

V20260207

[CN]

现代声学测量平台，例如 Smaart、SIM 和 SysTune，都依赖于基于 FFT 的分析来评估扬声器、信号链和空间声场特性。这些工具假设测量信号在一个线性、延时不变的系统中传播。测量麦克风和音频分析仪之间引入的任何处理或不稳定性都会直接影响结果的有效性。

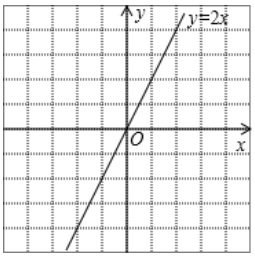
1 声学测量对无线传输最重要的要求是什么？

线性特性

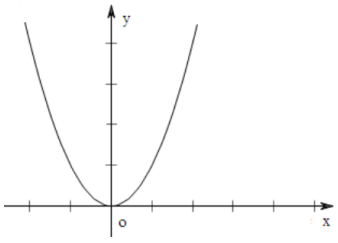
1. 音量应该线性调节，音量线性增加或者降低。
2. 20-20Khz 的全部音频信号，在无线传输中应该是一样的增益或衰减，整体呈现线性变化，其他指标的要求也类似。

说明：

输出 y 和输入 x 之间的数学关系，见图示。



y=2x (线性)



$y=x^2$ （非线性）

2 模拟音频无线通信无法用于声学测量主要源于以下原因：

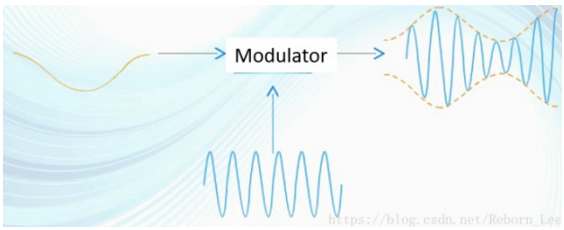
1. 现实中，模拟无法做到线性的调制曲线，频率响应表现差，导致无法满足声学测量。
2. 模拟技术对音量信息的传递办法落后，造成本身的动态范围不够，从而必须使用压扩器。使用压扩器，又造成伪影、相位错乱等问题，也无法满足声学测量的要求。
3. 信噪比较难提升。
4. 非线性造成失真度、底噪等方面不够优秀。

具体的阐述如下：

2.1 模拟无线通信频率响应表现差，高低音区域的衰减，从而导致无法满足声学测量。

2.1.1 第一点；首先要知道，模拟无线通信的调制原理是什么

模拟无线通信调制解调原理图如下：



（调幅原理图）

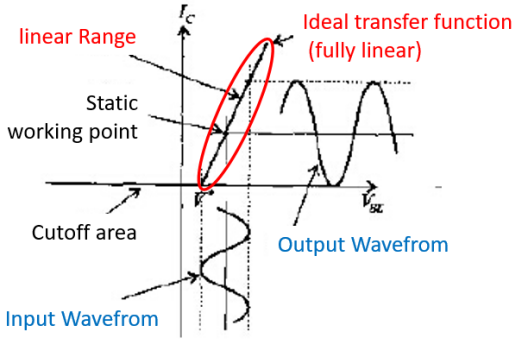
本质就是用音频信号（20-20Khz）去影响载波（例如 600Mhz，2.4Ghz）的某些物理属性。

而电磁波的物理特性只有三个：幅度、频率、相位。

从而主要三种调制方式：调幅、调频、调相。

2.1.2 第二点：模拟无线通信实现调制的手段是什么？

本质上，甲乙丙丁类放大器电路在音频与载波之间建立线性关系。 例如 甲类放大器电路 如下图 ：



Class A Amplifier Circuit

理想传递函数是关键。理论上，如果我们能够让音频的 20-20Khz 的各个频率，都能线性的影响到载波上的话，那么我们就能获得 20-20Khz 的传输频率响应，而且整个音频区间都将是 0dB 的衰减。

说明：

甲乙丙丁类放大器电路 – 本身是以输出较大功率为目的的多级输出放大电路，将微弱信号放大成大功率信号，最经典的设计方案有四种，故命名为甲类、乙类、丙类、丁类。

四种电路全部由电阻、电容、二极管、三极管组成，故是模拟电路的经典案例。

因为其具备信号特质迁移的特点，故，被用在无线电调制解调方案中，是人类无线电通信发展中的最重要突破。

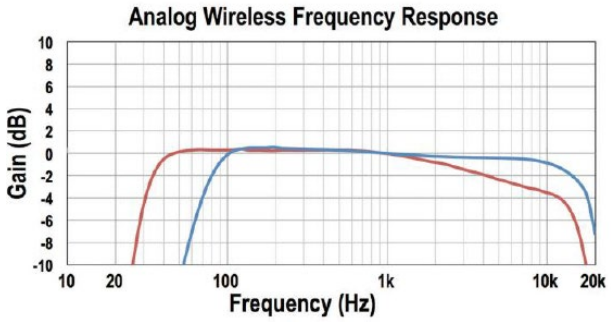
2.1.3 第三点，这个完美的理想传递函数能实现吗？

不能。

因为甲乙丙丁类类放大器电路都是靠电阻、电容、电感、二极管、三极管这种分离式器件搭建出来的。所有的器件都不具备完全的线性特性。造成整个调制电路只能在某些频率范围内达到线性关系（很多时候还不平坦）。

2.1.4 第四点，不完美的后果是什么？

这种不完美就带来了模拟无线通信的 频率响应范围。如下图:



低频可能干扰压扩电路的频率。例如，20Hz 的频率足够低，足以导致增益随波形的周期而变化。因此，低频被滤除。高频则受到模拟调频技术的限制，该技术通常无法产生 15kHz 以上的频率。

这就注定了，如果使用模拟无线通信技术，获得的音频一定无法做到 20-20Khz 全频率范围 0dB 衰减，高音区间和低音区域一定会有强烈的衰减。

2.1.5 第五点；模拟无线通信的糟糕频率响应会极度的影响声学测量

对于声学测量，“宽带”意味着系统能无损失地通过从极低（如 20Hz）到极高（如 20kHz 甚至更高）的所有频率。更重要的是，相位响应的平坦性比幅频响应更重要，也更难实现。一个滤波器即使在幅频上看起来平直，也可能在相位上产生严重的扭曲（表现为群延迟变化）。

1. 脉冲响应模糊:如果无线系统的高频响应在 18kHz 就急剧衰减，或者相位非线性，你测到的脉冲响应的“主峰”会变宽、不尖锐，后续的反射细节也会变得模糊。这直接影响你分析声场清晰度和反射时间的能力。
2. 相位图异常:在相位图上，可能会看到并非由扬声器或房间引起的、不自然的相位卷折或突变。
3. 分析精度下降:高频相位响应对带宽限制非常敏感，传递函数分析比较不同频率下的相对幅值和相位，脉冲响应分辨率取决于保留的带宽——所有这些都会因非平坦响应而受损。

此外，这种频率响应还造成音质的严重失真。

模拟无线通信传递普通人的语音还可以满足，但是传递乐器声音、女高音等情况时，无法满足其要求。

2.1.6 结论。

从频率响应范围分析，模拟无线通信不能满足声学测量的要求。

2.2 模拟无线通信为什么要使用压扩器，造成伪影等缺点，最后导致无法满足声学测量。

这个问题，最根源是为了解决音量信息的无线传输。

本质而言，音量信息不是音频信号的基本属性（音量的大小可以在接收端自行定义），所以在无线传输的

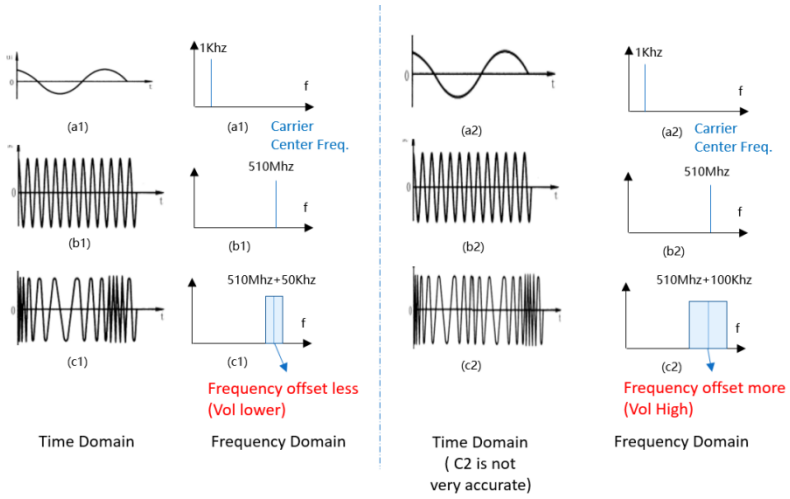
时候，无法被调制时候的放大电路携带。

模拟无线通信，为了解决音量信息传递问题，制造了一系列的麻烦事情，最终导致模拟音频无线通信出现一堆的新问题，而且至今无法解决。

2.2.1 第一点．首先要知道模拟无线通信如何传递音量信息的。

模拟无线通信采用了一个巧妙的办法：

音量的变化最后体现为 载波中心频点的±频率偏移量。频率偏移量越大，意味着越大的音量。如下图：



2.2.2 第二点．这个办法在工程实现时候的效果怎么样？

实际工程上，频率最大偏移量为±100Khz。

超过 100Khz，调制相关性就会变得非线性，造成严重失真。

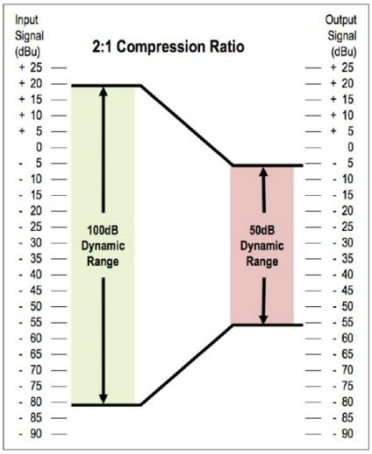
直接后果（新的问题）：FM 典型的原始动态范围约为 50dB。动态范围极低。

其他后果：FM 话筒，声音小的时候，一切正常。一旦声音大的时候，带宽瞬间剧烈增加，可能对相邻通道造成无线干扰。

2.2.3 第三点．模拟通信如何解决模拟无线通信的动态范围问题？

压缩扩展技术

为实现 100dB 的动态范围（高品质的最低要求），模拟无线麦克风采用压缩扩展技术。该技术通过 2:1 的比例压缩 100dB 的输入动态范围，使其保持在 50dB 以内。这一过程通过“可变增益放大器”（VGA）实现。这两种技术的结合称为“压缩扩展”（即压缩与扩展的组合）。



2.2.4 第四点. 压扩技术带来新的问题

压扩技术实际上是在发射端压缩音频信号，在接收端扩展信号——来提高信噪比和动态范围。虽然压扩技术对语音增强有效，但其本质上是非线性的，并且与信号电平相关。

可以把压扩想象成一个自动的、与音量联动的“推子”。在发射端，小声被自动推大（压缩），大声被自动拉小（限制）；在接收端，再做完全相反的操作。这对于语音通信是优点，这对于声学测量而言简直就是灾难：

a) 频率响应“飘移”

当你改变测试信号的音量时，测出的频率响应曲线竟然会变化！这让你无法判断是扬声器的特性还是无线链路在“捣鬼”。

b) 相干性崩溃

测量软件中的相干性曲线（数据可信度的“温度计”）会在很多频段下降，尤其是在低电平时。这意味着测量数据已经“脏了”，不可信。

c) 相位数据混乱

混响衰减曲线和相位响应变得不可靠，因为系统对信号的处理方式随电平动态变化。

总之：压扩技术中的压缩率和频率之间并不是线性关系（工程上，所有的元器件本身不可能存在全范围内线性的特性。），所以，造成整个系统都不是线性系统。基于 FFT 的幅值和相位数据被破坏，系统的真实特性被掩盖，降低相干性——所有这些都导致测量结果不可信。

此还会带来 声学伪影与呼吸效应：“声学伪影”和“呼吸效应”会导致可听增益变化。这些变化在大瞬态期间最为明显。本质上，压缩扩展处理无法完全跟上真实声音的动态变化。

如果你仔细听模拟无线话筒的声音，你会发现当你说话结束，音箱里面的声音并不会马上停止，低音还会延续 10-20ms 后才能消失，就是这个原因。"声学伪影"造成模拟无线话筒传输的声音始终保留了模糊的低音，让声音不够清澈。

声限幅：当增益超过 100dB 时，超出阈值的峰值将被清除。

2.2.5 第五点；结论。

因为压扩技术的存在，增加了模拟无线通信的非线性本质，从而更加不能满足声学测量的要求。

2.3 模拟无线通信极难提升信噪比（SNR）。

2.3.1 我们必须明白 SNR 对声学测量的重要性：

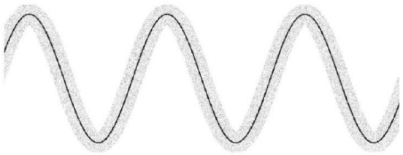
a) 测量安静房间和环境噪声基底

b) 捕捉长衰减时间和晚期反射

c) 在低频和低电平下保持相干性

2.3.2 模拟无线通信为什么极难提升 SNR。

a) 首先，模拟无线通信对在传输中没办法屏蔽干扰，受到的干扰都会叠加到音频信号中去，造成传输噪音。见下图



b) 其二，大多数的模拟无线通信电路都是基于分离式器件搭建的，这些元器件本身就是模拟器件，在运行过程中会带入新的噪音，电路无法进行屏蔽。这些干扰噪音也会叠加道音频信号中去。

2.3.3 模拟无线通信糟糕的 SNR 是在声学测量中的影响

信噪比决定了你能测量多安静的信号。比如测量房间的本底噪声或扬声器系统极低频段的微弱输出时，无线系统自身的噪声会成为一个“地板”，限制你的测量深度。

c) 混响尾巴被切断：

在测量衰减很长的混响时，无线系统自身的噪声会过早地“淹没”掉真实的声学衰减尾巴，让你测不到完整的混响时间

d) 低电平分析受限：

进行低电平的噪声谱分析时，系统的本底噪声会成为限制因素

e) 整体精度受限：

如果无线系统的噪声基底过高，无论麦克风质量或分析仪性能如何，都会限制测量的有效性。

2.3.4 总结：

模拟无线通信在的 SNR 的表现也注定其不适合用于声学测量。

2.4 模拟无线通信的失真度

压扩器的本质会引入非线性，从而导致失真度增加。此外，高电平信号可能会导致过调制失真。大多数模拟无线系统将其总谐波失真（THD）指定为压扩器稳定且不会发生过调制的水平。在这些条件下，THD 规格通常为 0.1% 至 0.5%。

2.4.1 失真度对声学测量的影响；

a) 虚假频率成分：

失真会产生原始测试信号中没有的谐波频率，这些虚假成分会被 FFT 分析仪捕捉到，污染数据。

b) 相干性下降

在相干性图上，失真会表现为对应频段的相干性“塌陷”。

c) 掩盖真实特性：

在传递函数幅值曲线上，可能会在基频的倍数处出现异常的“小凸起”（谐波成分），让你无法判断这个凸起是房间的共振，还是设备产生的失真。

2.4.2 总结

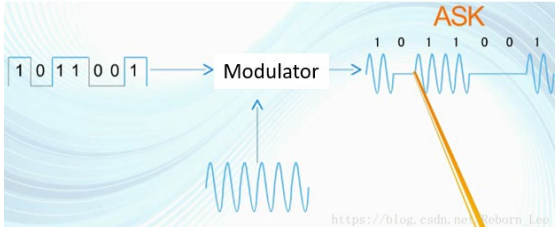
模拟无线通信在的失真度的表现也注定其不适合用于声学测量。

再回过头来复盘模拟无线通信，你会发现，因为整个模拟无线通信系统是基于分离式器件搭建的，而，这些元器件（电容、电阻、电感等）本身就不可能是完美存在的，他们所有的属性变化都不是理想的线性关键，从而导致模拟无线通信系统本身就不是理想的线性系统。非线性的通信系统，不能支持声学测量这样精密的任务。

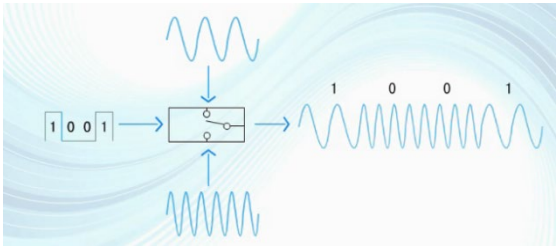
3 数字无线通信怎么实现声学测量功能的。

3.1 数字无线通信规避了传输函数，从而能够实现优秀的频率响应特性。

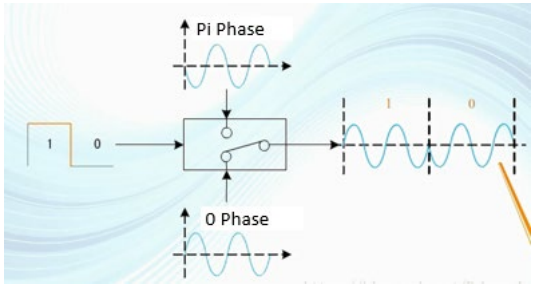
a) 数字音频无线通信，本质是传递 1 和 0，不需要构建信号和载波之间的线性关系。见下图：



ASK 调制

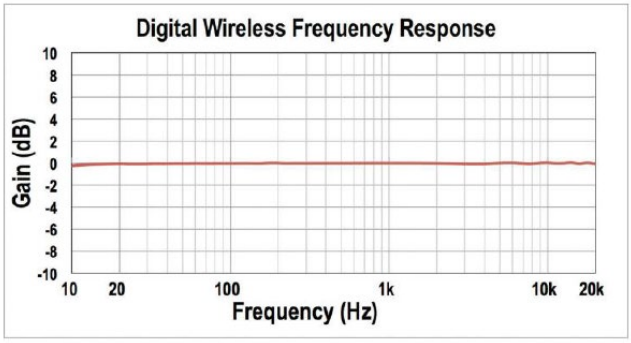


FSK 调制



PSK 调制

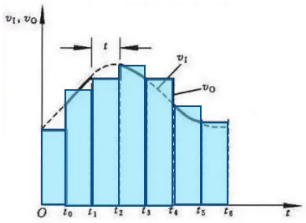
b) 因为调制方式的先进性，数字无线通信能够很轻松的实现优秀的频率响应特性。



低频与高频响应是采样率的函数，而非射频传输的任何特性。

3.2 数字无线通信能够很轻松的实现音量的信息传输，避免了压扩技术。

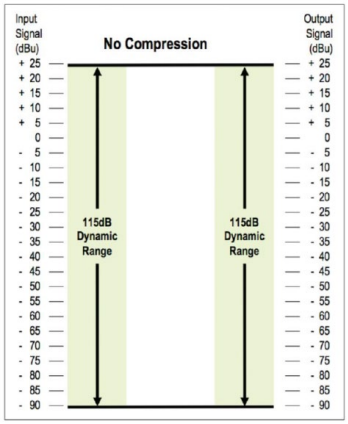
a) 数字通信，音量信息是在 AD 转化的过程中完成的（还涉及更前端的采样过程）。



编码深度越深，音量阶梯插值越小，音量动态越丰富。所以 24bit 比 16bit 更好。

最后，最大音量，取决于 AD/DA 芯片的可承受的信号最大输入电压、噪音等因素，最终影响音量动态范围。

b) 数字无线通信适应很宽的动态范围



无需任何压缩或限制，或预加重/去加重，即可直接接收音频信号。它还能适

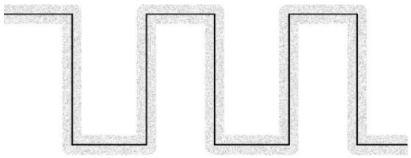
应更宽的输入动态范围，无需电平控制。最终，输入信号在接收端能够精确再现。

整个系统的动态范围受 AD/DA 芯片影响。

而芯片的提升比调制技术的提升要容易。

3.3 数字无线通信的底噪控制能量强。

数字无线通信本质只传递 1 和 0 两种状态(当然更复杂的数字无线通信可以传递 0000~1111 更多状态)。这就可以用很高的阈值对噪音进行过滤。比如下图:



我们在信号受到干扰，叠加了噪音信号之后，也能很轻松的判断 1 和 0。数字传输的优势在于能够包含额外的信息，帮助接收器判断数据是否正确。这被称为错误检测，校正位。

这是数字无线通信能够轻松做到 120db 信噪比的底层原理。优先的 SNR 性能，导致数字无线通信能够很好的使用于声学测量。

3.4 数字无线通信的失真度

失真是系统整体线性度的函数。不存在压扩器，也不存在音频过调制的可能性。总谐波失真的典型规格为 0.03%。

4 关于无线频段的选择。

虽然本文旨在解释数字无线通信和模拟无线通信在声学测量方面的差异。

但是，依旧需要解释不同频段对于声学测量上的区别和重要性。

4.1 关于 400Mhz~900Mhz 频率

除此之外，对于专业级的声学测量，我们需要选择基于 400Mhz~900Mhz 频率的数字无线通信。这也是非常重要的，原因如下。

无线通信定义而言，UHF 频段包含了 2.4G 频率，但是通常，人们提到 UHF 更多的是想到 400Mhz ~ 900Mhz 无线电频段。因为全球大部分可以民用的无线频段皆归属该范围。

从无线通信角度而言，如要进行音频的长距离无线传输，400Mhz~900Mhz 是最理想无线频段。在移动通信领域，将其称为“黄金频段”:

a) 拥有优秀的波长，其衍射、反射性能优秀，适合跨越围墙等障碍物。

b) 真空衰减性能较好，适合长距离传输。

c) 其匹配的 1/2 波长天线的长度在方便携带的范围内。

d) 规避了蓝牙、wifi 的使用频段，人群场景相对更加稳定。

e) 正好能够充分满足音频的无线传输对频率带宽要求。

4.2 关于 2.4Ghz 无线频段的选择

2.4G 频段，最开始是为了移动通信穿戴产品而规划的，强调的是更短的天线，为视频信号提供更宽的带宽，解决移动通信“无线传输最后 10 米”问题的。

Bluetooth 协议是 2000 年前推出的穿戴产品协议，物理层搭建在 2.4Ghz。 这在当时而言，是非常智慧的技术方案。既能满足短距离高速率无线通信的邀请，又做到了全球所有国家的频段统一，避免了繁琐的不同国家不同认证。

后面的 WIFI 协议也是基于以上优点，同样将其搭建在 2.4Ghz 上。

然而，随着 Bluetooth 和 WIFI 的应用场景不断的扩展，人们对其距离的期望值也不断的增加。Bluetooth 和 wifi 也在技术上不断的迭代提升，但是依旧存在以下问题:

a) 波长较短，衰减性差，衍射表现差。这是物理特征，很难通过协议来提升。

b) 基于 2.4Ghz 的通信协议（Bluetooth & WIFI）都比较复杂，造成延时过大，一般都在 10ms 以上。虽然最新版本的协议的在此方面有极大的提高，但是工程上依旧不够理想，无法达到 PA 的要求。

c) 2.4Ghz 广泛的应用在 Bluetooth 和 wifi, 在观众较多的场景, 一定会面临通道数量不够使用的问题。

d) 因为手机的使用，造成干扰源也非常多，而且无法规划和管制。

4.3 关于 5.8GHz 无线频段的选择

5.8G 频段，是对 2.4G 频段的扩展，以解决蓝牙、wifi 设备愈来愈多造成的无线频率资源紧张的问题。

从 2.4G 频段到 5.8G 频段的规划，间隔了将近 20 年，很多无线频段资源都被各国政府规划给移动通信、军队通信、卫星通信，RFID 通信使用。再考虑到未来的通信网络扩容的要求。能够给民用的各个国家都还空闲的无线频率资源就只剩下 5.8Ghz 了。

5.8Ghz 无线频段，最大的弱点就是波长只有 5.2cm，穿透力太弱，真空衰减性太差，不适合 PA 使用。这也能解释，近年来，很多国家政府都在收回 400Mhz~900Mhz 范围内的无线频率资源。

5 数字通信与协议

数字通信与模拟通信最大的不同是协议。

模拟通信没有协议的概念，只有实现数字通信的编码技术之后，才可能实现通信协议。

5.1 通信协议有何意义?

只有具备通信协议才能具备无线自动控制和管理的可能。

模拟无线通信没有协议，所以连音量信息的传递都非常复杂。而这对于数字无线通信是非常简单的事情。

拥有协议能力的数字无线通信，能够低成本的实现跳频技术，这是解决无线电干扰的重要办法。

5.2 为什么很多企业使用 2.4Ghz 或 5.8Ghz

大家都知道 400Mhz~900Mhz 更适合音频的长距离无线传输，但是依旧选择 2.4Ghz。

答案还是在于协议。

因为 2.4Ghz 频段有全球通用的 Bluetooth 和 wifi 协议和成熟的通用芯片支撑。企业只需要购买芯片，即可轻易实现数字无线通信。这样可以避免通信协议、基带、天线等很多基础技术的研发。

然而，Bluetooth 和 wifi 本质是网络通信协议，重点考虑地址编码、寻址、广播、通信路由、逻辑链路稳定性，所以，延时这个特征并不是优先级很高的技术要求。

这就是为什么很多数字无线通信设备在延时上表现不佳的原因。

6 感谢

感谢来自挪威 TZ AUDIO 的 Mr Thomas 的建议，让我们完成此文的撰写。TZ AUDIO 是北欧知名的声学实验室，给与了 GAODIMIC 宝贵的建议和技术支持，也是 GAODIMIC 在北欧地区唯一的 Business Partner。

感谢 GAODIMIC 的忠实用户和粉丝。 来自世界各地的朋友给 GAODIMIC 提供了完美的舞台，并给与了 GAODIMIC 很多理解、支持和帮助。让 GAODIMIC 聆听到了世界美妙的声音。

— End —

Written by: Philies Xu (Phifee) / Kert Chen / Yang Long [from GAODIMIC]

Proofread by Spanish version: CARLOS LÓPEZ PÉREZ (Carlos CLP) [from GAODIMIC]

Proofread by French version: MOHY, Franck VOIFFRAY [from HALIOTIS DISTRIBUTION SAS]

References and thanks:<< Line 6 Wireless microphones Whitepaper>>

Listen to the Beautiful Sounds from the World

聆 听 世 间 美 妙 声 音

GAODIMIC®

Infosvc LLC
20260207