微型空射诱饵任务载荷系统设计与 工作状态分析

陈美杉,曾维贵,李湉雨

(海军航空大学岸防兵学院,山东烟台264001)

摘 要: 微型空射诱饵(MALD)是美军研发的一款以信号增强系统、有源雷达干扰机为载荷的由载机发射的 诱饵弹。MALD经过20多年的发展,现已成为一款集侦察、欺骗、压制和打击于一体的射频综合诱饵,战场"踹门" 作用十分强大。鉴于目前国内对该类型武器的研发尚处起步阶段,美对其载荷相关信息披露甚少,所以本文从 MALD的功能出发,对MALD任务载荷系统组成进行分析,在给定的任务背景下,利用雷达对抗理论对其工作状态作初步分析,仿真结果可为MALD战场运用提供理论支撑。

关键词:微型空射诱饵;主战型号;作战模式;任务载荷系统设计;任务载荷工作状态分析
中图分类号:TN 97 文献标志码:A
DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.06.011

System Design and Performance Analysis of MALD Mission Load

CHEN Meishan, ZENG Weigui, LI Tianyu

(Coastal Defense College, Naval Aeronautical University, Yantai 264001, Shandong, China)

Abstract: Miniature air-launched Decoy (MALD) developed by the US military is a kind of Decoy launched by an aircraft with loads of a signal enhancement system and an active radar jammer. After more than 20 years of development, MALD has become a radio frequency integrated decoy integrating reconnaissance, deception, suppression, and strike. The battlefield "kicking door" capability is very powerful. Given the current domestic research and development of this type of weapon is still at the beginning, and the United States has little disclosure of its payload-related information, so this paper starts with the function of MALD and analyzes the composition of the MALD mission payload system. In a given mission background, the radar countermeasure theory is used to make a preliminary analysis of its working status. The simulation results can provide theoretical support for the application of the MALD battlefield.

Key words: miniature air-launched Decoy (MALD); main type of battle; operational mode; system design of mission load; performance analysis of mission load

0 引言

防空武器系统抗干扰能力的逐步提升对电子 对抗设备的性能提出了更高要求,传统的箔条干扰 会因多普勒效应而降低干扰效果,电子对抗吊舱会 降低飞行器的灵敏度而且对跟踪干扰源模式的导 弹无能为力,内部干扰系统的升级优化率和普适性 都比较低,于是美军在20世纪90年代提出发展空 投式诱饵以填补能力空白,微型空射诱饵(Miniature Air-Launched Decoy, MALD)应运而生^[1]。该 款诱饵历经20余年发展,现已发展有多种型号,因 技术限制加之早期对其关注度不够,我国在这方面 起步较晚。所以本文从MALD的功能特点和作战 模式角度出发,提出MALD任务载荷系统组成方 案,并对任务载荷的工作状态进行了仿真分析。

收稿日期:2019-08-30;修回日期:2019-12-24

作者简介:陈美杉(1991一),女,助理工程师,主要研究方向为军事装备学。

1 微型空射诱饵简介

1.1 微型空射诱饵主要型号及作战模式

1.1.1 主要型号

目前MALD主要发展有4种型号^[2-7]:1)基本 型 MALD,主要载荷为信号增强子系统(SAS),该 系统可模拟美军及其盟友的主战飞机雷达信号特 征,用于诱骗敌防空雷达开机甚至误判,暴露敌重 要防空节点位置,消耗高成本防空弹或诱骗防空导 弹弹载跟踪雷达,掩护高成本巡航(反舰)导弹突 防:2) 干扰型 MALD-J, 载荷方面增加了有源雷达 干扰机,增加了双向数据链功能,可抵近飞行对敌 防空雷达或对导引头实施主动干扰,瘫痪敌防空体 系,并完成战场态势的信息传输和共享;3)多用途 载荷型MALD-X,可搭载通用战斗部或者其他类型 载荷(如通信中继、传感器、特制电子战载荷等),以 提高情报搜集、监视侦察、担负靶机、反辐射攻击等 能力;4) 模块化设计型号 MALD-V,采用先进模块 化设计,使产品更新换代灵活,该型号旨在实现功 能的全面跃升。

静态存储状态下的MALD如图1所示。1.1.2 作战模式

MALD通常由载机在防区外大批量投放,对敌 防空体系进行一系列压制,被刺激开机的雷达会成 为反辐射武器的活靶子;同时MALD形成的假目标 会消耗大量高成本防空弹,干扰型MALD集群使用 会对防空雷达网形成整体压制,降低其作战效能, 为后续突防武器扫清障碍。



图 1 微型空射诱饵 Fig.1 Miniature air-launched decoy

作战模式想定图如图2所示。



图 2 微型空射诱饵作战模式 Fig.2 Operation pattern of MALD

1.2 微型空射诱饵基本性能参数

MALD从设计之初,美军就将其定位为一款防 区外发射的诱饵弹,以最大限度保护载机。MALD 的基本性能参数见表1。

型号	MALD (ADM-160A)	MALD (ADM-160B)	MALD-J (ADM-160C)
翼展/m	0.65	1.71(0°) 1.37(35°)	- 与 ADM-160B 相近
 长度/m	2.3	2.84	
直径/cm	15	宽 41,高 37	
质量/kg	36.5	~113	
	9 145	12 190	
续航时间/min	25	60	
航程/km	463	926	
速度/Ma	0.85	0.93	
发动机	T J-50	TJ-120	TJ-150

表 1 MALD基本性能参数 Tab.1 Basic performance index of MALD

2 MALD任务载荷系统设计

空射诱饵弹的任务载荷本质上是一种宽频带 的有源雷达干扰机,包含雷达接收机、发射机和收 发天线。有源干扰的基本原理是发射适当的干扰 信号进入雷达接设备,以此破坏或扰乱雷达对目标 回波信号的检测^[8]。MALD作为一种多功能的电 子战装备,需具备多种干扰手段和对干扰资源的管 理能力,以适应复杂战场中的雷达对抗。所以本节 从MALD功能特点出发,首先提出MALD任务载 荷系统的设计要求,之后给出任务载荷部分的系统 设计方案。

2.1 MALD任务载荷系统设计要求

MALD工作时,通过天线接收截获敌方的雷达 信号并传送至接收机,立刻检测出接收信号的频 率、辐射源方位和脉内参数等信息。这一方面通过 与存储信息的比对确定辐射源的基本特征,起到情 报侦察作用;另一方面通过系统处理将接收的信号 增强放大,使之产生与载机雷达回波特性相似的欺 骗信号,由天线发射出去,进而起到诱骗敌防空雷 达的目标。所以从美军对于MALD的功能定义和 可能的作战运用角度看,MALD任务载荷系统应具 备下述几个基本的特征:采用综合射频体制;覆盖 频带宽;较高灵敏度。

2.2 MALD任务载荷系统设计方案

MALD 是一款可覆盖大部分地面/舰载防空警 戒雷达、火控雷达和弹载雷达工作频段的宽频带综 合射频诱饵。该型有源诱饵具备被动信号侦察、典 型目标模拟、有源欺骗干扰、有源压制干扰等功能, 干扰样式多样,结构紧凑,功能参数可重新配置升 级,能够有效对抗各种先进体制雷达系统。

在设计层面,应重点考虑MALD的特有性能, 注重与以往干扰机的本质区别,突出侦察、干扰的 战术管理功能,能够以作战任务为导向,综合利用 先验信息、辐射特征数据库、被动探测数据对作战 场景中辐射源进行实时动态分析与描述,并形成最 优的干扰策略和干扰配置参数进行干扰对抗。一 方面该诱饵系统可作为辅助突击干扰武器,在防区 内有效压制敌陆上防空反导编队(海上防空反导系 统)的雷达系统,扰乱并降低其防空反导系统的作 战效能;另一方面,该诱饵系统可以伴飞或近距支 援巡航导弹或载机突防,充当战场"消耗品"。

MALD任务载荷的系统组成如图3所示。



图 3 任务载荷系统基本组成 Fig.3 Basic composition of mission payload

MALD载荷系统由宽带多元阵列天线、微波收 发组件、多通道中频接收机、高速信号采集与分选、 实时干扰波形产生、战术任务管理、信号精细分选 识别、电源模块等组成。诱饵系统的工作模式和参 数由战术任务管理模块进行配置和管理,可根据作 战任务和场景工作于被动侦察、转发干扰、有源压 制干扰或者同时多种模式。诱饵系统通过宽带多 元阵列天线接收空间辐射源信号,并由微波前端的 高速信号采集与预处理模块完成对信号的高速采 样及初步信号调理功能^[9]。信号精细分选识别模块 在任务管理模块的配合下负责对被截获辐射源信 号的精细化分选与识别。实时干扰波形产生模块 根据战术管理计算机传输的干扰策略和干扰参数 产生相应的干扰信号,并通过微波收发组件的上变 频通道进行变频、放大,最终通过天线辐射出去。

3 MALD任务载荷工作状态分析 本节以MALD任务载荷系统的基本框架为依 托,进一步讨论MALD载荷部分的工作状态。

3.1 MALD干扰防空雷达基本场景想定

为方便分析,考虑一枚基本型MALD与载机伴 飞突防,诱骗防空雷达探测跟踪这一基本情况。

MALD作为一种空投式的干扰机,有效辐射功率(Effective Radiated Power, ERP)是描述其性能的一个非常重要的参数^[10-11]。ERP与MALD的发射功率 $P_{\rm D}$ 存在如下关系:

$$P_{\rm ER} = \frac{P_{\rm D}G_{\rm D}}{L_{\rm D}} \tag{1}$$

式中: P_{ER} 为有效辐射功率; L_{D} 为MALD的系统损耗; G_{D} 为MALD辐射方向的增益。

同一般的雷达对抗一样,选择干信比(干扰信号/真实信号)来衡量 MALD 对雷达的干扰效果。 为方便分析,现做如下假设:防空雷达始终以天线 的最大辐射方向对准目标(载机),MALD 始终以 天线最大辐射方向对准防空雷达。此时,得到任 意时刻雷达、目标和 MALD 之间的位置关系图, 如图 4 所示。



跟踪雷达接收到的目标回波信号功率 P_{TR}可以 表示为

$$P_{\rm TR} = \frac{P_{\rm T} G_{\rm T}^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R_{\rm TR}^4}$$
(2)

式中:P_T为雷达的发射功率;G_T为雷达天线主瓣方 向上的增益;σ为目标的雷达反射截面积;λ为雷达 辐射信号的波长;R_{TR}为雷达和目标之间的距离。

MALD的干扰信号功率与雷达到 MALD 的距 离有关,这里用 R_{DR}表示。MALD 在抵近飞行的过 程中 R_{DR}发生变化,其工作模式也会发生相应的变 化。根据前期的分析,其可能有两种基本的工作模 式:线性转发工作模式和功率饱和工作模式^[12-14]: 1) 线性转发工作模式。转发式干扰系统又被称作恒增益系统,这种工作方式下,接收天线将接收到的雷达信号传送到幅度和相位调制模块,经过 调制模块调制后,送入功放模块,经放大后由发射 天线发射出去。当MALD处于线性转发工作模式 时,可以将其视为功率的恒增益转发器。

2) 功率饱和工作模式。功率饱和工作模式可 以看作是一个恒定功率系统,也就是说当MALD在 线性转发模式下功率增大到一个饱和值后,其功率 不再随 R_{DR} 而变化,即要求被存储复制再生的信号 电平能够使发射机产生最大功率输出,而与被截获 信号的电平无关。当MALD处于功率饱和的工作 模式时,认定其干扰功率是固定不变的。

既然MALD存在两种基本的工作模式,那么两种工作模式之间必然存在一个转换距离,定义工作模式转换时刻MALD与防空雷达的距离为MALD的转换距离。当MALD处于功率饱和工作状态下,存在一个距离,当MALD在这个工作距离时,在J/S满足一定条件下,雷达接收到的真实目标的信号的回波功率同接收到MALD干扰信号的回波功率相等,这个距离为烧穿距离。转换距离与烧穿距离对理解MALD任务载荷工作状态有着重要意义。

以下就从MALD的两种工作模式和两种工作 模式带来的两个距离概念入手,探究MALD任务载 荷的工作状态。

3.2 线性转发工作模式

当MALD与雷达的距离比较远时,诱饵接收到 的雷达信号的功率会比较小,此时若达不到MALD 接收机的灵敏度(系统最小可分辨信号的强度),则 诱饵弹不会对接收到的信号进行放大处理,即诱饵 弹无法进入干扰模式。如果MALD所截获的雷达 信号高于系统的灵敏度,则诱饵可将接收到的雷达 信号进行放大、调制和转发,这时可以将其看作一 个恒增益的系统^[14-15]。

MALD天线的有效孔径用 $A_{\rm D}$ 表示,有

$$A_{\rm D} = \frac{G_{\rm D}(\theta)\,\lambda^2}{4\pi} \tag{3}$$

式中: $G_{\rm D}$ 为MALD天线的增益; θ 为偏离MALD天线中轴的角度。

MALD所截获的雷达发射信号功率用 P_{Dr}表示,则有

$$P_{\rm Dr} = \frac{P_{\rm T} G_{\rm T}(\phi)}{4\pi R_{\rm DR}^2 L_{\rm p}} \cdot A_{\rm D} = \frac{P_{\rm T} G_{\rm T}(\phi) G_{\rm D}(\theta) \lambda^2}{(4\pi)^2 R_{\rm DR}^2 L_{\rm p}}$$
(4)

式中: $G_{T}(\phi)$ 为雷达天线方向图函数; ϕ 为偏离雷达 天线的轴线方向角度; L_{P} 为传播损耗; R_{DR} 为雷达与 MALD之间的距离。

因为已经确定了MALD在此工作模式下为恒 增益系统,用G_{DS}表示诱饵弹系统的增益,MALD 发射的干扰功率P_D为

$$P_{\rm D} = P_{\rm Dr} \cdot G_{\rm DS} = \frac{P_{\rm T} G_{\rm T}(\phi) G_{\rm D}(\theta) G_{\rm DS} \lambda^2}{(4\pi)^2 R_{\rm DR}^2 L_{\rm P}}$$
(5)

雷达接收到的干扰信号功率用P_{Br}表示,有

$$P_{\rm Rr} = \frac{P_{\rm D}G_{\rm D}(\theta)}{4\pi R_{\rm DR}^2 L_{\rm P}} \cdot A_{\rm R} = \frac{P_{\rm T}G_{\rm T}^2(\phi)G_{\rm D}^2(\theta)G_{\rm DS}\lambda^4}{(4\pi)^4 R_{\rm DR}^4 L_{\rm P}^2}$$
(6)

式中:A_R为雷达接收天线指向MALD方向上的有效孔径,且有

$$A_{\rm R} = \frac{G_{\rm T}(\phi)\lambda^2}{4\pi} \tag{7}$$

那么,根据式(2)和式(6)就可以得到雷达接收 端的干信比了,有

$$\frac{J}{S} = \frac{P_{\rm Rr}}{P_{\rm TR}} = \frac{G_{\rm T}^2(\phi)G_{\rm D}^2(\theta)G_{\rm DS}\lambda^2 R_{\rm TR}^4}{4\pi\sigma G_{\rm T}^2 R_{\rm DR}^4 L_{\rm P}^2} \qquad (8)$$

3.3 功率饱和工作模式

当MALD与雷达的距离越来越近时,随着其所 截获的雷达信号功率越来越大,如果继续保持线性 工作模式,诱饵的输出干扰功率也会越来越大,这 不符合实际情况。实际上,当上述情况出现时, MALD会在某一临界点实现功率饱和,达到一个最 大输出功率,这就是MALD的功率饱和工作模式。

在这种工作状态下, 假定 MALD 的最大输出功 率为 P_{Dmax}, 则雷达接收到的干扰信号功率为

$$P_{\rm RR} = \frac{P_{\rm Dmax}G_{\rm D}(\theta)}{4\pi R_{\rm DR}^2 L_{\rm P}} \cdot A_{\rm R} = \frac{P_{\rm Dmax}G_{\rm T}(\phi)G_{\rm D}(\theta)\lambda^2}{(4\pi)^2 R_{\rm DR}^2 L_{\rm P}}$$
(9)

根据式(2)和式(9),可得该工作模式下雷达接

收端的干信比为

$$\frac{J}{S} = \frac{P_{\rm RR}}{P_{\rm TR}} \frac{4\pi P_{\rm Dmax} G_{\rm T}(\phi) G_{\rm D}(\theta) R_{\rm TR}^4}{P_{\rm T} G_{\rm T}^2 R_{\rm DR}^2 \sigma L_{\rm p}}$$
(10)

3.4 转换距离和烧穿距离

为了进一步研究 MALD 的工作状态,需要利用 转换距离和烧穿距离的概念,对其进行简单的动态 分析。

通过对式(10)的观察可知,在做进一步分析之前,需要明确阵列天线的增益值。为方便分析,作如下约定:MALD与目标同时处于雷达的主瓣内且 $\phi = 0$,MALD的最大辐射方向也同样对准雷达,且 有 $R_{DR} = R_{TR}$ 。

根据第2节中给出的任务载荷设计方案, MALD采用阵列天线。对阵列天线参数进行初步 设计,通过查阅资料并结合经验公式^[15-16],得到

$$G = \frac{4\pi A_{\rm e}}{\lambda^2} \tag{11}$$

假设MALD天线设计参数: A_e =0.0192m²(边 长为160mm×120mm的矩形孔径), λ =0.05m(取 中心频率7GHz),N=12(4×3排列),d=40mm, 则得到最大增益G(单位dB)为

$$G = 10 \log \left(\frac{4\pi A_{e}}{\lambda^{2}} \right) \approx 19$$

考虑到式(11)、式(8)可以写成
$$\frac{J}{2} = \frac{10^{(38/10)} G_{Dp} \lambda^{2}}{4\pi^{2}}$$
(12)

 $4\pi\sigma L_{\rm p}^2$

式(10)可以写成

 s^{-}

$$\frac{J}{S} = \frac{4\pi P_{\rm Dmax} R_{\rm DR}^2 10^{(19/10)}}{P_{\rm T} G_{\rm T} \sigma L_{\rm p}}$$
(13)

在模式转换工作距离上,式(12)等于式(13),有

$$R_{\rm DR}^2 = \frac{10^{(19/10)} P_{\rm T} G_{\rm T} G_{\rm DS} \lambda^2}{16\pi^2 L_{\rm p} P_{\rm Dmax}}$$
(14)

此时的 R_{DR} 便是 MALD 从线性工作状态转换 到饱和功率状态的转换距离,从表达式可以看出, 转换距离的平方与 MALD 的系统增益 G_{DS} 成正比, 与最大发射功率 P_{Dmax} 成反比。

假定 MALD 系统增益为 G_{DS} =50 dB, σ =1 m², P_{T} =30 dB, G_{T} =23 dB,f=3 GHz, L_{p} =1,则最大发 射功率 P_{Dmax} 与转换距离 R_{DR} 之间的关系如图 5 实线 所示。 取防空雷达接收机灵敏度为 10 dB, 即式(13) 中的 $J/S \ge 10$,

$$\frac{4\pi P_{\rm Dmax} R_{\rm DR}^2 10^{(19/10)}}{P_{\rm T} G_{\rm T} \sigma L_{\rm p}} = 10$$
(15)

即

$$R_{\rm DR}^2 = \frac{10P_{\rm T}G_{\rm T}\sigma L_{\rm p}}{10^{(19/10)}4\pi P_{\rm Dmax}}$$
(16)

同样使用上述仿真参数,对式(16)进行仿真分 析的结果如图5虚线所示。





Fig.5 Relationship between mode switching distance/burn out distance and maximum transmitted power

从仿真结果可以看出:

1) 当最大发射功率 P_{Dmax}=1 W时,转换距离为 11.4 km,即在 MALD 与防空雷达距离 11.4 km 时, MALD 任务载荷的工作状态由线性转发转换至功 率饱和模式。随着最大发射功率的增大,转换距离 变小。在实际应用中,可以根据不同的战场环境, 设计 MALD载荷指标,以满足作战需求。

2) 当最大发射功率 P_{Dmax}=1 W时,烧穿距离为 4.5 km,即 MALD 与防空雷达距离大于 4.5 km 时, MALD 具备干扰能力。当距离小于 4.5 km 时, MALD 将失效。该仿真结果可以为 MALD 具体作 战运用提供理论支撑。

这里需要指出的是,上述分析是理论状态,实际情况下,射频综合诱饵的发射功率并不能保证从 雷达天线主瓣进入,也可能从旁瓣进入干扰,此时 转换距离和烧穿距离的计算值也要偏大一些。

4 结束语

本文从微型空射诱饵的功能特点出发,提出了 诱饵弹任务载荷的系统组成方案,并在该方案基础 上,进一步研究其工作状态。一方面为后续研仿工 作奠定基础;另一方面为从技术层面理解微型空射 诱饵作战运用提供理论支撑。微型空射诱饵近年 来逐步受到广泛关注,美空军已批量采购,美海军 型号也已定型,作为美军一款多功能电子战武器, 它具有十分强大的综合射频对抗能力和极其丰富 的作战应用模式,必将在未来战场发挥突防"倍增 器"和战场"清道夫"作用。

参考文献

- [1] 王朝晖,王向飞.机载空射诱饵作战应用分析[J].国际 航空,2016(8):20-22.
- [2]韩宝瑞,刘涛,赵小勇.美国近程防空武器发展及趋势 分析[J].飞航导弹,2018(4):12-16.
- [3] 杨会林,邹敏怀,王少锋.空射诱饵发展分析[J].教练 机,2012(1):48-51.
- [4] RAYTHEON C. Raytheon and US navy begin MALD- super hornet integration [EB/OL]. (2012-07-06) [2019-08-10]. www.raytheon.mediaroom.com.
- [5] Shephard News Team. Data link-equipped Mald-J files for the first time [EB/OL]. (2014-12-11) [2019-08-10].www.shephardmedia.com.
- [6] JAMES D. Raytheon reveals new composite missile body for Mald decoy-jammer [EB/OL]. (2015-07-22) [2019-08-10].www.flightgloble.com.
- [7] 陈美杉,曾维贵,王磊.微型空射诱饵发展综述及作战 模式浅析[J].飞航导弹,2019(3):28-33.
- [8]赵国庆.雷达对抗原理[M].西安:西安电子科技大学 出版社,1999:194-195.
- [9] TOWNSEND J D. Improvement of ECM techniques through implementation of a generic algorithm [R]. Air Force Inst. of Tech, 2008.
- [10] 周一宇,安玮,郭福成.电子对抗原理[M].北京:电子 工业出版社,2009:129-130.
- [11] 周涛.DRFM干扰机对PD雷达干扰效果的研究[D]. 成都:电子科技大学,2012.
- [12] 唐斌,赵源,蔡天一.雷达抗有源干扰技术现状与展望 [J].数据采集与处理,2016,31(4):623-639.
- [13] 张凯.有源雷达诱饵分析与设计[D].西安:西北工业 大学,2006.
- [14] 周冲.空射诱饵弹作战效能评估[D].西安:西北工业 大学,2014.
- [15] 马哈夫扎,埃尔舍贝利.雷达系统设计MATLAB仿真 [M].北京:电子工业出版社,2009:294-300.
- [16] KRAUS J D, MARHEFKA R J. Antennas: for all applications [M]. 3rd ed. Beijing : Electronic Industry Press, 2017: 18-19.