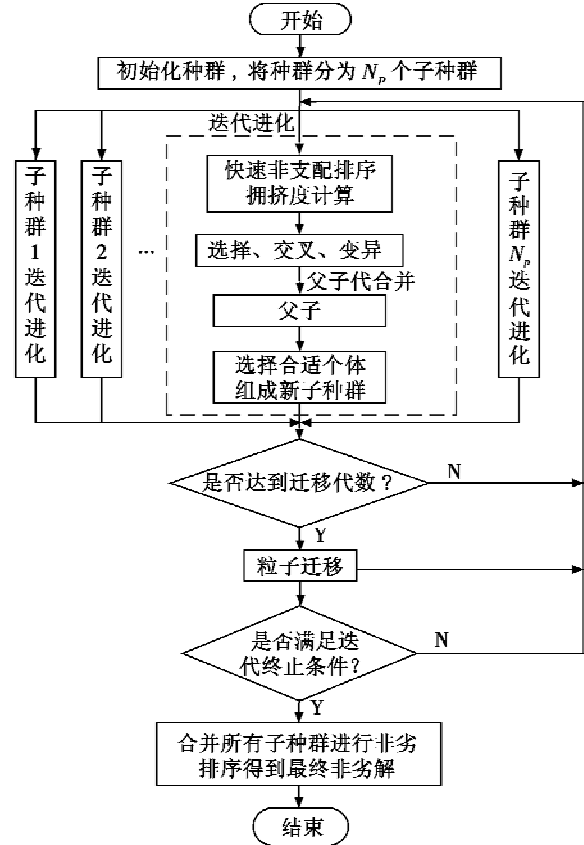


图 2 并行 NSGA-II 流程

Fig. 2 Flow chart of parallel NSGA-II

4 仿真结果与分析

4.1 并行 NSGA-II 仿真结果与分析

在仿真算例中,任务区域为 2000 m × 2000 m 的矩形区域,在区域内设置 3 个目标,使用 6 架无人机执行搜索和打击任务。考虑到无人机的异构性,在仿真中设置各无人机的性能参数和资源向量均不同。表 1 为无人机的初始状态,表 2 为目标的目标初始状态,其中, (x_i, y_i) 表示 A_i 的初始位置, Ψ_i 表示初始速度方向, v_i 为初始速度大小, r_{\min}^i 为最小转弯半径, s_i 为探测半径。

表 1 无人机初始状态

Table 1 Initial state of UAV formation

A_i	$(x_i, y_i)/m$	$\Psi_i/(^\circ)$	$v_i/(m \cdot s^{-1})$	r_{\min}^i/m	s_i/m	R_i^A
1	(-100, -190)	20	23	90	100	(2, 2, 3)
2	(150, -50)	0	25	100	400	(2, 1, 1)
3	(900, 700)	70	25	100	300	(1, 3, 2)
4	(-800, 800)	270	30	150	250	(1, 2, 1)
5	(-900, -600)	320	30	150	300	(1, 2, 0)
6	(30, 850)	330	25	130	250	(1, 1, 3)

表2 目标初始状态

Table 2 Initial state of target formation

T_j	$(x_j, y_j)/m$	R_j^T
1	(300, -200)	(3, 5, 4)
2	(-600, 500)	(3, 1, 2)
3	(0, 100)	(1, 1, 1)

当 $t=0$ s 时, A_1, A_2 同时发现目标 T_1, T_3 , 在本文中, 当多架无人机同时发现目标时, 规定由序号小的无人机先行选择目标, 优先选择序号小的目标进行打击。首先由 A_1 作为联盟长机完成对目标 T_1 的打击, 此时包括 A_1 在内的联盟候选集合 $A = \{A_1, A_3, A_4, A_5, A_6\}$, 通过并行 NSGA-II 得到非劣解为 $\{A_1, A_3\}, \{A_1, A_5, A_6\}$, 最快达到时间分别为 79.2 s, 75.4 s。本文在非劣解集中优先选择无人机架数少的解, 因此组建联盟 $C_1^1 = \{A_1, A_3\}$ 对目标 T_1 进行打击。

当 A_1 完成联盟 C_1^1 的组建后, A_2 开始进行联盟组建, 打击对象为 T_3 。由于 A_2 的资源向量 R_2^A 满足 T_3 的资源需求, 因此不需要组建联盟, 可以独自完成对 T_3 的打击。当 $t=5$ s 时, A_4 发现 T_2 , 此时联盟候选集 $A = \{A_4, A_5, A_6\}$ 。无人机 A_4, A_5, A_6 才能够满足打击 T_2 所需资源, 组建联盟 $\{A_4, A_5, A_6\}$ 。图3为所有无人机飞行路线图。

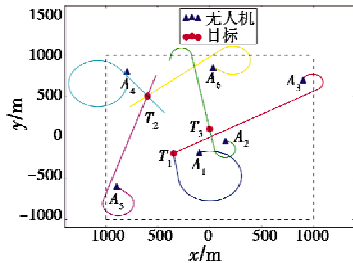


图3 无人机飞行路径

Fig. 3 UAV flight path

上述仿真结果验证了并行 NSGA-II 的合理性和可行性。当多架无人机执行搜索打击任务时, 发现目标后采用并行 NSGA-II 组建联盟, 可以集中优势兵力在较短的时间内完成对目标的打击, 并减少资源的浪费, 提高了任务的执行效率。

4.2 并行 NSGA-II 算法运行速度分析

组建联盟是一个在线规划过程, 实时性显得至关重要, 为了分析并行 NSGA-II 算法的实时性, 分别取联盟候选无人机架数为 5, 10 和 15 做仿真实验, 得到算法在不同种群数下的运行时间。

在仿真实验中设置目标资源个数为 $n=3$, 每个子种群中种群数固定为 20, 算法迭代次数为 40, 粒子迁移代数为 20, 设置子种群个数为 1~8, 在 CPU 主频 2.4 GHz 下, 算法运行时间如图4所示。

从图4中可以看出: 随着无人机架数的增加, 算法

运行时间缓慢增加, 无人机架数增多对算法运行速度影响很小; 随着种群数的不断增加, 算法运行时间平缓增加, 多个子种群需要开辟多个进程, 会消耗一定的 CPU 资源, 导致算法运行时间不断增加; 当种群数在 100 以内时, 3 种情况的算法运行时间都在 1 s 以内, 而当种群数为 100, 迭代次数为 40 时, 足够 NSGA-II 求解大规模的问题, 表明了算法具有很好的实时性。

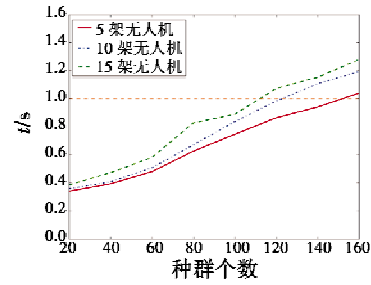


图4 NSGA-II 运行时间

Fig. 4 Time cost of NSGA-II

4.3 并行 NSGA-II 与 MSOCFA 对比

为了验证并行 NSGA-II 的求解性能, 将本文方法与文献[12]中的 MSOCFA 方法进行比较分析, 该方法对联盟候选集中无人机到达时间从小到大依次选择无人机加入联盟, 直到联盟资源满足目标资源要求。

采用蒙特卡罗方法, 选取目标数量为 5。设定无人机数量分别为 5, 10, 15 和 20。进行 4 组对比实验, 每组实验仿真 100 次, 统计两种算法的任务完成率取平均值。

在每次仿真中, 任务区域仿真步长的设置与 4.1 节中一致, 为了减少无人机性能对算法的影响, 设定所有无人机速度为 15 m/s, 转弯半径为 100 m, 探测距离为 300 m, 同时设定最大仿真时间 $t=400$ s。目标的位置、无人机的初始位置和初始航向均是随机生成的。资源向量长度 $n=3$, 无人机资源为区间 $[1, 3]$ 中的随机整数, 目标资源向量为区间 $[2, 4]$ 中的随机整数。任务完成率如图5所示。

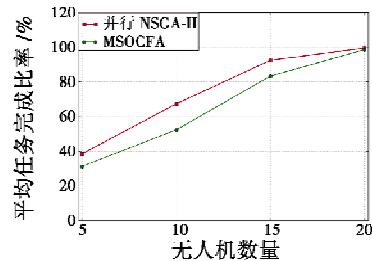


图5 并行 NSGA-II 与 MSOCFA 对比

Fig. 5 The contrast of parallel NSGA-II with MSOCFA

从图5可以看出, 当无人机数量分别为 5, 10, 15 时, 在相同时间内并行 NSGA-II 能够发现和打击更多的目标。当无人机数量为 20 时, 此时无人机过多, 两

种算法都能够完成全部目标的打击。对比 MSOCFA, 并行 NSGA-II 能够更好地利用资源, 任务完成率更高。

5 结束语

本文采用联盟的思想来解决未知环境下异构多无人机协同搜索打击时的任务分配问题, 建立了多无人机协同打击组建联盟的多目标优化模型。采用并行 NSGA-II 算法求解组建联盟优化模型, 用具体的仿真算例验证了算法的合理性, 分析了算法在不同规模无人机下的运行速度, 证明了算法具有良好的实时性, 最后通过蒙特卡罗方法与传统方法进行比较, 证实了通过并行 NSGA-II 算法组建联盟能够显著提高任务的完成效率。在本文中, 没有考虑诸如通信距离、通信时延等通信约束对联盟组建的影响, 后续工作可以针对该问题展开研究。

参 考 文 献

- [1] RASMUSSEN S, SHIMA T, RASMUSSEN S J. UAV cooperative decision and control: challenges and practical approaches[M]. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2009.
- [2] SCHUMACHER C, CHANDLER P R, RASMUSSEN S R. Task allocation for wide area search munitions via network flow optimization [C] // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Montreal, Canada, 2001: AIAA 2001-4147.
- [3] SCHUMACHER C, CHANDLER P R, RASMUSSEN S J. Task allocation for wide area search munitions via iterative network flow [C] // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Monterey, California, 2002: AIAA 2002-4586.
- [4] SCHUMACHER C, CHANDLER P R, PACTER M, et al. UAV task assignment with timing constraints [C] // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Austin, 2003: AIAA 2003-5664.
- [5] SCHUMACHER C, CHANDLER P R, PACTER M, et al. UAV task assignment with timing constraints via mixed integer linear programming [C] // The 3rd Unmanned Unlimited Technical Conference, Workshop and Exhibit, Chicago, 2004: AIAA 2004-6410.
- [6] YANG L C. Practical problems and solutions in age trend-line analyses for energetic components [C] // The 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Cincinnati, 2007: AIAA 2007-5135.
- [7] ALIGHANBARI M, HOW J P. Decentralized task assignment for unmanned aerial vehicles [C] // Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference, Seville, 2005: 5668-5673.
- [8] SHIMA T, RASMUSSEN S J, SPARKS A G, et al. Multiple task assignments for cooperating uninhabited aerial vehicles using genetic algorithms [J]. Computers & Operations Research, 2006, 33(11): 3252-3269.
- [9] 钱艳平, 夏洁, 刘天宇. 基于合同网的无人机协同目标分配方法 [J]. 系统仿真学报, 2011, 23(8): 1672-1676.
- [10] DEB K, AGRAWAL S, PRATAB A, et al. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II [R]. Kanpur: KanGAL Report 200001, Indian Institute of Technology, 2000.
- [11] MUHLENBEIN H, SCHOMISCH M, BORN J. The parallel genetic algorithm as function optimizer [J]. Parallel Computing, 1991, 17(6): 619-632.
- [12] 刘重, 高晓光, 符小卫, 等. 未知环境下异构多无人机协同搜索打击中的联盟组建 [J]. 兵工学报, 2015, 36(12): 2284-2297.
- [13] (上接第 13 页)
真与评估研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2003.
- [14] 陈斐. 无人机载的雷达欺骗设备研究与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [15] 戴小军. 对脉冲多普勒雷达干扰技术研究 [D]. 镇江: 苏科技大学, 2013.
- [16] 陈绪龙, 高剑, 韩星. 空中目标威胁等级评估方法研究 [J]. 火控雷达技术, 2015, 44(1): 19-23.
- [17] 黄培康, 殷红成, 许小剑. 雷达目标特性 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [18] 胡小川. 机载相控阵雷达模拟器系统设计与实现研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2003.
- [19] 李潮, 周金泉. 基于干扰方的干扰效果评估研究 [J]. 电子信息对抗技术, 2008, 23(2): 46-49.