

多基地雷达反隐身分布式检测融合算法研究

沈 阳¹, 陈永光^{1,2,3}, 李修和¹, 解 凯¹

(1. 解放军电子工程学院, 安徽合肥 230037; 2. 六三八八零部队, 河南洛阳 471003; 3. 国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘 要: 随着目标隐身技术的发展, 单雷达已不能够及时地发现隐身目标. 本文首先利用目标的前/侧向散射特性和多传感器分布式检测两个方面的优势建立了两种布站方式的多基地雷达系统, 继而提出了基于聂曼-皮尔逊(Neyman-Pearson)准则下的局部决策积累融合算法, 给出了系统检测概率和虚警概率的表达式, 提出了基于遗传算法(Genetic Arithmetic)的最佳门限计算方法, 最后对该系统的检测性能进行了仿真, 仿真结果说明了系统反隐身的有效性和融合算法的优越性, 本文结论对系统的工程实现具有一定的参考价值.

关键词: 多基地雷达; 反隐身; 分布式检测系统; 融合算法

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2007) 03-0506-05

Study on Fusion Arithmetic of Multi Radar Distributed Detection System Against Stealthy Targets

SHEN Yang¹, CHEN Yong-guang^{1,2,3}, LI Xiu-he¹, XIE Kai¹

(1. Electronic Engineering Institute, Hefei, Anhui 230037, China; 2. Unit 63880, Luoyang, Henan 471003, China;

3. School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan, 410073, China)

Abstract: With the development of target stealthy technology, single radar can't find stealthy target timely. This paper firstly establishes multi radar system making use of target's forward or side scatter and multi sensor distributed detection. Secondly, it puts forward fusion arithmetic based on Neyman-Pearson criterion and accumulation of local decision. Subsequently, the formulations of system's fusion detection probability and its false alarm probability are presented. The paper presents the calculation method of the best detection threshold based on Genetic Algorithm. Finally, computer simulation is carried out about system performance. The result given demonstrates superiority of fusion arithmetic and system performance on anti-stealthy. The conclusion of this paper is of important reference significance for the realization of system.

Key words: multi radar; anti-stealthy; distributed detection system; fusion arithmetic

1 引言

目标隐身技术的发展使得单基地雷达的性能急剧下降. 目标的雷达隐身技术主要包括外形设计、吸波涂料、有源对消等. 然而, 不管哪种隐身技术都不是全频段和全方位的, 并且隐身技术主要考虑了目标的后向散射而忽略了前/侧向散射. 针对隐身目标的这些固有弱点, 诸如双(多)基地雷达、多频段单基地雷达组网等各种反隐身措施相继提出^[1,2]. 另外, 多传感器分布式检测的信息融合理论充分利用了各局部传感器的观测信息, 采用融合算法使得融合中心的性能大大提高^[3].

传统的分布式检测融合算法是基于贝叶斯决策理论推广到分布式检测情形的^[4], 关于分布式检测融合算法的研究涉及传感器管理、局部判决规则设计、融合规

则设计以及全局最优融合规则设计. 其中, 全局最优融合规则设计是一个队(team)决策问题, 可以采用“逐个优化”(Person By Person Optimization - PBPO)方法来解决. 遗传算法(Genetic Algorithm GA)在解决复杂的全局优化问题方面已取得了成功的应用. 文献[5]将GA运用到数据关联中, 取得了较好的效果.

基于以上分析, 本文提出的多基地雷达分布式检测系统除了利用隐身目标的前/侧向散射特性外, 融合中心还对各站观测信息进行了充分利用, 即进行多传感器信息融合, 达到反隐身的目的. 本文提出了基于N-P准则下的局部判决积累的融合算法, 推导了融合检测概率和虚警概率的表达式, 提出了基于遗传算法的最佳门限计算方法, 最后对系统性能进行了计算机仿真, 仿真结果说明了系统反隐身的有效性以及融合算法的优越

收稿日期: 2005-07-20; 修回日期: 2006-05-11

基金项目: 国防科技重点实验室基金项目(No. 51435010105JB3904)

性.同时,本文的结论对系统的工程实现具有一定的参考价值.

2 多基地雷达布站方式

为了利用隐身目标的前/侧向散射特性,多基地雷达系统采用一发多收($T-R^N$)形式,而且系统布站采取均衡布站和加权布站两种方式.对于均衡布站(图1左),T站位于中心,各R站位于四周一定半径的圆上,防御隐身目标从各方位袭击目标;对于加权布站(图1右),T站位于中心,R站分两层部署:内层均衡布站,防止隐身目标从各个方向进入,外层在主要作战方向采取加权布站,增加几个R站.这样的系统布站主要基于以下四点考虑:

- (1) 内层均衡布站可以形成空间多角度探测隐身目标;
 - (2) 外层加权布站可以利用接收站前伸带来的距离优势;
 - (3) 收发分置体制可以利用隐身目标的前/侧向散射特性;
 - (4) 发射站兼融合中心位于系统中心便于分布式融合处理.
- 系统布站如图1所示.

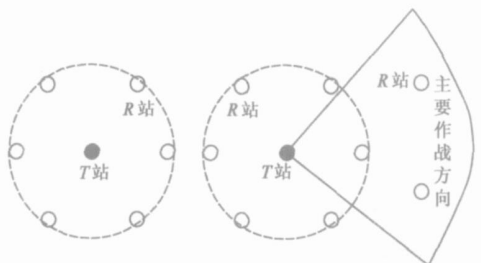


图1 系统布站示意图(左为均衡布站,右为加权布站)

3 融合算法与系统性能分析

多传感器目标检测的结构主要分为集中式和分布式两种^[3].在集中式结构中,局部传感器直接将所有观测传送到融合中心,虽然它可以获得良好的检测性能,但是它以增加局部传感器与融合中心间的通信开销为代价,而且还加重了融合中心的计算量;在分布式结构中,局部传感器对各自观测信息进行预处理,将局部判决结果送到融合中心.相对集中式结构而言,分布式结构减轻了通信链路的负担,但它的性能因为没有接收到所有局部传感器的观测信息而降低.尽管分布式结构的性能有所下降,但由于它的通信量小、可靠性高、成本相对低廉,因此还是备受青睐.基于这一原因,本系统采用分布式结构.

3.1 分布式检测原理

考虑具有假设 H_0 和 H_1 的二元假设检验问题,如

图2所示,在分布式融合检测系统中,每一局部传感器基于自己的观测 z_i

($i = 1, 2, \dots, n$) 独立

地完成同一决策任

务,这些局部决策

u_{ij} ($i = 1, 2, \dots, n, j$

$= 1, 2, \dots, k_i$) 被传

送到融合中心构成融合中心的观测向量

$$u = (u_{11}, \dots, u_{1k_1}, u_{21}, \dots, u_{2k_2}, \dots, u_{n1}, \dots, u_{nk_n}) \quad (1)$$

融合中心基于 u 获得全局决策.其中

$$u_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{确定有目标} \\ 0, & \text{确定无目标} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, k_i \quad (2)$$

式中: u_{ij} 为局部决策; i 为站号; j 为局部决策的序号; k_i 为第 i 站的判决积累数,以往的融合算法每个融合周期只利用一个局部决策量,所以 k_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 为 1.

分布式检测的关键是如何组合来自各局部传感器的判决.自从 Tenney 和 Sandell^[4]将贝叶斯决策理论推广到分布式传感器检测情形之后,分布式检测理论获得了迅速发展.各种融合规则、检测融合算法层出不穷,其中雷达系统常用的是 Neyman-Pearson(N-P)准则.

N-P 准则即在虚警概率 P_f (为一定值)的条件下使漏警概率 P_m 达最小的判决准则^[6],构造目标函数如下

$$\begin{aligned} J &= P_m + \lambda (P_f - \beta) \\ &= \int_{z_0} p(z/H_1) dz + \left[1 - \int_{z_0} p(z/H_0) dz - \beta \right] \\ &= (1 - \beta) + \int_{z_0} [p(z/H_1) - \beta p(z/H_0)] dz \end{aligned} \quad (3)$$

式中: J 为目标函数值; λ 为拉格朗日乘子; β 为规定的虚警概率值; P_m 为漏警概率; P_f 为虚警概率; $p(z/H_1)$ 和 $p(z/H_0)$ 为观测 z 的条件概率密度,又称似然函数.

似然函数的形式与目标起伏特性和观测噪声的分布有关.在雷达系统中,观测量为目标回波加接收机噪声(或外部干扰,这里不考虑).目标起伏特性由 Swerling 模型描述,观测噪声一般认为服从零均值正态分布.因此,似然函数 $p(z/H_1)$ 和 $p(z/H_0)$ 分别服从广义瑞利分布(莱斯分布)和瑞利分布,其表达式不再赘述.

显然,似然比检验可使目标函数值最小.即

$$(z) = \frac{p(z/H_1)}{p(z/H_0)} \geq \eta_0 \quad (4)$$

式中: (z) 为似然比; η_0 为检测门限.判决规则即是似然比大于检测门限时认为有目标;反之,认为没有目标.其中,检测门限 η_0 由下式确定

$$P_f = \int_{\eta_0} p[(z)/H_0] d(z) \quad (5)$$

式中: P_f 为系统要求的虚警概率.

在融合中心,虚警概率和检测概率分别为:

$$P_F = \sum_{(u) > \gamma} P((u)/H_0) \quad (6)$$

$$P_D = \sum_{(u) > \gamma} P((u)/H_1) \quad (7)$$

式中: (u) 为融合中心的似然比; u 为融合中心的观测向量,如式(1)所示.

3.2 融合规则设计

传统的分布式检测融合算法在时间序列上只利用了局部传感器的一组判决,为了改善系统检测性能,应充分利用观测周期内的所有观测信息.这里提出一种新的融合算法,即基于 N-P 准则下的局部决策积累融合算法.假设每个观测周期内各局部传感器向融合中心传送了多组判决,融合中心根据这些判决组成的观测向量,在 N-P 准则下做出全局判决.该算法中, T 站观测向量 u 的分量是 n 个 R 站在融合周期内的 k_i 个局部硬判决,而不是以往算法中的 n 个局部硬判决.

在各 R 站的局部判决规则一定的情况下, T 站的融合判决规则即为似然比检验.局部判决二元值 u_{ij} 用与其相对应的虚警概率 P_{fij} 、检测概率 P_{dij} 和漏警概率 P_{mij} 来描述.

由于各 R 站相距较远,所以它们的判决 u_{ij} 相互独立,所以融合规则可以表示为

$$A(u) = \frac{P(u/H_1)}{P(u/H_0)} = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^{k_i} \frac{P(u_{ij}/H_1)}{P(u_{ij}/H_0)} \geq \gamma_0 \quad (8)$$

其中

$$P(u_{ij}/H_1) = P_{dij}^{u_{ij}} P_{mij}^{1-u_{ij}} \quad (9)$$

$$P(u_{ij}/H_0) = P_{fij}^{u_{ij}} (1 - P_{fij})^{1-u_{ij}} \quad (10)$$

式中: P_{dij} 、 P_{mij} 和 P_{fij} 分别为第 i 个传感器第 j 个局部判决对应的检测概率、漏警概率和虚警概率.

所以,融合规则可以进一步表示为

$$\prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^{k_i} \left(\frac{P_{mij}}{1 - P_{fij}} \right)^{1-u_{ij}} \geq \gamma_0 \quad (11)$$

式中各参数含义同前.

其中,检测概率和虚警概率与观测量 z 的条件概率密度函数 $p(z/H_1)$ 和 $p(z/H_0)$ 的形式有关,这已经在 3.1 节阐述,这里不再重复.需要强调的是,根据检测概率和虚警概率的定义, P_{dij} 和 P_{fij} 的计算可按式(12)和(13)进行^[6].

$$P_{dij} = f_1(SNR_{ij}, i) \quad (12)$$

$$P_{fij} = f_2(i, i) \quad (13)$$

式中: SNR_{ij} 为传感器 i 的第 j 个局部判决对应的接收信噪比; i 为传感器 i 的检测门限; i 为传感器 i 的噪声均方差; f_1 和 f_2 表示函数关系,具体参见文献[6].

实际计算中,给定虚警概率得出检测门限,再根据目标起伏特性和散射特性就可计算出检测概率.在目标隐身的情况下,目标的雷达截面积减小,导致接收信噪比减小,使得检测概率降低.在本系统中,多基地雷达利用了隐身目标的前/侧向散射特性,提高接收信噪比,从而增大系统检测概率,达到反隐身的目的.

3.3 系统性能衡量

分布式检测系统的性能可以用系统检测概率和虚警概率来衡量.在 N-P 准则下,给定虚警概率,检测概率越大说明系统性能越好.当系统采用上述的 N-P 准则下局部判决积累的融合算法时,系统检测概率和虚警概率分别如式(14)和(15)所示.

$$\begin{aligned} P_D &= P(u=1/H_1) \\ &= P(u=1/u_{11}, \dots, u_{1k_1}, \dots, u_{n1}, \dots, u_{nk_n}) \\ &\quad P(u_{11}, \dots, u_{1k_1}, \dots, u_{n1}, \dots, u_{nk_n}/H_1) \\ &= P(u=1/u_{11}, \dots, u_{1k_1}, \dots, u_{n1}, \dots, u_{nk_n}) \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^{k_i} P(u_{ij}/H_1) \\ &= \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^{k_i} \left(P_{dij}^{u_{ij}} P_{mij}^{1-u_{ij}} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} P_F &= P(u=1/H_0) \\ &= P(u=1/u_{11}, \dots, u_{1k_1}, \dots, u_{n1}, \dots, u_{nk_n}) \\ &\quad P(u_{11}, \dots, u_{1k_1}, \dots, u_{n1}, \dots, u_{nk_n}/H_0) \\ &= P(u=1/u_{11}, \dots, u_{1k_1}, \dots, u_{n1}, \dots, u_{nk_n}) \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^{k_i} P(u_{ij}/H_0) \\ &= \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^{k_i} \left(P_{fij}^{u_{ij}} (1 - P_{fij})^{1-u_{ij}} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

式中: u 为 T 站判决输出(取值 0、1); u_{ij} 为第 i 个 R 站的第 j 个局部判决输出(取值 0、1); P_{dij} 、 P_{mij} 和 P_{fij} 分别为局部判决 u_{ij} 对应的局部检测概率、局部漏警概率和局部虚警概率;其它参数含义同前.

3.4 最佳检测门限计算

由融合规则式(11)可知,似然比 (u) 为一离散值

且有 $2^{\sum_{i=1}^n k_i}$ 个(包括相等的). N-P 准则下的最佳门限是这样的一个值,它使目标函数式(3)达最小,其中检测概率和虚警概率如式(14)和(15)所示.因此,寻找最佳门限是非常复杂的优化问题.遗传算法是解决复杂优化问题的好办法,所以本文提出运用遗传算法来计算最佳检测门限的方法,其步骤为:

- (1) 计算似然比的 $2^{\sum_{i=1}^n k_i}$ 个取值 $(u)^1, (u)^2, \dots, (u)^{2^{\sum_{i=1}^n k_i}}$, 则可以认为门限满足条件: $\left((u)^i - \gamma, i = 1, 2, \dots, 2^{\sum_{i=1}^n k_i} \right)$, 为某一小量,这样可以缩小搜索空间,提高效率;

(2) 设置种群规模 pop_size 、交叉概率 P_c 、变异概率 P_m 、遗传代数 N 、变步长 M 和评价参数;

(3) 随机产生 pop_size 个满足步骤(1)中条件的门限值作为初始染色体,这些门限值对应的系统虚警概率应该小于 P_f ;

(4) 计算各染色体对应的系统检测概率 P_D 、虚警概率 P_F 以及给定系统虚警概率 P_f 前提下的目标函数式(3)的值;

(5) 对步骤(4)中的函数值从小到大排序,记下使得函数值最小的染色体(门限值)及其对应的检测概率和虚警概率并用函数值更小的子染色体代替父染色体;

(6) 若遗传代数大于等于 N 则转步骤(7),否则,按给定的交叉和变异概率对本代染色体进行交叉和变异操作,得到下一代染色体,转步骤(4);

(7) 输出步骤(5)中的染色体(最佳门限值 *)及其对应的检测概率 P_D^* 和虚警概率 P_F^* 。

4 计算机仿真

4.1 仿真条件

如图3所示,设某 TR⁵ 型(内三外二加权布站)多基地雷达系统采取分布式检测结构来对付隐身目标,各 R 站的观测独立同分布。T 站发射功率为 2.75MW, T 站和 R 站天线增益均为 30dB,隐身目标从 A 点飞行到 T 站,速度为 510m/s。以 T 站位置为坐标原点,以射线 TA 为 x 轴正向,则它们的坐标(单位:km)分别为: T(0, 0), $R_1(147.2, 75, 0)$ 、 $R_2(147.2, -75, 0)$ 、 $R_3(50, -86.6, 0)$ 、 $R_4(50, 86.6, 0)$ 、 $R_5(-100, 0, 0)$ 和 A(200, 0, 7)。在隐身飞机从 A 点飞行到 T 站的过程中,各接收站对目标的视角不断变化,目标的 RCS 也相应变化,隐身目标的 RCS 模型参见文献[1]。设各 R 站的观测周期均为 $t = 5s$,即每隔时间 t ,R 站就向 T 站上报局部硬判决 0 或 1。以隐身飞机从 A 点起飞时刻为时间零点,截取连续三个上报时刻的隐身目标对各 R 站的 RCS 及其对应的检测概率如表 1 所示。假设各 R 站的虚警概率均为 10^{-4} ,融合中心虚警概率 P_f

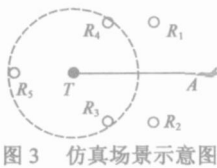


图3 仿真场景示意图

0, 0)、 $R_1(147.2, 75, 0)$ 、 $R_2(147.2, -75, 0)$ 、 $R_3(50, -86.6, 0)$ 、 $R_4(50, 86.6, 0)$ 、 $R_5(-100, 0, 0)$ 和 A(200, 0, 7)。在隐身飞机从 A 点飞行到 T 站的过程中,各接收站对目标的视角不断变化,目标的 RCS 也相应变化,隐身目标的 RCS 模型参见文献[1]。设各 R 站的观测周期均为 $t = 5s$,即每隔时间 t ,R 站就向 T 站上报局部硬判决 0 或 1。以隐身飞机从 A 点起飞时刻为时间零点,截取连续三个上报时刻的隐身目标对各 R 站的 RCS 及其对应的检测概率如表 1 所示。假设各 R 站的虚警概率均为 10^{-4} ,融合中心虚警概率 P_f



图4 仿真流程图

要求分别为 10^{-3} 、 10^{-5} 和 10^{-7} 。仿真流程如图 4 所示。

表1 各 R 站 RCS 和检测概率

时刻	指标	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5
t	RCS	0.3216	0.3216	0.2961	0.2961	0.0000
	P_{dij}	0.5972	0.5972	0.0014	0.0014	0.0000
$2t$	RCS	0.3216	0.3216	0.2961	0.2961	0.0000
	P_{dij}	0.6085	0.6085	0.0017	0.0017	0.0000
$3t$	RCS	0.3216	0.3216	0.2961	0.2961	0.0000
	P_{dij}	0.6195	0.6195	0.0021	0.0021	0.0000

4.2 仿真结论

根据上面的仿真条件和仿真流程,计算出 T 站融合周期 T 分别为 t 、 $2t$ 和 $3t$,即局部判决积累数分别为 1、2 和 3 时的融合检测概率、融合虚警概率以及最佳检测门限如表 2 所示。

表2 系统融合检测概率和虚警概率

P_f	T	P_D	P_F	*
10^{-3}	t	0.8378	1.9×10^{-4}	2399.8
	$2t$	0.9748	3.9×10^{-4}	871.8
	$3t$	0.9956	5.1×10^{-4}	0.197
10^{-5}	t	0.8062	1.8×10^{-6}	3643.2
	$2t$	0.9689	7.5×10^{-6}	1013.5
	$3t$	0.9758	9.1×10^{-6}	12.1
10^{-7}	t	0.7321	3.5×10^{-8}	30784.2
	$2t$	0.9532	6.5×10^{-8}	3454.1
	$3t$	0.9625	8.7×10^{-8}	48.6

从表 2 的仿真结果可以看出:

(1) 由于似然比的离散性,使得最佳门限对应的融合虚警概率并不严格等于系统规定的虚警概率,但均小于系统规定的融合虚警概率;

(2) 系统性能优于局部任何单站性能,即系统融合检测概率大于单站检测概率,系统融合虚警概率小于单站虚警概率;

(3) 给定虚警概率 P_f 时,随着最佳检测门限的减小,系统检测概率增大,融合虚警概率均满足要求,这是由局部判决积累数增加来保证的;

(4) 局部判决没有积累时($T = t$),随着系统虚警概率要求的提高,不得不提高检测门限,但系统检测概率下降。如果采取局部判决积累($T = 2t, 3t$),可以使检测概率维持在较高水平。

5 结语

本文研究了基于目标隐身特性和分布式融合检测的多基地雷达反隐身布站方案,并提出了基于 N-P 准则下局部判决积累的融合算法以及基于遗传算法的最佳门限计算方法,推导了系统融合检测概率和虚警概率。仿真试验表明:文中的融合算法具有优越的性能,不仅具备了一般分布式融合检测算法的优点,而且还能在不增加传感器的情况下提高系统性能;基于遗传

算法的最佳门限计算方法可以很好地解决分布式融合检测系统中复杂的优化问题. 本文的结论对系统的工程实现具有一定的参考价值.

参考文献:

- [1] 李修和,陈永光,沈阳,等. 电子战环境下双基地雷达对隐身目标的跟踪技术研究[J]. 电子学报,2004,32(6):918-922.
Li Xiurhe, Chen Yongguang, Shen Yang, et al. Tracking technology of bistatic radar against stealthy targets in EW environment[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(6): 918-922. (in Chinese)
- [2] 陆林根. 多雷达联网对低散射截面积(RCS)目标检测能力研究[J]. 电子学报,1998,26(6):110-112,109.
Lu Lin-gen. Detection performance for low RCS target in multistatic radars[J]. Acta Electronica Sinica, 1998, 26(6): 110-112, 109. (in Chinese)
- [3] 何友,王国宏,彭应宁,等. 多传感器信息融合及应用[M]. 北京:电子工业出版社,2000.
He You, Wang Guohong, Peng Yingning, et al. Multisensor Information Fusion With Applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000. (in Chinese)
- [4] Tenney R R, Sandell N R. Detection with distributed sensor. IEEE Trans AES, 1981, 17(4): 501-509.
- [5] 朱嘉,郭立,王宁,等. 一种基于GA的多传感器多目标数据关联算法[J]. 中国科学技术大学学报,1999,29(5):540-546.
- Zhu Jia, Guo Li, Wang Ning, et al. A data association algorithm in multisensor multitarget detecting based on GA[J]. Journal of China University of Science and Technology, 1999, 29(5): 540-546. (in Chinese)
- [6] 刘福声,罗鹏飞. 统计信号处理[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1999.
Liu Fursheng, Luo Pengfei. Statistical Signal Processing[M]. Changsha: National University of Defense Technology Publishing House, 1999. (in Chinese)

作者简介:



沈 阳 男,1978年6月生于安徽省安庆市,博士研究生. 研究方向为组网雷达信息融合、计算机作战模拟、电子战作战效能评估和组网雷达对抗技术等. 近年来,合作出版专著一本,发表学术论文近二十篇,其中5篇被EI、ISTP和SA等国际检索收录. E-mail: eeishy@163.com

陈永光 男,1962年2月生于安徽省合肥市,总工程师,研究员,博士生导师. 共出版专(译)著三部,发表学术论文130余篇,其中30多篇次被SCI、EI、ISTP、SA和IAA等国际检索收录. 获部委级科技进步一等奖1项、二等奖3项、三等奖2项,军事科学优秀成果一等奖1项,现主要从事电子信息装备试验技术、电子战作战模拟等研究.

李修和 男,1975年12月生于四川省简阳市,博士. 研究方向为信息融合、计算机作战模拟、组网雷达对抗技术等. 近年来,合作出版专著一本,发表学术论文近四十篇.