文章编号： 1672-8785(2014)12-0001-07

论红外成像系统的最大作用距离

王忆锋 刘 萍
(昆明物理研究所，云南 昆明 650223)

摘 要：作用距离是描述军用红外成像系统整机性能的一个重要参数。作用距离可以分为探测距离、识别距离和确认距离，其中以探测距离最大。根据红外成像系统、地球曲面和目标之间的几何关系，介绍了一种基于 MATLAB 的对地观察红外成像系统的最大作用距离计算方法。该值取决于整机所在高度、地球半径和目标高度。整机的实际探测距离或者对待研整机提出的作用距离指标不应该大于此值。

关键词：红外探测系统；红外成像系统；探测距离；作用距离

中图分类号： TN216 **文献标志码**： A **DOI**： 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.12.001

On the Maximum Operation Range of an Infrared Imaging System

WANG Yi-feng, LIU Ping
(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: The operation range is one of the important parameters for describing the whole performance of a military infrared imaging system. It can be divided into detection range, recognition range and identification range among which the detection range is the maximum one. According to the geometric relationships among the infrared imaging system, the earth surface and the target, a method for calculating the operation range of an earth observation infrared imaging system based on MATLAB is presented. The value of the operation range is determined by the altitude of the infrared imaging system, the radius of the earth and the height of the target. The actual detection range of an infrared imaging system or the operation range proposed for a system to be developed should not be greater than this value.

Key words: infrared detection system; infrared imaging system; detection range; performance range

0 引言

作为军用红外成像系统的一个最重要的性能参数，作用距离可以分为探测、识别和确认三个观察等级，其中以探测距离最大。在观察地 (海) 面目标时，最大探测距离会受到地球曲率的限制，其大小取决于系统所在位置的高度、目标尺寸和地球半径等因素。本文介绍一种关于对地观察系统的最大探测距离计算方法，并探讨理解最大探测距离时应该注意的一些问题。

1 整机视线经过地球表面且与目标顶端相切时的最大作用距离

如同人眼可以向下看、向上看或者平视一样，整机视线也具有方向性。如果视线平行投射出去，如图 1(a) 和图 1(b) 所示 [1]，那么这两种情况下均无法定义最大作用距离。因为在图 1(a) 中，视线可能还未到最大作用距离就被地势遮

收稿日期：2014–10–09
作者简介：王忆锋 (1963-)，男，湖南零陵人，工学士，高级工程师，主要从事器件仿真研究。
E-mail: wangyifeng63@sina.com

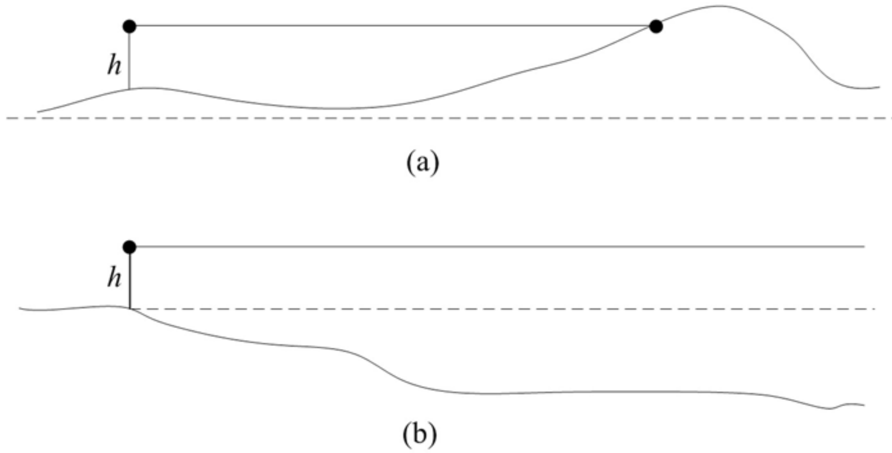

图 1 地势对视线距离的影响：(a) 上升地势；(b) 下降地势

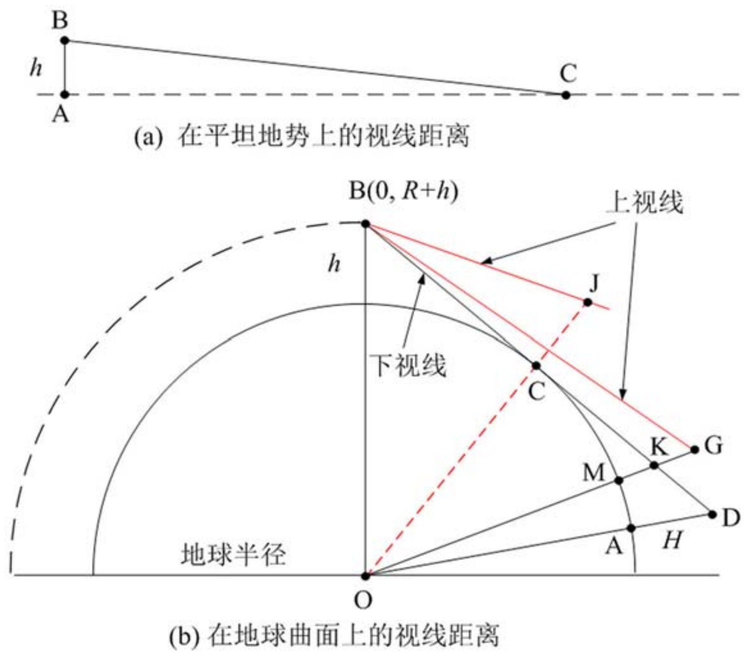

图 2 红外系统对地观察时所形成的几何关系

挡住了；而图 1(b) 类似于对空观察，此时视线可以无限地向外空间延伸。

在平坦地势上所呈现出的视线距离不一定是最大作用距离，如图 2(a) 所示。图 2(b) 所示为存在最大作用距离的情况。设整机处在离地高度为 h 的 B 点上，C 点为从 B 点投向地球表面的切线与地球表面的切点，视线 BCD 称为下视线，目标高度为 H 。目标先位于 A 点，然后移动到 M 点，再移动到 C 点，AD=MG=CJ=H 。B 点与目标顶点所在位置之间的连线称为上视线。图 2(b) 中的 BG 和 BJ 即为上视线。BCD 属于上视线与下视线重合的情况，其意义在于给出了一个临界点 D 。在 D 点上，目标顶端刚刚与整机视线相接触，但是目标整体仍在视线以下。

△OCB 和 △OCD 均为直角三角形。根据勾股定理，BD 的长度可按式 (1) 计算：

$$
\begin{aligned}
\mathrm{BD} &= \mathrm{BC} + \mathrm{CD} \\
&= \sqrt{(R+h)^2 - R^2} + \sqrt{(R+H)^2 - R^2}
\end{aligned}
\quad (1)
$$

式中，R 为地球半径，R=6378.14 km 。由于 $R \gg h$ 且 $R \gg H$ ，式 (1) 可以简化为

$$
\mathrm{BD} = \cdots \approx 112.9437(\sqrt{h} + \sqrt{H})\ (\mathrm{km}) \quad (2)
$$

或者

$$\mathrm{BD} = \cdots \approx 3.5716(\sqrt{h}+\sqrt{H})\ (\mathrm{m}) \tag{3}$$

2 目标的一半高度出现在视场切线以上时的线段长度和张角

假设整机与目标处在相同高度上，并且作为一个算例，设 $H=h=3.3$ m (取该值是为了利用文献 [2] 中给出的算例数据，以便进行比较和讨论) 。

根据式 (1) ，利用 MATLAB 可以求出 BD =12.9762 km 。由于目标高度与地球半径不在一个数量级上，如果计算结果只取到小数点后四位即采用 MATLAB 的短数据格式 (short) ，那么从结果上基本看不出什么差异。因此本文选取长数据格式 (long) ，于是有 BD=12.97624520333608 km 。

点 D 在半径为 $R+h$ 的圆周上，同时满足 BD 的直线长度方程，于是有下述关系：

$$\begin{cases} x_D^2+y_D^2=(R+h)^2 \\ x_D^2+(y_D-R-h)^2=\mathrm{BD}^2 \end{cases} \tag{4}$$

编写一个 MATLAB 程序，可以求出点 D 的坐标：

$$x_D = 12.97623848953126859689965126633\,7\ (\mathrm{km})$$
$$y_D = 6378.130100003413446149431546839\,8\ (\mathrm{km})$$

点 K 在直线 BD 上，同时点 K 又在半径为 $R+0.5h$ 的圆周上，因此可以联立求解下列直线方程和圆方程：

$$\begin{cases} \dfrac{x_K-x_B}{y_K-y_B}=\dfrac{x_B-x_D}{y_B-y_D} \\ x_K^2+y_K^2=(R+0.5h)^2 \end{cases} \tag{5}$$

利用 MATLAB 可以求出 K 点的坐标：

$$x_K = 11.5538889133767588578237957087\,47\ (\mathrm{km})$$
$$y_K = 6378.1311851604071447609085071029\ (\mathrm{km})$$

分别列出直线 MG 的长度方程、直线 MKG 所在的直线方程、直线段 MK 与 KG 相等的方程以及点 M 所在的圆方程，并联立

$$\begin{cases} (x_M-x_G)^2+(y_M-y_G)^2=h^2 \\ \dfrac{x_K-x_M}{y_K-y_M}=\dfrac{x_M-x_G}{y_M-y_G} \\ (x_M-x_K)^2+(y_M-y_K)^2=(x_K-x_G)^2+(y_K-y_G)^2 \\ x_M^2+y_M^2=R^2 \end{cases} \tag{6}$$

利用 MATLAB 可以求出

$$x_M = 11.553885924431427568160118294298\ (\mathrm{km})$$
$$y_M = 6378.1295351631143573434655508934\ (\mathrm{km})$$

以及

$$x_G = 11.553891902322090147487473123196\ (\mathrm{km})$$
$$y_G = 6378.1328351576999321783514633124\ (\mathrm{km})$$

在 △KBG 中，根据余弦定理，可以算出 ∠KBG=2.5275×10^{-4} rad=0.2528mrad(=0.0145°) ，这是线段 KG 相对于点 B 的张角大小。另有

$$\mathrm{BK}=\sqrt{(x_B-x_K)^2+(y_B-y_K)^2} = \cdots = 11.55389526488746\ (\mathrm{km})$$

$$\mathrm{BG}=\sqrt{(x_B-x_G)^2+(y_B-y_G)^2} = \cdots = 11.55389664154342\ (\mathrm{km})$$

在 △KBG 中，BG 为斜边，上述计算结果满足三角形斜边最大的要求。

3 目标位于切点位置时所对应的线段长度和张角

前面求出的 K 点是目标的一半高度刚好位于下视线时的位置。从 K 点继续往整机所在方向移动，当达到 C 点时，整个目标刚好全部出现在下视线以上。类似地，可以写出下列方程组：

$$\begin{cases} (x_C-x_J)^2+(y_C-y_J)^2=h^2 \\ \dfrac{x_C}{y_C}=\dfrac{x_C-x_J}{y_C-y_J} \\ x_C^2+(y_C-R-h)^2=\mathrm{BC}^2 \\ x_C^2+y_C^2=R^2 \end{cases} \tag{7}$$

利用 MATLAB 可以求出：

$$x_{C} = 6.48811924476563463940987339446888\ (\mathrm{km})$$

$$y_{C} = 6378.136700001707058255021787425\ (\mathrm{km})$$

以及

$$x_{J} = 6.488122601668039999999999999913422\ (\mathrm{km})$$

$$y_{J} = 6378.139999999999996648195205663126\ (\mathrm{km})$$

在 △CBJ 中，根据余弦定理，可以算出 ∠CBJ=0.5086 mrad(=0.0291°)，这是线段 CJ 相对于点 B 的张角大小。另外，

$$\begin{aligned}\mathrm{BC} &= \sqrt{(x_{B}-x_{C})^2+(y_{B}-y_{C})^2}\\ &= \cdots = 6.48812260166804\ (\mathrm{km})\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mathrm{BJ} &= \sqrt{(x_{B}-x_{J})^2+(y_{B}-y_{J})^2}\\ &= \cdots = 6.48812344089380\ (\mathrm{km})\end{aligned}$$

由此可见，一方面有 BJ>BC，即 BJ 为 △CBJ 的最大边长；另一方面，如果计算结果取到小数点后五位，则有 BJ=BC，即 △CBJ 是一个等腰三角形。从上一节的计算中也可以看到这一点。由此得到一个结论，即由上视线、下视线以及目标高度构成的三角形大体上是一个等腰三角形，此时作用距离可取其中任意一条视线的长度。

除了可以视为一个等腰三角形之外，△CBJ 还可视为一个直角三角形，其中 ∠BCJ 为直角，则有

$$\begin{aligned}\mathrm{BC} &= \sqrt{(R+h)^2-R)^2}\\ &= \cdots = 6.48812260166804\ (\mathrm{km})\end{aligned}$$

可以看到，计算结果是相同的。于是有

$$\mathrm{BJ} = \frac{\mathrm{CJ}}{\sin(\angle\mathrm{CBJ})} \approx \frac{\mathrm{CJ}}{\angle\mathrm{CBJ}} = \frac{h}{\alpha_{T}} \tag{8}$$

文献 [2] 即利用这一关系来表示作用距离 ($\alpha_{T} = \angle CBJ$)。

上述方程考虑的是一般情况下的算法。实际上，在本算例中，$H=h$，△OBD 为等腰三角形，点 C 为线段 BD 的中点，则有 BC=BD/2。从计算结果来看也是满足这一特点的。

4 已知张角时求线段长度

这里考虑图 3 所示的问题：在 △PBQ 中，已知 ∠PBQ=0.34 mrad(=0.0194°)，求线段 PQ 的长度。其中，M、K、G、D 诸点的坐标定义及数值已在前面给出。

在 △PBQ 中，根据余弦定理有

$$\begin{aligned}&(x_{P}-x_{Q})^2+(y_{P}-y_{Q})^2 = x_{P}^2+(y_{P}-R-h)^2\\ &+x_{Q}^2+(y_{Q}-R-h)^2-2\sqrt{x_{P}^2+(y_{P}-R-h)^2}\\ &\times\sqrt{x_{Q}^2+(y_{Q}-R-h)^2}\cdot\cos\alpha\end{aligned} \tag{9}$$

Q 点满足下列圆周方程：

$$x_{Q}^2+y_{Q}^2 = (R+h)^2 \tag{10}$$

N 点满足下列圆周方程：

$$x_{N}^2+y_{N}^2 = R^2 \tag{11}$$

此外，Q、N 两点之间的长度满足式 (12)：

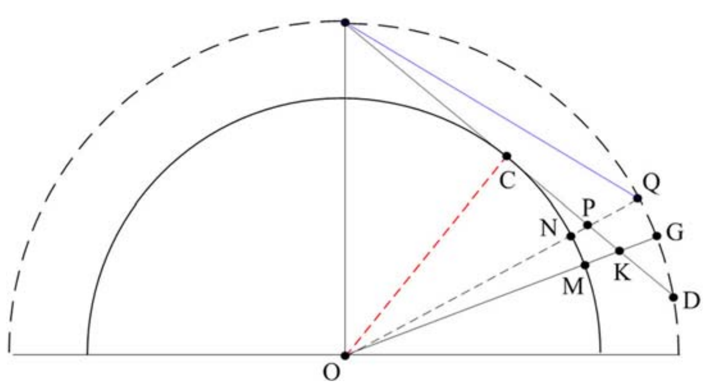

图 3 已知 ∠PBQ 的大小，求线段 PQ 的长度

$$\sqrt{(x_P-x_N)^2+(y_P-y_N)^2} \\ +\sqrt{(x_P-x_Q)^2+(y_P-y_Q)^2}=h \tag{12}$$

P 点满足直线 PB 的方程：

$$\frac{x_P-x_K}{y_P-y_K}=\frac{x_K-x_B}{y_K-y_B} \tag{13}$$

此外，P 点还满足直线 QN 的方程：

$$\frac{x_P-x_K}{y_P-y_K}=\frac{x_K-x_B}{y_K-y_B} \tag{14}$$

上述方程中有 6 个未知项，即 (x_P, y_P)、(x_Q, y_Q)、(x_N, y_N)。由于过于复杂，通过 MATLAB 的 solve( ) 命令已无法求解。此时可以利用尝试法进行求解，其具体步骤如下：

(1) 前面已经算出目标的一半高度所对应的张角为 0.2528 mrad 。该值小于 ∠PBQ=0.34 mrad，故可判断 Q 点位于 B 点与 G 点之间，并有 $x_Q < x_G$ 。假定 x_Q=0.8x_G ，计算该值所对应的 y_Q ：

$$y_Q=\sqrt{(R+h)^2-x_Q^2} \tag{15}$$

(2) 写出包括 P 点坐标在内的直线 BPD 的方程和直线 OPQ 的方程，并联立

$$\begin{cases}\dfrac{x_P-x_B}{y_P-y_B}=\dfrac{x_B-x_D}{y_B-y_D}\\[2ex] \dfrac{x_P}{y_P}=\dfrac{x_Q}{y_Q}\end{cases} \tag{16}$$

即可求出 x_P 和 y_P 的值；

(3) 求出 BP 、BQ 和 PQ 三条直线段的长度；

(4) 在 △PBQ 中，根据余弦定理，求出 ∠PBQ 的大小；

(5) 若 ∠PBQ≠0.34 mrad，则返回到第 (1) 步。然后根据大于或者小于的情况，相应地增加或减小 x_Q 的值，并执行第 (2) ∼ (4) 步，直至得到等于或近似等于 0.34 mrad 的 ∠PBQ 。一般经过几次尝试，就可以找到满足要求的 (x_P, y_P) 。

在本例中，有

$$x_P=8.6388409968384557925816741617625\ (\mathrm{km})$$

$$y_P=6378.1345121935981643474651202932\ (\mathrm{km})$$

$$\angle PBQ=0.34002056884963369005405427643994\ (\mathrm{mrad})$$

$$BQ=8.6388\ (\mathrm{km})$$

$$BP=8.63884546665075594165837824776667\ (\mathrm{km})$$

$$PQ=2.9373857665914243005584179110484\ (\mathrm{m})$$

类似地，可以分析 ∠PBQ=0.17 mrad 时的情况。表 1 列出了上述部分的计算结果。

5 引入空间频率的作用距离

如果不考虑地球曲面的影响，那么红外系统与目标之间的几何关系见图 4 。设探测器的光敏面为矩形，其尺寸为 a 。假设目标由远及近向红外系统移动。当目标在焦平面阵列上的投影小于一个像元的尺度时，目标呈现为点源；当目标在焦平面阵列上的投影等于一个像元的尺度时，目标则由点源转变为面源；随着目标渐近，越来越多的像元被目标投影所覆盖，导致目标可被探测、识别或确认。

根据几何光学成像原理，有下列关系：

$$\frac{H}{R}=\frac{na}{F} \tag{17}$$

表 1 若干条件下的目标张角或视场中的目标高度

条件参数	计算结果			
	距离 (km)	目标张角 (mrad)	下视线上方的目标高度 (m)	下视线下方的目标高度 (m)
目标高度刚好与下视线相切	12.9762	0	0	3.3
目标一半高度位于下视线之上	11.5538	0.2528	1.65	1.65
目标位于下视线与地球表面的切点	6.4881	0.5086	3.3	0
目标张角等于 0.17 mrad	10.8062	0.17	1.83	1.5
目标张角等于 0.34 mrad	8.6388	0.34	2.94	0.36

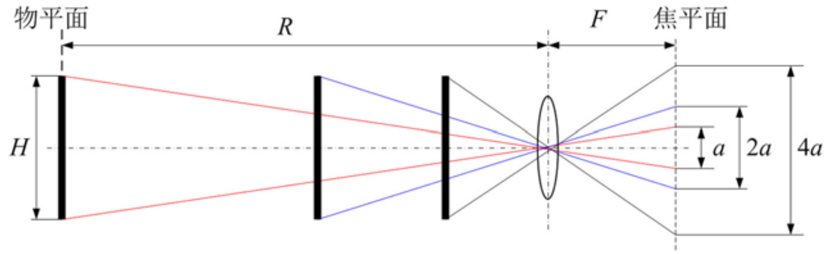

图 4 红外系统与目标之间的几何关系

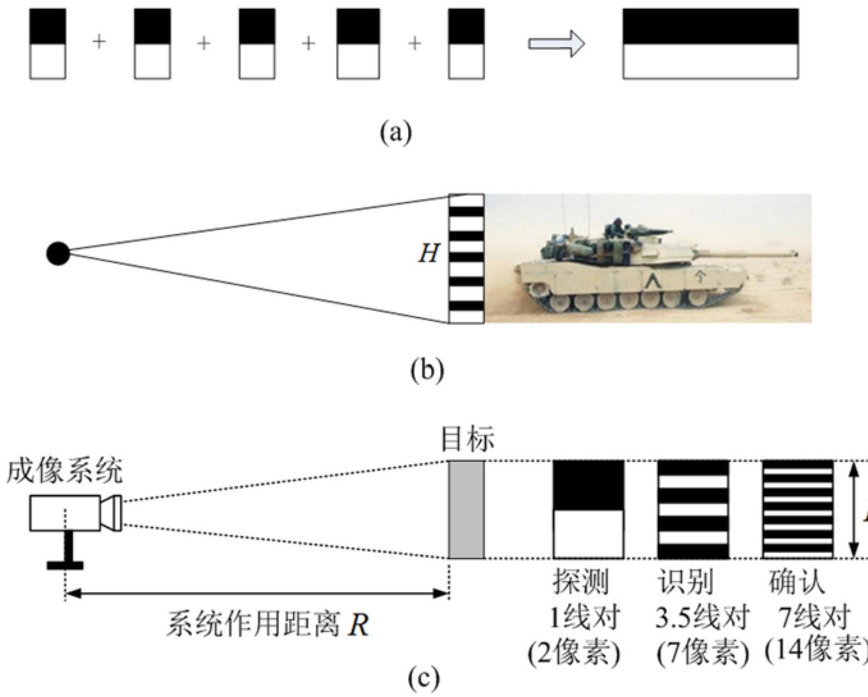

图 5 (a) 若干组一明一暗的两个像元横向并列构成一个线对；(b) 基于目标的关键尺寸，将实际目标简化等效为条带靶标；(c) 目标的关键尺寸与一个条带图案的空间频率之间的关系

式中，n 为目标投影所覆盖的像元数，n=1,2,4, $\cdots$ 。于是有

$$R = H\frac{F}{na} \tag{18}$$

本文前面讨论的情况对应于 n=2 。沿用文献 [2] 给出的算例数据 (H=3.3 m , a=6.8208$\times$10^{-5} , F=0.406 m) ，于是有

$$R = H\frac{F}{2a} = 3.3 \times \frac{0.406}{2 \times 6.82 \times 10^{-5}} = 9.8226\ (\mathrm{km})$$

该值大于图 3 中直线段 BQ 的长度 (在上节中得到 BQ=8.6388 km) 。如果观察对象为空中目标，那么这种算法是合理的，因为空中视线不受阻挡；若是针对地面目标，则显然不对，此时需要引入一个修正因子使计算结果变小。

当各像元获得的场景信息被转换到黑白显示器上以后，人眼看到的是显示器像素出现或明或暗的灰度变化。一个像素对应于一个 (探测器) 像元。如图 5(a) 所示，通过将若干组一明一暗的两个像素横向并列就可以形成两条线。这两条线构成一个线对。换言之，两个像素与一个线对等效。

引入线对概念之后，式 (18) 可以写为

$$R = \frac{H}{(n/2)} \cdot \frac{F}{2a} = \frac{H}{N_l} \cdot \frac{F}{2a} \tag{19}$$

式中，N_l 为线对数，$N_l = n/2$ 。线对可以做成条带靶标。例如，在图 5(a) 中，坦克高度 H 就是一个关键尺寸。如果在坦克旁边摆上一个同样高度的条带靶标，那么对坦克的观察问题便可简

化成对一个条带靶标的观察问题，如图 5(b) 所示。

直观上，或许容易想到用频率概念来描述若干个线对摆在一起时所呈现出的周期性变化，这就是所谓的空间频率。1 个空间频率 (周期)=1 个线对 =2 条电视线 =2 个像素。图 5(c) 所示为不同观察等级所要求的条带数量。对于探测任务而言，不同探测概率下所对应的线对数、像素数以及信噪比见表 2 。

表 2 地面车辆的探测概率与横跨关键目标尺寸的线对数及像素数的关系 [1]

探测概率	线对数	像素数
1.0	3	6
0.95	2	4
0.9		
0.80	1.5	3.0
0.50	1.0	2.0
0.30	0.75	1.50
0.10	0.50	1.00

作为一般形式，引入空间频率作为修正因子以后，式 (19) 可以写为

$$R = \frac{H}{N_l} \cdot f_T \tag{20}$$

式中，f_T 为空间频率函数，其最大值为

$$f_{T,max} = \frac{F}{2a} \tag{21}$$

沿用文献 [2] 给出的算例，在其他配套数据下计算出的可分辨空间频率约为 2.5 cycles/mrad 。该值小于 2.9765 cycles/mrad (最大空间频率 $f_{T,max}$) ，是一个可实现的空间频率。由表 1 可知，在 50% 的概率下，实现目标探测平均需要 1 个线对。于是有

$$R = \frac{H}{N_l} \cdot f_T = \frac{3.3\ \text{m}}{1\ \text{linepair}} \times 2.50\ \text{cycles/mrad} = 8.2\ \text{km}$$

6 结束语

针对作用距离的进一步分析涉及目标光子数以及其他一些系统参数 [3–6] 。在外场测试中，作用距离还可根据 GPS 坐标数据来计算 [7] 。

由日常经验及直觉可知，目标越小，就越不容易被察觉到。从理论上来说，根据 Johnson 准则，目标高度增加一倍，则识别距离也增加一倍 [8] ；反之，高度越小，识别距离越近。这一变化趋势对于确认距离和探测距离也应该是成立的。具体到坦克目标上，一般都尽量降低坦克车高，这样可以减小被探测到的距离。例如，美国 M1A1 坦克至炮塔顶的高度为 2.4 m ；俄罗斯 T90 坦克的高度为 2.2 m ；德国豹 2 坦克至炮塔顶的高度为 2.5 m ，至指挥塔顶的高度为 2.8 m ；北约标准坦克模型的尺寸为 2.3 m×2.3 m [1] 。在这些高度上，探测距离不应大于本文算例中根据 3.3 m 高度所算出的距离。

在分析红外系统对地 (海) 面目标的作用距离时，应明确讨论问题的出发点和着眼点。刚性约束条件是系统视线与地球表面相切时的直线段长度。作用距离大于视场切线的长度显然是不合理的。但是，有时会出现整机探测距离明显大于视场切线长度或者要求的整机探测距离明显大于视场切线长度之类的说法。至于这些数据是否合理，则需知道整机距离地面的高度以及目标尺寸后才好作出判断。利用本文介绍的方法，可以判断其合理性是否存在。

参考文献

[1] Campana S B. Infrared & Electro-Optical Systems Handbook (Vol.5): Passive Electro-Optical Systems [M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1993.

[2] Klein L A. Millimeter-Wave and Infrared Multisensor Design and Signal Processing [M]. Boston: Artech House Publishers, 1997.

[3] 王忆锋，余连杰，陈洁，等．基于探测距离的军用红外探测器分类 [J]. **红外**, 2011, **32**(6): 34–38.

[4] 王忆锋，史衍丽，李夏玲．论红外探测系统作用距离的比较分析 [J]. **红外技术**, 2012, **34**(9): 515–520.

[5] 王忆锋，史衍丽，马钰．论红外探测系统的作用距离 (上) [J]. **红外**, 2012, **33**(11): 8–13.

[6] 王忆锋，史衍丽，马钰．论红外探测系统的作用距离 (下) [J]. **红外**, 2012, **33**(12): 8–12.

[7] 王忆锋，王丹琳．利用卫星定位数据计算红外探测系统的作用距离 [J]. **红外**, 2013, **34**(7): 5–8.

[8] Robinson S R. Infrared & Electro-Optical Systems Handbook (Vol.7): Countermeasure Systems [M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1993.

[9] Miller J L. Principles of Infrared Technology, A Practical Guide to the State of the Art [M]. New York: Kluwer Academic Publishers, 1994.