

引用格式:关欣,张玉虎.基于阵元方向图的相控阵雷达辐射源识别技术[J].电光与控制,2018,25(6):106-109,114. GUAN X, ZHANG Y H. A method for recognition of phased array radar emitter based on array element pattern[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(6):106-109, 114.

基于阵元方向图的相控阵雷达辐射源识别技术

关欣, 张玉虎

(海军航空大学, 山东烟台 264001)

摘要: 为了实现对相控阵雷达辐射源的个体识别,分析了相控阵雷达天线的方向图形成方式,提出一种基于阵元天线方向图的相控阵雷达辐射源识别技术。通过双站侦察数据得到相控阵雷达天线阵面的指向角,进而算得相控阵雷达的阵列因子函数,经过比对接收的雷达天线方向图和阵列因子函数,得到组成阵列的天线阵元方向图,最终将计算得到的天线方向图与数据库中的天线方向图进行匹配,完成对相控阵雷达辐射源的个体识别。该方法通过提取相控阵雷达天线方向图的不变个体特征,实现了对相控阵雷达辐射源的个体识别。仿真实验结果表明所提方法能够有效地对相控阵雷达辐射源进行识别。

关键词: 相控阵雷达; 辐射源; 波束展宽效应; 增益衰减; 阵元方向图

中图分类号: V271.4; TN957 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2018.06.023

A Method for Recognition of Phased Array Radar Emitter Based on Array Element Pattern

GUAN Xin, ZHANG Yu-hu

(Naval Aeronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: In order to implement the individual recognition of Phased Array Radar (PAR) emitters, an analysis is made to the formation of the antenna pattern of PAR, and a PAR emitter recognition method is proposed based on the array antenna pattern. The method calculates the heading angle of the antenna array by using the data from two ESMs, and obtains the function of the array factor. By comparing the received antenna pattern with the array factor function, the antenna element pattern of the array is obtained. By matching the calculated element pattern with the element pattern in database, the recognition of individual PAR emitter is implemented. The method extracts the inherent characteristics of the antenna pattern of the PAR to recognize the identity of the PAR emitter. The experiments demonstrate that the method is effective.

Key words: phased array radar; emitter; beam broadening; gain attenuation; array element pattern

0 引言

随着军事科技的飞速发展,军事电子装备研制成果日新月异。电子战成为了现代战争的重要组成,取得了制电磁频谱权就取得了战争的主动权。相控阵雷达以其扫描快、探测远、精度高、工作模式多等特点在电子战中占据了重要地位,对相控阵雷达辐射源的识别是电子对抗中的重要课题。对相控阵雷达辐射源的识别研究现在主要集中于对相控阵雷达快速离散扫描的识别,文献[1]提出了几种判断相控阵体制的雷达的方法,包括通过到达时间、脉冲宽度和脉冲幅度来

判断,通过天线扫描的间隔时间变化规律和数据率的变化来判断,以及通过前后侦收的脉冲数变化来判断等,主要讨论了方法的基本思路,而并未给出仿真实验数据来证明识别的效果;文献[2-5]是通过计算电子侦察设备截获的雷达辐射源信号序列与特定波形的信号序列的相似度来识别相控阵体制的雷达辐射源,其中,文献[2]采用三角脉冲序列作为对比序列,文献[3-5]则采用正弦脉冲序列作为对比序列。文献[6]统计分析不同体制雷达的截获脉冲序列的前后差值的分布情况,定义了幅度差均值的概念,并通过计算序列的幅度差均值来对相控阵雷达进行体制识别。文献[7]通过定量分析相控阵雷达的波束展宽变形的性质,由 Hausdorff 距离和微似比进行匹配,对相控阵雷达的波束指向进行识别。在相控阵雷达波束的扫描过程中波束的宽度会

收稿日期:2017-06-29

修回日期:2017-07-26

作者简介:关欣(1978—),女,辽宁锦州人,博士,教授,研究方向为信息对抗、信息融合技术。

展宽,波束的增益会下降,同时,波束的最大值指向也会偏移,这种现象会影响雷达对目标探测的准确性,因此对在相控阵雷达阵面法线方向的目标探测的准确度较高。同时,由于相控阵雷达波束的扫描由移相器完成,扫描的速度较快,因此对相控阵雷达波束指向的实时识别没有太大作用,但是对相控阵雷达的阵面法线指向的识别有重要意义。文献[8]通过精确测量雷达信号的脉冲重复频率提取雷达信号的相对晶振钟频,从而对相控阵雷达进行个体识别。

本文以双站侦察数据计算得到相控阵雷达的阵面指向,以此计算得到相控阵雷达阵面的阵列因子函数,并且考虑了经过 Taylor 幅度加权的天线阵元激励的阵列因子函数,进而得到侦察接收机所在角度的阵列因子函数形式。将侦察接收的雷达信号波形与阵列因子函数比对得到各个角度信号增益,进而拟合得到天线的阵元天线方向图,最终将得到的阵元天线方向图与库中数据进行比对,完成对相控阵雷达辐射源的个体识别。

1 相控阵雷达天线方向图

以线阵天线方向图为例,假定组成天线阵列的每个阵元均相同,且均为全向天线,即阵元因子方向图 EP(Element Pattern)为

$$E_{EP} = 1 \quad (1)$$

而相控阵天线在远场合成的阵列因子 AF(Array Factor)可以表示为

$$A(\theta) = \sum_{i=1}^N a_i e^{j i (\frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta - \Delta \phi_B)} \quad (2)$$

式中, $\Delta \phi_B = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta_B$, θ_B 为天线波束最大值的指向, d 为相控阵天线阵元之间的间距。

则相控阵天线方向图 $F(\theta)$ 就是阵元天线方向图经过阵列因子调制后的结果,它等于组成阵列的阵元因子方向图 E_{EP} 与阵列因子 $A(\theta)$ 的乘积,并且假定采用均匀分布照射函数, $a_i = 1, i = 1, 2, \dots, N$, 则

$$F(\theta) = E_{EP} \cdot A = \sum_{i=1}^N e^{j i (\frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta - \Delta \phi_B)} \quad (3)$$

由欧拉公式可得

$$|F(\theta)| = \frac{\sin \frac{N\pi}{\lambda} d (\sin \theta - \sin \theta_B)}{\sin \frac{\pi}{\lambda} d (\sin \theta - \sin \theta_B)} \quad (4)$$

方向图中零点的位置为

$$\theta_z(k) = \arcsin \left(\frac{k\lambda}{Nd} + \sin \theta_B \right) \quad (5)$$

2 Taylor 幅度加权

由于阵元均匀分布的相控阵天线合成的方向图函数在主瓣附近的副瓣的电平较高,实际应用中通常是

对阵元均匀排布的阵列进行加权,以降低副瓣电平的影响,对于大型相控阵天线阵列的阵元激励幅度加权通常采用 Taylor 幅度加权以获得较高的主副瓣增益比。Taylor 幅度加权是按照一定的规律调节各个阵元馈电的激励电平,即调节式(2)中的参数 a_i , 而不再采用均匀分布照射函数。

确定所需的主瓣与副瓣的电平之比 R_0 和主瓣一侧的等幅电平个数 \bar{n} , 则可确定参数 A 为

$$A = \frac{1}{\pi} \operatorname{arcosh} 10^{R_0/20} \quad (6)$$

和展宽因子 σ 为

$$\sigma = \frac{\bar{n}}{\sqrt{A^2 + \left(\bar{n} - \frac{1}{2}\right)^2}} \quad (7)$$

Taylor 分布照射函数的阵列中各阵元的馈电激励振幅为

$$f(p) = 1 + 2 \sum_{m=1}^{\bar{n}-1} S(m) \cos(mp) \quad (8)$$

式中:

$$S(m) = \frac{[(\bar{n}-1)!]^2}{(\bar{n}-1+m)!(\bar{n}-1-m)!} \prod_{k=1}^{\bar{n}-1} \left[1 - \frac{m^2}{\sigma^2 \left[A^2 + \left(n - \frac{1}{2} \right)^2 \right]} \right]; \quad (9)$$

$$p = \frac{2\pi}{L} \xi = \begin{cases} \frac{2\pi dn}{L} & n = 0, 1, 2, \dots, N, \\ \frac{\pi d(2n+1)}{L} & n = 0, 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (10)$$

单元总数 $n = 2N + 1$
单元总数 $n = 2N$

经过 Taylor 幅度加权得到的相控阵天线方向图的主瓣与副瓣的电平比为 R_0 , 并且向两侧副瓣电平依次递减,但是经过 Taylor 幅度加权后的天线方向图会出现波束展宽、增益降低等现象。

经过仿真试验得到经过 Taylor 幅度加权后的天线方向图主瓣展宽的曲线,与未加权的天线方向图主瓣展宽曲线相同,如图 1 所示。

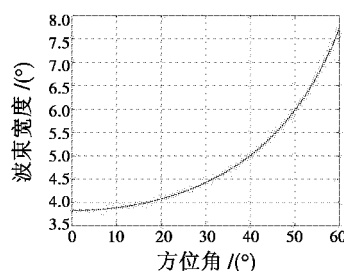


图1 天线波束展宽曲线

Fig. 1 Beam broadening curve

因此,通过两个电子侦察接收机的数据即可获知所侦察的相控阵雷达辐射源的阵列天线法线指向,相

控阵雷达波束的展宽是因为阵列因子的作用,在扫描角的扫描过程中,阵列因子的展宽随扫描角余弦的倒数规律变化。

而增益幅度的衰减则是由阵列因子的天线图特性决定的,假设组成相控阵列天线的阵元的方向图是一致的,但是不同的相控阵雷达天线的阵元天线特性是不同的,而且该特性是天线阵面的固有特性,存在于相控阵天线阵面的整个生命周期。因此对相控阵雷达天线的阵元方向图的侦察,是相控阵雷达辐射源识别的重要方法。

方向图侦察的关键技术就是对不同偏角波束振幅衰减的量测,通过不同偏角波束的振幅值对阵元天线方向图进行估计,从而达到对相控阵雷达辐射源的识别。相控阵雷达波束展宽识别流程如图 2 所示。

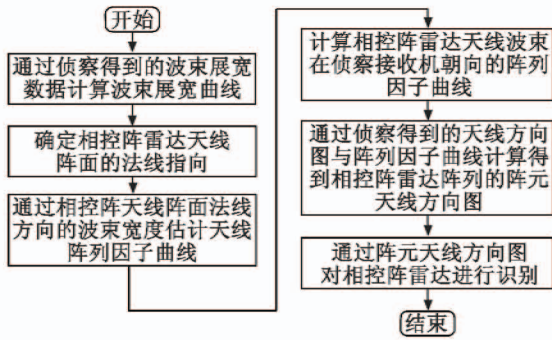


图 2 识别流程图

Fig.2 Flow chart of recognition

3 相控阵天线方向图的估计

因为经过幅度调制的相控阵雷达天线方向图与构成阵列的阵元个数有关,同时也与雷达辐射源信号波长、阵元间距等因素有关系,即

$$\begin{cases} \theta_z(1) = \arcsin \frac{\lambda}{Nd} \\ \theta_z(-1) = -\arcsin \frac{\lambda}{Nd} \end{cases} \quad (11)$$

波束宽度已经由上一节计算得到,式(11)得到了主瓣两侧的角度值,那么相控阵雷达天线的口径 Nd 就得到了,而相控阵雷达采用 $d/\lambda \leq 0.5$ 来控制扫描中不出现栅瓣,至此即可确定天线阵的阵元数目 N 。

得到了相控阵天线的阵元数量后即可估计出天线阵列因子函数。

4 阵元天线方向图计算

通过天线阵列因子与阵元天线方向图计算得到相控阵雷达的天线方向图。将上一节得到的天线方向图移动波束指向,得到侦察接收机所在的角度对应的天线阵列因子,结合侦察接收机收到的天线方向图计算振幅在每个脉冲上的增益,得到的信号增益曲线即为

天线阵元方向图。

5 相控阵雷达的个体识别

由于同一部相控阵雷达构成天线的阵元天线基本一致,然而不同的相控阵雷达天线的阵元天线方向图不同,阵元因子(EF,用 E_{EF} 表示)的阵元方向图算式为

$$E_{EF} = \cos^{E_{m-2}} \theta \quad (12)$$

理想状态下的阵元天线方向图应该是确定阵元方向图算式中的参数 E_{EF} ,然而现实状态下, $\theta = 90^\circ$ 时,阵元方向图的增益并不等于 0,而且组成天线阵列的阵元之间存在着微小差异,还要考虑环境因素的影响,因此等效的每个天线阵元的方向图一般不会是式(12)的形式。为保证识别的准确性,本文将得到的阵元方向图与已知的天线方向图进行比对,计算相似程度来确定相控阵雷达辐射源的身份,这就对平时的侦察工作提出了一定的要求,侦察数据的准确性是相控阵雷达辐射源识别的关键。

6 仿真实验

实验 1 相控阵雷达阵面指向的确定。

由图 1 可知,经过 Taylor 幅度调制的主瓣在扫描过程中的展宽性质与均匀分布天线方向图主瓣的展宽性质相同,两个侦察站之间的夹角已知,计算天线阵面的发现指向。实验仿真计算两个电子侦察站所处的天线阵面角度和两站之间的夹角大小对天线阵面指向角的计算误差。以内侧的电子侦察站所处的天线阵面的角度位置由 $10^\circ \sim 50^\circ$ 间隔 10° 变化,两站之间的夹角分别取 $3^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ 和 15° 这 4 个值来进行仿真实验,实验结果如表 1 所示。

表 1 不同角度、不同间距的误差

Table 1 Error at different angles and intervals ($^\circ$)

内侧侦察站 角度/ $^\circ$	侦察站间夹角/ $^\circ$			
	3	5	10	15
10	0.430 1	0.012 7	0.064 2	0.051 7
20	0.225 9	0.028 8	0.067 4	0.142 2
30	0.296 0	0.283 8	0.189 2	0.181 5
40	0.052 9	0.168 9	0.154 6	0.282 0
50	0.477 3	0.469 6	0.569 0	

实验 2 阵元方向图的拟合效果。

实验采用侦察得到的脉冲数据与计算得到的阵列因子函数计算脉冲在各点的增益,拟合阵元方向图,并与原始阵元方向图比较,如图 3 所示。

实验将以 $E_{EF} = 12$ 的阵元天线构成的天线方向图计算天线的阵面法线指向角,两个电子侦察站的位置分别为 20° 和 25° 。计算天线的阵列因子,并调整脉冲编号与角度值的关系,使得两个图像的峰值对应;将该

阵列因子与 20° 处的电子侦察站截获的脉冲序列进行计算,得到在各点的增益大小;再与构成天线的真实的阵元天线方向图进行比较。

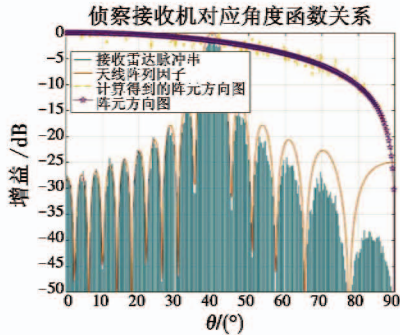


图3 计算阵元方向图

Fig.3 Computed array element pattern

实验3 方向图的识别。

将计算得到的天线阵元方向图与库中的天线图进行比对,计算偏差度判断相控阵雷达的身份。实验以式(12)建立阵元天线方向图数据库,并以实验2计算得到的天线方向图作为识别对象进行识别。

调整实验2的参数 E_{EF} ,计算在其分别为 8,12 和 18 时得到的阵元天线方向图函数与式(12)仿真得到的曲线的偏差度,结果如图4所示。

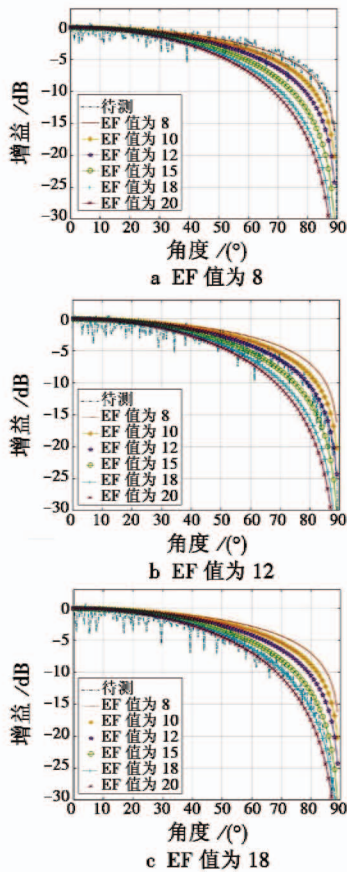


图4 阵元天线方向图

Fig.4 Element antenna pattern

计算待识别曲线与数据库内曲线的偏差度,结果如表2所示。

表2 曲线偏差度

Table 2 Curves deviation

EF 值	偏差度 (EF 值为 8)	偏差度 (EF 值为 12)	偏差度 (EF 值为 18)
8	1.775 8	7.864 8	26.731 6
10	2.673 1	3.759 4	17.274 0
12	5.784 2	1.864 9	10.030 2
15	14.601 8	3.181 5	3.315 5
18	28.400 8	9.476 2	1.581 9
20	40.367 0	16.440 0	3.193 4

综合以上实验结果,可以得到以下结论:

- 1) 随着侦察设备所处阵面夹角的增大,侦察设备计算得到的阵面指向角的误差也增大,但是误差均在 0.5° 以内,可以确定相控阵天线阵面的指向;
- 2) 由于接收到的雷达信号存在噪声,而计算的天线阵列因子不存在噪声,计算得到的阵元天线方向图会在真实的阵元天线方向图的周围波动;
- 3) 综合分析可将匹配的阈值定为 2.0,当偏差度小于阈值时确定两条曲线匹配成功,完成辐射源的识别。

7 结论

本文以双站侦察数据计算得到相控阵雷达的阵面指向,并以此计算得到相控阵雷达阵面的阵列因子函数,进而得到侦察接收机所在角度的阵列因子函数形式。将侦察接收的雷达信号波形与阵列因子函数比对得到各个角度信号增益,进而拟合得到天线的阵元天线方向图,最终将得到的阵元天线方向图与库中数据进行比对完成对相控阵雷达辐射源的个体识别。仿真实验结果表明,该方法在前期侦察数据储备充足的情况下,能够有效地对相控阵雷达辐射源进行个体识别。本文由于缺少复杂形式阵元方向图数据库,未针对其进行仿真实验,但是采用偏差度的曲线匹配方法能够对复杂形式的阵元方向图进行快速匹配,运算速度较快,无需获得曲线的解析表达。

本文方法分析了相控阵雷达的天线特征,而相控阵天线是其区别于其他体制雷达的最大特点,依据相控阵雷达的天线特征对相控阵雷达进行个体识别,相对于依据脉冲信号的传统特征来说更具有针对性。

参考文献

[1] 郑卉卉,程少云. 相控阵雷达信号的分选识别[J]. 舰船电子对抗,2008, 31(1): 89-91.

[2] 郭国华,何明浩,韩俊,等. 基于脉幅信息的相控阵体制

(下转第 114 页)

4 结束语

为了使候选匹配区的分类精度得到提升,本文提出了基于 PCA 和 GA-BP 神经网络结合的地磁匹配区的选取方法。首先,利用主成分分析法进行候选匹配区的特征选择,该方法在一定程度上解决了由于参量间的共线性导致的神经网络计算结果存在预报方差和病态的问题,同时也减少了计算量。其次,进一步对 BP 神经网络的参数通过 GA 进行优化,更加提升了分类的准确性。经验证,本文方法分类精度较高,选择出来的适配区域能有效地提高地磁导航定位精度。在实际应用中,能够正确地选取匹配性最优的区域作为匹配区,对下一步进行匹配定位有重要的意义。

参考文献

- [1] 李婷,张金生,王仕成,等. 量子粒子群算法在地磁匹配航迹规划中的应用[J]. 电光与控制,2015,22(7):43-47.
- [2] 陈丰刚. 地磁辅助导航适配区选取方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2013.
- [3] YUAN S, ZHANG J S, QIAO Y K, et al. Matching area intelligent selection method in geomagnetic navigation [C]//International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems, IEEE, 2010:860-864.
- [4] 罗海波,常铮,余新荣,等. 采用多特征融合的自动适配区选择方法[J]. 红外与激光工程,2011,40(10):2037-2041.
- [5] WANG P, WU Y, HU X, et al. Geomagnetic aided navigation suitability evaluation based on principal component analysis [C]//International Conference on Industrial Control and Electronics Engineering, 2012:324-329.
- [6] WANG K, LI Y, RIZOS C. Research on terrain suitability of iterative closest contour point algorithm for underwater navigation [C]//The 22nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2009:866-870.
- [7] 吕云霄,吴美平,胡小平. 基于支持向量机的地磁辅助导航匹配区域选取准则[J]. 兵工自动化,2011,30(1):49-52.
- [8] 李婷,张金生,王仕成,等. 基于改进地磁熵的地磁适配区选择准则[J]. 大地测量与地球动力学,2014,34(5):151-155.
- [9] 胡小平. 水下地磁导航技术[M]. 北京:国防工业出版社,2013.
- [10] 康崇,王明,樊黎明,等. 基于地磁熵和地磁差异熵的地磁导航区域选取[J]. 应用基础与工程科学学报,2015(6):1156-1165.
- [11] 张凯,赵建虎,施闯,等. BP 神经网络用于水下地形适配区划分的方法研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2013,38(1):56-59.
- (上接第 97 页)
- [5] 袁磊,孙永荣,周晓达,等. 基于 ARINC661 的 DF 文件设计平台研究与实现[J]. 现代电子技术,2012,35(5):156-159.
- [6] 邢飞燕,施佳,胡祖辉,等. 基于 MVC 的高校研究生会管理系统的开发与实现[J]. 科技资讯,2015,13(18):34-35.
- [7] 牛文生. 机载计算机技术[M]. 北京:航空工业出版社,2013:19-25.
- [8] 赵文献,孙永荣,王勇,等. ARINC661 设计文件自动生成平台的研究与实现[J]. 航空计算技术,2014(2):114-117.
- [9] 赵文献. ARINC661 定义文件开发软件的设计与实现[D]. 南京:南京航空航天大学,2016.
- [10] 郑澄,孙永荣,王晖,等. 基于 ARINC661 的触摸屏显控系统研究与设计[J]. 电光与控制,2015,22(4):62-65.
- (上接第 109 页)
- 雷达识别技术[J]. 中国电子科学研究院学报,2009,4(6):589-593.
- [3] 罗长胜,吴华,程嗣怡. 脉冲幅度特性分析的相控阵雷达识别技术[J]. 火力与指挥控制,2013,38(7):27-31.
- [4] 程胜,王星,楚维,等. 基于脉冲幅度特性的相控阵雷达识别技术研究[J]. 计算机工程与应用,2012,48(23):120-124,211.
- [5] 叶巍,牟连云,李仙茂. 基于脉冲包络的相控阵雷达识别技术研究[J]. 航天电子对抗,2011,27(1):41-44.
- [6] 冀琛,潘谊春,郁春来,等. 基于脉幅信息的相控阵体制雷达快速识别[J]. 空军预警学院学报,2013,27(5):323-326.
- [7] 李欣,王春阳,王强,等. 基于 Hausdorff 距离的相控阵雷达波束指向侦察方法研究[J]. 中国电子科学研究院学报,2013,8(5):507-511.
- [8] 尹亮,姜秋喜,潘继飞,等. 一种相控阵雷达指纹特征提取技术[J]. 航天电子对抗,2012,28(5):47-49.