

基于聚类算法的最优子阵划分方法研究

熊子源,徐振海,张 亮,吴迪军,肖顺平

(国防科技大学电子科学与工程学院,湖南长沙 410073)

摘 要: 系统研究了大型阵列雷达中的最优子阵划分问题.分析了权矢量逼近准则下最优子阵划分方法的理论基础,得出最优子阵划分方案是否具有邻接性的判断依据,同时提出了一种新的子阵划分方法.与传统的基于聚类算法的子阵划分方法相比,新方法能够进一步减少权矢量逼近误差,获得更优的波束性能.在给定面阵结构及和差波束形成框架下,对提出的新方法进行仿真分析,并与两种传统的子阵划分方法相比较,验证了新方法的有效性.

关键词: 阵列信号处理; 相控阵天线; 子阵划分; 和差波束; 单脉冲; 聚类算法

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 11-2615-07

Research on the Optimal Subarray Partition Based on Clustering Algorithm

XIONG Zi-yuan, XU Zhen-hai, ZHANG Liang, WU Di-jun, XIAO Shun-ping

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

Abstract: This paper deals with the optimization of subarray partition operated in large array radar. The theoretical basis of the optimal subarray partition is analyzed based on the principle of minimizing the “residual error” of excitation coefficients. The judgment basis about the contiguous characteristic of the optimal subarray partition is presented, and an innovative approach for subarray partition is proposed. Comparing with the traditional method based on clustering algorithm, the new method can decrease the “residual error” father more, and hold better beam performance. Numerical experiments are reported when the construct of the array and the feed architecture of sum and difference beams are given. Comparing research with two old methods is also presented, and the results demonstrate the efficacy of the proposed methods.

Key words: array signal processing; phased array antenna; subarray partition; sum and difference beams; monopulse; clustering algorithm

1 引言

在阵列雷达中,由于考虑到系统的成本和复杂度以及宽带条件下的一些约束等因素,往往需要对大型阵列划分子阵,以减小接收所需的通道数即后续信号处理的维数.因此研究子阵划分技术对大型阵列雷达的研制具有重大意义.

研究表明,最优子阵划分方法与子阵级信号处理方式有一定的联系.例如,在子阵级实现常规的数字多波束(即数据独立的波束),通常考虑子阵级的数字波束与全阵所能形成的参考波束的逼近程度^[1~4];在子阵级实现自适应干扰抑制,即生成统计最优波束,通常以输出的信干噪比作为评价子阵划分的性能指标.规则的子阵划分会在信干噪比曲线上形成栅零点,影响处理性能,通常采用不规则的子阵划分方案^[1,5~7],以及重叠子阵划分法^[8];在考虑宽带信号处理时,对子阵的形状大小也有特殊的要求^[9,10];Robert J Mailloux 从功率分配网络

实现的难易出发,提出子阵结构为不规则的多联骨牌形式的子阵划分方法^[11,12];不少学者认为邻接子阵划分方案的功率分配网络较容易实现,因此文献[6,13,14]等研究了邻接子阵的划分方法;此外,还有针对稀布阵的研究而开发的子阵划分方法^[15].

本文研究常规的数字波束性能约束下的最优子阵划分问题,并以工程实践中被广泛应用的单脉冲和差波束为例进行分析.关于阵列雷达的单脉冲技术及和差波束形成方法,国内外均有大量的研究,Nickel 深入研究了单脉冲技术,并推广到子阵级的自适应单脉冲技术^[16],胡航等在子阵级信号处理方面也做了大量工作^[17].对于常规的波束形成,我们希望能在子阵级尽可能地逼近全阵所能获得的最佳波束,基于这样的思路,最优子阵划分通常选择以下两种准则设计目标函数^[2]:一是权矢量逼近准则;二是方向图逼近/优化准则.

关于最优子阵划分的求解,现有的方法可总结为两种方式:一是使用全局搜索算法,例如模拟退火算法、

遗传算法^[18]、粒子群优化算法^[13,19]以及其他智能优化算法^[4,20,21]等;二是以文献[1,2]为代表的对参考加权矢量聚类的划分方法.Nickel 从子阵级和差波束天线方向图性能的角度提出了一种基于锥削函数量化的子阵划分方法^[1].文献[2]分析了单脉冲雷达权矢量逼近准则下最优子阵划分的特点,得出聚类子阵划分方法.

本文根据权矢量逼近准则下的最优子阵划分问题,建立了基于聚类算法的最优子阵划分方法的理论基础,并提出一种新的子阵划分方法.最后对新方法和传统的方法进行了仿真分析.

2 权矢量逼近准则下优化问题的建立

文献[22]给出了单脉冲雷达子阵级和差波束的形成框架(图 1(a)所示),在该框架下阵元级的加权产生和波束,子阵级加权产生差波束,多数文献都基于这样的和差波束形成框架进行研究,下文将这种和差波束形成框架简称为传统框架,文献[2]在此基础上提出了扩展的单脉冲雷达子阵合成和差波束形成框架,如图 1(b)所示,以下简称扩展框架.

设阵元个数为 M , 分别编号为 $1, \dots, m, \dots, M$, 阵元级模拟加权为 $M \times 1$ 维的矢量 \mathbf{w}^{ele} , 其中第 i 个阵元的模拟加权为 w_i^{ele} . 子阵级数字加权为 $L \times 1$ 维的矢量 \mathbf{w}^{sub} , 第 i 个阵元属于第 l_i 个子阵, 对应的子阵级数字加权为 $w_{l_i}^{sub}$. 子阵级的加权与阵元级加权相

结合产生所需的和差波束(参照图 1), 记等效在阵元级实现的和差波束加权分别为 \mathbf{w}^s 和 \mathbf{w}^d . 通常使用 Taylor 权得到和波束, Bayliss 权得到差波束, 将 M 个阵元对应的这两类加权值分别称为参考和波束加权及参考差波束加权, 并分别记为 $\mathbf{w}^{s_{ref}}$ 和 $\mathbf{w}^{d_{ref}}$.

对于传统框架下的和差波束形成, 有

$$\begin{aligned} \mathbf{w}^s &= \mathbf{w}^{s_{ref}} \\ \mathbf{w}_i^d &= \mathbf{w}_i^{s_{ref}} \mathbf{w}_{l_i}^{sub} \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $i = 1, 2, \dots, M, l_i = 1, 2, \dots, L$. 定义加权矢量集为 $\mathbf{W} = [\mathbf{w}^s, \mathbf{w}^d]$, 相应的参考加权矢量集为 $\mathbf{W}^{ref} = [\mathbf{w}^{s_{ref}}, \mathbf{w}^{d_{ref}}]$, 第 i 阵元的加权矢量为 $\mathbf{W}_i = [\mathbf{w}_i^s, \mathbf{w}_i^d] = \mathbf{w}_i^s [1, \mathbf{w}_{l_i}^{sub}]$. 为了评价子阵划分及子阵级加权的优劣, 定义权矢量逼近误差如下

$$e = \|\mathbf{w}^{d_{ref}} - \mathbf{w}^d\| = \sum_{i=1}^M \|\mathbf{w}_i^s \mathbf{w}_{l_i}^{sub} - \mathbf{w}_i^d\| \quad (2)$$

其中, 向量范数一般取 2 范数. 子阵划分结果可用子阵形成矩阵^[23] \mathbf{T}_0 表示, 包含阵元级加权的子阵变换矩阵为 $\mathbf{T} = \text{diag}(\mathbf{w}^{ele}) \mathbf{T}_0 = \text{diag}(\mathbf{w}^s) \mathbf{T}_0$, 则权矢量逼近误差为

$$e = \|\mathbf{T} \mathbf{w}^{sub} - \mathbf{w}^{d_{ref}}\| \quad (3)$$

对于面阵的情况, 差波束既有方位向的也有俯仰方向的, 将二者依次记为 \mathbf{w}^{da} 、 \mathbf{w}^{de} . 则加权矢量集为 $\mathbf{W} = [\mathbf{w}^s, \mathbf{w}^{da}, \mathbf{w}^{de}]$, 相应的参考加权矢量集为 $\mathbf{W}^{ref} = [\mathbf{w}^{s_{ref}}, \mathbf{w}^{da_{ref}}, \mathbf{w}^{de_{ref}}]$, 子阵级加权矢量为 $\mathbf{W}^{sub} = [\mathbf{w}^{sub}, \mathbf{w}^{sub_{da}}, \mathbf{w}^{sub_{de}}]$ 权矢量逼近误差可表示为

$$e = \|\mathbf{T} \mathbf{w}^{sub_{da}} - \mathbf{w}^{da_{ref}}\| + \|\mathbf{T} \mathbf{w}^{sub_{de}} - \mathbf{w}^{de_{ref}}\| \quad (4)$$

这样的误差定义方式适用于扩展框架下的和差波束形成, 同样可以推广到子阵级的数字多波束技术. 另外我们可以引入逼近误差权重 $\lambda_s, \lambda_{da}, \lambda_{de}$ 对不同波束权值的误差大小做适当的控制, 其值在 0 到 1 之间, 权矢量逼近误差可以表示为

$$e = \lambda_s \|\mathbf{T} \mathbf{w}^{sub_s} - \mathbf{w}^{s_{ref}}\| + \lambda_{da} \|\mathbf{T} \mathbf{w}^{sub_{da}} - \mathbf{w}^{da_{ref}}\| + \lambda_{de} \|\mathbf{T} \mathbf{w}^{sub_{de}} - \mathbf{w}^{de_{ref}}\| \quad (5)$$

所谓权矢量逼近准则就是使权矢量逼近误差最小, 即优化目标函数为

$$\text{mine} \quad (6)$$

3 传统最优子阵划分方法

3.1 最优化问题的分析与转化

不失一般性, 首先讨论扩展框架下面阵的最优子阵划分. 显然当子阵个数等于阵元个数时, 权矢量逼近误差最小(等于 0). 若存在子阵级加权值相等的两个阵元, 则把两阵元划入同一子阵并不会导致逼近误差的增大. 进步分析可知, 要保证权矢量逼近误差不增加, 则任意的 i, j 两个阵元可化入同一子阵的充要条件为

$$\mathbf{W}_i^{ref} \parallel \mathbf{W}_j^{ref} \quad (7)$$

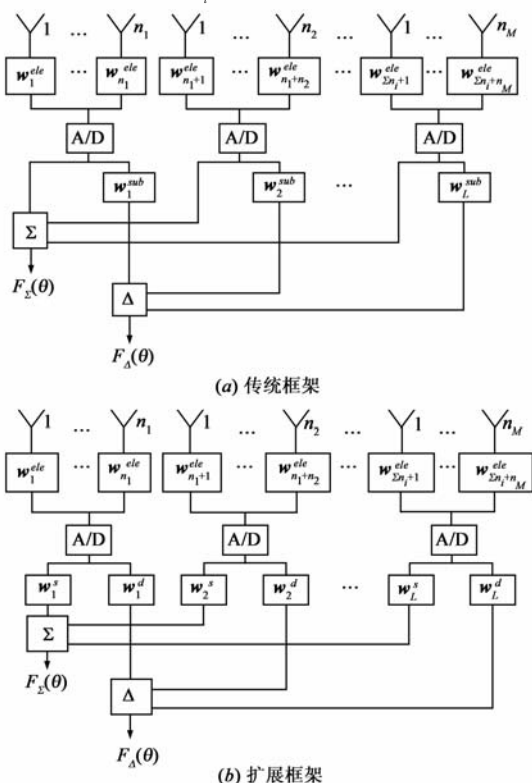


图1 单脉冲雷达子阵合成和差波束形成框架

其中“ \parallel ”表示两矢量平行.分析:首先有 $\mathbf{W}_i^{\text{ref}} \neq 0 (\forall i)$, 否则可认为该阵元不存在.故式(7)等价于 $\exists k \neq 0$ 使得 $\mathbf{W}_i^{\text{ref}} = k \mathbf{W}_j^{\text{ref}}$, 即 $[\mathbf{w}_i^{s_{\text{ref}}}, \mathbf{w}_i^{da_{\text{ref}}}, \mathbf{w}_i^{de_{\text{ref}}}] = k [\mathbf{w}_j^{s_{\text{ref}}}, \mathbf{w}_j^{da_{\text{ref}}}, \mathbf{w}_j^{de_{\text{ref}}}]$. 若把 i, j 阵元划入同一子阵,并令阵元 i, j 的阵元级加权分别为 k 和 1, 子阵级加权相同,且三种波束对应的子阵级加权分别等于 $\mathbf{w}_j^{s_{\text{ref}}}, \mathbf{w}_j^{da_{\text{ref}}}, \mathbf{w}_j^{de_{\text{ref}}}$.容易验证,这样的子阵划分方法与加权方案不会增加权矢量逼近误差.

然而,实际中两阵元的参考加权矢量很难满足平行的条件,因此将接近平行的参考加权矢量对应的阵元划入同一子阵也许是一种可行方案.这正是传统的基于聚类算法的最优子阵划分方法的思路.文献[2]利用 i, j 阵元的参考加权矢量之间的角度相似系数(夹角余弦)量化 $\mathbf{W}_i^{\text{ref}}, \mathbf{W}_j^{\text{ref}}$ 的“平行程度”,定义阵元间距为 1 减去矢量夹角余弦,将子阵划分问题转化为阵元加权矢量的聚类问题.另外,可通过归一化参考加权矢量的欧式距离来表征两个权矢量的“平行程度”,即定义归一化参考加权矢量 $\bar{\mathbf{W}}_i^{\text{ref}}$, 其第 i 元素为

$$\bar{\mathbf{W}}_i^{\text{ref}} = \frac{\mathbf{W}_i^{\text{ref}}}{\|\mathbf{W}_i^{\text{ref}}\|} \quad (8)$$

最优子阵划分问题就转化为矢量集 $\{\bar{\mathbf{W}}_i^{\text{ref}}\}_{i=1}^M$ 的最优聚类问题,本文将该权矢量集定义为变换权矢量集 Ω .于是得出矢量集 Ω 的聚类结果,就能得出相应的阵面的划分方案,即得出 \mathbf{T}_0 .

3.2 传统框架下的两种子阵划分方法

传统和差波束形成框架下,阵元 i 的参考加权矢量为 $\mathbf{W}_i^{\text{ref}} = [\mathbf{w}_i^{s_{\text{ref}}}, \mathbf{w}_i^{da_{\text{ref}}}, \mathbf{w}_i^{de_{\text{ref}}}] = \mathbf{w}_i^{s_{\text{ref}}} [1, \mathbf{w}_i^{sub_{da}}, \mathbf{w}_i^{sub_{de}}]$, 阵元 i 对应的阵元级加权直接由 $\mathbf{w}_i^{s_{\text{ref}}}$ 给出,其对应子阵级加权为 $[\mathbf{w}_i^{sub_{da}}, \mathbf{w}_i^{sub_{de}}]$.按 3.1 节所述,最优子阵划分转化为一个最优聚类问题,用于聚类分析的集合为 $[\mathbf{w}_i^{sub_{da}}, \mathbf{w}_i^{sub_{de}}]$, 即

$$\Omega = \left[\frac{\mathbf{w}_i^{da_{\text{ref}}}}{\mathbf{w}_i^{s_{\text{ref}}}}, \frac{\mathbf{w}_i^{de_{\text{ref}}}}{\mathbf{w}_i^{s_{\text{ref}}}} \right] = [\Omega(1), \Omega(2)], i = 1, 2, \dots, M \quad (9)$$

文献[1]提出了直接对矢量集 Ω 量化的子阵划分方法,相关文献称其为“基于锥削函数量化”的子阵划分方法^[5].该方法实际上是一种简单的聚类方法,具体方法不再赘述.文献[2]分析了基于聚类的子阵划分方法,其基本思想是根据矢量集 Ω 的聚类结果得到相应的子阵划分结果,其实质为将最优子阵划分转化为 Ω 的最佳聚类.文献[2]讨论了对 Ω 的单步聚类及迭代聚类法,在单步聚类法中分析了等间隔的分类和基于最大最小距离分类;在迭代聚类法中分析了两种阵元遍历顺序(最小距离遍历和顺序遍历),并以均匀线阵为例进行了仿真分析.

两种传统的子阵划分方法各有优劣,基于锥削函

数量化的方法实现最为简单,避免了复杂的聚类算法,但算法过于粗糙,不能很好地保证权值的逼近精度,而且不能灵活地选择子阵个数.基于聚类的子阵划分方法详细分析了矢量集 Ω 的聚类方法,在聚类方法上较为系统和全面,其中,等间隔分类的单步聚类法实际上就是基于锥削函数数量化的方法.

4 基于聚类算法的子阵划分方法

4.1 基于聚类算法的最优子阵划分方法理论基础

上述的两类传统子阵划分方法,都是通过变换矢量集 Ω 的聚类得出子阵划分结果,不妨称这一类算法为基于聚类算法的最优子阵划分方法.已经指出,传统的方法其实质为:将最优子阵划分等价于 Ω 的最佳聚类.实际上这个理论依据不一定成立,其关键在于阵元级加权造成了 Ω 的聚类误差与权矢量逼近误差之间的一致性,下面进行详细分析.

首先以传统框架下线阵的子阵划分为例,变换权矢量集可记为 $\Omega = \{\omega \mid \omega = \mathbf{w}_i^{da_{\text{ref}}}/\mathbf{w}_i^{s_{\text{ref}}}, i = 1, \dots, M\}$, 其聚类误差(误差平方和准则^[24])为

$$\sum_{l=1}^L \sum_{i \in \{k \mid l_k = l\}} (\omega_i - z_l)^2 = \sum_{i=1}^M (\omega_i - z_l)^2 \quad (10)$$

其中, $\omega_i = \mathbf{w}_i^{da_{\text{ref}}}/\mathbf{w}_i^{s_{\text{ref}}}$, z_l 为第 l 类的类心.考虑阵元级加权值均相等的情况,不妨设该值为 1,则权矢量逼近误差为

$$\sum_{i=1}^M (\mathbf{w}_i^{da_{\text{ref}}}/\mathbf{w}_i^{s_{\text{ref}}} - \mathbf{w}_i^{sub})^2 \quad (11)$$

可见式(10)和式(11)在形式上具有一致性,此时 Ω 的最佳聚类等价于最优子阵划分,而且,最优聚类同时给出了子阵级加权的最优解(即类心).然而,当阵元级加权不全相等时,权矢量逼近误差应为

$$\sum_{i=1}^M (\mathbf{w}_i^{da_{\text{ref}}} - \mathbf{w}_i^d)^2 = \sum_{i=1}^M (\mathbf{w}_i^{s_{\text{ref}}})^2 (\mathbf{w}_i^{da_{\text{ref}}}/\mathbf{w}_i^{s_{\text{ref}}} - \mathbf{w}_i^{sub})^2 \quad (12)$$

根据式(10)~(12)可得出如下结论:一般而言,权矢量逼近误差是由变换权矢量集 Ω 的聚类误差经过阵元级加权矢量作用下的非线性变换得到.所谓的非线性变换如式(12),显然 $|\mathbf{w}_i^{s_{\text{ref}}}|$ 越大误差放大倍数越大.进而可知:当阵元级加权值都相等时,权矢量逼近误差与聚类误差具有一致性,最优子阵划分才能等价于 Ω 的最佳聚类.通常阵元级要使用低副瓣加权,这时就必须详细地考察参考加权矢量的特点.

4.2 低副瓣加权对子阵划分的影响

低副瓣的和波束实现方式有很多,如 Taylor 权、Chebychev 权等.图 2 给出了 100 个阵元组成的均匀线阵对应的 32dB, $\bar{n} = 4$ 的 Taylor 加权和 30dB, $\bar{n} = 4$ 的 Bayliss 加权,以及相应的矢量集 Ω .

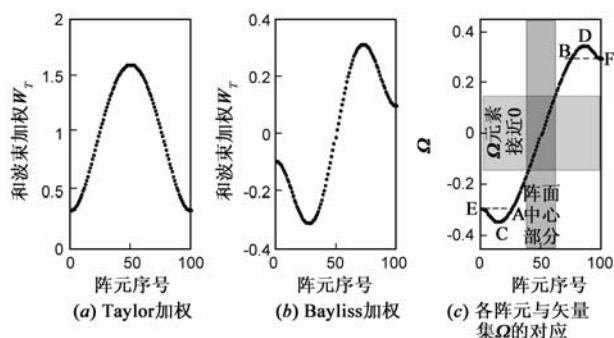


图2 线阵的低副瓣和差波束权值分布特点

图3给出了一个圆口径阵面的和差加权及对应矢量集 Ω 的例子.这里我们假定阵元的分布是足够密的,即阵列的规模足够大,不考虑 Ω 离散性的影响.由于只分析权值的分布特征,不妨设阵面半径为1,虚线标出了阵面的边界.

观察图2(c),可以发现 Ω 沿阵面径向的变化是非单调的,因此在对 Ω 聚类时,类数大于一定值,将使得图2(c)中的ACE及BDF部分的元素分属于不同的类,此时对应的最优子阵划分必然产生非邻接的划分.同理,对于面阵,可以考察 Ω 元素模值沿素阵面径向的变化特征来判断最优子阵划分是否为邻接子阵的形式.图3(c)的两条近似构成同心圆的曲线给出了 Ω 的一维分量即式(9)中的 $\Omega(1)$ 沿径向的单调性分割,内部的曲线相当于图2(c)中的AB两点,由符号“ \times ”连成的曲线对应CD两点. Ω 元素(含所有维分量)的模值在阵面上的分布特征由图3(d)给出.

根据上述分析,对于大型的阵列,在传统和差波束形成框架下,低副瓣的和差加权值与最优子阵划分都具有如下特点:

①和波束加权值在阵面中心部分绝对值较大,而在阵面边缘部分绝对值较小(图2(a),图3(a));

②矢量集 Ω 中对应阵面中心部分的模值接近零,

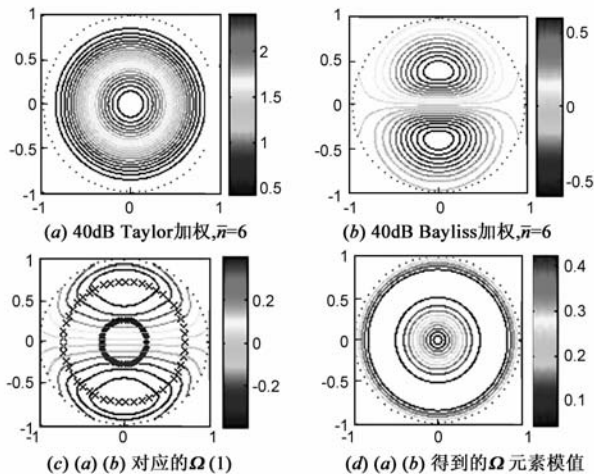


图3 圆口径面阵的低副瓣和差波束权值分布特点

对应阵面边缘的模值则相对较大(图2(c),图3(d));

③ Ω 的模值沿阵面径向变化的单调性和子阵个数决定了最优子阵划分的邻接性.

4.3 新的子阵划分方法

根据矢量集 Ω 与阵元位置的对应特点①及式(12),通过在 Ω 的最佳聚类的基础上,细化阵面中心部分阵元分类,使其分类较多、较细,而阵面边缘部分的分类相对减少,就能进一步减少权矢量逼近误差.

根据特点②,阵面中心部分的阵元加权又对应了集合 Ω 中绝对值接近零的元素,因此细化阵面中心部分的阵元分类就转换为对 Ω 中模值较小的元素做类数较多的聚类.于是提出一种对变换矢量集 Ω 分级聚类的子阵划分方法,其步骤如下:

①设需要划分的子阵个数为 L ,首先对矢量集 Ω 聚类,类数为 $L_0 = \lfloor \alpha L \rfloor, 0 < \alpha < 1$.记聚类结果为 C_0 ,类心集合为 $Z_0 = \{z_i\}_{i=1}^{L_0}$;

②在 C_0 中找出类心满足 $\|z\| < \beta \max(\|z\|)$ 的所有类,记为 C_0^a ,其类数为 L_0^a ,其余类记为 C_0^b ;

③对 C_0^b 中的所有元素重新聚类,类数为 $L - L_0^a$,得出新的聚类结果 C_1^a ;

④ C_1^a 和 C_0^b 构成新的聚类结果,相对应地得到子阵划分结果.

几点说明:当 $\alpha = 1$ 时,即不做分级聚类时,新的方法就等价于传统的聚类方法,根据4.1节的分析,只要阵元级采用了低副瓣的加权,要得到优于传统方法的子阵划分的方案就要求我们选择 $\alpha < 1$.

使用的聚类方法可以采用多种现有聚类算法,传统的均匀量化法也可视为一种简单聚类法.矢量集 Ω 的分布呈现内团聚状^[24],建议采用C均值聚类方法.众所周知,聚类算法的结果在一定程度上依赖于算法的初值,但根据上文的分析,得出最优的聚类并不是根本目的,而且已经指出最优的子阵划分并不等价于最优聚类问题.因此在选择初值时无需做苛刻的要求,初值类心可以随机选择,也可以用均匀量化法得出,下文的仿真中使用了最大最小距离法选择初始类心.

为了使最优子阵划分方案为邻接子阵的形式,根据4.2节总结的特点③,可以通过设计和差波束的加权值,使得 Ω 的模值沿阵面径向单调变化,限于篇幅,本文暂不做深入讨论.

聚类算法得出的类心,可以近似作为最优的子阵级加权,下文将这种子阵级权值的求法称为类心赋权法.子阵级加权也可以在给出子阵划分后,采用最优化方法得出,文献[1]给出了 T_0 给定时,最优的子阵级加权的解,相关方法不再赘述,下文将该方法的解称为权值最优解.

5 仿真分析

5.1 参数设置及子阵划分结果

参数设置:阵元个数为 3203,按三角形方式排列成一圆口径阵面.仿真时设三角形边长(即相邻阵元间距)均为 $\lambda/2$.阵元级采用 40dB, $\bar{n}=6$ 的圆口径 Taylor 加权,参考的差波束加权为 40dB, $\bar{n}=6$ 的圆口径 Bayliss 加权(如图 3(a)(b)所示).下面对三种借助参考加权矢量进行子阵划分的方法进行仿真.

方法一(锥削函数量化法):俯仰方向的变换权矢量 $\Omega(1)$ (参见式(9))和方位的变换权矢量 $\Omega(2)$,二者量化阶数 P 均为 7.划分结果为:共得 48 个子阵,对 Ω 的分类结果如图 4(a)所示.阵面的划分情况如图 5(a),图中每个符号代表一个阵元,相同符号对应的阵元划入同一子阵.

方法二(聚类子阵划分法):对矢量集 $\Omega=[\Omega(1),\Omega(2)]$ 直接采用 C 均值聚类算法,类数为 $L=48$,在 Ω 中按最大最小距离法^[24]求取 L 个矢量作为初始类心.得到的聚类结果如图 4(b),阵面的划分情况如图 5(b).

方法三(分级聚类子阵划分法):对矢量集 Ω 进行分级聚类,聚类算法及初始类心的选取方法同方法二. $L_0=37,\beta=80\%$,得到的聚类结果如图 4(c),阵面的划分情况如图 5(c).

5.2 子阵划分结果分析

使用第 4.3 节所述的两类子阵级权值设计方法(权值最优解、类心赋权法)对每一种划分结果求子阵级加权,并计算相应的权矢量逼近误差,结果如表 1 所示.为了便于对比,定义权值逼近相对误差为

$$E = \frac{e^2}{\|w^{ref}\|^2} = \frac{\|Tw^{sub} - w^{ref}\|^2}{\|w^{ref}\|^2}$$
(13)

对于子阵合成产生数字多波束的情况,权值逼近相对误差由式(14)给出

$$E = \frac{e_s^2 + e_{da}^2 + e_{de}^2}{\|w^{s_{ref}}\|^2 + \|w^{da_{ref}}\|^2 + \|w^{de_{ref}}\|^2}$$
(14)

图 6 给出了不同划分及不同加权法下的俯仰方向差波束的切面图,从图中可以看出方法一和方法二得出的差波束方向图在 $[20^\circ \sim 30^\circ]$ 及 $[-20^\circ \sim -30^\circ]$ 区域内存在较大旁瓣,而方法三的天线方向图整体旁瓣水平都得到了

降低,而且主瓣形状保持得很好,表 2 给出了 $[20^\circ \sim 30^\circ]$ 区域内各种方法得到的最大旁瓣的对比(由于权值最优解和类心赋权法得到的方向图差异不大,只给出权值最优解的情况对比).值得指出的是,方法二所得出的较大旁瓣与文献[1]是相符的.

表 1 面阵的子阵划分实例

划分方法	子阵级权值求法	e_{da}^2	e_{de}^2	E
锥削函数 量化法	权值最优解	6.4959	6.4091	14.80%
	类心赋权法	6.8081	6.6203	15.10%
聚类子阵 划分法	权值最优解	6.4261	5.6651	14.33%
	类心赋权法	6.6379	5.8281	14.55%
分级聚类 子阵划分法	权值最优解	5.7953	6.1787	14.26%
	类心赋权法	6.0163	6.4636	14.56%

表 2 $20^\circ \sim 30^\circ$ 区域内三种方法得到的方向图性能对比

对比 区域	对比项	Method1	Method2	Method3	平均 改善值
$20^\circ \sim 30^\circ$	最大旁瓣 电平(dB)	-26.337	-25.955	-43.810	17.724
	平均旁瓣 电平(dB)	-31.397	-29.035	-46.418	16.202

5.3 算法稳健性分析

通过分析参数选取对算法寻优性能的影响来评估算法的稳健性.令 L_0 从 28 到 47 取值, β 分别取 0.5 和 0.8,对多组参数划分结果的分析如图 7 所示.图 7(a)可以看出,当 $\beta=0.8$ 时,不同的 L_0 得出的 20 次实验中,方法三得到的权矢量逼近误差相对于方法一和方法二几乎都减少了.

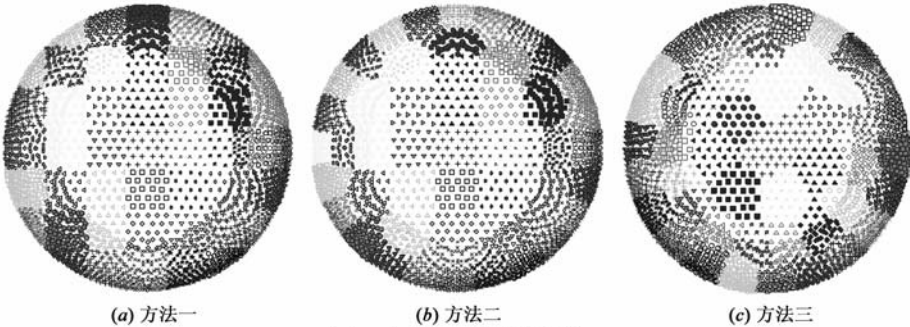


图4 矢量集 Ω 的分类结果

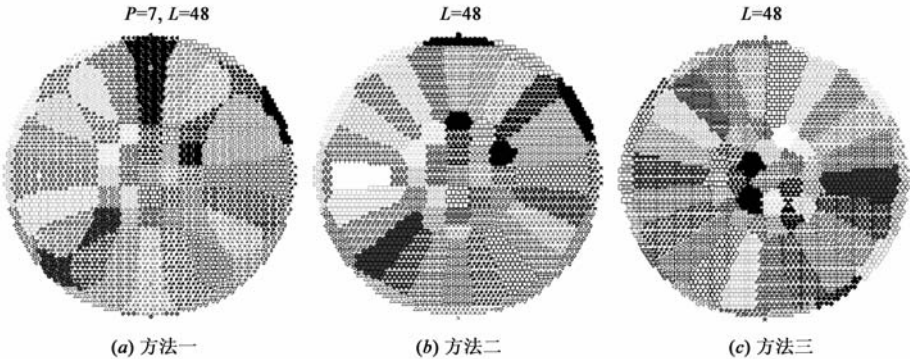


图5 天线阵元分类结果

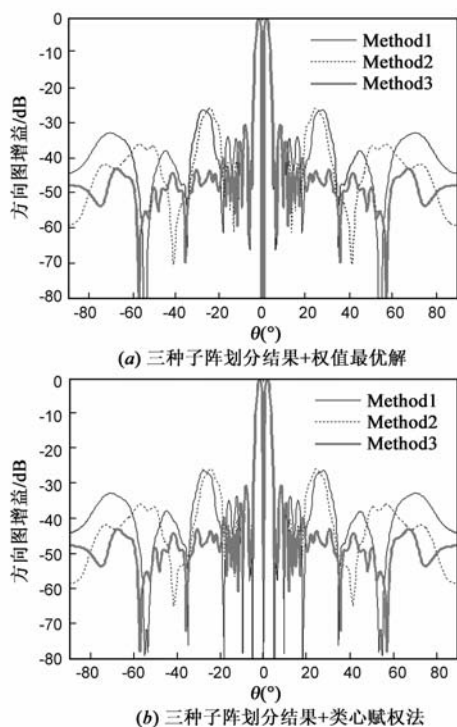
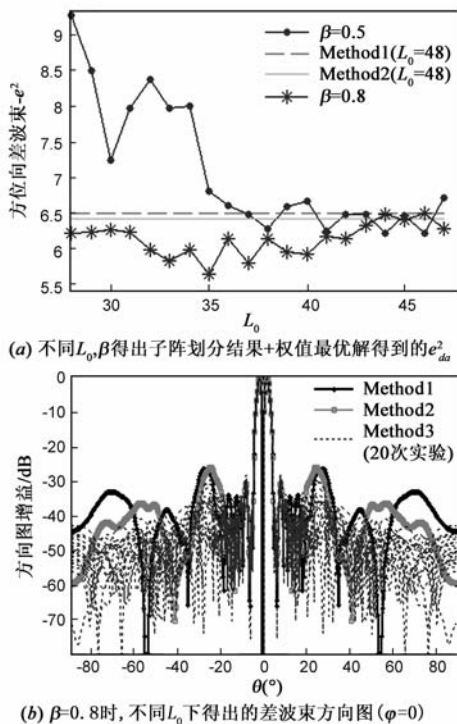
图6 差波束方向图在俯仰角 $\varphi=0$ 处的剖面图

图7 多组参数对应的划分结果分析

将 $\beta = 0.8$, $L_0 = 28, \dots, 47$ 这 20 次实验的差波束方向图及方法一和方法二得到的差波束方向图画在图 7 (b) 中, 对比可以发现, 新方法有效降低了差波束方向图中的较大副瓣, 提高了波束性能。

综上, 新方法控制参数的选取范围较大, 方法具有

较强的稳健性. 对于本文给定的阵面形式和加权方案而言, 建议选择 $L_0 < L$, $\beta > 0.5$. 值得一提的是, 虽然这两个参数的选择与阵面参数、和差波束加权矢量及子阵个数有关, 即参数选择具有问题依赖性, 但是分级聚类的思想适用于任意的阵面结构。

6 结论

对于大型面阵的子阵划分问题, 本文详细地分析了和差波束的加权值对最优子阵划分的影响, 建立了基于聚类算法的子阵划分方法的理论基础, 并根据加权值在阵面上的分布特点, 创造性地得出了最优子阵划分方案是否为邻接子阵形式的判断依据。

揭示了传统方法在理论研究上的不足, 指出最优子阵划分等价于最优聚类(变换权矢量集的聚类)的条件. 文中提出一种新的基于聚类算法的子阵划分法, 不仅继承了聚类子阵划分法的特点, 而且进一步改善了子阵级数字波束的性能。

使用了圆口径阵面的例子有效地验证了新算法的可行性, 算法中的参数的选取范围具有问题依赖性(该部分需要进一步的研究), 但本文所揭示的权矢量与最优子阵划分之间的联系, 是具有普适性的, 分级聚类的思想同样可以推广到其他阵面形式. 这些研究对大型阵列雷达的研制具有一定的参考价值, 对工程实践具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] Nickel, U R O. Subarray configurations for digital beamforming with low sidelobes and adaptive interference suppression [A]. Record of the IEEE 1995 International Radar Conference [C]. Alexandria, USA: IEEE Press, 1995. 714 – 719.
- [2] 张静. 阵列天线子阵划分设计和测向技术研究 [D]. 西安电子科技大学, 2009. 1 – 42.
- [3] Lopez P, Rodriguez J A, Ares F, et al. Subarray weighting for the difference patterns of monopulse antennas: joint optimization of subarray configurations and weights [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2001, 49(11): 1606 – 1608.
- [4] Manica L, et al. On the synthesis of sub-arrayed planar array antennas for tracking radar applications [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2008(7): 599 – 602.
- [5] 谢文冲, 王永良. 一种子阵划分方法及子阵级 STAP 性能分析 [J]. 数据采集与处理, 2007, 22(3): 274 – 277. Xie Wenchong, Wang Yongliang. Effective subarray partition method and performance analysis of STAP at subarray [J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2007, 22(3): 274 – 277. (in Chinese)
- [6] 许志勇, 保铮, 等. 一种非均匀邻接子阵结构及其部分自适应处理性能分析 [J]. 电子学报, 1997, 25(9): 20 – 24. Xu Zhiyong, Bao Zheng, et al. A nonuniform contiguous subar-

- ray configuration and its performance of partially adaptive processing[J]. Acta Electronica Sinica, 1997, 25(9): 20 – 24. (in Chinese)
- [7] 陈子欢, 等. 一种新的子阵结构及其自适应性能分析[J]. 电子信息对抗技术, 2006, 21(3): 33 – 37.
Chen Zihuan, et al. A new subarray configuration and its performance of adaptive processing [J]. Electronic Information Warfare Technology, 2006, 21(3): 33 – 37. (in Chinese)
- [8] Lombardo P, Pastina D. Pattern control for adaptive antenna processing with overlapped sub-array[A]. Record of the IEEE 2003 International Radar Conference[C]. Adelaide, Australia: IEEE, 2003. 425 – 430.
- [9] 王德纯. 宽带相控阵雷达[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010. 94 – 103.
- [10] Mailloux, R J. Phased Array Antenna Handbook, 2nd ed[M]. Norwood, MA: Artech House, 2005. 455 – 467.
- [11] Mailloux R J, Santarelli S G, Roberts T M. Wideband arrays using irregular (polyomino) shaped subarrays[J]. Electronics Letters, 2006, 42(18): 1019 – 1020.
- [12] Mailloux, R J, Santarelli, S G, Roberts, T M. Array aperture design using irregular polyomino subarrays[A]. Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology (ARRAY) [C]. Waltham, MA: IEEE Press, 2010. 740 – 744.
- [13] 王文昌, 李雷, 等. 基于粒子群优化算法的非均匀子阵波束形成技术[J]. 电子信息对抗技术, 2010, 25(1): 36 – 40.
Wang Wenchang, Li Lei, et al. Nonuniform subarray beam-forming method based on particle swarm optimization [J]. Electronic Information Warfare Technology, 2010, 25(1): 36 – 40. (in Chinese)
- [14] 田北京, 谭晓斐, 王彤. 非均匀邻接子阵结构划分方法研究[J]. 雷达科学与技术, 2009, 7(1): 75 – 80.
Tian Beijing, Tan Xiaofei, Wang Tong. Research on the methods of nonuniform contiguous subarray partition[J]. Radar Science and Technology, 2009, 7(1): 75 – 80. (in Chinese)
- [15] 邱力军, 周智敏, 等. 稀疏相控阵雷达子阵划分方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 1997, 19(7): 31 – 37.
Qiu Lijun, Zhou Zhimin, et al. Studies of antenna subarray division in sparse phased array radar[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 1997, 19(7): 31 – 37. (in Chinese)
- [16] Nickel U. Overview of generalized monopulse estimation[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2006, 21(6): 27 – 56.
- [17] 胡航, 张皓. 一种改进的两级子阵级自适应单脉冲方法[J]. 电子学报, 2009, 37(9): 1996 – 2003.
Hu Hang, Zhang Hao. An improved two-stage processing approach of adaptive monopulse at subarray level[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(9): 1996 – 2003. (in Chinese)
- [18] 江禹生, 等. 基于遗传算法的均匀子阵数字多波束形成研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 4(2): 103 – 106.
Jiang Yusheng, et al. Study on DBF for multi-beam at uniform subarray level based on genetic algorithms[J]. Journal of System Simulation, 2008, 4(2): 103 – 106. (in Chinese)
- [19] 张增辉, 等. 遗传二进制多粒子群优化算法及其在子阵 STAP 中的应用[J]. 信号处理, 2009, 25(1): 52 – 57.
Zhang Zenghui, et al. Genetic binary multiple particle swarm optimization algorithm and application in subarray STAP[J]. Signal Processing, 2009, 25(1): 52 – 57. (in Chinese)
- [20] Manica L, Rocca P, Benedetti M, Massa A. A fast graph-searching algorithm enabling the efficient synthesis of sub-arrayed planar monopulse antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009, 57(3): 652 – 663.
- [21] 胡航, 秦伟程. 电子对抗环境下 ADBF 相控阵雷达的阵列结构优化[J]. 电子与信息学报, 2010(2): 366 – 370.
Hu Hang, Qin Weicheng. The array configuration optimization of phased array radar with ADBF in electronic countermeasure environment[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, (2): 366 – 370. (in Chinese)
- [22] D'Urso M, Isernia T, Meliadi E F. An effective hybrid approach for the optimal synthesis of monopulse antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55(4): 1059 – 1066.
- [23] 胡航, 景秀伟, 潘向荣. 二维子阵级相控阵空间谱估计方法[J]. 电子学报, 2007, 35(3): 415 – 419.
Hu Hang, Jing Xiuwei, Pan Xiangrong. 2-D spatial spectrum estimation methods at subarray level for phased array[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(3): 415 – 419. (in Chinese)
- [24] 孙即祥, 等. 现代模式识别[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2002. 13 – 45.

作者简介



熊子源 男, 1986 年 10 月出生, 云南昌宁人. 现为国防科技大学信息与通信工程博士生, 从事阵列信号处理、雷达信号处理方面的研究.
E-mail: xzy_will@163.com



徐振海 男, 1977 年 9 月出生, 河南卫辉人. 博士(博士后), 副教授, 硕士生导师, 1994 年 9 月考入国防科技大学, 2004 年 6 月获信息与通信工程专业博士学位, 并留校任教. 2006 年 5 月到 2008 年 10 月在中国电子科技集团第十四研究所做博士后研究. 承担并参与国家自然科学基金重点项目、“973”、“863”等多项科研任务, 获军队科技进步二等奖 2 项, 三等奖 1 项. 出版学术专著 1 部, 以第一作者发表论文 40 余篇, 研究方向: 雷达阵列信号处理、雷达极化信息处理等.