

文章编号:1001-2486(2004)03-0063-05

极化域—空域联合谱估计*

徐振海,王雪松,肖顺平,庄钊文

(国防科技大学电子科学与工程学院,湖南长沙 410073)

摘要:首次提出极化域—空域联合谱的概念,拓宽了电磁波特征参量的谱描述方法。结合具体的极化敏感阵列定义了极化域—空域联合谱,用 MUSIC 方法得到联合谱函数表达式。研究了联合谱的估计的重要性能指标;估计精度和分辨力,估计精度用克拉美劳限 CRB(Cramer-Rao Bound)来具体度量,分辨力由极化域—空域模糊函数以及模糊图来描述。最后仿真结果验证了该方法的有效性和理论分析的正确性。

关键词:极化敏感阵列;联合谱;多重信号分类;估计精度;克拉美劳限;分辨力;模糊函数

中图分类号:TN911 **文献标识码:**A

Joint Spectrum Estimation of Polarizational and Spatial Domains

XU Zhen-hai, WANG Xue-song, XIAO Shun-ping, ZHUANG Zhao-wen

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The notion of joint spectrum in polarizational and spatial domains is proposed for the first time, which can depict the EM signal completely. Based on the polarization sensitive array, the joint spectrum is defined and its analytic function is presented by using MUSIC method. The estimation accuracy and resolving power are investigated to measure the performance of joint spectrum. The Cramer-Rao Bound (CRB) is used to evaluate the accuracy of the estimated direction of the arrival and polarization angle. The ambiguity function and ambiguity area are used to evaluate the resolving power in polarizational and spatial domains. The simulations verify the superiority of the joint spectrum and coincide with the theoretical analysis.

Key words: polarization sensitive array; joint spectrum; MUSIC; accuracy; CRB; resolving power; ambiguity function

对于电磁波而言,空间到达角是宏观参量,描述了辐射源的空间位置信息,反映了电磁波的传播特性,用参量表示 (θ, φ) ;相对而言,极化状态是微观参量,描述了电磁波的矢量运动特征,是电磁波本身固有的属性^[1],用相位描述子表示 (γ, η) (简谐波情形)。理论上对于空间辐射信号的区分与鉴别、极化特征和空间到达角具有等同的作用,单纯的空域描述或极化域描述都不能充分描述电磁波的特性。

电磁波极化信息的开发和利用可以增强雷达系统的分辨能力,传统的雷达分辨性能通常依赖于信号的时延、多普勒频率和空间到达角,当多个回波信号在某一域中不能良好分辨时,它们常常可以在其它域中进行分辨。虽然极化域不像其它域那样可以单独提供分辨力^[2],但是当极化信息和其它信息联合处理时则变得特别有用。比如对于两个空间辐射源,利用空间谱估计技术在空域不能有效分辨的时候,极化域分辨技术就成为一种有意义且必要的补充。毋庸置疑,将极化信息和空域信息联合处理将大大提高雷达系统的分辨能力,这正是本论文研究的出发点。

1 联合谱定义

本小节将结合具体的极化敏感阵列系统定义极化域—空域联合谱。所谓极化敏感阵列就是将极化敏感阵元按一定方式在空间放置所构成的阵列,利用极化敏感阵元获取电磁波的极化信息,极化信息表现在阵元正交通道之间的相关特性;利用其空间布阵方式获取空间信息,空间信息表现在相邻阵元之间

* 收稿日期:2003-12-01

基金项目:全国优秀博士学位论文专项资金资助项目(08100101);湖南省自然科学基金资助项目(No. 02JJY2100);国防科技大学优秀博士生创新资助项目

作者简介:徐振海(1977—),男,博士生。

的空间相位延迟。图1给出了线性均匀极化敏感阵列的结构图,极化敏感阵元的两个正交偶极子分别沿 X 轴和 Y 轴方向排列,各个阵元沿 Y 轴均匀排列,阵元间距为 d 。

极化敏感阵列的波束扫描矢量与空间到达角和极化状态角均有关系,扫描矢量包括四个独立的参量,所以极化域—空域联合谱定义在四维空间上。为了分析方便且不失一般性,固定所有信号 $\varphi = 90^\circ$ 和 $\eta = 90^\circ$,也就是说,信号到达方向限制在 YOZ 平面(要进行二维到达角的估计即同时估计入射信号的仰角和方位角,线性阵是无能为力的,阵列结构应为平面阵或立体阵),信号极化状态限制在 Poincare 球面 $\eta = 90^\circ$ 的大圆轨道上,这样阵列扫描矢量简化为:

$$\mathbf{a}(\theta, \gamma) = \mathbf{a}_s(\theta) \otimes \mathbf{a}_p(\theta, \gamma) \quad (1)$$

其中,“ \otimes ”表示 Kronecker 积。 $\mathbf{a}_s(\theta)$ 为空间扫描矢量:

$$\mathbf{a}_s(\theta) = [1 \quad q \quad q^2 \quad \cdots \quad q^{N-1}]^T \quad (2)$$

其中, $q = \exp(j \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta)$, 为相邻阵元之间的空间相位延迟, $\mathbf{a}_p(\theta, \gamma)$ 为极化扫描矢量:

$$\mathbf{a}_p(\theta, \gamma) = [-\cos \gamma \quad j \cos \theta \sin \gamma]^T \quad (3)$$

可见极化扫描矢量 $\mathbf{a}_p(\theta, \gamma)$ 依赖于空间到达角。针对具体的极化敏感阵列系统,当阵列波束在极化—空域联合域中扫描时,阵列的输出随天线扫描矢量的变化关系曲面称为极化域—空域联合谱。

2 联合谱估计方法

一维谱估计方法较多,有常规谱估计方法、信号子空间类方法、子空间旋转方法以及加权子空间拟合类方法^[3,4]等,只要能够获得阵列输出的相关矩阵,则一维谱估计的方法基本上都可以自然地拓广应用到极化域—空域联合谱估计问题中,惟一不同的是,为了获得谱峰的位置必须进行二维搜索,从而获得信号到达角和极化状态。本文以多重信号分类 MUSIC(Multiple Signal Classification)方法为例研究极化域—空域联合谱。

假设有 M 个独立的同频窄带信号源入射到极化敏感阵列上,阵元数目为 N , \mathbf{A} 为阵列信号矢量矩阵, $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1(\theta_1, \gamma_1), \mathbf{a}_2(\theta_2, \gamma_2), \cdots, \mathbf{a}_M(\theta_M, \gamma_M)]$, 阵列输出协方差矩阵定义为 \mathbf{R}_x , 对其进行特征分解:

$$\mathbf{R}_x = \mathbf{U} \mathbf{D} \mathbf{U}^H = \sum_{i=1}^{2N} \lambda_i \mathbf{u}_i \mathbf{u}_i^H \quad (4)$$

其中, $\mathbf{D} = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_M, \lambda_{M+1}, \cdots, \lambda_{2N}\}$, 且 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \cdots \geq \lambda_M \geq \lambda_{M+1} = \cdots = \lambda_{2N} = \sigma^2$, 前 M 个大的特征值对应于信号的强度,最小的 $2N - M$ 个特征值相等,均等于阵列接收噪声强度。令: $\mathbf{U}_S = [\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \cdots, \mathbf{u}_M]$, $\mathbf{U}_N = [\mathbf{u}_{M+1}, \cdots, \mathbf{u}_{2N}]$, 则它们分别张成信号子空间 $\langle S \rangle = \text{span}\{\mathbf{U}_S\}$ 和噪声子空间 $\langle N \rangle = \text{span}\{\mathbf{U}_N\}$ 。不难看出阵列矢量张成子空间与信号子空间相同,并且与噪声子空间正交,即: $\text{span}\{\mathbf{A}\} = \text{span}\{\mathbf{U}_S\}$, $\text{span}\{\mathbf{A}\} \perp \text{span}\{\mathbf{U}_N\}$, 根据此性质定义 MUSIC 零谱为阵列扫描波束矢量在噪声子空间的投影长度,即:

$$Z_{\text{MUSIC}}(\theta, \gamma) = \|\mathbf{a}(\theta, \gamma)^H \mathbf{U}_N\|^2 = \|\mathbf{a}(\theta, \gamma)\|^2 - \sum_{i=1}^M |\mathbf{a}(\theta, \gamma)^H \mathbf{u}_i|^2 \quad (5)$$

可以看出,对于任意的空间到达和任意极化的信号, $Z_{\text{MUSIC}}(\theta, \gamma) \geq 0$, 特别地,对于这 M 个信号, $\mathbf{a}(\theta_m, \gamma_m) \in \langle S \rangle$, $Z_{\text{MUSIC}}(\theta_m, \gamma_m) = 0$, 也就是说 MUSIC 零谱在信号位置上取得局部极小值。

在实际应用中,阵列的协方差矩阵未必精确已知,仅仅能够获得一系列采样样本数据 $\{\mathbf{x}_k\}_{k=1}^K$, 因此可以利用这些采样样本得到阵列协方差矩阵的极大似然估计为: $\hat{\mathbf{R}}_x = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{x}_k \mathbf{x}_k^H$, 然后对估计的阵列协

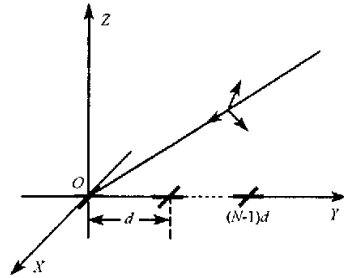


图1 极化敏感阵列结构图

Fig.1 The structure of polarization sensitive array

方差矩阵进行特征分解: $\hat{\mathbf{R}}_x = \sum_{i=1}^{2N} \hat{\lambda}_i \hat{\mathbf{a}}_i \hat{\mathbf{a}}_i^H$, 进而得到估计的信号特征矢量 $\hat{\mathbf{U}}_S$ 和噪声特征矢量 $\hat{\mathbf{U}}_N$, 此时零谱的估计为:

$$\hat{Z}_{\text{MUSIC}}(\theta, \gamma) = \|\mathbf{a}(\theta, \gamma)\|^2 - \sum_{i=1}^M |\mathbf{a}(\theta, \gamma)^H \hat{\mathbf{a}}_i|^2 \quad (6)$$

利用最优化搜索的方法得到估计零谱的 M 个极小值, 这些极小值的位置 $(\hat{\theta}_m, \hat{\gamma}_m)$ 即为信号源到达角和极化角的估计, 也可以对零谱求倒数, 并搜索其 M 个极大值, 实际中应用的极化域—空域 MUSIC 联合谱定义为:

$$P_{\text{MUSIC}}(\theta, \gamma) = \frac{1}{\|\mathbf{a}(\theta, \gamma)\|^2 - \sum_{i=1}^M |\mathbf{a}(\theta, \gamma)^H \hat{\mathbf{a}}_i|^2} \quad (7)$$

其中, “ $\|\cdot\|$ ”表示 Frobenius 范数。

在 MUSIC 联合谱中, 用了全部的噪声特征矢量。MUSIC 联合谱非常平滑, 且信号矢量位置上峰值非常尖锐, 但谱峰的高度并不代表相应位置上的信号强度。众所周知, 估计精度和分辨力是衡量谱估计性能的重要指标, 估计精度用克拉美劳限 CRB(Cramer-Rao Bound)来具体度量, 分辨力由极化域—空域模糊函数以及模糊图来描述。

3 联合谱估计精度

在联合谱的估计过程中, 阵列接收噪声和阵列协方差矩阵估计误差导致信号特征参量估计值偏离真实值。通过直观的分析, 可以得到如下定性的结论: 阵列信噪比越高, 估计精度越高; 采样点数目越多, 估计精度也提高。本小节特别考虑两个信号源参量估计之间的互相影响, 并且不失一般性, 假定其中一个信号为期望信号(Signal), 另外一个干扰信号(Interference), 研究干扰信号存在时对期望信号估计精度的影响, 具体研究期望信号到达角 θ_s 和极化状态角 γ_s 的估计精度与干扰信号到达角 θ_i 以及极化状态角 γ_i 的关系。在以下性能分析中基本参数设置如下: 极化敏感阵元数目 $N=8$, 阵列采样点数 $K=50$, 其中信噪比 SNR 为 10dB, 信干比 SIR 为 0dB, 期望信号特征参数 $(\theta_s, \gamma_s) = (15^\circ, 45^\circ)$ 。

图 2(a)、(b)分别给出了信号到达角和极化角估计标准差(STD)与干扰源位置的关系曲面。定义干扰与信号的空间距离为: $\Delta\theta = |\theta_i - \theta_s|$, 极化距离为: $\Delta\gamma = |\gamma_i - \gamma_s|$ 。可以看出当信号和干扰状态参量完全相同时, 信号参量估计标准差为无穷大, 这是由于 Fisher 信息矩阵奇异的缘故; 当干扰与信号特征参量接近时, 信号估计精度受干扰信号影响严重, 具体地, 当 $\Delta\theta \leq 1^\circ$ 且 $\Delta\gamma \leq 5^\circ$ 时信号的估计精度较差。

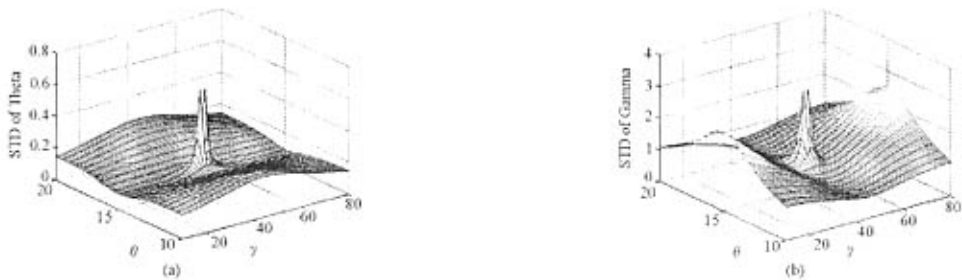


图 2 (a)到达角估计标准差与干扰源参量的关系曲面; (b)极化角估计标准差与干扰源参量的关系曲面
Fig.2 (a)The STD of DOA v. s. interference parameters; (b)The STD of polarization angle v. s. interference parameters

4 联合谱分辨力

谱分辨力反映了谱估计器表现谱微小细节的能力, 当两个信号到达角和极化状态差别都较大时分辨是显然的, 通常用两个参数接近的信号来评价联合谱的分辨能力。在本小节的分析中用极化域—空

域模糊函数以及模糊图来描述联合谱的分辨能力。对于给定的两个信号,增加采样点数和提高信噪比对提高谱分辨力均是有利的,并且可以看出当采样点数较少时可以通过提高信噪比来将信号分辨;同样地,当信噪比较低时可以通过增加采样点数来将信号进行分辨。因此可以猜想期望信号和干扰信号特征参量给定的条件下,需要一定的信噪比(dB表示)和采样点数(dB表示)总和来克服阵列信号的模糊度。极化域—空域信号模糊度仅与信号的特征参量有关,表征了两信号区分的难易程度。模糊函数等高线图称为极化域—空域模糊图,每条曲线的高度为信噪比采样点数量。

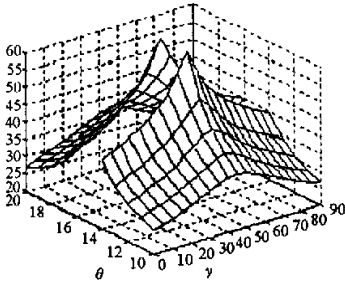


图3 极化域—空域模糊函数图
Fig.3 The ambiguity function in polarizational and spatial domains

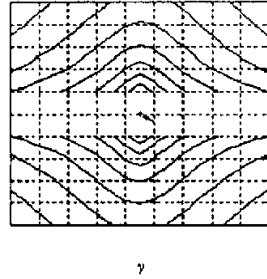


图4 极化域—空域模糊图
Fig.4 The ambiguity area in polarizational and spatial domains

期望信号特征参量为 $(\theta_s, \gamma_s) = (15^\circ, 45^\circ)$,干扰特征参量变化,图3给出了极化域—空域模糊函数图,图4给出是极化域—空域模糊图。可以看出当干扰到达角和信号到达角相同时,两信号的模糊度为无穷大,因此两信号根本无法分辨,随着两信号距离变大,两信号的模糊度减小。

5 仿真与结论

在仿真中,所有信号的信噪比均为 $SNR = 10\text{dB}$,采样点数 $K = 50$,空间到达角 $\theta \in [0, 60^\circ]$,极化状态角 $\gamma \in [0, 90^\circ]$ 。特别地,比较研究两个信号源情形,给出不同信号参量条件下的极化域—空域联合谱图,着重比较联合谱对信号的分辨性能。不失一般性,称其中一个信号为期望信号,参量为 $(\theta_s, \gamma_s) = (15^\circ, 45^\circ)$;另一个信号为干扰信号,其参量可以自由变化。

5.1 到达角和极化角均不相同

在图5(a)中,干扰信号参量为 $(\theta_i, \gamma_i) = (30^\circ, 10^\circ)$,两信号到达角和极化参量均不相同,此时联合谱呈现两个谱峰,谱峰大约为25dB,谱峰比较尖锐并且谱比较平滑,可以清晰地分辨两个信号,根据谱峰的位置可以正确估计出信号的空间到达角和极化状态角。

5.2 到达角不同,极化角相同

在图5(b)中,干扰信号参量 $(\theta_i, \gamma_i) = (30^\circ, 45^\circ)$,也即两信号到达角不同,而极化参量相同,此时联合谱仍然可以清晰地分辨该信号,并且根据谱峰的位置可以正确地估计出两个信号的空间到达角和极化状态角。

5.3 到达角相同,极化不同

在图5(c)中,干扰信号参量 $(\theta_i, \gamma_i) = (15^\circ, 10^\circ)$,也即两信号到达角不同,而极化参量相同,此时联合谱中两个信号谱峰融合在一起,呈现单个谱峰,两个信号不能进行分辨。

可以总结得到如下结论,当两个信号到达角相同、极化状态不同时不能分辨,估计将出现错误,除此之外信号到达角和极化角均可较好地估计,在联合谱中两个信号显得更直观。

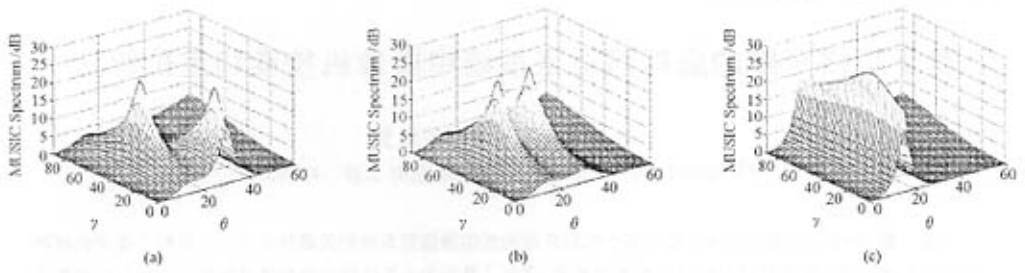


图 5 极化域—空域联合谱图

Fig. 5 The joint spectrum in polarizational and spatial domains

6 结束语

极化敏感阵列不仅可以在空域将电磁信号区分开来,而且还可以在极化域对其进行分辨。信号极化信息的开发和利用使得极化敏感阵列的综合性能与普通阵列相比具有本质的改善。文中首次提出了极化域—空域联合谱的概念,并对联合谱的估计方法及分辨特性等问题进行详细深入研究。和空间谱估计相比,联合谱估计不仅可以估计信号的到达角,而且可以估计信号的极化状态。本文的研究成果可以应用到智能天线系统中,开发利用极化信息有可能成为当前智能天线技术新的技术突破方向。

参考文献:

- [1] 庄钊文,肖顺平,王雪松. 雷达极化信息处理及应用[M]. 北京:国防工业出版社,1999.
- [2] Dino Giuli. Polarization Diversity in Radars[J]. IEEE Proc, 1986,74(2):245-269.
- [3] 刘德树,罗景青,张剑云. 空间谱估计及其应用[M]. 合肥:中国科技大学出版社,1997.
- [4] 孙超,李斌. 加权子空间拟合算法理论与应用[M]. 西安:西北工业大学出版社,1994.
- [5] Xu Zhenhai, Wang Xuesong, Xiao Shunping, Zhuang Zhaowen. Joint Spectrum Estimation of Polarization and Space[C]. IEEE ICNNSP'2003.
- [6] Weiss A J, Friedlander B. Performance Analysis of Diversely Polarized Antenna Arrays[J]. IEEE Trans. SP, 1991, 39(7):1589-1603.
- [7] LEE H B, Wengrovitz M. Resolution Threshold of Beamspace MUSIC for Two Closely Spaced Emitters[J]. IEEE Trans. ASSP, 1990, 38(9):1545-1559.
- [8] Friedlander B. A Sensitivity Analysis of the MUSIC Algorithm[J]. IEEE Trans. ASSP, 1990, 39(10):1740-1751.
- [9] Friedlander B, Weiss A J. The Resolution Threshold of a Direction-finding Algorithm for Diversely Polarized Arrays[J]. IEEE Trans. SP, 1994, 42(7):1719-1727.

