

【信息科学与控制工程】

用雷达海杂波反演蒸发波导的蚁群算法

程 焕¹, 谢洪森¹, 孙大军², 甄兴仁³

1. 海军航空工程学院 青岛校区航空电子系, 山东 青岛 266041;
2. 中国人民解放军 92313 部队气象台, 辽宁 兴城 125104;
3. 中国人民解放军 92853 部队, 辽宁 兴城 125106)

摘要:针对传统算法在实现雷达海杂波反演蒸发波导参数时表现出寻优慢、收敛早熟的现象,引入了具有更好寻优力的蚁群算法来实现反演过程。分析了利用雷达海杂波反演大气波导的基本原理流程;列出了用于函数优化的蚁群算法的原理。将蚁群算法与雷达海杂波反演大气波导的思路相结合,完成了对蒸发波导的反演。

关键词:蒸发波导; 蚁群算法; 反演; 折射率

中图分类号:TJ765; TN011.3; P412.25

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2013)01-0091-03

Analyzing Evaporation Duct from Radar Sea Clutter Using Ant Colony Algorithm

CHENG Huan¹, XIE Hong-sen¹, SUN Da-jun², ZHEN Xing-ren³

1. Naval Aeronautical and Astronautical University, Qingdao 266041, China;
2. 92313 Unit of PLA, Xingchen 125104, China; 3. 92853 Unit of PLA, Xingchen 125106, China)

Abstract: Evaporation duct is one of anomalous refractivity structure which often occurs at ocean atmosphere. It also boosts up the received radar sea clutter at the same time. In addition, it can produce refraction error in evaporation duct as the radio wave radiation. Refractivity from sea clutter inversion (RFC) with real-time, confidential, and equipment-simple advantages is a promising technique for predicting atmospheric duct. In the process of inverting evaporation duct profile from radar clutter, traditional algorithm presents a slow speed of seeking best parameters and premature convergence. In this paper, ant colony algorithm (ACA) is used and realizes the inversion ant colony algorithm (ACA) provides a novel algorithm to solve complicated optimization problems. The basic principles applications of ACA and RFC are introduced. And retrieving evaporation duct is achieved by combined RFC with ACA.

Key words: evaporation duct; ant colony algorithm; retrieving; refractive index

大气湿度因水蒸气蒸发在近海面垂直方向一定范围内大梯度值的形成,就造成了对于电磁波传输的蒸发波导现象,它是在海洋大气环境中发生概率较高的特殊的大气波导环境。蒸发波导可使雷达电磁波形成反常传播,直接影响到雷达系统的探测效能,可形成雷达空洞以及探测盲区,也可使雷达波束产生超视距传播,大大增加雷达的探测距离,在超远程警戒和引导攻击中发挥重要作用。雷达电波射线在

其中传播时会产生折射误差,为提高舰船雷达的定位精度,必须研究雷达在蒸发波导中的大气折射现象。现代战争对雷达系统提出了更高的要求,通过对蒸发波导信息的实时反演可提高雷达性能评估的准确性,并实时地修正雷达探测误差,为雷达系统提供必要的保障,同时对提高雷达探测精度和整体性能具有极其重要的意义。

利用雷达海杂波数据对大气波导参数进行反演,可实时

收稿日期:2012-11-02

作者简介:程焕(1974—),男,硕士研究生,工程师,主要从事大气环境对舰载雷达的影响研究;谢洪森(1966—),男,博士,硕士生导师,教授,主要从事导航新技术研究。

提供的蒸发波导信息^[1-7]。1997年Krolik, J. L.等人首次提出了用雷达海面杂波估计对流层电波传输折射率的方法,随后Peter Gerstoft等^[8]人对反演算法进行了深入研究,美国的Naval Surface Warfare Center在1998年进行了海上试验^[9-10],美军现已成功利用了RFC技术并装备于其舰艇使用,取得了较好的效果。雷达海杂波反演蒸发波导的寻优方法可以采用遗传算法、蚁群算法^[11]、免疫算法^[12]等,本文采用基于目标函数最小值差值作为期望的启发函数的蚁群算法,确定波导参数,得到最优参数构建的大气折射率剖面,从而有效地提高蒸发波导反演精度,并实验验证了该方法的有效性。

1 雷达海杂波蒸发波导反演原理

雷达海杂波反演蒸发波导方法是将实际测量的雷达海杂波数据和雷达电波传播模式正向模拟结果进行比较,通过在大气波导参数正向问题中的不断变化,得到回波功率,并将与观测数据符合最好的折射率参数的空间分布作为反演的结果,其本质是模拟海杂波功率与实测海杂波功率之间的最小值全局寻优问题。基于实验数据的优化方法反演蒸发波导的步骤如下。

1) 将雷达接收到的海杂波信号进行离散化处理,得到离散距离 r_1, r_2, \dots, r_n 上的海杂波实测功率曲线,将该海杂波功率曲线作为折射率剖面反演的输入。

2) 假设蒸发波导的折射率剖面在水平方向上变化是均匀的,将蒸发波导模型参数化为蒸发波导高度 d 和表征大气层结稳定性的总体理查森数 R_{ib} 。当蒸发波导高度确定后,不同高度 Z 的大气修正折射指数 $M(Z)$ 就可以通过 R_{ib} 确定的不同大气层结的计算公式求得^[12]。 R_{ib} 取距海平面6 m高的值。不稳定层结时 $R_{ib} < 0$,中性层结时 $R_{ib} = 0$,稳定层结时 $R_{ib} > 0$ 。由国家海洋信息中心多年的气象统计数据可知,在我国海区的分布 $R_{ib} \in (-0.5, 0.2)$,蒸发波导高度 $d \in [0 \text{ m}, 40 \text{ m}]$ 。根据大气修正折射指数 $M(Z)$ 构建的高度剖面,利用PE抛物方程求解出电磁波单程传播损耗 L ,最后基于雷达方程即可求得杂波功率^[13-14]

$$P_c = -2L + \sigma_0 + 10\log(r) + C \quad (1)$$

此时雷达海杂波的功率是海面垂直高度 Z 、总体理查森数 R_{ib} 、蒸发波导高度 d 、海杂波后向散射系数 σ_0 、与雷达参数有关的常数 C 和距离 r 的函数。将其在传播距离上离散化,得到海杂波功率随距离离散变化的曲线。

3) 确定目标函数和算法优化。目标函数的选取至关重要,它用来评判计算雷达海杂波功率与实测雷达海杂波功率的符合程度,本文选择目标函数为 $F(d) = P_{obs} - P_{cal} - \hat{T}$ 。目标函数中 $\hat{T} = P_{obs} - \bar{P}_{cal}$, P_{obs} 、 \bar{P}_{cal} 分别是 P_{obs} 、 P_{cal} 的平均值。利用蚁群算法,根据所确定目标函数 F ,搜索使 F 最小的 d_{opt} ,优化后获得的蒸发波导高度 d_{opt} 即为反演出的最优波导高度。比较反演波导高度和实验测量的波导高度,对其误差

进行分析。

2 蚁群算法反演

令路径 $\text{edge}(i, j)$ 上所含有的信息激素物质的浓度用 τ_{ij} 表示,在 t 时刻每只蚂蚁选择下一个要到达的目标节点,并在 $t+1$ 时刻到达所选定的目标点。在 $(t, t+1)$ 时间区间上,进行蚁群算法的1次迭代,完成 m 只蚂蚁各一次转移。

经过多次迭代后,蚁群算法完成1次循环,此时,信息激素浓度按式(2)和式(3)进行修正:

$$\tau_{ij}(t+n) = \rho\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij} \quad (2)$$

$$\Delta\tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k \quad (3)$$

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{F_k}, & L_k > 0 \\ 0, & L_k = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\rho \in [0, 1)$ 是信息激素挥发系数, $(1-\rho)$ 为信息激素残留因子; $\Delta\tau_{ij}^k$ 是第 k 只蚂蚁在 t 和 $t+1$ 时间区间内释放在路径 $\text{edge}(i, j)$ 上的信息激素物质的量,并规定在 $t=0$ 时刻信息激素物质的浓度 $\tau_{ij}(0)$ 很小; Q 是常数; L_k 取为第 k 只蚂蚁在本轮循环中 $F(d)$ 的变化量, $F(d)$ 的变化量中包含了所有蚂蚁所走过的全部节点的信息和性能指标的变化信息。

为了使每只蚂蚁到达所有不同的目标节点仅1次,需要定义一个禁忌表,用来存储 $(0, t)$ 时刻每只蚂蚁已访问过的目标节点和在每个目标节点间所走过的路程,并禁止该蚂蚁再一次访问这些节点,当1只蚂蚁完成一次旅行后,可用禁忌表来计算它的当前解。第 k 只蚂蚁的禁忌表用 tabu_k 来表示,则第 k 只蚂蚁由节点 i 向节点 j 转移的概率为

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{k \in \text{allowed}_k} [\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}, & \text{如果 } j \in \text{allowed}_k \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (5)$$

其中, $\text{allowed}_k = \{n - \text{tabu}_k\}$,启发式因子 $\alpha, \beta > 0$ 分别表示信息激素浓度和启发函数在转移概率 $p_{ij}^k(t)$ 中的相对重要性。

式(5)中 $\eta_{ij}(t)$ 为期望的启发函数值,并定义为

$$\eta_{ij}(t) = F_{\min} - F_{\min} \quad (6)$$

式中: $\eta_{ij}(t)$ 表示当前已经搜索到的目标函数最小值的差值; F_{\max} 、 F_{\min} 是对应目标节点上目标函数的最小值。

利用目标函数最小值差值作为期望启发函数的改进蚁群算法反演蒸发波导的步骤为:

1) 选取目标函数最小值差值作为期望启发函数;

2) 设定蚂蚁个数 m ,并给每只蚂蚁 $k(k=1 \sim m)$ 各定义一个具有 m 个元素的一维数组 Node_k 。在 Node_k 中依此存放第 k 只蚂蚁要经过的 m 个节点的值,用来表示第 k 只蚂蚁的爬行路径;设定最大迭代次数 N_{\max} ;以及初始时刻各节点上信息激素的浓度 $\tau(x_i, y_i, j, 0)$ 的值 c ,令 $\Delta\tau(x_i, y_i, j) = 0$,将全部蚂蚁按均匀分布于解空间中;初始化信息素 τ_j ,优

化函数 $F(d)$, 此处令 $\tau = f(d)$ 。

3) 利用式(3)计算这些蚂蚁向线段 L_i 上每个节点转移的概率, 根据此概率, 采用赌轮选择方法为每只蚂蚁 k ($k = 1, 2, 3, \dots, m$) 在线段 L_i 上选择 1 个节点, 并将蚂蚁 k 移到该节点, 同时将该节点的纵坐标值存入 Node_k 的第 i 个元素中; 置 $i = i + 1$, 若 $i \leq 15$, 继续循环, 否则, 根据蚂蚁 k 所走过的路径, 即数组 Node_k , 计算出系统的目标函数 f_k , 保存本轮循环中的最优路径和对应的参数 d 的值; 并将计算得到的优化函数值与已知的优化函数值进行比较, 小于则用新解取代当前解, 反之则放弃新解。

4) 循环次数加 1, 并根据式(2) ~ 式(4)更新每个节点上信息激素物质的浓度, 将 Node_k 中的所有元素清零。若当前循环次数小于最大循环次数 N_{\max} 且蚁群尚未收敛到走同一路径, 则再次将全部蚂蚁置于起始点并转到步骤 3) 执行, 若蚁群已收敛到同一条路径则循环结束, 并输出所得到的目标函数 $F(d)$ 的最优解。

3 实验结果

反演蒸发波导的蚁群算法参数设定为: 最大迭代次数 60、启动 24 只蚂蚁、 $P_0 = 0.3$ 、 $\rho = 0.8$ 。图 1 为反演修正折射率剖面与实测剖面的对比图, 由图可知, 蚁群算法反演的蒸发波导高度为 13 m, 相对误差为 1.6%。

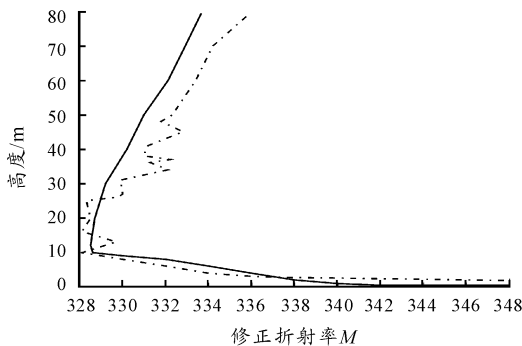


图 1 实测折射率剖面和反演折射率剖面

4 结束语

分析了雷达波在蒸发波导情况下的传播特点, 基于蚁群算法反演蒸发波导条件下雷达波的大气折射率方法, 给出了蚁群算法反演优化的具体步骤。实验表明, 基于雷达海杂波采用蚁群算法推演蒸发波导条件下雷达波折射率的效果是较好, 反演的蒸发波导高度为 13 m, 相对误差为 1.6%。为雷达在蒸发波导气候条件下的应用效能提供了一种有效的评估方法。

参考文献:

- [1] YARDIM C. Statistical Estimation and Tracking of Refractivity from Radar Clutter [D]. San Diego: Electrical Engineering, University of California, 2007.
- [2] 张瑜, 李雪萍, 吴少华, 等. 基于蒸发波导传播的雷达定位误差研究[J]. 光电与控制, 2010, 17(10): 37-40.
- [3] 胡晓华, 费建芳, 张翔, 等. 气象条件对大气波导的影响[J]. 气象科学, 2007, 27(3): 349-354.
- [4] 张萍, 王月清, 田斌, 等. 海上蒸发波导模型的初步研究[J]. 舰船电子工程, 2007, 27(1): 150-152.
- [5] 张星, 张祥林. 大气波导对雷达测距和测高的影响[J]. 火力与指挥控制, 2006, 31(8): 84-87.
- [6] 王华, 赵颖, 黄小毛. 蒸发波导对雷达探测的影响[J]. 现代雷达, 2006, 26(4): 5-8.
- [7] 蔺发军, 刘成国, 潘中伟. 近海面大气波导探测及与其它研究结果比较[J]. 电波科学学报, 2002, 17(3): 269-272.
- [8] Peter Gerstoft, L. Ted Rogers, William S. Hodgkiss, et al. Refractivity from clutter using global environmental parameters [C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Sydney, Australia, July 2001: 2746-2748.
- [9] L Krolik, J Tabrikian. Tropospheric refractivity estimation using radar clutter from the sea surface [C]//Proceedings of the 1997 Battlespace Atmospherics Conference, SPAWAR Systems. San Diego: Command Tech Rep. 2989, March, 1998: 635-642.
- [10] 王波, 吴振森, 赵振维, 等. 基于蚁群算法的雷达海杂波反演蒸发波导研究[J]. 电波科学学报, 2009, 24(4): 598-603, 616.
- [11] 左雷, 察豪, 周沫, 等. 基于免疫算法的雷达海杂波反演蒸发波导研究[J]. 电子学报, 2010, 39(10): 2382-2386.
- [12] 戴福山. 海洋大气近地层折射指数模式及其在蒸发波导分析上的应用[J]. 电波科学学报, 1988, 13(3): 280-286.
- [13] Peter Gerstoft, L. Ted Rogers, Jeffrey L Krolik, et al. Inversion for refractivity parameters from radar sea clutter [J]. Radio Sci, 2003, 32(2): 8053-8074.
- [14] GJB/87—97, 雷达电波传播折射与衰减手册[S].

(责任编辑 杨继森)