

文章编号: 1672-8785(2014)02-0009-08

基于偏振的红外成像目标模拟技术研究进展

高 辉

(中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

摘 要: 随着红外成像制导武器的不断发展, 红外目标模拟器的各项性能也在不断得到提高以满足仿真试验的需求。现今, 红外偏振成像技术已经日趋成熟, 基于红外偏振成像的探测系统及制导武器也正在研制之中。根据偏振产生和偏振调制技术, 讨论了几种可为偏振成像探测系统和偏振成像制导武器提供目标偏振信息的红外偏振成像目标模拟系统。

关键词: 红外目标模拟器; 偏振模拟; 半实物仿真

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.02.002

Progress of IR Target Simulation Based on Polarization Technology

GAO Hui

(China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: With the development of infrared imaging guided weapons, the performance of the infrared target simulators for simulation experiment is improved. Now, the infrared polarization imaging technology is becoming mature and the detection systems and guided weapon based on infrared polarization imaging are also being developed. According to the polarization generation and modulation technologies, several infrared polarization imaging simulation systems which are able to provide polarization information from targets to the detection systems and guided weapon based on polarization imaging are discussed.

Key words: IR target simulator; polarization simulation; HWIL simulation

0 引言

红外成像目标模拟器是红外半实物仿真系统的核心组成部分之一。它将计算机图像生成器产生的图像数据转换为红外辐射, 并通过光学系统将其投射到被测系统的光学入瞳处, 用以模拟系统工作时的红外场景, 供被测系统进行探测和识别, 进而对系统的捕获跟踪能力和

抗干扰能力等进行测试。红外目标模拟技术主要是通过直接辐射和辐射调制两种形式来实现的。其中, 直接辐射是指通过计算机控制模拟器每个像元的辐射强度来生成红外图像, 如电阻阵列和激光二极管阵列等; 红外辐射调制实际上是一个空间光调制器, 用于对红外光源所提供的红外辐射进行空间强度调制, 从而产生

收稿日期: 2013-12-18

作者简介: 高辉(1985-), 男, 山西文水人, 硕士, 助工, 主要从事红外制导系统仿真与红外目标模拟方面的研究。

E-mail: gaohuialex@163.com

红外图像,如红外液晶光阀、硅基液晶(Liquid Crystal on Silicon, LCOS)和数字微镜器件(Digital Micromirror Device, DMD)等。

红外目标模拟器的发展始终是围绕红外制导武器的需求进行的。目前红外目标模拟器的发展主要围绕以下几个方面进行:其一是高分辨率、高帧频的输出;其二是黑体等效温度更高的输出;其三是提供更多的目标辐射信息。

偏振是光的基本特性之一。任何目标在反射和发射电磁辐射的过程中都会表现出由其自身特性和光学基本定律所决定的偏振特性。目前,大多数探测器包括人眼都只能感觉到光波的波长和强度,然而却忽略了光的偏振信息。制导武器必须快速、准确地区分目标与干扰,并始终处于捕获目标的状态。面对当今越来越先进的干扰和伪装措施,依靠判断辐射强度和辐射光谱的传统方法受到了更大的制约。而以往常常被忽视的偏振信息则可为导引头提供更多的目标制导信息,使其能更有效地对目标进行识别和跟踪。近年来,随着红外偏振成像技术的快速发展,针对红外偏振成像制导的研究思路也不断被提出来,然而基于红外偏振成像的目标模拟器还未能引起关注。为了满足不久将会出现的红外偏振成像制导武器的仿真需求,本文探讨了几种可以产生偏振信息的红外目标模拟器系统。

1 红外偏振模拟的基础

红外偏振成像目标模拟器用于为红外偏振成像系统提供具有偏振信息的目标源。偏振模拟研究必须首先研究偏振成像的需求。偏振成像技术主要有以下三个关键点^[1]:

- (1) 对目标物体的辐射或反射光波进行偏振态分解,并计算光波的偏振信息;
- (2) 对获取的目标偏振图像进行处理;
- (3) 利用目标与背景的差异将目标区分出来。

而偏振成像仿真系统恰恰是这个过程的逆推,它首先是掌握目标的偏振特征,其次是模拟

目标的偏振态情况,并将其与背景图像进行融合后投射出去。红外偏振成像仿真首先应对目标的偏振特征具有足够的认识。

1.1 目标/背景的偏振情况

对于人造目标和自然环境,其反射光和辐射光的偏振态是有差别的。在红外波段,自然环境中除水体以外的地物背景的红外偏振度一般都非常小,几乎是无偏振的。而人造物体尤其是由金属材料制成的目标的偏振度则比较大^[2]。国外很早就对红外偏振理论和红外偏振探测技术进行了研究。由 Ben-Dor B^[3] 和 Joseph A S^[4] 的研究成果可知,自然背景中只有水体的热红外偏振特性比较明显。Lawrence B W 对玻璃和塑料材料在中波波段的偏振特性进行了研究,并发现物体表面粗糙度对目标偏振特性起着关键作用^[5]。Aron Y 的研究结果表明,红外偏振探测技术可以有效抑制背景噪声,并将目标的细节特征凸现出来,以便于识别和检测^[6]。国内也有众多研究机构对人造目标和自然景物的偏振态进行了研究,比如中国科学院安徽光学精密机械研究所对水泥目标和金属铝板等的偏振特性进行了研究^[7]。上述研究结果表明,人造目标的偏振度一般比自然背景(除水体外)的高,因此通过对偏振情况进行提取和识别可以有效地区分目标与干扰^[8-9]。

1.2 典型的偏振成像系统

对于红外偏振成像系统,目前最典型的偏振态分解方法是基于斯托克斯矢量的 Mueller 矩阵表示法。斯托克斯矢量可以用来描述光的所有偏振态。令被讨论的光分别通过 M_1 、 M_2 、 M_3 和 M_4 波片,通过这四块波片后的光强分别为 I_1 、 I_2 、 I_3 和 I_4 ,则斯托克斯矢量可表示为

$$\begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2I_1 \\ 2I_2 - 2I_1 \\ 2I_3 - 2I_1 \\ 2I_4 - 2I_1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

这四块波片的功能如下: M_1 为各向同性,对自然光的透过率为 0.5; M_2 为线偏振,其透

光轴沿 x 轴方向; M_3 为线偏振, 其透光轴与 x 轴成 45° 夹角; M_4 只允许右旋圆偏振光通过。

经推导, 各种偏振态的斯托克斯矢量情况见表 1。

表 1 各种偏振态的斯托克斯矢量

偏振光	斯托克斯矢量
自然光	$(1 \ 0 \ 0 \ 0)^T$
水平线偏振光	$(1 \ 1 \ 0 \ 0)^T$
45° 线偏光	$(1 \ 0 \ 1 \ 0)^T$
-45° 线偏光	$(1 \ 0 \ -1 \ 0)^T$
右旋圆偏振光	$(1 \ 0 \ 0 \ 1)^T$
左旋圆偏振光	$(1 \ 0 \ 0 \ -1)^T$

我们可采用 Mueller 矩阵来描述光通过偏振器件前后的斯托克斯矢量的变换关系:

$$\begin{pmatrix} I' \\ Q' \\ U' \\ V' \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中, I' 、 Q' 、 U' 和 V' 为输出量。

若入射光依次通过 n 个偏振元件, 它们的 Mueller 矩阵是 M_i , 则从第 n 个偏振器件出射的光的斯托克斯矢量显然为

$$\begin{pmatrix} I' \\ Q' \\ U' \\ V' \end{pmatrix} = M_n M_{n-1} \cdots M_2 M_1 \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} \quad (3)$$

通过求解 4 个斯托克斯矢量, 可以有效地描述被观测物的偏振特性。

1.2.1 分时获得斯托克斯矢量

采用步进方式旋转波片是一种很常见的获得斯托克斯矢量的方法。如图 1 所示, 在成像镜头前放置一个偏振片和一个 $1/4$ 波片, 然后通过 4 次旋转 $1/4$ 波片, 就可以得到 4 个斯托克斯矢量^[10]。

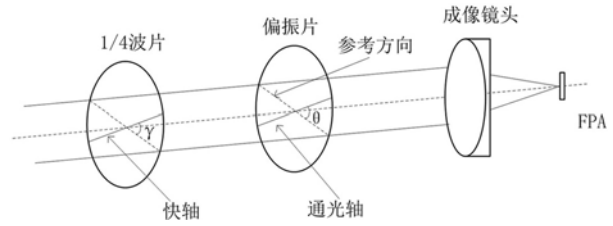


图 1 通过旋转 $1/4$ 波片获得斯托克斯矢量

如图 1 所示, 当线偏振片的透光轴方向与参考方向的夹角为 θ 时, 线偏振片的 Mueller 矩阵为

$$M_p = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

而快轴方向与参考方向的夹角为 γ 的 $1/4$ 波片的 Mueller 矩阵为

$$M_b = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\gamma & \cos 2\gamma \sin 2\gamma & -\sin 2\gamma \\ 0 & \cos 2\gamma & \sin^2 2\gamma & \cos 2\gamma \\ 0 & \sin 2\gamma & -\cos 2\gamma & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

那么, 出射光的斯托克斯矢量为

$$\begin{aligned} S_{out} &= \begin{bmatrix} I' \\ Q' \\ U' \\ V' \end{bmatrix} = M_p M_b S_{in} \\ &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\gamma & \cos 2\gamma \sin 2\gamma & -\sin 2\gamma \\ 0 & \cos 2\gamma & \sin^2 2\gamma & \cos 2\gamma \\ 0 & \sin 2\gamma & -\cos 2\gamma & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} \quad (6) \end{aligned}$$

由于偏振片的 Mueller 矩阵的最后一行全为零, 仅仅改变线偏振片的透光轴与参考方向的夹角无法得到第四个斯托克斯矢量, 也就是说,

此时无法描述其圆偏振情况。只有当加入 $1/4$ 波片, 并将波片快轴与偏振片通光轴的夹角变为 45° 时, 才能够获得第四个斯托克斯矢量。此外, 还可由液晶代替偏振片的机械旋转, 通过控制加在液晶片上的电场来改变其通光轴, 形成电控的偏振片^[11-12]。该方法具有较快的图像获取速度, 同时还可避免由机械转动产生的抖动误差。

1.2.2 同时获得斯托克斯矢量

通过旋转偏振片和波片可以分时得到斯托克斯矢量, 但这样做无疑会降低帧频。也可以采用多个探测器或者是在焦平面上集成偏振片的方式得到斯托克斯矢量。图 2 所示为用 4 个探测器分别探测 4 个线偏振态的光能量的偏振成像系统。这种方法没有加入 $1/4$ 波片, 因此也无法得到可描述圆偏振情况的斯托克斯矢量, 且系统复杂。而将偏振片集成在焦平面阵列上的方法则是利用微电子工艺直接在焦平面上制作多种通光方向不同的光偏振片。例如, 将 4 个通光方向分别为 0° 、 45° 、 90° 和 135° 的偏振片制作在焦平面上^[13-14], 并且使其与焦平面阵列的 4 个像素点一一对应。那么, 这四个像素就可分别探测到 4 种不同的偏振光强度。每四个这样的子像素便可构成一个偏振探测的像素元, 如图 3 所示。这样的效果与用分束法获得 4 个偏振态的效果一样。虽然该方法也无法获得可描述圆偏振情况的斯托克斯分量, 但是其无需转动偏振片, 而且集成度更高。

2 红外偏振成像模拟方案

2.1 红外偏振成像模拟的图像生成装置

对于红外偏振成像模拟来说, 红外图像生成装置的选择是很重要的。在模拟偏振态时, 可能需要模拟各种特定的偏振态, 这样就不可避免地会造成辐射能量的损失。因此, 有必要采用等效黑体辐射温度较高的图像生成装置来产生红外辐射。目前, 使用效果较好的红外图像生成装置有电阻阵和 DMD 两种。

红外图像生成装置具有阵列规模、辐射光

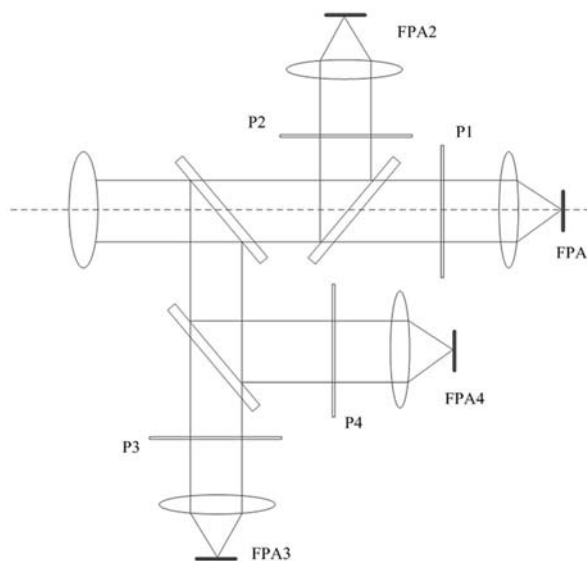


图 2 同时获取斯托克斯矢量的偏振成像系统

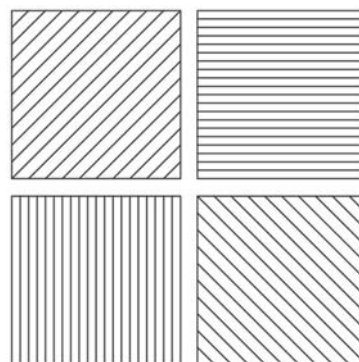


图 3 在焦平面上制作微偏振片的图样

谱波段、灰度等级、温度分辨率以及帧频等基本技术指标。各种红外探测系统对投射器在上述指标上的要求也有很大的不同。因此并不存在某种器件适合所有应用场合的情况, 而是不同场合可能需要采用不同种类的器件; 另外, 并不是所有类型的器件都具有良好的发展潜力。事实上, 由于性能和制造工艺等多方面的因素, 很多图像生成装置在红外仿真技术的进化过程中已逐渐被淘汰或者冷落。

当前使用的红外图像生成技术可以分为两类: 一类是以电阻阵为代表的直接红外辐射法; 另一类是以 DMD 为代表的红外调制法^[15]。

2.1.1 电阻阵

电阻阵的工作原理是, 通过电流加热电阻单元从而产生红外辐射; 利用微电子技术和 CMOS

工艺在硅片上制造大规模的微型电阻阵列, 其中每个电阻单元构成一个像素点, 它们可以被单独选址和施加不同的驱动电流。同时, 每个电阻单元在设计上都尽量与周围的电阻单元实现隔热。另外, 利用半导体制冷器件和水冷装置对芯片进行散热。这样, 通过控制不同电阻单元的驱动电流就能产生动态的、温度可变的红外图像。电阻阵的发展过程经历了薄膜电阻阵、桥形电阻阵和悬浮薄膜电阻阵三代产品^[16-17]。

电阻阵的红外辐射强度随时间呈阶跃式变化。每个像元的温度在没有被驱动电流驱动的时候始终保持不变, 只有施加驱动电流后才会产生热辐射。同时, 由于散热装置的存在, 电阻单元会达到一个热平衡状态。一旦驱动电流停止, 热量会迅速被带走; 当电流发生改变时, 电阻单元会重新达到一个热平衡状态, 从而产生另一种不同强度的辐射。由于采用了加热后辐射红外线的工作原理, 电阻阵列是一种从工作方式上最接近于真实物体产生红外辐射的器件。从仿真的角度来看, 电阻阵这种直接红外辐射型器件比基于其他原理的器件更符合仿真概念。

目前国外电阻阵列的水平已经达到了相当高的水准。单片器件的规模已发展到 1024×1024 像元, 其输出波段范围为 $2 \sim 14 \mu\text{m}$, 灰度等级为 16 bit, 输出的等效黑体温度为 650 K, 帧频为 200 Hz。图 4 所示为美国 SBIR 公司研制的电阻阵。但电阻阵还存在以下缺点: 一是阵列规模还不够大; 二是目前其帧频最高只能达到 200 Hz, 因为电阻元的热时间常数 (5 ms) 限制了帧频的进一步提高^[18]。

2.1.2 DMD

DMD 是一种全数字化的新型平面显示器件, 其本质就是一个半导体光空间分布调制器。它最初由美国德州仪器公司研发成功, 通常用于可见光投影领域。研究人员利用铝溅射工艺在半导体硅片上生成微米量级 ($13.8 \mu\text{m}$) 的方形微镜面, 并用铰链结构将数以百万计的微镜面建造在由硅片衬托的 CMOS 存储器芯片表面上, 然后通过静电驱动微反射镜的转动来调制红外

辐射分布。DMD 工作时, 有一束入射光照射到器件表面, 然后通过控制微镜的偏转来决定反射光是否能够进入投影系统^[19-21], 如图 5 所示。

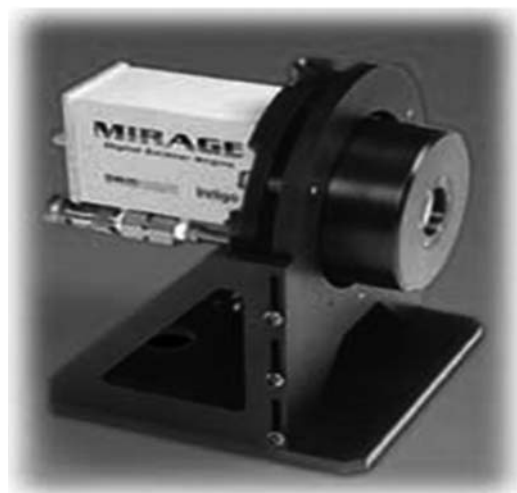


图 4 美国 SBIR 公司研制的电阻阵

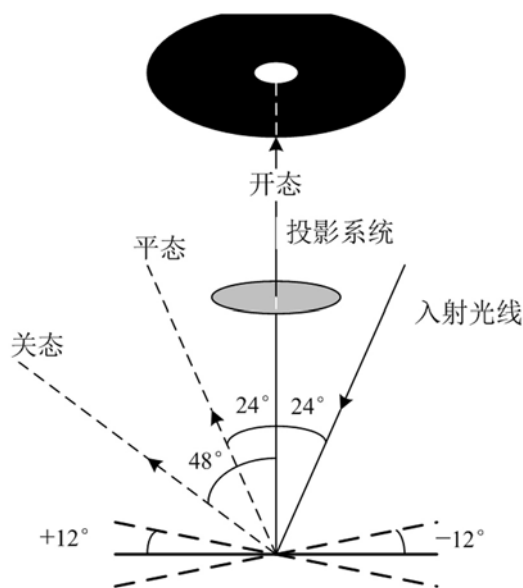


图 5 DMD 工作原理的示意图

DMD 采用脉宽调制技术实现灰度等级调制, 即在积分时间内, DMD 通过调节微镜面所处“开态”时间所占的百分比来实现对相应像素亮度的数字控制。为了避免光电探测器测试过程中由于积分不同步而出现的虚假信号现象, 需要使用同步信号。DMD 的灰度等级取决于红外成像制导系统的积分时间和 DMD 芯片的性能。成像制导系统的积分时间决定了 DMD 进行一帧

表 2 电阻阵与 DMD 的性能对比情况

技术	温度范围	动态范围	帧频	分辨率	占空比	光谱波段
电阻阵	77 ~ 700 K	400:1	400 Hz	1024×1024	90%	2 ~ 16 μm
DMD	与辐射源有关	400:1	400 Hz	1024×1024	90%	与辐射源有关

脉宽调制的时间,而 DMD 的性能则决定了在一帧脉宽调制周期内可以完成多少次微镜偏转。

由于微镜单元的中心距为 $17\text{ }\mu\text{m}$,其大小比较接近红外光的波长。因此衍射现象将会大大降低图像的对比度,而且由于衍射极限的存在,DMD 在长波红外波段的应用也会受到限制。

表 2 列出了电阻阵与 DMD 的性能对比情况[22]。

国内电阻阵的工程应用水平较高, 256×256 元电阻阵已经应用于半实物仿真当中;规模更大的 512×512 元电阻阵正在研制之中,该电阻阵具有较好的性能,其等效中波黑体温度已经达到 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。对于偏振成像制导仿真来说,电阻阵作为图像生成装置是一个比较理想的选择。

2.2 分别模拟 4 个斯托克斯矢量的方案

根据红外偏振成像制导探测系统的原理,对于红外偏振模拟系统来说,最直接的方法就是使用定义斯托克斯矢量的 4 个波片,这样就能直接输出已知斯托克斯矢量的偏振光。由于目标模拟器初始辐射的红外光没有偏振态,对于 4 个矢量的合成就需要 4 路光学系统来合束实现。这种方法的光学系统较为复杂,其优点是可以同时产生 4 个斯托克斯矢量,并且可以对每个参量的光强度进行连续控制。

2.2.1 同时模拟

图 6 为多路复合结构的偏振模拟示意图。其中, A、B、C、D 为 4 个目标模拟器, M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 为 4 种波片。 M_1 仅仅是中性衰减器; M_2 和 M_3 为线偏振,通光轴正交放置;而 M_4 较为复杂,由于要产生右旋圆偏振光,其包含一个起偏器和一个 $1/4$ 波片。这样,经过波束合成后输出的红外光就是由非偏振光、两个振动方向的线偏振光以及圆偏振光融合而成的复合偏振态。通过控制每个模拟器发出的光能

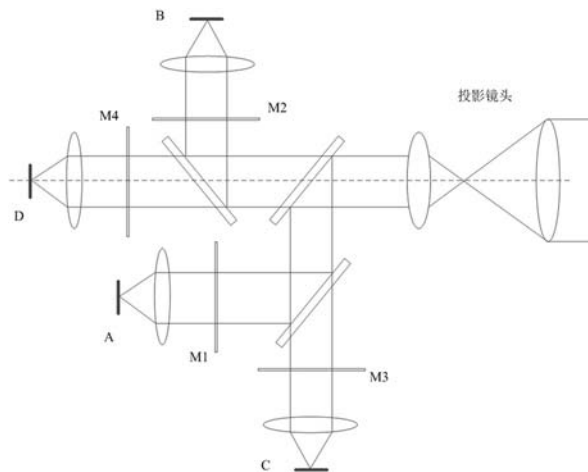


图 6 分束型偏振模拟的示意图

量大小,便可以形成所需要的目标偏振辐射。

该方案中,通过改变 M_4 中偏振片和 $1/4$ 波片的角速度可以生成左旋或右旋椭圆偏振光。虽然 B 和 C 输出的光并不是同相位的,但是对于前面所述的两种同时探测的偏振系统来说,其对相位不敏感,探测到的能量仍可由马吕斯定律计算得到。因此,通过改变模拟器 B 和 C 的输出能量大小可以控制生成的线偏振光的振动角度。

这种系统十分复杂,由 4 路光学系统经合束后构成。装调时,需要将 4 个目标模拟器的像素点一一匹配,难度很大。其次,控制系统也非常复杂。由于输出的光是多种偏振态的复合体,4 个光路的能量在被探测系统接收时都会依据马吕斯定律进行叠加,此时情况会变得比较复杂。其优点是可以控制产生任意斯托克斯矢量的偏振光。整个系统中需要转动的只有 M_4 中的 $1/4$ 波片,但在模拟过程中无需始终转动它,而只需提前设置好其快轴与偏振片通光轴的角度即可;另外, A 路可以直接作为背景自然光输出,适用性强,可以满足所有偏振制导探测系统的需求。

2.2.2 分时模拟

通过旋转偏振片和波片分时采集计算斯托克斯矢量的系统, 也可以通过分时方式生成相应的红外辐射。但与制导探测系统不同, 分时偏振模拟系统无需旋转偏振片和波片, 而只需对每一步的辐射能量进行控制即可。由于探测器本身对偏振没有响应, 对偏振的识别完全是依靠探测器前端的偏振片实现的, 即它是通过对透过偏振片的光辐射的响应来判断某一偏振态的光强大小的。因此, 只要不断改变模拟器输出的光强, 每次旋转偏振片和波片后, 也能使偏振制导探测系统焦平面上得到的光能量发生变化, 并由此来模拟不同偏振态的能量。此种方法无需其他附加结构, 但是需要使光强变化与偏振探测系统的步进严格保持一致, 否则将会导致制导探测系统接收到的光强发生紊乱, 从而影响斯托克斯矢量的解算。同时, 在图像生成的控制上, 必须对每帧图像的能量进行预先计算, 并采用一定的算法来模拟不同偏振态的能量。该算法一般比较复杂。此外, 同步还会对模拟器的帧频提出更高的要求。如果探测器以 4 个步进来解算斯托克斯矢量, 那么模拟器的帧频应为偏振制导探测系统的 4 倍。目前电阻阵的帧频为 200 Hz, 其最多能满足帧频为 50 Hz 的偏振成像制导系统的仿真需求。以分时方式进行偏振仿真, 只能为以步进方式旋转偏振片和波片的偏振制导探测系统提供目标, 对其他形式的偏振探测系统并不适用。

2.3 模拟目标的部分偏振情况

偏振成像系统最终是通过将得到的斯托克斯矢量转化成图像来完成图像处理和融合并得到图像与背景的差异信息的。图像处理主要是对置于背景之上的物体的边缘进行增强处理^[23-25], 而不是通过计算偏振度值等信息来确认目标。因此, 在模拟偏振图像的过程中, 只要适当控制目标辐射红外光的偏振态, 让其偏振度与背景光之间具有足够大的差异即可。此外, 由于探测器对偏振和光相位都不敏感, 对偏振态的解析完全可通过偏振片及波片实现。经研究发现, 在实际的偏振探测中, 圆偏振分量非常小, 几乎可以忽略不计, 所以不少偏振探测系统往往只求取前三个斯托克斯矢量。因此, 在偏振模拟时只需对具有部分线偏振的目标及背景进行模拟即可。这样, 整个偏振模拟系统就可以简化为两部分, 如图 7 所示。模拟器 B 用于模拟自然背景及目标物体的非偏振图像, 模拟器 A 用于配合偏振片 M 模拟目标物体的线偏振图像。两者合成以后, 目标物体的红外辐射就会具有一定的偏振态, 这样便可供制导探测系统接收了。该系统不可能模拟出所有复杂偏振态的情况, 也不可能模拟所有的斯托克斯矢量, 但对于仅从偏振图像处理角度来区分目标与背景的制导探测系统来说是完全适用的。整个系统中不存在需要转动的部件。由于是相对仿真, 偏振方向完全可以通过制导武器系统的旋转得到改变, 只要在装调时保证两块模拟器的像素一一对应即可。

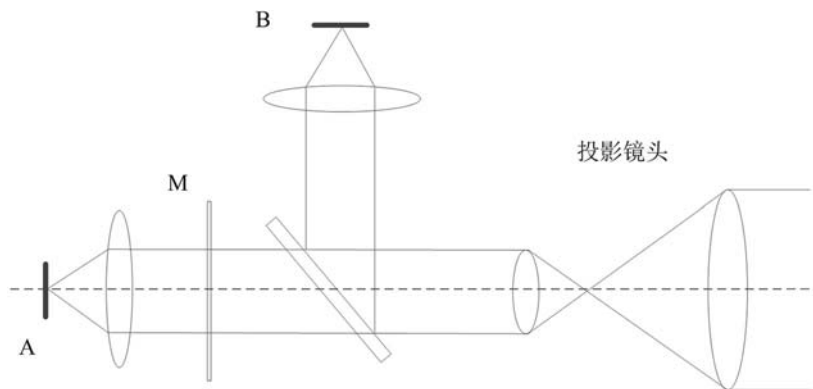


图 7 用双电阻阵模拟目标的偏振信息

2.4 关键器件

以上几种方案中有两个关键器件对整个系统的效能具有重要影响。

2.4.1 偏振片

偏振片的种类非常多。偏振光的产生方式主要包括反射和折射、双折射、散射、二向色性物质吸收以及金属栅等等。与偏振棱镜和二向色性薄膜偏振片等传统偏振器件相比,亚波长金属线栅不仅结构紧凑,易于集成,而且还具有较宽的光谱与视场范围以及较高的透过率和消光比^[26]。当金属光栅的周期小于入射光的波长时,其将会表现出偏振特性。金属光栅结构之所以具有偏振性能,主要是因为垂直于光栅矢量的 S 偏振(TE 偏振)光与平行于光栅矢量的 P 偏振(TM 偏振)光的边界条件不同,其等效折射率也不同;当 TE 偏振光入射到金属表面时,电子会沿栅条方向自由振荡,并被金属栅反射;由于栅条线宽远小于入射光波的波长,由平行于金属栅方向上的 TM 偏振光引起的电子振荡会受到限制,这样 TM 偏振光就可直接透过,从而形成透射偏振效果。目前应用于中波红外波段的金属线栅偏振片,如以 ZnSe 为衬底的金属线栅偏振片,在 3 μm 波长附近的消光比约为 20 dB。2009 年,清华大学设计并制作了周期为 200 nm、高度为 100 nm、占空比为 0.5 的红外铝光栅。该光栅可以在中波红外波段(3 ~ 5 μm)以及 $\pm 20^\circ$ 的视场范围内提供大于 35 dB 的消光比,具有宽光谱和大视场角等特性,十分适用于偏振成像系统或偏振成像仿真系统。

2.4.2 1/4 波片

1/4 波片是用于对偏振光进行相位延迟的,也叫相位延迟器。由于其对 o 光和 e 光的相位延迟量不同,人们将对 o 光和 e 光的相位延迟量为 $\pi/2$ 相位的波片称为 1/4 波片,它可以用来产生或鉴别圆偏振光。由于偏振成像仿真产生的是光谱较宽的红外光,利用单一晶体的双折射效应制作的传统 1/4 波片对波长敏感,无法得到应用,因此必须采用消色差的 1/4 波片。目前,消色差相位延迟器大致可以分为全内反射消色差相位延迟器和双折射型消色差相位延迟器两类

[27]。不同结构的消色差相位延迟器的特点也不尽相同。全内反射消色差相位延迟器利用全反射原理: p 光和 s 光在全反射时的相位变化不一致,使两光相位产生延迟量差;通过适当选择光学材料和全反射角度,可以使一定波段内的 p 光和 s 光相位延迟量不随波长变化,从而达到消色差的目的。而双折射型消色差相位延迟器则是一种采用多块双折射晶体的复合相位延迟器。它是通过计算和优化使得 o 光和 e 光的相位延迟在一定波段内保持一致的。

3 结束语

随着偏振成像探测系统及偏振成像制导系统的逐步改进,偏振成像制导仿真技术也需不断发展。偏振成像制导仿真最核心的内容就是红外偏振目标的模拟生成技术。本文提出了几种红外偏振目标模拟方案,可以为不同的偏振成像探测系统提供具有偏振信息的目标。在现有的模拟器条件下,采用一定的方法输出偏振信息是一种较为理想的方法。

参考文献

- [1] 徐参军,赵劲松,蔡毅,等. 红外偏振成像的几种技术方案[J]. 红外技术, 2009, 31(5): 262-266.
- [2] 马利祥,李范鸣,牛继勇. 目标红外偏振特性的影响因素研究[J]. 激光与红外, 2013, 43(8): 886-889.
- [3] Ben-Dor B, Oppenheim U P, Balfour L S. Polarization Properties of Targets and Backgrounds in the Infrared [C]. SPIE, 1992, 1971: 68-76.
- [4] Joseph A Shaw. Infrared Polarization in the Natural Earth Environment [C]. SPIE, 2002, 4819: 129-138.
- [5] Lawrence B W, Andrew L, Renjie T. Image Understanding from Thermal Emission Polarization [C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1998: 625-631.
- [6] Aron Y, Gronau Y. Polarization in the LWIR [C]. SPIE, 2005, 5783: 653-661.
- [7] 孙晓兵,乔延利,洪津,等. 人工目标偏振特征实验研究[J]. 高技术通讯, 2003, 13(8): 23-27.
- [8] 汪震,洪津,乔延利,等. 热红外偏振成像技术在目标识别中的实验研究[J]. 光学技术, 2007, 33(2): 196-201.
- [9] 汪震,乔延利,洪津,等. 利用热红外偏振成像技术识别伪装目标[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(6): 853-856.

(下转第 43 页)