

doi: 10.7690/bgzdh.2022.06.012

大入射余角下无线电引信海杂波模型

蒋涛, 高志林, 余曜, 迟德建
(上海机电工程研究所, 上海 201109)

摘要: 为解决无线电引信的超低空对抗海杂波干扰这一技术难题, 对大入射余角下的无线电引信海杂波模型进行研究。根据试验数据研究引信在大入射余角下的海面后向散射系数, 通过物理海面建模和网格划分, 建立引信的随机海面回波模型, 提供海杂波功率理论计算方法。对比仿真结果与引信的试验结果表明: 模型与实测数据一致性较好, 为引信的海杂波特性分析提供了理论基础。

关键词: 无线电引信; 海杂波; 大入射余角; 超低空
中图分类号: TJ43⁺4.1 **文献标志码:** A

Sea Clutter Model of Radio Fuze at Large Incidence Complementary Angle

Jiang Tao, Gao Zhilin, Yu Yao, Chi Dejian
(Shanghai Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Shanghai 201109, China)

Abstract: In order to solve the technical problem of radio fuze anti-sea clutter jamming at ultra-low altitude, the sea clutter model of radio fuze under large incident complementary angle is studied. According to the test data, the sea surface backscattering coefficient of the fuze is studied under the condition of large incident grazing angle. Through physical sea surface modeling and grid division, the random sea surface echo model of the fuze is established, and the theoretical calculation method of sea clutter power is provided. The comparison between the simulation results and the fuze test results shows that the consistency between the model and the measured data is good, which provides a theoretical basis for the analysis of the sea clutter characteristics of the fuze.

Keywords: radio fuze; sea clutter; large incident complementary angle; ultra-low altitude

0 引言

拦截超低空掠海飞行目标是舰空导弹主要作战功能, 但需要解决无线电引信(简称引信)在超低空对抗海杂波这一技术难题^[1]。为方便引战配合, 引信大多采用侧向定角波束探测体制, 其主波束与弹轴的角度(引信主波束倾角)固定, 一般大于 50° , 并且 3 dB 波束宽度在 4° 左右。同时由于引信较大的主波束倾角和导弹俯仰角影响, 引信波束对海面的入射余角通常在 $60^\circ\sim 90^\circ$ 之间, 为大入射余角照射。

目前, 国内外海杂波特性的研究主要针对远程雷达和导引头, 少有专门针对引信开展的海杂波特性研究, 且目前的各种海面后向散射模型主要根据低入射余角条件下获得的数据^[2-5], 模型在大入射余角下的适应性验证缺少数据支撑。侧向探测和大入射余角照射海面的工作模式使得引信的海杂波模型与雷达或导引头有着较大差异, 需要针对性地开展研究。

1 海杂波建模与特性分析

1.1 海面后向散射系数

后向散射系数是海杂波的重要特性之一, 表征单位面积的雷达照射区域对电磁波后向散射能力的平均强度。目前工程上主要利用基于试验数据的经验公式计算海面后向电磁散射系数, 这是因为经验公式依托于试验数据, 能较好地反映实际结果, 且计算模型相对快捷简便, 得到了广泛应用。目前, 海面后向散射系数的经验公式使用较多的有 GIT 模型^[6]、HYB 模型^[7]以及美国海军实验室的 NRL 模型^[7], 以上模型都利用岸基雷达系统测量, 受条件限制, 仅能获得低入射余角以内的海杂波数据, 在大入射余角条件下的性能不能反映真实情况。文献[8]通过机载测量方法获得了在大入射余角下的海面散射特性数据研究。各经验公式模型和实测模型如图 1 所示。

同时引信开展了超低空挂飞试验, 详见第 2 节内容。通过信号标定, 获得了引信在 70° 、 75° 和 90°

收稿日期: 2022-03-30; 修回日期: 2022-04-28

作者简介: 蒋涛(1991—), 男, 上海人, 硕士, 从事引信探测、引战系统设计、近场电磁仿真研究。E-mail: jiangtao_sast@163.com。

入射余角下的海面后向散射系数。其中海面气象条件为 1~2 级海况，风速小于 3 级，与文献[8]基本一致。受试验条件限制，引信仅获取了 3 种姿态下的试验数据，由于引信实际测量数据与文献[8]中数据的一致性较好，实际使用时可对文献[8]中数据进行线性插值，获得近似海面后向散射系数。

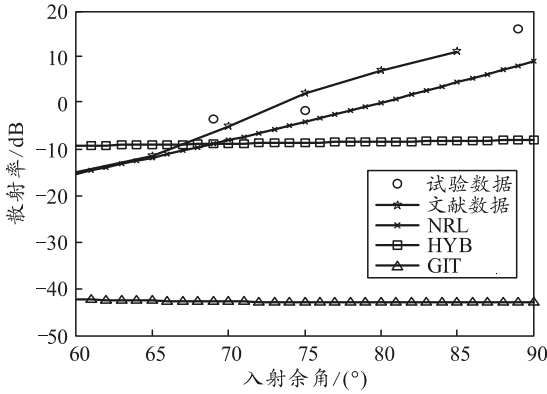


图 1 引信实测数据与理论模型对比

1.2 随机海面回波模型

海杂波信号是一种典型的随机信号，其回波特性通常与海面的波浪起伏密切相关。构造引信的海面回波模型时，首先需要获得海面的物理分布，再通过海面网格划分，计算不同海面元的回波，最终通过面元回波矢量叠加，得到引信海面回波信号。

海面作为一种随机过程，可用一些统计参量描述。海谱是一种功率谱，代表了海浪能量相对于组成波频率的分布，是目前以随机过程描述海浪的主要研究途径。P-M 海谱模型是较为常用的海谱模型之一，由 Pierson 和 Moscowitz 通过对北大西洋充分成长状态下的风浪记录进行谱估计得到的海谱模型^[9]。

$$S(\omega) = \frac{a g^2}{\omega^5} \exp \left[-\beta \left(\frac{g}{u \omega} \right)^4 \right] \cos^4 \left(\frac{\phi - \phi_0}{2} \right) \quad (1)$$

式中： u 为离海面 19.5 m 处风速； $a=8.10 \times 10^{-3}$ ， $g=9.81 \text{ m/s}^2$ ， $\beta=0.74$ ； ϕ 为 X 轴正向沿着逆时针旋转方向到所考察方向之间形成的夹角； ϕ_0 为风速方向。

根据海谱模型来产生模拟海面可采用现行叠加法的 Longuet-Higgins 模型^[10]。该模型把海浪看成各态历经的平稳随机过程，海浪由不同振幅、频率、初始相位的余弦信号叠加而成，其 2 维时变海面可表示为：

$$z(x, y, z) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sqrt{2P(\omega_i, \theta_j) \Delta \omega_i \Delta \theta_j} \times \cos \left[k_i (x \cos \theta_j + y \sin \theta_j) - \omega_i t + \phi_{ij} \right] \quad (2)$$

式中： $P(\omega_i, \theta_j)$ 为 2 维方向性海谱； ω_i 为按海谱等能量间隔划分的频点； θ_j 为 $-180 \sim 180$ 内等间隔点； $\Delta \omega_i = \omega_{i+1} - \omega_i$ ， $\Delta \theta_j = \theta_{j+1} - \theta_j$ 分别为频率和角度间隔； k_i 为波数，一般满足 $\omega_i = \sqrt{gk_i}$ ； g 为重力加速度；初相 ϕ_{ij} 在 $-180 \sim 180$ 内均匀分布。

对于 P-M 海谱， ω_i 可由下式求得：

$$\omega_i = g/u \left(\ln(M/(i+0.5)) / \beta \right)^{-0.25} \quad (3)$$

根据上述理论，典型状态下（风速为 10 m/s，风向为 45° 时）的海面仿真结果如图 2 所示。

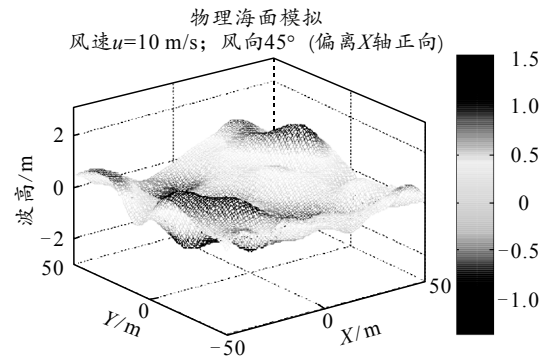


图 2 典型条件下物理海面仿真结果

引信的海杂波回波信号可看成是引信波束照射区中不同海面面元反射回来的信号矢量叠加。引信的波束照射区内的海面分割成众多三角形网格。

假设引信照射条带内的海面面元回波为

$$S_i = c_i \sigma_i e^{2\pi(2R_i/\lambda)} \quad (4)$$

式中： c_i 为回波功率因子，与雷达参数和距离相关； σ_i 为海面电磁反射率，与入射余角密切相关； $2R_i/\lambda$ 为由视线距离引起的回波相位延时。

引信的海面回波 S 可看成是所有面元回波的矢量和：

$$S = \sum S_i \quad (5)$$

1.3 海杂波功率模型

如图 3 所示，现定义的引信坐标系，坐标原点为引信中心， X 轴指向与弹水平速度分量同向， Y 轴平行于铅垂面指向上， Z 轴按右手法则确定。如图 4 所示，无线电引信一般采用锥形波束进行侧向探测，波束在海平面上的投影呈条带状，投影区域还受到引信接收波门的限制。图中： A_1C_1 和 A_2C_2 分别为引信主波束后沿和前沿的投影曲线； A_1 、 A_2 分别为引信主波束后沿和前沿的投影曲线与引信最大接收距离圆的交点，引信波束在海面的投影面积为 $A_1C_1A_2C_2$ 所围面积的 2 倍。

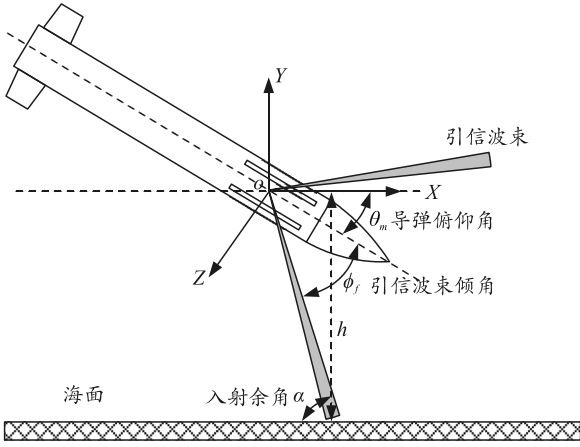


图 3 引信大入射余角工作

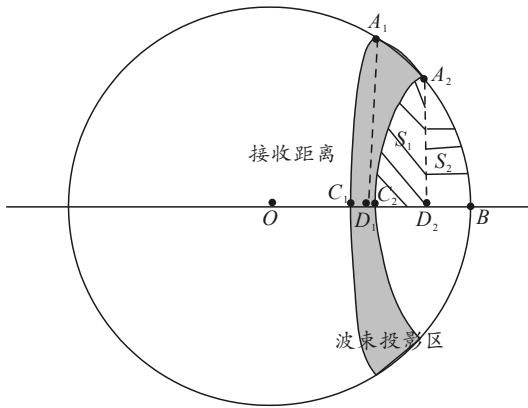


图 4 引信侧向波束海面投影

侧向波束的投影条带大小和波束倾角 ϕ_f ，导弹俯仰角 θ_m 以及引信相对海面高度 h 密切相关。设海面任一点 P 的坐标为 $(x, -h, z)$ ，弹轴指向矢量 M 为 $(1, \tan\theta_m, 0)$ ，则投影曲线应满足下面约束：

$$OP \cdot M = |OP| |M| \cos\phi_f \quad (6)$$

可得

$$(x - h \tan\theta_m)^2 = (\cos^2\phi_f / \cos^2\theta_m)(x^2 + z^2 + h^2) \quad (7)$$

则引信主波束在海面照射曲线为：

$$(x - c)^2 / a^2 - z^2 / b^2 = 1 \quad (8)$$

其中： $a^2 = h^4 \sin^2(2\phi_f) / 4(\cos^2\theta_m - \cos^2\phi_f)$ ， $b^2 = h^2 \sin^2\phi_f / (\cos^2\theta_m - \cos^2\phi_f)$ ， $c = h \sin\theta_m \cos\theta_m / (\cos^2\theta_m - \cos^2\phi_f)$ 。

同时 P 点坐标 $(x, -h, z)$ 不应超出引信接收波门：

$$\begin{aligned} R_1^2 &\leq x^2 + z^2 + h^2 \leq R_2^2 \\ R_1 &= 0.5 \times C \times (\tau_1 + nT_r) \\ R_2 &= 0.5 \times C \times (\tau_2 + nT_r) \end{aligned} \quad (9)$$

式中： C 为光速； τ_1 和 τ_2 分别为接收波门的起始和截止时刻； nT_r 为脉冲的 n 个重复周期； R_1 和 R_2 分

别对应 τ_1 和 τ_2 的接收距离。

引信接收波门如图 5 所示。

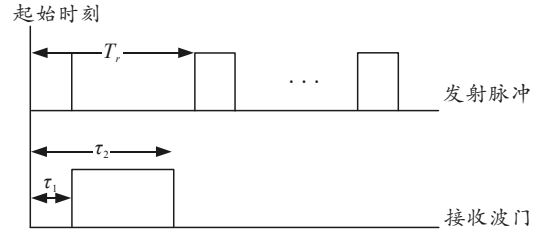


图 5 引信接收波门

根据式(8)和(9)，照射曲线与引信接收距离圆交点 A 的坐标为 (x_A, Z_A) ，其中：

$$\begin{aligned} x_A &= h \tan\theta_m + |\cos\phi_f / \cos\theta_m| R; \\ z_A &= \sqrt{R^2 - h^2 - x_A^2} \end{aligned} \quad (10)$$

则 $A_i C_i D_i (i=1, 2)$ 围成的面积：

$$\begin{aligned} S_1 &= \int_{a+c}^{x_A} z(x) dx = \\ &= ab/2 [\sin\beta_A \sec^2\beta_A - \ln|\sec\beta_A + \tan\beta_A|] \end{aligned} \quad (11)$$

式中 $\beta_A = \arccos[a / (x_A - c)]$ 。

计算 $A_i C_i B (i=1, 2)$ 所围成的面积：

$$S_2 = 0.5 [\alpha (R^2 - h^2) - |x_A z_A|] \quad (12)$$

其中 $\sin\alpha = z_A / \sqrt{R^2 - h^2}$ 。

则引信波束照射面积为：

$$S = 2 [(S_1 + S_2)_{\phi_{f1}} - (S_1 + S_2)_{\phi_{f2}}] \quad (13)$$

式中 ϕ_{f1}, ϕ_{f2} 分别为引信主波束 -3 dB 对应的最大倾角和最小倾角。

则引信的接收功率为

$$P_r = (P_t G_t G_r \lambda^2 S \sigma) / (4\pi)^3 R^4 \quad (14)$$

2 数字仿真与实测结果

某型无线电引信开展了超低空水面挂飞试验，由载机携带引信舱，在水面约 300 m 高度平飞或以一定的俯仰角向水面下降。试验中，通过载机俯冲角和引信舱相对载机夹角调整改变引信天线主波束相对水面的入射余角。

载机飞行速度为 40 m/s，下降速度为 1~3 m/s。引信主波束与弹轴倾角 60°，-3 dB 带宽 4°，接收波门宽度 160 ns。试验获取了随高度下降的引信动态海杂波数据。仿真参数设置与挂飞试验一致，分别进行海面动态回波仿真和海杂波功率仿真。

2.1 海面回波

海面动态回波仿真数据与实测数据对比如图 6

一图 8 所示。结果表明仿真得到的海杂波时域幅度分布特性和频域特性与实测数据一致性较好。

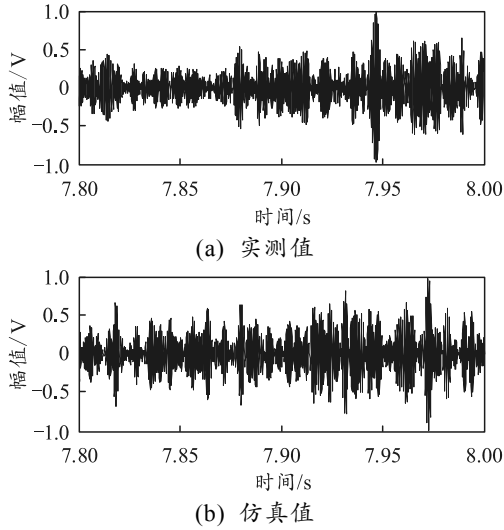


图 6 海杂波时域仿真与实测数据对比

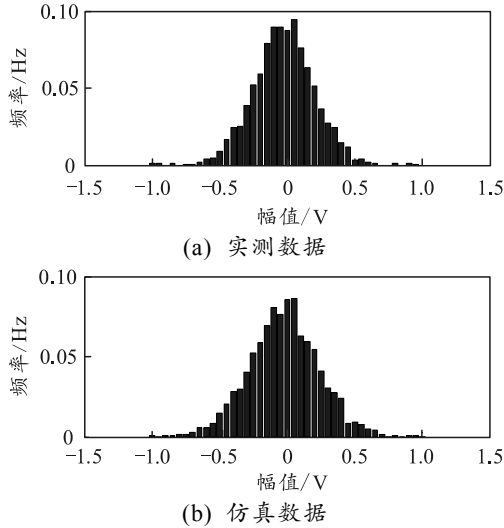


图 7 海杂波幅度直方图分布对比

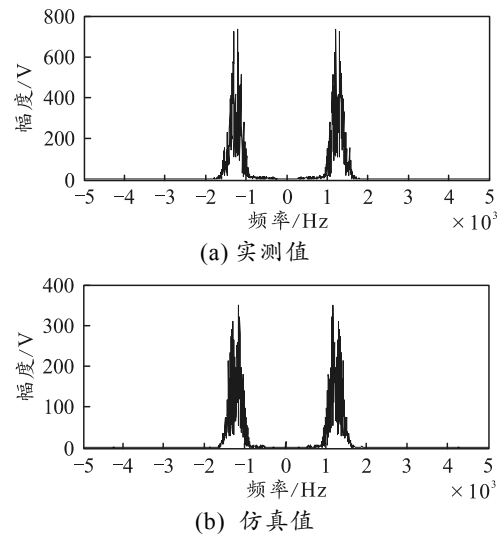


图 8 海杂波频域仿真与实测数据对比

2.2 海杂波功率

将挂飞试验采集到的海杂波数据,见图 9 所示,按引信信号处理周期统计接收功率,得到随时间变化的海杂波实际功率如图 10 所示。同时利用式(14)计算海杂波功率的理论值。根据处理结果,可以看出理论值能较好地反映实际测量结果,表明上述方法的正确性。

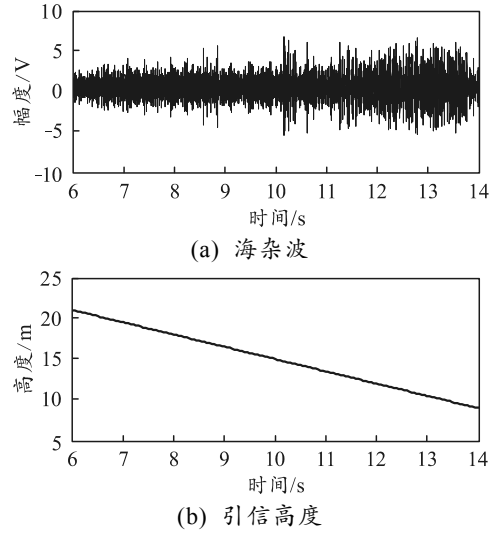


图 9 随高度变化的海杂波回波实测数据

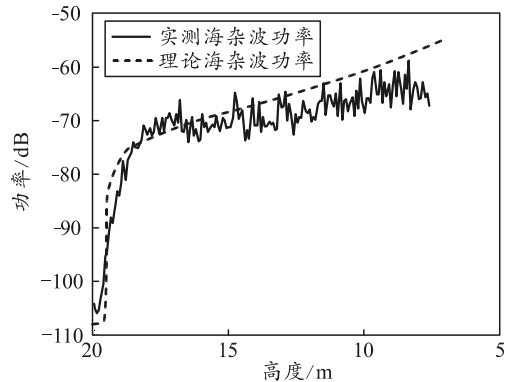


图 10 海杂波回波功率理论值与实测值对比

3 结束语

对比仿真结果与引信的试验数据,引信的随机海面回波模型与实测数据一致性较好,为引信的海杂波特性分析提供了理论基础。目前引信的超低空抗海杂波干扰仍是一个难题,后续将根据笔者建立的海杂波模型进行引信的抗海杂波设计,提升导弹的超低空拦截和突防能力。

参考文献

[1] 冯忠国, 钟生新. 舰空导弹引信发展方向研究[J]. 飞航导弹, 2006(9): 15-18.