

文章编号:1671-1637(2013)06-0107-06

应答器上行链路信号自适应解调方法

赵会兵¹, 全宏宇¹, 梁迪²

(1. 北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044;

2. 北京交通大学 轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100044)

摘要:分析了应答器上行链路信号特点,提出一种自适应解调方法对上行链路信号进行信号解调。采用自适应LMS算法跟踪上行链路信号的频率,计算跟踪误差,并根据跟踪误差进行信号解调。按照欧洲应答器测试规范对其解调性能进行仿真验证,并与过零检测法和非相干解调法进行了比较。仿真结果表明:自适应解调方法在上行链路信号参数存在极端偏移时同样能够满足解调性能要求;当信噪比为7 dB时,自适应解调方法的误码率接近0,而过零检测法和非相干解调法的误码率分别为0.163、0.001。自适应解调方法实现简单且具有较强的抗干扰能力,为应答器在电磁环境相对恶劣的场所中可靠应用提供基础。

关键词:铁路信号;列车运行控制系统;应答器;上行链路信号;自适应解调;抗干扰

中图分类号:U491.51

文献标志码:A

Adaptive demodulation method for balise uplink-signal

ZHAO Hui-bing¹, QUAN Hong-yu¹, LIANG Di²

(1. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The characteristic of balise uplink-signal was analyzed. An adaptive demodulation method for balise uplink-signal was introduced. The frequency of uplink-signal was tracked by using adaptive least mean square(LMS) algorithm. The signal was demodulated according to the calculated tracking residual. The demodulation performance was verified according to the Eurobalise test specification and then compared with zero-crossing detection method and non-coherent demodulation method. Simulation result shows that adaptive demodulation method can meet the demodulation performance requirements when there exists extreme migration of uplink-signal. When the signal to noise ratio (SNR) is 7 dB, the error rate of adaptive demodulation method is almost 0, while the error rates of the zero-crossing detection method and the non-coherent demodulation method are 0.163 and 0.001 respectively. The adaptive demodulation method is simple to utilize and has strong anti-interference ability. It provides a foundation for the reliable application of balise in comparative harsh electromagnetic environment. 2 tabs, 11 figs, 15 refs.

Key words: railway signal; train control system; balise; uplink-signal; adaptive demodulation; anti-interference

Author resume: ZHAO Hui-bing(1970-), male, professor, PhD, +86-10-62119891, hbzhao@bjtu.edu.cn.

收稿日期:2013-06-17

基金项目:铁道部科技研究开发计划项目(2012X004)

作者简介:赵会兵(1970-),男,河北怀来人,北京交通大学教授,工学博士,从事列控系统研究。

0 引 言

电磁干扰引起应答器丢失的主要原因是电磁干扰导致应答器上行链路信号传输误码率增高^[1-3],因此,提高应答器上行链路信号解调方法的抗干扰能力,对于解决电磁干扰引起的应答器丢失问题具有重要意义。

已经有学者针对应答器上行链路解调方法进行了相关研究:唐戴平等采用了非相干数字解调方法对应答器上行链路信号进行解调,设计了解调滤波器并对滤波器性能进行了优化,使得滤波器性能显著提升^[4];耿悦采用过零检测法对上行链路信号进行解调,实现了一种简单的上行链路信号参数估计方法^[5];赵亮等提出了基于离散傅立叶变换应答器的上行链路信号解调方法,研究了离散傅立叶变换解调窗口长度选取及同步调整问题,从而相对提高了解调方法的可靠性和实时性,并分析了硬件实现^[6];Zhao等提出了基于小波脊的上行链路信号解调方法,并对其抗干扰性能进行了仿真分析,仿真结果表明基于小波脊的解调方法性能优于非相干解调法^[7]。非相干解调法和过零检测法虽然实现简单且速度较快,但是抗干扰性能较差。离散傅立叶变换、小波脊这2种解调方法的复杂度相对较高,实现起来比较困难,而且以上研究也没有分析上行链路信号参数存在极端偏移情况下解调方法的性能。

本文提出一种应答器上行链路信号自适应解调方法,采用自适应算法跟踪信号的频率,根据跟踪误差进行解调,并按照欧洲应答器测试规范对本文方法在上行链路信号参数偏移情况下的解调性能进行验证,并与过零检测法、非相干解调法进行比较。

1 应答器上行链路信号特点

1.1 应答器信息传输系统

应答器信息传输系统主要由地面应答器、轨旁电子单元(Lineside Electronic Unit, LEU)以及车载应答器传输模块(Balise Transmission Module, BTM)3部分组成,见图1。应答器信息传输系统包含3个接口:列控中心与LEU之间的接口为S接口;LEU与有源应答器之间的接口为C接口;地面应答器和车载设备之间的传输接口为A接口。A接口为无线通信接口,传输的信号包括地面应答器向车载设备发送的上行链路信号和车载设备向地面应答器发送的能量信号^[8]。

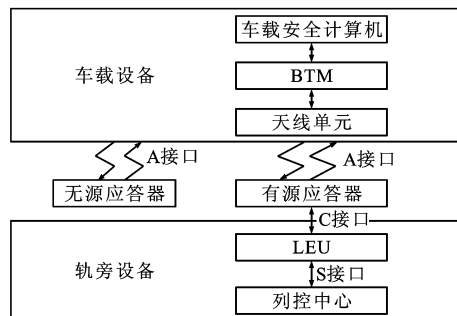


图1 应答器信息传输系统

Fig. 1 Balise information transmission system

当列车通过安装于轨道中心的地面应答器时,地面应答器获取能量进入工作状态,将存储的传输报文信息用频移键控(Frequency Shift Keying, FSK)方式进行调制,并发送至车载设备。上行链路信号在传输过程中会混入噪声,车载设备接收到含有噪声的上行链路信号后,需要对信号进行FSK解调以获取传输报文信息。

1.2 上行链路信号FSK调制频率参数

应答器传输报文采用差错控制编码方式对830 bit用户数据进行编码,编码后一帧报文长度为1 023 bit。地面应答器被激活工作时采用连续相位二进制频移键控(2FSK)方式对存储的报文数据进行调制。

设 f_0 为二进制信息为0时的频率, f_1 为二进制信息为1时的频率,根据2FSK调制的基本原理, f_0 、 f_1 与调制载频 f_c 、频偏 f_d 有以下关系

$$f_0 = f_c - f_d \quad (1)$$

$$f_1 = f_c + f_d \quad (2)$$

应答器上行链路信号的主要频率参数见表1,其调制速率 B 为 $564.48 \text{ kb} \cdot \text{s}^{-1}$,允许波动范围为 $\pm 2.5\%$ ^[8]。

表1 应答器上行链路信号频率参数

Tab. 1 Frequency parameters of balise uplink-signal

参数	标准值/MHz	允许波动范围/%
f_c	4.234	± 4.0
f_d	0.282	± 7.0
f_0	3.951	± 7.0
f_1	4.516	± 7.0

1.3 上行链路信号幅值包络特性

列车通过应答器时,地面应答器与车载设备之间的电磁耦合为近场耦合,车载天线的接收能量与地面应答器发射能量近似呈正比。考虑BTM接收门限,地面应答器的发射能量和地面应答器的水平相对位置 X 之间的关系见图2(a),车载天线接收能

量和地面应答器的水平相对位置 X 之间的关系见图 2(b)^[9-11],图中虚线从左到右依次为耦合作用起始位置、正常工作起始位置、中心位置、正常工作结束位置、耦合作用结束位置。由图 2 可以看出,车载设备接收到的上行链路信号的峰值并不是恒定的,而是先逐渐增大,再逐渐减小。当车载天线与地面应答器正对时(即图 2 中 $X=0$ 位置),车载设备接收到的信号能量最大,上行链路信号的峰值也最大。

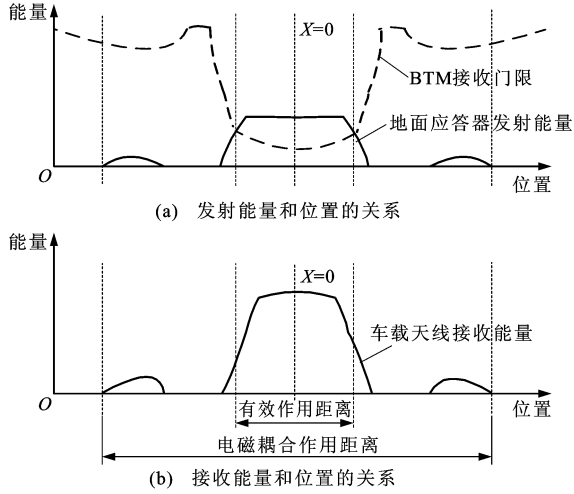


图2 应答器动态信号模式曲线

Fig. 2 Balise dynamic signal pattern curves

1.4 实际上行链路信号

图 3 为上行链路信号(电压幅度),信号采样频率 f_s 为 20.000 MHz,调制速率 B 为 $564.48 \text{ kb} \cdot \text{s}^{-1}$ 。可以计算得到每个码元对应的数据点数 N_b 为

$$N_b = \frac{f_s}{B} \approx 35 \quad (3)$$

由图 3 可以看出信号峰值不恒定,存在幅值包络曲线。图 4 为图 3 中上行链路信号的一个局部放大。实际上行链路信号中含有噪声,这些噪声包括列车设备噪声、电气牵引噪声等,当这些噪声的功率较大或者频率与上行链路信号传输频率在同一个数量级时,将会对上行链路信号传输产生严重的影响。

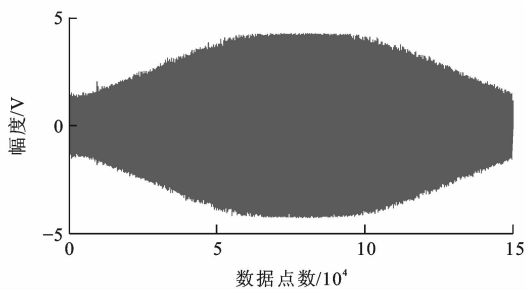


图3 实际上行链路信号

Fig. 3 Actual uplink-signal

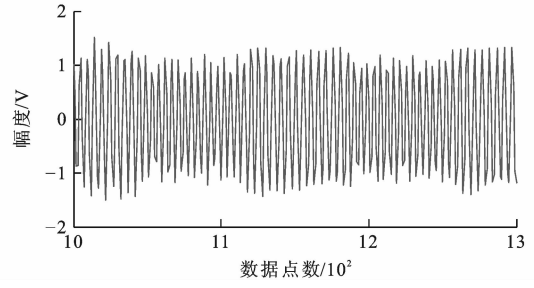


图4 局部放大的上行链路信号

Fig. 4 Partial enlargement of uplink-signal

2 应答器上行链路信号自适应解调

2.1 单频跟踪原理

图 5 为有 2 个权值可自动调整的自适应单频跟踪器^[12]: $d(k)$ 为数据点 k 的原始输入信号; $e(k)$ 为数据点 k 的跟踪误差信号; $y(k)$ 为数据点 k 的跟踪信号; $x_1(k)$ 、 $x_2(k)$ 为数据点 k 的 2 个参考信号; $w_1(k)$ 、 $w_2(k)$ 为数据点 k 的自适应滤波器的 2 个权值系数。 $d(k)$ 为带有噪声的实际正弦信号

$$\begin{cases} d(k) = A\cos(\omega k + \theta) + n(k) \\ \omega = 2\pi \frac{f}{f_s} \end{cases} \quad (4)$$

式中: A 为信号幅度; ω 为有用信号数字频率; θ 为初始相位; $n(k)$ 为数据点 k 的噪声信号; f 为有用信号频率。

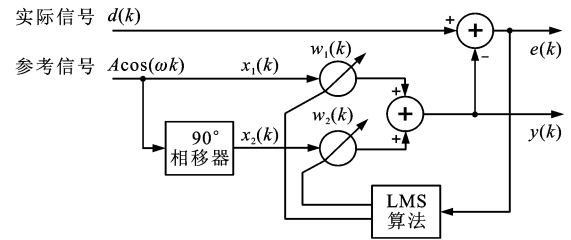


图5 自适应单频跟踪器

Fig. 5 Adaptive single-frequency tracker

参考信号 $x_1(k)$ 、 $x_2(k)$ 为存在 90° 相移的正交信号,即

$$x_1(k) = A\cos(\omega k) \quad (5)$$

$$x_2(k) = A\sin(\omega k) \quad (6)$$

自适应最小均方根 (Least Mean Square, LMS) 算法根据跟踪误差信号 $e(k)$ 对权值系数 $w_1(k)$ 、 $w_2(k)$ 进行调整, $y(k)$ 为跟踪后的信号。LMS 算法原理为

$$w_1(k+1) = w_1(k) + 2\mu e(k)x_1(k) \quad (7)$$

$$w_2(k+1) = w_2(k) + 2\mu e(k)x_2(k) \quad (8)$$

$$e(k) = d(k) - y(k) \quad (9)$$

$$\begin{cases} 0 < \mu < \frac{2}{\|\mathbf{X}\|^2} \\ \mathbf{X} = (x_1(k), x_2(k))^T \end{cases} \quad (10)$$

式中: μ 为控制 LMS 算法稳定性和收敛性的因子; \mathbf{X} 为参考信号向量。

根据图 5, 设滤波器权值向量 \mathbf{W} 为

$$\mathbf{W} = (\omega_1(k), \omega_2(k))^T$$

有如下关系式

$$y(k) = \mathbf{W}^T \mathbf{X} \quad (11)$$

利用三角公式展开式(4), 得到

$$d(k) = A \cos(\theta) \cos(\omega k) - A \sin(\theta) \sin(\omega k) + n(k) \quad (12)$$

因此, 有

$$e(k) = A \cos(\omega k + \theta) - \omega_1(k) \cos(\omega k) + n(k) - \omega_2(k) \sin(\omega k) \quad (13)$$

当自适应算法达到最优解, 即对实际信号进行有效频率跟踪时, 有

$$\omega_1(k) = A \cos(\theta) \quad (14)$$

$$\omega_2(k) = -A \sin(\theta) \quad (15)$$

$$e(k) = n(k) \quad (16)$$

由自适应单频跟踪器的原理可以看出, 自适应单频跟踪器可以视为陷波器, 图 5 中的 $e(k)$ 为陷波器输出。当单频跟踪器频率与输入信号频率一致时, $e(k)$ 较小, 当单频跟踪器频率与输入信号频率不一致时, $e(k)$ 较大, 二者具有明显差异, 因此, 根据跟踪误差信号 $e(k)$ 可以对调制信号进行解调。

2.2 应答器上行链路信号自适应解调原理

应答器上行链路信号自适应解调的基础是自适应单频跟踪。应答器上行链路信号自适应解调原理^[12-15]见图 6, 共包含 2 个通道, 其中每个通道中的单频跟踪器原理见图 5。解调时, 单频跟踪器 1 的跟踪频率 f_0 为 3.951 MHz, 单频跟踪器 2 的跟踪频率 f_1 为 4.516 MHz, 对单频跟踪误差信号 $e(k)$ 进行包络提取与比较判决, 得到解调后的信号。为了便于判决, 在包络提取时, 分别对跟踪误差信号 $e(k)$ 取绝对值, 再进行中值滤波。数据点 k 的中值滤波输出 $z(k)$ 为

$$z(k) = \frac{1}{2m+1} \sum_{i=-m}^m e(k+i) \quad (17)$$

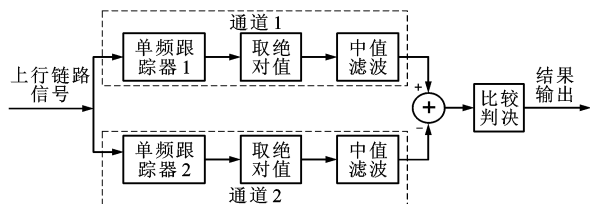


图 6 上行链路信号自适应解调原理

Fig. 6 Adaptive demodulation principle of balise uplink-signal

式中: i 为数据点偏移; m 为中值滤波器系数。

经过中值滤波后, 对 2 个通道的输出相减, 再选择合适的门限进行判决, 就可以得到解调输出。

2.3 仿真验证

按照图 6 对上行链路信号进行解调, 以图 4 的实际信号为自适应解调输入, LMS 算法收敛因子 μ 为 0.1, 中值滤波器系数 m 为 10。图 7 为通道 1、2 经过中值滤波后的输出。图 8 为通道 1 的输出减去通道 2 的输出得到的结果。对图 8 进行比较判决, 设置比较判决门限为 0, 即对于幅度大于 0 的判决为二进制信息 0, 幅度小于 0 判决为二进制信息 1, 自适应解调输出结果见图 9。

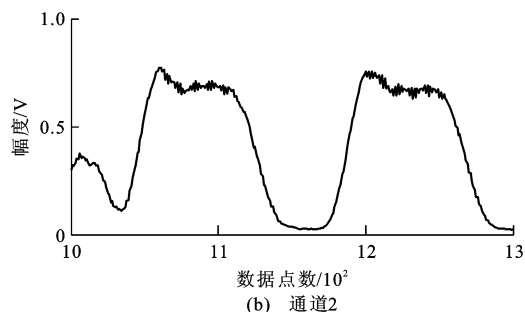
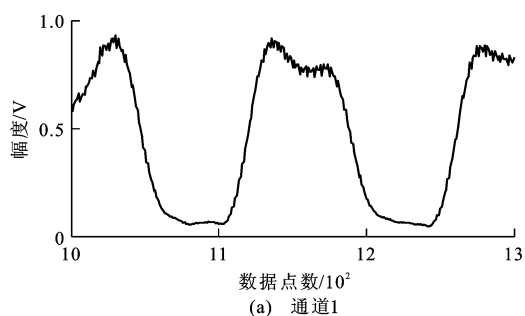


图 7 通道 1、2 中值滤波后输出结果

Fig. 7 Output results of channels 1 and 2 after median filtering

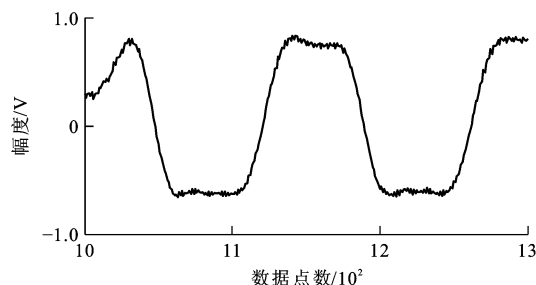


图 8 通道 1 减去通道 2 后结果

Fig. 8 Result of channel 1 minus channel 2

3 性能验证

3.1 基本性能分析

根据欧洲应答器测试规范^[9], 按照表 2 的 8 个测试案例, 对本文提出的应答器上行链路信号自适应解

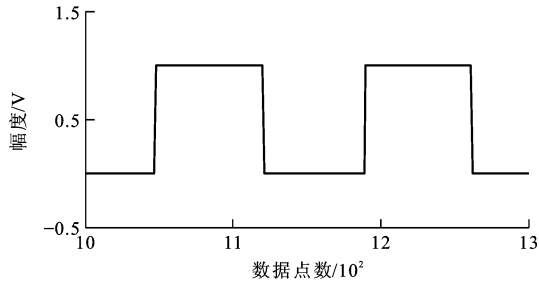


图 9 自适应解调输出结果

Fig. 9 Output result of adaptive demodulation

调方法进行测试,以检验当载频、频偏、调制速率以及幅度抖动参数在允许范围内波动时本文解调方法的可靠性。案例 1、2 中输入的上行链路信号载频存在

最大偏移,偏移量为 ± 0.175 MHz;案例 3、4 中输入的上行链路信号频偏存在最大偏移,偏移量为 $\pm 7.1\%$;案例 5、6 中输入的上行链路信号调制速率存在最大偏移,偏移量为 $\pm 2.5\%$;案例 7、8 中输入的上行链路信号幅度存在抖动,抖动幅度为 $+1.5$ dB 和 -2.0 dB,低频率切换指一帧报文内存在 3 个幅度抖动周期,高频率切换指每 3 bit 数据存在 1 个幅度抖动周期。根据测试案例的要求生成上行链路信号,其中数字信号为随机序列,采样频率 f_s 为 22.579 MHz(这是为了保证 1 个码元采集到的数据点数为整数,方便统计和比较)。用本文自适应解调方法对测试信号进行解调。图 10 为当数字信号为

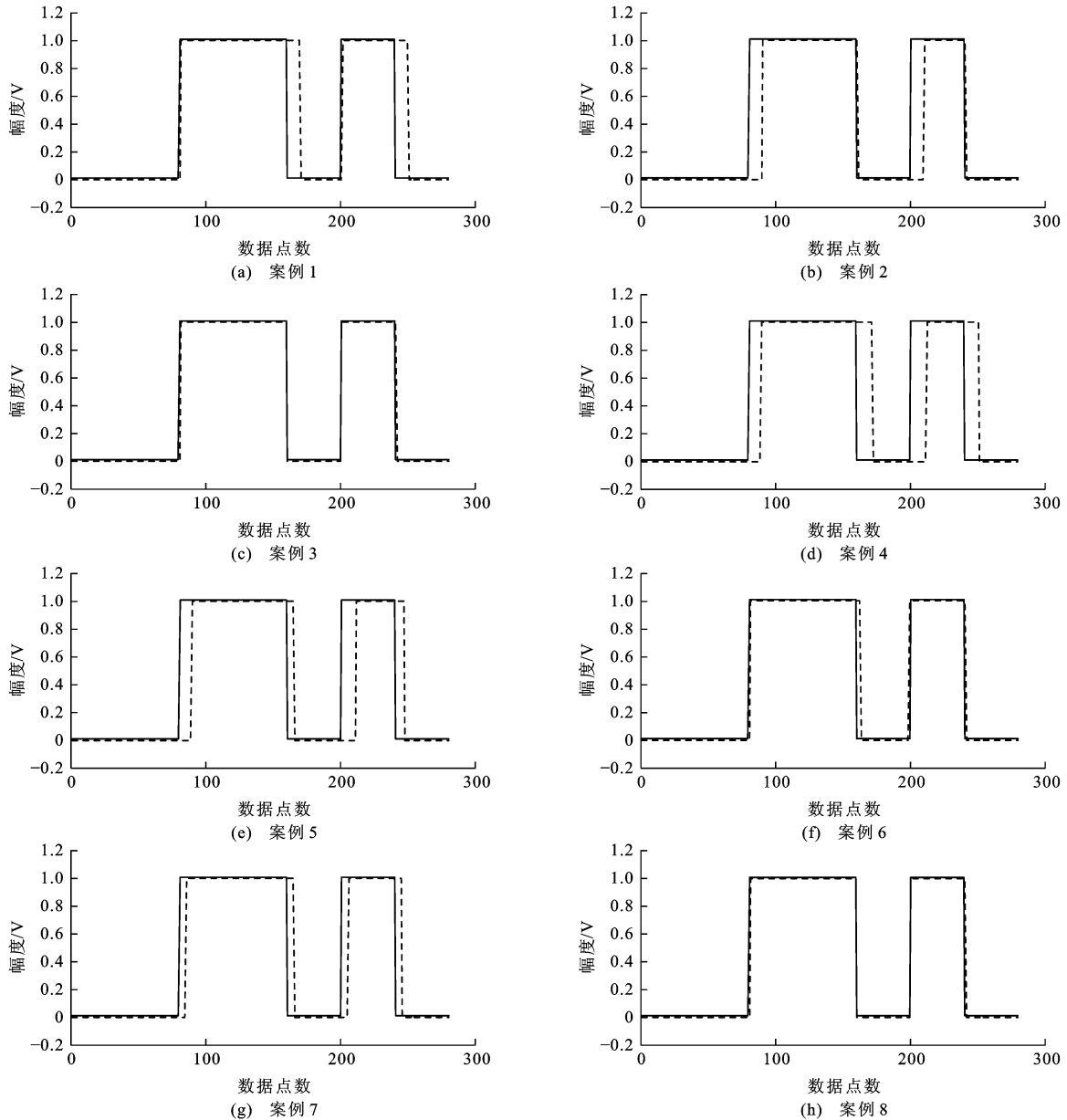


图 10 测试案例结果

Fig. 10 Results of test cases

表 2 八个案例的测试结果

Tab. 2 Test results of 8 cases

案例	载频/ MHz	频偏/ MHz	调制速率/ (kb · s ⁻¹)	幅度 抖动	测试 结果
1	4.409	正常	正常	正常	正常
2	4.059	正常	正常	正常	正常
3	正常	0.302	正常	正常	正常
4	正常	0.262	正常	正常	正常
5	正常	正常	578.60	正常	正常
6	正常	正常	550.40	正常	正常
7	正常	正常	正常	低频率切换	正常
8	正常	正常	正常	高频率切换	正常

“0011010”时,测试案例 1~8 的输出结果,实线为调制前数字信号,虚线为解调结果。根据仿真结果可以得出:当载频出现最大正负偏移、调制频偏出现最大负偏移、调制速率出现最大正偏移以及幅度抖动低频率切换时,解调结果会出现一定的偏差,但不影响解调正确性;当调制频偏出现最大正偏移、调制速率出现最大负偏移以及幅度抖动高频率切换时,解调结果几乎不受影响。自适应解调方法能够满足载频、频偏、调制速率以及幅度抖动参数允许范围内波动要求。

3.2 比较结果分析

将上行链路信号自适应解调方法与过零检测法、非相干解调法进行比较。采样频率 f_s 为 22.579 MHz, LMS 算法收敛因子 μ 为 0.1, 中值滤波器系数 m 为 10。

根据式(3)可以得到 1 个码元采集到的数据点数 N_b 为 40。上行链路信号的频率 f_0 为 3.951 MHz, f_1 为 4.516 MHz, 因此,过零检测法的过零点个数(上升沿方式)门限设置为 8,也就是说在 1 个同步码元内,过零点个数不小于 8 时,判决为二进制信息 0,过零点个数小于 8 时,判决为二进制信息 1。

仿真采用 MATLAB 环境,每次仿真的信号为 1.0×10^5 bit 随机码,且不带幅值包络,仿真次数为 10 次,不同信噪比下的统计结果见图 11。可以看出过零检测法、非相干解调法的抗干扰能力有限,当信噪比为 7 dB 时,自适应解调方法的误码率几乎为 0,远优于非相干解调法的 0.001 和过零检测法的 0.163,具有更好的抗干扰能力。

4 结 语

在铁路现场电磁环境复杂、电磁干扰不确定的前提下,本文对应答器上行链路信号的特点进行了全面分析,提出了一种上行链路自适应解调方法,并

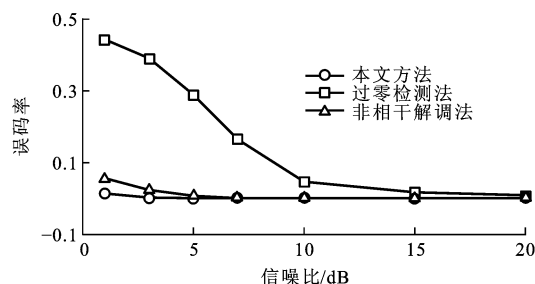


图 11 不同解调方法的误码率

Fig. 11 Error rates of different demodulation methods

详细叙述了方法的原理和实现过程。经现场数据试验和仿真实验,本文方法实现简单且具有较高的抗干扰能力,仅对跟踪频率敏感,能够满足复杂电磁干扰环境下上行链路信号检测的需求。下一步将研究自适应解调算法在 BTM 设备解调中应用的适应性,以提高实际运营设备的解调性能。

参考文献:

References:

- [1] 蔡世东. 外界电磁干扰引起应答器接收模块故障的原因分析[J]. 铁道通信信号, 2012, 48(3): 19-20.
CAI Shi-dong. Cause analysis of balise receiver module faults caused by external electromagnetic interference[J]. Railway Signalling and Communication, 2012, 48(3): 19-20. (in Chinese)
- [2] 马文俊, 赵 蕾. 应答器功能简介及典型故障分析[J]. 铁道通信信号, 2011, 47(1): 35-37.
MA Wen-jun, ZHAO Lei. Balise function introduction and typical faults analyzing[J]. Railway Signalling and Communication, 2011, 47(1): 35-37. (in Chinese)
- [3] BALGHITI Y, MEYNIEL B, ORION J, et al. Proposal of a specific test methodology to assess the radiated immunity behavior of a data transmission from beacon to train[C]// IEEE. Proceedings of the 20th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility. Zurich: IEEE, 2009: 485-488.
- [4] 唐戴平, 王鲁豫. 基于 FSK 的 CTCS 数字接收模块的设计与实现[J]. 铁路通信信号工程技术, 2006, 3(3): 42-45.
TANG Dai-ping, WANG Lu-yu. Design and implementation of FSK based CTCS digital reception module[J]. Railway Signalling and Communication Engineering, 2006, 3(3): 42-45. (in Chinese)
- [5] 耿 悦. 应答器上行链路信号参数估计的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
GENG Yue. The research on estimation of balise uplink signal parameters[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
- [6] 赵 亮, 陈永刚. DSTFT 在应答器信号解调方面的应用研究[J]. 电子质量, 2009(5): 6-8.
ZHAO Liang, CHEN Yong-gang. The applied research of DSTFT in balise for signal demodulation[J]. Electronics

(下转第 118 页)

- estimation using MARG sensors[C]//IEEE. Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligence Robots and Systems. Maui: IEEE, 2001: 2003-2011.
- [3] NORGAARD M, POULSEN N K, RAVN O. New developments in state estimation for nonlinear systems[J]. Automatica, 2000, 36(11): 1627-1638.
- [4] NORGAARD M, POULSEN N K, RAVN O. Advances in derivative-free state estimation for nonlinear system[R]. Copenhagen: Technical University of Denmark, 2004.
- [5] MERWE R, WAN E. Sigma-point Kalman filters for probabilistic inference in dynamic state-space models[D]. Portland: Oregon Health and Science University, 2004.
- [6] WU Yuan-xin, HU De-wen, WU Mei-ping, et al. An numerical-integration perspective on Guassian filters[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(8): 2910-2921.
- [7] ARASARATNAM I, HAYKIN S. Cubature Kalman filters[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2009, 54(6): 1254-1269.
- [8] ARASARATNAM I. Cubature Kalman filtering: theory and applications[D]. Hamilton: McMaster University, 2009.
- [9] FEMANDEZ-PRADES C, VILA-VALLS J. Bayesian nonlinear filtering using quadrature and cubature rules applied to sensor data fusion for positioning[C]//IEEE. 2010 IEEE International Conference on Communications. Cape Town: IEEE, 2010: 1-5.
- [10] LIU Jiang, CAI Bai-gen, TANG Tao, et al. A CKF based GNSS/INS train integrated positioning method[C]//IEEE. 2010 International Conference on Mechatronics and Automation. Xi'an: IEEE, 2010: 1686-1689.
- [11] PESONEN H, PICHE R. Cubature-based Kalman filters for positioning[C]//IEEE. Proceedings of the 7th Workshop on Positioning, Navigation and Communication. Dresden: IEEE, 2010: 45-49.
- [12] LI Wen-ling, JIA Ying-ming. Location of mobile station with maneuvers using an IMM-based cubature Kalman filter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(11): 4338-4348.
- [13] 鹿传国,冯新喜,张迪.基于改进容积卡尔曼滤波的纯方位目标跟踪[J].系统工程与电子技术,2012,34(1):28-33.
- LU Chuan-guo, FENG Xin-xi, ZHANG Di. Pure bearing tracking based on improved cubature Kalman filter[J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(1): 28-33. (in Chinese)
- [14] SHUSTER M D. Survey of attitude representations[J]. Journal of the Astronautical Sciences, 1993, 41(4): 439-517.
- [15] KARLGAARD C, SCHAUB H. Adaptive huber-based filtering using projection statistics: application to spacecraft attitude estimation[C]//AIAA. 2008 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Honolulu: AIAA, 2008: 1-20.

(上接第 112 页)

- Quality, 2009(5): 6-8. (in Chinese)
- [7] ZHAO Lin-hai, LI Zhan-kui, LIU Wei-ning, et al. An integrated uplink-signal detection method of railway balise system based on wavelet ridge[C]//IEEE. 2009 3rd IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications. Beijing: IEEE, 2009: 78-83.
- [8] 徐宁,张季良,王财进,等.列车高速运行条件下应答器车载测试设备关键技术[J].中国铁道科学,2010,31(4):131-137.
- XU Ning, ZHANG Ji-liang, WANG Cai-jin, et al. The crucial techniques of balise onboard test equipment for high speed train[J]. China Railway Science, 2010, 31(4): 131-137. (in Chinese)
- [9] 曾洁毅,赵会兵.应答器传输模块测试系统的研究[J].北京交通大学学报,2008,32(2):80-83.
- ZENG Jie-yi, ZHAO Hui-bing. Research on balise transmission module test system[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2008, 32(2): 80-83. (in Chinese)
- [10] 王瑞,赵会兵,王舒民.面向应答器传输模块测试的上行链路信号模拟器研究[J].铁道学报,2008,30(6):46-50.
- WANG Rui, ZHAO Hui-bing, WANG Shu-min. Research on uplink-signal simulator used for BTM test in balise system[J]. Journal of the China Railway Society, 2008, 30(6): 46-50.
- (in Chinese)
- [11] ZHAO Lin-hai, JIANG Ying. Modeling and simulation of balise up-link data transmission based on finite element method[J]. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 2012, 46(2): 867-874.
- [12] 胡爱群,苏杰.自适应FSK解调方法[J].应用科学学报,1996,14(2):167-172.
- HU Ai-qun, SU Jie. An adaptive demodulation method for FSK signals[J]. Journal of Applied Science, 1996, 14(2): 167-172. (in Chinese)
- [13] ZHAO Zhi-jin, FU Bai-cheng, XU Chun-yun. An adaptive demodulation method for MFSK signals under alpha-stable distribution pulse noise[C]//IEEE. 2008 International Congress on Image and Signal Processing. Sanya: IEEE, 2008: 65-69.
- [14] 李炎新.调制信号的自适应解调方法研究[D].南京:东南大学,2009.
- LI Yan-xin. Research on the method of adaptively demodulating the modulated signal[D]. Nanjing: Southeast University, 2009. (in Chinese)
- [15] 钱志文.基于自适应滤波的ASK解调方法及性能[J].工矿自动化,2003(3):14-16.
- QIAN Zhi-wen. A ASK demodulation method based on self-adaptive filtering and its performance[J]. Industry and Mine Automation, 2003(3): 14-16. (in Chinese)