

蒸发波导中电磁波异常传播特征研究及其应用

黄小毛 张永刚 王 华 唐海川
(海军大连舰艇学院海洋与测绘科学系 大连 116018)

摘 要 蒸发波导是海洋大气环境中一种典型的异常大气折射结构。它能够部分地陷获电磁波的传播,从而改变电磁波的传播特征。这种特性在雷达、通信、电子对抗等设备的使用方面具有广泛的应用。该文主要利用电磁波传播的抛物型数值方程和裂步傅里叶算法,通过仿真方法研究了蒸发波导环境下电磁波所具有的异常传播特征,并利用 2003 年 8 月大连海域的雷达异常探测试验作为应用实例,说明了蒸发波导对电磁波异常传播以及对雷达异常性能的影响。

关键词 电磁波, 蒸发波导, 异常传播特征, 雷达, 性能评估

中图分类号: TN011

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)08-1508-05

Study on Anomalous Propagation Characteristics of Electromagnetic Waves in Evaporation Duct Environments and its Application

Huang Xiao-mao Zhang Yong-gang Wang Hua Tang Hai-chuan
(Dept. of Ocean and Mapping Science, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China)

Abstract Evaporation duct is a kind of typical anomalous profile of atmospheric refractivity, it can partly trap electromagnetic waves, as a result, the propagation characteristics are changed, which may be applied in electronic equipments such as radar, communication and ECM, etc. The purpose of this article is to study on anomalous characteristics of electromagnetic waves in evaporation duct environment through simulation methods based on electromagnetic waves propagation parabolic numerical equation and split-step Fourier algorithm technology. The experimental data of radar abnormal detection in Dalian Sea Area in October of 2003 is analyzed as an example of application to validate the abnormal characteristics of the electromagnetic waves and the anomalous detection of radar influenced by evaporation ducts.

Key words Electromagnetic wave, Evaporation duct, Anomalous propagation characteristics, Radar, Performance evaluation

1 引言

蒸发波导是海洋环境中最经常出现的异常大气折射结构,蒸发波导的形成是由于海水蒸发形成的海面上一定高度内所具有的大气湿度随高度锐减分布结构。文献[1]的DCS(Ducting Climatology Summary)利用世界范围无线电观测站资料对全球海域进行的大气波导发生规律的统计,世界几乎所有海域几乎所有时间内都可能存在蒸发波导,其发生的高度和强度随地理纬度、季节、一日内不同时间而变化,一般是在低纬度海域、夏季、白天蒸发波导高度较高。

蒸发波导能够陷获电磁波,这种效应使得电磁波部分能量被限制在波导层内传播,从而形成与标准大气折射环境下截然不同的传播特征。国内的蒸发波导研究主要偏重于蒸发波导的机制、测量技术以及统计规律等研究,如文献[2]研究了蒸发波导的形成以及波导特征量的计算方法,文献[3]通过试验调查了我国部分海域大气波导发生规律。事实上,蒸发波导环境下电磁波的异常传播特征研究属于交叉学科,国内文献[4]从原理上研究了大气波导对电磁波传播影响,但没有

进行量化研究和试验。本文针对蒸发波导环境对电磁波传播的影响,运用电磁波传播的抛物近似数值方程技术,通过仿真的方法,定量地研究蒸发波导环境下电磁波的异常传播特征(第 2 节);通过将电磁波传播的数值模型与雷达的基本理论相结合,应用于 2003 年 8 月大连海域的雷达异常探测试验的数据分析当中(第 3 节);模型的结果与试验的实际效果比较一致,验证了模型的同时也证明了蒸发波导环境下雷达所具有的超视距探测能力,最后给出了相关的结论。

2 蒸发波导中电磁波异常传播特征的数值分析

2.1 电磁波传播的抛物近似数值方程

抛物近似方程代替电磁波的海姆霍兹波动方程的数值模型,早在 80 年代就开始应用于电磁波异常传播规律研究了,经过文献[5, 6]等科学家的不断丰富和完善,目前得到了广泛的应用。

2.1.1 电磁波传播的抛物近似数值模型 依据麦克斯韦方程组,电磁波的电场和磁场分量具有对称的特性,以垂直电极子 VED 为例,在无源介质中,磁场 $\mathbf{H}$ 的矢量波动方程的形式为

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{H} - \frac{\nabla \varepsilon}{\varepsilon} \times \nabla \times \mathbf{H} - \omega^2 \mu \varepsilon \mathbf{H} = 0 \quad (1)$$

ε 为介电常数; μ 为磁导系数; ω 为角频率。将式(1)去矢量化, 通过 Fock 置换方案: $H_\theta(r, \theta) = \varepsilon^\beta (\sin \theta)^\gamma r^\nu U(r, \theta)$, 其中 β, γ, ν 都是待定的常数, 研究人员对参数的选择略有不同, 但其本质一致, 都能够得到海姆霍兹波动方程。这里选择 $\beta = 1/2, \gamma = -1/2, \nu = -1/2$, 同时将方程通过直角坐标投影公式 $z \approx r - a_e, x \approx a_e \theta$ (a_e 为地球半径, z, x 分别为球地面的高度和距离) 转化到直角坐标系中, 并作假设(抛物近似处理): $|\partial_x^2 u| \ll k |\partial_x u|$, 即忽略掉 $\partial_x^2 u$ 项, 这样得到具有简单形式的电磁波传播的抛物近似的微分方程:

$$\partial_z^2 u + 2ik \partial_x u + k^2 (n^2 - 1 + 2z/a_e) u = 0 \quad (2)$$

对于水平电极子 HED 来说, 同样利用这种抛物近似的方法可以得到式(2)同样的形式。式(2)中 n 为大气折射指数, u 为磁场或电场场强。式(2)说明了辐射源在距离-高度空间内的电磁波传播状况(电场和磁场分量的大小), 对于水平极化和垂直极化的辐射源都适用, 这里没有考虑方位上的变化, 主要基于“大气折射是水平均匀的”这一假设(现实海洋大气环境常常能满足这一特征)。上述抛物近似处理在偏离水平方向大于 15° 的传播方向上会带来相速误差, 而大气介质中, 大气折射廓线的梯度较小, 能够陷获的角度极少超过 1° 。因此对于大于 15° 角以及所关心的区域(如高天线远区域), 折射率效应不重要, 则可以使用其它传播模拟方法。

2.1.2 裂步傅里叶数值算法技术 式(2)结合准确的边界条件和初始值, 可以利用步进类型的数值方法求解, 给定 x_0 处的解, 数值解法可以提供所有 $x > x_0$ 处的解。方程(2)中, 将 $m^2 = n^2 - 1 + 2z/a_e$ 看作常数, 已知 x_0 的解 $u(x_0, z)$, 对其作傅里叶变换得到(F代表傅里叶变换, F^{-1} 代表傅里叶反变换):

$$U(x_0, p) = F[u(x_0, z)] = \int_{-\infty}^{\infty} u(x_0, z) e^{-ipz} dz \quad (3)$$

对于距离增加 δx 量的解, 则对应在 p 空间增加一个相位因子, 作傅里叶反变换得到:

$$u(x_0 + \delta x, z) = \exp \left[i \frac{k}{2} (m^2 - 1) \delta x \right] \cdot F^{-1} \left\{ \exp \left[-i \frac{p^2 \delta x}{2k} \right] U(x_0, p) \right\} \quad (4)$$

同理可以得到 $u(x_0 + 2\delta x, z), u(x_0 + 3\delta x, z), \dots$ 的解, 数值解的误差与距离增量 δx 有关, 将 δx 限制在一定的范围内可以求解满足精度的数值解。上述解法通常依靠快速傅里叶变换算法 FFT 来实现, FFT 是有限算法, 要求知道傅里叶变换的上下边值。下边界与数值方程的边界条件一致, 而上边界的人为指定将使电磁波在突然增加的截断面上形成非物理性边界条件强反射, 解决这个问题的方法是在最大高度上加上“吸收”区域并使用窗口函数(如使用 Hamming 滤波器, z 空间的通带是 $0 \leq z \leq z_{\max}$)来实现。另外, 文献[6]给出了数值方程的详细的边界条件以及初始场的计算方法, 这里不再赘述。

2.2 仿真方法分析蒸发波导中电磁波的异常传播特征

利用上述数值模型和方法, 我们对不同蒸发波导环境下雷达电磁波传播进行仿真。蒸发波导高度分别为 0, 10, 20, 30m(0m 高为标准大气), 其大气修正折射率(M)的廓线结构(高度分布), 如图 1 所示(图中显示最大高度 100m, 超过部分通常使用标准大气折射梯度插值); 辐射源频率 5600MHz, 卡塞格伦天线, 水平极化, 垂直波束宽度 16° , 抬升角 0.0° , 天线高度 14.5m。网格点设置为: 高度范围 0~200m, 间隔 0.5m, 400 个高度点, 距离范围 0~200km, 间隔 0.5km, 400 个距离点; 分别对 4 种蒸发波导环境进行雷达电磁波传播数值模拟, 得到单程传播损失如图 2 所示。不同高度的蒸发波导条件下电磁波的传播特征具有明显不同。

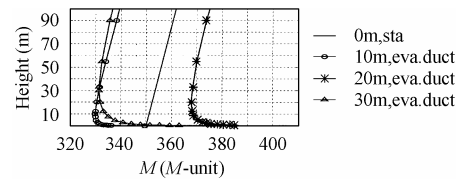


图 1 4 种蒸发波导的修正折射率廓线

Fig.1 Modified refractivity profile of four evaporate ducts

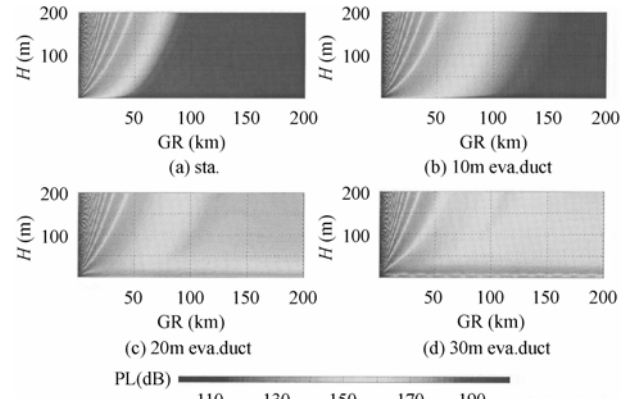


图 2 不同波导环境下雷达电磁波传播损耗的分布图

Fig.2 One-way propagation loss distribution in different evaporate duct environments

图 2 中, 横坐标为地面距离 GR(km), 纵坐标为高度 H(m), 颜色索引为单程传播损耗 PL(dB), 从图 2 的对比可看出蒸发波导对电磁波异常传播的影响: (1)与标准大气环境下(图 2(a)), 大气波导能否陷获电磁波与波导高度(波导高度与雷达天线高度的相对位置)有关, 波导高度 10m(图 2(b))低于雷达天线高度, 对电磁波不能产生陷获作用, 波导高度分别为 20、30m(图 2(c)、2(d)), 高于雷达天线高度, 对电磁波产生陷获作用, 波导层内的电磁波传播损失衰减很小。(2)10m 的蒸发波导层内虽然不能陷获电磁波(图 2(b)), 但与标准大气环境下相比, 波导层对电磁波单程传播损失的空间分布还是存在一定的“向前扭曲”, 其程度与蒸发波导的高度有关, 这种“扭曲”到达一定程度时(临界状态)就形成陷获传播。(3)不同高度的蒸发波导对电磁波具有的不同的陷获能力, 20m

的波导层(图2(c))与30m的波导层(图2(d))内,电磁波的传播衰减都比较小,但是30m蒸发波导的陷获能力明显比20m蒸发波导的要强,波导层内平均衰减的速率要相对要慢。(4)蒸发波导陷获雷达电磁波都发生在极低仰角上(蒸发波导的最大陷获仰角绝对值普遍小于 0.1°),对于其它仰角上都不能发生陷获作用,主要是由于大气波导是介质波导,主要依靠大气的折射来实现电磁波的导行的。

3 异常传播特征的应用和试验

蒸发波导环境下电磁波的这种异常传播特性对所有依靠电磁波传播来实现其功能的电子装备都具有影响,如雷达、通信、电子侦察以及电子对抗等。本文举例分析蒸发波导环境下电磁波异常传播特征对雷达异常性能影响来说明上述异常传播特征的应用。

3.1 传播损失空间分布应用于雷达性能评估

在满足一定探测概率 P_d 和虚警率 P_{fa} 的前提下(详见参考文献[7, 8]),雷达接收到目标回波大于等于雷达最小可检测信号时,认为雷达能够探测到目标。依据文献[7, 8]中雷达探测的理论,雷达信号检测因子定义为雷达最小可检测信噪比 $D_0 = (S/N)_{\min}$,是 P_d , P_{fa} 和脉冲积累数 N_p 的函数,文献[8]中给出了 D_0 计算方法:

$$\left. \begin{aligned} D_0 &= \frac{L_f x_0}{4N_p} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{16N_p}{x_0}} \right) \quad (\text{非相参脉冲积累}) \\ D_0 &= \frac{L_f x_0}{4N_p} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{16}{x_0}} \right) \quad (\text{相参脉冲积累}) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式(5)中, $x_0 = (g_{fa} + g_d)^2$ ($g_{fa} = 2.36\sqrt{-\lg(P_{fa})} - 1.02$, $g_d = 1.23t/\sqrt{1-t^2}$, $t = 0.9(2P_d - 1)$)。 L_f 为目标波动损耗,对于无波动目标有: $L_f = 1$,对于波动目标(如斯威尔林模型1, chi平方律等)有: $L_f = -(\ln(P_d)(1 + g_d/g_{fa}))^{-1}$ 。 N_p 为脉冲积累数,对于机械扫描的雷达,有 $N_p = \Theta_H f_p / (6\phi_h \cos\theta_0)$,其中 Θ_H 是水平波束宽度($^\circ$); f_p 是脉冲重复频率(Hz); ϕ_h 是天线水平方向扫描速度(rpm); θ_0 是目标仰角($^\circ$)(对于低空目标近似为 0°);而对于电扫描的雷达,脉冲积累数则由程序设定。

假设雷达接收机性能系统只受噪声的影响,则雷达(收发共置)对目标的最小可检测信号以及接收到的回波功率分别为

$$S_{i\min} = kT_0 B_n F_0 D_0 = -143.98 + 10\lg B_n + F_0 + 10\lg(D_0) \quad (6)$$

$$P_r = -73.43 + 10\lg \left(\frac{P_t \sigma}{R^4 f^2} F^4 \right) + 2G - L_s \quad (7)$$

式(6),式(7)中, B_n 为接收机带宽(MHz),与脉宽 τ 满足关系: $B_n \approx 1/\tau$; F_0 为接收机噪声系数(dB); $T_0 = 290$ 为接收机等效噪声温度(K); $k = 1.38 \times 10^{-23}$ 为波兹曼常数(J/K); P_t 为发射功率(kW); σ 为目标反射截面积(m^2); f 为频率(MHz); G 为天线增益(dB); F 为传播因子; L_s 为系统综合损耗(dB); R 为目标斜距(km)。

可以看出 $P_r - S_{i\min} \geq 0$ 时,目标能被检测到。式(7)中雷达接收到目标的回波功率与传播环境密切相关的量是传播因子 F ,由于大气中的传播损耗与传播因子满足关系:

$$\begin{aligned} L_{\text{single}} &= L_{fs} - 20\lg(F) \\ &= 32.44 + 20\lg(f) + 20\lg(R) - 20\lg(F) \end{aligned} \quad (8)$$

$L_{\text{single}}, L_{fs}$ (dB)分别为电磁波单程传播损耗和电磁波在自由空间的单程传播损耗。将式(8)代入式(7)中得到用电磁波单程传播损耗表示的接收功率:

$$P_r = -8.55 + 10\lg(P_t \sigma f^2) + 2G - L_s - 2L_{\text{single}} \quad (9)$$

由于目标回波功率反映了雷达对目标探测性能,通过式(9)建立了传播损耗与雷达探测的联系,设定门限:

$$\begin{aligned} T_{\text{single}}(\text{dB}) &= \frac{1}{2} \left(-8.55 + 10\lg(P_t \sigma f^2) + 2G - L_s - S_{i\min} \right) \\ &= \frac{1}{2} \left[135.43 + 10\lg(P_t \sigma f^2) + 2G - L_s \right. \\ &\quad \left. - 10\lg(B_n) - F_0 - 10\lg(D_0) \right] \end{aligned} \quad (10)$$

事实上, $L_{\text{single}} \leq T_{\text{single}}$ 与 $P_r - S_{i\min} \geq 0$ 是等价的,其中等号表示临界探测,对应了满足探测概率和虚警率条件下雷达的最远探测距离 $R_{\max}$,空间网格点上 L_{single} 由2.1节的方法计算得到,这样可以确定满足条件下雷达对目标的最大探测距离,从而评估雷达的性能。

3.2 试验分析

2003年8月31日在大连海域进行了蒸发波导监测和雷达观测的配合试验。其中蒸发波导的监测是通过测量参考高度的大气温度、湿度、风速和海表皮水温等要素参数,采用bulk方法获取蒸发波导高度及大气折射高度分布(说明:蒸发波导机理等方面的研究是海洋大气环境研究的一个方面,本文主要讨论蒸发波导对雷达影响方面的应用研究,详细地蒸发波导高度及廓线结构的计算方法和公式见参考文献[1-4]及其引用的文献);雷达使用船用RM1070导航雷达(机械扫描,无目标自动跟踪和记录功能),具体参数如表1所示,架装在大连760研究所南码头海边(位置 $121^\circ 39.8'E$, $38^\circ 51.8'N$),天线高度8m,受周围地形影响,雷达可观测方位 $25^\circ - 230^\circ$ (真方位)范围内的海面舰船目标。

表1 RM1070 导航雷达参数
Tab.1 Parameters of radar RM1070

频率	峰值功率	脉冲宽度	脉冲重复频率	最大量程	天线类型
9400MHz	10kW	0.3 μ s	600Hz	96n mile	隙缝天线
极化方式	天线高度	水平波束角	垂直波束角	抬升角	天线转速
水平	8m	1.3 $^\circ$	27 $^\circ$	0 $^\circ$	25rpm

试验过程中, 8 月 31 日 13:00–14:00 间, 通过测量大气温度(26.1℃)、湿度(52.6%)、海表水温(19.4℃)和海面风速(4.2m/s)等要素, 监测到海面蒸发波导的平均高度为 18.07m, 蒸发波导高度大于雷达天线高度, 容易出现陷获传播特征。利用本文 2.1 节的模型和方法计算得到雷达电磁波单程传播损失的空间分布如图 3 (a)所示(横坐标 GR(km), 纵坐标 H(m), 颜色索引为单程传播损耗 PL(dB)), 蒸发波导层内出现陷获传播特征, 电磁能量衰减明显小于波导层外。从图 3 (a)中分别取 6, 7.5, 10, 20 和 40m 高度上的值, 得到图 3 (b)(横坐标 GR(km), 纵坐标为单程传播损耗 PL(dB))的曲线, 从图 3 (b)中可以看出: 波导层内和外不同高度上传播损失随距离的变化存在不同, 6, 7.5 和 10m 高度低于蒸发波导高度, 传播损耗随距离的衰减要明显小于 20, 40m 高度上衰减, 其中 6m 高度的衰减率明显地小于其他高度。

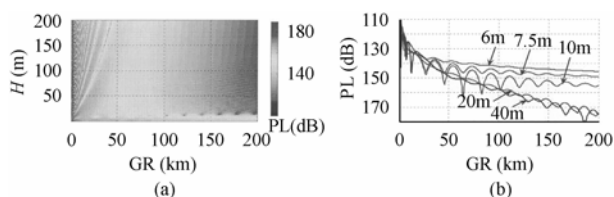


图 3 试验的蒸发波导环境下雷达电磁波单程传播损失的空间分布
Fig.3 One-way propagation loss distribution in experimental evaporation duct

假定海面舰船目标反射截面积为 2000m^2 , 目标慢起伏(大气波导条件下的雷达超视距探测, 照射到舰船的电磁波只有被陷获的小部分能量, 因而目标反射截面将减小)。利用式 (10)计算雷达在虚警率 10^{-6} 的条件下, 探测概率从 0.01 到 0.99 所对应的单程传播损耗的门限 T_{single} , 并对图 3 (a)的单程传播损耗空间分布作阈值处理, 得到雷达在试验条件下对假定目标的探测概率的空间分布, 如图 4 (a)(横坐标 GR(km), 纵坐标 H(m), 颜色索引为雷达探测概率 P_d)所示, 从图 4 (a)中分别提取相同高度上的数据得到探测概率随距离的变化, 如图 4 (b)(横坐标 GR(km), 纵坐标为探测概率 P_d)所示的曲线。

从图 4(b)可以看出, 在满足探测概率大于等于 0.9, 雷达对不同高度上的目标具有不同的最大探测距离, 如表 2 左部分所示(表 2 中的理想视距为不考虑探测概率和虚警率条件下雷达射线受地球曲率限制所能达到的最大距离, 其计算公式为 $R \approx 4.1(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})$ (km), 其中 h_1 , h_2 分别为雷达天线高度(m)和目标高度(m), 标准大气条件下通常大于雷达实际的最大探测, 详见文献[7])。可以发现: 波导层内的高度上(6,

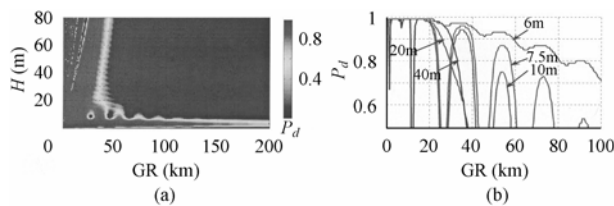


图 4 实验的蒸发波导环境下雷达对目标的探测概率空间分布
Fig.4 Radar detection probability distribution in experimental evaporation duct

7.5 和 10m), 雷达最大的探测距离都大于理想视距, 而波导层外则相反(与不考虑蒸发波导效应类似), 其中, 6m 对应的最大探测距离最远, 达到 60km, 这对应了图 3(b)中 6m 高度随距离的衰减率最小的特征。事实上, 雷达最大探测距离发生的高度在 3–4m 之间最大, 这里不考虑极低高度主要是基于以下原因: 本文中 3.1 节应用与雷达性能评估时只考虑系统噪声而忽略了海杂波等环境噪声, 极低高度的目标的检测受海杂波影响较大, 因此本文认为太贴近海面的目标, 模型计算误差明显。评估雷达对水面舰船目标的探测, 通常考虑舰船高度以下所有高度上的最大探测距离。综合上述结果可以判断: 试验的蒸发波导条件下雷达对舰船目标具有超视距探测能力, 最大探测距离约为 60km。

实际的试验中, 雷达对海面舰船进行了连续的跟踪观测(目标定位和跟踪是通过手动方式读数获取目标回波的距离(精度 0.1nmile), 以下换算成 km)和方位(精度 1°), 连续手动记录目标的位置直至目标消失), 表 2 右部分为 13:00–14:00 间雷达观测中最远的几个目标的最后消失的位置, 如目标 1 在 13:00 时的位置为距离 40.2km, 方位 52°, 回波较小、稳定; 13:30 时目标的位置为距离 54.2km, 方位 55.3°, 回波弱, 若隐若现; 13:36 时最后出现的位置距离 59.4km, 方位 56°。在此期间雷达在不同方向上跟踪观测到多批目标的远离至消失过程, 最后距离都在 57–60km 之间。这与理论预测雷达对海面大型船只的最大超视距探测距离约为 60km 吻合。

上述评估的结论与雷达实际探测的效果吻合得非常好, 说明了蒸发波导中电磁波具有异常传播特征, 并导致雷达产生超视距探测的异常探测性能。由于 2.1 节和 3.1 节的模型和方法中多处使用了近似处理, 并且由于海面舰船目标 RCS 的复杂性, 特别是蒸发波导环境的, 电磁波照射面积减小带来的 RCS 损失的复杂性, 必然引起评估的结果与实际存在差别, 实际应用过程中要考虑的因素比文章中要复杂得多。

表 2 雷达视距模型计算与雷达实际探测能力的对比

Tab.2 Difference between model evaluation and radar detection

目标高度(m)	理想视距(km)	模型计算得到的 雷达最大探测距离(km)	实际过程中雷达对海面 目标的最大探测距离			
			序号	时间	距离(km)	真方位(°)
6	21.6	60.0				
7.5	22.8	40.0	1	13: 36'	59.4	56
10	24.6	38.5	2	13: 48'	58.9	59
20	29.9	26.0	3	14: 20'	57.4	101
40	37.5	30.5	4	14: 24'	59.1	149

4 结束语

本文通过仿真和试验分析研究了蒸发波导环境下电磁波的异常传播特征以及在雷达性能上的应用,得到如下基本结论:

(1) 本文采用电磁波传播的数值方程以及傅里叶算法技术,通过仿真的方法研究了不同蒸发波导环境下电磁波的传播所具有的异常特征,并通过结合雷达的理论分析了其在雷达异常探测性能评估方面的应用。

(2) 蒸发波导对电磁波传播具有的陷获作用,被陷获的电磁波在波导层内传播衰减很小,从本文2.2节仿真的结果中可以看出:这种陷获作用与电磁波参数、蒸发波导高度(强度)以及相对位置等因素有关。

(3) 文中的试验分析是对蒸发波导中电磁波异常传播特征的具体分析和应用举例,模型的计算结果与雷达的实际效果比较一致,充分说明了本文反映了蒸发波导环境下电磁波异常传播的客观规律,也证明了蒸发波导环境下雷达所具有的超视距等异常探测特征。

(4) 本文的仿真和试验分析没有针对其他大气波导类型,如表面波导和抬升波导,对于复杂的海洋异常大气折射环境,本文的模型和方法同样适用,这里不再赘述。

参考文献

[1] Patterson W L, *et al.*. Engineer's refractive effect prediction

system (EREPS)[R]. San Diego, CA: Naval Command, Control and Ocean Surveillance Center(NCCOSC), Naval Research and Development(NRaD) Technology Report 2648, 1994.

- [2] 戴福山,等. 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.
- [3] 刘成国,等. 我国对流层波导环境特性研究[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2002, 29(1): 119-122.
- [4] 姚展予,等. 大气波导特征分析及其对电磁波传播的影响[J]. 气象学报, 2000, 58(5): 605-616.
- [5] Barrios A E. A terrain parabolic equation model for propagation in the troposphere[J]. *IEEE Trans. on AP*, 1994, 42(1): 90-98.
- [6] Dockery G D. Modeling electromagnetic wave propagation in the troposphere using the parabolic equation[J]. *IEEE Trans. on AP*, 1988, 36 (10): 1464-1470.
- [7] 丁鹭飞,等. 雷达原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1995, 第3章, 5章.
- [8] Blake L V. Radar range-performance analysis[M]. Norwood, MA: Artech. House, 1986, chap.1-3.

黄小毛: 男, 1974年生, 博士生, 研究领域为大气波导特性及其对电磁波传播影响研究.

张永刚: 男, 1962年生, 教授, 博士后, 博士生导师, 中国军事海洋专业分委会秘书长, 主要研究领域为海洋水文气象和大气波导等军事海洋环境研究.在国内外核心期刊发表论文30篇,有2篇被美国科学文摘SCI收录,有3篇被美国工程文摘EI收录,获国际ISOPE96'会议奖.