

深水隔水管疲劳多测点数据传输与仿真研究^{*}鲁丰坤¹ 王 勇² 李保军² 申晓红² 王海燕²

(1. 湛江南海西部石油勘察设计有限公司 湛江 524057; 2. 西北工业大学航海学院 西安 710072)

摘 要: 深水隔水管是海洋油气钻探开发必不可少的关键设备,也是深水油气勘探开发中最脆弱、最危险的部件。涡激振动、底部井口转角过大、平台的振荡和抖动等因素都可能导致隔水管疲劳损伤甚至断裂破坏,不仅造成极大的经济损失,而且诱发严重的生态灾难。隔水管疲劳监测是确保深水隔水管安全作业的重要保障,在预防隔水管事故方面具有不可或缺的作用。为了监测隔水管整体响应,需要沿隔水管按一定规则离散布放大量监测设备。疲劳参数信息的传输是隔水管疲劳监测的一项核心技术和难点。为了确保疲劳参数在各测点与接收端之间的高效传输,研究了3 000 m水深条件下,5测点与接收端的通信问题,提出了时分复用与频分复用结合的通信方案。仿真结果表明,在确保检测概率的前提下,所提方案可以有效克服远近效应和各测点之间的干扰问题。

关键词: 深水隔水管疲劳;远近效应;信道干扰

中图分类号: TN929.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

Simulation of multi-point data transmission scheme for deepwater marine riser fatigue

Lu Fengkun¹ Wang Yong² Li Baojun² Shen Xiaohong² Wang Haiyan²

(1. Survey&Design Company, CONHW, Zhanjiang 524057, China; 2. School of Marine and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Deepwater marine riser is the key equipment essential for the development of marine oil and gas drilling, as well as the most vulnerable and the most dangerous part of deepwater oil and gas exploration and development. VIV, the bottom of the well head angle is too large, platform of oscillation and jitter factors may cause the platform riser fatigue damage or even fracture damage, not only caused great economic losses, but also induce serious ecological disaster. Marine riser fatigue monitoring is an important guarantee for ensuring the safety of deepwater riser operations, and it also plays an indispensable role in the riser of accident prevention. In order to monitor riser overall response, a lot of discrete distribution monitoring equipment needs to be put along the marine riser by certain rules. Fatigue parameter information transmission is a core of riser fatigue monitoring technology and difficulty. In order to ensure the efficient transmission of fatigue parameters between the measuring point and the receiving end, this paper studies five-point communication problems with the receiving end, under the condition of 3 000 m water depth, so that a communication scheme combined time division multiplexing with frequency division multiplexing is proposed. The simulation results show that under the premise of ensuring detection probability, the proposed scheme can effectively overcome the near-far effect and the interference problem between each measuring point.

Keywords: deepwater marine riser fatigue; the near-far effect; channel interference

1 引 言

隔水管是连接海面作业平台与海底井口的咽喉要道。在水深超过1 000 m的深水,隔水管的直径与长度比达到

了细长柔弹性体的范围,隔水管的运动表现为柔弹性运动而非刚体运动,导致隔水管的振幅会大幅增加,极易产生疲劳、损伤、断裂和泄漏等一系列问题。深水隔水管监测系统的开发,可以对深水钻井作业隔水管的状态实现实时

收稿日期:2015-04

^{*} 基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05026-001-06)资助项目

监测,保证钻井作业安全顺利进行,规避风险,对钻井安全、高效作业有着重要的经济意义和社会意义。同时,隔水管疲劳监测是确保深水隔水管安全作业的重要保障,在预防隔水管事故方面具有不可或缺的作用。

根据供电和数据通信方式的差别,现有的隔水管监测主要有离线、有线和水声通信3种方法^[1]。对比这3种方法,离线无实时性,数据取回需要ROV,可靠性较低;有线用电缆传输,造价高,操作复杂;水声监测由水声通信传达信息,可以进行实时监测,并且成本低。在深水环境下,设计水声通信监测系统是最有效的监测方法。

本文设计了一种具有报警功能的水下多测点通信方案的隔水管监测系统,研究了在3 000 m水深条件下,沿隔水管按一定规则随机布放5个监测点,根据5个测点与接收端的通信问题,提出了时分复用与频分复用结合的通信方案。仿真结果表明,在确保检测概率的前提下,所提方案可以有效克服远近效应和各测点之间的干扰问题。

2 总体方案设计

2.1 数据传输

各测点布放位置如图1所示,1个位于水面上的隔水管倾角测点,编号为⑥,置于水面之上;1个下部柔性接头倾角测点,编号为①,置于海底井口;2个应力+VIV,编号为②和③;1个VIV+流速测点,编号为④;1个VIV测点,编号为⑤(从下往上依次为①~⑥)。

其原理是各监测点测得隔水管振动加速度和倾角、海洋流速、应力等隔水管状态的关键数据,通过水声通信系统进行传输^[2]。信息传输分为水面和水下部分。水上倾角测点⑥采用电缆通信监测方式,水下部分采用①~⑤水声通信无缆监测方式,采用频分+时分复用技术。

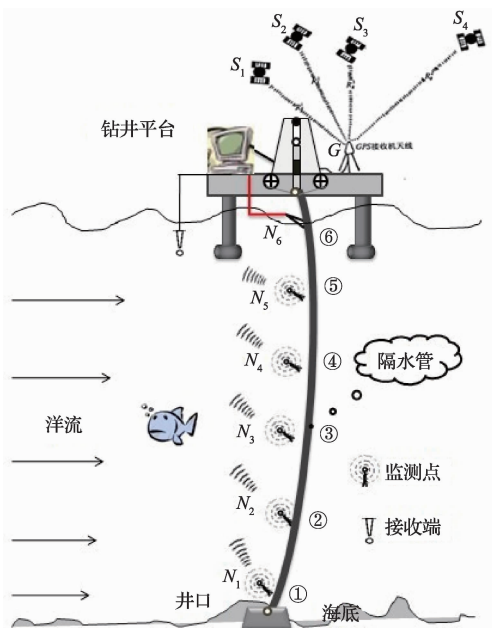


图1 各测点功能模块及布放示意

海底井口的测点①和其他②~⑤测点采用频分复用技术,②~⑤测点之间采用时分复用技术。数据监测①测点发射数据的帧结构如图2(a)所示;②~⑤测点发射数据的帧结构如图2(b)所示。本方案帧同步分为单频粗同步和线性调频细同步两部分^[2]。首先检测出单频信号段的位置,唤醒AGC自动增益控制,并进行粗同步;再进行逐点滑动相关检测,对相关峰进行过门限检测,确定线性调频同步的起始位置,完成细同步。为了避免多径时同步对信号的干扰,加入时间间隔保护,最后对监测点测得的隔水管数据进行接收。

①单频信号	②线性调频信号	③空	④数据
-------	---------	----	-----

(a) ①测点发射数据的帧结构

①单频信号	②线性调频信号	③空	④ID编号	⑤数据
-------	---------	----	-------	-----

(b) ②~⑤测点发射数据的帧结构

图2 发射数据帧结构

频分复用时,接收信号有LFM信号和CW信号,两路信号彼此之间有干扰。LFM信号可表示为:

$$LFM = g(t) \cos(2\pi f_c t + \frac{B}{T} \pi t^2 + \varphi_0)$$

式中:

$$g(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < T \\ 0, & \text{其他} \end{cases}, \quad T = 0.04 \text{ s},$$

B 为 LFM 信号的带宽。

CW 信号可表示为:

$$CW = f(t) \cos(2\pi f_c t + \varphi_0)$$

$$f(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < T \\ 0, & \text{其他} \end{cases}, \quad T = 0.004 \text{ s},$$

$$f_c = \begin{cases} 9\,000, & \text{①测点} \\ 13\,000, & \text{其他测点} \end{cases}$$

接收到的信号可能有以下4种组合:

$$x_1 = g(t) \cos(2\pi f_{11} t + \frac{2B}{T} \pi t^2 + \varphi_1) + g(t) \cos(2\pi f_{I\text{其他}} t + \frac{2B}{T} \pi t^2 + \varphi_2)$$

$$x_2 = g(t) \cos(2\pi f_{11} t + \frac{2B}{T} \pi t^2 + \varphi_1) + f(t) \cos(2\pi \times 11\,000 \times t + \varphi_2)$$

$$x_3 = f(t) \cos(2\pi \times 9\,000 \times t + \varphi_1) + g(t) \cos(2\pi \times f_{I\text{其他}} t + \frac{2B}{T} \pi t^2 + \varphi_2)$$

$$x_4 = f(t) \cos(2\pi \times 9\,000 \times t + \varphi_1) + f(t) \cos(2\pi \times 13\,000 \times t + \varphi_2)$$

2.2 信号的带宽 B 变窄对同步性能的影响分析

LFM 信号:

$$LFM = g(t) \cos(2\pi f_c t + \frac{2B}{T} \pi t^2 + \varphi_0) \text{ 的自相关函数的}$$

时域输出波形类似于归一化的 sinc 函数,其表达式为

$$R_{LFM} = g^2(t) \sqrt{BT} \frac{\sin\left\{\pi Bt\left(1 - \frac{|t|}{T}\right)\right\}}{\pi Bt} \cos(2\pi f_i)$$

可以看出其幅度值增加 $\sqrt{BT}$ 倍。

2.3 通信系统参数设计

1) 发射数据保护时间间隔的设计。为了避免测点信号在接收端时间上的干扰,在时分复用时应考虑时间保护间隔。时间保护间隔由 3 部分组成:

晶振偏差 + 传输时延 + 多径时延

系统硬件使用的晶振,偏为 $\pm 3.5 \sim 5 \times 10^{-6}$,以使用时间 2 个月为例,则使用时间内的总偏差为:

$$\Delta t_{\text{晶振}} = \pm 5 \times 10^{-6} \div 1\,000\,000 \times 60\,\text{day} \times 24\,\text{hour} \times 60\,\text{min} \times 60\,\text{s} = \pm 25.83\,\text{s}$$

由于各测点的布放位置尚未确定,所以,传输时延保护间隔应以最大间隔来计算:

$$\Delta t_{\text{传播}} = \frac{3\,000\,\text{m}}{1\,500\,\text{m/s}} = 2\,\text{s}$$

由于信道为垂直信道,多径时延较小,本方案暂定为:

$$\Delta t_{\text{多径}} = 10\,\text{ms} = 0.01\,\text{s}$$

时分复用的保护间隔为: $\Delta t = 25.83 \times 2 + 2 + 0.01 = 53.67\,\text{s} \approx 1\,\text{min}$

2) 井底①测点传输及报警机制。井底①测点采集数据 2.8 m,发送 0.03 m 数据到接收装置后,一个工作周期 3 m。若有数据超过门限值,则随时发送数据,直到连续 5 个监测数据低于门限值。同时,水面接收装置依据门限值判断,若超过门限值则发出声音、闪烁红黄灯进行报警。

3) 水下②~⑤测点时分复用传输机制。水下②~⑤测点的工作方式为:各测点每 60 min 采集 1 个采样周期数据,每 180 min 发射最后 11 个采样周期数据,采用时分复用技术,发送数据的方式为:

测点② + 保护间隔 + 测点③ + 保护间隔 + 测点④ + 保护间隔 + 测点⑤

频分复用频带划分示意图如图 3 所示。

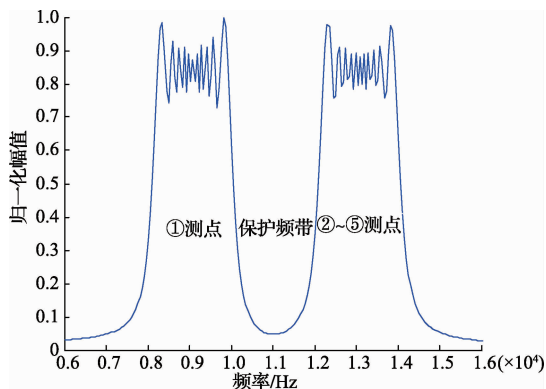


图3 频分复用频带划分示意

4) ①测点与其他 4 个测点的频分复用传输机制。

(a) ①测点和其他②~⑤测点频率的划分。

水下①测点与其他 4 个测点采用频分复用技术,即将传输频带 8~14 kHz 划分为 3 个部分。8~10 kHz 为 1 路信号,载波频率 $f_c = 9\,000\,\text{Hz}$; 10~12 kHz 为滤波器保护间隔,12~14 kHz 为另一路信号,载波频率 $f_c = 13\,000\,\text{Hz}$ 。仅考虑吸收损失,传播 3 000 m 时,低频和高频相差约 2.146 dB。

$$TL_{f=8\,\text{kHz}} = \alpha r = 0.036 \times 9^{1.5} \times 3 = 2.916\,\text{dB}$$

$$TL_{f=12\,\text{kHz}} = \alpha r = 0.036 \times 13^{1.5} \times 3 = 5.062\,\text{dB}$$

因此,8~10 kHz 用于①测点传输,载波频率 $f_c = 9\,000\,\text{Hz}$; 12~14 kHz 用于②~⑤测点传输,载波频率为 $f_c = 13\,000\,\text{Hz}$ 。

(b) 远近效应的产生及克服

若①测点布放于水下 3 000 m,载波频率为 $f_c = 9\,000\,\text{Hz}$; 另一测点布放于水下 100 m,载波频率为 $f_c = 11\,000\,\text{Hz}$,则到达水面的传播损失相差 32.327 dB。

$$TL_1 = 20 \times \log 3\,000 + 0.036 \times 9^{1.5} \times 3 = 69.543 + 2.916 = 72.458\,\text{dB}$$

$$TL_{\text{其他}} = 20 \times \log 100 + 0.036 \times 11^{1.5} \times 0.1 = 40 + 0.131 = 40.131\,\text{dB}$$

$$\text{水面接收信号幅值比} = \frac{A_{\text{其他}}}{A_1} = 10^{32.327/20} = 41.338,$$

产生远近效应,由于 AGC 自动增益控制的起控,当水下 100 m 的测点发送信号时,无法收到 3 000 m 测点发送的信号。克服远近效应,一种方法是对时分复用的②~⑤测点采用 A 通道接收,对①测点采用 B 通道接收;二是改进发射机,使发射机的发射功率可调,由于各测点的布放深度未定,目前采用第一种方法。

3 仿真分析

下面对该通信方案进行仿真分析。

3.1 频分复用两路信号干扰仿真分析

在 2.1 中接收到的 LFM 信号与 CW 信号彼此之间有干扰,LFM 信号的 $B = 2\,000\,\text{Hz}$,该 4 种组合的幅频响应曲线如图 4 所示。

图 4 中 X_1 为频分复用后,8~10 kHz 和 12~14 kHz 接收到的信号都是 LFM 信号的幅频响应; X_2 为在 8~10 kHz 接收到 LFM 信号,在 12~14 kHz 接收到 CW 信号的幅频响应; X_3 为在 8~10 kHz 接收到 CW 信号,在 12~14 kHz 接收到 LFM 信号的幅频响应; X_4 为在 8~10 kHz 和 12~14 kHz 接收到的信号都是 CW 信号的幅频响应。

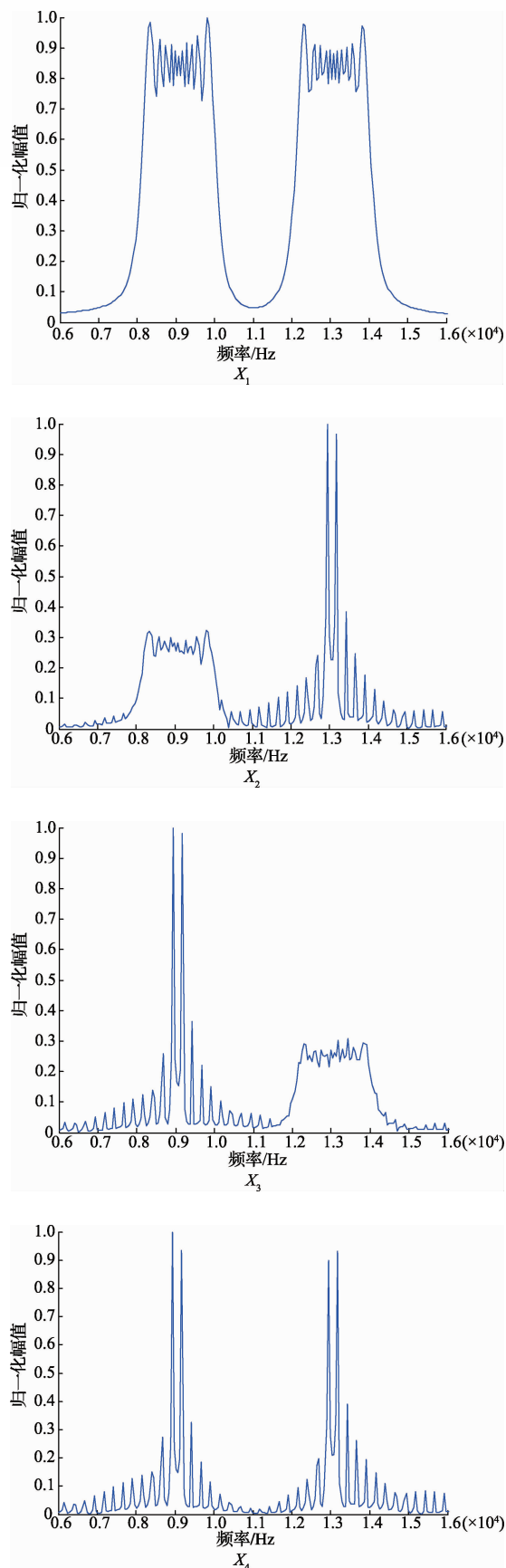


图4 幅频响应曲线

3.2 带宽 B 变窄对同步性能的影响分析

LFM 信号的 $T = 0.02$ s, $f_c = 8\,000$ Hz, 带宽分别为:

$B = 4\,000$ Hz, $B = 2\,000$ Hz, $B = 1\,500$ Hz, $B = 1\,000$ Hz 时, 其自相关函数分别如图 5 所示。

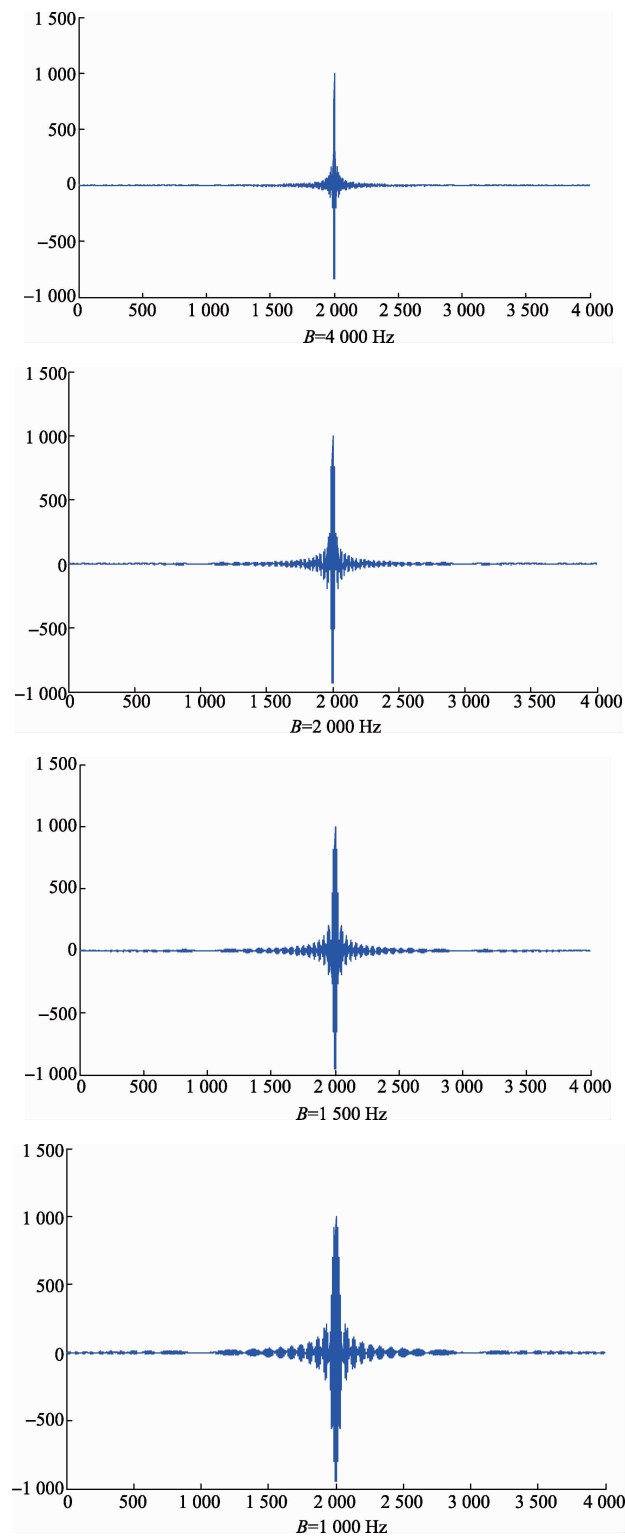


图5 自相关函数

由图5仿真结果可以看出,采用频分复用后,随着频带变窄,帧同步的精度下降很多,同步性能变差。

TB相同,即 $B = 4\,000\text{ Hz}$, $T = 0.02\text{ s}$, 和 $B = 2\,000\text{ Hz}$, $T = 0.04\text{ s}$ 的自相关性能比较如图6所示。

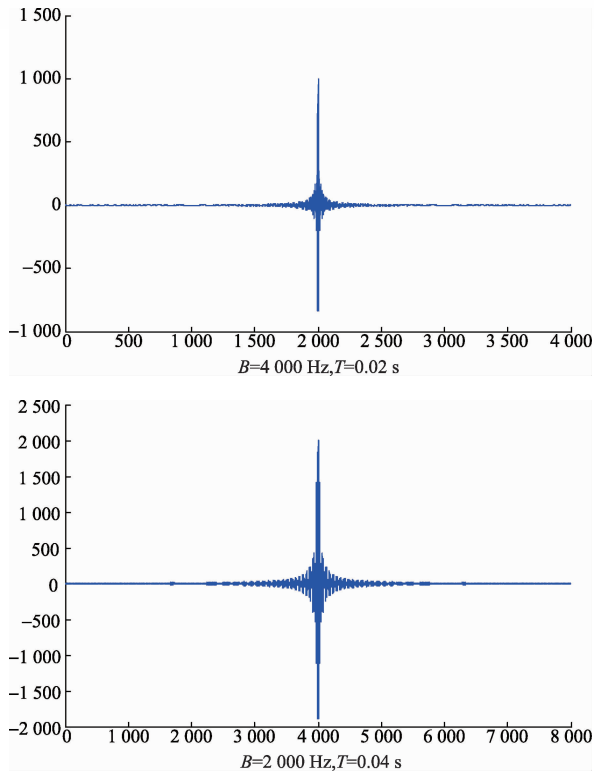


图6 自相关性能

根据图6仿真结果可以看出,在TB相同时,随着带宽变窄,线性调频信号时间增长,相关性有所改善,同步精度基本可以保证,但是增加了FFT的点数。

3.3 信号检测概率仿真

两路信号频带范围分别为:8~10 kHz, 12~14 kHz, 信号时宽 20 ms。不同信噪比情况下,二者的信号检测概率,如图7所示。

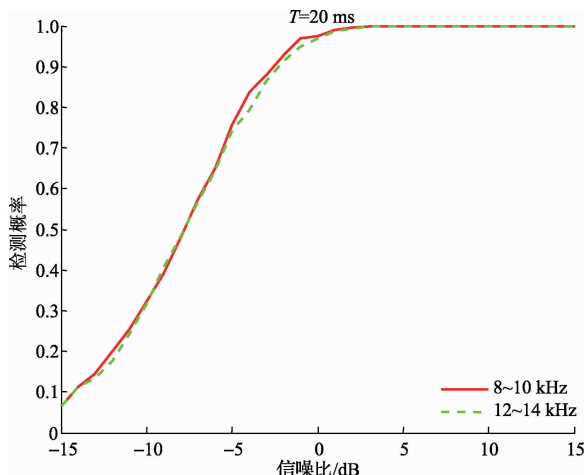


图7 接收信号(不同频带)检测概率

仿真结果表明,当线性调频信号时宽为 20 ms 时,降

低线性调频的带宽为 2 kHz 时,依然能够保证一定的检测概率,能够满足系统的同步需求。

4 结论

针对深水隔水管疲劳监测信息传输,提出一种具有报警功能的水下多测点通信方案。海底井口的测点①和其他②~⑤测点采用频分复用技术,②~⑤测点采用时分复用技术。理论和仿真结果表明,在确保检测概率的前提下,设计双通道接收系统,对时分复用的②~⑤测点采用A通道接收,对①测点采用B通道接收,可以有效克服远近效应。采用时分复用机制时,考虑了时间保护间隔,有效防止了各测点间信号干扰。

参考文献

- [1] 李保军,邓欣,申晓红,等.深水隔水管疲劳检测方法初探[J].海洋工程装备与技术,2014,1(1):62-68.
- [2] 张育芝,王海燕,申晓红,等.深水管道监测信息的水声传输技术研究[J].计算机测量与控制,2012,20(2):328-334.
- [3] 邓万彬,尹禄,陈冰.一种非对称结构的水声通信同步技术研究[J].电子测量与仪器学报,2013,27(12):1177-1178.
- [4] 李杨.传感器网络基于小波分段常值压缩的数据收集研究[J].仪器仪表学报,2013,34(1):119-127.
- [5] WANG F Y, ZHANG ZH J, WANG W L. Erosion thermocouple temperature acquisition system [J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2013,4(1):14-15.
- [6] 孙小进,郭恩全,白晓峰.一种多通道水声自动测试系统的设计[J].国外电子测量技术,2014,33(2):65-68.
- [7] 瞿佳俊,严军,朱渊倩.无线传感网低开销型数据可靠传输方法的研究[J].电子测量技术,2014,37(1):92-93.
- [8] MUKUNDAN H, MODARRES-SADEGHI Y, DAHL J M, et al. Monitoring VIV fatigue damage on marine risers[J]. Journal of Fluids and Structures, 2009,25(4):617-628.
- [9] AN P. Offshore structural monitoring, why and how [C]. 2nd Annual Deepwater Asia-Pacific, 2009.
- [10] HUANG C. Structural health monitoring system for deepwater risers with vortex induced vibration: non-linear modeling, blind identification fatigue/damage estimation and local monitoring using magnetic flux leakage[D]. Houston: Rice University, 2012.
- [11] UKANI S. Monitoring and instrumentation[C]. SUT London, 2010.

作者简介

鲁丰坤,1981年出生,大学本科,工程师,主要研究方向为电气工程及其自动化。

E-mail:lufk@cnooc.com.cn