

## 基于子孔径 Hough 变换的 SAR 转动目标检测

陈 稳, 张智军, 秦占师, 邓有为, 马 赢

(空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038)

**摘要:** 受杂波影响, 转动目标 SAR 回波在距离压缩域呈现断续正弦曲线特征而不易检测。提出一种基于子孔径 Hough 变换的转动目标检测方法, 对全孔径进行分段积累检测, 在子孔径内通过 FFT 将同一距离单元上的信号相干积累以提高信噪比, 在孔径间采用广义 Hough 变换进行非相干积累进一步抑制杂波。该方法适用于硬件开销更小的单通道系统, 两级检测获得稳健的杂波抑制性能和更优越的转动目标检测和测量性能。实验仿真结果验证了方法的有效性。

**关键词:** 目标检测; 转动目标; SAR; Hough 变换; 正弦曲线

**中图分类号:** TN957 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)09-0085-05

## Sub-Aperture Hough Transform Based SAR Rotational Target Detection

CHEN Wen, ZHANG Zhi-jun, QIN Zhan-shi, DENG You-wei, MA Ying

(Engineering College of Aeronautics and Astronautics, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** Due to the influence of clutter, the SAR echo of rotational target range-compressed domain presents a discontinuous sinusoid, which makes it difficult to be detected. A new algorithm based on sub-aperture Hough Transform was proposed to detect rotational target. The detection time duration is divided into multiple coherent processing intervals (CPIs) for integration. The echo in same range cell was coherently integrated via Fast Fourier Transform (FFT) within each CPI to increase SNR, and noncoherent integration was made among all CPIs via generalized Hough transform for clutter reduction. The proposed approach is suitable for single-channel SAR system that has a lower hardware cost. The two-stage detecting method has better performance on clutter cancellation and rotational target detection. The results of the simulation indicate the effectiveness of the method.

**Key words:** target detection; rotational target; SAR; Hough transform; sinusoid

### 0 引言

转动是常见的目标微动形式<sup>[1-2]</sup>, 如悬停的直升机翼、雷达阵地的旋转天线, 这类军事目标具有重要的战场作用, 研究转动军事目标的检测与识别对于快速摧毁敌方战略目标、抢夺战场主动权具有重要意义。不同于振动目标, 转动目标的幅度一般为几米以上, 大于合成孔径雷达(SAR)距离分辨率, 会引起额外的距离徙动, 回波在距离压缩域表现为正弦曲线形式特征

而非振动目标的直线形式<sup>[3-4]</sup>。另外, 微动目标回波常淹没在强杂波背景中, 难以提取, 因此, 必须改进传统的 SAR 转动目标检测算法<sup>[5]</sup>, 实现强杂波环境下旋转目标的可靠检测。

目前尚无公开文献研究单通道模式下 SAR 转动目标的检测, 而单通道系统以其更小的硬件开销仍为许多机载 SAR 系统所使用, 因此, 研究单通道 SAR 转动目标检测具有很大的现实意义<sup>[6]</sup>。有相关文献介绍了振动目标检测和多通道 SAR 微动目标检测, 为本文研究提供了参考。文献[7]根据目标微多普勒特征对微动参数进行估计, 但是没有考虑强杂波噪声的影响; 文献[8]利用数值模拟和实测数据研究毫米波 SAR 体制下地面振动、旋转目标的微多普勒效应, 但未给出性能稳健的检测方法; 文献[9]研究了雷达旋转目标的微多普勒效应, 对旋

收稿日期: 2014-04-29

修回日期: 2014-05-14

基金项目: 陕西省电子信息系统集成重点实验室基金(201107Y03)

作者简介: 陈 稳(1990—), 男, 湖南浏阳人, 硕士生, 研究方向为微波信号处理及工程应用。

转动目标雷达回波的时频特性进行理论推导,然而,所提参数提取方法仅适用于 PD 雷达;文献[10]提出基于时频分析和杂波抑制结合的双通道 SAR 自旋目标检测方法,实现强杂波背景下的自旋目标检测,但该方法不适用于单通道;文献[11]对旋转目标的 SAR 成像特征进行分析,深化了对旋转目标的 SAR 成像特性的认识,有助于旋转目标的图像域检测,然而,没有分析旋转对传统合成孔径雷达地面动目标检测(SAR-GMTI)算法的影响。以上方法都给单通道 SAR 转动目标检测提供了宝贵的技术支持,但没给出明确的单通道 SAR 转动目标杂波对消和检测方法。

本文模拟单通道 SAR 转动目标的回波模型,提出一种基于子孔径 Hough 变换的转动目标检测方法,对全孔径分段积累检测,子孔径内通过快速傅里叶变换(FFT)将同一距离单元上的信号相干积累以提高信噪比,孔径间采用广义 Hough 变换进行非相干积累进一步抑制杂波。两级检测获得稳健的杂波抑制性能和更高的微动目标检测概率。

## 1 转动目标信号模型

构造机载 SAR 系统目标检测几何模型如图 1 所示。

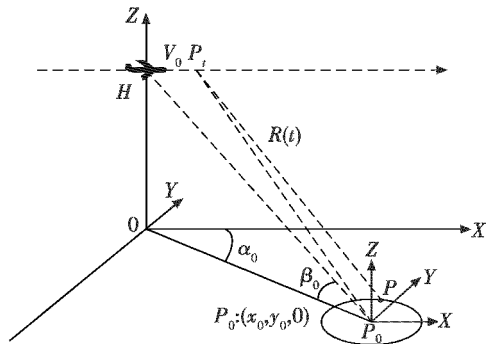


图 1 单通道 SAR 旋转目标检测几何模型

Fig. 1 Geometrical model of single-channel SAR rotational target detection

载机以速度  $V_0$ 、高度  $H$  平行于  $X$  轴飞行,在场景中,目标以半径  $r_m$  和角频率  $\omega$  绕中心  $P_0$  转动,初始相位为  $\omega_0$ ,  $P_0$  的坐标为  $(x_0, y_0)$ 。则目标在  $t$  时刻位置矢量为  $\mathbf{r}_t \triangleq [r_{xt} \ r_{yt} \ r_{zt}]^T$ , 其中,  $r_{xt} = r_m \cos(\omega t + \varphi_0)$ ,  $r_{yt} = r_m \sin(\omega t + \varphi_0)$ ,  $r_{zt} = 0$ 。因此,  $t$  时刻目标与雷达距离为

$$R(t) \approx \sqrt{(V_0 t - x_0 - r_{xt})^2 + (y_0 - r_{yt})^2 + (H - r_{zt})^2} \approx \sqrt{(V_0 t - x_0)^2 + y_0^2 + H^2} + r_m \cos \beta_0 (\cos \omega t + \varphi_0 + \alpha_0) \quad (1)$$

旋转中心对应参考距离

$$R_{\text{ref}}(t) \triangleq \sqrt{(V_0 t - x_0)^2 + R_B^2} \stackrel{\text{忽略空变}}{\approx} R_{n0} - \frac{V_0 x_0}{R_0} t + \frac{V_0^2}{2R_0} t^2 \quad (2)$$

式中:  $R_B = \sqrt{Y_0^2 + H^2}$ , 为目标旋转中心到航迹的垂直距离;  $R_{n0}$  和  $R_0$  分别为零时刻雷达到目标旋转中心和场

景中心的距离。可见,旋转目标距离像序列呈现出“正弦曲线+抛物线”的形式。正弦曲线由目标旋转造成,在微动幅度小于距离分辨率时,正弦特征不明显。实际中旋转目标转动半径为米级,比振动目标距离像序列的正弦特征更突出。抛物线表征了载机运动造成的距离徙动,在距离徙动小于距离分辨率时,抛物线特征不明显,此时,式(1)可简化为

$$R(t) \approx R_{n0} + r_m \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (3)$$

此时的距离像序列仅表现为正弦曲线形式,对旋转目标的检测对应为信号处理层面的正弦曲线的检测与测量。

## 2 转动目标检测与测量

实际场景中,目标常淹没在强杂波和噪声中,因此需要抑制杂波以提高信噪比。本节提出一种分段积累抑制杂波的方法,将全孔径(Coherent Processing Interval, CPI)划分为若干相邻而较短的小孔径(子孔径),子孔径内微动目标可近似为匀速运动,使得子孔径数据能进行相干积累以对消杂波,再通过包络检波和恒虚警检测(CFAR)初步检测微动目标,所有子孔径检测结果形成正弦曲线形式点迹,然后可利用广义 Hough 变换对各子孔径进行非相干积累,实现正弦曲线检测和参数估计。

旋转目标回波方位去斜后的多普勒历程见图 2。

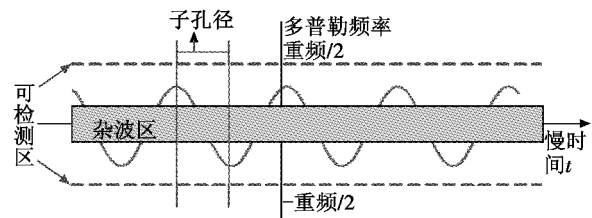


图 2 目标与杂波多普勒特性

Fig. 2 The Doppler characteristics of target and clutter

由图可见,由于杂波区的存在,正弦曲线的一部分淹没在杂波中无法分辨,而超出杂波的频带的分量周期性出现,在这部分子孔径中利用高通滤波检测旋转目标,并把相应的距离单元标记为 1,完成所有子孔径检测后形成正弦曲线形式点迹。利用广义 Hough 变换检测该点迹可以得到其正弦曲线特征,实现旋转目标的检测与测量。整个过程采用相干-非相干二元混合积累,通过两次门限检测判决,能很好地抑制杂波,显著改善检测性能。

整个检测步骤如图 3 所示。

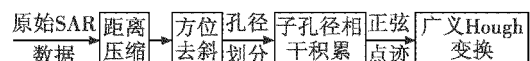


图 3 旋转目标检测流程图

Fig. 3 Flow chart of rotational target detection

图中,子孔径内相干积累和广义 Hough 变换检测

正弦点迹是核心步骤,下面分别论述。

### 2.1 子孔径内相干积累

MTI 高通滤波器一般通过时域脉冲对消器实现,二脉冲对消器结构简单,但与理想高通滤波器相比是很差的近似。本文采用三脉冲对消器,它能明显改善零多普勒附近的凹口宽度,其结构如图4所示。

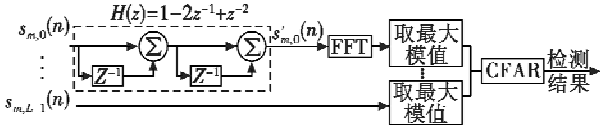


图4 子孔径相干积累原理图

Fig.4 The schematic diagram of coherent integration in sub-aperture

子孔径相干积累原理在时域表示为

$$s'_{m,l}(n) = s_{m,l}(n) - 2s_{m,l}(n+1) + s_{m,l}(n+2) \quad (4)$$

对于第  $l$  个距离单元,经过离散化和近似后,第  $m$  个子孔径内旋转目标回波可以表示为

$$s_{m,l}(n) = \tilde{\rho} \exp(j\omega_0 n), \quad 0 \leq m \leq M-1, \quad 0 \leq l \leq L-1, \quad 0 \leq n \leq N_{\text{sub}}-1 \quad (5)$$

式中:  $M$  为子孔径个数;  $l$  为距离单元个数;  $N_{\text{sub}}$  为子孔径长度;  $MN_{\text{sub}} = N$ , 为全孔径长度;  $\omega_0$  为子孔径中心处的目标数字域多普勒频率。

设子孔径脉冲对消后信噪比为  $R_{s,N,0}$ , 在子孔径内做  $L$  点 FFT 后信噪比为  $R_{s,N,1}$ , FFT 能实现信号的相干积累, 积累增益为

$$R_{s,N,1}/R_{s,N,0} = L \quad (6)$$

利用 CFAR 理论推导门限  $T_1$ 。设定不存在旋转目标, 只有噪声和残余杂波时 FFT 后最大模值为  $z_1$ , 且服从瑞利分布

$$p(z_1) = \frac{2z_1}{\beta^2} e^{-z_1^2/\beta^2}, \quad z_1 \geq 0 \quad (7)$$

式中,  $\beta^2 = E[z_1^2]$ , 为噪声功率。检测时将  $z_1$  与门限  $T_1$  比较, 设虚警概率为  $P_{FA}$ , 则得到门限为

$$T_1 = \beta \sqrt{-\ln P_{FA}} \quad (8)$$

$z_1$  在一定区间内可假设为具有各态历经性的平稳随机过程, 因此  $\beta$  可估计为

$$\hat{\beta} = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{i=0}^{L-1} z_i^2} \quad (9)$$

考虑到对全孔径进行广义 Hough 变换时也需要设置门限, 此处不妨把虚警概率设高点, 这样有利于正弦点迹的检测和参数估计。

### 2.2 全孔径非相干积累

子孔径 MTI 处理后, 旋转目标在子孔径-距离单元平面形成正弦曲线形式点迹, 利用广义 Hough 变换可以对正弦点迹进行检测, 并提取曲线特征。广义 Hough 变

换在二维平面搜索和匹配表征目标微动轨迹的正弦曲线, 实现跨越多个距离单元点迹的非相干积累, 能很好地提高信噪比, 具体步骤可参考文献[12]。

设第二级门限为  $T_2$ , 则检测准则为

$$H_T(f) = \sum_{i=1}^M f(C_{\text{CFI}}, R_i), \quad \begin{matrix} H_T(f) \geq T_2, & \text{有目标} \\ H_T(f) < T_1, & \text{无目标} \end{matrix} \quad (10)$$

式中:  $f(C_{\text{CFI}}, R)$  为点迹中的一条曲线;  $H_T(f)$  表示对  $f(C_{\text{CFI}}, R)$  做广义 Hough 变换, 获得的积累增益为

$$R_{s,N,2}/R_{s,N,1} = \sqrt{M} \quad (11)$$

这样经过子孔径相干积累和全孔径非相干积累, 获得整个检测过程的积累增益为

$$R_{s,N,2}/R_{s,N,0} = L\sqrt{M} \quad (12)$$

经过两次检测, 最终的检测概率和虚警概率为

$$P_D = \sum_{i=T_2}^M C_M^i P_{d1}^i (1 - P_{d1})^{M-i} \quad (13)$$

$$P_F = \sum_{i=T_2}^M C_M^i P_{f1}^i (1 - P_{f1})^{M-i} \quad (14)$$

式(14)可通过 Matlab 函数的 binoinv 或 binocd 计算, 预先设置好  $P_F$  和  $P_{f1}$  后, 门限  $T_2$  可通过式(14)求解,  $T_2$  取值为零与  $M$  之间的整数。典型参数下 ( $P_{f1} = 10^{-3}$ ,  $M = 128$ )  $P_F$  和  $T_2$  的关系如图5所示。

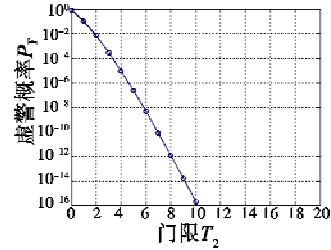


图5 总虚警概率与第二级门限的关系

Fig.5 The relation between final false alarm probability and the second threshold

由图5可见, 总虚警概率随门限  $T_2$  的增加按指数函数规律迅速减小, 较小的门限就能获得较低的虚警率。

## 3 实验仿真分析

为检验所提方法的有效性, 本节参考某机载 SAR 设置以下仿真实验。载机速度  $V_0$  为 200 m/s, 波长为 0.02 m, 带宽为 150 MHz, PRF 为 2048 Hz, 子孔径时间为 2 s, 距离分辨率和方位分辨率分别为 1 m 和 0.25 m。目标旋转半径  $r_m$  为 1.8 m, 频率  $f_m$  为 2 Hz。图6为原始回波距离向序列, 由图可见, RCM 为正弦曲线形状, 且该曲线淹没在强杂波中无法提取。若按照传统的成像算法对旋转目标回波成像, 结果如图7所示, 由图可见, 目标能量分布在多个距离、方位单元, 无法获得聚焦良好的图像, 因此在图像域也无法检测出旋转目标。

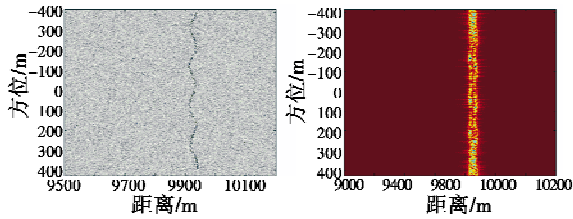


图6 杂波抑制前回波距离像

Fig. 6 Range imaging of echo before clutter elimination

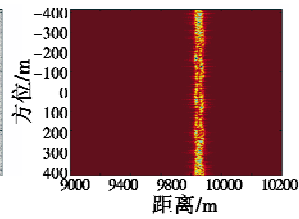


图7 转动回波成像结果

Fig. 7 The imaging of rotational target echo

采用本文方法进行检测,子孔径个数  $M$  为 128, 每个子孔径内的脉冲数即子孔径长度  $N_{sub}$  为 32, 第一级检测虚警概率  $P_{f1} = 10^{-3}$ 。由图 8 和图 9 可见,经过子孔径内相干积累后,大部分杂波得到抑制,得到第一级检测后的正弦点迹如图 10 所示。图 10 中部分点迹出现间断,是由于其对应子孔径中的目标多普勒被杂波频带掩盖,符合理论分析结论,少数间断不影响正弦曲线的检测。对该正弦点迹采用 Hough 变换进行检测,第二级检测虚警概率为  $P_f = 10^{-6}$ , 成功检测出旋转目标并得到旋转幅度和频率的估计值分别为 1.73 m 和 1.83 Hz。

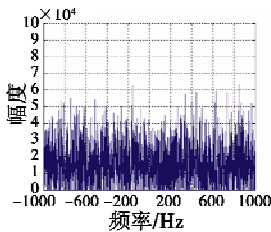


图8 脉冲对消前频谱图

Fig. 8 Frequency spectrum before pulse cancellation

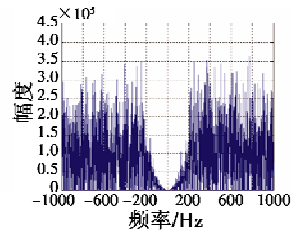


图9 脉冲对消后频谱图

Fig. 9 Frequency spectrum after pulse cancellation

为进一步研究算法的性能,在不同信杂比下进行 100 次蒙特卡罗仿真,得到检测概率随信杂比变化曲线如图 11 所示。

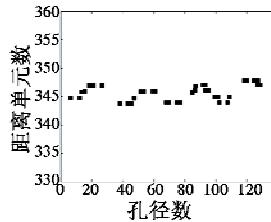


图10 第一级检测形成的点迹

Fig. 10 Point track export by the first step of detection

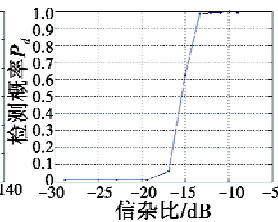


图11 检测概率随信杂比的变换曲线

Fig. 11 The relation between detection probability and SCR

由图 11 可见,对于 -15 dB 以上的信杂比,检测概率都能达到 0.6 以上,信杂比大于 -13 dB 时,检测概率能达到 0.9 以上,说明混合相干-非相干积累方法能很好地提高信杂比,具有优越的检测性能。得到不同信杂比下旋转参数的估计值如表 1 所示。

表1 参数估计精度与 SCR 关系

Table 1 The relation between parameters estimation precision and SCR

SCR/dB	半径/m	偏差/%	频率/Hz	偏差/%
-29	1.54	14.4	1.74	13.0
-23	1.58	12.2	1.80	10.0
-19	1.63	9.4	1.83	8.5
-17	1.96	8.9	2.14	7.0
-15	1.87	3.9	2.05	2.3
-13	1.77	1.7	2.02	1.0
-10	1.82	1.1	2.01	0.5

由表 1 可见,在 -15 dB 以上的信杂比时,参数估计精度都能达到 0.95 以上,说明 Hough 变换对正弦曲线的检测和估计性能优越。

### 4 结束语

微动能反映目标精细运动状态,是区别于其他目标独一无二的特征。转动目标作为一种常见的微动目标,因其 SAR 回波在距离压缩域受杂波影响呈现出断续正弦曲线特征而不易检测。本文提出一种基于子孔径 Hough 变换的单通道 SAR 转动目标检测方法,对全孔径进行分段积累检测,在子孔径内通过 FFT 将同一距离单元上信号相干积累以提高信噪比,在孔径间采用广义 Hough 变换进行非相干积累进一步抑制杂波。两级检测大大提高了回波的信杂比,实现了低虚警率条件下的高概率检测。通过仿真实验,所提方法在回波信杂比大于 -13 dB 时,检测概率能达到 0.9 以上,参数估计精度在 0.99 以上,具有优越的检测性能和很高的参数估计精度。此外,本文所提方法能大大提高单通道系统的杂波抑制性能,使机载 SAR 系统在提高性能的同时降低硬件成本。

尽管关于目标微多普勒效应的研究已引起各国学者的广泛关注,但是真正实现基于微动特征的目标识别还有很长的路要走。本文提出的旋转目标检测方法没有考虑机载平台运动对检测性能的影响,也没有考虑到实际战场环境中会存在多个目标回波相互干扰的情况。下一步的研究重点是基于微动特征的目标识别技术。

### 参考文献

[1] CHEN V C, LI F, HO S S, et al. Micro-Doppler effect in radar: Phenomenon, model, and simulation study [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2006, 42(1): 2-21.

[2] CAI C J, LIU W X, FU Y L. Radar micro-Doppler signature analysis with HHT [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46(2): 929-938.

[3] SETLUR P, AMIN M, THAYAPARAN T. Micro-Doppler

- signal estimation for vibrating and rotating targets [C]// Proceedings of the 8th International Symposium on Signal Processing and Its Applications, 2005:639-642.
- [4] CHEN V C, LI F, HO S S, et al. Analysis of micro-Doppler signatures[J]. IEE Proceedings Radar, Sonar Navigation, 2003, 150(4):271-276.
- [5] CHIU S. Moving target parameter estimation for RADAR-SAT-2MODEX[J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 31(15):4007-4032.
- [6] 高飞,孙进平,袁运能,等. 单通道 SAR 实现 ATI 动目标检测的新方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(18):890-894.  
GAO F, SUN J P, YUAN Y N, et al. New method of moving target detection using single-channel SAR ATI[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(18):890-894.
- [7] LIU Y X, LI X, ZHUANG Z W. Estimation of micro-motion parameters based on micro-Doppler[J]. IET Signal Processing, 2010, 4(3):213-217.
- [8] RÜEGG M, MEIER E, NUESCH D. Vibration and rotation in millimeter-wave SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(2):293-304.
- [9] 李金梁,王雪松,刘阳,等. 雷达目标旋转部件的微小 Doppler 效应[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(3):583-587.  
LI J L, WANG X S, LIU Y, et al. Micro-Doppler effect of rotation structure on radar targets[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(3):583-587.
- [10] 张伟,童创明,张群,等. 基于时频分析的双通道 SAR 自旋目标检测[J]. 航空学报, 2011, 32(10):1914-1923.  
ZHANG W, TONG C M, ZHANG Q, et al. Rotating targets detection with dual-channel SAR based on time-frequency analysis[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(10):1914-1923.
- [11] 吴晓芳,刘阳,王雪松,等. 旋转微动目标的 SAR 成像特性分析[J]. 宇航学报, 2010, 31(4):1181-1189.  
WU X F, LIU Y, WANG X S, et al. Analysis of SAR imaging characteristics of targets with rotational micro-motion[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(4):1181-1189.
- [12] ZOU C C, GE S. A hough transform-based method for fast detection of fixed period sinusoidal curves in images [C]//The 6th International Conference on Signal Processing, 2002:909-912.

(上接第 28 页)

### 参考文献

- [1] 蔡洪,胡正东,曹渊. 具有终端角度约束的导引律综述[J]. 宇航学报, 2010, 31(2):315-323.  
CAI H, HU Z D, CAO Y. A survey of guidance law with terminal impact angle constraints[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(2):315-323.
- [2] 孙未蒙,刘湘洪,郑志强. 多约束条件下的制导律研究综述[J]. 飞行力学, 2010, 28(2):1-5.  
SUN W M, LIU X H, ZHANG Z Q. Survey on the developments on the guidance law with impact angular constraints [J]. Flight Dynamics, 2010, 28(2):1-5.
- [3] JUNG B Y, KIM Y D. Guidance laws for anti-ship missiles using impact angle and impact time [C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Keystone, Colorado, 2006:1-13.
- [4] 马国欣,张友安. 带有导引头视场限制的攻击时间控制导引律[J]. 弹道学报, 2013, 25(2):6-11.  
MA G X, ZHANG Y A. Impact time control guidance-law with seeker field-of-view limit [J]. Journal of Ballistics, 2013, 25(2):6-11.
- [5] 张德丰. Matlab 自动控制系统设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2010:62-64.  
ZHANG D F. Automatic control system design with Matlab [M]. Beijing:China Machine Press, 2010:62-64.
- [6] 吴鹏,杨明. 带末端落角约束的制导律[J]. 西南交通大学学报, 2008, 43(3):309-313.  
WU P, YANG M. Missile guidance law with terminal impact angle constraint[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2008, 43(3):309-313.
- [7] 刘强,范英飏. 基于最优控制的落角约束攻击设计[J]. 海军航空工程学院学报, 2007, 22(2):215-218.  
LIU Q, FAN Y B. Design of guidance law and controller of missile with terminal angular constraint based on optimal control[J]. Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute, 2007, 22(2):215-218.
- [8] 王业达,周军,郭建国. 一种基于零脱靶量的最优制导律设计[J]. 计算机仿真, 2009, 26(2):57-60.  
WANG Y D, ZHOU J, GUO J G. An optimal guidance law based on zero miss-distance [J]. Computer Simulation, 2009, 26(2):57-60.
- [9] 钱杏芳,林瑞雄,赵亚男. 导弹飞行力学[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2008:48-54.  
QIAN X F, LIN R X, ZHAO Y N. Missile flight aerodynamics [M]. Beijing:Beijing Institute of Technology Press, 2008:48-54.
- [10] 杨军,朱学平,朱苏朋,等. 飞行器最优控制[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2011:53-72.  
YANG J, ZHU X P, ZHU S P, et al. Optimal control of aircraft [M]. Xi'an:Northwestern Polytechnical University Press, 2011:53-72.