

文章编号 :1001 - 2486(2004)02 - 0041 - 05

基于 ESPRIT 的中段弹道目标特征提取方法*

冯德军,王雪松,徐振海,肖顺平,王国玉

(国防科技大学电子科学与工程学院,湖南长沙 410073)

摘要 提出了一种新的弹道目标特征提取方法:对宽带雷达回波进行 STRETCH 处理后用 ESPRIT 方法估计其中频点,然后采用 Gerschgorin 半径方法进行散射源数目估计,去除虚假频率,获得目标散射点的数目、位置、散射中心强度等特征参数。与基于 FFT 算法的特征提取方法相比,这种方法具有更强的抑制杂波能力和更高的分辨率。仿真结果表明了该方法的有效性。

关键词 特征提取;高分辨雷达;一维距离像;旋转不变技术

中图分类号:V221 文献标识码:A

A Study of the Midcourse Ballistic Target Signatures Extracting Based on ESPRIT

FENG De-jun, WANG Xue-song, XU Zhen-hai, XIAO Shun-ping, WANG Guo-yu

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract A novel approach of extracting the high resolution signatures of the ballistic target in midcourse is proposed. This method processes high-resolution radar echo by using STRETCH and extracts the signature of the target by using ESPRIT, including the position and intensity of scattering centers. Then, the method of Gerschgorin radii is used to estimate the number of scattering centers for removing the illusive frequency dot. Compared with the FFT algorithm, this approach possesses higher resolution power and can suppress the clutter more effectively. Simulation results verify the effectiveness of the method.

Key words signature extracting; high-resolution radar; range profile; ESPRIT

真假目标识别是导弹防御的关键技术之一,其中,中段弹道目标识别被认为是识别的难点和重点^[1-3]。导弹防御系统一般采用多种手段综合识别真假,其中对目标进行一维成像是一种重要的识别手段^[4]。目标的一维像是目标对入射电磁波作了调制的结果,包含着目标径向的空间结构信息。目标一维像的波峰对应着目标表面的强散射结构或相邻的强散射结构合成,这些强散射结构称为目标的“散射中心”。散射中心的数目、散射强度及其在一维像中的位置反映了目标在径向上的电磁几何结构,通过分析它们可获取目标的长度、形状、凸凹等粗略的结构信息,由此可作为目标分类识别的特征信息,因此,它们被称为目标的一维像特征。提取有效的目标特征是目标识别中的一个重要步骤。

雷达采用大带宽 LFM 信号可获得高的距离分辨率,一般通过两种处理方法来实现:一种是对回波进行匹配滤波处理,另一种是进行 STRETCH 处理^[6,7]。STRETCH 处理可以大大降低系统的处理速度要求,对经 STRETCH 处理后的回波进行 FFT 变换可以获得目标的一维像。由于 FFT 算法存在的不足,较难进行有效的一维像特征提取。

1 STRETCH 处理的基本原理

STRETCH 处理又称“全去斜率脉压处理方法”,它只要通过全去斜率混频和一次 FFT 变换就可实现对线性调频信号的脉冲压缩,而如果采用匹配滤波器进行接收处理时,需要三次 FFT 处理^[8]。全去斜率脉压处理原理如图 1 所示。图中, $S_R(t)$ 为回波信号, $S_L(t)$ 为全去斜率的本振信号, $S_f(t)$ 为混频器输出

* 收稿日期 2003 - 10 - 20

基金项目:全国优秀博士论文专项资金项目(08100101);湖南省自然科学基金资助项目(02JJY2100)

作者简介:冯德军(1972—),男,工程师,博士生。

的中频信号 $s_N(n)$ 为经 A/D 变换后得到的中频信号, $S(L)$ 为 $s_N(n)$ 经 FFT 变换后得到的信号。设发射线性调频信号 则宽带回波信号 $S_R(t)$ 为:

$$S_R(t) = \text{rect}\left(\frac{t-T_L}{T}\right) \exp\{2j\pi[f_0(t-T_L) + \frac{1}{2}k(T_L^2 - T_L^2)]\} \quad (1)$$

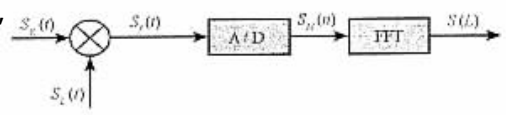


图1 STRETCH 处理框图

Fig.1 Block diagram of STRETCH processing

式中 $\text{rect}(\cdot)$ 为回波矩形包络, f_0 为起始频率, T 为时宽, k 为调频斜率, T_L 为目标回波延时。参考信号 $S_L(t)$ 是进行距离跟踪所获得的参考延时信号。当距离跟踪参考延时为 T_L 时, 混频后 输出 $S(t)$ 为:

$$S(t) = \text{rect}\left(\frac{t-T_L}{T}\right) \text{rect}\left(\frac{t-T_L}{T}\right) \exp\{2j\pi[kt(T_L - T_L) + f_0(T_L - T_L) + \frac{1}{2}k(T_L^2 - T_L^2)]\} \quad (2)$$

由(2)式可见, 去斜率混频器输出的频率和目标与参考信号间的时延差 $T_L - T_L$ 成比例, 与调频斜率有关, 而与发射信号起始频率无关, 因此, 这种处理降低了系统采样率, 而且处理简单。当参考时延选定后, 对(2)式进行 FFT 变换, 即可获得目标的一维像 $S(L)$ 。此时, $S(L)$ 中的各个谱峰点就代表了各个强散射点的距离相对位置(在下文中, 一维像中的距离均用频率替代)。

2 基于 ESPRIT 的特征提取方法

2.1 ESPRIT 方法

ESPRIT 是现代信号处理中的一种方法, 它由 Roy 等人提出, 现在得到了广泛的应用^[9]。ESPRIT 方法能很好地估计谐波信号的个数、频率以及谐波功率, 而且, 其估计精度较 FFT 算法要高得多。

假设去斜率后的回波中存在 p 个谐波, 那么混频器的输出可以写成

$$x(n) = \sum_{i=1}^p s_i(n) e^{jm\omega_i} + \xi(n) \quad (3)$$

式中, $s_i(n)$ 和 ω_i 分别是第 i 个谐波的幅值和频率, $\xi(n)$ 表示噪声, 这里假设混频后的脉冲采样 N 个点, 即 $n = 1 \sim N$ 。现在定义一个新的过程 $x_1(n) = x(n+1)$, 并引入旋转算符 Φ , 那么(3)式可以写成

$$\begin{cases} x = AS + \xi \\ x_1 = A\Phi S + \xi' \end{cases} \quad (4)$$

式中, $A = [e(j\omega_1) \ e(j\omega_2) \ \dots \ e(j\omega_p)]$, $e(j\omega_i) = [e^0, e^{j\omega_i}, e^{2j\omega_i}, \dots, e^{m\omega_i}]$ ($m > P$), $S = [s_1(n) \ s_2(n) \ \dots \ s_p(n)]$, ξ 和 ξ' 分别为噪声向量和旋转噪声向量。由于不同频率正弦信号之间及各信号与噪声之间均是正交的, 因此, 可以得到向量 x 的自相关矩阵及它和向量 x_1 的互相关矩阵

$$\begin{cases} R_{xx} = E[xx^H] = APA^H + \sigma^2 I \\ R_{xx_1} = E[xx_1^H] = A\Phi A^H + \sigma^2 Z \end{cases} \quad (5)$$

(5)式中 $P = \text{diag}\{E\{|s_1(n)|^2\}, \dots, E\{|s_p(n)|^2\}\}$ 为一对角矩阵, Z 是一个特殊矩阵, 它主对角下左下方次对角线元素全为 1, 其余全为 0。对 R_{xx} 和 R_{xx_1} 作特征值分解, 构造一对新的矩阵

$$\begin{cases} C_{xx} = R_{xx} - \lambda_{\min} I \\ C_{xx_1} = R_{xx_1} - \lambda_{\min} Z \end{cases} \quad (6)$$

式中, λ_{\min} 为矩阵 R_{xx} 的最小特征值。构造矩阵束 $\{C_{xx}, C_{xx_1}\}$, 对其进行特征值分解, 可以得到矩阵束的广义特征值矩阵 γ , 可以证明^[9] 矩阵 γ 与旋转算符矩阵 Φ 之间有下列关系

$$\gamma = \begin{vmatrix} \Phi & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (7)$$

所以, 在获得广义特征值后, 可以直接得到谐波频率 ω 的估计。为避免求解困难和出现病态解, 还可采用最小二乘法(TLS)和奇异值分解(SVD)等方法对算法进行改进, 具体参见文献[9]。

2.2 特征提取

由 STRETCH 处理可看出,经去斜率后,混频器输出的是各个频点混合的信号,因此,采用 ESPRIT 替代 FFT 变换,能更精确地估计出频率,从而提取散射点的位置特征。在实际中,由于散射点的个数在计算时是未知的,必须对估计出的频率进行散射点数目的估计,这样才能消去虚假点频。Hsien-Tsai Wu 等人提出了一种散射源数目估计的方法,基本思想是利用 Gerschgorin 半径进行源点数目估计^[10],在获得后,根据特征分解构造 Gerschgorin 半径阈值,根据阈值判定散射源数目^[10]。这样可获得散射源的真实数目。然后利用最小二乘估计,估计出各个频点的功率,也就是各散射点散射强度。由(4)式可得

$$\hat{P} = (A^H A)^{-1} A^H x \quad (8)$$

由以上处理可看出整个特征提取的基本流程:先采用 STRETCH 处理降低了采样频率,然后用 ESPRIT 方法估计信号频率,再用 Gerschgorin 方法去除虚假点频,最后用最小二乘方法估计散射强度,便获得了散射点的数目、频率、散射强度等目标特征。特征提取的基本流程如图 2 所示。

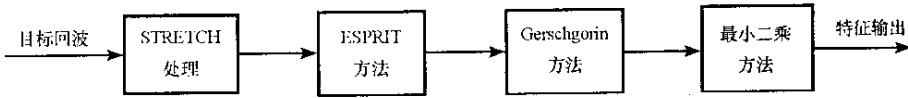


图 2 特征提取的基本流程

Fig.2 Block diagram of signature extracting

3 中段弹道目标一维成像和特征提取

3.1 中段弹道仿真

对中远程导弹来说,中段弹道是其整个弹道中距离最长的一段。在此阶段,目标的运动是相对平稳的。如果将地球看成均匀球体,将弹头看作质点,则目标的运动就是所谓的“二体问题”。此时,目标的飞行状态取决于目标的主动段关机参数,即关机速度 V_k 、地心距 r_k 和弹道倾角 θ_k ^[11]。仿真的一个最小能量弹道如图 3 所示。有关参数设置如下, $V_k = 2\text{km/s}$, $r_k = 80\text{km}$ 。A1、B1、C1 为不同弹道阶段的三个点,雷达位于图中的 R 点处,所处极角 $\phi = 3.2$ 。

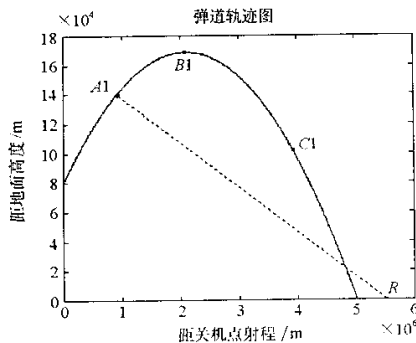


图 3 目标中段弹道

Fig.3 Target trajectory in midcourse

3.2 目标成像和特征提取

目标模型由 A、B、C、D、E 五个散射点组成,各个散射点在一条直线上,相互之间均相距 1.5m。A 点输出信噪比为 3dB,其余四个散射点输出信噪比为 0dB。成像时,选取 O 点作为参考距离点,O 点距 A 点的距离也为 1.5m。目标飞行方向与轴向一致。根据图 3 所示弹道中的 A1 点的位置进行回波模拟,此时雷达视线与目标轴向的夹角为 40° 。雷达的参数设置如下:中心频率为 10GHz,带宽为 1GHz,雷达发射脉宽为 $100\mu\text{s}$,调频斜率为 $k = 10^{12}\text{s}^{-2}$,雷达重复频率为 200Hz。进行 STRETCH 处理后,加矩形窗,分别采用 FFT 算法和 ESPRIT 算法,图 4、图 5 分别是用两种方法获得的一维像。

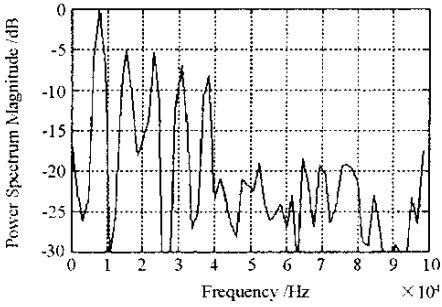


图4 FFT算法获得的一维像
Fig.4 Range profile obtained with FFT

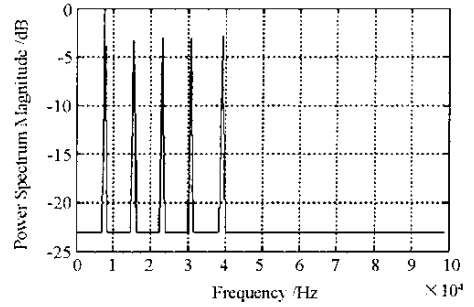


图5 ESPRIT算法获得的一维像
Fig.5 Range profile obtained with ESPRIT

由图4、图5的对比可看出,ESPRIT算法有比FFT算法更强的抑制杂波能力,这是由于ESPRIT算法估计出的散射点数是有限的,而且采用了Gerschgorin半径方法进行源点数目估计,去除了虚假散射点,所以ESPRIT方法去除了背景干扰。由图4和图5的对比还可看出,ESPRIT方法获得的一维像谱峰较尖,这说明它具有较高的分辨率。为了进一步说明这一点,将图4中的B、C两点以及D、E两点之间的距离分别调整为0.3m,其它参数不变,图6、图7分别给出了两种算法对邻近散射点的分辨。

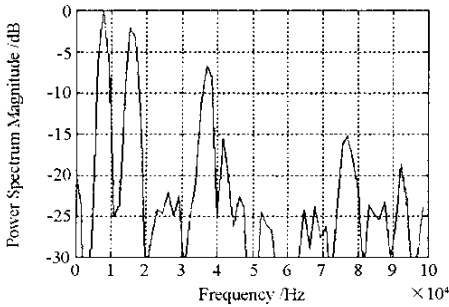


图6 FFT算法对邻近散射点的分辨
Fig.6 Resolving adjacent scatter center using FFT

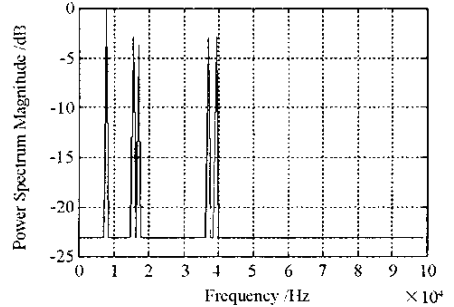


图7 ESPRIT算法对邻近散射点的分辨
Fig.7 Resolving adjacent scatter center using ESPRIT

由图6和图7的对比可见,当散射点相距很近时,FFT算法只能分辨出3个谱峰,而ESPRIT算法依然能清晰地分辨出5个谱峰。这说明ESPRIT算法具有更高的分辨率。

本文所提出的特征提取方法还能有效提取目标的散射点的散射强度特征,多次仿真表明,估计出的散射点强度在真值附近波动,误差小于15%。由于目标上各个散射点散射强度的动态范围很大,因此,对各个强散射点的位置和散射强度进行联合跟踪估计,可以推知目标散射点的运动等信息,从而实现目标特征的有效抽取。

目标的空中姿态对于一维成像十分关键。反之,获得目标的一维像后,也可以反推目标相对于雷达视线的空中姿态,从而获得目标的运动信息。图8、9分别给出了B1、C1两点的一维像(B1、C1点目标轴向与雷达视线的夹角分别为 30° 、 0°)。

由图8、9可以清楚地看出,在弹道的不同阶段,同一个散射点的回波频率是不同的,而且,两个散射点之间的频率差也是不同的,反映到距离上,也就是目标一维距离像长度是变化的。根据这一性质,对各散射点在各个脉冲周期之间的频率变化进行跟踪,可以确知散射点的频率变化周期,从而进一步推导出目标的旋转速率等特征。

4 结论

提出了一种采用STRETCH处理结合ESPRIT方法和Gerschgorin半径方法对中段弹道目标进行一维雷达成像和特征提取的新方法。介绍了这一新方法的基本原理,仿真了中段弹道,采用这一方法对不同弹

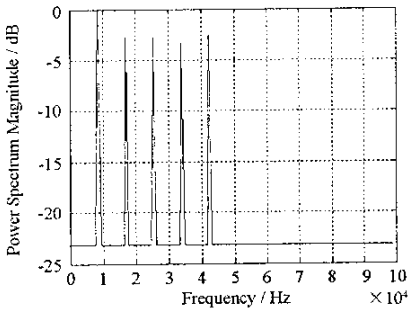


图8 B1点的一维像
Fig.8 Range profile of B1

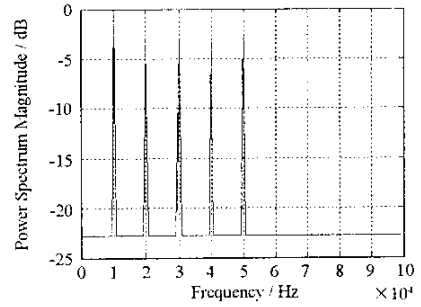


图9 C1点的一维像
Fig.9 Range profile of C1

道阶段的目标进行成像和特征提取,并与STRETCH结合FFT处理的方法进行了比较。仿真结果表明,提出的新方法能有效提取目标散射点的数目、位置、散射强度等特征,并能根据散射点特征变化规律推知目标的旋转速率等运动特性。与传统的处理方法相比,本文的方法具有更高的分辨率和更强的杂波抑制能力,是一种有效的一维特征提取方法。采用这一方法进行特征提取将为下一步的真假弹道目标识别奠定良好的基础。

参考文献:

- [1] 胡劲松,译.了解国家导弹防御系统[J].863先进防御技术通讯(A类),2000,10:2-42.
- [2] 史别,译.识别真假目标是NMD的最大技术难题[J].863先进防御技术通讯(A类),2001,8:30-32.
- [3] 格朗伦德,刘易斯,斯托波尔.最薄弱的环节:拦截弹道导弹[J].863先进防御技术通讯(A类),1997,4:20-37.
- [4] 马骏声.目标识别与GBR地基成像雷达[J].航天电子对抗,1996,4:1-5.
- [5] 戴征坚,胡卫东,郝文贤.空间目标ISAR成像识别[J].航天电子对抗,2000,3:34-38.
- [6] Caputi W J. STRETCH: A Time-transformation Technique[J]. IEEE Trans. on AES, 1971, 7(2): 269-278.
- [7] 国家高技术863-308专题专家组.逆合成孔径雷达论文集[C].1996,3:1-14.
- [8] 鹿国春.雷达距离维成像技术[J].火控雷达技术,2000,3:12-16.
- [9] 张贤达.现代信号处理[M].北京:清华大学出版社,2002.
- [10] Wu Hsien-Tsai, Yang Jar-Ferr, Chen Fwu-Kuen. Source Number Estimators Using Transformed Gerschgorin Radii[J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 1995, 43(6): 1325-1332.
- [11] 张毅,等.弹道导弹弹道学[M].长沙:国防科技大学出版社,1999.

