

基于 GNURadio 的 CMA 盲均衡器和锁相环组合设计与实现

李晓光, 潘克刚

(中国人民解放军陆军工程大学 通信工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 在分析 Bussgang 类恒模算法 (Constant Modulus Algorithm, CMA) 盲均衡基础上, 使用改进型 CMA 结合二阶锁相环 (PLL) 的盲均衡方法, 实现对 MQAM ($M=4, 16, 64$) 和 MPSK ($M=2, 4, 8$) 信号经过高斯噪声信道后发生的频率偏移和相位偏移的消除。组建了基于 GNURadio 和 USRP 软件无线电平台的 CMA + PLL 盲均衡处理模块。通过对 MQAM 和 MPSK 信号的测试, 模块在噪声影响下对信号频率和相位偏移依然有良好的纠正性能, 为使用软件无线电平台实时接收处理信号做好模块化验证。

关键词: 盲均衡常模算法; 二阶锁相环; GNURadio; USRP

中图分类号: TN919.3+4

文献标识码: A

DOI: 10.19358/j.issn.2096-5133.2018.07.016

引用格式: 李晓光, 潘克刚. 基于 GNURadio 的 CMA 盲均衡器和锁相环组合设计与实现 [J]. 信息技术与网络安全, 2018, 37(7): 67-70.

Design and implementation of CMA blind equalizer and PLL based on GNURadio

Li Xiaoguang, Pan Kegang

(School of Communication Engineering, The Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

Abstract: This paper is based on the analysis of Bussgang class blind equalization constant modulus algorithm (CMA). The blind equalization method based on the improved CMA and second-order phase-locked loop (PLL) is used to realize the optimization of MQAM ($M=4, 16, 64$) and MPSK ($M=2, 4, 8$), and to eliminate the distortion caused by the frequency offset and phase offset after the Gaussian noise channel. The CMA with PLL blind equalization processing module based on GNURadio and USRP software radio platform was established. Through testing the MQAM and MPSK signals, the module still has good performance in correcting the signal frequency and phase shift under the influence of noise. It is a modular verification for using the software radio platform to receive and process the real time signal.

Key words: blind equalization CMA; second-order phase-locked loop; GNURadio; USRP

0 引言

在通信系统中不理想的信道会对信号造成畸变, 其中非常普遍的畸变就是信道间干扰和码间干扰, 会使信号的频率发生频移和相位发生偏转, 降低数据传输的可靠性。为此, 常在接收端采用适当补偿的方式解决畸变问题。Bussgang 类盲均衡算法是以一种迭代方式进行盲均衡, 缺点是算法收敛时间长, 收敛后稳态剩余误差大^[1]。Godard 最早提出恒模算法 (Constant Modulus Algorithm, CMA), 它是 Bussgang 类盲均衡算法中最常用的一种^[2-3]。郭晓宇、赵宝峰等对恒模盲均衡算法进行了改进^[4-5]。童本锋设计了基于锁相环的 CMA 盲均衡器^[6], 解决了信号幅度变化和相位偏移补偿的问题。改进型 CMA 盲均衡器可以对信号幅度做均衡, 其性能优于常规 CMA, 二阶 PLL 可以对频偏和相位旋转进行补偿, 其性能优于一阶锁相环, 而两者结合可以提高收敛速度, 减少稳态误差, 可以用于实时信号的畸变处理。联合使用 GNURadio 和 USRP (Universal Software Radio Peripheral, 通用软件无线电设备) 的软件

无线电是一种开放的可重新编程的无线电通信系统^[7], 现在已经普遍利用该系统进行仿真实验和工程项目开发。使用 C++ 和 Python 语言编写通信模块, 通过 GNURadio 软件结合 USRP 硬件可以设计所需的通信系统。因此, 深入研究基于软件无线电平台的 CMA 盲均衡器和 PLL 组合的信号处理系统具有重要的意义和使用价值。

1 盲均衡器原理和组合设计

1.1 盲均衡的原理

盲均衡器是一种不需要训练序列就可以完成信道的均衡自适应技术, 原理如图 1 所示。

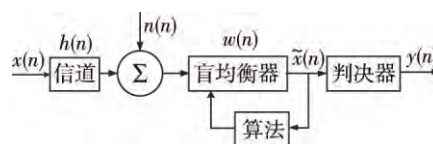


图1 盲均衡系统

输入序列 $x(n)$ 假设为独立同分布序列, 通过一未知时变离散时间传输信道 $h(n)$, 考虑加性信道噪声

$n(n)$ 得到均衡器接收序列 $y(n)$:

$$y(n) = h(n) * x(n) + n(n) = \sum_i h(i) x(n-i) + n(n) \quad (1)$$

可知, $y(n)$ 是由 $x(n)$ 和 $h(n)$ 卷积而成, 要想从 $y(n)$ 中获得 $x(n)$ 就需要对 $y(n)$ 进行反卷积或解卷积运算。

1.2 Bussgang 类盲均衡算法

Bussgang 盲均衡器原理图如图 2 所示。Bussgang 类盲均衡算法有两个公式^[2], 式(2)为均衡器输出, 式(3)为抽头系数迭代。

$$x(n) = \sum_{i=-L}^L w_i(n) y(n-i) \quad (2)$$

$$W(n+1) = W(n) - 2\mu e(n) Y^*(n) \quad (3)$$

均衡器长度为 $2L+1$, $e(n) = \tilde{x}(n) - g(\tilde{x}(n))$ μ 为迭代步长因子。

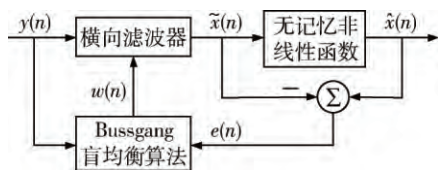


图2 Bussgang 盲均衡器的原理图

1.3 恒模算法

Godard 提出的 CMA 是最常用的一种 Bussgang 类盲均衡算法^[3]。表 1 所示为恒模算法公式列表。

表 1 恒模算法公式

运算	等式
均衡器	$\tilde{x}(n) = \sum_{k=-L}^L w_k^*(n-1) y(n-k)$
误差	$e(n) = \tilde{x}(n) [R_2 - \tilde{x}(n) ^2]$
更新	$w(n) = w(n-1) + \mu y(n) e^*(n)$
常数	$R_2 = \frac{E\{ x(n) ^4\}}{E\{ x(n) ^2\}}$

1.4 恒模算法和锁相环组合

因为改进型 CMA 可以均衡因信道引起的信号幅度, 而二阶 PLL 纠正信号的频偏和相偏, 因此改进型 CMA 和二阶 PLL 相结合的方法可以减小稳态均方误差和处理信道引起的畸变, 既能加快收敛速度, 又能纠正频率误差和相位误差。图 3 所示为两者结合信号处理原理图。

2 仿真实现

基于原理图生成 QAM 信号, 调制频偏 100 Hz 相位偏移 10° , 经 $\text{SNR} = 10 \text{ dB}$

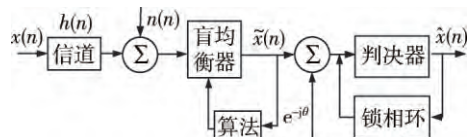


图3 CMA 盲均衡和锁相环信号处理原理图

高斯信道, 监测信号星座图。

图 4 星座图分别是: (a) 为原始 4-QAM 基带信号, (b) 为信号经过调制通过加性噪声高斯信道后有频偏相偏信号, (c) 为经过改进型 CMA 处理后的信号, (d) 为经过改进型 CMA 和二阶 PLL 处理后的信号。通过分阶段星座图显示, 经过改进型 CMA 处理后幅度均衡效果明显, 再经过二阶 PLL 处理后信号解调星座图收敛较好。

图 5 信号未经过 CMA 处理, 通过频响时间可见信号趋于稳定时间明显增加, 相位趋于稳定时间明显增加, 相位偏移起伏也明显增大, 尤其是处理后信号解调星座图收敛不好, 误码率高。而图 6 是信号经过改进型 CMA 和二阶 PLL 处理后的情况, 可见总体效果较好。

综合上面仿真情况来看, 改进型 CMA 和二阶 PLL 的组合对信号幅度、频率和相位都有较好的均衡和纠正, 性能较好。

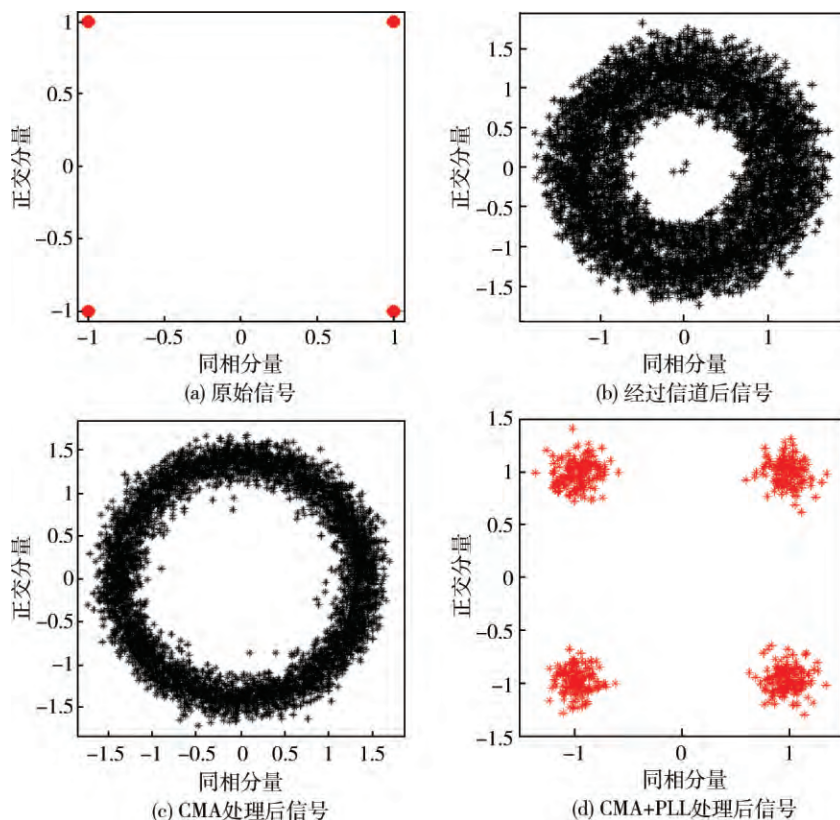


图4 仿真各阶段信号星座图

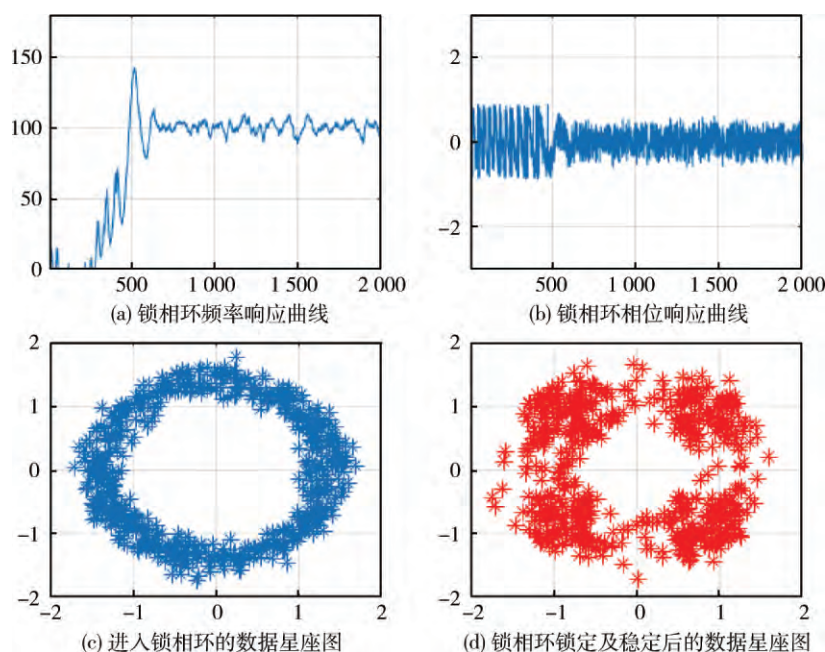


图5 未经 CMA 处理的信号图

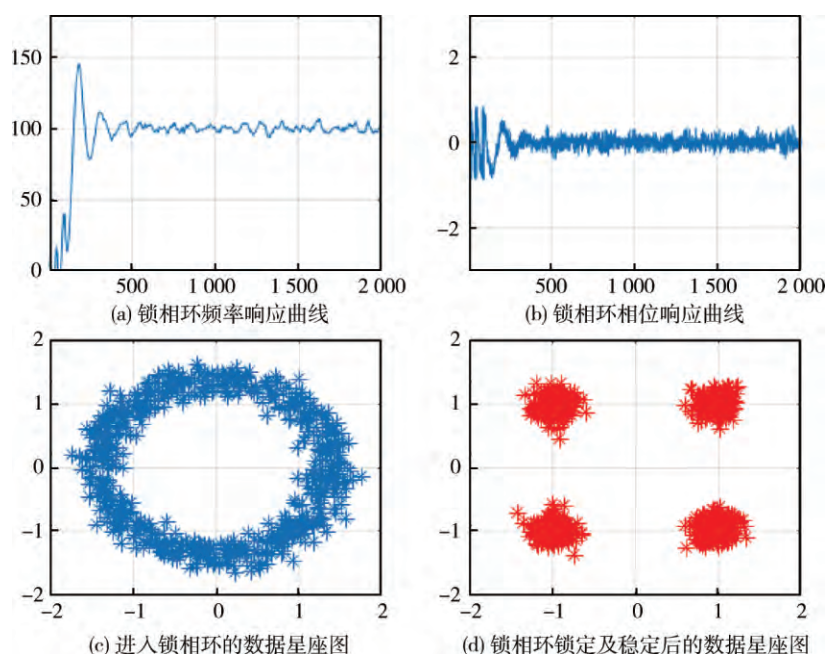


图6 CMA + PLL 处理的信号图

3 软件无线电平台实现

3.1 GNURadio 和 USRP 软件无线电平台

本文的重点在于对 GNURadio 和 USRP 软件无线电平台的研究,并在其上实现 CMA + PLL 组合对信号消除信道畸变。GNURadio 软件部分主要基于 Linux 操作系统,通信系统模型由 C++ 和 Python 语言编程构成, C++ 语言用来编写各种信号处理模块,这些信号处理模块在 GNURadio 中被称“block”; Python 用来连接各个 block 使之成为一个脚本文件,从而实现通信系统的某些功能,而这个脚本文件被称为“flow graph”。USRP

是硬件部分,它的作用为收发射频信号并将其转换为基带信号连接 PC^[8]。

GNURadio 和 USRP 软件无线电平台的软件部分是一个开源的项目,硬件部分的价格也不是很高,技术要求较低^[9]。

3.2 模块化实现

使用 GNURadio 软件设计信号处理模块,用 USRP 硬件发射和接收。发射机(图 7):随机信号生成模块生成随机二进制数据,调制模块生成 MQAM ($M=4, 16, 64$) 基带信号或者 MPSK ($M=2, 4, 8$) (灰色模块)基带信号,两个模块可选,发射 USRP 设置中心频率为 1 GHz。接收机(图 8):接收 USRP 设置中心频率为 1 GHz,考虑到信号经过无线通道后参数不可控,增加一个模拟信道模块,经过模拟信道模块仿真多径分布、频率偏移和相位偏移等参数, CMA 盲均衡模块和 PLL (选用科斯塔斯环)模块处理经过信道影响后的信号,处理后的信号送入信号解调和星座图监测模块。

参数设置: (1) 随机信号生成: 10 000 码元重复生成; (2) 调制模块: MQAM ($M=4, 16, 64$) 调制,格雷差分编码,或 MPSK ($M=2, 4, 8$) 调制,格雷差分编码; (3) 发射接收单元: 发射 IP192.168.10.3, 射频 1 GHz, AGC 增益 50 dB, 接收 IP192.168.10.2, 中心频率 1 GHz; (4) 模拟信道: 噪声电平,归一化的频率偏移、相位偏移,多径分布; (5) 多相时钟同步; (6) CMA 均衡器: 抽头数 15, 增益参数; (7) 锁相环: 二阶环路带宽参数; (8) 星座显示; (9) 频谱显示。

可变参数: 噪声电平,归一化的频率偏移,采样定时偏移量,多路径延迟分布,均衡器增益,环路带宽。

全局变量: samp_rate 为 32 000, arrity 为 4, sps 为 4, taps 为 1, nfilters 为 32。

幅度系数常量: $0.5 + 0.5j$, 从数学导入 pi, 从 gnuradio.filter 导入 firdec, 升余弦整形滤波器设计参数: rcc_taps: firdec.root_raised_cosine(nfilters, nfilters, $1.0/\text{float}(sps)$, 0.35, $11 * sps * nfilters$)。

系统组建完成后,测试发射了 4-PSK 和 16-QAM 信号,经过接收和 CMA + PLL 模块处理,图 9 为信号解调星座,可见信号通过系统后星座图收敛情况较好。

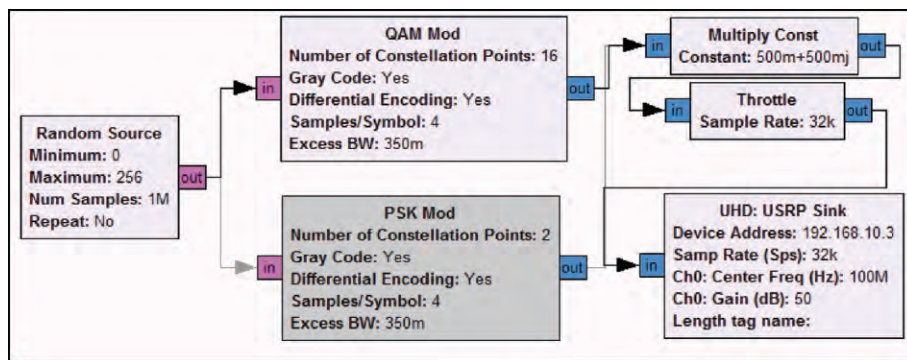


图7 发射模块图

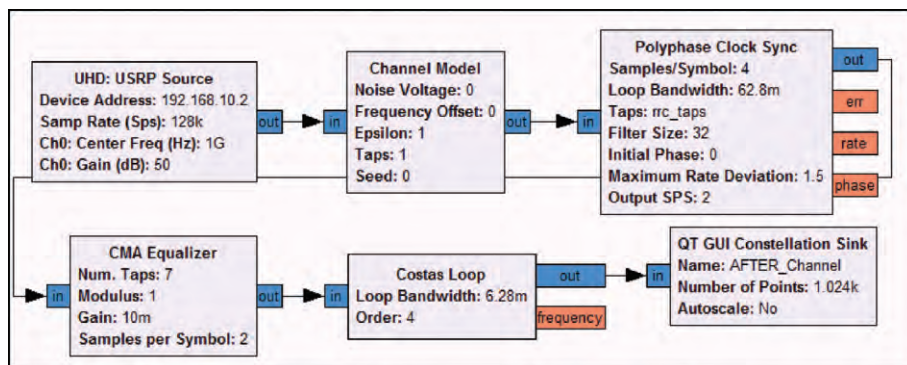


图8 接收模块图

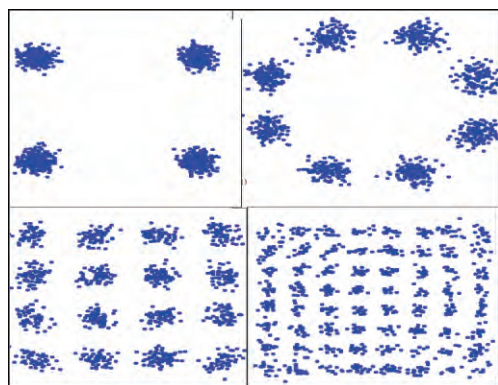


图9 信号星座图

4 结论

本文分析了一种用来处理信号畸变的 CMA 盲均衡器和 PLL 组合方法,并对组合的方法进行改进。通过 MATLAB 仿真进行对比论证,仿真结果证明了该方

法的有效性。研究并设计了基于 GNU Radio 和 USRP 软件无线电平台的 CMA 盲均衡器和 PLL 组合的系统,通过 MQAM 和 MPSK 的信号验证,系统性能良好。

参考文献

- [1] 张雄. 基于 Bussgang 技术盲均衡算法的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2003.
- [2] GARDNER F M. Interpolation in digital modems-part fundamentals [J]. IEEE Transactions on Communications, 1993, 41(3): 501-507.
- [3] SCHNITER P, JOHNSON C R. Dithered signed-error CMA: robust, computationally efficient blind adaptive equalization [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1999 (47): 1959-1997.
- [4] 郭晓宇. 改进型恒模盲均衡算法的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2005.
- [5] 赵宝峰. 变步长盲均衡算法的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2004.
- [6] 童本锋. 基于锁相环的 CMA 盲均衡器设计[J]. 中国新通信, 2015, 17(13): 113-114.
- [7] 黄凌. 基于 GNU Radio 和 USRP 的认知无线电平台研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [8] 王洪, 陈祝明, 孙清清. 基于 USRP 和 GNU Radio《软件无线电》课程实验[J]. 实验科学与技术, 2013, 11(4): 310-312.
- [9] 曹俊杰. 基于 GNU Radio 和 USRP 的认知无线电频谱感知技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.

(收稿日期: 2018-03-07)

作者简介:

李晓光(1977-) 通信作者,男,硕士,助理研究员,主要研究方向:通信信号处理。E-mail: 61425894@qq.com。

潘克刚(1977-) 男,博士,副教授,主要研究方向:通信信号处理。