

基于免疫算法的雷达海杂波反演蒸发波导研究

左 雷¹, 察 豪¹, 周 沫¹, 涂拥军²

(1. 海军工程大学电子工程学院海洋电磁环境研究所, 湖北武汉 430033; 2. 海军蚌埠士官学校信息技术系, 安徽蚌埠 233012)

摘 要: 传统的遗传算法在实现雷达海杂波反演蒸发波导剖面时呈现寻优速度慢, 早熟收敛的现象, 本文引入了具有更强寻优能力的免疫算法实现反演过程. 阐述了免疫算法实现海杂波反演蒸发波导剖面的原理, 根据反演问题特点对免疫算法进行了最佳参数选取的仿真, 并分析了实现 RFC (Refractivity from Clutter) 中免疫算法相对于遗传算法的优势, 最后采用我国某海域采集到的海杂波、探空、气象水文等数据对反演算法进行了检验, 结果表明免疫算法较遗传算法更适用于解决海杂波反演蒸发波导剖面问题.

关键词: 免疫算法; 海杂波; 蒸发波导; 反演

中图分类号: TP311 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 10-3382-05

Inversion for Evaporation Duct from Radar Sea Clutter Based on Immune Algorithm

ZUO Lei¹, CHA Hao¹, ZHOU Mo¹, TU Yong-jun²

(1. Institution of Oceanic Electromagnetic Environment, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China;

2. Department of Information Technology, Bengbu Naval Petty Officer Academy, Bengbu, Anhui 233012, China)

Abstract: In the process of inverting evaporation duct profile from radar clutter, traditional genetic algorithm presents a slow speed of seeking best parameters and premature convergence. In this paper, immune algorithm is used and realizes the inversion. The principle of immune algorithm is briefly described, and the procession of selecting the best parameters for the algorithm is emulated according to the characters of inversion question. The immune algorithm is compared with genetic algorithm and its advantage In RFC (Refractivity from Clutter) is analyzed. Finally, according to the sea clutter and hydrometeorological data collected from China Sea, the immune algorithm is tested (verified). It is indicated that immune algorithm is better than genetic algorithm in solving the question of retrieving evaporation duct profile from sea clutter.

Key words: immune algorithm; sea clutter; evaporation duct; inversion

1 引言

蒸发波导是海洋大气环境中发现概率最高的大气波导. 它是由于海面水汽蒸发使得在海面上很小高度范围内的大气湿度随高度锐减而形成的. 在现代战争中, 利用蒸发波导的超视距雷达在超远程警戒和引导攻击中扮演非常重要的角色. 蒸发波导通常用修正的大气折射率高度剖面描述, 而通过大气折射率剖面可以计算电磁波的衰减, 从而确定雷达的最大探测距离.

利用雷达海杂波携带的传播路径上的蒸发波导环境信息来反演大气折射率剖面是根据这种物理基础发展起来的遥感大气折射率的新方法, 它可以利用实时采集的雷达海杂波功率来反演蒸发波导剖面, 得到三维的、时变的蒸发波导反演剖面, 在应用这种方法的过程

中不需要气象数据和电磁数据的测量, 具有方便、易行的特点, 而且无需增加额外的硬件, 不增加设备成本, 隐蔽性好, 对蒸发波导的预测准确度也将得到大大的提高. 1997 年 Kroluk, J. L. 等人首次提出了用雷达海面杂波估计对流层折射率的方法, 随后 Peter Gerstoft^[1]等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^[2], 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. 我国在 RFC 技术的研究方面还处于初级阶段, 主要研究单位有中国电波传播研究所、西安电子科技大学、海军工程大学等.

实现雷达海杂波反演蒸发波导的寻优算法中, 大都采用传统的遗传算法^[3], 遗传算法在 RFC 实现过程中易出现早熟收敛现象, 而且反演速度较慢. 本文将人工

免疫算法引入到 RFC 实现中,建立海杂波功率与大气折射率剖面之间的非线性关系,利用人工免疫算法进行雷达实际观测到的海杂波功率和建模仿真获得的海杂波功率之间的匹配寻优搜索,进而确定波导参数,得到最优参数构建的大气折射率剖面.免疫算法具有保持群体多样性、分布式任务处理和兼具全局与局部优化的能力,可以避免早熟收敛,加速算法求解速度,扩大搜索范围和提高收敛准确度的特点.

2 利用免疫算法实现 RFC 步骤

基于试验数据的免疫算法反演蒸发波导,具体步骤如下:

(1) 采集海杂波数据

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 $r_1, r_2, \dots, r_n$ 上的实测海杂波功率曲线 P_c^{obs} ,此曲线作为反演的输入.

(2) 蒸发波导模型参数化

本文将蒸发波导折射率剖面水平变化近似为均匀,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 Ri_b .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 Ri_b 确定的不同大气层结的计算公式求得^[4],根据德国汉堡大学 Jeske 的结论, Ri_b 取距海平面 6 米高的值. Ri_b 为负时可认为不稳定层结,为零时为中性层结,为正时为稳定层结.通过对国家海洋信息中心近 60 年的气象统计分析数据得到, Ri_b 在我国海区的分布大部分在 $(-0.5, 0.2)$ 范围内,蒸发波导高度 d 取值在 $[0m, 40m]$ 范围内.

(3) 正向海杂波功率求解

根据构建的大气修正折射指数 $M(Z)$ 的高度剖面,利用 PE 抛物方程可将电磁波单程传播损耗 L 求出,最后利用雷达方程即可将杂波功率表示如下^[5]:

$$P_c = -2L + \sigma^0 + 10\log_{10}(r) + C \quad (1)$$

此时海杂波的功率变为海面垂直高度 Z 、总体理查森数 Ri_b 和蒸发波导高度 d ,海杂波后向散射系数 σ^0 、雷达参数有关的常数 C 和距离 r 的函数.将其在传播距离上进行离散,得到海杂波功率随距离离散变化的曲线.

(4) 目标函数的选取

目标函数是衡量雷达实际观测到的海杂波功率 P_c^{obs} 和建模仿真获得的海杂波功率 $P_c(m, r)$ 之间匹配程度的标准,根据中心极限定律可以假设 P_c^{obs} 和 $P_c(m, r)$ 之间的差分值 (dB) 是高斯过程,构建基于最小二乘法的目标函数:

$$\phi(m) = e^T e \quad (2)$$

其中

$$e = P_c^{obs} - P_c(m) - \hat{T} \quad (3)$$

$$\hat{T} = \bar{P}_c^{obs} - \bar{P}_c(m) \quad (4)$$

横杠 $(-)$ 代表向量中所有元素的平均值, $\hat{T}$ 是随着每组折射率参数 m 向量变化的,使得目标函数计算结果仅取决于杂波回波的变分量,与回波的绝对值无关.

(5) 利用免疫算法得到最优参数解构建的蒸发波导折射率剖面

利用人工免疫算法,根据步骤(4)确定的目标函数 $\phi(m)$,搜索使 $\phi(m)$ 最小的一组总体理查森数 Ri_b 和蒸发波导高度 d 的值,此组值所对应的蒸发波导剖面 $M(z)$ 即为最优的反演剖面.

3 免疫算法反演模型

3.1 免疫算法步骤

免疫算法是充分吸收了生物免疫系统的仿生隐喻机理而形成的问题求解的理论模型和计算方法.它将待解决问题对应为免疫学中的抗原,将问题的解描述为抗体.免疫算法主要包括初始种群生成、克隆选择操作、免疫网络抑制和反馈调节四个部分^[6].

海杂波反演大气折射率剖面的问题可以看成多参数多峰值函数优化的问题.本文在免疫基本算法的基础上融入 RFC 问题特点,对算法加以改进.例如,利用一定的先验知识产生初始种群,根据已统计的蒸发波导高度分布,蒸发波导高度的初始种群就可以设定在 0 到 5 米的小范围内.然后对初始种群进行克隆选择操作,通过高效变异算子对克隆增殖后的种群选择最优个体组成新种群.当出现最优适应度值不能得到提高时,利用免疫网络抑制,增加新个体,使个体之间的距离足够大.反馈调节是根据克隆选择后适应度的值或者免疫网络抑制后个体数量的变化使种群进入下一代,直到满足收敛条件时,记忆个体即为搜索得到的局部最优解,局部最优解中适应度最大的即为全局最优解.将实测海杂波功率数据和目标函数作为免疫算法输入值,其输出即为最优解.具体操作流程如下图 1 所示.

3.2 免疫算法实现 RFC 中的参数选取

由于本文引入免疫算法主要是解决遗传算法收敛速度慢和早熟的问题,所以将收敛时间和寻找到局部最大值的个数作为评价参数值对算法性能影响的主要评价标准.针对 RFC 问题特点改进后的免疫算法主要参数有^[7]:抑制阈值 σ_s 、初始种群规模 N_0 、克隆规模 N_c 、最大迭代代数 Gen 、新增个体比例 $d\%$ 、指数函数的衰减率 β . N_c 和 β 对算法的性能影响最大,必须合理选择才能使算法发挥最大性能.将 $f(x, y)$ 作为免疫算法

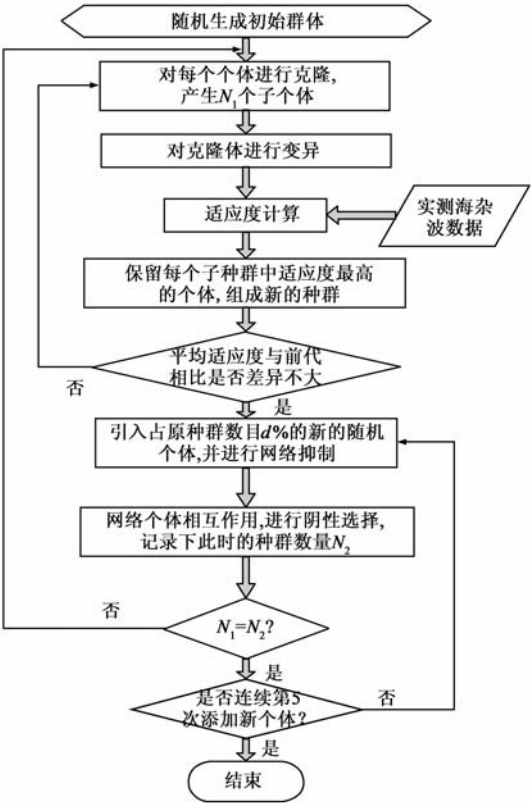


图1 免疫算法流程图

性能检验函数, $f(x, y)$ 是一个两参数多峰值函数, 有四个全局最优解, 对称分布于 $(0.64, 0.64)$, $(-0.64, -0.64)$, $(-0.64, 0.64)$, $(0.64, -0.64)$, 存在大量的局部极大值, 尤其是在中间有一取值很接近局部最大值 (2.077) 凸台 (如图 2)。

$f(x, y)$ 的表达式如下:

$$f(x, y) = 1 + x \times \sin(4\pi x) - y \times \sin(4\pi y + \pi), \quad x, y \in [-1, 1] \quad (5)$$

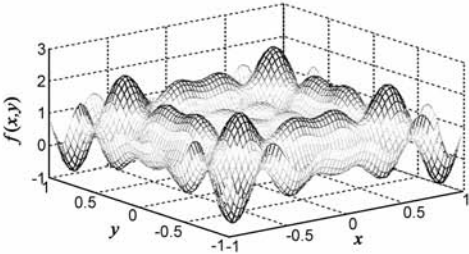


图2 检验函数

4 免疫算法实现 RFC 验证试验

4.1 试验内容

本文利用 2007 年 7 月在我国某海域某型雷达探测效能测试过程中采集到的海杂波数据进行反演, 同时利用架设在试验船上的海用自动气象站和系留式探空采集系统采集到的同步气象数据, 分别通过计算得到

(1) 克隆规模 N_c 的选取

固定 $\sigma_s = 0.2$, $N_0 = 20$, $Gen = 1000$, $d\% = 40\%$, $\beta = 10$, 分别取 N_c 为 5, 10, 20, 40, 80. 每个 N_c 值进行 20 次试验, 记录在搜索检验函数 $f(x, y)$ 的收敛时间和搜索到最大极值的个数, 整理每个 N_c 值 20 次试验中最大、最小和平均收敛时间和极值个数. 从表 1 中可以看出: 当 $N_c > 20$ 时, 算法的收敛时间已经达到很好的效果, 并且基本上保持稳定, 说明此时抑制阈值 σ_s 起到了控制种群数量的作用, 即使克隆规模 N_c 增大, 群体也会因为不满足抑制阈值的要求而被抑制在很小的规模. 所以克隆规模 N_c 取为 20 时可以取得较好的性能。

表 1 试验结果

N_c	收敛时间(s)			搜索极值个数		
	最大	最小	平均值	最大	最小	平均值
5	26.87	11.08	16.35	52	43	48
10	18.61	9.59	10.30	51	44	47
20	10.54	5.39	6.54	45	37	40
40	11.14	5.18	7.14	42	33	38
80	12.30	4.93	6.58	39	23	34

(2) 指数函数的衰减率 β 的选取

β 决定着变异的最大半径, 控制着搜索的灵敏度. 增大 β 可以增加搜索的灵敏度, 减小 β 又可以更有效的改善噪声影响. 首先固定 $\sigma_s = 0.2$, $N_0 = 20$, $Gen = 1000$, $d\% = 40\%$, $N_c = 20$, β 的取值分别为 5, 10, 40, 100, 150. 仍然利用测试函数 $f(x, y)$ 检验 β 不同取值时算法性能. 统计结果如图 3 和图 4 所示。

图 3 中可以看出随着 β 的增加, 算法的收敛速度减慢, 收敛代数增加, 所以要缩短 RFC 的计算速度必须减小 β 的取值. 但是图 4 中显示 β 的减小也会带来搜索解质量的下降. 综上分析, β 取值为 10 时能够在保证解质量的前提下, 大幅提高计算效率。

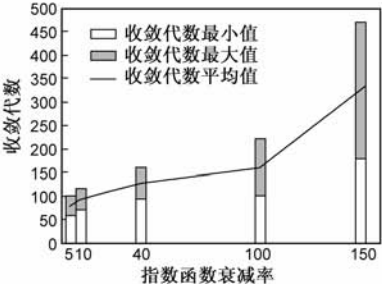


图3 指数函数的衰减率 β 对收敛代数的影响

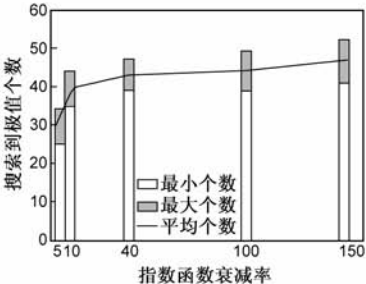


图4 指数函数的衰减率 β 对搜索极值个数的影响

的蒸发波导剖面作为对比剖面 and 实测剖面, 用于验证利用免疫算法实现 RFC 反演的准确性. 各系统采集到的数据处理如下:

(1) 海用型自动气象站及其数据处理:

ZQZ-CY 海用型自动气象站 (如图 5) 架设在小木船头上, 传感器距海面 6 米高, 可以自动测量风速、风向、相

对湿度、气压、气温、等数据,海表温度传感器放入海水中测量水温.风速、风向按十分钟取平均值,其它参数采集按 1 分钟取平均值.根据近地层相似理论,作为输入值代入蒸发波导 PJ 模型得到蒸发波导折射率剖面^[8].

(2)系留式探空采集系统及其数据处理

系留式探空采集系统(如图 6)由探空球、升降装置、探空 RS-90 传感器组成,采集数据包括温度、湿度、气压、风速和风向,采样间隔时间为 2 秒.释放时速度控制在 0.5 米/秒,高度在 40 米以下.气象数据经过预处理后,代入式(6)可以得到不同高度上的大气修正折射指数,由不同高度的大气修正折射指数 $M(Z)$ 所构建剖面作为实测剖面^[9].

$$M = \frac{77.6}{T} \left(p + \frac{4810e}{T} \right) + 0.157h \tag{6}$$

其中, M 为大气修正折射指数, p 为气压,单位为百帕, T 为温度,单位为 K , h 为测量高度,单位为米, e 为水汽压,单位为百帕.

海用自动气象站和系留式探空采集系统的测量精度参见文献^[8]中所列,当雷达开机并采集海杂波功率时,在距离 40km 左右的海面上同时利用架设在试验船上的海用自动气象站和系留式探空采集系统采集同一

时刻的气象数据.为避免船体辐射,航向与风向的夹角大于 30 度,整个试验过程共累计测量了 200 多组剖面.

4.2 试验结果分析

通过对试验数据的整理,挑选出 2007 年 7 月 20 日和 7 月 21 日两天的两组数据作为海杂波反演大气折射率剖面的实际雷达资料.这两天蒸发波导的高度和强度很大,而且正处于休渔期,小目标渔船对杂波的影响不大.由于试验雷达架设在海边,初始岸海交界对反演的影响很大,所以初始杂波功率距离设定为 10km.50km 以外的海杂波强度已经非常微弱,因此杂波功率的最远距离可以选定为 50km.第一组数据和第二组数据的反演结果如下图 7 到图 10 所示,参照 PJ 模型理论,实测总体理查森数 Ri_b 由气-海温差平均值近似,算法的参数设置如表 2 所示.

表 2 算法参数设置

遗传 算法	种群数量		交叉概率		变异概率	Gen	目标函数 最大值
	M		P_c		P_m		
	30		0.8		0.1	50	50
免疫 算法	No	Nc	δs	β	d%	Gen	目标函数 最大值
	20	20	0.2	10	40%	50	50



图5 海用自动气象站



图6 系留式探空采集系统

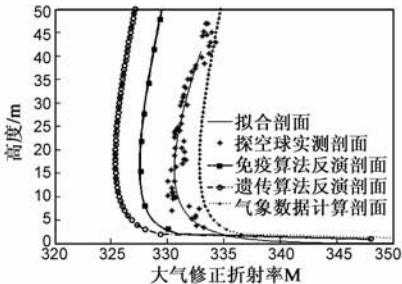


图7 反演剖面 and 实测剖面对比 (第一组)

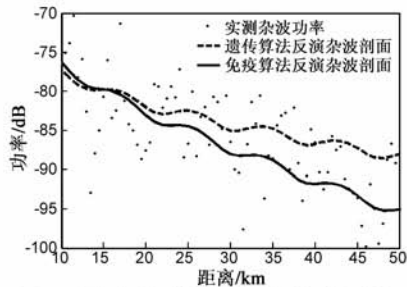


图8 反演杂波功率和实测杂波功率对比 (第一组)

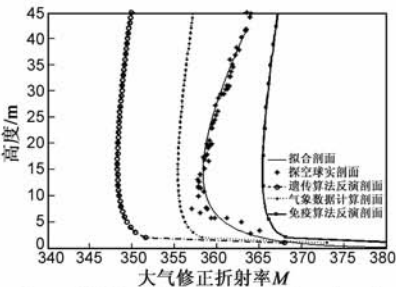


图9 反演剖面 and 实测剖面对比 (第二组)

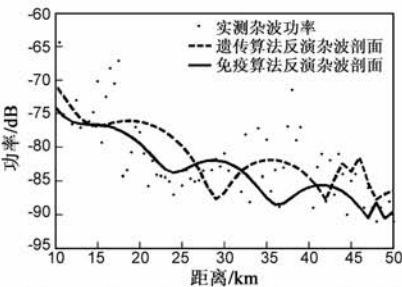


图10 反演杂波功率和实测杂波功率对比 (第二组)

试验结果分析:将反演所得蒸发波导高度和总体理查森数分别与实测值比较,从结果对比可以看出,两种算法反演的蒸发波导剖面变化趋势和我国海区实测剖面是基本相符的.反演的波导高度与实测值较为接近,误差控制在了 2m 之内,尤其是免疫算法反演的蒸发波导高度误差基本在 1m 左右,但是与自动气象站的数据计算结果还有一定的偏差.这是由于将蒸发波导

剖面近似水平均匀造成的误差,自动气象站与实测剖面同处一点,因此误差会小些.总的来说,同等收敛条件下,免疫算法的反演精度比遗传算法提高 10% 左右,计算速度也有 15% 左右的提高.通过我国实测反演试验的结果表明,免疫算法在 RFC 中可以适用,并在反演蒸发波导剖面时优于遗传算法.

表 3 试验数据反演结果

	数据组	蒸发波导高度 $d(\text{m})$	绝对误差 Δd	R_b	收敛时间(s)
探空资料	一	14.2			
	二	15.8			
气象站	一	13.7	0.5	-0.21	
	二	14.6	1.2	0.12	
免疫算法	一	13.4	0.8	-0.17	5354
	二	16.9	1.1	0.09	6012
遗传算法	一	12.3	1.9	-0.28	8214
	二	14.3	1.5	0.06	6995

误差原因分析:实际数据的测量有很多环境因素,如水流的影响、海底地形的影响、岸海交界的影响等诸多方面.另外海杂波数据处理过程中没有完全滤除船只、岛屿等目标对杂波功率的强干扰,在信号处理方面应增加这部分内容.海杂波建模不准确的原因也会导致反演结果普遍存在较大误差,这其中包括后向散射模型和电磁波传播模型.尤其是海杂波后向散射模型是根据大量测量数据总结的经验模型,所以需要发展更加准确的海杂波模型.

5 结论

利用雷达海杂波反演蒸发波导剖面是非常有军事应用价值的技术,对充分发挥超视距雷达性能至关重要.本文针对传统遗传算法在 RFC 实现过程中早熟收敛和反演速度较慢,提出了将的免疫寻优算法应用于反演蒸发波导剖面的实现过程中.免疫算法具有分布式、自适应、自组织和鲁棒性等优良特性,具有强大的信息处理和求解能力.因此表现出加速算法收敛、扩大搜索范围、维持群体多样性和提高复杂优化问题的求解质量等诸多优势.经过我国某海域的实测海杂波数据,探空数据及船载自动气象站数据进行了反演性能对比分析,结果表明,免疫算法较传统的遗传算法更适用于解决 RFC 中的反演蒸发波导剖面问题.

参考文献

[1] Peter Gerstoft, L. Ted Rogers, William S. Hodgkiss, Galina Rovner. Refractivity from clutter using global environmental parameters[A]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium[C]. Sydney, Australia, July 2001: 2746 – 2748.

[2] L Krolik, J Tabrikian. Tropospheric refractivity estimation using radar clutter from the sea surface[A]. Proceedings of the 1997 Battlespace Atmospherics Conference, SPAWAR Systems [C]. San Diego: Command Tech Rep. 2989, March, 1998: 635 – 642.

[3] Holland J H. Adaptation in natural and artificial systems[M].

Michigan: The University of Michigan Press, 1975: 111 – 142.

[4] 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.

Dai Fu Shan. The refractivity models in the marine atmospheric surface layer and their applications in the evaporation duct analysis[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1998, 13(3): 280 – 286. (in Chinese)

[5] Peter Gerstoft, L Ted Rogers, Jeffrey L Krolik, William S Hodgkiss. Inversion for refractivity parameters from radar sea clutter[J]. Radio Sci, 2003, 32(2): 8053 – 8074.

[6] Leandro N de Castro; Jon Timmis. An artificial immune network for multimodal function optimization[J]. Proc. of IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2002, 3(10): 699 – 704.

[7] 肖人彬, 曹鹏彬. 工程免疫计算[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 100 – 105, 165 – 169.

[8] 左雷, 察豪, 田斌, 田树森. 海上蒸发波导 PJ 模型在我国海区的适应性初步研究[J]. 电子学报, 2009, (5): 1100 – 1103.

Zuo Lei, Cha Hao, Tian Bin, Tian Shu-sen. An Initial Study on the Applicability of Paulus-Jeske Model of Evaporation Duct in Chinese Sea Areas[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, (5): 1100 – 1103. (in Chinese)

[9] B R Bean, E J Dutton. Radjo Meteorology[M]. New York: Dover Publication Inc, 1968. 435.

作者简介



左 雷 男, 1981 年生于黑龙江齐齐哈尔, 工程师, 海军工程大学博士研究生, 研究方向为超视距雷达探测规律研究.
E-mail: zuoleihaode2005@163.com



察 豪 男, 1966 年生于山西太原, 教授, 海军工程大学博士生导师, 研究方向为雷达总体技术, 全军电磁频谱管理委员会专家咨询委员会委员,

周 沫 男, 1971 生于浙江金华, 副教授, 海军工程大学硕士生导师, 研究方向为雷达信号处理.

涂拥军 男, 1981 年生于湖南衡阳, 讲师, 海军蚌埠士官学校, 研究方向为雷达电子对抗.