维普资讯 http://www.cqvip.com

第15卷第1期 华东船舶工业学院学报(自然科学版) Vol.15 No.1
2001年2月 Journal of East China Shipbuilding Institute(Natural Sciences) Feb. 2001

文章编号：1006-1088(2001)01-0048-04

船舶动力定位海浪环境的实时仿真与海浪谱分析

王立军， 陈 锋， 丁福光， 施小成
（哈尔滨工程大学 动力工程系，黑龙江 哈尔滨 150001）

摘 要：提出一种根据随机海浪频谱来实时模拟随机海浪的方法，它可以用于研究动力定位船舶及其控制系统在不同海况时的性能。该方法可以采用多种海浪谱来进行随机海浪的仿真。仿真结果利用了快速傅立叶变换 FFT(Fast Fourier Transform)进行频谱分析。仿真程序可用于实际的动力定位船舶系统。

关键词：海浪模拟；频谱分析；快速傅立叶变换；动力定位系统
中图分类号：U675.5；TP15 **文献标识码**：A

0 引 言

船舶经常在风浪中运动，在研究和设计船舶控制系统时，经常需要研究海浪对船舶及其控制系统的影响，特别是动力定位船舶需要较高的定位精度[1]。因此，必须有一个较理想的海浪信号来研究上述问题。海浪的实时仿真可以解决这个问题。现今国内外的多种资料表明，已发表的关于海浪的论文都是针对某些用途，模型结果偏重于海浪实验和数据统计，没有统一而又通用的固定模型，无法满足动力定位的需求。本文提出的仿真方法能模拟多种长峰波不规则海浪，该方法既能满足实时仿真的需要，具有较高的仿真精度，又具有实时分析的功能。这个方法可用做实际动力定位船舶仿真中的随机海浪环境，且具有一定的通用性。

1 随机海浪的仿真原理[2]

研究船舶在随机海浪作用下的运动特性和船舶动力定位系统在海浪作用下的动态响应时，经常把海浪作为一个平稳随机过程来处理。目前，常用长峰波海浪进行研究。假定随机海浪是由许多不同波长、波幅的谐波叠加而成，每个谐波都有同一个前进方向。根据海浪理论，海面上某一点随机海浪的波高可用(1)式表示。

$$\xi(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \xi_{ai} \cos(k_i x - \omega_i t + \epsilon_i) \tag{1}$$

式中，ξ_{ai}、k_i、ω_i 和 ϵ_i 分别是第 i 个谐波的波幅、波数、角频率和初相位。在仿真条件下，考虑到实际应用，可以忽略高次谐波，则(1)式可以写成：

$$\xi(t) = \sum_{i=1}^{n} \xi_{ai} \cos(k_i x - \omega_i t + \epsilon_i) \tag{2}$$

由海浪理论可知，相位 ϵ_i 是随机的，它在$(0,2\pi)$之间均匀分布。仿真时，用一个$(0,1)$之间均匀分

收稿日期：2000-07-10
作者简介：王立军(1971-)，男，河北承德人，哈尔滨工程大学硕士研究生。

维普资讯 http://www.cqvip.com

布的的伪随机数来产生各个谐波的初相位 ε_r。(0,1) 之间的伪随机数的产生借助于混合同余法,递推公式为:

$$X_i^* = AX_{i-1}^* + c(\mathrm{mod}M) \tag{3}$$

其中,$M = 2^k$,$k > 2$ 的整数;$A = 1(\mathrm{mod}4)$ 即 $A = 2^n + 1$,$2 \leqslant n \leqslant 34$ 的整数,c 为正数;初值 X_0^* 为非负数,参数的选取为:$A \equiv 179$,$X_0 = 11$,$M = 2^{36}$。

于是(0,2π) 间的初相角可表示为:$\varepsilon_r = 2\pi X_i$　　(4)

采样的频率　$\omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_n$ 求得后,就可求得 $S(\omega_1), S(\omega_2) \cdots, S(\omega_n)$,又由海浪理论,得波幅 ξ_{ar} 和频谱之间存在着如下关系:

$$\sum_{\Delta\omega} \frac{1}{2}\xi_{ai}^2 = S(\omega_i)\Delta\omega_i \tag{5}$$

$\Delta\omega$ 趋近于无限小时,在 $\Delta\omega$ 区间内的单元波趋于确定频率的谐波,故(5) 式可变为:

$$\xi_{ai} = \sqrt{2S(\omega_i)\Delta\omega} \tag{6}$$

根据(6) 式,可由 $S(\omega_i)$ 来计算随机海浪的每个波幅 ξ_{ai}。确定了随机海浪的各谐波的波幅 ξ_{ar} 和初相角 ε_i 之后,就可以确定各次谐波 $\xi_r(t)$,把 $\xi_i(t)$ 叠加起来,得到(2) 式所示的长峰波海浪 $\xi(t)$。

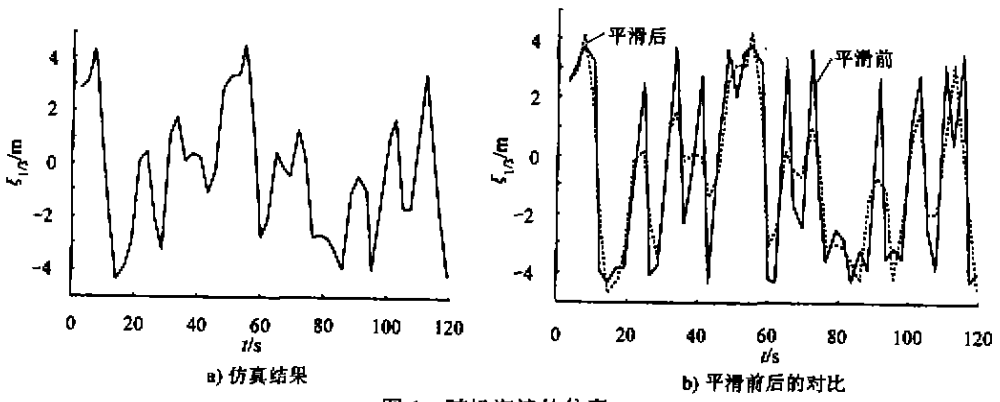
表1　不同海况仿真频段和频段增量

Tab. 1　Simulating frequency zones and additions in different sea conditions

有义波高 $\xi_{1/3}$/m	风速 v/(m/s)	仿真频段($\omega_1 - \omega_n$)/(rad/s)	频率增量 $\Delta\omega$/(rad/s)
<2.5	<8	0.3~3.5	0.09
2.5~4.5	8~11.5	0.2~2.5	0.07
>4.5	>11.5	0.15~1.8	0.06

为了研究海浪及其对动力定位船舶的影响,经常应用海浪谱理论。最常用的有 Pierson-Moscowitz 谱(简称 PM 谱),ITTC 推荐的海浪谱也是基于 PM 谱。仿真时首先确定欲仿真的海浪谱 $S(\omega)$的形式及参数(有义波高、风速等)。海浪谱公式可取为:

$$S(\omega) = \frac{A}{\omega^5}\exp(-\frac{B}{\omega^4}) \tag{7}$$



a) 仿真结果　　b) 平滑前后的对比

图1　随机海浪的仿真

Fig. 1　Simulation results of random sea wave

$A = 0.78$;$B = 3.11/\xi_{1/3}^2$;$\xi_{1/3}$是有义波高,(7) 式称为 ITTC 单参数谱。然后根据某种原则对其进行离散化,根据离散化的海浪频谱,确定在每个离散点频率下的谐波 ξ_{ai}。离散的方法很多,现采用等间隔频率采样,仿真的频段为 $\omega_1 - \omega_n$,采样频率的增量是 $\Delta\omega = (\omega_n - \omega_1)/n$。因为海浪谱是窄带谱,一般 $\omega_1 - \omega_n$ 取窄一些,根据海况,仿真频段和频率增量取值如表1所示,根据各谐波的初相位 ε_i 的分布确定初相位,然后把各个谐波叠加起来就得到了欲仿真的随机海浪,仿真结果如图1所示。仿真结果具有较高的精度,仿真的速度也很快,仿真过程适用于其它海浪谱。

维普资讯 http://www.cqvip.com

2 海浪仿真结果的检验和修正

为检验所仿真的海浪是否符合要求的海浪频谱，再把仿真得到的海浪离散化，并利用快速傅立叶变换 FFT(Fast Fourier Transform) 进行频谱分析，并对海浪谱进行了谱平滑过程处理。首先，对仿真输出的海浪 $\xi(t)$ 进行采样。根据 Shannon 定理可以确定采样周期的最大值，设采样周期为 τ。例如，当 $\xi_{1/3} < 2.5$ m，$\omega_n = 3.0$ 时，则可得 $\tau \leqslant 1.04$ s，即最大采样周期是 1.04 s。对 $\xi(t)$ 进行采样后，然后对采样点进行快速傅立叶变换 FFT。各种海浪谱都是窄带谱，它们的能量都集中在某一频段，仿真中忽略了海浪谱的高频部分，$S(\omega)$ 的最高频率为 ω_n，由 Shannon 定理，当满足 $\omega_n \leqslant \pi/\tau$ 时，对输出的海浪 $\xi(t)$ 进行频谱分析得到 $S_1'(\omega)$。随机海浪双侧谱的估计值为[3]：

$$S_1'(\omega) = \frac{1}{2\pi N}\left|\sum_{i=1}^{N} x_i e^{j\omega_r}\right|^2 \tag{8}$$

式中，j 是复数算子，N 是进行频谱分析的点数，x_i 代表采样点的波高值。为了计算一系列离散谱，令 $\omega_r = 2\pi r/N$，并带入(8)式，其中 $0 \leqslant r \leqslant \frac{N}{2}$，又令 $x_i = \xi_{i-1}$，得：

$$S_1'\left(\frac{2\pi r}{N}\right) = \frac{1}{2\pi N}\left|\sum_{l=0}^{N-1} \xi_l e^{\frac{2\pi}{N}rl}\right|^2 \tag{9}$$

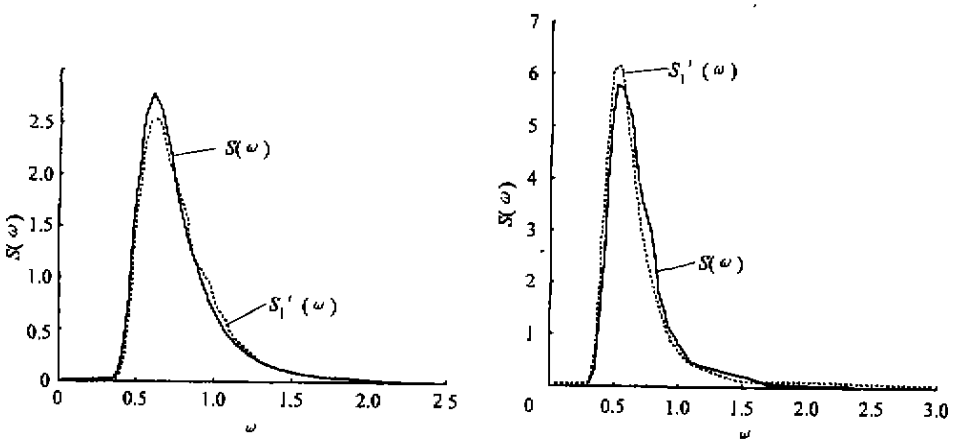
令

$$A_r = \sum_{l=0}^{N-1} \xi_l e^{\frac{2\pi}{N}rl} \tag{10}$$

对于单侧谱估计有：

$$S_1\left(\frac{2\pi r}{N}\right) = 2S_1'\left(\frac{2\pi r}{N}\right) = \frac{1}{\pi N}|A_r|^2 \tag{11}$$

FFT 就是计算(10)式的快速算法，由(11)式就可以得到仿真海浪的离散估计谱。经过频谱分析并将修正的海浪谱 $S_1'(\omega)$ 与原来的海浪谱 $S(\omega)$ 做了比较，如图 2 所示，由图可知仿真结果具有足够的精度。



a) 波高 $\xi_{1/3}=4$ m　　b) 波高 $\xi_{1/3}=7$ m

图 2 仿真的海浪谱 $S_1'(\omega)$ 与理想的海浪谱 $S(\omega)$

Fig. 2 Simulation wave-spectrum $S_1'(\omega)$ and original wave-spectrum $S(\omega)$

3 结束语

研究动力定位船舶在海浪环境作用下的运动性能具有重要意义，根据船舶的运动性能及环境因素的影响，可以为船舶控制系统提供控制策略和设计合适的滤波器，同时还可以用来调试动力定位控制仪的软硬件配置，实现动力定位的实时模拟。本文提出的随机海浪的实时仿真是为研究动力定位船舶及其控制系统在海浪作用下的运动过程而设计的，它是根据随机海浪频谱来实时模拟随机海浪的方法，它

维普资讯 http://www.cqvip.com

可以用于研究动力定位船舶及其控制系统在长峰波海浪中的性能。该方法可以采用多种风浪谱来进行随机海浪的仿真。仿真结果利用了FFT进行频谱分析,并进行了谱的平滑修正过程。仿真程序具有很大的通用性和灵活性,可以很方便地修改以满足多种目的使用,用于各种船舶及海上结构物在海浪作用下的运动分析过程。仿真程序可用于实际的动力定位船舶系统,可以提高动力定位的精度,仿真方法具有较快的速度,又有较高的精度。

参考文献:

[1] 摩根 M J.近海船舶的动力定位[M].北京:国防工业出版社.1987.
[2] 文圣常,余宙文.海浪理论与计算原理[M].北京:海洋出版社.1984.284.
[3] 金鸿章.长峰波随机海浪的实时仿真[J].船舶工程,1987(1):24~30.

Real-time Simulation and Spectrum-Analisis of a Dynamic Positioning System Ship in Waves

WANG Li-jun, *CHEN feng*, *DING Fu-guang*, *SHI Xiao-cheng*
(Dept. of Power Eng., Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang 15001, China)

Abstract: Provides a way to simulate waves in real-time according to random-wave-spectrum. It can be used to study the performances of dynamic positioning ship and control system under different waves. This method adapts several kinds of wave-spectrum to simulate waves. The results of simulation apply FFT(Fast Fourier Transform) to analyse the spectrum. The program has been applied to DPS (Dynamic Positioning System) ships.

Key words: sea wave simulation; frequency spectrum analysis; fast Fourier transform; dynamic positioning system

(责任编辑:汪时美)