

毫米波遥控弹道修正弹拦截机动反舰导弹命中概率的仿真研究

胡荣林^{1,2}, 李兴国²

(1. 淮阴工学院计算机工程系, 江苏淮阴 223001,

2. 南京理工大学毫米波光波近感技术研究所, 南京 210094)

[摘要] 提出了修正拦截流的概念,建立了舰载毫米波遥控指令弹道修正弹(MMW-RCTCM)拦截机动反舰导弹空袭流的防空射击模型。研究了单发MMW-RCTCM对单一机动反舰导弹的命中概率、修正拦截流对单一机动反舰导弹的命中概率以及修正拦截流对机动反舰导弹空袭流的命中概率。根据当前的技术发展状况,分析了攻防双方的技术参数,并据此对各种典型攻防模式下的命中概率进行了仿真计算。计算结果表明,与无控弹丸相比,MMW-RCTCM对机动反舰导弹的拦截效率成倍提高,且能够有效防御超音速反舰导弹的高强度攻击。

[关键词] 遥控指令; 弹道修正弹; 毫米波; 修正拦截流; 反舰导弹; 命中概率

[中图分类号] TJ413.6 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2007)10-0065-06

1 引言

现代先进反舰导弹通常依靠末端弹道机动如“蛇行机动”、“跃升-俯冲攻击”^[1,2]等动作来躲避舰载近程反导火炮的拦截。根据文献[1,2]的研究,由于反舰导弹在跃起俯冲过程中,其机动加速度会不断变化,舰炮射击后,其火控系统估计出的反舰导弹加速度不能用来修正炮弹的飞行方向,此后反舰导弹的机动加速度变化必导致新的射击误差。所以采用末端机动弹道攻击的反舰导弹可有效突破普通舰炮的拦截。

要有效拦截机动反舰导弹的攻击,急需一种能够根据来袭导弹的机动修正飞行弹道的低成本舰炮弹丸。为此,笔者提出了一种新的近程反导弹药:毫米波遥控指令弹道修正弹(MMW-RCTCM, millimeter wave remote controlling munitions)。

采用遥控指令式的弹道修正弹具有单发命中概率高,节省弹药和作战时间的优点,因而具有重要的研究价值^[3,4]。意大利Oto Melara公司、英国

Aerospace公司和Marconi Radar System合作为76 mm舰炮研制了遥控指令式的“舰载反导弹道修正弹(76 mm CCS)”。该弹在重心周围安装有10个小型脉冲火箭发动机,由火控雷达遥控产生侧向推力,修正弹道^[5]。

毫米波信号波束窄,大气衰减影响大,难以侦察,具有良好的抗干扰能力。同时还具有良好的穿透等离子体的能力和穿透发射烟雾的能力,特别适合于战场环境下的信号发射与接收^[6]。

2 MMW-RCTCM系统

MMW-RCTCM系统的基本原理是:利用火控雷达跟踪测量炮弹的外弹道参数实时数值,根据目标和弹丸的运动关系修正控制指令和起爆指令。用毫米波通信装置把指令传给弹上修正执行机构(阻力器、脉冲火箭或者气动舵)和引信,执行机构能够以连续或脉冲方式提供侧向修正力^[7]修正弹道,引信根据起爆指令在适当的时候起爆战斗部,在导弹的来袭路径前形成锥形钨珠弹幕,有效拦截来袭机

[收稿日期] 2006-05-11;修回日期 2006-07-19

[作者简介] 胡荣林(1978-)男,江苏高邮市人,博士,淮阴工学院讲师,研究方向为毫米波工程

动反舰导弹。其典型拦截弹道如图 1 所示。

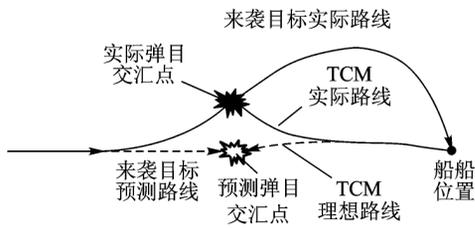


图 1 MMW-RCTCM 拦截在垂直平面内的机动目标弹道示意图

Fig. 1 Ballistic schematic diagram of MMW-RCTCM intercepting mobile target in vertical plane

MMW-RCTCM 系统由探测雷达、火控系统、毫米波遥控指令发射设备、弹载毫米波接收机和弹载修正指令执行机构组成。

毫米波遥控指令发射系统的组成如图 2 所示。目标来袭后,火控系统根据雷达探测到的目标来袭方位、速度等参数确定拦截弹丸的发射诸元,控制火炮发射拦截弹丸。

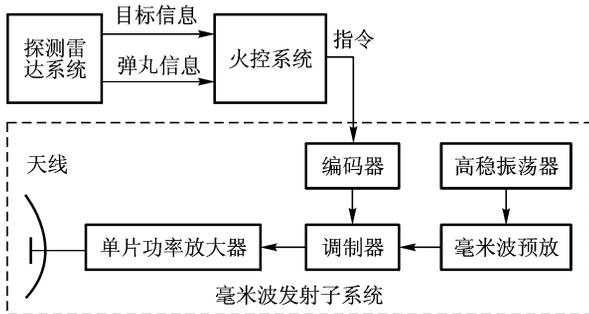


图 2 毫米波遥控指令发射系统

Fig. 2 MMW transmitting system of remote control

弹丸发射后,由于存在发射初速变动、射角的跳动、弹道随机风、目标机动等因素的影响,将会造成弹目弹道与火控系统预估的理想弹道不一致。此时,对于普通舰载近程反导火炮,单发弹丸的拦截概率极低,通常只能靠提高发射速率形成密集弹幕的办法来提高总体拦截概率。而 MMW-RCTCM 系统则采用探测雷达获取来袭目标以及所发射的弹丸在飞行过程中的弹道参数,由火控系统根据目标机动信息和弹丸的弹道信息计算弹目实际弹道与理想弹道的偏差,并根据弹目相对运动关系形成弹道修正指令。该指令被送到编码器后,经调制由射频前端发射出去。

毫米波射频前端包括调制器、高稳本振源、放大器和发射天线等,如图 3 所示。经编码的信号送入 BPSK 调制器后,再经过功率放大送入发射天线。发射天线

由火控系统操纵,实时对准在弹道上运动的弹丸。

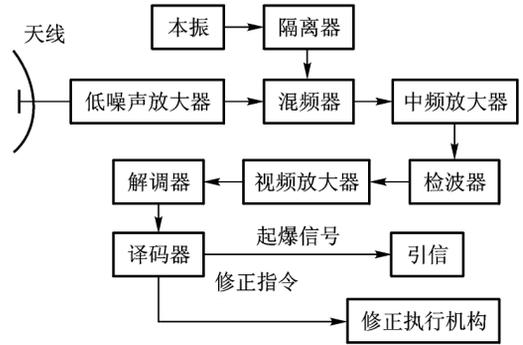


图 3 弹载毫米波指令接收机

Fig. 3 Projectile-borne MMW command receiver

弹载信号接收机由射频前端、中放、检波器视放、解调器、译码器等构成。来自发射机的带有编码修正指令的已调制载波信号被弹上的线极化天线截获后,经过放大与来自弹上的本振信号混频,输出中频信号。经前中、主中两级放大后的中频信号,通过检波,并放大到解调器所要求的电平值后再由解调器解调,得到基带信号。译码器将经过解调和放大的信号解译码,得到修正指令信号和起爆时间信号,控制修正机构完成一次修正动作或控制引信在适当的时刻起爆战斗部。

弹载修正指令执行机构是能够进行俯仰和方位修正的二维修正机构,通常可选用脉冲火箭或气动舵机。脉冲火箭修正机构由在弹体质心周围布置的一组微型脉冲火箭组成,通过喷口向外喷射燃气流,凭借喷流的反作用力为弹丸提供控制力,以改变飞行姿态,修正弹道。气动舵机通过电动机驱动 4 片舵翼,利用对电动机的控制,使 4 个舵面按照一定的规律实时动作,提供修正弹道所需要的气动力,具有体积小、响应快、力矩大、精度高的优点。

3 攻防模型

3.1 反舰导弹空袭流仿真模型

反舰导弹对舰船的进攻可看成是按 Poisson 流到达^[8]。来袭导弹到达时间间隔 Δt 服从与 Poisson 分布同参数的负指数分布,分布密度为

$$g(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (1)$$

式中 λ 是目标编队之间的平均间隔时间的倒数,称为目标空袭流强度。考虑到目标进攻的随机性,目标流的时间间隔可按

$$\Delta t = -\lambda \ln r_i \quad (2)$$

确定,式中 r_i 是服从 $(0, 1)$ 分布的随机数。

3.2 MMW - RCTCM 防空射击模型

弹道修正弹的侧向弹道修正能力可以等效为弹丸破片威力范围的扩展。设对于特定的来袭目标,弹丸的爆炸威力半径为 R_0 ,弹道修正能力为 C ,弹丸修正飞行时间为 T_c ,则弹丸的等效扩展威力范围为

$$R = R_0 + CT_c \quad (3)$$

弹丸修正飞行时间为

$$T_c = T - t_a - t_p \quad (4)$$

式中 T 为修正执行机构对修正指令的响应时间, t_p 为火控系统弹道预测响应时间。

炮弹发射后,由于受到弹丸侧向机动能力的限制,单发遥控指令弹道修正弹的等效威力范围有限。对由多枚来袭导弹组成的空袭目标流,舰载火炮可以一定的射击速率快速发射多发弹丸,形成密集可修正拦截流 A ,则有

$$A = \bigcup_{j=1}^N R_j \quad (5)$$

式中 R_j 为第 j 发弹丸的等效威力范围, N 为发射弹丸总数。若来袭导弹的机动能力未超出范围 A ,则 N 发弹道修正弹可有效命中来袭导弹。否则,来袭导弹突防成功。

4 MMW - RCRTCM 对机动反舰导弹目标流的命中概率模型

4.1 单发 MMW - RCRTCM 对单一机动反舰导弹的命中概率

在 MMW - RCTCM 拦截机动反舰导弹的过程中,拦截弹的发射参数是根据火控系统对弹目双方的弹道进行计算后得出的。不妨定义火控系统在弹丸发射前所预计的弹目双方的飞行弹道为预测弹道。若实际弹道与预测弹道一致,即弹道偏差为零,则弹道修正弹能够命中目标。但由于来袭导弹的机动、弹丸射角的跳动、气象扰动、弹丸对自身弹道的修正等因素的影响,实际弹道与预测弹道之间存在一定偏差。定义弹目双方实际弹道与预测弹道之间的偏差为弹道偏差。

来袭导弹的弹道偏差是由于火控系统对导弹机动加速度的预测存在误差,该误差随着预测期限的增加而增加,可用下列线性关系来近似表示,即

$$\Delta a = a_\varepsilon(1 + \beta T) \quad (6)$$

式中 Δa 为导弹机动加速度预测误差, a_ε 是火控系统对来袭导弹机动加速度的实时预测误差, T 为预测期限,即弹丸发射后至弹目交汇时导弹的飞行时间, β 为导弹加速度预测误差增长系数。 a_ε 是服从

正态分布的随机数,其概率密度函数为

$$f(a_\varepsilon) = (2\pi\sigma^2)^{-1/2} \exp[-(a_\varepsilon - \mu)^2/2\sigma^2] \quad (7)$$

式中 μ 为 a_ε 的平均值, σ 是 a_ε 的统计方差。

为不失一般性,假设来袭反舰导弹在对舰船末端攻击时只在垂直平面内进行机动,这是符合一般反舰导弹的典型末端攻击策略的。(对导弹在空间的其他机动弹道可进行类似的分析)则导弹在垂直平面内的弹道偏差 Δy 可表示为

$$\Delta y = \Delta\theta S + \int_0^T \int_0^T \Delta a dt dt = \Delta\theta S + a_\varepsilon T^2/2 + a_\varepsilon \beta T^3/6 \quad (8)$$

式中 $\Delta\theta$ 为舰炮的射角散布偏差,服从正态分布,均值为 0,方差为 σ_θ 。则单发 MMW - RCTCM 对来袭导弹的命中概率为

$$P_1 = P(|\Delta y| \leq R) = P(|\Delta\theta S + a_\varepsilon T^2/2 + a_\varepsilon \beta T^3/6| \leq R) \quad (9)$$

4.2 MMW - RCRTCM 拦截流对单一机动反舰导弹的命中概率

对来袭导弹,MMW - RCTCM 以 ΔT 的时间间隔发射 N 发弹丸,第 j 发弹的拦截概率是

$$P_1 = \{P(|\Delta\theta S + a_\varepsilon [T - (j-1)\Delta T]^2/2 + a_\varepsilon \beta [T - (j-1)\Delta T]^3/6| \leq R)\} \quad (10)$$

由 N 发弹道修正弹组成的修正拦截流 A 中的任意一发弹命中与否可看成独立随机事件,则 A 对反舰单一机动反舰导弹的拦截概率为

$$P^{(1)} = 1 - \prod_{j=1}^N (1 - P_j) \quad (11)$$

4.3 MMW - RCRTCM 拦截流对机动反舰导弹目标流的命中概率

因为舰炮在短时间内的可发射弹丸数目有限,要对目标流进行拦截,必须对每一可发射弹丸的射击对象进行统筹规划,以取得最大的拦截概率。设来袭导弹以空袭流强度 λ 依次进入作战区域,舰炮发射速率为 $\eta = 1/\Delta T$,一种较为可行的作战方案是对每一枚来袭导弹,可发射拦截弹丸的数目 M_i 与该导弹和下一枚导弹的间隔时间 Δt_i 成反比,且最多为 N_{\max} 发,即

$$M_i = k\Delta t_i \leq N_{\max} \quad (12)$$

其中 k 为比例系数,取决于火炮发射速率:

$$k = \eta/N_{\max} \quad (13)$$

所以,对每一枚来袭目标,可分配的遥控指令弹道修正弹的数目为

$$M_i = (\eta/N_{\max}) \Delta t_i \quad (14)$$

因为来袭目标的间隔时间 Δt_i 是随机的,根据式(2)可得

$$M_i = (\eta/N_{\max})\lambda \ln r_i \quad (15)$$

则 MMW - RCTCM 拦截流对一组总数为 L 的来袭目标流中的第 i 个目标的拦截概率为

$$P^{(i)} = 1 - \prod_{j=1}^{M_i} (1 - P_j) \quad (16)$$

则对目标流所有导弹的平均拦截概率为

$$P = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \left[1 - \prod_{j=1}^{M_i} (1 - P_j) \right] \quad (17)$$

式中 P_j 和 M_i 分别由式(10)和(15)定义。

5 仿真计算

5.1 仿真参数

由式(17)可以看出,毫米波遥控指令弹道修正弹系统拦截具有机动能力的反舰导弹目标流的命中概率与拦截系统及来袭目标流的众多参数有关。根据这攻防双方的当前技术发展状况,在进行仿真计算时,可合理地假设以下参数的数值:

MMW - RCTCM 拦截流:以某舰炮为例, $\eta = 13$ 发/s, $V_0 = 1\ 000$ m/s, $N_{\max} = 25$, $t_a = 0.4$ s, $t_p = 0.1$ s, $R_0 = 1$ m, $C = 15$ m/s^[9], $\mu = 0$ m/s⁻², $\sigma = 1$ m/s⁻², $\beta = 8$ 。

机动反舰导弹空袭流:以“鱼叉”和“雄风三型”反舰导弹为例,前者为亚音速导弹,巡航速度 $V = 0.9$ Ma;后者为超音速导弹,巡航速度为 $V = 2.5$ Ma。反舰导弹目标流的空袭强度 λ 根据冲突类型的不同在 $0.5 \sim 10$ s⁻¹ 之间。

5.2 仿真结果与分析

根据所建立的模型,采用 Monte Carlo 仿真方法可计算多种情况下的拦截概率。

5.2.1 不同射击距离处单发弹丸对单个目标的命中概率 从图 4 可以看出,相对于无控弹丸,MMW - RCTCM 对机动反舰导弹的命中概率成倍提高,不论是亚音速导弹还是超音速导弹。但对亚音速导弹的命中概率要高于对超音速导弹的命中概率。从总体上看,命中概率随射击距离的增加而逐渐降低,但在近距离处是个特例。此时,由于弹丸飞行时间较短,而火控系统反应时间和弹丸修正动作响应时间相对来说比较长,因而修正效果不明显,其命中概率不高,近似于无控弹丸。

5.2.2 对单个来袭导弹连续射击时的命中概率 图 5a 是 MMW - RCTCM 连续射击过程中每一发弹丸对单一来袭导弹的命中概率,其首发射击距离为 5 000 m。从图 5 a 中可以看出,连续射击过程中的每一发弹丸对来袭导弹的命中概率逐渐略有增加,其对超音

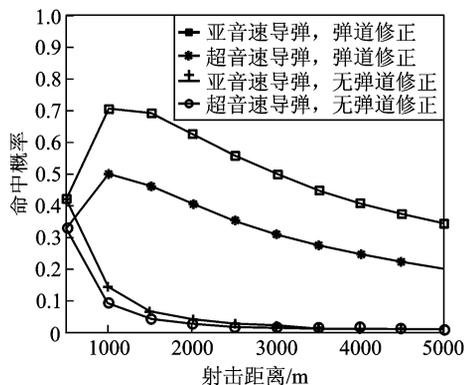


图 4 单发弹丸对单个目标的命中概率

Fig. 4 Single-shot hit probability to single target 超音速导弹的命中概率增加速率较快。对于无控弹丸,连续射击过程中每一发弹丸的命中概率很低。

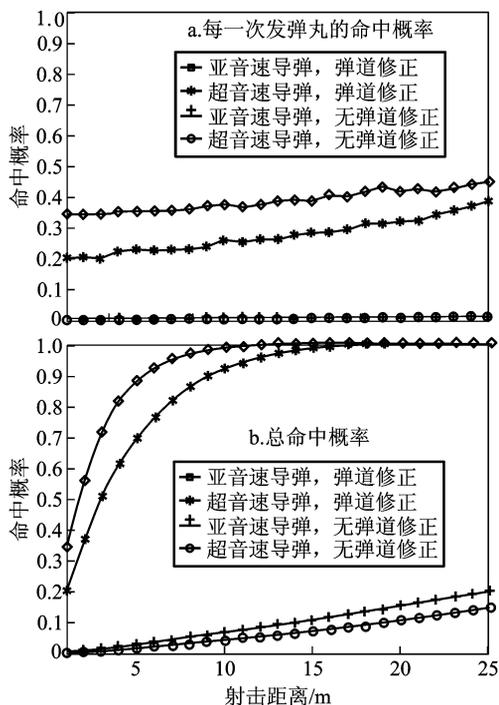


图 5 对单个来袭目标连续射击时的命中概率

Fig. 5 Continuously shot hit probability to single target

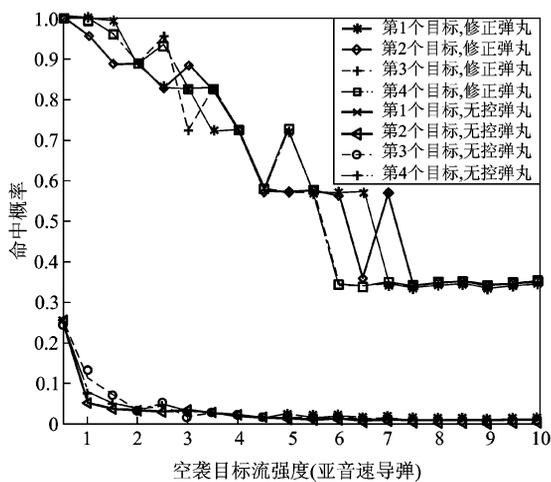
图 5b 是上述连续射击过程中对单一来袭目标的总命中概率,可以看出,对亚音速导弹连续发射 6 发弹丸、超音速导弹发射 10 发弹丸就可以达到 0.9 以上的命中概率,大大超过无控弹丸的射击效果。可利用相对较少的弹丸命中来袭目标,节省大量的弹药。

5.2.3 修正拦截流对空袭目标流的命中概率 图 6a 和图 6b 分别是 MMW - RCTCM 对亚音速及超音速机动目标流在不同空袭强度下一次点射时的命中概率。仿真时设来袭目标总数均为 4。从总体上看,系统对目标的命中概率随空袭强度的增加而逐

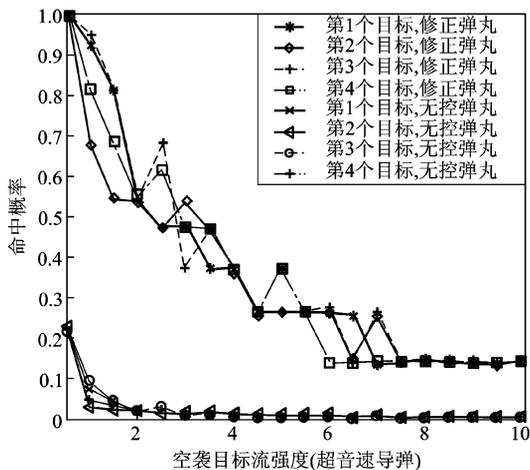
渐降低。但就某一空袭强度来说,前后4个目标的命中概率基本一致,只在局部有一些随机性。这是由于目标流的仿真模型是一个 Poisson 随机模型,来袭目标之间的时间间隔具有随机性,导致系统对某一目标的射击弹丸数略有波动,从而命中概率也有一些波动。

对低强度袭击($\lambda \leq 1$),MMW-RCTCM 拦截亚音速和超音速机动目标流的命中概率都相当高。对中等强度袭击($1 < \lambda \leq 3$),拦截亚音速机动目标流的命中概率仍然保持在较高水平(0.8 以上),而拦截超音速机动目标流的命中概率则下降较多(至0.5 左右)。对高强度袭击($\lambda > 3$),拦截命中概率均较低,特别是当 $\lambda > 6$ 以后,系统在一点射过程中对每一个来袭目标只能发射一发弹丸,致使总命中概率较低。

为了提高对高强度超音速机动目标流的拦截能



a. 亚音速机动目标流

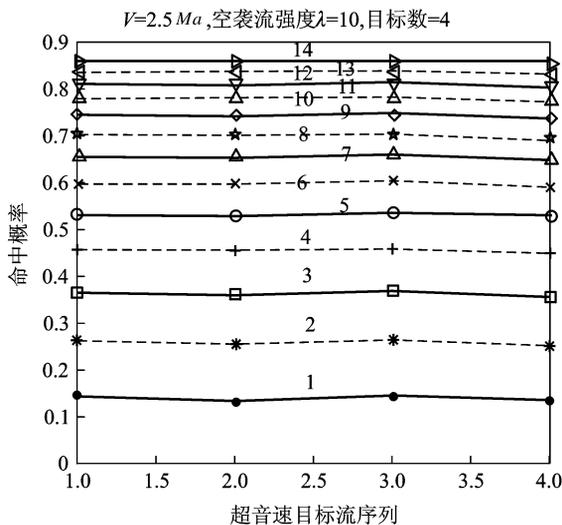


b. 超音速机动目标流

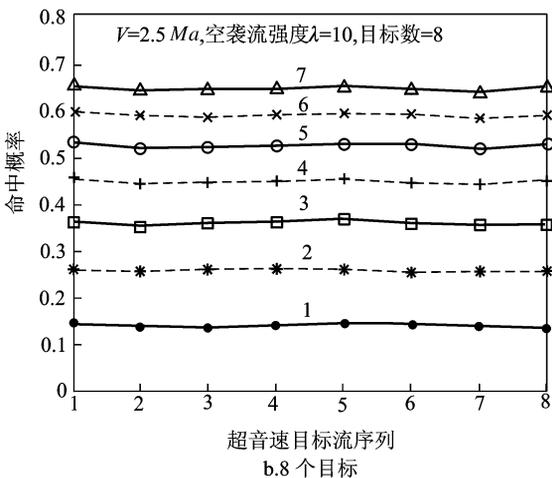
图6 对机动空袭目标流的命中概率

Fig. 6 Hit probability to mobile air targets flow

力,通常利用舰载防空火炮的射速较高的优势,在拦截过程中对来袭目标流进行多次点射,这也是当前舰炮拦截目标的通常方法。当目标数量较少时,对每个目标发射的弹丸相对大量目标来说可相应增多,因此命中概率要高一些,这由图7的仿真计算中可以看出(图中数字表示点射次数)。即使面对超音速目标流高强度袭击时,对空袭流中的每一目标的命中概率仍然很高。在实战中,空袭强度越大、目标数量越多,其出现的概率越小。因此,由图5、图6和图7可以看出,在大多数情况下,MMW-RCTCM 能够轻松应对具有机动突防能力的亚音速及超音速反舰导弹。即使出现上述小概率情形,MMW-RCTCM 在其他舰载防空武器的配合下完全能够防御超音速机动反舰导弹的高强度饱和攻击。



a. 4 个目标



b. 8 个目标

图7 对超音速目标流连续射击命中概率

Fig. 7 Continuously shot hit probability to ultrasonic targets flow

6 结论

1) 单发毫米波遥控指令弹道修正弹拦截单一机动反舰导弹(亚音速和超音速)的命中概率相对无控弹药成倍提高,可节约大量弹药;

2) 在连续射击的情况下,修正拦截流对单一来袭目标可确保歼毁;

3) 对中低强度的机动空袭目标流,一次点射即可取得较为满意的命中概率;

4) 利用舰载防空火炮射速较高的优势,采用多次点射的办法,能够有效防御亚音速和超音速机动反舰导弹的高强度攻击。

参考文献

[1] 胡海,魏健. 闭环校射近程反导舰炮抗击机动突防反舰导弹研究[A]. 中国系统仿真学会学术年会论文集[C].

2001. 718 ~ 724

[2] 吴强,姜玉宪. 反舰导弹综合突防技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(12): 1212 ~ 1215

[3] 虎晓伟. 弹道修正技术反导应用[J]. 火力与指挥控制, 2004, 29(5): 41 ~ 43

[4] 虎晓伟,陈利斌. 遥控引信技术反导应用[J]. 火力指挥与控制, 2004, 30(3): 102 ~ 104

[5] 王涛. 脉冲式弹道修正弹的修正方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2005

[6] 李兴国. 毫米波近感技术及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991

[7] 谭凤岗. 弹道修正弹的概念研究[J]. 弹箭技术, 1998, (4): 1 ~ 10

[8] 谢邦荣,尹健,宋劲松. 巡航导弹对地空导弹的突防概率仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(12): 2687 ~ 2691

[9] 王儒策. 弹药工程[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002. 145 ~ 152

Simulation on Hitting Probability of MMW Remote Controlling Trajectory Correction Munition Intercepting Mobile Anti-ship Missile

Hu Ronglin^{1,2}, Li Xingguo²

(1. Computer Engineering Department, Huaiyin Institute of Technology, Huaiyin, Jiangsu 223001, China;

2. Institute of Near Sensing Technique With Millimeter Wave and Optical Wave, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

[Abstract] The basic principle of millimeter wave remote controlling munitions (MMW - RCTCM) is demonstrated in the introduction. Then the concept of correctable intercepting flow is proposed. And the anti-air shooting model of millimeter wave remote controlling munitions (MMW - RCTCM) intercepting mobile anti-ship missile (MACM) is established in section 2 and 3. Subsequently, the hitting probability of single MMW - RCTCM vs. single MACM as well as MMW - RCTCM flow vs. single MACM and MMW - RCTCM flow vs. MACM flow are analyzed in detail. The probabilities of the above are simulated based on the parameters of the two sides of attacking and intercepting in the 5th section. It is illustrated that comparing with the non-controlling munitions, the efficiency of MMW - RCTCM is increased remarkably. At the last, it is concluded that the MMW - RCTCM can resist the attacking of saturate flow; ultra-sonic MACM.

[Key words] MMW; remote controlling; trajectory correction munitions; correctable intercepting flow; anti-ship missile; hitting probability