

多径信道下基于恒模算法的遥测信号盲均衡

王 刚¹, 杨 杨¹, 韩 明², 李 光¹

(1. 太原卫星发射中心, 山西 太原 030001; 2. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘 要: 运载火箭在塔架静态测试时易受多径衰落影响, 导致遥测信号产生码间干扰。本文对 PCM-FM 体制遥测信号的多径信道使用恒模算法(CMA)进行盲均衡研究, 针对遥测信道中的码间干扰展开理论分析和 Matlab 仿真, 并搭建盲均衡功能测试平台开展实验验证。结果表明: CMA 收敛速度快、误码率低, 对多径干扰具有较好的鲁棒性和实用性。

关键词: 多径效应; 遥测信号; 恒模算法; 盲均衡; 误码率

中图分类号: TN 911.5 **文献标志码:** A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2024.02.008

引用格式: 王刚, 杨杨, 韩明, 等. 多径信道下基于恒模算法的遥测信号盲均衡[J]. 上海航天(中英文), 2024, 41(2): 62-66, 80.

Blind Equalization of Telemetry Signals in Multipath Channels Based on Constant Modulus Algorithm

WANG Gang¹, YANG Yang¹, HAN Ming², LI Guang¹

(1. Taiyuan Satellite Launch Center, Taiyuan 030001, Shanxi, China;

2. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: Launch vehicles are vulnerable to multipath fading during the static tests in the tower, which leads to intersymbol interference in the telemetry signals. In this paper, the constant modulus algorithm (CMA) is used to carry out blind equalization research on the pulse code modulation/frequency modulation (PCM/FM) telemetry signals in multipath channels. Theoretical analysis and MATLAB simulation are carried out for the intersymbol interference in the telemetry channels, and a blind equalization function test platform is built to carry out experimental verification. The results show that the CMA has a fast convergence speed and a low bit error rate (BER), and has good robustness and practicability to the multipath interference.

Key words: multipath effect; telemetry signal; constant modulus algorithm (CMA); blind equalization; bit error rate (BER)

0 引言

运载火箭在发射前, 遥测系统^[1-5]与地面测试系统会发生大量的信息交互, 鉴于塔架的封闭环境, 无线通信易受多径衰落, 信道呈现出频率选择性, 接收端会产生码间干扰^[6-7]。随着数据传输速率的逐步提高, 多径效应^[8-9]造成的码间干扰问题越来越突出, 严重影响了遥测系统的信号接收质量, 因而需要有效的技术来减少或者消除码间干扰的影响。信道均衡技术就是一种常见的克服多径衰落的方法^[10]。

常用的自适应均衡算法可分为有训练序列的均衡和盲均衡^[11-12]。传统的自适应均衡器通过发送训练序列对均衡器的抽头系数进行调整, 最终使均衡器正好补偿信道特性, 从而降低码间干扰的影响, 但是需要人为插入训练序列, 无法在运载火箭遥测系统中应用。恒模算法(Constant Modulus Algorithm, CMA)具有计算量小、全局收敛性良好等特点, 是用于线性均衡器最成功的盲均衡算法^[13-15], 被广泛用于通信系统中^[16-17]。对 PCM-FM

收稿日期: 2023-11-29; 修回日期: 2023-12-11

作者简介: 王 刚(1988—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为运载火箭无线电技术。

体制遥测信号码间干扰进行理论分析,使用CMA对遥测信号进行盲均衡研究,并搭建实验平台验证该方法的有效性。

1 多径信道下的遥测信号分析

在塔架环境中,由于多径信道的存在,无线遥测信号一般都存在多径干扰,如图1所示,传播路径包括视距路径(图中实线所示)与非视距路径(图中虚线所示)2种。视距路径(Line of Sight, LOS)是接收机和发射机之间的直接路径;非视距路径(Non Line of Sight, NLOS)是经过反射、散射等到达的路径。

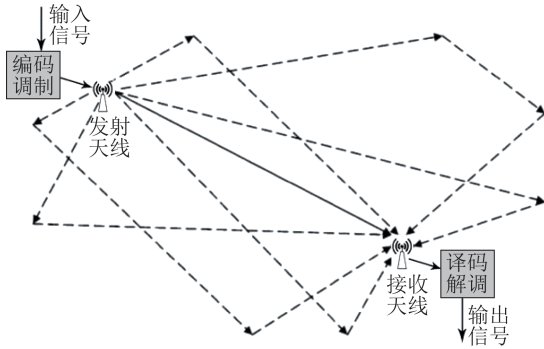


图1 塔架环境中无线遥测信号传播路径

Fig.1 Schematic diagram of the propagation paths of wireless telemetry signals in tower environment

遥测信号采用PCM-FM体制,即2FSK体制,设信号数字脉冲序列为

$$S_n(t) = a_n g(t - nT_s) \quad (1)$$

式中: $g(t)$ 为单个矩形脉冲; T_s 为单个脉冲重复周期; a_n 为PCM信号中第 n 个信号的幅值,一般取值为“1”或“0”。

载波频率随着调制信号“1”或“0”的改变而改变,当脉冲为“1”时,输出载波频率为 f_1 ;当脉冲信号为“0”时,载波频率为 f_2 。2FSK已调信号的时域表达式为

$$f(t) = ag(t - nT_s) \cos \omega_1 t + \bar{a}g(t - nT_s) \cos \omega_2 t \quad (2)$$

式中: $\omega_1 = 2\pi f_1$; $\omega_2 = 2\pi f_2$; a 为PCM信号中的0或1; $\bar{a}$ 为 a 的反码。

在塔架封闭环境,由于多径效应的影响,地面遥测站收到信号包括视距信号和非视距信号,由于路径距离的不同,各路信号到达地面接收站的时间不同,因此接收信号时域表达式为

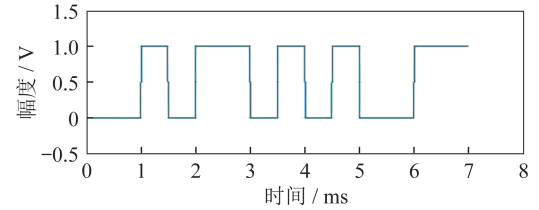
$$s(t) = \sum_{i=1}^m f(t_i) \quad (3)$$

式中: m 为地面遥测站接收到的信号路数; t_i 为箭上无线遥测信号到达地面遥测检测站的时间。

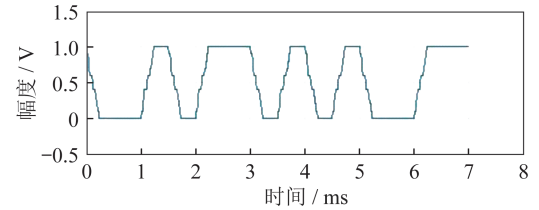
对接收到的信号进行解调,解调后的信号为

$$S_{PCM}(t) = \sum_{i=1}^m a_n g(t - nT_s - t_i) \quad (4)$$

对比式(1)和式(4)可知,多径效应导致解调后的信号中既包括基带信号,又包括延时信号。对式(4)进行仿真,结果如图2所示,表明地面通过天线接收的遥测信号在传输过程中因多径干扰,导致基带信号和其延时信号进行叠加后,码型波形变差,误码率(Bit Error Rate, BER)增加,通信的可靠性大大降低。



(a) 发射加调前遥测信号曲线



(b) 接收解调后多径信号曲线

图2 多径信号的失真特性

Fig.2 Distortion characteristics of the multipath signals

2 CMA 及仿真

盲均衡算法^[18-21]是一种基于自适应的机器学习算法,可有效抑制多径信号。盲均衡算法的经典算法有Sato算法、CMA算法、BG算法和stop-and-go算法,经过仿真发现,Sato算法收敛速度慢,收敛之后稳态误差较大;BG算法和stop-and-go 2种算法存在由试验确定的参数,复杂度高。

综合考虑实现复杂度和算法的收敛稳健性,选择CMA在遥测体制无线信号中的应用。

2.1 CMA 原理

CMA原理如图3所示,主要实现思路为用均衡器的滤波器系数向量 $[w_0(k), \dots, w_{L-1}(k)]^T$ 对接收

信号 $x(k)$ 进行滤波处理,即可得到均衡后的遥测信号 $y(k)$ 。滤波器系数依据代价函数最小化原则进行自适应更新,因此 CMA 的主要思想是寻求最大限度地减小由恒模量准则定义的代价函数。

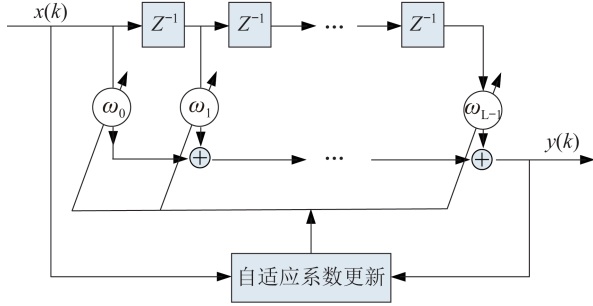


图 3 恒模均衡器原理

Fig.3 Principle block diagram of the constant modulus equalizer

CMA 的代价函数为

$$J(k) = E \left[\left(|y(k)|^2 - R_2 \right)^2 \right] \quad (5)$$

式中: R_2 为该算法的模,由输入信号 $x(k)$ 决定,可以表示为

$$R_2 = \frac{E \left[|x(k)|^4 \right]}{E \left[|x(k)|^2 \right]^2} \quad (6)$$

均衡器的输出 $y(k)$ 表示为

$$y(k) = \mathbf{X}^T(k) \mathbf{W}(k) \quad (7)$$

式中: $\mathbf{X}(k) = [x(k), \dots, x(k-L+1)]^T$ 为均衡器输入数据向量; $\mathbf{W}(k) = [w_0(k), \dots, w_{L-1}(k)]^T$ 为均衡器的抽头系数向量; L 为均衡器滤波器阶数。

综上, CMA 误差信号为

$$e(k) = y(k) \left(R_2 - |y(k)|^2 \right) \quad (8)$$

均衡器抽头系数更新方程为

$$\mathbf{W}(k) = \mathbf{W}(k-1) + \mu e(k) \mathbf{X}(k) \quad (9)$$

式中: μ 为步长参数。

可以看出, CMA 计算复杂度低, 代价函数只与接收序列的幅值有关且相位敏感度低, 适合 PCM-FM 体制的特点。在使用 Matlab 软件进行大量仿真后, 确定将滤波器的阶数 L 设定为 11、步长设定为 0.001 进行后续分析, 使算法性能和实现难度得到平衡。

2.2 盲均衡效果的仿真

多径信道由视距路径和多个非视距路径组成, 为了简化模型, 在信道中只考虑视距路径和一个能量较强的反射路径, 那么遥测信道可以表示为

$$h(t) = f(t) + |\Gamma| e^{j\theta} f(t - \tau) + n(t) \quad (10)$$

式中: $|\Gamma|$ 为第 2 径的幅度; τ 为第 2 径的时延; θ 为第 2 径的相位; $n(t)$ 为白噪声。

幅频特性如图 4 所示。多径会引起信号在频域发生周期性衰落, 衰落周期与多径时延成反比, 衰落深度大小与反射径的幅度值有关, 频率衰落的位置由反射径相位决定。

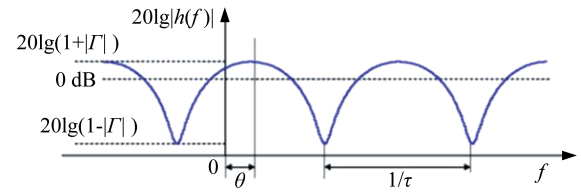


图 4 多径信道的幅频特性

Fig.4 Amplitude-frequency characteristics of the multipath channels

以式(10)建立的信号模型为主, 考虑目标为动态条件下, 第 2 径的幅度 $|\Gamma|$ 和相位 θ 动态变化的情况, 将第 2 径的幅度 $|\Gamma|$ 折合为相对第 1 径的功率衰减, 衰减范围 3~12 dB, 功率衰减变化速度 2 dB/s, 时延 τ 为 100 ns, 相位变化速度为 20 (°)/s, 开展误码率仿真, 结果如图 5 所示。

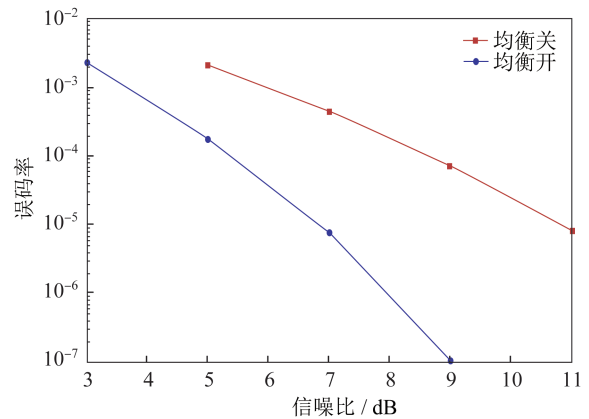


图 5 盲均衡对多径仿真效果对比

Fig.5 Comparison of the blind equalization effects on the multipath simulation

仿真表明, 在误码率为 10^{-4} 时, 性能约提高 3 dB。由仿真结果可以看出, 均衡对于动态多径环境有很强的鲁棒性, 由此推测在考虑多径条件动态

变化的情况下,均衡仍能带来不错的性能增益。

3 实验结果及分析

3.1 盲均衡测试平台

盲均衡功能测试平台^[22-25]如图6所示,通过左右

旋合路的方式模拟2径信道模型,左旋信号作为主路分量,右旋信号作为第2径分量,通过功率控制、相位控制、时延控制来改变第2径分量的信号以模拟不同的多径情况,通过噪声源对多径信道添加高斯白噪声。

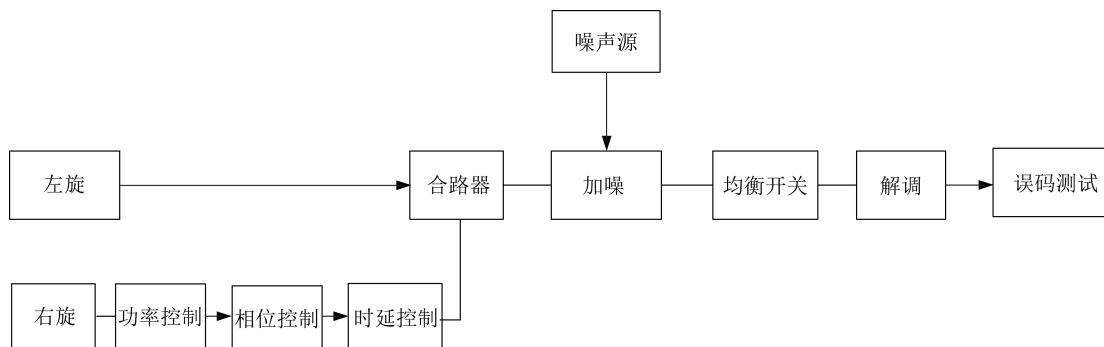


图6 盲均衡测试平台

Fig.6 Block diagram of the blind equalization test platform

如图6所示搭建实验平台后,测试2种情况:
1) 模拟多径条件下,均衡功能能够带来性能增益。通过调节右旋信号,设置不同的功率、相位、时延,测试均衡模块打开和关闭误码率情况下,不同多径条件均衡功能的性能增益。2) 多径效应使接收机解调失效的情况下,均衡功能是否可以恢复解调过程。通过调节右旋信号,关闭均衡模块,设置右旋信号的功率、相位、时延,找到使接收机解调失效的临界多径条件,然后打开均衡功能,测试接收机能否恢复正常解调。

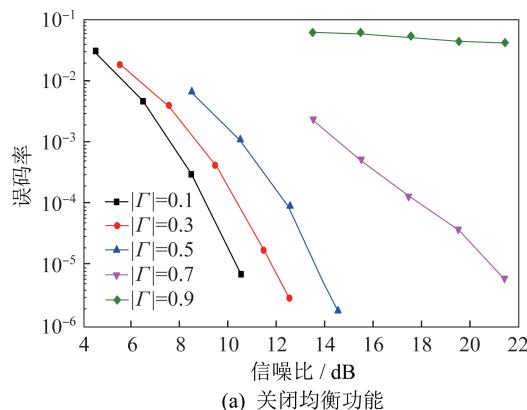
3.2 误码率测试

考虑到实际遥测链路情况,设置第2径参数 $|\Gamma|=0.1\sim 0.9$, $\tau=100$ ns,开展误码率测试。测试结果见表1、如图7所示。

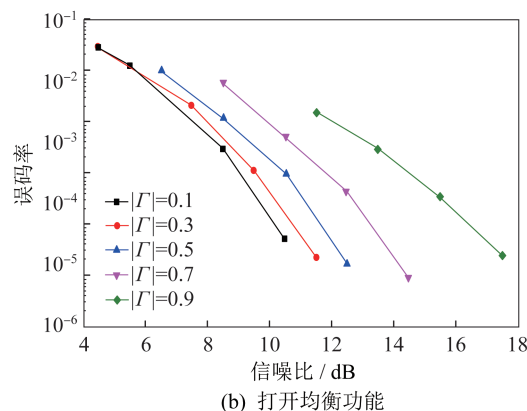
表1 CMA盲均衡技术性能分析

Tab.1 Performance analysis of the blind equalization technology based on the CMA

序号	反射系数 $ \Gamma $	BER= 10^{-5} 所对应的 $(E_b/N_0)/\text{dB}$		
		关闭均衡	打开均衡	盲均衡的性能改善比
1	0.1	10.2	10.1	0.1
2	0.3	11.8	10.7	1.1
3	0.5	13.6	11.6	2.0
4	0.7	20.8	13.1	7.7
5	0.9	—	16.3	>7.7



(a) 关闭均衡功能



(b) 打开均衡功能

图7 恒模盲均衡误码率测试曲线

Fig.7 Constant modulus blind equalization error rate test curve

从表1和图7中可以得到以下3个结论。

1) 对于PCM-FM体制遥测信号,反射路径的相对幅度 $|\Gamma|$ 越大,误码率恶化越严重。

2) 采用该恒模盲均衡技术可以有效抑制多径干扰。反射路径的相对幅度 $|r|$ 越大,恒模盲均衡技术所带的性能改善效果越明显。

3) 严重的多径干扰可能引起“误码平底”现象,恒模盲均衡技术可以有效解决这一问题现象。

3.3 收敛速度测试

在误码率测试的基础上,继续进行收敛性测试。针对无多径、轻微多径和典型多径条件下,每个码元 10 个采样点,统计均衡收敛情况,测试结果如图 8 所示。

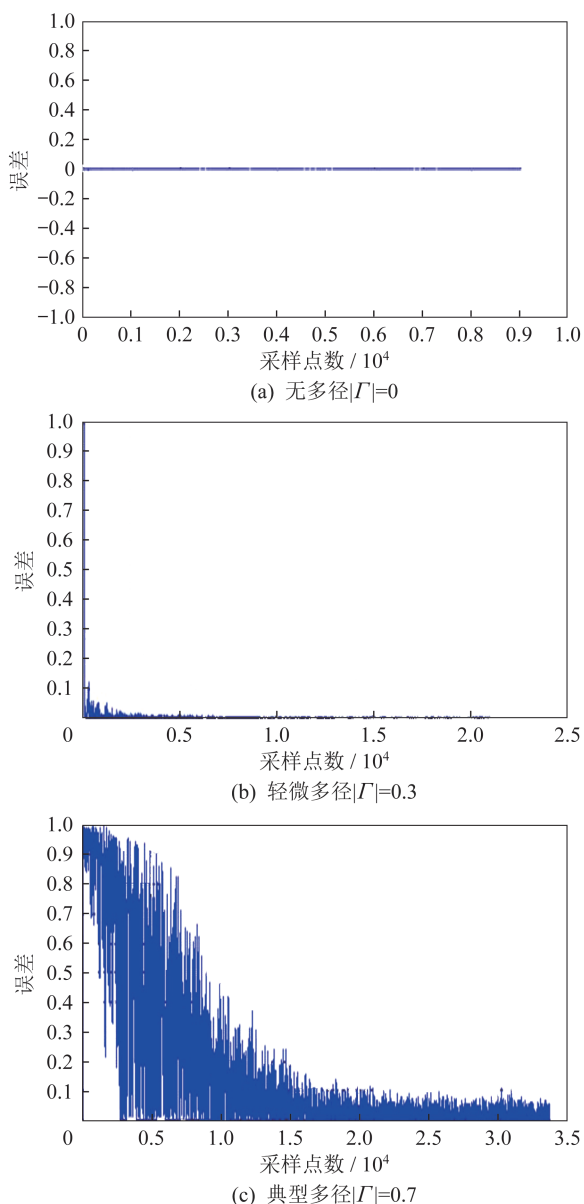


图 8 恒模盲均衡误差收敛曲线

Fig.8 Convergence curve of the constant modulus blind equalization error

盲均衡算法的收敛速度受多径条件的影响呈现出差异性,曲线结果可以反映出多径条件越恶劣,则收敛时间越长。分析图 8 得出如下结论:在均衡有效的多径条件下,收敛时间在 5 000 个码元长度内,能够满足工程使用条件。

4 结束语

本文首先对 CMA 的盲均衡效果进行了理论分析和 Matlab 仿真,然后搭建实验平台进行实验验证,结果表明 CMA 收敛速度快、稳态误差小,均衡后的遥测信号恢复效果明显。本文提出的基于 CMA 的盲均衡技术,对多径干扰具有较好的抑制作用,盲均衡技术在处理静态测试的运载火箭遥测信号中,展现出很强的实用性和应用前景。其他体制测控信号的多径效应影响抑制技术是今后的研究方向。

参考文献

- [1] 李邦复. 遥测系统[M]. 北京: 宇航出版社, 1987.
- [2] 朱亮聪, 褚洪杰, 毛玉明, 等. 基于部分遥测数据的飞行器力学环境评估方法[J]. 上海航天, 2015, 32(5): 44-47.
- [3] 朱亚明, 颜晓明, 姚迪, 等. 现役运载火箭遥测系统通用化技术[J]. 上海航天(中英文), 2020, 37(增刊 2): 188-192.
- [4] 郝少飞. 遥测系统中 SOQPSK-TG 的传输技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- [5] 鲁宇. 中国运载火箭技术发展[J]. 宇航总体技术, 2017, 1(3): 1-8.
- [6] 史煜, 钮毅锋, 郭道省, 等. 基于遗传算法的多径衰落信道下的 RLS 均衡[J]. 军事通信技术, 2016, 37(2): 11-14.
- [7] 陈轲. 卫星导航系统多径估计理论与方法研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2012.
- [8] 魏建军, 刘乃安, 李晓辉, 等. 多径效应对无线通信系统性能的影响[J]. 现代电子技术, 2023, 46(5): 5-8.
- [9] 赵雯雯, 陈玲玲, 徐连军, 等. 多径效应对北斗星间链路载荷校准影响的研究[J]. 现代电子技术, 2022, 45(19): 27-30.
- [10] 李健, 刘经宇, 刘丽霞, 等. 恒模盲均衡算法在运载器通信系统中的应用[J]. 航天控制, 2018, 36(4): 89-93.
- [11] 王大磊. 基于优化理论的盲均衡技术研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2014.
- [12] 陶立伟. 基于恒模准则的盲均衡算法仿真[J]. 无线电工程, 2007, 37(3): 22-24.

(下转第 80 页)