

文章编号: 2095-4980(2014)04-0579-05

## 巴克码在复合声呐信号中的应用

冯 奇, 王英民

(西北工业大学 航海学院, 陕西 西安 710072)

**摘 要:** 信号波形直接影响着声呐对目标的时延分辨力、频移分辨力、低截获能力及抗混响能力。因此, 设计和选择合适的波形对声呐系统有着极其重要的影响。巴克(Barker)码的模糊函数呈理想的“图钉型”, 具有良好的时频分辨力。本文利用模糊函数和 Q 函数, 对基于巴克码的复合声呐信号的分辨力、抗混响等性能进行了仿真分析, 并和传统的单频矩形脉冲(CW)信号、线性调频脉冲(LFM)信号进行了比较, 得出基于巴克码的复合声呐信号能够实现较高的测量精确度, 而且在一定的多普勒频移范围内具有较好的抗混响能力, 是浅海中主动声呐的优先选择信号。

**关键词:** 巴克码; 复合信号; 模糊函数; Q 函数

**中图分类号:** TN911.23; TB56 **文献标识码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA201404.0579

## Simulation on application of Barker code in complex sonar signals

FENG Qi, WANG Ying-min

(College of Marine, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi 710072, China)

**Abstract:** The transmitted waveform directly affects the performance of sonar at range resolution, velocity resolution, low-interception ability and anti-reverberation ability. Therefore, the design and proper selection of waveform show an important significance to sonar system. Barker code, whose ambiguity function is close to ideal thumbtack shape, bears high time-frequency resolution. Resolution and anti-reverberation performance of the complex sonar signals based on Barker code are analyzed by ambiguity function and Q function, and are compared with those of Continuous Waveform(CW) signal and Linear Frequency Modulation(LFM) signal. Simulations indicate that complex sonar signals based on Barker code are featured with a relatively high resolution in range, and a relatively high reverberation suppression, which make them the prioritized waveforms for active sonar operating in shallow water.

**Key words:** Barker code; complex signal; ambiguity function; Q function

信号波形在主动声呐设计中有着举足轻重的地位, 它直接影响着声呐系统的分辨力、抗干扰能力、抗混响能力和抗多途起伏能力。CW 信号和 LFM 信号是目前常用的 2 种主动声呐信号。长 CW 脉冲较窄的带宽使其有好的探测高速目标的性能, 而且信号容易发射; LFM 信号具有脉冲压缩效果, 多普勒容限大, 能很好地实现时延-频移二维的高分辨力, 混响谱级也被较宽的带宽分散, 能很好地探测低速目标。但是, 这 2 种信号也都存在不足。例如, CW 信号的频移分辨力  $\rho_f$  和时延分辨力  $\rho_r$  不可兼得, 提高其中一个的分辨力, 另一个的分辨力必然降低; LFM 信号存在距离-速度二维耦合, 当速度和距离均未知时, 测量会带来附加误差<sup>[1]</sup>。当前伴随着海战向浅海的转变, 声呐工作环境日趋复杂以及更高的战术指标使得传统波形难以满足声呐战术的要求。这种情况下, 一些特殊信号、复合信号越来越受到人们的关注<sup>[2]</sup>。巴克码在雷达系统中的研究已相当成熟<sup>[3-4]</sup>, 但在水声环境中还没有引起足够的重视。

巴克码是一种二元伪随机序列, 有着良好的相关特性和尖锐峰特性。它的非周期自相关函数, 与白噪声的自相关函数类似, 其模糊函数呈理想的“图钉型”。本文利用模糊函数和 Q 函数, 对基于巴克码的复合信号的性能进行了仿真分析。模糊函数是信号回波通过匹配滤波器后的全景输出, 通过研究模糊函数能够了解信号的模糊特性、分辨力和抗干扰能力。Q 函数则能从一定程度上反映信号避开混响的能力。分析过程中和 CW 信号、LFM 信号进行了比较。

## 1 巴克码二相编码信号

对于取样时间  $\tau$ ，巴克码的非周期自相关函数满足：

$$\chi_2(\tau, 0) = \sum_{k=0}^{P_B-1-\tau} c_k c_{k+\tau} = \begin{cases} P_B & \tau = 0 \\ \pm 1 \text{ 或 } 0 & \tau \neq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\{c(n)\}$  是巴克码序列， $c(n) \in (1, -1)$ ， $n=0, 1, \dots, (P_B-1)$ ， $P_B$  为巴克码序列的长度。上式的取值是离散的，从大到小依次为： $P_B, 1, 0, -1$ 。目前已经发现 9 种巴克码，见表 1。从表 1 中可以看出随着巴克码长度的增加，主旁瓣比也随之增大，13 位巴克码的主旁瓣比最大，泄漏的能量也最少，使用得最多。

表 1 常用的巴克码序列

Table 1 Frequently-used Barker code

$P_B$	$\{c(n)\}$	$\chi_2(\tau, 0)$	main-sidelobe ratio/dB
2	++;-+	2,1;2,-1	6.0
3	++-	3,0,-1	9.6
4	++-+;++++-	4,1,0,1;4,1,0,-1	12.0
5	+++++	5,0,1,0,1	14.0
7	++++--+	7,0,-1,0,-1,0,-1	17.0
11	++++-+-----	11,0,-1,0,-1,0,-1,0,-1,0,-1	20.8
13	++++-+-----+	13,0,1,0,1,0,1,0,1,0,1,0,1	22.8

复数表示相位编码信号为：

$$s(t) = a(t)e^{j\varphi(t)}e^{j2\pi f_c t} \quad (2)$$

式中： $u(t) = a(t)e^{j\varphi(t)}$  为编码信号的复包络； $\varphi(t)$  为相位调制函数，若为二相编码， $\varphi(t)$  的取值一般是 0 和  $\pi$ ，用二进序列可表示为  $c_k = e^{j\varphi_k} = \pm 1$ 。

巴克码相位编码信号的包络  $a(t)$  为矩形，即：

$$a(t) = \begin{cases} 1/\sqrt{P_B T_B} & 0 < t < P_B T_B \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $P_B$  为码长， $T_B$  为巴克码一个码字的时间宽度。这样，可以将巴克码二相编码信号的复包络写成：

$$u(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{P_B}} \sum_{k=0}^{P_B-1} c_k \text{rect}(t - kT_B) & 0 < t < P_B T_B \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (4)$$

式中  $\text{rect}(t)$  为矩形脉冲复包络，利用  $\delta(t)$  函数的卷积性质可以将式(4)写为：

$$u(t) = \text{rect}(t) * \frac{1}{\sqrt{P_B}} \sum_{k=0}^{P_B-1} c_k \delta(t - kT_B) = u_1(t) * u_2(t) \quad (5)$$

$$\text{式中：} u_1(t) = \text{rect}(t) = \begin{cases} 1/\sqrt{T_B} & 0 < t < T_B \\ 0 & \text{others} \end{cases}, u_2(t) = \frac{1}{\sqrt{P_B}} \sum_{k=0}^{P_B-1} c_k \delta(t - kT_B)。$$

## 2 基于巴克码的复合声呐信号

### 2.1 线性调频与巴克码的复合信号(LFM-Barker)

LFM 信号能实现较宽的带宽，多普勒容限大，但输出响应会产生一个附加时延，与多普勒频移成正比。相位编码信号的模糊函数呈近似“图钉型”，有较高的分辨力，但当信号回波与匹配滤波器的多普勒频移失谐时，匹配滤波器起不到脉冲压缩作用，而且相位编码信号是多普勒敏感信号，只有在目标的多普勒频率变化不大时性能良好。因此考虑将两者复合形成既有相位编码信号与 LFM 信号的优点，又可弥补各自不足的新复合信号：线性调频-二相编码信号<sup>[5]</sup>。如果相位编码是巴克码，则称为 LFM-Barker 信号。LFM-Barker 的复包络为：

$$u(t) = u_1(t) * u_2(t) \quad (6)$$

式中： $u_1(t) = \frac{1}{\sqrt{T_L}} \text{rect}\left(\frac{t - T_L/2}{T_L}\right) e^{j\pi k t^2}$  是 LFM 信号的复包络， $T_L$  是线性调频时间， $k = \frac{F}{T_L}$  是调频斜率， $F$  为调频带宽； $u_2(t) = \frac{1}{\sqrt{P_B}} \sum_{k=0}^{P_B-1} c_k \delta(t - kT_B)$  是巴克码信号的复包络， $P_B$  为码长， $\{c(n)\}$  为巴克码序列， $T_B$  是巴克码一个码

字的时间宽度。

### 2.2 跳频信号与巴克码复合信号

Costas 跳频信号是一种载频按 Costas 序列编码变化的时频跳变信号。如果跳频码的每一频率再用巴克码做相位调制，就得到 Costas 跳频码和巴克码联合调制的信号：FSK/PSK Costas。图 1 为 FSK/PSK Costas 信号的构成原理。巴克码为 13 位，Costas 序列的长度数为 5。

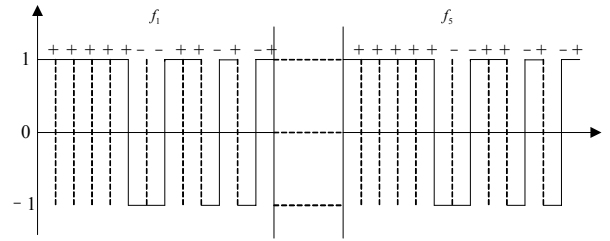


Fig.1 Composing principle of FSK/PSK Costas signal  
图 1 FSK/PSK Costas 信号的构成原理

### 2.3 基于 Matlab 仿真分析

CW 信号和 LFM 信号的模糊函数有成熟的表达式，可以直接引用。现通过 Matlab 仿真分析几种信号的模糊性能。设定仿真条件为：载频  $f_c=3\text{ kHz}$ ，CW 信号和 LFM 信号时宽为 100 ms，LFM 信号调频带宽  $F=500\text{ Hz}$ ；在 LFM-Barker 信号中， $T_B=T_L=0.0077\text{ s}$ ；而在 FSK/PSK Costas 信号中， $T_B=0.0015\text{ s}$ ， $c_s=[2,4,3,1,5]$ 。4 种信号的模糊函数  $X(\zeta,\tau)$  和模糊度  $(\zeta)$  图(下降到 -3 dB 的截面)分别如图 2~图 5 所示。

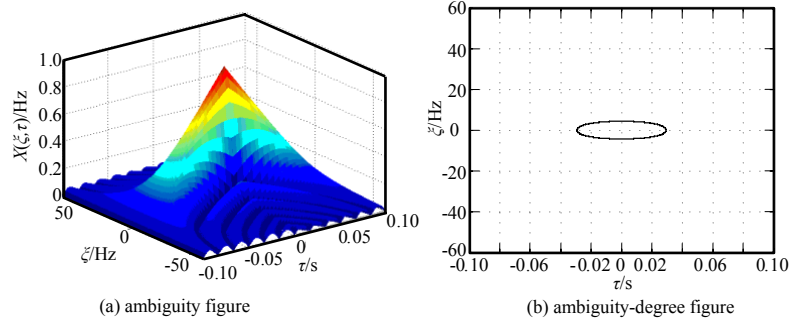


Fig.2 Ambiguity function performance of CW signal  
图 2 CW 信号模糊函数特性

由图 2 可看出，CW 信号的模糊函数为正刀刃状，在给定的参数条件下其时延(距离)分辨力最差，这是由于 CW 信号相对较窄的带宽造成的。另外，CW 信号的距离分辨力和速度分辨力不可兼得，减小脉宽，距离分辨力会增高，但速度分辨力降低；反之，增大脉宽，速度分辨力会增高，但距离分辨力减小。

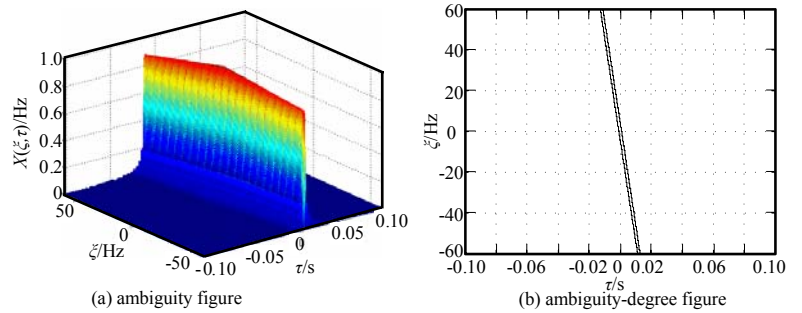


Fig.3 Ambiguity function performance of LFM signal  
图 3 LFM 信号模糊函数特性

LFM 信号可实现距离-速度二维高分辨，但存在耦合现象，当目标距离和速度均为未知时，容易带来附加的测量误差。另外，LFM 信号的多普勒容限大，能够覆盖大的多普勒频移范围，如图 3 所示。FSK/PSK Costas 信号和 LFM-Barker 信号的模糊函数接近理想的“图钉状”，具有很高的距离-速度二维分辨力，如图 4 和图 5 所示。表 2 根据模糊函数仿真结果列出了 4 种信号的时频分辨力，从表 2 中可以看出，FSK/PSK Costas 信号和 LFM-Barker 信号具有传统信号的时频分辨特性。

图 6 给出了 4 种信号频移为 0 的模糊图截面，即信号的自相关函数。可看出，CW 信号的测距性能最差；相同带宽情况下，其余 3 种信号都具有较高的距离分辨力，但 LFM 信号靠近主峰的旁瓣较高，随着距离的增大，旁瓣逐渐降低；而 LFM-Barker 信号和 FSK/PSK Costas 信号旁瓣相对较低且远离主瓣，对测距干扰较小。

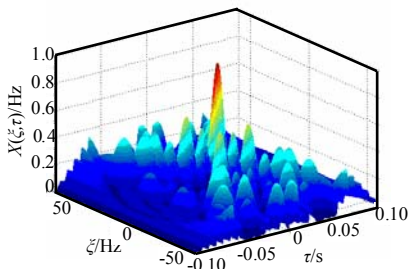


Fig.4 Ambiguity function performance of LFM-Barker signal  
图 4 LFM-Barker 信号模糊函数特性

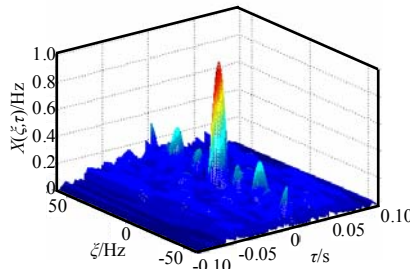


Fig.5 Ambiguity function performance of FSK/PSK Costas signal  
图 5 FSK/PSK Costas 信号模糊函数特性

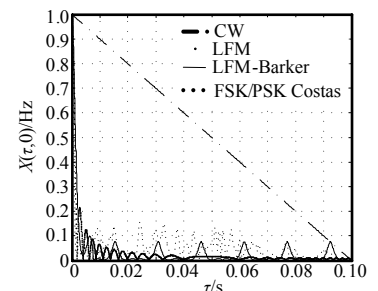


Fig.6 Autocorrelative function  
图 6 自相关函数

表 2 信号的分辨特性  
Table 2 Resolution performance of signals

	CW	LFM	LFM-Barker	FSK/PSK Costas
$\rho_r / \text{s}$	0.060 00	0.001 80	0.002 40	0.000 74
$\rho_\xi / \text{Hz}$	8.8	8.8	8.0	7.8

### 3 信号抗混响能力

混响是发射信号经海水中的不均匀散射体散射产生的,与发射信号特性密切相关,声呐信号发射后立刻就能接收到混响。混响限制下,匹配滤波器检测指数可近似为<sup>[6]</sup>:

$$d^2 \approx \frac{E_r / E_t}{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \varpi_{hh}(\tau, \xi) |\chi(\tau - \tau_0, \xi - \xi_0)|^2 d\tau d\xi} \quad (7)$$

式中:  $\varpi_{hh}(\tau, \xi)$  为混响散射函数,  $|\chi(\tau, \xi)|$  为信号的模糊度数,  $E_t$  为发射信号能量,  $E_r$  为接收信号能量。从式(7)可以看出,混响限制下采用匹配滤波器检测目标时,匹配滤波器已不再是最佳处理器。单纯靠增大发射信号能量不能有效改善信混比,因为混响与发射信号具有强相关性,增加发射信号的能量,混响也随着增大。

这种情况下,改善信混比的一个有效措施是波形设计,使得信号的模糊函数与混响散射函数重叠部分越小越好,在数学上就相当于要求式(7)中分母的二重积分尽可能小,这样才有利于混响限制下目标的检测。

混响具有频域扩展小,时域扩展大的特点。所以,可以假设混响是由静止散射体散射形成的,同时这些散射体是相互独立的、均匀的、密集的,则式(7)中分母的二重积分可简化为 Q 函数所示形式<sup>[7]</sup>:

$$Q(\xi) = \int |\chi(\tau, \xi)|^2 d\tau \quad (8)$$

由于模糊函数为理想信道中匹配滤波器的输出,当把散射体理解为一种特殊“目标”时, Q 函数可以认为是声呐和实际目标在某一相对运动速度下,对所有距离上的散射体产生的混响回波经匹配滤波器输出后的能量总和,即模糊函数对时延  $\tau$  积分。也就是说, Q 函数可以作为判断声呐波形混响输出大小的一个标准。Q 函数值越小,表明输出的混响强度就越小,越有利于混响限制下目标的检测<sup>[8]</sup>。仿真上述 4 种信号的 Q 函数如图 7 所示。通过对 Q 函数的仿真可知:

1) 在目标相对静止和速度很低的情况下, CW 信号的 Q 函数值对于其他 3 种信号来说都是最大的。相同带宽情况下, LFM 信号、LFM-Barker 信号和 FSK/PSK Costas 信号的 Q 函数值依次减小。说明对于静态目标和低速运动的目标, FSK/PSK Costas 信号和 LFM-Barker 信号具有优于传统信号的抗混响能力。LFM-Barker 信号的抗混响效果略优于 LFM 信号, FSK/PSK Costas 信号的混响输出比 LFM 信号减小了约 2 dB, 较大幅度地提高了抗混响能力。

2) 随着目标相对速度的增加, CW 信号的 Q 函数值不断减小,直至降至最低。由此可见,对于探测高速目标, CW 信号是抗混响的最优信号,而其余 3 种信号适用于探测相对低速的目标。

### 4 结论

本文利用模糊函数和 Q 函数,对基于巴克码的 LFM-Barker 信号和 FSK/PSK Costas 信号,2 种复合信号的距离分辨力、速度分辨力、抗混响能力等性能进行了仿真分析,并和传统声呐信号 CW 信号、LFM 信号进行了比较,验证了基于巴克码的 2 种复合信号有更好的目标分辨特性,低多普勒时有好的抗混响能力。而且复合信号具有更复杂的波形形式,进一步提高了声呐的抗干扰能力和低截获能力。随着电子技术的发展,复合信号必将在声呐系统中得到应用。

#### 参考文献:

- [1] 谢植广,王英民,卢治强. 基于 Costas 信号的声呐目标探测特性分析[J]. 电声技术, 2010(3):50-53,85. (XIE Zhi-guang, WANG Ying-min, LU Zhi-qiang. Analysis of detective performance of sonar target based on Costas signal[J]. Audio Engineering, 2010(3):50-53,85.)

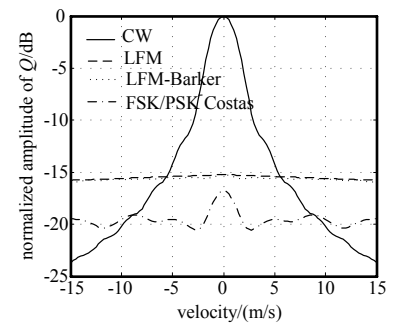


Fig. 7 Q function of four kinds of signals  
图 7 4 种信号的 Q 函数

- [2] 杨崇林,姚蓝. 探测高速小目标的声呐信号波形设计[J]. 声学技术, 1998,18(3):112-115. (YANG Chong-Lin,YAO Lan. Sonar signal waveform design to detect a high speed small target[J]. Acoustic Technique, 1998,18(3):112-115.)
- [3] 于超鹏,郝亮飞,谢金华. 线性调频和巴克码组合调制雷达信号[J]. 探测与控制学报, 2009,31(5):20-24. (YU Chao-peng,HAO Liang-fei,XIE Jin-hua. Hybrid radar signal composed modulation of linear frequency and Barker phase coded modulation[J]. Journal of Detection & Control, 2009,31(5):20-24.)
- [4] 王军. 线性调频-伪码卷积性复合信号 MCRLB 推导[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2010,8(2):196-200. (WANG Jun. Derivation of modified CRLB of convolution signal combined LFM and PRBC[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2010,8(2):196-200.)
- [5] 徐庆,徐继麟,周先敏,等. 线性调频-二相编码雷达信号分析[J]. 系统工程与电子技术, 2000,22(12):7-8. (XU Qing,XU Ji-lin,ZHOU Xian-min,et al. A discussion of performance of hybrid waveform of radar[J]. Systems Engineering and Electronics, 2000,22(12):7-8.)
- [6] 刘贯领,沈文苗,凌国民. 声呐信号抗混响能力和声兼容性分析[J]. 声学技术, 2008,27(3):319-322. (LIU Guan-ling,SHEN Wen-miao,LING Guo-min. Analysis of sonar waveform reverberation suppression and acoustic compatible capabilities[J]. Acoustic Technique, 2008,27(3):319-322.)
- [7] 陈韶华,赵冬艳. 几种主动声呐信号抗混响性能分析[J]. 水雷战与舰船防, 2011,19(4):12-15. (CHEN Shao-hua,ZHAO Dong-yan. Reverberation suppression performance of several active sonar signals[J]. Mine Warfare & Ship Self-defense, 2011,19(4):12-15.)
- [8] 刘肖. 主动声呐波形优化设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2011. (LIU Xiao. Active sonar waveform design optimization[D]. Harbin:Harbin Engineering University, 2011.)

#### 作者简介:



冯 奇(1986-), 男, 山西省永济市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为水声信号处理. email:skywolf1986@126.com.

王英民(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为水声工程和信号处理.