

基于双正交 FDWT 的雷达数据压缩和目标识别方法¹

唐白玉 褚扬清* 姜文利 柯有安

(北京理工大学电子工程系 北京 100081)

*(航天部 207 所 北京 100854)

摘要 本文由双正交共轭滤波器构造有限维内积空间的双正交多分辨分析和快速离散小波变换 (FDWT), 提出信号的对偶小波变换方法, 并将其用于降低雷达数据存储量, 提出双正交变换系数筛选方法以及基于压缩数据的小波域相关和最小距离分类方法。通过六种飞机目标的距离高分辨数据的分类实验, 证明本文提出的变换、压缩和识别方法是有效的。

关键词 小波, 小波变换, 雷达信号处理, 目标识别, 数据压缩

中图分类号 TN951, O158

1 引言

文献 [1] 基于正交共轭滤波系统构造了有限长数据序列的离散小波变换, 并给出了雷达数据压缩方法和小波变换域相关识别和最小距离分类方法, 不需要重建模板, 计算量大大减少。本文进一步从理论上消除文献 [1] 的正交性条件, 将方法推广到双正交情形。

2 $l^2(Z)$ 的共轭滤波系统的周期化

设 F 是序列 $f(i) \in l^2(Z)$ (Z 是整数集) 定义的卷积滤波下采样算子, F^* 为其伴随算子:

$$Fu(i) = \sum_{j \in Z} f(2i - j)u(j); \quad F^*u(j) = \sum_{i \in Z} \bar{f}(2i - j)u(i), \quad (1)$$

\bar{f} 表示 f 的复共轭值。由序列 $h(i)$ 、 $h'(i)$ 、 $g(i)$ 和 $g'(i)$ ($i \in Z$) 定义的卷积滤波下采样算子四件套 $\{H, H', G, G'\}$, 若满足下面四项条件, 则称为双正交共轭滤波系统。

- (1) $G'G^* = H'H^* = I$, (I 为单位算子);
- (2) $G'H^* = H'G^* = 0$, (零算子);
- (3) $G^*G' + H^*H' = I$;
- (4) $H1 = H'1 = \sqrt{2}1$, (1 表示恒为 1 的序列);
 $G1 = G'1 = 0$, (0 表示恒为零的序列)。

条件 (4) 表明滤波器是低通或高通的。高低通组合协同下采样, 可得到带通特性。若分别称 h' 和 g' 为尺度序列和小波序列, 则称 h 和 g 为对偶尺度序列和对偶小波序列。或者反之。

¹ 1996-09-13 收到, 1997-05-13 定稿

我们处理的信号序列常常是有限长的, 不希望线性卷积的边界效应增加序列长度, 给压缩数据和计算增加负担。将序列周期延拓可以克服这一困难。

$$u_N(i) = \sum_{k \in Z} u(i + Nk), \quad i \in Z, \quad (2)$$

$u_N(i)$ 称为 $u(i)$ 的 N 周期化序列。对于长度为 N_0 的被处理序列 x , 设 $N \geq N_0$ 。设滤波器序列 $f(i) \in l(Z)$ (绝对可和序列空间), 这里把 $f(i)$ 周期化得周期滤波序列 $f_N(i)$, 然后做周期卷积滤波。序列 $f(i)$ 可以是无限长的。周期卷积滤波下采样算子 F_N 及其伴随算子 F_N^* 定义如下

$$F_N u_N(i) = \sum_{j=0}^{N-1} f_N(2i-j)u_N(j), \quad F_N^* u_{N/2}(j) = \sum_{i=0}^{N/2-1} \bar{f}_N(2i-j)u_{N/2}(i). \quad (3)$$

本文中, 当 N 除以某正整数时, 总默认能被整除。将 N 周期序列、长度为 N 的序列与 N 维矢量空间 C^N 中的元素以及 $N \times 1$ 维的矩阵等同。 x 和 $y \in C^N$ 的内积定义为

$$\langle x, y \rangle = x^* y = \sum_{i=0}^{N-1} \bar{x}(i)y(i). \quad (4)$$

x^* 是 x 的共轭转置。此时 F_N 可以方便地写为 $(N/2) \times N$ 维矩阵, F_N^* 是 F_N 的共轭转置。周期化不破坏高低通条件等。周期化共轭滤波系统满足:

$$G'_N G_N^* = H'_N H_N^* = I_{(N/2) \times (N/2)}, \quad (5a)$$

$$G'_N H_N^* = H'_N G_N^* = 0_{(N/2) \times (N/2)}, \quad (5b)$$

$$G_N^* G'_N + H_N^* H'_N = I_{N \times N}, \quad (5c)$$

3 离散双正交小波变换

滤波下采样算子 G'_N 和 H'_N 输出两个 $(N/2)$ 周期序列, $N/2$ 周期序列可再受 $N/2$ 周期滤波下采样算子作用。投影算子 $G_N^* G'_N$ 、 $H_N^* H'_N$ 将 C^N 分解为两个 $N/2$ 维子空间的直和 (一般说来, 是非正交的)。在 (5c) 式中的 H_N^* 与低通算子 H'_N 间插入单位算子式:

$$I_{(N/2) \times (N/2)} = G_{N/2}^* G'_{N/2} + H_{N/2}^* H'_{N/2}, \quad (6)$$

得

$$G_N^* G'_N + H_N^* G_{N/2}^* G'_{N/2} H'_N + H_N^* H_{N/2}^* H'_{N/2} H'_N = I_{N \times N}. \quad (7)$$

设 M 是一奇数, $N = 2^L M$, $L > 1$, 则可用类似的方法, 继续插入适当维数的单位算子式, 直至 H_{2M}^* 和 H'_{2M} 。注意到 (5c) 式和 (7) 式左边的末项, 能发现这一过程可得到子空间链:

$$V_L \subset V_{L-1} \subset \cdots \subset V_0 = C^N, \quad V_l = H^l H^l C^N, \quad l = 1, 2, \cdots, L, \quad (8)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} H^l &= H'_{N/2^{l-1}} H'_{N/2^{l-2}} \cdots H'_{N/2^{l-1}}, & l &= 1, 2, \cdots, L; \\ H^{l+1} &= H'_{N/2^l} H^l, & l &= 1, 2, \cdots, L-1; \\ H^l &= H_{N/2^{l-1}} H_{N/2^{l-2}} \cdots H_{N/2^{l-1}}, & l &= 1, 2, \cdots, L; \\ H^{l+1} &= H_{N/2^l} H^l, & l &= 1, 2, \cdots, L-1. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

H^{l*} 是 H^l 的共轭转置。(8) 式的子空间链称为 C^N 的一个多分辨分析, V_l 称为 C^N 的多分辨子空间。由于下采样和滤波器的低通性, l 越大分辨率越低。 V_l 在 V_{l-1} 中的补空间记为 W_l ,

$$\left. \begin{aligned} G^{l1} &= G'_N, & G^{l+1} &= G'_{N/2^l} H^{ll}, & l &= 1, 2, \dots, L-1; \\ G^1 &= G_N, & G^{l+1} &= G_{N/2^l} H^l, & l &= 1, 2, \dots, L-1; \\ W_l &= G^{l*} G^l C^N, & & & l &= 1, 2, \dots, L; \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

W_l 称为 C^N 的小波子空间。 W_l 收容了由于算子 $H_{N/2^{(l-1)}}^* H'_{N/2^{(l-1)}}$ 的作用信号从 V_{l-1} 中被投影到 V_l 中而丢失的高频“细节”信息。 \oplus 表示直和, 由 (7) 式 ~ (10) 式以及插入单位算子式的过程可知

$$V_{l-1} = V_l \oplus W_l, \quad C^N = V_l \oplus \bigoplus_{k=1}^l W_k, \quad 1 \leq l \leq L.$$

矩阵 H^{l*} 的列向量给出的序列称为 V_l 的尺度序列, 是一个 N 周期序列的平移系, 平移步长为 2^l 。矩阵 G^{l*} 的列向量给出的序列称为 W_l 的离散小波基, 也是一个 N 周期序列的平移系, 平移步长也为 2^l 。

将 (5) 式等算子矩阵等式两边取共轭转置, 显然可得另一族多分辨子空间 V'_l 和小波子空间 W'_l ,

$$V'_l = H^{l*} H^l C^N, \quad W'_l = G^{l*} G^l C^N, \quad l = 1, 2, \dots, L. \quad (11)$$

矩阵 H^{l*} 和 G^{l*} 的列向量分别给出 V'_l 的尺度序列和 W'_l 的离散小波基, 为与 V_l 、 W_l 的尺度序列和小波对应和区别, 分别称它们为对偶尺度序列和对偶小波。

设

$$\left. \begin{aligned} WT^* &= [G^{1*} \ G^{2*} \ G^{3*} \ \dots \ G^{L*} \ H^{L*}], \\ WT'^* &= [G'^{1*} \ G'^{2*} \ G'^{3*} \ \dots \ G'^{L*} \ H'^{L*}]. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

算子 WT 和 WT' 定义了两个 C^N 至 C^N 的映射

$$u \rightarrow WTu, \quad u \rightarrow WT'u, \quad (u \in C^N). \quad (13)$$

若将其中一个称为小波变换, 则称另一个为对偶小波变换。 WT 和 WT' 的逆变换, 分别用算子 WT'^* 和 WT^* 实现。

用矩阵或算子来叙述和推导公式是方便的, 但实际计算时并不必做矩阵运算。从算子的滤波器定义方法, 插入单位算子式的过程, (9) 式、(10) 式的 H^{l+1} 、 G^{l+1} 与 H^l 的递推关系, 以及 H^{l+1} 、 G^{l+1} 与 H^l 的递推关系, 易知正逆变换均可用 Mallat 多分辨分析算法的塔式结构快速实现。为区别于无穷序列的离散小波变换 (DWT), 与快速周期离散傅里叶变换 (FFT) 对应, 我们将这里的变换方法称为双正交离散小波变换 FDWT。

4 变换系数筛选方法

基于小波变换的数据压缩, 在许多应用领域, 变换系数的筛选都是关键的。最常用的简单方法是, 仅保留模最大的一部分系数^[1]。更复杂的处理, 可以据实际情况定义适当的目标函数, 用优化目标函数的方法确定系数的取舍^[2]。我们希望经修正的变换系数的重建信号与原信号的相关性强, 正交变换情形应与文献 [1] 一致, 同时处理方法尽可能简单。设 $x_w = WT x$, 是雷达目标模板信号 $x(n) \in C^N$ 的小波变换系数序列。仅保留 $x_w(n)$ 的某 P 个数据, 其余忽略不

计, 默认为零。修正变换系数的这一步骤用算子 M_x 表示。 M_x 依赖于被处理信号 x 。 $x_w(n)$ 的修正重建信号可表示为

$$x_M = WT'^* M_x WT x, \quad (14)$$

则

$$\langle x, x_M \rangle = x^* WT'^* M_x WT x = \langle WT' x, M_x WT x \rangle. \quad (15)$$

所以可得出一种新的系数选择策略: 同时对 x 作对偶小波变换, $x'_w = WT' x$, 保留序列 $r(n) = x'_w(n)x_w(n)$ 最大 (设为实数) 的 P 个值对应的 $x_w(n)$ 。为减少识别时的计算量, 求出并存储 x_M 的能量归一化因子。

正交变换情形, $WT' = WT$, 即是选取模最大的 P 个变换系数^[1]。

5 基于压缩数据的目标识别方法

本节提及模板时, 指经过筛选处理的小波域系数序列或其逆变换序列, 分别用 x_w 和 x 表示。 x 的能量记为 E_x 。

显然, 可由压缩数据经逆变换重建模板信号序列再作相关等识别。小波变换压缩了模板数据存储量, 其代价是识别时重建大量模板增加了计算负担。

设 $y(n)$ 是未知目标数据序列, 能量为 E_y 。 $y'_w(n)$ 是 $y(n)$ 的对偶小波变换序列。 $y(n)$ 与 $x(n)$ 的相关系数定义为

$$\rho_x = |\langle y, x \rangle| / (\sqrt{E_y} \sqrt{E_x}). \quad (16)$$

因为

$$\langle y'_w, x_w \rangle = \langle WT' y, WT x \rangle = y^* WT'^* WT x = \langle y, x \rangle, \quad (17)$$

所以, 将未知目标信号 $y(n)$ 作对偶小波变换后, 可以在变换域内实现相关运算:

$$\rho_x = \frac{|\langle y'_w, x_w \rangle|}{\sqrt{E_y} \sqrt{E_x}} = \frac{\left| \sum_{x_w(i) \neq 0} \bar{y}'_w(i) x_w(i) \right|}{\sqrt{E_y} \sqrt{E_x}}. \quad (18)$$

在小波域, $y(n)$ 与 $x(n)$ 的距离为

$$d_x = \langle y - x, y - x \rangle = E_y + E_x - \sum_{x_w(i) \neq 0} (\bar{y}'_w(i) x_w(i) + \overline{\bar{y}'_w(i) x_w(i)}). \quad (19)$$

求得 $y(n)$ 与所有模板的相关系数或距离后, 与文献 [1] 的方法一样, 最大的相关系数或最小的距离即指示了目标的类别。解决时间参考点问题的思想方法也与文献 [1] 类似。

6 实验结果和结论

用文献 [1] 的非压缩平均模板和未知目标数据进行数据压缩和分类识别实验。图 1 和图 2 是六种飞机目标的距离高分辨数据的成功识别率曲线。图 1 是用 16 个模板小波系数 (排除直流系数 $x_w(255)$) 在变换域相关识别的结果。图 2 是仅用 8 个模板小波系数的变换域最小距离分类的结果。实验采用样条滤波系统^[3], 尺度滤波器 $h(n)$ 及其对偶滤波器 $h'(n)$ 如表 1 所示, 小波滤波器 $g(n) = (-1)^n h(1-n)$, 对偶小波滤波器 $g'(n) = (-1)^n h(1-n)$ 。

结果表明, 仅采用模板的少数重要的小波系数, 在小波域实现相关识别或最小距离分类, 即使在信噪比低至 0dB 时也能获得很好的分类结果。实验中, 所取模板数目是一定的, 但是, 数据量和计算量减少, 为增加模板数目以获得更好识别效果创造了条件。本文提出的变换、压缩和识别方法是可行的。小波域模板序列仅有 P 个非零值, 一般 P 远小于 N , 所以不仅减少了存储量, 而且不需重建大量模板, 内积的运算量也减少。文献 [1] 的变换、压缩和识别方法都是本文的特例, 本文拓宽了小波滤波器等的选择余地和方法的适用范围。

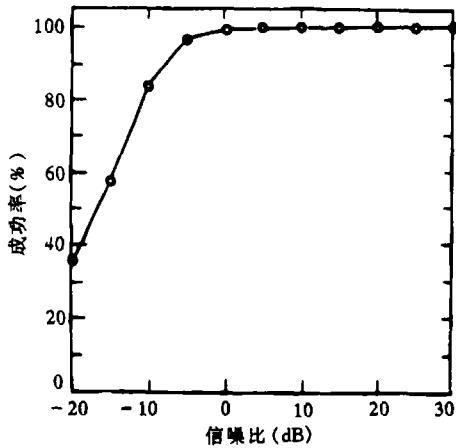


图 1 16 系数模板相关分类结果

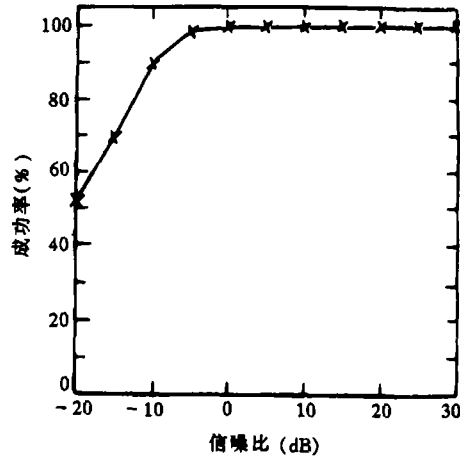


图 2 8 系数模板最近邻分类结果

表 1 尺度滤波器和对偶滤波器序列

n	0	± 1	± 2	± 3
$2^{-1/2}h(n)$	0.6	0.25	-0.05	0
$2^{-1/2}h'(n)$	17/28	73/280	-3/56	-3/280

参 考 文 献

- [1] 唐白玉, 褚扬清, 柯有安. 正交 FDWT 与雷达数据压缩及目标识别方法. 系统工程与电子技术, 1997, 19(8): 4-7.
- [2] Waagen D E, Argast J D, McDonnell J R. Evolving wavelet compression strategies. AD-A281247.
- [3] Antonini M, Barland M, Mathieu P, Daubechies I. Image coding using wavelet transform. IEEE Trans. on Image Processing, 1992, IP-1(2): 205-220.

THE METHODS OF RADAR DATA COMPRESSION AND TARGET IDENTIFICATION BASED ON BIORTHOGONAL FDWT

Tang Baiyu Chu Yangqing* Jiang Wenli Ke Youan

(*Department of Electronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081*)

(**207 Institute, Ministry of Aero-Space Industry, Beijing 100854*)

Abstract In this paper, by using the biorthogonal quadrature filters, the biorthogonal multiresolution of finite dimension space equipped with inner product and the fast discrete wavelet transform (FDWT) are constructed. The dual transform method is proposed and the radar data storage is reduced by it. The method of choosing the wavelet coefficients, and the methods of correlation and nearest neighbor classification in wavelet domain based on the compressed data, are presented. The experimental results of the classification, using the high resolution range returns from six kinds of aircraft, show that the methods of transform, compression and recognition are efficient.

Key words Wavelet, Wavelet transform, Radar signal processing, Target identification, Data compression

唐白玉: 男, 1967 年生, 博士后, 研究方向包括小波分析、模式识别、雷达信号处理等.

褚扬清: 男, 1969 年生, 硕士, 研究方向包括雷达信号处理, 雷达目标识别, 小波变换, 地、海杂波的研究和建模等.

姜文利: 男, 1967 年生, 博士, 感兴趣的研究方向包括雷达目标识别、神经网络、参数估计、计算机辅助设计等.

柯有安: 男, 1932 年生, 教授, 博士生导师, 电子科技导报主编、IEEE AES 北京分会主席、国务院学位与研究生教育评估研究所所长. 研究领域包括雷达信号处理、语音识别、图象处理、神经网络、小波理论等.