

## 基于动态粒子群算法的多总线测试任务调度方法

田野, 何锋, 王彤  
(北京航空航天大学, 北京 100191)

**摘要:** 测试任务调度多考虑资源约束和任务优先级约束, 在对消息实时性要求较高的航空总线测试设备中, 需要将任务调度的实时性能作为关键衡量指标。将剩余可调度时间和总线负载均衡程度作为优化目标, 在满足资源限制的前提下结合总线协议特征, 提出一种包含精英集的动态粒子群算法进行多目标优化, 得到 Pareto 前沿和非劣解集, 并从中选择非劣解作为测试消息队列。实验仿真证明了该调度方法的有效性, 且测试消息队列能够满足高实时性要求, 并平衡总线间负载。

**关键词:** 航空电子系统; 多总线系统; 测试任务调度; 粒子群; 多目标优化

**中图分类号:** V271.4; TP206<sup>+</sup>.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-637X(2014)04-0005-05

## A Task Scheduling Method of Multi-Bus Test System Based on a Dynamic Particle Swarm Optimization Algorithm

TIAN Ye, HE Feng, WANG Tong  
(Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** The real-time performance of a scheduling method should also be regarded as one of the main goals in avionics data bus test equipment in which the real-time property of messages is highly demanded. A dynamic multi-objective particle swarm optimization algorithm is proposed, in which elitism archived strategy is used, to optimize the message queue in the objectives of maximizing the available scheduling time and balancing the bus load. The Pareto front and a non-dominated solution set are obtained. The validity and rapidity of the method are verified through simulation and a message queue is generated, which satisfies the demand of high real-time property and the balance of bus load.

**Key words:** avionic system; multi-bus system; test task allocation; particle swarm optimization; multi-objective optimization

### 0 引言

随着计算机技术、网络通信技术的飞速发展, 航空电子设备的复杂程度日益提高。航空电子设备对消息的实时性要求较高, 且随着航空电子设备性能的提高和功能的多样化, 总线承担的数据传输任务也更为繁重, 传统的测试系统已经不能满足现今设备发展的需要。因此自动测试系统(Automatic Test System, ATS)已经成为先进航空电子系统与设备可靠运行的必要保障。

为了提高测试系统的效率并使测试满足某性能指标的要求, 需要对测试任务序列进行有效调度。文献

[1]证明这类问题为 NP 问题, 无法通过传统的线性规划等方法进行求解, 目前, 部分研究先采用 Petri 网建立任务调度的模型, 后根据模型信息进行优化; 文献[2]把 Petri 网运用到测试系统的分析设计中, 对测试流程进行调度。但是其复杂度较高, 可操作性差, 更多研究使用启发式算法, 寻找近似最优解; 文献[3]采用遗传算法对测试任务调度问题进行了研究, 但是针对大带宽多总线嵌入式系统的测试环境, 要求在满足总线消息实时性的前提下平衡总线负载, 以满足测试设备的要求, 并提高测试系统的鲁棒性; 在文献[4-5]的研究中, 对测试任务调度问题仅考虑了资源约束和任务优先级约束, 并未对实时性和负载均衡进行讨论; 文献[6]中提出了各步平均负载的概念, 但未将序列的实时性能考虑进来。

本文提出了一种基于粒子群算法(Particle Swarm

收稿日期: 2013-05-30

修回日期: 2013-07-09

基金项目: 国家自然科学基金(61073012)

作者简介: 田野(1989-), 男, 河北保定人, 硕士生, 研究方向为航空总线协议及航空设备测试。

Optimization, PSO) 的测试消息调度方法, 结合现今常见航空总线的协议特点和总线的资源约束关系, 建立测试消息序列; 并对消息的实时性和总线负载的均衡程度进行衡量。最后, 通过对案例的测试仿真, 证明该算法适用于宽带多总线的消息调度, 且有良好的表现。

## 1 数学模型

### 1.1 符号定义和情景分析

本文中符号的定义为:  $\text{Msg } i$ , 消息  $i$ ,  $i$  从 0 到  $n$ ;  $B_j$ , 总线  $j$ ,  $j$  从 0 到  $m$ ;  $x_{ij}$ , 若  $\text{Msg } i$  在  $B_j$  上传输, 则  $x_{ij} = 1$ , 否则  $x_{ij} = 0$ ;  $v_j$ , 总线  $j$  的传输速率;  $p_i$ ,  $\text{Msg } i$  的重要性;  $\text{scale } i$ ,  $\text{Msg } i$  对应的时间窗口;  $s_i$ ,  $\text{Msg } i$  时间窗口的开始时间;  $u_i$ ,  $\text{Msg } i$  在时间窗口内开始发送的时间;  $l_i$ ,  $\text{Msg } i$  长度;  $l'_i$ ,  $\text{Msg } i$  在总线  $B_j$  经过封装后的长度;  $d_i$ ,  $\text{Msg } i$  时间窗口的截止时间;  $r_i$ ,  $\text{Msg } i$  发送结束后时间窗口的剩余时间;  $t_i$ ,  $\text{Msg } i$  发送时占用总线的时长;  $T_j$ , 总线  $B_j$  调度周期的可用时长。

考虑以下几种情景。

1) 航空总线上的消息分为周期性消息和非周期性消息。两类消息都需要实时性能保障, 同时, 周期性消息要保证周期特性。因此, 每条消息均有一个发送时间窗口: 若早于此窗口, 消息内容可能还未填充, 导致消息内容的错误; 若迟于此窗口, 消息未能及时发送, 实时性无法得到保障, 周期性被破坏。

2) 每条总线的协议标准不同, 消息分配到不同的总线后, 封装得到的数据块的格式和长度也不同; 同时, 不同的总线有各自的发送机制和调度规则, 故总线可使用的时间段也不同。

3) 每条消息都有可能分配到不同的总线发送, 周期性消息也可能分配到不同的总线, 未经优化的消息调度规则可能造成某总线在某时间段内过于拥挤。

4) 由于资源约束, 每条总线上消息的发送时间不可重叠。

目标是获得一种消息的分发方案, 在满足资源约束的前提下, 使得系统内消息的实时性最强, 不同总线的负载相对均衡。本调度系统中, 参考航空总线协议中的方法, 将某段时间作为周期, 在周期内将消息进行分发, 并重复此周期。

### 1.2 实时性能保障

将每条消息发送结束后, 距离该消息截止期限的时间段称为可调度时间, 作为衡量消息实时性能的指标, 该时间段越长, 则消息的实时性保障越好。消息分发方案  $X$  可表示为

$$X = \{x_{ij}\}, 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m \quad (1)$$

其中,  $\text{Msg } i$  的发送时间窗口为  $\text{scale } i$ , 时间窗口的全局

开始时间为  $s_i$ , 消息在时间窗口内开始发送的时间为  $u_i$ , 若消息在总线  $B_j$  上发送, 则发送时占用总线的时长

$$t_i = \frac{l'_i}{v_j} x_{ij} \quad (2)$$

则消息  $\text{Msg } i$  发送结束后, 距离截止时间还有

$$r_i = d_i - u_i - t_i \quad (3)$$

剩余时间越长, 则消息的实时性保障越好。

在调度的过程中, 可能会遇到不同消息在同一时间申请发送的情况, 此时两条消息需要先后发送, 则后发送的消息实时性能就会被一定程度减弱, 而每条消息的重要性不同, 因此定义了消息重要性  $p_i$ , 衡量调度方案对系统稳定性的影响。对整个系统, 所有消息的可调度时间和为

$$C(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (d_i - u_i - \frac{l'_i}{v_j} x_{ij}) p_i \quad (4)$$

其中,  $p_i$  为消息  $\text{Msg } i$  的重要性, 重要性越大,  $p_i$  的值越大, 其可调度时间在系统可调度时间和中所占的比重越大。

### 1.3 总线负载均衡

消息分发后, 为了在充分利用总线资源的基础上平衡总线间的负载, 定义系统总线负载均衡度。在一个大周期内, 以总线的占用时间来衡量总线的负载, 用各总线占用时间的方差来衡量总线负载的均衡度。同样, 对消息分发方案  $X$ , 消息  $\text{Msg } i$  发送时占用总线的时间为

$$t_i = \frac{l'_i}{v_j} x_{ij} \quad (5)$$

对总线  $B_j$ , 其负载为

$$L_j = \sum_{i=1}^n \frac{l'_i}{v_j} x_{ij} \quad (6)$$

对  $m$  条总线, 其平均负载为

$$\bar{L} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \frac{l'_i}{v_j} x_{ij} \quad (7)$$

则系统的负载均衡度为所有总线负载的方差

$$B(X) = \sum_{j=1}^m (\sum_{i=1}^n \frac{l'_i}{v_j} x_{ij} - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \frac{l'_i}{v_j} x_{ij})^2 \quad (8)$$

方差可以衡量各总线负载的差异程度, 方差越大说明负载的差距越大, 不利于保障高负载总线上消息的实时性; 方差小说明负载均衡度越高, 可以充分利用多总线资源, 有利于消息的实时性保障。

## 2 资源限制和消息封装

在多总线任务调度模型中, 在考虑实时性能保障和总线负载均衡的基础上, 还需要将资源限制和由总线协议规定的消息封装格式作为调度方案性能评价的影响因子。

首先, 模型中只规定了消息分配的总线, 未规定在

时间窗口中哪个时刻发送。为了保证消息的实时性,希望每条消息的可调度时间最大化,故每条消息都应在时间窗口的开始时刻发送。但是如果若干条消息分配到同一总线发送,且其时间窗口互有重叠,则在其中某些消息的时间窗口开始时刻总线仍被占用,此时需要将其发送时间推迟,直到总线空闲。

另外,在实际操作中,每种总线的协议不同,对消息进行封装的方式不同,则同一消息在不同总线封装结束后得到的数据块长度不同。故此处以  $l_i^j$  表示 Msg  $i$  在总线  $j$  上发送时的消息长度。同时,每种总线均有各自的同步机制,同步花销并未考虑在算法当中,但是占用的时间会影响消息发送的实时性。以下以 FC 总线和 TTE 协议为例,讨论这两种总线上的协议花销。

### 2.1 光纤通道协议

光纤通道 (Fiber Channel, FC) 标准是一种高速串行传输协议。经过多年的发展,FC 技术因具有高速率、低延迟、低位错率等特性,能够很好地满足新兴航空电子互连系统的要求,目前已经成为航空电子统一网络的主要候选协议。

FC 帧由帧起始标记 (SOF)、帧头 (Frame Header)、帧载荷 (Payload)、校验位 (CRC) 和帧结束标记 (EOF) 组成。SOF、CRC 和 EOF 都是由 4 个字节,即一个传输字组成。帧头由 6 个传输字组成,它包括字段描述信息和帧处理信息等,用来唯一地标识一个帧<sup>[7]</sup>。加上可选帧头信息,负载最多能有 528 个传输字 (2112 字节),如图 1 所示。

SOF		Frame Header		Payload	CRC	EOF
Word	Bits	31...24	23...16	15...08	07...00	
0		R_CTL	D_ID			
1		CS_CTL / Priority	S_ID			
2		TYPE	F_CTL			
3		SED_ID	DF_CTL	SEQ_CNT		
4		OX_ID		RX_ID		
5		Parameter				

图 1 FC 协议帧格式  
Fig. 1 FC frame format

因此,如果有一个长度  $l_i$  小于 2112 字节的消息,则在 FC 总线上发送时,其长度会变为  $l_i^j = l_i + 36$  字节。

### 2.2 TTE 协议

TTE (Time-Trigger Ethernet), 即时间触发以太网,为端系统和交换机构建并维护了同步的时间。

在同步操作中被发送和压缩的协议控制帧被称为所谓的集成帧 (integration frames)。集成帧按照某个可配置的周期,即集成循环持续时间被调度和派发。

一个全面的集群循环 (cluster cycle) 包含一个数目可配置的集成循环,如图 2 所示<sup>[8-9]</sup>。而在调度过程中,要考虑到协议控制帧对消息时间窗口的影响,若时间窗口与集成帧有重合,则需要对其进行调整,使其在消息时间窗口中发送。

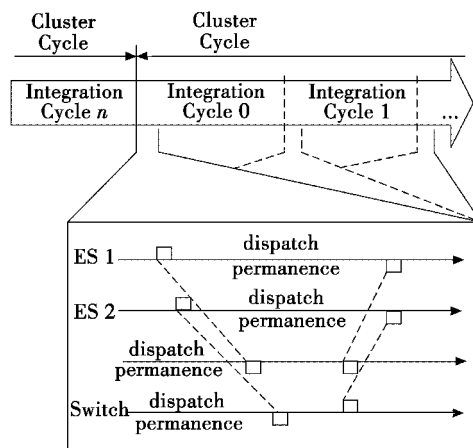


图 2 集群循环和集成循环示意图  
Fig. 2 Integration cycle and cluster cycle

## 3 动态粒子群算法

对上文提出的消息调度问题,一般的解决办法为使用智能算法寻找近似最优解。本文提出一种基于 PSO 的算法来解决消息分发的的问题。

PSO 算法最早由 J Kennedy 和 R C Eberhart 于 20 世纪 90 年代提出,其源于对鸟群觅食行为的研究。研究者发现鸟群在飞行过程中经常会突然改变方向、散开、聚集,其行为不可预测,但其整体总保持一致性,个体与个体间也保持着最适宜的距离。通过对类似生物群体的行为的研究,发现生物群体中存在着一种社会信息共享机制,它为群体的进化提供了一种优势。大量研究表明,该算法操作简便,依赖的经验参数较少,具有收敛速度快、避免陷入局部最优等优点,已成功应用于求解多维非线性函数优化、神经网络训练、整数优化等问题。

### 3.1 粒子表示

为了使用粒子群优化算法解决消息分发问题,首先要对消息分发方案进行编码,合适的编码方案会使算法计算的复杂度大大降低。在本文中,分配方案  $X$  为一个稀疏的矩阵,每个位置为 0 或 1。这种编码方式效率较低,未能充分利用粒子的空间。因此将第  $q$  个粒子表示为

$$P_q = (p_{q1}, p_{q2}, \dots, p_{qm})^T \quad (9)$$

其中,  $p_{qi}$  的值代表第  $i$  条消息分配到的总线的序列号。由于总线共有  $m$  条,故  $p_{qi}$  的取值范围为  $\{1, 2, \dots, m\}$ 。

### 3.2 多目标动态粒子群算法

在标准 PSO 算法中,首先随机产生一组解,每个解即为一个粒子。每个粒子会以一定速度移动,而速度会随着该粒子之前的路径和整个种群的路径调整。在过去的研究中,许多模型已经被提出,本文采用的模型<sup>[10-12]</sup>为

$$v_{id} = w * v_{id} + c_1 * R * (p_{best} - p_{id}) + c_2 * R * (g_{best} - p_{id}) \quad (10)$$

$$p_{id} = p_{id} + v_{id} \quad (11)$$

其中: $v_{id}$ 为粒子移动的速度,即粒子更新位置时从现在位置移动的距离; $p_{id}$ 为粒子*i*现在的位置; $p_{best}$ 为局部最优,即该粒子之前路径上的最佳位置; $g_{best}$ 为全局最优,即种群中所有粒子的最佳位置; $R$ 为0到1的随机数; $c_1$ 、 $c_2$ 为学习因子; $w$ 是惯性权重。

在本算法中,消息的实时性和总线负载的均衡度为优化的两个目标,故要在标准粒子群算法的基础上进行改造,使之适应多目标优化的场景。本文采用了基于密度距离的多目标粒子群算法,通过精英集中个体间的距离,动态选择全局最优和个体最优,事实证明这种方法有利于算法逼近 Pareto 最优。算法的主要步骤如下所述。

1) 随机初始化粒子和速度,将各粒子作为各自初始个体最优位置。

2) 计算各粒子的适应度函数,并判断各粒子间的 Pareto 支配关系,将非劣解加入到精英集中,计算精英集粒子间的决策空间距离

$$d(i,j) = \|x_i - x_j\| \quad (12)$$

3) 当迭代次数小于最大迭代次数时:

① 选择精英集中处在最为稀疏位置的解作为全局最优解,更新粒子的速度和位置,并对越界粒子进行重新随机初始化;

② 计算每个粒子的适应度函数,并判断其与精英集中粒子的支配关系,以此为依据剔除精英集中的劣解,更新精英集;

③ 若精英集超过最大容量,则剔除处在最为密集位置的非劣解,直到精英集回到正常大小;

④ 若粒子当前位置支配其个体最优位置,则进行更新,若个体最优位置支配当前位置,则保留原个体最优位置,若当前位置与个体最优位置互不支配,则随机选择一个作为新的个体最优位置。

4) 结束迭代,此时精英集即为非劣解集。

## 4 实验与仿真

为了测试多目标动态粒子群算法在实际应用中的效果,本文采用了表1中所示的消息集和总线集作为测试案例,在 Matlab 中分别采用本文提出的多目标动

态粒子群算法对测试消息集进行调度,得到非劣解集和 Pareto 前沿。

表1 消息列表  
Table 1 Message list

消息 ID	消息长度/kb	消息重要性	发送时间范围/ $\mu\text{s}$	
			起始时间	截止时间
MSG 01	5	3	0	15
MSG 02	20	1	5	65
MSG 03	15	1	90	135
MSG 04	50	1	140	290
MSG 05	10	2	130	160
MSG 06	15	2	350	395
MSG 07	25	1	500	575
MSG 08	5	3	700	715
MSG 09	30	2	700	790
MSG 10	50	1	850	1000
MSG 11	5	3	1150	1165
MSG 12	10	3	1300	1330
MSG 13	5	3	1305	1320
MSG 14	25	2	1400	1475
MSG 15	30	1	1560	1650
MSG 16	20	2	1750	1810
MSG 17	30	1	1900	1990
MSG 18	5	1	1920	1935
MSG 19	15	2	2100	2145
MSG 20	15	3	2200	2245

态粒子群算法对测试消息集进行调度,得到非劣解集和 Pareto 前沿。

测试中使用的总线采用了4条已经较为成熟或正在发展中的先进的航空总线协议,分别为 TTE 总线、1394 总线和两条 FC 总线。这些总线协议的通信速率如表2所示。

表2 总线列表  
Table 2 Bus list

总线协议	总线编号	通信速率/(Gb·s <sup>-1</sup> )
FC1	BUS1	1
FC2	BUS2	1
1394	BUS3	0.8
TTE	BUS4	1

当采用的总线速率较为接近时,使用调度算法可以得到较为理想的调度结果。使用本文中的粒子群优化算法,粒子数设为100,精英集大小为200,迭代次数为100,得到一组非劣解集和 Pareto 前沿如图3~图4所示。

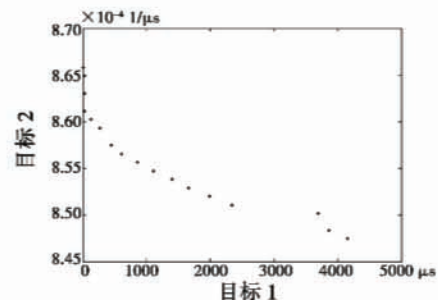


图3 非劣解集

Fig. 3 Pareto solution

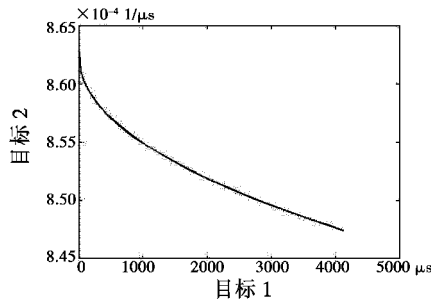


图4 Pareto 前沿  
Fig. 4 Pareto front

该组非劣解集为(6.25, 0.000862), (23, 0.000865), (26, 0.000863), (29, 0.000861), (127, 0.00086), (267, 0.000859), (442, 0.000857), (610, 0.000857), (854, 0.000856), (1106, 0.000855), (1401, 0.000854), (1656, 0.000853), (1986, 0.000852), (2342, 0.000851), (3697, 0.00085), (3864, 0.000848), (4156, 0.000847)。通过对比,选择(6.25, 0.000862)作为最优解并作出调度甘特图,如图5所示。

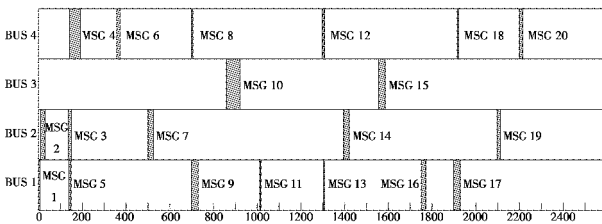


图5 消息调度甘特图  
Fig. 5 Gantt chart of message scheduling

在甘特图中,各总线的负载均衡度较高,每条消息均在时间窗口的起始时间处发送,且在截止时间前均无其他消息抢占总线,故对消息的实时性保障较强。该解在总线负载均衡和实时性保障能力方面符合预期,能够很好地解决多总线测试任务的调度问题。

### 5 结束语

为了保障多总线测试系统的消息实时性,并平衡各总线的负载,本文提出一种基于动态多目标粒子群算法的调度方法,在满足总线资源限制并结合总线协议特征,将消息可调度时间和及总线负载方差作为优化目标,建立测试消息序列。实验仿真证明,通过该方法建立的测试序列,在总线负载和消息实时性之间做出平衡,能够满足高实时性要求下的多总线测试系统的需求。

### 参考文献

[1] GAREY M R, JOHNSON D S. A guide to the theory of NP-completeness[DB/OL]. [2013-04-30] <http://www.di.unipi.it/~luccllo/GJCap1.PDF>.

[2] 李华,许化龙. 基于时间 Petri 网的并行测试任务调度[J]. 计算机测量与控制,2010,18(3):501-503.  
LI H, XU H L. Task scheduling of parallel test based on timed Petri net[J]. Computer Measurement and Control, 2010, 18(3):501-503.

[3] 孙瑞志,杨璐,欧阳娅. 基于改进遗传算法的网格任务调度[J]. 解放军理工大学学报:自然科学版,2012,13(4):388-392.  
SUN R Z, YANG L, OUYANG Y. On grid task scheduling based on modified genetic algorithm[J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2012, 13(4):388-392.

[4] 马敏,陈光祜,陈东义. 基于 Petri 网和模拟退火遗传算法的并行测试研究[J]. 仪器仪表学报,2007,28(2):331-336.  
MA M, CHEN G J, CHEN D Y. Research on parallel test based on Petri net and GASA algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(2):331-336.

[5] 夏锐,肖明清,程进军. 基于混合遗传退火算法的并行测试任务调度优化[J]. 系统仿真学报,2007,19(15):3564-3567.  
XIA R, XIAO M Q, CHENG J J. Optimization for the parallel test task scheduling based on hybrid GASA[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(15):3564-3567.

[6] LU H, NIU R, LIU J, et al. A chaotic non-dominated sorting genetic algorithm for the multi-objective automatic test task scheduling problem[J]. Applied Soft Computing, 2013, 13(5):2790-2802.

[7] 林强,熊华钢,张其善. 光纤通道综述[J]. 计算机应用研究,2006,23(2):9-13.  
LIN Q, XIONG H G, ZHANG Q S. Survey of fibre channel[J]. Application Research of Computers, 2006, 23(2):9-13.

[8] SAE A6802. Time-triggered ethernet[S]. SAE Aerospace Standard, 2011.

[9] 刘晚春,李峭,何锋,等. 时间触发以太网同步及调度机制的研究[J]. 航空计算技术,2011,41(4):122-127.  
LIU W C, LI Q, HE F, et al. Research on time-triggered-ethernet synchronization and scheduling mechanism[J]. Aeronautical Computing Technique, 2011, 41(4):122-127.

[10] 杨啸天,冯金富,冯媛,等. 基于遗传粒子群的多传感器目标分配算法[J]. 电光与控制,2011,18(3):5-8.  
YANG X T, FENG J F, FENG Y, et al. A multi-sensor target assignment algorithm based on genetic particle swarm optimization[J]. Electronics Optics & Control, 2011, 18(3):5-8.



## 4 结 论

本文首先讨论采用先跟踪后检测的 TBD 方法进行激光弱目标检测的可行性,之后,对多帧组合激光回波组成的距离像进行预处理,以降低输入航迹跟踪算法的数据量。接着,针对经典 HT 在参数空间映射方法存在无效映射及批处理投票缺乏实时性等问题,提出了依据空中目标速度约束条件选取样本进行收敛映射和在线投票的改进 HT 检测算法。收敛映射方法减少了参与参数空间映射的运算量,提高了算法的实时性。相比传统批处理方式的 HT 算法,改进算法可以实现在线实时投票。目标捕获时间可因信噪比不同而不同,信噪比大时可以迅速捕获目标,信噪比低时则以时间换取检测概率。仿真实验结果表明,改进目标航迹检测算法在信噪比大于等于 0.8 dB 时都具有较好的性能。

### 参 考 文 献

- [1] 孙立宏,王俊. 用于雷达弱小目标检测的改进 TBD 算法[J]. 雷达科学与技术,2007,5(4):292-295.  
SUN L H, WANG J. An improved track before detect algorithm for radar weak target detection[J]. Radar Science and Technology, 2007, 5(4):292-295.
- [2] VELEVA S, KACIC L. Estimating box-dimension by sign counting[C]//28th International Conference Information Technology Interfaces ITI 2006, Cavtat, Croatia, June 19-22, 2006:575-580.
- [3] 刘敬民,王浩,张洁. 先进战斗机光电综合系统发展综述[J]. 光电技术应用,2007(6):4-6,19.  
LIU J M, WANG H, ZHANG J. Development summary of integrated EO sensors systems in advanced fighters[J]. Electro-Optic Technology Application, 2007(6):4-6, 19.
- [4] XIA G F, ZHAO B J. Detection of air target based multi-fractal analysis in a laser radar[J]. Chinese Optics Letters, 2007, 5(1):51-53.
- [5] 平庆伟,夏桂芬,赵保军. 基于动态规划的激光雷达信号检测[J]. 激光与红外,2006,36(10):985-987.  
PING Q W, XIA G F, ZHAO B J. The signal detectron of laser radar based on dynamic programming[J]. Laser & Infrared, 2006, 36(10):985-987.
- [6] SU G, LIU Y Z, CHEN H. An adaptive channel prediction algorithm based on fractal brownian motion model[C]//Proceedings of SPIE, 2005, 985:1-5.
- [7] BERTLING K, TUCKER J R, RAKIC A D. Optimum injection current waveform for a laser rangefinder based on the self-mixing effect[C]//Proceedings of SPIE, Int. Soc. Opt. Eng. 2003, 5277:334-345.
- [8] AGORIS P D, MEIJER S, GULSKI E, et al. Threshold selection for wavelet denoising of partial discharge data[C]//Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation Indianapolis, IN USA, 2004:62-65.
- [9] ZHANG L, BAO P. Denoising by spatial correlation thresholding[C]//IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2003, 13(6):535-538.
- [10] YOON B J, VAIDYANATHAN P P. Wavelet-based denoising by customized thresholding[C]//Acoustics, Speech and signal Processing, 2004, doi:10.1109/ICASSP.2004.1326410.
- [11] CHEN Y, HAN C. Adaptive wavelet threshold for image denoising[J]. Image Processing, 2002, 9:1532-1546.
- [12] ZHAO Z D. Wavelet shrinkage denoising by generalized threshold function[C]//Proceedings of the Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Guangzhou, 18-21 August, 2005:5501-5550.
- (上接第 9 页)
- [11] 李纬,张兴华. 一种改进的基于 Pareto 解的多目标粒子群算法[J]. 计算机仿真,2010,27(5):96-99.  
LI W, ZHANG X H. An improved multi-objective particle swarm optimization algorithm based on Pareto[J]. Computer Simulation, 2010, 27(5):96-99.
- [12] 王云,冯毅雄,谭建荣,等. 基于多目标粒子群算法的柔性作业车间调度优化方法[J]. 农业机械学报, 2011,42(2):190-196.  
WANG Y, FENG Y X, TAN J R, et al. Optimization method of flexible job-shop scheduling based on multiobjective particle swarm optimization algorithm[J]. Chinese Society For Agriculture Machinery, 2011, 42(2):190-196.