

自适应遗传算法在 ADS-B 优化布站中的应用

曹博, 刘文评, 李承尚, 刘坤

(中国民航大学智能信号和图像处理天津市重点实验室, 天津 300300)

摘要: 为提高民航安全水平、空域容量、运行效率和服务能力, 提出基于自适应遗传算法的基站选址优化方法。总结广播式自动相关监视(ADS-B)基站组网的意义、原则和评价指标。仿真 ADS-B 天线辐射特性, 计算基站安全间隔。建立基站选址优化的数学模型, 给出自适应遗传算法的求解步骤, 采用实数编码和最优保存策略, 实现 ADS-B 基站优化布站。实验结果表明, 该方法优于基本遗传算法, 能有效地指导寻优, 提高组网优化效率, 为后期基站的组网提供参考。

关键词: 监视; ADS-B; 自适应遗传算法; 安全间隔; 优化布站

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2015)06-0081-05

Application of AGA in Optimal Embattling of ADS-B

CAO Bo, LIU Wen-ping, LI Cheng-shang, LIU Kun

(Tianjin Key Lab for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: To improve the level of civil aviation security, the airspace capacity, operation efficiency and service ability, we put forward an optimal method for base station embattling based on Adaptive Genetic Algorithm(AGA). The significance, principles and evaluation index of Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) base station networking are summarized. The ADS-B antenna radiation characteristics are studied through simulation, and the safety interval between base stations is calculated out. Then a mathematical optimization model for selecting base station site is built up and the solution procedures and steps of AGA are given. By using real-number coding and optimal preservation strategy, the optimal embattling of ADS-B base station is achieved. Experimental results show that the method, which is better than the basic GA, can effectively guide the optimization, improve the efficiency of network optimization and provide a reference for the later period of the base station networking.

Key words: surveillance; ADS-B; Adaptive Genetic Algorithm (AGA); safety interval; optimal embattling

0 引言

民航运输业正在快速发展, 空中交通流量逐年递增, 导致空中交通拥挤严重, 作为新航行系统发展的重要成果, ADS-B 技术是国际上解决空中交通管制问题的有效办法之一^[1]。ADS-B 应用的主要航空器定位数据源是全球定位系统(GPS), 同时推进北斗卫星导航系统的应用, 实现多星座兼容的 GNSS 系统, 为 ADS-B 的应用提供连续、可靠、准确的定位信息。空地数据交换由航空器和地面站完成, 且数据更新率快、成本低。

相比于雷达能提供更加安全、高效的空中交通监视手段, 提高管制员和飞行员的运行态势感知能力, 扩大监视覆盖范围, 提高空中交通安全水平、空域容量与运行效率^[2-4]。雷达等传统监视手段及其布局、数量将难以满足日益增长的航空运输需要, 同时依靠单一的基站难以连续跟踪和监视飞行目标。基站组网能扩大空域监视范围和能, 基站间信息共享能有效降低虚警、漏警等, 其优越性是单部基站无法比拟的。但是, 目前 ADS-B 技术处于起步阶段, 受到多种因素的限制, 还没有一套成熟的组网理论可供遵循, 因此, ADS-B 基站组网是一个值得研究的课题^[5]。

目前, 星型布站、菱形布站、倒三角布站是基站主要布局方案。虽然此三类方法简单易行, 但往往不是最佳方案。基于此, 有学者提出将遗传算法(Genetic Algorithm, GA)应用于基站的优化布站^[6-8]。虽然遗传算法成功地应用于诸多领域, 但算法有局部搜索迟钝、

收稿日期: 2014-07-22

修回日期: 2014-08-04

基金项目: 天津市应用基础与前沿技术研究计划(14JCYBJC16000);

中央高校基本科研业务费项目(3122013C016, 3122013Z001)

作者简介: 曹博(1990—), 男, 江西萍乡人, 硕士生, 研究方向为导航台信号覆盖分析及三维可视化。

过早收敛和随机游走等问题,导致算法存在收敛性能差,经过长时间才能找到最优解等现象^[9]。针对上述问题,提出自适应遗传算法(Adaptive Genetic Algorithm, AGA)应用于 ADS-B 优化布站,算法主要包括建立优化布站数学模型,采用最优保存策略避免早熟收敛,结合实数编码提高精度。AGA 是对遗传算法的改良,通过自适应调整遗传参数,提高了遗传算法的收敛精度,加快了收敛速度,保持了群体多样性,同时保证了遗传算法的收敛性^[10]。

1 ADS-B 基站组网概述

ADS-B 基站组网是适当地、合理地优化布置多部基站,基站接收航空器机载设备发射的 ADS-B 和雷达信号,通过数据传输网输入到信息网进行数据处理,完成监视空域覆盖范围内飞行目标的监视、定位和跟踪,信息网通过信息发布网关为用户提供服务^[11-13]。ADS-B 基站组网如图 1 所示。

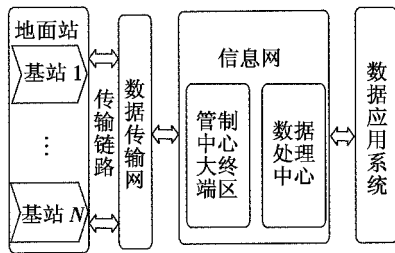


图 1 ADS-B 基站组网

Fig. 1 Schematic of ADS-B base station network

1.1 ADS-B 基站组网的原则

在监视空域、已有站点、基站数量、性能参数确定的条件下,布站方案应使监视空域中基站组网系统对目标监视空域的覆盖范围最大化、调整适当的覆盖冗余度、避免同频干扰、互补监视盲区。针对 ADS-B 系统特点对优化布站原则^[14]总结如下。

原则 1 覆盖范围最大化。责任区内 ADS-B 基站组网的覆盖范围越大,覆盖严密性越好,则监视能力越强。因此,ADS-B 基站组网对责任区的覆盖范围也尽可能大,覆盖层数尽可能多。

原则 2 适当的空域覆盖冗余度。空域覆盖冗余度越大则监视效果越好,但是过大会造成资源浪费,依据空域飞行流量和密度进行合理调整。

原则 3 避免频谱共享带来的干扰问题^[15-16]。使用 1030/1090 MHz 频率的电子系统有二次雷达、空中防撞系统、多点定位系统、ADS-B、敌我识别器和测距仪等。飞行密度的增高、复杂的空域结构,将逐渐暴露频谱共享带来的问题,相邻基站频率相同或者相近则会影响到整个网的监视能力,影响航空安全和运行效率。

因此,频率邻近的基站彼此需保持安全距离,避免相互干扰。

原则 4 补盲区域最大化。雷达和 ADS-B 基站均有顶空盲区和覆盖盲区,为了保证空域监视的严密性和连续性,基站组网应做到补盲区域最大化。

1.2 ADS-B 基站组网的性能评价指标

ADS-B 基站组网最主要的任务是对航路和管制区进行多重覆盖,扩大监视区域,减少探测盲区,基站间信号实现双向传输和信息共享,保障空中交通安全,提高空中交通服务质量。因此,监视区域的覆盖连续性与严密性是评价组网性能的首要指标;其次是跟踪目标与传输、处理目标航迹的能力;最后是发现飞行目标概率、抗干扰能力、低空监视能力等指标^[6-8]。对评价方法总结量化有如下表示方法。

- 1) 覆盖连续性与严密性。
- 2) 覆盖连续性用盲区系数表示,定义为

$$C_{BL} = \frac{\sum S_{BL}}{S_0} \quad (1)$$

- 3) 覆盖严密性用覆盖系数表示,定义为

$$C_{OV} = \frac{S_1 + S_2 + \dots + S_N}{S_0} \quad (2)$$

式中: $\sum S_{BL}$ 为责任空域内探测盲区面积; S_0 为组网责任空域面积; S_1, S_2, \dots, S_N 为每个基站在责任空域的覆盖面积。

- 4) 评价组网目标容量受基站接收数据的能力和数据传输网的传输带宽及信息网的处理显控设备量的影响。其他指标在此不再展开说明。

2 ADS-B 天线建模及顶空盲区分析

中国民用航空局规定 ADS-B 数据链采用 1090ES。依据 1.1 节原则 3 分析可知,该数据链易受干扰。在此主要考虑二次雷达与 ADS-B 之间的干扰。文献^[17]根据美国联邦航空局(FAA)标准,计算出 ADS-B 基站和雷达天线之间的安全距离为 17.4 n mile(32.2 km)。

由原则 4 可知,基站之间盲区要相互补充。分析双锥天线阵的辐射性能和方向图理论,运用有限元法的电磁仿真技术,仿真满足民航标准的 ADS-B 天线。利用二维电磁场仿真软件 HFSS 对 ADS-B 天线进行建模,以美国 dB system 公司生产的 dBs 540 天线为例,上、下锥角 $45^\circ, 30^\circ$, 锥长 $l = 60 \text{ mm}$, 阵子间距 $d = 10 \text{ mm}$, 阵子数 $N = 16$, 频率 $f = 1090 \text{ MHz}$ 。根据 FAA 标准,FAA-E-275 辐射场的 E 面的主瓣最大增益方向在 2° 仰角方向,最大增益不低于 11 dB。ADS-B 天线仿真如图 2 所示。

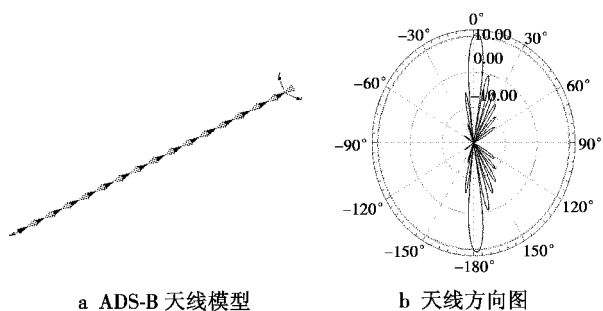


图2 ADS-B 天线仿真

Fig.2 Antenna simulation of ADS-B

从图 2b 可知,水平面方向图呈现无方向性,最大增益约 11.1 dB。为了减小地面反射造成的多径干扰,0°以下增益快速衰减。

将天线的增益数据导出,分析基站顶空盲区。参考雷达手册和视距波传输理论,计算 ADS-B 信号在自由空间仰角为 0°~90°时的辐射距离,如图 3 所示。以坐标(0 km,0 km)表示基站,纵坐标为飞行高度,横坐标为对应高度信号的辐射距离。

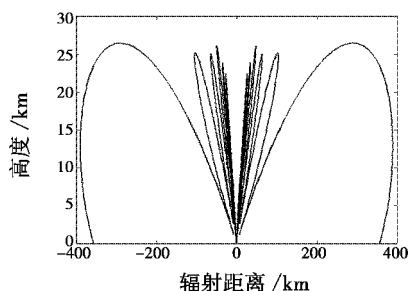


图3 飞行高度与辐射距离的关系

Fig.3 Relationship between flight altitude and radiation distance

参考我国米制 RVSM (Reduced Vertical Separation Minimum) 高度层配备标准,民航飞行高度层一般不超过 15 km。按照监视空域覆盖要求,在垂直覆盖范围内应该包括航路上的全部可巡航高度层。ADS-B 天线垂直辐射特性引起的顶空盲区需要靠另外一个基站来补充,如图 4 所示。

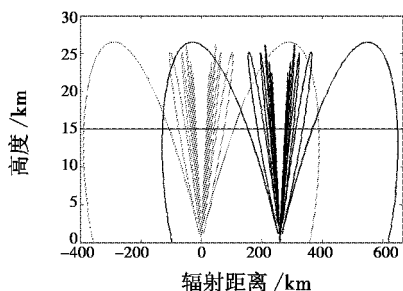


图4 两个基站顶空盲区互补

Fig.4 Complementation of overhead skip zones of two base stations

由图 4 可知,当相邻基站之间距离小于 270 km 时,可以互相补充盲区。图中两个基站分别位于(0 km,0 km),(270 km,0 km)。

3 自适应遗传算法设计

3.1 ADS-B 组网优化布站数学模型

N 部 ADS-B 基站组网,需要找到一种布站方案,获得最大的空域探测能力。为求解方便,将多目标优化通过加权转化为单目标优化,其数学模型^[6]为

$$f = \sum_{j=1}^M w_j \left[(1-\lambda) \frac{G_j}{A_g} + \lambda \frac{C_j}{A_c} \right] \quad \lambda, w_j \in [0,1], \sum_{j=1}^M w_j = 1 \quad (3)$$

式中: A_g 为警戒空域; A_c 为重点探测空域;第 j 高度层探测的警戒空域用 $G_j = \bigcup_{i=1}^N A_{ij} \cap A_g$ 表示, A_{ij} 为第 i 部基站在第 j 高度层的探测空域;将空域分为 M 层; λ 为重点探测空域内飞行目标的重要程度;组网对每个高度层的重视程度用 $w_j (j=1,2,\dots,M)$ 表示。用 $C_{sj} = \frac{G_j}{A_g}$, $C_{zd} = \frac{C_j}{A_c}$ 分别表示警戒区域覆盖系数、重点区域覆盖系数,进一步简化式(3)得

$$f = \sum_{j=1}^M w_j [(1-\lambda)C_{sj} + \lambda C_{zd}] \quad (4)$$

3.2 自适应遗传算法流程

算法流程主要包括初始化、参数编码方式、适应度函数的确定、遗传操作等,如图 5 所示。

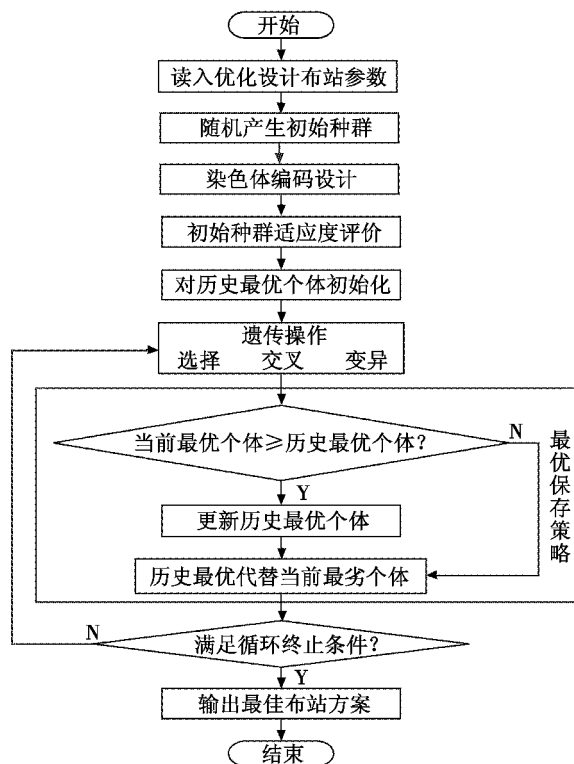


图5 AGA 算法流程框图

Fig.5 Flow chart of AGA algorithm

ADS-B 基站的组网是一个复杂的过程:首先,要综合考虑实地情况,比如地形因素、数据传输问题以及后期维护等相关实际情况;其次,技术层面还要结合信号

干扰对布站的影响、盲区的相互补充、已有站点的影响、覆盖率等问题;最后,ADS-B 基站组网对最优解精度和搜索速度有较高的要求。针对以上问题,设计自适应遗传算法。

1) 布站参数。

在自适应算法中,主要参数包括种群规模、变量范围、最大迭代次数、变异概率、交叉概率、高度层以及水平覆盖范围等。结合第2节分析,ADS-B 基站间的距离应小于270 km,与二次雷达距离应大于32.2 km。

2) 染色体编码设计。

典型的编码方式有二进制编码、格雷码编码、实数编码等。二进制编码原理简单,但精度不高。而 ADS-B 基站选址对精度有高要求,同时不能影响算法的效率,因此,采用实数编码,直接用一个实数表示每个参数,将这些实数组成一条染色体。设有 N 部 ADS-B 基站组网,各个基站的横纵坐标表示一条染色体, N 个基站可表示为: $x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_N, y_N$, 一条 $L = 2 \times N$ 位染色体对应一种组网方案。

3) 适应度函数。

适应值是更新算法中个体极值和全体极值的依据。考虑到 ADS-B 组网的覆盖率问题,将式(4)作为 AGA 的适应度函数,结合布站参数中的高度层和对应的水平覆盖范围等计算覆盖系数,以越大越好为准则。

4) 遗传操作。

选择操作是为了提高种群质量。采用适应度比例选择法选择优良个体。

由于 ADS-B 基站的选址和组网是在大空间内搜寻最优解的过程,运算量大且复杂,为了避免早熟、陷入局部极值的现象,在 AGA 运行过程中依据每一代的进化情况协调交叉概率 p_c 和变异概率 p_m 。如果 p_c 和 p_m 选择较大则演变成为随机搜索,运行时间长;选择较小又不易跳出局部极值点。构造 p_c 和 p_m 表达式为

$$p_c = \begin{cases} k_1 (f' - f_{\max}) / (f_{\text{avg}} - f_{\max}) & f' \geq f_{\text{avg}} \\ k_2 & f' < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (5)$$

$$p_m = \begin{cases} k_3 (f - f_{\max}) / (f_{\text{avg}} - f_{\max}) & f \geq f_{\text{avg}} \\ k_4 & f < f_{\text{avg}} \end{cases}$$

式中: f' 为适应值较大的交叉个体; f 为要变异的个体适应值; f_{avg} 为种群平均适应值; f_{\max} 为种群最大适应值; k_1, k_2, k_3, k_4 属于 $[0, 1]$ 。

5) 最优保存策略。

为了防止早熟收敛、每一代最优布站方案不被破坏,将最佳个体直接保留到下一代,用它来替换本代群体中经过遗传操作后适应度最低的个体。

4 仿真实验及分析

未来的监视体制和技术政策将会是雷达系统和 ADS-B 系统同时运行。假设以二次雷达为中心坐标 (250 km, 250 km), ADS-B 作为补充监视手段,在 500 km × 500 km 警戒空域, 100 km × 100 km 重点空域内部署 4 部不同类型的 ADS-B 基站; 在 1 km, 3 km, 5 km, 7 km 高度, 基站 1 最大覆盖范围分别为 75 km, 100 km, 125 km, 150 km, 基站 2 探测半径分别为 75 km, 125 km, 175 km, 200 km, 基站 3 最大覆盖范围分别为 100 km, 150 km, 175 km, 225 km; 基站 4 探测半径分别为 100 km, 150 km, 200 km, 250 km, 雷达探测半径分别为 80 km, 125 km, 180 km, 240 km; 基站覆盖范围被简化为一个圆形区域,均在理想环境下工作。初始化种群 $S = 100$, $w = \{0.25, 0.25, 0.25, 0.25\}$, 最小交叉概率 0.6, 最大交叉概率 0.9; 算法迭代 500 次, 染色体长 $L = 4 \times 2 = 8$; $\lambda = 0.1$; 最小变异概率 0.01; 最大变异概率 0.1。与文献[6]采用的 GA 做比较, 迭代运算结果如表 1 所示。

表 1 GA 与 AGA 迭代运算结果

Table 1 Iterative operation results of GA and AGA

基站	GA		AGA	
	x/km	y/km	x/km	y/km
1	102.36	106.30	395.0027	349.8097
2	393.70	381.89	130.8519	129.5748
3	161.42	334.65	344.0152	151.3708
4	334.65	153.54	167.9934	351.3708

图 6 是高度为 3 km 的组网优化效果图, 虚线圆圈代表二次雷达覆盖, 实线圆圈代表 ADS-B 覆盖。

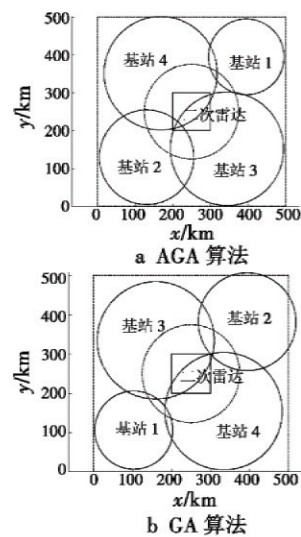


图 6 组网优化效果示意图

Fig. 6 Network optimization effect

由图可知,重点空域包括雷达覆盖和 ADS-B 覆盖,达到多重覆盖;在警戒空域内至少是 ADS-B 基站单

重覆盖;两种算法均实现了资源的合理利用,既达到空域覆盖最大化,也满足空域监视要求;适当的空域冗余度,避免了资源的过度浪费。结合表1 基站具体位置可知,相邻 ADS-B 基站距离小于 270 km,ADS-B 基站之间能够相互照应,顶空盲区可以互相补充,同时 ADS-B 基站也起到补充二次雷达顶空盲区的作用;ADS-B 基站与二次雷达间隔均大于 32.2 km,系统间互不影响。

在 3 km 高度层 GA 和 AGA 指标比较如表 2 所示。

表 2 GA 与 AGA 指标比较

Table 2 Comparison of GA and AGA

算法	指标			
	警戒区域覆盖系数 C_{gj}	重点区域覆盖系数 C_{zd}	空域覆盖系数 C_{OV}	盲区系数 C_{BL}
GA	0.721 2	1.507 5	0.878 2	0.185 7
AGA	0.729 7	1.369 4	0.886 5	0.180 0

由表 2 知,AGA 在覆盖连续性与严密性方面均优于 AG,虽然重点区域覆盖系数更小但该区域主要为雷达覆盖,因此影响不大。两种算法都有较好的整体搜寻能力,但 GA 缺乏有效的引导,不能根据种群的进化情况自适应变换变异概率和交叉概率,经过 317 代才能达到目标;在进化过程中最优解可能经过遗传操作被破坏,并且在找到较好方案后难以对基站位置进一步寻优,在整个监视空域范围内并非最优解,空域探测能力为 0.784 9;采用二进制编码算法效率低,具体表现为程序运行时间长。AGA 经过 216 次迭代计算出优化布站方案,空域探测能力为 0.793 1。因此,AGA 在节约了运算时间的同时达到了组网覆盖范围的最大化,从而有效提高空域监视能力。

5 结束

为了提高空域监视能力,提出将自适应遗传算法用于 ADS-B 基站优化布站。依据 ADS-B 系统的特点总结了 ADS-B 基站组网的概念、原则、评价指标,计算基站的安全间隔。仿真结果表明,采用的算法满足民航要求,符合组网原则,并得到了尽可能大的空域探测能力。本文方法以保证算法的收敛性为前提,最优解精度、收敛速度均优于基本遗传算法。

但是,该方法是在理想环境下进行的仿真,没有考虑地形地貌对基站建设、信号覆盖的影响和在有干扰情况下的监视能力。我国 ADS-B 的部署率先在西部进行,而西部地区地形复杂。因此,下一步的任务是考虑复杂地形下的 ADS-B 基站优化选址。

参考文献

[1] BESADA J A, MARTIN D, FRONTERA G, et al. Air-to-

air surveillance for future ATM systems [C]//Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2010 IEEE/AIAA, 2010:6. A. 6-1-6. A. 6-11.

- [2] MCCALLIE D, BUTTS J, MILLS R. Security analysis of the ADS-B implementation in the next generation air transportation system[J]. International Journal of Critical Infrastructure Protection, 2011, 4(2):78-87.
- [3] PARKINSON A. Space-based ADS-B: A small step for technology a giant leap for ATM [C]//2011 Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications-Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles (TIWDC/ESAV), IEEE, 2011:159-164.
- [4] MOODY J C, LASCARA B J, WILSON W J, et al. Assessing flight information and traffic data services uplinked to flight test aircraft [C]//Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS), 2012:07-1-07-14.
- [5] 张天平,郝建华,许斌,等. ADS-B 技术及其在空管中的发展与应用[J]. 电子产品世界, 2009, 16(6):34-37. (ZHANG T P, HAO J H, XU B, et al. Technology of ADS-B and its development and application for air traffic control [J]. Electronic Engineering & Product World, 2009, 16(6):34-37.)
- [6] 杨仕明,柯炳清,薛正辉. 基于遗传算法的区域雷达网优化布站方法[J]. 北京理工大学学报, 2005, 25(6):534-537. (YANG S M, KE B Q, XUE Z H. Approach to regional netting optimization genetic algorithm [J]. Transaction of Beijing Institute of Technology, 2005, 25(6):534-537.)
- [7] 张远,方青,曲成华. 基于遗传算法的组网雷达优化部署[J]. 雷达科学与技术, 2014, 12(1):76-80. (ZHANG Y, FANG Q, QU C H. Optimal deployment of netting radars on genetic algorithms [J]. Radars Science and Technology, 2014, 12(1):76-80.)
- [8] 王中许,李银伢,张学彪. 雷达组网仿真研究与实现 [J]. 南京理工大学学报, 2006, 30(3):292-295. (WANG Z X, LI Y Y, ZHANG X B. Research and realization of multi-radar netting simulation [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2006, 30(3):292-295.)
- [9] GUO P, WANG X, HAN Y. The enhanced genetic algorithms for the optimization design [C]//The 3rd International Conference on Biomedical Engineering and Informatics (BMEI), IEEE, 2010:2990-2994.
- [10] JIANG L, LI X. Design high performance microwave absorbers using adaptive genetic algorithm (AGA) [C]//Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility and 19th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, IEEE, 2008:758-761.

(下转第 102 页)

- [2] NELSON W B. Accelerated testing: Statistical methods, test plans, and data analysis [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1990:91-94.
- [3] MEEKER W Q, ESCOBAR L A, LU J C. Accelerated degradation tests: Modeling and analysis [J]. Technometrics, 1998, 40(2) :89-99.
- [4] YU H F. Designing an accelerated degradation experiment with a reciprocal Weibull degradation rate [J]. Journal of Statistical Planning and Inference, 2006, 136(1) :282-297.
- [5] TANG L C, YANG G Y, XIE M. Planning of step-stress accelerated degradation test [C]//RAMS, Los Angeles, USA, 2004 :278-292.
- [6] LIAO C M, TSENG S T. Optimal design for step-stress accelerated degradation tests [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2006, 55(1) :59-66.
- [7] 汪亚顺,张春华,陈循,等. 仿真基混合效应模型加速退化试验方案优化设计研究 [J]. 机械工程学报, 2009, 45 (12) : 108-114. (WANG Y S, ZHANG C H, CHEN X, et al. Simulation-based optimal design for accelerated degradation tests with mixed-effects model [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45 (12) : 108-114.)
- [8] 潘刚,梁玉英,孟军,等. 小样本条件下步降加速退化试验优化设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2013(5) :91-94. (PAN G, LIANG Y Y, MENG J, et al. Optimization design of step-down-stress accelerated degradation test on condition of small sample [J]. Instrument Technique and Sensor, 2013(5) :91-94.)
- [9] NELSON W B. Graphical analysis of accelerated test with a mix of failure modes [J]. IEEE Transactions on Reliability, 1975, 23(3) :230-237.
- [10] 董胜,韩意,陶山山,等. Weibull 分布参数的粒子群算法估计 [J]. 中国海洋大学学报, 2012(6) :120-125. (DONG S, HAN Y, TAO S S, et al. Parameters estimation for Weibull distribution with particle swarm optimization [J]. Periodical of Ocean University of China, 2012 (6) :120-125.)
- (上接第 85 页)
- [11] ZHENG G Q, ZHENG Y. Radar netting technology & its development [C]//Proceedings of IEEE CIE International Conference on Radar, 2011:933-937.
- [12] GU B, HE C. Simulation for hierarchical structure and distributed radar netting [C]//The 8th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM), IEEE, 2012:1-4.
- [13] 中国民用航空局. 中国民用航空 ADS-B 实施方案规划 [R]. 北京:中国民用航空局, 2012. (Civil Aviation Administration of China. Civil aviation of China ADS-B implementation planning [R]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2012.)
- [14] 王春阳,宫健,冯坤菊,等. 基于粒子群算法的多基地雷达优化布站方法 [J]. 现代防御技术, 2010, 38(2) : 104-107. (WANG C Y, GONG J, FENG K J, et al. Multi-static radar optimal disposition approach based on particle swarm optimization [J]. Modern Defence Technology, 2010, 38(2) :104-107.)
- [15] CHLUDZINSKI B J, DRUMM A C, ELDER T R, et al. Lincoln laboratory 1030/1090 MHz monitoring [R]. ATC-390. Lexington: MIT Lincoln Laboratory, 2011.
- [16] PANKEN A D, HARMAN W H, ROSE C E, et al. Measurements of the 1030 and 1090 MHz environments at JFK international airport [R]. Spring Field: Lincoln Laboratory, 2012.
- [17] BOCI E, SARKANI S, MAZZUCHI T A. Optimizing ADS-B RF coverage [C]//Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference, IEEE, 2009 :1-10.

本刊国内邮发代号为 36 - 693 欢迎订阅