

# 基于二次编码的 MIMO 雷达阵列稀布与天线综合

赵光辉, 陈伯孝

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 研究 MIMO 雷达在阵元数有限、阵列孔径有限、水平维和垂直维分别存在最小阵元间距等约束条件下的天线方向图综合问题。MIMO 雷达采用稀布天线, 为了降低旁瓣电平, 天线综合过程中同时考虑发射方向图和接收方向图的影响, 将阵元间距的稀疏约束从规则栅格扩展为仅有二维坐标的约束, 提出采用二次编码的改进遗传算法, 有效地解决了 MIMO 雷达天线方向图综合中低旁瓣电平设计问题。结合某工程要求给出了某 MIMO 雷达天线阵优化结果。仿真结果证实了方法的有效性。

**关键词:** MIMO 雷达; 稀布阵; 方向图综合; 遗传算法  
**中图分类号:** TN 820 **文献标志码:** A

## Pattern synthesis of antenna array in MIMO radar by using two-layer coding

ZHAO Guang-hui, CHEN Bai-xiao

(National Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

**Abstract:** For the constraints of the number of element, the limited array aperture and the minimum element spacing in both horizontal and vertical dimensions, the optimization of array pattern synthesis in MIMO radar is presented. To lower the sidelobe level, both the transmitting and receiving patterns are considered in the MIMO radar where sparse arrays are used. Extending the sparse constraints of regular grid to the constraints of inter-element distances in a plane, an improved multiple genetic algorithm by coding twice is proposed, with which the problem of pattern synthesis in MIMO radar with lower maximum relative sidelobe level is solved effectively. The optimal algorithm used in practical design is presented. The simulated results confirm the validity of this method.

**Keywords:** MIMO radar; sparse arrays; pattern synthesis; genetic algorithm

## 0 引言

MIMO(multi-input multi-output)系统最早应用于无线通信,即在通信两端使用多个天线,大大提高了通道容量和抗干扰能力。MIMO 雷达<sup>[1-4]</sup>发射阵列有多个发射阵元,而且每个阵元发射不同载频的正交编码信号;接收阵列亦采用多个天线接收,故 MIMO 雷达的天线方向图综合问题需同时考虑发射方向图和接收方向图的影响。MIMO 雷达又分为单基地和多基地两种,多基地 MIMO 雷达采用收发分置工作方式,即发射天线和接收天线不在同一区域,因此发射天线的位置及接收天线的位置不会相互影响,故其天线方向图综合问题可以采用传统的阵列天线综合优化的方法处理;但是对于单基地 MIMO 雷达,由于发射天线和接收天线在同一区域,其天线方向图综合问题,传统的阵列天线综合优化的方法不再适用。

多年来,常规的阵列稀布及天线综合理论已经获得了

广泛而深入的研究,例如可以通过 Chebyshev-Dolph 综合法<sup>[5]</sup>,泰勒综合法<sup>[5]</sup>,遗传算法(GA)<sup>[6-10]</sup>等数值优化方法实现阵列天线方向图综合。然而,常规的方法都是基于传统的收发共用的阵列天线进行方向图综合。对 MIMO 雷达,如何在阵列优化过程中同时考虑发射、接收天线的位置影响,在合成方向图中最大限度地降低阵列的峰值旁瓣电平,实现 MIMO 雷达的阵列优化成为阵列天线方向图综合的新研究课题。首先,MIMO 雷达的发射天线和接收天线的位置随机性很大,阵元位置是一个非线性优化问题;其次,从工程实际应用考虑,为减小阵元间的互耦,阵元间距要满足一定的约束条件,如水平维和垂直维间距分别大于一定的尺寸。针对间距约束,传统方法是从相距半波长的规则栅格<sup>[7]</sup>上稀疏优化布阵,而这种选取阵元位置的方法在很大程度上限定了阵元的自由度,不是真正意义上的随机布阵。

收稿日期:2007-05-11; 修回日期:2007-07-05。

基金项目:国家预研基金(51307050201);教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-06-0856);国家自然科学基金(60772068)资助课题

作者简介:赵光辉(1980-),男,博士研究生,主要研究方向为阵列信号处理,MIMO 雷达信号处理,米波雷达测高。E-mail:ghzhao1512@sohu.com

本文结合某实际工程研究MIMO雷达面阵天线优化设计问题,在给定面阵尺寸、最大阵列孔径、两维阵元间距等约束条件下,综合考虑发射天线方向图、接收天线方向图以及合成天线方向图之间的相互影响,将距离扰动思想引入到MIMO雷达的两维坐标系设计中,通过多重遗传算法、二次编码等方法实现了任意最小阵元间距约束下,抑制稀疏面阵综合方向图旁瓣电平的阵列天线综合。

## 1 MIMO 雷达天线设计要求

本文研究对象为一具体的面阵天线,天线尺寸高16 m,宽13 m,每个天线单元包含 $3 \times 2$ 共6个阵子,天线单元之间存在水平维和垂直维的间距约束,即水平间隔 $d_x > 1.1\lambda$ ,垂直间隔 $d_z > 1.65\lambda$ , $\lambda$ 为波长。经计算每个天线单元所占面积为 $3.4 \text{ m}^2$ ,因此,在给定面阵尺寸的情况下,总的天线单元数不超过61个。本文的研究任务是在天线阵元稀疏率约为50%的情况下,在给定的面阵中稀疏的放置发射天线和接收天线,从而使得该单基地MIMO雷达的合成天线方向图的旁瓣电平最低。

## 2 MIMO 雷达方向综合中遗传算法适应度函数的构造

传统的阵列综合过程中,由于发射、接收共用同一根天线,适应度函数只与发射天线的位置有关;而在单基地MIMO雷达阵元稀疏设计中,发射与接收采用不同的天线,所以要综合考虑发射天线阵和接收天线阵的坐标位置以及它们对合成天线阵方向图的影响,因此其适应度函数不同于传统的阵列天线稀疏优化函数。

假设面阵中有 $N_e$ 个发射天线, $N_r$ 个接收天线。以天线阵的中心作为坐标原点,以天线所在平面为YOZ平面,建立坐标系,如图1所示。假设第 $k$ 个天线单元(发射天线单元或接收天线单元) $E_k$ 的位置坐标为 $(x_k, y_k, z_k)$ , $x_k = 0$ ,目标 $T$ 的位置坐标为 $(x_T, y_T, z_T)$ 。天线单元 $E_k$ 的直角坐标 $(x_k, y_k, z_k)$ 和极坐标 $(d_k, \theta_k, \varphi_k)$ 对应关系为

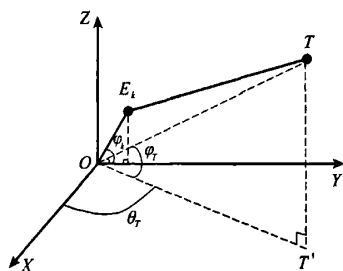


图1 天线单元坐标系示意图

$$\begin{cases} x_k = d_k \cos 90^\circ = 0 \\ y_k = d_k \cos \varphi_k \\ z_k = d_k \sin \varphi_k \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} d_k = \sqrt{x_k^2 + y_k^2 + z_k^2} \\ \cos \varphi_k = y_k / d_k \\ \sin \varphi_k = z_k / d_k \\ \theta_k = 0 \end{cases} \quad (1)$$

目标 $T$ 的直角坐标 $(x_T, y_T, z_T)$ 和极坐标 $(R, \theta_T, \varphi_T)$ 对应关系为

$$\begin{cases} x_T = R \cdot \cos \varphi_T \cdot \cos \theta_T \\ y_T = R \cdot \cos \varphi_T \cdot \sin \theta_T \\ z_T = R \cdot \sin \varphi_T \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} R = \sqrt{x_T^2 + y_T^2 + z_T^2} \\ \cos \varphi_T = y_T / (R \sin \theta_T) \\ \sin \varphi_T = z_T / R \\ \sin \theta_T = y_T / \sqrt{x_T^2 + y_T^2} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\theta_k, \varphi_k$ 分别表示阵元 $E_k$ (发射阵元 $E_k$ 或接收阵元 $E_k$ )在极坐标系下的方位角和俯仰角; $\theta_T, \varphi_T$ 分别表示目标 $T$ 在极坐标系下的方位角和俯仰角。

目标 $T$ 与天线单元 $E_k$ 相对于阵列中心的距离和回波延迟为

$$\Delta R_k = -|PE_k| \approx d_k (\sin \theta_T \cos \varphi_T \cos \varphi_k + \sin \varphi_T \sin \varphi_k) \quad (3)$$

$$\tau_k = d_k (\sin \theta_T \cos \varphi_T \cos \varphi_k + \sin \varphi_T \sin \varphi_k) / C \quad (4)$$

从以上的坐标关系经推导可以得到发射阵的方向图为

$$F_e(\theta, \varphi) = F_1(\theta, \varphi) \sum_{i=1}^{N_e} \exp \left\{ j \frac{2\pi}{\lambda} d_{e_i} [(\sin \theta \cos \varphi \cos \varphi_{e_i} + \sin \varphi \sin \varphi_{e_i}) - (\sin \theta_T \cos \varphi_T \cos \varphi_{e_i} + \sin \varphi_T \sin \varphi_{e_i})] \right\} \quad (5)$$

式中, $F_1(\theta, \varphi)$ 为单元天线的方向图。同理,接收阵的方向图为

$$F_r(\theta, \varphi) = F_1(\theta, \varphi) \sum_{i=1}^{N_r} \exp \left\{ j \frac{2\pi}{\lambda} d_{r_i} [(\sin \theta \cos \varphi \cos \varphi_{r_i} + \sin \varphi \sin \varphi_{r_i}) - (\sin \theta_T \cos \varphi_T \cos \varphi_{r_i} + \sin \varphi_T \sin \varphi_{r_i})] \right\} \quad (6)$$

式中, $(d_{e_i}, \theta_{e_i}, \varphi_{e_i})$ 为发射阵元的位置坐标, $(d_{r_i}, \theta_{r_i}, \varphi_{r_i})$ 为接收阵元的位置坐标。则在自由空间,阵列总的方向图为

$$F(\theta, \varphi) = F_e(\theta, \varphi) \cdot F_r(\theta, \varphi) \quad (7)$$

对式(7)归一化后可得空间阵列的合成方向图

$$G(\theta, \varphi) = \frac{|F(\theta, \varphi)|}{\max \{|F(\theta, \varphi)|\}} = G_e(\theta, \varphi) G_r(\theta, \varphi) \quad (8)$$

式中, $G_e(\theta, \varphi), G_r(\theta, \varphi)$ 分别为发射阵列和接收阵列的方向图。由于工程需要,优化布阵时阵元稀疏率约为50%,天线位置为优化变量,以较少的阵元数实现合成天线阵较低的旁瓣电平作为优化目标,选取最大相对旁瓣电平( $Max. Rsl$ )作为目标函数,定义为

$$Max. Rsl = 20 \log \left| \frac{F_{\max, d}}{F_{\max}} \right| \text{ dB} \quad (9)$$

式中, $F_{\max}$ 是主瓣电平, $F_{\max, d}$ 是最大旁瓣电平。与线阵不同的是,平面阵有方位和俯仰两维方向图,设计最优解时要根据需求权衡两者的比重,文中优化时兼顾方位、俯仰维的旁瓣电平,可得如下的适应度函数

$$fitness = -(w_1 Max. Rsl_{az} + w_2 Max. Rsl_{el}) \quad (10)$$

式中, $Max. Rsl_{az}$ 是方位维的最大旁瓣电平, $Max. Rsl_{el}$ 是俯仰维的最大旁瓣电平。由于最大旁瓣电平为负值,范围基本在 $(-40 \text{ dB} \sim -20 \text{ dB})$ 之间,为满足适应度函数 $fitness$ 非负,对加权后的最大旁瓣电平取反,所以优化时应选择 $fitness$ 的最大值。

## 3 面阵天线单元坐标位置的构造

由于天线阵的面积是给定的,所放置的阵元个数是有限的,要求在给定的面阵中随机放置发射天线和接收天线。

而且每个天线之间还有水平维和垂直维的间距要求,所以如何在面阵中构造天线单元的坐标位置成为求解适应度函数首要解决的一个关键问题。

等距栅格方法<sup>[8]</sup>作为一种传统的阵列优化方法在此不作详细介绍,本文根据实际天线阵的尺寸要求,在每个阵元间距间引入了随机阵元扰动,最终实现了阵元间非等间距的坐标系设计。

由于面阵天线的尺寸已知,首先按照等距栅格方法构造一个坐标位置固定的坐标系,水平栅格间距为 $d_y + \delta_{mx,y}$ ,垂直栅格间距为 $d_z + \delta_{mx,z}$ 。其中 $\delta_{mx,y}$ 、 $\delta_{mx,z}$ 分别为水平维、垂直维最大扰动值,其具体值根据天线尺寸设定。每个栅格形如“田”字,先将阵元放在每个“田”字的中心,然后分别在水平、垂直二维增加水平扰动 $\delta_x \leq \delta_{mx,y}$ (发射、接收天线在水平维扰动分别为 $\delta_{ex}$ 、 $\delta_{rx}$ )和垂直扰动 $\delta_z \leq \delta_{mx,z}$ (发射、接收天线在垂直维扰动分别为 $\delta_{ez}$ 、 $\delta_{rz}$ )。对于每个阵元来说,扰动的增加使得阵元可以随机的在给定“田”字空间内自由移动。由于扰动是随机产生的,阵元的位置相对中心位置的偏离也是随机的,因此阵元位置是随机分布的,且阵元间距满足水平间距和垂直间距的约束条件。文中微扰值 $\delta_x$ 、 $\delta_z$ 的取值范围由面阵的两维尺寸决定,设计中规定在0~0.22 $\lambda$ 之间,以满足微扰的条件。

存在距离微扰情况下,发射阵和接收阵方向图函数可以分别表示为

$$F_r(\theta, \varphi) = F_1(\theta, \varphi) \sum_{k=1}^N \exp \left\{ j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(x_k + \delta_{ex})^2 + (y_k + \delta_{rx})^2} \right. \\ \left. [(\sin \theta \cos \varphi \cos \varphi_k + \sin \varphi \sin \varphi_k) - \right. \\ \left. (\sin \theta_r \cos \varphi_r \cos \varphi_k + \sin \theta_r \sin \varphi_k)] \right\} \quad (11)$$

$$F_e(\theta, \varphi) = F_1(\theta, \varphi) \sum_{k=1}^N \exp \left\{ j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(x_n + \delta_{ex})^2 + (y_n + \delta_{rx})^2} \right. \\ \left. [(\sin \theta \cos \varphi \cos \varphi_n + \sin \varphi \sin \varphi_n) - \right. \\ \left. (\sin \theta_r \cos \varphi_r \cos \varphi_n + \sin \theta_r \sin \varphi_n)] \right\} \quad (12)$$

从式(11)、(12)可以看到,微扰值 $\delta_x$ 、 $\delta_z$ 的引入在天线阵列中的作用实际上等效于引入了一个随机的相位加权,但是这种相位加权的幅度是比较小的,而且满足统计规律。图2为采用上述随机扰动和半波长等距栅格方法得到的整个天线坐标位置对比图。其中,“o”为采用半波长等距栅格方法建立的坐标系;“\*”为采用二维间距扰动建立的坐标系。从图2可以看出,采用二维间距随机扰动后,61个坐标位置点彼此都不在一个水平轴或垂直轴,且阵元间距满足二维最小阵元间距要求。

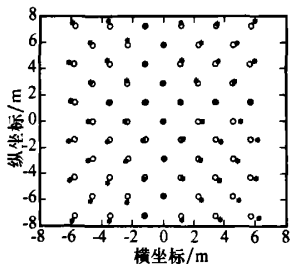


图2 面阵坐标系设计对比

#### 4 改进遗传算法在MIMO雷达天线稀布中的应用

由于MIMO雷达天线方向图综合要同时考虑发射天线方向图和接收天线方向图,以及它们对整个合成方向图的影响,所以本文研究的是一个多目标优化问题,即要进行多次的编码、选择、交叉、变异操作。图3为改进遗传算法流程图。

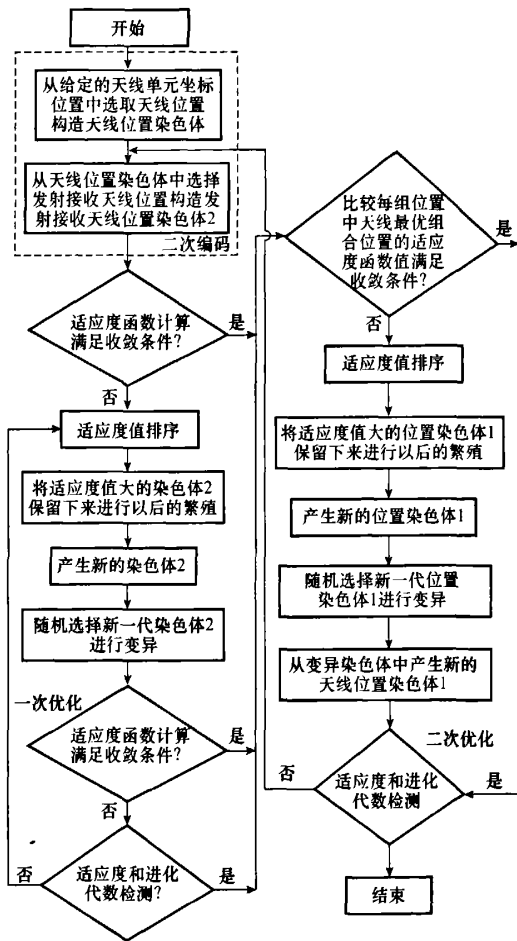


图3 改进遗传算法流程

(1) 编码:遗传算法不对所求解问题的实际参量直接进行操作,而是对参量的编码进行遗传运算达到优化目的。

针对MIMO雷达天线稀布优化问题,本文采用了两次编码,第一次编码是在图2带有随机扰动的坐标系中选择天线位置;第二次编码是从给定的天线位置中选择最优的发射、接收天线。具体过程为:首先采用二进制编码从图2坐标系中随机地选出一部分天线位置作为发射天线和接收天线,在图2所示的坐标系中共包含61个天线位置,令“1”表示放置天线,“0”表示不放置天线,则得到一条含有61个0、1的染色体,将得到的染色体与坐标系中61个坐标点联合起来进行位置编码,为保证该面阵有最大的阵列孔径,在

选取天线位置时,面阵四个端点的位置是必须选取的。

接下来找出上述61个由“0”、“1”组成的染色体中“1”的位置编码,并记录下来;针对纪录的天线位置,重新对其进行二进制编码,所不同的是此次编码中的“1”表示的是在给定的位置上放置发射天线,“0”表示的是在给定的位置上放置接收天线。通过以上两步操作即完成了二次编码操作。

(2) 选择:选择是将优良的染色体选出来,将其遗传到下一代群体中繁殖,体现了“适者生存”的自然选择原则,对群体中每个染色体的适应度进行排序,将适应度高的前一半染色体进行繁殖,将适应度最高的染色体直接复制到下一代,保证最佳染色体在遗传过程中不丢失。

(3) 交叉:交叉是产生新染色体的主要手段,是通过两个互相配对的染色体按照某种方式交换部分基因,从而形成两个新的染色体的过程。交叉概率 $P_c$ 控制着交叉算子的应用频率,在每一代新的群体中,需要对个体的染色体结构进行交叉操作。通常交叉概率取0.6~0.8是最优的。文中首先确定需要进行交叉的两个父代染色体,然后采用掩码算子,均匀交叉的方法产生新染色体,交叉位置用随机掩码确定。

(4) 变异:以变异概率 $P_m$ 在经过交叉的种群中选择进行变异的染色体,进而产生后代。由于交叉概率和变异概率的选择对于整个算法的运算效率及收敛性有很大的影响。为防止算法在迭代过程中出现早熟等现象,采用自适应算法<sup>[10]</sup>进行交叉概率和变异概率的自适应调节。

经过选择、交叉和变异操作,得到一个新的种群,如果

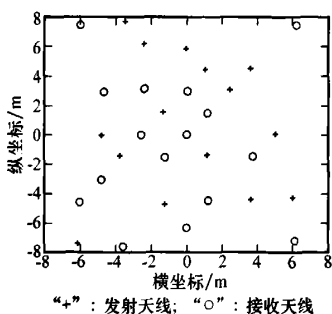


图4 优化的天线位置

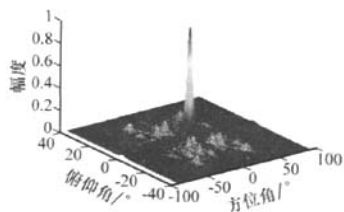


图6 合成天线的三维方向图

其中最优的染色体的适应度函数满足要求则停止,否则继续循环进行这三个操作,直到满足指标要求而终止。其流程图如图3所示。

## 5 MIMO 雷达天线方向图综合结果

仿真过程中,设定各参量为: $d_y = 1.12\lambda$ ,  $d_z = 1.76\lambda$ ,  $w_1 = 0.55$ ,  $w_2 = 0.45$ , 起始交叉概率  $P_{c1} = 0.8$ , 最小交叉概率  $P_{c2} = 0.6$ , 起始变异概率  $P_{m1} = 0.1$ , 最小变异概率  $P_{m2} = 0.001$ 。一次编码经过300代天线位置迭代,二次编码经过400代发射天线位置与接收天线位置的交替变换,得到优化后的发射、接收天线稀布位置,如图4所示,包括发射阵元15个,接收阵元16个,阵元稀布率为51.7%。其中“+”为发射天线位置,“o”为接收天线位置。图5(a)为阵元选取随进化代数的收敛曲线,图5(b)为给定最优天线位置后,得到的适应度函数与进化代数的关系图。当发射和接收天线取最优位置时,图6为合成天线的三维方向图,图7分别是合成天线方向图在方位维和俯仰维的主截面图。图7中实线为采用本文方法搜索的结果,虚线为采用等距栅格方法搜索的结果,从仿真结果可以看出,在经过300代天线位置迭代后,得到了给定面积内发射、接收天线的最优布阵结果,适应度函数值  $fitness$  随进化代数的增加而最终收敛于-36.1 dB。从图7的方位、俯仰两维方向图主截面可以看出,俯仰维最低旁瓣电平为-38.1 dB,方位维最低旁瓣电平为-33.8 dB,较等距栅格方法在同等阵元个数的情况下均有近10 dB的改善。

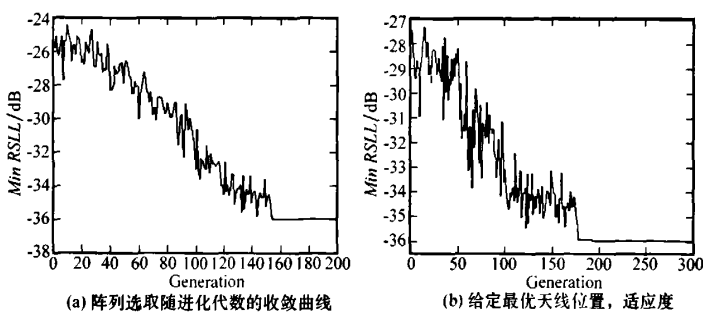


图5 两次编码的收敛曲线

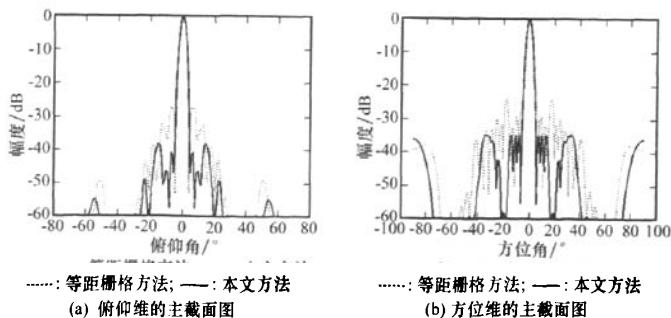


图7 合成天线方向图的主截面图

## 6 结束语

该文基于二次编码的改进遗传算法,给出了一种综合有限阵列面积、阵元数限定、阵列孔径限定和两维(水平维和垂直维)最小阵元间距等约束条件下的 MIMO 雷达天线阵列稀布方法。该文将 MIMO 雷达发射、接收天线稀布综合从规则栅格的稀疏约束扩展为仅有两维坐标阵元间距的约束,因而该方法更大程度地满足了工程设计的需要。该文基于二次编码,交叉概率、变异概率自适应选择等方法,研究了改进的遗传算法,有效地解决了 MIMO 雷达天线方向图综合中低旁瓣电平设计问题,并且给出了优化的 MIMO 雷达天线阵稀布结果,仿真结果证实了该方法的有效性。

### 参考文献:

- [1] Bliss D W, Forsythe K W. Multiple-input multiple-output (MIMO) radar and imaging: degrees of freedom and resolution [C]// *Proceedings of 37<sup>th</sup> Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Pacific Grove, CA, 2003.
- [2] Fishler E, Haimovich A, Blum R, et al. MIMO radar: an idea whose time has come [C]// *Proc. 2004 IEEE Radar Conf.*, Philadelphia, PA, 2004.

(上接第1008页)

从图4可知,噪声对 CVT 算法的影响要小于空间平滑类算法,特别是在存在 Toeplitz 色噪声的情况下, CVT 算法的估计偏差明显小于空间平滑类算法。

## 4 结束语

本文提出了一种针对相干信号源的 DOA 估计算法——CVT 算法,这个算法利用了信号源相干系数等于1的特殊关系,实现了完全意义上的解相干——修正后的信号协方差矩阵为对角阵。CVT 算法相对经典的空间平滑类算法具有运算量小、实现简单、解相干能力强、不损失阵列孔径、估计精度高的特点。

### 参考文献:

- [1] Shan T J, Wax M, Kailath T. On spatial smoothing for direction-of-arrival estimation of coherent signals [J]. *IEEE Trans. on ASSP*, 1985, 33(4): 806–811.

- [3] Forsythe K W, Bliss D W, Fawcett G S. Multiple-input multiple-output (MIMO) radar: performance issues [C]// *Proceedings of IEEE Radar Conference*, 2004.
- [4] Fuhrmann Daniel R, Geoffrey San Antonio. Transmit beamforming for MIMO radar systems using partial signal correlation [C]// *Proceedings of IEEE Radar Conference*, 2004.
- [5] 谢处方,邱文杰. 天线原理与设计 [M]. 西安:西北电讯工程学院出版社,1985:109–118.
- [6] 刘源,邓维波,许荣庆. 应用遗传算法进行阵列天线综合 [J]. *电子与信息学报*, 2004, 26(3): 400–404.
- [7] Dhanesh G Kurup, Mohamed Himdi, Anders Rydberg. Synthesis of uniform amplitude unequally spaced antenna arrays using the differential evolution algorithm [J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2003, 51(9): 2210–2217.
- [8] Haupt Randy L. Thinned arrays using genetic algorithms [J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1994, 42(7): 993–999.
- [9] Ares-pena Francisco J, Rodriguez-Gonzalez Juan A, Emilio Villanueva-Lopez, et al. Genetic algorithms in the design and optimization of antenna array patterns [J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1999, 47(3): 506–510.
- [10] 杨丽娜,丁君,郭陈江,等. 基于遗传算法的阵列天线方向图综合技术 [J]. *微波学报*, 2005, 21(2): 38–41.

- [2] TWilliams R, Prasad S, K Mahalanabis A. An improved spatial smoothing technique for bearing estimation in a multipath environment [J]. *IEEE Trans. on ASSP*, 1988, 36(4): 425–432.
- [3] Qi Chongying, Wang Yongliang, Zhang Yongshun. Spatial Difference smoothing for DOA estimation of coherent signals [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2005, 12(11): 800–802.
- [4] Choi Y H. Subspace-based coherent source localization with forward/backward covariance matrices [J]. *Proc. Inst. Elect. Eng., Radar Sonar Navigat.*, 2002, 19(3): 145–151.
- [5] Al-Ardi E M, Shubair R M, Al-Mualla E M. Computationally efficient high-resolution DOA estimation in multipath environment [J]. *Electron. Lett.*, 2004, 40(14): 908–910.
- [6] Wang BuHong, Wang YongLiang, Chen Hui. Weighted spatial smoothing for direction-of-arrival estimation of coherent signals [C]// *Proceedings of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium San Antonio, Texas, USA: IEEE, APSIS*, 2002, 2: 668–671.

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲,结合实际工程案例,直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>