

·信号与信息处理·

## 一种基于微弱周期信号的自适应处理算法

郭兆坤<sup>1,2</sup>, 张仁杰<sup>1</sup>

(1.上海理工大学,上海 200093;2.上海驭光智能科技有限公司,上海 201102)

**摘要:**在传感器,特别是分布式光纤传感器领域,原始信号通常具有微弱性、周期性等特点,在经过接收电路后会出现不可避免的失真,对后续的信号处理带来极大的影响。在对微弱周期信号接收电路进行理论分析的基础上,提出一种基于微弱周期信号的自适应处理算法,采用该算法对接收信号进行数据处理可以显著降低输出信号的失真度,实现了对输出信号进行优化、补偿的一种通用处理方法。

**关键词:**自适应算法;接收电路;微弱周期信号;分布式光纤;传感器

**中图分类号:**TP274<sup>+.2</sup>;TP212.4<sup>+.4</sup>

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-1255(2013)-06-0053-05

## Self-adaptive Processing Algorithm Based on Weak Periodic Signal

GUO Zhao-kun<sup>1,2</sup>, ZHANG Ren-jie<sup>1</sup>

(1. University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Shanghai Light-steering Intelligence Science and Technology Ltd., Shanghai 201102, China)

**Abstract:** In the field of sensor, especially distributed fiber sensor, the primary signal has the characteristics of weakness and periodicity. After passing through the receiving circuit, the signal is distorted unavoidable and the following signal processing will be influenced greatly. On the basis of theory analysis of the receiving circuits of weak and periodic signals, a self-adaptive processing algorithm based on weak periodic signal is proposed. The algorithm is used to process receiving signals so that the distortion of output signals is reduced greatly. A common processing method for optimizing and compensating output signals is realized.

**Key words:** self-adaptive algorithm; receiving circuit; weak and periodic signal; distributed fiber; sensor

分布式光纤传感系统是一种以光纤作为传感元件,可以实现对传感光纤所处环境的温度、应变、振动等物理量进行实时分布式测量的全光纤传感系统。分布式光纤传感系统主要由(脉冲)光源、光学解调系统、传感光缆、接收电路、采集及数据处理系统等核心模块组成。其中接收电路一般由光电转换器件、前置放大电路及高增益放大电路部分组成。光电转换器件一般采用高灵敏度PIN或者APD<sup>[4]</sup>,这些器件可以把微弱的光信号转化为微弱的电流信号<sup>[7]</sup>,为了方便后续电路放大和处理,通常需要将电流信号再转化为电压信号。前置放大电路就是进行这种转换的电路,由于前端电流信号的是非常微弱的,极

易受到外界信号的干扰。通常的做法是把前置放大电路集成到PIN或APD中,即所谓的PIN-FET、PIN-TIA、APD-TIA等。接收电路由于需要比较大的增益(50 dB左右)和带宽(100 MHz左右),一般采用多级放大级联的方式进行设计,各级之间包括与前置放大电路之间采用电容耦合,以限制前级放大电路的直流偏置或者直流失调电压对后级放大电路的影响。同时,耦合电容的引入使接收信号产生了不同程度的失真,导致系统精度、一致性、抗干扰能力等性能的下降。根据接收电路的信号失真问题,提出一种基于微弱周期信号的自适应处理算法,用于修正、还原失真信号,保证和提高系统性能。

收稿日期:2013-08-25

作者简介:郭兆坤(1981-),男,本科,工程师,主要研究领域为光纤传感、数据处理。

## 1 基于微弱周期信号的自适应处理算法

### 1.1 微弱周期信号接收电路结构

微弱周期信号接收电路一般主要由光电转换器件、前置放大电路及主放大电路组成。

#### 1.1.1 光电转换器件

光电转换器件主要有光电二极管 PIN 和雪崩光电二极管 APD 两种,其中 APD 具有较高的灵敏度,但需要较高的偏置电压。可以把前置放大电路与 PIN 或者 APD 集成起来以直接输出电压信号,同时这种方式还可以提高系统抗干扰能力。

#### 1.1.2 前置放大电路

前置放大电路,通常位于接收电路的最前端,主要有两个作用,一是将光电转换器输出电流信号转化为电压信号,即所谓的跨阻放大;二是实现前级微弱信号的放大,前置放大电路通常要求低噪声、低增益和高带宽。

#### 1.1.3 主放大电路

主放大电路通常由多级放大电路通过电容耦合级联而成,实现接收电路的高增益放大功能。另外主放大电路与前置放大电路之间也是通过电容耦合的。

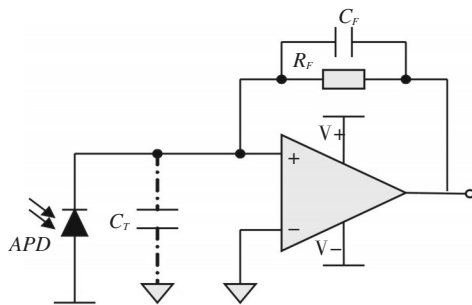


图1 APD-TIA 等效电路

## 1.2 基于微弱周期信号的自适应处理算法

微弱周期信号(如由入射光脉冲触发的分布式光纤传感系统传感散射信号)经过接收电路后,会对耦合电容等产生周期性的放电和充电现象,电容的电压值也随之产生周期的变化,而这些变化值又会耦合进传感信号,导致传感信号的失真。通过对微弱周期信号接收电路进行数学建模的方法,在失真传感信号与原始传感信号之间建立一种基于动态参数的数学联系,并给出动态参数的计算方法,从而实

现失真传感信号的补偿和修正。

文中提出的基于微弱周期信号的自适应处理算法以 APD-TIA、单级放大电路两种基本数学模型作为基础构建,并根据实际电路进行组合和级联。

### 1.2.1 APD-TIA 数学模型

图1所示的 APD-TIA 等效电路<sup>[1]</sup>是自带 TIA (transresistance amplifier) APD (avalanche photodiode) 内部结构的一种等效近似。其中  $C_T$  包含 APD 的结电容和放大器输入电容,  $C_F$  为放大器反馈电容器,用以维持放大器的稳定性。假设 APD 光输入信号用  $g(t)$  表示,转换因子(主要包括响应度和倍增因子)用  $M$  表示,经 APD 转换后电流信号为  $i(t)$ ,运放开环增益用  $A_1$  表示,APD-TIA 输出用  $u_o(t)$  表示。则根据电路原理可得式(1)和式(2)

$$i(t) = Mg(t) \quad (1)$$

$$i(t) = -\frac{1}{A_1} \left\{ [C_T + (1 + A_1)C_F] \frac{du_2}{dt} + \frac{(1 + A_1)u_2}{R_F} \right\} \quad (2)$$

假设  $A_1$  足够大,则式(2)变为

$$i(t) = -(C_F \frac{du_2}{dt} + \frac{u_2}{R_F}) \quad (3)$$

### 1.2.2 单级放大电路数学模型

如图2所示,设输入信号为  $u_i(t)$ ,输出信号为  $u_o(t)$ ,假设运算放大器开环增益足够大,根据电路原理可得式(4)

$$U_i(t) = \frac{R_1}{R_3(R_1 + R_F)C} \int_0^t u_o(\tau) d\tau + \frac{R_1(R_2 + R_3)}{R_3(R_1 + R_F)} u_o(t) + N \quad (4)$$

其中,  $N$  为电容  $C$  引入的直流偏量(实际上是一个缓变量)。

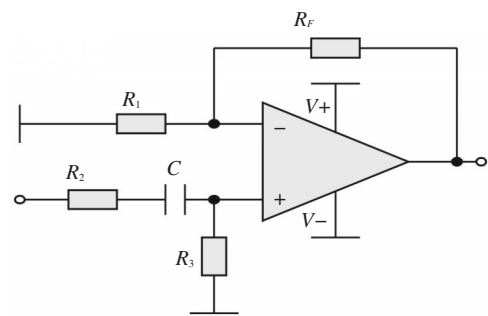


图2 单级放大电路

### 1.2.3 基于微弱周期信号的自适应处理算法

图3显示了两级放大电路的级联情况,文中以APD-TIA加三级放大电路的级联方式引入基于微弱周期信号的自适应处理算法,然后再推广到一般情况。为了方便下面的讨论,假设

$$\begin{cases} A = \frac{R_1}{R_3(R_1 + R_F)} \\ B = \frac{R_1(R_2 + R_3)}{R_3(R_1 + R_F)} \\ C = N \end{cases} \quad (5)$$

另外分别假设三级放大电路的上述两个参数分别是 $A_1, B_1, C_1; A_2, B_2, C_2$ 和 $A_3, B_3, C_3$ ;接收电路输入为 $i(t)$ ,三级级联放大电路输入为 $u_i(t)$ ,输出为 $u_o(t)$ ;输入输出信号分别为 $u_{i1}(t), u_{o1}(t); u_{i2}(t), u_{o2}(t)$ 和 $u_{i3}(t), u_{o3}(t)$ 。

则综合式(4)、式(5)可得

$$\begin{cases} u_{i1}(t) = A_1 \int_0^t u_{o1}(\tau) d\tau + B_1 u_{o1}(t) + C_1 \\ u_{i2}(t) = A_2 \int_0^t u_{o2}(\tau) d\tau + B_2 u_{o2}(t) + C_2 \\ u_{i3}(t) = A_3 \int_0^t u_{o3}(\tau) d\tau + B_3 u_{o3}(t) + C_3 \end{cases} \quad (6)$$

另外由于四级放大电路采用直接级联的方式,有下式成立

$$\begin{cases} u_{i1}(t) = u_i(t) \\ u_{i2}(t) = u_{o1}(t) \\ u_{i3}(t) = u_{o2}(t) \\ u_o(t) = u_{o3}(t) \\ u_i(t) = u_a(t) \end{cases} \quad (7)$$

综合式(6)和式(7)可得

$$\begin{aligned} u_i(t) = & A_1 A_2 A_3 \int_0^t \int_0^t u_o(\tau) d\tau + (A_1 A_2 B_3 + A_1 B_2 A_3 + \\ & B_1 A_2 A_3) \int_0^t u_o(\tau) d\tau + (A_1 B_2 B_3 + B_1 A_2 B_3 + \\ & B_1 B_2 A_3) \int_0^t u_o(\tau) d\tau + B_1 B_2 B_3 u_o(t) + A_1 A_2 C_3 \\ & \int_0^t d\tau + A_1 C_2 \int_0^t d\tau + B_1 B_2 C_3 + B_1 C_2 + C_1 \end{aligned} \quad (8)$$

从上式发现,输入信号经过APD-TIA、放大电路之后,可能出现一些失真,并可以通过式(3)和式(8)进行还原,但是式中的各项参数需要计算确定。

结合式(3)、式(7)和式(8),其中式(3)中的 $u_o(t)$ 即为式(8)中的 $u_i(t)$ 。 $i(t)$ 为原始输入信号,即分布式传感系统的原始周期信号,由有效信号和无效信号两部分组成,其中无效信号部分一般为无传感信

号时的直流分量(如在探测光缆末端到下一周期开始其值应该是0), $u_o(t)$ 为采集信号,为已知信号,可设

$$\begin{cases} D(t) = \frac{du_o(t)}{dt}, I_0(t) = U_0(t) \\ i(t) = 0(t > L(\text{原始周期信号有效部分对应的时间}), t < T(\text{信号周期})) \\ I_1(t) = \int_0^t u_o(\tau) d\tau, I_2(t) = \int_0^t \int_0^t u_o(\tau) d\tau, \\ I_3(t) = \int_0^t \int_0^t \int_0^t u_o(\tau) d\tau, \dots \\ L + M(\text{参与计算时长}) < T \end{cases} \quad (9)$$

结合式(3)、式(8)及式(9), $n+1$ 级接收电路(1级APD-TIA, $n$ 级放大电路)模型采用矩阵表示法

$$0 = \begin{bmatrix} D(L+1)I_n(L+1) \dots I_1(L+1)I_0(L+1) \\ (L+1)^{n-1} \dots (L+1)1 \\ D(L+2)I_n(L+2) \dots I_1(L+2)I_0(L+2) \\ (L+2)^{n-1} \dots (L+2)1 \\ \dots \\ \dots \\ D(L+M)I_n(L+M) \dots I_1(L+M)I_0(L+M) \\ (L+M)^{n-1} \dots (L+M)1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ M_n \\ \dots \\ M_1 \\ M_0 \\ \dots \\ M_{n-1} \\ \dots \\ N_0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中, $[M_n \dots M_0 N_{n-1} \dots N_0]^T$ 即为接收电路数学模型参数向量 $\bar{P}$ ,在实际应用中可以动态计算该参数向量。

至此可以得出基于微弱周期信号的自适应处理算法的完全表达式

$$i(t) = p \cdot D(t) + \sum_{i=0}^n M_i \cdot I_i(t) + \sum_{i=0}^{n-1} N_i \cdot t^i \quad (11)$$

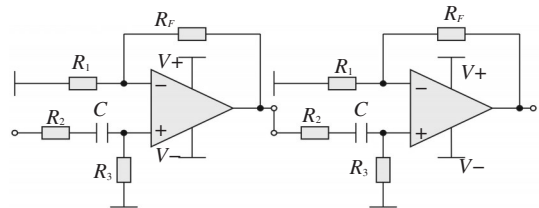


图3 双级放大电路

## 2 算法应用

基于微弱周期信号的自适应处理算法提供了一种可以动态处理、补偿类分布式光纤温度传感系统背向拉曼散射数据的通用方法。该算法不需要预先测定电路参数,而是根据分布式光纤传感信号在经过接收电路前后的不同特点自动计算所需电路参数,然后再通过该参数将接收电路输出失真信号补

偿到原始状态。下面以分布式光纤温度传感器(DTS)为例进行说明。

如图4所示,激光器以重复频率 $F$ 发射光脉冲,光脉冲经过传感光缆不断产生背向散射信号,背向散射信号(如Stokes和AntiStokes)有传感光缆返回分别进入到光电探测器1、2及后续放大处理电路。如上所述,散射信号(传感信号)经过放大电路后不可避免地引入了失真,需要对其进行补偿。假设传感光缆长度为 $L$ ,采集卡采样率为100 Msps,则其采样间隔为1 m,采集卡采样数据序列为 $U_0, U_1 \dots U_n \dots (0 \leq n < L)$ 为接收电路输出信号的采样值。

$$T = \frac{c}{F \times n \times 2} \quad (12)$$

其中, $T$ 为对应重复频率的周期长度(单位为m), $c$ 为光速, $n$ 为折射率。要求 $T > L$ ,即传感光缆长度受重复频率限制,为了进一步的数据处理, $T > L + M, M > 200$ 。这里的 $T, L$ 和 $M$ 对应于式(9)的 $T, L$ 和 $M$ 。根据离散化要求,将式(9)转换为

$$\begin{cases} D(n) = U_{n+1} - U_n, I_0(n) = U_n \\ i(t) = 0 (t > L \text{ (探测光缆长度对应的时长)}, t < T \text{ (信号周期)}) \\ I_1(n) = \sum_{k=0}^n U_k, I_2(n) = \\ \sum_{k=0}^n \sum_{p=0}^n U_p, I_3(n) = \sum_{k=0}^n \sum_{p=0}^k \sum_{q=0}^p U_q, \dots \\ L + M < T \end{cases} \quad (13)$$

根据式(13)及式(10)可计算出算法参数向量 $\bar{p}$ ,将式(13)代入式(11),可得

$$i(k) = \bar{p} \cdot D(k) + \sum_{i=0}^n M_i \cdot I_i(k) + \sum_{i=0}^n \sum_{i=0}^{n-1} N_i \cdot K^i, 0 \leq K < L \quad (14)$$

由式(14)可获得修正后的采样序列,完成DTS接收电路的修正工作。

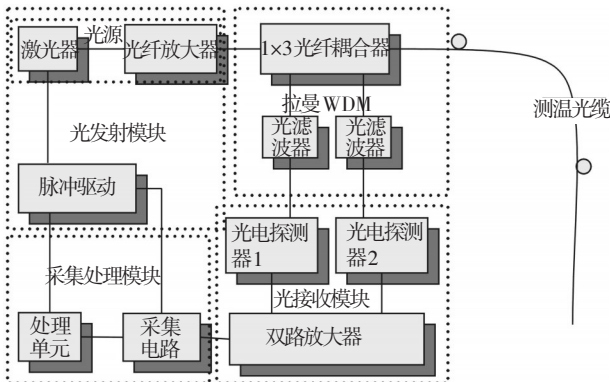


图4 分布式光纤温度传感系统

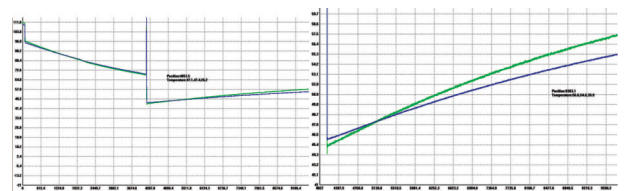
### 3 实验分析

实验以DTS(分布式光纤温度传感系统)为实验平台。由于自适应算法数据计算量大、数据元素数值差异大等特点,实验根据系统实际情况对算法做了一些改动,在实验中获得了很好的效果,下面是相关实验的一些数据和分析。

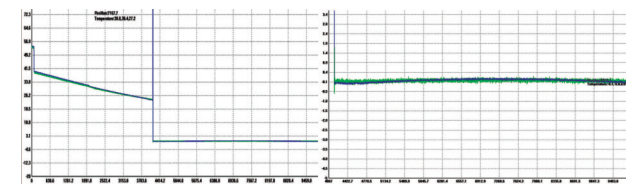
图5中的两条曲线分别代表了DTS系统中的Stokes和AntiStokes信号,即本实验待处理数据曲线。

图5a作图是DTS主机采集的原始数据曲线,右图是DTS主机采集的原始数据从光缆末端(余额4.1 km)开始的局部放大;从原始数据可以看到,原始数据明显受到了接收电路的影响,产生了比较严重的失真,特别是从光缆尾端开始,出现了明显的电容放电现象。因为正常情况下,光缆末端由于不再存在拉曼散射现象,所以应该接收不到任何信号,但是由于电容的存在,在光缆末端前面累积的电荷就会在光缆末端之后进行释放,从而产生了图5a右图所示的现象。

图5b左图是对图5a的原始数据进行算法处理后的数据,图5b右图是算法处理数据从光缆末端(余额4.1 km)开始的局部放大。采用算法处理后,两路信号得到了很好的修正,特别是对比图5b右图和图5a右图发现,本来明显的“放电曲线”被修正为在0附件随机波动的噪声。需要说明的是不仅尾端“放电曲线”得到了修正,更重要的是光缆段得到了充分的修正,为后来的温度解调奠定了良好的基础。



(a)原始曲线及局部放大



(b)算法修正曲线及局部放大

图5 分布式光纤温度传感系统数据及分析

对比图5a左图和图5b左图的曲线,其中的直流偏差是由于原始曲线经过接收电路以后由于电容的



存在,导致曲线的后面部分为负信号值,而采集电路的输入要求为正值,故在采集调理电路中加入固定直流偏置所致,算法修正中会自动清除这部分直流偏置的影响。

#### 4 结 论

文中提出的一种基于微弱周期信号的自适应处理算法可有效解决接收电路设计、参数变化等因素造成的信号失真问题。该处理算法主要作用在于将信号还原为“原始信号”,从根本上消除了信号失真造成的数据差异。信号失真的根源在于接收系统的频响特性,而这种频响特性从设计上很难达到理论要求。另外,外界环境的影响、器件的老化等对系统产生的影响随着时间的延长也逐步加大。文中提出的自适应处理算法,从信号动态补偿的角度,作了卓有成效的尝试。

#### 参考文献

- [1] Maithil Pachchigar. Design considerations for a transimpedance amplifier[J]. National Semiconductor Application Note, 2008.
- [2] CHANG Cheng, LI Zheng, ZHOU Yin-qing. Design of distributed optical fiber temperature sensor system using Raman back-scattering based on system engineering methodology [J]. ACTA PHOTONICA SINICA, 2001, 30.
- [3] Dakin J P. Temperature distribution measurement using Raman ratio thermometry[J]. SPIE (Fiber Optic and Laser Sensor III), 1985, 566: 249-253.
- [4] 赵洪志, 李乃吉, 赵达尊. 基于背向喇曼散射的分布式光纤温度传感器 APD 最佳雪崩增益的分析[J]. 光子学报, 1996, 25(11): 1028-1031.
- [5] 苏国彬, 李铮. 分布式光纤喇曼测温系统光接收机的动态范围及测温数据的修正[J]. 光子学报, 2002, 31(4): 475-479.
- [6] 吴宝峰. 全光纤智能监控防卫系统中微弱信号检测技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2009.
- [7] 刘吉, 赵辉, 王小燕, 等. 光电探测技术与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [8] 刘迪仁. 长距离分布式布里渊散射光纤传感技术研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2005.
- [9] 董贤子, 吴重庆, 付松年, 等. 基于 P-OTDR 分布式光纤传感中信息提取的研究[J]. 北方交通大学学报, 2003, 27(6): 106-110.
- [10] 徐升槐. 基于 OFDR 的分布式光纤传感技术的研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2001.
- [11] 任成, 张书练. 基于布里渊散射的分布式光纤传感器研究热点跟踪[J]. 激光技术, 2009, 33(5): 473-477.

### 欢迎利用期刊网站浏览本刊已发表文章

为了满足读者对《光电技术应用》期刊文章的快速、方便、阅读需求,《光电技术应用》期刊网站(网址为: <http://www.gdjsyy.com>),为读者提供了《光电技术应用》期刊 2009~2012 年已发表文章的在线浏览。读者可在过刊目录下,查阅 2009~2012 年期刊各期目录,点击文章题目或摘要,阅读文章全文。欢迎广大读者登陆期刊网站,及时了解《光电技术应用》期刊已发表文章的最新信息。

《光电技术应用》编辑部