

基于概率的自适应跳频通信系统中的跳频图案产生方法

杨晓文 申晓红 姜 喆 赵瑞琴 王海燕

(西北工业大学航海学院, 西安, 710072)

摘要: 为了提高水声跳频通信系统的可靠性和保密性, 提出了基于误码率映射和对伪随机数流的量化来产生跳频图案的方法, 该方法将各个跳频频点的误码率映射为一个概率密度函数, 由此得到量化向量, 根据伪随机数发生器产生的满足特定统计规律的伪随机数流和特定的量化准则, 对伪随机数流进行量化, 生成跳频图案, 进行跳频通信。构建基于概率的自适应跳频通信仿真系统, 仿真结果表明基于概率的自适应跳频通信相对于传统的跳频通信或自适应跳频通信误码率更低, 且保密性更强。

关键词: 水声通信; 自适应跳频; 概率; 伪随机数量化

中图分类号: TN914.41 文献标志码: A

Frequency Hopping Pattern Generation Method in Probabilities-Based Adaptive Frequency Hopping Communication System

Yang Xiaowen, Shen Xiaohong, Jiang Zhe, Zhao Ruiqin, Wang Haiyan

(School of Marine Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072, China)

Abstract: To improve the reliability and security of underwater acoustic (UWA) FH system, a method producing frequency hopping (FH) pattern is presented based on bit error rates (BER) mapping and the quantification of pseudo random numbers. BER of all FH channels are mapped into the probability density function (PDF), a quantitative vector can therefore be obtained. Furthermore, the pseudo random numbers, produced by the pseudo random number generator, generate FH patterns according to the specific statistical rule and quantitative criteria, which are used for FH communications. A specific adaptive FH communication simulation system based on probabilities is further established. Experimental simulation demonstrates that the proposed method has a lower BER compared with the traditional FH or adaptive FH. Moreover, it features better security performance.

Key words: underwater acoustic communications; adaptive frequency hopping; probability; quantification of pseudo random numbers

引 言

传统的自适应跳频通信技术的关键环节在于根据信道估计的结果, 对频率集中的频点进行“好”与

“坏”的划分,选择“好”的频点进行数据传输,“差”的频点不用,以达到避开频率集中被干扰的频点的目的^[1-3]。然而,信道的质量绝对不是一个“好”或“坏”就能反映出来的。传统的自适应跳频中,对于频率集中被选中的频点不加以区别的对待,也就是说,特别好的频点和相对较好的频点具有相同的权重,这显然是不合理的。由此人们提出了基于概率的自适应跳频方法^[4]。

基于概率的自适应跳频没有对跳频频点进行简单的“好”与“坏”的划分,但发送端需要知道每个跳频频点的误码率信息。在实际水声环境下,发送端准确地知道各个跳频频点的误码率是不可能的,只能对每个跳频频点单独传输数据(不进行跳频)时的误码率进行估计,依据估计的结果,遵循“好的频点多用,差的频点少用”的原则,给不同的跳频频点赋予了不同的权重(使用概率),为数据传输生成特定的跳频图案,系统在进行跳频频点的选择时更加合理^[4]。基于概率的自适应跳频与传统的方法相比,具有降低系统误码率,易于同步、易于加密的优点。

文献[4]给出了基于概率的自适应跳频通信的基本原理,但是没有给出具体实现方法。本文在前人已经取得的工作的基础上,提出了基于误码率映射和对伪随机数流的量化来产生跳频图案的方法,给出了基于概率的自适应跳频通信系统的实现框图,并且仿真验证了它的性能。

1 基于概率的自适应跳频通信系统

基于概率的自适应跳频通信系统实现的原理框图如图1,相比一般的跳频通信系统,其中大部分环节是一致的,增加的部分有(1)跳频频点误码率估计;(2)基于误码率的信道映射;(3)伪随机数流的量化等步骤。具体说明如下:

(1)跳频频点误码率估计:估计出各个跳频频点单独传输数据时的误码率。该步骤是实现基于概率的自适应跳频通信的基础,可以采用发送确定的已知序列来估计。

(2)基于误码率的信道映射:根据估计出的各个跳频频点的误码率,按照“好的频点多用,差的频点少用”的原则,设计基于误码率的映射函数,从而为每个跳频频点分配使用概率,在此基础上产生用于对伪随机数流进行量化的向量。基于误码率的信道映射的实现方法如下:

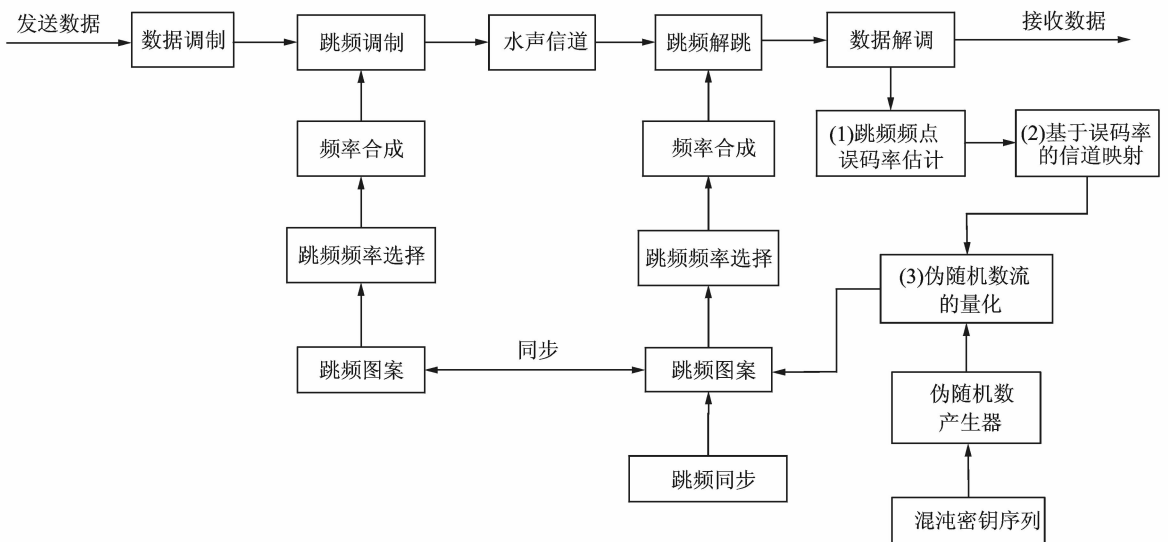


图1 基于概率的自适应跳频通信系统

Fig.1 Adaptive frequency hopping communication system based on probabilities

误码率映射的概率密度函数 $f_1^{[4]}$

$$f_1: Q(c_i) \rightarrow f_1(Q(c_i)) = \frac{(1 - Q(c_i))^\alpha}{\sum_{i=1}^M (1 - Q(c_i))^\alpha} \quad (1)$$

式中: $Q(c_i)$ 为第 i 个跳频频点的比特误码率; M 为跳频频点的个数; 参数 $\alpha (\alpha > 0)$ 为调整因子, α 越低, 每个信道使用的概率就越接近, α 越高, 信道质量的差异给信道使用概率带来的影响就越明显。

下界映射函数 $f_2^{[4]}$ 为

$$f_2: x \rightarrow f_2(x) = P_{\min} + x \cdot (1 - M \cdot P_{\min}) \quad (2)$$

式中: P_{\min} 为所有跳频频点使用概率的下限, f_2 函数是在 f_1 函数的基础上, 对其输出结果进行尺度变化, 目的是保证给每个跳频频点分配的使用概率大于使用概率的下限值。

上界映射函数 $f_3^{[4]}$ 为

$$f_3: x \rightarrow f_3(x) = P_{\max} - x \cdot (M \cdot P_{\max} - 1) \quad (3)$$

式中: P_{\max} 为所有跳频频点使用概率的上限, f_3 函数是对 f_2 函数得到的数据做最后的调整, 削减所有大于 P_{\max} 的概率值, 将超出 P_{\max} 多余的部分平均加到其他的概率值上, 目的是保证给每个跳频频点分配的使用概率小于使用概率的上限值。

整个映射函数的作用可表示为

$$f = f_1 \circ f_2 \circ f_3 \quad (4)$$

自此每个跳频频点都被分配了一个合适的使用概率, 完成了基于误码率的信道映射过程。

2 量化准则

基于误码率的信道映射的结果是为每个跳频频点分配一个合适的使用概率, 以下的工作是按照一定的量化准则, 对伪随机数发生器产生的伪随机数流进行量化, 生成具有一定概率分布的量化序列, 从而生成特定的跳频图案。本文提出基于概率的伪随机数流量化准则。

假设伪随机数流发生器产生 $(0, 1)$ 区间上均匀分布的伪随机数流, 系统跳频频点的个数记为 M , 第 i 个跳频频点(信道 c_i) 被分配的使用概率记为 p_i , 则对应的量化向量 v_q 可以表示为

$$v_q = (p_1, p_1 + p_2, \dots, \sum_{i=1}^{M-1} p_i, 1) \quad (5)$$

为了更进一步增强跳频系统的保密性, 本文选择混沌密钥序列作为特定的种子序列。跳频图案的同步可以归结为种子序列的同步, 实际中, 只要保证收发双方的种子序列同步, 跳频图案也就同步了。由此伪随机数流发生器产生了在 $(0, 1)$ 区间上均匀分布的伪随机数流, 利用量化向量 v_q , 依次对伪随机数流中的每一个数 N_i 按式(6)所示的量化准则进行量化

$$N_i \in \left(\sum_{k=1}^{j-1} p_k, \sum_{k=1}^j p_k \right) \Rightarrow Op_i = j \quad (6)$$

通过对伪随机数流的依次量化, 量化的结果就是相应的跳频频点的标号, 从而产生了用于传输数据的跳频图案。例如, 伪随机数流中的一个元素落到了 $(p_1 + p_2 + p_3, p_1 + p_2 + p_3 + p_4)$ 区间内, 量化的结果是选择第 4 个跳频频点进行数据的传输。

因为假设伪随机数流发生器产生的是 $(0, 1)$ 区间上均匀分布的伪随机流, 所以量化准则只要做各个跳频频点使用概率的加法运算就能得到相应的量化区间的端点, 从而得到量化区间的划分。如果产生的不是 $(0, 1)$ 区间上均匀分布的伪随机流, 例如高斯分布的伪随机数流, 为了产生一定的满足特定概率分布的跳频图案, 相应的量化区间的划分必须通过复杂的积分运算才能得出。

3 仿真及性能分析

仿真系统在如图 1 所示的系统框图的基础上建立, 发送数据时, 先产生跳频图案, 再经过数据调制

和跳频调制,在多径时延的信道中传输,接收端在同步的基础上进行基于 FFT 的解调,在不同的信噪比下经过多次仿真实验得到误码率性能曲线。为了评估所提出方法的性能,将本文方法的结果与传统混沌跳频系统和传统自适应跳频系统进行了对比。

3.1 仿真条件

对于多径信道,假设发送信号的波形为 $s(t)$,则接收信号的波形为

$$r(t) = \sum_{i=1}^6 A_i s(t - \tau_i) + n(t) \quad (7)$$

式中: A_i 和 τ_i 分别为第 i 条路径的加权振幅和时延, $n(t)$ 为各相同性的高斯白噪声。本文采用文献[5]给出的水声信道,则信道的单位冲击响应时域波形如图 2 所示,其频域波形如图 3 所示。由图 3 可知信道在 8 500 Hz 和 9 500 Hz 这两个跳频频点衰落比较严重。

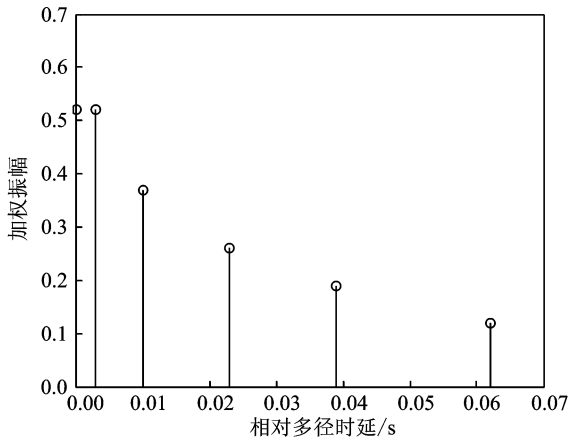


图 2 仿真信道的单位冲击响应

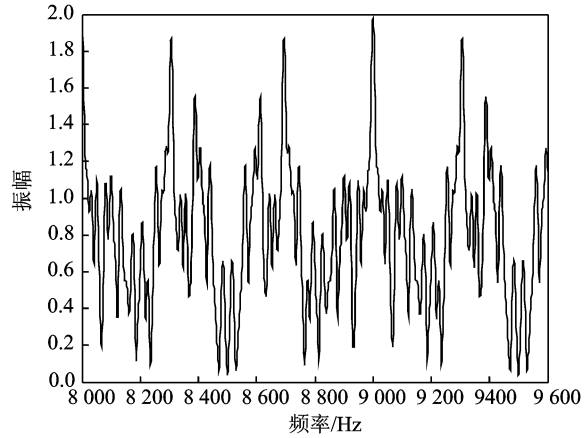


图 3 仿真信道的幅频响应

Fig. 2 Unit impulse response of simulation channel Fig. 3 Amplitude frequency response of simulation channel

系统的跳频频点间隔为 100 Hz,采用 2FSK 调制,每比特数据进行一次跳频,在 8 000~9 500 Hz 的频率范围内取 16 个跳频频点。接收端使用 FFT 对数据进行解调。仿真时假设跳频系统已实现同步。

3.2 传统混沌跳频与本文提出方法的性能对比

混沌信号是由初始状态唯一确定的有界确定性类随机信号,具有很强的保密性,在水声通信中采用的 Logistic 混沌序列是一种一维的离散混沌映射。Logistic 映射表达式为^[6]

$$x_{n+1} = ux_n(1 - x_n) \quad (8)$$

当迭代初值 $0 < x_0 < 1$, 参数 $3.569\ 946 < u \leq 4$ 时系统进入到混沌状态。

根据 Logistic 的性质及拓扑映射的知识,采用 cos 映射可以对 Logistic 序列进行均匀量化,按式(9)进行分区,序列落在各个子区间内的概率相等^[7,8]

$$E = \left\{ E_j = \left(\sin^2 \left(\frac{j\pi}{2q} \right), \sin^2 \left(\frac{(j+1)\pi}{2q} \right) \right) \right\} \quad j = 0, 1, \dots, q-1 \quad (9)$$

量化后的结果就用来产生跳频图案。

基于概率的自适应跳频中,取 $M=16, \alpha=10, P_{\min}=0.02, P_{\max}=0.2$,伪随机数产生器的初始状态设定为 3,仿真结果如图 4 所示。

3.3 传统自适应跳频与本文提出方法的性能对比

传统的自适应跳频和基于概率的自适应跳频都能做到跳频图案的产生根据信道的实际情况做出自

适应的调整,但是传统的自适应跳频为每个使用的跳频频点赋予相同的权重(使用概率)。取 $M=14$ (即在剔除两个可靠性最差的跳频频点的基础上进行数据传输), $\alpha=10$, $P_{\min}=0.02$, $P_{\max}=0.2$,伪随机数产生器的初始状态设定为3,仿真结果如图5所示。从仿真结果可以看出:

(1)在比特信噪比较小的范围内,噪声功率相对信号功率较大,每一个跳频频点的误码率都比较大,在这种情况下,基于概率的自适应跳频在跳频频点的选择方面不具有明显的优势,相比传统混沌跳频或传统自适应跳频可靠性相差不大。

(2)随着比特信噪比的逐渐增大,噪声功率相对信号功率逐渐变小,有些跳频频点的误码率相对于其它跳频频点变的很低,基于概率的自适应跳频遵循好的频点多用的原则,在跳频频点的选择方面更合理,因而在可靠性上体现出了明显的优势,表现在图像上就是在一定的比特信噪比范围内,基于概率的自适应跳频的误码率曲线相对于传统混沌跳频或传统自适应跳频的误码率曲线有非常明显的下降。

(3)随着比特信噪比的进一步增大,噪声功率相对信号功率已经很小,除了少数振幅衰落非常严重的跳频频点由于码间干扰使得误码率维持在一个较高的数值无法下降之外(这样的跳频频点就算完全不加噪声,也会有严重的误码,这是振幅急剧衰落和码间干扰综合作用的结果),绝大部分跳频频点的误码率已经非常小的接近于0,这种情况和第一种情况很类似,基于概率的自适应跳频在跳频频点的选择上不具有明显的优势。基于概率的自适应跳频和传统混沌跳频的误码率都维持在很低的水平,基于概率的自适应跳频在可靠性上具有微弱的优势,如图4所示。如果在剔除两个可靠性最差的跳频频点的基础上进行数据传输,即 $M=14$,其他条件不变,能够进一步降低系统的误码率,如图5所示,相同条件下基于概率的自适应跳频相对传统自适应跳频在可靠性上仍然具有一定的优势。

综上所述可以看出,对比非自适应的传统混沌跳频、传统自适应跳频,基于概率的自适应跳频在降低误码率性能上是最优的。

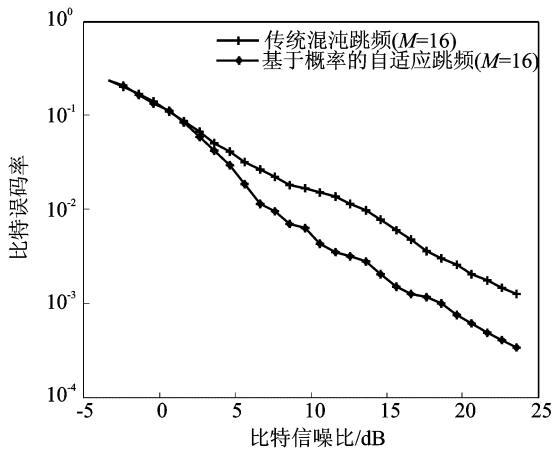


图4 传统混沌跳频和基于概率的自适应跳频的误码率对比

Fig. 4 BER comparison between traditional chaotic frequency hopping and adaptive frequency hopping based on probabilities

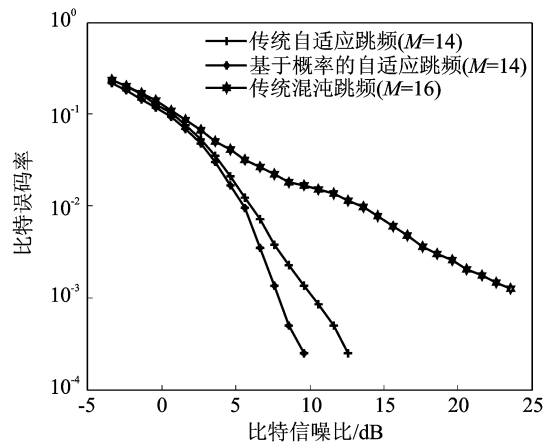


图5 传统自适应跳频和基于概率的自适应跳频的误码率对比

Fig. 5 BER comparison between traditional adaptive frequency hopping and adaptive frequency hopping based on probabilities

4 结束语

本文提出了基于误码率映射和对伪随机数流的量化来产生跳频图案的方法,该方法能产生满足一定概率分布的跳频图案,使基于概率的自适应跳频通信得以实现。基于概率的自适应跳频通信在跳频

频点的选择上比传统的方法更加合理,仿真结果也证明了它在可靠性上的优势。除此之外,基于伪随机数量化的自适应跳频通信系统具有易于同步、易于加密的优点,在实际中具有很好的应用价值。

参考文献:

- [1] 李一兵,谭俊锋,叶方,等. 自适应跳频通信系统信道质量评估方法研究[J]. 哈尔滨工程大学学报,2006,27(3):442-446.
Li Yibing, Tan Junfeng, Ye Fang, et al. Research of link quality analysis method used in adaptive frequency hopping communication system[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2006, 27(3): 442-446.
- [2] Yin Jingwei, Zhang Xiao, Sun Liqiang, et al. An application of the differential spread-spectrum technique in mobile underwater acoustic communication[J]. Science China Information Sciences, 2011, 54(10): 2190-2198.
- [3] Zander J, Malmgren G. Adaptive frequency hopping in HF communication[J]. IEE Proceedings, 1995, 142 (2): 99-105.
- [4] Stabellini L, Shi L, Rifai A A, et al. A new probabilistic approach for adaptive frequency hopping[C]//Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2009 IEEE 20th International Symposium on. Tokyo: IEEE, 2009: 2147-2151.
- [5] Stojanovic M. Underwater acoustic communications: Design considerations on the physical layer[C]//Wireless on Demand Network Systems and Services, Fifth Annual Conference, Garmisch-Partenkirchen. USA: IEEE, 2008: 1-10.
- [6] 陆清,林晓晖,李军,等. 一种改进的混沌跳频序列的设计方法[J]. 数据采集与处理, 2009, 25(1): 122-125.
Lu Qing, Lin Xiaohui, Li Jun, et al. Improved method for chaotic frequency hopping sequence[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2009, 25(1): 122-125.
- [7] Ling Cong, Sun Songgeng. Chaotic frequency hopping sequences[J]. IEEE Transactions on Communications, 1998, 46 (11): 1433-1437.
- [8] Heidari-Bateni G, McGillem C D. A chaotic direct-sequence spread-spectrum communication system [J]. IEEE Transactions on Communications, 1994,42(234): 1524-1527.

作者简介:



杨晓文(1989-),男,硕士研究生,研究方向:水声通信、通信信号处理,E-mail:yangxiaowen150@126.com。



申晓红(1965-),女,教授,研究方向:水声通信系统与组网、微弱信号检测与数字信号处理、传感器阵与声学探测系统、目标探测、识别与定位。



姜喆(1984-),男,讲师,研究方向:水声通信技术、阵列信号处理、数据融合。



赵瑞琴(1981-),女,副教授,研究方向:无线网络与通信、海洋水下声网络、水声通信技术及无线传感网络。



王海燕(1965-),男,教授,研究方向:现代信号检测与现代信息处理、水声信息感知、水下电子对抗与智能电子系统、水声通信与组网、目标识别与定位跟踪。

