

·光电器件与材料·

## 基于DSP的分布式光纤光栅传感解调技术的研究

李新海<sup>1</sup>, 李冰<sup>2</sup>

(1.北京交通大学电子信息工程学院,北京 100044;2.潍坊港华燃气有限公司,山东 潍坊 264001)

**摘要:**基于F-P腔的可调谐滤波法,是一种实用性较好、发展较为成熟的分布式光纤光栅传感解调方案。波峰检测技术是这种方案的关键所在。重点研究了频谱相关法实现波峰检测的原理,对分布式光纤光栅传感系统传感信号间的波形串扰进行了分析,基于TMS320C6416定点DSP实现了相应的频率相关算法,在计算精度和运算速度两方面都得到了较理想的结果。对于分布式光纤光栅传感解调技术的研究具有一定的理论指导意义和参考价值。

**关键词:**波峰检测;光纤光栅传感;频谱相关;数字信号处理。

中图分类号:TP212.44

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2013)-01-0032-06

## Research on Sensing Demodulation Technology of Distribution Fiber Grating Based on DSP

LI Xin-hai<sup>1</sup>, LI Bing<sup>2</sup>

(1. School of Electronics and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Weifang Hongkong-China Gas Limited Co., Weifang 264001, China)

**Abstract:** Tunable filtering method based on F-P cavity is a distribution fiber grating sensing demodulation method with good practicability and mature development. Peak detecting technology is the key to this method. Spectrum correlation method is emphasized to realize the principle of peak detecting. Waveform interference among sensing signals of distribution fiber grating sensing system is analyzed. Based on TMS320C6416 fixed point digital signal processing (DSP) chip, a correlation algorithm of relative frequency is realized and the algorithm has an ideal result in both calculation precision and operation speed. Research on the technology has certain theoretical guidance meaning and reference value.

**Key words:** peak detecting; fiber grating sensing; spectrum correlation; digital signal processing (DSP)

光纤传感技术是自20世纪70年代末快速发展起来的崭新的传感技术,由于其抗电磁干扰、可测量范围广、传输损耗小等优点,得到了广泛关注。光纤光栅传感技术基于其自身波长调制的这个特点,可以通过波分复用实现分布式测量,成为了光纤传感技术中的研究热点<sup>[1-2]</sup>。分布式光纤光栅传感系统的解调方案直接影响传感系统的动态范围、检测精度等重要参数。在众多已经报道的解调方案中,边缘滤波法<sup>[3]</sup>结构简单,但是测量精度低;干涉解调法<sup>[4-6]</sup>的测量精度高,但是由于易受环境干扰,实用性不强;匹配光栅滤波法<sup>[7-8]</sup>对匹配光栅的制作工艺要求较高;基于

F-P腔的可调谐滤波法<sup>[9]</sup>测量范围大、精度较高,是目前最有发展前景且技术较为成熟、实用性较好的解调方法之一。

基于F-P腔的可调谐滤波法的关键是对传感信号进行波峰检测<sup>[10]</sup>,波峰检测最直接简单的方法是通过光谱仪来进行检测,但是高精度光纤光谱仪价格非常昂贵,体积庞大,不利于面向实际的应用。利用DSP(digital signal processing)技术,结合其强大的信息处理能力和较快的运行速度,可满足计算精度和实时性的要求;并且,DSP技术价格合理、可编程、灵活性大、易于大规模集成。根据分布式光纤光栅

传感信号的特征,采用F-P腔的可调谐滤波法,研究了基于频率相关的波峰检测算法,对波形串扰进行了仿真分析,应用定点DSP实现了相应的频率相关的波峰检测算法,与浮点DSP技术相比,不仅计算精度可以与浮点运算相媲美,而且运算速度比浮点运算要快。

## 1 基于F-P腔的可调谐滤波法分布式光纤光栅传感系统

图1为基于F-P腔的可调谐滤波法分布式光纤光栅传感系统的原理框图。该系统主要包括宽带光源、耦合器、传感光栅阵列、可调谐F-P腔、光电探测器、A/D转换和数字信号处理部分等。宽带光源发出的宽带光信号经过耦合器入射在同一根光纤上的多个传感光栅上,反射回来的传感光信号经过耦合器进入导通频带可调的F-P腔,可调谐F-P腔可以扫描出所有的窄带反射光谱,光电探测器将此光信号转换为电信号,再通过A/D转换之后交给数字信号处理部分进行解调。

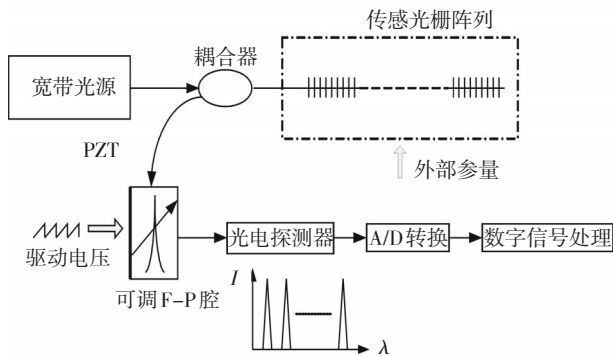


图1 基于F-P腔的可调谐滤波法分布式光纤光栅传感系统的原理框图

传感光栅阵列上分布的各个光栅在外部参量(温度、压力等)的作用下,中心波长会产生偏移,式(1)和式(2)分别为光栅中心波长随温度和压力的变化关系。其中,  $\Delta\lambda_g$  为光栅中心波长偏移量,  $\Delta T$  和  $\Delta\epsilon$  分别为温度和压力变化量,  $\alpha_s$  和  $\zeta_s$  分别为光纤的热膨胀系数和热光系数,  $P_e$  为光纤的有效弹光系数。通过检测光纤光栅中心反射波长偏移量便可确定外部温度的变化量<sup>[11]</sup>。

$$\frac{\Delta\lambda_g}{\lambda_g} = (\alpha_s + \zeta_s)\Delta T \quad (1)$$

$$\frac{\Delta\lambda_g}{\lambda_g} = (1 - P_e)\Delta\epsilon \quad (2)$$

由传感光栅阵列反射回来的传感信号是一系列的高斯脉冲,经过耦合器进入可调谐F-P腔,F-P腔相当于一个窄带滤波器,只有满足相干条件的某些特定波长的光才可以发生干涉,可以对光纤光栅阵列反射回来的光波进行波长检测。

在外加扫描电压的作用下PZT可以产生形变,改变F-P腔的腔长,使透过F-P腔的光信号的波长发生改变。如果F-P腔的透射波长和光纤光栅的反射波长重合,探测器就能探测到最大光强,此时给PZT所加电压即对应着光纤光栅的反射波长。在一个检测周期内,通过控制扫描电压范围,实现顺序检测出传感光栅阵列的各个波长。

## 2 频谱相关波峰检测算法

在数据处理端得到的是一系列与光栅阵列各个中心波长相对应的类似于高斯脉冲的电信号,准确定位各个脉冲波峰的位置常用波峰检测算法。在波峰检测算法中,常用的有直接比较法、质心检测法、二次差值数值微分法、一般多项式拟合法、高斯公式拟合法和频谱相关法等<sup>[12-13]</sup>。由于在分布式光纤光栅传感系统中信号解调端接收到的传感光栅反射谱信号相对于原始反射谱信号只有位置的偏移,反射谱的形状并没有发生变化,二者的相关性很强,因此,使用频谱相关法来进行波峰位置的检测比较有效。由于通常噪声信号与有效信号的相关性很小,因而这种方法有很好的噪声抑制能力<sup>[14]</sup>。

光纤光栅反射谱可以用高斯函数来进行描述

$$S_1(\lambda) = S_0 \exp[-4 \ln 2 \left(\frac{\lambda - \lambda_B}{\Delta}\right)^2] \quad (3)$$

其中,  $S_0$ 、 $\lambda_B$  和  $\Delta$  分别为光纤光栅反射谱的峰值反射率、布拉格波长和半高带宽。受外部参量的影响,光纤光栅的反射谱布拉格波长产生的  $\lambda_S$  的漂移,此时的反射谱可以表示为

$$S_2(\lambda) = S_1(\lambda - \lambda_S) = S_0 \exp[-4 \ln 2 \left(\frac{\lambda - \lambda_B - \lambda_S}{\Delta}\right)^2] \quad (4)$$

$S_1$  和  $S_2$  的互相关函数定义为

$$r_{12}(x) = \int_0^{\infty} S_1(\lambda - x) S_1(\lambda - \lambda_S) d\lambda = r_1(x - \lambda_S) \quad (5)$$

式(5)中,  $r_1$  为  $S_1$  的自相关函数,可以看出,二者的互相关函数与  $r_1$  只存在着相移  $\lambda_S$ 。而自相关函数有最大值且在零点处取得,分析上式可知,当  $x = \lambda_S$

时,互相关函数  $r_{12}$  取得最大值。因此只要通过计算基准信号  $S_1$  的自相关函数和它与反射信号  $S_2$  的互相关函数,并计算出二者最大值对应坐标的差值,就可以得到波长偏移量  $\lambda_s$ 。

由于实际处理的信号都为离散序列,上述计算公式表示为

$$r_{12}[x] = \sum_{k=0}^{N-1} S_1[k-x]S_2[k-k_s] = r_1[x-k_s] \quad (6)$$

因此,对于光纤光栅传感器解调端,可以先构造一个基准的光栅反射谱,计算它和单个传感光栅反射谱的互相关函数,通过确定互相关函数最大值对应的坐标推导出反射波长的偏移量。

分析式(6)的运算量。信号长度为  $N$ ,当计算任意一个时移  $x$  的互相关函数值  $r_{12}$  时,需要  $N$  次实数乘法和  $N-1$  次实数加法。当  $x$  取遍所有可能的值时,总共需要  $N^2$  次实数乘法和  $N(N-1)$  次加法。可以看出,相关函数的直接运算量是信号长度的平方函数。因此,随着信号长度的增大,相关函数的直接运算量将急剧增大。需要一种快速的计算方法来减少运算量。

根据相关定理<sup>[15]</sup>,对于离散信号,相关函数可以通过离散傅里叶变换(DFT)和离散傅里叶反变换(IDFT)来计算。设两个有限长序列  $x(n)$  与  $y(n)$  的长度分别为  $N_1$  和  $N_2$ ,利用FFT来求二者的互相关函数的步骤如下:

(1)使用圆周相关来代替线性相关,选择周期  $N \geq N_1 + N_2 - 1$ ,并且取  $N = 2^m$ ,以便使用FFT,将  $x(n)$  与  $y(n)$  补零至长为  $N$

(2)用FFT计算二者的离散傅里叶变换  $X(k)$  和  $Y(k)$   $0 \leq k \leq N-1$

(3)计算  $R_{XY}(k) = X^*(k)Y(k)$  ( $X^*(k)$  是  $X(k)$  的共轭)

(4)对  $R_{XY}(k)$  做IFFT,得到  $r(n)$

对于两个长度都为  $N$  的离散时间序列  $x(n)$  与  $y(n)$ ,将  $x(n)$  与  $y(n)$  补零至长  $2N$ ,则利用FFT计算二者的互相关函数需要:  $20N + 12N \lg 2N$  次实数乘法和  $22N + 18N \lg 2N$  次实数加法。与直接计算相关函数需要的  $N^2$  次实数乘法和  $N(N-1)$  次实数加法相比,运算量大大减小。图2为直接计算相关函数和FFT计算相关函数加法和乘法的运算量对比示意图。特别是随着信号长度的增加,FFT运算量的节省越可观。

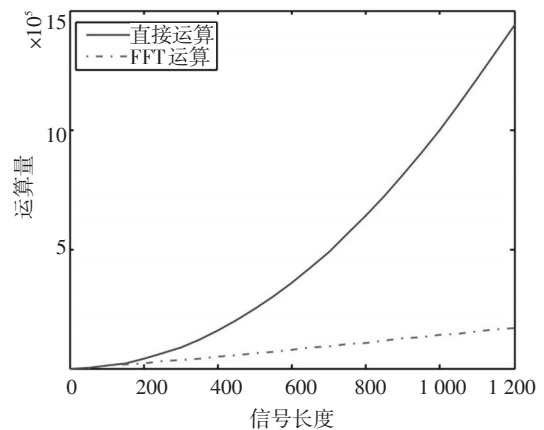


图2 直接计算与FFT计算相关函数运算量对比

### 3 波形串扰的影响

在设计分布式光纤光栅传感系统时,为了保证相邻光栅传感器返回的传感信号不相互串扰,根据传感量的需求,设计时两个相邻传感光栅反射谱之间必须保留一段波长间隔,如图3中所示,  $\delta$  为相邻反射谱  $\lambda_i$  和  $\lambda_j$  之间的波长间隔。然而,这样做势必会减小分布式光纤光栅传感系统可复用的光栅传感器的数量;而且,实际测量环境中的外部参量(温度、应变)的变化范围可能会超出系统设计时预测的范围,相邻光栅信号发生串扰。相邻光栅反射谱发生串扰,势必会破坏各自反射谱的波形完整性,影响频谱相关法的准确度。

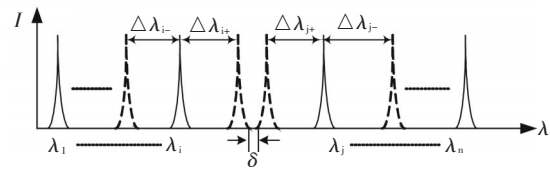


图3 光纤光栅阵列反射谱示意图

设分布式传感光栅阵列上有两个相邻光栅,中心波长分别为  $1550.4 \text{ nm}$  和  $1550.8 \text{ nm}$ ,  $3 \text{ dB}$  带宽均为  $0.1 \text{ nm}$ 。中心波长间隔  $0.4 \text{ nm}$ 。二者信号长度均为  $400$  个采样点。如图4所示,逐步减小二者的中心波长间距,使二者波形发生重叠,并且考虑白噪声对信号的影响,利用频谱相关法来计算二者的中心波长。使用两个信号重叠处的信号强度  $r$  来表示二者波形重叠的程度。显而易见,  $r$  越大表示波形重叠部分越大。

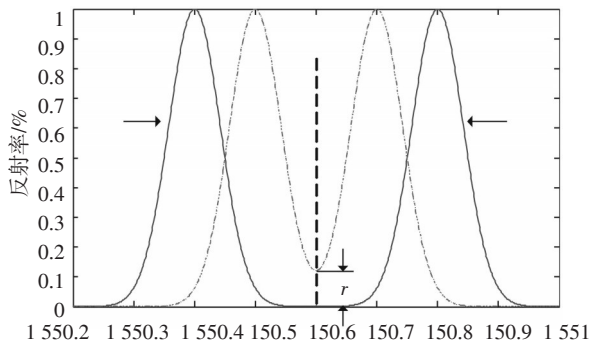


图4 相邻反射谱重叠示意图

表1为加载了10 dB和20 dB白噪声情况下的仿真结果,计算误差为中心波长位置计算值与实际值的差值,多次计算求平均值,以采样间隔为单位(一个采样间隔为0.001 nm)。波长偏移量小于0.10 nm时,二者波形重叠很小,对检测结果几乎无影响;波长偏移量大于0.16 nm时,误差很大,故表中没有列出对应结果。从表中数据可以看出,在 $r$ 绝对值大于3 dB时(波形重叠部分较小),计算误差小于一个采样间隔,即小于0.001 nm, $r$ 绝对值小于3 dB之后(波形重叠部分较大),计算误差大于一个采样间隔,并且随着 $r$ 绝对值的减小而逐渐增大。因为在1550 nm处的温度系数约为10 pm/°C,采样间隔0.001 nm,检测精度为0.1 °C,所以在 $r$ 绝对值大于3 dB时,检测误差小于最小精度,可以忽略不计; $r$ 值小于3 dB之后,则会开始产生误差。

表1 波形串扰对解调算法的影响

偏移量 (nm)	$r$ 值/(dB)	计算误差(采样间隔)	
		10 dB 噪声	计算误差(采样间 隔)20 dB 噪声
.....	.....	.....	.....
0.100	-9.2	0.75	0.15
0.110	-7.0	0.79	0.25
0.120	-5.1	0.78	0.27
0.130	-3.5	0.65	0.30
0.135	-3.2	0.76	0.37
0.140	-2.2	1.15	1.06
0.145	-1.7	2.04	2.11
0.150	-1.2	3.50	3.46
0.160	-0.6	7.40	7.30
.....	.....	.....	.....

因此,当相邻波形重叠较小时(不超过3 dB临界点),使用频谱相关法进行波峰检测是可行的。

### 4 波峰检测算法的DSP实现

以TMS320C6416 定点DSP硬件开发平台来实现波峰检测算法。基于DSP的应用开发的关键:一是算法在DSP芯片上的执行速度;二是算法在DSP芯片上的计算精度。而频谱相关算法中最主要的部分是FFT和逆FFT运算,因此这部分的运算性能直接影响算法的执行速度和计算精度。FFT算法是很成熟的算法,但是常见的C语言编写的代码是对浮点数据进行运算的。可以将C的浮点FFT运算代码直接移植在TMS320C6416 DSP芯片上运行,这样做的优点是浮点运算,计算精度高;缺点是在定点DSP上进行浮点运算,不能发挥出DSP的优势,运算速度较慢。

TI公司推出的以TMS320C6000系列芯片为基础的DSPLib库函数,包含了一系列用于信号处理的函数,这些函数是与汇编语言编写优化的,并可以由C语言调用。这些程序经常用在计算强度大、执行速度重要的实时运算中。通过使用这些程序,可以取得较用C语言编写的相关程序快的多的运行速度。DSPLib可进行的运算有:FFT运算、滤波与卷积运算、自适应滤波运算、数学函数运算、三角函数运算、矩阵运算等。

DSPLib库函数分别提供了16位和32位的FFT运算。由于浮点运算转换为定点运算时难免会有精度损失,为了减小精度损失,选择32位的FFT运算。库函数DSP\_fft32x32和DSP\_ifft32x32分别完成32位数据的FFT和逆FFT。

如图5中所示的传感反射谱信号,虚线表示各个反射谱原来的中心波长位置,分别1549.512 nm、1550.536 nm、1551.560 nm、1552.584 nm和1553.608 nm,3 dB带宽均为0.1 nm。采样间隔为0.001 nm,设信噪比为10 dB。第一个和第二个反射谱之间有一定的串扰。利用DSP\_fft32x32和DSP\_ifft32x32函数对如图5所示的光

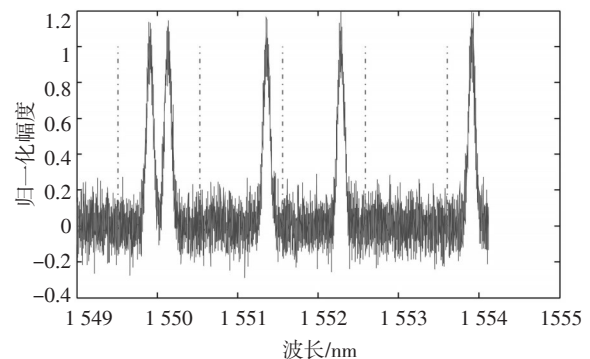


图5 光纤光栅传感反射谱信号

表2 不同计算方法结果对比

计算方法	反射谱1	反射谱2	反射谱3	反射谱4	反射谱5
理论值	1 549.912	1 550.536	1 551.360	1 552.284	1 553.308
Matlab	1 549.912	1 550.535	1 551.360	1 552.285	1 553.308
DSP浮点	1 549.912	1 550.535	1 551.360	1 552.285	1 553.308
DSPlib定点	1 549.911	1 550.535	1 551.361	1 552.285	1 553.30

光纤栅传感反射谱信号进行波峰检测,结果及与Matlab仿真运算、DSP浮点运算结果对比如表2所示。

从表2中可以看出,Matlab的计算结果相比于理论值在第二个和第四个反射谱信号均有0.001 nm的误差,这是由传感信号中的噪声造成的;基于DSP的浮点计算结果与Matlab的计算结果一致;基于DSP的定点计算结果与Matlab的计算结果和基于DSP的浮点计算结果相比,在第一个、第三个和第五个反射谱信号分别有0.001 nm、0.001 nm和0.002 nm的误差,这是定点处理造成的精度损失,是不可避免的。虽然如此,但是表3表明,基于DSP的定点计算速度要比直接在DSP上的浮点计算速度快得多。

表3 基于DSP浮点与定点计算速度对比

计算方法	消耗时钟周期数	耗时(720 MHz主频下)
DSP浮点计算	127,839,613	177 ms
DSPlib定点计算	16,564,963	23 ms

## 5 结论

文中根据分布式光纤光栅传感系统的信号特征,对基于F-P腔的可调谐滤波法的波峰检测算法开展研究。由于频谱相关算法,有一定的噪声抑制能力和抗波形串扰能力,利用FFT实现之后运算量可以明显减少,对于基于F-P腔的可调谐滤波法来讲,是一种较好的波长检测方法。文中给出了频谱相关法进行波峰检测的原理,对抗波形串扰能力进行了分析,并研究了频谱相关法基于定点DSP的实现,利用DSPlib中的FFT函数的计算结果,不仅计算精度可以与浮点运算相媲美,而且运算速度比浮点运算要快得多。这些分析结果对分布式光纤光栅传感解调技术的理论研究和实际应用具有一定的参考价值。

## 参考文献

[1] 姜德生,何伟.光纤光栅传感器的应用概况[J].光电子·激

光,2002,13(4):420-421.

- [2] Majumder Mousumi, Gangopadhyay Tarun Kumar, Chakraborty Ashim Kumar. Fibre Bragg gratings in structural health monitoring - Present status and applications [J]. 2008, 147(1):150-164.
- [3] 梁宇飞,王俊杰.基于光纤光栅的边缘滤波动态解调技术[J].微计算机信息,2006,22(10):201-203.
- [4] Jiang Y. Stabilized 3X3-coupler-based interferometer for the demodulation of fiber Bragg grating sensors [J]. Optical Engineering, 2008, 47(1):015006.
- [5] Li LC, Xia L, Xie ZH, et al. All-fiber Mach-Zehnder interferometers for sensing applications [J]. 2012, 20 (10): 11109-11120.
- [6] Minho Song, Shizhuo Yin, Paul B. Ruffin. Fiber Bragg Grating Strain Sensor Demodulation with Quadrature Sampling of a Mach-Zehnder Interferometer [J]. Applied Optics, 2000, 39(7):1106-1111.
- [7] Wang Zheng-fang, Sui Qing-mei, Wang Jing. Experimental and Technical Research on Fiber Bragg Grating Vibration Measuring Based on Two Matching Gratings Demodulation [C]//3rd Asia Pacific Optical Sensors Conference (APOS). Australia. 2012.
- [8] Jiang BQ, Zhao JL, Qin CA, et al. An optimized strain demodulation method based on dynamic double matched fiber Bragg grating filtering [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2011, 49(3):415-418.
- [9] Niu SL, Liao Y, Yao Q, et al. Resolution and sensitivity enhancements in strong grating based fiber Fabry-Perot interferometric sensor system utilizing multiple reflection beams [J]. Optics Communications, 2012, 285(12):2826-2831.
- [10] Cen Huang, Wencai Jing, Kun Liu, et al. Demodulation of Fiber Bragg Grating Sensor Using Cross-Correlation Algorithm [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19 (9):707-709
- [11] Ren WH, Tao PL, Tan ZW, et al. Theoretical and experimental investigation of the mode-spacing of fiber Bragg grating Fabry-Perot cavity [J]. Chinese Optics Letters, 2009, 7(9):775-777.
- [12] 朱浩瀚,秦海琨,张敏,等.光纤布拉格光栅传感解调中

- 的寻峰算法[J]. 中国激光, 2008, 35(6):893-897.
- [13] 朱梅, 张森, 胡立章, 等. 光纤布拉格光栅中心波长检测中的寻峰算法[J]. 光通信研究, 2011, 167(5):60-63.
- [14] Huang Cen, Jing Wencai, Liu Kun. Demodulation of fiber Bragg grating sensor using cross-correlation algorithm [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19 (9-12): 707-709.
- [15] 郑君里, 应启行, 杨为理. 信号与系统(上册)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007:341-349.

(上接第17页)

### (2) 具备主动光电干扰能力

目前无人机光电系统主要任务是光电侦察, 任务单一。其主要光电载荷为光电/红外传感器、激光测距仪等。随着无人机平台技术发展, 载荷能力增强, 针对作战需要, 搭载激光干扰载荷、光电制导导弹的无人机将是未来发展的必然趋势。

在舰艇防护方面, 利用无人机平台优势, 通过搭载光电系统载荷构建空中机动式防护系统。一方面, 利用无人机平台能够垂直起降、空中悬停优势, 弥补舰载平台空间受限的约束; 另一方面, 利用无人机平台相对有人直升机平台结构简单、可靠性高及性价比高的优势, 通过编队伴飞的方式, 增加舰艇的防护半径, 以提高舰艇生存能力。

作战过程中, 无人机光电防护系统在基地平台侦察设备及光电跟踪设备配合下对目标实施定位与跟踪, 接收控制指令编队飞离被保护目标一定距离拦截反舰光电制导导弹, 利用小型激光压制干扰载荷和小型高效中波红外干扰载荷, 压制、阻塞干扰红外/激光制导导弹导引头, 使其失去制导能力。

### (3) 具备多用途、高智能将是未来发展目标

目前无人机光电系统的主要缺点和不足是, 缺

少应对突发性事件的能力, 只能执行预定的任务, 功能单一, 且智能化程度较低。随着光电载荷技术、信息技术、控制技术的进步, 发展多用途、高智能的无人机光电载荷系统是一个重要的发展趋势。

### 参考文献

- [1] 欧阳龙春. 军用无人直升机的发展现状及趋势[J]. 航空科学技术, 2011, Overview: 9-11
- [2] 王岩, 祝小平. 侦察/打击一体化无人机对地攻击控制系统设计[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(23): 2728-2733
- [3] 刘波, 张洪涛, 等. 无人直升机技术的发展[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(3): 18-21
- [4] 吴源维. 复杂电磁环境下无人机的战场应用[J]. 飞航导弹, 2011(1): 30-35
- [5] 孙成陆. 特种作战中无人机侦察力量的运用[J]. 四川兵工学报, 2011, 32(1): 40-45
- [6] 王方玉. 美国无人机的光电载荷与发展分析[J]. 激光与红外, 2008, 38(4): 311-314
- [7] 刘洵. 军用飞机光电平台的研发趋势与技术剖析[J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(4): 269-288
- [8] 周权. 四旋翼微型飞行平台姿态稳定控制试验研究[J]. 传感器与微系统, 2009, 28(5): 72-79

(上接第28页)

- 教育出版社, 2006: 111-120.
- [2] 林燕强, 王宁, 徐立国. 单电压控制的电润湿显示阵列的制备与研究[J]. Advanced Display, 2012, 5(132): 24-27.
- [3] 徐庆宇, 沈凯, 肖长诗. 电润湿显示单元研究[J]. 光电子技术, 2010, 30(4): 225-229.
- [4] 岳瑞峰, 刘理天, 吴建刚. 基于介质上电润湿的透射式显示器件[J]. 纳米技术与精密工程, 2008, 6(1): 34-37.
- [5] 胡欢, 吴建刚, 赵晶曦. 一种新型基于电润湿的受光反射型显示单元[J]. 微纳电子技术, 2006(4): 190-193.
- [6] H.You, A.J.Steckl. Three-color electrowetting display device for electronic paper[J]. Applied physics letters, 2010, 97(023514): 1-3.
- [7] Beni G, Tenan M A. Dynamics of electrowetting display[J]. Applied physics letters, 1981, 52(10): 8011-8015.
- [8] Hayes R A, Feenstra B J. Video-speed electronic paper based on electrowetting [J]. Nature, 2003, 425(6956): 383-385.
- [9] D.Y.Kim, A.J.Steckl. Liquid-state field-effect transistors using electrowetting[J]. Applied physics letters, 2007, 90(043507): 1-3.
- [10] Hu-Xiaodong. Electrowetting based infrared lens using ionic liquids[J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(213505): 1-3.