

基于 DSFMT 的旋转微动目标分离

陈 帅¹, 冯存前¹, 张 蓉²

(1. 空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051; 2. 空军装备部驻北京地区军事代表局, 北京, 100166)

摘要 针对窄带雷达距离分辨力低、无法从距离维分离弹道群目标的问题, 提出利用离散正弦调频变换(DSFMT)分离群目标信号分量的方法。通过研究弹道目标的微动对回波信号的调制特性, 建立微动信号的回波模型, 利用离散正弦调频变换对正弦调频信号能量聚集的特性, 将多分量信号投影到参数变换域上, 构造目标函数, 处理变换域上的峰值特征点, 利用消去的思想逐步分离出各个信号分量。仿真实验验证了算法的有效性和鲁棒性。

关键词 微动; 弹道中段; 窄带雷达; 离散正弦调频变换; 目标分离;

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2019.05.007

中图分类号 TN957 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2019)05-0040-5

Separation of Rotating Micro-Motion Targets Based on DSFMT

CHEN Shuai¹, FENG Cunqian², ZHANG Rong³

(1. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;
2. Military Representative Office of the Air Force Equipment Department in Beijing, Beijing 100166, China)

Abstract: To solve the problems that the narrowband radar range is low in resolution and is hard to separate trajectory group targets from range dimension, a method of separating group target signal components by using Discrete Sinusoidal Frequency Modulation Transform (DSFMT) is proposed. The modulation characteristics of micro-motion ballistic target echo are studied and an echo model of micro-motion signal is established. The energy aggregation characteristics of DSFMT are used to project multi-component signal into transform domain. The objective function of parameter estimation is constructed to process the peak feature points in the transform domain, and the signal components are separated step by step. The effectiveness and robustness of the algorithm are verified.

Key words: micro-motion; middle trajectory; narrowband radar; DSFMT; target separation

美国海军实验室的 V. C. Chen^[1-3]于2000年首次提出微动的概念, 并描述了弹道目标的几种微动形式, 引领了基于微动的弹道目标识别与分离的技术研究。通常, 弹道目标的微动类型有振动、旋转、进动等, 其中旋转是弹头用以稳定自身飞行姿态的

重要措施^[4-6], 因此针对旋转微动目标的研究非常必要。然而, 弹道目标之间的距离往往小于窄带雷达的距离分辨力, 所以窄带雷达无法在距离上实现目标的有效分离^[7-9], 也就无法进一步对不同目标的特征进行提取。

收稿日期: 2019-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(61701528)

作者简介: 陈 帅(1995—), 男, 江苏泰兴人, 硕士生, 主要从事雷达信号处理研究。E-mail: cst01995@163.com

引用格式: 陈帅, 冯存前, 张蓉. 基于 DSFMT 的旋转微动目标分离[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(5): 40-44. CHEN Shuai, FENG Cunqian, ZHANG Rong. Separation of Rotating Micro-Motion Targets Based on DSFMT[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(5): 40-44.

针对这一问题,在信号处理层面,文献[10]通过粒子滤波算法,恢复了窄带回波中信号的相位差,并利用粒子滤波实现了信号的参数提取。在时频图像处理层面,文献[11]利用峰值提取法和拟合直线法对目标窄带回波信号进行处理,成功估计出微动目标的旋转频率和加速度参数。

上述方法存在抗噪声能力不强,能分离的目标个数较少等问题。为实现微动目标群信号分离,以弹道中段多个旋转目标为例,建立多目标的旋转模型,分析旋转雷达回波的信号形式。提出利用 DSFMT 分离弹道目标的方法并估计出目标的旋转频率。该方法不同于传统的图像处理分离方法,直接对信号进行处理,分离准确性较高,且在信噪比大于 -5 dB 时算法的特征估计精度较高。

1 多目标旋转模型

在光学区,多目标的信号回波可以等效成几个强散射点的信号回波之和。首先对单个弹头目标进行建模分析,建立如图 1 所示旋转微动模型。

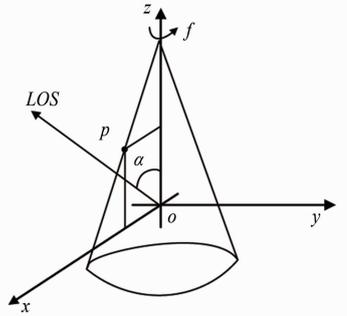


图 1 旋转微动弹头模型

以目标自旋轴为 z 轴,雷达视线 LOS 与 z 轴相交的平面为 xoz 面建立参考坐标系 $oxyz$ 。 α 为雷达视线与弹体对称轴的夹角。 P 为弹头上一散射中心,假设 p 点的初始位置 $(x_p, y_p, z_p)^T$ 位于 xoz 面,雷达视线方向 LOS 表示为 $\mathbf{n} = (\sin\alpha, 0, \cos\alpha)^T$ 。 p 点以角速度 $\omega = 2\pi f$ 绕 oz 轴旋转,实时位置由坐标 $(x_p(t), y_p(t), z_p(t))^T$ 表示。

$$\text{其中} \begin{cases} x_p(t) = \sqrt{x_p^2 + y_p^2} \cos(\omega t) \\ y_p(t) = \sqrt{x_p^2 + y_p^2} \sin(\omega t) \\ z_p(t) = z_p \end{cases}$$

以雷达视线为参照, p 点的自旋微动距离变化可以由 p 点在 LOS 上的投影位置变化得到。由文献[12]可知,散射点 p 的旋转微动距离可以表示为:

$$r_p(t) = z_p \cos\alpha + \sqrt{x_p^2 + y_p^2} \sin\alpha \cos(\omega t) \quad (1)$$

由微动引起的相位变化可以表示为:

$$\phi_p = -\frac{4\pi f_c}{c} r_p(t) \quad (2)$$

对相位求导即可得到旋转散射点的微多普勒频率:

$$f_p = \frac{d\phi_p}{df} = -\frac{4\pi f_c}{c} r'_p(t) \quad (3)$$

由上式可知,旋转散射中心的微多普勒满足正弦变化形式。

假设雷达发射信号频率为 f_c 的单频信号,则弹道群目标的雷达回波可以表示为:

$$s(t) = \sum_I \sigma_i \exp(-j \frac{4\pi f_c}{c} (r_{pi} + R)) \quad (4)$$

式中: R 为目标参考坐标系原点与雷达的距离; I 为目标个数; r_{pi} 为目标 i 的旋转微动距离。

2 基于离散正弦调频变换的目标分离

2.1 离散正弦调频变换方法

孙志国^[13]在 2012 年提出离散正弦调频变换(DSFMT)方法,该方法能将正弦调频(Sinusoid Frequency Modulation, SFM)信号的能量聚集在变换域的特征点上。本节将算法模型稍作更改,以便将其应用到微动信号的处理中。

SFM 信号的一般形式为:

$$s_{SFM}(t) = A \exp(j2\pi f_c t + jL \sin(2\pi f_d t)) \quad (5)$$

式中: A 为信号振幅; L 为正弦相位系数。令式(5)中 $f_c = 0$,得到基带 SFM 信号的表达式,其离散形式可以表示为:

$$s_{SFM}(n) = A \exp(jl_d \sin(2\pi k_d \frac{n}{N})) \quad (6)$$

式中: $0 \leq n \leq N-1$; l_d, k_d 分别为 L, f_d 在搜索域上对应的符号。

下面构造以 l_d, k_d 为变量的离散正弦调频变换,对于 SFM 信号 $s_{SFM}(n)$,它的离散正弦调频变换定义为

$$C(k, l) = \sum_{n=0}^{N-1} s_{SFM}(n) \exp(-jl \sin(2\pi k \frac{n}{N})) \quad (7)$$

利用 DSFMT 对 SFM 信号的能量聚集特性,可以分离出不同 SFM 信号分量,并估计信号参数。由式(4)可以看出,旋转微动目标的雷达回波相位以正弦形式变化,因此可以将离散正弦调频变换应用到微动目标的分离与特征提取中,从而实现通过窄带雷达回波分离弹道目标的目的。

将旋转微动信号回波表达式整理得到其离散形式:

$$s_1(n) = E_1 \exp(jl_1 \cos(2\pi k_1 \frac{n}{N})) \quad (8)$$

$$\text{式中:} \begin{cases} E_1 = \sigma_1 \exp(j \frac{4\pi f_c}{c} (z_p \cos\alpha + R)) \\ l_1 = \frac{4\pi f_c}{c} (\sqrt{x_p^2 + y_p^2} \sin\alpha) \end{cases},$$

E_i 为复常数, l_i 为常数; k_i 代表旋转频率; $0 \leq n \leq N-1, n \in N+$ 。

对式(8)做离散正弦调频变换,可以得到:

$$C_s(k, l) = \sum_{n=0}^{N-1} E_i \exp(jl_i \cos(2\pi k_i \frac{n}{N})) \cdot \exp(-jl \cos(2\pi k \frac{n}{N})) \quad (9)$$

观察式(9)可知,当 $l=l_i, k=k_i$ 时, $C_s(k, l)$ 的实部取最大值。通过寻找变换域的最大值坐标就可以估计信号参数 L, f , 回波信号估计参数目标函数为:

$$\begin{cases} (\hat{k}, \hat{l}) = \arg \max_{k, l} |C_s(k, l)| \\ \hat{f} = \hat{k} \\ \hat{L} = \hat{l} \end{cases} \quad (10)$$

由第1节的分析可知,多个旋转目标在窄带体制雷达的照射下,其回波为多个 SFM 信号在时域的叠加。因此,多旋转目标的回波信号可以表示为:

$$s(n) = \sum_{i=1}^I E_i \exp(jl_i \cos(2\pi k_i \frac{n}{N})) \quad (11)$$

式中: $E_i = \sigma_i \exp(j \frac{4\pi f_c}{c} (z_{pi} \cos \alpha_i + R))$ 为复常数; z_{pi} 为散射点 i 的初始位置纵坐标; α_i 为散射点 i 处雷达视线与旋转轴的夹角。

对多分量信号进行处理会不可避免的产生交叉项问题,下面对交叉项带来的影响进行分析。式(11)做离散正弦调频变换,得到:

$$C_s(k, l) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{i=1}^I E_i \exp(jl_i \cos(2\pi k_i \frac{n}{N})) \cdot \exp(-jl \cos(2\pi k \frac{n}{N})) \quad (12)$$

当 $l=l_i, k=k_i$ 时, SFM 信号分量 $s_i(n)$ 在坐标 (l_i, k_i) 处取得最大值,则式(12)中:

$$C_s(k_i, l_i) = E_i N + \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{\substack{\tau=1 \\ \tau \neq i}}^I E_\tau \exp(jl_\tau \cos(2\pi k_\tau \frac{n}{N})) \cdot \exp(-jl_i \cos(2\pi k_i \frac{n}{N})) =$$

$$E_i N + \sum_{\substack{\tau=1 \\ \tau \neq i}}^I E_\tau \sum_{m=-\infty}^{+\infty} J_m(l_\tau) \sum_{m=-\infty}^{+\infty} J_m(l_i) \cdot \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j2\pi m(k_i - k_\tau) \frac{n}{N}) = E_i N + N \sum_{\substack{\tau=1 \\ \tau \neq i}}^I E_\tau J_0(l_\tau) J_0(l_i) \quad (13)$$

式中: m 为整数; $J_m(\cdot)$ 为第1类 m 阶 Bessel 函数。

当 $l=l_i \cap k=k_i$ 为假时,变换域在交叉项处的取值为:

$$C_s(k, l) = \sum_{i=1}^I E_i \sum_{m=-\infty}^{+\infty} J_m(l_i) \sum_{m=-\infty}^{+\infty} J_m(l) \cdot$$

$$\sum_{n=0}^{N-1} \exp(j2\pi m(k_i - k) \frac{n}{N}) = N \sum_{i=1}^I E_i J_0(l_i) J_0(l) \quad (14)$$

显然 $C_s(k_i, l_i) > C_s(k, l)$, 交叉项处的取值低于信号特征点。因此对含有多个 SFM 信号分量的和信号做离散正弦调频变换时,会在每个信号分量的参数匹配点 (k_i, l_i) 产生极大值。多目标的旋转频率估计目标方程可以表示为:

$$\begin{cases} (\hat{k}_i, \hat{l}_i) = \arg \max_{k, l} |C_s(k, l)| \\ \hat{f}_i = \hat{k}_i \end{cases} \quad (15)$$

2.2 群目标分离方法

通过窄带雷达观测中段弹道目标,假设目标的高速平动已完全补偿^[14-16]。经过解调后多个旋转目标的基带回波信号由式(11)表示。

首先对回波信号 $s(n)$ 进行消噪处理,然后对其做离散正弦调频变换得到变换域 $C_s(k, l)$ 。在变换域上搜索最大值,并记录其坐标,根据目标函数对目标旋转频率进行估计。

在实际情况下,由于不同散射点的散射系数会有较大差别,对多分量信号做离散正弦调频变换的实部峰值检测时,散射系数较小的分量将无法分辨。并且 Bessel 函数在主瓣附近存在多个旁瓣,直接搜索最大值可能会造成误判。因此,在对信号进行离散正弦调频变换的过程中引入消去的思想。

结合估计出的信号参数设置带阻滤波器,对原始信号进行滤波后消去最强的信号分量,再次对信号进行离散正弦调频变换,直到分离出所有目标。具体算法步骤如下:

Step 1 令 $\text{loop}=1$, 设置最低门限 M 。对雷达接收的多分量信号进行离散正弦调频变换,得到变换域 $C_s(k, l)$;

Step 2 搜索 $|C_s(k, l)|$ 上的最大值,根据式(15)的目标函数估计并记录最强分量的信号参数 \hat{k}, \hat{l} ;

Step 3 由 $\hat{f}=\hat{k}$, 在频率 \hat{f} 附近设置带阻滤波器,对原信号进行滤波处理,滤除强信号分量;

Step 4 令 $\text{loop}=\text{loop}+1$, 重复 **Step2~3**, 直到信号变换域最大值幅度低于预定门限 M , 输出各个参数估计值。

算法实现了多旋转目标窄带雷达信号的分离,通过峰值搜索即可实现参数估计,复杂度低。

3 仿真实验

3.1 算法有效性验证

假设弹道中段存在 2 个旋转微动目标 A 和 B, 每个目标包含 2 个旋转散射中心, 分别为 $p_{11}, p_{12}, p_{21}, p_{22}$ 。其主要参数设置见表 1。其中 r 为散射点

p 绕对称轴的旋转半径, z_p 为散射点 p 在参考坐标系中的 z 轴坐标。 α 为雷达视线与弹体对称轴的夹角。 R 为目标参考坐标系原点距离雷达的距离, f 为散射点 p 绕对称轴旋转频率。

表 1 参数设置表

散射点	p_{11}	p_{12}	p_{21}	p_{22}
r/m	0.3	0.35	0.8	0.6
z_p/m	0.8	0.6	0.4	0.38
$\alpha/(\circ)$	42.7	42.7	14.4	14.4
R/m	10 000	10 000	9 995	9 995
f/Hz	3	3	2.85	2.85

假设雷达发射频率 $f_c = 10$ GHz 的单频信号, 脉冲重复频率为 $PRF = 2\ 000$ Hz, 对目标雷达回波进行仿真。

在 $SNR = 0$ dB 时, 对回波信号进行 DSFMT 处理, 结果如图 2 所示。 a、b、c、d 4 个箭头分别标示出图中 4 个明显的峰值点, 其中箭头 a 和 b 所指的散射中心频率相同, 可判断为 1 个目标上的 2 个散射中心; 同理, 箭头 c 和 d 所指的也是同一目标上的散射中心。 对回波信号的 DSFMT 域进行峰值搜索, 得到第 1 个峰值点坐标 (68.2, 18.84)。 图中横纵坐标 K 、 L 分别代表参数变化范围, 为无量纲。

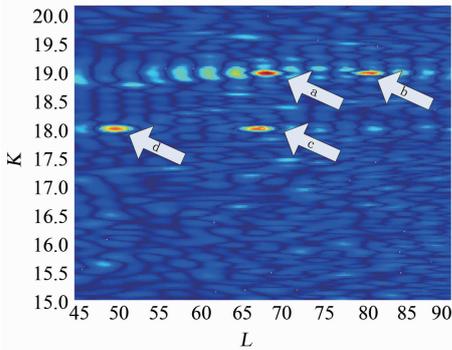


图 2 第 1 次 DSFMT 结果

设置合适的带阻滤波器, 对回波信号进行滤波, 消去 1 个目标的信号分量。 再对剩下的回波信号进行 DSFMT 处理, 结果如图 3 所示。

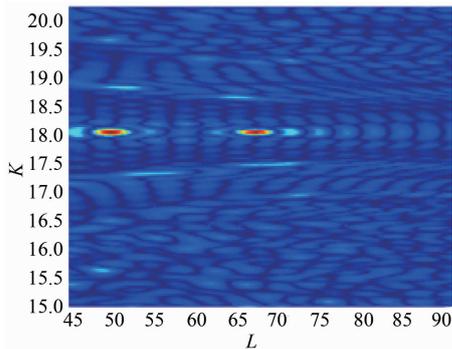


图 3 第 2 次 DSFMT 结果

从图 3 中可以看出经滤波处理后信号的 DS-

FMT 域剩下 2 个明显的峰值, 对 DSFMT 域进行峰值提取, 并根据式 (15) 估计出各散射中心的旋转频率和 L 值, 结果见表 2。

表 2 原始参数与估计结果

散射点	p_{11}	p_{12}	p_{21}	p_{22}
L	68.2	79.6	66.6	50.5
\hat{L}	67.8	80.1	66.8	49.9
f	3.00	3.00	2.85	2.85
\hat{f}	3.00	3.00	2.85	2.85

3.2 误差分析

仿真参数设置不变, 在信噪比从 -10 dB 到 5 dB 的变化范围内做 100 次蒙特卡罗仿真, 计算每个目标旋转频率的估计均方根误差。

图 4 为 $SNR = -10$ dB 时回波信号的 DSFMT 变换结果, 可以看出由于噪声的影响变换域上出现了大量伪峰, 需要对峰值门限进一步限制, 否则会对目标个数造成误判。 这里假设已经明确目标个数, 只对不同信噪比条件下的参数估计误差进行分析。 算法流程执行 2 次, 分离 2 个目标信号分量。 2 个目标旋转频率的参数估计误差见图 5。

当信噪比大于 -5 dB 时, 旋转频率的估计误差稳定在 -2.5 dB 以下。 文献 [17] 对传统的基音周期检测法进行改进, 当信噪比小于 3 dB 时, 该方法对 2 个目标旋转微动周期的估计均方根误差较大。

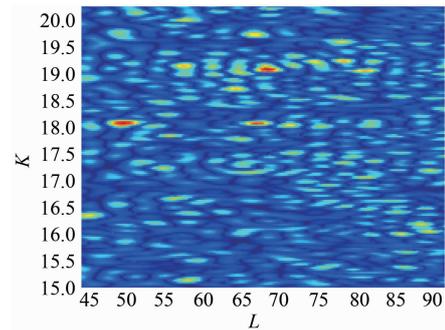


图 4 信号变换结果

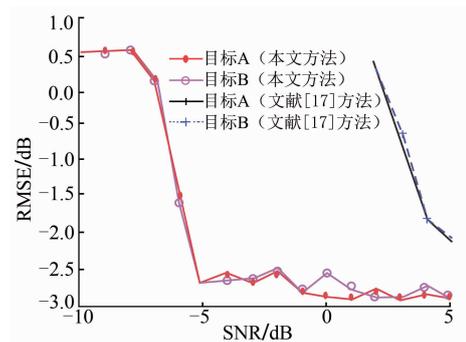


图 5 均方根误差

4 结语

旋转微动目标的分离本质上是多分量 SFM 信号的分离,基于旋转微动回波的正弦调频形式的相位变化可以将 DSFMT 应用到多分量信号的分离中。

仿真实验证明当信号 $\text{SNR} > -5 \text{ dB}$ 时,算法能有效分离 3 个旋转目标,且对其旋转频率的估计误差在 -2.5 dB 以下。当信号 $\text{SNR} \leq -5 \text{ dB}$ 时,噪声会影响算法判断目标个数,需要改进设置门限的方法提高判断的准确率。

参考文献(References):

- [1] CHEN V C. Micro-Doppler Effect in Radar [M]. USA: Artech House, 2011.
- [2] CHEN V C. Advances in Applications of Radar Micro-Doppler Signatures[C]//Proceedings of IEEE Antenna Measurements & Application France, 2014: 1-4.
- [3] CHEN V C, LI F Y, HO S S, et al. Analysis of Micro-Doppler Signatures[J]. IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation, 2003, 150(4): 271-276.
- [4] DAVID L R. Ballistic Missile Defense[J]. Journal of Electronic Defence, 2006, 29(1): 46-52.
- [5] VICTORIA S. American Missile Defense [M]. California: Praeger Security International, 2010: 44-78.
- [6] Cohort 311-1210/Team LCS. Missile Defense in the 21st Century Acquisition Environment: Exploring a BMD-Capable LCS Mission Package [M]. Monterey, CA: Naval Postgraduate School, 2013: 1-8.
- [7] JOHNSON S B. Technical and Institutional Factors in the emergence of Project Management [J]. International Journal of Project Management, 2013, 31(5): 670-681.
- [8] VICTORIA S. American Missile Defense [M]. California: Praeger Security International, 2010: 44-78.
- [9] 高红卫, 谢良贵, 文树梁, 等. 基于微多普勒特征的真假目标雷达识别研究[J]. 电波科学学报, 2008, 23(4): 775-780.
GAO H W, XIE L G, WEN S L, et al. Research on Radar Recognition of True and False Targets Based on Micro-Doppler Characteristics [J]. Journal of Radio Science, 2008, 23(4): 775-780. (in Chinese)
- [10] 张淑宁, 赵慧昌, 熊刚, 等. 基于粒子滤波的单通道正弦调频混合信号分离与参数估计[J]. 物理学报, 2014, 63(15): 158401.
ZHANG S N, ZHAO H C, XIONG G, et al. Separation and Parameter Estimation of Single Channel Sinusoidal FM Mixed Signal Based on Particle Filter [J]. Journal of Physics, 2014, 63(15): 158401. (in Chinese)
- [11] 陈广锋, 张林让, 王纯. 复合运动目标微多普勒特征的分析 and 提取[J]. 西安电子科技大学学报, 2011, 38(3): 55-62.
CHEN G F, ZHANG L R, WANG C. Analysis and Extraction of Micro-Doppler Characteristics of Compound Moving Targets [J]. Journal of Xidian University, 2011, 38(3): 55-62. (in Chinese)
- [12] 束长勇, 张生俊, 黄沛霖, 等. 基于微多普勒的空间锥体目标微动分类[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(7): 1387-1392.
SHU C Y, ZHANG S J, HUANG P L, et al. Micro Motion Classification of Space Pyramidal Targets Based on Micro Doppler [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(7): 1387-1392. (in Chinese)
- [13] 孙志国, 陈晶, 曹雪, 等. 基于离散正弦调频变换的多分量正弦调频信号参数估计方法[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(11): 1974-1979.
SUN Z G, CHEN J, CAO X, et al. Parameter Estimation of Multicomponent SFM Signals Based on Discrete Sinusoidal Frequency Modulation Transfoem[J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(11): 1974-1979. (in Chinese)
- [14] 罗迎, 柏又青, 张群, 等. 弹道目标平动补偿与微多普勒特征提取方法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(3): 602-608.
LUO Y, BAI Y Q, ZHANG Q, et al. Method of Trajectory Target Translation Compensation and Micro-Doppler Feature Extraction [J]. Journal of Electronics and Information, 2012, 34(3): 602-608. (in Chinese)
- [15] 王才, 徐成发, 冯祺, 等. 基于瞬时频率率的平动刚体目标微动参数测量[J]. 北京理工大学学报, 2017, 37(3): 318-324.
WANG C, XU C F, FENG Q, et al. Micro-Motion Parameter Measurement of Rigid Targets with Translation Based on Instantaneous Frequency Rate [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2017, 37(3): 318-324. (in Chinese)
- [16] 贺思三, 赵会宁, 张永顺. 弹道中段进动目标高精度平动补偿方法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(8): 1962-1968.
HE S S, ZHAO H N, ZHANG Y S. Translation Motion High Accuracy Compensation for Procession Ballistic Target in Midcourse [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(8): 1962-1968. (in Chinese)
- [17] 赵祎, 张盛, 林孝康. 一种改进的基音周期提取算法[J]. 数据采集与处理, 2014, 29(2): 304-308.
ZHAO Y, ZHANG S, LIN X K. An Improved Pitch Extraction Algorithm [J]. Data Acquisition and Processing, 2014, 29(2): 304-308. (in Chinese)

(编辑:徐敏)