

doi:10.3788/gzxb20144310.1011006

烟幕对电视导引头干扰效应的试验研究

高卫, 孙奕帆, 李娟, 党东妮, 王泗宏

(北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘 要:采用导引头挂飞干扰试验法, 研究烟幕对电视导引头的干扰效应和干扰机理. 将电视导引头吊挂在无人驾驶飞艇上, 飞艇飞行过程中, 利用烟幕干扰设备对电视导引头实施干扰, 在动态飞行条件下获得烟幕对电视导引头干扰效应的实测数据. 试验数据分析表明, 烟幕干扰对电视导引头跟踪状态、跟踪误差、测量视线角、测量视线角速度等多方面性能产生影响, 同时从导引头的视轴稳定原理等方面出发对干扰效应规律给出了合理解释.

关键词:光电对抗; 烟幕; 电视导引头; 干扰效应

中图分类号: TN97; TJ76

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)10-1011006-6

Field Test of Smokescreen Jamming Effect on TV Seekers

GAO Wei, SUN Yi-fan, LI Juan, DANG Dong-ni, WANG Si-hong

(Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: The effect and mechanism of smokescreen jamming on TV homing seekers were investigated by seeker captive flight jamming test, in which a TV homing seeker was hung up on an unmanned airship. The data of smokescreen jamming effect on the TV seeker in flight is obtained with the TV seeker disturbing by smokescreen. The test results shows that smokescreen jamming has much effect on the tracking status of TV seekers, tracking error, measurement of line-of-sight angle and its angular rate. A rational explanation for the laws of smokescreen jamming effect is presented based on the principle of stabilization of seeker optical axis.

Key words: Electro-optical electronic warfare; Smokescreen; TV seeker; Jamming effect

OCIS Codes: 110.0113; 110.2970; 110.7050; 100.3005

0 引言

烟幕是一种应用广泛的无源干扰手段, 多用于地面战车、舰船等作战平台的自卫和部队支援等. 烟幕干扰通过在空气中施放大量气溶胶微粒, 以掩盖、遮蔽被保护目标, 干扰敌方侦测设备和精确制导武器对目标的探测、识别和攻击^[1-4]. 电视制导导弹是烟幕的主要干扰对象之一. 烟幕对电视制导导弹的干扰效果决定于烟幕对其末制导电视导引头的干扰效应. 研究烟幕对电视导引头的干扰效应, 在烟幕干扰机理、烟幕干扰技术的研究以及电视制导导弹的抗干扰设计等领域具有重要意义. 文献[5]理论分析了烟幕弹对红外成像制导导弹的干扰效果. 文献[6]通过静态试验研究了烟幕对

毫米波雷达的干扰效果. 文献[7-11]通过仿真试验研究了烟幕对红外寻的导弹、电视制导导弹、毫米波末制导雷达的干扰效果. 由此可见, 国内外已开展了烟幕对精确制导武器或其末制导导引头干扰效果的研究并进行了理论或仿真分析, 但未见通过外场动态试验特别是飞行试验来研究烟幕对精确制导武器或其导引头的干扰效果. 本文通过外场飞行试验研究了烟幕对电视导引头的干扰效应, 发现烟幕干扰对电视导引头性能多方面的影响规律, 并从导引头视轴稳定原理等出发对这些规律给出了合理解释.

1 试验方案

利用导引头挂飞干扰试验法^[12-16], 即将导引头吊

基金项目: 试验技术研究重点项目(No. BZ00DZDK0810)资助

第一作者: 高卫(1970-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为光电对抗试验技术、光学工程等. Email: wchengao@sina.com

收稿日期: 2014-01-09; **录用日期:** 2014-03-25

<http://www.photon.ac.cn>

挂在飞行平台上,在平台飞行过程中,导引头对地面指定目标进行跟踪,模拟导弹上导引头的动态跟踪过程,在此过程中在地面施放烟幕对导引头实施干扰.通过挂飞试验,可以在动态条件下检验烟幕对导引头的干扰效应,得到更接近于实际对抗的干扰效应结果.

试验时飞行平台采用无人驾驶飞艇,电视导引头安装在飞艇气囊下方,视场面向飞艇正前下方,如图1.导引头通过数据接口与装在飞艇吊舱内的地空链路终端连接,实现与地面显示操控台的信息交换.烟幕干扰设备采用一种小型烟幕弹发射车,它利用发射定向器将烟幕弹以一定角度发射至一定高度后爆炸燃烧形成烟幕.



图1 电视导引头在飞艇上的安装

Fig.1 TV seeker installation on the airship

试验航线及设备布局如图2.航线是一条直线.电视导引头跟踪的地面合作目标为 $3\text{ m}\times 2\text{ m}$ 的白色泡沫塑料,布设在烟幕弹发射车后方一制高点上,位置如图中十号所示.试验时,烟幕弹发射车迎着飞艇进入方向以较高角度发射烟幕弹,在发射车前上方爆炸燃烧形成烟幕,相对飞艇进入方向对目标形成遮蔽.飞艇地面站、导引头显控台装在试验指控车上,布设在距

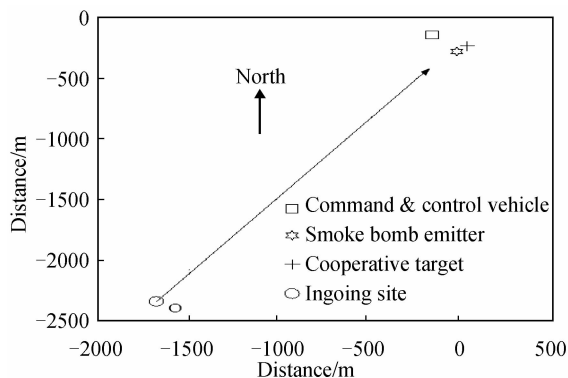


图2 试验航线及设备布局

Fig.2 Airship flight course and overall arrangement of test equipment

合作目标 300 m 处.飞艇飞行高度在 500 m 以下,速度设置在 $10\sim 12\text{ m/s}$.

试验过程如图3.加挂电视导引头的飞艇升空并飞到指定进入点 O 就位,然后在飞艇地面站的控制下沿规划试验航线向指定合作目标方向作水平飞行.期间,通过导引头地面显控台控制导引头搜索、捕获指定

目标,待稳定跟踪目标后,控制烟幕弹发射车发射烟幕弹,在规定方位上形成烟幕以遮蔽目标,对导引头的跟踪造成干扰.

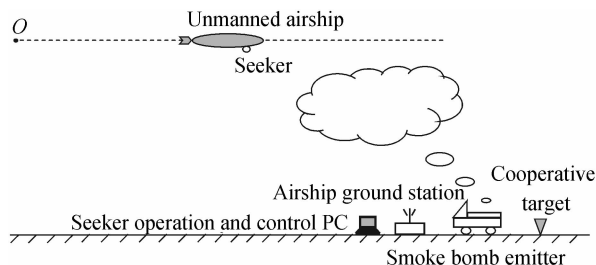


图3 试验过程

Fig.3 Test process

实时采集、记录各飞行航次中飞艇、导引头的相关数据,包括时间 t 、飞艇航迹、速度、姿态、导引头测量输出的离轴角、目标视线角速度、电视视频等.通过对比分析实施干扰前后导引头跟踪状态及测量输出导引数据的差别和变化,可获得烟幕干扰对电视导引头导引性能的影响规律.

2 试验结果

为准确获取烟幕干扰对电视导引头导引性能的影响规律,需要有大量实测数据支撑,为此完成了10余个有效航次的试验,以下分析其中4个典型航次的试验结果,以期从多方面揭示烟幕干扰对电视导引头导引性能的影响规律.

2.1 试验航次1

在试验航次1中,飞艇进入点距离目标约 2.6 km ,航线高度设为 200 m ,发射烟幕弹3发,发射方式为3发齐射,发射俯仰角约 60° .图4(a)为该航次导引头测量输出的跟踪状态字和跟踪误差的变化曲线,其中, A 为导引头跟踪锁定指定目标的时刻, B 为干扰起效时刻(导引头跟踪状态字发生跳变), C 为飞艇返回时刻.跟踪状态字是导引头中表征其目标跟踪状态的输出数据,其定义为:0表示导引头处于稳定跟踪状态,2表示跟踪不稳定,3表示丢失目标,处于搜索状态.由图4(a)可知,在实施烟幕干扰前,导引头稳定跟踪目标,跟踪误差在零值附近小幅波动;实施干扰并起效后,导引头丢失目标转入搜索状态,同时不再输出跟踪误差.之后导引头偶尔由搜索转入不稳定跟踪,又由跟踪转入搜索,如此多次反复.这表明,导引头在受干扰丢失目标后,在复杂地物背景中一直未能搜索到对比度较高的明确目标加以锁定跟踪,所以总是处于搜索和不稳定跟踪彼此交替的状态.这种状态也从导引头记录的视频得到证实.

图4(b)为直接根据该航次导引头测量输出数据得到的俯仰方向离轴角 $E(t)$ (导引头跟踪光轴与其几何纵轴即弹轴之间的夹角)的变化曲线(细线)以及根

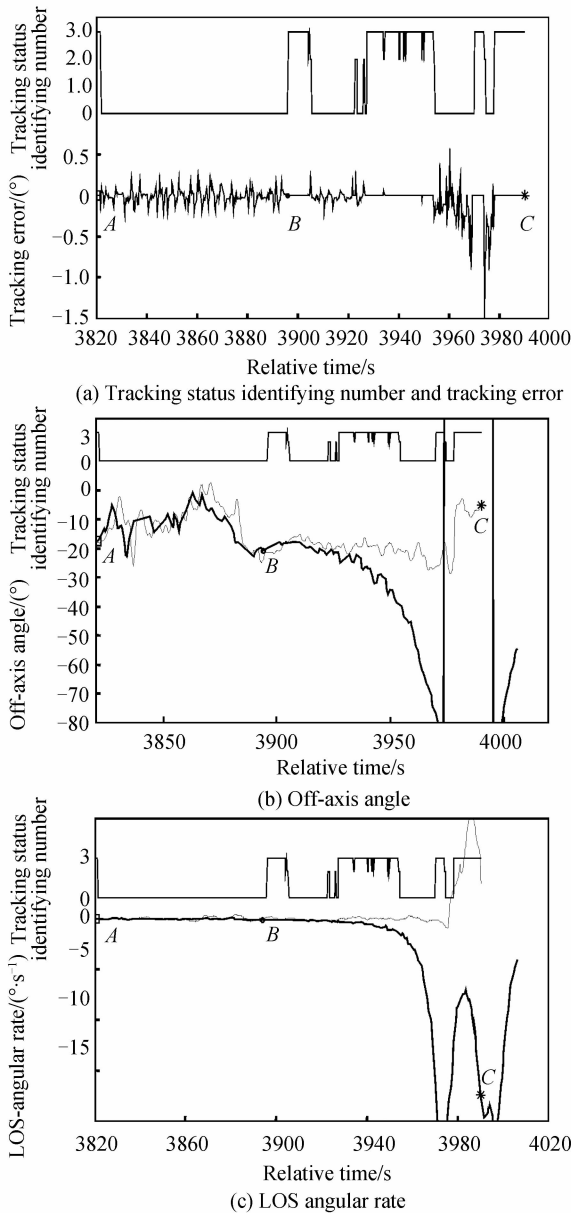


图4 试验航次1中导引头测量输出数据变化
Fig. 4 Data measured by the seeker in flight 1

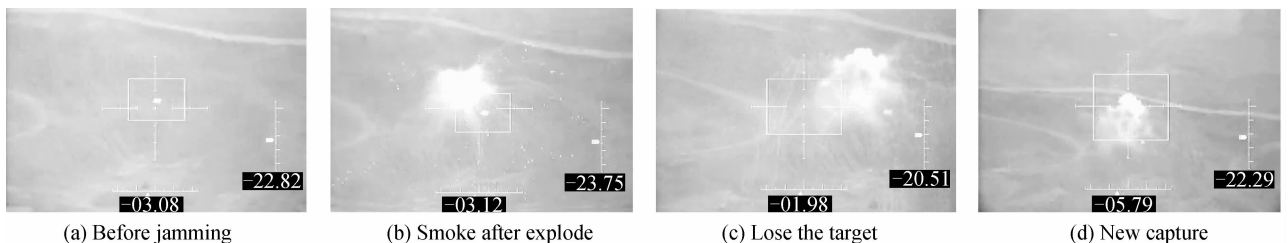


图5 试验航次2中导引头记录的视频截图
Fig. 5 TV video image of the seeker in flight 2

图6(a)为该航次导引头输出跟踪状态字和跟踪误差的变化曲线.由图可见,在实施干扰前,导引头稳定跟踪目标,跟踪误差在零值附近小幅波动;受到干扰后,导引头丢失目标,跟踪误差输出为零;经很短时间后,导引头又恢复输出跟踪误差,这是因为导引头又将烟幕本身

据飞艇姿态、航迹测量数据计算得到的飞艇艇体纵轴与目标视线(导引头或飞艇与目标的连线^[17], Line Of Sight, LOS)之间的夹角 $E_a(t)$ 的变化曲线(粗线).由图可见,在实施干扰前,两者基本一致;当实施烟幕干扰并起效后,随着飞艇距离目标越来越近,艇轴-视线夹角 $E_a(t)$ 越来越大,而导引头离轴角 $E(t)$ 的变化则不然,在受干扰丢失目标后,随着飞艇距离目标越来越近, $E(t)$ 不再明显增大,从而与 $E_a(t)$ 的变化曲线逐渐分离.由于离轴角即为导引头测量输出的视线角,所以试验结果表明烟幕干扰对视线角的正确测量产生了显著影响.

图4(c)为该航次导引头测量输出的视线角速度俯仰分量的变化曲线(细线)以及根据飞艇航迹、速度测量数据计算得到的实际视线角速度的变化曲线(粗线),其中导引头测量输出的实际上是其跟踪光轴转动的角速度,只是由于通常跟踪误差很小,所以直接利用速率陀螺测得的光轴角速度代替视线角速度.由图可见,在实施干扰前,两者基本一致;当实施烟幕干扰并起效后,随着飞艇距离目标越来越近,实际视线角速度越来越大,而导引头对视线角速度的测量值保持在零值附近,从而与实际视线角速度的变化曲线逐渐分离,即干扰对视线角速度的正确测量产生了显著影响.

2.2 试验航次2

在试验航次2中,除了发射烟幕弹为1发外,其他试验条件与航次1相同.为了对干扰过程和干扰效果有个直观的了解,首先观察航次2中导引头记录的视频,如图5.图5(a)为实施干扰前,导引头稳定跟踪指定目标;图5(b)为烟幕弹发射后爆炸形成烟幕;图5(c)为导引头受烟幕干扰并起效后丢失目标,进入搜索状态;图5(d)为几秒钟后导引头将烟幕本身作为新目标进行捕获并锁定跟踪.需要说明的是,图5中由(c)到(d),导引头经过一次变焦,由长焦变为短焦,致使(d)中烟幕尺寸看起来相对(c)中尺寸变小.

作为新目标捕获并锁定跟踪.值得注意的是,重新捕获并跟踪目标后,导引头的跟踪误差显著增大.对比导引头视频分析,其主要原因是:相比原来跟踪的目标,烟幕尺寸要大很多且随着扩散仍在不断变大,对于形心跟踪,这会导致目标形心点位置的计算误差增大.

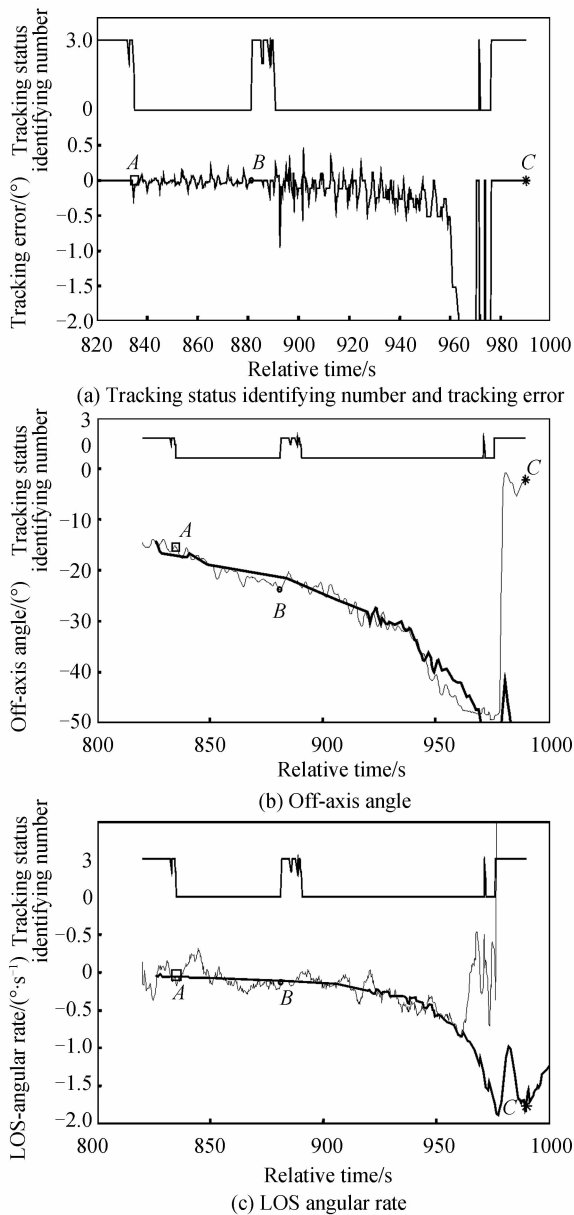


图6 试验航次2中导引头测量输出数据的变化
Fig. 6 Data measured by the seeker in flight 2

图6(b)、(c)分别给出了该航次导引头离轴角 $E(t)$ 和视线角速度测量数据的变化曲线(细线),同时给出了根据飞艇测量数据计算得到的艇轴-视线夹角 $E_a(t)$ 和实际视线角速度的变化曲线(粗线).由图可见,在实施干扰并起效前后,导引头测量输出数据均与根据飞艇测量数据得到的结果基本一致,从最终结果看,干扰对视线角和视线角速度的测量没有明显影响.

导引头在受烟幕干扰后丢失目标,但在很短时间后又捕获并跟踪上烟幕本身,相对于飞艇和导引头,烟幕和原跟踪目标在方位上很近或几乎重合(见图5),导引头测得的离轴角和视线角速度与无干扰时没有什么差别.

与航次1相比,航次2中干扰效果有着显著不同的表现.两个试验条件基本相同的航次试验结果不同,

表明烟幕干扰过程的复杂性及其干扰效果的不确定性.

2.3 试验航次3

在试验航次3中,试验条件与航次1完全相同.试验中导引头跟踪状态字、跟踪误差、离轴角、视线角速度的测量结果如图7.

图7表明,航次3与航次1结果相似,稍有不同的是,在实施干扰导致状态字跳变后,导引头视线角速度的测量值由非零跳变为零的现象十分明显.比较图7与图4可以看出,航次3相对航次1干扰起效较晚,在状态字跳变前一刻,视线角速度值较大,所以跳变时表现也就更为显著.

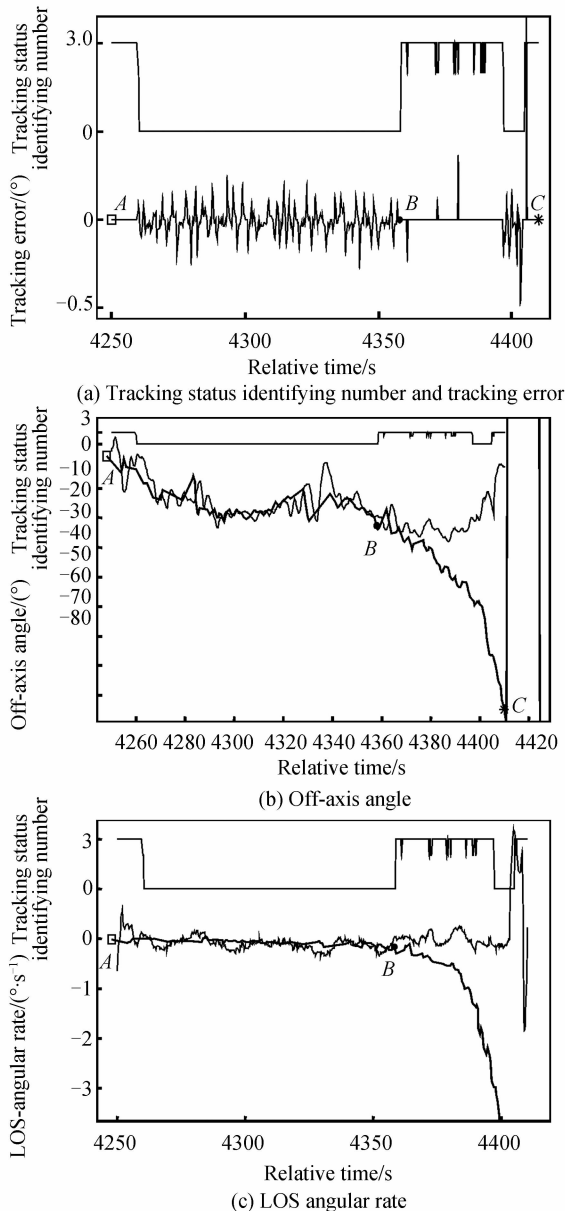


图7 试验航次3中导引头测量输出数据的变化
Fig. 7 Data measured by the seeker in flight 3

2.4 试验航次4

在试验航次4中,试验条件与航次1、航次3完全

相同. 试验中导引头跟踪状态字、跟踪误差、离轴角、视线角速度的测量结果如图 8.

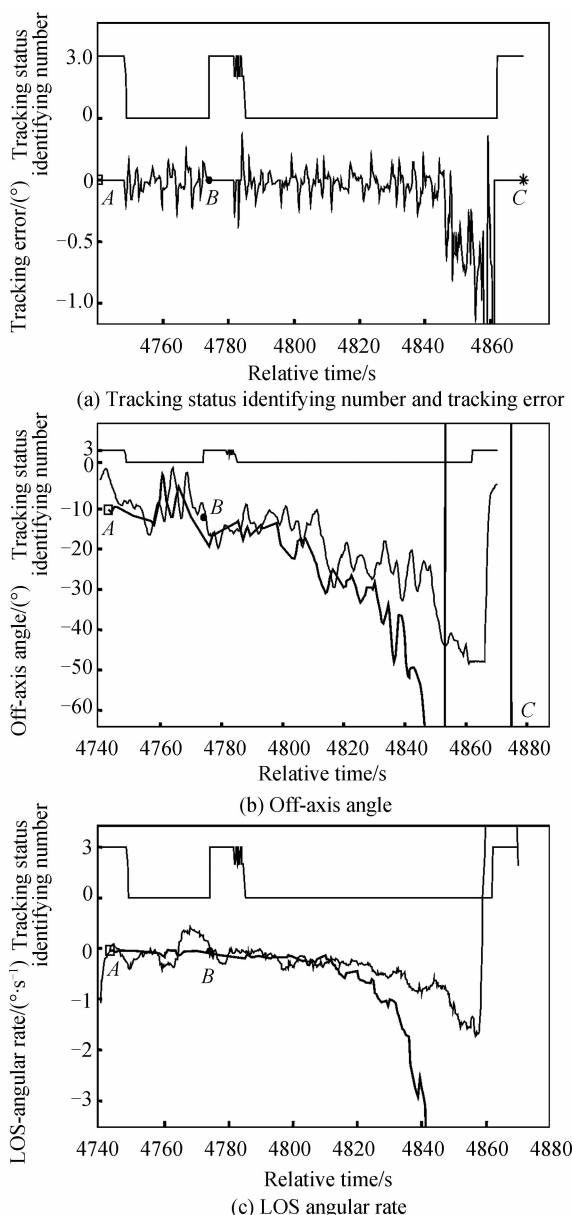


图 8 试验航次 4 中导引头测量输出数据的变化

Fig. 8 Data measured by the seeker in flight 4

图 8 表明, 虽然试验航次 4 在实施干扰导致状态字跳变后导引头测量输出离轴角、视线角速度的变化曲线与实际视线角、视线角速度的变化曲线产生分离, 但分离趋势远不如航次 1、航次 3 显著, 其原因是, 导引头受干扰丢失目标很短时间后就稳定跟踪上其他目标, 经检查导引头记录的视频发现, 导引头在丢失原目标后恰巧很快就捕获、锁定布设在距其不远的另一个合作目标, 因此导引头光轴解除锁定, 继续跟随新的目标视线转动并恢复视线角速度输出. 由图 8(b)、(c) 也可看出, 虽然导引头稳定跟踪目标, 但其测量输出的视线角、视线角速度数据曲线与实际值曲线并不重合, 其原因在于新目标在原目标以北大约 300 m 处, 新的视

线角、视线角速度明显小于原目标视线角、视线角速度.

3 干扰效应规律及其分析

根据上述导引头挂飞干扰试验结果, 烟幕干扰对导引头性能的影响是多方面的, 会影响到导引头所有的测量输出量, 包括跟踪状态字、跟踪误差、离轴角(也即测量视线角)、视线角速度等, 干扰效应的主要规律归纳总结如下:

1) 对跟踪状态字的影响

干扰对导引头性能最直接的影响为对输出跟踪状态字的影响. 当干扰达到一定程度后, 导引头由稳定跟踪目标变为跟踪失稳或丢失目标进入搜索状态, 输出跟踪状态字发生变化, 由 0 变为 2 或 3. 当丢失目标后的导引头重新捕获、锁定跟踪目标(通常为预定目标以外的新目标)后, 状态字由 2 或 3 变为 0.

2) 对跟踪误差的影响

当导引头正常稳定跟踪目标时, 其测量输出的跟踪误差在零值附近小幅波动. 干扰对跟踪误差的影响主要有两种情况. 一是当干扰达到一定程度后, 导致跟踪状态字由 0 变为 3, 则导引头停止输出跟踪误差或跟踪误差恒为零. 二是当干扰导致导引头跟踪到预定目标以外的其他目标, 跟踪状态字由 2 或 3 变为 0, 导引头重新输出跟踪误差, 但跟踪误差幅度一般明显增大且跟踪不稳定.

3) 对视线角测量的影响

当导引头正常稳定跟踪目标时, 其光轴紧密跟随目标视线转动, 导引头测量输出的离轴角即目标视线角. 当干扰达到一定程度后, 导致导引头丢失目标, 光轴不再跟随目标视线转动, 而是保持原方向不变, 离轴角即导引头测量视线角锁定, 保持为状态字变化前一刻的大小不再变化, 直至导引头锁定跟踪新目标后, 光轴指向解除锁定并跟随新的目标视线转动.

4) 对视线角速度测量的影响

当导引头正常稳定跟踪目标时, 其光轴紧密跟随目标视线转动, 通常将导引头测量输出的光轴角速度近似作为目标视线角速度. 当干扰达到一定程度后, 导致导引头丢失目标, 光轴指向锁定不变, 光轴角速度即导引头测量视线角速度立刻跳变为零, 直至导引头锁定跟踪新目标后, 光轴指向解除锁定并跟随新的目标视线转动, 输出相应光轴(视线)角速度.

上述规律可以从导引头的视轴稳定原理以及抗干扰策略得到合理解释. 在试验中采用的电视导引头为典型的速率陀螺稳定平台式导引头, 它通过速率陀螺实时测量光轴扰动角速度, 进而形成稳定控制信号来稳定光轴(视轴)指向^[18]. 当导引头因干扰导致丢失目标、停止输出跟踪误差时, 其光轴失去跟踪伺服控制,

导引头将启用保持光轴指向记忆的抗干扰策略以避免系统失控,光轴在速率陀螺视轴稳定系统作用下,保持状态字跳变前一刻的惯性空间指向不变,导致离轴角不再变化,光轴角速度则立刻跳变为零.

4 结论

通过导引头挂飞干扰试验,研究了烟幕对电视导引头的干扰效应和干扰机理,通过对大量试验结果的分析,发现了烟幕干扰对电视导引头性能多方面的影响规律,并从导引头的视轴稳定原理等方面对这些规律给出了合理解释.本文的研究成果可以用于评估烟幕对电视制导导弹的干扰效果,同时对烟幕干扰机理、烟幕干扰技术的研究以及电视制导导弹的抗干扰设计等领域具有重要启示和参考价值.

致谢:特别感谢黄惠明研究员对研究工作的指导以及原银忠、宁天夫、王松等人在试验中的大力协助.

参考文献

- [1] 高卫,黄惠明,李军.光电干扰效果评估方法[M].北京:国防工业出版社,2006.
- [2] ZHANG T, DAI X, REN L, *et al.* Dispersion and infrared jamming performance of hollow nanoshell smoke[C]. SPIE, 2013, **8907**:89073L.
- [3] CHANG X, YANG X. The interference of smoke screen to the laser[C]. 2012 Symposium on Photonics and Optoelectronics, 2012, 1-4.
- [4] WANG Xuan-yu. Extinction performance of oil fog smoke combined with superfine graphite to 10.6 μm laser emission[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(9): 1706-1709.
王玄玉.雾油与石墨组合烟幕对10.6 μm 激光的衰减特性[J].红外与激光工程,2011,**40**(9):1706-1709.
- [5] WANG L, LIU Z, WANG F. Jamming effectiveness analysis of IR smoke projectile based on sight optical observation[C]. SPIE, 2013, **8907**:890743.
- [6] PERRY B, BADEN J M, HALE D J. Effectiveness of MMW aerosols in defeating a battlefield surveillance radar: field demonstration preliminary results[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2000, **15**(3): 11-20.
- [7] TONG Zhong-xiang, LU Yan-long, LI Chuan-liang, *et al.* Optimal method for interfering with infrared homing missile by airborne infrared smoke[C]. Asia Simulation Conference- 7th International Conference on System Simulation and Scientific Computing, 2008, 588-592.
- [8] YANG Xi-wei, LI Chang-wei. Research on the jamming effect evaluation of smoke screen in opto-electric imaging guidance[J]. *Laser & Infrared*, 2012, **42**(2): 170-174.
杨希伟,李长伟.光电成像末制导烟幕干扰效果评估研究[J].激光与红外,2012,**42**(2):170-174.
- [9] CHEN Lei, JIANG Yun-dong, ZHANG Feng, *et al.* The research on operating distance of TV seeker under smoke disturbance[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2013, **33**(1): 17-18.
陈蕾,姜允东,张峰,等.烟雾干扰下电视导引头作用距离研究[J].弹箭与制导学报,2013,**33**(1):17-18.
- [10] HAN Shu-jian, SONG De-an, JIA Ren-yao, *et al.* Study on simulation of smoke jamming on millimeter-wave radar[J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2012, **27**(2): 64-68.
韩书键,宋德安,贾仁耀,等.烟幕对毫米波末制导雷达的遮蔽干扰分析[J].电子信息对抗技术,2012,**27**(2):64-68.
- [11] YU Fu, SONG Ning-tao, ZHAO Wei, *et al.* Research into the layout method for shipboard smoke screen confronting infrared imaging guided missiles[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2010, **33**(5): 28-31.
于夫,宋宁涛,赵威,等.舰载烟幕对抗红外成像制导导弹的布设方法研究[J].舰船电子对抗,2010,**33**(5):28-31.
- [12] 彭望泽.防空导弹武器系统电子对抗技术[M].北京:宇航出版社,1995.
- [13] LI Ke-da. Study on anti-jamming test procedures for missile weapon systems abroad[J]. *Aero Weaponry*, 2000(3): 10-15.
李可达.国外导弹武器系统抗干扰试验检测规程研究[J].航空兵器,2000(3):10-15.
- [14] BANKS H, MCQUILLAN R. Electronic warfare test and evaluation[R]. NATO RTO-AG-300-17, 2000.
- [15] CLEMENTS J, ROBINSON R, BUNT L, *et al.* Missile airframe simulation testbed; MANPADS(MAST-M) for test and evaluation of aircraft survivability equipment[C]. SPIE, 2011, **8015**:80150A.
- [16] PACE P, NISHIMURA B, MORRIS W, *et al.* Effectiveness calculations in captive-carry HIL missile simulator experiments [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1998, **34**(1): 124-136.
- [17] 孟秀云.导弹制导与控制系统原理[M].北京:北京理工大学出版社,2003.
- [18] 郑志伟,白晓东,胡功衍,等.空空导弹红外导引系统设计[M].北京:国防工业出版社,2007.