

聚类子阵划分及子阵级单脉冲测角性能分析

熊子源, 徐振海, 肖顺平

(国防科学技术大学电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室, 湖南长沙 410073)

摘要: 在大型阵列天线的设计中, 考虑到系统成本及复杂性, 通常会采用子阵技术。然而, 由于理论分析不足, 工程中普遍接受的是较为简单的子阵划分, 这种设计的缺陷制约雷达的整体性能。针对阵列雷达单脉冲技术, 揭示了最优子阵划分与聚类问题的等价关系, 建立了聚类算法求解最优子阵划分的理论基础, 并推导了任意子阵划分下的单脉冲技术及其性能指标。聚类方法能够有效地获得最优的划分方案。通过数值实验, 对所提方法以及经典的子阵划分方法进行了仿真对比, 验证了聚类子阵划分方法的有效性。

关键词: 阵列信号处理; 子阵划分; 聚类分析; 单脉冲; 角度估计

中图分类号: TN 953+.5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2013.09.11

Subarray partitioning based on the clustering algorithm and the performance of subarrayed monopulse technology

XIONG Zi-yuan, XU Zhen-hai, XIAO Shun-ping

(State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Considering the cost and the complexity in the design of large array antenna, subarray partitioning is introduced. However for lacking of analysis, very simple partitioning strategy is usually adopted in practice, which extremely restricts the performance of the radar system. The equivalence relation of the optimum subarray partitioning and clustering for the monopulse technology are revealed. Then the theory to solve subarray partitioning by clustering algorithms is established, and the monopulse technology at subarray level and its performance index are induced. The proposed subarray partitioning method based on clustering can get the optimum subarray configuration effectively. Numerical experiments about the proposed method and comparing research with the classic method are presented, and the results demonstrate the efficiency of the proposed method.

Keywords: array signal processing; subarray partitioning; clustering analysis; monopulse; angle estimation

0 引言

大型相控阵雷达通常采用子阵技术来设计实用的天线阵面, 以降低系统复杂性及成本。典型的大型相控阵雷达均运用子阵技术, 通常是阵元级接收的信号通过子阵实现模拟合成, 之后再行采样, 进而通过子阵级的处理完成不同的任务, 波束的扫描则通过调整阵元级的移相器实现。

针对子阵技术的研究, 首要的难题在于如何求出最优的子阵划分方案。该问题实质是一个组合优化问题, 经典的优化方法难以应用。目前主要采用一些启发式搜索技术进行求解, 但优化效果并不理想, 尤其是阵元数较多的情况。子阵技术普遍应用于单脉冲技术中, 是有效解决和差矛盾的重要手段, 因此现有的文献多以单脉冲技术为研究

背景, 1995年文献[1]提出的“幅度锥削函数量化法”是一种能够解决大型阵面划分的经典方法。此外, 多数文献提出的方法只能解决小型阵面的最优划分。文献[2-3]通过对优化问题的深入分析, 将解空间的维数降为 C_{M-1}^M , 并使用蚁群优化算法求解最优子阵划分, 其研究者认为这是目前最适合于解决最优子阵划分的优化方法, 但该算法在阵元个数较大时, 子阵划分的效果并不理想^[3]。国内对子阵划分的研究较少, 文献[4]相对系统地阐述了最优子阵划分的权矢量逼近准则与方向图逼近准则。文献[5]对子阵级单脉冲技术做了相关研究, 使用多目标进化算法进行子阵结构优化设计。文献[6]主要分析了低副瓣情况下的最优子阵划分, 提出了分级聚类子阵划分方法。

总的来说, 目前对最优子阵划分技术的研究尚不完善,

没有形成有效的解决方法,此外现有文献对子阵级单脉冲的测角方法和测角性能的特征也不够全面,关于子阵划分对测角性能的影响缺乏详细的分析。

本文首先对最优子阵划分的数学模型进行深入分析,建立了能有效解决大型阵面雷达最优子阵划分的聚类子阵划分方法,并明确了其适用条件。其次,推导了任意子阵划分情况下的子阵级单脉冲技术,以及测角偏差和相对差斜率等性能指标。最后,针对某一典型的圆口径阵列天线,完成了聚类子阵划分方法的数值实验,并与现有的能有效应用于大型阵面划分的方法进行对比。实验结果验证了聚类子阵划分方法的有效性,同时较为全面地给出了不同划分下的子阵级单脉冲测角性能。

1 聚类子阵划分及子阵级单脉冲

1.1 聚类子阵划分方法

典型的基于子阵技术的和差波束形成框架如图 1 所示。

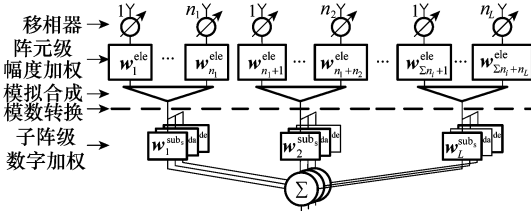


图 1 典型的基于子阵划分的和差波束形成框架

设阵元级模拟加权为 $M \times 1$ 维的矢量 w^{ele} ,子阵个数为 L ,子阵级数字加权为 w^{sub} 。子阵划分则用序列 $\{l_1, l_2, \dots, l_M\}$ 表示,第 i 个阵元属于第 l_i 个子阵,对应的子阵级数字加权为 $w_{l_i}^{sub}$ 。包含阵元级加权的子阵变换矩阵为 $T = \text{diag}(w^{ele})T_0$,其中, T_0 是一个 0-1 矩阵,它同样表征了子阵划分的形式,当且仅当第 i 个阵元属于第 j 个子阵时,有 $T_0[i, j] = 1$ 。给定 T 及 w^{sub} ,可推导其等效在阵元级的加权为 $\tilde{w}^{ele} = Tw^{sub}$ 。将阵元级所能实现的最优加权称为参考加权(通常由天线综合技术得出),记为 w^{ref} 。为设计最优的子阵划分,通常考虑权值逼近准则,即等效的阵元级加权 \tilde{w}^{ele} 逼近参考加权 w^{ref}

$$T_0, w^{sub} = \arg \min \| Tw^{sub} - w^{ref} \| \quad (1)$$

式中, $\| \cdot \|$ 为向量范数,取 L_2 范数时, $\arg \min \| Tw^{sub} - w^{ref} \|$ 等价于 $\arg \min \| Tw^{sub} - w^{ref} \|^2$ 。式(1)适用于任意的波束,本文在必要的地方分别附上字母“s”、“da”和“de”以区分和、方位差和俯仰差波束。另外式(1)表明,优化变量除了子阵划分 T_0 外,还包括子阵级加权 w^{sub} 。当 T_0 给定时,子阵级最优加权可直接由式(2)给出。

$$w^{sub} = (T^H T)^{-1} T^H w^{ref} \quad (2)$$

对于非重叠的子阵划分,可将式(2)进一步化简,以避免矩阵求逆和矩阵乘法,得出最优子阵加权的更为高效和精确的计算方式,即

$$w_l^{sub} = \frac{\sum_{i \in (k|l_k=l)} (w_i^{ele})^* w_i^{ref}}{\sum_{i \in (k|l_k=l)} |w_i^{ele}|^2} \quad (3)$$

式中, $l=1, 2, \dots, L$ 。虽然子阵级最优加权可直接求出,但通过式(1)并不能给出 T_0 的有效求解方法。

下面我们从另一个角度来考察式(1)。以方位差波束为例,权矢量逼近误差可表示为

$$\| Tw^{sub_{da}} - w^{ref_{da}} \|^2 = \sum_{i=1}^M (\tilde{w}_i^{ele_{da}} - w_i^{ref_{da}})^2 = \sum_{i=1}^M (w_i^{ele})^2 (w_i^{ref_{da}}/w_i^{ele} - w_{l_i}^{sub_{da}})^2 \quad (4)$$

平面阵通常还要考虑俯仰差波束,于是总的权矢量逼近误差为

$$\sum_{i=1}^M (w_i^{ele})^2 [(w_i^{ref_{da}}/w_i^{ele} - w_{l_i}^{sub_{da}})^2 + (w_i^{ref_{de}}/w_i^{ele} - w_{l_i}^{sub_{de}})^2] \quad (5)$$

记 $(h_i^{da}, h_i^{de})^T = \left(\frac{w_i^{ref_{da}}}{w_i^{ele}}, \frac{w_i^{ref_{de}}}{w_i^{ele}} \right)^T$, 并称其为 h 矢量, $(w_{l_i}^{sub_{da}}, w_{l_i}^{sub_{de}})$ 为第 l_i 子阵的子阵级加权,则式(5)可化简为

$$\sum_{i=1}^M (w_i^{ele})^2 \| h_i - z_{l_i} \|^2 = \sum_{l=1}^L \sum_{i \in (k|l_k=l)} (w_i^{ele})^2 \| h_i - z_l \|^2 \quad (6)$$

式中, z_l 为第 l 类的类心。定义 h 矢量构成的集合为 $H = \{h_i | i=1, 2, \dots, M\}$, 当 $w_i^{ele} \equiv c$ (c 为任意非零常数), 即阵元级

加权为均匀加权时,式(6)可以进一步化简为 $\sum_{l=1}^L \sum_{i \in (k|l_k=l)} \| h_i - z_l \|^2$ 。

若以欧式距离作为两向量 h_i 和 h_j 的近邻测度^[7], 从聚类分析的角度来看,式(6)即为类数等于 L 时,集合 H 的聚类误差。因此,当阵元级实现的和波束加权为均匀加权时,子阵个数为 L 的最优子阵划分问题等价于集合在类数为 L 下的聚类问题。至此最优子阵划分就由一个难以解决的组合优化问题转化为聚类问题。

借助于聚类算法,最优子阵划分问题将得到有效解决。同时,聚类方法也可以通过类心给出最优的子阵级加权。与传统的优化方法相比较,聚类方法具有很强的处理大规模分类问题的能力,以较常用的 K 均值算法为例,其算法的时间复杂度为 $O(MLdm)$ ^[8], 其中, d 为待聚类的特征矢量 h_i 的维数(本文 < 3); m 为算法收敛的迭代次数,通常 $m \ll M$ 。算法的收敛速度较快,并且性能稳健,后文的仿真也证实了这一点。

需要说明的是,阵元级加权为均匀加权这个条件并不难满足。首先,均匀加权的和波束具有最大的孔径效率,因此,阵元级均匀加权也具备实用性。其次,若无超低副瓣的要求,最优的和波束加权就是均匀加权^[9]。而且,低副瓣的要求也可以根据式(3)通过对子阵级加权的进一步优化实现,本文仿真部分将给出这样的设计实例。

1.2 子阵级单脉冲技术

记阵列的阵列因子为 AF , 则

$$AF(u, v) = (\tilde{w}^{ele})^H a(u, v) \quad (7)$$

式中, $a(u, v)$ 为阵元级导向矢量, $a(u, v) = \{e^{j2\pi(x_i u + y_i v)}\} (i=1, 2, \dots, M)$, (x_i, y_i) 为第 i 阵元的位置坐标(以波长为单位),

(u, v) 为方向余弦坐标, 可代表空间指向的方位角和俯仰角。

根据式(7)可得出任意的第 l 子阵的阵列因子 AF_l 为

$$AF_l(u, v) = \sum_{i \in (kl)_k=l} \tilde{w}_i^{\text{ele}} e^{j2\pi[\rho_x(u-u_0)+\rho_y(v-v_0)]} \quad (8)$$

容易证明, 当目标方向 (u, v) 近似等于天线指向 (u_0, v_0) 时, 天线方向增益可近似用阵因子代替, 且为

$$AF_l(u, v) = \sum_{i \in (kl)_k=l} \tilde{w}_i^{\text{ele}} e^{j2\pi[\rho_x(u-u_0)+\rho_y(v-v_0)]} \quad (9)$$

式中, $\rho_h = \frac{\sum_{i \in (kl)_k=l} \tilde{w}_i^{\text{ele}} h_i}{\sum_{i \in (kl)_k=l} \tilde{w}_i^{\text{ele}}}$ ($h = x$ or y)。 ρ_h 为等效的子阵相位中心, 相位中心不仅仅由阵元位置决定, 而且跟等效的阵元级加权密切相关。当幅度加权相等时, 相位中心与阵面几何中心一致。

记 U_l 代表属于阵面坐标系中第 l 象限的阵元编号的集合 ($l=1, 2, 3, 4$)。以方位差波束为例, 由于对称性, 可认为编号分别属于集合 $U_1 \cup U_4$ 和 $U_2 \cup U_3$ 的阵元构成了两个对称的子天线, 两子天线相位中心相距 $2d^{\text{da}}$, 其中, d^{da} 可表示为

$$d^{\text{da}} = \frac{\sum_{i \in U_1 \cup U_4} \tilde{w}_i^{\text{ele}} x_i}{\sum_{i \in U_1 \cup U_4} \tilde{w}_i^{\text{ele}}} \quad (10)$$

类似地可以求出 d^{de} 。两个子天线对 (u, v) 方向目标回波的增益形式分别为 $bF^{\text{de}}(u-u_0)e^{j2\pi d^{\text{da}}(u-u_0)}$ 、 $bF^{\text{de}}(u-u_0) \cdot e^{-j2\pi d^{\text{da}}(u-u_0)}$, 其中, F^{da} 为子天线方位向的天线方向图; b 为目标信号的幅度; u_0 为波束指向。因此单脉冲比为

$$\frac{D_{\text{da}}}{S} = \frac{F^{\text{da}}(u-u_0)e^{j2\pi d^{\text{da}}(u-u_0)} - F^{\text{da}}(u-u_0)e^{-j2\pi d^{\text{da}}(u-u_0)}}{F^{\text{da}}(u-u_0)e^{j2\pi d^{\text{da}}(u-u_0)} + F^{\text{da}}(u-u_0)e^{-j2\pi d^{\text{da}}(u-u_0)}} \quad (11)$$

当目标位于波束指向附近时, 根据式(10)和式(11)有

$$\frac{D_{\text{da}}}{S} = j \frac{\sum_{i \in U_1 \cup U_4} \tilde{w}_i^{\text{ele}} \sin 2\pi d^{\text{da}}(u-u_0)}{\sum_{i \in U_1 \cup U_4} \tilde{w}_i^{\text{ele}} \cos 2\pi d^{\text{da}}(u-u_0)} \approx j2\pi \frac{\sum_{i \in U_1 \cup U_4} \tilde{w}_i^{\text{ele}} x_i}{\sum_{i \in U_1 \cup U_4} \tilde{w}_i^{\text{ele}}} (u-u_0) \quad (12)$$

因此, 根据式(12)可以求出

$$u \approx u_0 + \frac{\sum_{i \in U_1 \cup U_4} \tilde{w}_i^{\text{ele}}}{2\pi \sum_{i \in U_1 \cup U_4} \tilde{w}_i^{\text{ele}} x_i} \text{Im} \left\{ \frac{D_{\text{da}}}{S} \right\} \quad (13)$$

于是目标的方向 (u, v) 可通过式(14)给出。

$$\begin{cases} \hat{u} = u_0 + \gamma_{\text{da}} \text{Im} \left\{ \frac{D_{\text{da}}}{S} \right\} \\ \hat{v} = v_0 + \gamma_{\text{de}} \text{Im} \left\{ \frac{D_{\text{de}}}{S} \right\} \end{cases} \quad (14)$$

根据式(13), 并考虑到和差波束的参考加权 w^{ref} 具有对称性, γ_{da} 和 γ_{de} 可由式(15)给出。

$$\begin{cases} \gamma_{\text{da}} = \frac{\sum_{i=1}^M |\tilde{w}_i^{\text{ele}} x_i|}{2\pi \sum_{i=1}^M |\tilde{w}_i^{\text{ele}} x_i|} \\ \gamma_{\text{de}} = \frac{\sum_{i=1}^M |\tilde{w}_i^{\text{ele}} y_i|}{2\pi \sum_{i=1}^M |\tilde{w}_i^{\text{ele}} y_i|} \end{cases} \quad (15)$$

综上所述, 子阵级单脉冲准则则由式(14)和式(15)确定。当差波束加权 \tilde{w}_i^{ele} 为虚数时, 只需将式(14)取虚部运算变为取实部运算即可。而且, 式(14)所给出的单脉冲准则同样适用于不使用子阵的情况, 文献[9]中的推导正是这种特殊类型。

假设阵元级的接收信号为 $z = ba(u, v) + n$, 其中, $a(u, v)$ 为阵元级导向矢量; n 为噪声, 当噪声具有零均值的统计特性时, 不难得出测角均值为

$$\begin{cases} E(\hat{u}) = u_0 + \gamma_{\text{da}} \text{Im} \left\{ \frac{\tilde{w}^{\text{ele}}_{\text{da}} a(u, v)}{\tilde{w}^{\text{ele}}_{\text{da}} a(u, v)} \right\} \\ E(\hat{v}) = v_0 + \gamma_{\text{de}} \text{Im} \left\{ \frac{\tilde{w}^{\text{ele}}_{\text{de}} a(u, v)}{\tilde{w}^{\text{ele}}_{\text{de}} a(u, v)} \right\} \end{cases} \quad (16)$$

式中, $E(\hat{\alpha})$ ($\alpha = u$ or v) 表示对 $\hat{\alpha}$ 求数学期望。通常将测角误差对半功率波束宽度归一化来描述测角性能, 根据式(16), 任意子阵划分方案下的归一化测角平均偏差为

$$\begin{cases} \Delta^{\text{da}} = [E(\hat{u}) - u] / BW \\ \Delta^{\text{de}} = [E(\hat{v}) - v] / BW \end{cases} \quad (17)$$

式中, Δ^{da} 、 Δ^{de} 分别表示方位向和俯仰向的测角误差; BW 为和波束的半功率波束宽度。此外, 相对差波束的相对差斜率也是描述测角性能的重要指标。经推导, 任意子阵划分下差波束相对差斜率的计算公式可表示为

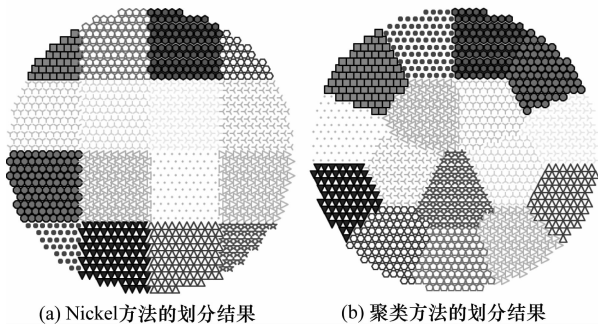
$$\begin{cases} \bar{K}_{\text{da}} = \frac{|\sum_{i=1}^M j\tilde{w}_i^{\text{ele}} x_i|}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \|\tilde{w}_i^{\text{ele}}\|^2} \sqrt{\sum_{i=1}^M x_i^2}} \\ \bar{K}_{\text{de}} = \frac{|\sum_{i=1}^M j\tilde{w}_i^{\text{ele}} y_i|}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \|\tilde{w}_i^{\text{ele}}\|^2} \sqrt{\sum_{i=1}^M y_i^2}} \end{cases} \quad (18)$$

2 仿真分析

2.1 参数设置及子阵划分结果

参数设置: 典型圆口径天线阵面, 阵元个数为 1 258, 按三角栅格方式排列, 三角形边长 (即相邻阵元间距) 为 $\lambda/2$ 。阵元级采用均匀幅度加权, 参考的差波束加权为关于阵面中心线性奇对称加权参考文献[9-10]。

图 2 给出了子阵数为 16 时, 两种子阵划分方法的划分方案的对比, 分别为 Nickel 的锥削函数量化法及本文推导的聚类子阵划分法。图中每个符号代表一个阵元, 相同符号的阵元属于同一子阵。本文将锥削函数量化法称为 Nickel 方法, 相关原理参考文献[1], 此处不再赘述。

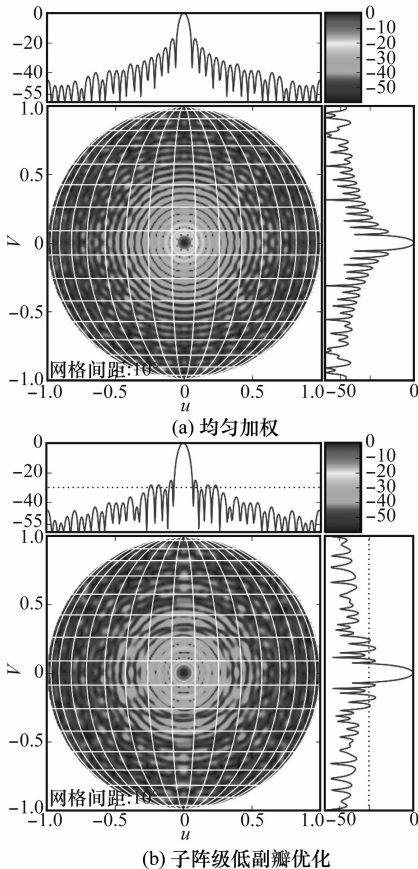


(a) Nickel方法的划分结果 (b) 聚类方法的划分结果

图 2 两种不同划分方法对应的子阵划分方案

由于最优和差加权给出的 h 矢量的分量在阵面的任意径向方向均是单调变化的,因此,本文的聚类子阵划分方法给出的子阵划分结果一定能保证每一个子阵都是“邻接”的(最优划分的邻接性判断依据参考文献[6])。相对于非邻接的子阵,具有邻接子阵结构的阵面在工程上是较容易实现的。

由于和差波束具有相同的波束指向,波束指向的扫描通过阵元级的移相器完成,因此,波束的扫描在正弦空间坐标系中表现为方向图的平移,方向图的形状保持不变^[1],这也是本文采用坐标来绘制阵因子的主要理由。而若从角度域观察,波束的扫描会导致方向图的展览,图 3 中通过对可见区域以间隔 10° (包括方位角和俯仰角)的分割,来表征波束展览的效果。其中,图 3(b)是对聚类子阵划分方法得出的阵面,按照式(3)进一步优化子阵加权获得低副瓣天线波束的例子,此时参考加权取为 -30 dB 的 Taylor 权。

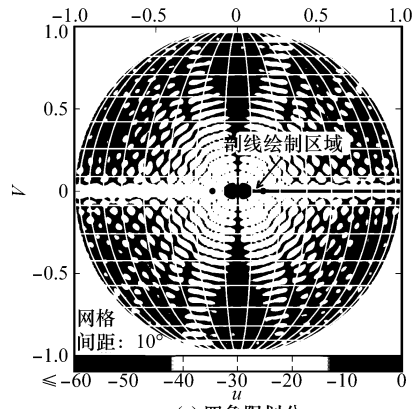


(a) 均匀加权 (b) 子阵级低副瓣优化

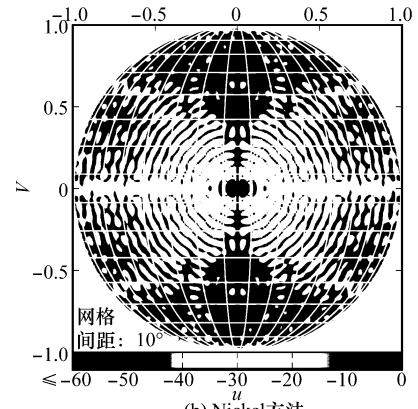
图 3 和波束方向图

2.2 差波束方向图性能对比

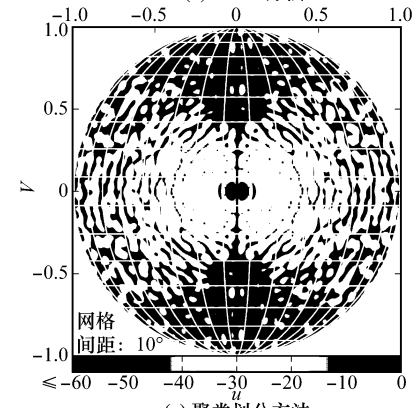
下面以方位差波束为例,分析差波束方向图的性能。图 4 给出了几种不同子阵化分方法对应的归一化的方位差波束方向图(波束指向为阵面法向)。



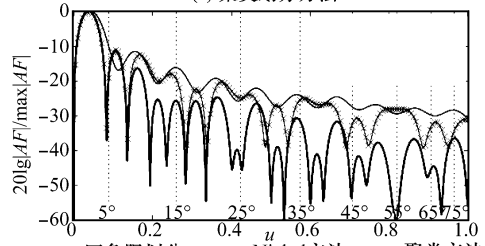
(a) 四象限划分



(b) Nickel方法



(c) 聚类划分方法



—: 四象限划分; x-x: Nickel方法; - - : 聚类方法。

图 4 方位差波束方向图对比

从图 4 可以看出,不同的划分方法对应的方向图在副瓣区域差别较大,其中聚类子阵划分方法得出的差方向图,其副瓣电平整体上是最低的。定义平均旁瓣电平为 $\overline{SLR} = \frac{1}{\Omega} 20 \iint_{\Omega} \lg |\overline{AF}| dudv$, 式中, Ω 为副瓣范围。本文取方位差波束第一零点外的区域为副瓣范围。表 1 给出了 3 种子阵划分对应的方位差波束的平均旁瓣电平、相对差斜率、相对测角误差的对比。从计算结果可见,聚类子阵划分方法得出的子阵划分方案在单脉冲性能方面表现最佳,具有最低的平均旁瓣电平,最大的相对差斜率和最小的测角偏差。

表 1 3 个划分实例的单脉冲性能对比

划分方法	四象限划分	Nickel 划分	聚类划分
平均旁瓣电平/dB	\overline{SLR}^{da} -24.16	-27.17	-36.34
电平均/dB	\overline{SLR}^{de} -23.22	-27.51	-32.90
最大旁瓣电平/dB	SLR_{max}^{da} -11.62	-11.08	-19.34
电平均/dB	SLR_{max}^{de} -11.81	-11.28	-11.78
相对差斜率/dB	\overline{K}^{da} -1.422	-0.329	-0.285
斜率/dB	\overline{K}^{de} -1.413	-0.331	-0.305

图 5 给出了几种不同划分方法的测角偏差在主瓣内的分布情况(上半部分为方位角的测角偏差,下半部分为俯仰

角的测角偏差;字母 S、N 和 C 分别代表了四象限划分法、Nickel 划分法和聚类划分法),可见聚类方法给出的子阵划分方案在给定测角误差的条件下具有最大的测角范围。

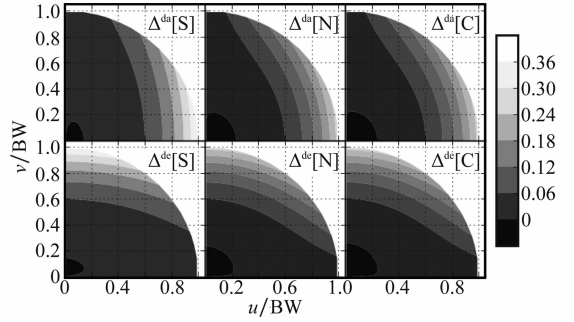


图 5 主瓣内测角误差对比

2.3 关于子阵个数的讨论

根据本文第 1 节的分析可知,聚类方法的子阵划分方法适用于任意子阵个数的情况,而 Nickel 方法,只能根据量化阶数间接确定子阵个数,子阵的个数并不能任意选择,例如对于本节的典型阵面,当量化阶数分别取 2,3,4,5,6 时,子阵个数为 4、9、16、25、36。不同子阵个数下聚类子阵划分方法与 Nickel 方法的对比如图 6 所示。仿真时聚类方法的子阵个数可以从 4~36 任意取值。

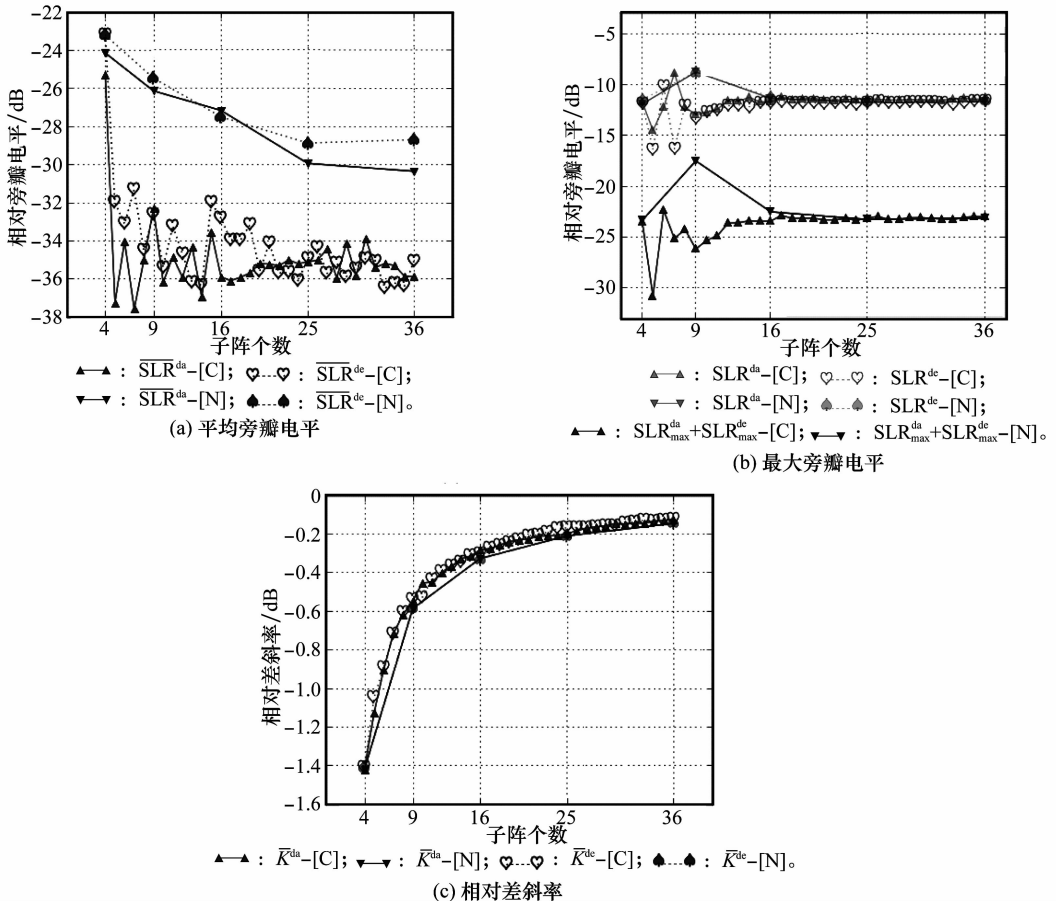


图 6 不同子阵个数下划分实例的单脉冲性能对比

图 6 中字母 N 和 C 的含义与图 5 一致。从图 6 中可以看出,聚类子阵划分方法在相同子阵个数的情况下,相对于 Nickel 方法具有更低的旁瓣电平,更高的相对差斜率。而且聚类方法的子阵个数选择更为灵活。

综上所述,聚类子阵划分方法得出的阵面具有最优的单脉冲性能,得出的差波束不仅副瓣电平较低,而且主瓣的波束性能最优,测角灵敏度最高。因此聚类子阵划分方法是一种极为有效的子阵划分方法。

3 结 论

本文深入研究了子阵级单脉冲技术以及聚类子阵划分方法的基本原理。建立了聚类算法用于最优子阵划分求解的理论基础,推导了任意子阵划分情况下单脉冲技术及其性能指标。对比分析了几种子阵划分方法对单脉冲性能的影响,主要结论如下:

(1) 阵元级为均匀加权时,线阵和面阵的最优子阵划分均等价于聚类问题,因此可以使用聚类算法求解最优子阵划分。聚类算法的收敛速度较快,性能稳健,能灵活地选择子阵个数,并能直接给出最优子阵加权。

(2) 推导了任意子阵划分情况下,子阵级单脉冲测角性能的衡量指标,为进一步分析子阵划分优劣奠定了基础。

(3) 针对最优差加权,对比了几种子阵划分方法对应的差波束性能差异。结果表明聚类子阵划分方法能获得最优性能的差波束,最大的差斜率,最小的测角偏差。

参考文献:

- [1] Nickel U R O. Subarray configurations for digital beamforming with low sidelobes and adaptive interference suppression[C]// *Proc. of the Record of the IEEE International Radar Conference*, 1995: 714 - 719.
- [2] Oliveri G, Rocca P, Poli L, et al. Evolutionary strategies for advanced array optimization[C]// *Proc. of the IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, 2011: 2441 - 2444.
- [3] Manica L, Rocca P, Martini A, et al. An innovative approach based on a tree-searching algorithm for the optimal matching of independently optimum sum and difference excitations[J]. *IEEE*

Trans. on Antennas and Propagation, 2008, 56(1): 58 - 66.

- [4] Zhang J. Study on subarray clustering and DOA estimation[D]. Xi'an: Xidian University, 2009. (张静. 阵列天线子阵划分设计和测向技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2009.)
- [5] Hu H, Qin W C. The array configuration optimization of phased array radar with ADBF in electronic countermeasure environment[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(2): 366 - 370. (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, 32(2): 366 - 370.)
- [6] Xiong Z Y, Xu Z H, Zhang L, et al. Research on the optimal subarray partition based on clustering algorithm[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(11): 2615 - 2621. (熊子源, 徐振海, 张亮, 等. 基于聚类算法的最优子阵划分方法研究[J]. 电子学报, 2011, 39(11): 2615 - 2621.)
- [7] Sun J X. *Modern pattern recognition* [M]. Changsha: National University of Defense Technology Publish House, 2002. (孙即祥. 现代模式识别[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 2002.)
- [8] Xu R, Wunsch D C. *Clustering* [M]. New Jersey: Wiley, 2009.
- [9] Nickel U. Overview of generalized monopulse estimation[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2006, 21(6): 27 - 56.
- [10] Kirkpatrick G M. Aperture illuminations for radar angle-of-arrival measurements[J]. *IRE Trans. on Aeronautical and Navigational Electronics*, 1953, PGAE-9: 20 - 27.
- [11] Mailloux R J. *Phased array antenna handbook* [M]. 2nd ed. Norwood, MA: Artech House, 2005.

作者简介:

熊子源(1986 -), 男, 博士研究生, 主要研究方向为阵列信号处理、雷达信号处理。

E-mail: xzy_will@163.com

徐振海(1977 -), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为阵列信号处理、雷达信号处理、极化信息处理。

E-mail: xzh930@yahoo.com.cn

肖顺平(1964 -), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为阵列信号处理、雷达信号处理。

E-mail: xiaoshunping_nudt@163.com