

粒子群优化算法对波束形成的效果分析

滕玉鹏^{1,2}, 史朝¹, 全宇³, 王晗^{1,4}

(1. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225; 2. 中国气象局气象探测中心, 北京 100081; 3. 鄂尔多斯市气象局, 内蒙古 鄂尔多斯 017000; 4. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081)

摘要:相控阵雷达的优势之一便是按照一定的幅度、相位或者间距对阵元进行加权后在理论上可得到任意形状的远场方向图。但是, 由于所需控制的参数之间存在互相作用, 导致其分布特性复杂, 致使相控阵雷达波束形成性能受限。以粒子群优化算法为代表的智能算法解决了在特定场合无法利用数学解析推导加权项分布的难题。通过仿真, 对粒子群算法在波束形成上的效果进行分析, 讨论在不同变量空间下的粒子群算法优化对于波束的性能影响, 并对诸多设计细节提出建议。仿真实验结果表明: 基于粒子群算法的相位加权不能单独应用于方向图优化。幅度加权收敛速度快, 可以较好地完成优化, 适合于自适应性的应用场合。幅、相混合加权对于宽波束赋形性能较好, 但是收敛速度较慢。

关键词:气象探测技术; 大气遥感; 相控阵雷达; 粒子群算法; 阵列天线; 天线方向图

中图分类号: TN958.92

文献标志码: A

0 引言

相控阵雷达自诞生以来, 便以波束指向灵活、迅速, 雷达工作可靠性高等优点而备受瞩目。随着研究的发展, 加之新技术、新材料、新工艺的研发, 使相控阵雷达的生产成本逐渐下降, 称为雷达发展的必然方向。

随着相控阵雷达的广泛应用, 如何有效、充分利用阵列天线的性能渐渐成了研究的热点。对于相控阵雷达而言, 面对复杂的电磁环境与杂波干扰, 如何在特定杂波来向上进行抑制, 或者对波形进行展宽成为决定相控阵雷达性能的关键。中国气象科学研究院在2007年和2014年分别与中电集团南京十四所和安徽四创电子合作开发了两部用于天气探测的相控阵天气雷达, 这两部雷达便利用波束形成生成了赋形宽波束, 并将其用于单发多收的扫描模式中。相关研究表明, 赋形波束能显著提高探测所需时间^[1-2]。

由于相控阵天线与传统的抛物面天线有着本质的不同, 这便造成了诸多问题, 例如阵列的耦合作用所造成的误差。杨金红、张志强等^[3-4]对因阵列耦合而产生误差进行分析。吴翀等^[5]对不同扫描模式产生的误差进行了订正。传统的赋形波束加权方式, 例如泰勒加权、海明加权, 通过数学解析的方法在抑制雷达旁瓣上具有良好的效果, 但是无法解决随机方向上的杂波, 更无法起到波束展宽生成宽波束的作用。粒子群算法作为智能算法的一种, 可以按照一定需求得到优

化的工程解。粒子群算法在优化远场方向图方面同样具有一定优势。通过对基于粒子群算法的波束形成所生成的波束效果进行分析, 进而对粒子群算法不同加权方式的优缺点进行评价, 以便更好应用粒子群算法优化远场方向图。

1 相控阵天线

1.1 相控阵天线原理

相控阵雷达与其他雷达相比, 其主要差异在于相控阵天线。相控阵雷达采取阵列天线, 将多个天线单元按一定规则排布, 通过对每一个天线单元的幅度、相位进行控制以控制雷达波束的方向性。若假定组成侧射阵列的天线单元之间完全相同, 则由 M 个幅度 a_m 、相位 Θ_m 的点阵元在方向 θ 处的相干叠加信号的电压公式为^[6]

$$AF = \sum_{m=1}^M a_m e^{j\Theta_m} e^{j\frac{2\pi}{\lambda} x_m \sin\theta} \quad (1)$$

式中: AF 为阵因子。

当 $\Theta_m = -\frac{2\pi}{\lambda} x_m \sin\theta_0$ 时, 则 AF 在 θ_0 方位上去最大值, 式(1)可表示为

$$AF = \sum_{m=1}^M a_m e^{j(\frac{2\pi}{\lambda} x_m \sin\theta - \frac{2\pi}{\lambda} x_m \sin\theta_0)} \quad (2)$$

式(2)的意义在于, 通过控制每个阵元的相位变化, 即可达到雷达波束定向扫描的功能。在实际应用中, $\frac{2\pi}{\lambda} x_m \sin\theta_0$ 项作为控制相位的变化的关键项, 常被

作为相位编码项^[7]。同时,有阵面扫描角度的变化,将使雷达阵面产生耦合作用,影响相控阵的一系列参数。故此,在实际建模过程中,阵因子乘以余弦函数进行修正。

1.2 相控阵天线方向图关键参数

1.2.1 波瓣宽度

波瓣宽度是天线方向图的重要参数,也称主波束宽度、半功率波数宽度,是指主波束最大值下降至两个半功率点之间的夹角大小。不同雷达所要求的波瓣宽度不同,且同一雷达在收发两个过程中的波瓣宽度也可不同。

对于一维线性侧射阵而言,波瓣宽度 θ_{BW} 可近似的表示为^[8]

$$\theta_{BW} = 0.886 \frac{\lambda}{L} \quad (3)$$

其中当阵元均匀分布时

$$L = Nd \quad (4)$$

式中: λ 为波长; L 为阵列孔径尺寸; N 为阵列阵元数; d 为阵元间距。

同时,由于互耦效应的存在,使得阵列孔径尺寸会在主波束指向方向上的等效投影尺寸减小,进而波瓣宽度会因扫描角度的增大而增大,在影响切向分辨率的同时造成能量的分散而影响增益,故此在实际应用中需进行考虑。

对于相控阵技术而言,除了用波瓣宽度衡量最小可分辨波达方向外,其分辨率存在极限值,称为瑞利限。瑞利限的概念来自于光学系统的瑞利准则,而阵列信号同样也遵循了这一原理。瑞利限的公式为^[9]

$$\beta \cong \frac{k\lambda}{L}, \quad 1 \leq k \leq 2 \quad (5)$$

式中 β 为角分辨能力。

瑞利限的意义在于,对于阵列而言通过波束形成技术所能得到的角分辨率存在极限,且角分辨能力必然小于波瓣宽度。由此所带来的相控阵雷达的回波平滑效应不可避免,故此在分析雷达实际数据时需要做出一定的考量。

1.2.2 旁瓣

在天线方向图中,除主波束外的其余辐射瓣统称为旁瓣或副瓣。由于旁瓣会向空中辐射能量,故此在雷达探测中需要限定旁瓣的相对增益。实际上旁瓣电平并非雷达的直接参数,而是作为雷达在复杂电磁环境下重要度量。

在多种限制旁瓣的方法中,以泰勒加权最为有效。泰勒加权通过对阵元的激励幅度进行适当的调整即可

获得低旁瓣的远场方向图。具体泰勒加权的阵列口径分布为^[10]

$$f(p) = 1 + 2 \sum_{m=1}^{\bar{n}} S(m) \quad (6)$$

$$p = \begin{cases} \frac{2\pi n}{N-1} & N \text{ 为奇数} \\ \frac{2\pi n + 1}{N-1} & N \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (7)$$

$$S(m) = J \prod_{n=1}^{\bar{n}-1} \left\{ 1 - \frac{m^2}{\delta^2 \left[A^2 + \left(n - \frac{1}{2} \right)^2 \right]} \right\} \quad (8)$$

其中

$$J = \frac{(\bar{n} - 1)^2}{(\bar{n} - 1 + m)! (\bar{n} - 1 - m)!} \quad (9)$$

式中: \bar{n} 为主瓣一侧的等副瓣数; A 由可变化控制副瓣电平参数 R_0 确定。

需要注意的是,任何加权方式都是以损失孔径效率为代价的,过低的孔径效率将限制雷达天线的增益进而影响探测距离。同时,加权同样会引起波束宽度的增大,但是在一定范围内这种增大造成的影响远远小于过高的旁瓣所带来的影响。

表 1 不同抑制能力下的波束宽度变化

抑制能力	未加权	20 dB 抑制 加权	25 dB 抑制 加权	30 dB 抑制 加权
阵元数 8	12.66°	13.8°	14.9°	15.9°
阵元数 16	6.36°	6.95°	7.5°	8°
阵元数 32	3.2°	3.5°	3.75°	4.05°

1.2.3 栅瓣

由于式(2)为周期函数,当阵元间距 d 大于半波长时,将会在主波束以外位置产生与主波束辐射能力相似的波瓣,称为栅瓣。阵列主波束位置 θ_0 时,栅瓣产生位置 θ_{GL} 的具体公式为^[6]

$$\sin \theta_{GL} = \sin \theta_0 \mp P \frac{\lambda}{d}, \quad P = 1, 2, 3, \dots \quad (9)$$

虽然在阵元数目一定的情况下加大阵元间距可有效减小波束宽度,使雷达的切向分辨率更高,但是对于接收过程而言,栅瓣的存在会稀释主瓣的辐射能量,从而导致天线的接收增益降低,乃至引入大量误差量。因此对于相控阵雷达天线的设计而言,必须采用合理的阵元间距以避免栅瓣的产生。通常,阵元间距取半波长。

1.2.4 方向性系数

雷达增益是雷达设计中重要的参数。由于相控阵雷达天线不同于传统的抛物面天线,其增益计算复杂,故此引入表征天线辐射功率集中程度的参数,称为方向性系数。其定义为在辐射功率相同的情况下,主瓣

最大方向上的功率密度与全空间的平均功率密度之比^[11-12]。若天线单元为无方向性的理想点源以半波长均匀排列且最大值方向相同,则方向系数 D 为

$$D = \frac{\left| \sum_{m=0}^{M-1} a_m \right|^2}{\sum_{m=0}^{M-1} |a_m|^2}$$

(10)

方向性系数虽然与雷达增益相差一个辐射效率系数(一般为 $0.4 \sim 0.8$)^[13],但是由于方向性系数容易获得,故此在相控阵雷达的研究上是一重要参量。

2 粒子群算法

2.1 粒子群算法原理

粒子群算法源于复杂适应系统。核心思想是基于概率,随机搜索全局空间。相对于遗传算法的“交叉”、“变异”,粒子群算法规则简单,通过模仿鸟群和鱼群的觅食行为,将每一个粒子置于一个变量空间中,通过粒子间的相互吸引以得到优化解。

通常,定义在由 N 个变量组成的 N 维空间中,粒子数 n 的粒子集合以一定评价规则得到的适应值来衡量粒子所处空间位置的有效性。通过记忆粒子自身的历史最优位置与全体粒子集合的全局最优位置,粒子将按照特定的位置速度更新公式在限定的区域内随机震荡直至粒子位置逐渐稳定,适应值将趋于收敛。粒子集合中的某一粒子在第 $k+1$ 次迭代中的位置速度更新公式如下^[14]

$$v_{id}^{k+1} = w v_{id}^k + c_1 \xi (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 \eta (p_{gd}^k - x_{id}^k)$$

$d = 1, \dots, N$

其中

(11)

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + r v_{id}^{k+1}$$

式中: w 为惯性权重; c_1 为粒子历史最优位置权重系数; c_2 为全局最优位置权重系数; ξ 和 η 为 $[0,1]$ 区间内均匀分布的随机数; r 为约束因子。

(12)

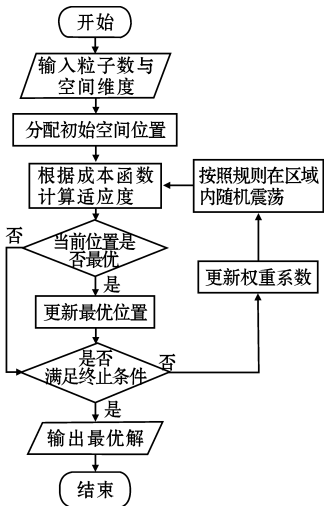


图1 粒子群算法流程图

2.2 算法实现

对于粒子群算法而言,成本函数的选择决定了整体的优化效果。对于波束形成而言,通常的评价规则包括:最大信噪比准则、最大似然比准则和线性约束最小方差准则。

表2 3种波束形成准则比较^[15]

最小均方误差准则		最大信噪比准则	线性约束最小方差准则
准则	使阵列输出与某期望相应的均方差最小	使期望信号分量功率与噪声分量功率之比最大	在某种约束条件下使阵列输出方差最小
代价函数	$J(w) = E[w^H x(k) - d(k) ^2]$ $d(k)$:期望信号	$J(w) = \frac{w^H R_s w}{w^H R_n w}$ R_s :阵列噪声相关矩阵 R_n :阵列信号相关矩阵	$J(w) = w^H R w$ 约束条件: $w^H a(\theta) = f$
优点	不需要波达方向的信息	信噪比最大	广义约束
缺点	产生干扰信号	必须知道噪声的统计量和期望信号的波达方向	必须知道期望分量的波达方向

其中,最小均方误差准则代价函数简单,在不知道波达方向信息的情况下,适合在粒子群算法中作为用以约束远场方向图的适应规则。在此,将均方差称为成本,且成本越小视为适应值越高。故此,适应规则为

成本 = $\sum | \text{幅度} - \text{限制} |^2$ (13)

式(13)作为数学统计量之外,还具有一定的物理意义,其代表了生成波束与理想波形的功率偏差。

同时,由于对于已经设计好的阵列天线而言,可控量为每个阵元的相位与幅度,则粒子群算法的空间维度为2。初始随即点均匀分布,且终止条件为进行一万次迭代。其余参数依照粒子群算法规则,在进行运算后即可输出每个阵元的幅度或相位优化解。

2.3 变量空间

对于波束形成而言,可按照加权方式的不同分为

3 种基础加权形式,即幅度加权、相位加权、密度加权,除此之外还有将 3 种基础加权形式互相组合的混合加权。

幅度与相位加权,顾名思义是通过对于组成天线阵列的阵元的幅度与相位进行一定方式的调整,进而影响整个阵列的远场方向图主瓣与旁瓣。密度加权较为特殊,是一种按照一定方式非均匀排列阵列的阵元间距。较为简单的做法是在阵列中心位置阵元间距较小,随着阵元不断远离阵列中心,阵元间距逐渐增大。然而这种加权方式一旦在设计之初确定,之后便难以更改,灵活度较差,故此混对于合加权方式而言多采用幅、相混合的加权形式。

所以除混合加权外,粒子群的运算空间为一维,变量为幅度或相位。幅、相混合加权为二维运算空间。由于混合加权维度提升到了二维,获得优化解所需的迭代次数也将增加,需要权衡收敛速度与优化结果。

3 波束形成效果分析

3.1 优化解与解析解的一致性

为验证粒子群算法在波束优化方面的有效性,则以泰勒加权为标准最优解,参照泰勒加权后的方向图设定旁瓣上下限。

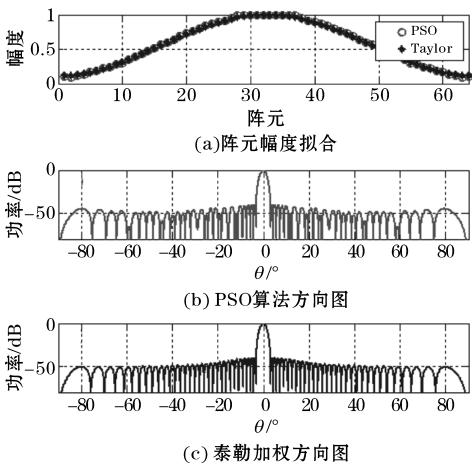


图 2 粒子群算法拟合

由图 2 可见,在同样旁瓣需求下,依靠粒子群算法得出的优化波束方向图与泰勒加权优化方向图相近,且得出的各个阵元加权系数近似一致。在阵元幅度方面,加权系数误差均值 0.0038;方向图误差平均 0.0081,同时主瓣性能一致,靠近主瓣区域的旁瓣限制相当。

这表明应用粒子群算法的方向图优化在得到最优方向图方面具有实际意义,可通过不断的迭代得到近

似于解析解的优化解决。故此,粒子群算法在方向图优化中具有应用空间,对粒子群算法的性能研究也十分有意义。

3.2 零陷生成能力

零陷在雷达、通讯领域有着广泛的作用。可以在特定方向上避免噪声和杂波的干扰,从而优化天线接收到的信号,实现空域滤波效果。故此,对于指定方向存在零陷的方向图优化是十分必要的。

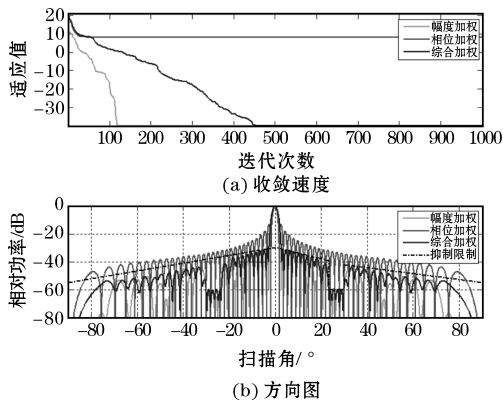


图 3 零陷方向图

图 3 分别为幅度加权、相位加权与幅相混合加权在生成零陷时的对比图。经过对比分析,可得出如下结论:

- (1) 相位加权在零陷方面,加权能力较弱,无法生成需要的方向图,且旁瓣难以抑制。
- (2) 幅度加权的收敛速度相较于幅、相加权而言更快,且性能较为优秀,主瓣增益经过计算为 31.89 dB。
- (3) 综合加权相较于其他两种加权方式而言收敛速度都是最慢的。这种现象可解释为由于变量的增加导致了粒子所需遍历的空间由一维扩展到了二维,进而导致了收敛速度的减慢。同时主瓣增益由于相位变化导致阵元在远场的最大值叠加不一致进而产生偏差,具体增益为 31.65 dB,较大幅度加权有所下降。

从结论中可以看出,在面对复杂电磁环境需要对指定方向进行方向图的零陷处理时,由于其处理的应用场合多为现场随机自适应化应用,故此对于算法的收敛速度要求高,需要快速收敛以响应系统需求。针对这些要求,幅度加权方式可在较快的收敛速度下完成零陷的生成且性能优秀,而幅、相混合加权虽然方向图波形效果贴合度高,但是收敛速度过慢,难以适应雷达需求。

3.3 宽波束生成能力

宽波束生成对于气象探测和军事雷达警戒都具有

特殊的意义,而经典的基于增加天线口径照射函数的平方相位方法,由于不能兼顾旁瓣和成倍展宽主波束而有着较多的局限性。针对宽波束生成能力进行讨论是十分有必要的。

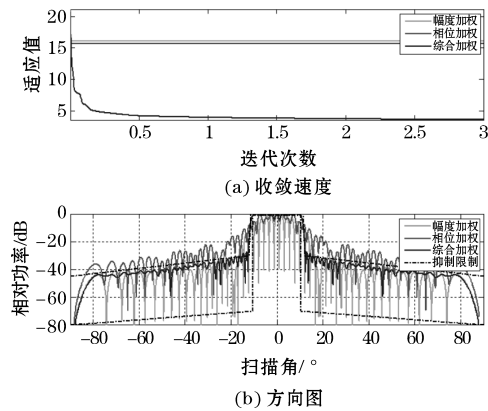


图4 宽波束方向图

图4以64阵元一维侧射阵为例,用3种的加权方式优化生成21.5°宽波束远场方向图。在宽波束生成中,相位加权依然表现较差,具体表现为在主瓣中波动较大和旁瓣抑制失效。而对于幅度加权,在宽波束生成中,出现了顶部不平坦,通过多个高增益副瓣拟合主瓣以换取拟合效果,且在规定方向上存在大量增益低于-20 dB的裂缝。同时,在靠近拟合主瓣区的旁瓣衰减速度慢。

综合加权虽然在接近1.5万次迭代后才接近收敛,但是其形成的波束顶部平坦,明显优于其他两者加权方式,旁瓣符合抑制要求。主瓣顶部波动峰值不超过1 dB,同时主瓣衰减速度为18.6 dB/度。由于应用场合的特殊,多为出厂时便设定好的警戒扫描模式,所以其收敛速度的劣势可以通过在设计时提前将优化方案存储于数字波束形成控制模块的内存中进行切换。

有趣的是依照常理而言,混合加权由于存在相位变化必然将导致阵元最大值叠加不一致,从而减小天线增益。但是通过多次实验,混合加权的增益并不总小于幅度加权增益,很多时候两者是近似的,有时甚至可以超过幅度加权。对此现象的解释:由于幅度加权为了更好地符合给定的理想方向图,使阵列中的一部分阵元辐射效率很低以便在细节处贴合给定理想方向图。而混合加权可以通过相位的调整使无须存在低辐射效率阵元进行方向图细节的修正。故此,在实际运算结果上而言,两者的增益差距并没有想象中那么大。

需要注意的是,由于粒子群算法自身存在固有“早熟”缺陷,导致在单次运行中粒子群陷入局部最优解附近进而失去空间遍历能力,导致结果不佳。故此在不要求快速得出结果的情况下,建议在设计时需要

多次重复运行优化算法以使初始粒子可随机分布于更多的空间组合中使优化效果具有代表性。在众多的优化解中选取最为优秀的解。

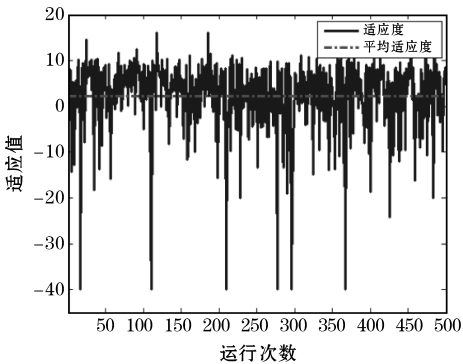


图5 重复试验的适应度变换情况

3.4 阵元误差

在现实中,阵元的实际工作状态会与设计要求产生误差,而这种难以避免的误差会给方向图带来一定影响。

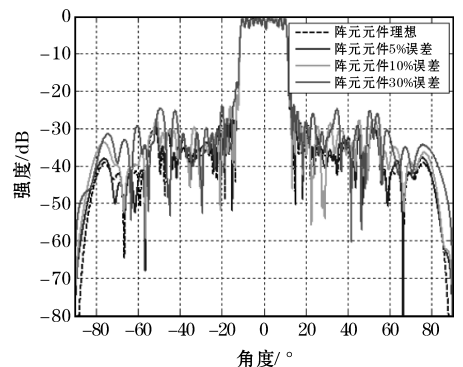


图6 阵元误差影响

图6为因阵元限幅器产生误差所导致的方向图变化。从图中可以明显地发现随着阵元误差程度的增高,方向图的变化愈加明显,主要体现在主波束顶部抖动轻微增加,旁瓣抑制能力显著减弱,在旁瓣产生部分窄而高的旁瓣信号。

表3 阵元误差影响

	阵元5%误差	阵元10%误差	阵元30%误差
平均误差	1.36	3.41	5.92
均方误差	36	47	89

由于误差的产生会抬高旁瓣,故此在最初设计阶段应对于阵元器件进行误差预计,根据预计值设计旁瓣抑制大小,从而使得阵列天线在存在误差情况下依然可以正常工作。需要注意的是,由于此处误差分析具有随机性,过高的误差在对主波束造成影响的同时

更为致命的是抬高了旁瓣,而过高的旁瓣将造成接收信号信噪比的直线下降,影响雷达探测的潜在精度并对后续的阵列信号处理、来波方向估计造成极大的困难。故此对于误差的控制需要引起足够的重视。

4 结束语

通过进行建模与仿真,对于粒子群优化算法在雷达方向图优化性能方面进行了讨论与初步分析,得到结论如下:

(1)粒子群算法在对于复杂电磁环境下生成存在某一方向零陷的方向图时,幅度加权方式比相位加权和幅、相混合加权更为有效、快速,能在保证方向图优化效果的同时快速收敛。

(2)相位加权方式对于方向图优化作用有限,不适单独使用。

(3)幅、相混合加权收敛速度较慢,需要更多的迭代次数。但是对于宽波束方向图优化方面比其他两种加权方式更加有效,同时建议多次运行以克服粒子群算法的固有缺陷得到最优的优化解。

(4)由于实际工作中阵元无法避免的存在误差,所以在方向图优化前应对阵元元件做出适当的预估,通过预估值对方向图优化的旁瓣抑制进行设计,但这不意味对于元件误差的控制不重要,随机的误差将有可能引发严重的设计缺陷。

虽然相控阵技术已经逐渐成了雷达发展的趋势,但是由于研究较少,且技术难度较高,需要进一步针对特定应用进行定向分析与讨论。通过对粒子群优化算法在方向图优化方面的讨论,初步得出了针对不同优化场合所应采用的优化方式,并对优化过程提出了建议,同时为相控阵雷达的设计与应用提供参考。

参考文献:

- [1] 吴肿,刘黎平,张志强. S波段相控阵天气雷达与新一代多普勒天气雷达定量对比方法及其初步应用[J]. 气象学报,2014,72(2):390-401.
- [2] 刘黎平,吴肿,汪旭东,等. X波段一维扫描有源相控阵天气雷达测试定标方法[J]. 应用气象学报,2015,26(2):129-140.
- [3] 杨金红,高玉春,程明虎,等. 相控阵雷达波束特性[J]. 应用气象学报,2009,20(1):119-123.
- [4] 张志强. 相控阵天气雷达强度探测与评估方法研究[M]. 北京:中国科学院研究生院,2011:38-39.
- [5] 吴肿,刘黎平,汪东旭. 相控阵雷达扫描方式对回波强度测量的影响[J]. 应用气象学报,2014,25(4):406-414.
- [6] Brown A D. 电扫阵列——MATLAB 建模与仿真[M]. 汪连栋,孔德培,乔会东,等译. 北京:国防工业出版社,2014:4.
- [7] 林桂道. 现代相控阵系统的波束控制设计分析[J]. 舰船科学技术,2007,29(3):74-78.
- [8] 张光义. 相控阵雷达原理[M]. 北京:国防工业出版社,2009:183.
- [9] 张小飞,汪飞,陈伟华. 阵列信号处理的理论与应用(第二版)[M]. 北京:国防工业出版社,2013:4.
- [10] 马星星,何正耀,马葱葱. 基于 DDS 和 Taylor 加权发射波束形成研究[J]. 压电与声光,2015,37(1):46-49.
- [11] 王建,郑一农,何子达. 阵列天线理论与工程应用[M]. 北京:电子工业出版社,2015:15.
- [12] Robert J, Mailloux. 相控阵天线手册(第二版)[M]. 南京电子技术研究所译. 北京:电子工业出版社,2007:55.
- [13] 张阳,李晓燕,郭金良. 一种简化的相控阵雷达威力范围可视化方法[J]. 船舶电子工程,2014,34(4):76-80.
- [14] 杨维,李歧强. 粒子群优化算法综述[J]. 中国工程科学,2004,6(5):87-94.
- [15] 张小飞,陈华伟,仇小锋,等. 阵列信号处理及 MATLAB 实现[M]. 北京:北京工业出版社,2015:54.

The Effect of Particle Swarm Optimization for Beam-forming

TENG Yu-peng^{1,2}, SHI Zhao¹, QUAN Yu³, WANG Han^{1,4}

(1. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Meteorological Observation Centre of CMA, Beijing 100081, China; 3. Ordos Meteorological Service, Ordos 017000, China; 4. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: One of the advantages of phased array radar is that any shape of far field radiation pattern can be obtained the-

oretically by weighting the array element according to certain amplitude, phase, or distance. However, due to the interactions between the parameters, distribution character is more complex, these limit the performance of phased array radar. Represented by particle swarm optimization algorithm of intelligent algorithm solve the problem that mathematical derivation can't be use to weighted items distribution in particular occasions. The effect on the particle swarm algorithm in beam-forming and different weighted forms of PSO is analyzed by simulation in this article. At the same time, the design suggestions are put forward. The simulation experiment results show that the phase weighted algorithm based on particle swarm optimization can't apply to pattern optimization independently. The amplitude weighted algorithm accelerates the rate of convergence, with better performance in optimization, suitable for self-adaption applications. The mixing weighted algorithm of amplitude and phrase has better performance on shaping the wide beam but with a slow rate of convergence.

Key words: meteorological sounding techniques; atmospheric remote sensing; phased array radar; particle swarm optimization; array antenna; radiation pattern