

文章编号: 1001-3806(2006)06-0618-03

调幅式调制盘红外导引头的主动干扰

王 滨^{1,2}, 李 彤², 吕百达^{1*}, 钟 鸣²

(1. 四川大学 激光物理与化学研究所, 成都 610064 2. 西南技术物理研究所, 成都 610041)

摘要: 为了干扰调幅式调制盘系统, 根据调幅式调制盘红外导引头的工作原理, 采用数值模拟的方式分析了两种主动干扰红外导引头的方法。结果表明, 缓慢幅度的干扰辐射会使导引头获得的目标方位信息产生偏差, 但无法使目标摆脱导引头的跟踪; 而重复频率近似等于调制盘系统调制波形载频的光脉冲会干扰导引头接收到的目标信号, 使导引头失去目标。干扰辐射强度近似等于目标辐射强度, 即可实现干扰。

关键词: 激光技术; 红外导引头; 干扰; 调制盘

中图分类号: TN216 文献标识码: A

Active jamming of an infrared seeker with amplitude modulation reticle

WANG Bin^{1,2}, LI Tong², LÜ Bai-da¹, ZHONG Ming²

(1. Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064, China 2. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract For the purpose of jamming the amplitude modulation reticle system, two methods of active jamming of infrared seeker are analyzed by using numerical simulation based on the operation principle of an infrared seeker with amplitude modulation reticle. The results show that the jamming source with a slow variation of amplitude will warp the target's azimuth received by the seeker. But it can not make the target escape from the sight of the seeker. At a repetition rate nearly equal to the carrier frequency of the reticle system, the jamming source will disturb the target's signal received by the seeker and make the seeker lose the target. If the intensity of the jamming source nearly equals to that of target's radiation, the jamming can be achieved.

Key words laser technique; infrared seeker; jamming; modulation reticle

引 言

红外点源寻的跟踪制导武器是最早研制的红外制导武器。其技术难度较低, 而效费比相对较高, 这使得它并未因成像寻的制导的出现而迅速退役。目前服役的导弹, 仍以红外点源寻的者居多^[1]。

点源跟踪制导系统根据目标的热辐射特性, 把目标当作热辐射点进行探测。调制盘是多数点源制导系统的核心元件, 其主要作用是: 把恒定的辐射通量变成交变的辐射通量, 以使用交流放大器把信号放大, 进行空间滤波, 抑制背景, 突出目标及提供目标的方位信息。按照像点在调制盘上的扫描方式, 调制盘可分为旋转调制盘、章动调制盘、圆锥扫描调制盘等; 按调制方式划分, 调制盘又可分为调幅式、调频式、调相式、脉冲编码式和脉冲调宽式等。本文中的研究对象为调幅

式旋转调制盘。

主动式红外对抗系统向来袭导弹发射经调制的红外辐射, 使导弹无法正常跟踪目标。对调幅式调制盘系统干扰方式主要有两种, 一是引入幅度缓变的干扰光, 从而影响调幅式调制盘系统接受到的目标辐射信号的幅值, 使之得到错误的目标信息; 二是发射一定频率的红外光脉冲信号, 通过调制盘的半透明区进入调制盘系统, 从而对目标调制信号产生干扰。干扰光源可以采用传统红外光源, 也可采用红外激光器进行定向干扰^[2~4]。

1 调制盘系统制导原理分析

旭日式调制盘是最简单的调幅式调制盘, 如图 1 所示。图中上半圆为目标像点调制区, 由 6 组圆心角相同的透光与不透光扇形相间配置而成; 下半圆为半透明区^[5]。当目标像点落在调制盘边缘时, 随调制盘的转动探测器接受到周期性光脉冲, 从而得到目标信号。而当面积较大的背景进入视场时, 由于其覆盖调制区多个扇区, 探测器接受到的透射通量近似为一恒值, 不会造成有用信号输出, 从而起到空间滤波的作

基金项目: 国防预研基金资助项目 (51288)

作者简介: 王 滨 (1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事中红外定向干扰研究工作。

* 通讯联系人。E-mail: bailah@scu.edu.cn

收稿日期: 2005-11-08 收到修改稿日期: 2006-02-16

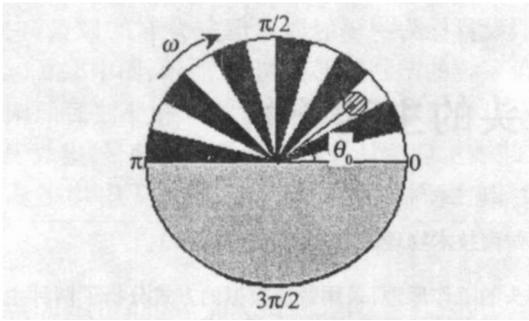


Fig 1 Illustration of rising-sun reticle

用^[6]。假设目标像点为能量分布均匀的半径为 δ 的圆形,像点中心距离调制盘中心距离为 ρ 则像点通过旭日式调制盘后所形成的调制波解析式为^[7]:

$$F(t) = \frac{1}{2}F + F \sum_{n=1}^{\infty} B_n \frac{2J_1(nZ)}{nZ} \sin(n\theta + n\omega t) \quad (1)$$

式中, F 为入射总能量, ω 是调制盘的转速, $\theta = \theta_0 - \pi/2$, θ_0 为目标方位角, $J_1(nZ)$ 是以 nZ 为宗量的第一类一阶贝塞尔函数, $Z = \delta/\rho$, $\tau(u)$ 是系统透过函数, B_n 是透过函数 $\tau(u)$ 的 n 次协波的幅值:

$$B_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \tau(u) \sin nu \, du, \quad \tau(u) = \tau(u) - 1/2 \quad (2)$$

像点透过调制盘的调制波形如图 2 所示,其中 T 为调

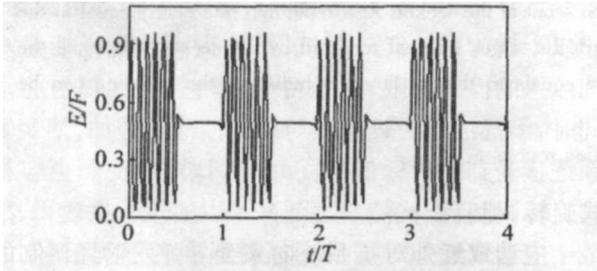


Fig 2 Waveforms of facular energy modulation

制盘转动 1 周的时间, $T = 2\pi/\omega$ 。如 (1) 式所示的光信号经探测器光电转换并放大转变为电信号,进入系统滤波电路。对于如图 1 所示的调制盘,调制区有 6 组黑白相间条幅,则透过调制盘的信号频率为 12ω ,称为调制盘系统的载频。为抑制背景及噪声,系统中一般会加入一带通滤波器,从信号能量及信噪比考虑^[8],滤波器一般取中心频率为 12ω ,带宽为 2ω 。设 $D_n = 2B_n J_1(nZ)/nZ$, 则 $F(t)$ 经过探测器光电转换,放大,带通滤波后可写为:

$$U'(t) = KF [D_{11} \sin(11\theta + 11\omega t) + D_{12} \sin(12\theta + 12\omega t) + D_{13} \sin(13\theta + 13\omega t)] \quad (3)$$

式中, K 是一比例系数,它与光电转换效率及放大系数有关。当 $Z \ll 1$ 时,可近似认为 $D_{11} = D_{13}$, 于是经检波器取出包含有目标方位信息的包络信号可写为:

$$U(t) = KF [D_{12} + (D_{11} + D_{13}) \sin(\omega t - \theta_0)] \quad (4)$$

式中,正弦包络信号的幅值与目标的失调角有关,目标离调制盘中心越远,振幅越大,包络初相位 θ_0 表征目标在空间的方位角,上式信号与基准信号 $U_b(t) =$

$U_b(1 + \sin\omega t)$ 相比较,即可得到目标失调角 Δq 和方位角 θ_0 。

2 干扰对调制盘系统影响分析

为使计算简便,同时能比较不同干扰方式的干扰效果,选取一组周期性正弦信号作为干扰光辐射信号^[9]:

$$S(t) = S + mS \sin(\Omega t + \varphi) \quad (5)$$

式中, S 为干扰机的辐射能量, Ω 为干扰波形的角频率, φ 为干扰波形初相位, m 为常数 ($m \leq 1$)。当 $\Omega \ll 12\omega$ 时,可认为上述是一幅值缓变的干扰光,用于干扰调制盘系统接受到的光脉冲幅度;当 Ω 近似于 12ω 时,认为上式可近似为一组光脉冲信号,用以干扰调制盘系统接受到的目标信号。

将该辐射叠加到点源目标上,同时为调制盘接收并调制,得到调制波形如下:

$$F(t) = \frac{(F+S)}{2} + (F+S) \sum_{n=1}^{\infty} D_n \sin(n\theta + n\omega t) + \frac{mS \sin(\Omega t + \varphi)}{2} + mS \sin(\Omega t + \varphi) \sum_{n=1}^{\infty} D_n \sin(n\theta + n\omega t) \quad (6)$$

式中,第 1 项和第 2 项能正确反映目标的位置信息,它与 (1) 式相似,幅值是 (1) 式的 $(F+S)/F$ 倍,这是由于干扰信号的直流项引起的,它对调制系统没有干扰作用,反而增强了目标信号,使目标更容易暴露。第 3 项和第 4 项是干扰项,将分别讨论其干扰机理及效果。

当干扰频率 Ω 处于系统滤波器通带范围之外时,第 3 项干扰将被系统滤掉,第 4 项起主要干扰作用,它可以展开为:

$$F_4(t) = \frac{mS}{2} \sum_{n=1}^{\infty} D_n \{ \cos[(n\omega - \Omega)t + n\theta - \varphi] - \cos[(n\omega + \Omega)t + n\theta + \varphi] \} \quad (7)$$

上式在 $n=12$ 左右协波幅值最大,即当 $\Omega \approx \omega$ 时,上述辐射通量经过探测器光电转换放大,再经过带通滤波器后得到电信号可写为:

$$U_4'(t) = mSKD_{12} \sin(\Omega t + \varphi) \sin(12\omega t + 12\theta) + mSKD_{11} \sin[(\Omega - \omega)t + \varphi - \theta] \sin(12\omega t + 12\theta) \quad (8)$$

上式经检波后得到干扰波形包络信号:

$$U_4(t) = mSKD_{12} \sin(\Omega t + \varphi) + mSKD_{11} \sin[(\Omega - \omega)t + \varphi - \theta] \quad (9)$$

调制波的包络波形中包含两种干扰正弦震荡,其初相位分别是 φ 和 $\varphi - \theta$,幅值分别为 $mSKD_{12}$ 和 $mSKD_{11}$ 。

若 $11\omega \leq \Omega \leq 13\omega$, (6) 式中的第 4 项作为高频噪声被滤波器滤掉,第 3 项干扰波 $F_3(t) = mS \sin(\Omega t + \varphi)/2$ 处于系统滤波器通带范围内时,经过光电转换,放大电路,带通滤波电路和检波电路后得到信号电压:

$$U_3(t) = mSK \cos[(\Omega - 12\omega)t + \varphi - 12\theta]/4 \quad (10)$$

上式会引入干扰波信号包络,对目标信号包络产生干扰,甚至使目标信号淹没于干扰信号中,从而使导引头丢失目标方位信息。

3 数值模拟计算

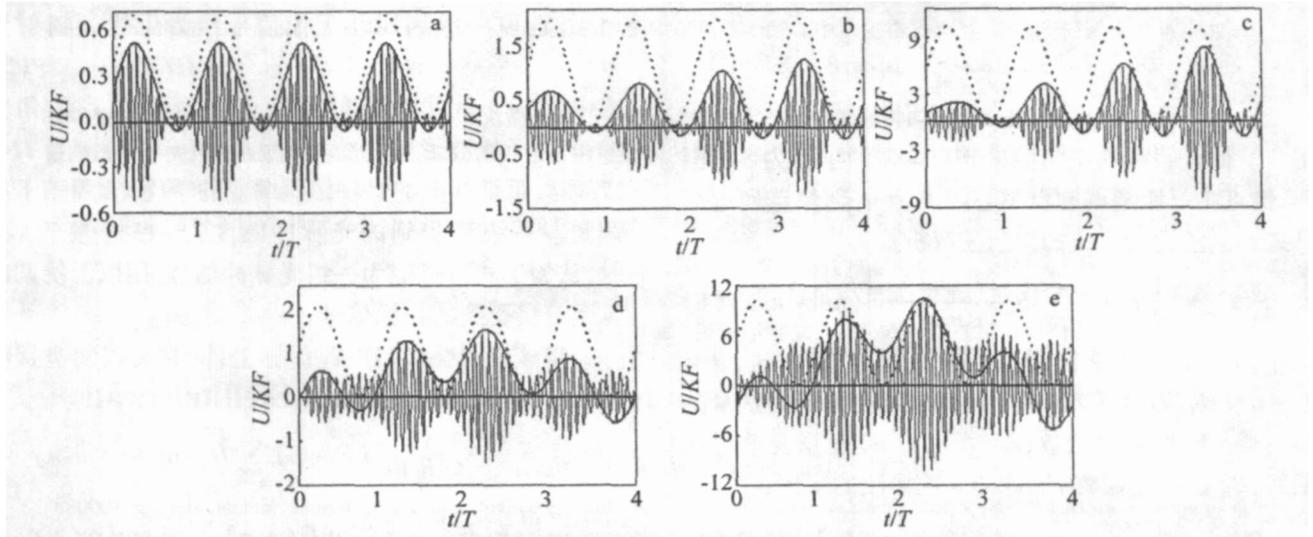


Fig 3 Target modulation signal with jamming

a—no jamming b— $\Omega = 1.1\omega, S = F$ c— $\Omega = 1.1\omega, S = 10F$ d— $\Omega = 12.25\omega, S = F$ e— $\Omega = 12.25\omega, S = 10F$

号幅值设定在信号幅值附近,以便于比较干扰对信号幅值和位相的影响。图中可以看出,目标信号调制包络与基准信号位相相差为 Q 从而可以判断出目标像点位于调制盘上 $\theta_0 = 0$ 处,进而得到目标的空间方位角;包络的幅值表示像点到调制盘中心的相对距离,若像点位于调制盘中心,包络幅值为 Q 。由于 $D_{11} + D_{13} > D_{12}$, 图中载波信号略微出现过调制现象。

对于幅值缓变的干扰辐射,假设 $\Omega = 1.1\omega, S$ 分别取 F 和 $10F$, $\theta_0 = 0, \varphi = \pi$, 如图 3b、图 3c 所示,干扰信号的直流分量增强了目标信息,同时干扰信号振幅的变化影响了目标信息包络的幅值,部分周期内包络的位相也有所改变,从而影响了导引头对目标方位的准确判断,具有一定干扰作用,但上述干扰只是使导引头获得的目标方位出现小的偏差,而无法使目标完全摆脱导弹的跟踪。

对于红外脉冲信号干扰光,假设 $\Omega = 12.25\omega, S$ 分别等于 F 和 $10F$, $\theta_0 = 0, \varphi = \pi$, 如图 3e、图 3f 所示,调制盘系统接收到的目标信号受到严重干扰,目标信号和干扰信号相互叠加而无法区别,由于产生严重的过调制现象,理论计算的信号包络和实际信号包络不完全吻合。实际信号包络在几个周期内呈现无规则起伏,调制盘系统将无法判断目标方位。另外,即使目标位于调制盘中心,目标信号为一直流项,由于干扰信号仍可通过系统的信号处理电路,因此,系统接收到的目标方位信息并不为 Q 干扰信号对调制盘系统仍起作用。

假设目标为一辐射能量恒定为 F 的像点,它透过调制盘系统的调制波形如图 3a 所示,图中取 $\theta_0 = 0$ 灰线表示目标信号经光电转换,放大和滤波后的调制信号,实线表示理论计算出的检波后的信号,虚线表示基准信号,它由调制盘系统产生,在图 3 中均把基准信

比较图 3b、图 3c 和图 3e、图 3f 中的 2 组数据,对于以干扰为目的红外对抗,单纯提高干扰光能量对干扰效果的提升有限,这是由于在增加干扰辐射能量的同时,干扰信号的直流项与目标信号相叠加,使调制盘系统接受到的目标信号同时得到增强,反而更容易暴露目标,但若干扰能量过低又难以实现干扰效果,故实战中应选取近似等于目标辐射强度的干扰信号,以实现干扰。

4 小结

旭日式调制盘是最简单的调幅式调制盘,其上半圆为目标像点调制区,由圆心角相同的透光与不透光扇形相间配置而成,下半圆为半透明区。加入半透明区可以抑制大面积背景对制导系统的影响,但却为干扰辐射提供了窗口。文中对比了改变目标幅值和干扰目标信号两种干扰方式,第 1 种是通过在目标上加载红外辐射源以改变目标的辐射强度,第 2 种是向导引头系统发射一定频率的红外光脉冲信号以干扰导引头系统接受到的目标信号。计算表明,两种方式都具有一定干扰效果,前者使导引头获得的目标方位出现偏差,但无法使目标完全摆脱导弹的跟踪,后者使目标信号和干扰信号相互叠加而无法分辨从而使导弹失去目标信息。实战中一般同时调制干扰光源的幅度和频率,以实现更佳干扰效果。文中计算还表明,对于以干扰为目的红外对抗,单纯提高干扰光能量会同时增强导

响熔覆道的宽度,在冷基板上沉积时,由于基板的热沉作用,熔覆道较窄;激光微沉积的工艺参数及热过程对所沉积薄壁的层高、厚壁及壁厚均匀性有显著影响,在合适的工艺条件下,沉积过程及熔池大小经过初始几层沉积后可达到稳定;为得到壁厚均匀一致的薄壁零件,在沉积初始几层要选择较低的扫描速度和送粉量;采用连续往复扫描沉积薄壁时,由于两端的热作用时间较长,所沉积层的高度和厚度较其它部位有所增加,采用单方向扫描和激光开关控制可克服这一差异;采用激光粉末微沉积工艺,可直接制备出壁厚在0.4mm的薄壁零件,沉积表面的粗糙度 R_a 约10 μ m;所沉积的薄壁材料内部组织致密,晶粒细小,充分显示了激光微沉积合金粉末技术在直接成形高精度的细小零件及小尺寸零件表面激光熔覆方面独特的优势和发展潜力。

参 考 文 献

- [1] ABBOTT D H, ARCELLA F G. Laser forming titanium components [J]. *Advanced Materials& Processes* 1998, 152(5): 29~ 30.
- [2] SCHWENDNER K J, BANERJEE R, COLLINS P C *et al*. Direct laser deposition of alloys from elemental powder blends [J]. *Scripta Materialia* 2001, 45(10): 1123~ 1129.
- [3] LEWIS G K, SCHLINGER E. Practical considerations and capabilities for laser assisted direct metal deposition [J]. *Materials& Design* 2000, 21(4): 417~ 423.
- [4] WU X, LIANG J, MEI J *et al*. Microstructures of laser deposited Ti-6Al-4V [J]. *Materials& Design* 2004, 25(2): 137~ 144.
- [5] CHOI J, CHANG Y. Characteristics of laser aided direct metal material deposition process for tool steel [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacturing* 2005, 45(4~ 5): 597~ 607.
- [6] KEICHE D M, SMUGERESKY J E. The laser forming of metallic components using particulate materials [J]. *Journal of Metals* 1997, 49(5): 51~ 54.
- [7] ARCELLA F G, FROES F H. Producing titanium aerospace components from powder using laser forming [J]. *Journal of Metals* 2000, 52(5): 28~ 30.
- [8] KOBRYN P A, MOORE E H, SEMKIN S L. The effect of laser power and traverse speed on microstructure, porosity, and build height in laser-deposited Ti-6Al-4V [J]. *Scripta Materialia* 2000, 43(4): 299~ 305.
- [9] PINKERTON A J, LI L. The significance of deposition point standoff variations in multiple layer coaxial laser cladding [J]. *International Journal of Machine Tool and Manufacturing*, 2004, 44(6): 573~ 584.
- [10] MAZUMDER J, DUTTA D, KUKUCHIN *et al*. Closed loop direct metal deposition art to part [J]. *Optics and Lasers in Engineering* 2000, 34(4~ 6): 397~ 414.
- [11] HU D M, KOVACEVIC R. Sensing modeling and control for laser-based additive manufacturing [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacturing* 2003, 43(1): 51~ 60.
- [12] LI X Y, QI X J, ZENG X Y. Establishment and application of temperature field model in laser microcladding [J]. *Laser Technology* 2005, 29(6): 561~ 564(in Chinese).

(上接第 620页)

引头接收到的目标信息,近似等于目标辐射强度的干扰信号,已经可以实现干扰。

实战中使用较多的棋盘格式调制盘、放射形和螺旋线形调制盘等^[10],相比于旭日式调制盘,其优点在于具有更好的空间滤波能力和较小的盲区等,但它的目标方位识别的原理与旭日式调制盘相同,所以文中所述的干扰方式对它们同样有效。实战中还需要对来袭导弹实施侦察以获得敌方导引头工作方式、工作频率等信息以实施干扰。

参 考 文 献

- [1] WANG Y Zh. Modern military optical technology [M]. Beijing Science Press 2003, 224~ 257(in Chinese).
- [2] YAO B Q, WANG Y Zh, WANG Q. Development of mid-infrared optical parametric oscillator [J]. *Laser Technology*, 2002, 26(3): 217~ 220(in Chinese).
- [3] WAN Y, LAN G, SU X Zh *et al*. High energy output complex cavity pump optical parametric oscillator in the mid infrared [J]. *Laser Technology* 2005, 29(4): 340~ 342(in Chinese).
- [4] YUAN Y H, LIU S H, SUN Ch W *et al*. The researches of laser disturbance effects in IR system processing circuit [J]. *Laser Technology*, 2002, 26(6): 432~ 434(in Chinese).
- [5] SUZUKI K. Analysis of rising sun reticle [J]. *Opt Engng* 1979, 18(3): 350~ 351.
- [6] SZU H H, KOPRIVA J, PERSIN A. Independent component analysis approach to resolve the multisource limitation of the rotating rising-sun reticle based optical trackers [J]. *Opt Commun*, 2000, 176, 77~ 89.
- [7] YANG Y H, YUE M. Infrared system [M]. Beijing National Defence Industry Press 1985, 45~ 60(in Chinese).
- [8] WU Ch L, CHEN X, QIU X H. Research of the photoelectric jammer's jamming principle [J]. *Journal of Xidian University*, 1995, 22(3): 290~ 294(in Chinese).
- [9] LI Sh X, WEI J Y. Analysis of infrared jammer's jamming principle [J]. *Infrared and Laser Technology*, 1994, 23(1): 10~ 13(in Chinese).
- [10] YIN D R. Analysis of reticle for IR guidance missile hongying 5 [J]. *Infrared and Laser Technology*, 1995, 24(4): 47~ 51(in Chinese).