

# 基于有源对消的装甲目标被动毫米波隐身技术研究

王文涛<sup>\*①②</sup> 黄家露<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(中国北方车辆研究所 北京 100072)

<sup>②</sup>(北京理工大学自动化学院 北京 100081)

**摘要:** 目前, 被动毫米波探测与制导技术已对装甲目标产生了极大的威胁。为提高装甲目标在未来战场的生存能力, 该文提出一种基于有源对消的新型毫米波隐身方法。该方法通过装甲目标车载毫米波干扰机发射低功率噪声来降低目标与不同实战背景的辐射温度差, 使得末敏弹毫米波辐射计无法探测识别出目标, 从而实现其被动隐身功能。与传统基于外形、材料的无源隐身方法相比, 该方法不仅可防护不同实战背景下的多种类型目标, 还具有布设机动性强、工程实现简单等优点。最后实验结果表明: 该方法可使实战环境下装甲目标对其正上方90°立体空域内Ka波段、W波段末敏弹辐射计的隐身效能分别达到-20~-8 dB, -15~-8 dB, 并且隐身效能较无源隐身方法也有一定的提升。

**关键词:** 被动毫米波隐身技术; 末敏弹; 毫米波辐射计; 有源对消; 隐身效能

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2022)12-4178-08

DOI: 10.11999/JEIT210944

## Research on Passive Millimeter-wave Stealth Technology Based on Active Cancellation for Armored Target

WANG Wentao<sup>①②</sup> HUANG Jialu<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China)

<sup>②</sup>(School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Armored target is currently great threatened by passive millimeter wave detection and guidance technology. An active cancellation millimeter-wave stealth method is proposed for enhancing the survivability of armored target in the future battlefield. By means of the low power noise from the millimeter wave jammer on armored target, the radiation temperature difference between target and background in practice is reduced. And then, the millimeter-wave radiometer in terminal-sensitive projectile could not detect and identify armored target so as to realize its passive stealth function. Compared to the traditional passive stealth methods based on shape and material, the proposed method can not only protect various types of targets under different backgrounds in action, but also has the advantages of strong mobility and simple engineering implementation. Finally, the experimental results demonstrate stealthy capability of armored target to Ka-band and W-band terminal-sensitive projectile radiometers above its 90° three-dimensional space can achieve -20~-8 dB and -15~-8 dB respectively, which it is also improved compared with the passive stealth methods.

**Key words:** Passive millimeter-wave stealth technology; Terminal-sensitive projectile; Millimeter-wave radiometer; Active cancellation; Stealthy capability

### 1 引言

末敏弹是一种专门用来攻击地面装甲目标顶甲的新型智能弹药, 具有作战距离远、识别命中概率高、毁伤威力大、高效费比等优点, 已经成为坦克装甲集群的重大威胁<sup>[1,2]</sup>。末敏弹多采用红外/毫米

波复合探测机制<sup>[3]</sup>。目前, 对末敏弹红外波段干扰技术研究较为成熟, 包括烟幕干扰、红外隐身材料、隔热材料等技术; 而对末敏弹毫米波干扰技术的研究则相对较晚, 并且干扰效能有限。末敏弹毫米波探测原理是依靠辐射计利用目标与背景的辐射温差来发现识别目标<sup>[4]</sup>。因此, 本文采用末敏弹毫米波辐射计干扰技术来降低末敏弹的探测识别概率是一种必要的技术策略, 具有重大的军事应用价值<sup>[5]</sup>。

目前, 末敏弹毫米波被动探测辐射计的干扰手

段主要有假目标<sup>[6-8]</sup>和隐身<sup>[9,10]</sup>两种技术。假目标干扰技术分为无源干扰和有源干扰这两种方法。假目标无源干扰方法采用与装甲目标相似外形且辐射率低的材料来模拟地面装甲目标，诱骗末敏弹识别、攻击虚假目标，从而达到保护真实装甲目标的目的<sup>[6,7]</sup>。假目标有源干扰方法则通过毫米波干扰机发射诱饵信号，而该信号近似于末敏弹辐射计稳态扫描地面装甲目标时的输出信号，使得敌对末敏弹误将毫米波干扰机当作目标，从而达到防护真实装甲目标的目的<sup>[8]</sup>。但假目标干扰技术的干扰范围有限、布设机动性差，而且易受假目标本身尺寸与反射特性、气候条件等条件限制。

隐身技术则是采用某种方法减少地面装甲目标与背景之间毫米波波段的辐射温度对比度，将目标“隐藏”在背景之中。隐身方面目前开展的研究集中于无源方法，通过目标外形设计和目标表面涂隐身材料等措施来减少目标与背景之间毫米波波段的辐射温度对比度。但是这些方法不仅隐身效能有限(约-8~-3 dB)，并且在工程实现上难度大<sup>[9,10]</sup>。此外，压制干扰方式需要信号直接加入毫米波辐射计接收端，这在实战中是无法实现的，仅适用于理论仿真分析<sup>[11]</sup>。

鉴于上述末敏弹干扰技术存在的不足，本文提出一种通过有源手段实现装甲目标隐身的方法。该方法通过在装甲目标上安装毫米波干扰机，垂直向上发射与辐射计工作频段相同的低功率宽带扫频信号，使得辐射计在探测装甲目标时接收到更多的毫米波辐射能量，可大幅降低装甲目标与实战环境(草地、砂石地等)的辐射温度差。本方法可对装甲目标正上方90°立体空域内Ka波段、W波段末敏弹辐射计进行有效干扰，并且装甲目标的隐身效能分别达到-20~-8 dB, -15~-8 dB，其防护空域、隐身效能较无源隐身技术均有一定的提升。

## 2 末敏弹毫米波被动探测机理

如图1所示，在稳态扫描阶段(辐射计扫描高度 $H$ 约60~150 m)，末敏弹毫米波辐射计以匀速 $V$ (约10 m/s)下降、扫描角度 $\theta_F = 30^\circ$ (末敏弹主要工作角度)和转速 $\omega$ (约3~4 r/s)等运动参数不断地螺旋扫过地面装甲目标与环境背景<sup>[12,13]</sup>。末敏弹毫米波辐射计扫描轨迹经过 $B$ 点，从 $Y$ 轴转向 $X$ 轴， $OB$ 与 $X$ 轴的夹角为 $\varphi$ ，辐射计波束中心轴线与 $Z$ 负轴的夹角为 $\theta$ 。由辐射原理可知装甲目标的辐射温度 $T(\theta, \varphi)$ 可表示为

$$T(\theta, \varphi) = \varepsilon T_0 + (1 - \varepsilon) T_g(\theta, \varphi) \quad (1)$$

其中， $\varepsilon, 1 - \varepsilon$ 分别为目标辐射率、反射率； $T(\theta, \varphi)$ ,

$T_g(\theta, \varphi)$ 表示在空间方向 $(\theta, \varphi)$ 上的目标辐射温度、天空辐射温度； $T_0$ 表示目标物理温度。

如表1所示，地面装甲目标的毫米波辐射率约为0，而地面背景的辐射率远大于目标辐射率甚至接近1。则由式(1)知：目标的辐射温度 $T(\theta, \varphi)$ 约等于天空辐射温度 $T_g(\theta, \varphi)$ ，而地面背景的辐射温度约等于自身的物理温度。于是目标与地面背景存在一定的辐射温度差，而末敏弹毫米波辐射计正是利用该辐射温度差输出一个钟形脉冲信号，并根据脉冲波形特征(高度、宽度等)识别装甲目标。

末敏弹多采用毫米波全功率交流辐射计，这种辐射计的温度灵敏度高，其典型原理框图如图2所示<sup>[14]</sup>。

辐射计输出电压的数学表达式为

$$U_0 = K_v C_d K_p k B (\Delta T_A + T_e) \quad (2)$$

其中， $U_0$ 为输出电压； $K_p, B$ 为检波前电路的级联电压增益、带宽； $K_v$ 为视频放大器电压增益； $C_d$ 为

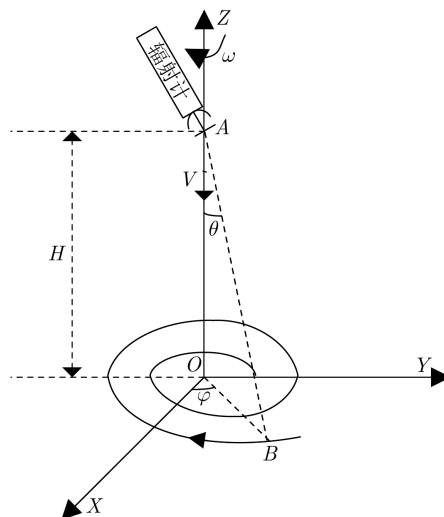


图1 末敏弹稳态扫描示意图

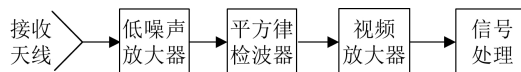


图2 典型毫米波辐射计原理框图

表1 几种典型物质的辐射率

物质	W波段	Ka波段
金属(装甲目标)	0	0
水	0.63	0.63
干沙	0.83	0.86
沥青	0.98	0.98
草地	1.00	1.00
混凝土	0.92	0.92

检波器功率灵敏度； $\Delta T_A$ 为目标与背景的辐射温度差； $T_e$ 为辐射计噪声温度； $k$ 表示玻尔兹曼常数。

在式(2)中， $K_p, B, K_v, C_d, T_e$ 为辐射计系统常数，因此 $U_0$ 与 $\Delta T_A$ 成线性关系。辐射计根据 $U_0$ 判决、识别装甲目标。

### 3 被动毫米波隐身方法

#### 3.1 算法原理

如图3所示，通过车载毫米波干扰机(干扰机天线为全向天线)垂直向天空主动辐射毫米波能量，以此来减小甚至消除目标与背景之间的辐射温度对比度，使得装甲目标在干扰机主波束360°方位上的辐射能量和背景相近，实现目标被动隐身功能。

当辐射计扫描到干扰机时，考虑到辐射计天线波束中心扫描对准干扰机天线最大增益方向时，接收的干扰机发射功率为最大。此时辐射计和干扰机有最大交叠面为 $S$ ，面积大小为

$$A_{TJ} = \pi \left( R_1 \tan \frac{\theta_J}{2} \right)^2 \quad (3)$$

其中， $R_1 = \frac{H \tan \frac{\theta_M}{2}}{\cos \theta_F \left( \tan \frac{\theta_M}{2} + \tan \frac{\theta_J}{2} \right)}$ 为车载毫米

波干扰机到 $S$ 的径向距离； $\theta_M, \theta_J$ 分别为辐射计和干扰机的天线主波束宽度； $H$ 为辐射计距地面的高度； $\theta_F$ 为辐射计探测角。

根据扫描波束中圆形目标的辐射温度近似计算公式，此时干扰机引起的辐射温度对比度可表示为

$$\begin{aligned} \Delta T_{AJ} &= \Delta T_{JC} \left( 1 - e^{-\frac{b A_{TJ}}{\pi H^2} \cos^2 \theta_F} \right) \\ &= \Delta T_{JC} \left( 1 - e^{-b \left( \frac{\theta_M \times \theta_J}{\theta_M + \theta_J} \right)^2} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

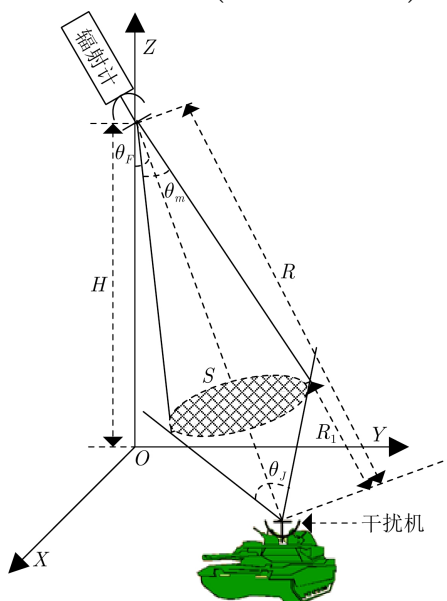


图3 被动毫米波隐身方法原理图

其中， $b$ 为干扰机天线波形系数， $\Delta T_{JC}$ 为加载干扰机的装甲目标与背景的辐射温度差。

辐射计单位面积 $d\Omega$ 接收到的功率为

$$dP = \frac{1}{2} A_{\text{eff}} \rho(\theta, \varphi) F(\theta, \varphi) d\Omega \quad (5)$$

其中， $A_{\text{eff}}$ 为天线等效口径面积； $\rho(\theta, \varphi), F(\theta, \varphi)$ 分别为 $(\theta, \varphi)$ 上的谱亮度分布、辐射计天线归一化辐射功率。

令辐射计带宽为 $\Delta f$ ，则有

$$\rho(\theta, \varphi) = \frac{2k}{\lambda^2} \Delta f T(\theta, \varphi) \quad (6)$$

其中， $T(\theta, \varphi)$ 为 $(\theta, \varphi)$ 上的辐射温度， $\lambda$ 为毫米波波长。

将式(6)代入式(5)可得辐射计接收到的总功率为

$$P = k \Delta f \frac{A_{\text{eff}}}{\lambda^2} \iint_{4\pi} T(\theta, \varphi) F(\theta, \varphi) d\Omega = k \Delta f T_A \quad (7)$$

其中， $T_A = \frac{A_{\text{eff}}}{\lambda^2} \iint_{4\pi} T(\theta, \varphi) F(\theta, \varphi) d\Omega$ 为辐射计天线温度。

当辐射计天线主波束照射到地面时，其接收功率为

$$\begin{aligned} P_1 &= k \Delta f \frac{A_{\text{eff}}}{\lambda^2} \left( \iint_{\theta_M} T_1(\theta, \varphi) F(\theta, \varphi) d\Omega \right. \\ &\quad \left. + \iint_{4\pi - \theta_M} T(\theta, \varphi) F(\theta, \varphi) d\Omega \right) \end{aligned} \quad (8)$$

其中， $T_1(\theta, \varphi)$ 为地面辐射温度。

当辐射计天线主波束照射到装甲目标时，其接收功率为

$$\begin{aligned} P_2 &= k \Delta f \frac{A_{\text{eff}}}{\lambda^2} \left( \iint_{\Omega_{T_1}} T_1(\theta, \varphi) F(\theta, \varphi) d\Omega \right. \\ &\quad + \iint_{\Omega_{T_2}} T_2(\theta, \varphi) F(\theta, \varphi) d\Omega \\ &\quad \left. + \iint_{4\pi - \theta_M} T(\theta, \varphi) F(\theta, \varphi) d\Omega \right) \end{aligned} \quad (9)$$

其中， $\Omega_{T_1}$ 表示天线照射到地面的空间角， $\Omega_{T_2}$ 为装甲目标所对应的空间角， $T_2(\theta, \varphi)$ 为装甲目标的辐射温度， $\theta_M = \Omega_{T_1} + \Omega_{T_2}$ 。

此时开启干扰机，若使 $\Delta T_{JC} = 0$ ，理论上辐射计接收到的干扰信号功率为

$$\begin{aligned}
 P_j &= P_1 - P_2 \\
 &= \Delta f \frac{k}{4\pi} \iint_{\Omega_{T_2}} [T_1(\theta, \varphi) - T_2(\theta, \varphi)] \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{\text{eff}} F(\theta, \varphi) d\Omega \\
 &= \Delta f \frac{k}{4\pi} \iint_{\Omega_{T_2}} [T_1(\theta, \varphi) - T_2(\theta, \varphi)] G(\theta, \varphi) d\Omega \quad (10)
 \end{aligned}$$

其中,  $G(\theta, \varphi)$  为辐射计主瓣内天线增益约为一固定值  $G_0$ , 若天线辐射效率近似为1, 则有

$$G_0 = \frac{4\pi}{\theta_M} \quad (11)$$

将式(11)代入式(10)得

$$P_j = k\Delta f [T_1(\theta, \varphi) - T_2(\theta, \varphi)] \frac{\Omega_{T_2}}{\theta_M} \quad (12)$$

装甲目标在毫米波辐射计视场轴方向的投影面积为  $A_1$ , 则有

$$\Omega_{T_2} = A_1/R^2 \quad (13)$$

其中,  $R$  为辐射计探测距离。

由雷达公式可知, 此时干扰机的发射功率为  $P_J$  (经发射天线功率放大后) 理论值为

$$P_J = \frac{(4\pi)^2 R^2}{G_r \lambda^2} P_j \quad (14)$$

其中,  $G_r \approx G_0$  为辐射计接收天线增益。

由式(11)~式(14)可得

$$P_J = \frac{4\pi k \Delta f [T_1(\theta, \varphi) - T_2(\theta, \varphi)] A_1}{\lambda^2} \quad (15)$$

由式(15)可知: 干扰机的发射功率  $P_J$  只与装甲目标固定参数(面积、装甲目标与背景的辐射温度差)、辐射计固定参数(带宽、工作波长)有关。该式表明基于本文所提方法设计的干扰机具有参数设置简单、可行性高等特点。

根据文献[15], 装甲目标的隐身效能可表示为

$$\eta = 10 \lg \left| \frac{U_2}{U_1} \right| \quad (16)$$

其中,  $U_1, U_2$  分别为干扰前(未加载干扰机或干扰机

关闭)、干扰后(开启干扰机)辐射计输出信号与背景电压相对值。

### 3.2 干扰机设计

目前末敏弹毫米波辐射计的工作波长为3 mm或8 mm<sup>[1]</sup>, 因此为了验证该干扰技术的普适性, 本文设计了3/8 mm波复合干扰机。如图4所示, 干扰机包含电源单元、控制单元、毫米波单元、天线单元等。其中毫米波单元包含毫米波驱动电路、3 mm波射频电路、8 mm波射频电路, 天线单元包含两根3 mm波天线及两根8 mm波天线。

3 mm波射频电路中中频扫频信号频率为4~14 GHz, 中频信号与2倍本振信号( $f_{LO} = 43$  GHz)混频后再经高通滤波器输出90~100 GHz, 最后经放大电路和3 mm波天线向辐射计发射W波段干扰信号; 8 mm波射频电路中中频扫频信号频率为30~40 GHz, 经放大电路和8 mm波天线向辐射计发射Ka波段干扰信号。

由图5可知, 干扰机天线的主波束角度超过90°立体角。因此, 该干扰机可实现其正上方90°立体空域内近似一致的辐射特性。

在典型作战背景下(草地、砂石地等), 干扰机Ka波段信号、W波段信号的发射功率理论设置值如表2所示(地面装甲目标的长宽一般为3 m×8 m)。

## 4 实验验证

为了验证本文所提隐身方法的有效性, 进行了实地测试。实验场地布置如图6所示, 毫米波辐射计和与3/8 mm波复合干扰机连线高塔之间的夹角为30°, 干扰机放置在2维调角支架上, 支架下方放置3 m×8 m铁皮(模拟地面装甲目标)。

实验陪试品为Ka波段、W波段被动毫米波辐射计, 其主要性能参数如表3所示。

实验测试步骤如下:

(1) 选一处空旷、平坦的实测场地, 按照场地布置图架设实验设备并设置其参数, 在距塔52 m处放置3 m×8 m铁皮, 在铁皮正中心放置干扰机;

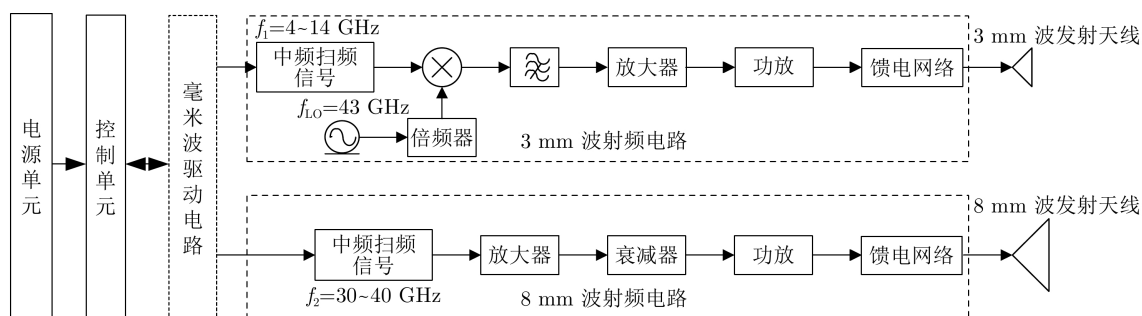


图4 3/8 mm波复合干扰机结构框图



表2 干扰机发射功率理论设置值

背景	装甲目标与背景的辐射温差 $\Delta T_A(K)$	Ka波段干扰信号		W波段干扰信号	
		带宽(GHz)	功率(dBm)	带宽(GHz)	功率(dBm)
草地	170~230	10	-10.57~-9.26	10	-2.05~-0.74
砂石地	120~150		-12.09~-11.12		-3.57~-2.6

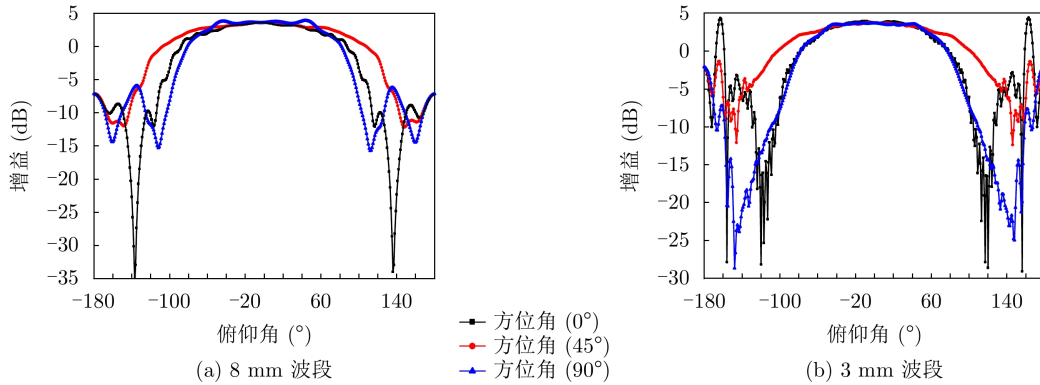


图5 干扰机天线方向图

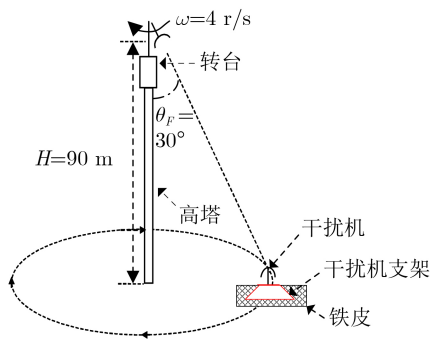


图6 实验场地布置示意图

表3 实验所用辐射计主要性能参数

名称	Ka波段辐射计	W波段辐射计
带宽(GHz)	4	4
灵敏度(K)	0.4	0.39
积分时间(ms)	0.19	0.21
射频增益(dB)	49	52
检波器效率(V/W)	8000	4500
视频放大器频带(Hz)	1790	1620
视频放大器增益(dB)	39	43
辐射计转速(r/s)	4	4

干扰机天线法向首先垂直于地面(辐射计俯仰角度初始为 $30^\circ$ ), 并以任意水平方向为初始方位 $0^\circ$ 。

(2) 关闭干扰机, 读取此时Ka波段(W波段)末敏弹辐射计扫描目标时对应的相对峰值电平 $U_1$ , 记录该值;

(3) 开启干扰机并根据地面背景设置参数, 发

射相应功率干扰信号, 记录此时Ka波段(W波段)末敏弹辐射计扫描目标位置时对应的相对峰值电平 $U_2$ ;

(4) 计算装甲目标隐身效能 $\eta = 10 \lg |U_2/U_1|$ ;

(5) 调节干扰机2维支架, 使得辐射计的俯仰角度分别为 $0^\circ, 15^\circ, 45^\circ$ , 重复(3)~(4);

(6) 将干扰机水平位置顺时针旋转 $90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ , 重复(3)~(5)。

实验结果记录于表4和表5。由两表可知: 在草地、砂石地背景下, 该方法可使装甲目标对其正上方 $90^\circ$ 立体空域内Ka波段、W波段末敏弹辐射计的隐身效能分别达到 $-20 \sim -8$  dB,  $-15 \sim -8$  dB。表明该方法能使地面装甲目标对较大实战空域内的末敏弹达到有效隐身的效果。

### 5 结论

针对末敏弹毫米波被动探测与识别机理, 本文提出一种有源装甲目标毫米波隐身方法。该方法充分利用了装甲集群目标与实战地面背景的辐射特性, 通过在装甲目标上安装毫米波干扰机, 垂直向上发射低功率连续宽带Ka波段、W波段高速扫频信号, 使得末敏弹辐射计在目标区域接收到更多的毫米波(Ka波段、W波段)辐射能量, 从而大幅降低甚至消除装甲目标与实战背景之间的辐射温度对比度, 达到装甲目标隐身的功能。实验结果表明: 在草地、砂石地等实战环境下, 该方法可使装甲目标对其正上方 $90^\circ$ 立体空域内Ka波段、W波段末敏弹辐射计的隐身效能分别达到 $-20 \sim -8$  dB,  $-15 \sim -8$  dB, 并且隐身效能较无源隐身方法也有一定的提升。

表4 草地背景下装甲目标被动隐身实验结果

方位角(°)	探测角(°)	W波段			Ka波段		
		$U_1$ (mV)	$U_2$ (mV)	隐身效能(dB)	$U_1$ (mV)	$U_2$ (mV)	隐身效能(dB)
0	0	359.9	20.1	-12.53	1729.6	145.2	-10.76
	15	359.9	20.2	-12.51	1729.6	-230.1	-8.76
	30	359.9	10.9	-15.19	1729.6	212.6	-9.10
	45	359.9	14.1	-14.07	1729.6	200.5	-9.36
90	0	359.9	-15.4	-13.69	1729.6	18.0	-19.83
	15	359.9	22.6	-12.02	1729.6	-199.2	-9.39
	30	359.9	53.4	-8.29	1729.6	178.6	-9.86
	45	359.9	45.2	-9.01	1729.6	20.3	-19.30
180	0	359.9	17.2	-13.21	1729.6	-215.9	-9.04
	15	359.9	-18.3	-12.94	1729.6	181.2	-9.80
	30	359.9	43.7	-9.16	1729.6	105.7	-12.14
	45	359.9	-22.6	-12.02	1729.6	173.2	-9.99
270	0	359.9	28.6	-11.00	1729.6	-238.4	-8.61
	15	359.9	-19.2	-12.73	1729.6	207.9	-9.20
	30	359.9	19.4	-12.68	1729.6	267.0	-8.11
	45	359.9	17.4	-13.16	1729.6	231.1	-8.74

表5 砂石地背景下装甲目标被动隐身实验结果

方位角(°)	探测角(°)	W波段			Ka波段		
		$U_1$ (mV)	$U_2$ (mV)	隐身效能(dB)	$U_1$ (mV)	$U_2$ (mV)	隐身效能(dB)
0	0	174.3	10.2	-12.33	838.3	135.2	-7.92
	15	174.3	20.2	-9.36	838.3	30.1	-14.45
	30	174.3	-10.9	-12.04	838.3	112.6	-8.72
	45	174.3	-14.1	-10.92	838.3	100.5	-9.21
90	0	174.3	15.4	-10.54	838.3	18.0	-16.68
	15	174.3	22.6	-8.87	838.3	-88.2	-9.78
	30	174.3	28.1	-7.93	838.3	122.0	-8.37
	45	174.3	-23.5	-8.70	838.3	-20.3	-16.16
180	0	174.3	17.2	-10.06	838.3	114.3	-8.65
	15	174.3	18.3	-9.79	838.3	103.6	-9.08
	30	174.3	13.7	-11.05	838.3	105.7	-8.99
	45	174.3	22.6	-8.87	838.3	-36.7	-13.59
270	0	174.3	21.3	-9.13	838.3	-22.5	-15.71
	15	174.3	19.2	-9.58	838.3	107.9	-8.90
	30	174.3	-19.4	-9.53	838.3	112.0	-8.74
	45	174.3	17.4	-10.01	838.3	131.1	-8.06

## 参考文献

- [1] ZHANG Hang, FENG Pengpeng, and YIN Ximei. Design of a servo attitude measuring device for an anti-terminal sensitive projectile weapon system[C]. IEEE 17th International Conference on Communication Technology, Chengdu, China, 2017: 1852-1855. doi: [10.1109/ICCT.2017.8359951](https://doi.org/10.1109/ICCT.2017.8359951).
- [2] 杨杰, 张琪, 贺元吉, 等. 间断采样导致末敏弹大范围扫描盲区的消减对策[J]. 兵工学报, 2021, 42(7): 1353-1362. doi: [10.3969/j.issn.1000-1093.2021.07.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1093.2021.07.002).  
YANG Jie, ZHANG Qi, HE Yuanji, et al. Countermeasure to reduce the large scanning blind area of terminal sensitive

- projectile caused by interval sampling[J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(7): 1353–1362. doi: [10.3969/j.issn.1000-1093.2021.07.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1093.2021.07.002).
- [3] 姜云, 郭锐, 刘荣忠, 等. 末敏弹阵线激光雷达的距离像分割方法[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(1): 0126002. doi: [10.3788/IRLA202049.0126002](https://doi.org/10.3788/IRLA202049.0126002).  
JIANG Yun, GUO Rui, LIU Rongzhong, *et al.* Distance image segmentation method for terminal sensitive missile linear array laser radar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(1): 0126002. doi: [10.3788/IRLA202049.0126002](https://doi.org/10.3788/IRLA202049.0126002).
- [4] 丁勇, 肖泽龙, 许建中, 等. 毫米波交流辐射计半实物仿真系统设计[J]. *兵工学报*, 2015, 36(10): 1867–1874. doi: [10.3969/j.issn.1000-1093.2015.10.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1093.2015.10.007).  
DING Yong, XIAO Zelong, XU Jianzhong, *et al.* Design of millimeter wave radiometer hardware-in-the-loop simulation system[J]. *Acta Armamentarii*, 2015, 36(10): 1867–1874. doi: [10.3969/j.issn.1000-1093.2015.10.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1093.2015.10.007).
- [5] 殷希梅, 冯鹏鹏. 末敏弹对抗技术现状及展望[J]. *探测与控制学报*, 2017, 39(5): 1–6.  
YIN Ximei and FENG Pengpeng. Status and prospect of terminal sensitive projectile technology[J]. *Journal of Detection & Control*, 2017, 39(5): 1–6.
- [6] 李金梁, 王雪松, 李永祯, 等. 弹道中段无源轻诱饵的动力学特性分析[J]. *宇航学报*, 2009, 30(6): 2127–2134. doi: [10.3873/j.issn.1000-1328.2009.06.013](https://doi.org/10.3873/j.issn.1000-1328.2009.06.013).  
LI Jinliang, WANG Xuesong, LI Yongzhen, *et al.* Dynamics characteristics of light jamming in the midcourse of trajectory[J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(6): 2127–2134. doi: [10.3873/j.issn.1000-1328.2009.06.013](https://doi.org/10.3873/j.issn.1000-1328.2009.06.013).
- [7] ZHOU Weiguang, LUO Jirun, JIA Yugui, *et al.* Performance evaluation of radar and decoy system counteracting antiradiation missile[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(3): 2026–2036. doi: [10.1109/TAES.2011.5937280](https://doi.org/10.1109/TAES.2011.5937280).
- [8] 陈曦, 陈自力, 许建中, 等. 基于波形诱骗的末敏弹毫米波有源干扰研究[J]. *兵工学报*, 2014, 35(1): 49–54. doi: [10.3969/j.issn.1000-1093.2014.01.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1093.2014.01.007).  
CHEN Xi, CHEN Zili, XU Jianzhong, *et al.* Study of millimeter-wave active jamming based on waveform deception for terminal-sensitive projectiles[J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(1): 49–54. doi: [10.3969/j.issn.1000-1093.2014.01.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1093.2014.01.007).
- [9] 缪晨, 娄国伟, 李兴国. 3mm涂层隐身材料的天线温度模型[J]. *红外与毫米波学报*, 2004, 23(3): 221–224. doi: [10.3321/j.issn:1001-9014.2004.03.016](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-9014.2004.03.016).  
MIAO Chen, LOU Guowei, and LI Xingguo. Antenna temperature model of 3mm coating stealth material[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2004, 23(3): 221–224. doi: [10.3321/j.issn:1001-9014.2004.03.016](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-9014.2004.03.016).
- [10] 聂建英, 李兴国, 娄国伟. 毫米波隐身材料主要参数的计算及误差分析[J]. *兵工学报*, 2004, 25(6): 734–737. doi: [10.3321/j.issn:1000-1093.2004.06.018](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-1093.2004.06.018).  
NIE Jianying, LI Xingguo, and LOU Guowei. Calculation and error analysis for the parameters of millimeter-wave absorbers[J]. *Acta Armamentarii*, 2004, 25(6): 734–737. doi: [10.3321/j.issn:1000-1093.2004.06.018](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-1093.2004.06.018).
- [11] 马若飞, 秦江. 末敏弹被动特性的干扰技术研究[J]. *甘肃科技*, 2014, 30(6): 43–46, 64. doi: [10.3969/j.issn.1000-0952.2014.06.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0952.2014.06.017).  
MA Ruofei and QIN Jiang. Research on jamming technology for the passive characteristic of terminal sensitive projectile[J]. *Gansu Science and Technology*, 2014, 30(6): 43–46, 64. doi: [10.3969/j.issn.1000-0952.2014.06.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0952.2014.06.017).
- [12] 郭明伟, 温云鹏, 仪名星. 高功率微波对抗末敏弹可行性分析[J]. *电子信息对抗技术*, 2019, 34(1): 27–30, 55. doi: [10.3969/j.issn.1674-2230.2019.01.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-2230.2019.01.007).  
GUO Mingwei, WEN Yunpeng, and YI Mingxing. The feasibility analysis of terminal sensitive projectile countermeasure using high power microwave[J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2019, 34(1): 27–30, 55. doi: [10.3969/j.issn.1674-2230.2019.01.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-2230.2019.01.007).
- [13] 谢文, 叶志红, 丁忠熙. 末敏弹射击效能分析[J]. *火力与指挥控制*, 2021, 46(7): 62–65. doi: [10.3969/j.issn.1002-0640.2021.07.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-0640.2021.07.012).  
XIE Wen, YE Zhihong, and DING Zhongxi. Analysis of firing efficiency for terminal sensitive projectile[J]. *Fire Control & Command Control*, 2021, 46(7): 62–65. doi: [10.3969/j.issn.1002-0640.2021.07.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-0640.2021.07.012).
- [14] 张生康. 毫米波辐射计前端研究[D]. [硕士学位论文], 电子科技大学, 2020. doi: [10.27005/d.cnki.gdzku.2020.001528](https://doi.org/10.27005/d.cnki.gdzku.2020.001528).  
ZHANG Shengkang. Research on front ends of millimeter wave radiometers[D]. [Master dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2020. doi: [10.27005/d.cnki.gdzku.2020.001528](https://doi.org/10.27005/d.cnki.gdzku.2020.001528).
- [15] 尚庆龙. 末敏弹毫米波探测器的干扰等效评估模型研究[D]. [博士学位论文], 南京理工大学, 2019. doi: [10.27241/d.cnki.gnjgu.2019.001288](https://doi.org/10.27241/d.cnki.gnjgu.2019.001288).  
SHANG Qinglong. The jamming effect equivalent evaluation model for the millimeter wave detector of terminal-sensitive projectile[D]. [Ph. D. dissertation], Nanjing University of Science & Technology, 2019. doi: [10.27241/d.cnki.gnjgu.2019.001288](https://doi.org/10.27241/d.cnki.gnjgu.2019.001288).
- 王文涛: 男, 硕士, 研究员, 研究方向为毫米波干扰.  
黄家露: 男, 博士, 工程师, 研究方向为毫米波干扰、非线性信号处理.