

相位编码旁瓣抑制及其在 MSK 扩频中的应用

李海轮, 孙盛喜

(四川九州电器集团有限责任公司, 四川 绵阳 621000)

摘 要:与相位编码信号一样, MSK 扩频信号在采用匹配滤波处理时, 也存在旁瓣较高的现象, 影响弱目标检测。相位编码信号通常使用迭代加权最小二乘算法来降低旁瓣, 将该算法应用于 MSK 扩频信号的旁瓣抑制, 可显著提高主副比。仿真结果表明, 主副比改善了 10 dB 以上, 而信噪比损失仅约 1 dB。

关键词:旁瓣抑制; 最小二乘; MSK 扩频; 迭代加权; 失配滤波

中图分类号: TN95

文献标识码: A

Phase-Coded Sidelobe Suppression and Its Application to MSK Spread Spectrum

LI Hailun, SUN Shengxi

(Sichuan Jiuzhou Electric Group Co. Ltd, Mianyang 621000, China)

Abstract: Like phase-coded signals, when processed by match filtering, MSK spectrum signals will have higher sidelobes which affects the detection of weak targets. Phase-coded signals usually use the iteratively reweighed least-square algorithm to suppress sidelobes. When this algorithm is applied to MSK spectrum signals for sidelobe suppression, it is found that the ratio of mainlobe to sidelobe can be improved significantly. The simulation results show that the ratio of mainlobe to sidelobe has been raised over 10 dB while the loss of SNR is only around 1 dB.

Key words: sidelobe suppression; least-square; MSK spread spectrum; iteratively reweighted; mismatched filtering

0 引言

相位编码信号是用码元对载波进行相位调制所产生的信号, 按调相码制式不同, 分为二相编码和多相编码。二相编码(BPSK)通常采用对载波进行 0、 π 调相来实现, 多相编码是使载波信号相位在多个值之间变化。相位编码信号也是一种扩频信号, 通过非线性相位调制得到较大的时宽带宽积(TB 积), 克服了脉冲雷达在同时提高分辨率、作用距离以及测量精度方面的矛盾, 充分发挥了设备的平均发射功率, 来提高其发现目标的能力。另外, 相位编码信号还具有抗干扰、抗截获和反隐身特性, 在当今电子对抗日益激烈的形势下, 受到了研究者的普遍关注。

相位编码信号的检测是通过脉冲压缩技术实现的, 脉冲压缩以频带扩展换取较高的时域分辨率, 一般是将信号通过匹配滤波器来完成。当信号与滤波器窗完全对齐时, 能给出脉冲压缩的时域峰值, 即匹配滤波器的最大瞬时信噪比。但是, 匹配滤波器的输出并不是理想的单一脉冲, 理论上, 和信号的非周期自相关函数相同, 存在若干旁瓣。在多目标环境

下, 弱目标的主瓣会被强目标回波的旁瓣电平淹没, 易丢失目标, 且难以实现对低可观测目标的探测, 在射频隐身不断发展的今天可能造成难以挽回的损失。所以在相位编码信号的脉压处理中, 如何获得更好的旁瓣特性一直是研究人员关注的课题。

改善旁瓣特性的方法主要是两个方向: 优选编码和旁瓣抑制。如果确定了编码形式而主旁瓣比仍然无法满足要求时, 就需要采用旁瓣抑制技术^[1]。Ackroyd 利用最小二乘法得到针对巴克码的最佳积累旁瓣电平滤波器^[2]; Baden 和 Cohen 利用迭代加权进一步优化了峰值旁瓣^[3], 这是目前已知较好的相位编码旁瓣抑制技术, 通过选择合适的滤波器长度和迭代循环次数, 能够很好地改善相位编码信号的主副瓣比。

MSK 是一种二进制频率调制波形, 比二相编码(BPSK)信号具有更好的频谱特性(在给定同样的带宽内, 数据传输率更高, 且带外频谱分量滚降快), 因而 MSK 扩频信号在雷达、数据链等领域得到了大量应用。MSK 扩频信号与二相编码信号一样, 也存在由编码序列自相关函数所决定的旁瓣。本文研

收稿日期: 2014-02-23

作者简介: 李海轮(1966-), 男, 四川威远人, 高级工程师, 硕士, 主要从事航空电子系统和设备研制。

究将最小二乘算法应用于 MSK 扩频信号的处理中,给出了最小二乘滤波器在 MSK 扩频系统中的应用方案,并作了仿真,仿真结果表明,在增益损失较小的条件下,可以获得较好的主副比。

1 迭代加权最小二乘滤波器基本原理^[4-6]

对码序列长为 K 的二相编码信号(基带)进行采样,每个码元宽度内采一个点,得到长度为 K 的复采样序列 c 。对应的失配滤波器的阶数 M 一般大于二相编码信号序列长度 K ,这样旁瓣的总能量就被扩散到更多的旁瓣上,主副比也就提高了。输入信号 c 和滤波器系数 h 可用向量分别表示为

$$c = (c_0 \ c_1 \ \cdots \ c_{K-1})^T \quad (1)$$

$$h = (h_0 \ h_1 \ \cdots \ h_{M-1})^T \quad (2)$$

滤波器响应为

$$y_n = \sum_{k=0}^{K-1} c_k h_{n-k} \quad n=0, \cdots, (K+M-2) \quad (3)$$

实际中,滤波器输出的旁瓣电平越小,对信号的检测越有利,旁瓣电平衡量指标有积分旁瓣电平(ISR)和峰值旁瓣电平(PSR):

$$ISR = 10 \log_{10} \frac{\text{旁瓣总能量}}{(\text{主瓣峰值})^2} \quad (4)$$

$$PSR = 10 \log_{10} \frac{\text{最大旁瓣能量}}{(\text{主瓣峰值})^2} \quad (5)$$

滤波器输出的最大旁瓣位置随着码序列的不同而不同,难以直接确定,通常设计是使积分旁瓣电平最小。

不失一般性,假设期望的滤波器输出向量 d 为

$$d = (d_0 \ d_1 \ \cdots \ d_{K+M-2})^T$$

$$d_{n=p} = 1, d_{n \neq p} = 0 \quad (6)$$

根据最小二乘算法,要使 ISR 最小,即期望响应与输出响应误差平方和 E 最小:

$$E = \sum_{n=0}^{K+M-2} (d_n - y_n)^2 \quad (7)$$

式(3)表示为矩阵形式:

$$y = Ch \quad (8)$$

式中 C 为信号向量循环移位所得的信号矩阵,有

$$C = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ c_2 & c_1 & \cdots & 0 & \\ 0 & \cdots & c_K & c_{K-1} & \\ 0 & \cdots & 0 & c_K & \end{bmatrix} \quad (9)$$

式(7)表示为矩阵形式:

$$E = (d - y)(d - y)^H \quad (10)$$

当 C 为列满秩矩阵时,求出最小二乘解为

$$h = (C^H C)^{-1} C^H d \quad (11)$$

在上面的求解中,对所有误差都是同等对待的,

这样得到的滤波器输出对 ISR 来说是最佳的,而实际应用中误差是不等价的,峰值旁瓣对信号检测影响较大,所以希望 PSR 最小,这可以利用迭代加权来求得合适的权矢量 W 。迭代加权最小二乘解可表示为

$$h = (C^H W C)^{-1} C^H d \quad (12)$$

式中 W 为加权矩阵,是以权值为对角元素的对角矩阵,有

$$W = \begin{bmatrix} w_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & w_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & w_{K+M-2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & w_{K+M-1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

根据求出的滤波器系数 h 得到输出序列 y ,然后对 W 进行迭代更新:

$$W(n) = |y_p| W(n-1) \text{diag}(\lambda + |y - d|) \quad (14)$$

只要参数选择合适,这种算法收敛很快,通常迭代几次就能满足实际要求。

2 最小二乘滤波器在 MSK 扩频中的应用

同样码速率的 MSK 扩频信号和二相编码信号相比,具有更优良的频谱特性,因而得到广泛关注。与相位编码信号对载波相位进行二进制或多进制调制所不同的是,MSK 扩频是对载波进行频率调制。本文以 MSK 中频信号为例,给出了最小二乘滤波器在 MSK 扩频系统中的应用方案,如图 1 所示。与二相编码信号所不同的是,对 MSK 扩频信号的脉压处理不能再直接采用码序列作为滤波器系数,而是将基带调制后的 I、Q 信号形成复序列,再迭代加权处理后作为失配滤波器系数。

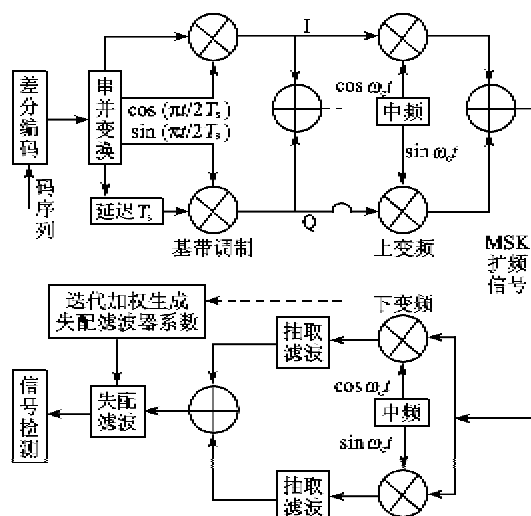


图1 最小二乘滤波器在 MSK 扩频处理中应用框图

3 对 MSK 扩频旁瓣抑制的仿真分析

根据上述应用方案,建立 MSK 扩频解扩仿真模型,对不同长度的扩频码进行了仿真,仿真数据的采样率等于信号带宽。在实际仿真中,迭代次数超过某个具体数值(如 10)则终止迭代,前后两次迭代的 PSR 之差小于门限(表示两次迭代后峰值旁瓣不再显著变化)也终止迭代。图 2 为 15 位 m 序列分别使用匹配滤波和 45 阶最优 ISR 滤波器的输出比较。图 3 为 15 位 m 序列分别使用匹配滤波和 45 阶最优 PSR 滤波器的输出比较。

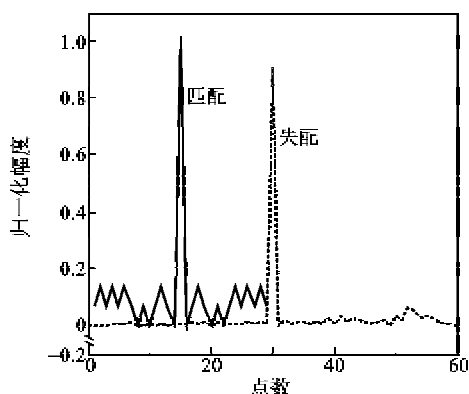


图 2 15 位 m 序列匹配滤波与最优 ISR 滤波器结果对比

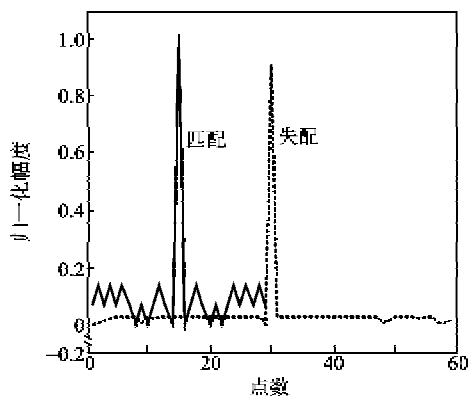


图 3 15 位 m 序列匹配滤波与最优 PSR 滤波器结果对比

比较图 2、3 可看出,经过迭代加权,旁瓣变得较平坦,对信号监测影响较大的峰值旁瓣能量被分散了。

表 1 为不同长度最小峰值旁瓣(MPS)码(设长度为 N)分别经过匹配滤波及 $3N$ 阶旁瓣抑制滤波器输出的 PSR、ISR 和信噪比损失(LPG)。由表可见,采用 PSR 最优滤波后峰值旁瓣电平(PSR)约有 12~21 dB 的改善,积分旁瓣电平(ISR)改善了 6~15 dB,且信噪比损失较小,最大约 1 dB。

表 1 不同长度 MPS 码匹配滤波及失配滤波性能比较

码长	匹配滤波(PSR/ISR)/dB	ISR 最优滤波(PSR/ISR)/dB	PSR 最优滤波(PSR/ISR/LPG)/dB
13	-22.28/ -11.49	-38.47/ -30.03	-43.09/-26.83/ 0.19
15	-17.50/ -6.89	-23.52/ -16.60	-30.09/-13.37/ 0.78
16	-18.06/ -6.60	-26.35/ -14.39	-30.30/-13.30/ 1.15
31	-20.28/ -8.56	-31.91/ -21.31	-38.31/-18.35/ 0.60
32	-20.56/ -8.52	-30.80/ -20.62	-37.72/-17.89/ 0.62
63	-23.55/ -6.67	-32.41/ -16.85	-36.53/-14.98/ 1.11
64	-24.08/ -6.84	-30.40/ -17.50	-34.86/-13.70/ 1.17

4 结束语

从以上仿真结果看出,本文设计的旁瓣抑制滤波器对 MSK 扩频信号有效。与匹配滤波相比,主副比改善了 10 dB 以上,而且信噪比损失仅约 1 dB。本文的研究对于 MSK 扩频系统在减少检测虚警、提高弱目标检测能力,改善系统的动态范围等方面都具有重要意义。

参考文献:

- [1] 王飞雪,欧钢. 恒增益处理损失的最佳编码旁瓣抑制滤波器[J]. 电子学报,2003,31(9):1418-1421.
WANG Feixue, OU Gang. Optimal code sidelobe suppression filters with constant loss in process gain[J]. Acta Electronica Sinica, 2003,31(9):1418-1421.
- [2] ACKROYD M H, GHANI F. Optimum mismatched filters for sidelobe suppression[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1973,9(2):214-218.
- [3] BADEN J M, COHEN M N. Optimal peak sidelobe filters for biphasic pulse compression[C]//S. I.; Proc of IEEE International Radar Conference, 1990:249-252.
- [4] 杨斌,向敬成,刘晟. 一种数字脉压旁瓣抑制滤波器设计方法[J]. 电子科学学刊,2000,22(1):124-129.
- [5] 王丽萍,苏涛. 一种迭代加权最小二乘旁瓣抑制滤波器设计[J]. 火控雷达技术,2008,37(1):92-96.
- [6] WILLIAM L M, JAMES A S. Principles of modern radar[M]. Stevenage:SciTech Publishing, 2013:75-81.