

一种多普勒宽容的多址波形

王永丰^{1,2}, 吴永清¹, 蔡惠智¹

(1. 中国科学院声学研究所, 北京 100080; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100080)

摘要: 提出了一种具有多址特性、对多普勒宽容的主动波形-HFM-Costas 波形。这种波形是通过将宽带双曲调频波形在时间上切分为子脉冲, 再根据 Costas 阵列编码重新排列而成, 它结合了 Costas 编码的多址特性和双曲调频信号的多普勒宽容性。这种波形适于采用相干-非相干混合接收机进行处理, 接收机结构简单, 计算量小, 检测鲁棒性好。详细说明了这种波形的生成方法、相应混合接收机结构, 并分析了该波形的主要特性。最后, 通过湖上试验进行了验证。

关键词: 主动波形; 多普勒宽容; HFM Costas

中图分类号:

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2008)-01-0014-04

A multiaddress waveform with Doppler tolerance

WANG Yong-feng^{1,2}, WU Yong-qing¹, CAI Hui-zhi¹

(1. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China;

2. Graduate School, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

Abstract: A multiaddress waveform with Doppler tolerance called HFM-Costas waveform is proposed. It is generated by cutting a broadband HFM (hyperbolic frequency modulation) waveform into a sequence of sub-pulses with equal length and rearranging together according to a selected Costas array code. The combined waveform inherits the multiaddress feature of Costas code and the Doppler tolerance characteristic of HFM waveform. The waveform can be detected by using a combined receiver with coherent-nocoherent structure which is simple, cost effective and robust in performance. This work first details the technique of generating the waveform along with the combined receiver, and then analyses the major properties of the waveform which are finally verified with real data from a lake trial.

Key words: active waveform; Doppler tolerance; HFM Costas

1 引言

在多基地主动声呐系统中和舰艇编队作战等情况下, 需要多部声呐发射的主动声呐波形相互之间避免干扰, 即要求主动波形具有多址特性。简单的主动声呐波形如单频脉冲、调频信号等, 不具备多址性能。虽然可以通过将各部声呐设置在不同的工作频率来消除同频干扰, 但此时每部声呐只能使用较小的带宽, 从而降低了处理增益。因此, 采用具有多址特性的主动信号波形是一种好的选择。一些复杂波

形如伪随机码调相信号、Costas 跳频信号具有优良的多址性能, 但因为其对多普勒敏感, 使得接收机必须在多个多普勒通道上进行匹配处理, 结构复杂。

本文通过结合双曲调频(HFM)信号的多普勒宽容性与 Costas 阵列编码的多址特性, 构造了一种多普勒宽容的多址波形(HFM-Costas 波形)。它以 HFM 脉冲作为跳频子脉冲, 对多普勒宽容的同时保留了 Costas 信号的多址特点, 并且非常适于采用相干-非相干混合处理, 接收机结构简单。

2 Costas 编码

Costas 编码是一种跳频编码方案^[2], 它将 N 个不同频率的 CW 子脉冲按编码序列排列在一个 $N \times$

收稿日期: 2007-03-20; 修回日期: 2007-06-21

作者简介: 王永丰(1978-), 男, 甘肃人, 助理工程师, 博士研究生, 研究方向为阵列信号处理、主动声呐。

通讯作者: 王永丰, E-mail: wyf@water.ac.cn

N 的阵列中，使得当这个阵列在其复本之上进行任意平移(行方向对应于延时，列方向对应于多普勒频移)时，最多只有一个阵元上的元素发生重叠。也就是说其二维自相关函数在两个方向上都具有小的旁瓣($\leq 1/N$)，因此基于 Costas 编码的波形具有接近图钉形的自模糊度函数，是一种同时具有高的距离和速度分辨率的主动信号。另外，Costas 编码还是一种具有多址特性的编码[3]，通过合理选择，可以找到一族同阶的 Costas 码，使其具有小的二维互相关函数。表 1 给出了 $N=10$ 的一族 Costas 编码，表 2 给出了表 1 中序列的互相关函数峰值。

表 1 $N=10$ 的一族 Costas 编码
Table 1 A family of Costas codes with $N=10$

#	编码序列									
1	2	4	8	5	10	9	7	3	6	1
2	6	3	7	9	10	5	8	4	2	1
3	7	5	2	3	10	4	6	9	8	1
4	8	9	6	4	10	3	2	5	7	1

表 2 表 1 中编码的互相关函数最大值
Table 2 Peak values of cross-correlation of codes in Table 1

#	1	2	3	4
1	10	2	3	3
2	2	10	3	3
3	3	3	10	2
4	3	3	2	10

在处理上，对 Costas 跳频信号一般采用混合相干-非相干检测方法，即接收机采用一组匹配滤波器，对每个子脉冲分别进行相干检测，然后再根据编码图样用一个延时-求和矩阵产生输出，不同的编码序列对应于不同的延时-求和矩阵。由于子脉冲采用 CW，对应于不同的目标速度，接收机必须不同的多普勒通道上进行搜索，结构复杂，计算量大。

3 HFM-Costas 波形

虽然 Costas 跳频信号具有近似理想的分辨力，但在某些应用场合，频率分辨率并不重要，此时由于其接收机复杂，多普勒敏感性反而成为其弱点。通过将双曲调频脉冲作为跳频序列的子脉冲，可以构造出具有多普勒宽容性的 HFM-Costas 波形，方法如下。

(1) 根据系统工作频段确定信号的中心频(这里定义为算术中心频率) f_m ，根据可用带宽、系统所需要的时间增益，确定总脉宽 T 与带宽 B ；

(2) 根据 f_m 、 B 、 T 生成宽带 HFM 信号；

(3) 根据系统对多普勒宽容性、多址性能的要求

确定 Costas 阵列阶数 N 并选择码族；

(4) 将 HFM 信号截断为 N 个等脉宽 $T_{sub}=T/N$ 的子脉冲，表示为 $HFM_{sub}(i)$ ， $1 \leq i \leq N$ ，同时，根据 HFM 信号的解析表达式计算出各子脉冲的算术中心频率 $f_{msub}(i)$ ；

(5) 将子脉冲按 Costas 编码序列重新排列连接起来。

在这里，取 $f_m=58\ 000\text{Hz}$ ， $B=20\ 000\text{Hz}$ ， $T=20\text{ms}$ ， $N=10$ ，采用表 1 中的序列 1。图 1 为生成的宽带 HFM 与 HFM-Costas 信号的时频分布。

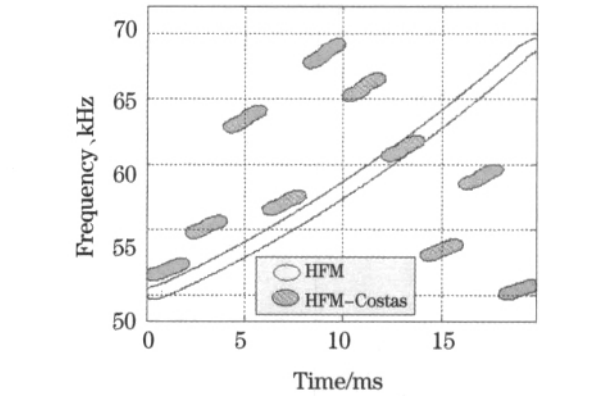


图 1 HFM 与 HFM-Costas 信号时频分布
Fig.1 Time-Frequency distribution of HFM and HFM-Costas waveform

注意到图 1 中子脉冲的带宽并不相同(以 $B_{sub}(i)$ ， $1 \leq i \leq N$ 表示)，这是因为 HFM 信号的频率并不是时间的线性函数。将子脉作窄带处理时，相同速度所引起的多普勒频移也不同，然而，由于各子脉冲的“中心频率”也不同，相同时间扩展因子所造成的相关峰的时间偏移量是相同的，相关峰可以叠加起来。

4 性能分析

4.1 处理增益

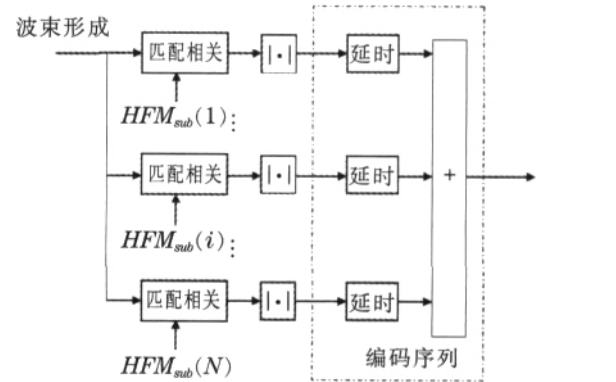


图 2 相干-非相干检测接收机结构
Fig.2 Coherent-nocoherent receiver structure

如前所述,采用图 2 所示的相干-非相干混合接收机对 HFM-Costas 波形进行处理。来自波束形成单元的信号分别与每个子脉冲进行匹配相关,各相关器输出取绝对值后进行入与编码序列对应的延时-求和矩阵,延时-求和后即得到复合信号的检测输出。由于子带信号更容易满足窄带条件,可以用窄带方法(如正交解调-复包络相关)进行处理,能够进一步减小计算量,降低硬件成本。在噪声情况下,单个子脉冲的相关处理增益为 $101gB_{\text{sub}}(i)T_{\text{sub}}\text{dB}$,忽略子脉冲带宽差别,混合检测方式总的处理增益为:

$$GT=101gT_{\text{sub}}B_{\text{sub}}+51gN \quad (1)$$

式中 T_{sub} 、 B_{sub} 分别为子脉冲脉宽与带宽, N 为 Costas 编码阶数。

4.2 多普勒分辨率

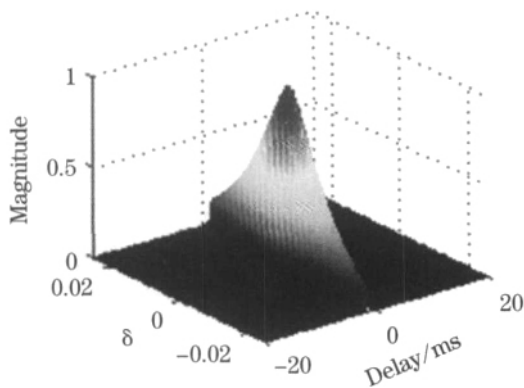


图 3(a) 序列 1 的 HFM-Costas 波形模糊度函数
Fig.3(a) Ambiguity function of HFM-Costas with code 1

图 3 给出了上述 HFM-Costas 信号采用相干-非相干检测时的“模糊度函数”。由于采用了混合检测,复合信号的多普勒分辨率与各子脉冲相同。各子脉冲的窄带多普勒容限由 $f_{\text{msub}}(i)$ 、 $B_{\text{sub}}(i)$ 决定。近似地,可以取频率在 f_m 处的子脉冲来计算, - 3dB 多普勒模糊度为^[4]:

$$\delta f_m = \frac{2vf_m}{c} = \frac{0.6B}{N}, v = \frac{900B}{Nf_m} \quad (3)$$

式中 δf_m 为窄带多普勒频移,以 Hz 为单位,速度 v 的单位为节。对于文中给出的信号,速度容限为 ± 15.5 节。可以通过增加子脉冲带宽来增大多普勒容限,然而在总带宽有限的情况下,这意味着减少 N ,正如下面指出的,将会牺牲多址性能。

4.3 多址性能

图 4 给出了根据表 1 中序列 1 与序列 2 所生成的 HFM-Costas 波形的“互模糊度函数”,波形参数同上。

更一般地,当波形编码与接收机延时-求和图样

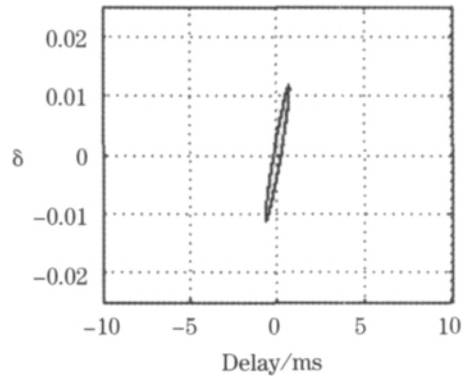


图 3(b) 序列 1 的 HFM-Costas 波形-3dB 模糊度图
Fig.3(b) Ambiguity diagram of HFM-Costas with code 1

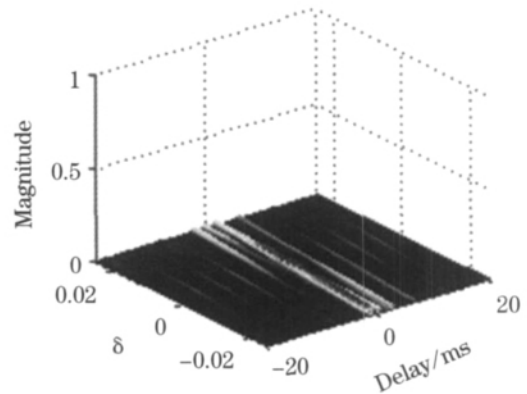


图 4 序列 1 与序列 2 的波形互模糊度函数
Fig.4 Cross-ambiguity function of HFM-Costas waveform with code 1 and code 2

不同时,所得到的处理增益为(单位: dB):

$$GT \leq 101gT_{\text{sub}}B_{\text{sub}}+51gX \quad (4)$$

式中 X 为互相关函数最大值,如表 2 中所示。与式 (1) 相比较,可得码字间的抑制比最小为 $51g(N/X)$ dB,以表 1 中码族为例,最小为 2.7dB。可以通过增大 N 和挑选互相关函数小的码族来提高多址性能。在总的可用带宽受限的情况下,增大 N 将会减小子脉冲的带宽,进而减小多普勒容限。实际使用时必须在两者之间折衷。Costas 编码的互相关性能可以通过减少码族间可用码的数量而提高^[3],如只使用表 1 中序列 1 和 2,则码间抑制比增大到 3.5dB。

5 试验结果

为了验证文所提出的波形在实际水声环境中的性能,进行了湖上试验。试验中所用目标为 $TS=-4\text{dB}$ 的柱形仿真锚雷,距离为 576 米,发射系统声源级 $SL=183\text{dB}$ 。接收采用平板阵,水平波束开角 2° ;垂直开角 10° 。发射信号波形采用序列 1,其它参数同上。图 5 是一次脉冲发射回波数据处理结果。图中 DT 为检测指数^[5]。

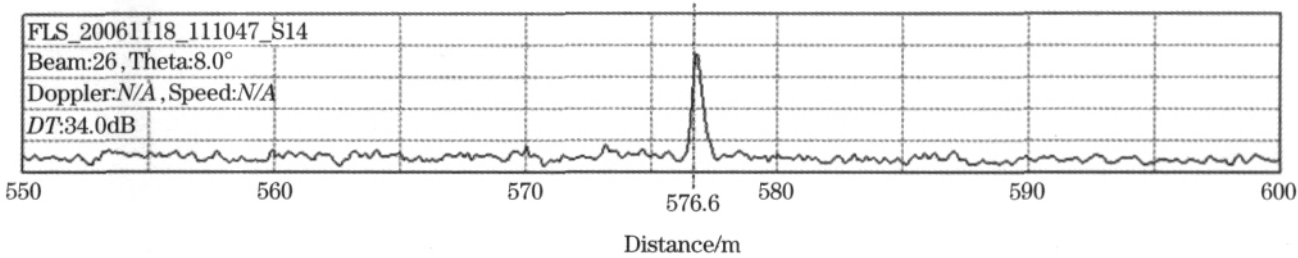


图 5(a) 湖上试验数据:混合检测接收机输出
Fig.5(a) Lake trial data: output of the combined receiver

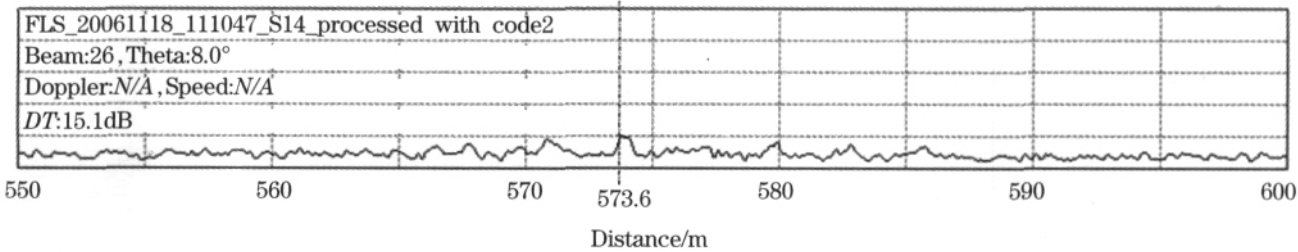


图 5(b) 湖上试验数据:接收机采用序列 2 延时求和的输出
Fig.5(b) Lake trial data: output of the combined receiver with code 2

表 3 HFM-Costas 波形与窄带 HFM 波形 DT 值对比
Table 3 Comparison of DTs of HFM-Costas waveform and conventional HFM waveform

脉冲编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	平均
HFM-Costas	35.4	34.0	34.0	33.5	34.4	34.0	35.1	33.5	34.0	35.4	35.7	33.0	32.8	31.5	29.7	33.8
HFM	34.2	32.5	33.7	32.3	31.1	29.8	33.1	30.8	31.4	32.7	29.7	30.9	31.0	28.8	26.1	31.4

由图 5(b) 可见当接收机所采用的编码与发射波形不同时,子脉冲相关峰不能够被完整叠加,而是分散于时间轴上,从而实现了码间抑制。作为对比,表 3 给出了上述试验条件下 HFM-Costas 波形与传统窄带 HFM 波形 DT 值对比结果,试验中两种波形交替发射,共进行了 15 次。HFM 窄带波形参数为: $f_m=61.8\text{kHz}$, $B=3\text{kHz}$, $T=21\text{ms}$, 采用匹配滤波处理。HFM-Costas 波形参数同上。可以看出 HFM-Costas 取得了与窄带 HFM 相近的接果, 具有较好的检测鲁棒性。

6 结 论

具有多址特性的波形在许多应用中都有需求,本文提出的 HFM-Costas 波形对多普勒宽容,能够简化接收机结构,增加检测的鲁棒性,具有潜在的应用价值,其实用性已经通过理论分析和湖上试验进行了初步验证。需要指出的是,以上分析中并没有

考虑到子脉冲发射和传播特性的差别,在实际系统中由于换能器频率响应,或者及吸收损失(因频率而不同)的影响,子脉冲幅度不再一致,将会使得多址性能下降。进一步的研究将结合具体应用需求进行,通过对比不同参数(带宽、脉宽、阶数、码族等)组合下波形的性能来确定合适的参数。

参 考 文 献

[1] 朱野. 主动声呐检测信息原理[M]. 北京海洋出版社, 1990.
ZHU Ye. An information theory of active sonar detection [M]. Beijing Ocean Press. 1990.

[2] JP Costas. A study of a class of detection waveforms having nearly ideal range-doppler ambiguity properties[J]. Proceedings of the IEEE, 1984, 72(8): 996-1009.

[3] S V Maric, I Seskar, E L Tittlebaum. On cross-ambiguity properties of Welch-Costas arrays [J]. IEEE Transactions on AES, 1994, 30(4): 1063-1071.

[4] Waite A D. Sonar for practising engineers[M]. Third Edition. John Wiley & Sons, Ltd., 2002.

[5] 李启虎. 数字式声纳设计原理[M]. 安徽教育出版社, 2002.
LI Qihu. The principle for digital sonar design[M]. Anhui Educational Press. 2002.