

环境适应性设计与分析

火箭弹多模导引头对复杂气象环境适用性研究

房施东, 宁全利, 陈栋, 唐正, 张杰

(陆军炮兵防空兵学院, 合肥 230031)

摘要: **目的** 计算分析火箭弹多模导引头对复杂气象的环境适用性, 为作战使用提供参考。**方法** 采用气溶胶衰减计算公式, 建立探测距离与波长、相对湿度、能见度关系, 运用 MATLAB 计算光学成像系统在雾霾条件下的探测距离。依据约翰斯顿准则计算光学探测设备一定高度上对目标的捕获识别概率, 从而判断有云环境条件下, 云底高度对探测设备的影响。根据毫米波雷达最大作用距离模型和雨滴特性, 建立其降雨衰减模型, 计算分析降雨率对毫米波雷达探测距离的影响。**结果** 获取了雾霾条件下探测距离随相对湿度和波长的变化规律, 确定了有云条件下导引头对云底高度的最低要求, 绘制了降雨条件下毫米波雷达对不同目标的探测距离随降雨率的变化曲线。**结论** 火箭弹多模复合导引头充分发挥了不同探测设备的优势, 对复杂天气环境具有较好的适用性。

关键词: 多模导引头; 气象环境; 环境适用性; 雾霾

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.01.020

中图分类号: TJ415

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)01-0124-06

Applicability of Rocket Multi-mode Seeker to Complex Meteorological Environment

FANG Shi-dong, NING Quan-li, CHEN Dong, TANG Zheng, ZHANG Jie
(Artillery and Air Defense Academy, Hefei 230031, China)

ABSTRACT: The paper aims to calculate and analyze the applicability of rocket multi-mode seeker to complex meteorological environment, and provide the reference for the using in the fight. Firstly, with the calculation formula of aerosol attenuation, the relationship between detection distance and wavelength, humidity and visibility was established to calculate the detection distance of optical imaging system under the condition of haze- fog with MATLAB. Secondly, based on Johnston criterion, the probability of target acquisition and recognition at a certain height of optical detection equipment was calculated, to judge the influence of cloud bottom height on detection equipment under cloud environment. Finally, according to the maximum range model of MMW radar and the characteristics of raindrops, the rainfall attenuation model was established to calculate and analyze the influence of rainfall rate on the detection distance of MMW radar. The variation rule of detection distance with humidity and wavelength under haze condition was obtained. The minimum requirement of the seeker for the height of cloud bottom was determined. The change curve of detection distance of MMW radar to different targets with rainfall rate was drawn. The multi-mode composite seeker of rocket gives the advantages of different detection devices to play. It has good applicability to

收稿日期: 2019-07-31; 修订日期: 2019-08-14

Received: 2019-07-31; Revised: 2019-08-14

作者简介: 房施东 (1980—), 男, 山东安丘人, 博士研究生, 主要研究方向为信息化弹药技术与运用。

Biography: FANG Shi-dong (1980—), Male, from Anqiu Shandong, Doctoral candidate, Research focus: informationization ammunition technology and application.

通讯作者: 宁全利 (1978—), 男, 山西稷山人, 博士, 副教授, 主要研究方向为武器系统技术。

Corresponding author: NING Quan-li (1978—), Male, from Jishan Shanxi, Doctor, Associate researcher, Research focus: weapon system technology.

complex weather environment.

KEY WORDS: multi-mode seeker; meteorological environment; environmental applicability; haze-fog

火箭弹多模复合导引头包括毫米波、可见光和红外三种制导模式。虽然多模复合导引头能够充分发挥各种末制导方式的优点，提高了抗干扰能力和命中精度^[1]，但是也会受到复杂气象条件影响而无法正常工作。如雾霾天气会造成可见光和红外探测设备成像困难，当雨量较大时，雷达的作用距离也会受到较大影响。

目前，对单一探测模式导引头的气象环境适用性研究较多。孙文芳等^[2]研究了复杂大气条件对红外成像系统的影响和作用距离估算。曹瀚元等^[3]分析了雨天对毫米波制导系统的影响。对于火箭弹多模复合导引头对复杂气象环境适应性能的研究尚未见相关报道。因此开展多模复合导引头对复杂气象环境适用性研究，以尽量发挥火箭弹导引头作战效能，并为其作战应用提供参考。

1 导引头探测设备性能分析

导引头可见光探测设备工作波长在 0.380~0.780 μm 之间，只能在可见度良好的条件下使用，受雾霾、云雨等气象条件影响较大。导引头红外成像设备采用 8~12 μm 波段，对雾霾、云层也具有一定的穿透能力，但是当其浓度较大时，红外成像也会受到较大影响^[4]。导引头的毫米波雷达工作波长在 1~10 mm 之间，穿透雾霾、烟云的能力强，对雨天也有一定的适用能力，具有全天候全天的特点，但当雨量较大时，雷达的作用距离也会受到较大影响^[5]。

根据上述分析可知，雾霾、阴天、降雨作为常见的天气现象，对火导引头的作战使用具有较大影响。根据导引头不同探测设备特性，重点研究可见光成像与红外成像设备在雾霾、阴天和毫米波雷达在雨天天气的适用性。

2 对雾霾环境适用性分析

雾霾是对大气中各种悬浮颗粒物含量超标的笼统表述，在天气预警预报中统称为“雾霾天气”。其厚度较大，可达 1~3 km 左右。雾霾是一种典型的气溶胶现象，因此可用气溶胶消光系数模型进行计算分析。

2.1 气溶胶消光系数模型

任意波长 λ 某个高度 H 上到地面的气溶胶消光系数计算公式为^[6]：

$$T_{\text{acr}}(\lambda, H) = \exp\left[-\int_0^H \beta(\lambda, h) dh\right] \quad (1)$$

式中： $\beta(\lambda, h)$ 表示任意波长 λ 和任意高度 h 上的气溶胶衰减系数。它可以近似地由近地面气溶胶衰减系数 $\beta(\lambda, 0)$ 与高度分布 $N(h)$ 确定： $\beta(\lambda, h) \approx \beta(\lambda, 0) \times N(h)$ 。

其中， $\beta(\lambda, 0)$ 可以通过式 (2) 计算：

$$\beta(\lambda, 0) = \sigma_e^1(\lambda, 0) \beta(0.55, 0) \quad (2)$$

式中： $\beta(0.55, 0)$ 表示波长 λ 为 0.55 μm 上的绝对衰减系数，可由地面能见度 V_{is} 通过公式 $\beta(0.55, 0) = 3.912/V_{is} - 0.00159 \text{ km}^{-1}$ 转换得到； $\sigma_e^1(\lambda, 0)$ 为地面上 (h 为 0 km) 不同波长对 0.55 μm 波长气溶胶的相对衰减系数，如式 (3) 所示。

$$\sigma_e^1(\lambda, 0) = \frac{\int_{r_1}^{r_2} \pi r^2 Q_e(\lambda, m) N_0 r^{-\nu-1} dr}{\sigma_e^1(0.55, 0)} \quad (3)$$

式中： Q_e 为气溶胶衰减效率因子，给定气溶胶复折射率 m ，其随波长变化，可用 Mie 程序计算得到^[7]； N_0 表示气溶胶粒子数密度； ν 表示 Junge 指数，一般处于 2~4 之间^[8]。

对于气溶胶高度分布 $N(h)$ ，在不同的高度其分布规律不同，其中在 0~10 km 内按指数分布减小，即：

$$N(h) = \exp(-h/z) \quad (4)$$

式中： z 指气溶胶标高。

空气湿度会对气溶胶颗粒的半径与折射率产生较大影响。结合已有的典型气溶胶成分的折射率，采用式 (5) 计算得到不同相对湿度条件下的气溶胶复折射率， $m_e = m_{re} + im_{ic}$ ^[6]。

$$\begin{cases} m_{re} = m_{rw} + (m_{r0} - m_{rw}) \left[\frac{r(HR)}{r_0} \right]^{-3} \\ \frac{m_{ic}}{m_{re}^2 + 2} = \frac{m_{iw}}{m_{rw}^2 + 2} + \left[\frac{m_{i0}}{m_{r0}^2 + 2} - \frac{m_{iw}}{m_{rw}^2 + 2} \right] \left[\frac{r(HR)}{r_0} \right]^{-3} \end{cases} \quad (5)$$

式中：下标 w 和 0 分别表示水和干气溶胶粒子； $r(HR)/r_0$ 表示湿气溶胶粒子半径与干气溶胶粒子半径之比， $r(HR)/r_0 = (1-HR)^{-1/d} - (1-0.6)^{-1/d} + 1.0$ (HR 为相对湿度， $0.6 \leq HR \leq 0.95$ ； r_0 为干气溶胶颗粒半径； $r(HR)$ 为湿气溶胶颗粒半径； d 为常数， $d=3.5$)； m_{i0} 与 m_{i0} 通过文献[6]获取； m_{rw} 与 m_{iw} 通过软件 MiePlot v4.6 计算获取， m_{rw} 与 m_{iw} 随波长变化如图 1 所示。

根据气溶胶衰减计算公式，可计算成像系统的探测距离 $L(\lambda)$ 。为消除成像系统探测器性能和光学效率等方面的差异，取 $N_p=0.02$ 。对于中长波红外成像系统，取噪声等效温差 $\Delta T=300 \text{ K}$ ，则^[9]：

$$L(\lambda) = \begin{cases} \frac{1}{T_{\text{aer}}(\lambda, H)} \ln \frac{1}{N_{\rho}} = \frac{3.9}{T_{\text{aer}}(\lambda, H)} & 0.4 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 3 \mu\text{m} \\ \frac{1}{T_{\text{aer}}(\lambda, H)} \ln \frac{1}{\Delta T \frac{dp(\lambda, T)}{dT} P(\lambda, T)} = \frac{4}{T_{\text{aer}}(\lambda, H)} & 3 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 14 \mu\text{m} \end{cases} \quad (6)$$

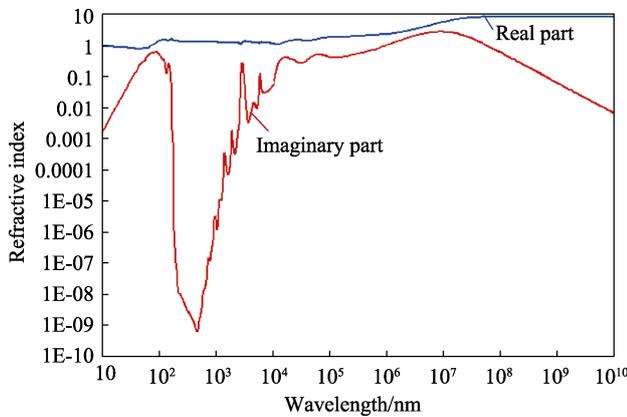


图1 水的复折射率随波长变化曲线
Fig.1 The curve of complex refractive index of water changing with wavelength

式中： $P(\lambda, T)$ 为目标热辐射功率，雾霾天可忽略瑞利散射消光系数。

2.2 雾霾条件下的探测距离计算

根据文献[6]，大陆型气溶胶 Junge 指数可取 $\nu=3.0$ ，标高可取 $z=5 \text{ km}$ 。假设弹目距离为 3.0 km ，导引头俯仰角为 -70° ，运用 MATLAB 计算得不同波长下，探测距离 L 与地面能见度 V_{is} （相对湿度 $HR=60\%$ ）、探测距离 L 与相对湿度（能见度 $V_{is}=3 \text{ km}$ ）的关系分别如图 2 和图 3 所示。

通过图 2 可以看出，在相对湿度为 0.6 条件下，导引头探测距离随着波长和地面能见度的增大而增大。通过图 3 可看出，随着相对湿度的增大，探测距离逐渐减小，且其减小幅度受波长影响较大。

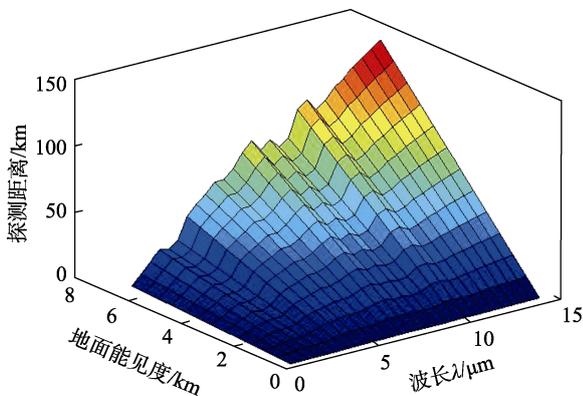


图2 探测距离与波长、地面能见度的关系
Fig.2 The relationship between detection range and wavelength & ground visibility

为进一步探求在不同能见度、相对湿度条件下探

测距离 L 的变化规律，首先绘制不同波长条件下的 L - HR 曲线，如图 4 所示。其中图 4a 为可见光波段曲线，图 4b 为远红外 $8\sim 14 \mu\text{m}$ 波段曲线。

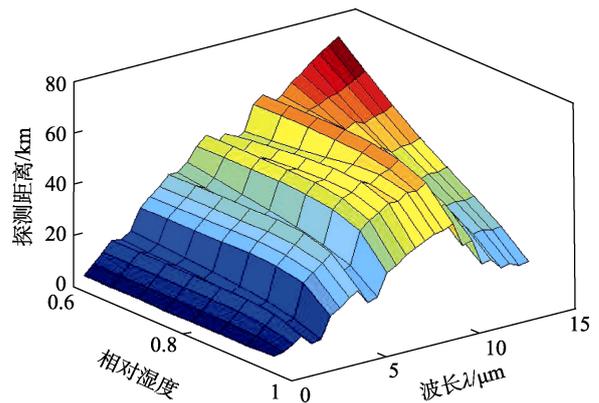
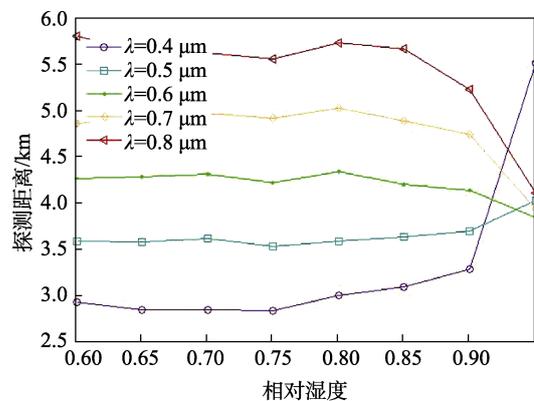
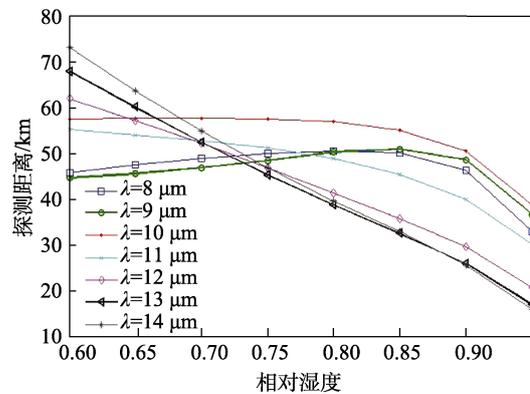


图3 探测距离与波长、湿度的关系
Fig.3 The relationship between detection range and wavelength & humidity



a 可见光成像设备



b 红外成像设备

图4 不同波段上探测距离与相对湿度关系
Fig.4 The relationship between detection range of different wavelengths and relative humidity: a) visible light imaging device; b) infrared imaging device

按照图 4 曲线的变化规律,根据相对湿度选择合适的波长来计算分析能见度、相对湿度对探测距离 L 的影响。在可见光波段,相对湿度对探测距离的影响不大,因此选择 $\lambda=0.5 \mu\text{m}$; 在 $8\sim 14 \mu\text{m}$ 波段,相对湿度对探测距离的影响较大,因此按照探测距离最小化原则选择波长。当相对湿度 ≤ 0.73 时,选择 $\lambda=9 \mu\text{m}$, 当相对湿度 >0.7 时,选择 $\lambda=13 \mu\text{m}$ 。最后,根据选择的波长,计算分析得探测距离随能见度、相对湿度的变化规律,如图 5 所示。已知导引头光学设备的探测距离要求和相对湿度条件,根据图 5 即可推断导引头对雾霾天气的适用性。

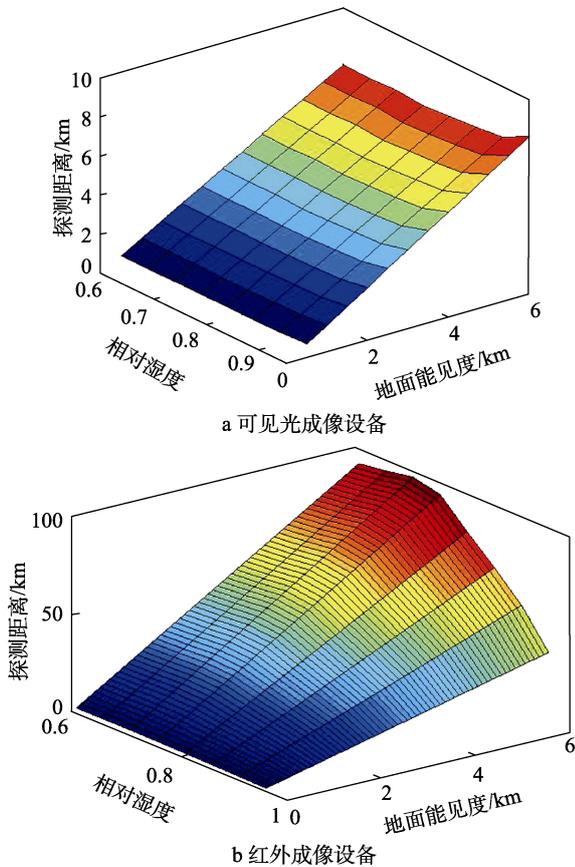


图 5 不同相对湿度条件下探测距离与地面能见度关系
Fig.5 The relationship between detection range under different relative humidity conditions and ground visibility: a) visible light imaging device; b) infrared imaging device

3 对有云天气的适用性分析

毫米波雷达对云层具有较好的穿透能力,但是可见光和红外探测设备受云层影响较大。因此导引头需要穿过云层底部后,才能有效探测识别目标,即只要云底高度大于探测设备最低工作高度,则能够使用可见光与红外设备。

根据图像传感器的视场角 η_0 、采集图像的像素、导引头俯仰角、目标定位误差、火箭弹散布误差等,

依据约翰斯顿 (Johnson) 准则可计算一定高度 h 上对不同幅员目标的捕获识别概率。根据文献[11]数据可知,当导引头高度为 3 km 时,捕获识别概率满足相关要求。因此,在云底高度大于 3 km 条件下可以使用可见光探测设备。

4 对降雨天气适用性分析

光学探测设备受降雨影响很大,应尽量避免在降雨情况下使用。毫米波雷达对雨天环境有一定的适用性,但是当雨量较大时也无法使用。因此重点研究毫米波雷达在雨天时的使用条件,为其在雨天条件下的作战使用提供参考。

4.1 最大作用距离模型

当接收到的目标回波信号功率 P_s 刚好等于雷达最小可检测信号功率 P_{smin} 时,雷达作用距离最大,记为 R_{max} , 则:

$$R_{max} = 0.01 \cdot \left(\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 (K_b T_0 B_n) F_n S_{min} L_s L_{atm}} \right)^{1/4} \quad (7)$$

式中: R_{max} 为气象条件影响下的毫米波雷达作用距离, km; P_t 为雷达发射的峰值功率, W; G 为天线增益, dB; λ 为雷达波长, m; σ 为雷达目标截面积, m^2 ; K_b 为波尔兹曼常数,取 $1.38 \times 10^{-3} \text{ J/K}$; T_0 为标准参考温度,取 $T_0=290 \text{ K}$ 时,则通过公式可以求得 $K_b T_0=4 \times 10^{-21} \text{ W/Hz}$; B_n 是接收机噪声带宽, Hz; F_n 为接收机噪声系数, dB; S_{min} 为雷达最小检测信噪比; L_s 是系统损耗; L_{atm} 为大气衰减损耗。通过公式可以看出, R_{max} 除受雷达自身性能和目标面积影响外,还受大气衰减损耗影响。

4.2 降雨衰减模型

大量实验表明,雨滴的尺寸近似为球形,直径一般介于 $0.1\sim 8 \text{ mm}$ 之间,与毫米波波长相近似,因此降雨造成的衰减和杂波对 R_{max} 产生了重要的影响^[13]。降雨的大小一般用降雨率 R 表示,即单位时间内的降雨量,常用单位是 mm/h 。不考虑大气中氧气、水蒸气等衰减系数的情况下,根据大气衰减系数模型与国际电信联盟 ITU-R 所确定的降雨衰减模型,建立降雨率 R 与大气衰减损耗 L_{atm} 的关系如下:

$$\begin{cases} L_{atm} = 10^{0.2} \alpha_{rain} R_z \\ \alpha_{rain} = k R^\gamma \\ k = \frac{[k_H + k_V + (k_H - k_V) \cos^2 \theta \cos 2\xi]}{2} \\ \gamma = \frac{[k_H \gamma_H + k_V \gamma_V + (k_H \gamma_H - k_V \gamma_V) \cos^2 \theta \cos 2\xi]}{1/(2k)} \end{cases} \quad (8)$$

式中： R_z 为雷达作用距离（是通过雷达自身相关参数设定后计算出的最大作用距离），km； α_{rain} 为雨衰减率，dB/km； θ 为毫米波雷达导引头仰角，这里取 -60° ； ζ 为极化特征（当 $\zeta=0^\circ$ 时，表示水平极化；当 $\zeta=90^\circ$ 时，表示垂直极化；当 $\zeta=45^\circ$ 时，表示圆极化）。 k_H 、 γ_H 、 k_V 、 γ_V 由参考文献[12]查表得到。

4.3 探测典型目标时的雨衰减分析

假设目标反射截面积为 3000 m^2 ，根据雷达性能参数^[3]，则不同极化方式下雷达最大作用距离随降雨率的衰减趋势如图 6 所示。

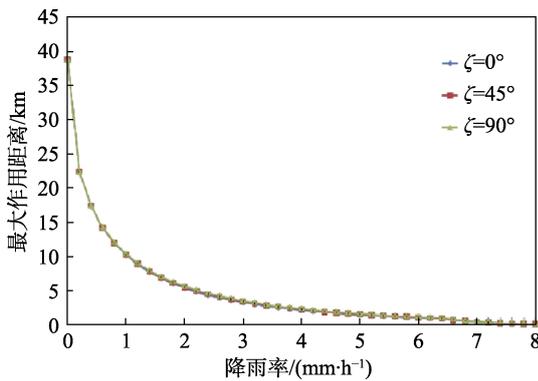


图 6 雷达最大作用距离随降雨率的衰减趋势
Fig.6 Attenuation trend of maximum radar range with rainfall rate

通过图 6 看出，雷达作用距离受降雨率影响较大，随着降雨率的增大，雷达作用距离迅速减小。极化方式对雷达最大作用距离影响不大，为此后续以圆极化为例进行分析。另外，下雨时，云底一般距地面 400~1000 m，云顶可达 8000~12 000 m，而导引头雷达开机高度约 5000 m，因此，可以近似认为雷达探测距离的雨衰减不受火箭弹飞行高度影响。已知部分目标的反射截面积见表 1，则其雨衰减曲线如图 7 所示。

表 1 目标反射截面积（参考值）
Tab.1 Target reflection area (reference)

目标	σ/m^2	目标	σ/m^2
战斗机	3~12	导弹快艇	500
战术轰炸机	7~10	驱逐舰	10 000
重型轰炸机	13~20	航空母舰	50 000
B-52 战略轰炸机	100	汽车	3~10（波长 10 mm）
运输机	40~70	T-90 主战坦克	29（波长 3~8 mm）

通过图 7 可以看出，目标反射截面积 σ 值越大，对降雨率的适用性越强。根据导引头的探测距离要求和目标反射截面积，可以判断毫米波雷达对不同降雨率的适用性。

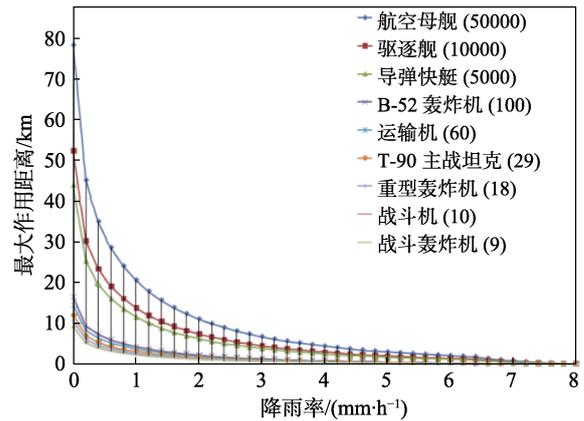


图 7 雷达对典型目标探测时的雨衰减趋势
Fig.7 The rain attenuation trend of radar to typical target detection

5 结论

根据火箭弹多模导引头探测设备的性能，理论上计算分析了导引头对雾霾、阴天、降雨等典型复杂气象环境的适用性。获得如下结论：

- 1) 打击舰船等金属类目标，能够充分发挥毫米波雷达的优势，在雾霾、有云、降雨率较小的条件下，可以使用多模导引头进行精确末制导。
- 2) 打击非金属类目标时，主要采用光学探测设备，受环境影响较大，需要根据计算结果来判断导引头能否适用复杂环境。

总之，火箭弹多模复合导引头充分发挥了不同探测设备的优势，互为补充，对复杂天气环境具有较好的适用性。另外，相关计算结果还需要未来进行进一步的试验验证。

参考文献：

- [1] FANG S D, LIU Z, LI X, et al. Research on the Terminal Guidance Strategy of Multiple-mode Seeker in Rocket Projectile[C]// 9th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science. IEEE, 2018.
- [2] 孙文芳. 基于 MRTD 的红外成像系统性能评估和大气影响的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015. SUN Wen-fang. Research of Performance Evaluation of Infrared Imaging System and Atmospheric Effects Based on MRTD[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [3] 曹瀚元, 董受全, 隋先辉. 雨天毫米波制导导弹打击岛礁区水面目标研究[J]. 指挥控制与仿真, 2016, 38(4): 39-43. CAO Han-yuan, DONG Shou-quan, SUI Xian-hui. Research on Millimeter Wave Guided Missile Attacking Reef Island Area Surface Target on Rainy Day[J]. Command Control & Simulation, 2016, 38(4): 39-43.
- [4] 王建才, 高聚忠, 白修宇. 红外制导系统大气衰减影响

- 分析[J]. 红外, 2006, 27(9): 9-12.
WANG Jian-cai, GAO Ju-zhong, BAI Xiu-yu. Analysis of Influence of Atmosphere Attenuation on Infrared Guidance System[J]. Infrared, 2006, 27(9): 9-12.
- [5] 向敬成, 张明友. 毫米波雷达及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
XIANG Jing-cheng, ZHANG Ming-you. Millimeter Wave Radar and Its Applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.
- [6] 陈秀红, 魏合理, 李学彬, 等. 可见光到远红外波段气溶胶衰减计算模式[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(2): 183-189.
CHEN Xiu-hong, WEI He-li, LI Xue-bin, et al. Calculating Model for Aerosol Extinction from Visible to Far Infrared Wavelength[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(2): 183-189.
- [7] CHRISTIAN M. MATLAB Functions for Mie Scattering and Absorption[R]. Bern: Institute of Applied Physics, University of Bern, 2002.
- [8] 李学彬, 胡顺星, 徐青山, 等. 大气气溶胶消光特性和折射率的测量[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(2): 207-210.
LI Xue-bin, HU Shun-xing, XU Qing-shan, et al. Characteristics Measurement of Extinction and Refractive Index of Aerosol Particles[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(2): 207-210.
- [9] 葛明锋, 亓洪兴, 王义坤, 等. 雾霾天气下可见光与红外成像系统性能研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(13): 82-86.
GE Ming-feng, QI Hong-xing, WANG Yi-kun, et al. Performance of Visible and Infrared Imaging System during Haze-fog Episodes[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(13): 82-86.
- [10] 邓君俊. 长三角地区霾天气形成机理和预报方法研究[D]. 南京: 南京大学, 2011.
DENG Jun-jun. Study on Formation Mechanism and Forecast Method of Haze Weather in Yangtze River Delta Region[D]. Nanjing: Nanjing University, 2011.
- [11] 房施东, 陈栋, 马翰宇, 等. 图像自寻的火箭弹目标捕获概率计算与分析[J]. 弹箭与制导学报, 2018, 38(6): 51-54.
FANG Shi-dong, CHEN Dong, MA Han-yu, et al. Calculation and Analysis on Target Acquisition Probability of Image Homing Rocket[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2018, 38(6): 51-54.
- [12] 白继玲. 毫米波在大气中传播的衰减分析[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
BAI Ji-ling. Analysis of Attenuation for Millimeter Wave Propagation in Atmosphere[D]. Xi'an: Xidian University, 2013.
- [13] 李德鑫, 杨日杰, 蔡晓琳, 等. 降雨对机载雷达作用距离影响分析[J]. 电光与控制, 2011, 18(11): 36-39.
LI De-xin, YANG Ri-jie, CAI Xiao-lin, et al. Effect of Rainfall on Airborne Radar Detection Range[J]. Electronics Optics & Control, 2011, 18(11): 36-39.
- [14] 周立佳. 航海气象[M]. 北京: 解放军出版社, 2005.
ZHOU li-jia. Nautical Meteorology[M]. Beijing: PLA Press, 2005.