

利用发射自由度提高机载相控阵雷达检测性能的方法

董 鑫,杨国鹏,张 良,孟祥东

(南京电子技术研究所, 南京 210039)

摘要:机载相控阵预警雷达由于载机运动,收到的杂波信号呈现二维分布特性。针对地杂波二维耦合特性,文中提出一种利用发射自由度预白化杂波的方法,可以有效提高机载相控阵雷达的检测目标性能。该方法利用了二进制伪随机序列的自相关特性,通过在不同脉冲之间使用不同的发射权值,将来源于发射方向图副瓣的地杂波白化到噪声空间,进而提升了机载雷达的动目标检测性能。通过数值仿真实验,证明该方法能够预白化地杂波,有效提升了雷达检测目标的信杂噪比。

关键词:发射加权;预白化;机载雷达;动目标检测;空时自适应处理

中图分类号:TN957.51 文献标志码:A 文章编号:1004-7859(2020)02-0058-05

引用格式:董 鑫,杨国鹏,张 良,等. 利用发射自由度提高机载相控阵雷达检测性能的方法[J]. 现代雷达, 2020, 42(2): 58-62.

DONG Xin, YANG Guopeng, ZHANG Liang, et al. A method for improving the performance of airborne radar by using freedom degree of transmitter[J]. Modern Radar, 2020, 42(2): 58-62.

A Method for Improving the Performance of Airborne Radar  
by Using Freedom Degree of Transmitter

DONG Xin, YANG Guopeng, ZHANG Liang, MENG Xiangdong

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract:The clutter signals received by airborne phased array radar show two-dimensional distribution characteristics due to the motion of airborne aircraft. In view of the two-dimensional coupling characteristics of ground clutter, a method of pre-whitening clutter by the transmitter's freedom degree is proposed, which can effectively improve the detection performance of airborne phased array radar. This method utilizes the autocorrelation of binary pseudo-random sequence to whiten the sidelobe ground clutter into noise space by adjusting the transmission weight between different pulse, thus improving the effect of ground clutter suppression. Through numerical simulation experiments, it can be proved that this method can whiten the clutter and improve the signal-to-noise ratio of the target.

Key words:weights of transmitter; pre-whiten; airborne radar;moving target detection;space-time adaptive processing

0 引 言

由于机载相控阵雷达中载机的运动,接收到的地面杂波分布于全空域、全多普勒域。为了能够有效抑制地面杂波,一般采用空时自适应处理技术(STAP)。空时自适应处理技术最早由 BRENNAN L E 等<sup>[1]</sup>在 1973 提出,之后 KLEMMN R<sup>[2]</sup>、GUERCI J R<sup>[3]</sup>、王永良等<sup>[4]</sup>等在这个领域做出了卓越的贡献。STAP 利用接收端的自由度,对一个相干处理间隔(CPI)内脉冲进行自适应加权处理,形成对杂波响应的角度-多普勒凹陷。

20 世纪 80 年代,文献[5-6]提出了利用发射自由度提升雷达探测性能的构想。随着相控阵雷达的发展,雷达的硬件已经可以解耦发射的自由度,如空间、波形、极化等,使上述构想有了充分的实践基础。近年

来,利用发射自由度提高雷达探测性能受到了国内外学者的广泛关注。文献[7-8]利用多输入多输出(MIMO)雷达的特点,在接收端重构发射的自由度,在接收端重构发射波束时形成对地杂波响应的凹陷,但 MIMO 雷达自身存在基带信号正交性难以满足、发射功率低等问题;文献[9]将通信中信道估计的概念引入雷达,通过掌握信道的估计来调整发射自由度,在接收端获得了更高信杂噪比的信号,但该方法的目标探测性能对于信道估计误差极为敏感。

针对如何利用发射自由度提高雷达探测性能的问题,本文提出了对发射阵元进行空域、时域加权,抑制地杂波的方法。本文首先从方向图的角度分析了接收端 STAP 抑制杂波的机理,然后建立了发射权值到接收信号的联合模型。在联合模型的基础上,利用了 M 序列的相关性质设计了发射的空时权。经过仿真实验证明,该方法可以有效地提高机载雷达使用空时自

通信作者:董鑫 Email:xindong0707@foxmail.com  
收稿日期:2019-10-18 修订日期:2019-12-19

适应处理技术探测动目标的性能。

1 机载雷达 STAP 技术

1.1 STAP 处理模型

机载雷达运动模型如图 1 所示, 载机以速度  $V$  沿平行于  $X$  轴的方向飞行, 雷达阵列为均匀间隔正侧视一维阵列, 阵元沿  $X$  轴方向排列。阵列的阵元间隔  $d=\lambda/2$ , 阵元数为  $N$ , 其中  $\lambda$  为雷达载波的波长。雷达脉冲重复频率为  $f_r$ , 一个 CPI 内脉冲数为  $M$ 。

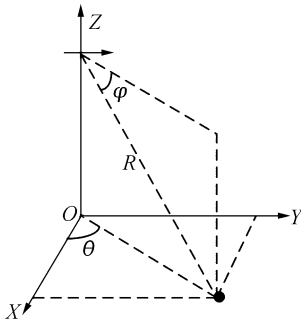


图 1 机载雷达几何布局

考虑一个位于方位角为  $\theta_i$ , 俯仰角为  $\varphi_i$ , 距离为  $R_i$  的点目标。该目标的空间导向矢量  $\mathbf{a}(\bar{\theta}_i)$  和时域导向矢量  $\mathbf{b}(\bar{f}_i)$  如下

$$\mathbf{a}(\bar{\theta}_i) = [1, e^{j2\pi\bar{\theta}_i}, \dots, e^{j2\pi(N-1)\bar{\theta}_i}] \quad (1)$$

$$\mathbf{b}(\bar{f}_i) = [1, e^{j2\pi\bar{f}_i}, \dots, e^{j2\pi(M-1)\bar{f}_i}] \quad (2)$$

式中: 归一化角度  $\bar{\theta}_i = \frac{d \sin(\theta_i)}{\lambda}$ ; 归一化多普勒为  $\bar{f}_i = \frac{2VT}{\lambda} \sin(\theta_i)$ 。位于  $(\theta_i, f_i)$  的目标的导向矢量  $\mathbf{v}_i$  为

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{b}(\bar{f}_i) \otimes \mathbf{a}(\bar{\theta}_i) \quad (3)$$

式中:  $\otimes$  为 Kronecker 积<sup>[10]</sup>。

传统的 STAP 技术处理流程如图 2 所示, 其中 STAP 最优权矢量

$$\mathbf{w} = k\mathbf{R}^{-1}\mathbf{v}_i \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{R}$  为对目标所在距离环的杂波的估计;  $k = 1/(\mathbf{v}_i^H \mathbf{R} \mathbf{v}_i)$ 。

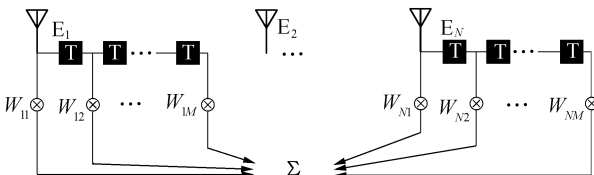


图 2 STAP 处理示例

在正侧视阵下, 若目标的归一化角度为 0、归一化多普勒为 -0.38。图 3 为某个距离环上杂波的功率谱, 图 4 为经过 STAP 计算出的最优权的二维响应谱。接收端 STAP 本质是对一个 CPI 内所有脉冲进行自适应加权处理, 令权值在角度-多普勒域上的响应在杂波所在位置形成凹陷, 达到滤除杂波的目的。

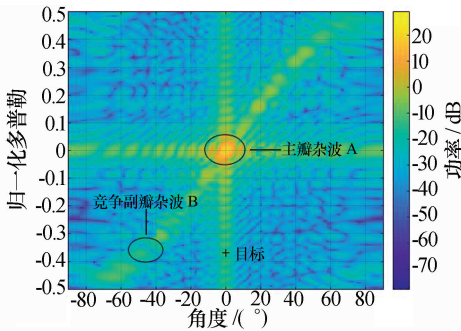


图 3 信号的角度-多普勒谱

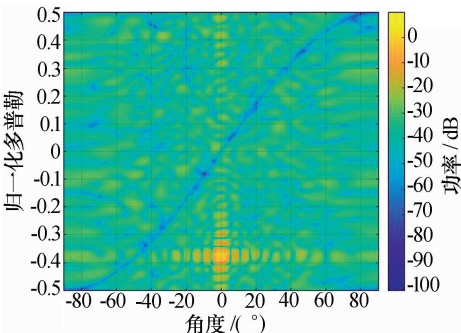


图 4 最优权的角度-多普勒响应

1.2 STAP 权值一维方向图畸变

空时自适应技术的数学形式与维纳滤波器等价, 维纳滤波器是一种去相关滤波器, 其输出的信杂噪比可以由式(5)表示<sup>[11]</sup>

$$SCNR = 1 + \frac{\mathbf{v}_i^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{s}}{\mathbf{v}_i^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{c} + \mathbf{v}_i^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{n}} \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{s}$  为目标信号;  $\mathbf{c}$  为杂波信号;  $\mathbf{n}$  为噪声信号。分析式(4), 当杂波信号空间与信号空间完全不相关时,  $SCNR$  取得最大值, 此时维纳滤波器等价于匹配滤波器。

由于地面杂波分布于全空域、全多普勒域, 导致杂波空间与信号空间有部分重合, 与目标信号相关性较强的杂波信号分量主要来自于与目标角度相同的杂波以及与目标多普勒相同的杂波。

在通过式(5)求取 STAP 权值后, 可以将 STAP 分解为  $M$  个空域滤波权对一个 CPI 内  $M$  个脉冲进行空域滤波后求和; 同理, 也可以将 STAP 分解为  $N$  个多普勒域滤波器对  $N$  个不同阵元进行多普勒滤波后求和。图 5 是阵列不同脉冲的空域接收方向图, 图 6 是阵列中不同阵元的多普勒响应, 且目标所在角度位于图 5

的最大响应处,目标多普勒位于图 6 中最大响应处。图 5 中箭头所指的方向图畸变代表接收 STAP 在空域滤波的过程中,滤波器中较多的自由度用来白化与目标多普勒竞争但归一化角度不同的竞争副瓣杂波 B;图 6 中箭头所指的滤波器响应畸变代表接收 STAP 在多普勒滤波过程中,滤波器中较多的自由度用来白化与目标角度竞争但多普勒不同的主瓣杂波 A。

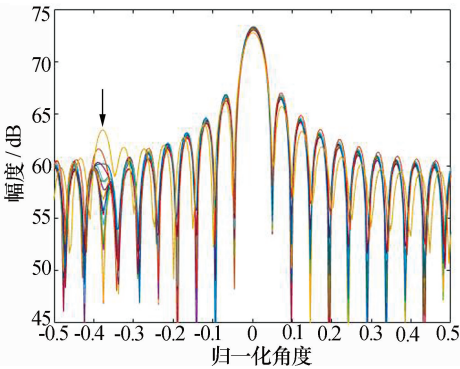


图 5 不同脉冲的空域方向图

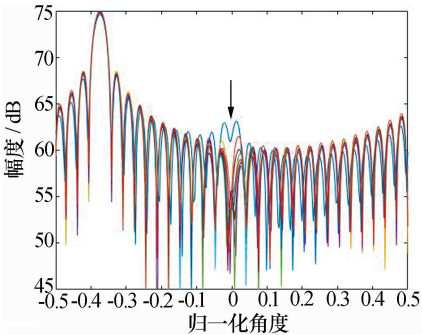


图 6 不同阵元的多普勒响应图

由于主瓣杂波 A 能量较强,STAP 通过深加权抑制该处杂波泄露到目标多普勒通道;而对于竞争副瓣杂波区 B,STAP 通过慢时间脉冲域调制将该处杂波能量白化到其他多普勒通道。

接收 STAP 滤波器对竞争副瓣杂波区 B 的时域调制等价于多普勒域卷积,该序列的多普勒域频谱如图 7 所示。

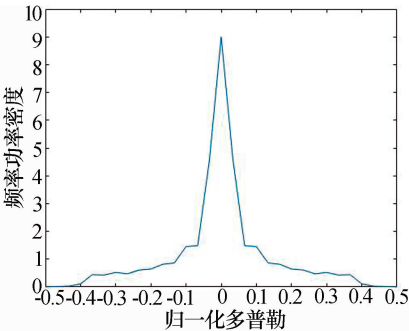


图 7 调制序列频域

2 发射调幅模型

接收端 STAP 使用了较大的自由度滤除与目标角

度相同的杂波以及与目标多普勒相同的杂波。其中,与目标多普勒相同的杂波来自于发射方向图的副瓣方向。因此,如果能够在发射端对杂波信号进行预处理,降低与目标多普勒相同的杂波的回波信号能量。即降低地杂波信号与目标信号的相关性,就能够有效提高接收端 STAP 处理后的信杂噪比。

考虑到在实际工程中,雷达在一个 CPI 内只检测主瓣的目标,而主瓣内动目标的多普勒与主瓣杂波的多普勒是必然不同的。因此,与主瓣内感兴趣目标的多普勒竞争的杂波的角度来源于方向图的副瓣方向。

使用超低副瓣天线能够有效抑制与目标多普勒相同的杂波,但获得超低副瓣电平必然导致天线口径效率的降低。考虑到杂波多普勒谱与慢时间脉冲的傅里叶变换关系,本文提出了在慢时间上对副瓣杂波进行随机调制的方法,将杂波在多普勒域进行预白化,进而降低与目标多普勒相同的杂波分量,提高接收端 STAP 的检测性能。

2.1 发射权值模型

对于机载雷达来说,地杂波回波信号不仅仅与真实地理环境相关,还受到发射权值的调制。通过调整不同阵元的馈电幅相权值得使得阵列的方向图主瓣指向空域某一个角度,且保持较低的副瓣。但相控阵在一个 CPI 内不同时刻的阵列加权仍然保持一致,没有有效利用发射的自由度,致使副瓣杂波仍然能够在多普勒域积累。因此,不同发射脉冲可以采用不同发射权值,即不同脉冲使用副瓣不同但主瓣相同的方向图,弱化副瓣杂波在多普勒域的累积效果。

发射权值  $\mathbf{W}$  为

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1N} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_{M1} & w_{M2} & \cdots & w_{MN} \end{bmatrix} \tag{6}$$

式中: $w_{pq}$  代表第  $q$  个阵元的第  $p$  个脉冲的幅相权值。对式(6)的每一行做  $N$  点的傅里叶变换,得到

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} f_1(\theta_1) & f_1(\theta_2) & \cdots & f_1(\theta_N) \\ f_2(\theta_1) & f_2(\theta_2) & \cdots & f_2(\theta_N) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f_M(\theta_1) & f_M(\theta_2) & \cdots & f_M(\theta_N) \end{bmatrix} \tag{7}$$

不考虑距离衰减及雷达系统参数的影响,其中  $f_p(\theta_q)$  为阵列发射的第  $p$  个方向图的在  $\theta_q$  处的幅值和相位。假设阵列中的阵元接收方向图为全向的。

对于某个距离环上归一化角度为  $\bar{\theta}_i$ 、归一化多普勒为  $\bar{f}_i$  的地杂波散射点,其回波信号的形式如下



$$\mathbf{C}_R(\theta_l) = \begin{pmatrix} f_1(\theta_l) \\ f_2(\theta_l) \\ \vdots \\ f_M(\theta_l) \end{pmatrix} * \mathbf{b}(\bar{f}_l) \otimes \mathbf{a}(\bar{\theta}_l) \quad (8)$$

式中: \* 代表对应元素相乘。将  $\mathbf{C}_R(\theta_l)$  中每  $N$  个元素作为矩阵的一行,进行矩阵化得  $\mathbf{W}_R(\theta_l)$ 。

为了利用发射自由度优化地杂波回波,可以通过求解式(9)的优化问题

$$\begin{cases} \max \mathbf{P}(\theta), \theta \in \text{主瓣} \\ \min \mathbf{P}(\theta), \theta \in \text{副瓣} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{P}(\theta)$  代表  $\theta$  角度处的地杂波信号功率。

对式(9)进行傅里叶变换,且考虑到信号空间、杂波空间和噪声空间的关系,可得

$$\begin{cases} \max \|\mathbf{R}(\theta) - \mathbf{I}\|_2, \theta \in \text{主瓣} \\ \min \|\mathbf{R}(\theta) - \mathbf{I}\|_2, \theta \in \text{副瓣} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\mathbf{R}(\theta)$  代表角度  $\theta$  处地杂波回波信号的自相关函数,即  $\mathbf{R}(\theta) = \mathbf{W}_R(\theta_l) \mathbf{W}_R(\theta_l)^H$ 。

通过求解式(10),可将地杂波信号空间白化为噪声空间,降低目标信号空间与杂波信号空间的相关性,提升接收端 STAP 处理结果的信杂噪比。

$\mathbf{R}(\theta)$  中对角线上的元素由一次快拍的数据决定。 $\mathbf{R}(\theta)$  中非对角线上的元素由慢时间不同脉冲的快拍数据决定。

由上述分析可知,利用超低副瓣天线等价于优化  $\mathbf{R}(\theta)$  对角线上的元素;而利用阵列慢时间的自由度白化杂波信号等价于优化杂波相关矩阵  $\mathbf{R}(\theta)$  的非对角线上的元素。

## 2.2 基于 M 序列的白化杂波方法

M 序列是一种二进制伪随机序列,广泛应用于数字通信领域<sup>[12]</sup>。M 序列具有伪随机噪声特性,其自相关函数具有类冲击函数性质如式(11),其中  $T_M$  为 M 序列分配给符号 1 或 0 的持续时间,  $N_M$  为 M 序列长度。长度为 63 的单极性 M 序列的自相关函数如图 8 所示,功率谱如图 9 所示。

$$\mathbf{R}_M(\tau) = 1 - \frac{N_M + 1}{N_M T_M} |\tau|, |\tau| \leq T_M \quad (11)$$

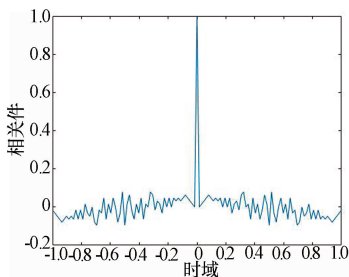


图 8 M 序列的自相关函数

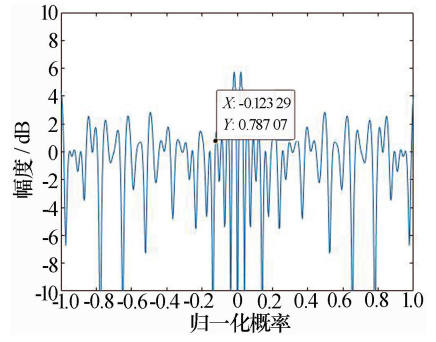


图 9 M 序列的功率谱密度

利用 M 序列良好的自相关特性,对雷达阵列方向图副瓣进行幅度调制。设计两个副瓣交错的方向图,如图 10 所示。图 10 中,方向图 1 是阵列权值为 20 dB 泰勒加权的方向图,方向图 2 是根据方向图 1 的零极点,通过移动零点设计出的方向图。

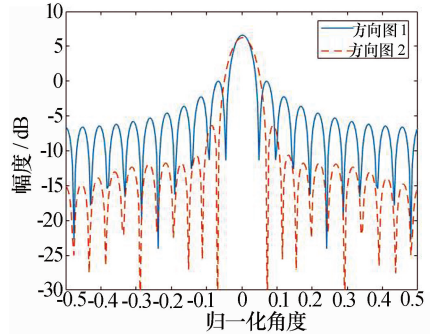


图 10 设计方向图

当 M 序列为 1 时,发方向图 1;当 M 序列为 -1 时,发方向图 2。对于  $\bar{\theta}_l = -0.05$  处的杂波,即方向图 1 的第一副瓣,是方向图 2 的零点。该方法在慢时间域使用 M 序列对该副瓣杂波进行了调制,使该点处杂波的能量中的一部分被白化到了噪声空间。

为了保证两个方向图在方向图 1 的前几个副瓣处的零极点交错,不可避免会导致方向图 2 的主瓣增益略低于方向图 1。在计算接收端 STAP 导向矢量时,其多普勒导向矢量变化为式(12)、(13),  $M(i)$  为 M 序列。  $f_1(\theta_0)$  代表第一个方向图主瓣处的幅值,  $f_2(\theta_0)$  代表第二个方向图主瓣处的幅值。

$$\mathbf{b}_m(\bar{f}_i) = \mathbf{b}(\bar{f}_i) * \mathbf{C}_m \quad (12)$$

$$\mathbf{C}_m(i) = \begin{cases} f_1(\theta_0) & M(i) = 1 \\ f_2(\theta_0) & M(i) = -1 \end{cases} \quad (13)$$

对于归一化角度不在方向图 1 和方向图 2 的零极点交错位置的地杂波,计算多普勒导向矢量  $\mathbf{b}_m(\bar{f}_i)$  与真实多普勒导向矢量失配,等价于降低了地杂波信号的能量。

3 示例仿真及结论

仿真参数设置:阵列为间隔为半波长的一维线阵,阵元数目  $N=21$ ,慢时间域脉冲数  $M=31$ ,脉冲重复频率  $PRF=3\ 200\text{ Hz}$ ,基带信号是时宽带宽积为 100 的线性调频信号,载频  $f_c=1.2\text{ GHz}$ ,目标的归一化角度为 0,载机飞行速度为  $200\text{ m/s}$ ,阵列的偏航角为 0,杂波模型为  $\gamma=25$  的恒  $\gamma$  模型。阵列的阵元有 1 dB 的增益误差,相位误差不超过  $5^\circ$ 。

阵列接收到的信号经过放大器、模/数变换、匹配滤波后,分析目标所在距离环的角度-多普勒谱,如图 11 所示。

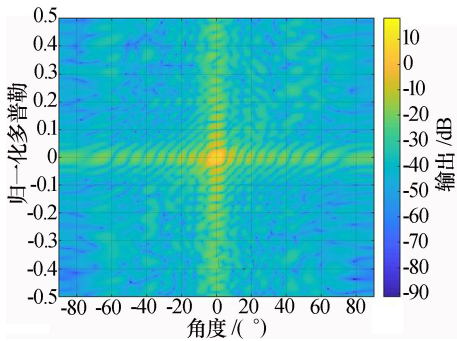


图 11 目标所在距离环的角度-多普勒功率谱

从图 11 中可以看到,由于副瓣受到 M 序列的调制,图 3 中的杂波脊已经被预先白化,与目标多普勒竞争的杂波也被预先白化,达到预期效果。

通过 GIP 方法选取估计杂波协方差矩阵所需要的样本之后,在接收端采用 STAP 方法对收到的信号进行处理,得到的检测结果如图 12 所示。

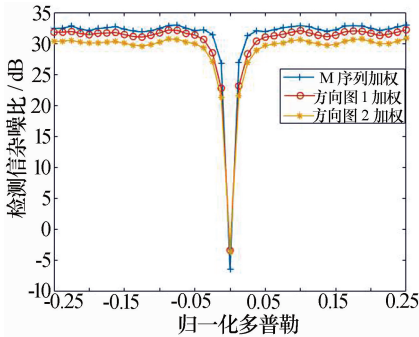


图 12 不同加权的检测结果

图 12 中三种加权方式的发射总能量相同,通过 STAP 输出的信杂噪比分析发射加权对雷达检测能力的影响。

由于方向图 2 的主瓣增益最低,目标在清晰区的检测信杂噪比低于其他加权方式。基于 M 序列的加权方式对副瓣杂波进行了白化,在等价主瓣增益低于

方向图 1 的主瓣增益的情况下,目标在清晰区的检测信杂噪比仍高于方向图 1 加权下的检测信杂噪比。

当目标低速运动时,STAP 的输出信杂噪比曲线凹口的宽度主要取决于发射方向图的主瓣宽度。从图 12 中可以看出,在发射端使用基于 M 序列的加权方式,使得杂波在慢时间脉冲域难以积累,等价于降低了发射方向图的主瓣宽度,减小了目标最低可检测速度。

4 结束语

传统相控阵雷达一般利用发射自由度在不同 CPI 进行调整,如调整波束指向,调整脉冲重复频率等。本文通过利用一个 CPI 内发射的慢时间自由度,降低目标信号空间、杂波信号空间的相关性,在接收端采用 STAP 技术的前提下,能够显著提高动目标检测的信噪比。相比于其他利用发射自由度的方法,本文提出的方法不需要掌握特殊的先验知识,对基带信号也没有特殊的要求,具有较高的工程实际价值。

参考文献

[1] BRENNAN L E, REED L S. Theory of adaptive radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1973, AES-9(2): 237-252.

[2] KLEMM R. Space-time adaptive processing: principles and applications[J]. Electronics & Communication Engineering Journal, 1998, 11(4): 172-172.

[3] GUERCI J R. Space-time adaptive processing for radar[M]. Norwood: Artech House, 2003.

[4] 王永良,彭应宁. 空时自适应信号处理[M]. 北京:清华大学出版社,2000.

WANG Yongliang, PENG Yingning. Space-time adaptive processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.

[5] FARINA A, STUDER F A. Detection with high resolution radar: great promise, big challenge[J]. Microwave Journal, 1991, 9(5): 683-687.

[6] PELL C. Book review: target adaptive matched illumination radar: principles and applications[J]. IEE Proceedings of Communications, Radar and Signal Processing, 1986, 133(6): 581-582.

[7] 张良,祝欢,吴涛. 机载预警雷达系统架构发展路径研究[J]. 现代雷达,2015, 37(12): 11-18.

ZHANG Liang, ZHU Huan, WU Tao. A study on the evolution way of the system architecture of AEW radar[J]. Modern Radar, 2015, 37(12): 11-18.

(下转第 66 页)

求,针对天线座中轴筒进行了刚强度有限元计算分析和结构优化。依据中轴筒刚度强度指标参数要求,通过对轻质材料性能等综合因素进行对比筛选,确定了TC18 高强钛合金为中轴筒工程应用材料。采用 SLM 技术实现了复杂截面高强钛合金构件的高精度成型,同时,获得了与锻造组织相当的微观组织和力学性能,TC18 材料沉积态初始组织抗拉强度、屈服强度达到 1 200 MPa。中轴筒制造工艺为具有复杂截面轻型机载天线座中轴筒及类似轻质高强高韧构件制造提供了一种可行的工艺参考方案。

参 考 文 献

[1] 曹 晨. 机载预警雷达七十年发展回顾与展望[J]. 现代雷达,2015, 37(12): 6-10.  
CAO Chen. Review and prospect of airborne early warning radar development[J]. Modern Radar,2015,37(12): 6-10.

[2] 黄 潇. 机载雷达天线座结构优化设计[J]. 电子机械工程, 2015, 31(5): 35-37.  
HUANG Xiao. Structure optimization of antenna pedestal in airborne radar[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2015, 31(5): 35-37.

[3] 付 磊, 廉哲满. 双向螺旋轴建模及其有限元分析[J]. 机械工程师,2014(12): 168-170.  
FU Lei, LIAN Zheman. Modeling and finite element analysis of spiral shaft[J]. Mechanical Engineer,2014(12): 168-170.

[4] 黄志涛, 锁红波, 巩水利, 等. TC18 钛合金电子束熔丝成形技术研究[J]. 航天制造技术,2015(4): 14-17.  
HUANG Zhitao, SUO Hongbo, GONG Shuili, et al. Study on TC18 titanium alloy by electron beam wire deposition[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2015(4): 14-17.

[5] 张 升, 桂睿智, 魏青松, 等. 选择性激光熔化成形 TC4

钛合金开裂行为及其机理研究[J]. 机械工程学报, 2013,49(23):21-27.

ZHANG Sheng , GUI Ruizhi, WEI Qingsong, et al. Cracking behavior and formation mechanism of TC4 alloy formed by selective laser melting[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013,49(23): 21-27.

[6] 张绪虎, 徐桂华, 孙彦波. 钛合金热等静压粉末冶金技术的发展现状[J]. 宇航材料工艺,2016, 46(6): 6-10.  
ZHANG Xuhu, XU Guihua, SUN Yanbo. Research progress of Ti products fabricated by hot isostatic pressing( HIP)[J]. Aerospace Materials and Technology, 2016, 46(6): 6-10.

[7] 庄宝潼, 刘风雷, 朱成祥. 紧固件用 TC16 钛合金强化热处理工艺研究[J]. 航空制造技术,2016, 59(19): 83-86.  
ZHUANG Baotong, LIU Fenglei, ZHU Chengxiang. Study of heat treatment process on TC16 titanium alloy for fastener[J]. Aeronautical Manufacturing Technology,2016, 59(19): 83-86.

[8] 丁 悦, 王 焱, 刘 畅, 等. 钛合金切削力和表面粗糙度试验研究[J]. 航空制造技术, 2016, 59(6): 88-91.  
DING Yue, WANG Yan, LIU Chang, et al. Experimental study on cutting force and surface roughness when milling titanium alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(6): 88-91.

严战非 男,1967 年生,大学本科,高级工程师。研究方向为雷达天线结构制造工艺。

邱保安 男,1977 年生,硕士,高级工程师。研究方向为雷达伺服传动结构制造工艺。

吕 辉 男,1991 年生,硕士,工程师。研究方向为雷达高频元件精密加工工艺。

(上接第 62 页)

[8] 邹佳龙,姚 元,王建明. 相控阵 MIMO 雷达最佳子阵划分[J]. 现代雷达,2016,38(1): 10-13.  
ZOU Jialong, YAO Yuan, WANG Jianming. The optimal sub-array number for phased MIMO radar[J]. Modern Radar, 2016, 38(1): 10-13.

[9] GUERCI J R, WICKS M C, BERGIN J S, et al. Theory and application of optimum and adaptive MIMO radar[C]// IEEE Radar Conference. Rome: IEEE Press, 2008: 1-6.

[10] BRENNAN L E, MALLETT J. Efficient simulation of external noise incident on arrays[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1976, 24(5): 740-741.

[11] 西蒙·赫金. 自适应滤波器原理[M]. 郑宝玉, 王 磊, 朱 艳, 等译. 5 版. 北京: 电子工业出版社,2010.  
HAYKIN S. Adaptive filter theory[M]. ZHENG Baoyu, WANG Lei, ZHU Yan, et al, translate. 5th ed. Beijing:

Publishing House of Electronics Industry, 2010.

[12] 张贤达,保 铮. 通信信号处理[M]. 北京: 国防工业出版社,2010.  
ZHANG Xianda, BAO Zheng. Communication signal processing[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.

董 鑫 男,1995 年生,硕士研究生。研究方向为机载雷达信号处理。

杨国鹏 男,1994 年生,硕士研究生。研究方向为阵列信号处理。

张 良 男,1966 年生,博士,研究员高级工程师。研究方向为机载预警雷达系统设计、雷达信号与信息处理技术。

孟祥东 男,1980 年生,博士,高级工程师。研究方向为信号与信息处理。