

## 基于啁啾扩频的水声网络 OPNET 仿真方法

李文聪<sup>1,2</sup>, 袁飞<sup>1,2</sup>, 钟张婷<sup>1,2</sup>, 程恩<sup>1,2</sup>

(1. 厦门大学信息科学与技术学院通信工程系, 厦门 361005;  
2. 厦门大学水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室, 厦门 361005)

**摘要:** 针对 OPNET 软件在水声网络协议仿真中不支持信道结构改变和自定义调制方式的局限, 以啁啾扩频的水声网络 ALHOA 协议仿真为例, 提出了一种适合在 OPNET 上实现更真实水声通信协议仿真的方法。物理层调制方式采用自定义的  $\pi/4$ -DM-DQPSK 制式, 利用 MATLAB 将生成的调制曲线导入 OPNET 中配合 OPNET 其他管道的配置。在 2 种具有结构差异的 Bellhop 信道中验证对 ALHOA 协议的仿真效果, 结果表明信道结构的变化能灵敏地影响 ALHOA 协议的仿真。此方法对利用 OPNET 软件灵活开展水声网络协议仿真具有较好的参考价值。

**关键词:** 水声通信; 啁啾扩频; 水声网络; OPNET 仿真

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 01-0183-08

DOI:10.16182/j.cnki.joss.2016.01.025

### OPNET Simulation Method for Underwater Acoustic Networks Based on Chirp Spread Spectrum

Li Wencong<sup>1,2</sup>, Yuan Fei<sup>1,2</sup>, Zhong Zhangting<sup>1,2</sup>, Cheng En<sup>1,2</sup>

(1. College of Information Science and Technology, Communication Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;  
2. Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology, Ministry of Education, School of Information Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** Underwater acoustic(UWA) network protocol simulation on OPNET software could not follow the changing of channel structure and did not support custom modulation. In view of the limitations mentioned, a more realistic method of UWA protocol simulation on OPNET was introduced. UWA network ALHOA protocol simulation was taken as an example. *The physical layer modulation customized was called  $\pi/4$ -DM-DQPSK which was based on Chirp Spread Spectrum. In Matlab, the system would generate a modulation curve which would then be imported into OPNET to adjust the configuration of other pipelines.* The simulation results of ALHOA protocol was verified in two Bellhop channels with different structures, which showed changing structure had a sensitive impact on ALHOA protocol. The method introduced has reference value on simulating UWA network protocol flexibly in OPNET.

**Keywords:** Underwater Acoustic Communications; Chirp Spread Spectrum; Underwater Acoustic Network; OPNET Simulation

## 引言

20 世纪 90 年代初, 水声通信网络走进人们的



收稿日期: 2014-08-27 修回日期: 2014-12-14;  
基金项目: 国家自然科学基金项目(61571377;  
61471308);  
作者简介: 李文聪(1991-), 男, 广东佛山, 硕士生,  
研究方向为水声通信; 袁飞(通讯作者 1979-), 男,  
福建福州, 博士, 副教授, 研究方向为水下多媒体信  
息传输与处理。

视线, 并得到了广泛关注。各国相继投入了大量的人力和物力对水声通信网络进行开发和研究, 并取得了较大的进展<sup>[1]</sup>。如由美国海军实施的“海网”(Seaweb), 是目前规模最大的水声通信网络; 由欧共体发展的自组网通信计划 SWAN(Shallow Water Acoustic Communication Network)Project 等<sup>[2]</sup>。而国内在水声通信网络的研究主要侧重在仿真方

面。自 1987 年以来,OPNET 仿真软件已经在通信、国防、网络等领域被广泛应用,日渐成为主流网络仿真软件之一<sup>[3-4]</sup>。商业化的 OPNET 相比 NS2 等开源软件具有更便捷的使用及更友好的界面,可以最大限度地提高通信网络应用的仿真效率<sup>[5]</sup>,目前广泛应用于水下组网研究<sup>[6-9]</sup>。

然而,OPNET 软件主要是针对无线信道设置的,而极为复杂水声信道相比于无线信道在多径结构、传播损耗上存在较大差异。当前,基于 OPNET 平台做水声网络仿真的典型做法是通过修改管道参数来近似模拟信道<sup>[10-11]</sup>。这样的仿真方法只能修改如声速、传播时延等基础的信道参数。由于无法引入对水声网络仿真有重要影响的底层信道参数(如信道传递函数、新建调制方式等),这些传统仿真方法的仿真结果无法较好反映水声网络信道的特点和影响。本文针对这个问题,以基于啁啾扩频的  $\pi/4$ -DM-DQPSK 制式为例,介绍了一种可支持信道结构变化和自定义调制方式的 OPNET 水声网络仿真方法。

## 1 通信制式的仿真方案

误码率是水声通信系统的重要指标,OPNET 管道的最终目的是计算信道的误码率,通过误码门限来判定传输的数据包是否能够被接收,数据包的接收个数直接影响着水声通信网络的性能<sup>[4]</sup>。

OPNET 进行无线信道仿真时,管道阶段通过调用调制曲线计算误码率,而调制曲线与调制方式和信道模型密切相关。目前 OPNET 等仿真手段是通过设置底层的 14 个通道,然而这些通道无法很好地贴近信道特点。OPNET 管道建模在模拟水声信道时存在以下 2 个缺陷:一是对调制曲线的描述并不符合水声信道特性;二是缺少水声信道模型。另一方面,OPNET 调制方式有限,不能满足水声通信的要求。由此生成的不准确的调制曲线将直接影响网络仿真结果的真实性。

为了解决上述问题,本文提出一种基于啁啾扩频  $\pi/4$ -DM-DQPSK 制式的水声网络 MAC 协议仿

真方案,通过建立一个水声通信系统来实现 OPNET 物理层链路的仿真。其中啁啾扩频  $\pi/4$ -DM-DQPSK 制式则需要借助 MATLAB 平台构建。此方案改进了 OPNET 仿真平台调制方式的有限性,可以对水声信道模型进行完善,而且系统的构建由 MATLAB 和 OPNET 两个平台合作完成,最终的仿真结果具有一定的真实性。

### 1.1 仿真体系结构

自定义通信制式的仿真对调制模块与信道模块进行了改进,调制方式采用速率快,功放能力、抗频选衰落能力强的啁啾扩频的  $\pi/4$ -DM-DQPSK,信道模型采用对水声信道建模更为准确的 Bellhop 射线模型,从而建立一个啁啾扩频  $\pi/4$ -DM-DQPSK 水声通信系统。最后对啁啾扩频  $\pi/4$ -DM-DQPSK 水声通信系统进行了仿真,将系统仿真结果与网络建模相结合,完成水声网络 MAC 协议仿真。

总体仿真体系结构图如图 1 所示。通过对输出信号的分析,可以获取啁啾扩频  $\pi/4$ -DM-DQPSK 系统在不同信道环境中的性能曲线。在 OPNET Modeler 无线管道中,误码率是以管道获得的 SNR 值为前提,通过调用仿真平台自带的调制曲线计算得到。将啁啾扩频  $\pi/4$ -DM-DQPSK 制式的通信系统建模后所得的相应性能曲线通过 OPNET 中的 EMA 接口生成调制曲线文件,并导入到 OPNET 管道中,完成通信系统与网络仿真平台的连接。这也同时为水声网络协议仿真提供真实可靠的物理层特性。

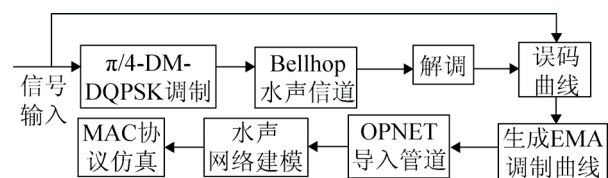


图 1 自定义通信制式的仿真体系结构图

### 1.2 啁啾扩频 $\pi/4$ -DM-DQPSK 系统原理

啁啾扩频  $\pi/4$ -DM-DQPSK 采用 Chirp 调频信号作为载波信号。因为线性调频信号具脉冲压缩特

性,在解调时方便进行检测和判决,因而可以减少误码<sup>[12]</sup>。水声信道复杂多变,啁啾扩频  $\pi/4$ -DM-DQPSK 调制可以克服海洋噪声、多径效应和多普勒频移对水声通信的影响,实现可靠传输。

### 1.2.1 线性调频信号

线性调频信号,又称 Chirp 信号。该信号的频带宽,发射能量大,自相关性非常好,易于检测,因此是最常用的检测信号之一<sup>[13]</sup>。Chirp 信号表达式为:

$$u(t) = a(t) \cos(2\pi f_0 t + k\pi t^2) \quad (1)$$

其中:  $-T/2 < t < T/2$ 。

式(1)中,  $a(t)$  是 Chirp 信号的包络。Chirp 信号的带宽  $B = |k|T$ 。  $f_0$  是 Chirp 信号的中心频率。

Chirp 信号对应的匹配滤波器的冲激响应如公式(2)所示

$$h(t) = B \cos(2\pi f_0 t - \pi k t^2) \quad (2)$$

其中:  $-T/2 < t < T/2$ 。

那么 Chirp 信号经过匹配滤波器的输出结合公式(1)可得:

$$y(t) = h(t) \times u(t) = \sqrt{BT} \frac{\sin(\pi B t (1 - \frac{|t|}{T}))}{\pi B t} \cos(2\pi f_0 t) \quad (3)$$

其中:  $-T < t < T$ 。

从公式(3)可知,当  $t = 0$  时,  $y(t)$  取峰值。输出信号的脉冲宽度与带宽成反比,大小为  $1/B$ 。也就是说,输入信号的带宽越大,输出的峰值越尖锐,如图 2 所示。

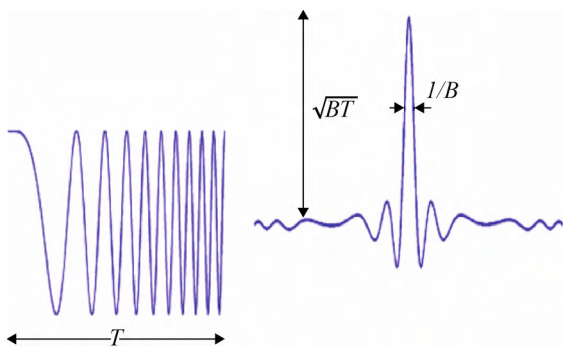


图 2 Chirp 信号及其匹配输出

Chirp 信号自相关性好,且 up-Chirp 信号和 down-Chirp 信号具有良好的正交性,解调时便于进行判断,因此得到广泛的使用。

### 1.2.2 $\pi/4$ -DM-DQPSK 调制解调原理

原理框图如图 3 所示。发送端对于输入数据进行串并转换、差分编码、内插和成形滤波器,再与正交载波相乘累加得到已调  $\pi/4$ -DM-DQPSK 信号。将生成的信号与激励脉冲相乘,生成调频信号放入在信道中传输。

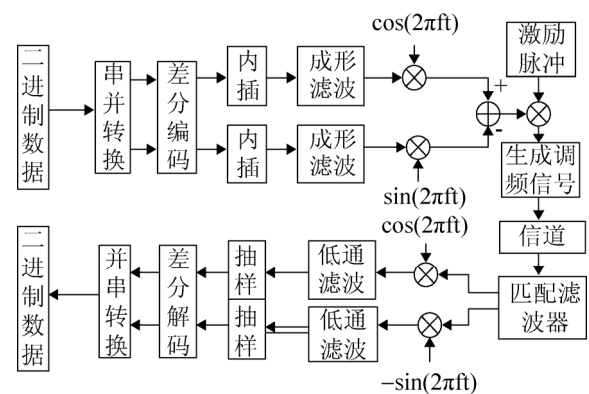


图 3  $\pi/4$ -DM-DQPSK 的原理框图

接收端首先对接收到的信号进行匹配滤波,输出的结果经过正交解调,送入低通滤波器滤波,再经过抽样、差分编码和并串转换进而恢复出原始的数据信息。

设已调信号为:

$$S_k(t) = \cos(\omega t + \theta_k) = \cos(\omega t) \cos(\theta_k) - \sin(\omega t) \sin(\theta_k) \quad (4)$$

当前时刻码元的相位  $\theta_k = \theta_{k-1} + \Delta\theta_k$ ,其中  $\theta_{k-1}$  是前一个时刻码元的相位,  $\Delta\theta_k$  是当前时刻码元对应的相位的跳变值。由此可以推出

$$\cos(\theta_k) = \cos(\theta_{k-1} + \Delta\theta_k) = \cos(\theta_{k-1}) \cos(\Delta\theta_k) - \sin(\theta_{k-1}) \sin(\Delta\theta_k) \quad (5)$$

$$\sin(\theta_k) = \sin(\theta_{k-1} + \Delta\theta_k) = \sin(\theta_{k-1}) \cos(\Delta\theta_k) + \cos(\theta_{k-1}) \sin(\Delta\theta_k) \quad (6)$$

设差分编码输出两路数据分别是  $I_k = \cos(\theta_k)$  和  $Q_k = \sin(\theta_k)$ ,则它们与  $\Delta\theta_k$  的关系如表 1。 $\pi/4$ -DQPSK 星座图如图 4 所示<sup>[14]</sup>,避免了相位过 0

点出现的  $180^\circ$  相位跳变, 减少了功率谱旁瓣成分, 提高功放性能。

表 1 两路数据与相位变量的对应关系

I 路	Q 路	$\Delta\theta_k$
0	0	$\pi/4$
0	1	$-\pi/4$
1	0	$3\pi/4$
1	1	$3\pi/4$

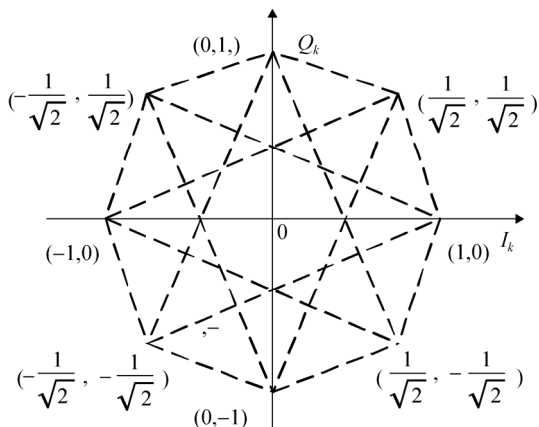


图 4  $\pi/4$ -DQPSK 星座图

## 2 信道模型及仿真分析

在水声通信系统中, 水声信道模块采用 Bellhop 模型进行水声信道建模。为了研究浅海网络的特性, 下文对浅海进行建模, 并对声速剖面、信道冲激响应进行了仿真和分析。

### 2.1 Bellhop 射线模型

Bellhop 模型是 1987 年 Poter 和 Buiker 提出的通过高斯波束跟踪方法计算水平非均匀环境中的声场<sup>[15]</sup>。高斯束射线跟踪法的基本思想是将高斯强度分布与每条声线结合起来, 该声线为高斯波束的中心声线, 这些声线能较平滑的过渡到声影区, 也能较平滑的穿过焦散线, 得到的结果与全波动模型的结果一致。

本文采用 MATLAB 平台实现 Bellhop 射线模型的仿真, 通过在 MATLAB GUI 中输入海洋环境的各种参数(如信道几何结构、声速剖面、海底地形、界面反射损失、多径的数目  $N$ , 入射角、幅度),

最终给出系统的冲激响应和延时, 为水声通信系统建模提供相应的信道参数。

### 2.2 浅海信道建模与仿真

浅海水声信道相对复杂, 根据浅海声速梯度模型, 得到浅海声速剖面图, 如图 5 所示。对浅海信道建模, 仿真中的参数设置如表 2 所示。

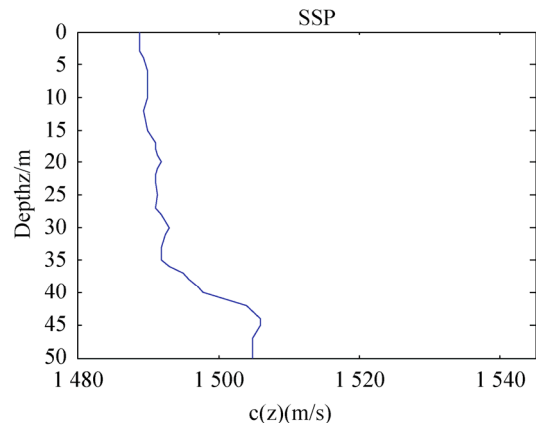


图 5 浅海声速剖面图

表 2 浅海信道仿真主要参数设置

海水深度	声源深度	接收机深度	声源频率	路径	收发水平距离 D
H=80 m	H1=20 m	H2=25 m	f=24 khz	N=10	600 m/ 1 600 m

由于每条路径传播时所经过的底面和海底反射后到达接收端, 因此水声信号在每一条路径上都有相应的衰减和时延。经过 Bellhop 模型得到浅海信道的冲激响应, 图 6 和图 7 为收发端相距 600 m 和 1 600 m 的浅海水声道的冲激响应。

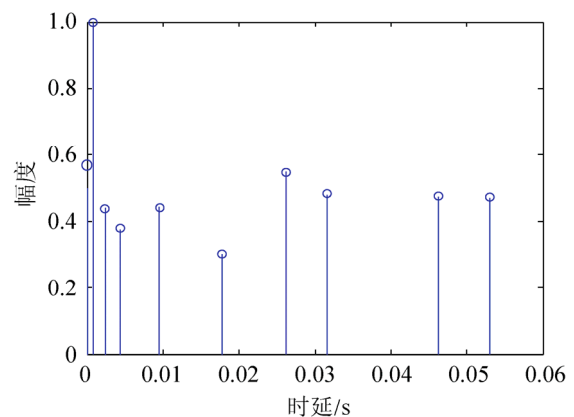


图 6 收发端相距 600 m 时的信道冲激响应

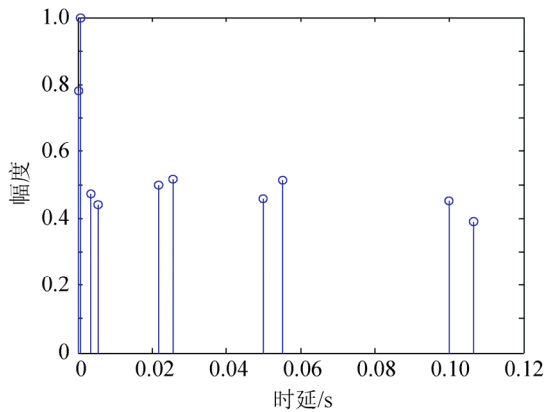


图 7 收发端相距 1600 m 时的信道冲激响应

由图 6 和图 7 可知,收发端 2 个不同距离将导致两种不同的多径结构,下面 OPNET 仿真将在 2 种信道结构下讨论吞吐量和丢包率关系。

### 3 $\pi/4$ -DM-DQPSK 系统仿真

Chirp 载波技术在 OPNET 的管道配置无法实现,故  $\pi/4$ -DM-DQPSK 系统构建在 MATLAB 平台完成。对  $\pi/4$ -DM-DQPSK 系统仿真时,Chirp 信号的频率范围为 10~15 kHz,带宽 5 kHz,码元宽度  $T = 5$  ms。调制信号经过浅海水声信道后对其进行解调,最终可得到系统性能曲线图。图 8 为调制信号波形图和频谱图。

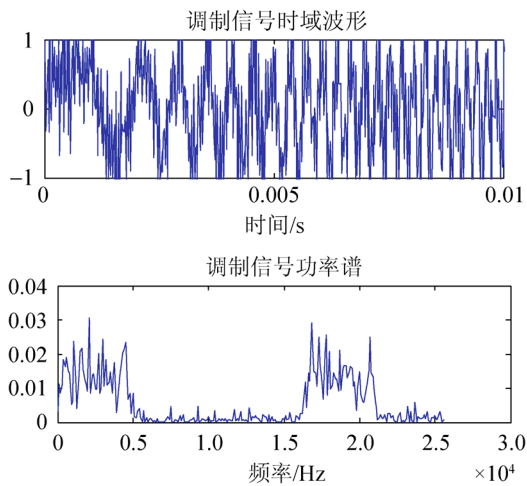


图 8 调制信号的波形和功率谱

信号经过  $\pi/4$ -DM-DQPSK 调制后与浅海水声信道冲激响应进行卷积,得到经过水声信道后的接收信号。

图 9 和图 10 分别为收发端相距 600 m 和 1 600 m 的接收信号时域波形及其功率谱。由仿真结果可知,经过浅海信道后的接收信号失真严重。收发端水平传输距离越大,接收信号的包络幅值和功率越小,这是因为当收发端的水平传输距离增大时,多径信号经过海平面和海底的多次反射,干扰严重,因此信号的损耗会变大,相应的功率也会变小,所以波形失真严重。

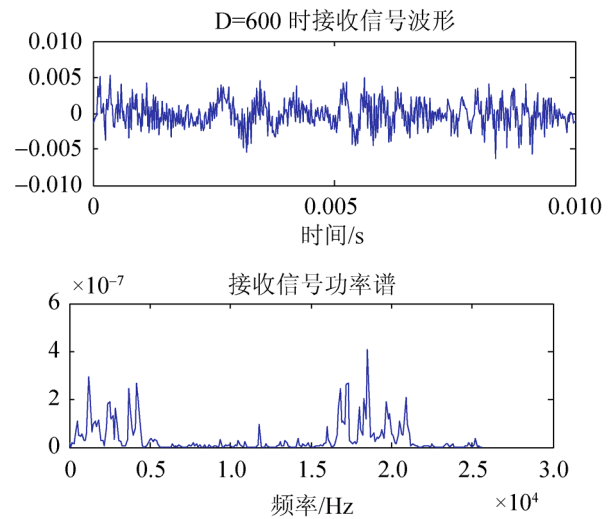


图 9 D=600 m 时的接收信号波形和功率谱

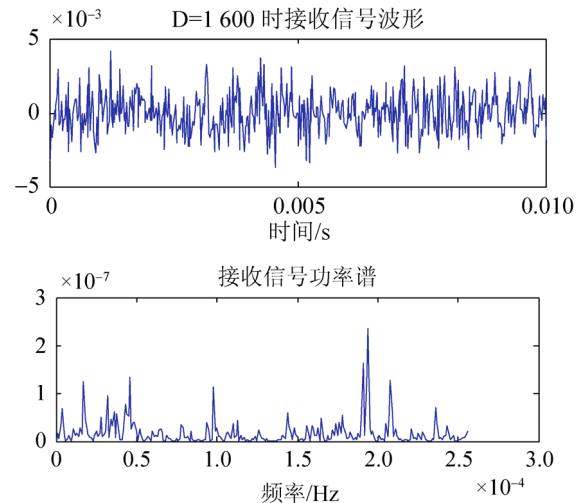


图 10 D=1600 m 时的接收信号波形和功率谱

接收信号经过解调后进行误码计算,图 11 和图 12 分别为收发端相距 600 m 和 1600 m 的误码曲线图。由仿真结果可知,信号经过浅海信道时,随着传输距离的增大,接收信号的误码率也相应增

大,因为距离越大,信号的衰减越大,因此在接收时信号发生严重畸变,导致解调后的误码会增大。

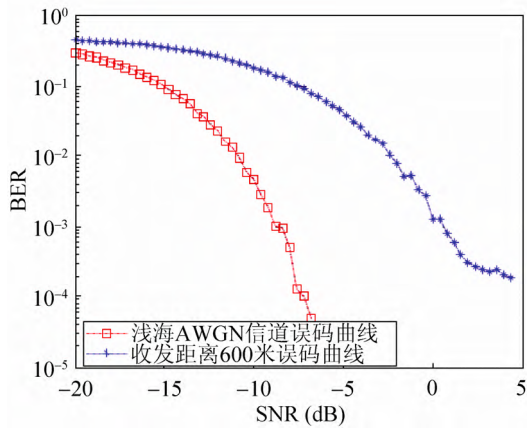


图 11 浅海信道距离 600 m 的误码曲线

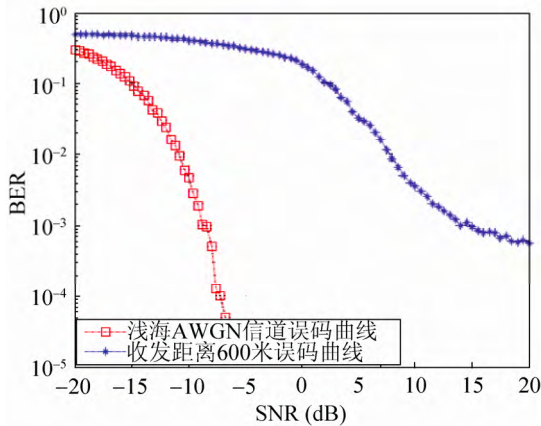


图 12 浅海信道距离 1600 m 的误码曲线

## 4 水声网络 MAC 协议仿真

### 4.1 仿真参数配置

#### 4.1.1 线性调频信号

OPNET 对物理层采用了 14 个管道来完成。收发机属性中还需对水声信道的传输速率和带宽等进行设置,相关参数大小应与水声通信系统建模中的参数保持一致。仿真中的物理层参数配置如表 3 所示。

表 3 网络主要参数设置

数据传 输速率	信道 带宽	调制方式	发送 功率	数据包 大小
400 bps	5 kHz	$\pi/4$ -DM-DQPSK	20 W	512 bit

在 OPNET 仿真平台中,OPNET 管道阶段 11 在计算误码率时,不必调用 OPNET 内部的调制曲线,只需要调用  $\pi/4$ -DM-DQPSK 制式在 Bellhop 信道模型下的调制曲线。而这一过程通过 OPNET 的外部访问实现。

#### 4.1.2 调制曲线 EMA 生成

OPNET 中模型的外部访问(EMA)指不通过 Modeler 编辑器,而使用其它访问模型的机制。因此结合 EMA 接口可将水声通信系统仿真后得到的误码曲线变成 OPNET 内部可使用的调制曲线 (Modulation Curve)文件,以便在网络仿真时调用。在 OPNET 中新建一个调制曲线,并生成 EMA 代码。将已有的误码曲线值导入 EMA 代码的 `dvec_0[]` 数组中,并配置信噪比的取值区间,最后得到调制曲线文件,保存为 `em.c` 文件。OPNET 控制台的配置,通过 OPNET 的配套工作“`op_mkema`”对调制曲线文件进行编译,若编译成功会自动生成与调制曲线文件相对应的 `em.x` 文件,并执行该 `em.x` 文件。完成设置后系统会自动生成外部文件导入的调制曲线。

#### 4.1.3 网络模型

在本次仿真中,节点采用多跳拓扑结构,网络中的任意两个节点可以相互进行通信。在水声网络设置 5 个节点,如图 13 所示。仿真时结合 3.2 节中水声信道建模的收发端距离进行水下节点分布,节点间的平均距离分别为 600 m 和 1600 m,仿真时对节点 0 的数据量进行统计。

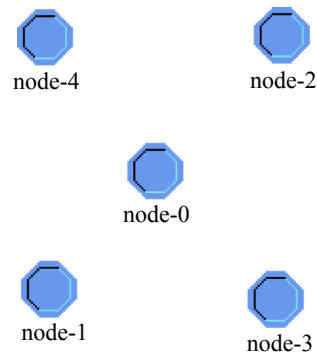


图 13 网络节点分布

## 4.2 MAC 协议仿真分析

仿真采用 MAC 层中的 ALOHA 协议, 本文对协议在浅海网络中的性能进行了研究。仿真时将  $\pi/4$ -DM-DQPSK 调制曲线导入 OPNET 中, 仿真对比在两种传输距离 600 m 和 1600 m 的浅海信道下协议的性能, 具体仿真结果如图 14。可知, 浅海水声网络中, MAC 协议在距离近时性能优于距离远的情况。这是因为随着节点之间的平均距离增加, 传播损耗增加, 可接收到的数据包个数减少, 导致网络吞吐量的减少。

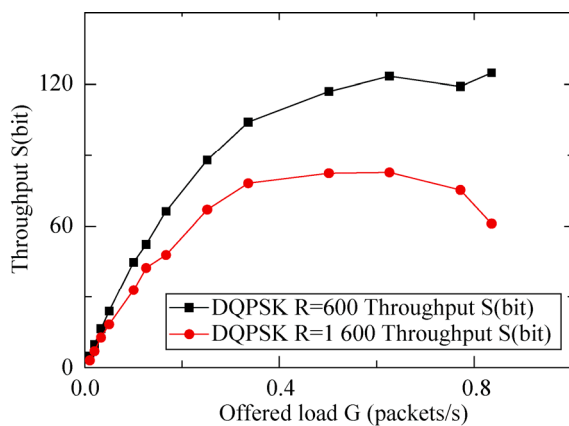


图 14 浅海传输距离变化与吞吐量的关系

OPNET 自带管道不考虑传输距离对于调制曲线的影响, 因此在 OPNET 没有结合底层仿真的时候, 经常会出现单纯的距离增加未必会影响性能的情况。现有的一些研究在对比传输距离对 MAC 协议的性能影响时<sup>[16]</sup>, 也只考虑到传输距离对于协议机制的影响。本文考虑了传输距离对于调制曲线的影响, 仿真结果表明传输距离变化对吞吐量有很大影响。所以, 本文得出一个结论, 设计 MAC 协议必须考虑物理层特性, 任何网络参数的变化: 传输距离、数据包大小等因素都会影响物理层特性, 进而影响上层协议的性能。

由图 15 可知, 水下节点间距离越长, 协议的丢包率越大, 因为距离的增大将直接导致调制曲线中误码率的增大。而误码率的大小必将直接影响数据包的丢包率, 因此传输距离越大, 调制曲线越差, 丢包率增加。

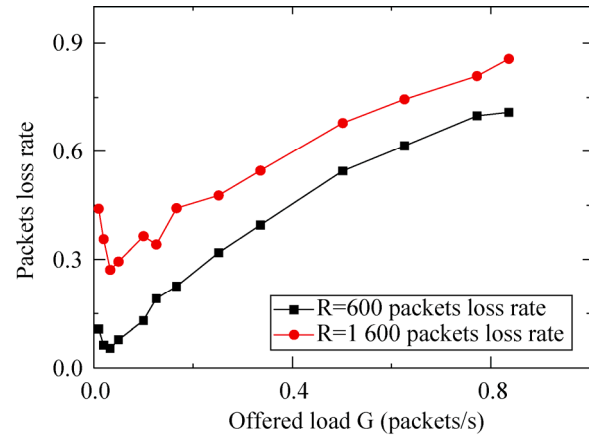


图 15 浅海传输距离变化与丢包率的关系

综上所述, 浅海网络中, 节点间传输距离的变化会对协议性能产生影响, 传输距离越长, 协议的性能越差。因此在浅海组网时应该适当减小网络中节点间的距离。

## 5 结论

本文给出了一个基于 MATLAB 和 OPNET 的水声网络联合仿真平台的构建思路。然后详细论述该平台的构建方案, 包括  $\pi/4$ -DM-DQPSK 调制方式和水声信道模型的构建以及该水声通信系统性能的仿真。最后在该平台上对水声网络 MAC 协议进行仿真实现。结合浅海水声信道建模对协议的性能进行分析和研究。

仿真结果表明, 传输距离的变化会影响协议的性能。随着传输距离的增大, 浅海网络中协议的性能下降。所以, 在分析网络参数(传输距离、数据包大小等)对 MAC 协议性能的影响时, 必须充分考虑这些底层参数对于水声信道的影响。

## 参考文献:

- [1] 程恩, 袁飞, 苏为. 水声通信技术研究进展 [J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2011, 50(2): 271-275.
- [2] 邓婕. 浅海水声自组网 MAC 协议的设计与实现 [D]. 厦门: 厦门大学, 2009: 1-2.
- [3] 陈敏. OPNET 网络仿真 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 6-10.
- [4] 王文博, 张金文. OPNET Modeler [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003.

(下转第 199 页)

- [10] Kucherov Leonid, Ryvkin Michael. Fracture toughness of open-cell Kelvin foam [J]. International Journal of Solids and Structures (S0020-7683), 2014, 51: 440-448.
- [11] Demiray Serkan, Becker Wilfried, Hohe Jörg. Investigation of the fatigue behavior of open cell foams by a micromechanical 3-D model [J]. Materials Science and Engineering A (S0921-5093), 2009, 504: 141-149.
- [12] Kumar Prashant, Topin Frederic, Vicente Jerome. Determination of effective thermal conductivity from geometrical properties: Application to open cell foams [J]. International Journal of Thermal Sciences (S1290-0729), 2014, 81: 13-28.
- [13] Jang Wen-Yea, Kraynik Andrew M, Kyriakides Stelios. On the microstructure of open-cell foams and its effect on elastic properties [J]. International Journal of Solids and Structures (S0020-7683), 2008, 45: 1845-1875.
- [14] Gaitanaros Stavros, Kyriakides Stelios, Kraynik Andrew M. On the crushing response of random open-cell foams [J]. International Journal of Solids and Structures (S0020-7683), 2012, 49: 2733-2743.
- [15] Jang Wen-Yea, Kyriakides Stelios, Kraynik Andrew M. On the compressive strength of open-cell metal foams with Kelvin and random cell structures [J]. International Journal of Solids and Structures (S0020-7683), 2010, 47: 2872-2883.
- [16] Mills N J. The high strain mechanical response of the wet Kelvin model for open-cell foams [J]. International Journal of Solids and Structures (S0020-7683), 2007, 44: 51-65.
- [17] Sullivan Roy M, Ghosn Louis J. Shear moduli for non-isotropic, open cell foams using a general elongated Kelvin foam model [J]. International Journal of Engineering Science (S0020-7225), 2009, 47: 990-1001.
- [18] 齐敏菊, 高光发. 开孔泡沫材料随机化 Kelvin 微结构模型建立与应用 [J]. 系统仿真学报, 2015, 27(2): 262-269.
- [19] Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures [J]. Engineering fracture mechanics (S0013-7944), 1985, 21(1): 31-48.
- [20] Schwer L. Aluminum plate perforation: a comparative study using Lagrange with erosion, multi-material ALE, and smooth particle hydrodynamics [C]// 7<sup>th</sup> European LS-DYNA Conference, Salzburg: LSTC, 2009.



(上接第 189 页)

- [5] Dao Van Phuong, 左加阔, Bui Thi Oanh, 等. 网络模拟软件 NS2 与 OPNET 的剖析比较 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2014, 44(3): 90-95.
- [6] 谭盛彪, 刘俊. OPNET 在水声通信网中的应用研究 [J]. 数字通信, 2013 (3): 37-41.
- [7] 韩晶, 黄建国, 冉茂华. 基于 OPNET 的水声通信网络设计与仿真 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(17): 5498-5502. (Han Jing, Huang Jian-guo, Ran Mao-hua. Design and simulation of underwater acoustic communication network based on OPNET [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2009, 21(17): 5498-5502.)
- [8] Yuan Fei, Wang Shanhong, Lin Bilan, et al. Research of the multiple access protocol for underwater acoustic networks based on OPNET [C]// Control Conference (CCC), 2010, Beijing, China. USA: IEEE, 2010: 4147-4150.
- [9] Jianxiong Wen, Lianghui Ding, Feng Yang, et al. Improved multi-hop time synchronization for Underwater Acoustic Networks [C]// Wireless Communications & Signal Processing (WCSP), 2013, Hangzhou, China. USA: IEEE, 2013: 1-6.
- [10] 丁元明, 姜大鹏. 基于 OPNET 的水声网络信道仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2012, 24(7): 1529-1536. (Ding Yuanming, Jiang Dapeng. Research and Simulation of Underwater Acoustic Network Channel Based on OPNET [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2012, 24(7): 1529-1536.)
- [11] 程荣涛. 水声通信网络设计与 OPNET 平台下仿真 [J]. 自动化与仪器仪表, 2014 (6): 173-176.
- [12] 王明. 基于 Chirp 超宽带通信技术的研究与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2010: 7-13.
- [13] 尉宇. 线性调频和非线性调频信号的检测与参数估计 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2005: 6-14.
- [14] 王军梅, 钟洪声, 周国勇. 实现  $\pi/4$ -DQPSK 调制的一种快速算法 [J]. 电子科技大学学报, 2005 (6): 747-750.
- [15] B M Porter, H P Bucker. Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic fields [J]. The Journal of the Acoustical Society of America (S0001-4966), 1987, 82(10): 1349-1359.
- [16] P Xie. Underwater Acoustic Sensor Networks: Medium Access Control, Routing and Reliable Transfer [D]. Connecticut, USA: University of Connecticut, 2007.