

微波超视距雷达对海面舰船目标距离的探测

刘爱国, 察 毫

(海军工程大学 海洋电磁环境研究所, 湖北武汉 430033)

摘要: 研究了蒸发波导环境中雷达对海面舰船目标的最远探测距离预报模型. 现有雷达超视距探测距离预报模型的预报结果往往偏离实际雷达观测值, 分析了现有预报模型的不足, 提出利用高度上多个散射中心来描述海面舰船目标, 通过引入目标雷达散射截面高度分布模型来对现有模型进行修正, 并与实际观测数据进行了比较, 证明修正后的预报模型的预报结果与观测值更接近, 预报准确度更高.

关键词: 蒸发波导; 雷达; 最大作用距离; 多散射中心

中图分类号: TN011 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2009)04-0741-05

Study of the microwave OTH radar maximum detection range of ships

LIU Ai-guo, CHA Hao

(Inst. of Ocean Electro. Environment, Naval Univ. of Eng., Wuhan 430033, China)

Abstract: The prediction model of the radar maximum detection range of the sea surface ship in evaporation duct environments is studied. The predictions of the present radar Over The Horizon detection range prediction model frequently deviate significantly from radar measurements. The limitation of the present prediction model is described. The use of the vertical multi-scatter center to model the surface ship is presented. A vertical distribution model of the radar cross section is used to correct the present prediction model. Finally, the predictions by the corrected model are compared with the radar observations. The result shows that the predictions by the corrected model agree well with the observations and are more accurate.

Key Words: evaporation duct; radar; maximum detection range; multi-scatter center

蒸发波导是海面上经常出现的一种大气波导, 受其影响, 舰载微波雷达经常会出现超视距探测现象. 目前, 利用海上蒸发波导实现超视距探测的微波超视距雷达是雷达装备发展的方向之一. 在雷达出现超视距探测时, 其对海面目标的作用距离会大于视距, 此时其对海面目标最远作用距离的预报已经不能再使用传统的视距公式, 而必须使用含有传播因子的雷达距离方程. 察豪等^[1]研究了蒸发波导条件下雷达探测距离的估计方法, 通过电磁波传播的抛物方程, 引入传播因子来描述蒸发波导对雷达探测距离的影响, 最终得到蒸发波导条件下雷达作用距离的一种估计方法. 赵小龙^[2]、黄小毛^[3]、焦林^[4]等在研究蒸发波导环境中雷达探测性能的评估方法时, 也基于类似的雷达作用距离预报模型.

在实际应用中发现, 某些情况下, 上述雷达作用距离预报模型对小型水面目标探测距离预报值大于对大型目标的探测距离预报值, 这显然与实际不符. 另外经常会出现探测距离预报值偏大的情况. 笔者拟引入目标雷达散射截面(RCS)的高度分布模型, 修正上述雷达作用距离预报模型, 消除微波超视距雷达对海面目标探测距离预报的误差.

1 现有预报模型的缺陷

现有作用距离预报模型所基于的雷达方程为

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

其中 P_t 为发射机发射功率, P_r 为接收机接收功率, G 为雷达天线增益, λ 为工作波长, σ 为目标的雷达截面积, F 为传播因子, R 为目标距雷达距离, L_s 为系统损耗, L_a 为大气吸收损耗。

由上述雷达方程可以看出, 此时是将目标作为 RCS 是 σ 的理想点目标来考虑的。海上舰船目标具有一定高度, 将其作为点目标来建模, 存在两个问题: 一是其等效高度不便确定; 二是在非稳定层结(气海温差小于或等于 0)条件下, 某些计算结果与实际不符。

以 2007 年 1 月 8 日 10 时 30 分在东海某海域进行的蒸发波导环境中海上电磁波传播损耗测量实验得到的一组气象数据为例, 此时测得海表温度为 10.3℃, 参考高度 6 m 处气温为 5.4℃, 相对湿度 52%, 风速 8.89 m/s。利用预报蒸发波导高度的 Paulus-Jeske 模型, 计算得到此时的蒸发波导高度为 12.36 m, 大气层结为不稳定层结, 此时工作于 X 波段、天线架高 15 m 的实验雷达的电磁波传播损耗在距离为 80 km 和 160 km 处高度分布曲线如图 1 所示。

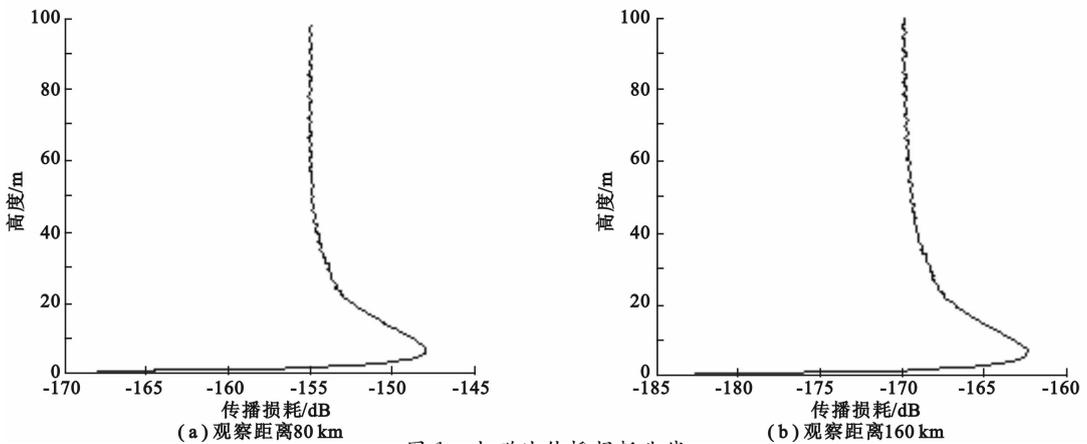


图 1 电磁波传播损耗曲线

由损耗曲线可见, 由于蒸发波导高度较高, 电磁波的传播出现明显的陷获效应, 在高度为 6 m 处, 其传播损耗出现最小值。对大型水面目标, 将其视为某一高度上的理想点目标, 若其等效高度大于 6 m, 则虽然其 RCS 较大, 但因为其不在损耗曲线的极小值点上, 因此利用现有模型得到的雷达探测距离预报值就可能小于 RCS 较小、但等效高度在 6 m 左右的小型目标距离预报值, 结果出现雷达对小型水面目标探测距离远、对大型水面目标探测距离近的预报结果, 而这与实际情况相悖。另外, 当目标等效高度在 6 m 左右时, 由于雷达电磁波传播损耗很小, 此时预报得到的探测距离会明显偏大, 预报准确度降低。

出现上述预报偏差的原因在于目标建模时没有考虑到实际目标 RCS 的空间分布, 而将其简单地作为点目标来考虑。在蒸发波导环境中, 传播因子 F 随空间变化, 是空间坐标的一个三维函数, 它不但在距离上变化, 在高度上也是起伏的。因此在目标建模时, 需考虑到海上舰船具有一定高度, 它的不同高度部分对电磁波的后向散射效应不同, 在计算雷达探测距离时, 应引入目标 RCS 在高度上的分布模型。

2 现有预报模型的修正

在得到蒸发波导折射率剖面后, 利用电波传播的抛物方程模型可得到传播因子在空间的分布。不考虑大气环境在方位上的变化, 即假设场分量只在高度和距离上变化, 在方位上是均匀的, 则传播因子 F 简化为距离 R 和高度 z 的二维函数。将海上舰船目标视为高度上多散射中心的集合体, 其总的 RCS 为 σ , 类似于概率密度函数, 引入目标 RCS 在垂直高度上的分布密度函数 $p(z)$, 设目标最高点离海面的高度为 h , 则 $p(z)$ 满足

$$\int_0^h p(z) dz = 1 \quad (2)$$

将目标在高度 h 上 N 等分,则当 N 足够大时,每等份可视为点目标,高度为 $n \Delta z (n = 0, 1, \dots, N-1)$ 的部分其 RCS 为

$$\sigma_n = p(n \Delta z) \cdot \Delta z \cdot \sigma \quad (3)$$

则此时雷达接收到的目标回波功率 P_r 为

$$P_r = \sum_{n=0}^{N-1} \frac{P_t G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 L_s L_a(R)} p(n \Delta z) \cdot \Delta z \cdot F^4(n \Delta z, R) \quad (4)$$

当 N 足够大时,目标雷达回波功率为

$$P_r = \frac{P_t G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 L_s L_a(R)} \int_0^h p(z) \cdot F^4(z, R) dz \quad (5)$$

由式(5)知电磁波传播距离为 R 时单程损耗为

$$L(R) = 20 \lg\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) - 5 \lg \int_0^h p(z) \cdot F^4(z, R) dz + L_a(R) \quad (6)$$

以 dBW 表示雷达接收到的目标回波功率,则雷达方程变为

$$P_r = P_t + 2G + 10 \lg\left(\frac{4\pi\sigma}{\lambda^2}\right) - L_s - 2L(R) \quad (7)$$

其中 P_r 和 P_t 的单位为 dBW, $G, L_s, L(R)$ 的单位为 dB, λ 的单位为 m, σ 的单位为 m^2 .

雷达接收机灵敏度 S_{\min} 可由发现概率、虚警概率和雷达参数决定,当 $P_r = S_{\min}$, 有 $R = R_{\max}$, 定义单程损耗门限

$$L_T = 1/2 [P_t + 2G + 10 \lg(4\pi\sigma/\lambda^2) - L_s - S_{\min}] \quad (8)$$

则当 $L(R) = L_T$, 有 $R = R_{\max}$, 即得到雷达对海面目标的最远探测距离.

上述预报方法的改进在于将目标作为高度上多散射中心的分布式目标,即引入了目标 RCS 高度分布模型来描述目标不同高度部分对电磁波的后向散射效应.目前,对目标 RCS 的研究还集中于其随电磁波入射角变化情况的研究,即研究不同方位角上目标 RCS 的变化,目标 RCS 在高度上的分布相关研究还处于空白,没有可用的理论研究结果,对其进行实际的测量难度也较大,在实际应用中,只能根据目标空间体积的分布进行估算.

3 与实测数据的比较

2007 年 10 月 9 日,在南海某海域进行了微波超视距雷达最远探测距离海上拉距实验,此时岸基实验雷达为某导航雷达,天线架高 20 m,工作于 X 波段,具体参数见表 1. 目标船为中型船只,满载排水量 1700 t,利用 Skolnik 给出的海上舰船目标 RCS 估算公式^[5],得到目标船只的 RCS 估算值为 10 000 m^2 ,考虑到舰船上部结构和桅杆是主要散射体,目标船主甲板离海面高度为 3 m,最高点距海面 20 m,因此计算时采用类似高斯分布的 RCS 高度分布模型,高度上各部分 RCS 占总的 RCS 的比例如图 2 所示.

表 1 实验雷达参数表

雷达参数	数值	雷达参数	数值
脉冲重频/Hz	500	天线垂直波束宽度/(°)	1
脉宽/ μs	0.2	天线极化方式	水平极化
天线仰角/(°)	0	天线波束形状	SINX/X
天线水平波束宽度/(°)	1	接收机噪声系数/dB	3

实验时海水表面温度、6 m 高处的大气温度、相对湿度及风速等气象参数由海用型自动气象站采集得到,采集间隔为 10 min 采集一次. 利用上述参数监测蒸发波导的变化,同时对目标进行不间断的观测,记录下目标出现和消失的时间和距离.

利用上述模型,根据测量得到的气象水文参数监测蒸发波导高度和大气层结的变化,最终计算得到检测概率 90%、虚警概率 10^{-6} 下雷达最远作用距离预报值与实际观测值,如表 2 所示.

由计算结果可见,雷达最大探测距离预报值与实际观测值虽存在一定偏差,但二者比较接近.由于目标船的 RCS 只是估算值,难以得到其精确值,且其 RCS 在垂直高度上的分布也难以确定,目标建模存在误差.另外也没有考虑目标 RCS 随方位角的变化,因此预报值与实际观测值存在一定的误差.

作为对比,表 2 同时也给出了未作修正时模型的预报结果,此时将目标船看成是离海面 10 m 高的理想点目标,其 RCS 为 $10\,000\text{ m}^2$.从计算结果可以看出,此时未修正模型的预报与实际观测结果也比较接近,说明若等效高度选得合适,未修正模型的预报也具有一定的准确性.另外,由于修正后预报模型采用的目标 RCS 高度分布模型使用的是中心在 10 m 的近似高斯分布,目标 RCS 主要集中在 10 m 高度上,因此修正前后预报结果相差不大.

表 2 实际观测结果与模型预报结果比较

观测时间	监测得到蒸发波导高度/m	未修正模型预报最大探测距离/km	修正后预报最大探测距离/km	实际观测值/km
05:00	5.4337	48.7	49.2	55
09:12	10.1690	123.9	121.4	106
13:16	17.4200	123.6	115.0	107
15:16	17.0040	109.8	100.2	111
17:18	16.1370	82.9	88.8	79
21:14	9.2100	92.5	92.0	85
23:15	6.7400	57.8	57.8	79

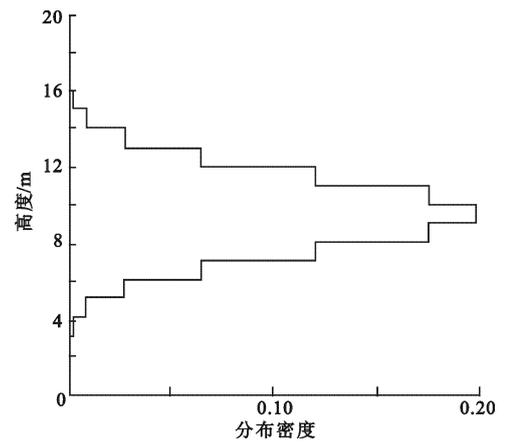


图 2 目标船 RCS 高度分布示意图

4 总 结

蒸发波导环境中预报微波超视距雷达对海上舰船目标的最远探测距离仍然基于雷达方程,此时在方程中引入传播因子来描述环境对雷达探测距离的影响.由于传播因子是高度的函数,而海面舰船目标又具有一定高度,目标不同高度部分对电磁波后向散射的效应不同,因此在目标建模时,应用垂直高度上的多散射中心模型来模拟目标,目标的后向散射是多个散射中心共同作用的结果,即用垂直高度上目标 RCS 的分布来替代理想的点目标 RCS 模型.

修正后的预报模型的雷达最远探测距离预报值与实际观测值具有较好的一致性,预报的准确度得到了提高.由于目前对雷达目标 RCS 高度分布模型的研究还较少,目标 RCS 的准确预估也难以做到,因此修正后的预报模型仍然与实测结果存在偏差,这需要后续相关的研究进一步完善.

参考文献:

- [1] 察豪, 史建伟, 张萍. 蒸发波导条件下雷达探测距离的估计方法[J]. 现代雷达, 2006, 28(9): 5-7.
Cha Hao, Shi Jianwei, Zhang Ping. Calculation of Radar Detection Range in Condition of Evaporation Duct[J]. Modern Radar, 2006, 28(9): 5-7.
- [2] 赵小龙, 黄际英, 王海华. 蒸发波导环境中的雷达探测性能分析[J]. 电波科学学报, 2006, 21(6): 891-894.
Zhao Xiaolong, Huang Jiying, Wang Haihua. Analysis of Radar Detection Ability in Evaporation Duct Environment [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2006, 21(6): 891-894.

- [3] 黄小毛, 张永刚, 王华, 等. 蒸发波导环境下雷达超视距性能评估方法[J]. 电子科技大学学报, 2007, 36(1): 36-39.
Huang Xiaomao, Zhang Yonggang, Wang Hua, et al. A Method of Evaluating Radar OTH Performance in Evaporation Duct Environments [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2007, 36(1): 36-39.
- [4] 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, Zhang Yonggang. Prediction of the Electromagnetic Shadow Zone under the Atmospheric Duct [J]. Journal of XiDian University, 2007, 34(6): 989-994.
- [5] Skolnik M I. An Empirical Formula for the Radar Cross Section of Ships at Grazing Incidence [J]. IEEE Trans on Aerospace Electron Syst, 1974(3): 292.

(编辑: 郭 华)

(上接第 695 页)

- [3] 李夏, 李建东. 无线传播特性的实时估计[J]. 西安电子科技大学学报, 2001, 28(2): 137-146.
Li Xia, Li Jiandong. An In-service Estimation Scheme for Radio Propagation Path Characteristics for an Adaptive Transmission System [J]. Journal of Xidian University, 2001, 28(2): 137-146.
- [4] 李夏, 李建东, 栾英姿. 移动信道信噪比估计方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2001, 28(6): 820-823.
Li Xia, Li Jiandong, Luan Yingzi. Estimation of the Signal-to-interference Ratio in a Mobile Channel [J]. Journal of Xidian University, 2001, 28(6): 820-823.
- [5] 杨大成. 移动传播环境[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 35-279.
- [6] Kita N, Yamada W, Sato A. Path Loss Prediction Model for the Over-Rooftop Propagation Environment of Microwave Band in Suburban Areas[J]. Electronics and Communications in Japan, 2007, 90(1): 13-24.
- [7] Molisch A F, Balakrishman K. IEEE 802.15.4a Channel Model-final Report[DB/OL]. [2008-07-10]. <http://www.ieee802.org/15/pub/TG49.html>.
- [8] Texas Instruments. Texas Instruments CC2430 Preliminary Data Sheet[R]. Dallas: Texas Instrument, 2006: 12-17.

(编辑: 齐淑娟)