

海面角反射器干扰微多普勒建模与仿真

黄孟俊, 陈建军, 赵宏钟, 付强

(国防科学技术大学电子科学与工程学院 ATR 重点实验室, 湖南长沙 410073)

摘要: 研究了在波浪作用下,海面角反射器干扰的微动建模及其微多普勒特性仿真问题。以船搭载的角反射器干扰为具体研究对象,根据海上目标耐波性理论,结合海况等级和角反射器载体的水动力系数,建立了在各种海情条件下角反射器摇摆运动仿真模型。根据设定的雷达参数,推导了角反射器随载体的横摇和垂荡运动产生的雷达微多普勒模型。最后,采用时频方法提取了角反射器回波微多普勒特征,通过仿真实验验证了模型的正确性。

关键词: 海面目标; 无源干扰; 角反射器; 微多普勒

中图分类号: TN 955

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2012.09.06

Micro-Doppler modeling and simulating of corner reflector in sea surface

HUANG Meng-jun, CHEN Jian-jun, ZHAO Hong-zhong, FU Qiang

(Key Laboratory of ATR, School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A motion model and a micro-Doppler signature generation model for corner reflectors in the sea surface are proposed. Based on the sea keeping theory, considering the sea state and the hydrodynamic coefficient of the carrier, the motion model of the corner reflector is established. According to the radar parameters, the micro-Doppler model of the corner reflectors, due to the roll and heave motion, is derived. Finally, the time-frequency transform is used to analyze the time-varying micro-Doppler features. A number of numerical examples are presented to demonstrate the effectiveness of the proposed model.

Keywords: sea surface target; passive interference; corner reflector; micro-Doppler

0 引言

角反射器是一种由多块金属板或栅网按一定角度组成的多面散射体^[1],它能够以较小的尺寸和重量获得很大的有效雷达反射截面。海面角反射器作为海战中一种重要的无源假目标,通常是采用船体搭载(例如靶标船),或是自身设计为充气结构(例如:“橡皮鸭”^[1]无源干扰)漂浮在海面上,在舰船周围形成欺骗式或质心式干扰,诱使导弹攻击角反射器或偏离主舰^[2]。角反射器干扰是反舰导弹面临的重大威胁之一。

海面角反射器随载体平动的同时,在海浪扰动力作用下,产生了绕质心点的摇摆运动,根据文献[3]的定义,该运动属于微动的范畴。文献[3-5]对典型的微动现象进行了研究,给出了目标在三维空间进行复杂运动的一般模型,并结合脉冲多普勒雷达体制,对复杂运动目标的多普勒信号

进行推导。为了利用雷达探测人体运动特征和生命特征,人体的微多普勒建模与特征提取成为了微动研究的热点之一^[6-9]。文献[6]建立了人体行走时的微多普勒模型,通过提取微多普勒特征实现了隔墙探测人体运动。在军事应用领域,微动的研究工作主要集中在利用弹道导弹中段的微动特征识别真假弹头^[10-12]。

研究波浪作用下海面角反射器微动对雷达发射信号的动态调制效应,旨在揭示实际海面角反射器的散射现象和机理,建立其结构特征与微多普勒特征之间的内在联系,为利用微多普勒效应实现对海面角反射器的辨识和探测,提供理论支撑。本文以船体搭载的角反射器为研究对象,如图1所示(以下文中的“海面角反射器”均是指角反射器和载体船的组合物),采用国际上标准的海浪谱模型刻画海浪的运动形式,根据船舶水动力学系数,分析建立了海面角反射器在不同海况条件下的摇

摆运动响应模型,在此基础上建立了角反射器在横摇和垂荡两自由度运动条件下的雷达微多普勒信号模型,最后运用时频变换方法分析了海面角反射器的微多普勒特性,为海面角反射器的动态电磁特性仿真研究提供了一种新的研究途径。

1 海面角反射器动态电磁特性仿真原理

海面角反射器微多普勒特性仿真需要解决以下两个问题。

(1) 海面角反射器在海浪作用下的运动建模问题。

海面角反射器的运动包含两个部分,一是载体船的动力系统推进产生整体的平动或者是载体船随海洋流动形成的平动;二是在海浪周期性拍打作用下船体产生的摇摆运动。由船舶的耐波性理论(研究海面目标在波浪作用下的运动规律的学科)可知,船舶等楔形结构目标,在非规则波(海浪)的激励下,呈现出 6 个自由度的振荡运动,包括 3 种角位移运动:横摇、纵摇、首尾摇;3 种线位移运动:横荡、垂荡、纵荡。具体定义如图 1 所示,坐标系 XOY 固定在船体中,O 点为船体的运动中心,OX 的正轴指向船首,OY 的正轴指向右舷方向,OZ 的正轴垂直向下。

(2) 海面角反射体摆动对雷达照射信号的调制建模问题。

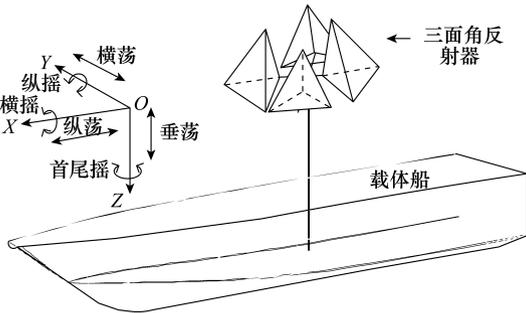


图 1 海面角反射器结构示意图

为了使海面角反射器的方向图覆盖尽可能宽的方位和较大范围内的俯仰角,通常是多个角反射器分别对准不同指向(图 1 给出了一种典型的结构),为分析方便,这里角反射器的雷达散射截面(radar cross section, RCS)可用点散射模型。根据角反射器与雷达的相对位置关系和雷达参数,可以建立角反射器的雷达回波模型。将角反射器的微动信号代入角反射器雷达回波模型中得到角反射器回波信号。

图 2 描述了本文海面角反射器雷达回波仿真原理,主要包括两个模块,第一是海面角反射器运动模型,其输入信号为海浪谱,经过角反射器载体的响应系统,输出了角反射器的运动谱,通过对运动谱的频域离散化处理得到角反射

器的摇摆运动曲线;第二是雷达信号模型,输入为角反射器的点散射模型,根据设定的雷达信号参数和目标的相对位置参数,得到角反射器回波的信号模型,最后将角反射器的微动曲线代入信号模型中,得到角反射器动态特性回波。通过调整参数,还可以仿真不同海况,不同类型载体船,不同运动方式的海上目标雷达回波。

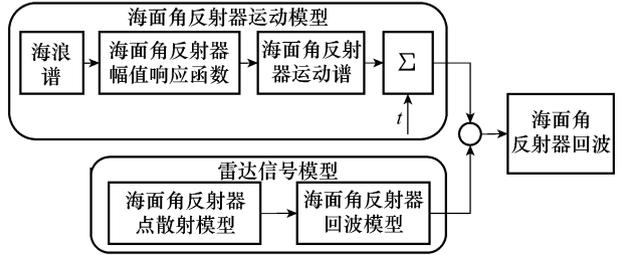


图 2 海面角反射器雷达回波仿真原理图

2 海面角反射器在海浪作用下的微动建模

2.1 海浪谱模型和船舶遭遇海浪谱

海上波浪的运动是非常不规则的复杂运动,为简化问题,通常假定海浪只沿一个固定方向传播,而且波峰线是无限长彼此平行,它的周期和波高是随机变化的,通常称这类不规则波浪为长峰不规则波。线性水波理论已证明,长峰不规则波是由无限多个不同波幅和频率的单元规则波线性叠加而成(各单元规则波相位是随机的)。长峰不规则波海面上任意一点波高的观测,可认为是一个各态历经的,平稳的零均值高斯随机过程,则海面任意位置处波高随时间变化的函数可表示为^[13]

$$\xi(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \delta_n \cos(\omega_n t + \varphi_n) \tag{1}$$

式中, δ_n 表示第 n 个单元规则波的波高; ω_n 为第 n 个单元规则波的角频率; φ_n 为 $[0, 2\pi]$ 区间内的随机相位。

按照流体力学理论可知,单位面积内的单个谐波的能量为

$$E = \frac{1}{2} \rho g \delta_n^2 \tag{2}$$

式中, ρ 为海水密度; g 为重力加速度; δ_n 为第 n 个单元规则波的波幅。

利用谐波叠加原理,在 $\omega_n \sim \omega_n + \Delta\omega$ 之间的随机波的能量为

$$E_1 = \frac{1}{2} \rho g \sum_{\Delta\omega} \delta_n^2 \tag{3}$$

定义 $S_\psi(\omega_n)$ 使下式成立:

$$\frac{1}{2} \rho g \sum_{\Delta\omega} \delta_n^2 = \rho g S_\psi(\omega_n) \Delta\omega \tag{4}$$

当 $\Delta\omega \rightarrow 0$,即单元规则波无穷多时,长峰不规则波在单位面积内的能量可表示为

$$E_2 = \frac{1}{2} \rho g \sum_{n=1}^{\infty} \delta_n^2 = \rho g \int_0^{\infty} S_{\psi}(\omega) d\omega \quad (5)$$

称 $S_{\psi}(\omega)$ 为海浪谱,或称波能谱密度(简称波能谱)。根据式(4)可得

$$\delta_n \approx \sqrt{2S_{\psi}(\omega_n) \Delta\omega} \quad (6)$$

海洋研究者和造船设计者对航行海域的海况进行了大量的观测、记录和分析,在一定的假设下推导出了不同的海浪谱模型。目前公布的典型海浪谱模型主要有:皮尔逊-莫斯柯维奇谱、纽曼谱、国际船模试验池会议(international towing tank conference, ITTC)推荐的波谱以及适合于中国沿海的海浪谱。不同的海浪谱模型差异较大,具体内容可参考文献[13],为了简化分析过程,本文选用 ITTC 推荐的单参数标准海浪谱。

ITTC 推荐的单参数海浪谱可以描述如下:

$$S_{\psi}(\omega_n) = \frac{0.78}{\omega_n^4} \exp \left\{ -\frac{3.11/H^2}{\omega_n^4} \right\} \quad (7)$$

式中, H 为有义波高,它表征了波高的统计值,定义为在一定的海况条件下,将测量的波高按从大到小排列,再从波高大的部分取出 1/3 的数据量进行平均得到。海况的描述是通过选择输入海浪谱的相关参数确定的,即每一种海况对应一组海浪谱参数。对 ITTC 单参数海浪谱来说,即需要确定有义波高 H 。

需要指出的是,式(7)中的角频率 ω_n 是在大地坐标系下定义的,而海面角反射器以一定航速和航向角(即船首与海浪传播方向之间的夹角,如图 3 所示)航行时,波浪实际作用于海面目标上的频率已发生改变,为此需要引入遭遇频率和遭遇海浪谱的概念,遭遇频率和遭遇海浪谱定义为在海面角反射器坐标系下观测得到的海浪频率和海浪谱。

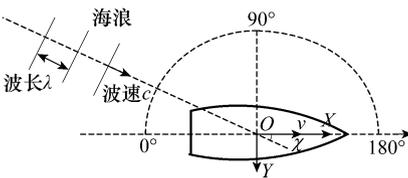


图 3 海面角反射器的航向角

当海面角反射器以航速 v 和航向角 χ 在不规则波中航行时,受到海浪的冲击,其遭遇频率 $\omega_{e,n}$ 为

$$\omega_{e,n} = \omega_n - \frac{\omega_n^2}{g} v \cos \chi \quad (8)$$

海面角反射器的遭遇谱为

$$S_{\zeta}(\omega_{e,n}) = \frac{S_{\psi}(\omega_n)}{|1 - \frac{2\omega_n}{g} v \cos \chi|} \quad (9)$$

式(6)改写为

$$\delta_{e,n} \approx \sqrt{2S_{\zeta}(\omega_{e,n}) \Delta\omega_{e,n}} \quad (10)$$

2.2 随机海浪输入下的海面角反射器运动模型

如图 4 所示,海面角反射器在波浪作用下的摇摆运动,可以用能量转换的原理来解释,不规则波 $\xi(t)$ 作为能量转换器的输入,经过海面角反射器(或是载体船)系统响应的作用,将其能量传递给 $\theta(t)$ 输出。 $\theta(t)$ 为其摇摆运动函数,用数学关系式表示,则有

$$\theta(t) = F[\xi(t)] \quad (11)$$

式中, F 为 $\xi(t)$ 转换到 $\theta(t)$ 的算子,在中低海情条件下 F 可以认为是线性。

根据叠加原理,海浪被认为是由一系列单元规则波叠加而成的,则海面角反射器的摇荡运动也可以看成是由一系列单元规则波引起的单元摇荡的叠加。

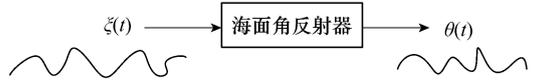


图 4 能量转换原理

根据式(1),海浪某一确定频率的单元规则波的波高可写为

$$\xi_n(t) = \delta_n \cos(\omega_n t + \varphi_n) \quad (12)$$

海面角反射器作为一种能量转换器,在确定频率 ω_n 的单元规则波作用下产生的单元摇荡可以写成

$$\theta_i^e(t) = F[\xi_n(t)] = |Rao_i(\omega_n)| \delta_n \cos(\omega_n t + \varphi_n + \phi_{i,n}), \quad i = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (13)$$

式中, i 表示船体摇摆运动的 6 个自由度; Rao_i 定义为船体第 i 个自由度运动的幅值响应函数(response amplitude operators, Rao),描述了船舶对各个频率单元规则波的响应程度,它的本质是海浪运动与船舶运动之间的传递函数, $|Rao_i|$ 为幅值响应函数的幅度; $\phi_{i,n}$ 为幅值响应函数的相位。

$$Rao_i(\omega_n) = |Rao_i(\omega_n)| \exp(j\phi_{i,n}) \quad (14)$$

Rao 与船体的尺寸、吃水深度、结构等有关,与环境因素无关,它可通过切片法理论计算[13]或目标耐波性实验[14]测量得到,文献[14]运用水动力学分析软件分别计算了 Wigley 船型,“企业号”航母和箱型三体船的幅值响应函数。

船舶任意时刻的摇荡运动可以认为是各单元摇荡运动的叠加,即

$$\theta_i(t) = \sum_{n=1}^N |Rao_i(\omega_n)| \delta_n \cos(\omega_n t + \varphi_n + \phi_{i,n}) \quad (15)$$

考虑船体的航速和航向角,由式(8)和式(9)可以得到

船体的遭遇频率和遭遇海浪谱,则式(15)改写为

$$\theta'_i(t) = \sum_{n=1}^N |Rao_i(\omega_{e,n})| \delta_{e,n} \cos(\omega_{e,n}t + \varphi_n + \phi_{i,n}) \quad (16)$$

根据式(16)就可以预测船体 6 个自由度的运动规律。

3 海面角反射器回波的微多普勒建模

考虑如图 5 所示的情况,在海况较低的条件,海面角反射器摇摆幅度不大,在一定范围内可近似认为海面角反射器 RCS 幅度无起伏。为了说明研究思路,而简化分析过程,本文只考虑海面角反射器的横摇和垂荡运动。

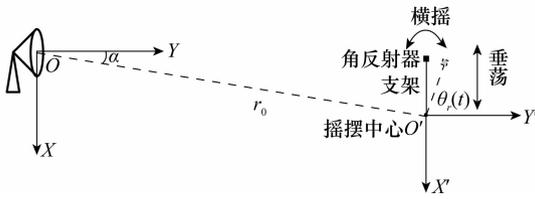


图 5 雷达和运动海面角反射器的几何关系

雷达位于观测坐标系 (X, Y) 的原点 O , X 轴垂直向下, Y 轴平行于水平面,目标坐标系 (X', Y') 与雷达观测坐标系 (X, Y) 在同一个平面内,其原点为海面角反射器的等效摇摆中心 O' , X' 平行于 X , Y' 平行于 Y ,海浪沿 Y 轴方向传播,载体船的遭遇角为 90° ,此时遭遇谱等于海浪谱。设角反射器的俯仰角为 α ,摇摆中心相对于雷达的初始径向距离为 r_0 。

设角反射器初始时刻在目标坐标系 (X', Y') 的坐标为 $p(0) = [-h, 0]^T$,则在 t 时刻的坐标为 $p(t) = [-h \cos(\pi - \theta_r(t)), -h \sin(\pi - \theta_r(t))]^T$,初始时刻 O' 在雷达坐标系 (X, Y) 中的坐标为 $q(0) = [r_0 \sin \alpha, r_0 \cos \alpha]^T$, t 时刻的坐标为 $q(t) = [r_0 \sin \alpha + \theta_h, r_0 \cos \alpha]^T$,其中 $\theta_r(t)$ 为角反射器的横摇运动函数, $\theta_h(t)$ 为角反射器的垂荡运动函数,在 t 时刻角反射器与雷达的径向距离 $R(t)$ 为

$$R(t) = p(t) + q(t) \quad (17)$$

则

$$\begin{aligned} R(t) &= \|R(t)\| = \|p(t) + q(t)\| = \\ &= [(-h \cos(\pi - \theta_r(t)) + r_0 \sin \alpha + \theta_h(t))^2 + \\ &= (-h \sin(\pi - \theta_r(t)) + r_0 \cos \alpha)^2]^{\frac{1}{2}} = \\ &= [r_0^2 + \theta_h^2(t) + h^2 - 2h\theta_h(t) \cos \theta_r(t) + \\ &= 2r_0\theta_h(t) \sin \alpha + 2hr \sin(\theta_r(t) - \alpha)]^{\frac{1}{2}} \quad (18) \end{aligned}$$

当 $\alpha=0$ 时,有

$$R(t) = [r_0^2 + \theta_h^2(t) + h^2 - 2h\theta_h(t) \cos \theta_r(t) + 2hr \sin(\theta_r(t))]^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

(1) 当海面角反射器只有横摇运动,即 $\theta_h(t) = 0$,且 $r_0 \gg h$ 时,有

$$R(t) \approx r_0 + h \sin(\theta_r(t)) \quad (20)$$

在微幅摆动条件下 $\sin(\theta_r(t)) \approx \theta_r(t)$,式(20)可简化为

$$R(t) \approx r_0 + h\theta_r(t) \quad (21)$$

根据式(16)可得

$$\theta_r(t) = \sum_{n=1}^N |Rao_r(\omega_{e,n})| \sqrt{2S_\zeta(\omega_{e,n}) \Delta\omega} \cos(\omega_{e,n}t + \beta_{r,n}) \quad (22)$$

角反射器的径向速度为

$$R'(t) = h\theta'_r(t) \quad (23)$$

$$R'(t) = -h \sum_{n=1}^N \omega_{e,n} |Rao_r(\omega_{e,n})| \sqrt{2S_\zeta(\omega_{e,n}) \Delta\omega} \cdot \sin(\omega_{e,n}t + \beta_{r,n}) \quad (24)$$

假设雷达发射信号为单频连续波 $\exp(j2\pi ft)$,其中 f 为载频,角反射器的微多普勒频率为

$$f_{mD} = \frac{2f}{c} R'(t) \quad (25)$$

将式(24)代入式(25)得

$$f_{mD} = \frac{-2hf}{c} \sum_{n=1}^N K \sin(\omega_{e,n}t + \beta_{r,n}) \quad (26)$$

其中

$$K = \omega_{e,n} |Rao_r(\omega_{e,n})| \sqrt{2S_\zeta(\omega_{e,n}) \Delta\omega} \quad (27)$$

由式(26)可以得到如下的结论:

①当角反射器相对于运动中心距离 h 增大时,角反射器径向速度 $R'(t)$ 增大,微多普勒幅值增大。

②在给定的海况条件下(即 $S_\zeta(\omega_{e,n})$ 确定),微多普勒谱只与角反射器载体的幅值响应函数 $|Rao_r(\omega_{e,n})|$ 有关。

(2) 当海面角反射器只有垂荡运动,即 $\theta_r(t) = 0$ 时,有

$$R(t) = [r_0^2 + (h - \theta_h(t))^2]^{\frac{1}{2}} \approx r_0 + \frac{(h - \theta_h(t))^2}{2r_0} \quad (28)$$

$$\theta_h(t) = \sum_{n=1}^N K'_h \cos(\omega_{e,n}t + \beta_{h,n}) \quad (29)$$

其中

$$K'_h = |Rao_h(\omega_{e,n})| \sqrt{2S_\zeta(\omega_{e,n}) \Delta\omega} \quad (30)$$

$$R'(t) = \frac{(h - \theta_h(t))\theta'_h(t)}{r_0} \quad (31)$$

$$f_{mD} = \frac{-2hf}{c} \sum_{n=1}^N K \sin(\omega_{e,n}t + \beta_{r,n}) \quad (32)$$

由式(31)可知,当雷达视线方向为小入射余角时 α 接近于 0,且在远场条件下($r_0 \gg h$),角反射器的垂荡运动引入径向距离变化率非常小。由式(30)和式(26)可得,垂荡运动引入的多普勒频率分量较小。

4 仿真分析

4.1 不同海况下海面角反射器横摇与垂荡运动

海浪谱选用 ITTC 单参数模型,计算 3 种有义波高为 0.5 m、0.7 m 和 1.3 m,分别对应二级海况、三级海况和四级海况。载体船长为 25 m,宽为 6 m,型深 4 m,吃水深度为 1 m,角反射器相对于运动中心的高度为 5 m。

设海面角反射器的遭遇角为 90° ,其遭遇海浪谱如图 6(a)所示,随着海况升高,海浪遭遇谱峰值点的频率降低,能量增大。本文采用船舶水动力学计算软件 Seakeeper 计算载体船的幅值响应函数。图 6(b)中载体船的垂荡 Rao 在频率(0,2 rad/s)范围内接近于 1,表明载体船随着海浪的长波分量起伏,对于海浪短波分量的响应接近于 0。

由载体船的横摇幅值响应函数可知,载体横摇谐振频

率在 3 rad/s 附近,图 6(c)和图 6(d)分别为角反射器的横摇和垂荡运动曲线,随着海况等级的增加,横摇和垂荡运动的幅度都增加。图 6(e)中角反射器的横摇运动谱随着海况等级的增加,能量升高,谱宽度变大,但谱峰位置没有变化,谱峰位置的频率对应载体的横摇谐振频率。垂荡运动谱为图 6(f),由于二、三、四级海浪谱能量集中在(0,2 rad/s)频段内,此时的垂荡幅值响应函数接近 1,所以垂荡运动谱曲线与遭遇海浪谱基本一致。

4.2 海面角反射器微多普勒信号提取

设雷达发射信号载频为 2 GHz,脉冲重复周期为 0.002 s,根据式和式产生雷达回波,分别得到 3 种海况下的平滑伪魏格纳分布(smoothed pseudo wigner-Ville distribution, SPWVD),采用峰值检测法估计角反射器回波的瞬时多普勒频率,然后运用傅里叶变换获取海面角反射器的微多普勒谱,结果如图 7 所示。

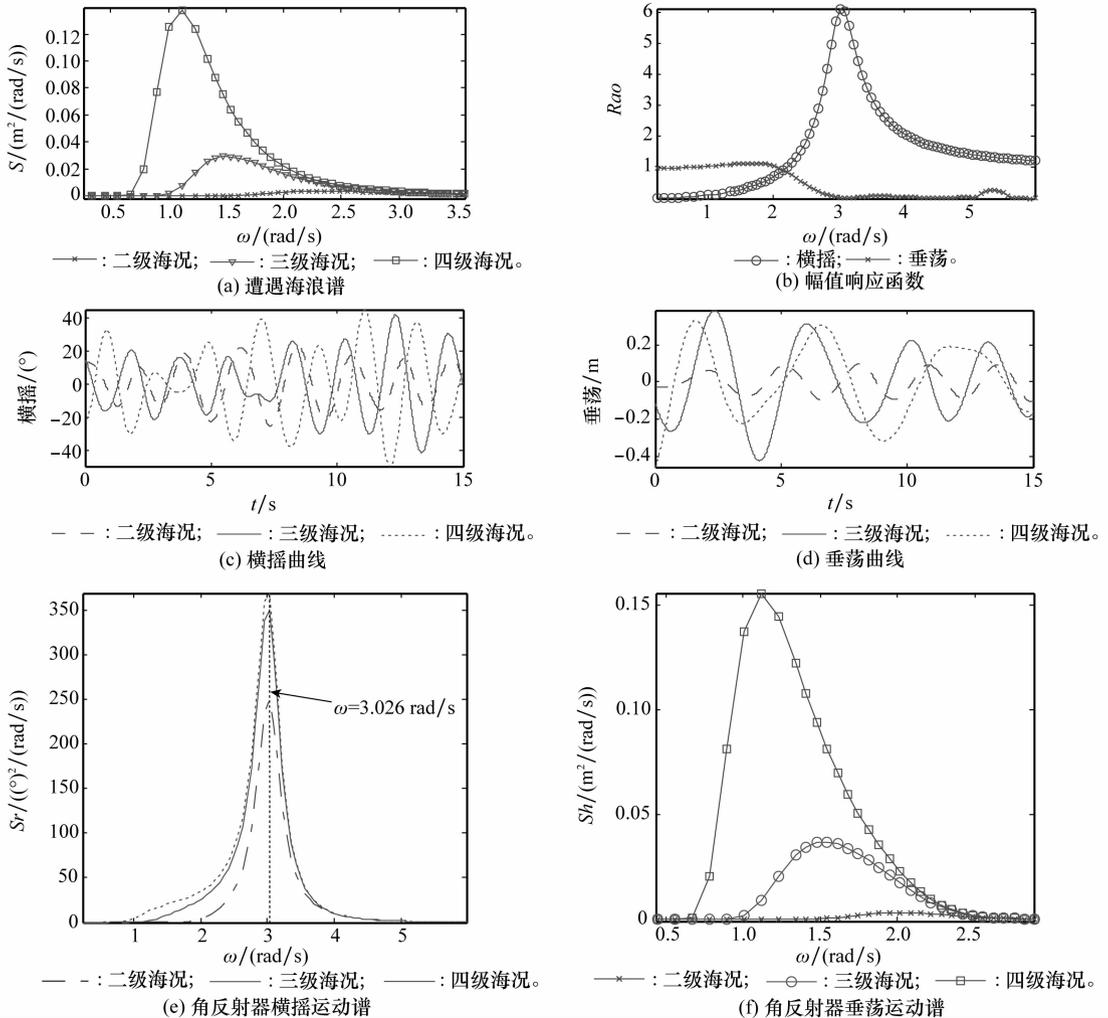


图 6 角反射器(载体)运动特征

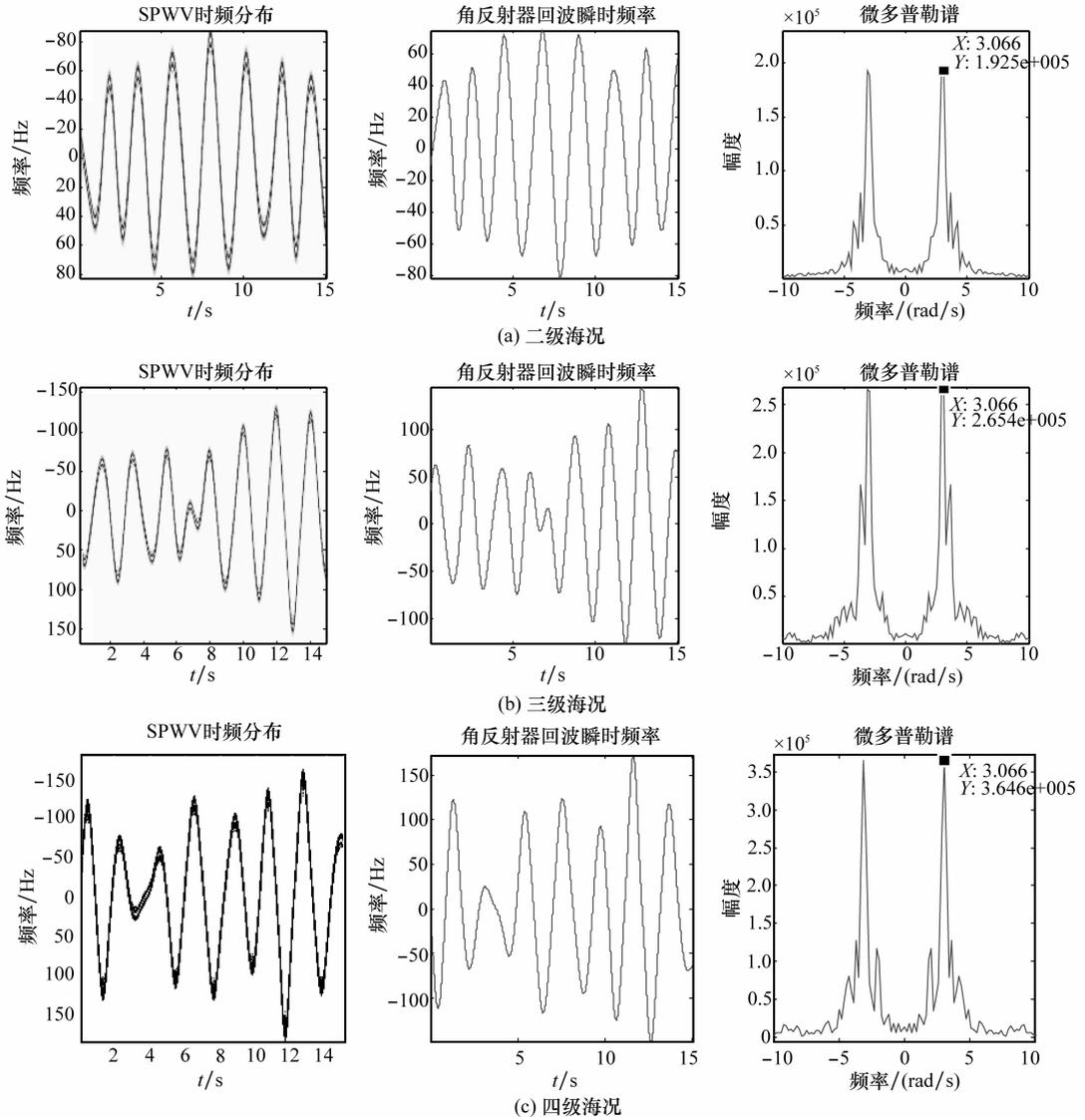


图 7 不同海况条件下的角反射器微多普勒

将图 6(c)与图 7 中 3 种海况的瞬时频率对比可知,角反射器微多普勒信号主要受横摇运动的影响,这与第 3 节中的理论推导是一致的。在不同海况条件下,微多普勒谱峰值能量增大,但峰值能量对应的频率点都出现在载体船横摇谐振频率附近,这可以用惠更斯原理解释。海面角反射器的横摇是一种类似钟摆运动的简谐振荡,其固有的谐振频率只与载体船的结构特征有关,不受波浪力大小的影响。

5 结束语

本文结合了船舶的耐波性理论和雷达微多普勒理论,提出了一种新的海面角反射器微多普勒特性仿真方法,该思路同样可用于其他海面目标的微多普勒特性仿真。由理

论推导可知,海面角反射器的微多普勒谱反映了它在海浪激励下的运动特性,仿真分析结果表明,对于无动力推动的海面角反射器,在不同的海况条件下,其微多普勒谱的峰值点的频率始终在载体的横摇谐振频率附近。海面角反射器干扰可分为有动力型和无动力型,当海面角反射器以不同的航速和航向角推进时,它的幅值响应函数差异较大,在雷达回波中表现出的微多普勒特性有哪些差异,都是后续研究的方向。

参考文献:

[1] 陈静. 雷达无源干扰原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009. (Chen J. *Principles of radar passive jamming* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.)

- [2] 柴刚,陆益敏,陈晓明. 角反射器在海军中的战术使用[J]. 舰船电子对抗,2006,29(5):11-14.(Chai G, Lu Y M, Chen X M. Tactical usage of corner reflector in navy[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*,2006,29(5):11-14.)
- [3] Chen V C. Micro-Doppler effect in radar: phenomenon, model, and simulation study[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(1): 2-21.
- [4] Chen V C. Doppler signatures of radar backscattering from objects with micro-motions[J]. *IET Signal Processing*, 2008, 2(3):291-300.
- [5] Chen V C, Lin C T, Pala W P. Time-varying Doppler analysis of electromagnetic backscattering from rotating object[C]// *Proc. of the IEEE Radar Conference*, 2006: 807-812.
- [6] Shobha S R. Simulation and Analysis of human micro-Doppler in through-wall environments[J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(4): 2015-2023.
- [7] Raj R G, Chen V C, Lipps R. Analysis of radar human gait signatures[J]. *IET Signal Processing*, 2010, 4(3):234-244.
- [8] Youngwook K, Hao L. Human activity classification based on micro-Doppler signatures using a support vector machine[J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(5): 1328-1337.
- [9] Smith G E, Woodbridge K. Multistatic micro-Doppler radar signatures of personnel targets[J]. *IET Signal Process*, 2010, 4(3): 224-233.
- [10] Wang T, Wang X S. Estimation of precession parameters and generation of ISAR images of ballistic missile targets[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(4): 1983-1995.
- [11] Gao H W, Xie L G. Micro-Doppler signature extraction from ballistic target with micro-motions[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronics Systems*, 2010, 46(4):1969-1982.
- [12] Lei P, Wang J. Analysis of radar micro-Doppler signatures from rigid targets in space based on inertial parameters[J]. *IET Radar, Sonar and Navigation*, 2011, 5(2):93-102
- [13] 李积德. 船舶耐波性[M]. 哈尔滨: 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1992. (Li J D. *Ship seakeeping theory* [M]. Harbin: Harbin Ship Building Engineering Institute Press, 1992.)
- [14] 高学静. 复合船型运动预报及模型试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009. (Gao X J. Research on the motion prediction and model test analysis of the hybrid monohull [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.)
- [15] 姜宗玉. 船舶在波浪上线性运动的三维频域计算技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008. (Jiang Z Y. A study of 3D computational technology for predicting linear ship motions in frequency domain [D]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2008.)