

基于相控阵引信的自适应起爆控制算法

吉阳, 任宏滨, 简金蕾, 周洋, 谢理

(空军工程大学防空反导学院, 西安 710051)

摘要: 针对传统固定倾角引信在拦截弹道导弹等高速目标时存在起爆控制精度差的问题, 提出了基于相控阵引信的自适应起爆控制算法。通过引入相控阵技术, 实现了对目标的自适应跟踪, 并建立了基于波束分档前提下的最佳起爆角模型, 利用自适应起爆延迟时间来防止引信天线波束分档后可能导致的超前起爆, 实现智能化引战配合。仿真结果分析表明, 该算法能够实现对最佳炸点的有效控制, 进一步提高对目标的杀伤效率。

关键词: 相控阵引信; 波束自适应控制; 最佳起爆角; 自适应起爆延时

中图分类号: TJ430 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2017)05-0065-03

An Adaptive Initiating Control Algorithm Based on Phased Array Fuze

Ji Yang, REN Hong-bin, JIAN Jin-lei, ZHOU Yang, XIE Li

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: The traditional angle-fixed fuze has low initiating controlling accuracy when intercepting an object moving at high speed, such as a Tactical Ballistic Missile (TBM). Therefore, we proposed a new algorithm of adaptive control based on phased array fuze. The planar phased array technology was introduced in the algorithm to implement adaptive target tracking. On this basis, a new model of the optimum detonating angle was established. An adaptive initiating delay time was used to prevent explosion in advance because of beam stepping and realize intelligent coordination. Simulation indicates that this method can realize effective control of the optimum point of burst, and improve the kill efficiency to the target.

Key words: phased array fuze; adaptive control of beam; optimum detonating angle; adaptive detonating delay

0 引言

随着空天攻防对抗技术的发展, 弹道导弹和临近空间高超声速飞行器等高速机动目标将成为现有导弹防御体系的主要威胁^[1], 弹目交会条件变得越来越复杂, 采用相控阵天线^[2], 利用波束控制技术, 根据弹目交会中获得的有关信息调整天线的波束倾角和波束宽度, 使引信启动角与战斗部动态杀伤角一致, 则能很好地提高引战配合效率。虽然相控阵天线的波束指向可以在一定范围内连续调整, 但考虑到导弹在拦截战术

弹道导弹(TBM)时, 弹目相对速度非常大, 并且存在很多干扰, 这些都会对相关参数的采集和测量造成很大误差, 因此, 结合防空导弹引信的特点及性能要求^[3], 可以将天线波束指向划分为若干离散档位。通过导引头与引信共用平面相控阵天线, 同时增加自适应起爆延时和战斗部破片束宽度去弥补误差, 实现智能化引战配合, 这对基于主动相控阵天线技术雷达型防空导弹的 GIF 设计技术、工程应用具有很好的参考意义。

1 平面相控阵天线

平面相控阵天线按照阵面与导弹纵轴相互垂直的方式安装在导弹上, 如图 1 所示, 通过引入相控阵技术能够实现天线波束在 φ 方向和 θ 方向同时进行连续扫描^[4-5], 其中, $(-i, -k)$, $(0, k)$, $(i, 0)$ 分别代表处于坐标系不同象限和坐标轴上的阵元坐标。

收稿日期: 2016-05-06

修回日期: 2017-03-27

基金项目: 航空科学基金(20130196004)

作者简介: 吉阳(1992—), 男, 江苏南通人, 硕士生, 研究方向为引信技术。

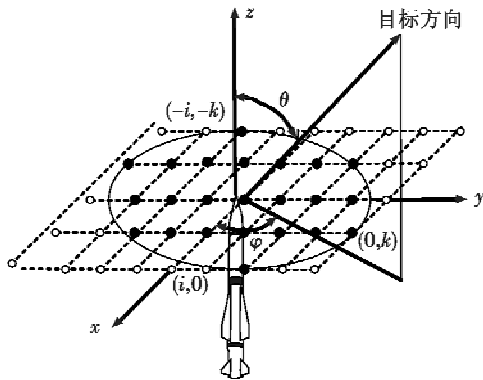


图1 平面矩形相控阵天线

Fig.1 Rectangle phased-array antenna on plane

1.1 波束宽度

当平面相控阵天线波束扫描到 (θ_B, φ_B) 方向时, θ 方向上的波束宽度 $\Delta\theta'_{0.5}$ 为

$$\Delta\theta'_{0.5} = \arcsin \left[\sin \theta_B + \sin \left(\frac{\Delta\theta_{0.5}}{2} \right) \right] - \arcsin \left[\sin \theta_B - \sin \left(\frac{\Delta\theta_{0.5}}{2} \right) \right] \quad (1)$$

当波束扫描到较大的角度时, $\Delta\theta'_{0.5}$ 近似为

$$\Delta\theta'_{0.5} \approx \frac{\Delta\theta_{0.5}}{\cos \theta_B} \quad (2)$$

式中, $\Delta\theta_{0.5}$ 为波束指向天线阵面法线方向时的宽度, φ 方向的波束宽度在扫描时保持恒定为 $\Delta\theta_{0.5}$ 。

图2所示为波束宽度与扫描角的变化关系。其中: L 为孔径尺寸; λ 为天线工作波长; L/λ 为研究波束宽度与扫描角的定量条件。

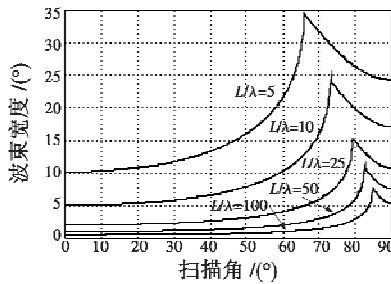


图2 波束宽度与扫描角的变化关系

Fig.2 Relations of beam width with scanning angle

1.2 阵元间距

对于矩形栅格, 为防止扫描辐射在其他方向因场强同相叠加, 形成强度与主瓣相仿的辐射瓣即栅瓣, 则相控阵天线阵元的间距 d_x, d_y 应满足

$$d_x, d_y \leq \frac{\lambda}{1 + |\sin \theta_m|} \quad (3)$$

1.3 波束分档

假设相控阵引信天线的工作波长为 0.02 m; 天线的波束指向从 $0^\circ \sim 65^\circ$ 均等分为 10 个档位, 波束档位

之间的夹角为 7.2° , 如表 1 所示。取均匀正方形面阵尺寸大小为 $(16 \times 16) \text{ cm}^2$, 阵元数为 25×25 , 则 $d/\lambda = 0.33$, 波束宽度 $5^\circ \sim 13^\circ$ 。

表1 波束不同指向档位中波束宽度与波束倾角之间的关系

Table 1 Relations between beam width and scanning angle in different direction gears

档位	I	II	III	IV	V
波束倾角 $\theta/^\circ$	0	7.2	14.4	21.6	28.8
纵向波束宽度 $\Delta\theta'_{0.5}/^\circ$	5.356	5.399	5.530	5.761	6.112
档位	VI	VII	VIII	IX	X
波束倾角 $\theta/^\circ$	36	43.2	50.4	57.6	65
纵向波束宽度 $\Delta\theta'_{0.5}/^\circ$	6.620	7.347	8.403	9.996	12.67

2 最佳起爆角算法

弹目交会如图3所示。

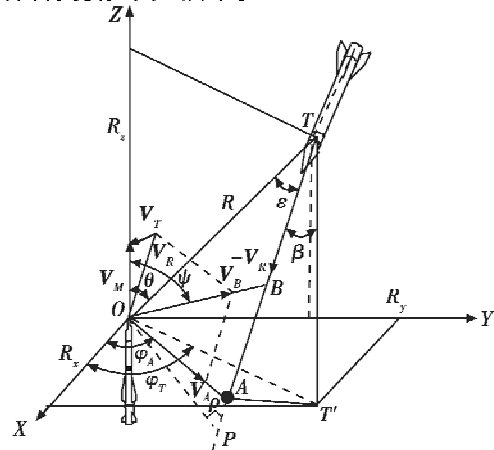


图3 弹目交会示意图

Fig.3 Schematic of missile-target encountering trajectory

图中, A 点是相对速度 V_R 方向与 XOY 面的交点。将导弹弹轴与动态破片速度矢量 V_B 之间的夹角定义为最佳起爆角 $\psi^{[6]}$, 即

$$\cos \psi = \frac{i \cdot V_B}{|V_B|} \quad (4)$$

根据弹目交会几何关系可得最佳起爆角为

$$\psi = \arccos \frac{V_R \cdot \cos \beta}{\sqrt{V_R^2 + V_A^2 + 2V_R \cdot V_A \cdot \sin \beta \cos(\varphi_T - \varphi_A)}} \quad (5)$$

3 自适应起爆延时算法

为防止引信天线因波束分档而导致的超前起爆, 进一步提高引战配合效率, 可以通过设计自适应延时^[7-8]来调整炸点位置。

假设导弹和目标进行共面交会, 导弹速度沿弹轴方向分布, 空间交会情况如图4所示。

根据几何关系可求出目标穿越天线波束的时间 t_x , 即

$$t_x = (\overline{MN} + l) / V_R = \frac{2\rho \left(\tan \frac{1}{2} \Delta\theta'_{0.5} + \tan^2(\theta - \beta) \tan \frac{1}{2} \Delta\theta'_{0.5} \right)}{V_R (\tan^2(\theta - \beta) - \tan^2 \frac{1}{2} \Delta\theta'_{0.5})} + \frac{L \cos \Delta}{V_R} \quad (6)$$

式中: L 为目标线长度; Δ 为目标线长度与 V_R 的夹角。一般情况下, 目标穿越天线波束时间至少是信息处理所需时间的 5 倍^[5], 那么信息处理时间满足

$$\tau_x \leq 0.2 t_x \quad (7)$$

根据图 3 弹目交会几何关系, 引信自适应起爆延迟时间 t_Q 可表示为

$$t_Q = \tau_x + \left(\frac{AT}{V_R} - \frac{AO}{V_A} \right) = \tau_x + \frac{\rho}{\cos \beta \sqrt{1 - (f_d \lambda)^2 / 4 V_R^2}} \cdot \left(\frac{\cos \theta}{V_R} - \frac{1}{V_A} \sqrt{\cos^2 \beta + \cos^2 \theta - f_d \lambda \cos \beta \cos \theta / V_R} \right) \quad (8)$$

式中, f_d 为对应波束倾角 θ 时的多普勒频率。

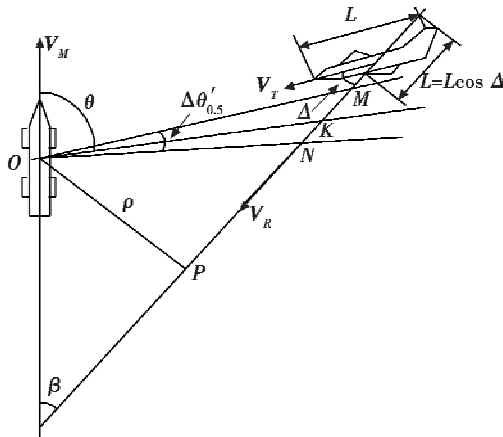


图 4 天线波束与目标相对运动轨迹的交会图

Fig.4 The geometric figure of antenna beam's intersection with target motion

4 仿真分析

假设目标机身长度 $L = 15$ m, 载波波长 $\lambda = 0.02$ m, 引信波束宽度 $\Delta\theta'_{0.5} = 6^\circ$, 战斗部静态破片速度为 2100 m/s, 脱靶量为 5 m, 目标的相对初始位置是 (-600 m, 300 m, 500 m), 距离和角度的测量误差分别在 (-20 m, 20 m) 和 (-20 mrad, 20 mrad) 之间均匀分布, 采样时间为 5 ms。则根据以上公式可求得二维波控引信最佳起爆延迟时间 t_Q 与相对速度 V_R 及扫描角 θ 的对应关系, 如图 5、图 6 所示。

根据表 1 中对波束指向档位的分类, 可以得到不同

范围内最佳起爆角大小所对应调整的波束指向。

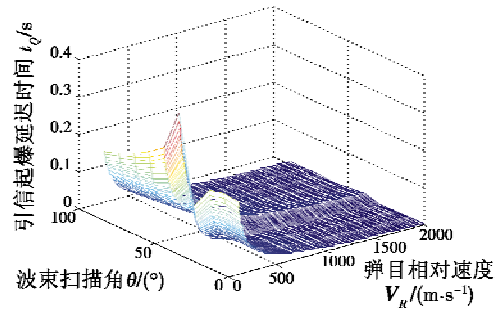


图 5 最佳起爆延迟时间 t_Q 与 V_R 及 θ 三维图

Fig.5 3D graphics of detonating time-lapse, relative speed and beam-scanning angle

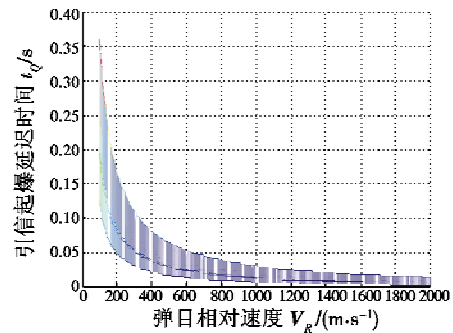


图 6 最佳起爆延迟时间 t_Q 与 V_R 关系示意图

Fig.6 Relations of detonating time-lapse and relative speed

波束指向为 $\theta =$	{	0° (I档) $0^\circ < \psi < 7.2^\circ$
		7.2° (II档) $7.2^\circ < \psi < 14.4^\circ$
		14.4° (III档) $14.4^\circ < \psi < 21.6^\circ$
		21.6° (IV档) $21.6^\circ < \psi < 28.8^\circ$
		28.8° (V档) $28.8^\circ < \psi < 36^\circ$
		36° (VI档) $36^\circ < \psi < 43.2^\circ$
		43.2° (VII档) $43.2^\circ < \psi < 50.4^\circ$
		50.4° (VIII档) $50.4^\circ < \psi < 57.6^\circ$
		57.6° (IX档) $57.6^\circ < \psi < 65^\circ$
		65° (X档) $\psi > 65^\circ$

此式为根据计算获取的最佳起爆角的大小来选择波束指向档位, 并通过自适应起爆延迟时间来弥补引信天线波束分档后可能诱发的超前起爆。

利用自适应延迟时间来修正起爆角从而寻找最佳炸点, 炸点误差偏差如图 7 所示。从图 7 中可以看出, 通过将天线波束离散分档控制及自适应延时调整能够使修正后的起爆角与最佳起爆角无限接近, 引信启动战斗部实现对目标的最佳杀伤。

(下转第 92 页)

- [2] 黄孝彬,牛征,牛玉广,等. 利用主元方法进行传感器故障检测的行为分析[J]. 传感器技术学报,2003(4): 419-423.
- [3] 李荣雨. 基于 PCA 的统计过程监控研究[D]. 杭州:浙江大学,2007.
- [4] QIN F, ZHAN X, SU X, et al. Detection and mitigation of errors on an ultra-tight integration system based on integrity monitoring method[C]//Proceedings of the 26th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation(ION GNSS + 2013), 2013:2102-2113.
- [5] 刘江,蔡伯根,王剑,等. 基于主成分分析的车辆组合导航系统故障检测与隔离算法[J]. 交通运输系统工程与信息,2009,9(5):46-52.
- [6] 周福娜,文成林,汤天浩,等. 基于指定元分析的多故障诊断方法[J]. 自动化学报,2009,35(7):971-982.
- [7] 邱天,丁艳军,吴占松. 基于主元分析的故障可检测性的统计指标比较[J]. 清华大学学报:自然科学版,2006,46(8):1447-1450.
- [8] 胡友强. 数据驱动的多元统计故障诊断及应用[D]. 重庆:重庆大学,2010.
- [9] FU K C, DAI L K, WU T J, et al. Sensor fault diagnosis of nonlinear processes based on structured kernel principal component analysis [J]. Journal of Control Theory and Applications, 2009, 7(3):264-270.
- [10] BO C M, ZHANG S, ZHANG G M, et al. Fault identification of tennessee eastman process based on FS-KPCA[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2008, 59(7): 1783-1789.
- [11] 李明. 基于多元统计分析的故障诊断方法及其应用研究[D]. 济南:山东大学,2006.
- [12] MILLER P, SWANSON R E, HECKLER C F. Contribution plot: a missing link in multivariate quality control [J]. Applied Mathematics and Computer Science, 1998, 8(4):775-792.
- [13] MAC GREGOR J F, JAECKLE C, KIPARISSIDES C, et al. Process monitoring and diagnosis by multiblock PLS methods[J]. AIChEJ Journal, 1994, 40(5):826-838.
- [14] 郑望. 多变量统计过程监测[D]. 北京:北京化工大学,2008.
- [15] BHATTI U I, OCHIENG W Y. Failure modes and models for integrated GPS/INS systems[J]. The Journal of Navigation, 2007, 60(2):327-347.

(上接第 67 页)

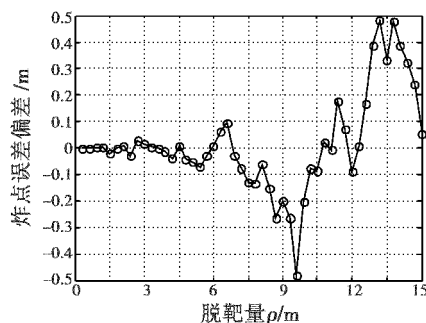


图 7 炸点误差偏差

Fig. 7 The error of detonating point

5 结束语

本文将平面相控阵技术引入引信天线,并开展实现引信波束的二维控制,进而实现对目标的自适应跟踪。设计了基于天线波束分档前提下的起爆控制算法,利用自适应起爆延迟时间来防止引信天线波束分档后可能诱发的超前起爆,把修正后的起爆角(波束指向角与延迟修正的角度之和)与动态破片飞散角差值作为起爆控制量,实现智能化引战配合,提高导弹对目标的杀伤概率。

参考文献

- [1] 蒋静群,简金蕾,张晓. 制导信息协同下的最佳起爆控制分析与研究[J]. 现代防御技术,2009,37(3):19-25.
- [2] MA C Y, LI Z G. Beamforming of whole airspace phased array TT&C system based on linear subarrays [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 32(1):128-132.
- [3] 苏志谋,简金蕾,任宏滨,等. 基于制导引信一体化的自适应起爆控制[J]. 导弹与航天运载技术,2012(3):47-51.
- [4] ZHU X P, MENG J H, XU T, et al. Integration guidance technology of phased array radar seeker based on maneuvering target tracking [J]. College of Astronautics Northwestern Polytechnical University, 2013(5):695-699.
- [5] 李静,简金蕾,任宏滨. 二维波束控制引信与定向战斗部配合[J]. 现代防御技术,2010,38(6):56-60.
- [6] 刘剑锋,庄志洪,陈潜. 基于一维相控阵引信的起爆控制算法研究[J]. 宇航学报,2005,26(4):466-470.
- [7] 刘腾谊,陈佳音,张安民. 防空导弹自适应起爆延时控制技术[J]. 火箭与制导学报,2010,32(1):143-145.
- [8] 徐蓬朝,王方,聂峥,等. 串联攻坚弹后级引信自适应起爆方法[J]. 探测与控制学报,2015,37(4):20-23.