

基于FBG差分群时延的微压力传感方法研究*

彭 晖**, 房晓丽

(湖南信息学院,长沙410151)

摘 要:提出了一种基于光纤光栅差分群时延(Differential Group Delay, DGD)的微压力传感新方法,给出了理论分析和实验结果。在外界压力作用下,由于压力致双折射效应,光纤光栅两个线偏振光的群时延发生变化。仿真结果表明,DGD峰值与压力在一定的测量范围内存在线性关系。实验结果证明,在0~0.3 MPa的压力条件下,实验压力灵敏度为424.2 ps/MPa,实验结果与理论分析吻合较好,验证了该方法的可行性。

关键词:微压力;光纤光栅;差分群时延;压力灵敏度

中图分类号: TN29 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2022)04-0298-05

A Novel Fiber Bragg Grating Sensor for Weak Pressure Measurement Based on the DGD

PENG Hui, FANG Xiaoli

(Hunan Institute of Information Technology, Changsha 410151, CHN)

Abstract: A novel sensor based on the Differential Group Delay (DGD) of FBG was proposed in this paper. The evolution of the DGD with respect to pressure was studied theoretically and experimentally. A theoretical model for pressure sensing by use of DGD was built and numerical simulation was also carried out. The experimental pressure sensitivity was 424.2 ps/MPa at 0 MPa to 0.3 MPa. Good agreements between experiment results and numerical simulations could verify the feasibility of the method.

Key words: weak pressure; Fiber Bragg Grating; differential group delay; pressure sensitivity

引 言

光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)是20世纪末出现的一种新型无源光器件,具有高灵敏度、低损耗、易制作、性能稳定可靠、易与系统及其它光纤器件连接等优点,因此在光通信、光纤传感等领

域得到了广泛应用。外界物理量如应力、温度、压力等会引起光纤光栅的有效折射率或光栅周期的变化,从而导致了FBG中心波长的位移,通过测量中心波长的变化实现对这些物理量的监测。目前广泛使用的光纤光栅传感器都是这种基于波长调制的传感器^[1-7]。

收稿日期:2022-07-09

* 基金项目:湖南省教育厅科学研究项目(19B395、22B1026)

作者简介:彭 晖(1979—),男,副教授,研究方向为光通信及光传感技术;(E-mail:njnice99@163.com)

房晓丽(1985—),女,副教授,研究方向为传感及信号处理技术。

** 通讯作者

外界信号还可能会引起光的强度、波长、相位、偏振态等性质的变化。随着技术的发展,无论是在光通信还是光传感领域,FBG的偏振特性越来越受到关注,为FBG传感器开辟了一片新天地。C.Caucheteur等人利用光纤光栅的偏振相关损耗进行横向应力测量^[8-10],偏振特性也开始应用于磁场传感领域^[11-12]。因此,研究光纤光栅双折射的偏振特性具有重要的意义^[13-15]。

众所周知,横向力或压力会使FBG中引起显著的双折射,双折射会改变FBG的谐振条件,产生两个分离的Bragg波长^[16-17],而两个谐振峰的波长差依赖于光纤光栅在其半径上所承载的压力的大小。实验证明,裸光纤的压力灵敏度仅有6 pm/MPa,在小负载时,FBG的两个谐振峰分离不明显,利用光谱分析仪无法测得相应的波长^[18]。基于此,很多研究者将目光聚集在通过对光栅进行封装来提高其灵敏度。

文章提出了一种新的测量机理,即通过观察光纤光栅透射光的偏振特性进行微压力测量。从理论上分析差分群时延随外界微压力的变化趋势,发现DGD峰值在一定压力范围之内与外界压力之间存在线性关系,并通过实验进行验证,证明该方法的正确性及有效性。

1 理论分析

为了便于测量,设计如图1所示的实验结构。FBG与平行支撑光纤一起被放置在两块支撑板之间,在平板上施加负载。该结构利用聚合封装技术^[19]将压力转换为横向负载到FBG。压力与横向荷载的关系为 $F=P \times S$,其中 S 为支撑板的面积。

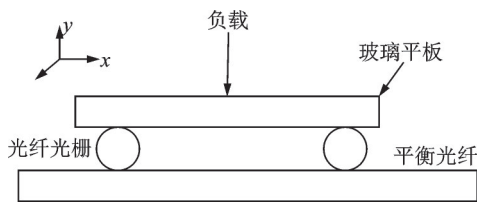


图1 FBG实验结构图

Fig.1 Experimental structure diagram of FBG

当FBG受到如图1所示的压力时,在 y 方向上,由于是压缩,因此应力是负的,而在 x 与 z 方向,应力是正的。当受压区域远远大于光栅直径时, z 方向的应力 σ_z 可以忽略不计,仅计 σ_x 和 σ_y 。为了简化光纤受力模型,假设不影响光栅间距,根据给定的压

力,可以得到各个方向的应力为^[20]:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{2F}{\pi LD} \\ \sigma_y &= -\frac{6F}{\pi LD} \\ \sigma_z &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中 D 是光栅直径, F 是外界施加的压力, L 则为光栅受力长度。施加的压力会导致有效折射率的各向异性,可以表示为^[21]:

$$\begin{aligned} \Delta n_x &= -\frac{n_{\text{eff}}^3}{2E} \left([p_{11}(1+\nu)(1-\nu) - p_{12}(1+\nu)\nu] \sigma_x + [p_{12}(1+\nu)(1-\nu) - p_{11}(1+\nu)\nu] \sigma_y \right) \\ \Delta n_y &= -\frac{n_{\text{eff}}^3}{2E} \left([p_{11}(1+\nu)(1-\nu) - p_{12}(1+\nu)\nu] \sigma_y + [p_{12}(1+\nu)(1-\nu) - p_{11}(1+\nu)\nu] \sigma_x \right) \end{aligned} \quad (2)$$

式中 Δn_x 和 Δn_y 是 x 和 y 方向的有效折射率变化量, n_{eff} 是在无压力作用时的有效折射率。 p_{11} 和 p_{12} 为光弹性张量, E 和 ν 分别为杨氏模量和泊松比(对普通光纤而言 $E=74.52$ Gpa, $\nu=0.17$, $p_{11}=0.121$, $p_{12}=0.27$)。因此 x 和 y 方向上的折射率可以表示为 $n_x=n_{\text{eff}}+\Delta n_x$ 和 $n_y=n_{\text{eff}}+\Delta n_y$,由此可得双折射为:

$$\Delta n = \Delta n_y - \Delta n_x \quad (3)$$

双折射 Δn 定义为两个正交模式即 x 和 y 模之间的有效折射率差。由于双折射 Δn 的存在, x 和 y 模在光纤中有着不同的传播常数。在笛卡儿坐标系中,FBG的传输特性可以用对角传输琼斯矩阵 J 来描述,传输信号对应的琼斯向量可以表示为:

$$\begin{pmatrix} E_{i,x} \\ E_{i,y} \end{pmatrix} = J \cdot \begin{pmatrix} E_{i,x} \\ E_{i,y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_x & 0 \\ 0 & t_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{i,x} \\ E_{i,y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_x E_{i,x} \\ t_y E_{i,y} \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中 $t_{x(y)}$ 是 $x(y)$ 模所对应的FBG传输系数。 $(E_{i,x}, E_{i,y})^T$ 是入射光的琼斯向量。

$$\begin{pmatrix} E_{i,x} \\ E_{i,y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_x e^{j\theta_x} \\ M_y e^{j\theta_y} \end{pmatrix} \quad (5)$$

此处 $M_{x(y)}$ 和 $\theta_{x(y)}$ 分别是入射光 $x(y)$ 分量的幅度与相位,可以通过耦合模方程得到 $t_{x(y)}$ 为^[22]:

$$t_{x(y)} = \frac{j\alpha_{x(y)}}{\sigma_{x(y)} \sinh(\alpha_{x(y)} L) + j\alpha_{x(y)} \cosh(\alpha_{x(y)} L)} \quad (6)$$

式中

$$\begin{aligned} \alpha_{x(y)} &= \sqrt{k^2 - \sigma_{x(y)}^2} \\ k &= \frac{\pi \delta n}{\lambda} \\ \sigma_{x(y)} &= \frac{2\pi(n_{\text{eff},x(y)} + \delta n)}{\lambda} - \frac{\pi}{\Lambda} \end{aligned} \quad (7)$$

此处 L 、 λ 和 δn 分别表示光栅长度、光栅周期和光栅调制深度。

通过(4)、(5)和(6)式,可以得到光栅透射光的群时延:

$$\tau_i = \frac{d\theta_i}{d\omega} = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d\theta_i}{d\lambda} \quad (8)$$

x 和 y 两个模式的群时延谱存在如下关系:

$$\tau_x \approx \tau_y(\lambda + \Delta\lambda) \quad (9)$$

波长间隔 $\Delta\lambda$ 与压力致双折射直接相关。压力致双折射未导致光栅布拉格波长明显的变化,但却对差分群时延影响较大。差分群时延(DGD)的定义是两正交模式群时延之差,可用下式表示^[23]:

$$DGD(\lambda) \cong |\tau_x(\lambda) - \tau_y(\lambda)| \quad (10)$$

$$DGD(\lambda) = |\tau_x - \tau_y| =$$

$$\left| \frac{n_{\text{eff},x} k^2 \sinh(\alpha_x L) \cos(\alpha_x L) - \alpha_x \sigma_x^2 L}{c \alpha_x k^2 \cosh^2(\alpha_x L) - \alpha_x \sigma_x^2} - \frac{n_{\text{eff},y} k^2 \sinh(\alpha_y L) \cosh(\alpha_y L) - \alpha_y \sigma_y^2 L}{c \alpha_y k^2 \cosh^2(\alpha_y L) - \alpha_y \sigma_y^2} \right| \quad (11)$$

2 仿真分析

光信号在FBG中传播时,压力会影响透射谱,同样也会影响DGD。本节将关注压力作用下光纤光栅的透射谱以及DGD的变化情况。为了得到仿真结果,光栅参数设定为: $L=1\text{ cm}$ 、 $\Lambda=535\text{ nm}$ 、 $\delta n=5e^{-5}$ 。

图2给出了在不同压力作用下的透射谱,从图中可以看出,压力的变化对透射谱影响并不大,不同压力条件下的透射谱无明显变化。

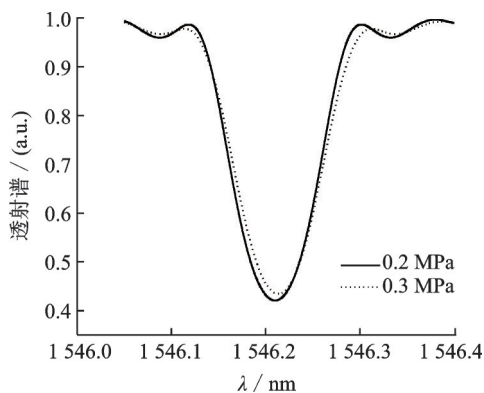


图2 不同压力作用下的透射谱

Fig.2 Transmitted spectrum of FBG with different pressures

图3给出了不同压力作用下的DGD,可以看到压力的变化对DGD的影响非常明显,并且压力的变化并未影响DGD的谱形。

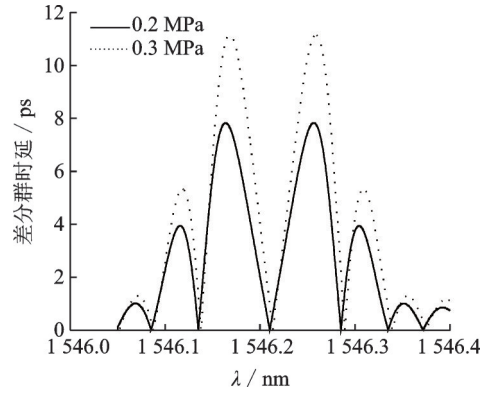


图3 不同压力作用下的差分群时延谱

Fig.3 DGD evolution with different pressures

图4给出了DGD峰值与压力之间的关系图,从图中可以看出,DGD峰值与压力在一定范围内呈线性关系。如果压力超出这一范围,则应选择波长检测方案而不能采用文中所提方案。基于DGD的测量方案更适用于弱压力传感器,而且相关文献证明可以通过改变设计参数如光栅长度、调制深度等来提高系统的量程和灵敏度^[24]。

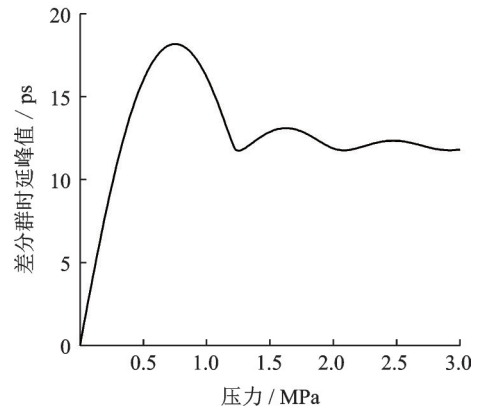


图4 差分群时延峰值与压力关系图

Fig.4 The maximum DGD amplitude versus pressure

3 实验结果

实验中采用的光纤光栅是项目团队自行设计并制作,其参数如下: $n_{\text{eff}}=1.455$ 、 $\Lambda=535\text{ nm}$ 、 $\delta n=5e^{-5}$ 以及 $L=10\text{ mm}$,采用的支撑板尺寸为: $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ (质量忽略不计)。图5给出了测量系统实验示意图,实验中采用光矢量分析仪(OVA)同时作为光源、检测器以及处理器;偏振控制器控制光源输出光的偏振态,确保入射进光纤光栅的是线偏振光;砝码作为外界压力作用于支撑板,进而形成对光栅的压力。光栅的透射光经过OVA进行DGD测量并分析,OVA的测量精度可达 10^{-1} ps ^[25]。

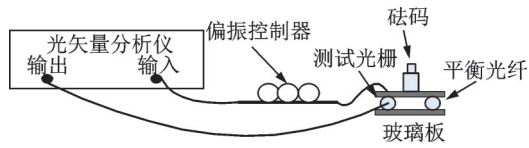


图5 基于FBG的压力测量系统

Fig.5 Pressure measurement system based on FBG

图6给出了不同压力作用下光栅的透射谱,从图中可以看出压力的变化并未对光栅的透射谱产生明显的影响,图中中心波长的漂移是实验温度的变化所导致而非压力所致。

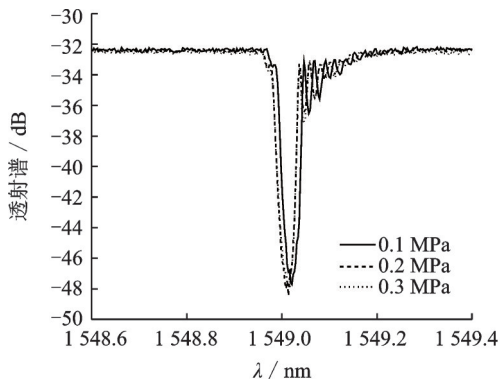


图6 光栅透射谱随压力变化情况

Fig.6 Variation of the transmission spectra with pressure

图7给出了在无外界压力情况下光栅透射光的DGD,图中DGD并非为零,这主要是因为光纤中存在固有双折射而导致的固有DGD。

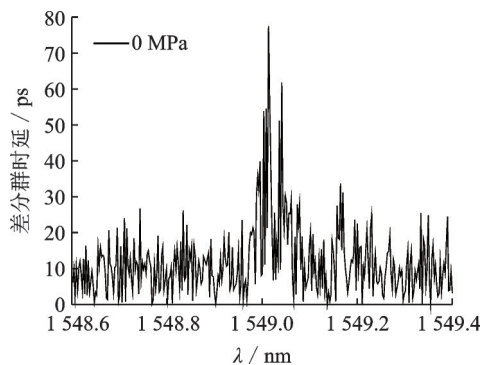


图7 无外界压力时的差分群时延谱

Fig.7 The DGD without pressure

图8给出了不同外界压力情况下光栅透射光的DGD,图中可以明显的看出随着外界压力的增加,DGD谱的峰值也在不断的增加,这与前述的理论仿真相吻合。

表1中给出了在0~3 000 g的范围内,步长为200 g砝码的作用下,根据支撑板面积换算成相应的压力,通过OVA测量得到的DGD峰值。根据表1

的数据得到了压力与DGD峰值的关系如图9所示,实验值与拟合曲线吻合较好,DGD峰值随外界压力增加呈线性增加趋势。实验中采用的OVA的精度为 10^{-1} ps,由图9可以得到实验的压力测量灵敏度为424.2 ps/MPa,实验结果与理论仿真结果基本吻合。

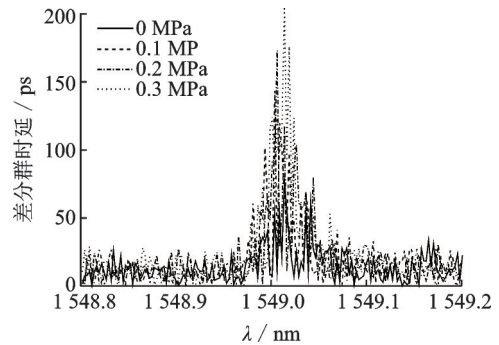


图8 差分群时延谱随压力变化情况

Fig.8 Variation of the DGD with pressure

表1 不同压力条件下实验测量得到的差分群时延峰值

Tab.1 The experimental maximum DGD under different pressure

砝码重量/g	压力/MPa	差分群时延峰值/ps	砝码重量/g	压力/MPa	差分群时延峰值/ps
0	0	77.448 68	1 600	0.16	118.570 35
200	0.02	83.244 7	1 800	0.18	126.911 98
400	0.04	85.511 92	2 000	0.2	143.740 04
600	0.06	91.258 75	2 200	0.22	154.973 57
800	0.08	95.313 6	2 400	0.24	172.887 42
1 000	0.1	101.488 3	2 600	0.26	178.192 55
1 200	0.12	105.259 46	2 800	0.28	190.866 89
1 400	0.14	115.471 67	3 000	0.30	205.371 18

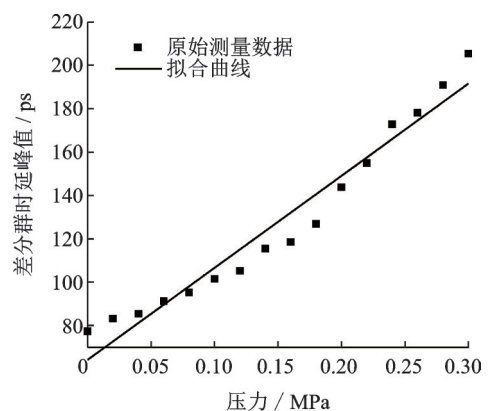


图9 压力与实测DGD峰值关系

Fig.9 The results of the experiment

4 结 论

给出了一种新颖、简单的直接利用光纤光栅测量压力的方法,该方法基于光纤光栅的DGD峰值

与外界压力的大小呈线性关系,数值仿真和实验结果证实了该方案的可行性。实验结果与理论分析基本一致,证明利用该方案进行压力测量是可行的,其测量灵敏度可达 424.2 ps/MPa,而且通过选择合适的光栅设计参数,该灵敏度还可以提高。与传统基于波长检测的光纤光栅传感器相比,该方法更适合于微压力测量,在液位和水声等测量领域具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] He Xuelan, Wang Donghui, Wang Xianbin, et al. A cascade fiber optic sensors for simultaneous measurement of strain and temperature[J]. IEEE Sensor Letters, 2019, 3(11):3502304.
- [2] Zhang L, Zhu Z, Yin M, et al. A large dynamic range interferometric fiber strain sensor[C]. 2019 18th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), Huangshan, 2019.
- [3] Li Xuefeng, Zhang Han, Qian Chunya, et al. A new type of structure of optical fiber pressure sensor based on polarization modulation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020(130): 106095.
- [4] Park J, Kwon Y S, Ko M O, et al. Dynamic fiber Bragg grating strain sensor interrogation with real-time measurement [J]. Optical Fiber Technology, 2017, 38:147-153.
- [5] Wang Yiping, Huang Xiaoqin, Ming Na. Fiber optic transverse load sensor based on polarization properties of pi-phase-shifted fiber Bragg grating[J]. Optics Communications: A Journal Devoted to the Rapid Publication of Short Contributions in the Field of Optics and Interaction of Light with Matter, 2015, 342:152-156.
- [6] Li Chao, Ning Tigang, Zhang Chan, et al. Liquid level measurement based on a no-core fiber with temperature compensation using a fiber Bragg grating[J]. Sensors and Actuators, A. Physical, 2016, 245:49-53.
- [7] Esposito F, Srivastava A, Iadicco A, et al. Multi-parameter sensor based on single Long Period Grating in Panda fiber for the simultaneous measurement of SRI, temperature and strain [J]. Optics and Laser Technology, 2019, 113:198-203.
- [8] Caucheteur C, Guo T, Albert J. Polarization-assisted fiber Bragg grating sensors: Tutorial and review [J]. J. Lightwave Technol. 2017, 35(16):3311-3322.
- [9] Descamps F, Caucheteur C, Megret P, et al. Distribution profiling of a transverse load using the DGD spectrum of chirped FBGs[J]. Optics Express, 2015, 23(14):18203-18217.
- [10] Caucheteur C, Bette S, Garcia-Olcina R, et al. Influence of the Grating parameters on the polarization properties of fiber Bragg gratings[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(8):1000-1010.
- [11] Su Yang, Zhu Yong, Zhang Baofu, et al. Use of the polarization properties of magneto-optic fiber Bragg gratings for magnetic field sensing purposes[J]. Opt. Fiber Technol., 2011, 17(3): 196-200.
- [12] Peng Hui, Su Yang, Li Yuquan. Evolution of polarization properties in circular birefringent fiber Bragg gratings and application for magnetic field sensing[J]. Opt. Fiber Technol., 2012, 18(4):177-182.
- [13] Peng Hui, Zhou Bihua, Wang Hui, et al. A new method for resolving the influence of circular birefringence in FBG weak pressure sensor[J]. Measurement, 2014, 58:280-285.
- [14] Peng Hui, Su Yang, Ye Zhenxing, et al. A novel fiber Bragg grating sensor for weak pressure measurement based on the Stokes parameter[J]. Optical Fiber Technology, 2012, 18(6): 485-489.
- [15] Su Yang, Zhou Hua, Wang Yiming, et al. A novel polarization demodulation method using polarization beam splitter (PBS) for dynamic pressure sensor [J]. Optical Fiber Technology, 2018, 41:69-73.
- [16] Xu M G, Reekie L, Chow Y T, et al. Optical in fiber grating high pressure sensor[J]. Electron. Lett., 1993, 29(4):398-399;
- [17] Xu M G, Geiger H, Dakin J P. Fiber grating pressure sensor with enhanced sensitivity using a glass bubble housing [J]. Electron. Lett., 1996, 32(2):128-129.
- [18] 张颖, 刘志国, 郭转运, 等. 高灵敏度光纤光栅压力传感器及其压力传感特性的研究[J]. 光学学报, 2002, 22(1):89-91.
- [19] Takahashi N, Yoshimura K, Takahashi S. Characteristics of fiber Bragg grating hydrophone [J]. IEICE Transactions on Electronics, 2000, E83-c(3): 275-281.
- [20] Wagreich R B, Atia W A, Singh H, et al. Effects of diametric load on fibre Bragg gratings fabricated in low birefringent fibre[J]. Electronics Letters, 2002, 32(13):1223-1224.
- [21] Lawrence C M, Nelson D V, Udd E, et al. A fiber optic sensor for transverse strain measurement [J]. Experimental Mechanics, 1999, 39(3):202-209.
- [22] Erdogan T. Fiber grating spectra[J]. J. Lightwave Technol., 1997, 15:1277-1294.
- [23] Bette S, Caucheteur C, Olcina R G, et al. Relationship between chromatic dispersion and differential group delay in weakly birefringent fiber gratings[J]. IEEE PTL, 2008, 20(6):437-439.
- [24] 彭晖, 苏洋, 徐俊华, 等. 光纤光栅结构对磁场测量性能的影响[J]. 光电子技术, 2008, 28(4):232-236.
- [25] Luna Technologies, Inc. Optical Vector Analyzer User Guide [Z]. Document Version 4.7 for VOA control software version 3.7.1©2006.