

基于粒子群算法的宽带真延时方向图栅瓣抑制方法

丛雯珊* 余 岚 沃江海

(空军预警学院一系 武汉 430019)

摘 要: 针对阵元间距大于信号波长引起阵列方向图出现栅瓣的问题, 该文提出一种基于粒子群优化(PSO)算法的宽带真延时方向图栅瓣抑制方法。该方法首先定义了基于宽带真延时的阵列能量方向图, 其次构造了以阵列能量方向图的最高副瓣电平作为适应度函数, 最后利用粒子群优化算法优化阵元分布来实现对阵列方向图栅瓣的进一步抑制。仿真结果表明: 相比于单独使用粒子群算法和单独使用宽带真延时方法, 该方法对方向图栅瓣的抑制性能更加有效, 在此基础上, 该文还研究了阵元个数、平均阵元间距、信号时宽和信号中心频率等因素对方法抑制栅瓣性能的影响。

关键词: 粒子群优化算法; 宽带真延时; 能量方向图; 栅瓣抑制; 适应度函数

中图分类号: TN911.7; TN821

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)07-1698-07

DOI: 10.11999/JEIT180719

A Grating Lobe Suppression Method of Wideband Real Time Delay Pattern Based on Particle Swarm Optimization Algorithm

CONG Wenshan YU Lan WO Jianghai

(No. One Department, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: A grating lobe suppression method of wideband real time delay pattern based on Particle Swarm Optimization(PSO) algorithm is proposed to solve the problem of grating lobe arise from inter-element is larger than wavelength. Firstly, the array energy pattern based on wideband real time delay is defined. Then, a fitness function is constructed with maximum sidelobe level of the array energy pattern. Finally, the grating lobe is further suppressed by optimizing the elements position distribution using Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm. The simulation results show that the proposed grating lobes suppression method is more effective than individually using the particle swarm optimization method or the wideband real time delay method. Furthermore, the influence of the element space, the element number, the time width and the center frequency of signal on the performance of grating lobe suppression are studied.

Key words: Particle Swarm Optimization(PSO) algorithm; Wideband real time delay; Energy pattern; Grating lobe; Fitness function

1 引言

由阵列信号知识可知, 为了获得较高的空间分辨力, 就必须采用大阵列天线^[1], 但在相控阵天线中每个天线单元都需要一个T/R组件, 因此大阵列天线不仅会增加天线复杂度, 而且还极大地提高了天线成本。为了实现在阵元个数较少时获得较窄的天线主波束, 采用稀疏阵列是一种有效的解决方法, 但由于阵元间距不满足空域奈奎斯特采样定理, 导致其阵列天线方向图出现与主瓣性质一样的栅瓣, 不仅会引起辐射能量分散, 还会造成空间分辨模糊。

针对大阵元间距阵列方向图栅瓣抑制问题, 国内外学者展开了广泛的研究^[2-18], 按发射信号带宽的不同可以将目前的方法分为两类: 基于窄带的阵列方向图栅瓣抑制方法^[2-12]和基于宽带的阵列方向图栅瓣抑制方法^[13-18]。基于窄带的阵列方向图栅瓣抑制方法又分为阵列优化^[2-9]和压缩感知^[10,11]两种, 其中阵列优化算法思想就是利用遗传算法、粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法等优化算法对阵列中子阵的位置^[3,4]、大小^[5,6]、相对朝向^[7]及其组合方法^[8-10]来实现对阵列方向图栅瓣的抑制, 虽然上述方法实现了对栅瓣的抑制, 但其对栅瓣的抑制性能随着平均阵元间距的增大而急剧下降, 同时随着阵元数目的增多, 上述优化的解空间按 $M!$ 增长, 不仅会使上述算法的运算量急剧增

收稿日期: 2018-07-18; 改回日期: 2019-01-21; 网络出版: 2019-02-15

*通信作者: 丛雯珊 congwenshan@sina.com

加、收敛速度变慢,甚至还无法得到最优解;2013年,南京理工大学王建等人^[11,12]将压缩感知理论应用到接收端线阵和圆阵的自适应波束形成方面,在稀布率较大时有效地规避了阵列方向图出现栅瓣,但该方法需要稀疏后的阵元数 M 、满阵时的阵元数 N 和空间信号个数 K 满足 $M \geq K \log_2(N/K)$ 的条件,当上述条件不满足时,该方法将会失效。文献^[13]针对宽带侦查数字波束形成栅瓣抑制方法展开了研究,提出了一种基于虚拟阵元技术的栅瓣抑制方法,实现了对栅瓣15 dB的抑制。文献^[14,15]针对宽带阵列方向图的特点,定义了3种宽带能量方向图,在此基础上,文献^[16]研究了超宽带天线阵列抑制栅瓣与信号带宽之间的关系,得到了为有效抑制栅瓣信号的相对带宽需达到100%。随后Ye等人^[17,18]研究了基于真延时的宽带阵列波束形成性能分析,定义了一种相关最大值方向图,有效地抑制了阵列方向图的栅瓣,但随着信号的相对带宽减小,上述方法对栅瓣的抑制性能会急剧下降。

本文根据已有方法对栅瓣抑制的优缺点,提出了一种基于粒子群优化算法的宽带真延时方向图栅瓣抑制方法。首先定义了基于宽带真延时的阵列能量方向图,然后利用粒子群优化算法以阵列能量方向图的最高副瓣电平为适应度函数优化阵元分布,从而实现对阵列方向图栅瓣的进一步抑制,最后通过仿真实验验证了本文方法的有效性,并研究了阵元个数、平均阵元间距、信号时宽和信号中心频率等因素对所提方法抑制栅瓣性能的影响。

2 基于宽带真延时的阵列能量方向图

考虑由 N 个阵元组成的均匀直线宽带阵列,阵元间距为 d ,且假设各阵元为各向同性阵元,阵元空间位置关系如图1所示。空间中来自 θ (定义为信号入射方向与阵列法线之间的夹角)方向上的远场宽带信号入射到阵元上,以第1个阵元为参考阵元,则阵列接收的信号为

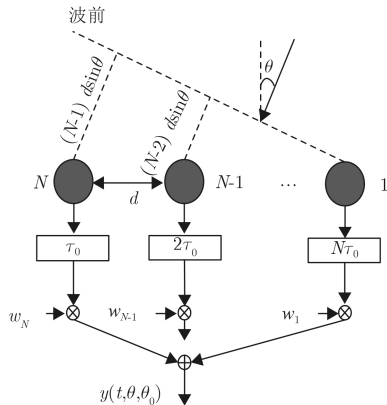


图1 阵元空间位置关系

$$y(\theta, \theta_0, t) = \sum_{n=1}^N w_n s[t - \tau_n(\theta) - \tau_n(\theta_0)] \quad (1)$$

其中, w_n 为第 n 个阵元所施加的权值, $\tau_n(\theta) = (n - 1) d \sin \theta / c$ 为第 n 个阵元与参考阵元之间由于波程差引起的时间差, $\tau_n(\theta_0) = (N - n + 1) d \sin \theta_0 / c$ 是为使阵列方向图主瓣指向 θ_0 时延时器对第 n 个阵元的延时值, c 为光速,其值为 $c = 3 \times 10^8$ m/s, $s(t)$ 为入射的宽带信号,本文采用线性调频信号,其表达式为

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) e^{j2\pi f_0 t + jk\pi t^2} \quad (2)$$

其中, $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形脉冲函数, T 和 f_0 分别为线性调频信号的脉冲宽度和中心频率, $k = B/T$ 为线性调频信号的啁啾率, B 为线性调频信号的带宽。由文献^[14]可知,宽带真延时能量方向图的表达式为

$$\text{BP}(\theta, \theta_0) = \frac{\left(\int_{-\infty}^{+\infty} |y(\theta, \theta_0, t)|^2 dt\right)^{1/2}}{\left(\int_{-\infty}^{+\infty} |s(t)|^2 dt\right)^{1/2}} \quad (3)$$

将式(1)和式(2)代入式(3)化简得(推导略)

$$\text{BP}^2(\theta, \theta_0) = \sum_{n=1}^N w_n^2 + \sum_{n=1}^N \sum_{m>n}^N \frac{2w_n w_m}{k\pi T\tau} \cdot \cos(2\pi f_0 \tau) \sin[k\pi \tau (T - |\tau|)] \quad (4)$$

其中, $\tau = (m - n) d (\sin \theta - \sin \theta_0) / c$ 为第 m 个阵元接收的信号与第 n 个阵元接收信号经光真延时网络后的时间差。

3 基于粒子群算法的宽带真延时方向图栅瓣抑制

上节推导了在接收线性调频信号时,均匀线阵基于宽带真延时的阵列能量方向图表达式,但由文献^[16]可知,只有信号的相对带宽达到100%时基于宽带真延时的阵列能量图才能有效抑制阵列方向图的栅瓣,为了能在较小信号带宽下实现对栅瓣的抑制,本节提出了一种基于粒子群算法的宽带真延时方向图栅瓣抑制方法,该方法的思想是在发射宽带信号和采用真延时的情况下,以阵列能量方向图的最高副瓣电平为适应度函数,利用粒子群优化算法优化阵元分布来实现对阵列方向图栅瓣的进一步抑制。

3.1 粒子群优化算法

粒子群算法自1995年提出以来,凭借其理论简单、参数少易于编程实现和同时能对多维问题及非线性优化问题求解的能力,在阵列方向图综合、模式识别和信息处理等多个领域得到广泛应用,其思

想就是将需要优化的变量看成一个粒子，每个粒子对应不同的位置和速度，并且以目标函数决定的适应度函数来评价每个粒子作为解的优良程度，每个粒子根据粒子本身找的最优值和整个粒子群找的最优值不断更新自己的最优位置和速度，直到找到最终的最优值。因此，粒子群优化算法的速度和位置迭代更新公式为

$$v_i^{q+1} = wv_i^q + c_1r_1(p_i^q - x_i^q) + c_2r_2(g^q - x_i^q) \quad (5)$$

$$x_i^{q+1} = x_i^q + v_i^{q+1} \quad (6)$$

其中， x_i^{q+1} 和 v_i^{q+1} 分别为第 $q+1$ 次迭代时第 i 个粒子的位置和速度， x_i^q 和 v_i^q 分别为第 q 次迭代时第 i 个粒子的位置和速度， w 为保持原来速度的权重系数，称为“惯性权重系数”， c_1 和 c_2 分别为粒子根据自身的最优位置和整个粒子群的最优位置更新速度的权重系数，统称为“学习因子”， r_1 和 r_2 为均匀分布在 $0\sim 1$ 之间的随机数， p_i^q 为第 q 次迭代后第 i 个粒子的最佳位置， g^q 为第 q 次迭代后全体粒子的最佳位置。

3.2 基于粒子群算法的宽带真延时方向图栅瓣抑制方法

为了实现在信号带宽较小时通过优化阵元分布来抑制方向图的栅瓣，得到具有较高主副瓣抑制比的阵列是一个多维优化问题，根据第2节和3.1节的分析可知，可以利用粒子群优化算法实现这一目标。

为了优化阵元在阵列中分布，以 N 个阵元在阵列中的位置为优化变量，即 $\mathbf{dd} = (d_1, d_2, \dots, d_N)$ 为优化变量。为了保证阵列孔径不变，设 $d_1 = 0$ ， $d_N = (N-1)d$ 保持不变，同时为了保证阵元最小间距为信号中心频率对应波长的 $1/p$ 倍，因此，粒子群优化算法的速度、位置迭代式(5)、式(6)变成

$$v_i^{q+1} = wv_i^q + c_1r_1(\mathbf{dd}_{i,q} - \mathbf{dd}_i^q) + c_2r_2(\mathbf{g}_q - \mathbf{dd}_i^q) \quad (7)$$

$$\mathbf{dd}_i^{q+1} = \text{sort} \left\{ \text{fix} \left[\left(\mathbf{dd}_i^q + v_i^{q+1} \right) / \max \left(\mathbf{dd}_i^q + v_i^{q+1} \right) \cdot (N-1)d \cdot p \right] \right\} \quad (8)$$

其中， v_i^{q+1} 和 v_i^q 分别为第 i 个粒子第 $q+1$ 次和第 q 次循环时的阵元速度矢量， \mathbf{dd}_i^q 为第 i 个粒子第 q 次循环的阵元位置矢量，且其单位为信号中心频率对应波长的 $1/p$ 倍， $\mathbf{dd}_{i,q}$ 为第 i 个粒子第 q 次循环后的阵元最佳位置矢量， $\mathbf{g}_{i,q}$ 为整个粒子群第 q 次循环后的

阵元最佳位置矢量， $\text{sort}(\mathbf{x})$ 为对 \mathbf{x} 中的元素从小到大排序运算符， $\text{fix}(\mathbf{x})$ 为对 \mathbf{x} 朝零的方向取整数部分的运算符。

目标函数是用来评价每次循环后粒子的优良程度的。在本文中采用阵列能量方向图的归一化最高副瓣电平(Maximum Side-Lobe Level, MSL)作为优化目标的适应度函数，其定义式为

$$\text{MSLL}(\mathbf{dd}_i) = \frac{\max_{\theta \in S} \{ \text{BP}^2(\theta, \theta_0, \mathbf{dd}_i) \}}{\max \{ \text{BP}^2(\theta, \theta_0, \mathbf{dd}_i) \}} \quad (9)$$

其中， $\text{BP}^2(\theta, \theta_0, \mathbf{dd}_i)$ 为第 i 个粒子对应的宽带真延时阵列能量方向图， S 为方向图的旁瓣区域，则目标函数可以定义为

$$\text{MSLL} = \min [\text{MSLL}(\mathbf{dd}_i)] \quad (10)$$

为了获得具有较小MSLL的宽带真延时能量方向图，基于粒子群优化算法的宽带真延时能量方向图栅瓣抑制方法在第 q 次循环后需要对第 i 个粒子的阵元最佳位置矢量、适应度函数值和所有粒子的阵元最佳位置矢量、适应度函数值进行更新，其更新流程如表1所示。

根据上述理论分析及粒子群算法的步骤可知，基于粒子群算法的宽带真延时能量方向图栅瓣抑制方法的具体步骤如下：

步骤1 初始化阵元个数 N ，平均阵元间距 d ，信号带宽 B 、中心频率 f_0 和时宽 T ，主瓣指向 θ_0 ，粒子个数 I ，学习因子 c_1 和 c_2 和迭代次数 Q ；

步骤2 初始化阵元位置矢量 \mathbf{dd}_i^0 ($i = 1, 2, \dots, I$)和速度矢量 v_i^0 ，并令迭代次数 $q=0$ ；

步骤3 将 \mathbf{dd}_i^0 代入式(4)，计算出第 i 个粒子的宽带真延时能量方向图 $\text{BP}^2(\theta, \theta_0, \mathbf{dd}_i^0)$ ；

步骤4 将 $\text{BP}^2(\theta, \theta_0, \mathbf{dd}_i^0)$ 代入式(9)，得到第 i 个粒子对应的适应度函数值 $\text{MSLL}_{i,0}$ ；

步骤5 将 $\text{MSLL}_{i,0}$ 代入式(10)，求出初始化时整个粒子群的适应度函数值 MSLL_0 ；

步骤6 利用式(7)、式(8)更新各粒子的阵元位置矢量，重复步骤3和步骤4，求出第 q 次循环时第 i 个粒子的适应度函数值 MSLL_i^q ；

步骤7 根据更新流程，利用表1对第 q 次循环后的第 i 个粒子的阵元最佳位置矢量 $\mathbf{dd}_{i,q}$ 、适应度

表1 基于粒子群优化算法的宽带阵列方向图栅瓣抑制方法每次循环后更新粒子流程

- | |
|--|
| (1) 如果 $\text{MSLL}_{i,q-1} > \text{MSLL}_i^q$ ， $\text{MSLL}_{i,q} \leftarrow \text{MSLL}_i^q$ ， $\mathbf{dd}_{i,q} \leftarrow \mathbf{dd}_i^q$ ；否则 $\text{MSLL}_{i,q} \leftarrow \text{MSLL}_{i,q-1}$ ， $\mathbf{dd}_{i,q} \leftarrow \mathbf{dd}_{i,q-1}$ ； |
| (2) 如果 $\text{MSLL}_{q-1} > \text{MSLL}_q$ ， $\text{MSLL}_q \leftarrow \text{MSLL}_{i,q}$ ， $\mathbf{g}_q \leftarrow \mathbf{dd}_i^q$ ；否则 $\text{MSLL}_q \leftarrow \text{MSLL}_{q-1}$ ， $\mathbf{g}_q \leftarrow \mathbf{g}_{q-1}$ 。 |

注：表中， MSLL_i^q 为第 i 个粒子第 q 次循环的适应度函数值， $\text{MSLL}_{i,q}$ 为第 i 个粒子第 q 次循环后的最佳适应度函数值， MSLL_q 为整个粒子群第 q 次循环后的最佳适应度函数值。

函数值 $MSLL_{i,q}$ 和粒子群的阵元最佳位置矢量 g_q 、适应度函数值 $MSLL_q$ 进行更新;

步骤8 判断循环是否完成, 如完成, 则转到步骤9, 否则 $q=q+1$, 转步骤6;

步骤9 输出此时粒子群的阵元最佳位置矢量 g_q 和适应度函数值 $MSLL_q$, 并计算 g_q 对应的宽带真延时能量方向图 $BP^2(\theta, \theta_0, g_q)$ 。

4 仿真实验结果与分析

本节以线阵为仿真平台, 且由于本文是针对目前基于微波光子技术新体制雷达——微波光子雷达, 尤其是微波光子ISAR雷达所提出的, 文献[19-21]中微波光子ISAR发射的线性调频信号带宽分别为600 MHz, 8 GHz和10.02 GHz, 因此本文取线性调频信号的带宽为1 GHz和10 GHz两种情况, 并以仅使用粒子群优化(PSO)算法和仅使用宽带(WB)真延时抑制栅瓣的方法作为对照算法, 来评价本文方法对栅瓣的抑制性能。

仿真条件设置: 粒子群的维数(阵元数)为16, 粒子个数为20, 最大迭代次数500, 惯性权重系数为0, 学习因子 c_1 和 c_2 均为2, 线性调频信号的频率和时宽分别为10 GHz和10 ns, 相邻阵元间的平均间距和最小间距分别为3倍和半个信号中心频率对应的波长, 阵列方向图的主瓣指向 $\theta_0 = 0^\circ$, 当信号带宽为1 GHz时, 得到阵元的位置矢量为[0, 2, 7, 9, 12, 15, 21, 25, 35, 41, 50, 53, 58, 69, 70, 90], 对应的PSO算法、WB算法和本文算法得到的阵列方向图如图2(a)所示, 当将发射信号的带宽调整为10 GHz, 对应的PSO算法、WB算法和本文算法得到的阵列方向图如图2(b)所示。

由图2可知, 仅使用PSO算法得到阵列方向图的MSLL为-6.23 dB, 信号带宽为1 GHz时, WB算法和本文算法得到阵列方向图的MSLL分别为-2.35 dB和-10.42 dB, 而当信号带宽为10 GHz时, WB算法和本文算法得到的阵列方向图的MSLL

分别为-10.12 dB和-12.06 dB, 由此可知, 本文方法对栅瓣的抑制性能优于PSO算法和WB算法, 且在信号带宽为1 GHz, 本文方法对栅瓣的抑制性能优于PSO算法和WB算法之和, 相比两者之和改善了1.84 dB。

由第2节宽带真延时能量方向图的式(4)及第3节本文方法的理论分析可知, 本文方法对栅瓣的抑制性能与阵元个数、平均阵元间距、信号中心频率和时宽等因素有关, 下面, 分别仿真分析在信号带宽分别为1 GHz和10 GHz两种情况下, 上述4种因素对本文方法抑制栅瓣性能的影响。

(1) 阵元个数: 仿真条件为阵元个数的变化范围为10~100, 步长为10, 其余的仿真条件与上述仿真相同, PSO算法、WB算法和本文方法在信号带宽为1 GHz和10 GHz两种情况下, 得到阵列能量方向图的MSLL随阵元个数的变化情况分别如图3(a)和图3(b)所示。由图可知, 上述3种方法对栅瓣的抑制性能均随着阵元个数的增多而变好。

(2) 平均阵元间距: 仿真条件为阵元间平均阵元间距的范围为3~30个波长, 步长为3个波长, 其余仿真条件与上述仿真相同, PSO算法、WB算法和本文方法在在信号带宽为1 GHz和10 GHz两种情况下, 得到阵列能量方向图的MSLL随平均阵元间距的变化情况分别如图4(a)和图4(b)所示。由图可知, PSO算法得到阵列能量方向图的MSLL随着平均阵元间距的增大先增大而后下降; WB算法得到阵列能量方向图的MSLL随着平均阵元间距的增大几乎不变; 在信号带宽为1 GHz时, 本文方法得到阵列能量方向图的MSLL随着平均阵元间距的增大有些波动, 而在信号带宽为10 GHz时, 本文方法得到阵列能量方向图的MSLL随着平均阵元间距的增大几乎不变。由此可知, 在信号带宽较大时, 本文方法对阵列能量方向图栅瓣的抑制性能与信号带宽无关。

(3) 信号中心频率: 仿真条件为线性调频信号

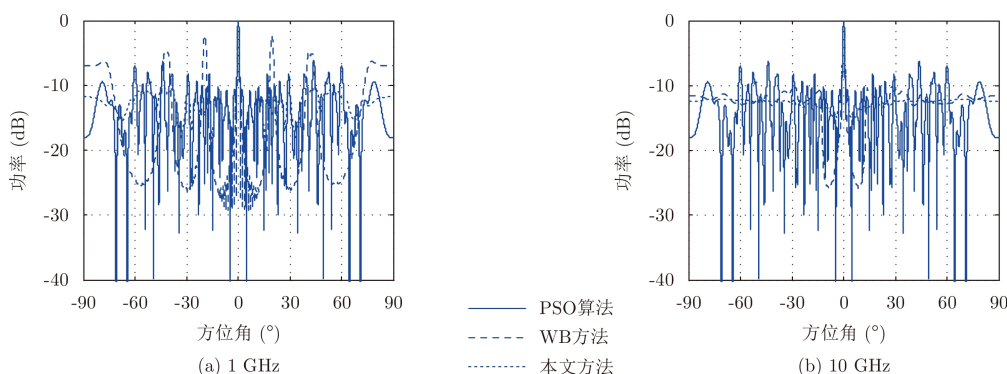


图2 阵列方向图

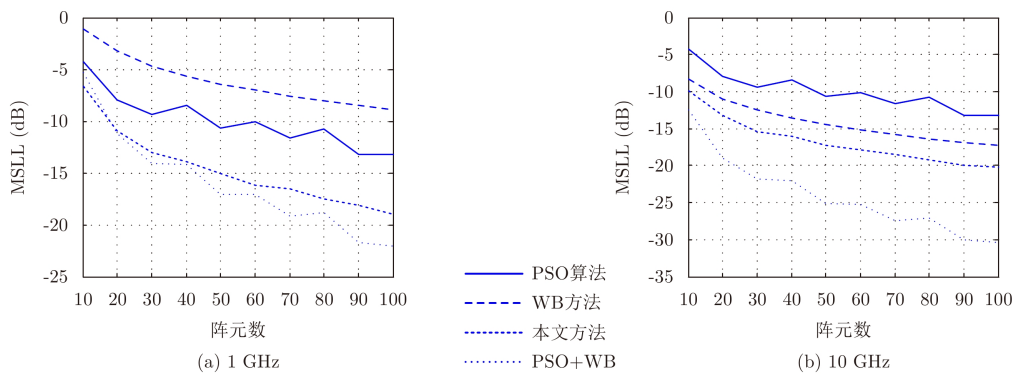


图3 MSLR随阵元个数的变化情况

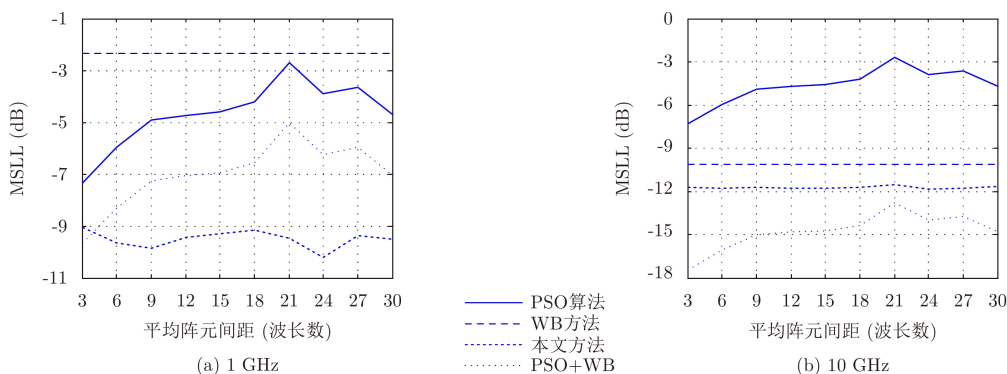


图4 MSLR随阵元间平均间距的变化情况

的中心频率变化范围为8~18 GHz, 步长为1 GHz, 其余仿真条件与上述仿真相同, PSO算法、WB算法和本文方法在信号带宽为1 GHz和10 GHz两种情况下, 得到阵列能量方向图的MSLR随信号中心频率的变化情况分别如图5(a)和图5(b)所示。由图可知, 3种算法得到阵列能量方向图的MSLR均随着信号中心频率的增大而增大, 由此可知本文方法对栅瓣的抑制性能与信号中心频率成反比。

(4) 信号时宽: 仿真条件为线性调频信号的时宽变化范围为10~100 ns, 步长为10 ns, 其余仿真条件与上述仿真相同, PSO算法、WB算法和本文方法在信号带宽为1 GHz和10 GHz两种情况下, 得

到阵列能量方向图的MSLR随信号时宽的变化情况分别如图6(a)和图6(b)所示。由图可知, 3种算法得到阵列方向图的MSLR随着信号时宽的增大几乎不变, 由此可知本文方法对栅瓣的抑制性能与信号时宽无关。

综上所述, 相比于仅使用粒子群优化算法和仅使用宽带真延时, 本文方法对栅瓣的抑制性能更加有效, 且本文方法对阵列方向图栅瓣的抑制性能与阵元个数成正比、与信号中心频率成反比和与信号时宽和阵元平均间距无关; 同时由图3(a)、图4(a)、图5(a)和图6(a)还可发现, 当信号带宽较小(1 GHz)时, 本文方法对栅瓣的抑制性能优于仅使用粒子群

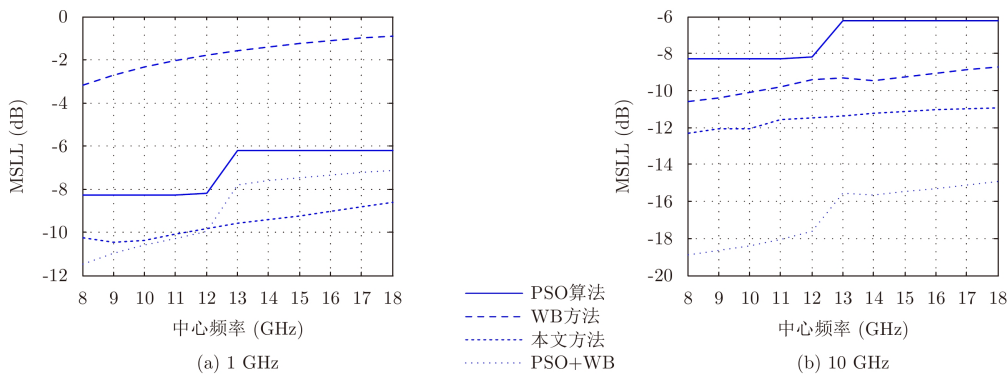


图5 MSLR随信号中心频率的变化情况

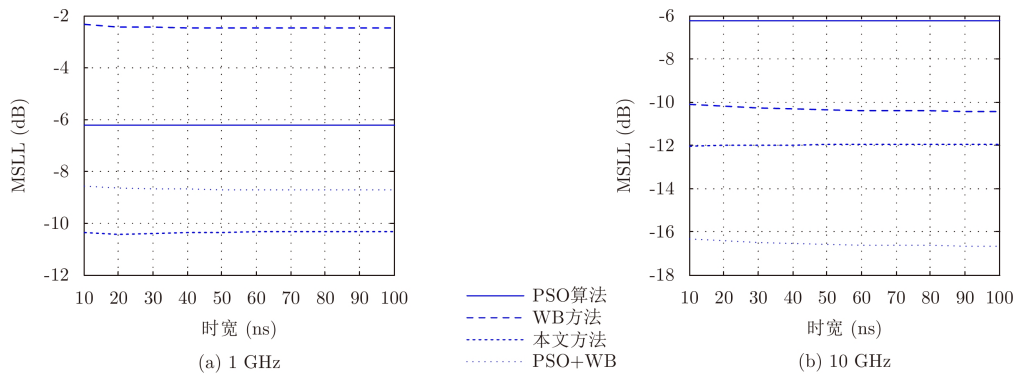


图6 MSLL随信号带宽的变化情况

优化算法和仅使用宽带真延时对阵列方向图栅瓣的抑制之和。

5 结束语

本文针对大阵元间距阵列方向图栅瓣抑制问题,提出了一种基于粒子群算法的宽带真延时方向图栅瓣抑制方法,本文方法在利用宽带真延时抑制栅瓣的基础上,以阵列能量方向图的最高副瓣电平为适应度函数,利用粒子群优化算法优化阵元分布来实现对阵列方向图栅瓣的进一步抑制。仿真结果表明,相比于单独采用粒子群优化算法和单独采用宽带真延时,本文方法对阵列方向图栅瓣的抑制更加有效,尤其是在发射信号带宽较小(1 GHz)时,其对栅瓣的抑制性能比前两者之和还高1.84 dB,在此基础上还得到了本文方法对阵列方向图栅瓣的抑制性能与阵元个数成正比、与信号中心频率成反比,与信号带宽和平均阵元间距无关的结论。研究结论为基于微波光子技术新体制雷达-微波光子雷达采用大阵元结构提供了一定的理论基础。

参考文献

- [1] 王永良, 陈辉, 彭应宁, 等. 空间谱估计理论与算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. 22–25.
WANG Yongliang, CHEN Hui, PENG Yingning, *et al.* Spatial Spectrum Estimation Theory and Algorithm[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009. 22–25.
- [2] 丁志丹, 杨飞, 蔡海文, 等. 基于微光学阵列差分真延时网络的光学多波束合成系统[J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0406004.
DING Zhidan, YANG Fei, CAI Haiwen, *et al.* Optical multi-beam synthetic system based on micro-optical array differential true time delay network[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0406004.
- [3] 曹爱华, 李海林, 马守磊, 等. 基于MOPSO与凸优化算法的稀疏圆阵列方向图优化[J]. 数据采集与处理, 2017, 32(5): 980–987. doi: 10.16337/j.1004-9037.2017.05.015.
CAO Aihua, LI Hailin, MA Shoulei, *et al.* Sparse circular array pattern optimization based on MOPSO and convex optimization[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2017, 32(5): 980–987. doi: 10.16337/j.1004-9037.2017.05.015.
- [4] 冯晶晶, 陈祝明, 江朝抒. 非均匀分布式星载雷达栅瓣抑制技术研究[J]. 现代雷达, 2010, 32(4): 50–53. doi: 10.3969/j.issn.1004-7859.2010.04.013.
FENG Jingjing, CHEN Zhuming, and JIANG Chaoshu. Grating lobes suppression for non-uniform distributed space-based radar[J]. *Modern Radar*, 2010, 32(4): 50–53. doi: 10.3969/j.issn.1004-7859.2010.04.013.
- [5] GOFFER A P, KAM M, and HERCZFELD P R. Design of phased arrays in terms of random subarrays[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1994, 42(6): 820–826. doi: 10.1109/8.301701.
- [6] XIONG Ziyuan, XU Zhenhai, and XIAO Shunping. Beamforming properties and design of the phased arrays in terms of irregular subarrays[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2015, 9(4): 369–379.
- [7] TOYAMA N. Aperiodic array consisting of subarrays for use in small mobile earth stations[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2005, 53(6): 2004–2010. doi: 10.1109/TAP.2005.848486.
- [8] ALSHAMMARY A, WEISS S, and ALMORQI S. Grating lobe suppression in rotationally tiled arrays[C]. Proceedings of the 11th European Conference on Antennas and Propagation, Paris, France, 2017: 1158–1161.
- [9] WANG Hao, FANG Dagang, and CHOW Y L. Grating lobe reduction in a phased array of limited scanning[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2008, 56(6): 1581–1586. doi: 10.1109/TAP.2008.923354.
- [10] KRIVOSHEEV Y V, SHISHLOV A V, and DENISENKO V V. Grating lobe suppression in aperiodic phased array antennas composed of periodic subarrays with large Element spacing[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2015, 57(1): 76–85. doi: 10.1109/MAP.2015.2397155.
- [11] 王建, 盛卫星, 韩玉兵, 等. 基于压缩感知的自适应数字波束形成算法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(2): 438–444. doi: 10.3724/

- SP.J.1146.2012.00517.
- WANG Jian, SHENG Weixing, HAN Yubing, *et al.* Adaptive digital beamforming algorithm based on compressed sensing[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(2): 438–444. doi: [10.3724/SP.J.1146.2012.00517](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.00517).
- [12] 王建, 盛卫星, 韩玉兵, 等. 基于压缩感知的圆阵自适应数字波束形成算法[J]. *电波科学学报*, 2014, 29(3): 455–461. doi: [10.13443/j.cjors.2013060802](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2013060802).
- WANG Jian, SHENG Weixing, HAN Yubing, *et al.* Compressed sensing based adaptive digital beamforming algorithm in circle arrays[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2014, 29(3): 455–461. doi: [10.13443/j.cjors.2013060802](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2013060802).
- [13] HU Mengzhong, JIN Xueming, and HU Yuankui. A method for suppressing grating lobes of wideband reconnaissance DBF[C]. Proceedings of 2016 IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference, Xi'an, China, 2016: 1547–1550.
- [14] RIES S and KAISER T. Ultra wideband impulse beamforming: It is a different world[J]. *Signal Processing*, 2006, 86(9): 2198–2207. doi: [10.1016/j.sigpro.2005.07.041](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2005.07.041).
- [15] KAISER T, ZHENG Feng, and DIMITROV E. An overview of ultra-wide-band systems with MIMO[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, 97(2): 285–312. doi: [10.1109/JPROC.2008.2008784](https://doi.org/10.1109/JPROC.2008.2008784).
- [16] SIPAL V, EDWARDS D, and ALLEN B. Bandwidth requirement for suppression of grating lobes in ultrawideband antenna arrays[C]. Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Ultra-Wideband, Syracuse, USA, 2012: 236–240.
- [17] YE Xingwei, ZHANG Yamei, and PAN Shilong. Performance evaluation of RF beamforming based on a wideband antenna array and photonic true time delay[C]. Proceedings of the 14th International Conference on Optical Communications and Networks, Nanjing, China, 2015.
- [18] YE Xingwei, ZHANG Bowen, ZHANG Yamei, *et al.* Performance evaluation of optical beamforming-based wideband antenna array[J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(1): 010013. doi: [10.3788/COL](https://doi.org/10.3788/COL).
- [19] LI Ruoming, LI Wangzhe, DING Manlai, *et al.* Demonstration of a microwave photonic synthetic aperture radar based on photonic-assisted signal generation and stretch processing[J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 14334–14340. doi: [10.1364/OE.25.014334](https://doi.org/10.1364/OE.25.014334).
- [20] ZHANG Fangzheng, GUO Qingshui, WANG Ziqian, *et al.* Photonics-based broadband radar for high-resolution and real-time inverse synthetic aperture imaging[J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 16274–16281. doi: [10.1364/OE.25.016274](https://doi.org/10.1364/OE.25.016274).
- [21] WANG Anle, WO Jianghai, LUO Xiong, *et al.* Ka-band microwave photonic ultra-wideband imaging radar for capturing quantitative target information[J]. *Optics Express*, 2018, 26(16): 20708–20717. doi: [10.1364/OE.26.020708](https://doi.org/10.1364/OE.26.020708).
- 丛雯珊: 男, 1989年生, 博士生, 研究方向为阵列信号处理、任意高频微波信号产生.
- 余 岚: 男, 1962年生, 教授, 研究方向为微波光子学在雷达、通信中的应用等.
- 沃江海: 男, 1987年生, 讲师, 研究方向为微波光子雷达、光纤光学和光纤传感等.