

# 基于特征提取的智能天线波束校正问题研究

王乐宁, 戴国宪, 宋 懋  
(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

**摘要:**基于阵列相关矩阵的特征分解技术,提出了特征值门限提取的智能天线波束校正方法。特征分解得到特征值与对应特征矢量后,通过门限提取,摒弃部分小特征值,使特征谱结构保持良好的稳健性。仿真结果表明:该方法能够有效抑制信号对消,改善旁瓣电平性能,收敛速度优于传统方法,具有良好的波束校正能力。

**关键词:**自适应数字波束形成;特征谱分解;智能天线;波束校正

**中图分类号:**TP31 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2003)06-0056-04

波束形成算法是智能天线技术的核心,自适应数字波束形成(ADBF)技术能够通过调整天线波束指向使多阵元阵列实现空间分离,并且具有实现超低旁瓣的潜力。然而,在空时自适应处理(STAP)过程中,自适应形成零点抑制有源干扰的同时,旁瓣电平性能会变差,这将极大地影响到空域多路信号的不失真接收。目前采用的一些波束校正与保形方法如对角加载<sup>[1]</sup>、最优权加载<sup>[2]</sup>等,不同程度地改善了波束畸变,但它们对误差都较为敏感,并且减少了系统的部分抗干扰性能,增加了实时处理的难度。

基于接收信号矢量相关矩阵的特征分解技术,本文提出了特征值门限提取的智能天线波束校正方法,并从STAP的角度作了相关理论与仿真分析,较好地解决了降低旁瓣电平与实现干扰对消零点的问题。

## 1 特征波束校正思路与方法

### 1.1 阵列相关矩阵的形成与特征分析

波束校正即自适应方向图保形,在干扰源方向置零的同时,使自适应方向图保持静态方向图的低旁瓣电平性能。STAP处理中,计算阵列相关矩阵 $R$ ,导出最佳权值 $W_{opt} = \mu R^{-1}S$ ,得到自适应方向图,其中 $\mu$ 为常数, $S$ 是空时导向矢量<sup>[3]</sup>。特征分解后对 $R$ 求逆

$$R^{-1} = \sum_{i=1}^p \frac{1}{\lambda_i} V_i \cdot V_i^H + \sigma^2 \sum_{i=p+1}^{NK} V_i \cdot V_i^H \quad (1)$$

其中: $H$ 是共轭转置; $N$ 为天线单元数; $K$ 是快拍采样数目; $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p$ 为相关矩阵 $p$ 个大特征值, $NK-p$ 个小特征值近似等于噪声方差 $\sigma^2$ ;  $V_i$ 为对应 $\lambda_i$ 的特征矢量。

### 1.2 特征值门限提取的波束校正方法

小特征值对应的特征波束扰动很大,这是引起波束畸变的主要原因。本文提出的波束校正方法,主要是降低小特征值波束的扰动影响。

在智能天线系统处于理想无误差情况下,干扰与有用信号在时域和空域均平稳,分别定义集合 $\Gamma$ 与子集 $\Theta$ 为

$$\Gamma = \{(n, k) \mid 1 \leq n \leq N, 1 \leq k \leq K\} \quad (2)$$

$$\Theta = \{(n, k) \mid \forall (n_1, k_1) \in \Theta, \forall (n_2, k_2) \in \Theta, n_1 \omega_s + k_1 \omega_t = n_2 \omega_s + k_2 \omega_t\} \quad (3)$$

其中, $\omega_s$ 和 $\omega_t$ 分别为空域与时域角频率。子集 $\Theta$ 内任何序列 $(n, k)$ 的采样信号完全相同,其接收数据矢量

收稿日期:2002-12-04

作者简介:王乐宁(1975-),男,甘肃兰州人,博士生,主要从事武器系统电子对抗、阵列信号处理、软件无线电研究;  
戴国宪(1938-),男,辽宁沈阳人,教授,博士生导师,主要从事电磁场与微波技术、武器系统电子对抗研究。

的相关矩阵具有相同的特征值,因此可将集合  $\Gamma$  划分为  $m$  个互不相交的子集  $\Theta_m$ ,其中  $\Theta_m^s$  为有用信号集而  $\Theta_m^j$  为干扰信号集,且每一个子集均为最大化。考虑到接收天线的方向函数  $F(\theta, \varphi)$  代表阵列系统的一般性,可以认为来自不同子集接收数据的相关矩阵满秩,因此,阵列接收到干扰信号空间的维数就是子集  $\Theta_m^j$  的个数。

理想情况时,对应于噪声电平的小特征值严格相等,其特征波束不参与自适应方向图的形成。而实际工程实现时不可避免的存在误差,并且,用有限次快拍数据估计权值时,由于小特征值发散,对应特征波束有较大的起伏,因而在参与自适应方向图的形成时导致波束严重畸变。另外,干扰谱结构本身包括干扰特征矢量与静态特征矢量的相关性等原因都是方向图畸变的因素。

由阵列接收矢量形成相关矩阵  $R$ ,首先对  $R$  作特征分解,全部特征值按幅度递减排序。定义全空时域特征值数目  $E_{st} = NK$ ,选取的特征值门限幅度为  $a_\eta$  (dB),对应序列号  $i_\eta \leq E_{st}$ 。提取幅度大于  $a_\eta$  的特征值及其特征矢量参与自适应权值计算,摒弃小于  $a_\eta$  的特征值,即有效数据量  $\eta = i_\eta / E_{st}$ ,这样,定义特征值门限,以逐步舍弃小特征值的方法拟合得到新矩阵,特征提取后的逆矩阵由式(1)导出

i) 当  $p \leq i_\eta < E_{st}$  时

$$R_E^{-1} = \sum_{i=1}^p \frac{1}{\lambda_i} V_i \cdot V_i^H + \sigma^2 \sum_{i=p+1}^{i_\eta} V_i \cdot V_i^H + \frac{E_{st} - i_\eta}{\lambda_{i_\eta}} V_{i_\eta} \cdot V_{i_\eta}^H \quad (4)$$

ii) 当  $0 < i_\eta < p$  时

$$R_E^{-1} = \sum_{i=1}^{i_\eta} \frac{1}{\lambda_i} V_i \cdot V_i^H + \frac{E_{st} - i_\eta}{\lambda_{i_\eta}} V_{i_\eta} \cdot V_{i_\eta}^H \quad (5)$$

因此,校正后的自适应最优权值为

$$W_{opt} = \mu \left( \frac{1}{\sigma^2} S - \sum_{i=1}^{i_\eta} b_i V_i - (E_{st} - i_\eta) b_{i_\eta} V_{i_\eta} \right) \quad (6)$$

其中  $b_i = \left( \frac{1}{\sigma^2} - \frac{1}{\lambda_i^2} \right) V_i S$ 。式(4)表明,最优权矢量  $W_{opt}$  是矢量组  $[S, V_1, V_2, \dots, V_{i_\eta}]$  的线性组合,而且可以把  $W_{opt}$  分解为两部分

$$W_{opt} = W_q \cdot S - W_A \cdot S \quad (7)$$

其中  $W_q$  表示静态权矢量,它是静态常规波束形成矢量,  $W_A$  表示自适应抑制干扰的权矢量,它处于干扰子空间  $\Theta_m^j$  内。最后的波束方向图为静态常规波束减去自适应波束。当  $i_\eta$  远大于  $p$  时,由特征分解的逆向运算形成的相关矩阵仍含有部分噪声子空间分量;当  $i_\eta$  接近于  $p$  时,得到相关矩阵的噪声子空间分量减少,但仍保留了大特征值信息,因此波束扰动较小,可以有效减小波束畸变。

## 2 性能分析与仿真

以一个典型  $M \times N$  智能天线阵列结合 Capon 法<sup>[3]</sup>和 3 通道联合处理(3-CAP)法<sup>[4]</sup>,分别针对单路和 3 路多普勒通道输出的特征谱分布特性来研究特征值提取对系统自适应处理综合性能的改善效果,其中矩形面阵为  $16 \times 16$  单元,采样脉冲数为  $k = 34$ 。

Capon 法针对一个多普勒通道的输出作处理,使干扰效果局域化。3-CAP 方法的原理是组合了多个时域多普勒通道以实现无源或有源干扰抵消,当检测到第  $k$  个多普勒通道时,这一通道的输出和与它相邻的左右通道的输出一起进行自适应处理。

鉴于处理系统误差的存在,以及传统波束保形方法在有误差时对波束畸变的改善效果并不明显,我们在研究中依据特征值提取的基本思路,对特征提取方法的误差特性作了对照分析。设阵列存在幅相误差,第  $n$  个阵元对应的幅度和相位误差分别计为  $\delta_n$  和  $\phi_n$ ,是独立的零均值高斯随机变量,均方误差  $\delta_n = \phi_n = 0.05$ 。

图 1 是上述两种方法在无误差情况和有误差时的特征分布曲线。从全空时域收敛到空域, Capon 法(无误差曲线 No. 1、有误差曲线 No. 2)取单路多普勒通道,对应  $E_{st} = N$ ;对 3-CAP 法(无误差曲线 No. 3、有误差曲线 No. 4)取 3 路相邻多普勒通道作研究,  $E_{st} = 3N$ 。可以看到,半数以上的特征值幅度小于  $-50$  dB,3 通道时小特征值数目更多,需要摒弃大量的小特征值才可以达到波束校正的目的。此外,阵元误差引起了大量伪干扰,使干扰自由度明显增加,无误差和有误差时的特征值分布曲线存在明显差异,会直接影响到特征值门

限幅值的选择范围<sup>[5]</sup>。

图2为对应的改善因子变化特性。仍以曲线1~4分别标记单路、3路多普勒通道输出的理想状态和存在误差的不同情况。图中横坐标为各次特征值提取数目相对于 $E_n$ 的百分率;纵坐标为自适应方法计算得到的系统改善因子(IF)。

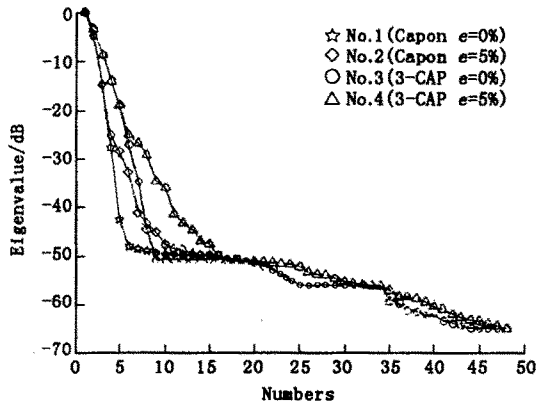


图1 原始相关矩阵特征分布

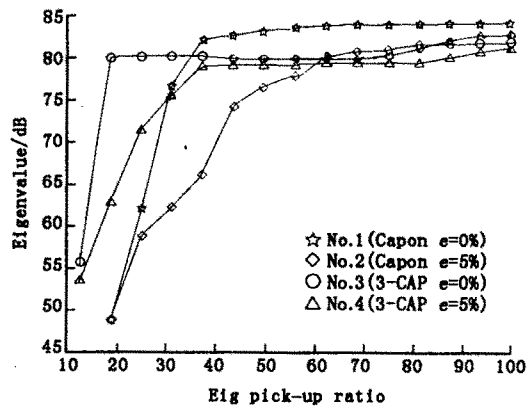


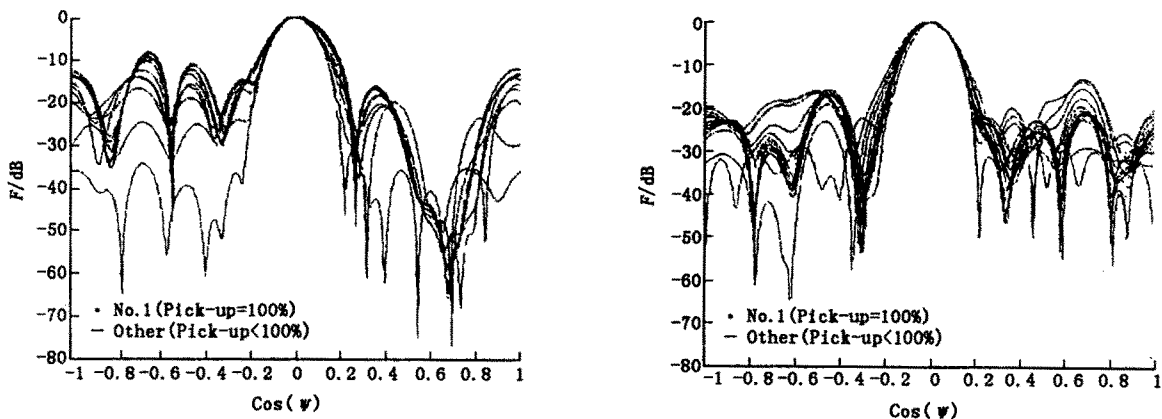
图2 特征提取后的性能改善因子

无论 Capon 法或 3 - CAP 法,在进行特征值门限提取的过程中,随着实际参与计算的有效特征值数目的减少,自适应处理性能的变化都经过了3个阶段:I区弱变、II区渐变、III区剧变。如3 - CAP方法,I区当 $\eta \in (38\%, 100\%)$ 时虽然已经摒弃了较多的特征值,但由于其幅度很小,而且相应的特征矢量趋于噪声子空间,因此,这一阶段的特征提取对系统性能的影响较小,相当于除去小的噪声分量。II区变化相对明显,但并未对系统的整体性能造成严重影响。III区由于摒弃了较多的特征值,其中可能含有包含接收数据特征信息的大特征值及对应的属于信号子空间的特征矢量,因此导致改善因子严重降低,有误差时最大下降幅度已超过30 dB,所以 $\eta$ 值不宜太小。

下面讨论特征值门限提取对自适应方向图的影响,即新方法的波束校正能力。无误差时,Capon法和3 - CAP方法都有较好的旁瓣特性,静态加权-40 dB以后波束畸变不大,因此即使 $\eta$ 已从100%取至10%,但自适应方向图旁瓣电平的降低并不明显,小于10 dB。

图3是考虑阵元误差时特征值门限提取对天线方向图的影响, $\psi$ 为入射锥角。图3(a)为单通道、图3(b)为3路多普勒通道。点画曲线标记为未作特征值提取(即 $i_n = N$ 或 $3N, \eta = 100\%$ )的原始自适应方向图,其余分别代表提取门限不同时,即 $\eta$ 从100%取至10%时波束校正后得到的自适应方向图。

随着特征值幅值选取门限 $a_n$ 的逐步提高,参与自适应计算的有效特征值、特征矢量数目减小,小特征值被逐次摒弃,对应噪声子空间特征矢量被剔除,因此处理可以得到性能优良的自适应方向图,旁瓣电平明显降低。考虑5%误差情况,Capon法原始自适应方向图旁瓣电平-8.3 dB,取门限 $a_n = -41.5$  dB、 $\eta = 50\%$ 时,Max SL下降到-13.7 dB;当 $a_n = -30.2$  dB、 $\eta = 31\%$ 时,Max SL = -23.5 dB,特征值门限提取后的旁瓣电平最大限度可以改善至-40.1 dB。



(a) 单路多普勒通道

(b) 三路多普勒通道

图3 存在5%阵元误差时的自适应方向图校正性能

为了确定特征值提取门限的最佳范围,对每一不同门限得到的波束方向图,在除去主波束左右的半功率

波束宽度  $2\theta_{0.5}$  对应的电平分量后作了峰值旁瓣电平 (Max SL) 搜索, 结果见表 1。

表 1 不同特征值提取门限对应的 Max SL

	$\eta(\%)$												
	18	25	31	43	50	56	62	68	75	81	87	93	100
Capon E5/dB	-40.1	-34.1	-23.5	-14.1	-13.7	-12.4	-10.3	-9.5	-9.1	-8.3	-8.2	-8.3	-8.3
3-CAP E5/dB	-38.9	-29.0	-21.3	-20.7	-20.7	-21.7	-22.2	-21.6	-20.1	-19.3	-17.4	-15.6	-13.4

因此, 综合考虑 STAP 处理的整体性能, 包括剩余干扰输出功率等因素, 结合 IF 的特性分析可以得到以下结论: 特征提取方法能够有效地减少噪声子空间的相关分量, 依据门限幅度的具体选择, 部分或全部小噪声特征值分量被剔除, 不参与后续自适应处理, 最大限度地减小噪声扰动。误差引起的特征值扰动在特征提取之后也同样被部分摒弃, 有效抑制了扰动影响。反映在校正之后的自适应方向图中, 是主瓣宽度变窄、旁瓣电平随  $a_n$  的抬高而得到降低, 并且干扰抑制凹口的位置与深度均未受到影响。

通常情况下, 发射系统已采用较低旁瓣的天线,  $-15$  dB 左右的峰值旁瓣电平即可满足工程应用的要求。因此, 既考虑减弱波束畸变又兼顾干扰抑制性能, 在 Capon 法中理想门限取值范围为  $a_n \in [-35.2, -47.5]$  dB,  $\eta \in [43\%, 71\%]$ ; 3-CAP 法为  $a_n \in [-45.1, -51.6]$  dB,  $\eta \in [31\%, 50\%]$ 。这样既能保证旁瓣电平足够低, 改善因子下降的幅度在系统性能许可的范围以内, 也没有减弱处理器对干扰的自适应抑制能力。

借助于特征值门限提取, 在波束校正的同时还有效地改善了系统在误差环境下的信号检测性能, 由于摒弃了噪声子空间分量, 该方法提高了自适应处理速度, 有助于后续旁瓣消隐技术的顺利实现。

#### 参考文献:

- [1] Carlson B D. Covariance Matrix Estimation Errors and Diagonal Lading in Adaptive Arrays[J]. IEEE Trans on AES, 1988, 24(4):397-401.
- [2] Jablon N K. Adaptive Beamforming With the Generalized Sidelobe Canceller in The Presence of Array Imperfections[J]. IEEE Trans. 1986, 34(8):996-1002.
- [3] 保 铮. 相控阵机载雷达杂波抑制的时空二维自适应滤波[J]. 电子学报, 1993, 21(21):1-7.
- [4] Wang Yongliang, Peng Yingning, Bao Zhen. Space-Time Adaptive Processing for Airborne Radar With Various Array Orientations[J]. IEE Proc. Radar, Sonar, Naving, 1997, 144(10):330-340.
- [5] 赵清涛. 一种自适应门限控制方案的研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2001, 2(3):44-47.

(编辑:田新华)

## Research on Eigenvalue Abstraction – Based Updating Method for Smart Antenna Beam Forming

WANG Le-ning, DAI Guo-xian, SONG Mao

(The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan, Shaanxi 713800, China)

**Abstract:** For the purpose of beam shape remedy on smart antenna, a new beam form updating method is presented in this paper based on correlation matrix eigenstructure. After spectroscopic eigenvalue analysis, small eigenvalues under threshold are aborted to keep the robustness of eigenstructure spectrum. The computer simulation shows that, by using this method, the signal cancellation can be effectively inhibited and better beam shape with low sidelobe and fast convergence properties can be obtained.

**Key words:** adaptive digital beam forming; spectroscopic eigenvalue analysis; smart antenna; beam forming remedy