

文章编号:1001-5078(2018)06-0744-06

· 光电技术与系统 ·

## 多偏振方向对低照度伪装目标偏振度提取的影响

黄雁华<sup>1,2</sup>, 陈磊<sup>1</sup>, 吴成国<sup>1</sup>, 李霞<sup>1</sup>

(1. 陆军工程大学理学院, 江苏南京 211101; 2. 陆军工程大学电磁环境效应与光电工程国家级重点实验室, 江苏南京 210007)

**摘要:**基于 Stokes 矢量和 Mueller 矩阵, 推导了任意偏振方向的线偏振度表达式, 实施了多偏振方向的低照度伪装目标偏振检测实验, 以多种伪装相关的人材料三波段偏振反射实验数据为依据, 采用数值计算方法讨论了上述实验结果, 探讨了多偏振方向影响偏振度的误差和稳定性问题。研究表明, 探测角在镜面反射方向附近, 间隔  $60^\circ$  的偏振度图像的清晰度和对比度较高, 数值计算结果能合理地解释实验结果, 一致性较好; 发现当三个偏振方向角  $A, B, C$  之间的间隔角度  $\Phi_{AB} \in [40^\circ, 80^\circ]$  和  $\Phi_{AC}$  平均值为  $2.06\Phi_{AB}$  时, 偏振度标准差较小, 低照度条件下获取的偏振信息较稳定。

**关键词:**偏振检测; 线偏振度; 偏振方向; 伪装目标

中图分类号: TN29; O436.3 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2018.06.014

## Influence of multi-polarization direction on DOLP extraction of camouflage target under low illumination

HUANG Yan-hua<sup>1,2</sup>, CHEN Lei<sup>1</sup>, WU Cheng-guo<sup>1</sup>, LI Xia<sup>1</sup>

(1. College of Science, the Army Engineering University of PLA, Nanjing 211101, China;

2. National Key Laboratory on Environmental Electromagnetic Effects and Electro-Optic Engineering, the Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** The DOLP expression of any polarizer direction was deduced based on the Stokes vector and Mueller matrix. The polarization detection experiments of camouflage target under multi-polarization directions was done, and taking camouflage man-material polarization reflection experiment as the data, the experiment results were discussed by numerical calculation, and then the influence of multi-polarization directions on the stability and error of DOLP was discussed. The experimental results show that image definition and contrast of interval  $60^\circ$  in reflection direction are high under the condition of low illumination. The numerical results can reasonably explain the experimental results and show good consistency. Research further finds that three polarization direction angles  $A, B, C$  and its intensities are a composite DOLP image, when interval angle  $\Phi_{AB} \in [40^\circ, 80^\circ]$  is between  $A$  and  $B$ , and average interval angle  $\Phi_{AC} = 2.06\Phi_{AB}$  is between  $B$  and  $C$ , the stability and error of DOLP image is significantly reduced.

**Key words:** polarization detection; DOLP; polarizer direction; camouflage target

### 1 引言

强度光谱信息检测是基于电磁波强度特征和波长特征所提供的信息, 目标和背景的偏振特征往往

被忽略。偏振检测对于识别那些与背景“同谱同色”目标, 能够有效提高目标与背景的对比度<sup>[1-3]</sup>, 特别在低照度条件下的目标识别方面显示了明显的

优势<sup>[4]</sup>,所以研究低照度条件下提取偏振度的影响因素等问题是一项有意义的工作。

偏振反射特性主要取决于观测时的照明条件、几何条件以及目标的本征特性,户外情形涉及太阳光、天空散射光和反射辐射等因素的综合影响<sup>[5]</sup>。偏振度是偏振检测的一个重要的技术指标,探测器的天顶角、方位角和偏振片的偏振方向等是影响目标偏振检测的重要因素。赵云升等研究了植物单叶等典型地物的偏振特性,得到了在方位角 180°时偏振反射比最大的结果<sup>[6]</sup>。文献[7]从工程设计和测角误差影响的角度,设定偏振方向角度为 0°、60°、120°或者 0°、45°、90°、135°,目前大部分文献报道也是采用这种方式偏振成像,而其他偏振方向的偏振成像方式研究甚少。相对一定的光照条件和给定材料的偏振检测,如何放置合适的偏振方向提高目标识别能力,这对于偏振检测的前期工作是一项值得研究的课题。本文从理论上推导了任意偏振方向的线偏振度表达式,实施了多偏振方向的低照度伪装目标偏振检测实验,采用数值计算方法讨论实验结果,探讨了偏振方向影响偏振度的误差和稳定性问题。

### 2 推导任意偏振方向的线偏振度

Stokes 矢量可以完整地描述光波的偏振态,其四

$$S_0 = 2 \frac{I_A \sin(2C - 2B) + I_B \sin(2A - 2C) + I_C \sin(2B - 2A)}{\sin(2C - 2B) + \sin(2A - 2C) + \sin(2B - 2A)} \quad (3)$$

$$S_1 = 4 \frac{I_A \sin(B - C) \cos(B + C) + I_B \sin(C - A) \cos(C + A) + I_C \sin(A - B) \cos(A + B)}{\sin(2C - 2B) + \sin(2A - 2C) + \sin(2B - 2A)} \quad (4)$$

$$S_2 = 4 \frac{I_A \sin(B - C) \sin(B + C) + I_B \sin(C - A) \sin(C + A) + I_C \sin(A - B) \sin(A + B)}{\sin(2C - 2B) + \sin(2A - 2C) + \sin(2B - 2A)} \quad (5)$$

$$DOLP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0}$$

$$= 2 \frac{\sqrt{I_A^2 \sin^2(B - C) + I_B^2 \sin^2(C - A) + I_C^2 \sin^2(A - B) + 2I_A I_B \sin(B - C) \sin(C - A) \cos(B - A) + 2I_A I_C \sin(B - C) \sin(A - B) \cos(C - A) + 2I_B I_C \sin(C - A) \sin(A - B) \cos(C - B)}}{I_A \sin(2C - 2B) + I_B \sin(2A - 2C) + I_C \sin(2B - 2A)}, (0 \leq DOLP \leq 1) \quad (6)$$

其中,角 A、B、C(0 ≤ A, B, C ≤ 2π) 分别为式(2)中与 x 轴成 θ 的偏振方向,对应的光强值分别为 I<sub>A</sub>、I<sub>B</sub>、I<sub>C</sub>,我们利用式(3)~(6)研究了低照度条件下多偏振方向对伪装目标偏振度提取的影响因素。

### 3 多偏振方向的偏振检测实验

实验光路如图 1 所示,设 Oyz 为某入射面,x 方向为线偏振片的 0°方向,以下称为线偏振片的参考方向。卤钨灯光源通过准直镜筒以入射角 i 约 45°入射,目标为平均直径约 0.2 m 的大斑点迷彩伪装布,背景为树叶。为了能获得较强的偏振信息,实验

一个参量可以表示为光强的时间平均值,能够直接被探测器探测。由于大部分地物目标的反射光圆偏振分量非常微弱不易探测<sup>[8]</sup>,目前偏振检测主要是基于 Stokes 矢量和 Mueller 矩阵的测量线偏振为主的检测方式。设来自目标的反射光 Stokes 矢量 S = [S<sub>0</sub>, S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>]<sup>T</sup>,经偏振器透射光的 Stokes 矢量为 S' = [S'<sub>0</sub>, S'<sub>1</sub>, S'<sub>2</sub>, S'<sub>3</sub>]<sup>T</sup>,偏振器可用 Mueller 矩阵表示。当目标反射光圆偏振分量 S<sub>3</sub>可以忽略的情况下,来自目标的反射光经过与 x 轴成 θ 角的理想线偏振片后,透射光的 Stokes 矢量 S' 可由入射光的 Stokes 矢量 S 和线偏振片的 Mueller 矩阵 M(θ) 表示为<sup>[5]</sup>:

$$S' = M(\theta)S = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

则透射光到达探测器的强度为:

$$I(\theta) = \frac{1}{2}(S_0 + S_1 \cos 2\theta + S_2 \sin 2\theta) \quad (2)$$

其中,θ 为偏振器最大透光轴与参考方向的夹角,以下简称偏振方向。若测得 θ 对应的透过偏振器的透射光强度值 I(θ) 三组数据,由式(2)可以求出目标的 S<sub>0</sub>、S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub>参量及线偏振度 DOLP:

中探测器尽量在入射面内接收反射光,并近距离采集图像,CCD 装置距离目标中心约 0.8 m(选用 UMENER 公司的 LM165 单色 CCD 相机(SONY ICX285 芯片),选用 Thorlabs 公司复合薄膜线偏振片,增透波段 400~700 nm)。CCD 放置在探测角 r 约 45°的镜面反射方向,以 x 轴正向为起始偏振方向,步进电机旋转线偏振片在[0°,360°]间隔 15°获取图像(步进精度 0.9°),每次拍摄 3 次,共获得 3 × 24 张单色图片,重复多次实验,图 2 为低照度条件下获取的图像。

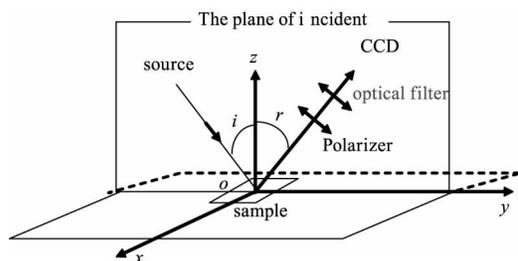


图 1 偏振检测示意图

Fig. 1 Sketch map of polarization detection

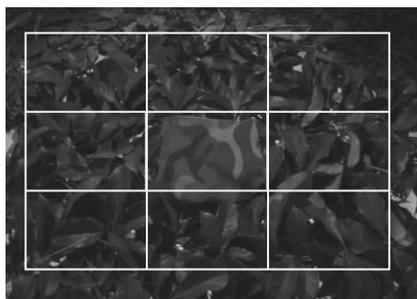


图 2 拍摄图

Fig. 2 Experiment image

利用式(6)可获得伪装目标与背景的偏振度图,设 $\Phi_{AB}$ 为偏振方向角 $A$ 和角 $B$ 之间的间隔角度, $\Phi_{AC}$ 为偏振方向角 $A$ 和角 $C$ 之间的间隔角度,令 $\Phi_{AC} = 2\Phi_{AB}$ 。为了考查偏振方向对伪装目标偏振度提取的影响,我们得到了不同 $\Phi_{AB}$ 条件的偏振度图,图3分别为 $\Phi_{AB}$ 间隔 $15^\circ$ 、间隔 $30^\circ$ 、间隔 $45^\circ$ 、间隔 $60^\circ$ 的平均偏振度图。以间隔 $60^\circ$ 为例,由于上述实验采集得到的每张照片是某个偏振方向获取的强度图,我们把每张照片都作为偏振方向角 $A$ 对应的强度图 $I(A)$ ,即 $I(A)$ 依次取偏振方向角 $A$ 为 $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $\dots$ 、 $345^\circ$ 对应的照片, $I(B)$ 、 $I(C)$ 依次间隔 $60^\circ$ ,即取下述三个偏振方向角对应的照片( $0^\circ 60^\circ 120^\circ$ )、( $15^\circ 75^\circ 135^\circ$ )、( $30^\circ 90^\circ 150^\circ$ )、 $\dots$ 、( $345^\circ 45^\circ 105^\circ$ )、共得到24张偏振度图,图3(d)为间隔 $60^\circ$ 偏振度图的平均效果图,其他间隔角度 $\Phi_{AB}$ 提取偏振度图的方法类似。

图3给出了四种间隔角度的偏振图对比,可以看出间隔 $60^\circ$ 的图3(d)合成效果较好,边缘轮廓较清楚,间隔 $45^\circ$ 和间隔 $30^\circ$ 的次之,而间隔 $15^\circ$ 图3(a)的图像噪声较多,清晰度较差。为了客观评价图像质量,选用常用的评价指标:均值、信息熵、清晰度和目标与背景的偏振度对比,评价方法结合伪装目标检测的要求,以九宫格方式<sup>[9]</sup>提取目标及其背景计算偏振度对比(图2),评价结果如表1,可以看

出,探测角在镜面反射方向附近,采用间隔 $60^\circ$ 合成的偏振图,清晰度和信息量均明显提高,能更加有效地提取偏振度信息;同时,目标与背景的偏振度对比更强,更加有利于识别目标。

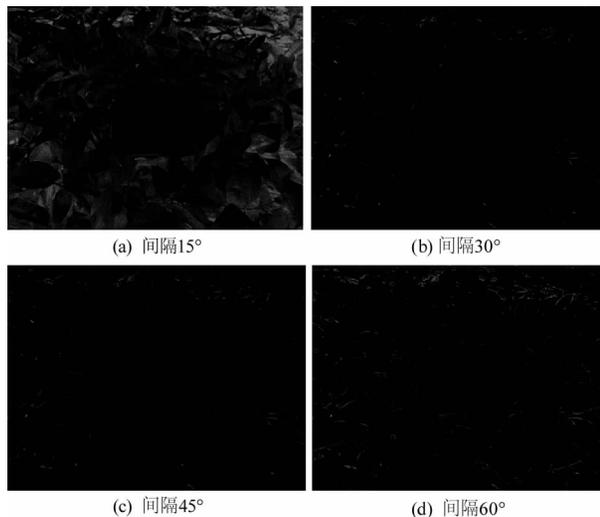


图 3 不同间隔角度合成的偏振度图对比

Fig. 3 The DOLP images comparative results of different interval angles

表 1 对图 3 的图像质量评价

Tab. 1 Evaluating results of fig. 3

方法 (Method)	均值 (Mean)	信息熵 (Entropy)	清晰度 (definition)	对比度 (Contrast)
间隔 $30^\circ$	22.109	5.1692	2.9994	0.2621
间隔 $45^\circ$	18.146	5.1231	2.9692	0.3241
间隔 $60^\circ$	19.371	5.3237	3.7910	0.3592

#### 4 实验结果的数值计算解释

##### 4.1 数值计算方法描述

由实验结果知,采用间隔 $60^\circ$ 合成的偏振度图像清晰度较好,能更加有效地提取偏振度信息。实验中保持偏振相机在入射面内,其天顶角和方位角不变。由式(6)知,当目标反射光到达偏振相机系统时,若不考虑光学系统等因素的误差,影响材料像元 $(x, y)$  DOLP 大小的主要因数是探测器对该材料像元 $(x, y)$  获得的强度值 $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$ 和线偏振片的偏振方向角 $A$ 、 $B$ 、 $C$ ,从统计的角度讲,某一个偏振方向角获取静态图像的强度值是稳定的。

对于某种材料,若给定强度值 $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$ ,偏振方向设置随机数产生,当循环计算次数越多,强度值 $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$ 对应的偏振方向角 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 出现的概率就越大,数值模拟就越接近实际情况。而对于某一材料而言,当探测器的天顶角和方位角不变时,旋转线偏

振片一周的过程中,在相同光照条件下,探测器对该材料像元(x,y)获得的强度值会有一定的范围。因此,通过实验方法获得该强度值的变化范围,即可控制强度值 I<sub>A</sub>、I<sub>B</sub>、I<sub>C</sub> 的变化,再结合式(3)~式(6)利用数值计算可以考察偏振方向角 A、B、C 对偏振度图像的影响。

### 4.2 数值计算关键参数的实验确定

采用多波段偏振成像系统,实验光路如图 1,卤钨灯光源通过准直镜以入射角 i = 30° 入射到多种伪装材料和天然材料组成的样品板(图 4 为四色(红绿蓝黑)木板、四色伪装涂料铁板、四种迷彩布、四种伪装网和丛林颜色相似的不同粗糙度塑料、纸、树叶等 46 种材料),以 x 轴(图 1)正向为起始偏振方向,间隔 15° 旋转线偏振片一周,入射面内改变偏振相机 CCD 的天顶角 r 分别为 50°、40°、30°、20° 和 10°,滤波片转轮装有中心波长及带宽分别为 (450 ± 10) nm, (550 ± 10) nm, (650 ± 10) nm 的滤波片(Thorlabs 公司的介质膜滤光片)和 1 个中性片,CCD 获得上述多种材料像元(取 20 × 20 像素)的多波段灰度值,并将该样品的灰度变化范围统计如图 5 所示。



图 4 多伪装材料样品测试图

Fig. 4 Experimental samples of Camouflage material

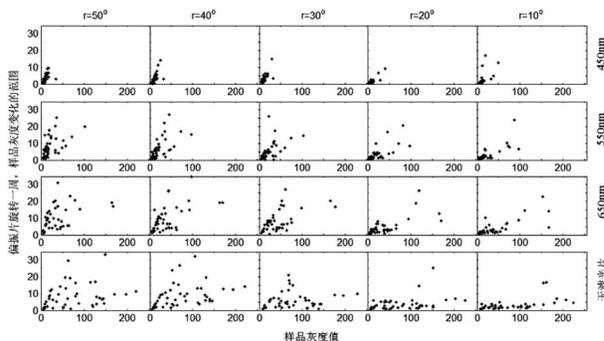


图 5 线偏振片旋转一周的 46 种材料像元(取 20 × 20 像素)的多波段灰度范围分布

Fig. 5 The distribution of spectral and intensity of forty-six camouflage materials(20 × 20 pixels) when line polarizer rotate a circle

图 5 横坐标为各样品(取 20 × 20 像素)的平均灰度值,纵坐标为偏振片旋转一周后,该样品的灰度变化范围值,采用拉依达准则的数据处理方法剔除误差较大的数据,统计各单色图像样品的强度范围,容易得到样品的灰度变化范围的平均最大值为 Width = 19.22。所以,下面数值计算时,像元 I<sub>A</sub>、I<sub>B</sub>、I<sub>C</sub> 的灰度变化范围为 Width = 20,低照度下灰度范围设置为 [0, 255] 约 1/3 的区域 [10, 90]。

### 4.3 间隔角 Φ<sub>AB</sub> 对 DOLP 的影响

#### 4.3.1 以灰度范围 [50, 70] 为例子

数值计算初始参数为: I<sub>A</sub> = 50, I<sub>B</sub> = 60, I<sub>C</sub> = 70, 强度变化范围满足 4.2 实验得到的关键参数 Width = 20; 以 x 轴为参考方向,偏振方向角 A、B、C 设置为:角 A 为随机变量, B = A + Φ<sub>AB</sub>, 角 C = A + Φ<sub>AC</sub>, Φ<sub>AC</sub> = 2Φ<sub>AB</sub>, 间隔角 Φ<sub>AB</sub> 在范围 [0°, 360°] 间隔 1° 递增,每次给定 Φ<sub>AB</sub>,角 A 在范围 [0°, 360°] 内均匀分布随机产生,交换 I<sub>A</sub>、I<sub>B</sub>、I<sub>C</sub> 的排列顺序共 6 种计算结果如图 6 所示。

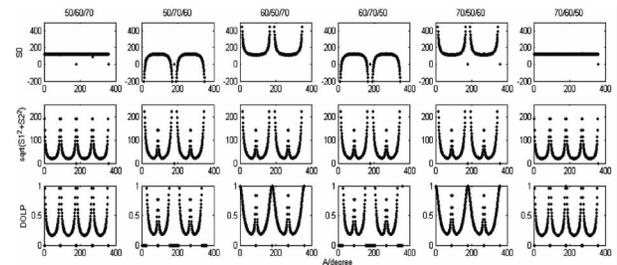


图 6 S<sub>0</sub>√S<sub>1</sub><sup>2</sup> + S<sub>2</sub><sup>2</sup> 和 DOLP 和随间隔角 Φ<sub>AB</sub> 变化的计算结果

Fig. 6 The calculation results of the S<sub>0</sub>√S<sub>1</sub><sup>2</sup> + S<sub>2</sub><sup>2</sup> and DOLP via interval Angle Φ<sub>AB</sub>

图 6 为 S<sub>0</sub>、√S<sub>1</sub><sup>2</sup> + S<sub>2</sub><sup>2</sup> 和 DOLP 随间隔角 Φ<sub>AB</sub> 在 [0°, 360°] 间隔 1° 递增的计算结果, DOLP 范围为 (0, 1), 图中舍去了计算产生的无穷大和无穷小数据。可以看出 I<sub>A</sub>、I<sub>B</sub>、I<sub>C</sub> 排列的 6 种排列方式对 S<sub>0</sub>、√S<sub>1</sub><sup>2</sup> + S<sub>2</sub><sup>2</sup> 和 DOLP 有一定影响,具有周期性,存在一些稳定值。由于曲线具有周期性,我们考察 Φ<sub>AB</sub> 的 [0°, 90°] 区间, S<sub>0</sub> 的物理意义是描述灰度值 I<sub>A</sub>、I<sub>B</sub>、I<sub>C</sub> 的平均值,由图 6 知,当 Φ<sub>AB</sub> 在 [40°, 90°], S<sub>0</sub> 符合实际意义,且在此区间 DOLP 存在最小值,其最小值附近数据变化较缓慢, DOLP 在上述区间取到最小值对应的间隔角 Φ<sub>AB</sub> 分别为 45°、66°、64°、66°、64° 和 45°, 均值为 58.3°, 可以看出当 Φ<sub>AB</sub> 取上述值时, DOLP 数据变化较稳定。

### 4.3.2 低照度条件下任意灰度范围

图 7,低照度灰度范围[10,90]内,Width = 20,  $I_A$  随机选取,  $I_B, I_C$  在范围[ $I_A, I_A + \text{Width}$ ]内随机选取, 偏振方向角 A、B、C 的取值方法同图 6, 计算次数 3000 次, 统计 DOLP 取最小值(此时 DOLP 变化较稳定)对应的间隔角  $\Phi_{AB}$ 。结果显示, 当偏振方向角 A、B、C 之间的平均间隔角  $\Phi_{AB} = 59.2^\circ$  时, DOLP 较稳定, 这与上述图 2 实验的间隔  $60^\circ$  合成的偏振度图像清晰度较高的结果基本一致, 可以看出, 采用这种偏振方向得到的图像能更加有效地提取偏振度信息。偏振检测中 CCD 对材料像元获得的灰度值具有随机性, 利用该结论的偏振方向进行偏振检测, 能够得到较稳定 DOLP 值, 从而可获取较稳定的偏振信息。

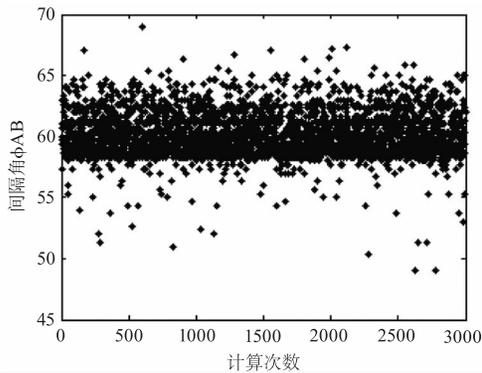


图 7 低照度灰度范围下 DOLP 取最小值, 对应的间隔角  $\Phi_{AB}$

Fig. 7 The interval Angle  $\Phi_{AB}$  of the minimum DOLP under the condition of low illumination

### 4.4 间隔角 $\Phi_{AC}$ 对 DOLP 的影响

#### 4.4.1 以灰度范围[70,90]为例子

以上讨论的问题均是  $\Phi_{AC} = 2\Phi_{AB}$  的情况, 为了进一步探知  $\Phi_{AC}$  对 DOLP 的影响, 计算如下: Width = 20,  $I_A, I_B, I_C$  在灰度范围[70,90]随机产生, 角 A 在[ $0^\circ, 360^\circ$ ]随机产生, 均服从均匀分布, 角  $B = A + \Phi_{AB}$ , 角  $C = A + \Phi_{AC}$ ,  $\Phi_{AB}, \Phi_{AC}$  均在[ $0^\circ, 360^\circ$ ]间隔  $1^\circ$  递增, 每次给定  $\Phi_{AB}$  值查看  $\Phi_{AC}$  变化, 随机计算 5000 次, 计算结果如图 8。

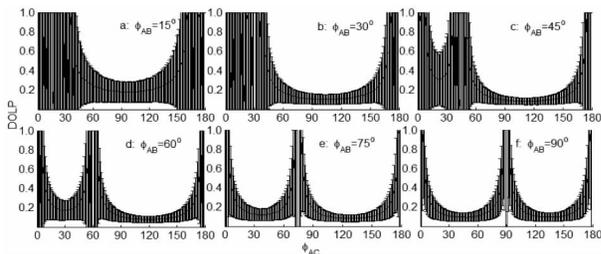


图 8 灰度范围为[70,90]的不同  $\Phi_{AB}$  得到的 DOLP 随  $\Phi_{AC}$  的变化结果

Fig. 8 The results of DOLP via different interval angle  $\Phi_{AC}$  under gray level range[70,90]

计算表明, 当  $\Phi_{AB}$  变化  $90^\circ$  后, DOLP 均值和标准差的变化具有周期性, 所以图 8 给出了当  $\Phi_{AB}$  在[ $0^\circ, 90^\circ$ ]间隔  $15^\circ$  变化, DOLP 均值和标准差(图 8 DOLP 宽度)随  $\Phi_{AC}$  变化的计算结果。以图 8(a) 为例, 该图表示给定  $\Phi_{AB} = 15^\circ$ ,  $\Phi_{AC}$  在范围[ $0^\circ, 180^\circ$ ]间隔  $1^\circ$  递增, 保持当前  $\Phi_{AB}$  和  $\Phi_{AC}$  不变, 随机计算 5000 次, 统计该过程的 DOLP 均值和标准差。考虑  $\Phi_{AC} > \Phi_{AB}$  的情况, 可以看出图 8(c)、(d)、(e) 图的 DOLP 标准差较小, 能够得到较稳定 DOLP 值, 下面分析这些 DOLP 标准差较小对应的  $\Phi_{AC}$  值。

#### 4.4.2 低照度条件下任意灰度范围

计算方法同图 8, 只是改变  $I_A, I_B, I_C$  灰度范围分别为[10,30]、[30,50]、[50,70]和[70,90], 各灰度范围均满足强度变化范围宽度 Width = 20, 图 9 为四个灰度范围的 DOLP 标准差最小值随  $\Phi_{AB}$  在[ $0^\circ, 90^\circ$ ]变化的结果。以图 9(d) 为例, 该图为灰度范围为[70,90]的 DOLP 标准差最小值与对应的  $\Phi_{AB}$  的关系, 图 9 其他图方法类似。综合图 9(a) ~ (d) 易得到下面结论: (1) 低照度的灰度范围中, 灰度值低的区域偏振度反而高, 与现有文献报道结果是一致的<sup>[4]</sup>; (2) 经计算, 在灰度范围[10,90]的低照度下, DOLP 的标准差较小的  $\Phi_{AB}$  的平均范围为[ $40^\circ, 80^\circ$ ]。

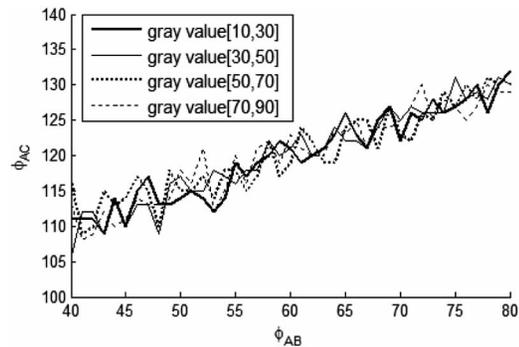


图 9  $\Phi_{AC}$  随  $\Phi_{AB}$  的变化关系

Fig. 9 The relationship of  $\Phi_{AC}$  via  $\Phi_{AB}$

由图 8 知, 各图的 DOLP 标准差最小值、 $\Phi_{AB}$  和  $\Phi_{AC}$  三个量是一一对应关系, 利用上述获得的  $\Phi_{AB}$  范围[ $40^\circ, 80^\circ$ ], 可确定灰度范围[70,90]对应的  $\Phi_{AC}$  范围, 同理可确定其他灰度范围对应的  $\Phi_{AC}$ 。图 9 为  $\Phi_{AB}$  与  $\Phi_{AC}$  的对应关系, 考虑比值  $K = \Phi_{AC} / \Phi_{AB}$ , 可以看出, 四个灰度区间的各 K 值的变化趋势基本相同, 当  $\Phi_{AB}$  取值在[ $40^\circ, 80^\circ$ ]范围, 此时  $\Phi_{AC}$  取值在[ $105^\circ, 135^\circ$ ]范围。图 9 易求出平均值  $K = 2.06$ , 即当  $\Phi_{AB}$  取值在[ $40^\circ, 80^\circ$ ]范围,  $\Phi_{AC}$  取值的平

均值为  $2.06\phi_{AB}$  时, DOLP 标准差能取到最小值, 此时 DOLP 变化较稳定, 上述实验间隔  $60^\circ$  合成的较高清晰度的偏振度图, 其偏振方向的选取也是在这个范围, 计算结果与实验结果基本吻合, 与文献 [10] 结果相一致, 并且偏振成像中人们常常采用偏振方向角  $0^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $120^\circ$  进行成像的也是属于上述计算结果的范围。

## 5 结论

本文基于 Stokes 矢量和 Mueller 矩阵, 推导了任意偏振方向的线偏振度表达式, 实施了多偏振方向的低照度伪装目标偏振检测实验, 以 46 种材料三波段偏振反射实验数据为依据, 采用数值计算方法讨论了上述实验结果, 探讨了偏振方向影响偏振度的误差和稳定性问题。研究表明, 探测角在镜面反射方向附近, 间隔  $60^\circ$  的偏振度图像的清晰度和对比度较高, 间隔  $45^\circ$  的次之, 间隔  $30^\circ$  的偏振度对比度较差, 偏振度信息提取效果较差; 数值计算结果能够较好地解释实验结果, 一致性较好。然而, 实验发现不同间隔角度得到的偏振度图像结果不同, 除了与光照条件、材料物理性质等因素有关外, 相关的物理机制尚不明确, 还需进一步研究, 这对于提高地物目标的偏振检测能力有重要的意义。

## 参考文献:

- [1] XIA Yanhui, LUO Shoujun, BAI Yanzhu, et al. Research progress of infrared polarization in target detection and recognition [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46 (8): 909 - 915. (in Chinese)  
夏寅辉, 骆守俊, 白廷柱, 等. 红外偏振在目标探测识别中的研究进展 [J]. *激光与红外*, 2016, 46 (8): 909 - 915.
- [2] J Scott Tyo, Dennis L Goldstein, David B Chenault, et al. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications [J]. *Applied Optics*, 2006, 45 (22): 5453 - 5469.
- [3] M Felton, K P Gurton, J L Pezzaniti, et al. Comparison of the inversion periods for mid-wave IR (MidIR) and long-wave IR (LWIR) polarimetric and conventional thermal imagery [R]. Aberdeen: Army Reserch Laboratory, 2010.
- [4] ZHAO Yongqiang, PAN Quan, CHENG Yongmei. Imaging spec-tropolarimetric remote sensing and application [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [5] CAO Hanjun, QIAO Yanli, YANG Weifeng, et al. Characterization and analysis of the polarization Images in remote sensing [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2002, 19(4): 373 - 378. (in Chinese)  
曹汉军, 乔延利, 杨伟锋, 等. 偏振遥感图像特性表征及分析 [J]. *量子电子学报*, 2002, 19(4): 373 - 378.
- [6] ZHAO Yunsheng, HUANG Fang, JIN Lun, et al. Study on polarizing reflectance characteristics of plant simple leaf [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2000, 4(2): 131 - 135. (in Chinese)  
赵云升, 黄方, 金伦, 等. 植物单叶偏振反射特征研究 [J]. *遥感学报*, 2000, 4(2): 131 - 135.
- [7] SUN Xiaobing, QIAO Yanli, HONG Jin. Review of polarization remote sensing techniques and applications in the visible and infrared [J]. *Journal of Atmospheric and environment optics*, 2010, 5(3): 175 - 189. (in Chinese)  
孙晓兵, 乔延利, 洪津. 可见和红外偏振遥感技术研究进展及相关应用综述 [J]. *大气与环境光学学报*, 2010, 5(3): 175 - 189.
- [8] ZHAO Yunsheng, WU Taixia, HU Xinli, et al. Study on quantitative relation between multi angle polarized reflectance and bidirectional reflectance [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2005, 24(6): 442 - 445. (in Chinese)  
赵云升, 吴太夏, 胡新礼, 等. 多角度偏振反射与二向性反射定量关系初探 [J]. *红外与毫米波学报*, 2005, 24(6): 442 - 445.
- [9] HUANG Xiaolun, LV Yuliang, WENG Xiaodi, et al. Improvement of polarization performance of camouflage paint and measurement of Muller matrix [J]. *Journal of PLA University of Science and Technolog*, 2017, 18(3): 302 - 306. (in Chinese)  
黄小伦, 吕绪良, 翁泉迪, 等. 伪装涂料偏振性能改进及穆勒矩阵分析 [J]. *解放军理工大学学报: 自然科学版*, 2017, 18(3): 302 - 306.
- [10] JIAN Xiaohua, ZHANG Chunmin, ZHAO Baochang, et al. The optimization theory of detection angle in polarization measurement using polarization interference imaging spectrometer [J]. *Acta Phys. Sin*, 2009, 58(4): 2286 - 2293. (in Chinese)  
简小华, 张淳民, 赵葆常, 等. 利用偏振干涉成像光谱仪进行偏振检测的最佳角度分析 [J]. *物理学报*, 2009, 58(4): 2286 - 2293.