

对流层散射无源监视系统最优布局方法*

刘赞^{1,2}, 刘晓鹏³, 陈西宏¹, 谢泽东⁴, 刘强¹

(1. 空军工程大学 防空反导学院, 陕西 西安 710051; 2. 中国人民解放军 93567 部队, 河北 保定 071000;
3. 中国人民解放军 93448 部队, 天津 300270; 4. 中国人民解放军 93436 部队, 北京 101100)

摘要:为提高对流层散射无源监视系统对辐射源的定位精度,利用改进粒子群优化算法对分布式监视节点进行最优布局设计。推导了基于电磁波方位到达角定位机制下的几何精度因子。在改进粒子群优化算法中,采用混沌理论初始化所有粒子的初始参数;通过自适应变化的惯性权重和学习因子来提高算法寻优能力;为防止粒子陷入局部最优,利用双子群机制进行寻优,并在两子群之间进行交叉变异操作,以增加粒子的多样性。仿真结果表明:相对于几种常规的布站方式,所提算法能够明显提高监视系统对辐射源的定位精度,运行时间较遍历寻优算法有所减少。

关键词:无源监视系统;对流层散射;几何精度因子;粒子群优化

中图分类号:TN966 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2021)01-103-06

Optimal arrangement for passive troposcatter surveillance system

LIU Zan^{1,2}, LIU Xiaopeng³, CHEN Xihong¹, XIE Zedong⁴, LIU Qiang¹

(1. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;
2. The PLA Unit 93567, Baoding 071000, China; 3. The PLA Unit 93448, Tianjin 300270, China;
4. The PLA Unit 93436, Beijing 101100, China)

Abstract: To improve the localization accuracy of angle of arrival in passive troposcatter surveillance system, an improved particle swarm optimization was employed to arrange distributed nodes. Geometry dilution of precision was deduced and treated as the evaluation index. Chaos theory was adopted to modulate the position parameters for particle swarm optimization. Adaptive inertia weigh and learning factors were introduced to improve the optimization ability. In order to avoid getting stuck at local optimization and enhance the global exploration ability, swarm optimization based on two subgroups was adopted. The crossover operation and mutation operation were carried out based on two subgroups as well. Simulation results demonstrate that the proposed algorithm can obviously improve the location performance of passive troposcatter surveillance system, and the operating time is less than that of the traversal optimization.

Keywords: passive surveillance system; troposcatter; geometry dilution of precision; particle swarm optimization

大气层底部分布着大量随机运动的散射体,包括云团边缘、空气漩涡、大气渐变层等。对流层散射是指,微波段的电磁波经过散射体的散射或反射作用而形成的超视距传播。其链路单跳跨距大、不受核爆以及电离层活动的影响^[1-3]。因为此独特的优势,对流层散射广泛应用于通信领域,用于保障战时或平时的数据可靠传输。类似于散射通信链路,敌方辐射源辐射的电磁波亦能通过散射体形成超视距传播,被我方无源监视系统所接收。对流层散射无源监视系统就是利用上述散射信号对辐射源进行定位。无源监视系统不主动发射电磁波,而是被动地接收目标辐射的信号,因

此具备隐蔽性强、不易受反辐射导弹攻击的优点^[4-6]。我国拥有广阔的陆地和海洋,地形地貌复杂多变,因此对流层散射无源监视系统具有广阔的应用前景。

文献[4]考虑到目标辐射源先验信息未知场景,提出了一种基于能量检测的信号感知算法。文献[5]研究了对流层散射衰落特性对阵列天线的影响,分析了无源监视系统检测信号的性能。文献[6]建立了时变的对流层散射传播损耗模型,研究了无源监视系统探测范围的变化规律,为监视站选址提供了一定的参考。然而该文献在分析探测范围时,仅以单个节点为基础,并未涉及多

* 收稿日期:2019-07-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61671468,61701525)

作者简介:刘赞(1990—),男,河北保定人,博士研究生,E-mail:13259463725@163.com;

陈西宏(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:zhchen0315217@163.com

站协同探测的情况。优化布局方式是提高多站协同探测精度的一种有效手段。近年来,国内外学者对多站协同探测的布局问题进行了深入研究。文献[7]研究了基于到达时间(Time Of Arrival, TOA)分布式声源定位系统的定位精度,并以平均克拉美罗下界(Cramer Rao Lower Bound, CRLB)为准则,利用遗传算法优化了节点布局。文献[8]也以分布式声源定位系统为对象,研究了多种不同体制的定位原理,并对误差进行了分析。

为提高分布式对流层散射无源监视系统的定位精度,本文主要研究分布式多节点的最优布站问题。首先,对基于到达角(Angle Of Arrival, AOA)的定位机制进行了分析,推导了几何精度因子(Geometry Dilution Of Precision, GDOP);然后,以 GDOP 为评价指标,利用粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法对分布式监视站的节点布局进行优化;最后,对本文提出的布站方案进行仿真验证。为克服 PSO 对初始值的敏感,本文引入混沌理论对粒子的初始位置进行赋值。针对 PSO 易陷入局部最优的问题,引入双子群机制提高算法的搜索能力,同时受遗传算法启发,两子群之间进行交叉变异产生第三个子群,三子群之间进行相互比较,从而进一步提高 PSO 的空间搜索性能。

1 对流层散射无源监视系统

如图 1 所示,由于散射体的存在,对流层散射信道可实现电磁波的超视距传播。敌方辐射源在工作过程中,由于散射体的散射作用,我方无源监视系统可接收到辐射源的部分电磁波。在此过程中,只有小部分电磁波经散射到达监视站,因此监视系统必须具备高灵敏度的接收机和大增益的天线。监视系统通过分析接收到的信号,可对目标辐射源进行有效定位。

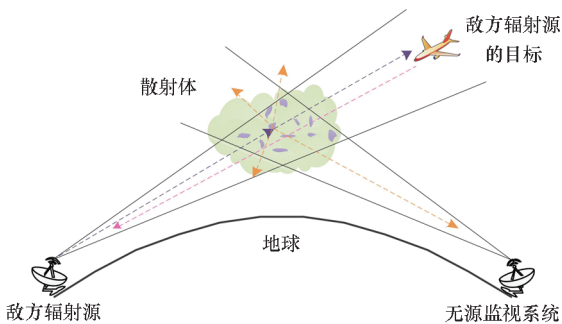


图 1 对流层无源监视示意图

Fig. 1 Passive troposcatter surveillance system

目前常用的定位算法依赖于电磁波的 AOA、

TOA、接收信号强度(Received Signal Strength, RSS)等。文献[9]中利用射线跟踪法对散射链路的路径以及俯仰角进行研究,结果表明:对流层折射率能够给散射的电磁波带来不可忽视的影响。同时,散射链路并非直线传播,散射过程极其复杂,散射点高度以及散射路径长度计算困难,而监视目标又属于非合作式辐射源,因此,基于 TOA 以及 RSS 的位置解算方法失效。仅依赖电波到达方位角亦能对目标进行有效定位。以三个监视站为例,用 φ 表示电磁波的方位角, θ 表示电磁波的俯仰角,二者均可通过一定算法得到,图 2 为几何结构图。

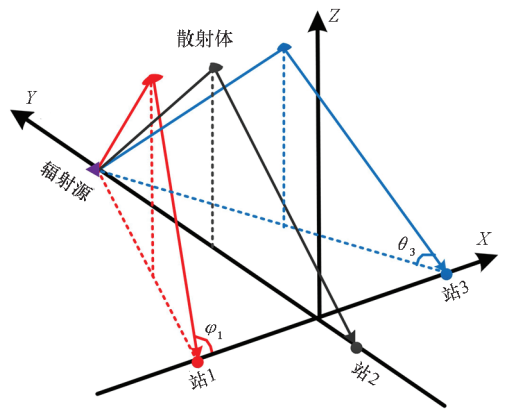


图 2 定位算法原理

Fig. 2 Diagram of location algorithm

根据图 2 给出的几何关系,结合目标辐射源的坐标 (x, y, z) ,监视节点的坐标 (x_i, y_i, z_i) 以及电波到达方位角 φ ,可得:

$$\varphi_i = \arctan \frac{\sqrt{(z - z_i)^2 + (y - y_i)^2}}{x - x_i}, i = 1, 2, 3 \tag{1}$$

式(1)含有 3 个未知参数,因此,至少需要 3 个方程才能有效定位辐射源。在实际应用中,为提高定位精度、监视范围以及获取数据的可靠性,节点数往往多于 3 个。而分布式节点的布站方式不同,最终的定位结果差异也较大。假设有 M 个节点,将式(1)推广为:

$$\begin{aligned} x^2 \tan \varphi_i - y^2 - z^2 - 2xx_i \tan^2 \varphi_i + 2yy_i + \\ 2zz_i + x_i^2 \tan^2 \varphi_i - y_i^2 - z_i^2 = 0, i = 1, 2, \dots, M \end{aligned} \tag{2}$$

方位角 φ 主要由目标辐射源以及监视节点坐标所决定,可将方位角的微分进一步表示为:

$$\begin{aligned} \delta \varphi_i = \frac{\partial \varphi_i}{\partial x} \delta x + \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_i} \delta x_i + \frac{\partial \varphi_i}{\partial y} \delta y + \\ \frac{\partial \varphi_i}{\partial y_i} \delta y_i + \frac{\partial \varphi_i}{\partial z} \delta z + \frac{\partial \varphi_i}{\partial z_i} \delta z_i \end{aligned} \tag{3}$$

可用矩阵将式(3)表示为 $\delta \varphi = C \delta X + \delta X_s$,其

中, $\delta X = [\delta x, \delta y, \delta z]^T$, $\delta \varphi = [\delta \varphi_1, \delta \varphi_2, \dots, \delta \varphi_M]^T$, 矩阵 C 和 δX_s 可分别表示为:

$$C = \begin{bmatrix} \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} & \frac{\partial \varphi_1}{\partial y} & \frac{\partial \varphi_1}{\partial z} \\ \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} & \frac{\partial \varphi_2}{\partial y} & \frac{\partial \varphi_2}{\partial z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \varphi_M}{\partial x} & \frac{\partial \varphi_M}{\partial y} & \frac{\partial \varphi_M}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\delta X_s = \begin{bmatrix} \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_1} \delta x_1 + \frac{\partial \varphi_1}{\partial y_1} \delta y_1 + \frac{\partial \varphi_1}{\partial z_1} \delta z_1 \\ \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_2} \delta x_2 + \frac{\partial \varphi_1}{\partial y_2} \delta y_2 + \frac{\partial \varphi_1}{\partial z_2} \delta z_2 \\ \vdots \\ \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_M} \delta x_M + \frac{\partial \varphi_1}{\partial y_M} \delta y_M + \frac{\partial \varphi_1}{\partial z_M} \delta z_M \end{bmatrix} \quad (5)$$

考虑到矩阵 C 不可逆, 因此, 利用 $C^T C$ 对 $\delta \varphi = C \delta X + \delta X_s$ 变形, 可将 δX 表示为:

$$\delta X = (C^T C)^{-1} (C^T \delta \varphi - C^T \delta X_s) \quad (6)$$

令 $r_i = [(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2]^{\frac{1}{2}}$, 结合式(1)给出的几何关系, 可得:

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi_i}{\partial x} = -\frac{\partial \varphi_i}{\partial x_i} = \frac{\sqrt{(y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}}{r_i^2} \\ \frac{\partial \varphi_i}{\partial y} = -\frac{\partial \varphi_i}{\partial y_i} = \frac{(x - x_i)(y - y_i)}{r_i^2 \sqrt{(y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}} \\ \frac{\partial \varphi_i}{\partial z} = -\frac{\partial \varphi_i}{\partial z_i} = \frac{(x - x_i)(z - z_i)}{r_i^2 \sqrt{(y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}} \end{cases} \quad (7)$$

假设各监视节点方位角测量误差是零均值且互不相关, 各节点的站址误差同样也是零均值且互不相关, 目标定位误差的协方差^[10]可表示为:

$$P_X = E[\delta X(\delta X)^T] \quad (8)$$

定位性能评估指标几何精度因子 $G^{[10-11]}$ 可表示为:

$$G = Tr(P_X) \quad (9)$$

由于散射链路的方向性较强, 对流层散射无源系统的有效监视目标多为地面雷达站、海面舰队等静止或移动速度较慢的辐射源。因此式(7)中的海拔参数 z 项可忽略, 即解算目标位置时, 最少需要两个监视站。为提高对辐射源的定位精度, 可不断改变节点位置, 以得到最低几何精度因子。然而在实际应用过程中, 辐射源位置未知。因此, 假设目标在一区域内等概率出现, 利用改进 PSO 对节点布局进行优化, 得到最小平均几何精度因子对应的节点位置。

2 最优布局方案

2.1 基本 PSO 算法

PSO 作为一种高效寻优算法, 广泛应用于优化领域。PSO 中的粒子所在位置对应一个适应度函数值和待优化问题的解。在迭代过程中, 粒子在寻优区域内不断移动, 并根据适应度函数更新最优解。假设有 m 个粒子在 n 维搜索空间中寻优, 第 i 个粒子的位置为 x_i , 移动速度为 v_i , 经历的最好位置为 $p_b(t)$, 整个群体中所有粒子经历的最优位置为 $g_b(t)$ 。 $t+1$ 次迭代时的速度和位置分别更新为式(10)和式(11)。^[12]

$$v_i(t+1) = \omega \cdot v_i(t) + c_1 \cdot r_1 [p_b(t) - x_i(t)] + c_2 \cdot r_2 [g_b(t) - x_i(t)] \quad (10)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t) \quad (11)$$

式(10)中: r_1 和 r_2 表示 0 到 1 之间的随机数。 ω 表示惯性权重。 c_1 和 c_2 表示学习因子, 一般取 0.5 ~ 2.5; c_1 设置较大, 会使粒子过多地进行局部搜索; c_2 设置较大, 则会使粒子过早收敛到局部最优^[13]。为提高算法的收敛性能, 获得全局最优解, 自适应改变的学习因子可表示为:

$$\begin{cases} c_1 = -2t/t_{\max} + 2.5 \\ c_2 = 2t/t_{\max} + 0.5 \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中, t_{\max} 和 t 分别表示最大和当前寻优代数。同时, 较大的 ω 利于提高全局搜索能力, 较小的 ω 利于增强局部搜索能力。为了能在全局和局部搜索之间取得平衡, 多种自适应变化的权值机制被提出^[14]。根据凹曲线递减策略, 引入一种自适应调节惯性权重的方法, 如式(13)所示。

$$\omega(t) = (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \cdot e^{-(t_{\max}-t)^2} + \omega_{\min} \quad (13)$$

式(13)中, ω_{\min} 和 ω_{\max} 分别表示最大和最小权重。由式(13)可知, 初期较大的 ω 可使得粒子快速定位最优解的范围; 随着迭代的增加, 较小的 ω 可以使得粒子精确找到最优解。由粒子的移动机理可知, 一旦粒子抵达目前的最大极值点(非最优值), 而根据当前速度又无法跳到下一个更大的极值点时, 算法将停止运行, 即算法在搜索过程中可能陷入局部最优值。因此, 需要对算法进行改进。

2.2 改进 PSO 算法

双子群机制能够提高寻优效率, 在一定程度上避免算法陷入局部最优。双子群中存在搜寻方向与主子群相反的辅助子群^[15], 即

$$y_i(t+1) = x_i(t) - v_i(t) \quad (14)$$

每一次迭代中, 将两个子群的局部最优适应

值进行比较,用更优的局部适应值作为主辅子群共同的局部最优。为进一步增加粒子的多样性和分散性,避免陷入局部最优,参考遗传算法中的遗传变异操作^[16],主辅子群在一定概率下进行交叉和变异得到第三个子群,从而打破粒子群的稳定状态,冲出局部最优。交叉操作如式(15)所示。

$$x'_i(t+1) = P_b \cdot x_i(t+1) + (1 - P_b) \cdot y_i(t+1) \tag{15}$$

式(15)中, P_b 为0~1之间的随机数。所有粒子产生变异的概率为 P_m ,则对于选中的 $m \times P_m$ 个粒子进行变异,如式(16)所示。

$$x''_i(t+1) = x'_i(t+1) \cdot (1 - P_m) + x'_i(t+1) \cdot P_m \cdot P_b \tag{16}$$

经过交叉变异操作后,PSO中相当于又多了一个子群 $x''_i(t+1)$,从而3个子群相互比较,进一步更新全局和局部最优值。而后,主辅子群继续按照原方式进行移动。

粒子的初始位置同样影响着寻优结果,混沌序列具有良好的随机性和遍历性,可以初始化粒子的位置。混沌序列的产生原理为:

$$\lambda_{k+1} = 4\lambda_k(1 - \lambda_k), \lambda_k \in (0, 1) \tag{17}$$

式(17)中, $\lambda \notin \{0.25, 0.50, 0.75\}$ 。根据式(17)产生的序列具备随机性与遍历性,从而保证初始粒子分布在整个解空间。所提算法的具体流程如图3所示。

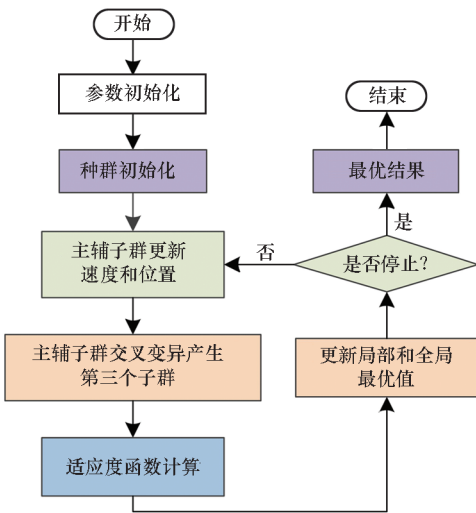


图3 改进 PSO 流程

Fig.3 Process of improved PSO

2.3 基于改进 PSO 的最优布局方案

基于改进 PSO 优化无源监视系统布局方案的流程如下:

步骤 1:参数初始化。初始化 PSO 中一系列参数。

步骤 2:种群初始化。利用混沌理论在布站区域生成粒子位置。

步骤 3:迭代寻优。双子群更新速度和位置等信息,并通过交叉和变异产生第三个子群,通过三子群之间的比较,更新全局和局部最优。

步骤 4:算法终止判定。判断算法是否符合终止条件,如不符合,转到步骤 3。

每个粒子的位置由节点坐标 x, y 组成。在迭代过程中,一旦粒子位置超出无源系统的布站范围,必须采取相应操作。以 x 为例,如果交叉变异产生的子群中 x 超出最大值,则取最大值。如果是主辅子群的 x 超出最大值,不仅要将其最大值赋给主辅子群的 x ,还要将其对应的移动速度取反方向。

在实际应用中,目标辐射源的位置是未知的,为了确保在整个区域内的整体定位性能,所使用的优化准则是:测试区域内的所有可能目标的平均几何精度因子达到最小,即

$$f = \frac{1}{\Omega} \iint_{\Omega} G \, dx dy \tag{18}$$

式(18)中, Ω 为目标可能出现的区域。对式(18)积分比较困难,因此对其离散化处理,即

$$f = \frac{1}{N} \sum_i^N G_i \tag{19}$$

式(19)中, N 为离散后辐射源的数量。

3 算例与结果分析

假设布站区域为边长为 100 km × 100 km 的矩形,目标区域为 200 km × 200 km 的矩形,二者中心相距 300 km,且均对称于 x 轴。对目标区域进行网格均匀化,假设辐射源以等概率出现在各点,各节点接收到的所有辐射源信号的信噪比一致,根据所提的改进 PSO 对节点布局进行优化。测角误差取为 0.5°,各节点的定位误差为 10 m,监视系统的节点数分别取 4 和 7。以取 4 节点时为例,此时 PSO 中粒子的位置可表示为 1×8 向量,即 $[x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_4, y_4]$,移动速度同样也是 1×8 向量。

利用所述的寻优方法得到的最优布局如图 4 所示,该布局方式对应目标区域的平均 GDOP 等高线如图 5 所示。

为进一步表征本文布局方案较部分传统方案的优势,节点的测角和位置误差保持不变,本文所得最优布局同其他布局性能对比如表 1 所示。表 1 中,4 个节点的圆形布局等同于正方形布局,其边长为 30 km;直线布局中的各节点相距 25 km;7 个节点的圆形布局半径取 34 km,各节点

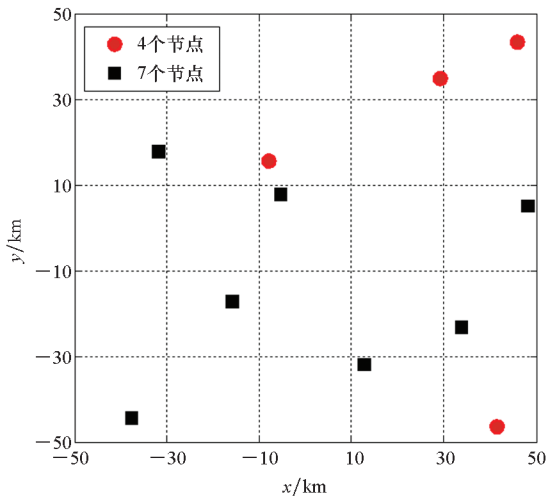


图 4 分布式节点的最优布局

Fig. 4 Optimal placement for distributed nodes

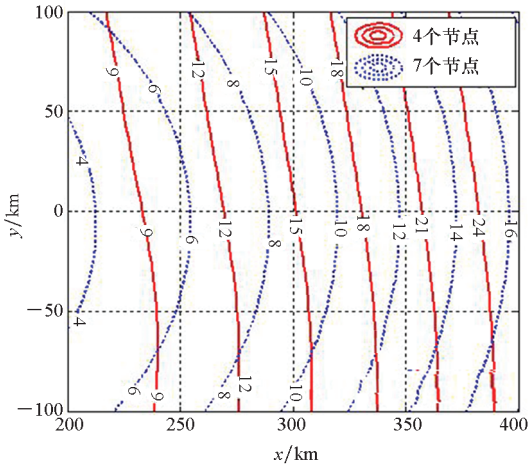


图 5 平均 G 的等高线

Fig. 5 Contour of mean G

均匀分布在圆上;直线布局的各节点相距 10 km。上述所有参考布局的中心均为坐标原点。

表 1 不同布局的性能

Tab. 1 Performance of different placement

节点数	本文方法	圆形布局	直线布局
4	15.524 9	20.45	59.43
7	9.746 5	13.71	52.11

各节点的测角误差分别取 1°和 0.5°,位置误差保持不变。用本文所提方案得到节点最优布局,定位性能同节点数关系如图 6 所示。

分析上述结果,可得出如下结论:

对流层无源散射监视系统仅依靠来波方位角便能定位目标,定位精度随布局方式的改变而发生变化。

本文所提的改进 PSO 能够对拥有不同的节

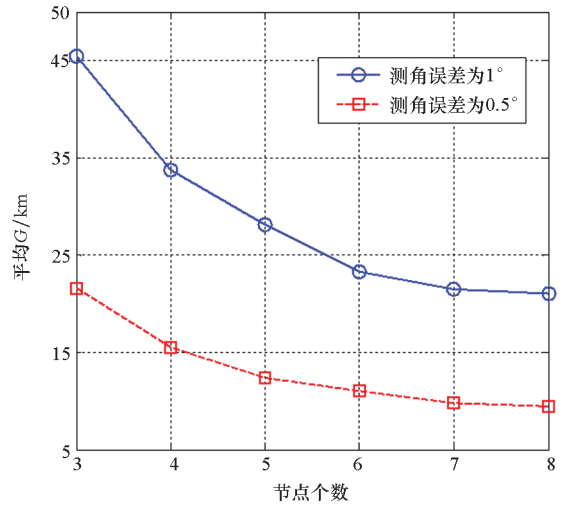


图 6 平均 G 和节点数的关系

Fig. 6 Relationship between the mean G and node numbers

点的对流层无源散射监视系统进行最优布局设计,所得结果优于传统的布局方式。

传统的圆形布局方案优于直线布局方案。测角越精确,定位性能越好。节点数越多,精度越好;但随着节点数持续增加,性能改善程度相对降低,直至变得不明显;当节点数达到 7 时,该现象尤为明显。

遍历寻优同样能够对布局进行优化,然而其计算量十分巨大。以 4 个节点为例,目标区域同上,步长为 5 km,可将目标区域均匀分为 1 600 点,此时的计算次数为 C_{1600}^4 ,计算量十分巨大。而本文所提算法的寻优步长是由大到小时变的,且多个粒子并行移动,搜索范围也随着寻优的进行不断变小,因此其运算复杂度要低于遍历寻优。多次的计算机仿真过程表明:其运行时间约在 10 min,远短于遍历寻优的运行时间。

4 结论

本文主要利用改进 PSO 优化对流层散射无源监视系统的节点布局,推导了基于方位角定位的评价指标。通过对 PSO 中参数以及寻优体制的改进,提高了算法的整体搜索能力。为验证所提方案的性能,考虑了一定区域内目标辐射源等概率出现的情况,仿真结果表明:所提算法能够有效地优化无源监视系统的布局。本文中设置的监视节点位置可任意选择,然而考虑地形、地貌以及地面建筑等因素影响,实际中的节点可能在某些开阔或海拔高的区域重点布置,因此在 PSO 寻优过程中可设置粒子对应的寻优范围,在当前限制范围内找寻最佳值。

参考文献 (References)

- [1] LI C L, CHEN X H, LIU X P. Cognitive tropospheric scatter communication [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 67(2): 1482–1491.
- [2] 刘赞, 陈西宏, 刘进, 等. 对流层散射信道传递时间信号的抖动抑制模型[J]. 国防科技大学学报, 2016, 39(6): 182–186.
LIU Zan, CHEN Xihong, LIU Jin, et al. Jitter mitigation model for time signal transferred via troposcatter[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2016, 39(6): 182–186. (in Chinese)
- [3] GONG S H, YAN D P, WANG X. A novel idea of purposefully affecting radio wave propagation by coherent acoustic source-induced atmospheric refractivity fluctuation [J]. Radio Science, 2016, 50(10): 983–996.
- [4] LIU Z, CHEN X H, LIU Q, et al. A blind signal detection algorithm for passive location system based on troposcatter[J]. International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 2018, 10(10): 1–6.
- [5] LIU Z, CHEN X H, LI C L, et al. Research on detection performance of passive detection system based on troposcatter[J]. AEÜ-International Journal of Electronics and Communications, 2018, 95: 170–176.
- [6] LIU Z, CHEN X H. Prediction on operating range of passive troposcatter detection system [J]. International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 2019, 11(1): 22–26.
- [7] 闫青丽, 陈建峰. 分布式声源定位系统节点最优布局方法及性能研究[J]. 电子学报, 2018, 46(5): 1186–1193.
YAN Qingli, CHEN Jianfeng. Node placement optimization for distributed acoustic source localization system and performance study [J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(5): 1186–1193. (in Chinese)
- [8] SARIC Z M, KUKOLJ D D, TESLIC N D. Acoustic source localization in wireless sensor network[J]. Circuits, Systems and Signal Processing, 2010, 29(5): 837–856.
- [9] LIU Z, CHEN X H, LIU J, et al. Method for estimating tropospheric bias in passive detection system[J]. IET Journal of Engineering, 2018, 2018(6): 332–335.
- [10] 胡超, 王潜心, 王中元, 等. 一种基于观测方程 GDOP 值的优化选站模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(6): 838–844.
HU Chao, WANG Qianxin, WANG Zhongyuan, et al. An optimal stations selected model based on the GDOP value of observation equation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(6): 838–844. (in Chinese)
- [11] WANG B C, HE Y, WANG G H, et al. Optimal allocation of multi-sensor passive localization [J]. Science China (Information Sciences), 2010, 53(12): 2514–2526.
- [12] 刘继业, 陈西宏, 刘强, 等. 基于改进粒子群优化 LS-SVM 的卫星钟差预报研究 [J]. 宇航学报, 2013, 34(11): 1509–1515.
LIU Jiye, CHEN Xihong, LIU Qiang, et al. LS-SVM based on improved PSO for prediction of satellite clock error[J]. Journal of Astronautics, 2013, 34(11): 1509–1515. (in Chinese)
- [13] 张浩为, 谢军伟, 张昭建, 等. 基于混合遗传-粒子群算法的相控阵雷达调度方法[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(9): 1987–1991.
ZHANG Haowei, XIE Junwei, ZHANG Zhaojian, et al. Scheduling based on the hybrid genetic particle swarm algorithm for the phased array radar[J]. Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(9): 1987–1991. (in Chinese)
- [14] LIU Z, CHEN X H, LIU J, et al. High precision clock bias prediction model in clock synchronization system [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016, 2016(11): 1–6.
- [15] 李成龙, 陈西宏, 刘继业, 等. 利用自适应 TS-IPSO 优化的灰色系统预报卫星钟差[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(6): 1–7.
LI Chenglong, CHEN Xihong, LIU Jiye, et al. Predicting satellite clock errors using grey model optimized by adaptive TS-IPSO[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(6): 1–7. (in Chinese)
- [16] 孙瑞胜, 洪侨, 陈晋璋, 等. 脉冲修正弹控制参数粒子群优化算法[J]. 国防科技大学学报, 2016, 38(4): 159–163.
SUN Ruisheng, HONG Qiao, CHEN Jinzhang, et al. Particle swarm optimization method for impulse-correction projectiles[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2016, 38(4): 159–163. (in Chinese)