

仿真技术

FFT-MTD 滤波器组优化设计与仿真^{*}

周亚飞, 赵修斌, 邹鲲

(空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘要: 介绍了用 FFT 算法实现雷达信号动目标检测 (MTD) 的方法, 为提升 MTD 在强杂波环境下的检测性能, 对加权 FFT 优化 MTD 时窗函数的选取进行了讨论, 比较了 6 种窗函数加权时 FFT 等效多普勒滤波器组的幅频特性和改善因子, 得出了适合于 MTD 的最佳窗函数, 并针对某型雷达信号体制进行了仿真分析和验证, 结果表明优化方法增强了 MTD 在杂波背景下的检测性能。

关键词: 雷达信号处理; 快速傅里叶变换; 动目标检测; 杂波抑制; 加窗

doi: 10.3969/j.issn.1009-086x.2011.02.032

中图分类号: TN957.51; TN713; TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1009-086X(2011)-02-0160-04

Optimized Design and Simulation for FFT-MTD Filter Banks

ZHOU Ya-fei, ZHAO Xiu-bin, ZOU Kun

(AFEU, Telecommunication Engineering Institute, Shaanxi Xi'an 710077, China)

Abstract: The method of detecting moving target in radar signal processing system with FFT is introduced. In order to improve the performance of MTD in strong clutter environment, the optimal window for FFT-MTD is discussed. The frequency responses and improving factors of MTD filter banks weighted with 6 kinds of window functions are compared and the optimal window function suitable for MTD is gained. The simulation result indicates that the MTD performance is improved with the optimized design.

Key words: radar signal processing; fast Fourier transformation (FFT); moving target detection (MTD); clutter suppression; windowing

0 引言

杂波抑制是雷达信号处理的关键环节, 对于固定杂波, 通常用结构简单、运算量低的 MTI 对消器就可以获得一定的杂波抑制效果。但是在实际雷达系统中, 发射机幅度不稳、发射机或接收机相位漂移等多种因素导致固定目标回波出现起伏, 影响 MTI 杂波抑制效果, MTI 对消器改善因子一般都限制在

20 dB 左右^[1], 此外 MTI 对消器还无法抑制由云、雨等引起的平均多普勒频率不为 0 的气象杂波。现代雷达系统通常使用动目标检测 (MTD) 技术来克服 MTI 的不足, MTD 通过多个带通滤波器组对雷达回波进行脉冲多普勒处理, 然后再对滤波器组的输出进行检测来发现目标^[2-3]。相对于 MTI, MTD 能改善滤波器的频率特性, 使之更接近于最佳线性滤波, 可将改善因子提高至 42 dB^[4], 能够检测强杂波信

^{*} 收稿日期: 2010-06-09; 修回日期: 2010-07-06
基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (SJ08F06)
作者简介: 周亚飞 (1983-), 男, 湖北宜昌人。硕士生, 主要研究方向为军用航空无线电导航。
通信地址: 710077 陕西省西安市沣镐东路 1 号空军工程大学电讯工程学院研管 14 队
E-mail: af-zhouyafei@126.com

号中的弱目标信号。

MTD 滤波器组一般采用 FIR 滤波器或 FFT 技术来实现。FIR 滤波器组设计方法灵活, 滤波特性旁瓣低, 但计算量大, 对信号处理硬件平台要求较高。用 FFT 技术实现的 MTD 滤波器组运算效率高, 算法实时性好, 可以节省很大的运算量, 但存在滤波特性旁瓣高的问题, 造成不同滤波器间的相互干扰, 降低 MTD 检测性能^[5]。通常的解决方法是对 FFT 进行加窗处理来抑制滤波器的旁瓣幅度。本文用多种窗函数对 FFT 时域加权后进行分析比较, 选择出最佳的加权方案, 最后结合某型雷达信号体制进行仿真, 验证了方案实际效果。

1 基于 FFT 的 MTD 原理

设 N 个周期、长度为 L 的雷达回波视频信号, 对同一距离单元上的 N 点慢时间数据进行 FFT 运算, 共进行 L 次 N 点 FFT。 N 点 FFT 运算可以表示为

$$X(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) e^{-j2\pi nk/N} = \sum_{k=0}^{N-1} W^{nk} x(k), \quad n=0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (1)$$

$X(0), X(1), X(2), \dots, X(N-1)$ 相当于 N 个 FIR 滤波器的输出, 第 n 个滤波器的幅频响应为

$$|H_n(f)| = \left| \frac{\sin[\pi N(f/f_r + n/N)]}{\sin[\pi(f/f_r + n/N)]} \right|, \quad n=0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (2)$$

式中: f_r 为脉冲重复频率。

N 个滤波器具有相同的幅度特性, 只是中心频率不一样, 第 n 号滤波器的中心频率出现在 $\frac{n}{N}f_r$ 处, 它们均匀地分布在 $0 \sim f_r$ 频率区间上, 并以 f_r 为周期在频率轴上重复, 具有不同多普勒频率的信号将从滤波器组中不同的滤波器输出。如图 1 所示, 当 $N=16$ 时, 在 $f/f_r=0 \sim 1$ 区间内均匀分布着 16 个带通滤波器 $0^\# \sim 15^\#$ 。但滤波器组的主瓣高度与第一旁瓣高度比不高, 只有 13.2 dB, 杂波不仅从各个滤波器的主瓣进入, 也从副瓣进入, 由副瓣进入的杂波会降低滤波器的性能, 特别是在强杂波情况下, 由副瓣进入的杂波会明显降杂波抑制改善因子。

2 窗函数加权分析

通常在计算 FFT 之前, 用一个窗函数 $w(k)$ 对慢

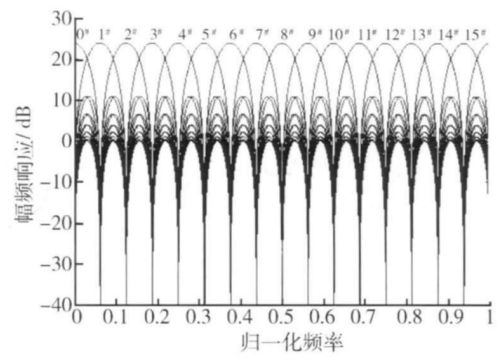


图 1 16 点 FFT 形成的 MTD 滤波器组幅频响应

Fig. 1 Amplitude frequency response of 16 point FFT MTD filter banks

时间采样数据进行加权来降低旁瓣的影响^[6], 加权后的 N 点 FFT 可表示为

$$X(n) = \sum_{k=0}^{N-1} w(k) x(k) e^{-j2\pi nk/N} = \sum_{k=0}^{N-1} W^{nk} x(k), \quad n=0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (3)$$

此时, 第 n 个滤波器的幅频响应可表示为

$$|H_n(f)| = \left| \sum_{k=0}^{N-1} w(k) e^{-j2\pi k(f/f_r + n/N)} \right|, \quad n=0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (4)$$

用窗函数进行加权主要目的是减小滤波器旁瓣的相对幅度, 使信号尽量从主瓣进入, 同时主瓣尽可能窄, 使滤波器获得较陡的过渡带。一般来说, 加非矩形窗后, 旁瓣峰值电平降低的同时主瓣宽度会增加, 主瓣电平会减小, 信噪比也会降低。因此要针对雷达信号体制和杂波环境, 选用合适的窗函数进行加权处理。常用的一些窗函数有: 矩形窗、汉宁 (Hanning) 窗、海明 (Hamming) 窗、布莱克曼 (Blackman) 窗、凯泽 (Kaiser) 窗、切比雪夫 (Chebyshev) 窗等, 文献 [7] 对这些窗函数的表达式和幅频特性有详细的介绍。

加窗后和未加窗时信号峰值功率的比值称为处理增益损失, 由下式给出^[8]:

$$LPG = \frac{1}{N^2} \left| \sum_{n=0}^{N-1} w(n) \right|^2, \quad n=0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (5)$$

加窗后和未加窗时信号峰值处信噪比的比值称为处理损失, 由下式给出^[8]:

$$PL = \frac{\left| \sum_{n=0}^{N-1} w(n) \right|^2}{N \sum_{n=0}^{N-1} |w(n)|^2}, \quad n=0, 1, 2, \cdots, N-1. \quad (6)$$

式中: $w(n)$ 为所加的窗函数; N 为窗函数阶数。

用上述窗函数对 16 阶 FFT 进行加权后, 滤波器组的幅频响应如图 2 所示, 图中只显示出 3[#]~7[#]

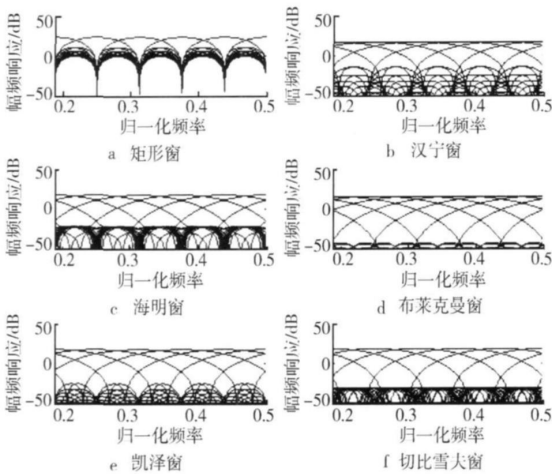


图 2 用不同窗函数加权后 MTD 滤波器组的幅频响应

Fig.2 Amplitude frequency response of MTD filter banks weighted with different windows

表 1 用不同窗函数加权后 MTD 滤波器组的主要特性

Table 1 Main characteristics of MTD filter banks weighted with different windows

窗函数	主瓣宽度 (归一化频率)	主副瓣比/ dB	处理增益损失 LPG/dB	处理损失 PL/dB
矩形窗	0.13	13.14	0	0
汉宁窗	0.27	31.50	-6.58	-2.04
海明窗	0.30	39.82	-5.83	-1.54
布莱克曼窗	0.40	58.61	-8.09	-2.65
凯泽窗 (β=6)	0.29	43.92	-6.57	-1.93
切比雪夫窗 (r=50)	0.27	50.00	-5.79	-1.58

3 仿真

根据某型雷达信号体制, 设置如下仿真条件:

发射信号载频 $f_c=9\ 370\ \text{MHz}$, 脉冲重复频率 $f_r=2\ 000\ \text{Hz}$, 脉冲宽度 $\tau=0.5\ \mu\text{s}$, 中频频率 $f_0=30\ \text{MHz}$, 信号带宽 $B=2\ \text{MHz}$, FFT 点数 $N=16$, 在 10 km 处有多普勒频率 $f_d=6\ 350\ \text{Hz}$ 的目标信号, 在 5~15 km 范围内有幅度服从瑞利分布的强地杂波, 谱宽 4 Hz。

滤波器的幅频特性, 其中凯泽窗的参数为 6, 切比雪夫窗的参数为 50。

由表 1 可以看出, 用不同的窗函数对 16 点 FFT 加权后, MTD 滤波器组的主瓣越宽, 主副瓣比越小。其中, 用矩形窗加权相当于对输入信号直接进行 FFT 处理^[9], 此时, 滤波器组主瓣最窄, 但主副瓣比最小; 用布莱克曼窗加权后, 滤波器主副瓣比最大, 但主瓣最宽, 处理增益损失和处理损失也最大; 用汉宁窗和海明窗加权后, 主瓣宽度适中, 但主副瓣比增加不够明显; 相比之下用凯泽窗和切比雪夫窗加权后, 主副瓣比明显增大, 主瓣宽度增加的代价相对较小, 处理增益损失和处理损失适中且加切比雪夫窗比加凯泽窗小。此外, 凯泽窗和切比雪夫窗可以通过参数的设置在主瓣宽度与旁瓣衰减之间自由选择, 适应性很强, 在实际应用中, 可以根据不同的杂波环境来进行调整, 在强杂波环境中调整为旁瓣衰减大的窗来最大程度上抑制杂波, 在相对较弱的杂波环境中, 可以调整为主瓣较窄的窗来获得较陡的过渡带, 降低信噪比损失。

由表 2 可以看出, 由于副瓣相对其他窗函数低, 布莱克曼窗、凯泽窗和切比雪夫窗加权后滤波器组的改善因子较高。但由于主瓣宽度大, 布莱克曼窗加权 MTD 在低频处的改善因子不高, 在实际应用中会把慢速目标同杂波一起抑制。综合考虑, 采用凯泽窗或切比雪夫窗加权既能在较大程度上抑制杂波, 又不会丢失慢速目标, 符合雷达实际应用需求。分别用加矩形窗 FFT、加凯泽窗 FFT 和加切比雪夫窗 FFT 处理后, MTD 滤波器组 0[#]~5[#]滤波器输出如

图 3 ~5 所示。

表 2 用不同窗函数加权后 MTD 滤波器组的改善因子

Table 2 Improving factor of MTD filter banks weighted with different windows

窗函数类型	归一化中心频率							
	1/16	2/16	3/16	4/16	5/16	6/16	7/16	8/16
矩形窗	-2.95	-2.92	-2.90	23.34	23.34	23.30	23.36	23.34
汉宁窗	2.47	10.10	41.20	45.93	46.85	46.82	46.56	46.70
海明窗	-1.20	7.20	36.32	42.06	42.36	42.18	41.98	42.12
布莱克曼窗	3.52	42.63	55.96	61.32	61.30	61.09	60.93	61.22
凯泽窗 ($\beta=6$)	16.31	32.64	43.31	47.95	47.80	47.86	47.55	48.02
切比雪夫窗 ($r=50$)	17.21	35.80	48.12	51.36	51.70	51.48	50.87	51.55

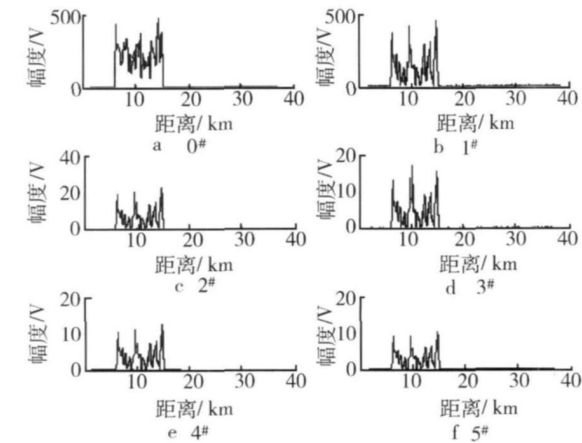


图 3 加矩形窗 MTD 滤波器输出

Fig. 3 Outputs of MTD filter banks weighted with rectangular window

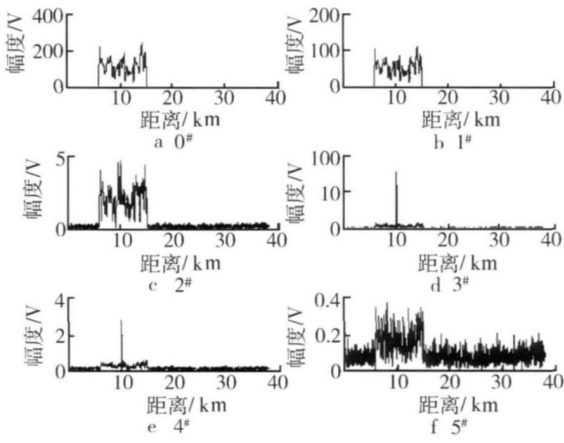


图 5 加切比雪夫窗 MTD 滤波器输出

Fig. 5 Outputs of MTD filter banks weighted with chebyshev window

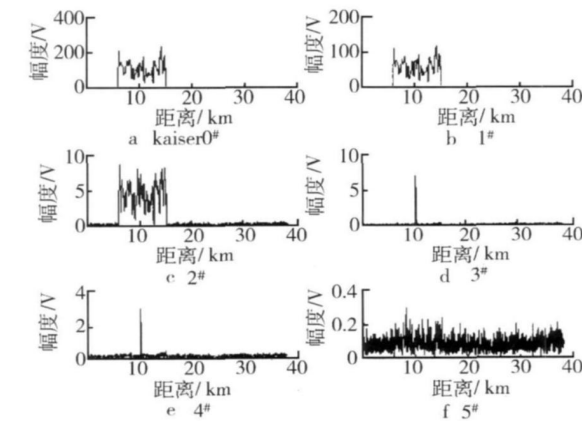


图 4 加凯泽窗 MTD 滤波器输出

Fig. 4 Outputs of MTD filter banks weighted with kaiser window

FFT 形成的 MID 由于存在很高的副瓣,对杂波的抑制效果很差,无法检测出目标信号。加凯泽窗和切比雪夫窗以后,如图 4、图 5 所示,强地杂波和慢速运动杂波通过 MTD 滤波器组的 0 和 1 滤波器输出,由于主瓣较宽,在 2 滤波器中仍有杂波输出,但幅度已经明显降低,在其他滤波器通道中,杂波被明显抑制,衰减达 50 dB 以上。多普勒频率 $f_d=6\ 350$ Hz 的运动目标信号从 3 滤波器输出,相对于剩余杂波目标信号非常明显,同时由于主瓣宽度增加,目标信号也从 4 滤波器中输出,但被部分抑制,幅度有所降低。仿真表明,凯泽窗和切比雪夫窗对 FFT 进行加权可以明显增强 MTD 的检测能力。在实际雷 (下转第 175 页)

由图 3 可以看出,在强杂波环境下,加矩形窗

- [3] 靳生盛. 高原环境对工程机械动力系统的影响及措施[J]. 青海师范大学学报, 2004, 19(4): 48-50.
- [4] 沈颖刚. 高原环境下内燃机工作过程应用基础研究[D]. 天津: 天津大学, 2003.
- [5] 张福才, 黄光宏. 三种内燃发电机组产品高原试验及结果分析[J]. Movable Power Station & Vehicle, 2010(3): 34-35.
- [6] 德国道依茨公司增压发动机技术维护手册 [K].
- [7] 李德龙. 高原型气候对电器设备的影响[J]. 青海大学学报, 2009, 27(4): 71-73.
- [8] 高秉亚. 雷达的高原适应性问题[J]. 现代电子, 2005, (1): 59-61.
- [9] 祝耀昌, 常文君. 武器装备环境适应性与环境工程[J]. 装备环境工程, 2005, 2(1): 16-19.
- [10] 于衍华. 武器装备环境适应性论证[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2007: 150-170.

(上接第 163 页)

达信号处理应用中, 应根据雷达工作环境, 选择适当的凯泽窗或切比雪夫窗的参数, 使滤波器主瓣宽度和副瓣电平调谐到最佳滤波性能。还可将 MTD 与频域杂波图恒虚警技术相结合增强对小目标的检测能力^[10]。

4 结束语

本文分析了在不同窗函数对 FFT 加权的情况下 MTD 滤波器组检测性能的变化, 针对某型雷达信号体制进行了杂波环境中目标信号检测仿真。结果表明, 用凯泽窗和切比雪夫窗加权后, MTD 能够有效地从杂波背景中提取出目标信号, MTD 性能得到提升。本文是在实际工程项目背景下进行的研究, 对工程实践具有借鉴意义。

参考文献:

- [1] 马晓岩, 向家彬, 朱裕生, 等. 雷达信号处理[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1999: 155-169.
- [2] 谷泓, 赵永波, 张守宏. 一种基于数字综合算法的 MTD 滤波器设计方法[J]. 航空计算技术, 2002, 32(2): 58-62.
- [3] 汪莉君, 罗丰, 吴顺君. 一种 MTD 的优化设计及实际应用[J]. 火控雷达技术, 2005, 34(1): 9-13.
- [4] Charles Edward Muehe. The Moving Target Detector[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 2006, 42(3): 1177-1181.
- [5] 简涛, 何友, 苏峰. 基于 FFT-DWT 提高 MTD 检测性能的仿真分析[J]. 数据采集与处理, 2005, 20(4): 411-416.
- [6] Merrill I Skolnik. 雷达手册[M]. 王军, 林强, 米慈中, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2003: 578-602.
- [7] 刘纪红, 孙宇舸, 李景华. 数字信号处理原理与实践[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 184-192.
- [8] Mark A Richards. 雷达信号处理基础[M]. 邢孟道, 王彤, 李真芳, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2008: 187-195.
- [9] HUANG Yong, WANG Xiu-tan, PENG Ying-ning et al. Adaptive Clutter Suppression Scheme with High Performance [C] //2000 5th International Conference on Signal Processing Proceedings. Beijing: IEEE Press, 2000: 1818-1821.
- [10] 刘艳苹. 一种海杂波背景下快速小目标的检测方法[J]. 舰船电子对抗, 2008, 31(3): 41-44.