

# **m 序列相位编码信号的最小峰值旁瓣滤波器\***

朱兆达 陈由俊 戴明桢  
(南京航空学院)

## **提 要**

**m**序列相位编码信号最小峰值旁瓣滤波器(LP滤波器)的冲激响应序列可以通过解线性规划问题求得。对于15位和31位全部**m**序列的计算结果表明,LP滤波器对峰值旁瓣有较大的抑制。对[4, 3, 0]反馈连接的起始状态为1001的15位码,它的长度为15的LP滤波器的峰值旁瓣电平降到-21.47 dB,比用匹配滤波器改善7.49 dB;对[5, 3, 2, 1, 0]反馈连接的起始状态为11101的31位码,它的长度为31的LP滤波器的峰值旁瓣电平降到-23.80 dB,比用匹配滤波器改善6.01 dB。当滤波器的长度增加时,LP滤波器可把峰值旁瓣抑制到更低电平。

## **一、引 言**

**m**序列是伪随机码中比较重要的一类码。在脉冲压缩及其它类似应用中,与巴克码相比,**m**序列可以提供更大的时间带宽积,但是它的旁瓣电平比较高。非周期**m**序列的自相关函数,不象巴克码的自相关函数那样规则。因此,用频域分析方法去解决**m**序列的旁瓣抑制问题,似乎不太可取。而用时域分析方法寻求旁瓣抑制滤波器,则可作为某种类型的优化问题去求解。

本文假定要求最小峰值旁瓣滤波器(LP滤波器)。这种滤波器的冲激响应序列可以通过解线性规划问题求得。Mosca<sup>[1]</sup>曾经提出用这种方法解决相位编码脉冲压缩雷达的旁瓣抑制问题。Cavin等人<sup>[2]</sup>曾经用这种方法设计地震滤波器。Blinchikoff等人<sup>[3]</sup>用线性规划方法求得巴克码的旁瓣抑制滤波器,但是,约束条件偏保守,因此结果还不是最优的。Zoraster<sup>[4]</sup>报道了用线性规划求得13位巴克码的LP滤波器。本文作者<sup>[5]</sup>曾经报道用线性规划方法求解15位**m**序列的长度为15的LP滤波器。最近又见到Maskara等人<sup>[6]</sup>给出用快速收敛沉降法求解7位、15位**m**序列旁瓣抑制滤波器的一些计算结果,其优化准则是滤波器的响应和理想响应的误差最小。

本文介绍用线性规划方法求解**m**序列的LP滤波器的计算结果。对于15位及31位的全部**m**序列,计算它们不同长度的LP滤波器的冲激响应序列、峰值旁瓣电平以及信噪比损失。找出用LP滤波器处理信号时性能最优的15位和31位**m**序列。

\* 1981年12月31日收到。

## 二、15 位和 31 位 m 序列

用 4 级移位寄存器产生 15 位 m 序列, 可有两种反馈连接方式<sup>[7]</sup>, 其反馈抽头分别是 [4, 3, 0] 和 [4, 1, 0]. 这两种反馈连接方式所形成的序列互为逆转. 因此, 只要对一种情况求解旁瓣抑制滤波器就够了.

按 [4, 3, 0] 反馈连接时, 4 级移位寄存器按不同的起始状态, 共可得到 15 个 15 位的非周期 m 序列. 每一个非周期 m 序列, 可以用起始状态作为标志. 起始状态为 1111 的 15 位 m 序列为:

$$1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0$$

15 位 m 序列的自相关函数的峰值旁瓣与主瓣的比值分别为 3/15、4/15、5/15.

同样, 用 5 级移位寄存器产生 31 位 m 序列, 共有六种反馈连接方式<sup>[7]</sup>, 其反馈抽头分别是: [5, 2, 0]、[5, 3, 0]、[5, 3, 2, 1, 0]、[5, 4, 3, 2, 0]、[5, 4, 2, 1, 0] 和 [5, 4, 3, 1, 0]. 在不考虑逆转序列时, 按下列三种反馈连接方式: [5, 2, 0]、[5, 3, 2, 1, 0] 和 [5, 4, 2, 1, 0], 按移位寄存器不同的起始状态, 共可得到 93 个 31 位的非周期 m 序列. [5, 2, 0] 反馈连接时, 起始状态为 11111 的 m 序列为:

$$1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0$$

[5, 3, 2, 1, 0] 反馈连接时, 起始状态为 11111 的 31 位 m 序列为:

$$1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0$$

[5, 4, 2, 1, 0] 反馈连接时, 起始状态为 11111 的 31 位 m 序列为:

$$1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0$$

31 位 m 序列的自相关函数的峰值旁瓣与主瓣的比值分别为 4/31、5/31、6/31、7/31.

## 三、线性规划问题

这里考虑的是离散时间系统. 用  $\{s_j\}$ 、 $\{h_j\}$  分别表示输入信号序列和滤波器冲激响应序列. 线性滤波器的输出序列  $\{y_j\}$  是下面的离散卷积:

$$\{y_j\} = \{s_j\} * \{h_j\} \quad (1)$$

适当选择序列起点, 使  $y_0 = \sum_j s_j h_{-j}$  表示主瓣, 则  $y_k = \sum_j s_j h_{k-j}$ ,  $k \neq 0$  都是旁瓣.

求 LP 滤波器, 即求峰值旁瓣与主瓣的比值最小的滤波器, 等价于求主瓣与峰值旁瓣的比值最大的滤波器, 即在限制旁瓣电平范围的条件下, 求最大主瓣的滤波器, 这相当于下列问题:

$$\max_{\{h_j\}} \sum_j s_j h_{-j} \quad (2)$$

满足约束条件:

$$\begin{aligned} \sum_j s_j h_{k-j} &\leq 1, \quad k \neq 0 \\ -\sum_j s_j h_{k-j} &\leq 1, \quad k \neq 0 \end{aligned}$$

表 1 15 位  $m$  序列的长度为 15 的 LP  
Tab. 1 Impulse response sequences of

| 序列起始状态                     | 0001        | 0010        | 0011        | 0100        | 0101        | 0110        | 0111        |
|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 冲<br>激<br>响<br>应<br>序<br>列 | 0.543 E-01  | -0.232 E-01 | 0.502 E-01  | -0.154 E-02 | 0.376 E-01  | -0.810 E-01 | 0.428 E-01  |
|                            | 0.543 E-01  | 0.238 E-01  | -0.529 E-01 | -0.532 E-01 | 0.731 E-01  | 0.321 E-01  | -0.797 E-01 |
|                            | 0.170 E-01  | 0.762 E-01  | -0.313 E-01 | 0.908 E-01  | -0.148 E-00 | -0.428 E-01 | 0.656 E-01  |
|                            | 0.491 E-01  | 0.940 E-01  | -0.733 E-01 | 0.885 E-01  | -0.211 E-01 | -0.691 E-01 | 0.118 E-01  |
|                            | -0.767 E-01 | 0.105 E-00  | 0.979 E-01  | 0.192 E-00  | 0.131 E-00  | -0.855 E-01 | -0.821 E-01 |
|                            | 0.616 E-01  | -0.761 E-01 | 0.598 E-01  | 0.100 E-00  | -0.686 E-01 | 0.132 E-00  | -0.865 E-01 |
|                            | -0.782 E-01 | 0.658 E-01  | 0.520 E-01  | 0.166 E-02  | -0.748 E-01 | 0.995 E-01  | 0.682 E-01  |
|                            | 0.108 E-00  | -0.943 E-01 | 0.149 E-00  | 0.830 E-01  | -0.312 E-01 | 0.103 E-00  | -0.990 E-01 |
|                            | 0.122 E-00  | 0.143 E-00  | -0.210 E-01 | -0.237 E-01 | 0.103 E-01  | 0.101 E-00  | -0.317 E-01 |
|                            | -0.101 E-00 | 0.640 E-01  | 0.141 E-00  | 0.103 E-00  | 0.308 E-01  | 0.222 E-01  | -0.144 E-00 |
|                            | -0.664 E-01 | -0.513 E-01 | -0.506 E-01 | 0.394 E-01  | 0.483 E-01  | 0.428 E-01  | 0.662 E-01  |
|                            | 0.864 E-01  | -0.598 E-01 | 0.623 E-01  | -0.589 E-01 | 0.110 E-00  | -0.366 E-01 | 0.829 E-01  |
|                            | -0.239 E-01 | 0.596 E-01  | 0.866 E-01  | -0.122 E-01 | -0.120 E-00 | 0.572 E-01  | 0.167 E-01  |
|                            | -0.565 E-01 | -0.357 E-01 | -0.564 E-01 | 0.113 E-00  | 0.206 E-01  | 0.711 E-01  | 0.520 E-01  |
|                            | -0.452 E-01 | -0.279 E-01 | -0.159 E-01 | -0.417 E-01 | -0.741 E-01 | -0.683 E-01 | -0.706 E-01 |

上面不等式右边的 1, 可以换成任何其它常数, 不影响计算结果. 问题 (2) 是具有线性不等式约束的线性目标函数的极值问题, 属于线性规划问题, 可以用经典的单纯形法的通用程序在计算机上算出结果. 对任何给定的输入信号序列  $\{s_i\}$ , 都可以用这种方法求出相应的 LP 滤波器的冲激响应序列  $\{h_i\}$ .

#### 四、LP 滤波器计算结果

对上述 15 个 15 位以及 93 个 31 位的非周期  $m$  序列, 用线性规划方法已经求出它们的不同长度的 LP 滤波器.

15 位  $m$  序列的长度为 15 的 LP 滤波器的冲激响应如表 1 所示.

每一个 15 位  $m$  序列的匹配滤波器的峰值旁瓣电平, 长度为 15 的 LP 滤波器的峰值旁瓣电平以及它们相对于匹配滤波器的改善值列于表 2. LP 滤波器对旁瓣电平的抑制, 是以加权系数复杂化和信噪比损失为代价的. LP 滤波器相对于匹配滤波器的信噪比损失  $L_{SNR}$ , 也列在表 2 中, 它是按下式计算的,

$$L_{SNR} = \frac{M \sum_i h_i^2}{V_m^2} \quad (3)$$

式中,  $M$  是码位数,  $h_i$  是滤波器的加权系数,  $V_m$  是设  $s_i = \pm 1$  时的响应主瓣值.

由以上计算结果可见, 不同的 15 位非周期  $m$  序列的 LP 滤波器的性能是不一样的. 15 位  $m$  序列中最优的是起始状态为 1001 的码, 其 LP 滤波器抑制旁瓣的效果最明显, 它把峰值旁瓣电平压低到 -21.47 dB, 相对于匹配滤波器的改善值也最大, 达 7.49 dB, 但有 1.16 dB 的信噪比损失.

## 滤波器的冲激响应序列

## LP filters of length 15 for 15-element m-sequence

| 1000        | 1001        | 1010        | 1011        | 1100        | 1101        | 1110        | 1111        |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 0.961 E-02  | -0.666 E-01 | 0.691 E-01  | -0.103 E-00 | 0.976 E-01  | -0.874 E-01 | 0.613 E-01  | -0.754 E-01 |
| 0.213 E-01  | -0.239 E-01 | -0.439 E-01 | 0.262 E-01  | 0.405 E-01  | -0.438 E-01 | -0.501 E-01 | 0.675 E-01  |
| 0.552 E-01  | -0.202 E-01 | -0.825 E-01 | 0.275 E-01  | -0.646 E-01 | 0.297 E-01  | 0.114 E-00  | -0.116 E-00 |
| -0.858 E-01 | 0.104 E-01  | 0.912 E-01  | -0.249 E-01 | 0.965 E-01  | -0.535 E-01 | -0.874 E-01 | 0.601 E-01  |
| 0.930 E-01  | 0.902 E-01  | -0.521 E-01 | -0.706 E-01 | -0.117 E-00 | -0.917 E-01 | 0.104 E-01  | 0.373 E-01  |
| -0.503 E-01 | 0.877 E-01  | -0.138 E-00 | 0.765 E-01  | 0.238 E-01  | -0.628 E-01 | 0.111 E-00  | -0.113 E-00 |
| 0.105 E-00  | 0.938 E-01  | -0.401 E-01 | -0.114 E-00 | 0.866 E-01  | 0.108 E-00  | -0.809 E-01 | -0.445 E-01 |
| 0.128 E-00  | 0.842 E-02  | 0.571 E-01  | -0.699 E-01 | -0.183 E-01 | 0.100 E-00  | -0.640 E-02 | 0.831 E-01  |
| -0.144 E-00 | 0.135 E-00  | 0.113 E-00  | -0.115 E-00 | -0.680 E-01 | 0.648 E-01  | 0.642 E-01  | -0.231 E-01 |
| -0.927 E-01 | -0.668 E-01 | 0.118 E-00  | 0.649 E-01  | 0.323 E-01  | 0.678 E-01  | -0.528 E-01 | -0.473 E-01 |
| 0.436 E-01  | 0.937 E-01  | 0.306 E-01  | 0.649 E-01  | -0.923 E-01 | -0.796 E-01 | -0.108 E-00 | -0.424 E-01 |
| -0.589 E-01 | 0.710 E-01  | -0.181 E-01 | 0.567 E-01  | -0.920 E-01 | 0.502 E-01  | -0.200 E-01 | 0.611 E-01  |
| -0.753 E-01 | -0.334 E-01 | 0.377 E-01  | 0.567 E-01  | -0.327 E-01 | -0.551 E-01 | 0.721 E-01  | 0.104 E-00  |
| -0.368 E-01 | -0.376 E-01 | -0.435 E-01 | -0.101 E-00 | 0.758 E-01  | 0.147 E-01  | 0.645 E-01  | 0.523 E-01  |
| 0.943 E-03  | 0.844 E-01  | 0.694 E-01  | 0.284 E-01  | 0.623 E-01  | 0.908 E-01  | 0.973 E-01  | 0.724 E-01  |

表 2 峰值旁瓣电平和信噪比损失 (15 位 m 序列)

Tab. 2 Peak sidelobe level and S/N loss (15-element m-sequence)

| 15 位 m 序列起<br>始状态 | 匹配滤波器峰值旁<br>瓣电平<br>(dB) | 长度为 15 的 LP 滤波器 |                   |               |
|-------------------|-------------------------|-----------------|-------------------|---------------|
|                   |                         | 峰值旁瓣电平<br>(dB)  | 峰值旁瓣电平改善值<br>(dB) | 信噪比损失<br>(dB) |
| 0001              | -13.98                  | -18.02          | 4.04              | 0.72          |
| 0010              | -13.98                  | -18.19          | 4.21              | 0.91          |
| 0011              | -11.48                  | -15.97          | 4.49              | 1.17          |
| 0100              | -11.48                  | -16.92          | 5.44              | 1.92          |
| 0101              | -9.54                   | -14.72          | 5.18              | 1.47          |
| 0110              | -13.98                  | -17.12          | 3.14              | 1.13          |
| 0111              | -11.48                  | -18.24          | 6.76              | 0.92          |
| 1000              | -11.48                  | -15.30          | 3.82              | 1.36          |
| 1001              | -13.98                  | -21.47          | 7.49              | 1.16          |
| 1010              | -13.98                  | -18.94          | 4.96              | 1.01          |
| 1011              | -13.98                  | -17.78          | 3.80              | 0.82          |
| 1100              | -11.48                  | -17.19          | 5.71              | 0.79          |
| 1101              | -13.98                  | -17.64          | 3.66              | 0.60          |
| 1110              | -11.48                  | -18.06          | 6.58              | 0.98          |
| 1111              | -11.48                  | -18.12          | 6.64              | 0.66          |

为了研究 LP 滤波器的长度对性能的影响,我们对起始状态为 1001 的 15 位 m 序列,求得了不同长度的 LP 滤波器的冲激响应序列如表 3 所示。表中还列出了这些滤波器的峰值旁瓣电平以及信噪比损失。从表 3 可见,随着 LP 滤波器长度的增加,峰值旁瓣电平进一步压低,而信噪比损失只略有摆动。

对 15 位 m 序列计算结果还表明,滤波器长度等于码位数时,抑制旁瓣效果差的码,在

表 3 起始状态为 1001 的 15 位 m 序列的 LP 滤波器  
Tab. 3 LP filters for 15-element m-sequence with initial condition 1001

| 滤波器长度 | 峰值旁瓣电平<br>(dB) | 信噪比损失<br>(dB) | 冲 激 响 应 序 列 |             |             |             |             |
|-------|----------------|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 17    | -21.62         | 0.94          | 0.950 E-02  | -0.735 E-01 | -0.326 E-01 | -0.326 E-01 | 0.817 E-01  |
|       |                |               | 0.964 E-01  | 0.774 E-01  | 0.921 E-01  | -0.859 E-02 | 0.126 E-00  |
|       |                |               | -0.564 E-01 | 0.952 E-01  | 0.636 E-01  | -0.282 E-01 | -0.354 E-01 |
|       |                |               | 0.100 E-00  | -0.170 E-01 |             |             |             |
| 19    | -22.46         | 1.03          | -0.231 E-02 | 0.251 E-02  | -0.752 E-01 | -0.254 E-01 | -0.359 E-01 |
|       |                |               | 0.844 E-01  | 0.786 E-01  | 0.690 E-01  | 0.110 E-00  | 0.564 E-02  |
|       |                |               | 0.131 E-00  | -0.588 E-01 | 0.877 E-01  | 0.767 E-01  | -0.452 E-01 |
|       |                |               | -0.315 E-01 | 0.959 E-01  | -0.477 E-02 | -0.157 E-01 |             |
| 21    | -22.90         | 0.56          | -0.174 E-01 | -0.213 E-01 | -0.237 E-02 | -0.779 E-01 | -0.472 E-01 |
|       |                |               | -0.472 E-01 | 0.534 E-01  | 0.613 E-01  | 0.582 E-01  | 0.109 E-00  |
|       |                |               | -0.428 E-01 | 0.110 E-00  | -0.793 E-01 | 0.796 E-01  | 0.510 E-01  |
|       |                |               | -0.435 E-01 | -0.560 E-01 | 0.840 E-01  | -0.858 E-02 | -0.280 E-01 |
| 23    | -25.02         | 1.32          | -0.242 E-01 |             |             |             |             |
|       |                |               | 0.201 E-01  | -0.499 E-02 | -0.170 E-02 | 0.757 E-02  | -0.474 E-01 |
|       |                |               | -0.118 E-01 | -0.341 E-01 | 0.734 E-01  | 0.889 E-01  | 0.804 E-01  |
|       |                |               | 0.104 E-00  | -0.128 E-01 | 0.140 E-00  | -0.631 E-01 | 0.941 E-01  |
| 25    | -25.51         | 1.11          | 0.930 E-01  | -0.279 E-01 | -0.255 E-01 | 0.104 E-00  | 0.213 E-01  |
|       |                |               | -0.128 E-01 | 0.198 E-01  | 0.363 E-01  |             |             |
|       |                |               | 0.143 E-01  | 0.252 E-01  | -0.106 E-01 | 0.160 E-02  | 0.450 E-02  |
|       |                |               | -0.471 E-01 | -0.170 E-01 | -0.387 E-01 | 0.631 E-01  | 0.943 E-01  |
| 27    | -25.64         | 1.31          | 0.811 E-01  | 0.102 E-00  | -0.327 E-01 | 0.123 E-00  | -0.665 E-01 |
|       |                |               | 0.983 E-01  | 0.793 E-01  | -0.224 E-01 | -0.295 E-01 | 0.105 E-00  |
|       |                |               | 0.158 E-01  | -0.147 E-01 | 0.128 E-16  | 0.393 E-01  | 0.137 E-01  |
|       |                |               | 0.162 E-03  | 0.130 E-01  | 0.263 E-01  | -0.105 E-01 | 0.461 E-02  |
| 29    | -26.42         | 1.37          | 0.722 E-02  | -0.434 E-01 | -0.743 E-02 | -0.344 E-01 | 0.748 E-01  |
|       |                |               | 0.961 E-01  | 0.856 E-01  | 0.990 E-01  | -0.189 E-01 | 0.134 E-00  |
|       |                |               | -0.673 E-01 | 0.970 E-01  | 0.881 E-01  | -0.223 E-01 | -0.301 E-01 |
|       |                |               | 0.102 E-00  | 0.227 E-01  | -0.102 E-01 | 0.981 E-02  | 0.393 E-01  |
| 31    | -26.56         | 1.22          | 0.801 E-02  | 0.491 E-02  |             |             |             |
|       |                |               | -0.318 E-01 | 0.813 E-02  | 0.117 E-02  | 0.581 E-02  | -0.171 E-01 |
|       |                |               | -0.465 E-02 | 0.835 E-02  | -0.530 E-01 | -0.261 E-01 | -0.332 E-01 |
|       |                |               | 0.738 E-01  | 0.846 E-01  | 0.742 E-01  | 0.968 E-01  | -0.146 E-01 |
| 31    | -26.56         | 1.22          | 0.134 E-00  | -0.569 E-01 | 0.982 E-01  | 0.102 E-00  | -0.141 E-01 |
|       |                |               | -0.260 E-01 | 0.112 E-00  | 0.129 E-01  | -0.461 E-02 | 0.252 E-01  |
|       |                |               | 0.334 E-01  | 0.597 E-02  | 0.251 E-01  | 0.167 E-01  |             |
|       |                |               | -0.711 E-02 | -0.305 E-01 | 0.933 E-02  | 0.417 E-03  | 0.417 E-03  |
| 31    | -26.56         | 1.22          | -0.169 E-01 | -0.274 E-02 | 0.960 E-02  | -0.559 E-01 | -0.266 E-01 |
|       |                |               | -0.348 E-01 | 0.743 E-01  | 0.838 E-01  | 0.735 E-01  | 0.100 E-00  |
|       |                |               | -0.127 E-01 | 0.136 E-00  | -0.632 E-01 | 0.908 E-01  | 0.946 E-01  |
|       |                |               | -0.254 E-01 | -0.263 E-01 | 0.102 E-00  | 0.176 E-01  | -0.147 E-01 |
| 31    | -26.56         | 1.22          | 0.163 E-01  | 0.354 E-01  | 0.778 E-02  | 0.107 E-01  | 0.963 E-02  |
|       |                |               | -0.267 E-02 |             |             |             |             |

表 4 31 位 m 序列的 LP 滤波器举例  
Tab. 4 Examples of LP filter for 31-element m-sequence

| 反馈连<br>接方式  | 起始<br>状态 | 匹配滤波<br>器峰值旁<br>瓣电平<br>(dB) | 长 度 为 31 的 LP 滤 波 器 |                        |                   |                  |             |             |             |             |             |             |             |
|-------------|----------|-----------------------------|---------------------|------------------------|-------------------|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|             |          |                             | 峰值旁瓣<br>电平<br>(dB)  | 峰值旁瓣<br>电平改善<br>值 (dB) | 信噪比<br>损失<br>(dB) | 冲<br>激<br>响<br>应 | 序<br>列      |             |             |             |             |             |             |
| [5,3,2,1,0] | 11101    | -17.79                      | -23.80              | 6.01                   | 0.52              | 0.208 E-01       | 0.437 E-01  | -0.285 E-01 | -0.415 E-01 | 0.283 E-01  | -0.259 E-01 | -0.154 E-01 | 0.521 E-01  |
|             |          |                             |                     |                        |                   | 0.295 E-01       | -0.453 E-01 | -0.307 E-01 | -0.343 E-01 | -0.585 E-01 | 0.323 E-01  | -0.202 E-01 | 0.444 E-01  |
|             |          |                             |                     |                        |                   | 0.287 E-01       | -0.431 E-01 | 0.333 E-01  | -0.204 E-01 | 0.503 E-01  | -0.264 E-01 | -0.225 E-01 | -0.184 E-01 |
|             |          |                             |                     |                        |                   | 0.396 E-01       | 0.293 E-01  | 0.401 E-01  | -0.851 E-02 | 0.231 E-01  | 0.247 E-01  | 0.399 E-01  |             |
| [5,4,2,1,0] | 01101    | -17.79                      | -23.32              | 5.53                   | 0.71              | -0.270 E-01      | -0.267 E-01 | -0.148 E-01 | 0.537 E-01  | 0.436 E-01  | 0.442 E-01  | -0.305 E-01 | -0.108 E-01 |
|             |          |                             |                     |                        |                   | 0.115 E-01       | 0.385 E-01  | -0.282 E-01 | 0.510 E-01  | 0.310 E-01  | 0.489 E-01  | 0.452 E-01  | 0.611 E-01  |
|             |          |                             |                     |                        |                   | -0.259 E-01      | 0.470 E-01  | -0.242 E-01 | -0.135 E-01 | -0.268 E-01 | 0.434 E-01  | -0.215 E-01 | -0.230 E-01 |
|             |          |                             |                     |                        |                   | 0.389 E-01       | -0.132 E-01 | 0.477 E-01  | -0.201 E-01 | 0.417 E-01  | 0.243 E-01  | -0.223 E-01 |             |
| [5,4,2,1,0] | 00111    | -15.85                      | -23.10              | 7.25                   | 0.85              | 0.452 E-01       | 0.249 E-01  | -0.146 E-01 | 0.346 E-01  | 0.458 E-01  | 0.240 E-01  | 0.991 E-02  | 0.259 E-01  |
|             |          |                             |                     |                        |                   | -0.460 E-01      | 0.503 E-01  | -0.103 E-01 | -0.506 E-01 | -0.269 E-01 | 0.408 E-01  | -0.579 E-01 | -0.517 E-01 |
|             |          |                             |                     |                        |                   | 0.564 E-01       | 0.804 E-04  | 0.281 E-01  | -0.377 E-01 | 0.242 E-01  | 0.354 E-01  | -0.377 E-01 | -0.257 E-02 |
|             |          |                             |                     |                        |                   | -0.282 E-01      | -0.366 E-01 | 0.209 E-01  | 0.350 E-01  | 0.393 E-01  | -0.176 E-01 | -0.411 E-01 |             |

滤波器长度增加时,虽然旁瓣也能进一步压低,但相对于好的码,性能总是差些。

从全部 93 个 31 位  $m$  序列的计算结果中发现性能较优的有 3 个,它们的长度为 31 的 LP 滤波器能把峰值旁瓣压到  $-23$  dB 以下,而信噪比损失都小于 1 dB。这 3 个 31 位  $m$  序列的长度为 31 的 LP 滤波器的冲激响应序列、峰值旁瓣电平以及信噪比损失列于表 4。

从以上计算结果还可发现,有些自相关函数峰值旁瓣较高的码,经 LP 滤波器处理后,性能反而更好。因此,在用 LP 滤波器处理信号时,不能单根据自相关函数旁瓣高低来区分  $m$  序列的优劣。

## 五、结 束 语

线性规划方法可用来求解任意信号的 LP 滤波器。用这个方法去寻求  $m$  序列的 LP 滤波器,是可行的。对于 15 位和 31 位全部  $m$  序列的计算结果表明,在大约 1dB 信噪比损失的代价之下,LP 滤波器对于峰值旁瓣有较大的抑制。

最后要说明一点,LP 滤波器的加权系数的数值复杂,具体实现这种滤波器可能要困难一些。但是,随着数字电路、SAW 器件以及 CCD 的发展,这种困难是可以克服的。

## 参 考 文 献

- [1] E. Mosca, IEEE Trans. on IT, **IT-13**(1967), 131.
- [2] R. K. Cavin, et al., IEEE Trans. on GE, **GE-7**(1969), 142.
- [3] H. J. Blinichkoff and A. I. Zverev, *Filtering in the Time and Frequency Domains*, John Wiley & Sons, 1976.
- [4] S. Zoraster, IEEE Trans. on AES, **AES-16**(1980), 112.
- [5] 朱兆达、戴明楨、陈由俊,中国电子学会信号与信息处理会议论文集,1981年,第125页.
- [6] S. L. Maskara and J. Das, IEEE Trans. on AES, **AES-17**(1981), 342.
- [7] R. S. Berkowitz, *Modern Radar*, John Wiley & Sons, 1965.

## MINIMUM PEAK SIDELobe FILTERS FOR $m$ -SEQUENCE PHASE-CODED WAVEFORMS

Zhu Zhaoda, Chen Yujun, Dai Mingzhen

(Nanjing Aeronautical Institute)

The impulse response sequence of minimum peak sidelobe filter (LP filter) for  $m$ -sequence phase-coded waveform can be found by using linear programming method. The results of computation for all the 15-element and 31-element  $m$ -sequences show that the LP filters can significantly suppress the peak sidelobes. For the 15-element code with feedback connection [4, 3, 0] and initial condition 1001, the peak sidelobe level is reduced to  $-21.47$  dB by using LP filter of length 15, and it is 7.49 dB better than that by using matched filter. For the 31-element code with feedback connection [5, 3, 2, 1, 0] and initial condition 11101, the peak sidelobe level is reduced to  $-23.80$  dB by using LP filter of length 31, and it is 6.01 dB better than that by using matched filter. The LP filter can suppress the peak sidelobe even more when its length is increased.