

# 毫米波导引头在空地末制导中捕获区与纵向机动能力分析

王 榕, 杨林冲, 鲁建辉  
(中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

**摘要:** 介绍了毫米波导引头在国外现役和在研的空地导弹的应用。在等弹道倾角下滑弹道条件下, 计算并分析了毫米波导引头在俯仰方向的扫描范围及导弹的末端过载能力, 所得结果对于毫米波制导的空地导弹总体设计有一定的参考价值。

**关键词:** 空地导弹; 毫米波导引头; 搜索捕获域; 过载

**中图分类号:** V271.4; TN959.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2014)07-0078-03

## A Capture Area and Vertical Mobility of Millimeter-Wave Seeker in Air-to-Ground Terminal Guidance

WANG Rong, YANG Lin-chong, LU Jian-hui  
(China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

**Abstract:** The application of millimeter-wave seekers in foreign air-to-ground missiles in active service and under-development is introduced. The pitch scanning scope of the seeker and terminal overload capability of the missile are calculated and analyzed based on gliding trajectory with the constant flight path angle. The results may offer some references to the design of millimeter-wave guidance missiles.

**Key words:** air-to-ground missile; millimeter-wave seeker; scanning search area; overload

### 0 引言

毫米波通常是指频域位于 30 ~ 300 GHz 的无线电波(波长为 1 ~ 10 mm), 其介于微波和红外之间, 兼有红外和微波波段的优点。与微波相比, 毫米波部件体积小、重量轻、结构紧凑, 便于弹载使用<sup>[1]</sup>; 与激光、红外相比, 虽然没有后者的分辨率高, 但它具有穿透烟、灰尘和雾的能力, 能够适应恶劣气象、复杂的战场环境条件, 因此毫米波成为空地导弹的优选制导技术。

本文主要对空地导弹末制导阶段, 毫米波导引头俯仰方向扫描能力及导弹的过载能力进行研究。

### 1 国外毫米波导引头在空地导弹上的应用

目前, 空地导弹上装备的以及在研的毫米波导引头多为主动、双模或三模复合制导模式<sup>[1]</sup>。以下为国外已经装备部队的毫米波导引头。

1) 美国休斯(Hughes)公司研制的黄蜂空地导弹, 其采用 94 GHz 主动/被动雷达复合制导系统。该系

统具有在严重地物杂波环境下发现、区别目标和选择攻击不同目标的能力。

2) 美国 AH-64D“阿帕奇”武装直升机装备的“长弓海尔发”导弹, 导引头工作频段为 35 GHz。导引头利用机械扫描天线进行快速扫描, 锁定目标后进行圆锥扫描测角, 并跟踪目标。导弹可以对动目标实现发射前锁定, 对静止目标进行发射前或发射后锁定。

3) 英国 MBDA 公司研制的双模“硫磺石”导弹采用毫米波主动雷达导引头(94 GHz)。导引头有一部机械扫描天线, 在锁定目标后采用圆锥扫描。导弹可以在发射前或发射后锁定目标。

4) 美国的先进反辐射导弹(AARGM), 加装了主动毫米波制导雷达(大于 40 GHz), 导弹接近目标时, 毫米波雷达启动搜索模式, 对目标区进行搜索, 发现雷达天线强回波信号, 随即予以跟踪并制导 AARGM 命中目标<sup>[2]</sup>。

处于研制、验证阶段的典型空地弹项目有以下几种。

1) 美国的联合空地导弹(JAGM)采用的三模导引头(半主动激光+红外成像+毫米波雷达), 可以同时工作, 并自由切换, 提高导弹克服战场烟尘、天气、电子

干扰的能力<sup>[3]</sup>。

2) 美国的 SDB II 采用三模导引头(毫米波雷达 + 非制冷红外成像 + 半主动激光),能够自主搜索、截获及跟踪目标,并自行选取最佳瞄准点实施攻击。美国防部联合需求监督委员会已经确认 SDB II 具有防区外发射能力,能够兼顾打击机动目标及装甲目标<sup>[4]</sup>。

## 2 毫米波导引头俯仰方向扫描能力分析

### 2.1 导引头搜索捕获域模型

图 1 为导引头对地面目标瞬时捕获域示意图。

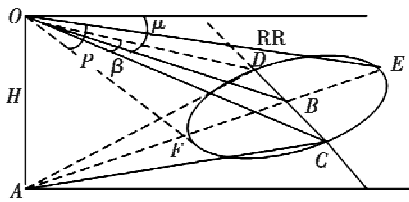


图 1 导引头瞬时捕获域示意图

Fig.1 The schematic diagram of seeker instantaneous capturing area

其中:O 为导引头所在位置;OB 为导引头光轴;ABC 为地平面;椭圆 DFCE 为导引头瞬时视场在地面的投影,即导引头的瞬时捕获域<sup>[5]</sup>。在导引头对目标进行搜索过程中,瞬时捕获域组成集合即为导引头的搜索捕获域。

由图中看出,导引头瞬时捕获域可以用椭圆扫描长轴 EF、短轴 DC 来描述。其中: $\mu$  为光轴与地面夹角; $P \times \beta$  为瞬时视场(俯仰  $\times$  偏航);H 为导弹飞行高度。

通过几何关系求解,得到导引头搜索捕获域模型为

$$EF = H \times [1/\tan(\mu - P/2) - 1/\tan(\mu + P/2)] \quad (1)$$

$$DC = 2 \times H/\sin \mu \times \tan(\beta/2) \quad (2)$$

为了避免毫米波导引头对地搜索过程中出现漏扫情况,导引头采用往复“一”字形扫描,其扫描过程分为有效扫描过程和复位过程<sup>[6]</sup>。在有效扫描过程内,光轴做横向运动,光斑中心在地面扫描的是一条与导弹纵轴垂直的直线。在复位过程中,位标器以较快角速度转动综合复位角,使电轴回到起始位置,开始回程有效扫描。综合复位角包括方位角度差和俯仰角度差。

横向搜索主要通过导引头框架角转动实现,俯仰方向搜索通过平台运动实现。扫描搜索周期为  $T = EF/V$ , V 是导弹飞行速度。

在搜索过程中,导弹等速、等弹道倾角飞行,随着弹目距离缩短,导弹飞行高度减小,捕获域长轴、短轴逐渐缩小,导引头搜索周期缩短;假设搜索范围仍保持不变,一个搜索周期内导引头需要扫过的角度增加,最终引起导引头角速度的增加。因此在角速度一定的情

况下,搜索区域是一个随着弹目距离缩短不断收缩的封闭图形,如图 2 所示。

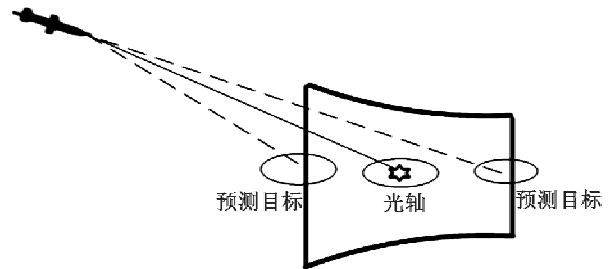


图 2 MMWS 搜索范围示意图

Fig.2 Schematic diagram of MMWS search range

### 2.2 导引头俯仰方向的扫描范围计算

未制导阶段,毫米波导引头开机进行搜索时,载机或惯导提供的目标位置可能落在搜索域的前/后或左/右位置,因此,需要导引头的位标器在俯仰和偏航方向转动一定的角度,并指向目标。

设弹目距离 3 km 时导引头开机,2 km 结束搜索,导引头瞬时视场角  $1.2^\circ \times 1.2^\circ$  (俯仰  $\times$  偏航),最大搜索角速度  $180 (^\circ)/s$ ,信息处理周期为 4 ms;导弹飞行过程中,光轴与弹道倾角方向一致,且保持  $20^\circ$  不变,导弹速度 300 m/s,考虑导引头搜索区域重叠率 50%,计算得到弹目距离对搜索捕获域的影响,如表 1 所示。

表 1 弹目距离对搜索捕获域的影响

Table 1 The effect of missile-target distance on scanning search area

弹目距离/km	捕获域纵向长度/m	捕获域横向宽度/m	扫描搜索周期/s	波门数	搜索区域横向宽度/m
3	183	62	0.61	152	4712
2	122	41	0.40	100	1025

纵向搜索长度取 800 m,弹道倾角  $10^\circ \sim 35^\circ$ ,目标落在搜索域的前沿/后沿,光轴初始位置指向搜索范围几何中心,如图 2 所示,分两种情况考虑:1) 导引头偏转一定角度后,光轴指向目标;2) 导引头偏转一定角度后,对应的瞬时捕获域边界覆盖目标。计算得到导引头在俯仰方向需要偏转的角度,如表 2 所示。

表 2 MMWS 在俯仰方向需要偏转的角度

Table 2 The required pitch rotation angle for MMWS

弹道倾角/°	目标在搜索区前沿		目标在搜索区后沿	
	偏转角度/°	偏转角度/°	偏转角度/°	偏转角度/°
10	2	1.3	2.5	1.8
15	2.9	2	3.7	2.7
20	3.9	2.6	4.8	3.5
25	4.7	3.2	5.9	4.3
30	5.6	3.7	6.9	5.1
35	6.3	4.2	7.8	5.7
说明	光轴指向目标	捕获域边界覆盖目标	光轴指向目标	捕获域边界覆盖目标

由计算结果可知,瞬时捕获域边界覆盖目标时,导引头需要偏转的角度比光轴指向目标对应角度小,且目标预测位置落在捕获域的后侧时,导引头位标器需要偏转更多角度。

### 3 导弹末制导纵向机动能力分析

假定导弹的纵向对称面始终与飞行平面重合,在铅垂平面内的运动方程组<sup>[7]</sup>为

$$\begin{cases} m \frac{dV}{dt} = F_1 \cos \alpha - X - mg \sin \theta \\ mV \frac{d\theta}{dt} = F_1 \sin \alpha + Y - mg \cos \theta \\ dx/dt = V \cos \theta \\ dy/dt = V \sin \theta \end{cases} \quad (3)$$

式中: $m$ 、 $\theta$ 、 $\alpha$ 分别为导弹的质量、弹道倾角和攻角; $F_1$ 、 $X$ 、 $Y$ 分别为推力、阻力和升力,可以分别表示为 $X = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_x$ ,  $Y = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_y$ ,  $\rho$ 为空气密度; $S$ 为弹身最大横截面积; $C_x$ 、 $C_y$ 分别为阻力系数和升力系数。

假设导引头分别在搜索区的前沿/后沿发现目标,光轴指向搜索范围几何中心。导弹末速 600 m/s,弹目距离 3 km 时,导引头开机搜索,分别在 2 km、1.5 km 时稳定跟踪目标,计算不同搜索边界对应的导弹最大过载见表 3、表 4。其中,  $CD$  表示纵向搜索范围。

表 3 弹目距离 2 km 时导弹最大过载

Table 3 The maximum overload of missile when missile-target distance is 2 km

$\theta/(\circ)$	$V/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$CD/\text{m}$	前/后沿	偏转角度/ $(\circ)$	过载/ $g$ 数
50	600	1000	前沿	9.4	7.8
			后沿	12.8	12.5
50	600	800	前沿	7.8	6.8
			后沿	9.9	9.3
50	400	1000	前沿	9.4	3.9
			后沿	12.8	5.3
50	400	800	前沿	7.8	3.5
			后沿	9.9	3.9
20	600	1000	前沿	3.9	3.8
			后沿	6.3	6.3
20	600	800	前沿	3.3	3.5
			后沿	4.8	4.2

表 4 弹目距离 1.5 km 导弹最大过载

Table 4 The maximum overload of missile when missile target distance is 1.5 km

$\theta/(\circ)$	$V/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$CD/\text{m}$	前/后沿	偏转角度/ $(\circ)$	过载/ $g$ 数
50	600	1000	前沿	12	7.9
			后沿	18	15
50	400	1600	前沿	17	12
			后沿	31	24

通过上面的计算可以看出:1) 其他条件相同,搜索

范围越大,导弹的需用过载越大;2) 其他条件相同,导弹速度越大、弹道倾角越大、距离目标越近,导弹的机动过载越大;3) 其他条件相同,目标位于搜索区后沿时,导引头需要偏转的角度越大,导弹的机动过载越大。

### 4 结论

在空地导弹末制导阶段,导弹飞行速度、弹道倾角、弹目距离和导引头搜索范围是影响导弹需用过载的主要因素;为提高目标被捕获的概率,减小对导引头搜索能力及导弹过载能力要求,应尽量提高载机或导弹惯导提供的预测目标位置精度。另外,在毫米波导引头截获目标前,受导弹可用过载能力限制,不宜将弹道倾角控制太大。

### 参考文献

- [1] 向敬成,张明友.毫米波雷达及其应用[M].北京:航空工业出版社,2005.  
XIANG J C, ZHANG M Y. Millimeter wave radar and application [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2005.
- [2] RICHARDSON D. AARGM begins carry trials on EA-18G Growler[J]. Jane's Missiles & Rockets, 2011(8):9-12.
- [3] 蒋琪. JAGM——下一代中近程轻型空地导弹[J]. 飞航导弹, 2012(1):44-48.  
JIANG Q. JAGM——Next generation medium range light air-to-ground missile [J]. Aerodynamic Missile, 2012(1):44-48.
- [4] HEWSON R. SDB II goes live at white sands[J]. Jane's Missiles and Rockets, 2012(9):2-6.
- [5] 卜奎晨,刘莉.毫米波末制导弹药搜索段弹道设计[J]. 弹道学报, 2007, 19(5):23-26.  
BU K C, LIU L. Trajectory design of scanning search phase for MMW terminal guided munition [J]. Journal of Ballistics, 2007, 19(5):23-26.
- [6] 周焘,陈新云,赵平均,等.机载激光探测设备的往复式“一”字形扫描研究[J]. 中北大学学报:自然科学版, 2007, 28(5):53-57.  
ZHOU T, CHEN X Y, ZHAO P J, et al. Study on reciprocating “—” shape scan method of airborne laser detection equipment [J]. Journal of North University of China: Natural Science Edition, 2007, 28(5):53-57.
- [7] 李新国,方群.有翼导弹飞行动力学[M].西安:西北工业大学,2008.  
LI X G, FANG Q. Flight dynamics of winged missile [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2008.