

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，如遥控、射频遥控器和无线数据传输。

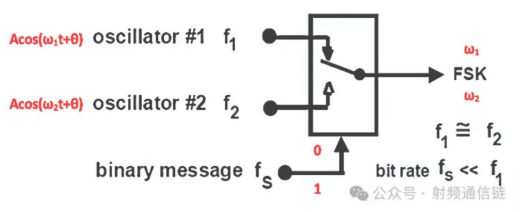
在二进制 FSK 中，两个不同的频率分别代表二进制 “1” 和 “0”。这些频率被称为 f1（标记频率）和 f2（空号频率）。FSK 在高级系统中可以涉及超过两个频率，但在本解释中，我们专注于二进制 FSK。FSK 信号的数学表示可以给出如下：

- 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 f1 和 f2 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 f1 和 f2。

二进制 ‘0’ 的载波是 $A\cos(\omega_1 t + \theta)$ ，二进制 ‘1’ 的载波是 $A\cos(\omega_2 t + \theta)$ 。

振荡器：

开关电路：

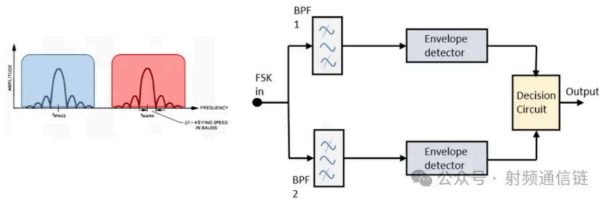
调制器使用二进制消息来控制开关，决定选择哪个振荡器输出进行传输。

如果输入位是 ‘0’，调制器选择来自振荡器#1 (f1) 的信号。

如果输入位是 ‘1’，调制器选择来自振荡器#2 (f2) 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 f1 和 f2 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 $f_{\text{out}} = N * f_{\text{ref}}$ 。

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

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

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)：

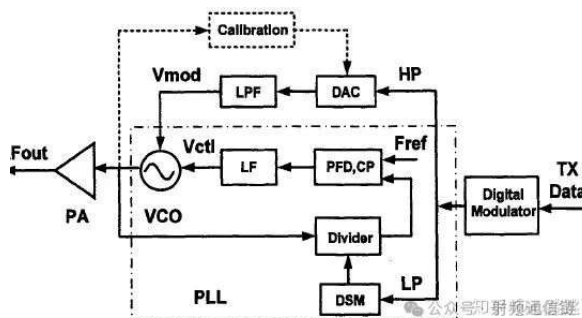
环路带宽限制：PLL本质上是一个低通滤波器（由环路滤波器决定带宽 BW_{loop} ）。调制信号 $m(t)$ （改变 N 的指令）必须通过这个低通滤波器才能改变VCO频率。

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 Δf 。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 $m(t)$ ，并通过预加重 (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_{tune} 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_{vco}(t) 不是原始 m(t), 而是经过一个特殊滤波器 H_{pre}(s) 处理后的信号 m_{vco}(t) = H_{pre}(s) * m(t)。H_{pre}(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



皮诺曹

“ 射频工程师加油 ”

喜欢作者

[阅读原文](#)