

# 一种新的二相码旁瓣抑制滤波器<sup>1</sup>

张砾珩 王秀坛 黄勇 彭应宁

(清华大学电子工程系 北京 100084)

**摘要** 二相编码是一种在雷达脉冲压缩中得到广泛应用的波形,但是一般的二相码波形的旁瓣抑制算法只适用于短码(如 Barker 码等),且设计得到的滤波器阶数比较高,本文提出了一种新的基于时域综合的二相码旁瓣抑制滤波器,能适用于各种长度的二相码,包括  $m$  序列等.文中给出了  $m$  序列和 Barker 码旁瓣抑制滤波器结果,并与现有的滤波器性能进行了比较.

**关键词** 二相码,旁瓣抑制,时域综合

**中图分类号** TN957.5, TN713

## 1 引言

由于二相码具有独特的自相关性质,在现代脉冲压缩雷达中得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>.二相编码主要包括 Barker 码、Legendre 序列<sup>[2]</sup>、最大长度序列( $m$  序列)<sup>[3]</sup>等. Barker 码具有理想的自相关函数,但是现在还没有找到长度超过 13 的 Barker 码.因此二相码旁瓣抑制滤波器的设计一直是二相码应用的研究重点<sup>[4]</sup>.

经典的二相码旁瓣抑制滤波器设计算法一般只适用于短码,这些算法从二相码的自相关函数解析式出发,研究自相关函数的性质,进行滤波器的优化设计.如最优 R-G 滤波(Optimized R-G Filtering)法<sup>[5]</sup>,线性规划法(Linear Programming)<sup>[6]</sup>、改进的 Wiener 滤波法<sup>[4]</sup>等.这些方法的提出都是基于对 Barker 码的研究,当应用于长度较长的  $m$  序列等其他二相编码时效果并不理想.

旁瓣抑制滤波器的设计思路一般包括时域综合和频域综合两种.频域综合滤波器一般灵活性大,旁瓣抑制效果好,滤波器设计理论成熟.但是因为相位编码波形具有类似噪声的相频特性,很难用具有线性相位的有限冲击响应滤波器去逼近.而直接使用逆滤波又会引入比较大的信噪比损失,因此只有在功率谱解析式已知的情况下,才可以利用频域综合并获得比较好的效果.线性规划法是一种时域综合的方法,其缺点是不能直接控制滤波器的输出,对长码的效果不好.本文提出的时域综合法是一种通过直接设计旁瓣结构,利用逆滤波得到滤波器的冲激响应的办法.文中给出了应用于  $m$  序列和 Barker 码的基于时域综合的旁瓣抑制滤波器的仿真结果.

## 2 时域综合法设计旁瓣抑制滤波器

考虑二相编码序列  $a(t)$  的自相关函数为  $b(t)$ ,其频域表示为  $B(f)$ .用  $b_m(t)$  表示主瓣, $b_s(t)$  表示旁瓣,则有

$$b(t) = b_m(t) + b_s(t) \quad (1)$$

对应的频域表示如下( $B_m(f)$  为主瓣的频域表示,  $B_s(f)$  为副瓣的频域表示):

$$B(f) = B_m(f) + B_s(f) \quad (2)$$

一般  $b_s(t)$  幅度比较大.我们希望通过旁瓣抑制滤波,使  $b_s(t)$  的峰值减小,满足主副比的要求.当然在具体雷达信号处理机环境中,还应该考虑信噪比损失.时域综合法设计思路就是寻找一个滤波器,使二相码波形经过滤波器输出的旁瓣幅度小于预先设定的值,同时满足一定

<sup>1</sup> 1999-10-15 收到, 2000-06-08 定稿

的信噪比损失要求。所以应该先设计一个“预期”的信号通过滤波器的输出时域模型, 然后采用逆滤波的办法求滤波器响应。

假设“预期”的滤波器的输出记为  $b_d(t)$ , 预期的输出旁瓣为  $b_{sd}(t)$ , 则有

$$b_d(t) = b_m(t) + b_{sd}(t) \quad (3)$$

为了使旁瓣的总能量尽可能的均匀分散在各个旁瓣从而在一定主副比情况下尽量减小信噪比损失, 就希望输出的  $b_{sd}(t)$  各个峰的幅度相同。因此我们按照如下的方式构造预期的第  $k$  个旁瓣:

$$b_{sd}(t_k) = [b(t) - cb_m(t)] \left( \frac{Ns_m}{b_s(t_{km})} \right)^p, \quad t_k \in k\text{-th sidelobe} \quad (4)$$

其中  $N$  是二相码序列长度,  $c, s_m, p$  为三个可调参数, 按照物理意义分别称为主瓣补偿因子、旁瓣抑制因子、信噪比损失补偿因子;  $b_s(t_{km})$  为第  $k$  个旁瓣的最大值。当  $p = 1$  时为线性加权(这时加权后旁瓣最低, 但是信噪比损失最大), 否则为非线性加权。线性加权时最大旁瓣即为旁瓣抑制因子  $s_m$  的值。对于 Barker 码, 由于各个旁瓣的幅度相同,  $s_m = s$ , 上式可以简化为

$$b_{sd}(t) = [b(t) - cb_m(t)]s \quad (5)$$

利用上述方法得到的旁瓣的时域形式, 就可以通过逆滤波求得滤波器的频域响应:

$$H(f) = \frac{B_m(f) + B_{sd}(f)}{B(f)} A^*(f) \quad (6)$$

其中  $A^*(f)$  是二相码  $a(t)$  的匹配滤波器, 匹配滤波器的输出为自相关函数  $b(t)$ , 而  $a(t)$  通过  $H(f)$  的输出就是  $b_d(t)$ 。实际计算时需要单独处理  $|B(f)| = 0$  的情况避免出现滤波器的幅度无穷大的情况。

选定如下参数:  $m$  序列长度为 255, 产生  $m$  序列的移位寄存器初始值为  $\{1, 1, 1, -1, -1, 1, -1, -1\}$ 。图 1(a) 曲线为归一化输出峰值电平随主瓣补偿因子的变化曲线, 图 1(b) 曲线为和信噪比损失随信噪比损失补偿因子的变化曲线。其中归一化输出峰值电平定义为

$$M = \max(|b_d(t)|) \frac{\int_0^T |a(t)|^2 dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} |H(f)|^2 df} \quad (7)$$

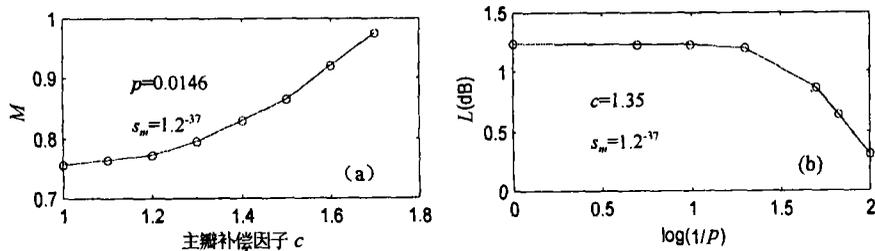


图 1 几个可调参数的物理意义

由于采用了三个物理意义明确的参数  $c, s_m, p$ , 使得在设计上取得很大灵活性, 可以根据不同的信噪比要求得到不同的主副比。图 1 是在固定其中的两个参数下单个参数变化时对相应输出结果的影响 ( $M$  是归一化峰值电平,  $L$  为旁瓣抑制滤波器引入的信噪比损失, 单位分贝)。

### 3 应用实例

#### 3.1 $m$ 序列的旁瓣抑制滤波器设计

最大长度序列 ( $m$  序列) 是一种常见的二相码形式, 尤其是应用在时宽带宽积比较大的场合, 图 2 是不同长度的  $m$  序列使用线性规划, 改进的 Wiener 滤波和时域综合算法设计旁瓣抑制滤波器的结果比较。图 2 结果表明, 本文提出时域综合方法能够在比较小的信噪比损失的条件得到很好的输出主副比 (PSR)。

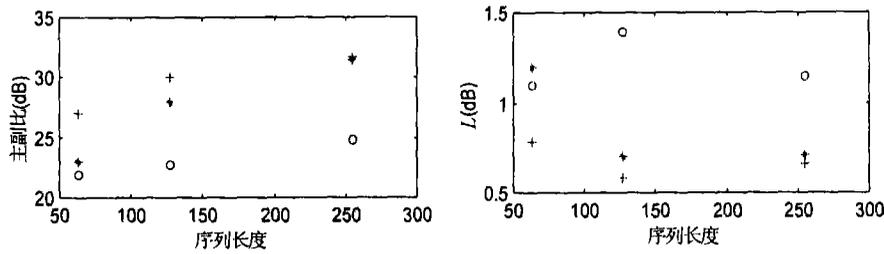


图 2 线性规划、Wiener 滤波、时域综合算法比较  
\*: 线性规划 o: Wiener 滤波 +: 时域综合,

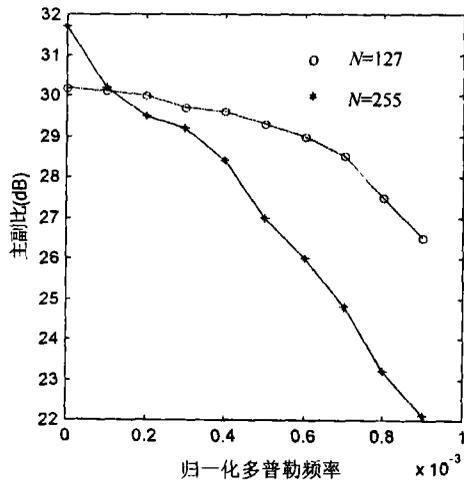


图 3 时域综合滤波器的 Doppler 性能

使用时域综合法设计的滤波器具有图钉状的模糊函数, 多普勒响应范围大约为

$$f_d T < 0.15 \tag{8}$$

其中  $T$  为时宽,  $f_d$  为多普勒响应范围。图 3 是长为 127 和 255 的  $m$  序列时域综合算法设计的旁瓣抑制滤波器 Doppler 性能曲线 (多普勒频率用带宽归一化, 此处假定带宽是 1MHz)。

#### 3.2 Barker 码旁瓣抑制

该方法不局限于  $m$  序列, 结果表明对短码同样适用。以 13 位 Barker 码为例, 可以使用 26 阶的失配滤波器将旁瓣压到  $-72\text{dB}$ , 信噪比损失只有  $0.2\text{dB}$ , 比同样阶数的专门进行 Barker 码旁瓣抑制的线性规划滤波器和最优化的 R-G 滤波器旁瓣好  $30\text{dB}$ 。图 4 给出了线性规划法设计的滤波器性能和时域综合法设计的性能对比。

上述应用中各个时域综合滤波器的三个参数的优化选取采用了遗传算法 (genetic algorithm) 实现, 并通过计算机仿真求解。

### 4 结 论

本文提出了一种新的二相码旁瓣抑制滤波器。该滤波器的设计是基于时域旁瓣结构的综合实现的, 滤波器设计具有三个物理意义明确的参数, 通过遗传算法等优化算法和计算机辅助求

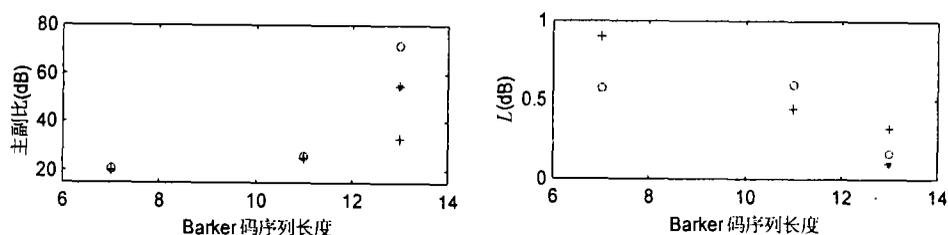


图4 Barker 码旁瓣抑制滤波器性能比较  
 +: 线性规划 o: 时域综合 \*: R-G 滤波器法

解。这种滤波器不仅可以适用于 Barker 码等结构比较简单的二相码, 对  $m$  序列这样的长码同样适用。并且在一定的信噪比损失要求下, 具有比已知的算法更好的性能。

### 参 考 文 献

- [1] A. M. Boehmer, Binary phase compression codes, IEEE Trans. on IT, 1967, IT-13(2), 156-167.
- [2] K. V. Rao, V. U. Reddy, Biphasic sequence generation with low sidelobe autocorrelation function, IEEE Trans. on AES, 1986, AES-22(2), 128-133.
- [3] S. R. Gottesman, P. G. Grieve, A class of pseudonoise-like pulse compression codes, IEEE Trans. on AES, 1992, AES-28(2), 355-362.
- [4] J. M. Baden, M. N. Cohen, Optimal sidelobe suppression for biphasic codes, National Telecom Conf., U.S.A., 1991, 127-131.
- [5] C. X. Hua, J. Oksman, A new algorithm to optimize Barker code sidelobe suppression filters, IEEE Trans. on AES, 1990, AES-26(4), 673-677.
- [6] S. Zoraster, Minimum peak range sidelobe filters for binary phase-coded waveforms, IEEE Trans. on AES, 1980, AES-16(1), 112-115.

## A NOVEL SIDELobe SUPPRESSION FILTER FOR BINARY PHASE CODED WAVEFORMS

Zhang Liping Wang Xiutan Huang Yong Peng Yingning

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** Binary Phase Coded Waveform(BPCW) is a widely used waveform in radar pulse compression, but the Sidelobe Suppression Filter(SSF) designing algorithms for BPCW are always limited to short codes such as Barker code, and the ranks of the SSF are always high. A new kind of SSF based on time domain synthesis is presented. It can be used for various length codes, including the  $m$ -sequence and so on. Some simulation results of time domain synthesized SSF for the Barker code and  $m$ -sequence are given, with the performance comparison of the new filter with some known filters.

**Key words** Binary phase coded waveform, Sidelobe suppression, Time domain synthesis

张琰珩: 男, 1977 年生, 博士生, 现从事雷达脉冲压缩波形设计、高速实时信号处理算法及其实现和神经网络等方面的研究。

王秀坛: 女, 1947 年生, 副教授, 主要研究方向包括雷达信号处理和实时图像信号处理等。

黄勇: 男, 1972 年生, 博士生, 主要研究方向包括雷达信号处理、谱估计、神经网络、无线通信等。

彭应宁: 男, 1939 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向包括谱估计、自适应滤波、自适应阵列信号处理、并行信号处理、雷达信号处理、神经网络与子波变换等。