

# 基于 DHT 的 FSK 数字化解调算法研究

杨庆,陈强,梁鉴如,吴庐山  
(上海工程技术大学,上海 201620)

**摘要:**文中对基于 DHT 的二进制频移键控(FSK)信号的数字化解调算法进行研究。FSK 信号的码元分为过渡区和稳定区,而在实际解调时只考虑稳定区中的若干个载波的采样值作 Hartley 变换运算,计算出对应于 1 码和 0 码载波频率的幅值信息,根据幅值的大小来判决,从而恢复数字信号。在高斯噪声背景下,对该解调算法的误码性能进行了分析。位同步也可以通过 Hartley 变换来实现。理论分析和仿真结果表明该解调算法具有计算量小、抗干扰性能好等优点。

**关键词:**Hartley 变换;数字化解调;频移键控;误码率

中图分类号:TN911

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2014)09-0073-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2014.09.016

## Study on Digital Demodulation Algorithm for FSK Signal Based on DHT

YANG Qing, CHENG Qiang, LIANG Jian-ru, WU Lu-shan  
(Shanghai University of Engineering Technology, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** It studies DHT-based digital demodulation algorithm for FSK signal in this paper. As the yard wave of FSK signal can be divided into transitional section and steady section, in the actuality, only samples of several carriers in steady section are used to do DHT operation to calculate the amplitude of the carrier frequencies of code 1 and code 0, and then recover the digital signal by judging the amplitudes. The BER performance of the algorithm in presence of Gauss white noise is analyzed. Bit synchronization can also be achieved by doing DHT. Theoretical analysis and simulation results show this method is of little calculation and good noise-resisting performance.

**Key words:** DHT; digital demodulation; FSK; error bit rate

## 0 引言

最近几年,数字化解调理论作为一个重要研究内容,在软件无线电技术的运用中受到了人们的高度重视<sup>[1]</sup>。很多文献中采用数字化的正交解调方式<sup>[2]</sup>,原理是:先将模拟信号 $f(t)$ 通过 A/D 转换器,转换为数字信号 $f(n)$ ,再利用数控振荡器(NCO)产生两路本振信号,再分别与之混频,经 FIR 数字低通滤波器(LPF)输出信号 $I(n)$ 和 $Q(n)$ ,最终解调成功输出。缺点是要提取同步载波,算法较复杂,存储空间大。

针对以上问题,如今在信号的解调方法上逐步进行了改进。正由于移频键控(Frequency Shift Keying, FSK)具有抗噪声、远距离传输、低误码率等优点,所以在实际中 FSK 信号应用较为普遍。文献[3]介绍了基于离散短时傅里叶变换(DSTFT)的 2FSK 信号解调算法,解决了算法中的同步问题,提出了一种新的基于谱

图同步的解调算法,比其他同步算法调解的误码率更低,但实际使用受限。文献[4-6]也介绍了基于离散短时傅里叶变换(DSTFT)的 2FSK 信号解调的方法,与现有方法相比,该算法更简单,具有更强的抗干扰能力。但上述文献中介绍的解调方法在实际应用中都会受到限制。文献[7-8]介绍了根据 DSTFT 的递归基于瞬时傅里叶变换(Momentary Fourier Transform, MFT)的算法,该算法是每个抽样点只需进行 3 次复数运算,大大降低了计算量,但由于 MFT 计算是一个递归过程,会出现积累误差的现象,对结果的准确度会产生一定的影响。为克服这些缺点,文中提出了一种简单、快速的 FSK 数字化解调算法。

文中将采用基于离散 Hartley 变换(DHT)对 FSK 信号进行解调,它是一种实数变换,而 DFT 是一种复数变换,运算量明显优于 DFT。文献[9-10]介绍了关

收稿日期:2013-11-14

修回日期:2014-02-18

网络出版时间:2014-07-17

基金项目:上海市教育创新项目理科重点项目(12ZZ182)

作者简介:杨庆(1988-),男,安徽安庆人,硕士,研究方向为车地通信便携式检测仪的研究。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20140717.1228.019.html>

于离散 Hartley 变换提出的一些快速算法,都已经应用到图像处理、频谱分析和地震波等领域。文献[11]提出了基于离散 Hartley 变换的 OFDM 实现模型,文中根据文献[11]的算法推广到对 FSK 信号的解调,提出了一种基于 DHT 的 FSK 数字化解调算法。并对离散 Hartley 变换的原理进行介绍和使用 Matlab 对误码率进行仿真,得出 DHT 算法的优点。

## 1 移频键控 (FSK) 的特点

FSK 是信息传输过程中使用的一种调制方式,实现比较容易,抗噪音与抗衰减性的性能比较好,所以在中低速数据传输中得到了广泛的应用。它是利用载波的频率传输数字信息的。

### 1.1 相位连续的 FSK 信号

通过数字基带矩形脉冲控制振荡器的某些参数,从而改变振荡频率,得到不同频率的信号,产生的 FSK 信号对应着两个频率的载波,在码元转换时,相位依然保持连续的就称为相位连续的 FSK 信号。

### 1.2 相位不连续的 FSK 信号

从原理上说,数字调频既可以通过模拟调频方法来实现,也可以通过键控方法来实现。模拟调频方法产生的就是相位连续的 FSK 信号,键控方法产生的是相位不连续的 FSK 信号。

## 2 离散 Hartley 变换原理

文献[12]中介绍了离散 Hartley 变换,仿照 DFT,对于离散实值的数学信号序列  $\{x(n) = 0, 1, 2, \dots, N-1\}$ , DHT 和 IDHT 被定义为:

$$X(k) = \text{DHT}[x(n)] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \text{cas}\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) \quad (k = 0, 1, \dots, N-1) \quad (1)$$

$$x(n) = \text{IDHT}[X_H(k)] = \sum_{k=0}^{N-1} X_H(k) \text{cas}\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) \quad (n = 0, 1, \dots, N-1) \quad (2)$$

离散 Hartley 变换的核  $\text{cas}\left(\frac{2\pi nk}{N}\right)$  是周期性的<sup>[13]</sup>, 周期为  $N$ , 且

$$\sum_{n=0}^{N-1} \text{cas}(2\pi n k/N) \text{cas}(2\pi n m/N) = \begin{cases} N, & m = k \\ 0, & m \neq k \end{cases} \quad (3)$$

由以上公式可以得出,与 DFT 变换比较类似, DHT 变换也是将不同频率的正弦信号之和用一个信号来表示,实际得到的频域表达式信息和原信号一样,说明时域的  $N$  点有限序列  $x(n)$  也可以变换为频域的  $N$  点有限序列  $X(k)$ 。

假设信号的初始相位为  $\varphi$ , 频率为  $f_0$ , 幅值为  $A$  的

正弦波  $x(t) = A \sin(2\pi f_0 t + \varphi)$ 。采样频率为  $f_s$ , 则采样点数  $N = f_s / f_0$ 。

将它进行 DHT 运算, 可得:

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \text{cas}\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} A \sin\left(\frac{2\pi n}{N} + \varphi\right) \text{cas}\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) \quad (4)$$

DHT 变换可以获取离散序列  $X(1), X(2), \dots, X(N-1)$  的频域, 其中在基波分量  $X(1)$  不为 0 时, 其余分量才为 0。得到:

$$X(1) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \text{cas}\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \left[ \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) + \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \right] \quad (5)$$

根据频域的基波分量可以求出正弦信号的幅值信息:

$$A = \sqrt{I^2 + Q^2} \quad (6)$$

式中

$$I = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \quad (7)$$

$$Q = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \quad (8)$$

## 3 基于 DHT 的 FSK 数字化解调方法

在码元转换时,理想的 FSK 信号可能会发生载频跳变,必须经过带通滤波才能发射,而 FSK 信号接受的码元波形可分为两个区域:稳定区和过渡区。过渡区波形的频率不稳定,且幅度明显降低,而稳定区的波形比较接近于载波频率的正弦波。显然稳定区非常适合对码元进行数字化解调判决。

FSK 信号可表示为:

$$s(t) = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N/2-1} \alpha_i \text{cas}\left(\frac{2\pi i t}{T}\right) + \frac{1}{N} \sum_{i=N/2}^{N-1} \alpha_i \text{cas}\left(\frac{2\pi(i-N)t}{T}\right) \right] \cos(\omega_c t) + \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N/2-1} \beta_i \text{cas}\left(\frac{2\pi i t}{T}\right) + \frac{1}{N} \sum_{i=N/2}^{N-1} \beta_i \text{cas}\left(\frac{2\pi(i-N)t}{T}\right) \right] \sin(\omega_c t) \quad (0 \leq t \leq T) \quad (9)$$

式中,  $\omega_c$  为载波角频率;  $T$  为 FSK 信号持续时间;  $N$  点实数序列为  $\{\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{N-1}\}$  和  $\{\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{N-1}\}$ 。

设 FSK 信号载频为  $f_1$  和  $f_2$ ,  $f_s$  为采样频率, 采样后的样值序列为  $s(t)$ , 高斯白噪音序列为  $n(t)$ , 则加噪音后序列为:  $R(t) = s(t) + n(t)$ 。

利用 DHT 原理解调 FSK 信号的基本原理<sup>[14]</sup>是:

先对 FSK 信号进行接收采样,之后经过两路带通滤波器,得到两个载波频率;再对每路信号进行 A/D 转换,对稳定区中的若干个载波的采样值进行 DHT 解调运算,求出频率为  $f_1$  和  $f_2$  的分量对应两个幅值  $A_1$  和  $A_2$ ,通过比较幅值的大小来恢复数字码元。如果发送的是 0 码时,得到对应于频率  $f_1$  的幅值  $A_1$  应小于  $A_2$ ;反之,如果发送的是 1 码时,得到对应于频率  $f_2$  的幅值  $A_2$  应小于  $A_1$ 。该解调方法未采用低通滤波和数据抽样的方法,计算量明显降低。基本解调框图如图 1 所示。

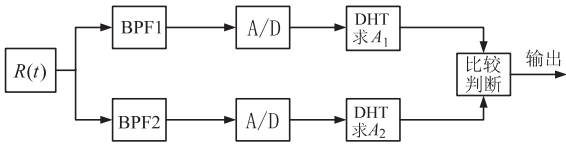


图 1 基于 DHT 的 FSK 信号数字化解调框图

3.1 解调算法

为了减少误差,FSK 信号的采样频率一般取载波频率的整数倍。设每一个码元周期的采样数目都为  $N$ ,可表示为  $f(1) \cdots f(n)$ ;在一个码元周期  $T$  内,假设 1 码有  $m_1$  个周波 ( $m_1 = T \cdot f_1$ ),0 码有  $m_2$  个周波 ( $m_2 = T \cdot f_2$ )。对稳定区中的每一个码元周期内的采样值都分别进行两次 DHT 解调运算,求出频率为  $f_1$  和  $f_2$  的分量对应的两个幅值  $A_1$  和  $A_2$ 。先对 1 码的载波分量进行一次 DHT 运算,则可以得到一个幅值  $A_1$ :

$$A_1 = \sqrt{I_1^2 + Q_1^2} \tag{10}$$

式中

$$I_1 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n) \cos(\frac{2\pi m_1}{N}n) \tag{11}$$

$$Q_1 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n) \sin(\frac{2\pi m_1}{N}n) \tag{12}$$

再对 0 码的载波分量进行一次 DHT 运算,则可以得到另外一个幅值  $A_2$ :

$$A_2 = \sqrt{I_2^2 + Q_2^2} \tag{13}$$

式中

$$I_2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n) \cos(\frac{2\pi m_2}{N}n) \tag{14}$$

$$Q_2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n) \sin(\frac{2\pi m_2}{N}n) \tag{15}$$

通过以上的原理,只要比较这两个幅值的大小就可以判决码元。如果  $A_1 > A_2$ ,则码元判为 1 码;如果  $A_1 < A_2$ ,则码元判为 0 码<sup>[14]</sup>。

3.2 位同步方法

位同步<sup>[15]</sup>是数字化解调中一个重要环节。在本解调方案中,分别对两个数字带通滤波器输出的信号进行 A/D 转换,再进行 DHT 解调,得到两个幅值序列  $M_1(k)$  和  $M_2(k)$ 。当  $M_1(k) > M_2(k)$  时,说明码元为 1;否则码元为 0。码元切换时刻取决于  $M_1(k) -$

$M_2(k)$  的极性,当  $M_1(k) - M_2(k)$  的值大小由正数变为负数或者由负数变为正数时,认为此处的转换点为码元的同步点。所以  $M_1(k) - M_2(k)$  极性的改变可以调整相位,位与接受码元之间的同频同相问题也就随之解决了,从而能够正确地判决接收到的码元。

为了减少“功率谱泄漏”,对整个载波进行周期采样。通常在一个载波周期内对 FSK 信号进行 DHT 解调中,如果采样点数不是整数,采样值可以选择用连续几个载波周期内的数据。而在实际过程中,只需要在位同步时刻前后时间内,计算两个幅值  $M_1$  和  $M_2$  的大小,根据幅值的大小来判断  $M_1(k) - M_2(k)$  的极性改变时刻。

4 软件仿真

在通信系统正常工作时,衡量传输消息可靠度的重要性能指标是误码率。算法的解调性能可以通过对误码率-信噪比仿真图的分析得到。图 2 是误码率计算的仿真流程框图。

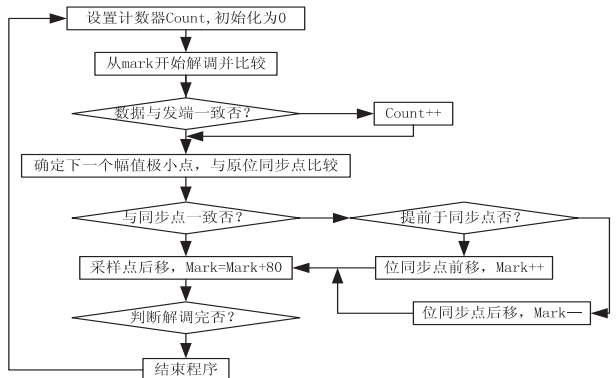


图 2 误码率计算流程框图

初始同步位 Mark,计数器 count,统计错误码元的数目。将接收解调到的每一个码元都与原始码元比较,如果数据与发端不一致则为误码,此时计数器 count 自动加 1;反之,继续对下一个码元进行判决。数据接收解调码元之后,数据传输中产生的误码率就是计数器 count 与总的传输码元的比值。

综合各种软件的仿真效果,最终选择采用 Matlab 软件进行仿真。为了验证该解调方案的正确性与可行性,选择了一系列参数,传输的调制信号采用 2FSK 信号,调制信号参数如表 1 所示。

表 1 已调信号调制参数

2FSK 特征参数	特征值
载波频率 $f_1$	10 kHz
载波频率 $f_2$	15 kHz
采样频率 $f_s$	120 kHz
FSK 信号的码速率	1 kBaud
波特率	125 符号/s

取采样时间  $T=1$  s, 数字带通滤波器 1 和 2 的带宽均取为 2 kHz, 码元个数取为 10 000 个。对 2FSK 调制好的参数信号进行解调, 重点对误码率进行比较。图 3 显示了在不同信噪比下, 该解调算法与传统正交解调算法的误码率性能比较。

从图中可以看出, 基于 DHT 的 FSK 数字化解调算法的误码率显著降低, 其抗干扰性能较传统方法有了明显改善。

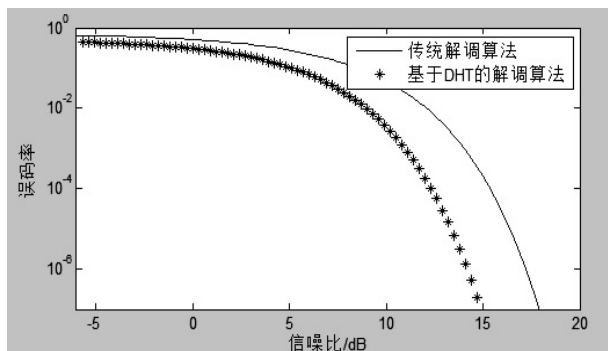


图 3 新解调算法与传统算法的误码率比较图

软件仿真了在位同步发生偏移的情况下误码率的情况, 图 4 显示了系统在位同步偏移情况下的信号误码率曲线。

从图中可以看出, 在相同的信噪比下, 即使位同步发生偏移, 但该解调算法依然可以获得较好的解调效果。

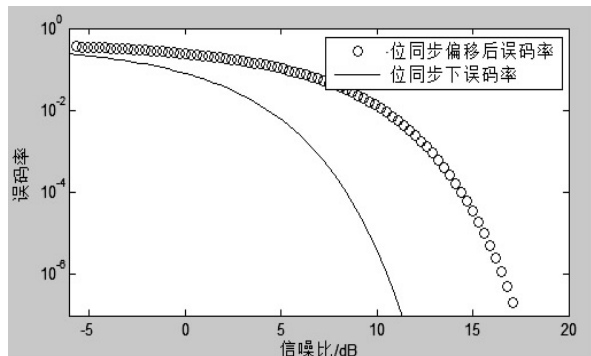


图 4 系统位同步偏移情况下误码率比较图

## 5 结束语

文中提出了基于 DHT 的 FSK 信号数字化解调算法, 通过对比该解调算法与传统解调算法的仿真, 在抗噪声性能下误码率的比较得出 DHT 算法的优点:

(1) DHT 是实变换, 不需要复数运算, 有效地节约了运算时间, 提高了运算精度;

(2) 在解调时只使用了码元波形稳定区内的采样数据, 有利于降低误码率;

(3) 编程容易;

(4) 不需要载波同步, 发射载波的相位波动对误码率影响不大。

因此, 利用 DHT 变换的解调, 不仅合理可行, 而且实现起来也较简单快捷。可望能够在软件无线电技术中得到广泛的应用。

## 参考文献:

- [1] 杨小牛, 楼才义, 徐建良. 软件无线电原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.
- [2] Rohde U L, Whitaker J C. Communications receivers—DSP software radio and design[M]. 3rd ed. [s. l.]: McGraw Hill, 2001.
- [3] 金文光, 张正宇, 唐少华. 2FSK 信号 DSTFT 解调算法中的同步新方法[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2011, 45(6): 1027–1031.
- [4] 冯小平, 罗明, 钟征斌, 等. FSK 信号数字化实时解调方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2001, 28(3): 401–404.
- [5] 冯小平, 李红娟, 罗明. 用离散 STFT 实现 FSK 调制信号的数字解调方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2001, 28(6): 812–815.
- [6] 胡延平, 李纲, 王晨, 等. 一种基于 DSTFT 解调 2FSK 信号的新方法[J]. 通信学报, 2000, 21(6): 54–59.
- [7] 刘蕊. 一种基于 DFT 滑动窗的实时 FSK 解调算法[J]. 现代电子技术, 2010, 33(19): 83–86.
- [8] 李秋娜, 袁嗣杰, 章兰英. 基于虚拟无线电的 PCM/FM 信号解调方法[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(7): 1617–1619.
- [9] 彭军, 罗奇峰. Hartley 变换在地震波研究中的应用[J]. 国际地震动态, 2008(12): 6–10.
- [10] Guo J I. An efficient design for one-dimensional discrete Hartley transform using parallel additions[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2000, 48(10): 2806–2813.
- [11] 王德强, 刘丹谱, 乐光新. 基于离散 Hartley 变换的 OFDM 实现模型[J]. 电路与系统学报, 2005, 10(1): 15–19.
- [12] Bracewell R N. Discrete Hartley transform[J]. J Opt Soc Am, 1983, 73(12): 1832–1835.
- [13] Bracewell R N. The fast Hartley transform[J]. Proceedings of the IEEE, 1984, 72(8): 1010–1018.
- [14] 胡敏, 肖大光. 一种 MSK 信号的数字化解调新算法[J]. 计算机仿真, 2007, 24(10): 123–125.
- [15] 吴志敏, 黄红兵, 肖大光. 基于 DFT 的 FSK 数字化解调算法研究[J]. 通信技术, 2008, 41(4): 36–37.

基于DHT的FSK数字化解调算法研究

作者：

[杨庆](#)，[陈强](#)，[梁鉴如](#)，[吴庐山](#)，[YANG Qing](#)，[CHENG Qiang](#)，[LIANG Jian-ru](#)，[WU Lu-shan](#)

作者单位：

[上海工程技术大学, 上海, 201620](#)

刊名：

[计算机技术与发展](#)

ISTIC

英文刊名：

[Computer Technology and Development](#)

年，卷(期)：

2014 (9)

本文链接：[http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_wjfz201409016.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201409016.aspx)