

## 基于目标函数的微波超视距雷达天线高度优化方法

康士峰 曹仲晴\* 王红光 郭相明

(中国电波传播研究所电波环境特性及模化技术重点实验室 青岛 266107)

**摘要:** 利用海上蒸发波导可以使舰载微波超视距雷达实现远距离低空目标探测,然而大气波导内的超折射和多径传播效应会产生不利于目标检测的雷达盲区。该文提出一种基于目标函数的微波超视距雷达天线高度优化方法,针对形成蒸发波导的海-气界面稳定层结、中性层结和不稳定层结3种情况,利用电波传播数值算法和雷达评估模型仿真分析了蒸发波导内特定区域不同目标函数时的雷达目标检测性能,给出了雷达天线高度优化结果。该方法可以为微波超视距雷达系统设计、探测性能分析和大气环境自适应技术提供参考。

**关键词:** 雷达; 微波超视距; 蒸发波导; 目标函数; 天线架设高度; 优化

中图分类号: TN957.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)07-1767-04

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.01039

## Antenna Height Optimization Based on Object Function for Microwave Over-the-horizon Radar

Kang Shi-feng Cao Zhong-qing Wang Hong-guang Guo Xiang-ming

(National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107, China)

**Abstract:** Microwave over-the-horizon radar can detect long distance and low altitude targets by means of the evaporation ducts over sea, however, the super refraction and multi-path propagation effects produce radar blind areas in evaporation duct where targets can not be detected. A method of antenna height optimization based on object function for microwave over-the-horizon radar is proposed in this paper. Radar detection performances are simulated in the three evaporation duct situations of stable stratification, neutral stratification and unstable stratification using numeric algorithm of radiowave propagation and radar performance evaluating models. The results of optimized antenna height is obtained for specific evaporation height and area weight functions. The method proposed can be used as a reference in microwave over-the-horizon radar design, detection performance analysis and self adaptive technology development in atmosphere environment.

**Key words:** Radar; Microwave over-the-horizon; Evaporation duct; Objective function; Antenna height; Optimization

### 1 引言

受地球曲率影响,舰载微波雷达对海目标搜索、警戒、监视和跟踪的作用距离一般限制在视距范围内,同时,海面干涉作用使天线波束向上抬起,导致雷达覆盖范围在低仰角存在探测盲区,难以发现视距内的低空来袭目标,对海上作战造成较大威胁。

蒸发波导是海上出现概率最高,持续时间最长的反常大气折射现象,通过对电波的陷获作用可以使电波传播到视距之外,实现远距离目标探测,同时由于电磁波被陷获在蒸发波导层结内,微波雷达可以发现数十米之内低空和海面来袭目标,因此,基于蒸发波导的微波超视距雷达可以有效解决传统

雷达存在的近距离及低空盲区问题。但是,微波超视距雷达存在大气波导顶部盲区 and 波导内的跳跃盲区问题,也可能影响对该区域内来袭目标的探测(蒸发波导被来袭目标利用)。为了充分利用蒸发波导的超视距效应,同时避免盲区等不利影响,需要寻求蒸发波导盲区应对措施,包括雷达参数的选取<sup>[1]</sup>,工作模式<sup>[2]</sup>,检测算法<sup>[3-7]</sup>的确定等。许多学者对大气波导雷达探测盲区分析和其对系统性能影响方面做了许多工作<sup>[8-10]</sup>,但对减小或避免盲区影响方面还缺少研究。

微波超视距雷达系统在岸边或海上蒸发波导环境中工作时,天线不同的离地架设高度会使从天线发射的波束传播情况不同,从而使得对特定区域的目标探测性能不同。为避免或减少特定区域出现盲

2013-07-16 收到, 2014-02-18 改回

\*通信作者: 曹仲晴 ccaao515@163.com

区,需要在一定的条件下有较大的检测区域,本文提出了一种基于目标函数的微波超视距雷达天线高度优化方法,根据蒸发波导环境参数和雷达重点关注区域,利用目标函数最大化准则优化选取或自适应确定雷达天线高度,提高微波超视距雷达的探测效能。在工程应用中,可以设计一种雷达天线可上下移动的工作方式,为了提高特定区域目标探测能力,把天线调整到相应的最优高度。本文给出了雷达目标探测性能评估方法,描述了目标函数的概念及定义,针对特定环境与系统参数进行了仿真分析,最后进行了讨论。本文的方法同样适用于表面波导、悬空波导等其他的大气折射情况,为微波超视距雷达天线高度的选取提供依据。

## 2 雷达探测分析

### 2.1 雷达性能评估模型

根据雷达原理,单基地雷达接收功率表示为

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma F^4}{(4\pi)^3 R^4 L_s} \quad (1)$$

式中,  $P_t$  为发射功率(W),  $\sigma$  为目标雷达散射截面(RCS)( $m^2$ ),  $\lambda$  为波长(m),  $G$  为天线增益(dB),  $F$  为传播因子,  $L_s$  为系统损耗(dB),  $R$  为目标距离(m)。式(1)中传播因子  $F$  代表环境的综合影响,与频率、距离、地形、大气等因素有关,其它参数则由雷达系统和目标决定。把式中的参数按系统、环境和目标量分离并用分贝式表示为

$$P_r = 10 \lg \left( \frac{4\pi P_t G^2}{\lambda^2 L_s} \right) - 2L + 10 \lg \sigma \quad (2)$$

其中,  $L$  表示实际传播损耗,与自由空间传输损耗  $L_{fs}$  和传播因子  $F$  的关系为

$$L = L_{fs} - 20 \lg F \quad (3)$$

$$L_{fs} = 20 \lg \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) \quad (4)$$

根据雷达参数、环境参数和目标参数,利用抛物方程等电波传播数值算法可得到雷达目标回波功率。

雷达系统噪声功率  $P_n$  为

$$P_n = \bar{F} K T_s B_n \quad (5)$$

式中,  $B_n$  为接收机带宽(Hz),  $\bar{F}$  为噪声因子,  $T_s$  为系统噪声温度,  $K = 1.38 \times 10^{-23}$  为波尔兹曼常数(J/K)。

### 2.2 单元平均恒虚警率(CA-CFAR)方法

由雷达自动检测理论知,单元平均恒虚警率(CA-CFAR)在未知水平的高斯白噪声和均匀的瑞利包络杂波背景及单脉冲平方率检测的假设下成立。CA-CFAR 检测器的检测概率  $P_d$  为

$$P_d = [1 + T / (1 + C)]^{-2n} \quad (6)$$

其中,  $C$  为信噪比  $C = P_r / P_n$ ,  $T$  为标称化因子,由式(7)得到

$$T = (P_{fa})^{-1/2n} - 1 \quad (7)$$

其中  $P_{fa}$  为虚警概率,  $n$  为恒虚警处理的单元数。

### 2.3 天线高度优化目标函数

为了定量分析天线高度对微波超视距雷达探测性能的影响,本文提出一种基于目标函数的优化方法。设定雷达天线高度为  $H$ , 雷达覆盖区域高度为  $h$ 、距离  $r$  处的检测概率为  $P_d(H; h, r)$ , 设定检测概率门限  $P_{d0}$ , 得到如式(8)的二值函数:

$$P_d(H; h, r) = \begin{cases} 0, & P_d(H; h, r) < P_{d0} \\ 1, & P_d(H; h, r) \geq P_{d0} \end{cases} \quad (8)$$

设雷达目标检测的空间范围为高度  $H_{\min} \sim H_{\max}$ , 距离  $R_{\min} \sim R_{\max}$ , 则目标函数定义为

$$\Phi_m(H) = \frac{\int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \int_{H_{\min}}^{H_{\max}} g(h, r) P_d(H; h, r) dh dr}{\int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \int_{H_{\min}}^{H_{\max}} g(h, r) dh dr} \quad (9)$$

其中,  $g(h, r)$  为高度  $h$ , 距离  $r$  处的权值。

$\Phi_m(H)$  的最大值  $\Phi_{\max}(H_0)$  对应的天线高度  $H_0$  即为优化天线高度:

$$\Phi_{\max}(H_0) = \max(\Phi_m(H)) \quad (10)$$

## 3 数值仿真分析

### 3.1 不同大气层结雷达探测性能

形成蒸发波导的大气层结主要分为稳定层结、中性层结、不稳定层结3种情况。图1为不同层结下蒸发波导剖面,稳定层结大气修正折射率  $M$  随高度下降最慢,中性层结次之,不稳定层结下降最快。

不同层结下天线高度变化对目标探测有不同的影响。现设仿真参数如下:蒸发波导高度30 m, 雷达工作频率9.6 GHz, 高斯天线, 增益37 dBi, 垂直极化, 发射仰角 $0^\circ$ , 波束宽度 $0.3^\circ$ , 峰值功率230 kW, 噪声因子1.4, 系统损耗3 dB, 天线架设高度分别取5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 25 m, 40 m; RCS  $20 m^2$ ; 雷达检测参数: 虚警概率  $P_{fa} = 10^{-6}$ , 恒虚警单元数  $n$  为8。

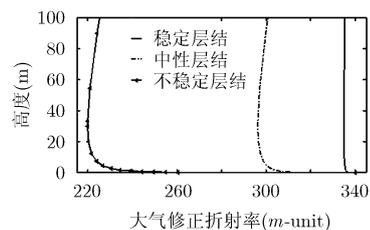


图1 不同层结蒸发波导剖面

为了定量描述和评估波导内与波导外的探测性能,采用目标函数  $\Phi_m(H)$ , 令  $H_{\min}$ ,  $R_{\min}$  为 0,  $H_{\max}$  为 100 m,  $R_{\max}$  为 200 km,  $q(h,r)$  取值为 1, 若设高度分辨率为  $\Delta H$ , 距离分辨率为  $\Delta R$ , 则分辨单元  $\Delta S = \Delta H \Delta R$ , 目标函数可离散为

$$\begin{aligned} \Phi_m(h_a) &= \sum_1^{N_1} \sum_1^{N_2} P_d(H;h,r) \Delta S / (N_1 N_2 \Delta S) \\ &= \sum_1^{N_1} \sum_1^{N_2} P_2(h_a,h,r) / (N_1 N_2) \end{aligned} \quad (11)$$

其中  $N_1$  为  $\lceil \frac{R_{\max}-R_{\min}}{\Delta R} \rceil$ ,  $N_2$  为  $\lceil \frac{H_{\max}-H_{\min}}{\Delta H} \rceil$ ,  $\lceil \cdot \rceil$  表示对括号内的数取整。此处, 目标函数  $\Phi_m(H)$  的物理意义为雷达目标可探测面积占总覆盖面积的比值。计算结果如图 2 所示。观察图 2 发现, 天线架设高度 1~40 m 变化时目标函数的变化趋势为先增大再减小, 其中取得最大值或探测性能最好时的天线高度分别为 6 m, 17 m, 18 m, 其探测概率分布如图 3 所示。图 3(a) 为稳定层结情况, 在大气波导内部具有较好的超视距探测能力, 在波导高度之外的区域也有一定的探测能力。中性层结和 unstable 层结时分别如图 3(b) 和图 3(c) 所示, 在波导内仍显示有跳跃盲区的存在, 波导外可探测距离在 50 km 左右。

以上分析为使雷达目标探测面积最大意义上的优化, 权值选取方式没有考虑波导内外的差别, 适合于综合评估蒸发波导情况下波导内外的雷达目标探测性能。

### 3.2 利用区域加权目标函数优化天线高度

实际中不同区域对雷达探测性能的要求有不同

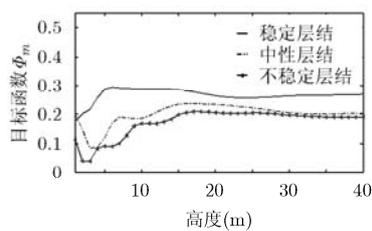


图 2 不同层结下均匀优化的目标函数

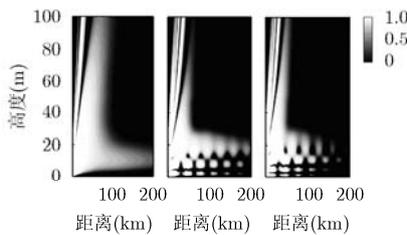


图 3 不同层结下均匀优化的探测概率分布

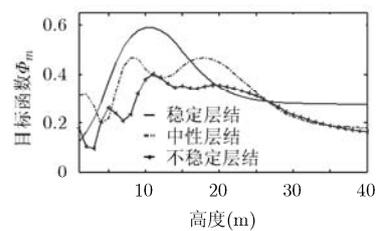


图 4 不同层结下区域优化的目标函数

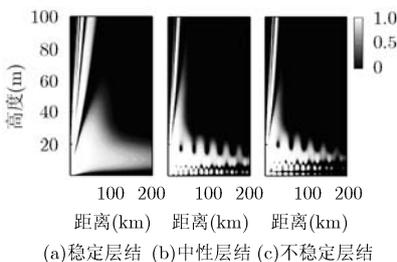


图 5 不同层结下区域优化探测概率分布

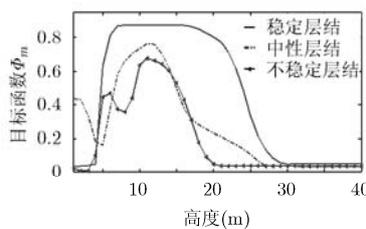


图 6 不同层结下局部优化的目标函数

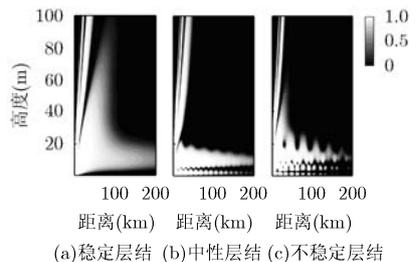


图 7 不同层结下局部优化探测概率分布

的侧重。若探测波导内目标, 可以把波导内的权值变大; 探测波导外目标, 则把波导外的权值变大。

为了探测波导内目标, 现取波导内权值为 0.9, 波导外权值为 0.1, 其余参数不变, 得到的目标函数如图 4 所示, 由图 4 可见目标函数随天线高度的增大总的趋势依然为先增大后减小, 最大值对应的高度分别为 11 m, 18 m, 11 m, 权函数的变化影响了天线架设高度的选取, 稳定层结、中性层结、不稳定层结对应的检测概率分布分别如图 5(a), 图 5(b), 图 5(c) 所示。

比较图 3(a) 和图 5(a) 可见, 图 5(a) 显示雷达在波导外探测能力减小, 波导内的探测能力显著增强。同样, 图 5(b) 和图 5(c) 波导外探测概率下降, 波导内可探测区域由原来的点状扩展为片状, 探测性能改善。

为了有利于探测特定局部区域的目标, 可以设置如式(12)的 2 维空间滤波函数。此权值使部分区域的探测性能相比其他部分变得“重要”, 在目标函数中所占比重变大, 从而使目标函数大小更能反映此区域的影响, 所得目标函数如图 6。

$$q(h,r) = \begin{cases} 1, & 5 \text{ m} \leq h \leq 15 \text{ m}, 90 \text{ km} \leq r \leq 100 \text{ km} \\ 0.01, & \text{其它} \end{cases} \quad (12)$$

图 6 为稳定层结、中性层结、不稳定层结下不同天线高度对应的目标函数值, 其最大值分别为 8 m, 12 m, 11 m, 其对应的探测分布如图 7(a), 图 7(b), 图 7(c) 所示, 雷达在权重较大的区域具有较好的探测性能。

## 4 结束语

大气波导对雷达超视距探测具有重要的作用, 微波超视距雷达的探测能力不仅与形成大气波导的气象条件有关, 而且还与雷达参数以及天线与大气波导的相对位置有关。本文采用目标函数来定量优化雷达天线架设高度, 针对探测不同区域时的权函数选择来优化确定天线架设高度, 为雷达系统的设计、性能评估和实际应用提供了定量研究方法, 仿真结果表明了该方法的有效性, 但还需要实测数据的进一步验证。

本文方法是在设定蒸发波导为稳定、中性及不稳定 3 种海洋边界层气象条件下分析的, 在同一波导高度下仿真结果具有较大的差异, 因此, 在实际应用中还需要对蒸发波导环境进行诊断和评估。另外, 优化是针对特定区域目标探测进行的, 改变天线高度只是使盲区位置发生了改变, 雷达盲区并没有实质性的减少。若需增加雷达在覆盖区内总的检测概率, 可以考虑进一步采用多天线等技术。

## 参 考 文 献

- [1] Chan L C. Improved performance of a subsurface radar target identification system through antenna design[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1981, 29(2): 307-311.
  - [2] Hitney Herbert V and Hitney Linda R. Frequency diversity effects of evaporation duct propagation[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1990, 38(10): 1694-1770.
  - [3] Chaumette E and Larzabal P. Monopulse-radar tracking of swerling III-IV targets using multiple observations[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2008, 44(2): 520-537.
  - [4] 孙康, 金钢, 朱晓华. 基于波动分析的海上小目标检测[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(4): 882-887.  
Sun Kang, Jin Gang, and Zhu Xiao-hua. Small target detection within sea clutter based on the fluctuation analysis[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(4): 882-887.
  - [5] Berman A and Hammer A. False alarm effects on estimation in multitarget trackers[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1991, 27(4): 675-681.
  - [6] Guan Jian, Liu Ning-bo, and He You. Fractal poisson model for target detection within spiky sea clutter[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(2): 411-415.
  - [7] Guan J and Chen X L. Adaptive fractional fourier transform-based detection algorithm for moving target in heavy sea clutter[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2012, 6(5): 389-401.
  - [8] 焦林, 张永刚. 大气波导条件下雷达电磁盲区的预报研究[J]. *西安电子科技大学学报*, 2007, 34(6): 989-994.  
Jiao Lin and Zhang Yong-gang. Prediction of the electromagnetic shadow zone under the atmospheric duct[J]. *Journal of Xidian University*, 2007, 34(6): 989-994.
  - [9] 刘爱国, 蔡豪, 席泽敏, 等. 舰载微波超视距雷达天线架设高度研究[J]. *现代雷达*, 2009, 31(4): 11-14.  
Liu Ai-guo, Cha Hao, Xi Ze-min, et al. A study on antenna height of ship-borne microwave OTH radar[J]. *Modern Radar*, 2009, 31(4): 11-14.
  - [10] 黄小毛, 张永刚, 王华, 等. 大气波导对雷达异常探测影响的评估与实验分析[J]. *电子学报*, 2006, 34(4): 723-725.  
Huang Xiao-mao, Zhang Yong-gang, Wang Hua, et al. Evaluation and experimental analysis of radar anomalous detection influenced by atmospheric ducts[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006, 34(4): 723-725.
- 康士峰: 男, 1966 年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为电波环境分析与预报、超视距传播、微波遥感等。
- 曹仲晴: 男, 1985 年生, 硕士, 主要研究方向为大气波导、海杂波、雷达信号检测。
- 王红光: 男, 1980 年生, 博士生, 工程师, 研究方向为对流层电波传播计算、分形信号处理、海杂波特性分析等。
- 郭相明: 男, 1983 年生, 工程师, 主要研究方向为大气波导机理研究等。