

文章编号:1004-4213(2010)01-0139-5

基于空间积分的磁光相关处理性能分析*

武保剑, 解宝祥, 罗成友

(电子科技大学 宽带光纤传输与通信网技术教育部重点实验室, 成都 610054)

摘要:根据振幅调制的静磁波对导波光的磁光 Bragg 衍射调制作用, 描述了空间积分磁光相关器的工作原理, 得到了衍射光检测输出的带通信号包络以及归一化相关积分的解析表达式, 分析了微波信号强度对空间积分磁光相关性能的影响, 研究表明, 在小信号范围内, 相关输出的归一化包络的峰值较小, 近似与驱动功率成正比, 此时可实现严格的磁光相关, 其处理增益可达 20 dB.

关键词:磁光 Bragg 器件; 相关器; 静磁波

中图分类号: O482.55; TN247

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103901.0139

0 引言

声光 Bragg 器件在射频信号处理方面有着重要应用, 而基于微波静磁波的磁光 Bragg 器件可以实现声光 Bragg 器件的大部分功能^[1], 且具有工作频率更高(0.5~40 GHz)、可调磁光带宽大、光调制/开关速度快等优点^[2-3]. 因此, 将这种微波磁光器件引入到光信息处理领域具有重要现实意义. 如在 RoF(Radio over Fiber)中完成数据信息到光波的直接调制^[4-5], 在扩频通信中实现磁光相关处理^[6], 在激光相控雷达中实现磁光可调延迟^[7-8], 在光通信中实现磁光脉冲压缩等^[9].

本文利用振幅调制的静磁波对导波光的衍射调制作用, 研究了空间积分磁光相关器的实现原理. 把两个相对延迟随时间变化的电信号转换为运动的空间光学信号, 进而在光束孔径内进行相关积分; 借助于磁光 Bragg 衍射输出光场的复振幅表示, 重点分析了信号强度对空间积分磁光相关性能的影响, 小信号时的处理增益达 20 dB.

1 调幅静磁波对导波光的 Bragg 衍射

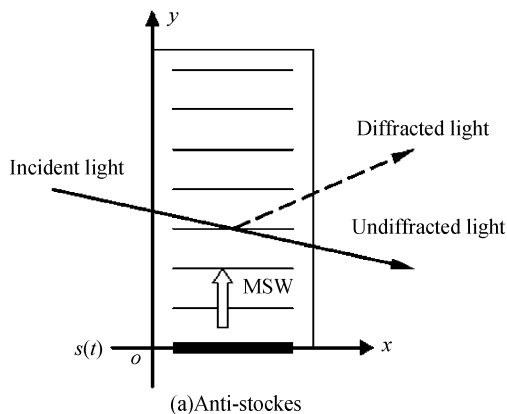
在偏置磁场作用下, 通过金属微带线变换器可以在磁性薄膜波导中激发静磁波, 并沿垂直于微带线的方向传播(忽略静磁波束的衍射和边缘效应). 当微带线中的射频激发电流幅度保持不变时, 激发的静磁波将保持等幅传播(忽略传播损耗). 若射频激发电流受到一个基带信号的幅度调制, 则所激发静磁波的幅度也发生变化(与基带调制信号的频谱

以及微带线的频率响应有关), 其等效交变磁化强度总可表示为

$$m(y, t) = g_0 S\left(t - \frac{y}{u_s}\right) e^{j(\omega_c t - k_s y)} = g_m(y, t) e^{j(\omega_c t - k_s y)} \quad (1)$$

式中 $S(t)$ 为调制信号, $u_s = su_g$ 和 k_s 分别为静磁波包络传播速率(群速)和相位传播常量, $u_g > 0$, $s = \pm 1$ 表示静磁波群速沿 y 轴正向或负向; $g_m(y, t) = g_0 S\left(t - \frac{y}{u_s}\right)$, g_0 为等幅调制时的复振幅.

基于静磁波与导波光非共线作用的磁光 Bragg 器件衍射原理如图 1. 静磁波的不同传播方向往往对应于反斯托克斯(衍射光频率上移, $s_f = +1$)或斯托克斯(衍射光频率下移, $s_f = -1$)相互作用, 通常满足 $s_f = -\text{sgn}(\beta \cdot k_s)$, β 和 k_s 分别为入射光和静磁波的波矢, sgn 为符号函数^[10]. 在慢变包络近似下, 输出的衍射光场复振幅可由连续静磁波情形下的微波磁光衍射理论得到. 若导波光场的传播因子采用 $e^{j(\omega_0 t - \beta \cdot r)}$ 的形式, 一级小信号近似下相位匹配时输出端未衍射光和衍射光的电场分布可分别表示为



(a) Anti-stokes

* 国家自然科学基金(60671027)和四川省应用基础研究项目(07JY029-089)资助

Tel: 028-83200507

Email: bjwu@uestc.edu.cn

收稿日期: 2009-01-06

修回日期: 2009-03-11

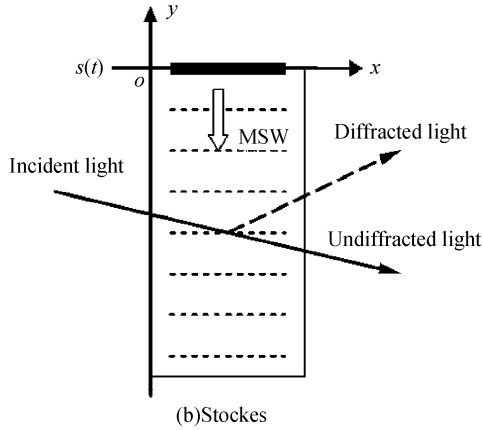


图1 基于静磁波的磁光 Bragg 器件衍射原理
Fig.1 The diffraction principle of magnetostatic-wave-based magneto-optic Bragg devices

$$\begin{bmatrix} E^{(u)}(y,t) \\ E^{(d)}(y,t) \end{bmatrix} = E_0(x,y,t) \cdot \begin{bmatrix} \sqrt{1 - |C_{dTE,dTM}^{(\pm)}(L)|^2 \left[S(t-s \frac{y}{u_g}) \right]^2} \\ C_{dTE,dTM}^{(\pm)}(L) S(t-s \frac{y}{u_g}) e^{j s_1 (\omega_c t - k_s y)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中

$$E_0(x,y,t) = W(y) e^{j(\omega_0 t - x \beta \cos \theta_B)} e^{-j y \beta \sin \theta_B}$$

为未衍射光的光场, $W(y)$ 为振幅权函数, 如非均匀照射、静磁波衰减、激光功率、磁光器件的截短效应等因素引起的振幅变化, 所引起的空间相位对相关积分结果不产生可测的影响^[11]; ω_0 和 $\beta = 2\pi/\lambda_0$ 分别为入射导波光的频率和传播常量; θ_B 为入射导波光相对于 $+x$ 方向的 Bragg 入射角(可正可负);

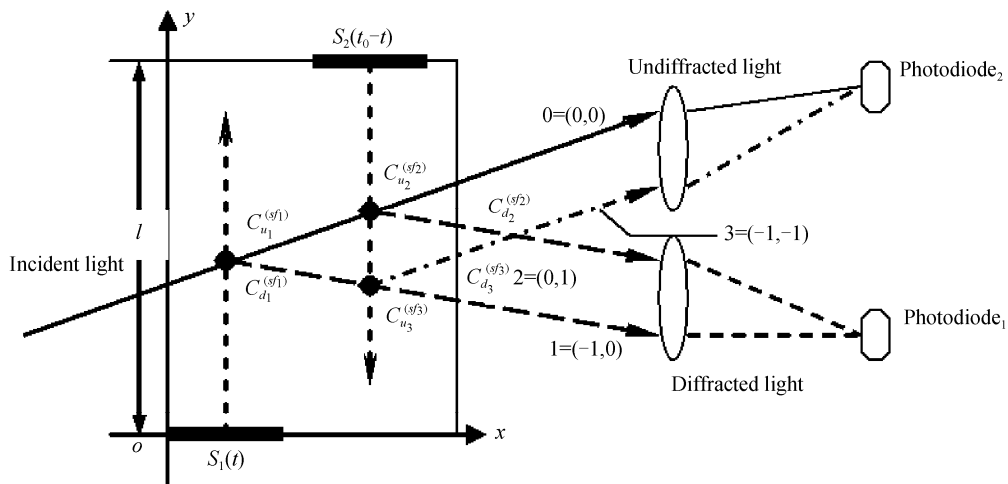


图2 空间积分磁光相关原理
Fig.2 The principle of space-integrating magneto-optic (MO) correlation

对于如图2的情形, $s_{f_1} = -1, s_{f_2} = +1, s_{f_3} = -1$. 当忽略损耗对未衍射光的影响时^[12], 经两个静磁波作用区后输出的导波光场有如下关系

$$E_1(y,t) = E_0(y,t) C_1^{(-)}(L_1) S_1(t - \frac{y}{u_g}) \cdot$$

$C_{dTE,dTM}^{(\pm)}(L)$ 为小信号近似下相应等幅静磁波引起的 TE 模或 TM 模反斯托克斯或斯托克斯衍射光复振幅^[10], 其中已计及静磁波初始相位对衍射光场的影响.

2 空间积分磁光相关处理

在磁光波导中, 当导波光依次与两个反向传播的静磁波发生非共线作用时, 将分别导致导波光的斯托克斯和反斯托克斯衍射, 输出光可用频移状态 (s_{f_1}, s_{f_2}) 标识, 其光场由式(2)给出. 设激发静磁波的微带线相距 l , 激发第一个静磁波的射频信号为 $S_{RF_1}(t) = S_1(t) e^{j\omega_c t}$, 激发第二个静磁波的射频信号为 $S_{RF_2}(t) = S_2(t_0 - t) e^{j\omega_c t}$, 如图2. 入射导波光与第一个静磁波(沿 y 轴正向传播, $s_1 = +1$) 发生斯托克斯作用, 产生的衍射光频率下移, 此时的衍射光用 $1 = (-1, 0)$ 表示; 透过第一个静磁波作用区的未衍射光与第二个静磁波(沿 $-y$ 轴正向传播, $s_2 = -1$) 发生反斯托克斯作用, 衍射光频率上移, 此时的衍射光用 $2 = (0, 1)$ 表示; 衍射光 $1 = (-1, 0)$ 与第二个静磁波发生斯托克斯衍射, 该二次衍射光用 $3 = (-1, -1)$ 表示. 一次衍射光 1 和 2 共线传播, 经透镜空间积分到平方律光电二极管 1 上, 即外差检测一次衍射光; 二次衍射光 3 与未衍射光 0 共线, 经透镜空间积分到平方律光电二极管 2 上, 即外差检测二次衍射光. 磁光 Bragg 单元的输出光经透镜聚焦在位于焦平面上的光电检测器上, 聚焦的位置与输出光的方向有关.

$$e^{-j(\omega_c t - k_m y)} \quad (3a)$$

$$E_2(y,t) = E_0(y,t) C_2^{(+)}(L_2) S_2 \cdot$$

$$\left[t_0 - \left(t + \frac{y-l}{u_g} \right) \right] e^{j[\omega_c t + k_m (y-l)]} \quad (3b)$$

$$E_3(y,t) = E_0(y,t) C_1^{(-)}(L_1) S_1(t - \frac{y}{u_g}) \cdot$$

$$e^{-j[\omega_c t - k_m y]} C_3^{(-)}(L_2) S_2 \left[t_0 - \left(t + \frac{y-l}{u_g} \right) \right] \cdot$$

$$e^{-j[\omega_c t + k_m (y-l)]} = E_0(y, t) C_1^{(-)}(L_1) C_3^{(-)}(L_2) \cdot$$

$$S_1 \left(t - \frac{y}{u_g} \right) S_2 \left[t_0 - t + \frac{l}{u_g} - \frac{y}{v_g} \right] e^{-j[2\omega_c t - k_m l]} \quad (3c)$$

式中 $k_m = |k_{s_1}| = |k_{s_2}|$. 由式(3)可知,两个一次衍射光的光场相位与空间位置 y 有关,对应的波矢将随信号频率改变,致使一次衍射光在焦平面上的聚焦位置发生改变,要求使用较大有效光敏面积的光电检测器;二次衍射光的光场相位与空间位置 y 无关,信号频率的改变不影响二次衍射光的空间聚焦位置,这是个优点. 透镜的作用是把整个光孔径 l 内的衍射光都集中于光电二极管并完成空间积分,平方检测输出电流可表达为

$$I_1(t) \propto \int_0^l |E_1(y, t) + E_2(y, t)|^2 dy \quad (4a)$$

$$I_2(t) \propto \int_0^l |E_0(y, t) + E_3(y, t)|^2 dy \quad (4b)$$

式(4a)和(4b)中被积函数可展开为两个平方项和一个交叉项,其中平方项是偏置项,而交叉项是感兴趣的相关积分项. 这样,通过带通滤波就可以得到相关结果.

分析表明,一次衍射光检测和二次衍射光检测的输出包络信号 $V_i(t)$ 具有相似的形式

$$V_i(t) = \eta_i C(t) \quad (i=1, 2) \quad (5)$$

式中

$$C(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t S_1(\tau) S_2(\tau + t_0 + T_i - 2t) d\tau \quad (6)$$

$$\eta_1 = 2l C_1^{(-)*}(L_1) C_2^{(+)}(L_2) \quad (7a)$$

$$\eta_2 = 2l C_1^{(-)}(L_1) C_3^{(-)}(L_2) \quad (7b)$$

$C(t)$ 称为归一化相关积分,给出了相关检测输出信号的归一化波形; η_1 和 η_2 称为衍射强度因子,决定了相关输出的强度; $T_i = l/u_g$ 为静磁波渡越时间.

3 磁光相关处理性能分析

分析可知,当静磁波对导波光的衍射效率或磁光耦合强度较小时(小信号近似),衍射光复振幅与静磁波信号强度成正比,源消耗的影响可以忽略,从而可以得到较严格的磁光相关结果;在大信号情形下,这种相关过程将发生劣化,影响相关输出的性能. 空间积分相关处理可在帧同步检出、扩频通信系统的相关解调等方面发挥重要作用^[11].

3.1 信号强度对相关性能的影响

式(5)表明,磁光相关器的输出强度与磁光衍射效率有关. 由于掺 Bi 的 YIG 薄膜具有比纯 YIG 薄膜更大的磁光系数,因而本文考虑由掺 Bi 的 YIG 薄膜波导组成的磁光相关器,它对入射光偏振态

(TE 或 TM)的敏感性很小^[2]. 图 3 给出了 TE 模导波光入射时衍射效率对 RF 驱动功率的依赖曲线,其中激发静磁正向体波的微带线结构相同(垂直磁化),频率为 $f_{\text{MSFVW}} = 2.85 \text{ GHz}$; 计算参量取自文献^[13],计算中没有考虑静磁波的传播损耗及其非线性效应. 图 3 还给出了完全同步状态下 7 位巴克码在光束孔径单位长度上的归一化包络和相关积分峰值 ($\max[|V(t)|]$ 和 $\max[C(t)]$) 曲线,其中计及了源消耗对未衍射光的影响^[12].

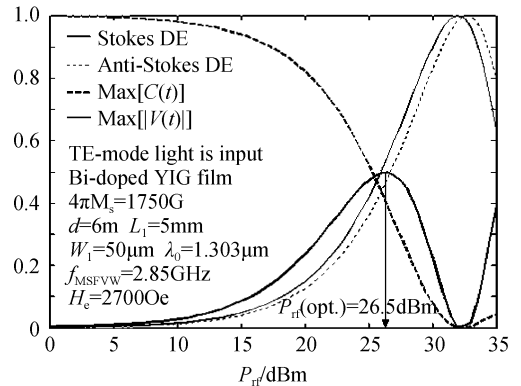


图 3 归一化包络的峰值和相关积分峰值对 RF 驱动功率的依赖曲线

Fig. 3 The peak-value curves of normalized envelope and correlation integral versus the RF-driven power

由图 3 可以看出: 1) 在小信号范围内,相关输出的归一化包络的峰值较小,并与 RF 驱动功率近似成正比,此时可实现严格的磁光相关处理(相当于匹配滤波器). 在白噪音情形下,其输出信噪比取决于有限时间宽度的输入信号能量 E_s (这里指 7 位巴克码的波形信号) 和噪音的单边功率谱密度 N_0 , 即 $\text{SNR}_{\text{out}} = 2E_s/N_0$; 可见,通过提高信号幅度或持续时间宽度可增加信号能量,进而提高输出信噪比. 若定义相关器的处理增益 G_p 为相关输出的信噪比 SNR_{out} 与接收信号的信噪比 SNR_{in} 之比, 即 $G_p = \text{SNR}_{\text{out}}/\text{SNR}_{\text{in}}$, 则小信号范围内磁光相关器的处理增益 $G_p = TB_0$ (时间-带宽积), T 为输入 RF 信号的时间宽度, B_0 为输入带通噪音的带宽; 2) 随着 RF 驱动功率的增加,归一化包络的峰值增大,相关积分的峰值减小,相关积分的峰值曲线与衍射效率的变化趋势基本相反; 3) 存在一个优化的 RF 驱动功率 $P_{\text{rf}}^{\text{opt}}$, 此时相关输出包络的峰值达到最大值 0.5; 4) 在 $P_{\text{rf}} \leq P_{\text{rf}}^{\text{opt}}$ 的范围内,提高 RF 驱动功率,输入和相关输出的信噪比均增加 ($\max[|V(t)|]$ 增加), 但处理增益降低 ($\max[C(t)]$ 降低).

3.2 磁光相关器的处理增益计算

为了计算磁光相关器的处理增益,需要计算静磁正向体波的渡越时间和磁光带宽^[14]. 仍采用图 3

中的计算参量,并取光束孔径 $l=1$ cm. 对于基模静磁前向体波(激发频率范围为 2.66~4.48 GHz),计算的静磁波渡越时间为 $T_l=0.261$ μ s,对应的波长为 $\lambda_{\text{MSFW}}=220.67$ μ m. 根据磁光衍射效率的频率依赖曲线可确定 3 dB 磁光带宽,进而可计算磁光相关器的处理增益 $G_p=10\lg(T_l B_0)$. 图 4 为三个不同 RF 驱动功率 P_{rf} 时处理增益随光波长的变化曲线,可以看出,在静磁波的线性激发范围内,射频信号的驱动功率对处理增益的影响不大,处理增益基本保持在 20.25 dB 左右. 此时,在固定偏置磁场情形下,3 dB 磁光带宽约为 400 MHz.

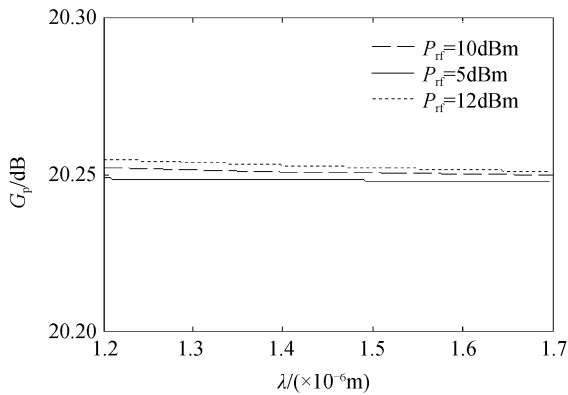


图 4 磁光衍射效率对静磁波频率的依赖

Fig. 4 Dependence of magnetostatic wave frequency on magneto-optical diffraction efficiency

与声光相关器比较,若选择 TeO_2 材料作为声光相互作用介质,其中声速度 $v_s=670$ m/s,在同样宽度的光束孔径 ($l=1$ cm) 内的渡越时间可达 10 μ s,当 3 dB 声光带宽取 $B_0=80$ MHz 时计算的处理增益为 29 dB^[15],大于磁光相关器的处理增益.

通过对典型的静磁正向体波 Bragg 器件的计算表明,磁光相关器在处理增益性能上不如声光相关器. 然而,由于静磁波的传播速度比声波高很多,这样在相同光束孔径内所需的渡越时间就小,因而磁光 Bragg 器件具有更高的开关/处理速度^[2];另外,通过调谐偏置磁场可获得更大的磁光带宽^[4]. 更重要的是,磁光相关器能够工作在更高的频率范围内 (0.5~40 GHz),可直接处理射频信号(无需下变频),在微波光通信、RoF 等系统中具有潜在的应用价值.

4 结论

在慢变包络近似下,给出了载有信息的微波静磁正向体波对导波光的非共线作用光场复振幅,在此基础上,描述了基于空间积分的磁光相关检测过程. 根据检测输出信号的包络和归一化相关积分,讨论了磁光相关处理性能. 在小信号范围内,由于衍射光强正比射频驱动功率,从而可实现较严格的磁光

相关处理;随着射频驱动功率的增加,归一化包络的峰值达到一个最大值,但相关积分的峰值减小,即相关性能下降. 所以,实际中的声光/磁光 Bragg 器件往往都是工作在小信号区域.

参考文献

- [1] WANG Gang, WANG Shi-yu, CAI De-fang, *et al.* Study on the effect of diffraction efficiency on pulse compression of A-O Q-switched laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(1): 13-15. 王刚, 王石语, 蔡德芳, 等. 声光调 Q 衍射效率对脉宽压缩的影响研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(1): 13-15.
- [2] TSAI C S. Integrated acousto-optic and magneto-optic Bragg cell modulators and their applications[J]. *Opt Eng*, 1999, **38**(7): 1136-1142.
- [3] LI Yong-an, LI Xiao-jun, BAI Jin-tao. Analyze on sine wave and rectangular wave magneto-optical modulation by comparing[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **36**(Sup1): 192-197. 李永安, 李小俊, 白晋涛. 正弦波与方波磁光调制的比较分析[J]. *光子学报*, 2007, **36**(Sup1): 192-197.
- [4] SHEN Yi-chun, ZHANG Xian-min, CHEN Kang-sheng. Stimulated brillouin scattering for optical single sideband modulation in RoF system[J]. *Proc SPIE Int Soc Opt Eng*, 2005, 60120T.
- [5] TSAI C S, LIN Y S, SU J, *et al.* High efficiency guided-wave magneto-optic Bragg cell modulator using nonuniform bias magnetic field[J]. *Appl Phys Lett*, 1997, **71**(25): 3715-3717.
- [6] WANG Dan-zhi, SHAO Ding-rong, LI Shu-jian. Acousto-optic adaptive signal processing techniques for spread spectrum communication applications[J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(5): 776-778. 王丹志, 邵定蓉, 李署坚. 声光自适应信号处理技术在扩频通信中的应用[J]. *光学技术*, 2005, **31**(5): 776-778.
- [7] SHANG Dan, WU Bao-jian. Study on interactions between multifrequency microwave magnetostatic waves and guided optical waves[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(10): 2054-2057. 尚丹, 武保剑. 多频微波静磁波与导波光相互作用研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(10): 2054-2057.
- [8] ZHOU Jian-hua, REN Guo-rong, YANG Jian-jun, *et al.* Study of time-delay line of chirped fiber grating applied to optically controlled phased array radar[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2008, **6**(1): 33-36. 周建华, 任国荣, 杨健君, 等. 啁啾光纤光栅延迟线在光控相控阵雷达中的应用研究[J]. *光学与光电技术*, 2008, **6**(1): 33-36.
- [9] WU Bao-jian, GAO Xiang. Magnetostatic-wave-based magneto-optic pulse compression by control of phase mismatching[J]. *Chinese Physics Letters*, 2008, **25**(11): 4006-4008.
- [10] WU Bao-jian. Analysis of phase mismatch in magneto-optic Bragg diffraction[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(6): 3095-3099. 武保剑. 磁光 Bragg 衍射中的相位失配分析[J]. *物理学报*, 2006, **55**(6): 3095-3099.
- [11] CHENG Nai-ping, JIANG Xiu-fu, SHAO Ding-rong. Acousto-optic signal processing and application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004.

- 程乃平,江修富,邵定蓉. 声光信号处理及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2004.
- [12] BAZZI O, TORGUET R, ROUVAEN J M, *et al.* A 1023-bit acousto-optic correlator for direct sequence spread spectrum applications[J]. *Ultrasonics Symposium*, 1992; 573-576.
- [13] JUN Su, TSAI C S. Nonlinear characteristics of magneto-optic Bragg diffraction in bismuth substituted yttrium iron garnet films[J]. *Appl Phys*, 2000, **87**(3): 1474-1481.
- [14] WU Bao-jian, SUN Wei-yong, SHI Shuang-jin, *et al.* Dependence of magnetostatic wave modes and bandwidth on external bias magnetic fields [J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2007, **35**(11): 2198-2200.
- 武保剑,孙维勇,史双瑾,等. 外加偏置磁场对静磁波模式及频带的影响[J]. *电子学报*, 2007, **35**(11): 2198-2200.
- [15] HE Da-wei, XU Cheng-jie, XU Shu-rong. Space integrating acousto-optic correlator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(11): 1514-1517.
- 何大伟,许承杰,徐叙容. 空间积分声光相关处理的研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(11): 1514-1517.

Performance Analysis of Space-integrating Magneto-optic Correlation

WU Bao-jian, XIE Bao-xiang, LUO Cheng-you

(Key Lab of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks of the Ministry of Education, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: According to magneto-optic (MO) Bragg diffraction and modulation effects in the interaction between the amplitude-modulated magnetostatic forward volume waves and guided optical waves, the operating principle of space-integrating MO correlators is described. The analytic expressions for the envelope of detected band-pass signal associated with normalized correlation integral are obtained and used to analyze the performance of the space-integrating MO correlators dependent on the intensity of microwave RF signals. It is shown that, in the range of small signals, the peak value of normalized envelope is approximately proportional to the RF-driven power and the MO correlation can be strictly realized with the processing gain of 20 dB or more.

Key words: Magneto-optic Bragg device; Correlator; Magnetostatic wave



WU Bao-jian was born in 1970. He received the Ph. D. degree in applied physics from Shanghai Jiaotong University. Now he is a professor, and his research interests focus on microwave magneto-optics, optical waveguide devices, optical fiber communications, and optical signal processing.