

文章编号: 0258-7025(2009)11-2934-05

船载无线激光通信系统模拟运动平台的研制

卢 莎¹ 梁忠诚¹ 汪亭玉² 薛威阳¹

(¹ 南京邮电大学光电工程学院, 江苏 南京 210003; ² 江苏省海事职业技术学院轮机系, 江苏 南京 211170)

摘要 无线激光通信具有通信容量大、数据传输速率高、抗电磁干扰能力强、保密性高、功率消耗小、结构轻巧等主要优点,是未来船舶间通信的发展趋势。研究了船载无线激光通信系统中的模拟运动平台。该运动平台主要由水平移动台、垂直升降台、旋转台和摆动台四部分组成,分别模拟船舶在海浪中的四种摇荡运动:纵荡、垂荡、首摇和横摇。本文根据船舶运动方程,采用线性系统理论分析船舶在海浪中的摇荡运动规律,由海浪谱得到船舶摇荡运动谱,进而得到船舶摇荡运动方程。通过这四种运动合成出船舶在海浪中复杂的运动状态,从而在实验室条件下模拟出船舶在各种不同海况中的运动情况,为研究船载激光通信系统提供仿真实验环境。对该运动平台的操纵控制由计算机实现。

关键词 无线激光通信; 模拟运动平台; 线性系统; 海浪谱; 船舶运动

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093611.2934

Study and Simulation of the Moving Ship Platform with Free-Space Optical Communication System

Lu Sha¹ Liang Zhongcheng¹ Wang Tingyu² Xue Weiyang¹

¹ College of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China
² Marine Engineering Department, Jiangsu Maritime Institute, Nanjing, Jiangsu 211170, China

Abstract Free-space optical communication (FSOC), which features the large capacity, high data transmission rate, high anti-EM interference capability, good security, low power consumption, small dimension and simple structure, is the tendency of the communication between ships in the future. This paper studies the simulated moving platform of the ship-borne laser communications system, which mainly consists of four parts: a horizontal, a vertical, a rotating and a swing moving platforms, simulating ship's four swaying motions in wave: surge, heave, roll and yaw respectively. According to the ship motion equations, we mainly discuss the motion law of the ship in the wind waves by using linear system theory. These four movements can be used to synthesize ship's complex movements in waves, and thus could simulate ship's movements in various sea conditions in laboratory, providing a simulation experimental environment for studying the ship-borne laser communications system. The manipulation and control of the platform are realized through computer.

Key words ship-borne free-space optical communication system; simulated moving platform; linear system; wave spectrum; ship motion

1 引 言

目前船舶之间使用比较普遍的通信手段是无线电通信。它的优点是传递数据快,传递距离大,缺点则是保密性比较差,容易被窃听和干扰。采用无线激光通信可以弥补这种缺陷^[1,4]。无线激光通信,

又称自由空间光通信,是光纤通信和无线通信相结合的产物。它是指以激光为载体,在真空或大气中传递信息,不需要任何有线信道为传输媒介的一种通信技术^[3,5,10]。无线激光通信主要优点是:传输速率极高,通信容量极大;光束方向性好,保密性高;不

作者简介: 卢莎(1983-),女,硕士研究生,主要从事自由空间光通信方面的研究。E-mail:lusha45254@163.com

导师简介: 梁忠诚(1958-),男,教授,博士生导师,主要从事光信息存储与处理、微流控光学技术、自由空间光通信等方面的研究。E-mail: zcliang@njupt.edu.cn

需无线电频率使用许可；不需占用、租用光纤通道；体积小，重量轻，成本低，安装简捷方便等^[2,11,12]。

本文研究船载激光通信系统中的模拟运动平台。该运动平台主要由水平移动台、垂直升降台、旋转台和摆动台四部分组成，分别模拟船舶在海浪中的四种摇荡运动：纵荡、垂荡、首摇和横摇。根据船舶运动原理，这四种运动可以合成出船舶在海浪中各种复杂的运动状态，从而可以在实验室条件下模拟出船舶在各种不同海况中的运动情况，为研究船载激光通信系统提供实验平台。

2 船舶运动原理

航行在风浪中的船舶，由于受到海浪的扰动，船体会发生复杂的运动。把船舶看作刚体，这种复杂的运动可以分解为三种角位移和三种线性位移，采用 $Oxyz$ 直角坐标系描述。在平衡状态下，坐标系原点 O 与船舶重心位置 G 重合， x 轴正向指向船首， y 轴在水平面内。船舶重心 G 沿 Ox 轴的直线运动称为纵荡，沿 Oy 轴的运动称为横荡，沿 Oz 轴的运动称为垂荡；船体绕 Ox 轴的转动称为横摇，绕 Oy 轴的转动称为纵摇，绕 Oz 轴的转动称为首摇，六种运动如图 1 所示。

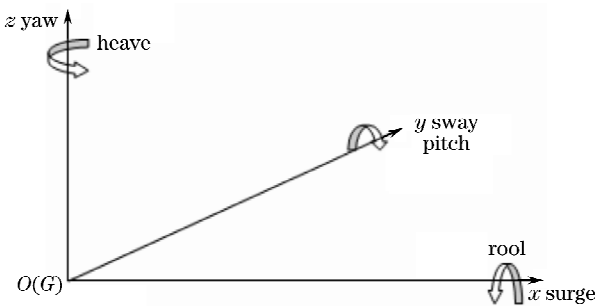


图 1 船舶的六自由度运动示意图

Fig. 1 Schematic of the ship's six-degree-of-freedom movement

假设船舶在海浪中所做的六个自由度的摇荡运动是相互独立的，在小振幅海浪情况下，它们满足类似的运动方程。若将六种运动统一以 $Y(t)$ 表示，则运动方程为^[7]

$$\ddot{Y} + 2\gamma\dot{Y} + \omega_0^2 Y = \chi\omega_0^2 f(t), \quad (1)$$

式中 ω_0 是船舶固有振动频率， γ 是衰减系数， χ 是修正系数(取值范围为 $0-1$)， $f(t)$ 代表海浪运动对船舶的策动作用。

(1) 式为二阶线性常微分方程，因而可采用线性系统的理论进行分析。将船舶看作一个线性变换系统，海浪运动 $X(t)$ 作为系统的激励输入，船舶运

动 $Y(t)$ 是系统的响应输出，二者满足关系

$$Y(t) = h(t) * X(t), \quad (2)$$

式中 $h(t)$ 是系统的脉冲响应函数， $*$ 是卷积符号。

在频率域中(2) 式有如下对应关系：

$$C(\omega) = H(\omega) \cdot B(\omega), \quad (3)$$

其中 $H(\omega)$ 是船舶的频率传递函数：

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \exp(-j\omega t) dt, \quad (4)$$

$B(\omega)$ 、 $C(\omega)$ 分别是 $X(t)$ 、 $Y(t)$ 的傅里叶变换：

$$B(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t) \exp(-j\omega t) dt, \quad (5)$$

$$C(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} Y(t) \exp(-j\omega t) dt.$$

对(3)式两边分别取复共轭，再与(3)式两边相乘，得到

$$S_C(\omega) = |H(\omega)|^2 \cdot S_B(\omega), \quad (6)$$

式中 $S_C(\omega) = C(\omega) \cdot C^*(\omega)$ ， $S_B(\omega) = B(\omega) \cdot B^*(\omega)$ 。 $S_B(\omega)$ 为海浪谱密度函数，简称海浪谱，表示海浪的平均能量在不同频率上的分布情况； $S_C(\omega)$ 为船舶的运动谱密度函数，简称运动谱，表示在海浪作用下船舶平均运动能量在不同频率上的分布情况。

3 船舶运动的计算

3.1 频率传递函数

根据(1)式，船舶的脉冲响应函数 $h(t)$ 满足

$$\ddot{h} + 2\gamma\dot{h} + \omega_0^2 h = \chi\omega_0^2 \delta(t). \quad (7)$$

对(7)式进行拉普拉斯变换，得到

$$H'(p) = \int_0^{\infty} h(t) \exp(-pt) dt = \frac{\chi\omega_0^2}{p^2 + 2\gamma p + \omega_0^2}. \quad (8)$$

将上式中 p 用纯虚数 $j\omega$ 代替，可得系统的频率传递函数

$$H(\omega) = 2H'(j\omega) = 2 \int_0^{\infty} h(t) \exp(-j\omega t) dt = \frac{2\chi\omega_0^2}{(\omega_0^2 - \omega^2) + 2\gamma j\omega}, \quad (9)$$

其中 j 是虚数单位， ω 是振动圆频率。

由(9)式可得系统的幅频响应函数

$$|H(\omega)| = \frac{2\chi\omega_0^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\gamma^2\omega^2}} = \frac{2\chi}{\sqrt{(1 - \Delta^2)^2 + 4\mu^2\Delta^2}}, \quad (10)$$

和系统的相频响应函数

$$\Phi(\omega) = \arctan \frac{-2\gamma\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} = \arctan \frac{-2\mu\Delta}{1 - \Delta^2}, \quad (11)$$

式中 $\Delta = \omega/\omega_0$, 称为调谐因数; $\mu = \gamma/\omega_0$, 称为无因

次衰减系数。图 2(a), 图 2(b) 分别给出了系统在 $\chi = 0.5$ 时不同无因次衰减系数 μ 的幅频响应函数和相频响应函数曲线。

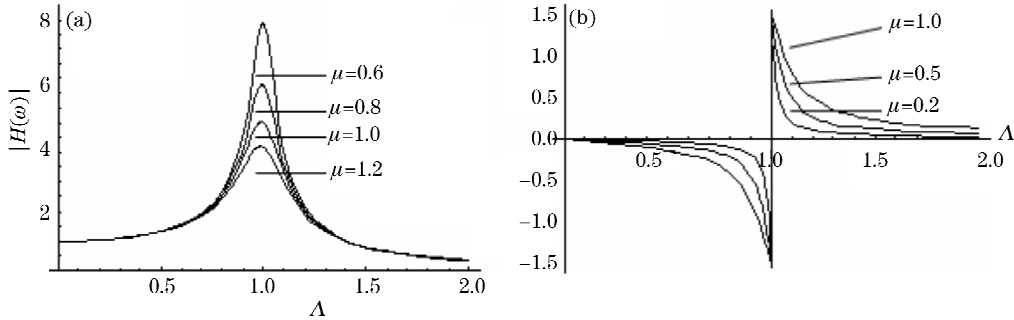


图 2 不同 μ 值下的幅频响应函数(a)和相频响应函数(b)

Fig. 2 Schematic of the amplitude-frequency response function under different μ (a) and the phase-frequency response function (b) under different μ (b)

3.2 海浪运动描述

真实环境下的海浪是不规则的随机运动, 可以用海浪谱描述。我国海洋部门提出的海洋海浪谱的半经验公式为^[6]

$$S_b(\omega) = \frac{0.74}{\omega^5} \exp\left(-\frac{96.2}{\omega^2 U^2}\right), \quad (12)$$

式中 ω 为海浪圆频率, U 为平均风速。当船以航速 V 与海浪成 β 角度航行时, 相应的海浪谱公式为(式中 g 为重力加速度)

$$S_B(\omega) = \frac{S_b(\omega)}{1 + (2\omega/g)V \cos \beta}, \quad (13)$$

图 3 给出了航速 $V = 30 \text{ m/s}$, 航向 $\beta = 0^\circ$ 时不同风速情况下的海浪谱曲线。由图可见, 这种情况下的规则波主频在 $0.1 \sim 0.4$ 之间, 运动能量集中在 $0.05 < \omega < 0.4$ 的范围之内。

根据海浪谱的定义, 特定频率 ω 和间隔 $\Delta\omega$ 下简谐运动(单元规则波)的平均振幅 $A(\omega)$ 与海浪谱

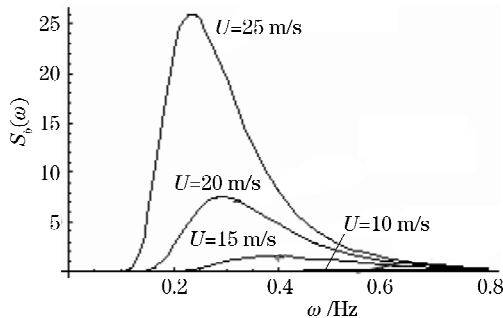


图 3 航速 $V = 30 \text{ m/s}$, 航向 $\beta = 0^\circ$ 时, 不同风速情况下的海浪谱曲线

Fig. 3 Ship speed $V = 30 \text{ m/s}$, ship course $\beta = 0^\circ$, the wave spectrum curves under different wind velocity

之间有如下关系^[6]:

$$A^2(\omega) = 2S_B(\omega)\Delta\omega. \quad (14)$$

海浪运动的相位分布 $\varphi_B(\omega)$ 也是随机的, 一般认为是在 $(0 \sim 2\pi)$ 之间均匀分布。

3.3 船舶运动计算

为了模拟船舶运动需要给出各自由度运动量随时间的变化关系 $Y(t)$, 由于海浪运动是随机的, 所以船舶运动同样也是随机的。为了实现船舶运动的模拟, 我们在海浪谱空间以间隔 $\Delta\omega$ 进行抽样 $\{\omega_k, S_{Bk}, \varphi_{Bk}\}, (k = 1 \sim N)$, 由此得到海浪运动样本

$$X(t) = \sum_{k=1}^N \sqrt{2S_{Bk}\Delta\omega} \cos(\omega_k t + \varphi_{Bk}). \quad (15)$$

根据(6)式、(10)式、(11)式, 求出船舶运动谱的抽样值 $\{\omega_k, S_{Ck}, \varphi_{Ck}\}, (i = 1 \sim N)$

$$S_{Ck} = |H(\omega_k)|^2 S_{Bk}, \quad \varphi_{Ck} = \Phi(\omega_k) \varphi_{Bk}, \quad (16)$$

由此得到船舶运动的一个样本

$$Y(t) = \sum_{k=1}^N \sqrt{2S_{Ck}\Delta\omega} \cos(\omega_k t + \varphi_{Ck}), \quad (17)$$

(17)式确定了该自由度的一个运动方式。船舶其他自由度的运动算法与此类似。

以横摇运动为例, 100 T 以下船舶的横摇固有周期范围为 $3 \sim 5 \text{ s}$, 本文取 $T = 4 \text{ s}$; 横摇运动无因次衰减系数的范围为 $\mu = 0.05 \sim 0.075$, 本文取 $\mu = 0.06$, 修正系数取 $\chi = 0.5$, 则由(10)式、(11)式可以确定船舶横摇运动的频率传递函数 $H(\omega)$ ^[6,7,8,9]。

若船舶在平均风速 $U = 15 \text{ m/s}$ 中以航速 $V = 30 \text{ m/s}$ 、航向 $\beta = 0^\circ$ 行驶, 在 $0.05 < \omega < 0.4$ 的范围之内以间隔 $\Delta\omega = 0.01$ 对海浪谱抽样, 给出海浪运

动一个形如(15)式的一个样本, $t=0\sim 300$ s 时间内的海浪运动如图 4(a) 所示。然后通过(16)式求得

对应上述海浪谱抽样的船舶运动谱, 进而确定一个形如(17)式的船舶运动方式, 如图 4(b) 所示。

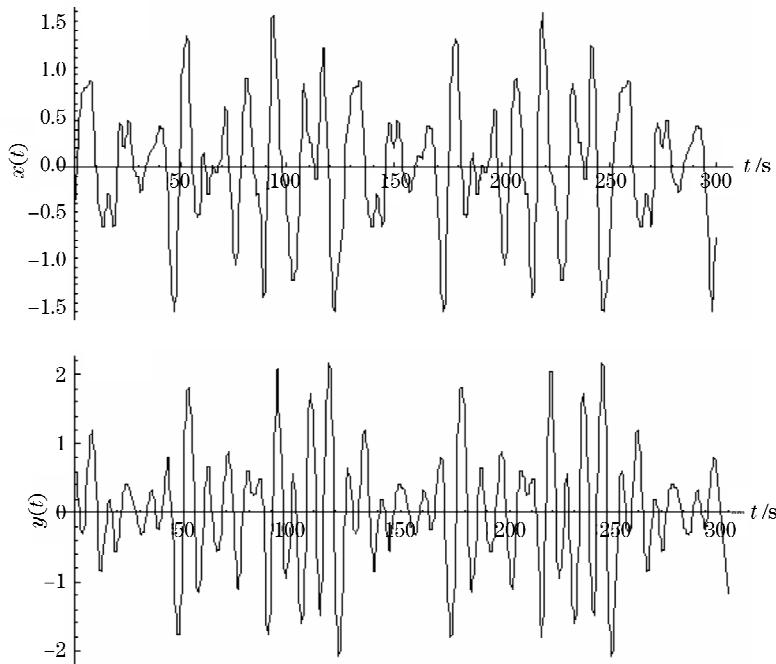


图 4 海浪随机运动样本(a)和对应的船舶运动样本(b)

Fig. 4 A sample of the wave's random motion (a) and a sample of the ship's motion corresponding to (a), (b)

4 船舶运动模拟平台

为了简化起见, 初步研制的运动平台由水平移动台、垂直升降台、旋转台和摆动台四部分组成, 分别模拟船舶在海浪中的四种摇荡运动: 纵荡、垂荡、首摇和横摇, 如图 5 所示。这四种运动可以合成出船舶在海浪中主要的运动状态, 从而为研究船载激光通信系统提供实验平台。

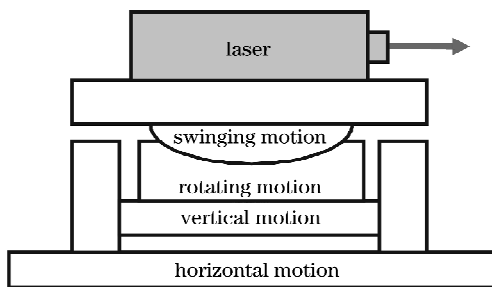


图 5 运动平台模型

Fig. 5 Model of the motion platform

图 6 是我们研制的模拟运动平台照片。运动平台的四部分均由步进电机驱动, 步距角 1.8° , 可实现 5、10、20、25、40、50、100、125 细分, 由两台二轴控制器控制。控制器的 RS232 口与电脑的 COM 口相连, 各自由度的运动计算和控制都由电脑完成。该运动平台模拟的船舶参数为: 船长 27 m, 船宽 6.3 m, 吃水

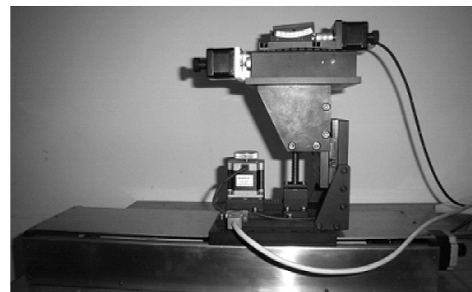


图 6 运动平台照片

Fig. 6 Photo of the motion platform

1.3 m, 排水量: 标准 68 T, 满载 79 T。

该运动平台各部分的参数如下: 水平移动台最长可移动长度为 58.5 mm, 精度为 0.25 mm/转。垂直升降台的最长可升降长度为 15 mm, 精度为 0.05 mm/转; 旋转台旋转角度范围 $0^\circ\sim 360^\circ$, 精度为 0.005° /转, 摆动台摆动角度范围 $-15^\circ\sim 15^\circ$, 精度为 0.004° /转。

5 结 论

激光通信因为具有波束窄、容量大、数据传输速率高、抗电磁干扰能力强、保密性高、功率消耗小以及系统结构轻小等主要优点, 是未来船舶之间通信

的发展趋势。本文根据船舶运动微分方程,建立海浪与船舶运动的线性关系模型,由海浪谱计算出运动谱,得到船舶摇荡运动的规律,从而实现用计算机对运动平台的操纵控制。采用水平移动台、垂直升降台、旋转台和摆动台实现了船舶在波浪中的四种摇荡运动:纵荡、垂荡、首摇和横摇。本文所提出的船舶运动模拟平台结构简单,易于实现,可在实验室条件下模拟出船舶在海面上的运动,为船载无线激光通信系统提供仿真运动场景。

参 考 文 献

- 1 Yang Changqi, Jiang Wenhao, Rao Changhui. Impact of aperture averaging on bit-error rate for free-space optical communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 212~218
杨昌旗,姜文汉,饶长辉. 孔径平均对自由空间光通信误码率的影响[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 212~218
- 2 Liang Bo, Zhu Hai, Chen Weibiao. Simulation of laser communication channel from atmosphere to ocean [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1166~1172
梁波,朱海,陈卫标. 大气到海洋激光通信信道仿真[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1166~1172
- 3 Ding Tao, Xu Guoliang, Zhang Xuping. Control of bit error rate introduced by platform vibration for free space optical communication[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4): 499~502
丁涛,许国良,张旭平等. 空间光通信中平台振动对误码率影响的抑制[J]. *中国激光*, 2007, **34**(4): 499~502
- 4 Wang Jingyuan, Zhang Zhengxian. The application of wireless optical communication on military communication[C]. 576~579
汪井源,张正线. 无线光通信在军事通信中的应用[C]. 2000 军事电子信息学术会议, 2001. 576~579
- 5 Zheng Yonggang, Li Bo. The application and development of optical communication in free space[J]. *Optical Communication Technology*, 2006, **7**: 52~53
郑勇刚,李博. 自由空间光通信技术的应用与发展[J]. *光通信技术*, 2006, **7**: 52~53
- 6 Wu Xiuheng, Zhang Lewen, Wang Renkang. Ship Maneuvering and Sea-Keeping[M]. Beijing: People's Communications Press, 1988. 215,217,228
吴秀恒,张乐文,王仁康. 船舶操纵与耐波性[M]. 北京: 人民交通出版社, 1988. 215,217,228
- 7 Li Jide. Ship Sea-Keeping[M]. Harbin: Harbin Shipbuilding Engineering Institute Press, 1992. 49~62
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. 49~62
- 8 Sun Chang. Ship Maneuvering System Modeling and Simulation [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2003. 5~30
孙畅. 船舶操纵系统建模与仿真[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2003
- 9 Xiong Wenhao, Mao Xiaofei, Li Yujian. Review on evaluation methods and criteria for sea-keeping of ship[J]. *Ship and Ocean Engineering*, 2007, **36**(4): 42~45
熊文海,毛筱菲,李毓江. 船舶耐波性衡准及其评价方法浅析[J]. *航海工程*, 2007, **36**(4): 42~45
- 10 Zhu X, Kahn J M. Free space optical communication through atmospheric turbulence channels [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2002, **50**(8): 1293~1300
- 11 F. P. Par, G. E. Faulkner, D. C. O'Brien *et al.*. Optical wireless test bed system using a multiple source transmitter and a segmented receiver to achieve signal tracking[C]. *SPIE*, 2001, **4350**: 125~134
- 12 C. A. T. II, Tee, W. A. Crosland, N. Callings *et al.*. Design of a free space optical switch demonstrator for a VCSEL-based photonic packet switch [J]. *Ultrafast Electronics and Optoelectronics, OSA Trends in Optics and Photonics*, 2001. 49