

一种消除伴生调幅影响的 PGC 解调方法

王燕¹ 王恺晗¹ 郝彬² 张爱玲¹

¹天津理工大学计算机与通信工程学院, 教育部通信器件与技术工程研究中心,
天津市薄膜电子与通信器件重点实验室, 天津 300384

²天津光电通信技术有限公司 技术中心, 天津 300211

摘要 为了克服内调制时伴生调幅现象对相位生成载波解调结果的影响, 提出了一种相位生成载波解调改进算法。通过利用干涉信号中的三次谐波分量和基频分量进行解调, 有效地消除了伴生调幅对解调结果的影响。改进后的算法减少了一路混频信号的产生, 降低了数字解调时占用的内存及系统的采样频率。给出了改进算法的 Matlab 仿真和 CCS 硬件仿真实验结果, 分析验证了算法的可行性。

关键词 光纤光学; 直接调制; 伴生调幅; 相位生成载波; 干涉型光纤传感器

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.010605

Phase Generated Carrier Demodulation Algorithm for Eliminating Companion Amplitude Modulation

Wang Yan¹ Wang Kaihan¹ Hao Bin² Zhang Ailing¹

¹Tianjin Key Laboratory of Film Electronics and Communication Devices, Communication Devices and Technology Engineering Research Center of Ministry of Education, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China

²TOEC Technology Co., Ltd. Technology Center, Tianjin 300211, China

Abstract An improved phase generated carrier (PGC) demodulation algorithm is proposed to eliminate the effect of companion amplitude modulation in direct frequency modulation. The improved algorithm effectively eliminates the effect of companion amplitude modulation by using the third order harmonic component and the fundamental component. It reduces the generation of one mixing signal, cuts down the memory usage and the sampling frequency in the digital demodulation system. The Matlab simulation and CCS hardware emulation results verify the feasibility of the proposed algorithm.

Key words fiber optics; direct modulation; companion amplitude modulation; phase generated carrier; interferometric fiber optic sensor

OCIS Codes 060.2300; 060.2310; 060.2370; 060.5060

1 引言

相位生成载波(PGC)调制解调技术^[1-5]是一种无源零差解调技术,因其具有灵敏度高、线性度好、动态范围大等优点而广泛应用于干涉型光纤传感器的解调系统中。采用内调制的 PGC 解调方法无需引入附加物理模块,结构紧凑,易于实现传感器全光纤化、形成大规模光纤传感阵列及远距离传输信号。内调制在调制激光器的光频时,使得稳定的光功率上叠加了一个交变的光功率,即有伴生调幅出现^[7-11]。这种伴生调幅的影响使得解调过程复杂化,如果不能很好地消除其影响,将使最后解调出来的信号失真,甚至失去原来的面目,严重影响解调系统性能。

常见的消除伴生调幅的方法有:忽略直流光强的影响,通过选取合适的相位调制度 C 值减小伴生调幅的影响^[11];测量出伴生调幅表达式,直接与干涉信号相除^[12];测量出伴生调幅深度,在解调结果中进行补偿^[13];在干

收稿日期: 2013-09-30; 收到修改稿日期: 2013-09-30; 网络出版日期: 2013-12-14

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-07-0611)、天津理工大学项目资助(YB11-32, YB11-34)

作者简介: 王燕(1987—),女,硕士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: wangyan_sw@126.com

导师简介: 张爱玲(1973—),女,博士,教授,主要从事光纤通信方面的研究。

E-mail: alzhang2012@163.com(通信联系人)

涉信号的贝塞尔展开式中选取更高次谐波分量进行解调^[14];通过3×2耦合器引入双路干涉信号^[15]等。这些方法均获得一定的效果,但在实际的操作过程中不可避免地增加了成本、难度和复杂度,结果不是很令人满意。

本文提出了一种改进PGC解调算法,并对采用此算法的解调系统进行了研究。对改进的算法进行了仿真实验,结果表明,改进后的算法可以有效消除伴生调幅对解调结果的影响。不仅可以实现对单一频率信号的解调,而且可以实现对啁啾信号及振动信号等非单一频率信号的解调,即实现对任意相位调制型传感信号的解调。

2 PGC改进算法

在采用内调制的PGC解调系统中,由于内调制时伴有寄生调幅现象,干涉仪输出信号为^[11,15]:

$$I = A(1 + m \cos \omega_0 t) + B(1 + m \cos \omega_0 t) \cos[C \cos \omega_0 t + \varphi(t)], \quad (1)$$

式中 A, B 为常量, C 为相位调制度, $1 + m \cos \omega_0 t$ 是伴生调幅项, m 是激光器的调制深度, ω_0 是调频的载波频率; $\varphi(t) = D \cos \omega_s t + \varphi_0(t)$ 为待测信号与环境噪声共同引起的相位变化, ω_s 为传感信号频率, D 为待测信号幅度, $\varphi_0(t)$ 为初始相位和环境对相位的影响。

采用传统微分交叉相乘(DCM)算法^[14],PGC解调系统的最终解调结果为

$$B^2 GH J_1(C) J_2(C) \varphi(t) - \frac{B^2}{4} GH m^2 [J_0(C) - J_2(C)] [J_3(C) - J_1(C)] \varphi(t) - \frac{A}{2} G m \left\{ -B H J_2(C) \cos \varphi(t) + \frac{B}{2} H m [J_3(C) - J_1(C)] \sin \varphi(t) \right\}, \quad (2)$$

式中 $J_k(k=0,1,2,\dots)$ 为 k 阶贝塞尔函数, G, H 分别为一倍频载波和二倍频载波的幅值。由(2)式解调结果可以看出,解调结果中不仅包含了待测信号 ω_s 频率项,还包含了待测信号的高次谐波成分,因而将会导致解调结果出现严重失真,最后难以把待测信号正确地解调出来。如果能去除直流项 $GA m/2$ 的影响,则能实现信号的正确解调。考察直流项出现的原因,主要是伴生调幅中的 ω_0 项与一倍频载波 $G \cos \omega_0 t$ 相乘得到。因此,如果干涉仪输出信号在第一个乘法器与 $G \cos 3\omega_0 t$ 相乘,则可避免此直流项的产生^[14,16]。

根据以上分析,本文提出了一种改进的PGC算法,将干涉信号经过滤除直流处理后,一路与 $G \cos 3\omega_0 t$ 相乘后经过低通滤波器(LPF),另一路直接经过低通,得到两路低通后的信号再经过微分交叉相乘相关处理后实现信号的正确解调。改进算法后的解调原理框图如图1所示。

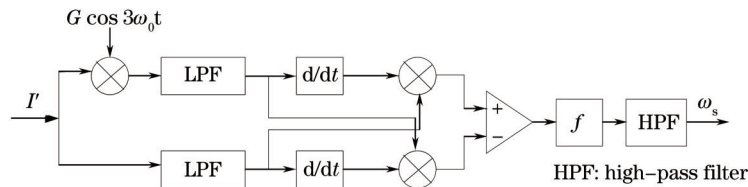


图1 改进的PGC解调方法

Fig.1 Diagram of the improved PGC Demodulation algorithm

滤除直流项后的干涉信号为

$$I' = A m \cos \omega_0 t + B(1 + m \cos \omega_0 t) \cos[C \cos \omega_0 t + \varphi(t)], \quad (3)$$

经过处理的干涉信号与三倍频混频低通滤波后得到

$$I_{LP1} = \frac{GB}{2} m [J_4(C) - J_2(C)] \cos \varphi(t) + G B J_3(C) \sin \varphi(t), \quad (4)$$

式中 J_4 为4阶贝塞尔函数。经过处理的干涉信号直接经过低通滤波后得到

$$I_{LP2} = B J_0(C) \cos \varphi(t) - B m J_1(C) \sin \varphi(t), \quad (5)$$

经微分交叉相乘相减积分后得到

$$GB^2 J_0(C) J_3(C) \varphi(t) - \frac{GB^2}{2} m^2 J_1(C) [J_2(C) - J_4(C)] \varphi(t). \quad (6)$$

最后经高通滤波实现信号的解调。

由(6)式可知,解调结果中没有谐波项的出现,只是幅度上发生一些变化。那么,通过选取合适的系统

参量可以完全消除伴生调幅的影响。

3 采样频率分析

改进算法后的解调系统在系统参量的选取、系统最低采样频率的分析上都有很大变化。这里系统参量主要是指 C 的选取,为使系统输出随 C 变化而变化的幅度最小,应有

$$d\left\{GB^2J_0(C)J_3(C) - \frac{GB^2}{2}m^2J_1(C)[J_2(C) - J_4(C)]\right\}/dC = 0. \quad (7)$$

考虑到一般情况下 $B < 1, m^2 \ll 1$, 上式简化为 $d[GB^2J_0(C)J_3(C)]/dC = 0$, 即输出信号的幅度主要取决于 $J_0(C)J_3(C)$, 只需使 $J_0(C)J_3(C)$ 取得最大值。

从(6)式可知,解调结果中不存在非线性项,不会引入新的谐波成分,但伴生调幅及调制深度 C 会对解调结果的幅值产生影响。在有效消除伴生调幅影响的同时,还应尽量减小 C 值的影响^[14-15]。当 C 的取值为 1.73, 3.99, ... 时, $J_0(C)J_3(C)$ 取得极大值,其变化趋势趋于 0。因此,根据以上分析可知,调制深度最优值 C 取 1.73。

根据干涉信号的贝塞尔展开式及图 2 可知,干涉信号的频谱是以载波频率 ω_0 为间隔进行频谱搬移,载波各次谐波 $k\omega_0$ 处的幅度正比于 $J_k(C)$ 进行重新分配的过程。根据贝塞尔函数的衰减特性, $J_k(C)$ 的值随着 k 的增大而减小。 $C=1.73$ 时, $J_0(1.73)=0.3806$, $J_1(1.73)=0.5793$, $J_2(1.73)=0.2891$, $J_3(1.73)=0.0891$, $J_4(1.73)=0.02$, ...。 $J_3(1.73) < 0.1$, 故干涉信号的频谱主要集中在 $3\omega_0 + \omega_d$ 内。

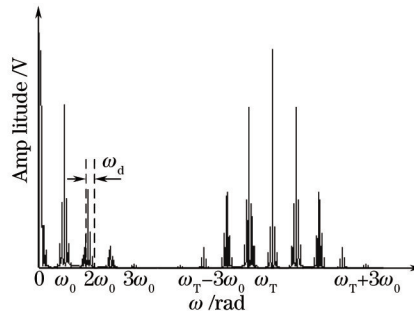


图 2 时域采样对频谱搬移示意图

Fig.2 Diagram of spectral displacement by time-domain sampling

根据无失真恢复信号频谱不混叠条件及图 2 可知,系统最低采样频率要满足 $\omega_t - (3\omega_0 + \omega_d) > 3\omega_0 + \omega_d$, 即 $\omega_t > 2(3\omega_0 + \omega_d)$ 。由改进的 PGC 解调方法可以看出解调理论上最多用到干涉信号频谱的三次载波项附近的频谱,根据采样定理系统理论上的最低采样频率为 $\omega_t \geq 2(3\omega_0 + \omega_d)$, 系统最低采样频率达到理论上的最小值。

由以上分析可知:系统最低采样频率与一般 PGC 解调方法相比并无增加,不会对硬件系统的采样频率的要求过高,限制系统复用的路数。

4 仿真实验结果分析

在(1)式中取 $A=3, B=1, m=0.30, C=1.7, D=1$, 载波频率 $f_c=20$ kHz, 采样频率 $F_s=240$ kHz, 传感信号频率 $f_s=500$ Hz。图 3 为采用改进后算法解调结果。图 4 为传统 DCM 算法解调结果。由图 3 可知,改进后算法可以实现信号的正确解调,消除了伴生调幅所引起的待测信号谐波成分的存在。由图 4 可知,传统 DCM 算法无法消除由于伴生调幅带来的影响,解调结果中因包含有待测信号的谐波成分造成信号失真,无法实现信号的正确解调。

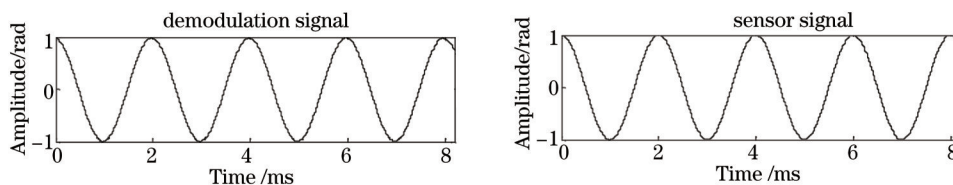


图 3 改进算法解调结果

Fig.3 Demodulation result of improved algorithm

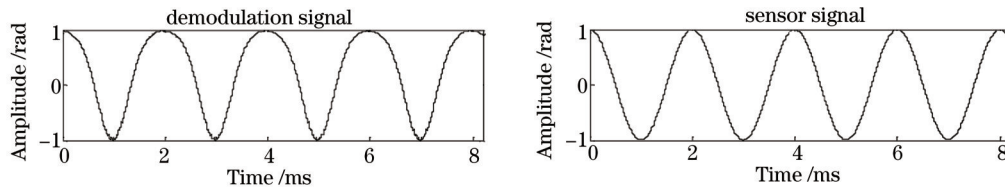


图4 传统DCM算法解调结果

Fig.4 Demodulation result of traditional DCM algorithm

图5为改进算法对啁啾信号的解调结果,啁啾信号为 $0.5 \cos[2\pi(f_2 t + f_1 t^2)]$, $f_2=3500$ Hz, $f_1=50$ Hz。图6为改进算法对一周周期冲击响应信号的振动信号解调,周期冲击响应信号为 $\exp(-\alpha t)\sin(2\pi f_2 t)$,其中 $\alpha=8$, $f_2=3$ Hz。综合图5、图6解调结果可知,改进算法不仅可以实现对啁啾信号的解调,而且可以实现对周期冲击响应信号的振动信号解调。

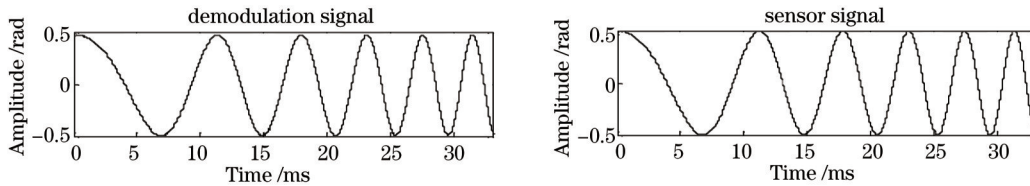


图5 改进算法对啁啾信号解调结果

Fig.5 Demodulation result of improved algorithm for chirp signal

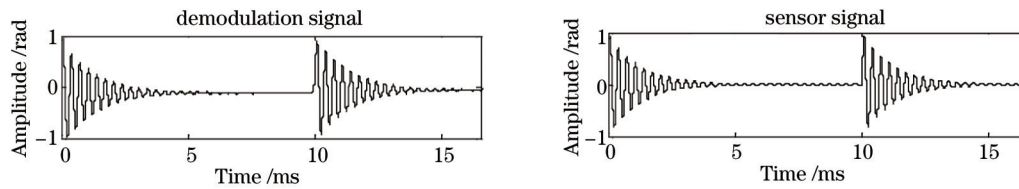


图6 改进算法对周期冲击响应信号解调结果

Fig.6 Demodulation result of improved algorithm for periodic impulse response signal

实际应用中 CCS 硬件仿真平台选用定点数字信号处理(DSP)芯片 TMS320VC5509a,数据采用 Q14 定标。图7为采用与图3相同参数的 CCS 解调结果,图8为采用与图6相同参数的周期冲击信号 CCS 解调结果。对比图7上方解调信号与下方待测传感信号图形可知,改进算法可以有效地消除伴生调幅所引起的信号失真,实现单频信号的正确解调。由图6、图8解调结果可知,改进算法可以实现对周期冲击信号的解调。

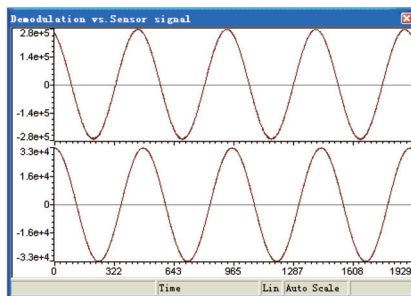


图7 改进算法 CCS 解调结果

Fig.7 CCS demodulation result of improved algorithm

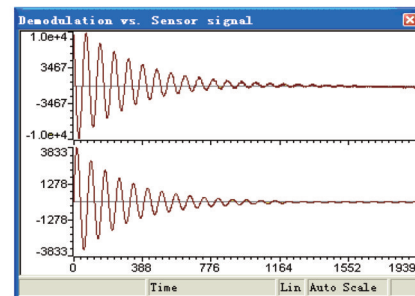


图8 改进算法对周期冲击信号 CCS 解调结果

Fig.8 CCS demodulation result of improved algorithm for periodic impulse response signal

根据以上分析可知,改进算法可以实现单频传感信号的正确解调,同时可以实现对啁啾信号及周期冲击信号等非单一频率信号的正确解调,验证了算法的可行性。

5 结 论

在一般 PGC 算法的基础上,通过改变算法中某些参量的方法,提出了一种改进的 PGC 解调算法。改进

算法通过选取合适的 C 值能够有效地消除伴生调幅对解调信号带来的影响,改善了解调后信号的质量。改进算法不仅可以实现对单一频率信号的解调,可以实现对啁啾信号及振动信号等非单一频率信号的解调,即实现对任意相位调制型传感信号解调。对于改进算法分别进行了 Matlab 和 CCS 仿真验证,证明了算法的可行性。该算法对于设计干涉型光纤传感器解调系统具有重要的参考意义。

参考文献

- 1 Lin Huizu, Ma Lina, Hu Zhengliang, *et al.*. Multiple reflections induced crosstalk in Inline TDM fiber Fabry-Perot sensor system utilizing phase generated carrier scheme[J]. J Lightwave Technol, 2013, 31(16): 2951-2958.
- 2 Wang Lin, He Jun, Li Fang, *et al.*. Ultra low frequency phase generated carrier demodulation technique for fiber sensors [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(4): 0405001.
王 林,何 俊,李 芳,等.用于探测极低频信号的光纤传感器相位生成载波解调方法[J].中国激光,2011,38(4): 0405001.
- 3 Tang Weijie, Fu Lei, Chen Shufen, *et al.*. Realization of measuring micro-vibration based on phase generated carrier modulation-demodulation method and interference analysis[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0214001.
唐伟杰,付 雷,陈淑芬,等.相位生成载波调制解调法测量微振动的实现及干扰分析[J].中国激光,2013,40(2): 0214001.
- 4 Guo Jingjing, Li Min, Tong Bin. Dual-fiber Fabry-Perot displacement sensor based on direct phase demodulation[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0805005.
郭晶晶,黎 敏,童 斌.基于直接相位解调的双光纤法布里-珀罗位移传感器[J].中国激光,2012,39(8): 0805005.
- 5 Shi Qingping, Zhang Huayong, Wang Liwei, *et al.*. A new phase generated carrier demodulation method based on fixed phase delay[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(8): 0805002.
施清平,张华勇,王利威,等.基于固定相位延迟的相位生成载波检测方法[J].中国激光,2011,38(8): 0805002.
- 6 Xiao Hao, Li Fang, Liu Yuliang. Crosstalk analysis of a fiber laser sensor array system based on digital phase-generated carrier scheme[J]. J Lightwave Technology, 2008, 26(10): 1249-1255.
- 7 Kuang Wu, Zhang Min, Wang Liwei, *et al.*. Data acquisition method for digital phase generated carrier demodulation system of optical fiber interferometers[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(8): 1086-1090.
匡 武,张 敏,王利威,等.光纤干涉仪数字相位生成载波解调系统数据采集单元设计[J].中国激光,2005,32(8): 1086-1090.
- 8 He Jun, Wang Lin, Li Fang, *et al.*. An ameliorated phase generated carrier demodulation algorithm with low harmonic distortion and high stability[J]. J Lightwave Technol, 2010, 28(22): 3258-3265.
- 9 He Jun, Li Fang, Zhang Wentao, *et al.*. High performance wavelength demodulator for DFB fiber laser sensor using novel PGC algorithm and reference compensation method[C]. SPIE, 2011, 7753: 775333.
- 10 Wang Guoqing, Xu Tuanwei, Li Fang. PGC demodulation technique with high stability and low harmonic distortion[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2012, 24 (23): 2093-2096.
- 11 Cao Jiannian, Zhang Likun, Li Xuyou, *et al.*. Phase modulation and demodulation of interferometric fiber-optic hydrophone using phase-generated-carrier techniques[J]. Acta Optica Sinica, 1999, 19(11): 1536-1539.
曹家年,张立昆,李绪友,等.干涉型光纤水听器相位生成载波调制及解调方案研究[J].光学学报,1999,19(11): 1536-1539.
- 12 Shi Qingping, Tian Qian, Wang Liwei, *et al.*. Performance improvement of phase-generated carrier method by eliminating laser-intensity modulation for optical seismometer[J]. Opt Eng, 2010, 49(2): 024402.
- 13 Tian Changdong, Wang Liwei, Zhang Min, *et al.*. Performance improvement of PGC method by using lookup table for optical seismometer[C]. SPIE, 2009, 7503: 750348.
- 14 Bo Linhou, Liao Yanbiao, Zhang Min, *et al.*. The improvement on PGC demodulation method based on optical fiber interferometer sensors[J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 9(34): 1324-1327.
柏林厚,廖延彪,张 敏,等.干涉型光纤传感器相位生成载波解调方法改进与研究[J].光子学报,2005,34(9): 1324-1327.
- 15 Shi Qingping, Wang Liwei, Zhang Min, *et al.*. Frequency-modulated phase generated carrier demodulation for eliminating companion amplitude modulation[J]. J Optoelectronics·Laser, 2011, 22(2): 180-184.
施清平,王利威,张 敏,等.一种消除伴生调幅的光源调频型相位生成载波解调方法[J].光电子·激光,2011,22(2): 180-184.
- 16 Li Yang, Su Xiaoxing, Liu Yan, *et al.*. A PGC demodulation method based on the fundamental frequency mixing[J]. J Optoelectronics·Laser, 2012, 23(5): 933-936.
李 阳,苏晓星,刘 艳,等.基于基频混频的相位生成载波调制解调方法研究[J].光电子·激光,2012,23(5): 933-936