

# 滤波补偿方法及其在瞬态检测中的应用\*

王永军

(东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110006) (沈阳铁路工程建设集团信息处理中心)

史捷

张旭

(沈阳军区指挥自动化站)

陈辉

(东北大学)

**摘要** 提出一种滤波补偿方法,并从理论上证明了该方法的正确性,从而找到一种既能抑制邻道干扰,又使受检信号不失真恢复的方法。将这一方法应用于瞬态检测实验系统,取得了预期的效果,解决了瞬态检测理论在实际应用中所遇到的关键问题。

**关键词** 瞬态检测理论,滤波补偿,快速付里叶变换

**分类号** TN 713

## The Filtering-compensation Method and Its Application in the Elimination of Adjacent-channel Interference

Wang Yongjun

(Northeastern University) (Shenyang Railway Engineering Construction Group Co. Ltd.)

Shi Jie

Zhang Xu

(Shenyang Military Area Automation Station) (Northeastern University)

Chen Hui

**Abstract** A method to eliminate the adjacent-channel interference by filtering-compensation is presented. An experimental system is set up to eliminate adjacent-channel interference and realize the transient detecting. The elimination of the adjacent-channel interference solves the problem which is inevitable in actual application of the transient detecting method.

**Key words** transient detecting theory, filtering-compensation, fast Fourier transform

## 1 引言

瞬态检测理论是一种检测弱确知离散信号的新理论,具有相关检测等方法无法比拟的优越性<sup>[1]</sup>。它不仅具有极强的抗码间干扰的能力,而且还能突破仙农信息论的束缚<sup>[2]</sup>,为提高通信速度和保密性提供理论依据<sup>[3]</sup>。但由于瞬态检测是利用信号脉冲的确知性(即变化规律),如果受检信号波形的变化规律与干扰的变化规律相类似,则用瞬态检测方法就无法得出正确的判决。因此,能否找到一种既能抑制邻道干扰,又能使受检信号基本不失真的方法,便成

为瞬态检测理论能否转化为实用技术的关键<sup>[4]</sup>。

本文提出一种滤波补偿方法,并从理论上证明了这种方法的正确性,同时设计构造了实验系统。研究表明,实验结果与理论推导完全一致,从而有效地解决了瞬态检测理论在实际应用中所遇到的问题。

## 2 频域滤波补偿方法

### 2.1 频域补偿原理

设所收到的视频受检信号序列如下

$$s(t) = S_j(t) = \sum_j^m R_j g(t - jT_s) =$$

$$R_0 g(t) + R_1 g(t - T_s) +$$

$$\dots + R_m g(t - mT_s) \quad (1)$$

\* 辽宁省自然科学基金项目(972194)

其中,  $g(t), \dots, g(t - mT_s)$  为载信脉冲,  $R$  为随机信息。则有

$$s(s) = S_j(s) = G(s) [R_0 + R_1 e^{-sT_s} + \dots + R_m e^{-msT_s}] \quad (2)$$

式中  $T_s$  为码元间隔, 其发码率  $R = 1/T_s$ 。

若取  $\omega T_s = 2\pi$ , 则发码率  $R$  与信道截止频率  $f_c$  的关系为  $R = f_c$ , 而

$$\begin{aligned} S(j\omega) &= S_A(\omega) + jS_B(\omega) = \\ &[G_A(\omega) + jG_B(\omega)][R_A(\omega) - jR_B(\omega)] \quad (3) \\ S[j(\omega + \omega)] &= S_A(\omega + \omega) + jS_B(\omega + \omega) = \\ &[G_A(\omega + \omega) + jG_B(\omega + \omega)][R_A(\omega) - jR_B(\omega)] \quad (4) \end{aligned}$$

由式(3)和(4)得

$$\begin{aligned} \frac{s(j\omega)}{s[j(\omega + \omega)]} &= \\ \frac{S_A(\omega) + jS_B(\omega)}{S_A(\omega + \omega) + jS_B(\omega + \omega)} &= \\ \frac{G_A(\omega) + jG_B(\omega)}{G_A(\omega + \omega) + jG_B(\omega + \omega)} \quad (5) \end{aligned}$$

式中  $G_A(\omega), G_B(\omega)$  为载信脉冲  $g(t)$  的谱且已知。若在  $0 \sim \omega \sim \omega$  频域区间内, 信号谱  $S_A(\omega)$  和  $S_B(\omega)$  可以测知, 则在诸频域区间内的信号谱为

$$\begin{aligned} S_A(k\omega + \omega) + S_B(k\omega + \omega) &= \\ [S_A(\omega) + jS_B(\omega)] \cdot \\ \frac{G_A(k\omega + \omega) + jG_B(k\omega + \omega)}{G_A(\omega) + jG_B(\omega)} \quad (6) \end{aligned}$$

即根据已知载信脉冲  $g(t)$  谱的诸比值为

$$\begin{aligned} G^k(\omega) &= \frac{G_A(k\omega + \omega) + jG_B(k\omega + \omega)}{G_A(\omega) + jG_B(\omega)} \\ k &= 0, 1, 2, \dots \quad (7) \end{aligned}$$

且为已知。根据在  $0 \sim \omega \sim \omega$  频率区间上所测知的信号谱  $S(j\omega) = S_A(\omega) + jS_B(\omega)$ , 便可求得诸大于  $\omega$  区间上的信号谱

$$\begin{aligned} S[j(k\omega + \omega)] &= \\ S_A(k\omega + \omega) + jS_B(k\omega + \omega) &= \\ S(j\omega) G^k(\omega) \quad (8) \end{aligned}$$

换言之, 在上述条件下, 只要测得在  $0 \sim \omega \sim \omega$  区间上的诸频谱, 则原信号  $s(t)$  的谱  $s(j\omega) =$

$\sum_{k=0} S[j(k\omega + \omega)]$  便可复现, 从而达到无失真补偿的目的。

## 2.2 对杂波干扰 $n(t)$ 的滤波作用

若信号  $s(t)$  被杂波  $n(t)$  所干扰, 则在  $0 \sim \omega \sim \omega$  区间所测知的频谱为

$$\begin{aligned} E(j\omega) &= S(j\omega) + N(j\omega) = \\ S_A(\omega) + jS_B(\omega) + N_A(\omega) + jN_B(\omega) \quad (9) \end{aligned}$$

故被补偿频谱(诸大于  $\omega$  区间上的谱)为

$$\begin{aligned} E &= [j(k\omega + \omega)] = E(j\omega) G^k(\omega) = \\ S(j\omega) G^k(\omega) + N(j\omega) G^k(\omega) \quad (10) \end{aligned}$$

由式(10)可见, 补偿后的受检信号可以无失真地复现。输出杂波干扰  $n^*(t)$  的谱和原干扰相比, 其谱乘以衰减因子  $G^k(\omega)$ 。由式(7)可知, 衰减因子  $G^k(\omega)$  将随  $K$  的增加而减少, 亦即随  $\omega$  的增加而减少, 故杂波干扰的高频分量将被削弱(滤除), 其作用相当于一个低通滤波器。因此, 这种方法既可无失真地重现受检信号, 又可滤除杂波干扰的高频分量。

## 2.3 发码率 $R > f_c$ 的情况

若取  $\omega T_s = \pi$ , 则发码率  $R$  和信道截止频率的关系为  $R = 2f_c$ , 于是式(4)可改写成

$$\begin{aligned} S_A(\omega + \omega) + jS_B(\omega + \omega) &= \\ - [G_A(\omega + \omega) + jG_B(\omega + \omega)] \cdot \\ [R_A(\omega) - jR_B(\omega)] \quad (11) \end{aligned}$$

将式(3)除以(11)得

$$\begin{aligned} \frac{S(j\omega)}{S[j(\omega + \omega)]} &= \\ - \frac{G_A(\omega) + jG_B(\omega)}{G_A(\omega + \omega) + jG_B(\omega + \omega)} \quad (12) \end{aligned}$$

同理

$$\begin{aligned} \frac{S(j\omega)}{S[j(2\omega + \omega)]} &= \\ - \frac{G_A(\omega) + jG_B(\omega)}{G_A(2\omega + \omega) + jG_B(2\omega + \omega)} \quad (13) \end{aligned}$$

由式(12)和(13)推出系数公式

$$\begin{aligned} G^k(\omega) &= \\ (-1)^k \frac{G_A(k\omega + \omega) + jG_B(k\omega + \omega)}{G_A(\omega) + jG_B(\omega)} \\ k &= 0, 1, 2, \dots \quad (14) \end{aligned}$$

既然已计算出补偿系数, 便可利用周期谱分析补偿方法来恢复受检信号的频谱。

## 3 实验系统

为验证频域补偿方法能够消除邻道干扰, 我们设计一实验系统如图 1 所示。整个系统分为信息发送和信息接收两部分。

### 3.1 信息发送部分

信息发送部分为验证滤波补偿方法能否有效抑制邻道干扰所需的信号源。实际的信息发送部分框图如图 2 所示, 它由码元形成装置、信号形成网络、

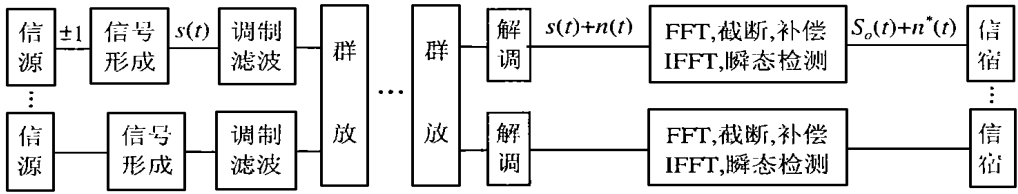


图1 采用滤波补偿方法消除邻道干扰的系统框图

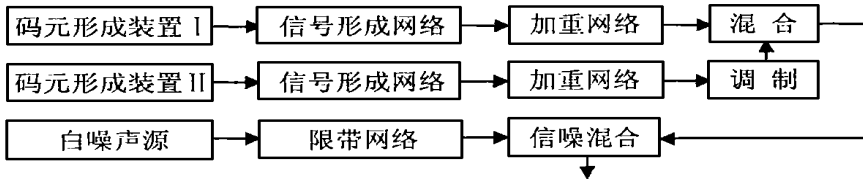


图2 信息发送部分框图

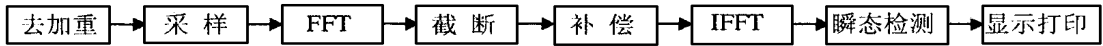


图3 信息接收部分框图

加重网络、混合调制网络、噪声源及信噪混合网络等组成。

码元形成装置 是由8096单片机和DAC1210组成的,其输出是  $\pm 1$  的阶跃信号。信号形成网络产生所要传输的载信脉冲  $g(t) = te^{-\alpha}$ 。加重网络的作用是提升信号的高频分量,有利于对信号进行有效检测。码元形成装置 是由TMS320-C25和DAC1210组成的,其作用是产生邻道码元信号。混合调制网络产生邻道干扰信号  $g(t) = te^{-\alpha} \cos \omega t$ 。噪声源产生限带噪声干扰,用于模拟实际的信号传输环境。信噪混合网络的输出是验证滤波补偿方法抑制邻道干扰所需的信号源。

### 3.2 信息接收部分

信息接收部分采用以TMS320-C50数字信号处理芯片为核心的开发系统。在该开发系统上完成采样、谱分析补偿、瞬态检测、判决等工作。信息接收部分的框图如图3所示

### 3.3 实验结果

实验中,发码采用二条码,载信脉冲形式为  $g(t) = te^{-\alpha}$ ,邻道信号  $g^c(t) = te^{-\alpha} \cos \omega t$ ,噪声为限带白噪声,噪声带宽  $B_N = 3.6\text{kHz}$ ,信道为理想信道,传输速率  $R = 4800\text{bps}$ 。在输入信号不同信噪比的情况下,对20480个码进行检测,结果如表1所示。实验结果表明,在信噪比  $\text{SNR} = 5\text{db}$  的情况下,

误码率  $P_e < 10^{-4}$ ,这一指标已达到目前先进的通信水平。随着器件和线路条件的改善,其指标还可以进一步提高。

表1 误码率统计表

信噪比	发码总数	误码个数	误码率
10	20480	0	0.000000
8	20480	0	0.000000
7	20480	0	0.000000
6	20480	0	0.000000
5.5	20480	0	0.000000
5	20480	2	0.000097
4.5	20480	16	0.000780
4	20480	114	0.005560

## 4 结 论

1) 滤波补偿方法既能抑制邻道干扰,使受检信号不失真地恢复,又能抑制高频杂波干扰;

2) 滤波补偿方法既适用于发码率  $R < f_c$  的情况,也适用于发码率  $R > f_c$  的情况,这为不失真地高速传输数据提供了保证。

3) 实验表明,在瞬态检测中用滤波补偿方法抑制邻道干扰是有效的。

## 参考文献

- 1 赵子尧. 一种提高数据传输速率的方法. 见: 1986 年全国数据通信学术会议论文集. 1986
- 2 张旭. 在瞬态检测中用无失真滤波器抑制邻道干扰. 东北大学硕士学位论文, 1999
- 3 张旭, 王永军. 一种抑制邻道干扰的无失真滤波器方法. 控制与决策, 1999, 14(S): 621~624

## 作者简介

王永军 男, 1946 年生. 现为东北大学信息科学与工程

学院教授. 研究方向为电子技术应用、数字信号处理和图象处理。

史捷 男, 1956 年生. 现为沈阳铁路工程建设集团信息处理中心工程师. 研究方向为计算机信息处理和计算机网络。

张旭 男, 1963 年生. 1999 年于东北大学获硕士学位, 现为沈阳军区指挥自动化站工程师. 研究方向为无线通信。

陈辉 男, 1971 年生. 1995 年毕业于东北大学, 现为东北大学计算中心助理工程师. 研究方向为多媒体技术。

(上接第 736 页)

## 参考文献

- 1 Shuuji Kajita. Dynamic walking control of a biped robot along a potential energy conserving orbit. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1992, 8(4): 431~437
- 2 P H Channon. Derivation of optimal walking motions for a bipedal walking robot. Robotica, 1992, 10(2): 165~172
- 3 W Thomas Miller. Real-time neural network control of a biped walking robot. IEEE Control System, 1994, 14(1): 41~48
- 4 刘志远. 双足机器人动态行走研究. 哈尔滨工业大学博士学位论文, 1991
- 5 纪军红. 造纸过程水分控制系统研究. 哈尔滨工业大学博士学位论文, 1994

## 作者简介

麻亮 男, 1969 年生. 1998 年于哈尔滨工业大学获博士学位, 现在哈尔滨工业大学从事博士后研究. 主要研究方向为机器人控制, 高精度伺服系统。

纪军红 男, 1972 年生. 1996 年于哈尔滨工业大学获硕士学位, 2000 年获得博士学位. 主要研究方向为机器人控制, 机器人学。

强文义 男, 1937 年生. 1960 年毕业于哈尔滨工业大学电机系, 现为该校控制工程系教授, 博士生导师. 主要研究方向为智能控制, 鲁棒控制, 过程控制。

傅佩琛 男, 1932 年生. 1960 年毕业于哈尔滨工业大学控制工程系, 现为该校控制工程系教授. 主要研究方向为机器人学, 机器人控制, 智能控制。

(上接第 739 页)

## 参考文献

- 1 解学书. 最优控制理论. 北京: 清华大学出版社, 1987
- 2 J C Willems. Dissipative dynamical system. Arch Rat Mech Anal, 1972, 45: 321~393
- 3 Van Der Schaft A J.  $L_2$ -gain analysis of nonlinear system and nonlinear state feedback  $H^\infty$  control. IEEE Trans on AC, 1992, 37(6): 770~784
- 4 P J Moyland, Brain D O Anderson. Nonlinear regulator theory and inverse optimal control problem. IEEE Trans on AC, 1973, 18(5): 683~691
- 5 Liu J S. Robustness of optimal nonlinear regulators under actuator and additive perturbations. Control

Theory and Advanced Technology, 1993, 8(4): 779~787

## 作者简介

谢世杰 男, 1966 年生. 1993 年于北京航空航天大学获硕士学位, 现为西北工业大学博士生. 研究方向为非线性系统理论和鲁棒控制。

于茜 女, 1976 年生. 1997 年毕业于西北工业大学, 现为西北工业大学硕士生. 研究方向为鲁棒控制。

吴旭光 见本刊 1999 年第 14 卷第 5 期第 437 页。

徐德民 见本刊 1993 年第 8 卷第 1 期第 218 页。