

CCD 双站被动定位效能评估

曹海源, 黎 伟, 陆益敏, 初 华, 米朝伟

(陆军工程大学军械士官学校 光电火控系, 湖北 武汉 430075)

摘 要: 光电被动定位系统隐蔽性好, 有利于提高复杂电磁环境中对抗作战的效能。建立基于 CCD 的双站被动定位系统模型, 为提高测算精度, 依据最小二乘法原理推导出静止目标坐标的求解方法。基于大气消光系数、目标背景亮度系数、CCD 成像设备参数建立 CCD 侦察模型。以目标探测概率大于 10% 为标准, 确定单个 CCD 的作用距离, 并在此基础上分析 CCD 双站定位范围随双站间距的变化关系。在有效定位范围内抽取批量目标样本, 计算双站定位误差, 分析误差的均值和标准差随双站间距的变化规律。计算结果表明: 对于确定的天气条件及 CCD 成像设备, 当双站间距超过一定距离后, 定位范围将逐步减小; 定位误差及误差离散程度随着双站间距的增加先变小后变大。分析结果对于优化 CCD 设备参数、合理配置观测站位置具有一定的借鉴意义。

关键词: 被动定位; CCD 传感器; 光电对抗; 作用距离

中图分类号: TN97 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210148

Effectiveness evaluation for double-station passive location based on CCD

Cao Haiyuan, Li Wei, Lu Yimin, Chu Hua, Mi Chaowei

(Opto-electronics Department, Ordnance Noncommissioned Officers School, Army Engineering University, Wuhan 430075, China)

Abstract: The system of photoelectric passive location with good concealment could improve the combat effectiveness of confrontation in complex electromagnetic environment. The system model of double-station passive location based on CCD was established. In order to improve the accuracy of calculation, the calculation method of target coordinate was provided according to the principle of least square method. The CCD reconnaissance model was established based on atmospheric extinction coefficient, the luminance coefficient of target and background, parameters of CCD imaging equipment. Based on the rule that the detection probability must be more than 10%, the operating distance of single CCD was calculated. Then, the change relations of the double-station location range and the distance of the stations was studied. By the target samples within the effective location range, the double-station location error was calculated. Then, the variation of mean value and standard deviation with the distance of the stations was analyzed. The calculation show that to certain weather and CCD, when the distance of the stations exceed a certain value, the location range would decrease rapidly. With the increase of distance, the location error and its dispersion first increase and then decrease. The analysis results have certain reference significance for optimizing CCD equipment parameters and reasonably configuring the position of observation stations observation stations. The analysis conclusion can be use for reference to optimize the CCD parameters and choose the reasonable location of observation station.

Key words: passive location; CCD sensor; photo-electric countermeasure; operating distance

收稿日期: 2021-12-08; 修订日期: 2022-01-25

基金项目: 陆军武器装备军内科研项目 (LJ20191A040162)

作者简介: 曹海源, 男, 副教授, 硕士, 主要从事军用光电技术方面的研究。

0 引言

光电侦察与定位是光电对抗的重要内容,其职能是为光电跟踪及光电打击提供精确的目标信息。目标信息包括目标方位和距离。传统的定位方法是利用激光测距机或雷达^[1],由于系统工作时均向外辐射能量脉冲,面临光电反侦察及电磁反辐射攻击的严重威胁^[2-3]。光电被动侦察及定位是借助目标的主动辐射、自身辐射或反射等途径,采用单站或多站光电探测器实现被动测距与定位,其具有隐蔽性好、抗电磁干扰能力强等突出优点。光电被动定位既能独立完成中近程目标探测与捕获任务,又可在复杂电磁环境下实现与雷达探测系统的复合^[4],可显著提高作战对抗效能。因此,光电侦察及被动定位是当前重要研究方向。

光电被动定位目前主要有基于图像处理的方法、基于目标物体辐射和大气传输特征衰减的测量法、基于角度测量的几何方法等^[5-7]。基于图像处理的方法一般要求被测目标到达可识别的距离内,限制了其定位范围,军事应用价值不大^[4];基于目标物体辐射和大气传输特征衰减的方法已被华中光电研究所的研究人员进行了计算机仿真和验证,其前提是假定目标辐射强度恒定,定位精度受光电前端指向精度和大气传输模型准确性的影响^[5],工程应用还需进一步完善。

基于观测站的角度测量方法运用三角形交叉定位原理实现对静止或动态目标的定位,目前研究更多、应用更广。但是其定位计算精度受观测站之间的距离影响较大^[8],从一定程度上限制了其潜在效能的发挥。王莲芬等基于红外探测器开展了双站被动定位技术在光电对抗领域的研究,叶映宇等基于短波接收器开展了辐射源的双站定位研究^[8-9]。相比之下,CCD 传感器具有成像分辨率高、具备颜色细节等突出优点,是大部分军事侦察系统中必备的探测设备,但目前关于采用 CCD 传感器的双站定位研究鲜见报道。文中的研究对象是在光电对抗模拟训练中,采用两个可移动的观测站点对静止目标进行隐蔽侦察与定位。针对此需求,建立侦察模型,从探测概率、作用距离、定位精度等方面对 CCD 双站被动定位方法进行效能分析,为优化传感器参数及位置配置、提高测量精度提供参考。

1 基于 CCD 的双站定位系统

目标、观测站、坐标系共同构成一个观测系统。观测站采集目标数据,经过计算将数据映射到坐标系内形成位置或轨迹,实现定位。若采用两个观测站,且使用的探测器是 CCD 成像设备,则构成基于 CCD 的双站定位系统。

三维空间坐标定位模型适合于对运动目标的定位特性进行动态分析,比较复杂。平面直角坐标系定位模型相对简单,便于分析静态目标的定位特性。另外,由于动态目标在每一特定时刻的位置点是确定的,因此对其进行定位分析时,通常是选取某一时刻,确定目标位置,然后采用平面直角坐标模型进行分析和评价^[10]。文中的测量对象是静止目标,为便于分析,建立平面直角坐标模型。

如图 1 所示,两个观测站点的间距为 D ,站点之间的连线为观测基线,在站点采用可见光成像设备 CCD1、CCD2 同时对静止目标进行观测,观测角度分别为 α 、 β 。

假定 CCD1 位置坐标为 $(0,0)$, CCD2 坐标为 $(D,0)$,目标出现位置为 (x,y) ,有如下关系:

$$\begin{cases} \tan \alpha = \frac{y}{x} \\ \tan \beta = \frac{y}{x-D} \end{cases} \quad (1)$$

转化为矩阵形式表示:

$$\begin{bmatrix} \tan \alpha & -1 \\ \tan \beta & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ D \tan \beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中,角度测量过程为:目标通过镜头在 CCD 靶面成像,经信号处理后在监视器上显示,人眼从监视器上观察目标图像,并操作转台实现目标瞄准,测角设备自动进行角度测量。由于设备精度及人为因素,每一个角度观测值不可避免存在误差,最终导致目标坐标

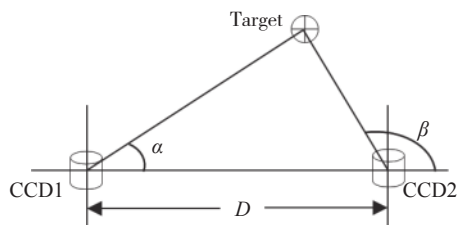


图 1 基于 CCD 的双站定位示意图

Fig.1 Diagram of double-station location based on CCD

误差。为提高测算精度,采用最小二乘原理求公式 (2) 的最小均方误差解, 实现对目标的准确定位。该线性方程的最小均方误差解为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} \tan \alpha - 1 \\ \tan \beta - 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tan \alpha - 1 \\ \tan \beta - 1 \end{bmatrix} \right)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \tan \alpha - 1 \\ \tan \beta - 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D \\ \tan \beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

2 CDD 侦察模型

图 2 为人眼借助 CCD 成像设备观察目标的示意图, 设目标尺寸为 L , 目标距离为 R , 镜头焦距为 f , 当 $R \gg f$ 时, 像距接近于 f 。CCD 传感器靶面尺寸 (对角线长度) 为 S_p , 监视器的对角线长度为 S_c , 设 θ 为目标图像相对人眼的张角, 则有:

$$\theta = 2 \arctan \frac{g L f S_c}{2 R S_o S_p} \quad (4)$$

式中: g 为弧分换算系数; S_o 为人眼的明视距离, 一般取 250 mm。

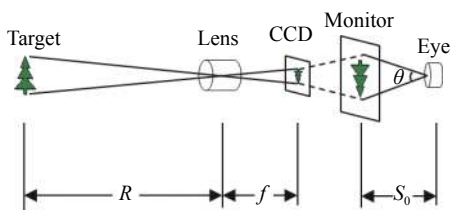


图 2 人眼采用 CCD 侦察示意图

Fig.2 Diagram of reconnoiter by eyes and CCD

目标处于特定的背景中, 由于反射特性、空间位置、表面材料等物理因素, 导致目标与背景存在色彩和亮度对比^[1]。其中色彩对比在近距离观察时影响较大, 但在战场侦察中一般距离较远, 亮度对比度具有决定性作用。

目标和背景的亮度对比为^[4]:

$$K_l = \frac{|L_b - L_o|}{\max(L_b, L_o)} \quad (5)$$

式中: L_b 为背景亮度; L_o 为目标亮度。当目标距离较远时, 目标与背景的空间位置近似一致, K_l 可直接以目标和背景的亮度系数 r_b 、 r_o 表示, 即:

$$K_l = \frac{|r_b - r_o|}{\max(r_b, r_o)} \quad (6)$$

由于大气衰减作用, 目标与背景亮度将被降低, 由朗伯-比耳定律, 影响传输的主要是消光系数, 大气

透过率可表示为:

$$\tau = e^{-aR} \quad (7)$$

式中: R 为水平方向大气层厚度 (近似为观察距离); a 为水平方向单位大气层消光系数。

此外, 大气中由于太阳辐射所产生的散射光形成了一定的气幕亮度将增大目标与背景的亮度, 气幕亮度可表示为:

$$L_a = L_h(1 - e^{-aR}) \quad (8)$$

式中: L_h 为空气层无穷厚时的气幕亮度, 一般取天边靠近地平线处的天空亮度。

故目标与背景的亮度经过一段距离 R 传输到 CCD 成像设备时, 实际镜头处的视觉亮度分别为:

$$\begin{cases} L'_o = L_o e^{-aR} + L_h(1 - e^{-aR}) \\ L'_b = L_b e^{-aR} + L_h(1 - e^{-aR}) \end{cases} \quad (9)$$

由公式 (5) 可知, 目标与背景的视觉对比度为:

$$K_{ls} = \frac{|L'_b - L'_o|}{\max(L'_b, L'_o)} = \frac{K_l}{1 + \frac{L_h(e^{aR} - 1)}{\max(L_b, L_o)}} = \frac{K_l}{1 + \frac{r_h(e^{aR} - 1)}{\max(r_b, r_o)}} \quad (10)$$

式中: r_h 为水平方向的天空亮度系数。

CCD 成像设备性能也会导致视觉对比度的变化, 但在正常情况下影响较小, 故不考虑。

当人眼通过 CCD 设备侦察时, 目标最终能否被探测到还与与人眼恰好能发现目标的最小亮度对比值有关, 称为亮度对比阈值 ε 。实验表明: ε 是一个呈正态 $N(\mu, \sigma^2)$ 分布的随机变量, 其均值 μ 与视角 θ 的关系为:

$$\mu = \begin{cases} 0.05, & \theta \geq 30^\circ \\ 0.812\theta^{-0.819}, & \theta < 30^\circ \end{cases} \quad (11)$$

由 K_{ls} 及 $N(\mu, \sigma^2)$ 可求得某一观察距离 R 上目标的探测概率为:

$$P(D) = P(K_{ls} \geq \varepsilon) = \int_{-\infty}^{K_{ls}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\varepsilon - \mu)^2}{2\sigma^2}} d\varepsilon = \int_{-\infty}^{\frac{K_{ls} - \mu}{\sigma}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = \Phi\left(\frac{K_{ls} - \mu}{\sigma}\right) \quad (12)$$

其中

$$\Phi\left(\frac{K_{ls} - \mu}{\sigma}\right) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (13)$$

根据约翰逊准则, 标准差 $\sigma = 0.3876\mu$ 。

3 CCD 双站定位范围分析

3.1 单站 CCD 目标探测概率的计算

在双观测站中,每个站点配置的 CCD 参数一般会有所不同,根据 CCD 侦察模型分别对单个 CCD 的目标探测概率和作用距离进行仿真计算。

设定仿真条件为晴朗天气,能见度为 13 km。大气衰减系数 a 是散射系数和吸收系数之和,因大气状态的不同有较大的差别,在估算光电探测系统作用距离的文献中,为简单起见,一般设定为一个常数。根据仿真天气条件,设定在 CCD 可见光波段的大气衰减系数为 0.15 km^{-1} [2]。天空背景亮度系数 r_h 随季节、地区、太阳方位、云层及大气透过率变化,数值范围一般为 $0.2\sim 15.8$ [4],设定 r_h 为 0.4。目标尺寸为 9.45 m,目标亮度系数 r_o 取 0.5,背景亮度系数 r_b 取 0.3。观测站 1 成像设备指标: CCD 探测器像元尺寸为 $3.75 \mu\text{m}$,靶面尺寸为 $1/3 \text{ in}$ ($1 \text{ in}=2.54 \text{ cm}$), $1292\times 964 \text{ pixel}$,镜头焦距 $f=125 \text{ mm}$,入瞳直径为 80 mm,监视器 7 in;观测站 2 指标: CCD 探测器像元尺寸为 $3.45 \mu\text{m}$,靶面尺寸 $1/1.8 \text{ in}$, $2048\times 1536 \text{ pixel}$,镜头焦距 $f=100 \text{ mm}$,入瞳直径为 60 mm,监视器 10 in。两个 CCD 光谱响应范围均为 $0.4\sim 0.97 \mu\text{m}$ 。

根据公式 (10)~(13),采用站点 1 的 CCD 对目标进行侦察,目标视在对比度及探测概率的仿真计算结果如图 3 所示。

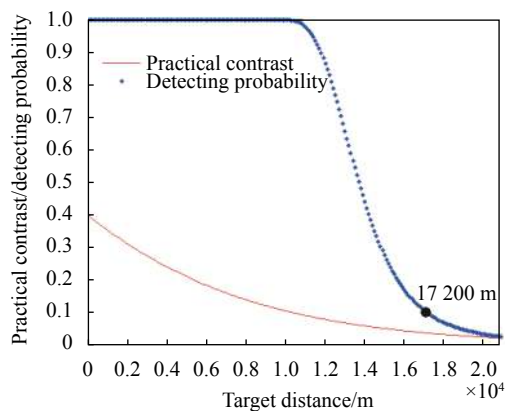


图 3 视在对比度、探测概率随距离的变化曲线

Fig.3 Curve of contrast and detection probability with distance

由图可见:随着目标距离的增大,由于大气的衰减作用越来越强,经过 CCD 成像后,目标与背景的对

比度由 0.4 逐渐减小;在大约 10 km 距离范围内,人眼借助 CCD 对目标的探测概率几乎保持在 100%,超出该距离后,一方面由于目标图像尺寸变小,对于人眼的张角越来越小;另一方面,大气衰减使得目标与背景的视在对比度逐步变小,使得探测概率迅速降低。当距离超过 17.2 km 时,探测概率低于 10%。

经过仿真计算,观测站 2 配置的 CCD 视觉对比度及探测概率的变化规律与观测站 1 类似,当距离超过 15.8 km 时,探测概率低于 10%。

3.2 CCD 双站定位范围的计算

定义对目标的探测概率下降到 10% 以下时对应的距离为探测距离[11]。由仿真结果可知,观测站 1 的探测距离 R_1 为 17.2 km,观测站 2 的探测距离 R_2 为 15.8 km。实现目标定位的必要前提是双站能同时探测目标,即目标同时位于两个观测站的视场以内。借助转台控制,CCD 可作俯仰 ($-15^\circ\sim 90^\circ$)、方位 ($0^\circ\sim 360^\circ$) 运动,因此理论上单个 CCD 的有效侦察范围是近似半球形空间区域,双站 CCD 的侦察范围是这两个空间区域的交汇区域。对于该范围内的目标,不考虑测量天顶角和气溶胶浓度[12]的影响,可建立由目标、CCD1、CCD2 三点构成的平面直角坐标系进行分析。

以 CCD1 所在位置为坐标原点,以双站基线方向为水平轴,设双站间距为 D ,假定目标处于双站基线的一侧(第一、第二象限区域),则当 $0 < D \leq (R_1 - R_2)$ 时,双 CCD 定位范围如图 4(a) 所示;当 $(R_1 - R_2) < D \leq (R_1 + R_2)$ 时,定位范围如图 4(b) 所示。

图 4 中,两段弧线分别表示 CCD1 与 CCD2 的作用距离界限,弧线交汇区域为双站定位范围。该范围内的小三角形为随机生成的目标位置点。设定目标点到双站基线的距离最大值为最大定位距离,则该距离值随双站间距的变化曲线如图 5 所示。

由图 4、5 分析得出,定位范围的中心接近双站基线的中心区域(取决于两个 CCD 站点的指标参数)。随着双站间距 D 的增大,定位范围大小相应发生变化。在间距 D 较小时,定位范围的最大宽度为 $2R_2$,当间距 D 超过 $(R_1 - R_2)$ 后,宽度逐步减小,直至为 0;最大定位距离在间距 D 小于 6.8 km 时,保持为 15.8 km,当 D 进一步增加时,最大定位距离逐步减小,且减幅

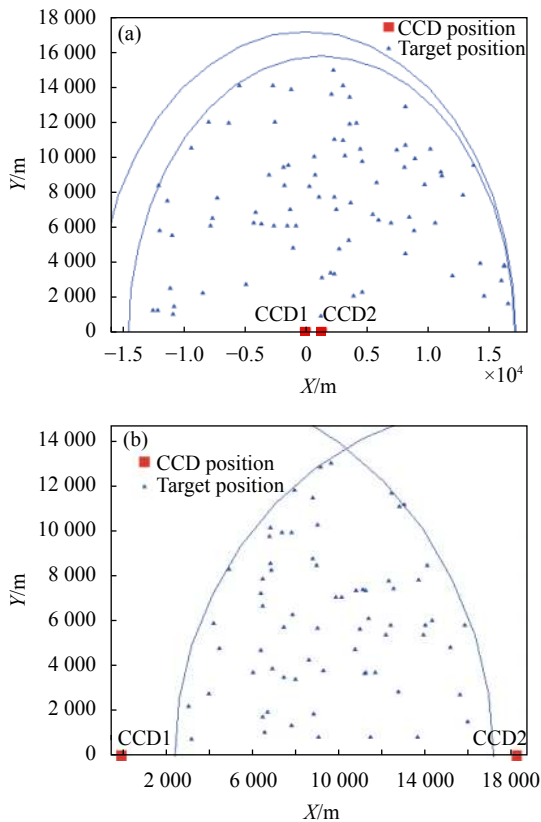


图 4 CCD 双站定位范围

Fig.4 Location range of double-station based on CCD

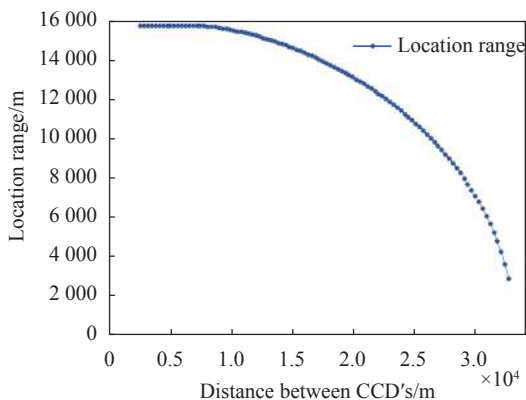


图 5 双 CCD 定位距离计算

Fig.5 Location distance of double-station based on CCD

越来越大。

4 CCD 双站定位精度分析

由前节分析可知,双站间距数值 D 决定了定位范围。在该范围内,随机抽取 n 个目标点进行定位精度分析。

在实际应用中,角度测量是借助 CCD 成像系统及测角设备实现,由人工完成对目标的侦察与瞄准,由测角设备自动完成目标的角度测量和数据传输。影响角度测量误差的因素主要有镜头光学分辨率、CCD 成像角度分辨率、测角设备的角度测量精度^[13-14]。其中镜头光学分辨率一般较高,可不考虑。CCD 角度分辨率为:

$$\omega = 2\arctan(S/2f) \quad (14)$$

式中: S 为 CCD 像元尺寸; f 为镜头焦距。根据成像设备的实际参数,可计算出 CCD1、CCD2 的角度分辨率分别为 $6.2''$ 、 $3.6''$ 。测角设备的角度误差为 00-01 密位 ($\approx 216''$)。因此,测角设备的精度是角度测量误差的主要因素。根据弧秒换算关系,设定角度观测噪声方差 $Q=1.097 \times 10^{-6}$ 。在对公式 (2) 进行仿真计算时,对每个目标的角度观测值 α 、 β 叠加一个方差为 Q 的高斯白噪声。

$$\begin{cases} \alpha = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) + \sqrt{Q} \cdot \text{randn} \\ \beta = \arctan\left(\frac{y}{x-D}\right) + \sqrt{Q} \cdot \text{randn} \end{cases} \quad (15)$$

式中: randn 表示介于 0 与 1 之间的随机数。

设定第 i 个目标的真实位置为 $T_r(i)$, 根据目标的观测角度,用最小二乘法计算目标的估计位置为 $T_e(i)$, 计算 $T_r(i)$ 与 $T_e(i)$ 的直线距离, 得到目标的定位误差 $T_l(i)$ 。 $T_l(i)$ 的均值及标准差分别为:

$$\bar{T}_l = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_l(i) \quad (16)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_l(i) - \bar{T}_l)^2}{n}} \quad (17)$$

注意到当目标点与观测站基线距离太近时,实际测量意义不大,结合仿真软件需求,剔除了与观测基线距离小于 500 m 的目标点。选取 $n=100$ 个目标点,由公式 (16)、公式 (17) 计算出定位误差的均值 \bar{T}_l 及母体标准差 σ 。

经过计算,当双站间距 D 由 0 逐步增大时,定位误差的均值及标准差的变化曲线如图 6 所示。

可以看出,当两个 CCD 间距小于 5 km 时,在有效定位范围内,平均定位误差在 50 m 以上,标准差大于 50,此时目标定位数据精度较低,误差离散程度较

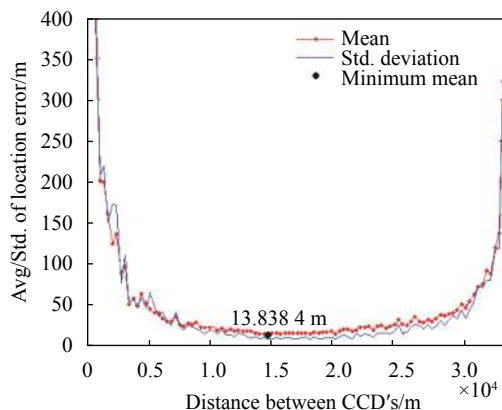


图 6 定位误差的均值及标准差

Fig.6 Mean value and Std. deviation of location error

大;当 CCD 间距继续增加时,定位误差逐步减小,并在约 14.5 km 处达到最小值 13.8384 m,标准差也减小至 13 以下;当 CCD 间距继续增加时,定位误差均值及标准差逐步增大。这是因为,当间距增加到一定值

后,最大定位距离快速减小,目标的观测角度 α 趋近于 0° , β 趋近于 180° ,导致计算误差增大;当间距 D 超过 30 km 以上,误差急剧增大。

综合以上分析,当观测站间距变化时,定位范围(最大定位宽度、最大定位距离)及定位误差情况如表 1 所示。

从表 1 可以得出以下结论:对于确定的大气条件和 CCD 设备参数,双站定位范围取决于双站间距大小,当间距超过一定数值后,最大定位宽度、最大定位距离将迅速减小;双站间距直接影响目标定位精度,从统计分析数据看,定位误差及误差值离散程度随着间距的逐步增大先减小后增大。要更好地发挥双站定位的效能,需结合气候条件和大气衰减影响,根据每个观测站传感器的特性参数,综合考虑目标位置、定位范围、定位精度的要求,对观测站位置进行优化配置。

表 1 定位范围、定位误差与双站间距的关系

Tab.1 Location range and deviation vs. the distance of double station

Distance between CCD's/km	Maximum location width/km	Maximum location range/km	Mean of location deviation/m	Std. of location deviation/m
2.5	30.5	15.8	90.9	88.6
5.0	28.0	15.8	48.2	58.2
7.5	25.5	15.7	24.6	21.5
10.0	23.0	15.6	23.9	18.4
12.5	20.5	15.2	18.8	15.4
15.0	18.0	14.6	14.2	10.5
17.5	15.5	13.9	14.3	10.1
20.0	13.0	13.1	15.6	10.3
22.5	10.5	12.0	22.7	11.2
25.0	8.0	10.8	27.5	14.1
27.5	5.5	9.1	35.4	24.9
30.0	3.0	6.9	48.3	36.2
32.5	0.5	2.9	322.3	273.5

5 结 论

基于 CCD 的双站光电被动定位是一种基于角度测量的几何方法,需要采用两个以上的观测站点,站点越多,定位精度越高。文中针对对抗模拟仿真软件开发的需要,对静止目标只考虑双 CCD 的情况,定位精度有限。进一步探索发现,如增加站点,精度将显著提高,有待后续研究。在分析 CCD 观测器的作用

范围时,将大气衰减系数及天幕亮度系数取为一般常数值,没有考虑大气湍流、侦察天顶角等其它复杂环境因素的影响。另外,该定位方法需要各个站点间的数据通信,对于静止目标,只需考虑每组角度数据的测量时刻所对应的站点位置坐标,对数据传输及处理的实时性没有严格要求。对于动态目标,如要实现实时跟踪定位测量,则要满足一定的实时性。文中双站

定位效能分析方法及结论对于采用光学瞄具、红外成像等其他传感器的被动定位也具有一定的借鉴意义,可根据气候条件、传感器特性合理部署观测站点的位置,以及从作用距离、定位精度等方面评估目标定位效能。

参考文献:

- [1] Zhang He, Qiao Chuan, Kuang Haipeng. Target geo-location based on laser range finder for airborne electro-optical imaging systems [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(1): 8-16. (in Chinese)
- [2] Fu Xiaoning, Wang Bingjian, Wang Di. Electro-optic Ranging & Countermeasure[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2018: 1-26. (in Chinese)
- [3] Sun Senzhen, Li Guangyun, Feng Qiqiang, et al. Indoor positioning based on visible light communication and binocular vision [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(4): 8-16. (in Chinese)
- [4] Liu Songtao, Wang Longtao, Liu Zhengxing. Optoelectronic Confrontation Principle[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2019: 130-268. (in Chinese)
- [5] Qi Meng, Qiu Chaoyang. The realization of an IR passive positioning method in engineering [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2016, 36(3): 14-16. (in Chinese)
- [6] Sun Quan, Huang Kai, Chen Yuwei, et al. Research on mono-station passive location method of infrared tracking system [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2018, 16(5): 35-38. (in Chinese)
- [7] Cai Mingbing, Liu Jinghong, Xu Fang. Multi-targets real-time location technology for UAV reconnaissance [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(5): 812-821. (in Chinese)
- [8] Ye Yingyu, Wen Tieniu, Chen Jun, et al. Analysis of location error of dual-station system based on shortwave external radiation source [J]. *Modern Radar*, 2015, 37(4): 6-8. (in Chinese)
- [9] Wang Lianfen, He Junfa. Single and double sited passive location technique in military survey application [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(9): 1135-1137. (in Chinese)
- [10] Wu Wei, Wang Guohong, Li Shizhong, et al. Optimum sensors deployment of double-plane passive system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(10): 51-56. (in Chinese)
- [11] Li Shuanggang, Nie Jinsong, Li Hua. Effectiveness analysis on eyeballing optical reconnaissance under a typical atmospheric condition [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(5): 915-917. (in Chinese)
- [12] Tao Zongming, Shi Qibing, Xie Chenbo, et al. Precise detection of near ground aerosol extinction coefficient profile based on CCD and backscattering lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(S1): S1060071. (in Chinese)
- [13] Li Jiakun, Feng Qibo, Bao Chuanchen, et al. Measurement method and error analysis for angular positioning error of rotary axis [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(2): 02170011. (in Chinese)
- [14] Zhang Shilei, Cui Yu, Xing Muzeng, et al. Light field imaging target ranging technology [J]. *Chinese Optics*, 2020, 14(6): 1332-1342. (in Chinese)