

基于目标辐射的被动测距方法

李振宇, 付小宁

西安电子科技大学, 陕西 西安

收稿日期: 2022年5月7日; 录用日期: 2022年6月21日; 发布日期: 2022年6月28日

摘要

为了满足现代战争的需要,对来袭目标的精确测量显得尤为重要。当前应用的主流探测手段是雷达探测。由于雷达为主动探测,在探测的过程中会暴露自己,很容易被敌方反辐射武器针对,而且武器隐身技术成为当下的主流,雷达的局限性愈发明显。红外被动测量方法则不然,任何有温度的物体都会辐射能量,利用此特性,既不会暴露自己,也可以很精确地获取来袭目标的距离温度信息。基于上述背景,本文利用美国空军大气传输软件MODTRAN生成不同温度、距离下目标在不同波段的透过率数据,利用Matlab计算出不同温度、距离下目标所对应的辐照度,通过对辐照度数据的分析与仿真,本文提出了红外目标的温度线和距离线概念,利用目标温度线及距离线,提出了两种新的红外被动测距方法。

关键词

红外被动测量, 大气透过率, 辐照度

Passive Ranging Method Based on Target Radiation

Zhenyu Li, Xiaoning Fu

Xidian University, Xi'an Shaanxi

Received: May 7th, 2022; accepted: Jun. 21st, 2022; published: Jun. 28th, 2022

Abstract

In order to meet the needs of modern war, it is very important to accurately measure the incoming target. Radar detection is the main detection method currently used. As radar is active detection, it will expose itself in the detection process, and it is easy to be targeted by enemy anti-radiation weapons. Moreover, weapon stealth technology has become the mainstream at present, and the limitations of radar are increasingly obvious. The infrared passive measurement method is different. Any object with temperature will radiate energy. With this feature, it will not expose itself,

and also can obtain the distance and temperature information of the incoming target very accurately. Based on the above background, this paper generated transmittance data under different temperatures and distances from target at different wavelengths by Modtran, and used Matlab to calculate the target's irradiance under different temperatures and distances. Through the analysis of the irradiance data and simulation, this paper puts forward the concept of lines to the target temperature and the distance. A new infrared passive ranging method is developed by using target temperature line and range line. Secondly, the correlation analysis of the irradiance of the target in the spectrum is carried out, and it is found that the irradiance ratio of 9.0~9.2 and 9.2~9.4 bands is independent of temperature and strongly correlated with distance. Based on this finding, a new passive ranging method is proposed in this paper. The combination of the above two methods can improve the accuracy, fault tolerance and robustness of ranging.

Keywords

Infrared Passive Measurement, Atmospheric Transmittance, Irradiance

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 研究内容

本文研究内容分两部分,第一部分如下:利用 MODTRAN 仿真得到不同温度、不同距离下的透过率,将被测红外目标等效黑体,通过普朗克公式计算出目标的辐照度,选择两个辐射能量较多的窗口作为工作波段,将两个波段测得的辐照度作为两个相关变量,对同一温度不同距离下的目标进行线性拟合,得到目标的温度线,对同一距离不同温度下的目标进行拟合,得到目标的距离线,温度线拟合为直线,距离线拟合为二次曲线,通过已知温度线和距离线的系数建立了双波段测温模型,进而求解未知目标的距离。具体过程如下:1) 测量目标在两个波段的辐照度。2) 通过两个波段辐照度的比值在已知温度线模型中进行比对,找出目标的温度范围。3) 将双波段辐照度代入已知温度范围的距离线模型中,解算出目标的距离[1]。

第二部分的主要内容为利用目标不同波段辐照度的相关性,寻找一条在一定范围内的与目标温度无关的距离线,这样就可以不用关心目标的温度,直接求解目标的距离。通过对不同窄波段的辐照度值与温度的相关性分析,发现当温度大于 450 K 时,9.2~9.4 μm 与 9.4~9.6 μm 波段的辐照度比值在一定温度范围内近乎保持不变,即这两波段的比值与温度无关,但与距离相关,因此可以通过这两波段的比值建立双波段测距模型[2]。

将上述两种测距模型结果的交集作为最终的输出结果,便可以提高模型的精度以及稳定性。下面将分别对两种测距模型的具体方法进行论述。

2. 研究方法

2.1. 测距方法 1

- 1) 通过接收目标双波段辐照度的多组数据点,对数据点线性拟得出温度线斜率从而确定目标的温度范围。
- 2) 根据目标的温度范围选取此温度范围对应的距离线。

3) 通过数据点与距离线的相对关系从而确定目标与观测点间的距离。具体判别方法为: 将数据点横坐标带入距离线的回归方程, 从而判断数据点与距离线的关系, 通过数据点到相邻两距离线距离值的大小对两线间的距离进行填充, 由此确定更加精确的距离。

为实现上述目的, 本文采取的技术方案为[3]:

1a) 截取不同的波带

采集待测目标 $t = \{t_i | i = 1, 2, \dots, N\}$ 辐射的红外光波长 $\lambda = \{\lambda_i | i = 1, 2, \dots, N\}$, 其中 $N \geq 1$;

1b) 计算辐照度

对步骤(1a)中截取的两个不同波带分别进行逐线积分, 获取两个波带上不同待测目标 t 和传输距离对应的多组光辐射能量 E_1 和 E_2 , 其中 E_1 为 $\lambda_1 \sim \lambda_2 \mu\text{m}$ 波带的光辐射能量, E_2 为 $\lambda_3 \sim \lambda_4 \mu\text{m}$ 波带的光辐射能量;

1c) 估计目标温度

将步骤(1b)中获取的光辐射能量 E_1 和 E_2 进行拟合, 得到线性关系 $E_2 = kE_1 + b$, 其中, k 表示取决于目标温度的系数, 根据 k 值的大小可以估计目标自身的温度; E_1 和 E_2 分别对应两个窄波带的光辐射能量; b 表示该线性关系的截距;

1d) 建立目标距离线模型

同步骤(1c)相同, 将(1b)中获取的光辐射能量 E_1 和 E_2 进行二次拟合, E_1 和 E_2 对应的是一定温度范围下同一距离不同温度的光辐射能量, 得到 $E_1 = k_1E_2 + k_2E_2 + c$, k_1 、 k_2 和 c 便是距离模型系数;

1e) 解算距离

通过传感器获取未知目标的光辐射能量 E_1 和 E_2 , 通过(1c)所示方法估计未知目标温度范围, 然后截取温度范围在(1d)中对应已知的距离线模型, 将未知目标 E_1 和 E_2 带入距离线模型中即可解出目标对应的距离。

2.2. 测距方法 2

1) 通过接收目标双波段辐照度的多组数进行据点, 对数据点线性拟得出温度线斜率从而确定目标的温度范围[4]。

2) 根据目标的温度范围选取此温度范围对应不同距离的辐照度比值范围。

3) 获取目标 $9.2 \sim 9.4 \mu\text{m}$ 与 $9.4 \sim 9.6 \mu\text{m}$ 的辐照度比值, 与(2.2)中不同距离对应的比值范围进行匹配, 进而确定目标与观测点的距离。

实现上述目的的技术方案同测距方法一类似, 如下:

2a) 截取特定的波带

同 1.1 类似, 截取 $9.2 \sim 9.4 \mu\text{m}$ 与 $9.4 \sim 9.6 \mu\text{m}$ 波带作为待测波段;

2b) 计算辐照度

同 1.2 所示方法相同, 计算 $9.2 \sim 9.4 \mu\text{m}$ 与 $9.4 \sim 9.6 \mu\text{m}$ 对应的辐照度 E_1 和 E_2 , 通过 MODTRAN 和 Matlab 仿真出不同距离下 E_1 和 E_2 的辐照度, 供下文标定使用;

2c) 估计目标温度

此处估计目标温度同(1c)完全相同, 如果对测距精度要求不高或者目标的温度可以确定在一定的范围内的情况, 此过程可以省略;

2d) 建立目标距离线模型

使用(2b)仿真得到的不同距离下的辐照度建立距离线模型, 距离线拟合直线为 $E_1 = kE_2 + b$, 其中 k 、 b 为距离系数;

2e) 解算距离

通过传感器获取未知目标的光辐射能量 E_1 和 E_2 , 通过(2c)所示方法估计未知目标温度范围, 然后截取温度范围在(2d)中对应已知的距离线模型, 将未知目标辐照度 E_1 和 E_2 带入距离线模型中即可解出目标对应的距离。

3. 实验结果

3.1. 仿真实验条件

本文的实验环境为 Windows 8.0 系统, 处理器型号为 Intel(R)Core(TM)i5-3230M CPU@2.60GHZ, 显存 4G, 64 位操作系统上使用 matlab r2018b 进行仿真。大气透过率计算软件: pcmodwin4.0。数据拟合软件: IMB-SPSS-Statistics-25。

3.2. 实验方案及结果

3.2.1. 测距方法 1

对于测距方法 1, 实验方案如下:

截取 $3.2\sim 3.4\ \mu\text{m}$ 与 $8.2\sim 8.4\ \mu\text{m}$ 两个窄波带作为工作窗口, 以 $8.2\sim 8.4\ \mu\text{m}$ 波段对应的辐照度为自变量, $3.2\sim 3.4\ \mu\text{m}$ 对应的辐照度为因变量, 拟合出目标 $600\sim 1000\ \text{K}$ 的温度线, 温等线图及其模型系数如图 1 和表 1:

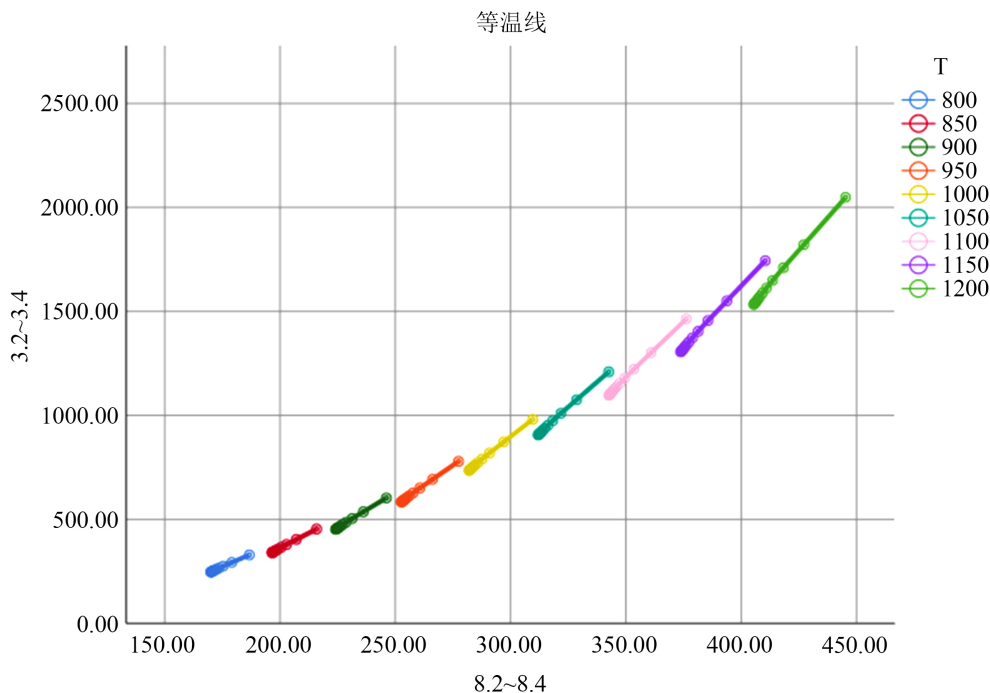


Figure 1. 600~800 K isotherm

图 1. 600~800 K 等温线图

然后将不同温度线上对应的同一距离的数据点标记, 然后对这些数据点进行拟合, 拟合后的线我们称之为距离线, 相较于大温度跨度, 小温度跨度大拟合出的距离线与实际数据更加贴合, 所以本文将温度跨度设置为 100 K, 也就是说温度线可接受的误差为 100 K。经过反复实验, 对低温目标适合用二项式对距离线进行拟合, 拟合系数如下表, 调整后的 R2 为 0.999, 达到预期效果。

Table 1. 2:1:15 Km isotherm coefficient
表 1. 2:1:15 Km 等温线系数

温度(K)	斜率 k	截距 b	调整后 R2
800	4.948	-593.514	0.999
850	5.900	-818.877	0.999
900	6.888	-1090.712	0.999
950	7.899	-1410.4070	0.999
1000	8.921	-1778.575	0.999
1050	9.948	-2195.181	0.999
1100	10.971	-2659.667	0.999
1150	11.985	-3171.070	0.999
1200	12.985	-3728.119	0.999

部分高温距离线及其模型系数分别如图 2、图 3、表 2、表 3:

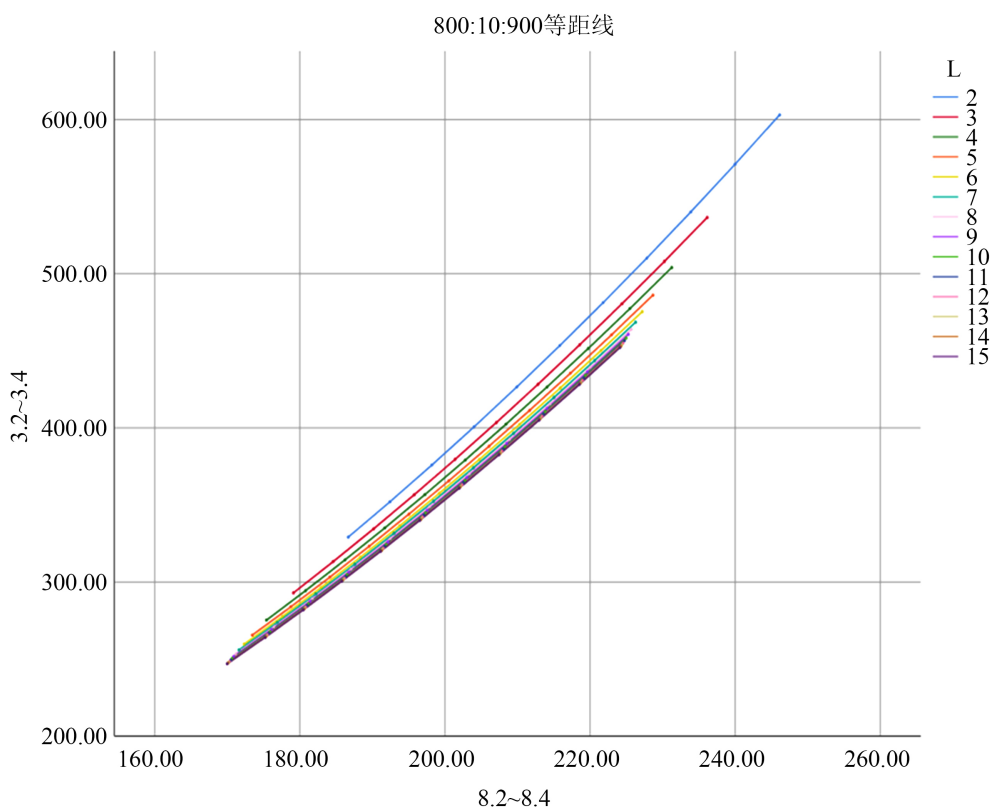


Figure 2. Isometric line of 800~900 K target
图 2. 800~900 K 目标的等距线

Table 2. 800:10:900 K isometric coefficient
表 2. 800:10:900 K 等距系数

距离	斜率 k	截距 b	调整后 R2
2	4.606	-536.565	0.998
3	4.269	-476.928	0.998
4	4.095	-447.901	0.998
5	3.993	-431.863	0.998
6	3.931	-422.287	0.998
7	3.889	-416.168	0.998
8	3.861	-412.045	0.998
9	3.841	-409.183	0.998
10	3.827	-407.092	0.998
11	3.815	-405.456	0.998
12	3.806	-404.136	0.998
13	3.799	-403.095	0.998
14	3.794	-402.260	0.998
15	3.789	-401.569	0.998

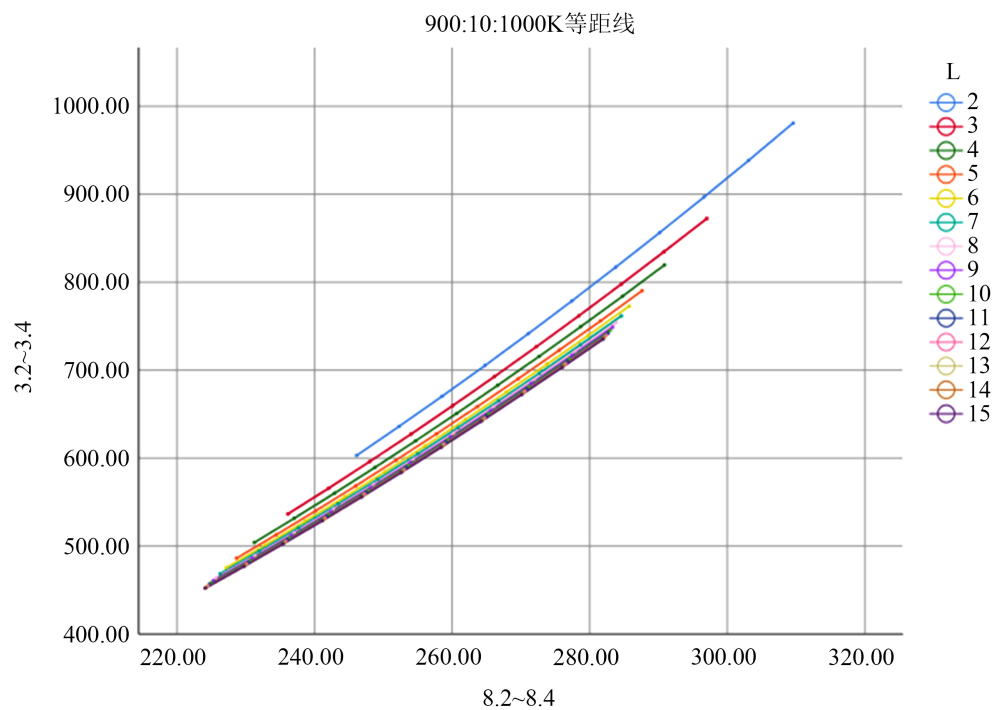


Figure 3. 900:10:1000 K isometric line
图 3. 900:10:1000 K 等距线

Table 3. 900:10:1000 K isometric coefficient
表 3. 900:10:1000 K 等距系数

距离	斜率 k	截距 b	调整后 R2
2	5.954	-868.652	0.998
3	5.517	-771.816	0.998
4	5.291	-724.706	0.998
5	5.159	-689.689	0.998
6	5.078	-683.162	0.998
7	5.025	-673.246	0.998
8	4.988	-666.567	0.998
9	4.962	-661.933	0.998
10	4.943	-658.550	0.998
11	4.928	-655.902	0.998
12	4.917	-653.767	0.998
13	4.908	-652.084	0.998
14	4.901	-650.732	0.998
15	4.895	-649.614	0.998

3.2.2. 测距方法 2

对于方法 2, 实验方案以及结果如下:

本文对不同窄波段的辐照度值相关性分析, 发现一定温度大于 450 K 时, 9.2~9.4 μm 与 9.4~9.6 μm 波段的辐照度比值在一定温度范围内近乎与温度无关, 但与距离相关, 此现象对高温、远距离目标极为明显, 由此可以根据目标辐照度直接确定目标距离。通过仿真, 得到 450~1150 K、2~20 Km 对应的辐照度比值, 将双波段的比值按 100 K 等温度分开, 为不失一般性, 分别对距离为 2 Km、5 Km、10 Km、18 Km 为中心的数据进行仿真, 对不同距离下的辐照度比值进行整理, 选取 18 Km 为数据中心, 1 Km 为距离间隔, 进行理论展示, 整理结果如表 4~10:

Table 4. 450~550 K dual-band ratio data
表 4. 450~550 K 双波段比值数据

距离	Min	Max	Ave	误差
16 Km	1.614653	1.604124	1.623888	0.00612
17 Km	1.698903	1.687782	1.708657	0.006144
18 Km	1.78616	1.77442	1.796458	0.006169
19 Km	1.871546	1.859192	1.882381	0.006195
20 Km	1.951675	1.938739	1.963022	0.006221

Table 5. 550~650 K dual-band ratio data**表 5.** 550~650 K 双波段比值数据

距离	Min	Max	Ave	误差
16 Km	1.623888	1.637073	1.630847	0.004042
17 Km	1.708657	1.722583	1.716007	0.004058
18 Km	1.796458	1.811116	1.804218	0.004075
19 Km	1.882381	1.897852	1.890547	0.004092
20 Km	1.963022	1.979223	1.971573	0.004109

Table 6. 650~750 K dual-band ratio data**表 6.** 650~750 K 双波段比值数据

距离	Min	Max	Ave	误差
16 Km	1.637073	1.646397	1.641959	0.002839
17 Km	1.722583	1.732432	1.727744	0.00285
18 Km	1.811116	1.821559	1.81661	0.002862
19 Km	1.897852	1.908794	1.903586	0.002874
20 Km	1.979223	1.990681	1.985228	0.002886

Table 7. 750~850 K dual-band ratio data**表 7.** 750~850 K 双波段比值数据

距离	Min	Max	Ave	误差
16 Km	1.646397	1.653294	1.649991	0.00209
17 Km	1.732432	1.739716	1.736228	0.002098
18 Km	1.821559	1.829249	1.825566	0.002106
19 Km	1.908794	1.916887	1.913012	0.002115
20 Km	1.990681	1.999156	1.995098	0.002124

Table 8. 850~950 K dual-band ratio data**表 8.** 850~950 K 双波段比值数据

距离	Min	Max	Ave	误差
16 Km	1.653294	1.658577	1.656035	0.001595
17 Km	1.739716	1.745297	1.742611	0.001601
18 Km	1.829249	1.835142	1.832306	0.001608
19 Km	1.916887	1.923087	1.920104	0.001615
20 Km	1.999156	2.005649	2.002525	0.001621

Table 9. 950~1050 K dual-band ratio data
表 9. 950~1050 K 双波段比值数据

距离	Min	Max	Ave	误差
16 Km	1.658577	1.662742	1.66073	0.001254
17 Km	1.745297	1.749696	1.747571	0.001259
18 Km	1.835142	1.839786	1.837542	0.001264
19 Km	1.923087	1.927975	1.925614	0.001269
20 Km	2.005649	2.010767	2.008295	0.001274

Table 10. 1050~1150 K dual-band ratio data
表 10. 1050~1150 K 双波段比值数据

距离	Min	Max	Ave	误差
16 Km	1.662742	1.666101	1.664473	0.001009
17 Km	1.749696	1.753244	1.751524	0.001013
18 Km	1.839786	1.843532	1.841716	0.001017
19 Km	1.927975	1.931917	1.930006	0.001021
20 Km	2.010767	2.014896	2.012895	0.001026

4. 结果验证

用 MODTRAN 仿真温度为 980 K、距离观测者 10 Km 左右的目标的辐照度数据, 各窄波段数据如下表 11:

Table 11. 10 Km verification data
表 11. 10 Km 验证数据

波段(μm)	3.2~3.4	8.2~8.4	9.2~9.4	9.4~9.6
10 Km	681.3614	271.1297	228.9505	183.3893

1) 首先通过 3.2~3.4 μm 、8.2~8.4 μm 两个窄波段的两组数据进行拟合, 斜率为 9.908, 与温度系数表 1 进行匹配, 目标温度范围为 950~1050 K。

2) 将 10 Km 的模拟辐照度数据与 950~1050 K 的距离线在同一坐标轴下进行比较, 根据上述距离线拟合系数, 9 Km 的距离线表达式为: $y = 4.962x - 661.933$, 10 Km 距离线表达式为: $y = 4.943x - 658.55$, 11 Km 的距离线表达式为: $y = 4.928x - 655.902$, 将数据点(271.1297, 681.3614)带入各表达式中, 求取数据点到距离线的距离, 经计算数据点介于 10 Km 与 11 Km 距离线之间, 且距 10 Km 距离线 0.2827, 距 11 Km 距离线 26.5957, 所以目标距离近似为 10 Km。

3) 根据探测方法二, 计算得 9.2~9.4 μm 与 9.4~9.6 μm 波段的辐照度比值为 1.248, 由 1)可知, 目标的温度范围为 950~1050, 将 1.248 与 950~1050 K 对应的辐照度比值表进行匹配[5], 如下表 12:

Table 12. 950~1050 K dual-band ratio data
表 12. 950~1050 K 双波段比值数据

距离	Min	Max	Ave	误差
8 Km	1.187205	1.190128	1.188716	0.001229
9 Km	1.213019	1.216009	1.214565	0.001231
10 Km	1.247442	1.250522	1.249034	0.001233
11 Km	1.29485	1.298054	1.296351	0.001236
12 Km	1.357105	1.360471	1.358845	0.001238

1.248 介于 1.247 与 1.250 之间, 所以可知目标距离为 10 Km。

4) 综合探测方法一与探测方法二的结果, 可得两种结果的交集为 10 Km, 所以最终确定目标距离观测点的距离为 10 Km, 验证完毕。

5. 结论

本文基于双波段测距提出了距离线概念, 通过温度线确定目标温度, 已知目标温度后进而可以有效提高距离线模型的准确度。其次本文首次发现 9.2~9.4 μm 、9.4~9.6 μm 两波段比值与温度的无关性以及与距离的强相关性。两种测距模型各有利弊, 但可以互补, 通过距离线模型测距适合近距离测距, 相对远距离来说, 近距离辐照度变化随距离变化幅度大, 远距离则不然, 随着距离的不断增大, 辐照度随距离变化的幅度非常小, 不足以引起距离线模型的变化, 距离线近乎保持不变。对高温远距离目标进行双波段比值测距, 9.2~9.4 μm 、9.4~9.8 μm 双波段辐照度比值几乎与目标温度毫无关系, 且与距离有非常强的相关性, 但随着温度的降低, 这种相关性逐渐变弱, 当目标温度小于 450 K 时, 这种相关性已不足以判断距离。综合仿真结果, 将两种测距方法误差结合, 误差完全控制在 10% 以内, 对于高温目标, 误差可以控制在 5% 以内, 测距精度相较当前的行业精度有巨大提升。

参考文献

- [1] 付小宁, 陈立强, 董恣. 基于改进 Elman 神经网络的红外被动测距算法研究[J]. 红外技术, 2019, 41(6): 540-544.
- [2] 潘明波, 李帝水. 现代海战光电协同探测关键技术研究[J]. 光学与光电技术, 2020, 18(2): 69-77.
- [3] 付小宁, 陈立强, 景钊, 雷新忠. 多种天气条件下地面目标的被动红外测距方法[P]. 中国专利, CN201710685445.1. 2017-08-11.
- [4] 付小宁, 雷新忠, 古丽军, 李保明. 自适应红外双波段被动测距方法[P]. 中国专利, CN201710157705.. 2017-03-16.
- [5] 景钊. 多模型结合的目标被动测距精度的调优[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.