

水下控制电力载波通信信道特性仿真研究

王书斌¹, 刘颖¹, 曹海量¹, 郭龙川¹, 王珏², 朱春丽², 田佳²

[1. 中国石油大学(北京), 自动化系, 北京 102249; 2. 中海油研究总院, 北京 100028]

摘要 水下生产控制系统的正常运行与通信系统的安全可靠息息相关。采用电力载波通信(PLC)方式,引入集中参数这一概念进行建模,并将南海某水下气田的现场实测 *RLGC* (电阻、电感、电导、电容)参数值代入到系统模型中。使用 OrCAD Capture 软件进行仿真,得到了信号在不同传输路径下的衰减曲线,分析了影响水下电网背景噪声的因素,最后通过限定误码率,计算了任一传输路径在某一频率下所能达到的极限传输速率。研究结果为水下生产控制载波通信系统设计提供了一种参考方法,有一定应用价值。

关键词 水下生产系统;集中参数;电力载波通信; *RLGC* 参数;OrCAD Capture 软件

中图分类号 TN913.6 **文献标志码** A **文章编号**: 2095-7297(2015)01-0064-08

Simulation Study on Power Line Carrier Communication Design for Subsea Production Control System

WANG Shu-bin¹, LIU Ying¹, CAO Hai-liang¹, GUO Long-chuan¹, WANG Jue²,
ZHU Chun-li², TIAN Jia²

(1. Department of Automation, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
2. CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China)

Abstract The normal operation of subsea production control system is closely linked to the safety and reliability of communication system. Power line carrier communication (PLC) model is established with the concept of lumped parameter, and the *RLGC* measured data of an underwater gas field of the South China Sea is introduced into the system. The OrCAD Capture software is used for simulation. Attenuation curves of different transmission paths are obtained. Finally, through limiting the bit error rate, the attainable transmission rate is calculated. In this way, a new method is provided for the communication design of subsea production system.

Key words subsea production system; lumped parameter; power line carrier communication; *RLGC*; OrCAD Capture software

0 引言

水下生产控制系统是水下生产系统(SPS)的关键组成部分^[1-3]。许多学者对水下控制系统的设计进行了深入的研究^[4-8]。在水下控制系统中,数据、图像、语音等各种不同形式信号的发送/接收设备以及它们之间的通信信道构成的整个水下通信系统,尤其是通信信道,扮演着十分重要的角色,它直接关系到设备检测信号、数据采集信号以及控制指令能否顺利到达。因此,本文主要针对水下载波通信进

行仿真分析。

水下通信方式主要有三种。第一种是水声通信,其损耗因素过多,带宽狭窄,衰减分析较为复杂,故不利于工程设计。第二种是光纤通信,此种方式主要用于水上平台与水下分配单元(SDH)之间的远距离通信,因其成本高昂,所以不利于广泛应用。第三种为电力载波通信(PLC)方式,它可以实现电力与通信数据的同线传输,不仅降低了通信成本,其传输速率也完全可以满足 SPS 对通信速率的要求。

收稿日期:2015-11-27

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05026-003-01)

作者简介:王书斌(1977—),男,讲师,主要从事先进控制理论与应用、安全保护控制系统及深海油田自动化技术与应用等方面的研究。

近年来许多学者对水下生产控制系统中的 PLC 进行了研究^[9-13];文献[9]对水下 PLC 的原理、组成结构和调制方式进行了简单介绍;文献[10]介绍了几种主要的调制方式;文献[11-13]给出了水下载波通信路由器的设计方法。但这些文献只是简要地介绍了通信系统的工作原理、组成设备或调制/解调设备,并未涉及实际系统的设计及分析。

本文通过引入传输线集中参数模型这一概念对电力线系统进行了建模,模型考虑了对 PLC 性能影响最大的两个方面:线路衰减和背景噪声。将该模型应用到南海某水下气田的通信系统设计中,通过仿真,分别得到了主脐带缆和水下场内脐带缆不同路径的通信传输带宽,分析了不同设备对水下通信线路中的电网背景噪声的影响,最后通过限定误码率,计算出任一传输路径下、某一频率时所能达到的最高传输速率,对于实际的水下载波通信系统设计具有一定的参考价值。

1 PLC 通信线路基本模型

传统低频输电线的传导电波长度远大于输电线长度,因此,只需考虑电压源与负载的特性,输电线效应可以忽略。而在 PLC 这种高频线路中,波长往往低于输电线长度,输入、输出阻抗难以匹配,导致电波在传输空间内来回反射,形成驻波,增加了信道的复杂性与不确定性,因此,需要对传输线的高频特性加以分析并对信道进行建模。在以往的研究中,学者们提出了不同种类的 PLC 载波通信信道建模方法,其中较为著名的有 Zimmermann 等^[14]和 Philipps^[15]提出的多径传输模型,Anatoly 等^[16]提出的网络拓扑结构模型等。这些模型均是基于均匀传输线理论^[17]推导得到的,如图 1 所示即为一段均匀传输线模型。

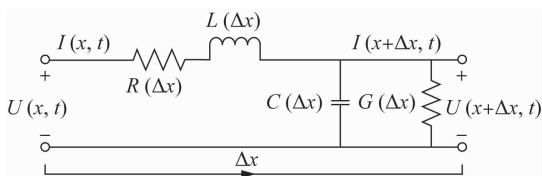


图 1 均匀传输线模型

Fig. 1 Uniform transmission line model

根据该模型结构,由基尔霍夫电压定律(KVL)可得到如下方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial U(x,t)}{\partial x} = RI(x,t) + L \frac{\partial I(x,t)}{\partial t} \\ \frac{\partial I(x,t)}{\partial x} = GU(x,t) + C \frac{\partial U(x,t)}{\partial t} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: x 方向为电力传播方向, $U(x,t)$ 、 $I(x,t)$ 分别是与时间 t 和位置 x 有关的电压值、电流值; R 、 L 、 G 、 C 分别代表传输线导体单位长度的电阻、电感、电导和电容值。由式(1)可以看到,均匀传输线是一个分布参数模型。由于电力线的分布参数模型较为复杂,不便于工程设计与分析,并且根据传输线知识,在一定长度的均匀传输线上,可以忽略线路的分布参数及集肤效应。因此,通过对式(1)中的电压与电流进行集中化处理,得到稳态时的均匀传输线方程,即集中参数模型:

$$\begin{cases} U_1 = U_2 \cdot \cosh(g) + I_2 \cdot Z \cdot \sinh(g) \\ I_1 = I_2 \cdot \cosh(g) + \frac{U_2}{Z} \cdot \sinh(g) \end{cases}, \quad (2)$$

式中: U_1 、 I_1 分别是集中参数模型第一段的输入电压和输入电流; U_2 、 I_2 分别是集中参数模型第二段的输入电压和输入电流,同时, U_2 、 I_2 也是集中参数模型第一段的输出电压和输出电流; g 为传播常数。

将式(2)改写成二端口网络的形式,有

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(g) & Z \sinh(g) \\ \frac{1}{Z} \sinh(g) & \cosh(g) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: Z 为特性阻抗。式(3)中 $[U_2 \ I_2]^T$ 前的参数矩阵决定了整个传输信道的特性。 Z 和 g 的表达式分别为

$$Z = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}, \quad (4)$$

$$g = L \cdot \sqrt{(R + j\omega L) \cdot (G + j\omega C)}. \quad (5)$$

由式(4)和式(5)可以看出, Z 和 g 这两个参数均与电力线分布 $RLGC$ 值以及加载的频率有关。随着信号源频率的增加, Z 的数值主要取决于 L 和 C , 主要反映信道的固有特性,与发射源和负载无关。根据传输线理论,一般情况下, g 为复数,实部代表信号幅值衰减常数,虚部代表信号相角滞后常数。这两个参数共同决定了信道的衰减特性。

2 通信信道建模与仿真分析

2.1 通信信道建模

目前,国际上主流的 SPS 开发模式采用全水下系统回接到水上平台的形式,因此,本文根据这一开发模式对南海某水下气田进行建模。图 2 展示了整

个水下生产控制系统电力/通信结构。

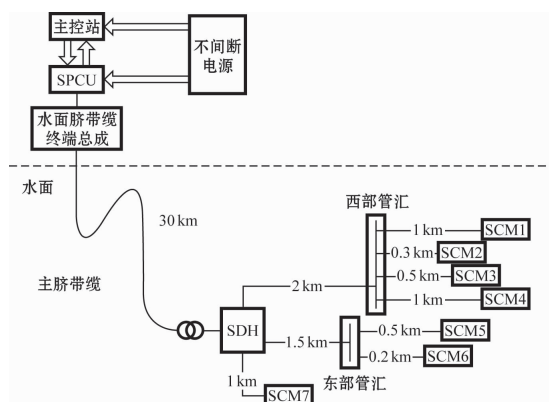


图2 水下生产控制系统电力/通信结构图

Fig. 2 Power/communication structure of subsea production control system

水上载波机位于水下电力/通信单元(SPCU)中,水下载波机位于各个水下控制模块(SCM)上。整个系统的水上与水下电力/信号传输通过一根主脐带缆实现,长度为30 km。水下各个SCM之间通过场内脐带缆的连接进行信号的发送与接收。水下分支的终端共有7个SCM。SDH与东、西部管汇上也各包含一个SCM,水下变压器位于SDH中。

由于载波信号不能够跨越变压器进行传输,因此,通信的仿真分为两部分:(1)水面脐带缆终端总成到水下SDH之间的30 km主脐带缆通信;(2)水下SDH到水下SCM之间的场内脐带缆通信。

根据以上分析,在对通信信道进行建模时,考虑到参数 Z 和 g 决定了信号沿电力线传播的线路衰减,而这两个参数的计算公式(4)和式(5)中包含了电力线的分布电阻、电感、电容以及电导值,因此,若要对信号传输信道进行分析,则必须获取这4个参数的数值。

海洋工程中一般采用测量法来得到电缆的分布RLGC参数值。通过对单位长度的电缆进行频率扫描,得到不同频率下的RLGC数值。在实际的工程测量中,只有电缆分布电阻的数值随着频率的升高略有上升,其余参数基本保持不变。而根据传输线知识,导线本身的电导对系统信号通信的影响可以忽略,因此,可根据某一频率下测量的一组RLGC参数值对模型进行赋值。对于非单位长度的电缆,缆长为 Δx ,由于在一定长度内电缆是均匀线性的,所以其RLGC参数可用下式进行计算:

$$R = r\Delta x, L = l\Delta x, G = g\Delta x, C = c\Delta x, \quad (6)$$

式中: r, l, g, c 分别是电缆每千米的电阻、电感、电

导、电容值。主脐带缆与场内脐带缆均采用截面积为 16 mm^2 的水下专用电缆。南海某水下气田在一定条件下实测的单位长度电缆参数值如表1第4行所示。由于相邻SCM之间的最长通信距离不超过30 km,根据传输线理论,可忽略电缆的集肤效应和分布参数特性,因此,电力线集中参数模型适用于本次设计分析。文献[18]对传输线分布电导进行了仿真,其仿真结果表明,在 $1 \text{ Hz} \sim 30 \text{ MHz}$ 范围内,电缆的电导效应可忽略不计。因此,本次仿真无需考虑电缆的分布电导。表1其余行中的电力线分布电阻、电感、电容数值是根据式(6)计算出来的。

表1 RLC参数测量值

Table 1 Measured values of RLC

距离/km	电阻 R/Ω	电感 L/mH	电容 $C/\mu\text{F}$
0.2	0.48	0.150	0.0104
0.3	0.72	0.225	0.0156
0.5	1.2	0.375	0.0260
1	2.4	0.750	0.0520
1.5	3.6	1.125	0.0780
2	4.8	1.500	0.1040
30	72	22.500	1.5600

2.2 仿真分析

OrCAD Capture 这一电子设计自动化(EDA)软件具有强大的电路图绘制、模拟仿真以及图形后处理功能,非常适合于分析整个载波通信系统的性能,本文利用该软件进行仿真。完成的主要内容包包括信道衰减、背景噪声(高压直流电)、传输带宽等具体通信特性的仿真分析。仿真前提供了一定的输入说明和条件,具体内容如下:

(1) 脐带缆具有抗水下高压特性,水压对通信质量的影响可忽略不计;海水中的多种金属离子可吸收电磁波,起到屏蔽电磁干扰作用;水温范围一般为 $-2 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

(2) 调制方式:MQAM。

(3) 误码率不高于 1×10^{-6} 。

(4) 发射信号为 37 dBm (5 W);同时,根据项目规定,系统接收机最低功率要大于等于 -45 dBm (低于此值信号将淹没在背景噪声中,无法提取信号)。接收端获得的接收功率可用下式进行计算:

$$P_R = 10 \cdot \lg(I_R \cdot V_R) \cdot 1000, \quad (7)$$

式中: P_R 为接收机信号功率,dBm。

仿真设置中,选择交流小信号与噪声同时分析的模式。发射机功率设为 37 dBm ,幅值为1,相位

为0。采用2倍频程扫描,每2倍频程设置10个扫描点。载波频率为100 Hz~500 kHz。将不间断电源(UPS)作为电网的等效噪声源,每隔30个频率点输出一份噪声资料。

例1:无电网噪声时的30 km主脐带缆信号衰减特性。如图3所示为下行通信的原理图,其中,电阻 R 、电感 L 和电容 C 的单位若未特别说明,则为国际单位 Ω 、H和F。信号源 $V1$,为了得到37 dBm的发射功率,内阻定为25 Ω ,接收机位于水下SDH的SCM上,内阻定为100 Ω 。由于脐带缆工作温度是变化的^[19],因此,分别在-20、0、20、40、60 $^{\circ}\text{C}$ 五种温度下进行仿真,进而观察温度对通信性能的影响,得到的仿真曲线如图4所示,不同温度下接收信号功率曲线重合,说明环境温度对接收机信号质量基本无影响。1 kHz以前接收功率保持稳定,超过1 kHz以后呈线性衰减。截止频率为4.6249 kHz。

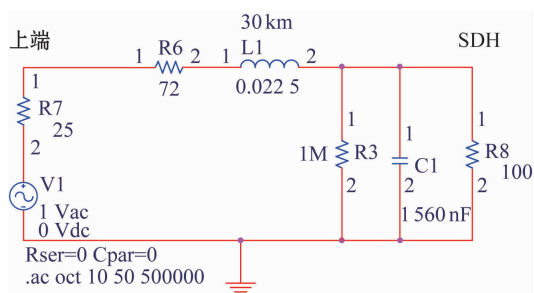


图3 无电网噪声时,主脐带缆下行通信仿真模型

Fig. 3 Umbilical downlink communication simulation model without electric network noises

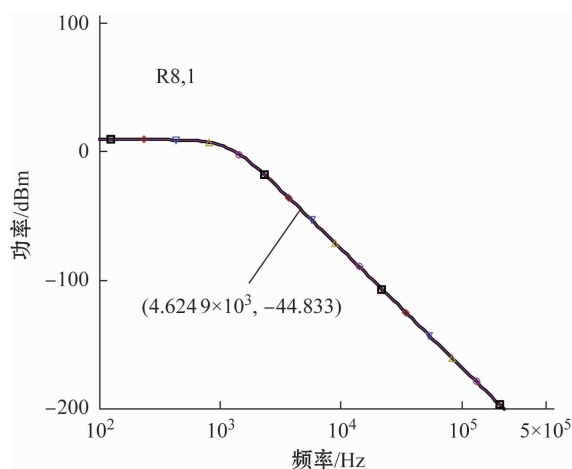


图4 接收机信号衰减

Fig. 4 Signal attenuation at the receiving end

例2:加入电网背景噪声(高压直流电)时主脐带缆信号衰减特性。

在深水环境中,诸如船舶、海浪、生物之类噪声可以忽略不计,但是,由于实际载波信号与传输电能的电力线共用一根电缆,因此仿真过程中必须考虑实际电网背景噪声对接收机接收信号的影响。图5是加入了电网背景噪声的主脐带缆下行通信原理图。南海某水下气田采用1 230 V直流UPS为水下设备供电,电压到达水下SDH处经过变压器降压,以此来获得符合SCM电压窗范围的电压值。UPS位于主脐带缆上部,内阻为10 Ω 。为了得到电网背景噪声随环境温度改变的变化规律,仍然需要进行温度分析。图6的仿真结果描绘了不同温度下电网背景噪声随频率变化的曲线。与此同时,UPS与发射机相对位置的不同会导致上/下行通信的衰减存在一定差异,因此,图7和图8分别对这两种传输方向进行了仿真。

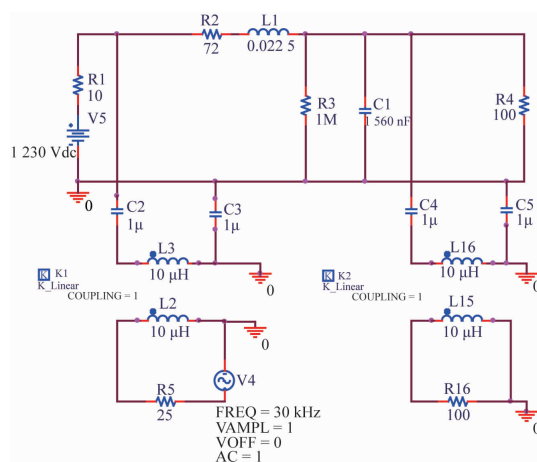


图5 加入电网背景噪声时主脐带缆通信仿真模型

Fig. 5 Umbilical communication simulation model with additive electric network noises

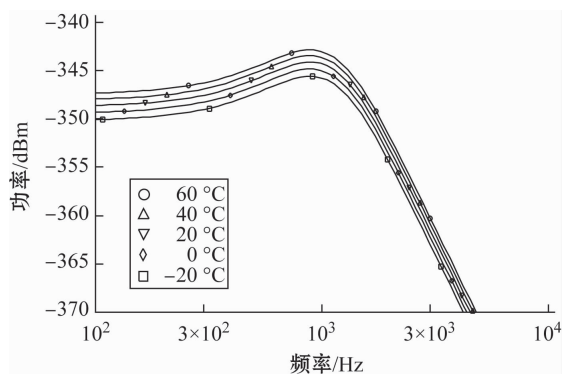


图6 主脐带缆不同温度下的电网背景噪声

Fig. 6 Electric network background noises in the umbilical cable under different temperature

从图6中首先可以看到,无论环境温度如何改变,在100~870 Hz这一频带内,整个电网背景噪声功率都呈指数增长,最大值出现在频率为870 Hz时,功率总和在-342~-346 dBm之间,随后线性下降,对信道的影响逐渐降低。通过对比图4与图7的衰减曲线可知,电网背景噪声的存在会使得接收机信号的截止频率前移,直接导致传输带宽变窄,降低传输速率。

其次,在-20℃到60℃范围内,温度每升高20℃,电网背景噪声整体增加约0.8 dB,与电网背景噪声功率-342~-370 dBm相比可以忽略。这说明温度的变化对电网背景噪声的影响较小,在实际通信系统设计中可不考虑。

水面脐带缆终端总成到水下SDH的主脐带缆

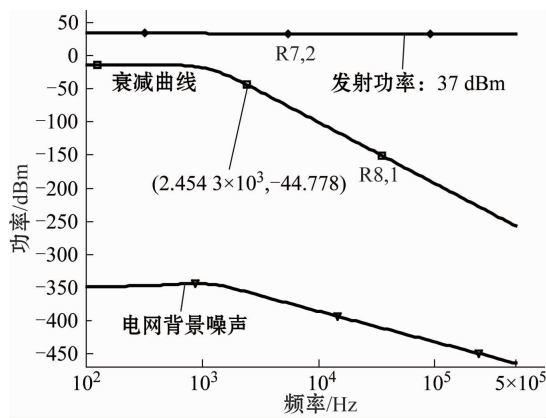


图7 主脐带缆的下行衰减

Fig. 7 Downlink attenuation of the umbilical cable

下行衰减如图7所示,图中包含信号源的发射功率、接收机的接收功率以及电网背景噪声。发送功率在整个频率范围内保持在37 dBm(5 W);接收机功率在0~700 Hz之间保持在-14 dBm,超过700 Hz后线性下降,当信号源频率提高到2.4543 kHz时,接收机的信号功率衰减到-45 dBm,接收机无法提取有用信号。

图8展示了主脐带缆上行衰减。接收机信号衰减呈现出类似二次函数的曲线形式,信号传输带宽降至1.7591 kHz。通过与下行衰减对比可知:同一传输路径的上行衰减更为剧烈,更能衡量一个传输通道的性能。因此,上行衰减对载波机发射功率的设计以及信道通信速率的计算都更具有指导意义。

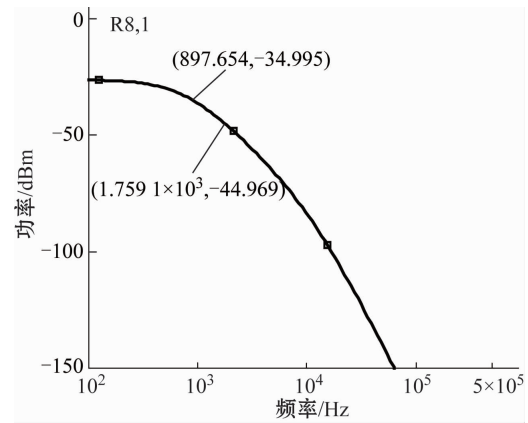


图8 主脐带缆的上行衰减

Fig. 8 Uplink attenuation of the umbilical cable

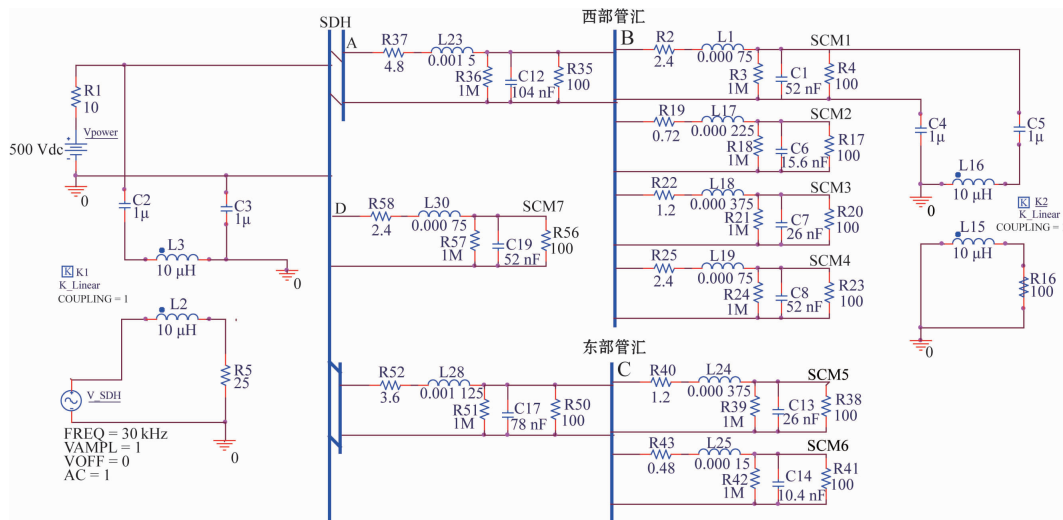


图9 场内脐带缆通信仿真模型

Fig. 9 Communication simulation model of the infield umbilical cables

例 3:水下 SDH 到水下 SCM 之间的场内脐带缆通信。

目前,SPS 的水下组成形式以树型结构为主,SDH 与 SCM 之间的场内脐带缆通信结构如图 9 所示,其中,接收端的变压器模块可根据需要分别接于 SCM1~SCM7 的末端电阻上。水下每一个 SCM 的电压窗为 300~600 V,本次仿真选取 500 V 作为水下 SCM 的供电电压,信号发射机位于 SDH 上,接收机安装在 SCM1~SCM7 中。图 10 和图 11 分别为水下场内脐带缆通信系统的背景噪声以及各个路径的下行衰减。

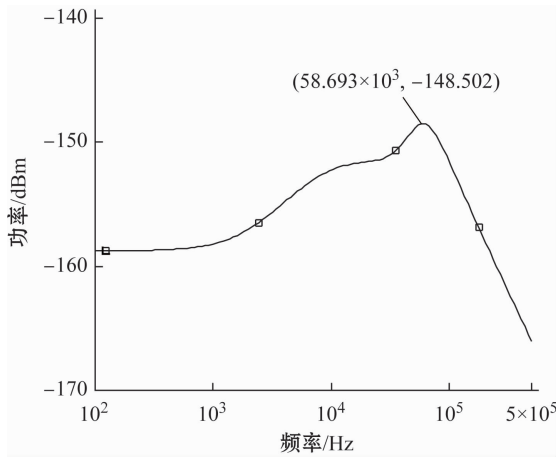


图 10 场内脐带缆的电网背景噪声

Fig. 10 Electric network background noises in the infield umbilical cables

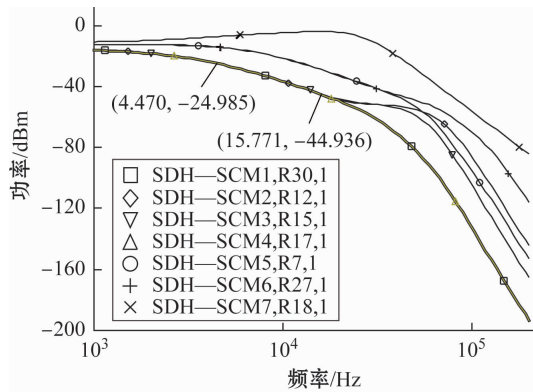


图 11 场内脐带缆各路径下行通信衰减曲线对比

Fig. 11 Comparison of attenuation curve for downlink communication of each path in the infield umbilical cables

对比图 10 与图 6 的噪声曲线可以看到,水下 SCM 之间的场内脐带缆通信的电网背景噪声高于主脐带缆,而主脐带缆的噪声则更加平稳。

图 11 中共有 7 条接收机的信号衰减曲线。距离最近的 SDH—SCM7 路径衰减最缓慢,带宽可达 60 kHz 以上。距离最远的 SDH—SCM1 和 SDH—SCM4 路径衰减最严重,带宽为 15.771 kHz。这里值得一提的是,在实际海洋工程的通信系统设计方案中,必须以衰减最严重、带宽最狭窄的传输路径作为设计参考。因此,水下 SCM 之间通信的误码率和传输速率要根据 SDH 到 SCM1 或 SCM2 之间的信道来计算。

3 传输速率计算

3.1 主脐带缆传输速率计算

本文的电力线载波通信调制方式采用 MQAM。该方式比单一参量受控数字符号的频带传播方式更具抗干扰能力,这会使得频带利用率大为提高,极大地节省了频率资源,更加适合信号的远距离传输。

若要计算信号的传输速率,首先要限定误码率,本文要求通信误码率不大于 1×10^{-6} 。MQAM 调制方式的误码率计算公式为^[20]

$$P_{s, \text{MQAM}} = 2 \left(1 - \frac{1}{M} \right) \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{3r}{2(M-1)}} \right), \quad (8)$$

式中:erfc()为互补误差函数; r 为信噪比。这两个参数的计算公式分别为

$$\text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x) = \frac{2}{\pi} \int_0^x e^{-z^2} dz, \quad (9)$$

$$r = \frac{E_{av}}{n_0}, \quad (10)$$

式中:erf()为误差函数,可通过 MATLAB 中的误差函数指令进行计算; E_{av} 为平均信号能量; n_0 为接收机所处环境的背景噪声,根据前文的仿真条件定为 -45 dBm。 E_{av} 的表达式为

$$E_{av} = \frac{P_{rec} \times B}{S_p}, \quad (11)$$

式中: P_{rec} 为接收端的二进制信号所携带的能量; B 为带宽; S_p 为所求的最高传输速率。将以上公式进行展开,可得

$$P_{s, \text{MQAM}} = 2 \left(1 - \frac{1}{M} \right) \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{3 \cdot P_{rec} \cdot B \cdot \log_2 M}{2 \cdot (M-1) \cdot n_0 \cdot S_p}} \right) \log_2 M. \quad (12)$$

本次传输速率计算以衰减最严重的主脐带缆上行通信为例,背景噪声功率为 $n_0 = 10^{-4.5} \times 10^{-3} \text{ W}$,带宽为 1 759 Hz,调制/解调采用 4QAM。同时,为

了尽可能得到信道最低传输速率,接收端应尽可能地选择距离截止频率较近的频率点的功率值,本次计算选取了(897.654 Hz, -34.995 dBm)。将上述数据代入式(12)可得

$$P_{s,4QAM} = 2 \left(1 - \frac{1}{4} \right) \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3 \cdot 10^{-3.5} \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 1759 \cdot \log_2 4}{2 \cdot (4-1) \cdot 10^{-4.5} \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot S_p}} \right) \quad (13)$$

$$\log_2 4 = 1 \times 10^{-6}.$$

求解该方程,得到传输速率 $S_p = 1\,392.625$ bit/s。 M 为其他数值时的 QAM 调制方式传输速率如表 2 所示。

表 2 主脐带缆不同进制下的上行传输速率
Table 2 Uplink transmission rates of the umbilical cable under different systems

M 值	传输速率/(bit · s ⁻¹)
4	1 392.625
16	514.244
64	175.942
256	56.818

从表 2 可以看出,随着 M 值的不断增加,传输速率逐渐降低。这是因为在误码率要求相同的条件下,单个码元携带的信息量增加,导致了速率的降低,但却提高了传输的可靠性。因此,在设计调制方式的进制数 M 时,要衡量好传输速率和系统可靠性这两个相互矛盾的通信指标。

3.2 SDH 到 SCM 之间的场内脐带缆传输速率计算

针对例 3 的水下结构图选取表 3 中距离较远的路径进行上行通信仿真,得到了信号传输带宽,调制方式采用 4QAM,通过式(8)进行计算,得到相应信道的最低传输速率,表 3 中的 SEM 是水下电子模块,包含载波通信子系统,是 SCM 控制模块中的一部分。

4 结 语

本文针对南海某水下气田进行了水下载波通信信道特性建模与仿真分析,得到如下结论:

(1) 信道衰减随传输距离的增加而增大;在同一路径中,信道上行衰减略大于下行衰减。

(2) 信道衰减随信号频率的增加而增大,随着频率的变化有电网背景噪声时比无电网背景噪声时衰减大。

表 3 场内脐带缆之间下行通信的传输特性

Table 3 Transmission characteristic of the downlink communication among infield umbilical cables

调制方式	路 径	带宽 /kHz	传输速率 /(bit · s ⁻¹)
4QAM	SEM1→B→A→C→SEM5	5.692 7	45 044
	SEM1→B→A→D→SEM7	9.035 0	71 491
	SEM5→C→A→B→SEM1	5.742 7	45 440
	SEM5→C→A→D→SEM7	20.494 0	162 162
	SEM7→D→A→B→SEM1	9.455 5	74 818
	SEM7→D→A→C→SEM5	16.015 0	126 721

(3) UPS 的变化对线路噪声功率变化的影响较小,可不作考虑;传输距离的增加会抬高噪声峰值点所对应频率前的噪声功率,但提高后的噪声功率不会超过峰值点的数值;SCM 数量的少量增加不会导致整个系统的背景噪声功率显著提高,但会使噪声功率随频率的变化更加稳定。

(4) UPS 产生的电网背景噪声会使接收端信号的截止频率前移,导致带宽变窄,降低同一频率下的信号传输速率。

(5) 水下环境温度变化对信号传输质量的影响可忽略不计。

(6) 在限定了误码率的情况下,传输速率随调制进制数的增加而降低,但可靠性有所提高。

本文为 SPS 中的水下载波通信系统的设计提供了一种仿真分析方法,对于工程实践具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] Lim J S, Barker G L. Deepwater multiwell subsea production system[C]. OTC, 1986; 5092.
- [2] 陈家庆. 海洋油气开发中的水下生产系统(一)[J]. 石油机械, 2007, 35(5): 54.
- [3] 王玮, 孙丽萍, 白勇. 水下油气生产系统[J]. 中国海洋平台, 2009, 24(6): 41.
- [4] Bavidge M. Husky Liwan deepwater subsea control system [C]. OTC, 2013; 23960.
- [5] Corneliussen S. KOS 200, the subsea control system for the Millenium[C]. SCADA, 2002; 111.
- [6] Carlson B C. API offshore standards activities: subsea production systems[C]. OTC, 1986; 5242.
- [7] Vichitrnanda V, Simms N, Sumner J. Subsea processing in remote marginal fields[C]. SPE, 2012; 153345.
- [8] Nelson S G. AKPO: the subsea production system [C]. OTC, 2010; 20993.
- [9] 苏峰, 刘鸿雁, 王强. 电力/信号传输技术在水下生产系统的应用[J]. 石油化工自动化, 2008(5): 29.
- [10] 张理. 水下生产控制系统设计探讨[J]. 中国造船, 2010, 51

- (A02): 185.
- [11] Hesbol S, Hprten V, Steigen V. Power line communication device for subsea well; USA, US 2010/0052940 A1 [P]. 2010-03-04.
- [12] Horten V, Steigen V. Modem in particular for subsea power line communication; USA, 8279614[P]. 2012-10-02.
- [13] Brekke E, Horten V, Steigen V. Method and modem for subsea power line communication; USA, 8199798[P]. 2012-06-12.
- [14] Zimmermann M, Dostert K. A multipath model for the powerline channel[J]. IEEE Trans Communications, 2002, 50(4): 553.
- [15] Philipps H. Modelling of powerline communication channels [C]. Powerline Communications and Its Applications, 1999: 14.
- [16] Anatory J, Theethayi N, Thottappillil R, et al. The effects of interconnections and branched network in the broadband powerline communications [C]. International Gathering of Radio Science, 2005.
- [17] Meng H, Chen S, Guan Y L, et al. A transmission line model for high-frequency power line communication channel [C]. International Conference on Power System Technology, 2002, 2: 1290.
- [18] Guezgouz D, Lebunetel J C, Raingeaud Y. Electromagnetic compatibility between power line communication and powers converters[C]. IECON, 2009: 4098.
- [19] 郭宏,高欢. 水下生产系统脐带缆温度场与载流量分析的有限元方法[J]. 电线电缆, 2013(3): 5.
- [20] 张力军, 钱学荣, 张宗橙. 通信原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.

• 征订启事 •

《海洋工程装备与技术》征订启事(2015 年)

《海洋工程装备与技术》是由上海交通大学主管、上海交通大学出版社主办的综合性学术刊物。本刊以介绍我国海洋工程装备方面的研究、设计、实验、生产、使用和管理等方面的成果以及学术动态为宗旨。本刊主要读者对象为海洋工程装备研究与技术从业人员。2015 年本刊为双月刊,将出版 6 期。

《海洋工程装备与技术》征订单存根(复印有效)

单期定价	50 元	年定价	300 元
订阅内容	<input type="checkbox"/> 2015 年全年	订阅份数	
合计金额		汇款日期	
订阅单位			
收件地址			
收件人		收件人电话	

订阅者请先通过电子邮件或电话与编辑部联系。

汇款方式:

开户行:中国工商银行上海华山路支行

账号:1001271509004604749

户名:上海交通大学出版社有限公司

汇款后请将存根填写完整,传真至编辑部。

《海洋工程装备与技术》编辑部

地址:上海市番禺路 951 号上海交通大学出版社(邮编:200030)

邮箱:journalsjtup@hotmail.com

电话:021-61675249;61675260;60823078 传真:021-61675228

您也可通过邮局订阅本刊:邮发代号 4-897。