

海面雷达最大探测距离分布规律快速计算方法研究

田树森 察豪 周沫 刘爱国
(海军工程大学海洋电磁环境研究所 武汉 430033)

摘要:为解决海面雷达最大探测距离分布规律计算耗时过长的问题,论文首先分析蒸发波导条件下雷达最大探测距离计算方法的特性,给出蒸发波导高度、理查森数和风速对雷达最大探测距离的影响,随后在此基础上提出用查表法计算每条海面气象水文记录对应的雷达最大探测距离,并总结出构建标准距离表的原则。利用查表法很大程度上缩短了计算时间,计算结果与直接计算偏差较小,能满足快速建立海面雷达最大探测距离分布规律的需要。

关键词: 雷达最大探测距离; 抛物方程; 折射率剖面; 查表法

中图分类号: TN959.72

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)08-1872-04

The Method Study on Calculating Quickly the Distribution of Radar Detection Range over Sea

Tian Shu-sen Cha Hao Zhou Mo Liu Ai-guo

(Institute of Ocean Electromagnetic Environment, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: To solve the problem of too much time spending on calculating the distribution of radar detection range over sea, firstly, the method characteristic of calculating radar detection range in condition of evaporation duct is described, the influence of evaporation duct height, the bulk Richardson number and wind speed on radar detection range is presented, then consulting table method based on this influence is advised to use for calculating radar detection range of each weather record over sea and the principle of constructing standard radar detection range table is outlined. The calculating time is greatly shorten by means of consulting table method, the result difference between consulting table method and that of direct calculation is small, so this method can meet the requirement of summarizing the distribution of radar detection range over sea quickly.

Key words: Radar detection range; Parabolic Equation (PE); Refractive profile; Consulting table method

1 引言

海面雷达最大探测距离受大气波导影响, 有较大的起伏^[1]。而蒸发波导是海面出现概率最高的一种波导形式, 它是由海面水汽随高度上升锐减造成的。蒸发波导在每个海区、每个季节和每个时段存在着一定的分布规律^[2,3], 受其影响, 每一型海面雷达的最大探测距离也同样存在着与海区、季节、时段相关的分布规律, 这些规律对于雷达的使用、配置与部署等决策具有重要参考价值。

研究海上雷达最大探测距离分布规律需要先计算雷达在每个地理方格上、每个季节、每个时段各条海面气象水文记录对应的最大探测距离, 然后对结果按距离段分别统计, 距离统计间隔为 20 km。雷达最大探测距离计算方法根据原始气象水文数据和雷达参数由蒸发波导模型、电磁波传播衰减计算方法和雷达方程得到^[4,5]。在计算电磁波传播衰减时采用抛物方程(PE)法^[6,7], 由于 PE 能提供距离相关

环境下波动方程的全波解, 且一般采用分步傅里叶算法, 所以速度较快, 但在现在普通性能 PC 机上执行一次运算的时间仍约需 15 s。当计算中国海域雷达最大探测距离分布规律时, 由于近 50 年来收集到的有效海面气象水文记录约有 410 万条, 对于一型雷达及确定的架设高度, 用一台普通 PC 机完成所有运算, 大约需要 18000 h, 这相当于同时用 30 台普通 PC 昼夜不停地运算, 需要近 1 个月的时间。一旦雷达参数或架设条件中任意一个量发生变化, 都需要重复以上计算才能重新得到最大探测距离的分布规律。如果把规律计算的数据范围扩展到全球, 那所需的计算时间将是一个更惊人的数字。为解决雷达最大探测距离分布规律计算耗时过长的问题, 需要具体分析雷达最大探测距离计算方法的特性, 并在此基础上寻找能减少计算时间的快速算法。

2 雷达最大探测距离计算方法特性分析

2.1 雷达最大探测距离算法分析

雷达方程中计算最大探测距离的关键因素是传播因子, 而传播因子可根据折射率剖面 and 雷达参数

经 PE 计算得出。如果折射率剖面相同, 当雷达参数及其架设条件固定时, 影响 PE 计算结果的量主要就是海浪对电磁波散射的影响, 而风对海浪的作用可通过计算模型模拟^[7]。也就是说对于指定雷达, 最大探测距离完全由折射率剖面和风速等环境因素决定。

蒸发波导模型选用被广泛应用的 Paulus-Jeske 模型(简称 P-J 模型)^[8], 折射率剖面模型如式(1)^[9]

$$M(Z) = M(Z_0) + 0.125Z - 0.125Z_0 - 0.125 \frac{d}{\Phi(d/L)} \int_{z_0}^z \frac{\Phi(Z'/L)}{Z'} dZ' \quad (1)$$

$M(Z)$ 为 Z 高度处大气修正折射指数, Z_0 为粗糙度参数, P-J 模型假设 $Z_0 = 0.00015 \text{ m}$, $M(Z_0)$ 为 Z_0 高度处大气修正折射指数, d 为蒸发波导高度, Φ 为普适函数。 L 为莫宁长度, 它的倒数满足式(2)

$$\frac{1}{L} = \frac{R_{ib}}{10z\Gamma_e} \quad (2)$$

R_{ib} 为理查森数, 反映大气层结的稳定性, 当 $R_{ib} > 0$ 时表示稳定层结, $R_{ib} = 0$ 时表示中性层结, $R_{ib} < 0$ 表示不稳定层结。 Γ_e 是经验剖面系数, 它与 R_{ib} 的关系如式(3)所示^[10]。

$$\left. \begin{aligned} \Gamma_e &= 0.05, & R_{ib} &\leq -3.75 \\ \Gamma_e &= 0.065 + 0.004R_{ib}, & -3.75 < R_{ib} \leq -0.12 \\ \Gamma_e &= 0.109 + 0.367R_{ib}, & -0.12 < R_{ib} \leq 0.14 \\ \Gamma_e &= 0.155 + 0.021R_{ib}, & 0.14 < R_{ib} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

可以看出, 折射率剖面实际上是由 $M(Z_0)$, d 和 R_{ib} 3 个量决定, $M(Z_0)$ 决定折射率剖面位置, d 和 R_{ib} 决定剖面形状。 d 和 R_{ib} 作为中间量可由温度、湿度、气压、风速和海表温度等海面气象水文参数经 P-J 模型计算得出^[10]

为研究各因素对雷达最大探测距离影响, 本文仿真条件中雷达参数如表 1 所示, 当计算距离超过 300 km 时, 认为最大探测距离为 300 km。

表 1 雷达参数

参数名称	取值
天线垂直波束宽度(°)	17
天线仰角(°)	0
频率(MHz)	9050
极化方式	水平极化
天线架设高度(m)	20
天线类型	高斯
天线增益(dB)	30
噪声系数(dB)	3
发射功率(kW)	230

另外在对收集的海面气象水文数据的统计中发现, 所有 R_{ib} 大于 0.1 记录对应的蒸发波导高度小于 5 m; 所有 R_{ib} 小于 -5 记录对应的蒸发波导高度小于 15 m。该规律是确定各要素取值范围的一个重要依据。

首先分析 $M(Z_0)$ 对雷达最大探测距离的影响。取蒸发波导高度为 18 m, 风速为 5 m/s, R_{ib} 为 0, 0.03, -0.16, 分别代表中性层结、稳定层结和不稳定层结; $M(Z_0)$ 取值范围为 340 到 370, 以 5 为步长。不同剖面位置对应最大探测距离如图 1 所示。

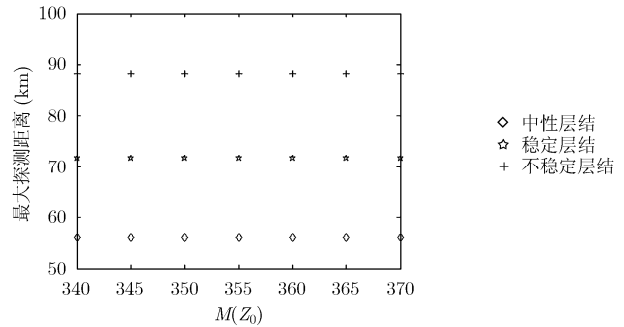


图 1 不同剖面位置对应最大探测距离

可以看出, 剖面位置对最大探测距离计算结果没有影响, 有影响的只是剖面形状, 也就是 $M(Z)$ 在高度上的梯度。因此, 当雷达参数及架设条件等固定时, 决定最大探测距离量只有 3 个: 蒸发波导高度, R_{ib} 和风速, 下面着重分析这 3 个量对最大探测距离的影响。

2.2 蒸发波导高度对雷达最大探测距离的影响

不同大气层结条件下, 蒸发波导高度对雷达最大探测距离影响也不同。 R_{ib} 取值为 0, 0.03, -0.16, 分别代表中性层结、稳定层结、不稳定层结; 风速为 5 m/s, 蒸发波导高度取值范围为 0 到 40 m, 0.5 m 为步长。不同蒸发波导高度对应的最大探测距离如图 2 所示。

可以看出, 当蒸发波导高度小于 10 m 时, 最大

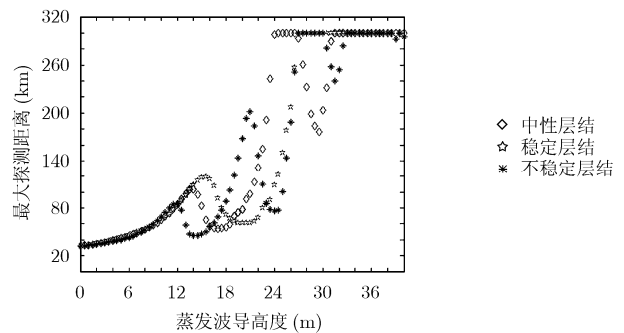


图 2 不同蒸发波导高度对应最大探测距离

探测距离随波导高度增加缓慢变大,并且受层结稳定性影响较小;当蒸发波导高度大于10 m时,最大探测距离随波导高度增加有较快速度的变化,在某些高度附近有波动,并且受层结稳定性的影响较大。

2.3 理查森数 R_{ib} 对雷达最大探测距离的影响

由于雷达天线架高为20 m,考虑到蒸发波导高度与天线之间的相对位置,波导高度取10 m,15 m,20 m,25 m 4个值,理查森数 R_{ib} 的取值范围为-10到1,当 R_{ib} 位于-10到-1时,以1为步长,当 R_{ib} 位于-1到1时,以0.1为步长,风速为5 m/s。对应最大探测距离如图3和图4所示。

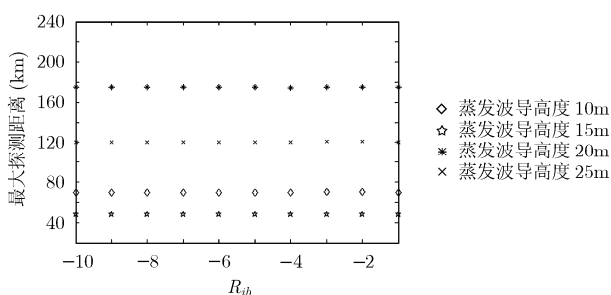


图3 R_{ib} 由-10到-1变化对应最大探测距离

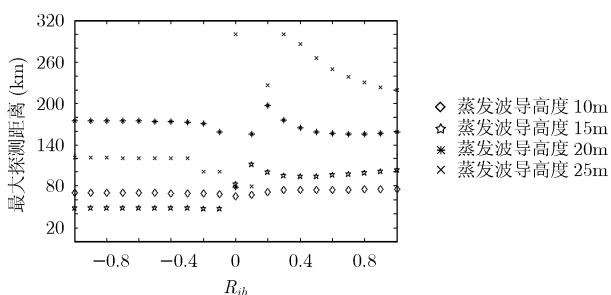


图4 R_{ib} 由-1到1变化对应最大探测距离

可以看出,当波导高度为10 m时, R_{ib} 的变化对最大探测距离影响较小;对于其它3个波导高度,当 R_{ib} 小于-0.3时,最大探测距离基本同 R_{ib} 为-0.3时最大探测距离;当 R_{ib} 处于-0.3到0.3范围之内时, R_{ib} 的微小变化会带来距离较大的变动。

2.4 风速对雷达最大探测距离的影响

蒸发波导高度取受 R_{ib} 变化影响较小的10 m和在-0.3到0.3范围内变化影响较大的18 m,其中10 m蒸发波导高度 R_{ib} 取值为0;18 m蒸发波导高度 R_{ib} 取值为-0.3, -0.1, 0, 0.05;风速取值范围为0到20 m/s, 0.5 m/s为步长。不同风速对应最大探测距离如图5所示。

可以看出,对于10 m蒸发波导高度,当风速在10 m/s以下变化时,最大探测距离几乎不变,当风速超过10 m/s继续增加时,最大探测距离缓慢变

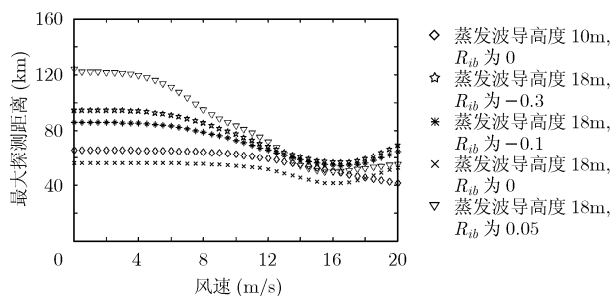


图5 不同风速对应最大探测距离

小。对于18 m蒸发波导高度,在 R_{ib} 为0情况下,当风速在10 m/s以下变化时,最大探测距离几乎不变,当风速超过10 m/s继续增加时,最大探测距离缓慢变化,并且有波动;对于 R_{ib} 为其它3个取值,当风速在5 m/s以下变化时,最大探测距离几乎不变,当风速在5 m/s到15 m/s缓慢增加时,最大探测距离以较快的速度变小,当风速超过15 m/s增加时,最大探测距离又缓慢增加。

总结以上分析,可以将许多计算出来的折射率剖面合并,也可以将许多风速条件合并,这样只需计算一些典型折射率剖面形状和风速条件下的雷达最大探测距离,并用它们替代其它条件下的计算结果。

3 查表法

根据以上对雷达最大探测距离计算方法特性的分析,为减少计算时间,采用查表法计算雷达最大探测距离。所谓查表法,首先需要建立一个能提供所有典型折射率剖面形状和风速条件下雷达最大探测距离的标准距离表,每条记录的索引值由蒸发波导高度、 R_{ib} 和风速三者共同构成。在计算雷达最大探测距离时,首先根据气象水文记录计算对应的查表索引值,然后查标准距离表,把索引值对应的雷达最大探测距离值作为该条记录的雷达最大探测距离。

依照上述分析的3个量对本文参数雷达的最大探测距离影响特性曲线,可确定该雷达标准距离表的构建原则如下:

(1)当蒸发波导高度不超过10 m时:波导高度取步长为1 m;不考虑层结稳定性影响, R_{ib} 取值为0;风速小于10 m/s时,取值为10 m/s,风速位于10到15 m/s范围内时,取值为15 m/s,风速在15到20 m/s范围内变化时,取值为18 m/s。

(2)当蒸发波导高度超过10 m时:波导高度取步长为0.5 m;需要考虑层结稳定性影响,当 R_{ib} 小于-0.3时, R_{ib} 取值为-0.3,当 R_{ib} 位于-0.3到0.3范围内时,取步长为0.01,结合前述对海面气象水

文数据规律的统计,当 R_{ib} 大于 0.1 时,蒸发波导高度均小于 5 m,所以 R_{ib} 最大值取 0.1 即可;风速小于 5 m/s 时,取值为 5 m/s,风速位于 5 到 15 m/s 范围内时,取步长为 0.2 m/s,风速位于 15 到 20 m/s 范围内时,取步长为 1 m/s。

对于其它型号雷达,可用相同的分析方法得到构建距离标准表的原则。

4 结果验证

运用查表法,10 台 PC 机连续工作 1.5 个昼夜完成了某型号雷达标准距离表的构建和中国海域近 50 年来的海面气象水文记录对应的雷达最大探测距离分布规律计算,很大程度上缩短了计算时间。南海某海域发现距离大于指定距离直接计算与查表法计算结果百分比概率差如图 6 所示。

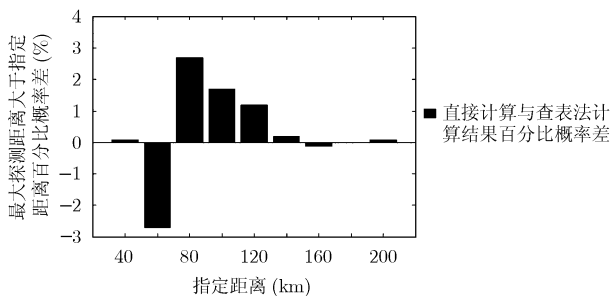


图 6 发现距离大于指定距离直接计算与查表法计算结果百分比概率差

可见查表法所得结果与直接计算偏差较小。

5 结束语

查表法的实质是用典型折射率剖面形状和风速条件下的雷达最大探测距离值来替代其它条件下的计算结果。利用查表法计算大批量海面气象水文记录对应雷达最大探测距离,很大程度上缩短了计算时间,计算结果与直接计算偏差较小,能满足快速建立海面雷达最大探测距离分布规律的需要。特别是当要计算的雷达型号较多或者海面气象水文记录的地域范围很大时,查表法在节省计算时间方面的优势就表现得更加突出。

参考文献

- [1] 田斌. 蒸发波导对雷达探测距离的影响[J]. 微计算机信息, 2007, 23(1): 145-146, 164.
Tian Bin. The influence of the evaporation duct on the detecting range of radars [J]. *Control & Automation*, 2007, 23(1): 145-146, 164.
- [2] 蔺发军. 海上大气波导的统计分析[J]. 电波科学学报, 2005, 20(1): 64-68.
Lin Fa-jun. Statistical analysis of marine atmospheric duct [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2005, 20(1): 64-68.
- [3] 唐海川. 黄海部分海域大气波导分布规律及成因[J]. 海洋技术, 2008, 27(1): 115-117, 128.
Tang Hai-chuan. Atmospheric duct distribution feature and origin in the partial sea area of yellow sea[J]. *Ocean Technology*, 2008, 27(1): 115-117, 128.
- [4] 察豪. 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. Calculation of radar detection range in condition of evaporation Duct[J]. *Modern Radar*, 2006, 28(9): 5-7.
- [5] 黄小毛. 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 Xiao-mao. 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.
- [6] 王红光. 大气波导传播的抛物方程模型研究综述[J]. 装备环境工程, 2008, 5(1): 11-15.
Wang Hong-guang. Overview on parabolic equation model research for atmospheric duct propagation[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2008, 5(1): 11-15.
- [7] Levy M. Parabolic Equation Method for Electromagnetic Wave Propagation[M]. London: IEE Press, 2000: 16-106.
- [8] Paulus R A. Practical application of an evaporation duct model[J]. *Radio Science*, 1985, 20(4): 887-896.
- [9] 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, 1998, 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.
- [10] 戴福山. 海上蒸发波导高度的确定及其敏感性试验[J]. 空军气象学院学报, 1997, 18(4): 290-301.
Dai Fu-shan. Calculation and sensitivity test of evaporation duct height over sea [J]. *Journal of the AIR Force Institute of Meteorology*, 1997, 18(4): 290-301.

田树森: 男, 1980 年生, 博士生, 研究方向为海洋大气环境下的雷达探测规律。

察豪: 男, 1966 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达总体技术。

周沫: 男, 1971 年生, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为雷达信号处理。

刘爱国: 男, 1975 年生, 博士生, 研究方向为海洋大气环境下的电磁波传播。