调幅式红外导引头干扰机理

钱 方[1,2],郭 劲[1],邵俊峰[1,2],王挺峰[1]

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室,
吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要:基于调制盘的红外制导导弹严重威胁战机的生存,需要开展机载红外对抗技术研究以保护战机的自身安全。以旭日升型调幅式调制盘为例,介绍了调制盘的工作原理,分析了中波红外激光干扰调制盘的机理,使用 MATLAB 模拟了不同幅度、频率、相位的调制脉冲信号对调制盘系统的干扰情况。结果表明:干扰光强度与目标辐射强度之比从 1 提高到 10 时,方位角误差由 3.6°变为 14.4°,失调角误差由 2.4°变为 10.8°。当干扰信号角频率与调制盘载波频率接近时,方位角误差变为 151.2°,失调角误差变为 28.4°。单纯增加干扰光的强度对实现干扰贡献不大,会增加调制盘系统接收信号的强度,易暴露目标。幅值缓变的干扰信号虽然能使调制盘导引头的接收信号出现偏差,但不会让目标完全摆脱导弹跟踪,而角频率接近载波频率的干扰信号会使导引头接收不到准确信号,最终实现干扰。

关键词:机载红外对抗;光电制导;调幅调制盘;干扰机理

中图分类号:TN248.1 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2013)06-1432-05

Jamming of the amplitude modulation infrared seekers

Qian Fang[1,2], Guo Jin[1], Shao Junfeng[1,2], Wang Tingfeng[1]

(1. State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences, Changchun, 130033, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The threat of the IR guidance missile is a direct consequence of extensive proliferation of the airborne IR countermeasure. According to the operation of the amplitude modulation reticle system, the principle of the laser disturbance on modulation reticle was analyzed and the numerical simulation used MATLAB based on a rising-sun reticle was done. When the ratio of jamming energy to target radiation increased from 1 to 10, the azimuth error changed from3.6° to 14.4° and the misalignment angle error changed from 2.4° to 10.8°. When the jamming angular frequency was equal to the carrier frequency, the azimuth error was 151.2° and the misalignment angle error was 28.4°. The results show that simply increasing the intensity of the jamming light achieves little. It will increase the received signal strength of the amplitude modulation reticle system and the target will be more easily exposed. A slow variation of the amplitude will warp the azimuth information received by the seeker, but the target can't be completely out of the missile tracking. If the jamming signal's angular frequency is close to the carrier frequency of the reticle system, the seeker will can't receive an accurate signal and the jamming can be achieved.

Key words: airborne IR countermeasure; photoelectric homing; AM reticle; jamming mechanism

---

收稿日期:2012-10-05; **修订日期**:2012-11-08

基金项目:国家重点实验室自主基础研究课题(SKLLIM1004);院地合作长吉图专项基金(2011JT0006);
吉林省科技发展计划项目(20126015)

作者简介:钱方(1987-),女,硕士生,主要从事激光辐照效应方面的研究。Email:qfmail@yahoo.cn

导师简介:郭劲(1964-),男,研究员,博士生导师,博士,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。

0 引 言

机载红外对抗技术是为了应对红外制导导弹威胁而发展起来的防御性技术，红外末制导一般以高温飞机尾焰为寻的目标，其典型辐射波段范围一般为 2~5 μm,因此,可以采用该谱段的弧光灯或激光进行干扰或压制。

由于红外点源制导导弹技术难度较低，而效费比相对较高，这使其并未因成像寻的制导的出现而迅速退役,目前主要服役的仍是红外点源寻的导弹。美国研制的“尾刺”和法国的“西北风”等红外地对空导弹的信号处理单元都为调制盘式的调幅系统或调频系统[1-4]。近几年来,美国空军基于电子战仿真平台(AFEWES)开展了机载红外对抗干扰机理及仿真评估技术研究,还发展了定向红外对抗(DIRCM)系统和先进威胁红外对抗(ATIRCM)系统,深入探讨了弧光灯或激光对调制盘系统的干扰机理，但均未报道具体研究内容和结果。2010 年中科院长春光机所采用中波激光器对 HgCdTe 探测器进行了远场干扰实验[5],但是国内对中红外波段激光干扰调幅式调制盘点源探测系统的研究报道较少，对干扰机理还不清晰,急需开展对调幅调制盘系统干扰机理的研究。

文中以旭日升型调幅式调制盘为例，介绍了调幅系统的工作模式,用 MATLAB 仿真了干扰光强度与目标辐射强度之比(压制比)不同、干扰信号与载波信号频率不同、初始相位不同等 4 种干扰情况下调制盘系统的输出,并比较干扰效果。

1 调幅调制盘工作原理

红外系统中使用的调制盘类型很多，按调制方式划分可分为调幅式、调频式、调相式、调宽式和脉冲编码式。在跟踪和制导系统中,调制盘主要用来测量目标的位置，即把目标的位置信息转换成可用信息,从而给出误差信号驱动跟踪机构跟踪目标,此外就是滤除大面积背景辐射,即空间滤波[6-7]。

最简单的调制盘由调制区和半透区组成，调制区由透射和不透射的扇形辐条交替形成，半透区可透过目标像点能量的一半。调制盘一般置于光学系统的焦平面上，调制盘的中心位于光学系统的光轴上。在调幅系统中,假设目标像点不动,而调制盘绕中心旋转，这样目标像点的透过能量就随着调制盘的转角而变化,形成幅度调制波。

假设调制盘以角频率 ω 顺时针旋转，目标像点为能量分布均匀的半径为 δ 的圆形，其中心到调制盘中心的距离为 ρ, θ 为方位角，则目标像点通过旭日升型调制盘后所形成的调制波解析式为：

$$\mathbf{F}(t)=\frac{1}{2}\mathbf{F}+\mathbf{F}\sum_{n=1}^{\infty}\mathbf{B}_n\frac{2\mathbf{J}_1(\mathbf{nZ})}{\mathbf{nZ}}\sin(\mathbf{n}\theta+\mathbf{n}\omega t) \tag{1}$$

$$\mathbf{B}_n=\frac{2}{\pi}\int_{\theta}^{\pi}\tau(\mathbf{u})\sin\ \mathbf{nu}\mathbf{du} \tag{2}$$

式中:$\mathbf{F}$ 为入射总能量;$\mathbf{J}_1(\mathbf{nZ})$是以 $\mathbf{nZ}$ 为宗量的第一类一阶贝塞尔函数;$\mathbf{Z}=\delta/\rho$;$\tau(\mathbf{u})$是系统的透过率函数。

当目标像点通过调制区透明辐条部分输出能量最大,透过不透明辐条时输出能量最小,透过调制盘的能量大小随调制盘的转角而变化。当目标像点通过半透区时,输出的能量始终为 1/2$\mathbf{F}$。因此,调制盘在一个转动周期内，目标像点的能量被调制成幅度调制波输出,调制盘继续转动,输出的调制波呈现出周期变化,根据调制波幅值可以判断出 ρ 的大小，根据波形相位可以判断出 θ 的大小,最终得到目标像点位置信息。

2 干扰调制盘系统机理分析

文中以旭日升型调制盘为例,使用 MATLAB 仿真了旭日升型调制盘的形状和调制盘在无干扰和有干扰信号输入时的输出情况。

旭日升型调制盘如图 1 所示，上半圆为目标像点调制区，由透辐射和不透辐射的扇形条交替呈辐射状组成;下半圆为半透区。调制盘放置于光学系统的焦平面上,当从目标辐射来的红外线以平行光束

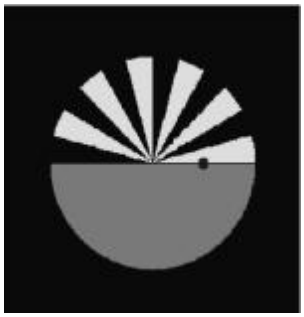


图 1 旭日升型调制盘

Fig.1 Illustration of rising-sun reticle

进入光学系统并聚焦在调制盘上时，会形成一个很小的像点。红外辐射经调制盘调制后,把目标像点的偏离量 ρ 以及方位角 θ 转化为可用的信息，从而确定目标方位。

当调制盘在无干扰情况下工作时,仿真得到的输

出信号波形如图 2(a),图中依次是目标像点经调制盘系统的输出信号, 滤波信号和包络检波信号。失调角由 $\rho=f\times\tan\Delta q$ 得到,f 为光学系统焦距,Δq 与调制信号的相对值 K 之间的关系曲线称为调制曲线。$K=U_{max}/U$,其中 U_{max} 是调制信号的最大幅值,U 是目标像点的总能量。通过与基准信号相比较, 就可以得到目标像点的偏离量 ρ 以及方位角 θ[7]。调制曲线如图 2(b)所示。

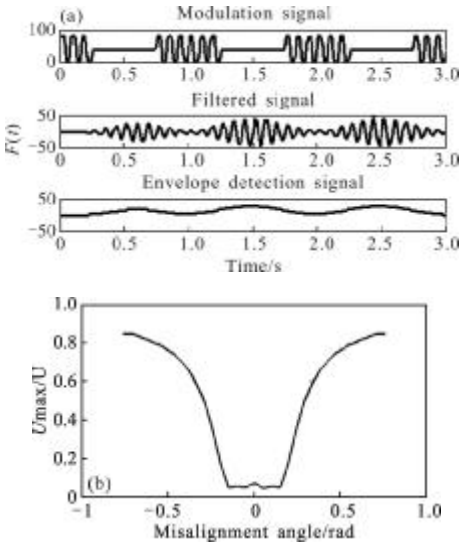


图 2 无干扰目标调制信号

Fig.2 Target modulation signal with no jamming

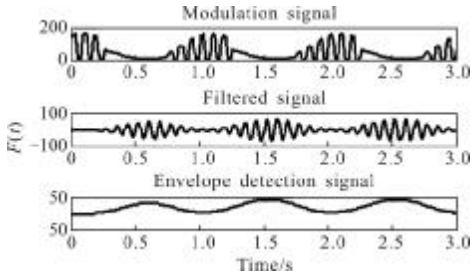
从以上分析可以看出, 调制盘在一个转动周期内, 目标像点在调制区内输出能量经调制盘调制之后,在某个固定的最大与最小间呈脉冲形式输出。目标像点在半透区内输出能量始终为最大能量的一半。

主动式红外对抗系统是向来袭的导弹发射经过调制的红外辐射, 使调制盘点探测系统接收不到准确的有用信息,从而使目标摆脱导弹的跟踪。对调幅式调制盘系统的干扰方式主要有两种: 一是加入幅度缓变的干扰光, 从而影响探测器接收到的目标信号的幅值; 另外一种是发射经调制的一定频率的激光脉冲信号,对调制波进行干扰[8-12]。

干扰信号是随机量,分布律因干扰源而异,假设干扰信号是高斯型的,且有无限宽的频谱。当干扰信号通过窄带滤波器后,可以近似地将其表示为:

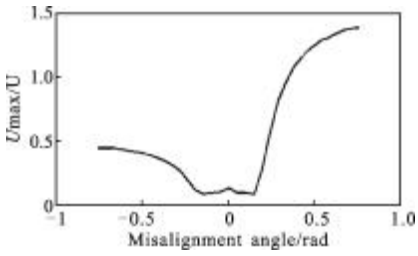
$$J=J(t)\cos[\Omega t+\varphi(t)] \tag{3}$$

式中:J(t)为干扰信号幅值;$\varphi(t)$为干扰信号的相位;Ω 为干扰信号角频率。设 S(t)为无干扰时调制盘接收到的信号幅值,ω 为调制盘旋转角频率,此时载波频率为 12ω。加入一组随机相位干扰信号, 即在 MATLAB 中为:φ=2·pi·rand。图 3(a)~(d)通过比较,当 J=S,$\Omega=\omega$,经计算方位角 θ 的误差约为 3.6°,失调角 Δq 的误差约为 2.4°;当 J=10 S,$\Omega=\omega$,经计算方位角 θ 的误差约为 14.4°,失调角 Δq 的误差约为 10.8°。从可以看出,当干扰信号加入后,输出波形仍呈周期变



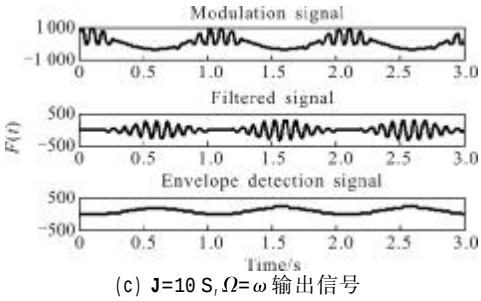
(a) J= S,$\Omega=\omega$ 输出信号

(a) J=S,$\Omega=\omega$ output signal



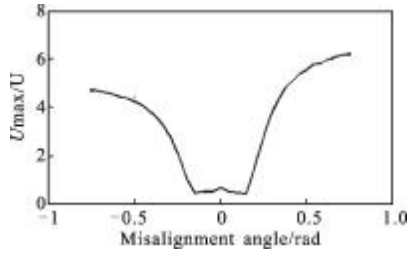
(b) J=S,$\Omega=\omega$ 调制曲线

(b) J=S,$\Omega=\omega$ modulation curve



(c) J=10 S,$\Omega=\omega$ 输出信号

(c) J=10 S,$\Omega=\omega$ output signal



(d) J=10 S,$\Omega=\omega$ 调制曲线

(d) J=10 S,$\Omega=\omega$ modulation curve

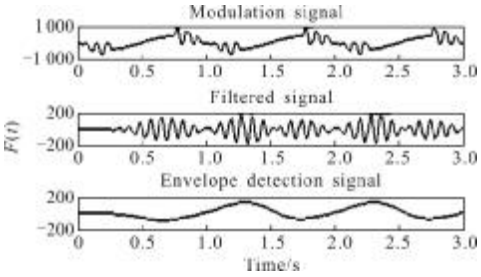
图 3 有干扰目标调制信号

Fig.3 Target modulation signal with jamming

化,但在调制区输出的最大脉冲幅值已经不一致,在半透区的输出值也不再是目标像点能量的一半。它们的调制曲线与无干扰情况下的调制曲线均存在误差,此时失调角 Δq 与调制信号的相对值 K 之间的对应关系已经不准确,由调制曲线确定的目标像点方位信息存在误差。J=S 时的干扰信号只是使点探测器接收的目标方位角和偏离量信息发生了小的偏差,但是无法使目标完全摆脱导弹的跟踪。J=10S 时其偏差比 J=S 时大,干扰效果更加明显。因此,单纯增加干扰光强度能提高干扰效果,加入随机相位干扰信号后,目标像点经调制盘后输出的方位角和偏离量信息均存在误差,但由于相位的随机性不利于定量讨论,所以下面将讨论固定相位的情况。

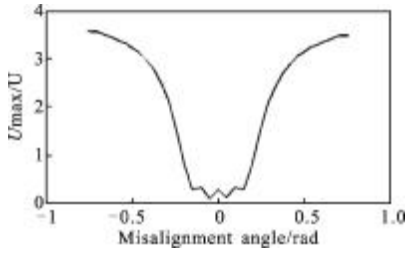
加入一组固定相位干扰信号,信号形式见公式(3),令 $\varphi=\pi$。

比较后,当 J=10S,$\Omega=\omega$,经计算方位角 θ 的误差约为 18.4°,失调角 Δq 的误差约为 21.6°;当 J=10S,$\Omega=12.5\omega$,经计算方位角 θ 的误差约为 151.2°,失调角 Δq 的误差约为 28.4°。从图 4(a~d)中可以看出,当 $\Omega=\omega$ 时,输出的脉冲信号还存在周期性,当 $\Omega=12.5\omega$ 时,输出信号已经完全没有周期性,也无法分辨目标像点何时通过半透区。它们的调制曲线均与无干扰情况下的调制曲线存在误差,此时失调角 Δq 与调制信号的相对值 K 之间的对应关系已经不准确,由调制曲线确定的目标像点方位信息存在误差。$\Omega=12.5\omega$ 时比 $\Omega=\omega$ 时干扰效果明显。干扰信号强度的变化影响了目标像点包络的幅值,同时包络的相位信息也有所改变,当 $\Omega=\omega$ 时,实际信号、信号包络仍在周期内呈现规律性,当 $\Omega=12.5\omega$ 时,实际信号、信号包络几个周期内已经没有规律性,点探测器接收到的信息已经无法判断出目标方位,调制盘系统受到严重干扰。



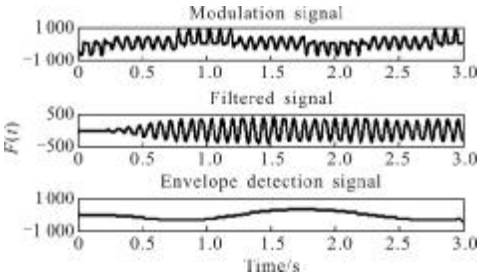
(a) J=10S,$\Omega=\omega$ 输出信号

(a) J=10S,$\Omega=\omega$ output signal



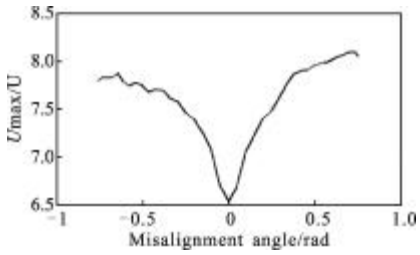
(b) J=10S,$\Omega=\omega$ 调制曲线

(b) J=10S,$\Omega=\omega$ modulation curve



(c) J=10S,$\Omega=\omega$ 输出信号

(c) J=10S,$\Omega=\omega$ output signal



(d) J=10S,$\Omega=\omega$ 调制曲线

(d) J=10S,$\Omega=\omega$ modulation curve

图 4 有干扰目标调制信号

Fig.4 Target modulation signal with jamming

表 1 中,当干扰信号强度增加时,获得的目标方位角和失调角信息误差变大;如果在增加干扰光强度的同时,调制干扰信号的频率,使其接近调制盘载波信号的频率,这时目标位置信息的误差最大,干扰效果最明显。

表 1 误差分析

Tab.1 Error analysis

Error	Interference			
	J=S $\Omega=\omega$ $\varphi=2\cdot pi\cdot rand(1)$	J=10S $\Omega=\omega$ $\varphi=2\cdot pi\cdot rand(1)$	J=10S $\Omega=\omega$ $\varphi=\pi$	J=10S $\Omega=12.5\omega$ $\varphi=\pi$
θ	3.6°	14.4°	18.4°	151.2°
Δq	2.4°	10.8°	21.6°	28.4°

3 总 结

文中基于 MATLAB 仿真方法开展了旭日升型调制盘的干扰机理研究。分别模拟了 4 种不同的干扰方法:(1) 压制比 J/S=1,干扰信号的频率接近调制盘旋转频率($\Omega=\omega$),干扰相位随机时,相当于加入幅值缓变的干扰光, 此时方位角误差为 3.6°,失调角误差为 2.4°, 虽然能对系统造成一定的干扰,却无法使目标完全摆脱导弹的跟踪;(2) 压制比 J/S=10,同时保持 $\Omega=\omega$ 和干扰相位随机,此时方位角误差为 14.4°,失调角误差为 10.8°,虽然提高了压制比,目标像点位置信息误差更大,但是压制比较大时又会增强调制盘接收到的信号,使目标像点更易暴露;(3) 压制比 J/S=10,$\Omega=\omega$,干扰相位 $\varphi=\pi$ 时,干扰效果同方法 (2) 接近, 此时方位角误差为 18.4°, 失调角误差为 21.6°;(4) 压制比 J/S=10,干扰信号的频率接近调制盘载波频率 ($\Omega=12.5\omega$),干扰相位 $\varphi=\pi$ 时, 相当于加入一定调制频率的脉冲激光, 此时方位角误差为 151.2°, 失调角误差为 28.4°,输出的目标信号不再具有周期性,也无法通过滤波和包络检波得到有用的位置信息。通过结果比较可以看出第(4)种干扰方法在增加干扰信号强度的同时改变干扰频率,使干扰频率与调制盘载波信号的频率接近,此时调制盘得到的目标像点位置信息偏差最大,干扰效果最好。

为了实现对红外寻的制导调制盘系统的干扰,使目标完全摆脱导弹的跟踪, 不能只单纯增加干扰信号的强度,以免干扰信号过强时暴露自身目标,最好使干扰强度稍大于目标信号辐射强度, 并适当选择干扰信号的频率和相位,完成有效干扰。

参考文献:

[1] Fan Jinxiang, Yang Jianyu. Development trends of infrared imaging detecting technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(12):3145-3153. (in Chinese)
范晋祥, 杨建宇. 红外成像探测技术发展趋势分析 [J]. 红外与激光工程,2012,41(12):3145-3153.

[2] Fan Jinxiang. Development analysis of infrared imaging seekers of kinetic kill vehicles in America [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(1):1-2. (in Chinese)
范晋祥. 美国动能拦截弹红外成像导引头的发展分析[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(1):1-2.

[3] Luo Haibo, Shi Zelin. Status and prospect of infrared imaging guidance technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(4):565-566. (in Chinese)
罗海波, 史泽林. 红外成像制导技术发展现状与展望[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(4):565-566.

[4] Schleijpen H M A, Carpenter S R, Mellier B, et al. Imaging seekers surrogate for IRCM evaluation [C]//SPIE, 2006, 6397:1-3.

[5] Wang Siwen , Guo Lihong , Zhao Shuai , et al. Experiments of high-power CO_2 laser disturbance to far-field HgCdTe detectors[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(4): 1-2. (in Chinese)
王思雯, 郭立红, 赵帅, 等. 高功率 CO_2 激光对远场HgCdTe探测器的干扰实验[J]. 光学 精密工程,2010,18(4):1-2.

[6] Yang Yihe. Infrared System [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1995.(in Chinese)
杨宜禾. 红外系统[M]. 北京:国防工业出版社,1995.

[7] An Yuying. Optoelectronic technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. (in Chinese)
安毓英. 光电子技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.

[8] Ivica Kopriva, Antun Persin. Discrimination of optical sources by use of adaptive blind source separation theory[J]. Applied Optics, 1999, 7(38): 1115-1117.

[9] Ronald G D, Carl E H, Glenn D B. Parameters of spinning AM reticles [J]. Applied Optics, 1991, 19(30): 2675-2684.

[10] Bernhard Molocher. Countermeasure laser development [C]// SPIE, 2005, 5989: 1-4.

[11] Paul E Mengerst, Kathryn O'Brien. Analysis of error response of amplitude modulated reticles[C]//OSA, 1964, 54: 668-669

[12] Wagner J. Infrared semiconductor laser modules for DIRCM applications[C]//SPIE, 2009, 7483: 1-6.