

# 如何选择数字麦克风的工作频率

AN-11-0006

作者：Jason Zhu/Felix Ge



# 如何选择数字麦克风的工作频率

## 摘要

数字硅麦克风(Digital MEMS Microphone)以其优秀的信噪比和接口的易用性, 被市场逐渐接受。同时对于真无线耳机核心处理芯片和手机应用处理器来说, 随着处理器工艺节点的缩小, 使用纯数字麦克风接口可以大大减少对工艺的依赖性, 并可以省去音频编解码芯片。本文中主要针对数字麦克风使用过程中时钟频率的选择进行分析, 给出针对音频和语音应用合适的工作频率, 后续滤波器的下采样倍数, 以及有效的信噪比等数据。从而指导系统工程师更好的设置处理器或者音频编解码芯片的配置参数。

## 目录

1.数字麦克风采样原理 .....	2
2.降采样(Down-sampling)与PCM(Pulse Code Modulation)信号 .....	4
3.时钟工作频率的选择 .....	6
4.参考文献 .....	8
5.修订历史 .....	9

# 如何选择数字麦克风的工作频率

## 1. 数字麦克风采样原理

一般而言，麦克风采集的信号为音频信号，频率范围是20Hz~20kHz，根据奈奎斯特采样定理，用40kHz的频率进行采样就可以恢复信号。然而实际上数字麦克风内部的采样频率高达2~3MHz，这是因为其中的模拟-数字转换器（Analog-to Digital Converter）是Sigma-Delta型的(有些文献写成Delta-Sigma)，电路本身的量化级数(Level)少。Sigma-Delta型ADC转换器通过很高的采样率和噪声整形技术来弥补量化级数少的弱点，仍然可以获得高质量的信号。

脉冲密度调制PDM (Pulse Density Modulation) 输出型的数字麦克风直接将1-bit Sigma-Delta调制器产生的数据流输出[1]。图 1示意了一个正弦信号和由它调制产生的PDM信号。因为PDM数据只有两个量化值，而信号的变化远小于这两个值之差，必然包含大量的量化噪声。

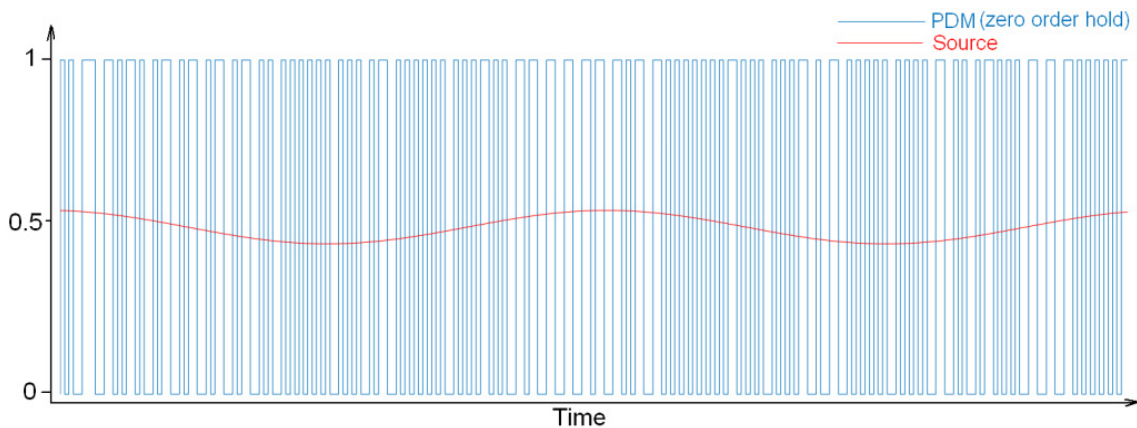


图 1 PDM调制生成波形的例子

## 如何选择数字麦克风的工作频率

图2是一个 -60dBFS, 1kHz正弦信号经过调制产生的2.4MHz PDM信号的离散傅立叶变换(DFT)结果，从中可以看出量化噪声的能量分布并不是均匀的。从零到十几kHz的频率范围内，噪声能量较低；从十几kHz开始到大约100kHz，噪声能量随频率显著增加；在整个1.2MHz(1/2采样频率)带宽内，只有频率最低的一小段频带噪声低——这是噪声整形(noise shaping)技术的结果。因低频段的噪声被推挤到更高的频率，只要用合适的低通滤波器将PDM信号中高频噪声去除，留下的低频信号信噪比就可以显著提升[2]。

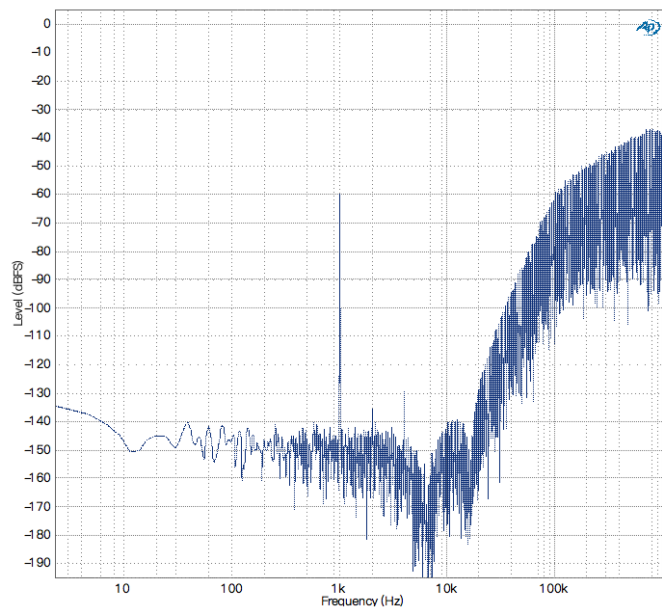


图 2 PDM信号DFT分析(源信号-60dBFS, 1kHz, 调制频率2.4MHz)

## 如何选择数字麦克风的工作频率

### 2.降采样(Down-sampling)与PCM(Pulse Code Modulation)信号

PDM信号是单bit数据流，接口形式与传输简单，可以任意截取，但是对于音频应用必须首先滤除其中的高频量化噪声。PDM信号经过滤波以后就不能再用1-bit量化表示了，带来数据带宽的急剧增加。同时，对于单纯的音频信号也不需要MHz级别的采样频率，否则浪费存储空间和处理器资源。于是，在对PDM信号进行低通滤波之后进行适当的降采样处理，可以还原出常规的音频采样率下的脉冲编码调制PCM(Pulse Code Modulation)信号。例如，3.072MHz的1-bit PDM信号，经过滤波和降采样得到48kHz的24-bit PCM信号，降采样(又叫抽取)系数为64，而实际ADC工作频率称为64倍过采样频率[2]。

数字麦克风的时钟CLK输入频率决定了内部Sigma-Delta型ADC的采样频率，对于PDM输出型的数字麦克风，DATA脚输出的码流就是和这个时钟频率同步的。PDM数字麦克风的降采样动作是在系统的音频编解码器(CODEC)或者手机应用处理器(AP)当中使用纯数字电路实现的。因此最终得到PCM音频的采样频率并不完全由麦克风工作频率决定。选取不同的降采样系数，可以在不同的麦克风工作频率下得到同样的PCM采样频率。需要注意的是，通常情况下PDM数字麦克风确保在正常全性能工作模式下，保证20Hz~20kHz频率内的噪声性能。实际降采样倍数是由麦克风时钟频率与需求的PCM采样频率的倍数决定。下表中列出当今主要的PDM麦克风工作时钟频率，降采样输出的PCM采样率之间的关系。

PDM 时钟频率	降采样系数D	PCM采样频率
3.072MHz	64x	48kHz
2.4MHz	50x	48kHz
2.4MHz	64x	37.5kHz
1.536MHz	48x	32kHz
1.024MHz	32x	32kHz
1.024MHz	64x	16kHz
768kHz	48x	16kHz
512kHz	32x	16kHz

表1 PDM时钟频率/降采样系数/和PCM采样频率的关系

## 如何选择数字麦克风的工作频率

当然, 由于PDM码流的降采样过程是在CODEC或者AP当中完成。理论上是可以进行任意倍数的下采样, 但通常情况下, 输出的PCM码流会作为标准音频码流进行传输或者存储。因此最终的PCM码流的采样率最好符合标准音频采样率, 以兼容各种音频设备。下表列出了主要的音频采样率以及应用场景以供参考。

PCM采样频率	规格参考
192kHz	HiFi无损音质
96kHz	HiFi级高保真音质
48kHz	影音娱乐, 高保真录音
44.1kHz	音频CD格式
32kHz	FM收音机音质
16kHz	宽带语音
8kHz	窄带语音、电话通话

表 2 PCM采样率与应用的关系

对于I2S输出型麦克风, 由于输出的是PCM编码, 降采样的过程必须是在麦克风内部完成。因为I2S接口中BCK和LRCK两个时钟(分别对应麦克风CLK和WS脚)频率比是固定的(最常见的情况就是 $f_{CLK}=64*f_{WS}$ ), I2S麦克风的降采样率是固定的(具体产品所支持的降采样率请参阅产品规格书)。

纳芯微电子的MEMS麦克风调理芯片当中, NSC6362为PDM接口输出的数字麦克风调理芯片, NSC6364为I2S接口输出的数字麦克风调理芯片。以上两种产品均可以搭配不同的MEMS换能器封装成麦克风产品。这其中, NSC6364产品的I2S接口的内部为64倍的下采样率。在有效的工作频率内, 它的采样率输出如下表3所示。

I2S 时钟频率	PCM采样频率/WS频率
3.072MHz	48kHz
2.4MHz	37.5kHz
1.536MHz	24kHz
1.024MHz	16kHz
768kHz	12kHz

表 3 NSC6364产品时钟频率与输出采样率的关系

## 如何选择数字麦克风的工作频率

### 3. 时钟工作频率的选择

要指出的是，对一个确定的PDM调制器（包括PDM麦克风），量化噪声的谱密度与归一化频率（相对于调制频率）有关。当PDM调制频率降低时，噪声占据的频带也成比例地下移，能免受量化噪声的信号带宽成比例缩窄。图3为同一信号(1kHz, -20dBFS)分别用3.072MHz调制(左图)和1.536MHz调制(右图)得到的PDM信号DFT分析，可见在1.536MHz调制下10kHz以上频段量化噪声有明显增加。当PDM调制频率从3.072MHz降为1.536MHz，倘若为了保持48kHz PCM采样频率而将降采样系数从64减至32，就必然包更多噪声成分，使PCM信号的信噪比降低。

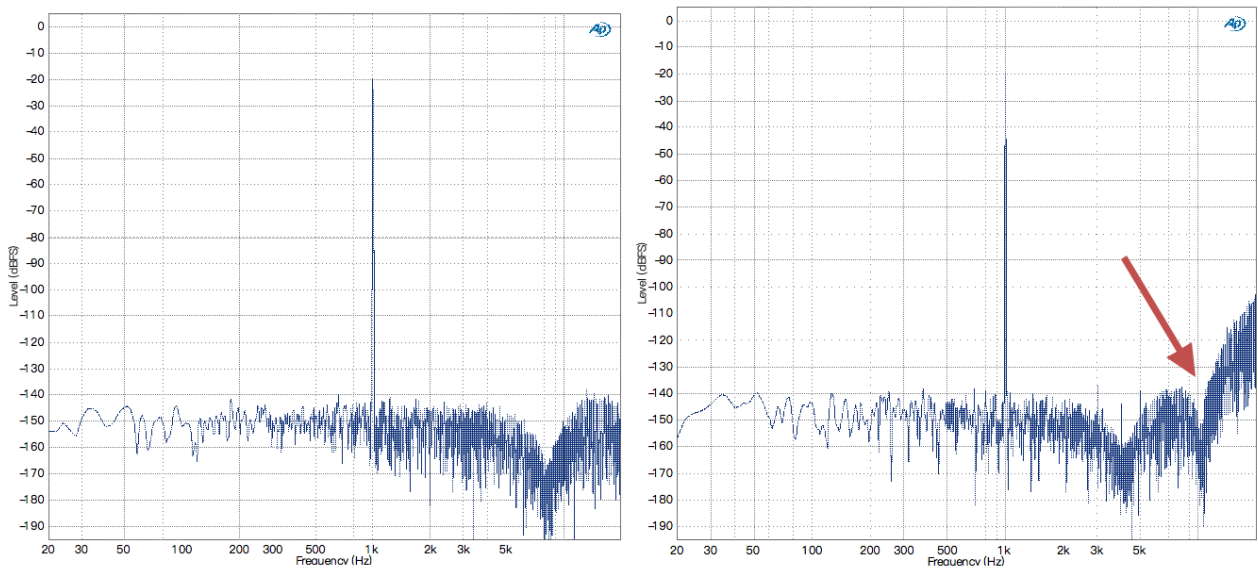


图3 3.072MHz PDM(左)与1.536MHz PDM(右)的DFT分析对比

## 如何选择数字麦克风的工作频率

如果用同样的降采样系数，即不同的PDM调制频率对应不同的PCM采样频率，也就由PDM频率决定了可用的音频信号带宽。但还需要注意的是PDM降采样过程需要使用低通滤波器，它的增益特性从通带到阻带多少需要有一段过渡带。通常认为音频转换器只需要保证20Hz~20kHz的平坦响应，所以最终输出采样频率为48kHz时，过渡带可以从20kHz到28kHz（因降采样到48kHz时，28kHz~48kHz的噪声会混叠到0~20kHz，所以必须对28kHz以上信号有足够的衰减），处于音频范围之外。但是，如果把这个系统的工作频率降低2/3，输出采样频率变为16kHz，原设计20kHz~28kHz过渡带就变为6.67kHz~9.33kHz，属于音频范围内。图4为7kHz、8.4kHz两个-20dBFS正弦波用1.024MHz PDM调制，再降采样至16kHz的频谱分析。尽管PCM采样带宽是0~8kHz，由于降采样的不完美，7kHz信号有几个dB的衰减，而7.6kHz出现了由一个混叠带来的假信号。

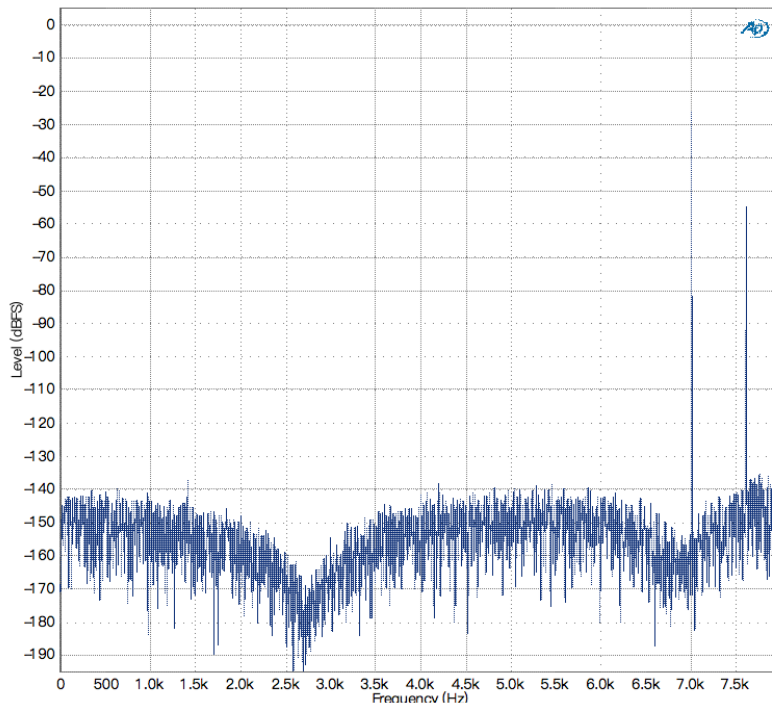


图 4 7kHz加8.4kHz源信号在16kHz系统(超采样-降采样)下的表现

不过，尽管降采样使用的低通滤波器并不完美，它的截止特性已远好于模拟方式实现的抗混叠滤波器。跟使用逐次逼近型(SAR) ADC采集模拟信号得到PCM信号的方案相比，数字麦克风不仅更加灵活，而且信号质量更高。



## 如何选择数字麦克风的工作频率

### 4.参考文献

- [1] Thomas Kite, “Understanding PDM Digital Audio,” Technical literature, Audio Precision, 2012.
- [2] Franco Maloberti, Data Converters, Springer-Verlag, 2007.

## 如何选择数字麦克风的工作频率

### 5. 修订历史

版本	描述	作者	日期
1.0	创建应用笔记	Jason Zhu, Felix Ge	2023/11/28

销售联系方式: [sales@novosns.com](mailto:sales@novosns.com); 获取更多信息: [www.novosns.com](http://www.novosns.com)

### 重要声明

本文件中提供的信息不作为任何明示或暗示的担保或授权，包括但不限于对信息准确性、完整性，产品适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的陈述或保证。

客户应对其使用纳芯微的产品和应用自行负责，并确保应用的安全性。客户认可并同意：尽管任何应用的相关信息或支持仍可能由纳芯微提供，但将在产品及其产品应用中遵守纳芯微产品相关的适用法律、法规和相关要求。

本文件中提供的资源仅供经过技术培训的开发人员使用。纳芯微保留对所提供的产品和服务进行更正、修改、增强、改进或其他更改的权利。纳芯微仅授权客户将此资源用于开发所设计的整合了纳芯微产品的相关应用，不视为纳芯微以明示或暗示的方式授予任何知识产权许可。严禁为任何其他用途使用此资源，或对此资源进行未经授权的复制或展示。如因使用此资源而产生任何索赔、损害、成本、损失和债务等，纳芯微对此不承担任何责任。

有关应用、产品、技术的进一步信息，请与纳芯微电子联系（[www.novosns.com](http://www.novosns.com)）。

苏州纳芯微电子股份有限公司版权所有