

# 基于FPGA的LMS滤波器在水声信道均衡中的应用仿真

齐浩彬, 孙玉国\*

上海理工大学, 上海

收稿日期: 2022年10月23日; 录用日期: 2022年11月21日; 发布日期: 2022年11月28日

## 摘要

本文介绍了射线声学理论, 从理论方面分析水声信道模型, 并用Matlab脚本编程实现BELLHOP模型, 完成了水下声信道的建模, 模拟真实海洋环境对声波信号产生的噪声以及多径干扰, 以获取复杂环境背景下的水声信号。且利用FPGA编写RTL代码, 用硬件的方式实现了LMS自适应滤波器。最后在Modelsim仿真平台上验证设计的滤波器对水声信道均衡的效果, 结果显示LMS自适应滤波器能较好地消除信号中噪声以及多径干扰造成的影响, 为水声通信工程实现中的信道均衡问题提供了一种简便的解决方法。

## 关键词

水声信道仿真, LMS自适应滤波, BELLHOP模型, FPGA

# Application Simulation of LMS Filter Based on FPGA in Underwater Acoustic Channel Equalization

Haobin Qi, Yuguo Sun\*

University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Oct. 23<sup>rd</sup>, 2022; accepted: Nov. 21<sup>st</sup>, 2022; published: Nov. 28<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

This paper introduces the theory of ray acoustics, analyzes the underwater acoustic channel model from the theoretical perspective, realizes the BELLHOP model with Matlab script programming, completes the underwater acoustic channel modeling, simulates the noise and multipath interference.

\*通讯作者。

rence generated by the real ocean environment to acoustic signals, in order to obtain underwater acoustic signals under the complex environmental background. The RTL code is written by FPGA, and the LMS adaptive filter is implemented by hardware. Finally, the effect of the designed filter on underwater acoustic channel equalization is verified on the Modelsim simulation platform. The results show that the LMS adaptive filter can better eliminate the influence caused by noise and multipath interference in the signal, which provides a simple solution to the channel equalization problem in underwater acoustic communication engineering.

## Keywords

Underwater Acoustic Channel Simulation, LMS Adaptive Filtering, BELLHOP Model, FPGA

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



## 1. 引言

水声信道是目前难度最大的无线通信信道之一[1], 水下声波较低的传播速度以及水下复杂多变的环境都会对水声信号造成干扰。而浅海信道中强烈的多径效应更是给水声通信的工程实践带来了巨大挑战, 为了对抗多径效应的干扰, 通常需要对信道进行自适应均衡。信道均衡的目的是对接收信号进行补偿, 抑制多径传输带来的码间干扰, 从而尽可能地恢复发送信号。均衡器的抽头系数通常采用 LMS 或 RLS 算法进行调节, 其中 RLS 算法性能优于前者, 但与之对应的是巨大的计算量, 而 LMS 算法性能虽比不上 RLS 算法, 但其计算量小, 且易于工程实现, 因此需根据实际情况进行选择。

本文将在 FPGA 上搭建基于 LMS 算法的自适应滤波器, 并利用 BELLHOP 模型对水声信道进行建模, 模拟真实海况对水声信号的影响。最后将经过水声信道模型的信号作为均衡器的输入, 分析 LMS 自适应滤波器在水声信道均衡中的性能。

## 2. 水声信道建模

通常可将水声信道看作一个线性、随机时变的滤波器, 该滤波器的冲击响应为  $h(p, t, f)$ , 其中  $p$  为位置参数,  $t$  为时间,  $f$  为频率。因此, 接收信号可表示为发送信号与信道响应的卷积[2], 即:

$$r(p, t, f) = s(p, t, f) * h(p, t, f) = \int_{-\infty}^t s(p, \tau, f) h(p, t - \tau, f) d\tau \quad (1)$$

要获取水声信道的具体参数, 需要从声场模型来分析, 一般常用的声场模型有射线理论模型、简正波模型、多途扩展模型、快速场模型、抛物线方程模型等五种[3]。目前水声领域应用最广泛的声学模型有简正波模型和射线理论模型, 其中简正波模型更为精确, 但由于其理论与计算过于繁琐, 相比之下射线理论模型物理意义直观且易于计算, 故在工程应用中多用射线理论模型。

在高频情况下, 可将声波的传输过程看作一束拥有  $N$  条与等相位面垂直的射线形成的传播, 高频条件指的是[2]

$$f > 10 \times \frac{c}{z} \quad (2)$$

其中  $f$  为声波频率,  $c$  为水下声速,  $z$  为声源深度。本文在仿真过程中选取的声源深度为 50 m, 在此深度下, 声速约为 1500 m/s, 由此可计算出下限频率约为 300 Hz, 而选用的载波频率为 35 kHz 和 30 kHz, 满足该高频条件, 故可基于射线理论模型对水声信道进行建模。

## 2.1. 射线声学理论

在理想均匀介质中, 声波的波动方程为[4]:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (3)$$

其中  $\nabla^2$  为拉普拉斯算子,  $p$  为势函数,  $c$  为声速。在稳态声场中, 波动方程可简化为与时间无关的形式:

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (4)$$

式(4)即为亥姆霍兹(Helmholtz)方程, 其中  $k = \omega/c = 2\pi/\lambda$  是波数,  $\lambda$  为波长,  $\omega$  为声源角频率, 射线声学理论是一定条件下对此方程的近似求解。

射线模型通过两个方程来确定声场的路径和强度, 对于简谐过程的波动方程:

$$\nabla^2 p + k_0^2 n^2(x, y, z) p = 0 \quad (5)$$

其中  $k_0$  为参考点波数,  $n$  为与环境有关的折射率。假设其解得形式为:

$$p = A(x, y, z) e^{jk_0 S(x, y, z)} \quad (6)$$

其中  $A$  为声压幅度函数,  $S$  为相位函数。将式(6)代入式(5)可得

$$(\nabla S)^2 - \frac{\nabla^2 A}{A k_0} - n^2 = 0 \quad (7)$$

$$(\nabla S)^2 + \frac{2(\nabla S \cdot \nabla A)}{A} = 0 \quad (8)$$

当满足  $\frac{\nabla^2 A}{A k_0} \ll n^2$ , 即在一个波长内声速变化不大的条件时, 式(7)中第二项可以省略, 如此便得到:

$$(\nabla S)^2 = n^2 \quad (9)$$

式(9)称为程函方程, 确定了声线的方向, 声线方向定义为等相面  $S(x, y, z)$  的法线方向。

对于式(8), 由于

$$\nabla \cdot (A^2 \nabla S) = 2A \nabla A \cdot \nabla S + A^2 \nabla^2 S \quad (10)$$

故

$$\nabla \cdot (A^2 \nabla S) = 0 \quad (11)$$

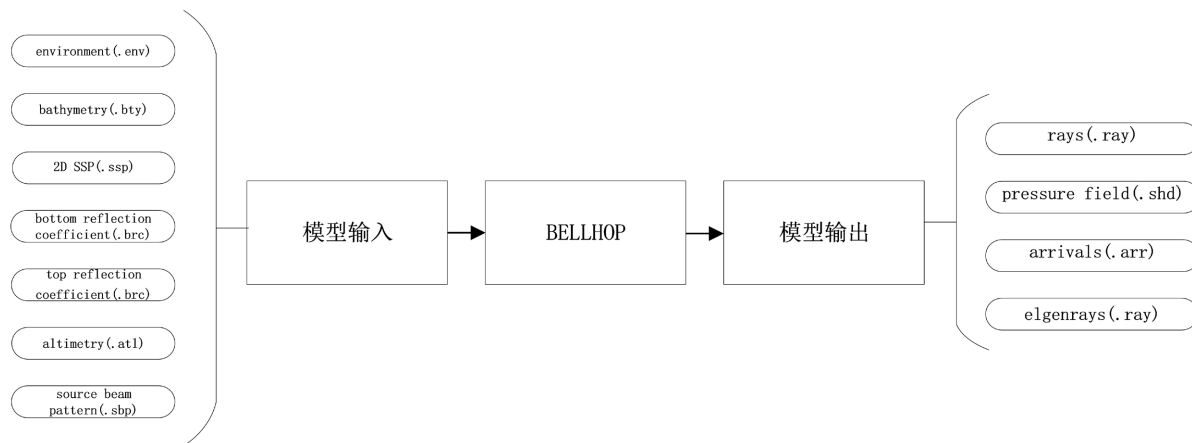
式(11)称为强度方程, 由程函方程和强度方程即可求解出波动方程的近似解, 如此便可近似求解出水下声场的各项参数。

## 2.2. 基于 BELLHOP 的水声信道建模方法

由上文可知程函方程仅在  $\frac{\nabla^2 A}{A k_0} \ll n^2$  时成立, 即在一个波长内声速变化不大。显然声波频率越高越容易满足这一条件, 但为了使所得的水声信道模型同样适用低频情况, 则需采用新的建模方法。

BELLHOP 是利用射线和高斯波束跟踪预测海洋环境中声压场的模型, 它通过高斯波束追踪法, 求解出水平非均匀的水声环境中的声场。高斯波束射线追踪法的核心思想是将水下声场中的每一条声线和高斯强度的分布进行联系起来, 这些声线是高斯声束的中心线, 这些声线不仅能平缓地过度到水下声影区, 也能平滑地穿过水下声场的焦散线, 如此得到的水声信道模型更准确, 更符合实际情况[5]。

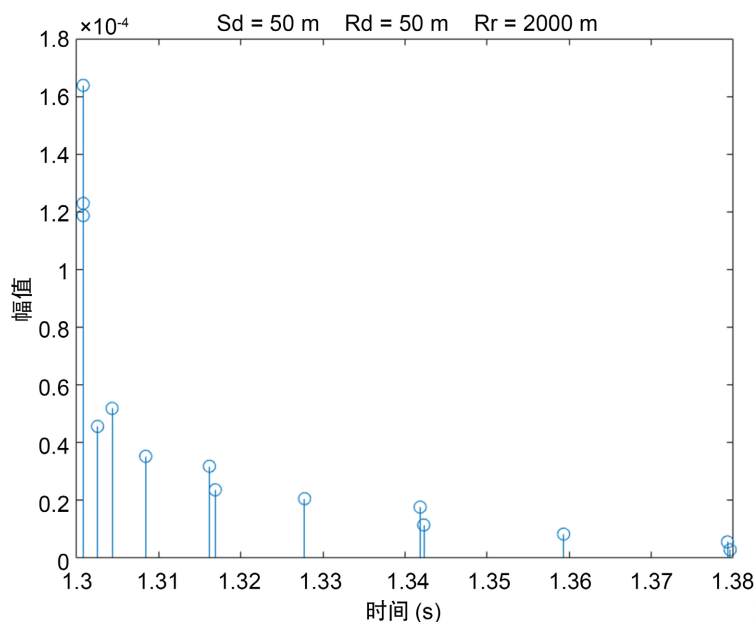
BELLHOP 整体结构如图 1 所示:



**Figure 1.** Overall structure of BELLHOP  
**图 1.** BELLHOP 整体结构图

BELLHOP [6]模型的输入文件需要能够描述发送端和接收端的环境和几何特性，其输入文件包括环境文件(文件后缀为.env)、水深文件(文件后缀为.bty)、声速分布剖面分布文件(文件后缀为.ssp)以及海洋底部反射系数文件(文件后缀为.brc)。通常情况下只需输入一个环境文件，该文件包含了声速剖面以及相关的海底信息，同时也可添加水深文件来确定不同位置的水深。当海洋中的声速处在一个变化的范围中时，可通过添加一个声音速度剖面分布文件将声速列成规范性的列表。如果需要指定一个通过任意底部反射系数来表征的底部，那么必须提供一个海洋底部反射系数文件。

BELLHOP 模型的输出文件包括用于描述声线和本征声线的声线文件(文件后缀为.ray，通常用来获得信号在信道中传播过程中的能量感应)、用于描述声线传播损失的传播损失文件(文件后缀为.shd)以及用于描述声线到达的时间 - 幅度序列参数的到达文件(文件后缀为.arr)。该文件中的信息可用于描述信道的冲击响应，将其与发送端信号的时间序列进行卷积，即可得到接收端信号的时间序列。



**Figure 2.** Channel response  
**图 2.** 信道响应

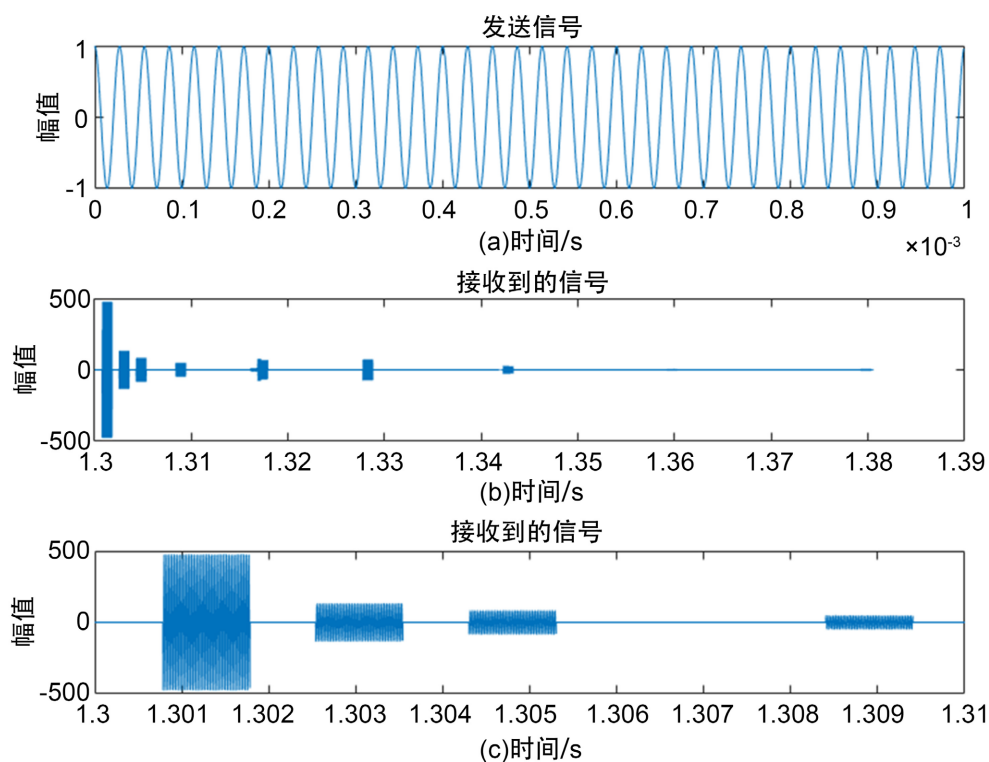


Figure 3. Time series of sender and receiver  
图3. 发送端与接收端时间序列

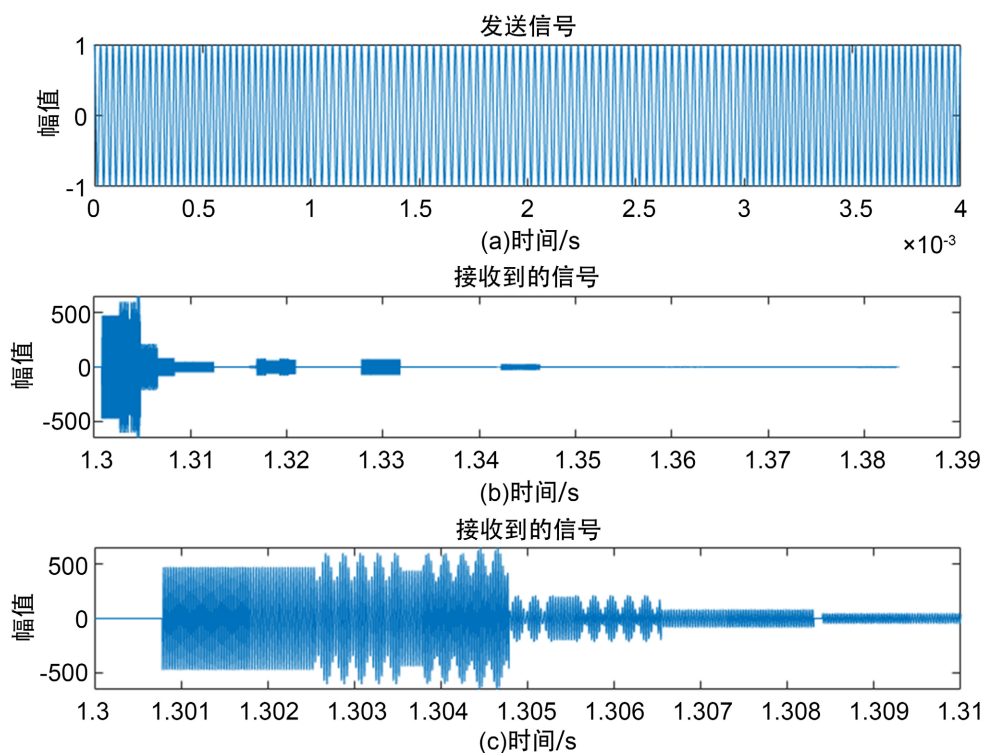


Figure 4. Diagram of inter symbol interference  
图4. 码间串扰示意图

本文以 Matlab 作为 BELLHOP 的运行平台, BELLHOP 模型以环境文件作为唯一输入文件。仿真的通信环境为: 水深 100 m, 发送机与接收机的深度均为 50 m, 二者直线距离 2 km, 发送信号频率为 35 kHz。图 2 为上述模拟条件下通过 BELLHOP 模型计算出的多径信道响应, 图 3 为发送端与接收端信号的时间序列。

图 2 中横坐标最小值为 1.3, 是因为发送机与接收机之间距离为 2000 m, 水下声速约为 1500 m/s, 故接收端在经过 1.33 s 时延之后才能接收到信号。图 3(a)为发送的原始信号, 图 3(b)、图 3(c)均为接收到的信号, 其中图 3(c)为图 3(b)放大所得。从图 3(b)、图 3(c)可看出, 发送的信号经过不同路径传播, 在接收端可接收到若干个不同时延的信号, 此为多径效应。若连续发送多个码元, 多径效应会造成码间串扰, 如图 4 所示。

图 4(a)为发送的原始信号, 图 4(b)、图 4(c)均为接收到的信号, 从图 4(c)可看出码间串扰使信号发生了畸变。采用自适应滤波器对信道进行均衡可有效解决这一问题。LMS 算法作为主流的均衡算法, 具有结构简单、算法复杂度低、便于硬件实现等优点, 故本文采用 LMS 算法对信道进行均衡。

### 3. LMS 自适应滤波器的 FPGA 实现

LMS 自适应滤波器由 FIR 滤波器和 LMS 自适应算法两部分组成, 且 FIR 滤波器的各抽头系数由 LMS 算法实时调整, 最终使 FIR 滤波器的输出信号收敛。LMS 自适应滤波器结构如图 5 所示。

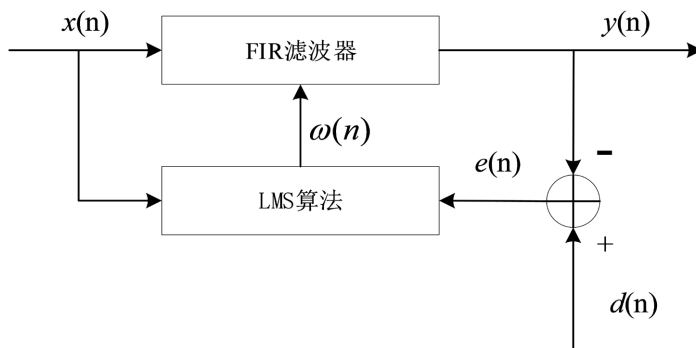


Figure 5. LMS adaptive filter structure diagram  
图 5. LMS 自适应滤波器结构图

图中  $x(n)$  为待处理信号序列,  $y(n)$  为输出信号,  $d(n)$  为期望信号,  $\omega(n)$  为滤波器系数, 下同。

FIR 滤波器的本质就是一个标准的乘加运算集, 因此分布式算法[]很适合用于 FIR 滤波器的设计。分布式算法的限制条件之一是每个乘法运算中必须有一个乘数为常数, 一个乘数为常数的乘法可采用查找表来实现, 而 FPGA 正是基于查找表构建的, 因此很适合在 FPGA 上用分布式算法实现 FIR 滤波器, 如此既可节省硬件资源, 又能提高运算速度。

LMS 算法基于最小均方误差准则, 在梯度法的基础上, 通过改进均方误差梯度的估计值计算方法, 取单个误差样本平方的梯度作为均方误差的估计值[7]。并将维纳 - 霍夫方程转换为一组递推公式, 即

$$\begin{aligned} y(n) &= \omega^T(n)x(n) \\ \varepsilon(n) &= d(n) - y(n) \\ \omega(n+1) &= \omega(n) + 2\mu\varepsilon(n)x(n) \end{aligned} \tag{12}$$

其中  $\varepsilon(n)$  为误差信号,  $\mu$  为加权向量更新时的步长因子。该递推公式仅包含加减法和乘法运算, 巧妙地避开了原来的矩阵运算, 从而更有利于在 FPGA 上实现。LMS 自适应滤波器的一般实现结构如图 6 所示

[7], 图中虚线框内为 FIR 滤波器模块, 其余部分为 LMS 权值更新模块。

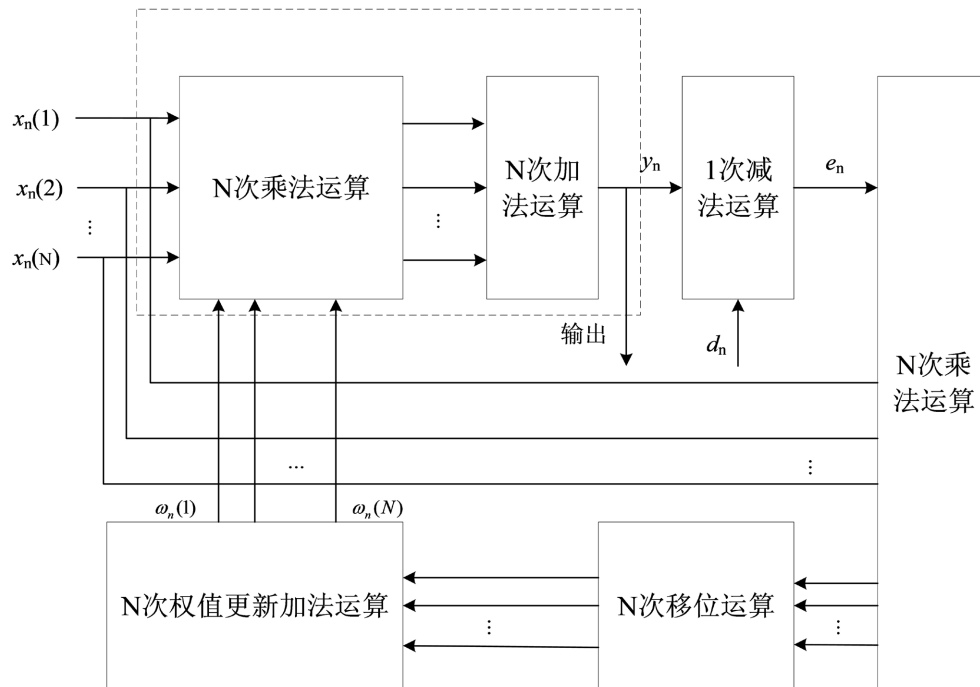


Figure 6. Implementation structure of LMS adaptive filter

图 6. LMS 自适应滤波器的实现结构

从图 6 可看出, 若所有计算均以串行方式进行, 需要进行  $2N$  次乘法运算、 $2N+1$  次加减法运算、以及  $N$  次移位计算, 这样只需调用 2 个乘法器、3 个加减法器和 1 个寄存器, 能有效地节省硬件资源。但 LMS 算法的所有运算需要在一个数据周期内完成, 当采样输入数据速率较高或权向量位数较多时, 会因为权值更新过慢而影响滤波性能。同样, 也可采用并行运算的方式实现图 6 所示结构, 在这种情况下, 完成一次权值更新只需进行 2 次乘法、3 次加减法和 1 次移位运算, 相比串行结构大大降低了一次权值更新所需的顺序计算量, 但需要的硬件资源变成了  $2N$  个乘法器、 $2N+1$  个加减法器和  $N$  个寄存器。

LMS 算法虽然只包括加减法以及乘法运算, 但乘法器资源在 FPGA 中数量有限, 且乘法运算速度受限, 因此提出了针对硬件实现的简化算法, 其中包括符号 LMS 算法和符号化回归 LMS 算法[8]。符号 LMS 算法将式(12)中的  $\varepsilon(n)$  用其符号代替, 得到的递推关系为:

$$\omega(n+1) = \omega(n) + 2\mu x(n) \text{sign}(\varepsilon(n)) \quad (13)$$

符号化回归 LMS 算法将式(12)中的  $x(n)$  用其符号代替, 得到的递推关系为:

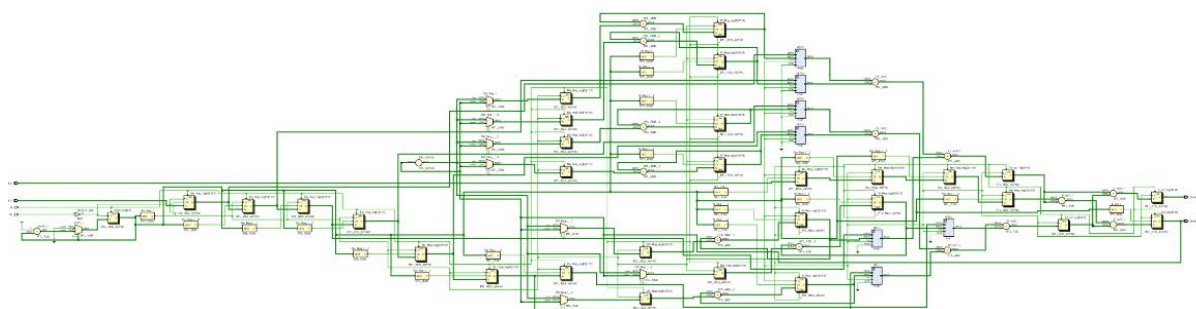
$$\omega(n+1) = \omega(n) + 2\mu \varepsilon(n) \text{sign}(x(n)) \quad (14)$$

同时, 将步长因子  $\mu$  取值为 2 的负整数次幂, 这样在更新滤波器系数的计算过程中不再需要乘法运算, 能够减少  $N$  次乘法运算, 提高 LMS 算法的运算速度。但是以上两种算法性能随机性较大, 在工程实践中需要先对其进行仿真, 经过比较之后选取性能较好的一个。

对两种简化算法进行 Matlab 仿真之后, 选用的简化算法为符号化回归 LMS 算法, 步长因子  $\mu$  取 1/128, 输入与输出数据长度均为 16 比特, 滤波器抽头数为 8。结合上文的分析可知, FPGA 以串行方式实现 LMS 算法需要进行的运算步骤为:

- 步骤一: 计算  $y(n)$ , 需进行一次 16 比特\*16 比特的乘法运算和 8 个 32 比特数据的加法运算;
- 步骤二: 计算  $e(n)$ , 需进行一次减法运算;
- 步骤三: 计算权值更新( $dw$ ), 需进行一次判断与取反操作;
- 步骤四: 更新滤波器抽头系数, 需进行一次加法运算。

在分配各运算步骤所需时钟周期时, 基本原则是使各步骤的运算尽可能相近, 因此本文各时钟周期的运算量分配方案为: 步骤一中乘法运算使用乘法器 IP 核实现, 流水线设置为 2 级, 占用两个时钟周期, 8 个 32 bit 的加法运算分为 2 次 4 个 32 bit 并行加法及 1 个 32 bit 加法运算, 其中 4 个 32 bit 加法运算占用一个时钟周期, 1 个 32 bit 加法运算与步骤二在同一时钟周期内完成, 占用 1 个时钟周期, 步骤三和步骤四各占用一个时钟周期。综上, 完成 LMS 算法的一次迭代需占用 6 个时钟周期, 因此, FPGA 系统时钟频率应为数据抽样频率的 6 倍。最终在 FPGA 上实现的 LMS 自适应滤波器原理图如图 7 所示, 表 1 展示了该滤波器消耗的硬件资源。



**Figure 7.** RTL schematic diagram of LMS adaptive filter  
**图 7.** LMS 自适应滤波器 RTL 原理图

**Table 1.** Hardware resources consumed by LMS adaptive filter based on FPGA  
**表 1.** FPGA 实现 LMS 自适应滤波器消耗的硬件资源

Resource	Estimation	Available	Utilization %
LUT	398	3750	10.61
LUTRAM	16	2400	0.67
FF	468	7500	6.24
IO	66	100	66.00
BUFG	1	16	6.25

#### 4. LMS 自适应滤波器性能分析

本文仿真所采用的水声通信系统模型为: 对信号进行 FSK 调制, 调制信号经过 BELLHOP 水声信道模型之后得到受干扰的接收端信号, 再利用 Modelsim 对 LMS 均衡器模块进行功能仿真, 得到滤波之后的信号。

图 8 为信号比对示意图, a 为发送的调制信号, b 为经过水声信道后接收端信号, c 为经过均衡之后的信号, 由于系统采用 FSK 调制方式, 信号的幅值对系统的影响很小, 故图 a, b, c 中的信号为归一化处理后的信号波形, 不代表真实幅值。图 9 为未经均衡信号的幅频特性曲线, 图 10 为均衡后信号幅频特性曲线。同样, 图 9 和图 10 中的幅频特性曲线主要展示不同频率分量信号幅值的相对关系。可看出本文设计的 LMS 自适应滤波器能够较好地消除水声信号中的噪声并恢复出原始信号。



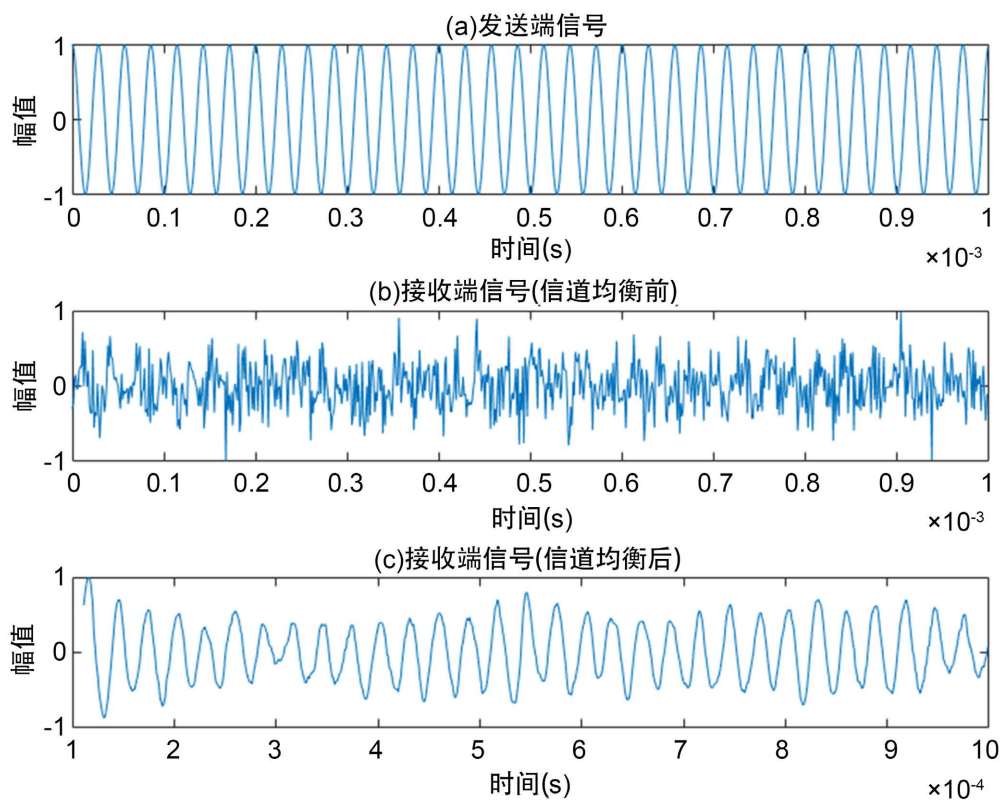


Figure 8. Signal contrast diagram  
图 8. 信号对比图

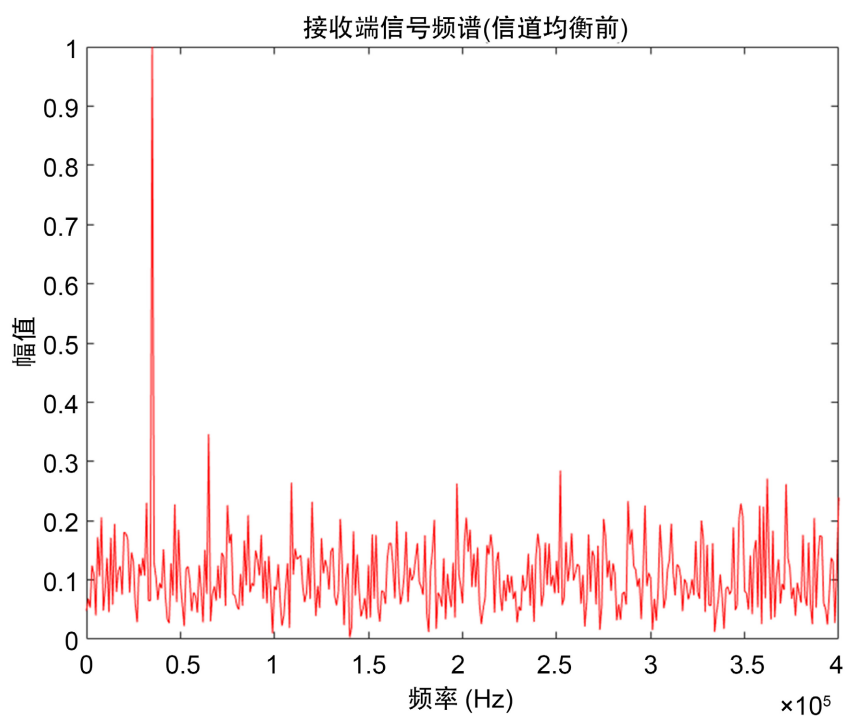


Figure 9. Amplitude-frequency characteristic curve of received signal  
图 9. 接收信号幅频特性曲线

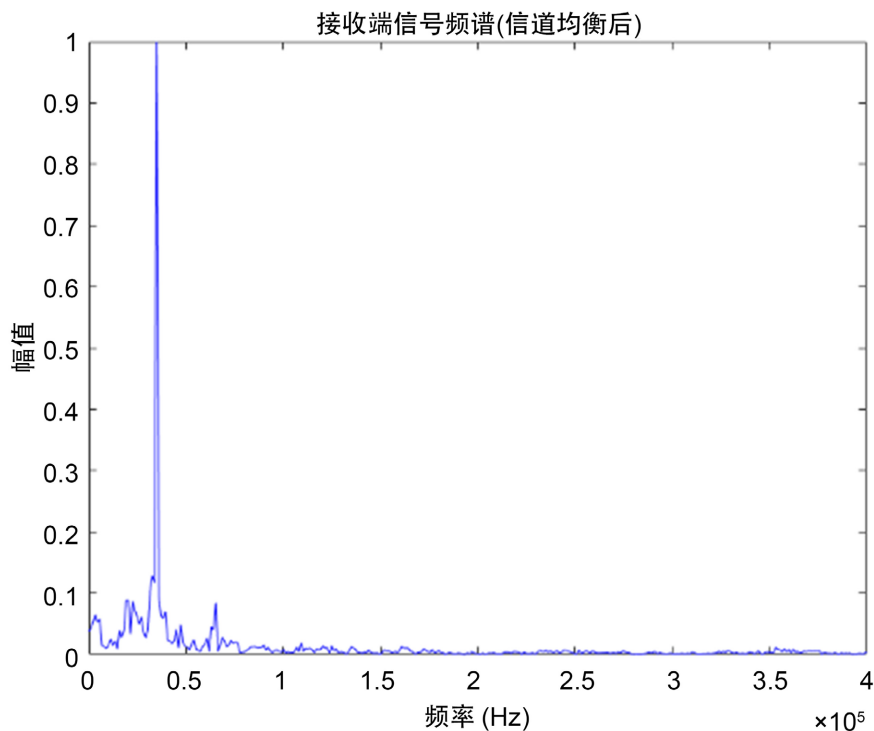


Figure 10. Signal amplitude-frequency characteristic curve after filtering  
图 10. 滤波后信号幅频特性曲线

## 5. 总结

本文从理论层面对水声信道进行分析,在 Matlab 平台利用 BELLHOP 模型对水声信道进行建模仿真,并在 FPGA 平台上实现了 LMS 自适应滤波器。将 BELLHOP 模型的输出信号作为滤波器的输入在 Modelsim 中进行仿真,对比滤波前后信号的频谱图可得,本文设计的自适应滤波器能够较好地消除噪声信号与多径效应对信号造成的干扰,对水声信道能够起到较好的均衡作用。

## 参考文献

- [1] 许肖梅. 水声通信与水声网络的发展与应用[J]. 声学技术, 2009, 28(6): 811-816.
- [2] 王炜. 水声信道的多普勒处理及分集方法研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [3] Etter, P.C. (2018) Underwater Acoustic Modeling and Simulation, Fifth Edition. Taylor and Francis, CRC Press, Boca Raton.
- [4] 欧晓丽. 水声信道建模及其仿真平台的实现[D]: [硕士学位论文]. 厦门: 厦门大学, 2007.
- [5] 汪思琪. 基于 Bellhop 模型的水下声场仿真系统设计与实现[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [6] Morozs, N., Gorma, W., Henson, B.T., *et al.* (2020) Channel Modeling for Underwater Acoustic Network Simulation. IEEE Access. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.11958852.v1>
- [7] 杜勇. 数字滤波器的 MATLAB 与 FPGA 实现: Altera/Verilog 版[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- [8] 贝赫鲁兹·法尔航·保罗耶尼. 自适应滤波器原理及 Matlab 仿真应用(原书第 2 版) [M]. 韩芳明, 译. 北京: 机械工业出版社, 2018: 96-97.