

# FSK的原理与实现

原创 皮诺曹 射频通信链 2025年12月9日 16:19



射频通信链

让射频学习不再困难，学射频，学通信，就看射频通信链。

411篇原创内容

公众号

频移键控 (FSK) 是一种数字调制方案，其中载波信号的频率根据数字数据（二进制比特流）进行改变。它是一种鲁棒且简单的技术，常用于通信系统，特别是在低成本应用中，如遥测、射频遥控器和无线数据传输。

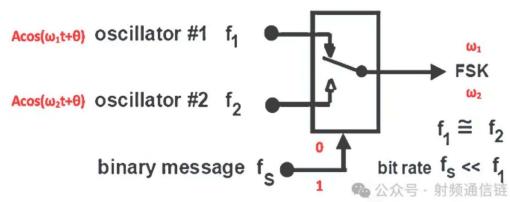
在二进制 FSK 中，两个不同的频率分别代表二进制“1”和“0”。这些频率被称为  $f_1$ （标记频率）和  $f_2$ （空号频率）。FSK 在高级系统中可以涉及超过两个频率，但在本解释中，我们专注于二进制 FSK。FSK 信号的数学表示可以给出如下：

- For binary '0':  $s_1(t) = A \cos(\omega_1 t + \theta_1)$ , where  $\omega_1 = 2\pi f_1$
- For binary '1':  $s_2(t) = A \cos(\omega_2 t + \theta_2)$ , where  $\omega_2 = 2\pi f_2$

载波频率在  $f_1$  和  $f_2$  之间根据二进制输入序列进行切换。

FSK 调制

FSK 调制器根据输入的二进制比特流生成 FSK 信号。



FSK 调制器的主要组成部分：

两个振荡器产生对应二进制“0”和“1”的频率  $f_1$  和  $f_2$ 。

二进制‘0’的载波是  $\text{Acos}(\omega_1 t + \theta)$ ，二进制‘1’的载波是  $\text{Acos}(\omega_2 t + \theta)$ 。

振荡器：

开关电路：

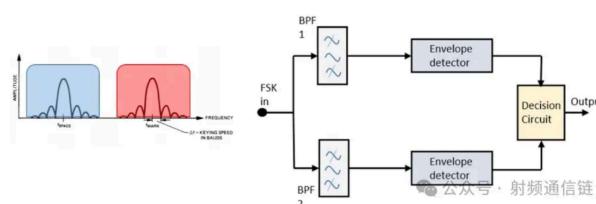
调制器使用二进制消息来控制开关，决定选择哪个振荡器输出进行传输。

如果输入位是‘0’，调制器选择来自振荡器#1 ( $f_1$ ) 的信号。

如果输入位是‘1’，调制器选择来自振荡器#2 ( $f_2$ ) 的信号。

工作原理：

二进制输入数据流切换开关，在两个振荡器之间交替，从而产生调制波形，其中  $f_1$  和  $f_2$  分别对应二进制‘0’和‘1’。



实现

直接调频 (VCO法)：

原理：直接将数字基带信号（经过或不经过脉冲整形）作为电压控制振荡器(VCO)的控制电压  $V_{tune}$ 。

优点：实现简单，天然产生恒包络信号。

缺点：

频率稳定度差：VCO的中心频率易受温度、电压、器件老化影响。

调制线性度要求高：VCO的调频灵敏度  $K_{vco}$  (Hz/V) 需要高度线性，否则频偏不准。

难以集成：纯模拟VCO集成度较低。

应用：低速、低成本应用。

#### 锁相环(PLL)分频比调制法：

原理：在单个分数N分频锁相环(Fractional-N PLL)中，根据输入数字信号动态改变分频比N。设参考频率为  $f_{ref}$ ，则输出频率  $f_{out} = N * f_{ref}$ 。

发送‘1’时，设置分频比为  $N_1$ ，输出  $f_1 = N_1 * f_{ref}$ 。

发送‘0’时，设置分频比为  $N_2$ ，输出  $f_2 = N_2 * f_{ref}$ 。

优点：频率精度高（锁定晶振），单PLL结构相对简单。

核心瓶颈(传统单点调制)：

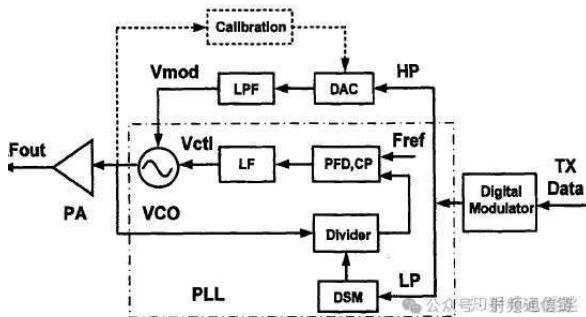
环路带宽限制：PLL本质上是一个低通滤波器（由环路滤波器决定带宽  $BW_{loop}$ ）。调制信号  $m(t)$ （改变N的指令）必须通过这个低通滤波器才能改变VCO频率。

调制速率受限：只有当调制信号  $m(t)$  的频率分量远低于  $BW_{loop}$  时，PLL才能有效跟踪，输出正确的频偏  $\Delta f$ 。如果调制速率接近或高于  $BW_{loop}$ ，调制信号会被严重衰减/滤波，导致输出频偏不足甚至无法正确调制。

建立时间限制：PLL从一个频率切换到另一个频率需要一定的建立时间（由  $BW_{loop}$  决定），这同样限制了最大符号速率。

#### 两点调制(Two-Point Modulation, TPM)

##### 原理



核心目标：突破PLL环路带宽对调制速率的限制，实现高速、宽频偏的调制（如高速FSK/GMSK）。

基本思想：在PLL环路的两个不同点（“两点”）同时注入调制信号  $m(t)$ ，并通过加重(Pre-emphasis)技术，使得：

在低频段（低于环路带宽  $BW_{loop}$ ），两条路径在VCO输出端产生的调制效果相互抵消，允许PLL环路正常跟踪低频变化，维持锁定。

在高频段（高于环路带宽  $BW_{loop}$ ），来自“环路滤波器前”路径的调制信号被环路滤波器衰减，而来自“VCO路径”的信号直接作用在VCO上，产生所需的高频调制分量。

关键点：

点1(参考/分频路径): 通常施加到分频比N上(通过Σ-Δ调制器实现小数分频和调制)。这个点在环路滤波器之前。调制信号需要经过环路滤波器。

点2(VCO路径): 施加到VCO的调谐电压V<sub>tune</sub>上(通常通过DAC)。这个点在环路滤波器之后, 调制信号绕过了环路滤波器, 直接控制VCO。

预加重: 加到VCO路径的调制信号m<sub>vco</sub>(t)不是原始m(t), 而是经过一个特殊滤波器H<sub>pre</sub>(s)处理后的信号m<sub>vco</sub>(t)=H<sub>pre</sub>(s)\*m(t)。H<sub>pre</sub>(s)的设计是TPM的核心, 其目标是补偿环路滤波器的低通特性。

总结

FSK是频域数字调制的基础, 实现方式从模拟键控到数字演进。两点调制是FSK在高性能射频芯片中的架构级优化, 通过频域双路径合成解决了PLL带宽与相位噪声的固有矛盾。其核心在于精确的增益匹配和延迟对齐, 这要求芯片级的设计与校准算法支持, 是现代低功耗广域网(LPWAN)和短距离无线通信成功的关键技术之一。

课程培训, 行业交流, 公司内训, 商务合作, 请加微信: jump-qq

 射频通信链



扫一扫上面的二维码, 加我为朋友。

 皮诺曹

“射频工程师加油”

喜欢作者

阅读原文