

先进战机射频集成系统干扰资源管控

赵玉, 吴华, 程嗣怡, 宋海方
(空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038)

摘要: 针对先进战机射频集成系统“一对多”干扰时的资源管控问题, 首先, 讨论了基于有源相控阵天线的雷达/电子战一体化设计方案; 然后, 采用多属性决策方法建立了电子战目标威胁等级评估模型; 通过设置威胁等级门限建立干扰任务请求模型; 最后, 采用时分复用的方式对于干扰空间内的多个目标进行干扰, 提出了干扰资源的自适应动态分配方法。该方法基于威胁等级偏差均值最小准则或最大威胁等级偏差最小准则, 可以结合相控阵雷达资源管理算法, 实现雷达/干扰资源综合管控。通过不同威胁等级门限的仿真, 表明自适应管控策略能够实现干扰资源的动态分配。

关键词: 战斗机; 射频集成系统; 威胁评估; 干扰资源动态分配; 单机对多目标

中图分类号: V271.4; TN 974 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)06-0007-05

Jamming Resource Management of Advanced Airborne Integrated Radio Frequency Systems

ZHAO Yu, WU Hua, CHENG Siyi, SONG Haifang

(Engineering College of Aeronautics and Astronautics, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: To study resource management of integrated radio frequency system onboard advanced fighters for “single-to-multiple” jamming, a systematic scheme of radar/jamming based on active phased array antenna was analyzed, and a model for threat level evaluation was built up by means of multi-attribute decision-making. The jamming task requirement model was established based on the given threat threshold, and time division multiplexing mode was used for jamming multiple targets. An adaptive dynamic resource allocation method was proposed. Two criterions of jamming resource management were proposed, the minimum mean deviation of threat-level and the minimum deviation of highest threat-level. Combined with the algorithm of radar resource management, the method can be used to realize the integrated management of radar and jamming resources as well. Computer simulation indicated that the adaptive method of resource management could optimize the dynamic allocation of jamming resources.

Key words: fighter aircraft; integrated radio frequency system; threat assessment; dynamic allocation of jamming resource; single-to-multiple attack

0 引言

火控雷达和电子对抗系统是战斗机“保存自己、消灭敌人”的关键设备, 能够同时担负雷达、电子战和高速数据链等多种战术任务的射频集成系统是机载电子系统发展的重要趋势^[1]。射频集成系统在减小系统体

积、减轻系统重量, 特别是在降低天线孔径 RCS、提升战机隐身能力上有着独特优势^[2]。借助有源相控阵系统实现射频集成是射频集成系统设计的重要步骤。控制计算机是有源相控阵系统的核心, 雷达/干扰资源综合管控算法是发挥相控阵资源优势的关键。

目前, 国内外对雷达/干扰一体化系统的研究主要从系统组成、关键技术、共享信号等方面进行^[3-4]; 对于干扰资源管控策略主要是对静态资源的分配进行研究^[5-10]。本文对雷达电子战一体化系统方案进行了分析, 采用多属性决策方法建立了电子战威胁等级评估模型, 并基于威胁等级建立了干扰资源分配模型,

收稿日期: 2012-05-08

修回日期: 2012-06-13

基金项目: 电子信息控制国防重点实验室基金(9140C1005051103); 陕西省自然科学基金(2012JQ8019)

作者简介: 赵玉(1979—), 男, 吉林延吉人, 硕士, 讲师, 研究方向为电子对抗。

最后对单机对多目标时的干扰资源管控策略进行了研究。

1 系统方案

根据相控阵雷达的系统组成和工作原理^[11],电子战系统同样可以根据接收和发射过程^[12]与相控阵雷达进行一体化设计,系统组成如图1所示。

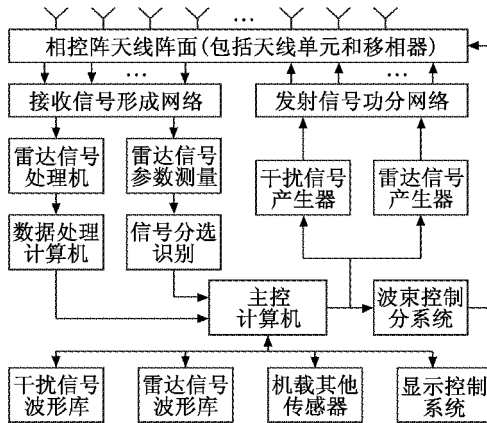


图1 基于有源相控阵天线的雷达电子战一体化系统

Fig. 1 Integrated systems of radar and EW based on active phased array

相控阵天线接收信号,通过匹配滤波将本机雷达回波信号提取出来,然后通过信号处理和数据处理,对目标参数进行检测估计;对其他辐射信号进行测频和测向处理,然后进行分选识别、威胁等级判定;一体化系统的核心是主控计算机,根据接收的信号,主控计算机调度雷达和干扰资源,产生雷达和干扰信号发射控制指令,驱动信号产生器产生对应信号;主控计算机通过波束控制分系统形成发射和接收信号所需要的天线方向图。

系统可以对目标雷达实施欺骗干扰或压制干扰;可以对雷达和干扰信号的功率和方向进行精确控制,还可通过对接收天线方向图的控制实现重点空域的无源探测或跟踪干扰源(Home On Jam, HOJ);同时,实施干扰也受到信号带宽的限制。

2 干扰资源管控模型及算法

2.1 干扰资源管理模型

1) 威胁等级评估模型。

威胁等级评估是进行干扰资源分配以及火力打击的依据。本文采用多属性决策直接线性加权的方法来确定电子对抗系统作战对象的威胁等级^[5]。机载电子对抗系统的作战对象包括空中和地(海)面的各种雷达。结合战机作战特点,雷达威胁等级主要考虑雷达类型、工作状态、与本机的距离这3个因素。威胁等级

表达式为

$$w_i = \mu_1 P_i + \mu_2 Q_i + \mu_3 R_i \quad (1)$$

式中: w_i 为第*i*部雷达的威胁等级,假设空中和地面雷达的数目为*N*,*N*部雷达的威胁等级记为 $\mathbf{W} = [w_1, w_2, \dots, w_N]$, $\mathbf{W}^i = w_i, i = 1, 2, \dots, N$; P 为雷达类型威胁因子; Q 为雷达工作状态威胁因子; R 为雷达距离威胁因子; $\mu_i (i = 1, 2, 3)$ 为各因子所占权重值,可以由AHP方法确定,且满足 $\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 = 1$ 。

雷达类型及用途可以根据雷达信号载频、重频、脉宽和方位等参数与辐射源数据库比较得出^[6];机载电子对抗系统作战对象包括弹载末制导雷达、机载火控雷达、地面制导雷达、炮瞄雷达、机载预警雷达、地面目标指示雷达和远程预警雷达等,雷达类型威胁因子的确定见式(2)。

$$P = \begin{cases} 0.9, & \text{弹载末制导} \\ 0.7, & \text{机载火控雷达、地面制导雷达、炮瞄雷达} \\ 0.3, & \text{机载预警雷达、地面目标指示雷达} \\ 0.1, & \text{远程预警雷达} \end{cases} \quad (2)$$

雷达的工作状态可以划分为搜索、跟踪和制导等3种状态。雷达工作状态可以根据雷达的用途、波束扫描的时空特性、信号形式及其变化特性等,结合导弹逼近告警器数据,按照以下方法确定。

根据雷达用途对目标雷达做如下分类:

$$\text{雷达用途} \begin{cases} \text{只进行搜索的雷达} \\ \text{搜索、跟踪雷达} \begin{cases} \text{单目标跟踪} \\ \text{多目标跟踪} \begin{cases} \text{边搜索边跟踪} \\ \text{搜索加跟踪} \end{cases} \end{cases} \end{cases}$$

搜索、跟踪雷达的工作状态可以根据雷达搜索数据率、跟踪数据率,结合雷达信号波形进行确定。一般跟踪数据率大于搜索数据率,同时雷达也会设计几种不同的波形分别用于目标的搜索和跟踪^[11],可以根据数据率的差异和信号波形确定雷达的搜索、跟踪状态;雷达进入制导状态,其跟踪数据率会明显增大,信号多采用准连续波的形式,同时机载导弹逼近告警器也会检测到来袭导弹,据此可以区分雷达的跟踪和制导状态。雷达状态威胁因子确定见式(3)。

$$Q = \begin{cases} 0.9, & \text{制导} \\ 0.7, & \text{跟踪} \\ 0.3, & \text{搜索} \end{cases} \quad (3)$$

目标相对本机的距离可以由己方有源或者无源探测系统得到。对于机载自卫电子对抗系统而言,当目标雷达与本机距离*r*小于最小威胁距离 r_1 ,即 $r \leq r_1$ 时,其威胁程度 $R(r)$ 最大,设为最大值1;当*r*大于最大威胁距离 r_2 ,即 $r > r_2$ 时,基本不对本机造成威胁,可认为 $R(r)$ 为最小值0;同时, $R(r)$ 随距离的逼近快速

变大,因此采用二次曲线作为其数学表达式^[7],雷达距离威胁因子的数学表达式为

$$R(r) = \begin{cases} 1, & r \leq r_1 \\ \left(\frac{r-r_2}{r_1-r_2}\right)^2, & r_1 < r \leq r_2 \\ 0, & r_2 < r \end{cases} \quad (4)$$

2) 干扰任务请求模型。

目前对干扰资源分配的研究大多是在对所有目标均需要进行干扰的前提上的^[5,7-9],实际上,由于干扰资源有限,同时并不是所有目标均需要进行干扰,因此需要考虑干扰的效率问题。电子战目标威胁评估的目的是为干扰提供决策依据,本文提出基于威胁等级的干扰目标选择和干扰时机确定方法,实现干扰资源的动态分配。

首先确定威胁等级门限 $W_0 = [w_{01}, w_{02}, \dots, w_{0N}]$ 。 W_0 可以根据作战环境和任务特点进行设置,例如在某次作战任务中,根据敌方雷达部署情况,针对不同的作战阶段将敌方雷达可能的威胁等级进行排序,根据战机是执行火力打击还是电磁掩护等任务特点,选择其中一个目标作为参考门限, W_0 还可以根据不同的阶段进行动态设置。

N 部雷达的威胁等级记为 $W = [w_1, w_2, \dots, w_N]$, 用神经元表示的干扰请求模型如图 2 所示。

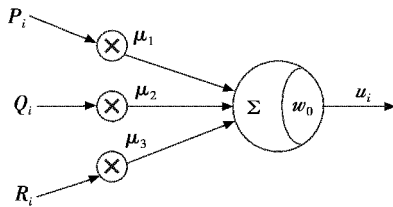


图2 基于神经元模型的干扰任务请求模型

Fig. 2 Jamming task requirement based on neuron model

设 $N_{neti} = (\mu_1 P_i + \mu_2 Q_i + \mu_3 R_i) - w_{0i}$, $u_i = 1$ 表示需要干扰, $u_i = 0$ 表示无需干扰, 则

$$u_i = f(N_{neti}) = \begin{cases} 1, & N_{neti} \geq 0 \\ 0, & N_{neti} < 0 \end{cases} \quad (5)$$

通过设置威胁等级门限, N 部雷达中有 M ($M \leq N$) 部雷达需要干扰, 从而形成 M 部雷达组成的干扰任务队列 $T = [T_1, T_2, \dots, T_M]$ 。

3) 干扰资源分配模型。

相控阵系统干扰多个目标可以采用两种方法: 1) 采用单波束干扰的方式, 即某一时刻只在相控阵天线阵面上形成一个主波束, 利用相控阵天线波束便于控制的优点, 采用时分复用 (Time-sharing) 的方式对多个目标实施干扰, 这种干扰方式的优点是系统结构简单, 技术较为成熟; 2) 采用多波束同时干扰的方式, 通过对阵列天线进行分块实现对多个目标的同时干扰, 这种

方法的优点是增强了干扰机同时干扰多目标的能力, 缺点是系统结构复杂, 控制和实现的难度较大。本文以方法 1) 为基础, 建立干扰资源的分配模型, 对相控阵系统干扰资源调度方法进行研究。

设 Ω 为干扰系统可以实施干扰的能力范围, Ω 可以表示为

$$\Omega = [f_{\min}, f_{\max}] \otimes [\theta_{\min}, \theta_{\max}] \otimes [t_{\min}, t_{\max}] \quad (6)$$

式中: f, θ, t 分别表示干扰的频域、空域和时域条件; \otimes 表示直积运算。干扰任务队列 T 中: 如果 $T_i \in \Omega$ ($i = 1, 2, \dots, M$), 则继续保留 T_i , 否则将 T_i 从 T 中剔除。

假设经 Ω 约束后, 干扰任务队列中有 D ($D \leq M$) 部雷达, t_k ($k = 1, 2, 3, \dots$) 时刻, D 个雷达的威胁等级为 $W(t_k)$, 设 $U(t_k)$ 为 t_k 时刻对雷达的干扰控制量。

$U(t_{k+1}) = \{u(t) \mid u(t) = 0, -1, \dots, -D; t = t_1, \dots, t_k\}$ (7) 式中, $u(t) = 0$ 表示此时不对雷达进行干扰, $u(t) = -j$ ($j \neq 0$) 表示此时对雷达 j 进行干扰。在 t_{k+1} 时刻的干扰最佳控制量为

$$u(t_{k+1}) = \arg \min_{j \in [0, 1, \dots, D]} G [W_0^i, W^i(t_{k+1}) \mid U(t_k), u(t_{k+1}) = -j], i = 1, 2, \dots, D \quad (8)$$

式中, $W^i = W(t_{k+1} \mid U(t_k), u(t_{k+1}) = -j)$, 表示 t_{k+1} 时刻对雷达 j 进行干扰的条件下雷达 i 的威胁等级。

式(8)表示干扰系统下一时刻干扰控制量使目标雷达的威胁等级与设定的威胁等级门限之间以某种准则 G 达到最小。本文对“某种准则”定义如下。

定义 1 最大威胁等级偏差最小准则, 简称 G-1 准则。该准则使所有目标威胁等级偏差的最大值达到最小。G-1 准则对应的干扰资源分配模型为

$$u(t_{k+1}) = \arg \min_{j \in [0, 1, \dots, D]} \left(\max_{i \in [1, 2, \dots, D]} G^i \right) \quad (9)$$

定义 2 平均威胁等级偏差最小准则, 简称 G-2 准则。该准则使所有目标威胁等级偏差的平均值达到最小。G-2 准则对应的干扰资源分配模型为

$$u(t_{k+1}) = \arg \min_{j \in [0, 1, \dots, D]} \frac{1}{D} \sum_{i=1}^D G^i \quad (10)$$

G^i 表示 t_{k+1} 时刻如果对目标 j 进行干扰, 所有目标的威胁等级与设定的威胁等级门限之间的偏差: 如果 $W^i > W_0^i$, 则 $G^i = W^i - W_0^i$; 如果 $W^i \leq W_0^i$, 则 $G^i = 0$ 。

2.2 干扰资源综合管控算法

前面建立了射频集成相控阵系统干扰资源管控模型, 可以采用时分复用的方式, 结合本文提出的基于威胁等级门限的干扰资源管理算法和基于协方差门限的相控阵雷达资源管理算法^[10] 实现雷达-干扰综合管控。现将干扰资源管控算法总结如下:

- 1) 按照式(1)更新 t_k 时刻 N 个目标的威胁等级 W ;
- 2) 根据式(5)计算是否需要目标 i 实施干扰, 对需要进行干扰的 M 个目标组成干扰任务队列;

3) 按照式(6)对需要干扰的目标进行约束过滤,将“需要”且“能够”干扰的各目标重新形成干扰任务集合;

4) 根据式(8)计算 t_{k+1} 时刻干扰资源的最优控制量 $u(t_{k+1}) = -j$;

5) 根据最优控制量 $u(t_{k+1})$ 的计算结果,选择相应的干扰目标,调用相应的干扰资源实施干扰;

6) 令 $k = k + 1$,返回 1) 直至结束。

3 仿真实例

仿真场景中设置两个目标,目标 1 相对本机做匀加速运动(CA 模型),初始时刻距离本机 180 km,50 s 时距离本机最近且最近距离为 60 km;目标 2 相对本机做匀速运动(CV 模型),初始时刻距离本机 160 km,100 s 时距离本机 80 km,目标与本机的距离变化如图 3 所示。

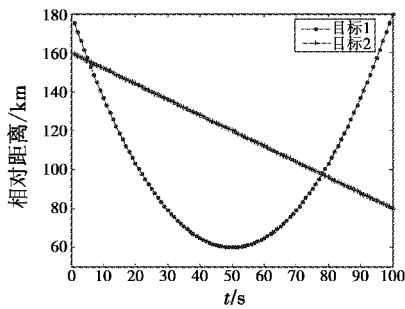


图 3 目标与本机相对距离

Fig. 3 Relative distance between target and airplane

假设目标 1 和目标 2 均为机载火控雷达, r_1 设为目标雷达的作用距离,且 $r_1 = 130$ km; r_2 设为武器的作用距离,且 $r_2 = 70$ km; 设雷达在作用距离内为跟踪状态,在武器作用距离内为制导状态,受到干扰后均转换为搜索状态; $\mu_1 = 0.20, \mu_2 = 0.45, \mu_3 = 0.35$ 。图 4 表示未进行干扰时目标的威胁等级变化情况。

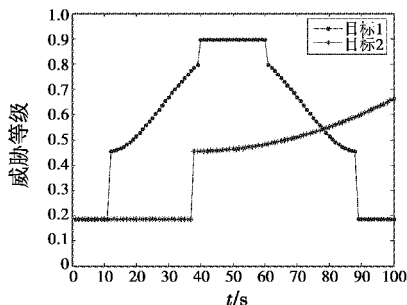
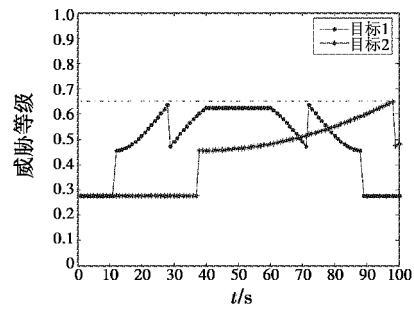


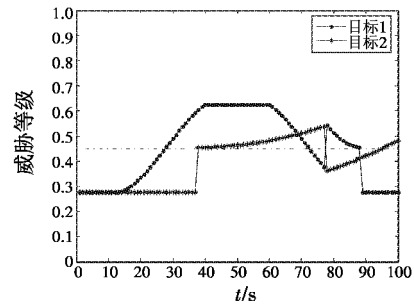
图 4 未进行干扰时目标威胁等级

Fig. 4 Threat level of targets before jammed

分别设 $W_0 = [0.65, 0.65]$ 和 $W_0 = [0.45, 0.45]$, 采用 G-1 准则实施干扰以后目标威胁等级的变化情况如图 5 所示。



a $W_0 = [0.65, 0.65]$

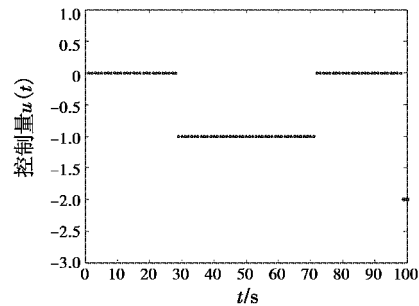


b $W_0 = [0.45, 0.45]$

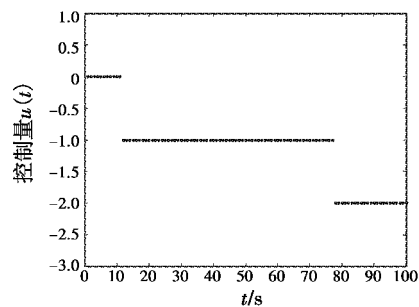
图 5 实施干扰以后目标威胁等级

Fig. 5 Threat level of targets after jammed

$u(t) = 0$ 表示相控阵天线停止辐射干扰信号; $u(t) = -1$ 或 -2 表示对目标 1 或目标 2 进行干扰。相控阵资源调度情况如图 6 所示。



a $W_0 = [0.65, 0.65]$



b $W_0 = [0.45, 0.45]$

图 6 相控阵资源调度情况

Fig. 6 Jamming resource schedule based on integrated RF systems

由图 6 可知,当 $W_0 = [0.65, 0.65]$, 在 25 ~ 75 s 时对目标 1 实施干扰,在 99 ~ 100 s 时对目标 2 进行干扰,威胁等级均控制在设定的门限值以下;当 $W_0 = [0.45, 0.45]$, 在 10 ~ 75 s 时对目标 1 实施干扰,在 75 ~ 100 s 时对目标 2 实施干扰,干扰使目标威胁等级得到有

效降低,但是25~75 s,95~100 s期间,目标1和2并没有低于门限值,这是因为此时距离对威胁等级起主要作用,干扰并不能降低由目标机动带来的威胁。

4 结论

本文对先进战机射频集成系统以及单机对多目标作战时的干扰资源管控策略进行了研究,基于相控阵天线的雷达电子战一体化设计可以降低机载电子设备的体积和重量、降低天线 RCS,主控计算机能够对雷达电子战资源精确控制;威胁等级门限和协方差门限可以根据作战环境和任务特点进行设置,通过控制威胁等级门限和协方差门限,可以控制相控阵资源是“雷达占优”、“干扰占优”还是“空闲占优”,从而使相控阵资源对雷达资源、干扰资源或者空闲资源得到合理分配。但是干扰不能阻止目标机动引起的威胁等级升高,这就需要将电子干扰与战术机动和火力打击综合起来考虑,这也是下一步需要深入研究的方向。

参考文献

- [1] 张昀. 国外海军先进射频集成系统分析[J]. 电讯技术,2009,49(6):77-80.
- [2] 杨红兵,周建红,汪飞,等. 飞机射频隐身表征参量及其影响因素分析[J]. 航空学报,2010,31(10):2040-2045.

- [3] 张勇. 雷达与干扰一体化系统及其共享信号[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2011:40-48.
- [4] 张明友. 雷达-通信-电子战一体化系统概论[M]. 北京:国防工业出版社,2008:15-23.
- [5] 沈阳,陈永光,李修和. 基于0-1规划的雷达干扰资源优化分配研究[J]. 兵工学报,2007,28(5):528-532.
- [6] ZHANG Gexiang, JIN Weidong, HU Laizhao. Radar emitter signal recognition based on complexity features [J]. Journal of Southwest University, 2004, 12(2):116-122.
- [7] 何静波,彭复员,胡生亮. 基于作战任务的雷达干扰决策模型[J]. 现代雷达,2007,29(1):20-22.
- [8] 刘以安,倪天权,张秀辉,等. 模拟退火算法在雷达干扰资源优化分配中的应用[J]. 系统工程与电子技术,2009,31(8):1914-1917.
- [9] 高晓光,胡明,郑景嵩. 突防任务中的单机对多目标干扰决策[J]. 系统工程与电子技术,2010,29(12):1239-1243.
- [10] 卢建斌,胡卫东,郁文贤. 基于协方差控制的相控阵雷达资源管理算法[J]. 电子学报,2007(3):403-408.
- [11] 张光义. 相控阵雷达原理[M]. 北京:国防工业出版社,2009:13-18.
- [12] 王星. 航空电子对抗原理[M]. 北京:国防工业出版社,2008:362-365.

(上接第6页)

了比较,如图3所示。

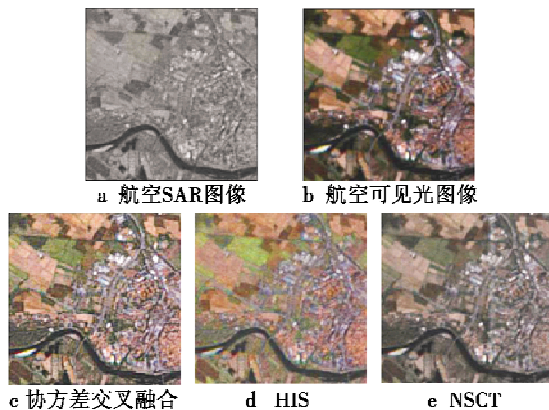


图3 航空 SAR 图像与可见光图像不同算法融合结果图

Fig.3 Image fusion of aviation SAR and visible light images using different algorithms

由图3可知,PCA和NSCT方法提取到的空间细节信息较少,而且丢失了较多的光谱信息,出现了一定程度的失真。本文方法中道路和河道都清晰可见,图像光谱保持较好,同时,清晰度最高,融合效果较好。

4 结论

本文提出了一种基于二维协方差交叉算法的图像

融合增强方法,可以最大可能地保留和提升图像的边缘,图像亮度有所增强,而边缘没有出现光晕现象。实验中,采用两组遥感图像进行融合仿真实验,从主观与客观两方面比较本文方法融合后的图像和其他几种方法融合后的图像,实验结果表明,文本方法要优于其他几种融合方法。

参考文献

- [1] 孙洪泉,窦闻,易文斌. 遥感图像融合的研究现状、困境及发展趋势探讨[J]. 遥感信息,2011(1):104-109.
- [2] 韩崇昭,朱洪艳,段战胜,等. 多源信息融合[M]. 2版. 北京:清华大学出版社,2010.
- [3] JULIER S J, UHLMANN J K. A non-divergent estimation algorithm in the presence of unknown correlations [J]. Proceedings of the American Control Conference, Albuquerque, NM, 1997, 4:2369-2373.
- [4] JULIER S J, UHLMANN J K. Generalized and split covariance intersection and addition[R]. Technical Disclosure Report, Naval Research Laboratory, 1998.
- [5] 程云鹏. 矩阵论[M]. 西安:西北工业大学,1999.
- [6] 王彦本,杨武军. 协方差交叉在分布式传感器网络定位中的应用[J]. 西安邮电学院学报,2008,13(1):95-98.