

实值离散 Gabor 变换用于雷达信号的表示

况 伟,陶 亮

(安徽大学 计算智能与信号处理教育部重点实验室,安徽 合肥 230039)

摘 要:针对雷达在检测弱目标能力的不足,基于雷达信号与噪声的实际模型,为构建基于实值离散 Gabor 变换的移动目标检测系统(MTD),提出了一种基于实值离散 Gabor 变换(RDGT)的快速的雷达信号 Gabor 表示算法。基于 DCT 的实值离散 Gabor 变换是一种重要的联合时频域分析工具,文中采用基于 DCT 的实值离散 Gabor 变换的算法对雷达信号进行 Gabor 域表示,并给出了一些仿真实验来验证算法的有效性。仿真结果表明该算法能够将被白噪声污染的不同多普勒频率不同到达时间的雷达目标回波信号在联合时频域中进行有效地区分。

关键词:实值离散 Gabor 变换;雷达信号;联合时频分析

中图分类号: TN911.72

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2010)10-0131-06

Gabor Representation for Radar Signals via Real-Valued Discrete Gabor Transform

KUANG Wei, TAO Liang

(Ministry of Edu. Key Lab. of Intelligent Computing & Signal Processing, Anhui University, Hefei 230039, China)

Abstract: For the insufficiency of detecting weak radar targets, basing on the radar signals and noise actual model, a fast algorithm for the Gabor representation for radar signals is presented to structure the moving target detection (MTD) system based on real-valued discrete Gabor transforms. In this paper, as an important joint time-frequency analysis tool, DCT-based real-valued discrete Gabor transform is utilized to represent the radar signals in the Gabor domain. Numerical examples are given to demonstrate the efficiency of the algorithm. The simulation results show that the proposed algorithm is capable of separating echoes of the objects with different doppler frequencies, various arrival times, and additive white noises.

Key words: real-valued discrete Gabor transforms; radar signals; joint time-frequency analysis

0 引 言

雷达(Radar)一词是“Radio Detection and Ranging (无线电探测和测距)”缩写的音译,起源于1940年第二次世界大战期间美国海军的一个保密代号,是现代电子科学技术各种成就相结合的高科技系统,其基本任务是探测目标,并且通过对目标回波的处理,从而提取出目标的距离、坐标、速度、运动轨迹以及识别目标特性。雷达在军事和民用等方面有着广泛的用途。根据其载体的不同可分为地面(含车载)、舰载、机载等。雷达是通过发射电磁信号,再从接收信号中检测目标回波来探测目标的。在接收到的信号中,包括了目标回波信号,但是同时也会混杂了各种噪声,主要是接收机的热噪声;还有各种杂波信号,地面、海面、云雨等产

生的杂波;以及工业、广播、人为等各种干扰信号。所以在这种复杂的信号背景下,雷达要成功地提取目标物的距离、角度、速度、性质等等有用信息必须要对雷达接收到的信号进行信号处理,前文提到的基于DCT的实值离散 Gabor 变换就是一种十分有效的信号处理方法。

Gabor 变换是一种重要的时频分析工具,在雷达信号等类似的瞬变信号的表示和处理方面有着十分显著的效果,已有文献对此进行了报道^[1~3],其中, Friedlander 等人提出的连续复值 Gabor 变换在这方面的应用最具代表性。然而,对于连续复值 Gabor 变换来说,与综合窗函数相对应的分析窗函数的求解存在明显的不足,除了单边指数综合窗等少数的窗函数外,大多数的综合窗都无法求解其对应的分析窗解析式^[2];其次,由于连续复值 Gabor 变换涉及较多的复值计算,因此不利于实现快速的数值计算。文中所采用的基于 DCT 的实值离散 Gabor 变换^[4]可以有效地克服连续复值 Gabor 变换的上述缺陷。

收稿日期:2010-01-27;修回日期:2010-04-21

作者简介:况 伟(1984-),男,硕士研究生,研究方向为图像处理、模式识别、机器学习;陶 亮,博士,教授,博士生导师,研究方向为数字信号与图像处理、模式识别。

1 基于 DCT 的实值离散 Gabor 变换

假设 $x(k)$ 是一周期为 L 的有限长或经周期拓展的时间序列, 实值离散 Gabor 展开式^[5] 定义为

$$x(k) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} a(m, n) \tilde{h}_{m,n}(k) \quad (1)$$

实值离散 Gabor 变换式定义为

$$a(m, n) = \sum_{k=0}^{L-1} x(k) \tilde{\gamma}_{m,n}(k) \quad (2)$$

其中

$$\tilde{h}_{m,n}(k) = \tilde{h}(k - m\bar{N}) \cdot$$

$$\sqrt{\frac{2}{N}} \cos \frac{\pi[2\text{mod}(k, N) + 1]\text{mod}(n, N)}{2N} g_n \quad (3)$$

$$\tilde{\gamma}_{m,n}(k) = \tilde{\gamma}(k - m\bar{N}) \cdot$$

$$\sqrt{\frac{2}{N}} \cos \frac{\pi[2\text{mod}(k, N) + 1]\text{mod}(n, N)}{2N} g_n \quad (4)$$

$$g_n = \begin{cases} 1/\sqrt{2}, n = 0, N \\ 1, n = 1, 2, \dots, N-1 \end{cases} \quad (5)$$

$\text{mod}(k, N)$ 是指 k 对 N 的求余运算, $\text{mod}(n, N)$ 为 n 对 N 的求余运算。

$L = \bar{N}M = N\bar{M}$, M 为时域中的抽样点数, \bar{N} 为时间的抽样间隔, N 为频域中的抽样点数, \bar{M} 为频率的抽样间隔。与复值离散 Gabor 变换^[4] 相类似, $\bar{N}\bar{M} \leq L$ (或 $MN \geq L$) 是实值离散 Gabor 展开是否完备的必要条件。

这里 $\tilde{h}(k)$ 为综合窗函数 $h(k)$ 的周期拓展

$$\tilde{h}(k) = \sum_i h(k + iL) = \tilde{h}(k + L) \quad (6)$$

同样的, $\tilde{\gamma}(k)$ 为分析窗函数 $\gamma(k)$ 的周期拓展

$$\tilde{\gamma}(k) = \sum_i \gamma(k + iL) = \tilde{\gamma}(k + L) \quad (7)$$

通常假设 $\tilde{h}(k)$ 受能量归一化约束

$$\sum_{k=0}^{L-1} |\tilde{h}(k)|^2 = 1 \quad (8)$$

实值离散 Gabor 系数 $a(m, n)$ 是以 m 和 n 为变量的周期实函数

$$a(m + iM, n + iN) = a(m, n) \quad (9)$$

$$i, j = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

下面将介绍关键的双正交分析窗的求法。

$\tilde{h}(k)$ 与 $\tilde{\gamma}(k)$ 满足下列双正交条件式^[6]:

$$\sum_{k=0}^{L-1} \tilde{h}(k + mN) \cdot \tilde{\gamma}(k) \cdot g_n \sqrt{\frac{2}{N}} \cdot \cos \frac{\pi[2\text{mod}(k, \bar{N}) + 1]n}{2\bar{N}} = \sqrt{\bar{N}} \delta(m) \delta(n) \quad (10)$$

$$0 \leq m \leq \bar{M} - 1, 0 \leq n \leq \bar{N} - 1$$

这里 $\delta(k)$ 表示 Dirac $\delta(k)$ 函数:

$$\delta(k) = \begin{cases} 1, k = 0 \\ 0, k \neq 0 \end{cases}$$

双正交条件式(式(10))也可以用矩阵的形式来

表示:

$$\mathbf{H} \cdot \boldsymbol{\gamma} = \mathbf{v} \quad (11)$$

这里 \mathbf{v} 是一个长度为 $\bar{M}\bar{N}$ 的矢量, 其第一个元素值为 $\sqrt{\bar{N}}$, 其余为 0。

$$\mathbf{v} = \{\sqrt{\bar{N}}, 0, 0, \dots, 0\}^T$$

$\boldsymbol{\gamma}$ 是一个以 $\tilde{\gamma}(k)$ 为元素的长度为 L 的矢量, 其中 $k = 0, 1, \dots, L-1$ 。

$$\boldsymbol{\gamma} = \{\tilde{\gamma}(0), \tilde{\gamma}(1), \dots, \tilde{\gamma}(L-1)\}^T = \{\gamma(0), \gamma(1), \dots, \gamma(L-1)\}^T$$

\mathbf{H} 是一个结构如式(12)的 $(\bar{M}\bar{N}) \times L$ 的实矩阵

$$\mathbf{H}(m\bar{N} + n, k) = \tilde{h}(k + mN) g_n \sqrt{\frac{2}{N}} \cdot \cos \frac{\pi[2\text{mod}(k, \bar{N}) + 1]n}{2\bar{N}} \quad (12)$$

根据式(11), 对 $\boldsymbol{\gamma}$ 的求解即是对式(11)所表示的线性方程组的求解。因为 \mathbf{H} 是一个 $(\bar{M}\bar{N}) \times L$ 的矩阵, 在临界抽样条件下 $\bar{M}\bar{N} = L$, 式(11)具有唯一解, 而在过抽样条件下, $\bar{M}\bar{N} < L$, 所以式(11)中 $\boldsymbol{\gamma}$ 的解不是唯一的。为了使其解唯一, 可以对其施加一个约束条件。取其解为广义逆解

$$\boldsymbol{\gamma}_g = \mathbf{H}^T (\mathbf{H}\mathbf{H}^T)^{-1} \mathbf{v} \quad (13)$$

那么就有 $\|\boldsymbol{\gamma}_g\|^2 = \boldsymbol{\gamma}_g^T \boldsymbol{\gamma}_g^*$ 为最小范数, $\boldsymbol{\gamma}_g$ 为最小能量解, 称此约束条件为最小范数的附加约束条件。

下面将举例说明, 在给出综合窗函数 $h(k)$ 的条件下, 求解分析窗。

取综合窗函数为下式所示单边指数衰减函数:

$$h(k) = 0.02 \exp\{-2.5(k - 255.5)/64\} u(k - 255.5) \quad (14)$$

$u(k)$ 为单位阶跃序列, 取 $M = 64, N = 512$, 利用(13)式可以求出其对应的分析窗。

在计算出了 $\boldsymbol{\gamma}$ 之后, 就可以计算实值离散 Gabor 展开系数 $a(m, n)$ 了。

$$a(m, n) = \sum_{k=0}^{L-1} x(k) \tilde{\gamma}(k - m\bar{N}) \cdot g_n \sqrt{\frac{2}{N}} \cos \frac{[2\text{mod}(k, N) + 1]\text{mod}(n, N)\pi}{2N} = \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} R_m(iN + j) \cdot g_n \sqrt{\frac{2}{N}} \cos \frac{[2\text{mod}(j, N) + 1]n\pi}{2N} = \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} R_m(iN + j) \cdot g_n \sqrt{\frac{2}{N}} \cos \frac{[2j + 1]n\pi}{2N} \quad (15)$$

其中 $R_m(k) = x(k) \tilde{\gamma}(k - m\bar{N})$, $k = iN + j$ 。注意这里式(15)满足 N 点 DCT, 可以使用快速 DCT 来加速 Gabor 展开系数的求解。

同样的, 对于信号的重建也可以用上面相同的方法来进行加速, 根据(1)式, 得

$$x(k) = \sum_{m=0}^{M-1} \tilde{h}(k - m\bar{N}) \sum_{n=0}^{N-1} a(m, n) \cdot g_n \sqrt{\frac{2}{N}} \cdot$$

$$\cos \frac{[2\text{mod}(k, N) + 1]\text{mod}(n, N)\pi}{2N} \quad (16)$$

不妨令 $k = qN + k_0, q = 0, 1, \dots, \bar{M} - 1; k_0 = 0, 1, \dots, N - 1$, 上式变换为

$$\begin{aligned} x(qN + k_0) &= \sum_{m=0}^{M-1} \tilde{h}(qN + k_0 - mN) \sum_{n=0}^{N-1} a(m, n) g_n \cdot \\ &\sqrt{\frac{2}{N}} \cos \frac{[2\text{mod}(k_0, N) + 1]\text{mod}(n, N)\pi}{2N} = \sum_{m=0}^{M-1} \tilde{h}(qN \\ &+ k_0 - mN) \sum_{n=0}^{N-1} a(m, n) \cdot g_n \sqrt{\frac{2}{N}} \cos \frac{[2k_0 + 1]n\pi}{2N} \end{aligned} \quad (17)$$

很显然, 对于上式的第二个求和项来说, 其符合 N 点的 IDCT。

这里, 第二个求和项也是一 N 点的 IDCT, 同样可以用 IDCT 的快速算法进行计算。这里给出实值离散 Gabor 变换的 Gabor 谱图的定义:

$$S(m, n) = a(m, n)^2 \quad (18)$$

Gabor 谱图是信号在联合时频域中能量分布的反映。

2 实值离散 Gabor 变换用于雷达信号表示

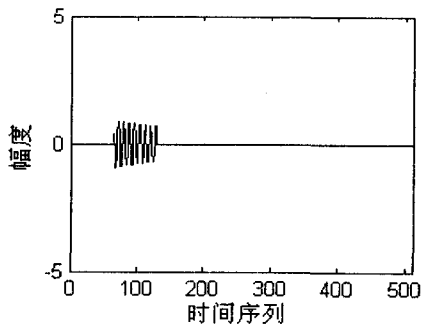
雷达系统相位检波器的输出信号模型: 在关于运动目标检测(MTD)系统的许多文献^[7~12]中, 相位检波器的输出信号(目标回波信号)被描述成:

$$y(t) = \sum_{i=1}^I A_i \cdot \exp[-\lambda(t - t_i)] \cdot \cos[2\pi f_i(t - t_i) + \varphi_i] \cdot u(t - t_i) \quad (19)$$

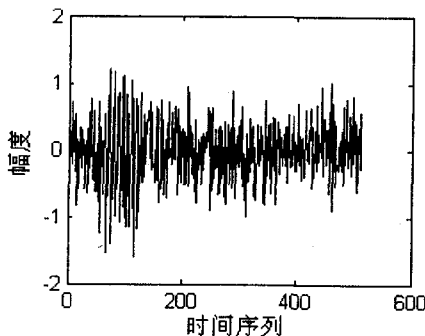
这里, I 是目标的数目, $\{A_i, \lambda, t_i, f_i, \varphi_i\}$ 分别是相位检波器输出的雷达目标回波信号的幅度, 接收系统引起的信号的衰减, 到达时间, 多普勒频率和初相位。这里, 选择 $\lambda = 0.005$ 。

Example 1: 单目标的情况, 图 1(a) 是相位检波器的输出信号。在本例中, 幅度、多普勒频率、到达时间和初相位分别是 1.0, 1M, 16 μ s 和 $\pi/4$ (幅度、频率、时间均为相对大小)。连续时间信号抽样频率为 4M, 回波信号持续时间 16 μ s, 总观察时间长度为 128 μ s, 因此, 抽样离散后信号序列的长度 $L = 512$ 。采用与式(15) 单边指数衰减函数对应的分析窗, 可求出 RDGT 系数及其 Gabor 谱图(图 1(b))。图 1(c) 显示的是相同的信号, 加上了零均值、标准差为 0.4 的高斯白噪声(SNR = -5.2212dB)。信噪比定义为观察期间(128 μ s) 信号的能量与噪声能量之比, 即 $\text{SNR} = 20\log(\|s\| / \|n_v\|)$ 。图 1(d) 是相对应的 Gabor 谱图。不难看出, 受到噪声污染的信号在 Gabor 域中清晰可辨, 而在时域波形中较难分辨。

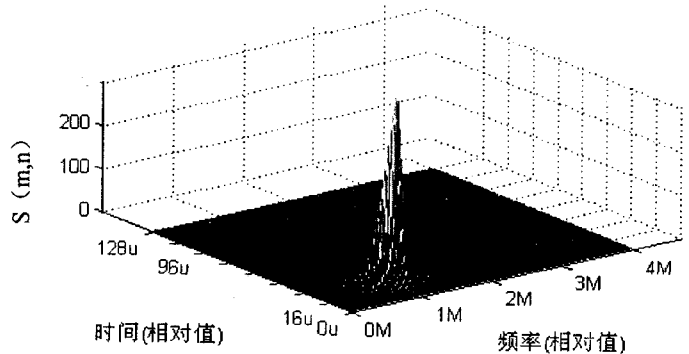
Example 2: 多目标回波信号不同时到达的情况图 2(a) 是相位检波器输出的雷达回波信号。该信号由两



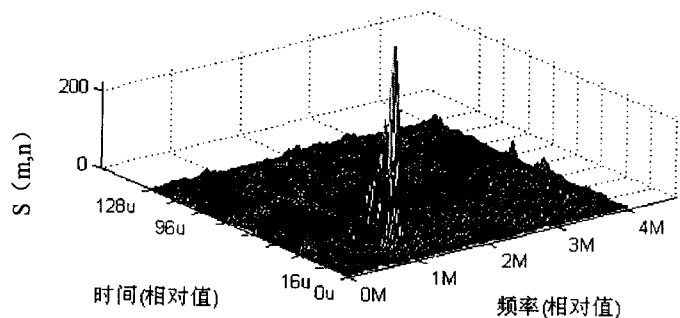
(a) 单目标回波信号



(c) 被噪声污染的单目标回波信号

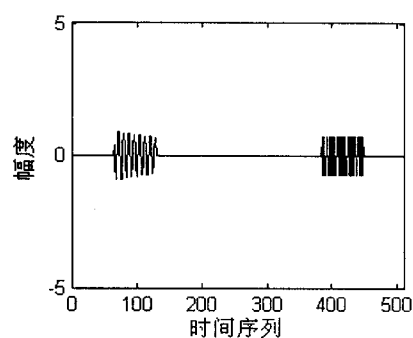


(b) 单目标回波 Gabor 域表示

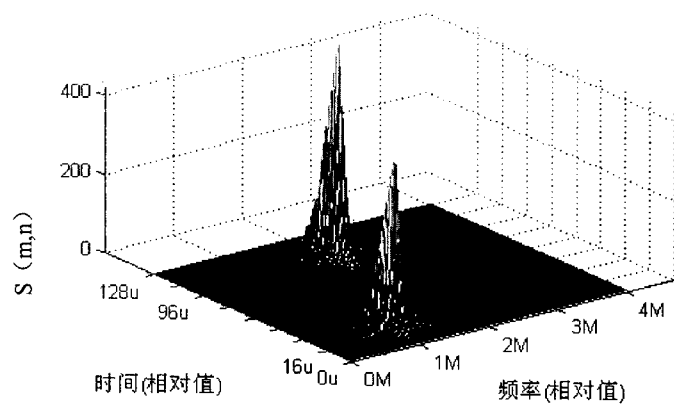


(d) 加噪单目标回波 Gabor 域表示

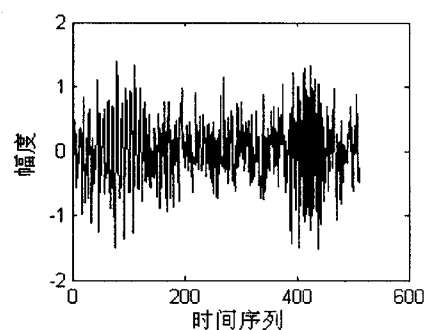
图 1 单目标情况



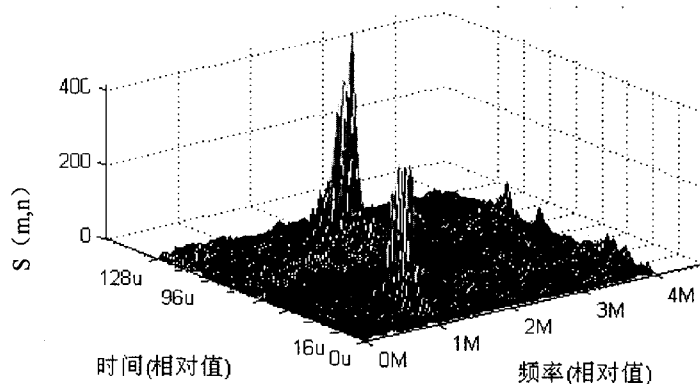
(a) 多目标回波信号



(b) 多目标回波Gabor域表示

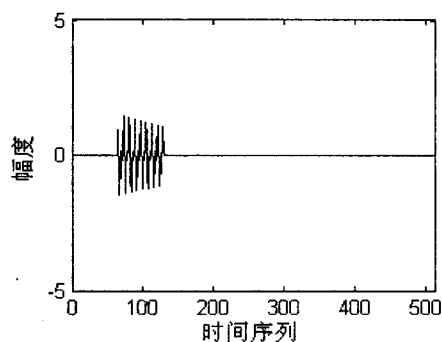


(c) 加噪的多目标回波信号

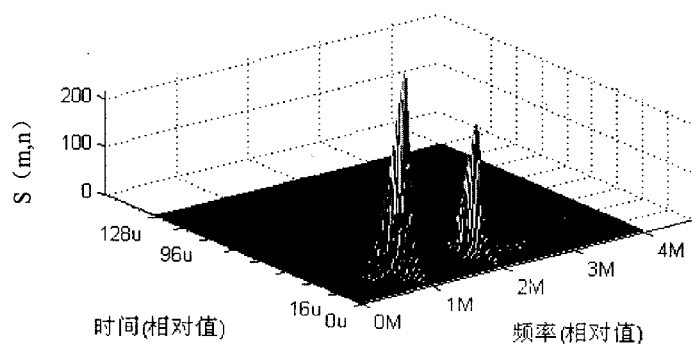


(d) 加噪多目标回波Gabor域表示

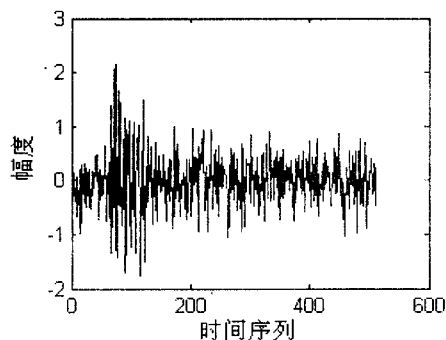
图 2 多目标不同时到达情况



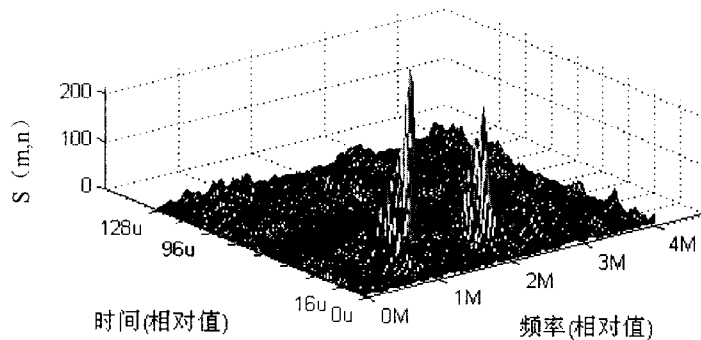
(a) 多目标回波信号



(b) 多目标回波 Gabor 域表示



(c) 加噪多目标回波信号



(d) 加噪多目标回波 Gabor 域表示

图 3 多目标同时到达情况

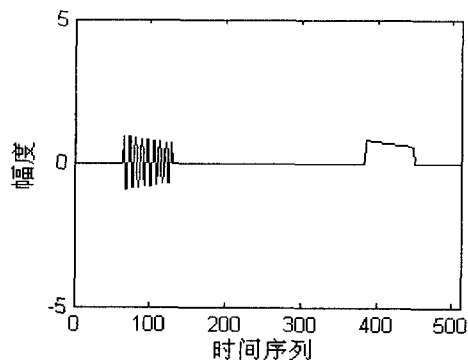
个目标回波构成,其中一个目标以较慢的速度运动,另一个以较快的速度运动。这里,两个目标回波信号的幅度分别是 1.0 和 0.8;多普勒频率分别是 1M 和 2M;初相位分别是和 0;出现时间分别是 $16\mu\text{s}$ 和 $96\mu\text{s}$,信号持续时间均为 $16\mu\text{s}$ 。图 2(b)是其 Gabor 谱图。图 2(c)显示的是相同的信号,加上了零均值、标准差为 0.4 的高斯白噪声($\text{SNR} = -3.5694\text{dB}$)。图 2(d)是相对应的 Gabor 谱图。显然,受到噪声污染的两个目标的回波信号在 Gabor 域中的表示要比其在时域波形中更易分辨。因此,基于 Gabor 变换的 MTD 系统可以同时捕获多个以不同速度运动的目标。

Example 3:多目标回波信号同时到达的情况,图 3(a)是相位检波器输出的雷达回波信号。该信号由两个目标回波构成,其中一个目标以较慢的速度运动,另一个以较快的速度运动。这里,两个目标回波信号的幅度分别是 1.0 和 0.8;多普勒频率分别是 1M 和 2M;初相位分别是和 0;出现时间均为 $16\mu\text{s}$,信号持续时间均为 $16\mu\text{s}$ 。图 3(b)是其 Gabor 谱图。图 3(c)显示的是相同的信号,加上了零均值、标准差为 0.4 的高斯白噪声($\text{SNR} = -2.6666\text{dB}$)。图 3(d)是相对应的 Gabor

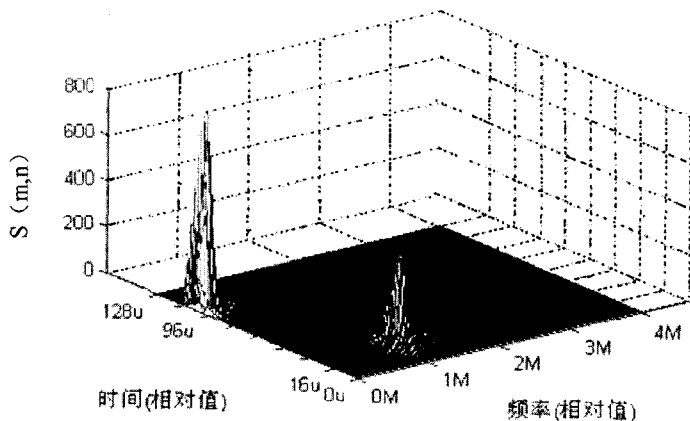
谱图。

Example 4:运动目标和定点杂波出现在不同时刻的情况图 4(a)是相位检波器的输出雷达回波信号。信号由一个运动目标回波信号和一个定点杂波(fixed-point-clutter)组成。运动目标回波信号出现在 $16\mu\text{s}$,持续时间 $16\mu\text{s}$,它的幅度、多普勒频率和初相位分别是 1, 1M 和 $\pi/3$ 。定点杂波出现在 $96\mu\text{s}$,幅度是 0.8,持续时间 $16\mu\text{s}$ 。图 4(b)是其 Gabor 谱图。图 4(c)显示的是相同的信号,加上了零均值、标准差为 0.4 的高斯白噪声($\text{SNR} = -0.7516\text{dB}$)。图 4(d)是其 Gabor 谱图。正如所见,Gabor 域中定点杂波的峰值出现在 0M 处。如果消除 Gabor 域中 0 处的峰值,那么就可以滤除定点杂波的影响。这意味着基于 Gabor 变换的 MTD 系统可以在强定点杂波的背景背景下捕获运动目标。

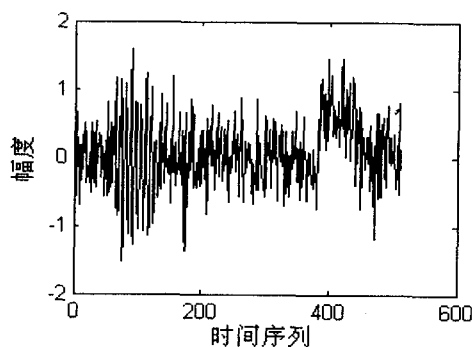
Example 5:运动目标和定点杂波出现在相同时刻的情况图 5(a)是相位检波器输出的雷达目标回波信号。信号由一个运动目标回波信号和一个定点杂波组成。运动目标回波信号和定点杂波出现在同一时刻($16\mu\text{s}$),持续时间 $16\mu\text{s}$ 。杂波的幅度是 0.8。运动目



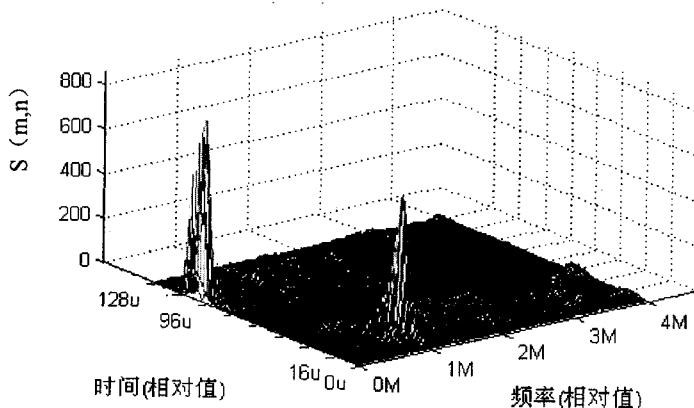
(a)运动目标回波和定点杂波信号



(b)运动目标回波和定点杂波 Gabor 域表示

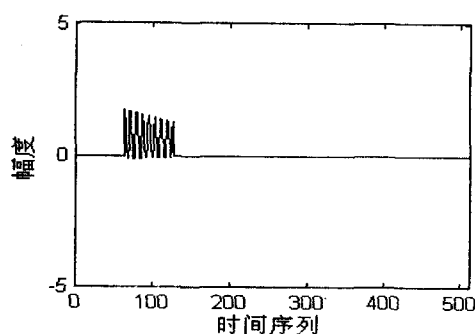


(c)加噪运动目标回波和定点杂波信号

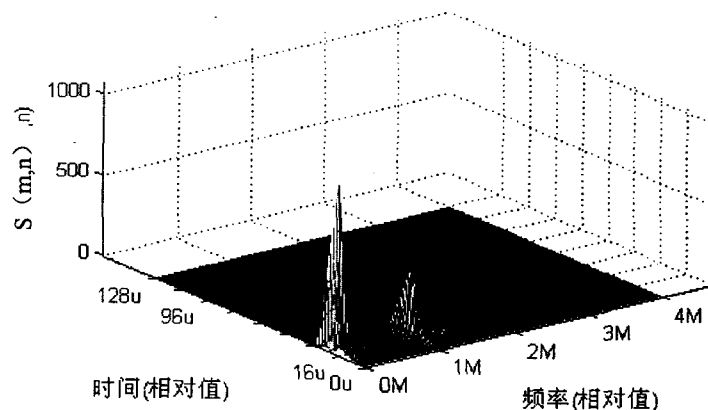


(d)加噪运动目标回波和定点杂波信号 Gabor 域表示

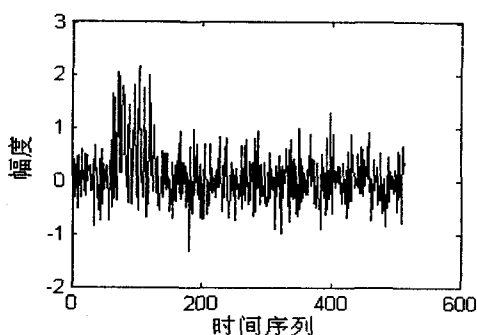
图 4 运动目标回波和定点杂波不同时到达情况



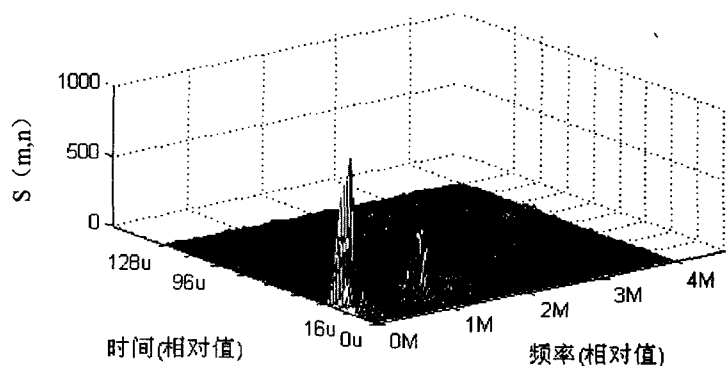
(a) 运动目标回波和定点杂波信号



(b) 运动目标回波和定点杂波Gabor域表示



(c) 加噪运动目标回波和定点杂波信号



(d) 加噪运动目标回波和定点杂波信号 Gabor 域表示

图 5 运动目标回波和定点杂波同时到达情况

标的幅度、多普勒频率和初相位分别是 1, 1M 和 0。图 5(b) 是其 Gabor 谱图, 正如 Example 3, 如果忽略 Gabor 系数 a_{mn} 中的 a_{m0} , 那么可以滤除定点杂波的影响。图 5(c) 显示的是相同的信号, 加上了零均值、标准差为 0.4 的高斯白噪声 ($\text{SNR} = -0.5943\text{dB}$)。图 5(d) 是其 Gabor 谱图。

3 结束语

提出了使用基于 DCT 的实值离散 Gabor 变换表示雷达信号的算法, 基于 DCT 的实值离散 Gabor 变换由于仅涉及实值计算以及可以利用快速 DCT 变换加速计算, 更易于数值计算和求解双正交分析窗。实验表明提出的算法可以在 Gabor 域中对多个不同到达时间和不同多普勒频率的雷达信号进行有效地区分。

参考文献:

- [1] Friedlander B, Porat B. Detection transient signal by the Gabor representation [J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1989, 37(2): 169 - 180.
- [2] Lee N, Schwartz S C. Robust Transient Signal Detection Using the Oversampled Gabor Representation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1995, 43(6): 1498 - 1502.
- [3] Friedlander B, Zriela A. Oversampled Gabor representation for transient signals [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1995, 43(9): 2088 - 2094.
- [4] Qian S, Chen D. Joint time - frequency analysis [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1999(2): 52 - 67.
- [5] 祝美龙, 陶 亮. 基于 DCT 的实值离散 Gabor 变换的快速并行算法 [J]. 计算机技术与发展, 2007, 17(10): 50 - 53.
- [6] 魏道昀, 祝美龙, 陶 亮. 基于 DCT 的实值离散 Gabor 变换 [J]. 电子与信息学报, 2007, 29(11): 2783 - 2786.
- [7] 雷 超, 陈 伟. 一种火控雷达终端显示器的仿真实现 [J]. 计算机技术与发展, 2008, 18(4): 195 - 198.
- [8] 陈 青, 邵玉祥. 雷达杂波数据仓库应用技术研究 [J]. 计算机技术与发展, 2006, 16(7): 204 - 208.
- [9] Wexler J, Raz S. Discrete Gabor Expansions [J]. Signal Processing, 1990, 21(3): 207 - 220.
- [10] Ji Shu - Long, Huang Fu Kan, Sun Zhong - Kang, et al. Detection of Radar signals using Gabor Transform and Neural Network [C] // Proceedings of the IEEE 1992 National Aerospace and Electronics Conference. [s. l.]: [s. n.], 1992: 916 - 922.
- [11] 马晓岩, 李广柱, 张贤达. 基于小波变换的雷达信噪比改善分析 [J]. 清华大学学报, 2003, 43(3): 422 - 424.
- [12] 肖文书, 张兴敢, 都思丹. 雷达信号的盲分离 [J]. 南京大学学报, 2006, 42(1): 38 - 43.