

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201611018

雷达威力预报技术中海表温度测量及修正方法

崔萌达, 察豪, 田斌

(海军工程大学 海军信息装备作战应用研究所, 武汉 430033)

摘要: 针对雷达探测威力预报中海表温度测量问题, 提出一种基于红外传感器的修正方法. 分析了红外传感器产生测量偏差的原因, 通过对海面红外辐射及反射情况进行建模, 仿真分析了天空温度对海表面温度测量结果和雷达威力预报结果的影响, 并提出海表温度的修正方法. 实验结果表明, 将该方法应用到雷达威力预报中, 预报结果与实际雷达威力相对误差小于20%的概率高达80%, 显著提高了雷达威力预测预报精度.

关键词: 微波超视距; 雷达威力预报; 蒸发波导; 红外测量; 海表温度

中图分类号: TN95 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2017)05-0116-06

Measurement and modification method of sea surface temperature for radar detection range prediction

CUI Mengda, CHA Hao, TIAN Bin

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

Abstract: Aiming at the problem of sea surface temperature (SST) measurement in radar power prediction (RPP), a modification method of sea surface temperature is proposed based on infrared sensor. The measured deviation of infrared sensor for SST is analyzed. The infrared models of sea surface radiation and reflection are modeled. The affections of sky radiation to result of SST and RPP are analyzed by simulation. A modification method for RPP is deduced. Through experiment, the result shows that the relative error of prediction result is limited in 20% with 80% probability by this method, which greatly enhances the prediction accuracy.

Keywords: microwave over the horizon; radar detection range; evaporation duct; infrared measurement; sea surface temperature

蒸发波导是由水汽蒸发引起的大气湿度随高度锐减的大气现象, 它会造成电磁波的异常传播, 并减小电磁波的海上传播损耗. 蒸发波导具有较高的发生概率, 所以广泛应用于超视距雷达探测^[1]. 然而大气参数会随时间和空间不断变化, 超视距雷达的探测威力也将发生变化. 雷达威力的预测可为作战舰艇提供辅助决策, 使其合理把握雷达开关机时间, 提高生存能力. 通过蒸发波导计算雷达探测威力, 首先需要测量海上的水文气象参数, 包括风速、湿度、气压以及海表温度, 然后通过波导模型得到海上大气折射率廓线^[2-3], 再通过电磁波传播模型计算雷达电波传播损耗, 最终预测出雷达的探测威力^[2,4]. 海表温度的测量影响着预报结果的准确程度, 是整个预报系统中的难点.

海表温度的测量与海水温度测量不同, 是测量

海水与空气接触部分的水温. 因蒸发作用和热交换作用的存在, 海表温度与海水温度存在一定区别^[5]. 与其他接触式温度传感器相比, 利用红外传感器测量海水温度具有独特的优势^[6-7]: 一是在红外波段, 海水的透射率很低, 红外传感器测量的温度为海表面以下几毫米的海水温度, 与理论上的海表温度十分接近^[8]; 二是红外传感器与海面不发生接触, 不会因热传导而改变被测海水的温度. 但因海表面的红外辐射率小于1, 加上天空背景的干扰, 红外传感器的测量温度与真实的海温之间存在偏差, 会使得测量温度低于真实温度.

本文针对红外传感器温度测量的偏差, 结合海面与天空的红外辐射模型, 提出一种基于红外传感器的海表温度修正方法, 并将其应用到超视距雷达的威力预报中, 验证了方法的有效性.

1 红外温度测量及影响因素

1.1 红外温度测量模型

红外传感器通过测量被测物体的红外辐射, 在不接触物体的条件下, 实现温度的测量. 以热释

收稿日期: 2016-11-12

基金项目: 国家自然科学基金(414005009); 国家重点实验室基金(K201510); 湖北省自然科学基金(2015CFB692)

作者简介: 崔萌达(1990—), 男, 博士研究生;

察豪(1966—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 察豪, hydchj@sina.com

电型红外温度传感器为例,传感器利用温差电效应,通过测量因温差引起的电压值 U_0 , 得到被测物的辐射温度 T_m , 即传感器的测量结果. U_0 和 T_m 的关系可表示为^[9]

$$U_0 = C(T_m^4 - T_a^4).$$

式中: T_a 表示传感器自身的温度,单位为华氏温度; C 为与传感器自身结构相关的参数.

测量结果 T_m^4 与传感器探头受到的红外辐射照度 E_m 成线性关系. 若测量范围内只存在被测物而不包含其他干扰物, T_m 和 E_m 之间的关系可表示为

$$E_m = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{\Omega} L_b(T_m, \lambda) \cos \beta d\Omega d\lambda = \pi \sin^2 \alpha \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_b(\lambda, T_m) d\lambda. \quad (1)$$

式中: $L_b(T_m, \lambda)$ 表示辐射温度为 T_m , 波长为 λ 时黑体的辐射亮度; α 表示传感器的测量半角; Ω 表示传感器测量半角范围内的空间角,测量过程中需保证在 Ω 角度范围内仅包含被测物体, $d\Omega = \sin \beta d\beta d\gamma$; β 表示在空间角为 $d\Omega$ 时,红外辐射方向 $\vec{e}$ 与传感器轴线 $\vec{e}_0$ 间的夹角,积分范围为 $0 \sim \alpha$; γ 表示 $\vec{e}$ 所对应的方位角,积分范围为 $0 \sim 360^\circ$.

1.2 海温测量影响因素分析

为研究红外传感器在舰船条件下海表温度的测量精度,通过实验研究了高度和倾角对测量结果的影响. 实验中发现高度的变化对测量结果基本没有影响,但倾角的增大会导致测量误差的增大. 这一测量误差,实际为海表面红外辐射的物理过程造成的测量温度和真实温度之间的偏差.

红外传感器的测量结果实际为等效黑体的温度,但海面的辐射率小于黑体的辐射率,即小于 1,并且辐射率会随辐射角度的增大而降低,因此测量的海表温度将小于实际海表温度. 同时,辐射角度增大时海面的反射率会增大,天空背景的干扰也将增大.

因此红外传感器测量温度,并非真实海表温度. 通过测量的温度获取真实的海表温度,需要对海面的辐射率和反射率进行建模,测量并补偿天空温度.

2 海表面温度测量模型

海面的辐射率变化及反射的天空温度会造成海表面的测量温度存在偏差,在此将对海表面的红外辐射和反射的天空辐射进行建模,分析测量偏差的分布概率.

2.1 海表面的红外辐射模型

针对海表面的辐射率问题,常用的模型是平静海面模型,该模型考虑了辐射方向变化对海面红外

辐射率的影响,可表示为^[6,10]

$$\varepsilon(\theta) = 0.98[1 - (1 - \cos \theta)^5],$$

式中 θ 表示海面的辐射方向与 Z 轴的夹角.

该模型忽略了海面波浪的起伏对测量结果的影响. 为获得更准确的海面辐射模型,需要考虑海浪影响. Charles Cox 及 Walter Munk 给出了海浪坡度的分布概率,其概率密度函数为^[6,10]

$$\begin{cases} f(s_x, s_y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{s_x^2 + s_y^2}{2\sigma^2}\right), \\ 2\sigma^2 = 0.003 + 0.005 \, 12 \times v. \end{cases} \quad (2)$$

式中: s_x 和 s_y 分别表示 x 方向和 y 方向海浪的坡度分量, v 表示 12.5 m 高度处的风速. 若 $\vec{n}$ 表示小面元法线方向, $\vec{e}$ 表示红外辐射方向, θ_e 、 θ_n 分别表示 $\vec{e}$ 、 $\vec{n}$ 与 Z 轴正方向的夹角, φ_e 、 φ_n 分别表示 $\vec{e}$ 、 $\vec{n}$ 在 XOY 平面上的投影与 X 轴正方向的夹角(右手坐标系) χ 表示 $\vec{e}$ 和 $\vec{n}$ 方向间的夹角,那么可以得到

$$\begin{aligned} s_x &= -\tan \theta_n \cos \varphi_n, \\ s_y &= -\tan \theta_n \sin \varphi_n, \\ \cos \chi &= \cos \theta_n \cos \theta_e + \cos(\varphi_e - \varphi_n) \sin \theta_n \sin \theta_e. \end{aligned} \quad (3)$$

通过变量代换,式(2)可写为

$$f(u_n, \varphi_n) = \frac{u_n^{-3}}{2\pi\sigma^2} \exp\left(\frac{1 - u_n^{-2}}{2\sigma^2}\right), \quad (4)$$

式中 u_n 等于 $\cos \theta_n$. 在 $\vec{e}$ 方向上,海面的平均辐射率可以表示为

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_\lambda(\theta_e, \varphi_e) &= \frac{1}{\cos \theta_e} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \varepsilon_\lambda(\chi) \cos \chi \cdot \\ &\sec \theta_n P(s_x, s_y) ds_x ds_y = \frac{1}{\cos \theta_e} \int_0^1 \int_0^{2\pi} \varepsilon_\lambda(\chi) \cdot \\ &\cos \chi u_n^{-1} f(u_n, \varphi_n) du_n d\varphi_n. \end{aligned} \quad (5)$$

因此,对于辐射波长为 λ , 在 $\vec{e}$ 方向上,真实海表面温度为 T_{sea} 的红外辐射亮度可表示为

$$L_{\text{sea}}(T_{\text{sea}}, \lambda, \theta_e, \varphi_e) = \bar{\varepsilon}_\lambda(\theta_e, \varphi_e) \frac{M_b(T_{\text{sea}}, \lambda)}{\pi},$$

式中 $M_b(T_{\text{sea}}, \lambda)$ 表示表温度为 T_{sea} 时,海面的辐射出射度,海温取华氏温度.

2.2 天空反射模型

天空的红外辐射分为晴天无云、有云和下雨 3 种情况. 无云时多由太阳光的散射和大气热辐射组成,有云或下雨时多为云团的水汽或雨水造成的红外热辐射. 天空的红外辐射可视为黑体的红外辐射,并可采用 45° 天顶角的辐射代替^[7]. 太阳的红外辐射也会对传感器的测量结果造成影响,其辐射方向可通过时间和传感器的经纬度计算得到^[6],因此入射方向为 $\vec{e}_i$ 时,天空辐射亮度 $L_{\text{sky}}(\theta_i, \varphi_i)$ 可表示为

$$L_{\text{sky}}(\theta_i, \varphi_i) = \frac{\sigma T_{\text{sky}}^4}{\pi} + L_{\text{sun}}(\theta_i, \varphi_i).$$

式中: σ 表示史蒂芬-玻尔兹曼常数; T_{sky} 表示天空温度, 单位为华氏度; $L_{\text{sun}}(\theta_i, \varphi_i)$ 为入射方向为 $\vec{e}_i$ 太阳的辐射亮度; θ_i 表示 $\vec{e}_i$ 与 Z 轴正方向的夹角; φ_i 表示 $\vec{e}_i$ 在 XOY 平面上的投影与 X 轴正方向的夹角, 同 θ_e, φ_e 类似.

由基尔霍夫定律可知, 海水的辐射率 ε_λ 和反射率 ρ_λ 相加为 1, 存在

$$\varepsilon_\lambda(\chi) = 1 - \rho_\lambda(\chi),$$

式中 χ 意义与式 (3) 相同. 因此可以得到海水反射的辐射亮度为

$$L_r(\lambda, \theta_e, \varphi_e) = \frac{1}{\cos \theta_e} \int_0^1 \int_0^{2\pi} L_{\text{sky}}(\theta_i, \varphi_i) \rho_\lambda(\chi) \cos \chi u_n^{-1} f(u_n, \varphi_n) du_n d\varphi_n, \quad (6)$$

式中 u_n 与 φ_n 意义与式 (4) 相同.

天空辐射入射方向 $\vec{e}_i$ 可通过水面辐射方向 $\vec{e}$ 和小面元法线方向 $\vec{n}$ 求解, 其关系可表示为

$$u_n = \frac{\sqrt{2 + 2\sin \theta_i \sin \theta_e \cos(\varphi_i - \varphi_e) + 2\cos \theta_i \cos \theta_e}}{\cos \theta_i + \cos \theta_e},$$

$$\cos \chi = \frac{\sqrt{1 + \sin \theta_i \sin \theta_e \cos(\varphi_i - \varphi_e) + \cos \theta_i \cos \theta_e}}{2}.$$

根据海表面的红外辐射模型和天空反射模型, 可以得到红外传感器的温度测量模型, 传感器受到的辐射照度可表示为

$$E_m = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \iint_{\Omega} (L_{\text{sea}}(T_{\text{sea}}, \lambda, \theta_e, \varphi_e) + L_r(\lambda, \theta_e, \varphi_e)) \cos \beta d\Omega d\lambda. \quad (7)$$

将式 (7) 带入式 (1), 即可得到传感器测量温度. 式 (7) 对传感器的测量过程进行了建模, 在已知真实海表面温度为 T_{sea} 、天空温度 T_{sky} 、海上风速 v 及传感器安装的轴线方向 $\vec{e}_0$ 的情况下, 即可求得传感器的测量温度.

2.3 温度测量模型的验证

2.3.1 海表面温度测量模型的验证

通过实验测量倾斜条件下传感器的测量结果, 并与温度测量模型的计算结果进行比较.

实验时天气为多云, 测量到的天空温度为 12.2 °C, 图 1 给出了不同倾斜条件下的海表温度的测量结果. 从结果可以看出, 模型仿真结果同测量结果基本一致. 造成误差的主要原因包括以下几个方面: 1) 水表温度不均匀且存在流动, 水温存在一定的变化; 2) 测量过程中需要人工操作, 测量结果可能会受人体红外辐射的影响; 3) 传感器倾角存在

测量误差.

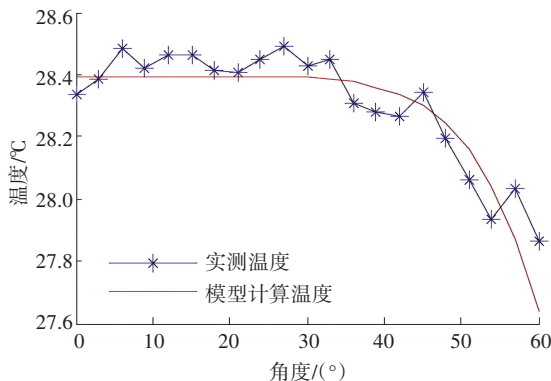


图 1 温度测量模型验证

Fig.1 Verification of measurement model

2.3.2 海表温测量偏差统计

海面辐射率随辐射方向增大而降低, 使得传感器测量到的海面辐射亮度降低, 同时反射率的增大使得天空温度对测量结果的影响增大. 为验证在不同风速、舰船横纵摇条件下, 天空红外辐射的影响, 仿真了测量偏差的概率分布函数. 在一定范围内随机选取风速、纵横摇角度、天空温度及海表温, 风速选择范围为 0~10 m/s, 纵横摇角度选择范围为对应浪级下的倾角范围, 天空温度选择范围为 -40~20 °C, 海表温选择范围为 15~30 °C. 仿真结果见图 2.

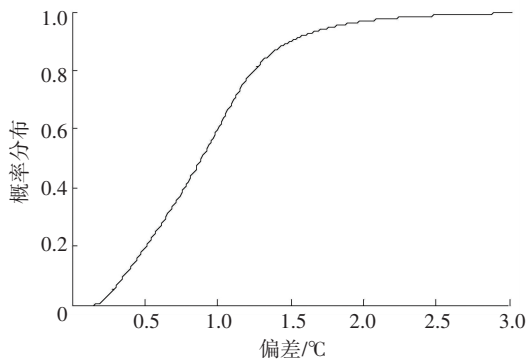


图 2 测量偏差概率分布

Fig.2 Probability distribution of measurement deviation

从结果看, 若不对海水的辐射率和天空温度的干扰进行修正, 测量温度与真实海温间偏差 < 1.5 °C 的概率 < 90 %, 偏差 < 1 °C 的概率 < 60 %, 而偏差 < 0.3 °C < 6 %.

3 海表温度修正算法研究

3.1 海表温度修正算法

依据传感器受到的辐射照度 E_m , 以及在 $\vec{e}$ 方向上海面的平均辐射率 $\bar{\varepsilon}_\lambda(\theta_e, \varphi_e)$ 和海水反射的辐射亮度 $L_r(\lambda, \theta_e, \varphi_e)$, 可计算得到真实的海水温度 T_{sea} .

若忽略式(7)中的波长,依据斯蒂芬-玻尔兹曼定律,可以得到传感器测量温度 T_m 和真实海温 T_{sea} 的关系为

$$T_{sea} = \left(\frac{T_m^4 - T_{sky}^4 (1 - \bar{\varepsilon}(\theta_0, \varphi_0))}{\bar{\varepsilon}(\theta_0, \varphi_0)} \right)^{1/4}, \quad (8)$$

式中 $T'_{sky}(\theta_0, \varphi_0)$ 和 $\bar{\varepsilon}(\theta_0, \varphi_0)$ 为在传感器轴线 $\vec{e}_0$ 时的等效天空温度和等效海水辐射率:

$$T'_{sky}(\theta_0, \varphi_0) = \left(\frac{\int_{\Omega} L_r(\theta_e, \varphi_e) \cos \beta d\Omega}{\sigma \sin^2 \alpha (1 - \bar{\varepsilon}(\theta_0, \varphi_0))} \right)^{1/4}, \quad (9)$$

$$\bar{\varepsilon}(\theta_0, \varphi_0) = \left(\frac{\int_{\Omega} \varepsilon(\theta_e, \varphi_e) \cos \beta d\Omega}{\pi \sin^2 \alpha} \right). \quad (10)$$

式中: σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, α, β 与 Ω 与式(1)相同, $d\Omega$ 积分范围为传感器测量的空间角范围, $d\Omega$ 的方向即为 $\vec{e}$.

因此,天空温度修正算法可表述为以下过程:

- 1) 以舰艏向为 y 轴建立坐标系,获取舰船纵摇角度 α_1 及横摇角度 α_2 (右手坐标系).
- 2) 测量海上一定高度上的风速,并计算 12.5 m 高度上的风速.
- 3) 获取天空温度 T_{sky} 并计算辐射亮度. 获取天空温度 T_{sky} 的方法包括经验法和测量法,两种方法将通过仿真对比进行选择.
- 4) 计算传感器轴线方向 $\vec{e}_0$. $\vec{e}_0$ 对应的角度 θ_0, φ_0 及安装角度 θ_s, φ_s 之间的关系可表示为

$$\begin{bmatrix} \sin \theta_0 \cos \varphi_0 \\ \sin \theta_0 \sin \varphi_0 \\ -\cos \theta_0 \end{bmatrix} = A(\alpha_1) A(\alpha_2) \begin{bmatrix} \sin \theta_s \cos \varphi_s \\ \sin \theta_s \sin \varphi_s \\ -\cos \theta_s \end{bmatrix},$$

$$A(\alpha_1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_1 & -\sin \alpha_1 \\ 0 & \sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 \end{bmatrix},$$

$$A(\alpha_2) = \begin{bmatrix} \cos \alpha_2 & 0 & \sin \alpha_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha_2 & 0 & \cos \alpha_2 \end{bmatrix}.$$

传感器测量倾角为 45° 时, $\theta_s = 45^\circ$, 安装于左舷的传感器 $\varphi_s = 180^\circ$, 右舷的传感器 $\varphi_s = 0^\circ$.

- 5) 空间角为 $d\Omega$ 辐射方向为 $\vec{e}$ 时,通过式(5)计算海面平均辐射率 $\bar{\varepsilon}_\lambda(\theta_e, \varphi_e)$, 通过式(6)计算海水反射的辐射亮度 $L_r(\lambda, \theta_e, \varphi_e)$.
- 6) 对空间角为 $d\Omega$ 进行积分,通过式(9)和(10),计算传感器轴线方向 $\vec{e}_0$ 时的等效天空温度和等效海水辐射率,积分范围为传感器测量半角内对应的

空间角度.

- 7) 通过式(8)计算海水的温度.

3.2 天空温度补偿方法

对海表温度进行修正,需要补偿天空的红外辐射温度. 天空温度的获取方法包括经验法和测量法. 测量法是对天空温度进行测量,需要加装一路对天的传感器,与经验法相比实现过程更为复杂,但补偿精度高;经验法是根据以往的气象条件,选择一个合适天空温度实现修正,实现简单,但补偿精度差. 在此,对经验法进行仿真,若此方法的补偿精度可使雷达威力预报结果达到 20 % 相对误差的指标要求,则可放弃测量法. 仿真时使用 NPS 模型计算蒸发波导折射率廓线^[11], PE 模型计算电磁波传播损耗^[12-13].

设用于补偿的天空温度分别为 20°C 、 -10°C 、 0°C 和 10°C , 传感器的测量结果使用 2.3 中的仿真结果. 图 3 给出了 4 种天空温度补偿后仍存在误差的概率分布. 从图 3 可以看出,选用 -10°C 作为补偿温度误差概率相对较小,小于 0.6°C 的概率为 90%, 小于 0.3°C 的概率为 50 %.

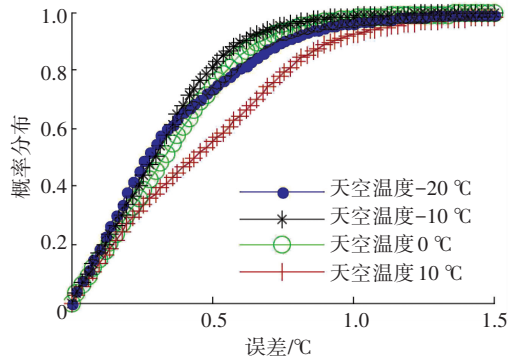


图3 经验法补偿误差的概率分布

Fig.3 Probability distribution of error by empirical method

若海温误差为 0.1°C 到 0.6°C , 图 4 给出了不同温度误差造成的雷达威力预报误差的概率分布函数. 气温、海表温、风速及湿度在一定范围内随机选取,其中海温选择范围为 $15 \sim 30^\circ\text{C}$, 气温温差选择范围为 $-2 \sim 2^\circ\text{C}$, 风速选择范围为 $0 \sim 10 \text{ m/s}$, 湿度选择范围为 $45\% \sim 95\%$. 从图 4 可以看出,当海温误差为 0.1°C 到 0.6°C 时,预报相对误差小于 20 % 的概率分别约为 96 %、92 %、89 %、86 %、83 % 和 79 %. 因此可以得到,使用经验法得到的修正温度,会导致预报结果相对误差小于 20 % 概率分别约为 71 %. 可以看出,采用经验法会使预报误差较大,无法满足雷达威力预报的要求. 也有研究指出^[14],在稳定层结条件下温度测量误差应小于 0.2°C , 不稳定层结测量误差应小于 0.5°C . 因此在补偿天空温度时应采用测量法.

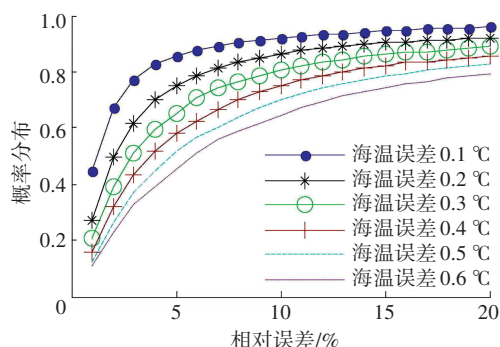


图 4 预报距离误差的概率分布

Fig.4 Probability distribution of detection range error

4 海上实验验证及结果分析

为了验证本文方法在实际雷达威力预报中的效果和作用,项目组于 2015 年 8 月在江苏北部黄海海域行了为期 20 d 的海上实验. 实验系统由一套水文气象采集器和一台工作于 X 波段的雷达组成,气象水文采集器用于采集风速、湿度、压强、气温和海温等气象参数,X 波段雷达用于探测海上目标,获取雷达可探测到最远目标的距离参数,舰船的倾斜角度通过倾角传感器测得,并将测得的角度和气象数据输送至计算机,计算雷达的探测效能. 实验中,共测得有效数据 198 组,得到雷达威力预报的相对误差分布曲线如图 5 所示.

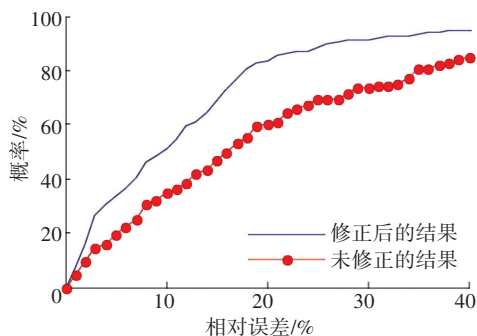


图 5 海上实验中预报威力相对误差的概率分布函数

Fig.5 Probability distribution of relative error of predicted detection range

从图 5 可以看出,利用修正的海温实现雷达威力预报,预报结果的误差有显著的降低. 使用未修正的海温,预报结果相对误差小于 20% 的概率约为 60%,而使用修正后的海温,预报结果相对误差小于 20% 的概率大于 80%.

预报结果与测试结果仍存在一定的偏差,其原因可能包括以下几个方面:

1) 波导预报模式为单点预报,即假设大气折射率剖面水平均匀分布,仅利用雷达周围的天气参数对整片海域的波导条件进行预报. 而在实际探测过程中,大气折射率水平分布均匀的条件不一定成立,

尤其是陆地附近,折射率在水平方向上存在较明显的变化^[15].

2) 海上目标的 RCS 不能准确估计. 由于被测目标为非合作目标,目标 RCS 的大小和方向性只能通过人为设置,这在某种程度上造成了测量误差.

3) 舰艇运动过程仍会对采集到的气象水文数据有一定影响,测量结果存在一定的误差. 预报模型中,仍存在一些敏感点,使得微小的气象误差会造成较大的预报误差.

5 结 语

本文针对雷达威力预报系统中的海表面温度的修正方法展开研究. 首先研究了红外传感器的测量过程,指出了传感器倾角和天空背景对测量结果的影响. 在此基础上对海面红外辐射和天空反射进行建模,给出测量偏差修正公式以及天空温度补偿方法. 最后,将提出的海表温度测量及修正方法应用到雷达威力预报中,实验结果表明利用本文方法预报的雷达探测距离相对误差小于 20 % 的概率高于 80 %,具有较高的预报精度.

参考文献

- [1] ZHANG Pei, BAI Lu, WU Zhensen, et al. Applying the parabolic equation to tropospheric groundwave propagation[J]. IEEE Antennas & Propagation Magazine, 2016, 58(3):31-44. DOI:10.1109/MAP.2016.2541620.
- [2] 刘爱国, 察豪, 李忠猛. 岸基微波超视距雷达探测预报方法[J], 华中科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(7):96-100. DOI: 10.13245/j.hust.140719.
- LIU Aiguo, CHA Hao, LI Zhongmeng. Prediction method of coastal microwave OTH radar detection range[J]. Journal Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2014, 42(7):96-100.
- [3] MESNARD F, SAUVAGEOT H. Climatology of anomalous propagation radar echoes in a coastal area[J]. Journal of Applied Meteorology & Climatology, 2010, 49(11):2285-2300. DOI: 10.1175/2010JAMC2440.1.
- [4] APAYDIN G, SEVGİ L. MatLab-based FEM-parabolic equation tool for path loss calculations along multi-mixed-terrain paths[J]. IEEE Antennas & Propagation Magazine, 2014, 56(3):221-236. DOI: 10.1109/MAP.2014.6867720.
- [5] ANDERSON K, BROOKS B, CAFFREY P, et al. TheRED experiment: an assessment of boundary layer effects in a trade winds regime on microwave and infrared propagation over the sea[J]. Bulletin of The American Meteorological Society, 2004, 85(9):1355-1365. DOI: 10.1175/BAMS-85-9-1355.
- [6] LI H, PINEL N, BOURLIER C. Polarized infrared reflectivity of 2D sea surfaces with two surface reflections[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 147(9):145-155. DOI: 10.1016/j.rse.2014.02.018.
- [7] 谷延锋, 丰炳波, 郑贺, 等. 基于多时相多光谱红外图像浅层地下目标探测[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(3):14-19.

DOI:10.11918/hitxb20140303.

GU Yanfeng, FENG Bingbo, ZHENG He, et al. Detection of sub-surface targets based on multitemporal and multispectral infrared image[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(3): 1-10.

[8] 杨尧, 吴振森, 姚连兴, 等. 从红外辐照热平衡方程求解海面温度[J]. 红外与毫米波学报, 2003, 22(5): 357-360. DOI: 10.3321/j.issn:1001-9014.2003.05.009.

YANG Yao, WU Zhensen, YAO Lianxing, et al. Solving the sea surface temperature from the infrared radiation heat balance equation [J]. Journal Infrared Millimeter Waves, 2003, 22(5): 357-360.

[9] 易金桥, 黄勇, 廖红华, 等. 热释电红外传感器及其在人员计数系统中的应用[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(4): 1186-1192. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2276.2015.04. 014.

YI Jinqiao, HUANG Yong, LIAO Honghua, et al. Pyro electric infrared sensor and its application in people counting system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(4): 1186-1192.

[10] KARINE C, SANDRINE F, CHRISTOPHE B. Multiresolution optical characteristics of rough sea surface in the infrared[J]. Applied Optics, 2007, 22(46): 5471-5481. DOI: 10.1364/AO.46.005471.

[11] ZHANG Jinpeng, WU Zensen, ZHU Qinglin, et al. A four parameter M-profile model for the evaporation duct estimation from radar clutter[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2011, 114(8): 353-368. DOI: 10.2528/PIER11012204.

[12] SIRKOVA I, MIKHAYLEV M. Parabolic wave equation method applied to the tropospheric ducting propagation problem; a survey[J]. Electromagnetics, 2006, 26(2): 155-173. DOI: 10.1080/02726340500486484.

[13] SHENG Zheng. The estimation of lower refractivity uncertainty from radar sea clutter using the Bayesian-MCMC method[J]. Chinese Physics B, 2013(22): 580-585. DOI: 10.1088/1674-1056/22/2/029302.

[14] GRACHEV A A, ANDREAS E L, FAIRALL C W, et al. SHEBA flux-profile relationships in the stable atmospheric boundary layer [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2007, 124(3): 315-333. DOI: 10.1007/s10546-007-9177-6.

[15] ZHANG Qi, YANG Kunde, SHI Yang. Spatial and temporal variability of the evaporation duct in the Gulf of Aden[J]. Tellus, 2016, 68: 1-14. DOI: 10.3402/tellusa.v68. 29792.

(编辑 王小唯, 苗秀芝)

(上接第 55 页)

参考文献

[1] 郭向英, 张西超, 赵雷. 应用虚拟测试技术提升航天嵌入式软件可信性[J]. 质量与可靠性, 2014(1): 55-59.

GUO Xiangying, ZHANG Xichao, ZHAO Lei. Application of virtual test technology to enhance the credibility of the aerospace embedded software[J]. Quality and Reliability. 2014(1): 55-59.

[2] 芦彩林, 丁刚毅. 嵌入式软件全数字仿真测试环境设计[J]. 计算机仿真, 2007, 24(1): 295-297.

LU Cailin, DING Gangyi. Design of full digital simulation test environment for embedded software[J]. Computer Simulation, 2007, 24(1): 295-297. DOI: 1006-9348(2007)01-0295-03.

[3] AARNO D, ENGBLOM J. Software and system development using virtual platforms: full-system simulation with wind river simics[M]. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2014.

[4] 叶常春. 嵌入式虚拟化技术[J]. 计算机工程与科学, 2012, 34(3): 41-45.

YE Changchun. The embedded virtualization technology[J]. Computer Engineering & Science, 2012, 34(3): 41-45, DOI: 1007-130X(2012)03-0041-05.

[5] MUTTER F, GAREIS S, SCHATZ B, et al. Model-driven in-the-loop validation: simulation-based testing of UAV software using virtual environments [C]//Engineering of Computer Based Systems (ECBS), 2011 18th IEEE International Conference and Workshops on. IEEE, 2011: 269-275.

[6] BECKER M, BALDIN D, KUZNIK C, et al. XEMU: an efficient QEMU based binary mutation testing framework for embedded software[C]//Proceedings of the Tenth ACM International Conference on Embedded Software. New York: ACM, 2012: 33-42.

[7] 李毅, 徐萍, 万寒. 基于 QEMU 实现的处理器类故障模拟与注入方法研究[J]. 计算机工程与科学, 2014, 36(1): 19-27.

LI Yi, XU Ping, WAN Han. Research on a QEMU-based processor fault simulation and injection method[J]. Computer Engineering & Science[J]., 2014, 36(1): 19-27, DOI: 1007-130X(2014)01-0019-09.

[8] 肖荣荣. 基于 Bochs 的 X86 小核前端时序模拟器的设计及优化 [M]. 北京: 北京邮电大学, 2012.

XIAO Rongrong. Design and optimization based on bochs for the front-end architecture of X86 single coreprocessor[M]. Beijing University of Posts, 2012.

[9] LEE Y R, CHO S Y, LEE J B. The design a virtual prototyping based on ARMulator[C]// Fourth Annual ACIS International Conference on Computer and Information Science. Jeju Island: IEEE, 2005: 387-390.

[10] MAGNUSSON P S, CHRISTENSSON M, ESKILSON J, et al. Simics: a full system simulation platform[J]. Computer, 2002, 35(2): 50-58.

[11] SATRIA H, WIBOWO B, KWON J B, et al. VDEES: a virtual development environment for embedded software using open source software[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2009, 55(2): 959-966.

[12] GHANEM A K, EL-MAHDY A H, EL-SALAM I A. A cycle-accurate micro-architecture simulation framework for embedded processors[C]//The 2006 International Conference on Computer Engineering and Systems. IEEE, 2006: 71-76.

(编辑 王小唯 苗秀芝)