

一种低能耗的水声通信编码方案的研究

刘林泉^{1,2}, 梁国龙¹, 吴 波², 周志强², 李宏伟²

(1. 哈尔滨工程大学黑龙江, 哈尔滨 150001; 2. 解放军某部, 湛江 524022)

摘要: 研究了一种用多个不同频率的 CW 窄脉冲与帧同步脉冲的时延差携带信息的水声通信技术。该技术利用多个不同频率的 CW 矩形窄脉冲与帧同步 CW 矩形窄脉冲之间的时延值进行信息编码, 在接收端采用时延估计和频率检测技术进行解码, 从而使码元间距成为可携带信息的有用资源, 将码元间距扩展到足够宽, 既可有效地克服水声信号的多途影响、提高频带利用率, 又可大大减少码元脉冲数量, 达到节省能量并提高通信可靠性的目的。仿真结果表明, 该水声通信编码体制数据传输速率适中, 编码和解码简易, 系统稳健。

关键词: 水声通信; 节能声通信; 跳频时延编码(FH-TDFSK); 抗多途传输

中图分类号: TB559

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2007)-01-0130-04

Power saving coding for underwater acoustic communication

LIU Lin-quan^{1,2}, LIANG Guo-long¹, WU Bo², ZHOU Zhi-qiang², LI Hong-wei²

(Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: An underwater acoustic communication scheme is described. It uses time delay among CW narrow pulses filled with different frequencies and frame synchronous CW narrow pulse to carry information. The receiver uses time delay estimation and frequency detection for decoding. The element intervals are used to overcome the multi-path effect, improve frequency band efficiency, and reduce the number of pulses so as to save energy and increase system reliability. Lake trial results show that the rate of data transmission is moderate, coding and decoding are easy to implement, and the system is robust.

Key words: underwater acoustic communication; energy conservation acoustic communication; frequency hopping and time delay frequency shift keying (FH-TDFSK); multi-path

1 引 言

随着海防和海洋资源勘探开发事业的发展, 以及信息化海洋的建立, 水声通信是目前实现水下无线通信的最重要手段。然而, 水下声信道是一种十分复杂的时-空-频变参随机多途传输信道, 其环境噪声高、多途效应严重、信道带宽窄、可适用的载波

频率低、传输时延大、信号起伏衰落严重, 这些不利因素使得水声通信系统抗多途、抗衰落的难度急剧加大, 导致通信速率低, 传输距离短。因此, 研制既可满足可靠性, 又可满足有效性, 还能满足较高的通信速率要求的水声通信系统面临不少困难。目前, 国内外研究者对 FSK、MFSK、TFSK、PSK、DPSK、QPSK、OQPSK、RAKE、OFDM、PATTERN 时延编码等多种水声通信体制均进行了研究试验, 并取得了部分成果^[1-4]。

随着靠电池供电的水下无线遥控探测器的广泛应用, 保持较高通信速率和通信可靠性的节能声通

收稿日期 2005-11-21 修回日期 2006-04-26

作者简介 刘林泉(1968-), 男, 广东人, 博士生, 主要研究方向是水声通信、水声信号处理、水下定位导航。

通信作者 刘林泉, E-mail: Liulinquan@sina.com

信技术显得越来越重要。跳频时延编码(FH-TD-FSK: Frequency Hopping and Time Delay Frequency Shift Keying)技术具有较好的抗多途、抗衰落能力,它是一种新的二维编码技术^[3],利用 CW 矩形窄脉冲与帧同步 CW 脉冲之间的时延值的变化来表示 M 进制信息,多个不同频率的 CW 窄脉冲与帧同步 CW 脉冲之间的时延值构成多位 M 进制数据帧,从而使码元间距成为可携带信息的有用资源,较好地克服通信速率与码元间距之间的矛盾,起到较好的抗多途传输效果,码元压缩率高,通信频带窄,能量损耗少,同步检测简易,对测时精度要求不苛刻,编码和解码简便,系统稳健性较好。

2 跳频时延编码原理

数字频率调制又称频移键控 FSK(Frequency Shift Keying),它是用载波的频率来传达数字信息,即用所传送的数字信息控制载波的频率。频率跳变(FH:Frequency Hopping)扩展频谱通信也称跳频通信,按其“频率跳变图案”编码^[4],使得所用信号带宽 B 远大于信道的相干带宽 W,理论分析可知,当 B 大于 W 时,就能以 1/B 的时间分辨率解决信道多径效应问题,实现有效的频率分集。时延差编码(TDC:Time Delay Coding)就是将每个 CW 脉冲携带的多位二进制数转换成一个数据包周期内对应的时间片的序号,多个不同频率的 CW 脉冲就构成了多位二进制数。

跳频时延编码(FH-TDFSK)就是首先将一个数据帧周期 T 分成 N 个时间段,每个时间段又分成 M 个时间片,每个时间片再分成 P 个时隙,每个时隙对应一个 CW 窄脉冲的脉宽,再根据一定的带宽要求将可用的水声信道频带分割成 Q 个相邻的信道(频隙),分别为 $f_1, f_2, \dots, f_q$,将其分成 N 个组,每组有 P 个频点,即 $Q=N \times P$ 。这样每个频点的 CW 脉冲都对应 M 进制数的一位,每一个 CW 脉冲在 M 个时间片内的某个对应时隙出现,即表示了 M 进制中的某个值。因此, Q 个频点即可构成 Q 位 M 进制的数据帧,再加上一个帧同步 CW 脉冲,即实现了跳频时延编码。

FH-TDFSK 技术克服多途的主要思想是增大码元宽度和增加频点数,使得多途时延的影响相对减小,其降低能耗和提高频带利用率的主要思想是利用码元间距来携带信息,用一个频点的 CW 窄脉冲即可表示多位二进制数据,有效地克服了通信速率

与码元间距、码元宽度以及带宽之间的矛盾。为了提高通信速率,可减小脉宽和增加频点数,这样必然会带来频带占用宽度的增加和通信距离的减小。FH-TDFSK 技术与 FSK 比较,具有更好的抗多途能力,并可提高其可靠通信速率,是一种新型组合编码新体制。下面用一个 8 频 64 进制的 FH-TDFSK 编码方案说明如下:

首先根据一定的频率间隔选取 8 个频点,并分为二组,第一组包含 f_1, f_2, f_3, f_4 ,第二组包含 f_5, f_6, f_7, f_8 。将一个数据帧周期 T 分成二个时间段 T1 和 T2,每个时间段又分成 64 个相等的时间片 $\tau = \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_{64}$,每个时间片再分成 4 个相等的时隙 $\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau_4$,每两个时隙之间留有保护时间 τ' , τ 可为 0,时隙与 CW 窄脉冲的频率和脉宽一一对应,并且某个频率的 CW 窄脉冲在一个数据帧周期内只出现一次。图 1 是 T1 时间段内用 f_1, f_2, f_3, f_4 作为 CW 脉冲填充频率的 4 位 64 进制数据的编码示意图,T2 时间段的编码原理图同图 1,故不再赘述。

f_0 是帧同步脉冲的填充频率, τ 是其脉宽, f_1, f_2, f_3, f_4 是代表 4 位 64 进制数 $M_1 M_2 M_3 M_4$ 的脉冲的填充频率,时隙 $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$ 是其对应的脉宽, $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$ 是将 M_1, M_2, M_3, M_4 的值与时间片长度 τ 相乘所得的时延值,即:

$$\begin{aligned}\tau_1 &= M_1 \times \tau \\ \tau_2 &= M_2 \times \tau \\ \tau_3 &= M_3 \times \tau \\ \tau_4 &= M_4 \times \tau\end{aligned}$$

图 2 是采用 FH-TFSK 编码后,用 4 个 CW 窄脉冲代表 4 位 64 进制数的编码发射时序图,它等效于一组 24 位的二进制数据,因此,它还具有较强的码元数量压缩功能。

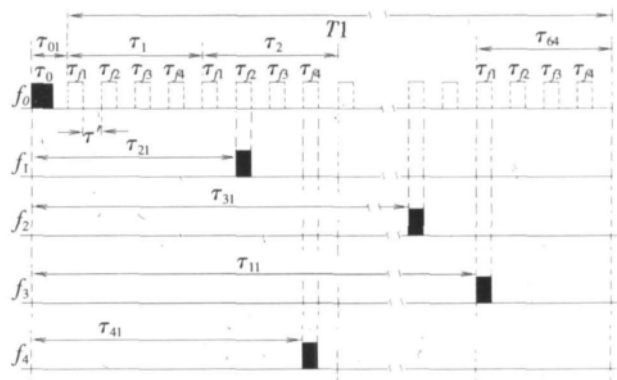


图 1 编码示意图
Fig.1 Coding diagram

3 解码原理

跳频时延编码(FH-TDFSK)是利用 CW 窄脉冲出现在一个数据帧周期内若干个固定时隙中的各不同时间隙来表示不同的信息,并用多个脉冲填充频率来组合多位数据,它是在 MFSK 基础上发展起来的,是与时隙有关的多进制频移键控,因此,跳频时延编码信号的解调可以等效为时延和频率信号的检测。如果能正确检测出各脉冲与帧同步脉冲之间的时延值以及各脉冲的频率,再依据各频率所对应的数据位即可实现正确解调。

如图 1 所示,解码时,接收机首先检测到先到达的频率为 f_0 的帧同步脉冲,并逐步检测到后续到达的多个脉冲的频率 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 , 及其对应的时延值 τ_1 、 τ_2 、 τ_3 、 τ_4 , 从而解调出 4 位 64 进制的数据 $M_1M_2M_3M_4$, 即:

$$M_1 = \text{INT}[(\tau_{11} - \tau_{01})/\tau + 0.5]$$

$$M_2 = \text{INT}[(\tau_{21} - \tau_{01} - \tau)/\tau + 0.5]$$

$$M_3 = \text{INT}[(\tau_{31} - \tau_{01} - 2\tau)/\tau + 0.5]$$

$$M_4 = \text{INT}[(\tau_{41} - \tau_{01} - 3\tau)/\tau + 0.5]$$

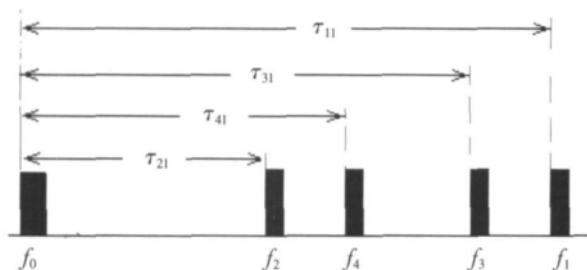


图 2 发射时序图

Fig.2 Transmitting sequence char

4 系统设计方案

系统采用单频调制 CW 窄脉冲作为发射脉冲,发射机组成原理如图 3 所示。在发射机中,先将 48 位的二进制信息分割成 8 个 6 位的二进制数,前 24 位二进制数为 1 组,对应数据包周期的时间段 T1,后 24 位二进制数为另外 1 组,对应时间段 T2。每个 6 位二进制数的值即代表一个脉冲的发射时间延迟间隔,定时控制器控制完成 9FSK 调制,调制器选 9 个频率中的一个,得到的 9FSK 信号又转换成另外一些频率,这些频率由伪随机序列发生器输出的序列频率决定,这个频率与调制器的输出进行混频,再

将所得到的变换频率信号发送到水声信道上去。

由理论分析可知,在时变多途信道中,要保持“跳频图案”中所用频率的相位相干是困难的,此外,信号在水声信道中传播时,从一个频率经过一定的带宽跳到另一频率要保持相位相干也是很困难的。因此,跳频信号常采用非相干检测技术,系统接收机组成原理如图 4 所示。

接收端有一个相同的“跳频图案”,它与所收信号同步,这样,在接收端用“跳频图案”的输出和所收信号混频,就可把发射端引入的“跳频图案”中的频率去掉,再将所得到的信号经 9 路 Notch 滤波器进行数字窄带滤波,测出各信号的频率和时延差完成解码,将各频率对应的码片拼接起来即可还原出发射端所传送的 48 位二进制信息。

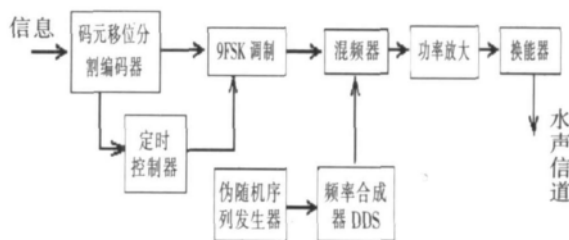


图 3 发射机组成原理图

Fig.3 Transmitter's structure



图 4 接收机组成原理图

Fig.4 Receiver's structure

由于 CW 窄脉冲含有丰富的频谱,多频率通道系统中强信号的边带频谱将通过邻近频率通道,成为邻近通道中的尖脉冲干扰,即所谓“通道串漏”。为了提高频带利用率和减小误码率,采用由 Notch 滤波器组构成的能量检测器和瞬时频率方差检测器(VIFD)进行联合信号检测估计,其联合检测的判据为:首先通过 Notch 滤波器的能量输出判幅度门限和宽度门限来进行能量检测,如果同一时刻只有一路过门限则不可能有串漏,可直接判为信号;如果同一时刻有多路过门限,则再利用 VIFD 检测器来克服强信号的通道串漏。关于 Notch 滤波和瞬时频率

方差(VIFD)检测器的相关资料请参见文献^[7],本文不再赘述。

Notch 滤波器是一种自适应滤波器,为了便于系统实时实现,采用 LMS 算法。由于利用了 9 个频点,所以我们采用 9 路并联 Notch 滤波器。对于每一路 Notch 滤波器,参考输入为一对正交的单频信号,分别对应 9 个规定的频率,其结构如图 5 所示。

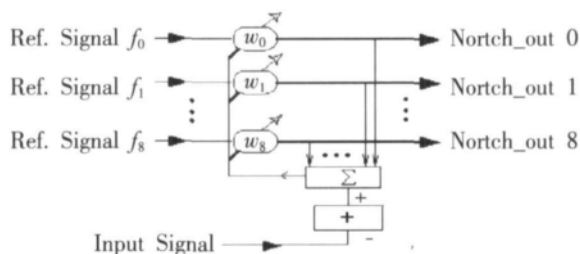


图5 9路并联 Notch 滤波器结构图

Fig.5 9-way parallel Notch filters' structure

采用联合判决就是利用了 VIFD 检测器能够有效的克服强信号的通道串漏的特点；但 VIFD 检测器在低信噪比条件下，检测的效果不如 Notch 滤波器检测效果。所以联合判决就是希望利用尽可能多的信息给出尽量正确的检测结果。

5 试验结果及讨论

2005 年 9~11 月，在实验室通过按信道仿真模型研制的模拟声信号源，对编码发射和接收进行了仿真测试，设定水深 30m~50m，发射换能器吊放深度 8m，接收换能器吊放深度 15m，发射机和接收机水平相距 6km，换能器带宽 7.5kHz~12.5kHz，重复发送 9600 位的二进制数据，水声数据传输速率 50bps。结果表明：系统稳定可靠，误码率很低，约为 10^{-4} ~ 10^{-5} ，方案切实可行。

为了进一步提高数据传输速率，可以缩短数据包的帧周期 T，也可缩短每个码元的宽度，还可增多调制频点数。如将 T1、T2 缩短为 16 个时间片，码元

宽度缩短为 2ms，则通信速率可达 125bps，将码元宽度缩短至 1ms，则通信速率可达 250bps。但是，频点数增加或码元宽度减小，可能会导致误码率上升和通信距离下降，并大大增加系统的复杂性。针对本文的海上试验研究正在进行中。

参考文献

- [1] Stojanovic M. Recent Advances in High-Speed Underwater Acoustic Communications [J]. IEEE J. Oceanic Eng. 1996, 21(2): 125-135.
- [2] Kilfoyle D B, Baggeroer A B. The State of the Art in Underwater Acoustic Telemetry [J]. IEEE J Oceanic Eng. 2000, 25(1): 4-27.
- [3] 李启虎. 水声信号处理领域若干专题研究进展 [J]. 应用声学, 2001, 20(1): 1-5.
LI Qihu. Advance of research work in some areas of underwater acoustics signal processing [J]. Applied Acoustics, 2001, 20(1): 1-5.
- [4] 殷敬伟. Pattern 时延差编码四信道水声通信技术研究 [J]. 应用声学, 2006, 25(3): 180-186.
YIN Jingwei. Study of 4-channel underwater acoustics communication based on pattern time delay shift coding system [J]. Applied Acoustics, 2006, 25(3): 180-186.
- [5] 王瑜. 时频编码水声通信技术及性能分析 [J]. 西北工业大学学报, 2004, 22(5): 636-639.
WANG Yu. On exploring TFSK (Time Frequency Shift keying) for improving underwater acoustic communication [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2004, 22(5): 636-639.
- [6] 许肖梅. 水声信道中一种抗多途跳频通信的研究 [J]. 台湾海峡, 2001, 20(2): 152-156.
XU Xiaomei, et. Research on anti-multipath frequency hopping communications in underwater acoustic channels [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2001, 20(2): 152-156.
- [7] LIANG Guolong, HUI Junying. Variance-of-instantaneous-frequency detector and its performance evaluation [J]. Chinese Journal of Acoustics, 1999, 18(1): 19-28.