

水下高速目标航行参数遥测技术研究

张庆国, 王健培

(昆明船舶设备研究试验中心, 云南昆明 650051)

摘要: 对于高速、强机动的水下目标来说, 其航行参数信息的实时遥测具有重要意义。水声信号的多普勒频移估计与补偿是水声遥测的关键技术之一, 它直接影响着水声遥测的效果与性能。针对双曲线调频信号及线性调频信号进行仿真分析, 对比在相同情况下的多普勒频偏可补偿性, 仿真实验证明双曲线调频信号具备较高的多普勒容限, 其时延估计精度可达到 $1\mu\text{s}$ 。结合工程实际, 采用双曲调频信号与单频信号组合的方式进行水声遥测, 充分发挥双曲线调频信号的多普勒不变性和单频信号对多普勒频移的敏感性, 在获得较高定位精度的同时, 也具备高精度的水声遥测功能。该组合信标信号经过湖上试验验证, 具有遥测精度高、误码率低、易于实现等优点, 可直接应用于相关水声工程中。

关键词: 双曲线调频信号; 线性调频信号; 水声遥测; 多普勒频移

中图分类号: TB56

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2014)-05-0412-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2014.05.006

Research on telemetry technique of high-speed underwater target navigation parameters

ZHANG Qing-guo, WANG Jian-pei

(Kunming Shipborne Equipment Research & Test Center, Kunming 650051, Yunnan, China)

Abstract: For high-speed underwater target of strong maneuverability, the real-time telemetry of the navigation parameters is important. Doppler shift estimation and compensation of underwater acoustic signal is one of those key techniques for the underwater acoustic telemetry, which directly affects the effectiveness and performance of the telemetry. In this article, Doppler shift is compensated for both HFM and LFM signals by simulation, and the analysis and comparison in the same conditions are made. Simulation results show that hyperbolic frequency modulated (HFM) signal has higher Doppler tolerance, and the estimation accuracy for time delay can be achieved by $1\mu\text{s}$. In practical applications, the HFM signal is combined with a single frequency signal for underwater acoustic telemetry. Thus, both the Doppler invariance of the HFM signal and the Doppler shift sensitivity of the single-frequency signal can fully play important roles in obtaining high positioning accuracy to realize high-precision underwater acoustic telemetry. The effectiveness of this combined beacon signal has been verified through lake trial. The testing results show that this signal has the characteristics of higher telemetry precision and lower error rate. And, this signal is easy to be implemented, so can be directly applied to the relevant underwater acoustic engineering projects.

Key words: large eddy simulation; acoustic analogy; aeroacoustics

0 引言

实时获得水下目标的航行参数信息, 有利于对其工作状态进行监控, 并能对其航行/攻击性能进行精确评估。随着高速轻型水下武器的不断发展, 如何实时获得其航行参数信息显得尤为重要。

随着水声技术的不断发展, 国内外学者对 FSK、PSK、OFDM、PATTERN 时延编码和扩频通信等技术进行了试验研究, 并取得了部分结果^[1-6]。

但是由于水声信道的复杂性及其理解的局限性, 现有水声技术均具有一定的局限性, 并非十分有效。因此, 针对高速水下目标的航行参数遥测, 进行试验研究具有重要意义。本文对比分析了双曲线调频(Hyperbolic Frequency Modulation, HFM)与线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)在水声遥测上的特性, 采用单频信号(Continuous Wave, CW)与 HFM 信号组合调制的方式, 进行高速水下目标的航行参数遥测技术与试验研究。

1 调频信号特性分析

研究表明, 蝙蝠、海豚等哺乳生物采用了 HFM

收稿日期: 2013-04-25; 修回日期: 2013-08-13

作者简介: 张庆国(1982-), 男, 黑龙江佳木斯人, 工程师, 研究方向为水声信号处理。

通讯作者: 张庆国, E-mail: ZQG750@126.com

形式的超声信号进行定位与导航^[2]，从生物进化择优性上来看，HFM 具有很高的实用性。HFM 信号是一种多普勒不变信号，有时又称为对数相位信号或线性周期信号^[3]。为了便于特征分析，本文将 HFM 信号与水声工程中常用的 LFM 信号进行对比分析。

1.1 HFM 信号分析

HFM 信号波形为：

$$u(t) = \begin{cases} A \exp \left[-j(2\pi \frac{f_0^2}{m}) \ln(1 - \frac{m}{f_0} t) \right], & -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

式中： A 为信号幅度； T 为脉冲宽度； f_0 为中心频率； m 为调制参数。

由公式(1)可知，相位函数和瞬时频率分别为：

$$\begin{cases} \Phi(t) = -2\pi \frac{f_0^2}{m} \ln(1 - \frac{m}{f_0} t) \\ f(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d(\Phi(t))}{dt} = \frac{f_0}{1 - (\frac{m}{f_0} t)} \end{cases} \quad (2)$$

假设存在如下关系：

$$\begin{cases} t_0 = \frac{f_0}{m} \\ k = \frac{f_0^2}{m} \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知， $k = f_0 t_0$ 。此时，将式(3)代入式(1)，可得到如下实信号计算公式：

$$u(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi k \ln(1 - t/t_0)), & -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

同理，将式(3)代入式(2)可得

$$f(t) = \frac{k}{t_0 - t} \quad (5)$$

假设信号幅度为 A ，脉冲信号宽度为 T ，上限频率及下限频率分别为 f_H 、 f_L ， $f_H = f(T/2)$ ， $f_L = f(-T/2)$ ；调频带宽为 B ， $B = f_H - f_L$ 。算术中心频率为 f_m ， $f_m = (f_L + f_H)/2$ ；时间中心频率为 f_0 ， $f_0 = f(0)$ ；则式(5)中的参数 k 与 t_0 分别为：

$$\begin{cases} t_0 = (\frac{T}{B}) \cdot f_m \\ k = f_0 \cdot t_0 \end{cases} \quad (6)$$

根据上述公式，产生 HFM 信号时域波形及时频曲线波形如图 1 所示。

1.2 LFM 信号分析

LFM 信号波形为：

$$u(t) = \begin{cases} A \exp [j(2\pi f_0 t + \pi l t^2)], & -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (7)$$

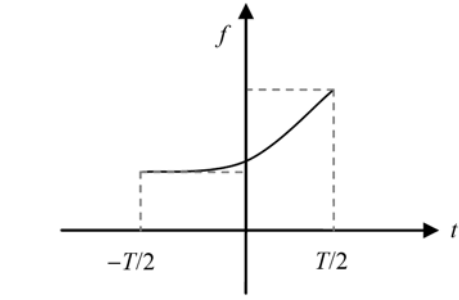
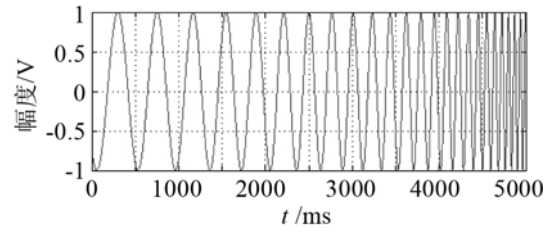


图 1 HFM 信号时域波形及时频曲线图
Fig.1 HFM signal waveform and time-frequency graph

式中， A 为信号幅度， f_0 为中心频率， l 为调频斜率。

由式(7)可知，其相位函数和瞬时频率分别为：

$$\begin{cases} \Phi(t) = 2\pi f_0 t + \pi l t^2 \\ f(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d(\Phi(t))}{dt} = f_0 + l t \end{cases} \quad (8)$$

根据上述公式，产生 LFM 信号波形及时频曲线波形如图 2 所示。

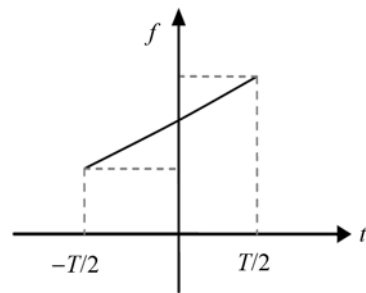
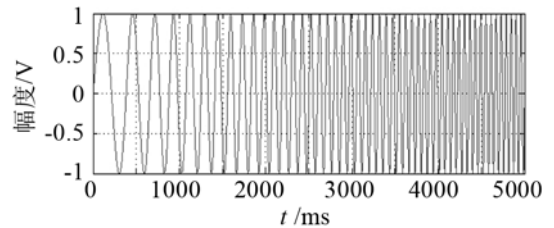


图 2 LFM 信号时域波形及时频曲线图
Fig.2 LFM signal waveform and time-frequency graph

1.3 多普勒特性比对分析

通常情况下，多普勒容限是指信号波形对速度或多普勒频移敏感性的特征分量^[4]。水声信号的多普勒容限大小，直接影响着高速水下目标航行参数遥测功能与性能。

假设水下目标与接收端相对速度为 v ，声速为 c ，则多普勒频偏系数 $p=1+v/c$ 。那么对于 HFM 信号，在接收端收到的信号瞬时频率存在如下关系：

$$f'(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d}{dt} \varphi(pt) = \frac{pk}{t_0 - pt} \quad (9)$$

假设存在时延差 Δt ，满足如下关系：

$$f'(t - \Delta t) = f(t) \quad (10)$$

将式(5)代入式(9)可推导出，当 Δt 存在如下关系时，满足式(10)。

$$\Delta t = \frac{p-1}{p} \cdot t_0 \quad (11)$$

由式(10)、(11)可以看出，对于 HFM 信号而言，多普勒压缩效应等效于频率调制函数在时间上的平移和在频率上移动一个固定量，如图 3 所示。

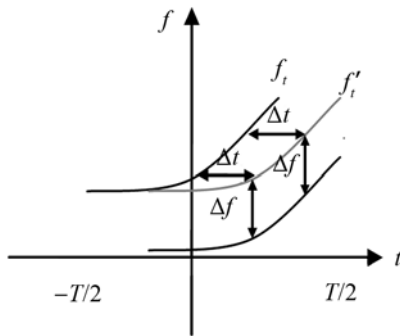


图 3 HFM 信号在具有多普勒时瞬时频率变化曲线图
Fig.3 Instantaneous frequency change of HFM signal with Doppler shift

由图 3 可知，对于 HFM 信号的多普勒匹配，只需要改变参考波形的初始时间 Δt ，便能与发射端的信号“完全”匹配。

同上，对于 LFM 信号存在相对速度时，接收端接收到的信号瞬时频率为

$$f'(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d}{dt} \varphi(pt) = f_0 p + lp^2 t \quad (12)$$

由于找不到时延差 Δt 来满足式(10)，LFM 信号的 $f'(t)$ 不能通过平移与原 $f(t)$ 相重合(不含 $p \approx 1$ 时)，即 LFM 信号不具备多普勒不变性，而 HFM 信号具有多普勒不变性。HFM 信号经过水声信道传播后，接收端获得的信号幅度不因与目标存在相对运动而剧烈变化，可最大程度上减少由于水下目标高速运动带来的多普勒效应对水声遥测的影响。

利用对数展开式对公式(1)进行展开如下：

$$u(t) = A \exp[j(2\pi f_0 t + \pi m t^2 + 2\pi \frac{m^2 f^3}{3 f_0} + \dots)] \quad (13)$$

由式(13)可见，当忽略 t^3 以上的各项后，便是 LFM 的计算公式，也就是说 LFM 信号是 HFM 信号的一种特例。

2 航行参数遥测信标波形结构设计

对于水下高速目标的航行参数遥测来说，信标波形的结构设计是其关键技术，直接影响水声遥测基本功能及测量精度。本文采用 CW 信号与 HFM 信号相结合的方式组成同步式遥测信标。充分利用 HFM 信号的多普勒不变性，解决水下目标高速运动带来的多普勒频偏及幅度剧变等问题；同时利用 CW 信号对频率的敏感性，来提高距离测量精度。所设计的信标波形结构如图 4 所示。

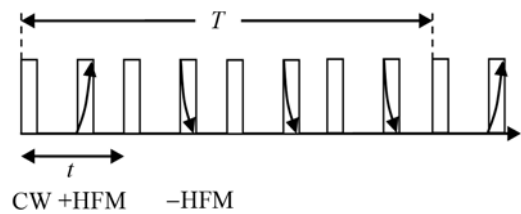


图 4 遥测信标波形结构示意图
Fig.4 Configuration of telemetry beacon signal

图 4 中， T 为测量周期， $T=2$ s； t 为小周期， $t=0.5$ s。假设遥测参数(又称姿态角)为：深度值、俯仰角、横滚角和航向角，则分别对应于图 4 中的四个组合脉冲信号。该信标主要性能为：水下目标最大速度不小于 70 kn，水平测量半径为 3 km，姿态角度测量精度可达 1° ，深度值测量精度为 0.5 m。由此可见，该信标可满足大多数水下目标高速运动状态下的航行参数测量要求。

3 实验仿真分析

针对本文设计的遥测信标进行仿真分析。具体仿真参数为：CW 脉冲信号宽度为 5 ms， $f_0=75$ kHz；HFM 信号调制宽度为 ± 3.5 kHz， $f_0=75$ kHz； $T=2$ s， $t=40.96\sim 81.92$ ms(如图 4 所示)。

3.1 信标信号的可识别性仿真

该信标波形结构内共包含三种脉冲信号，即 CW、+HFM、-HFM，为了防止在接收端产生混淆，需要各种信号相互之间具有较高的独立识别性。将三种脉冲信号进行相关分析，归一化相关图如图 5 所示。每种信号除自身相关峰明显外，与其他信号相关特性均不明显，也就是说该信标结构内的信号具有很好的独立识别性，不存在识别模糊的问题。

3.2 多普勒效应仿真

多普勒效应包括多普勒扩展和多普勒频移。由

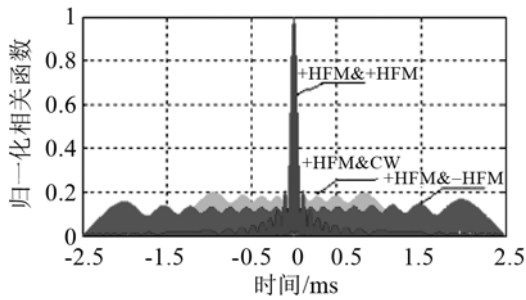


图 5 信标波形内信号相关示意图
Fig.5 Normalized correlation function of the beacon signal

于水声信道的随机、时变特性引起信号的多普勒扩展，在一般情况下约为 $0.1\sim 0.7\text{ Hz}$ ^[5]，对水声遥测影响不大，这里不予考虑，而多普勒频移则是本文考虑的主要因素。

通常情况下，对于 LFM 信号采用中心频率估计、相关样本修正的方式进行多普勒频偏修正，可满足一般的水声定位需求。但多普勒频偏是随着频率的变化而非线性变化的，不能简单地采用固定频偏进行补偿。另外，当水下目标速度较快时，按照常规方法，利用已知的 LFM 同步信号样本对接收到的信号进行拷贝相关处理时，将会出现相关峰值下降、相关峰分裂等现象，最终降低了时延值测量的精度，甚至降低整个遥测系统精度。

以线性插值法^[6]进行多普勒信号的模拟仿真，假设接收到的信号为 x 。分别将 LFM 和 HFM 信号进行中心频率偏移的修正，将修正后的数据和 x 进行相关，从而获得两种信号在不同速度下的时延值偏移量，结果如图 6 所示。

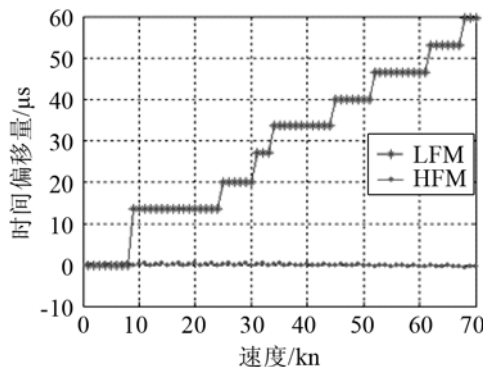


图 6 多普勒频偏仿真比较图
Fig.6 Doppler shift simulation chart

从图 6 中可以看出，在同样的速度下，HFM 信号的相关偏移量均小于 LFM 的相关偏移量，甚至在较大的相对速度下，HFM 信号均能保持较高的时延值估计精度。这里为了实验方便，该项仿真没有考虑多途反射与叠加影响，在实际水声信道环境下，其整体估计误差将会增大，但整体规律相同。

4 湖上试验

在某湖水域进行试验，针对该种遥测信号波形的性能进行动态测试。在船上安装发射声源，利用固定布放在水底的水声基阵(接收端)进行信号接收，除验证其遥测功能外，主要考察高速情况下的该声信标信号存在多普勒偏移时，对水下目标的航行参数遥测所带来的影响。

装载发射声源船速约 $8\sim 10\text{ kn}$ ，声源距离水下基阵约为 750 m ，其 HFM 的信号频谱及相关性如图 7 所示。实际 HFM 信号的长度为 5 ms ，经过水声多途传播后，扩展为 7 ms 左右，并存在多途信号相互叠加造成的幅度变化。从图 7 中可以看出，即使在多途干扰及水面反射叠加的复杂水声环境下，依然具有良好的识别特性。

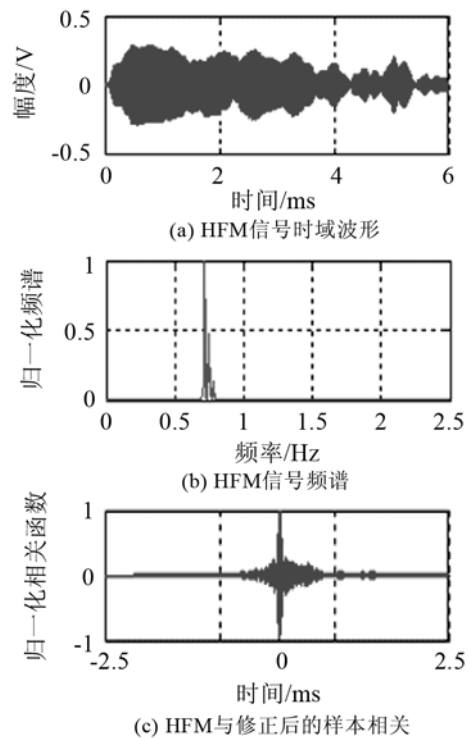


图 7 HFM 信号经过水声信道后的波形、频谱和相关函数
Fig.7 Waveform, spectrum and correlation function of the HFM signal after passing through the underwater acoustic channel

同上，当速度为 $8\sim 10\text{ kn}$ ，距离为 800 m 时，其 LFM 信号经过水声信道后的信号频谱及相关性如图 8 所示。

对比图 7、图 8 可以看出，其 LFM 信号在时域上接收端存在较大的幅度变化(主要由于多普勒效应及多途叠加造成)，以至于频域上相关峰出现分叉，降低了测量精度。

装载发射声源的试验船只以 $8\sim 10\text{ kn}$ 左右的速

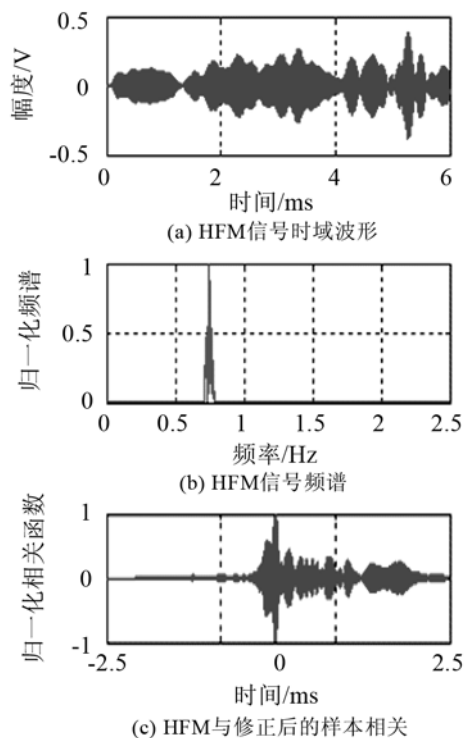


图8 LFM信号经过水声信道后的信号波形、频谱和相关函数
Fig.8 Waveform, spectrum and correlation function of the LFM signal after passing through the underwater acoustic channel

度, 在 100~2300 m 的范围内周期发射信标信号, 接收端进行相应处理后获得其遥测的误码率如图 9 所示。图 9 所示的误码率是指在动态试验中, 接收端不能正确解算、错误解算及未能接收到的数据, 均认为是误码数据。也就是说这里的误码包含了水声遥测过程中所有的错误信息, 比如由于声线

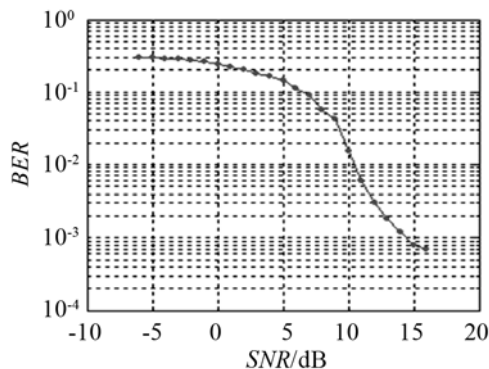


图9 运动状态下的实测误码率
Fig.9 The measured bit error rate under the state of motion

弯曲在某些区域带来的信噪比急速下降, 声信号的反相位叠加等特殊情况, 因此, 实际动态试验获得的误码率较高。

由于水声信道的多途效应影响, 水声信号与修正后样本的相关峰会出现多个峰值, 这里采用加窗及线性插值再次相关的方法^[7]获取精确时延值。

5 结论

经过仿真及湖上试验可以看出, HFM 信号与 LFM 信号相比, 具有更高的多普勒容限, 采用 HFM 信号与单频信号相组合的方式, 实现水下目标的航行参数遥测, 可以有效校正多普勒频偏的影响, 遥测性能稳健, 特别适用于水下高速、高机动目标的水声遥测、水声通信等。

参考文献

- [1] 田坦, 刘国枝, 孙大军. 声纳技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2000.
TIAN Tan, LIU Guozhi, SUN Dajun. Sonar technology[M]. Harbin: Harbin Engineering University press, 2000.
- [2] Busnel R G, Fish J F. Animal sonar system[M]. USA: Plenum Press, 1980.
- [3] 杨长生, 杜金香, 马艳. 一种宽带仿生信号的小波变换域分析[J]. 声学技术, 2007, 26(4): 105-109.
YANG Changsheng, DU Jinxiang, MA Yan. Analysis of a wide-band bionic signal in wavelet transform domain[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(4): 105-109.
- [4] 李志舜. 鱼雷自导信号与信息处理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2003, 10.
LI Zhishun. Signal and information processing homing torpedo[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003, 10.
- [5] 惠俊英. 水下声信道[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.
HUI Junying. Underwater acoustic channel[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1991.
- [6] 林伟. 远程水声通信技术的研究[D]. 西安: 西北工业大学硕士学位论文, 2005.
LIN Wei. Study on long-range acoustic communication technology[D]. Xi'an: Master's degree thesis of Northwestern Polytechnical University, 2005.
- [7] 刘松海, 洗观福, 廖述常. 同步信标在水下机动小目标轨迹测量中的高精度时延估计方法[J]. 声学技术, 2008, 27(26): 903-906.
LIU Songhai, XIAN Guanfu, LIAO Shuchang. A method of high precision time delay estimation in underwater moving mini-tracking with synchronous beacon[J]. Technical Acoustics, 2008, 27(26): 903-906.