

A²B技术和数字麦克风 如何在新兴汽车应用中 实现出色的性能

Ken Waurin, ADI公司战略营销经理

Dietmar Ruwisch, ADI公司高级音频技术专家

Yu Du, Harman International Industries高级首席声学工程师

简介

这篇关于Automotive Audio Bus® (A²B®, 汽车音频总线) 技术的文章介绍数字麦克风和连接技术的最新进展。这些创新正在促使支持新世代汽车信息娱乐系统的变革性应用得到迅速采用。

市场和应用概况

在汽车座舱电子市场, 随着汽车制造商努力实现车辆差异化以区别于竞争对手, 一个越来越明显的趋势是音频、语音和声学相关应用正在迅速扩张。此外, 随着普通消费者对技术越来越了解, 其对驾驶体验和个人与车辆交互水平的期望也在大幅提高。家庭影院质量的音响系统已成为所有价位车辆的寻常配置, 现在还出现了复杂的语音免提(HF)和车内通信(ICC)系统。另外, 传统上仅部署于顶级高端车辆中的主动降噪和路噪降噪(ANC/RNC)系统, 现在也进入了一般人负担得起的主流市场。展望未来, 基于音频或声学的技术将成为L4/L5级自动驾驶车辆发动机控制单元(ECU)的关键组成部分, 因为ECU需要检测是否存在应急车辆。

所有这些传统和新兴应用的共同点是依赖于高性能声学检测技术, 例如麦克风和加速度计。几乎所有新兴应用都需要多个声学传感器(如麦克风或麦克风阵列)来实现最佳系统级性能, 因此需要一种简单但经济高效的互连技术来确保系统总成本最小化。

长久以来, 缺乏麦克风优化的互连技术一直是汽车制造商的一大痛点, 每个麦克风都需要使用昂贵笨重的屏蔽模拟电缆直连到处理单元。这些增加的成本——主要是实际的布线, 其次是重量增加和燃油效率降低方面——在许多情况下阻碍了这些应用的广泛采用, 或者至少是将其限制在高端市场。数字麦克风和连接技术的最新进展有望推动变革性应用在新世代车辆信息娱乐系统中迅速得到采用。A²B技术将大有可为。

传统模拟麦克风的实现和局限

大多数国家和地区都禁止开车时使用手持电话, 支持Bluetooth®的免提装置已成为几乎所有车辆的标配设备。市场上有各种各样的免提解决方案——从简单的包含扬声器和麦克风的独立单元, 到完全集成在车辆信息娱乐系统中的高级解决方案。直到最近, 大多数免提系统是以非常相似的方式实现的。此类系统仅包含一个(少数有两个)麦克风, 相关的麦克风技术是50年前的驻极体电容麦克风(ECM)类型。所传输音频的语音质量常常不能令人满意, 尤其是简单的独立单元, 麦克风与讲话者嘴巴之间的距离可能相当大。如果将麦克风安装在尽可能靠近嘴巴的位置(例如车辆的车顶板中), 通信质量可以有所改善。然而, 在这种情况下, 如果要同样地支持驾驶员和乘客, 那么前排两个座位都需要有麦克风。

典型的汽车ECM麦克风是一种将ECM单元与小型放大器电路整合在单个外壳中的装置。放大器提供一个模拟信号，其电压电平允许信号通过数米长的电线进行传输，这也是典型汽车应用的要求。若不放大，原始ECM信号对于如此长的电线来说太低，由于电线上的电磁干扰，信噪比(SNR)会降低过多。即使放大信号，也需要屏蔽线缆——通常是双线电缆，通过一个偏置电压(8V)为麦克风装置供电。考虑到这种布线要求，由于重量和系统成本制约，显然主流车辆中使用的ECM器件数量很有限。

ECM的少数优点之一是其内置声学指向性，通常将其调整为超心型极性图(MEMS麦克风也可以做成指向的，但通常需要更复杂的声学设计)。通常可以实现10 dB或更多的后向衰减，“后向”是指朝向挡风玻璃的方向，从其中只会产生噪声(即没有期望的信号，例如讲话者的语音)。在期望信号的进入方向上具有更高灵敏度非常有利于提高SNR。然而，定向ECM单元会引入不必要的副作用，例如高通特性——灵敏度在较低频率时会降低。这种高通响应的3 dB截止频率通常在300 Hz至350 Hz范围内。在HF技术的早期，这种高通特性是一个优势，因为发动机噪声主要以较低频率存在，发动机声音本身会经过麦克风衰减。然而，自从宽带或HD通话出现以来，这种高通特性开始成为一个问题。在宽带通话中，有效带宽从300 Hz到3400 Hz增加为100 Hz至7000 Hz。麦克风的自身高通滤波特性使得有必要在后处理单元中放大100 Hz至300 Hz的信号，而如果麦克风本身能提供更好的音频带宽，则不需要放大此范围内的信号。ECM技术的另一个缺点是不同器件的灵敏度和频率响应差异很大。ECM的制造公差相对较大，这对于单个麦克风应用可能不是问题。但是，如果在间距较小的麦克风阵列应用中部署多个麦克风信号，则麦克风之间的严格匹配对于实现最佳阵列性能至关重要。在这种情况下，ECM难以使用。此外，从物理尺寸角度看，传统ECM单元一般不适合于小型麦克风阵列。

麦克风阵列具有广泛的适用性，包括在车内，因为与传统ECM相比，阵列能提供类似(常常更优越)的定向性能。关于声音冲击方向的空间信息，可以使用阵列中分组的两个或更多个合适的麦克风来从麦克风信号中提取。这类算法常被称为波束成型(BF)。“波束成型”一词源自与相控阵天线技术的类比，利用简单的纯线性滤波器和求和算法可以将天线阵列发射的无线电“波束”聚焦在某个方向上。虽然麦克风阵列中没有这样的波束，但波束成型这一术语在麦克风信号处理领域也很常见，相比于简单的线性波束成型处理，它涵盖了更广泛的线性和非线性算法，支持实现更高的性能和更大的灵活性。

除了波束成型处理之外，原始麦克风信号几乎总是需要后处理，因为每个HF麦克风都会同时捕获期望的语音信号和环境(若座

舱)中的干扰。风噪、路噪和发动机噪声会降低SNR，通过扬声器播放的信号——通常称为扬声器回波——也是不需要的信号源。为了减少这种干扰并改善语音质量，需要采用复杂的数字信号处理技术，常常称之为回声消除和降噪(AEC/NR)。AEC从麦克风中消除扬声器声音，否则它会作为在线路另一端讲话的人声的回声传输。NR则在降低恒常存在的行驶噪声的同时提高所传输信号的SNR。虽然国际电信联盟(ITU)发布了详细规范(例如ITU-T P.1100和P.1110)来定义HF系统的许多性能细节，但在行驶车辆中通话时，如果AEC/NR处理达不到标准，人们对通信质量的主观印象可能不会满意。与前面提到的BF算法一起，AEC/NR/BF的组合赋能广泛的新型应用，所有这些应用都与某种程度的数字音频信号处理相关。为了支持这些应用，需要新一代消除了传统ECM缺点的麦克风技术。

数字MEMS麦克风的技术和性能优势

微机电系统(MEMS)技术迅速成为麦克风的新行业标准，因为相比传统ECM，它提供了许多优势。首先，MEMS使得声音传感器比现有ECM单元要小得多。此外，将MEMS传感器与模数转换器(ADC)集成在单个IC中所得到的数字麦克风，能够提供可立即进行AEC/NR/BF处理的信号。

模拟接口MEMS麦克风也存在，但其具有与模拟ECM相同的许多缺点，而且若使用传统双线模拟接口工作，甚至需要比ECM更复杂的放大器电路。只有采用全数字接口技术，才能显著减轻模拟线路固有的干扰和SNR问题。此外，从生产角度看，MEMS也占选，因为MEMS麦克风的生产规格偏差比ECM单元要小得多，这对于BF算法很重要。最后，MEMS IC麦克风的制造工艺大大简化，因为可以采用自动化安装技术，整体生产成本得以降低。从应用角度看，更小的尺寸是最大的优势，并且由于声音入口非常小，MEMS麦克风阵列实际上可以做成不可见的。传感器的入口和声音通道要求在设计和生产质量方面特别小心。如果声学密封不牢，来自内部结构的噪声可能到达传感器，两个传感器之间的泄漏可能降低BF算法的性能。与可以设计和制造成全向或定向的典型ECM单元不同，MEMS麦克风元件几乎总是制造成全向式(即声音接收没有内在方向性)。因此，MEMS麦克风是忠实于相位的全向声压传感器，为高级BF算法提供理想的信号，衰减方向和波束宽度可以由用户通过软件进行配置。

一般来说，将所有信号处理模块组织在一个集成算法套件中非常重要。如果功能模块彼此孤立地实现，处理延迟将会不必要地增加，整体系统性能会下降。例如，BF算法始终应与AEC一同实现，最好由同一提供商实现。如果BF算法在信号中引入任何非线性效应，

则AEC肯定会产生令人不满意的结果。数字信号处理的理想结果最好通过一个集成算法包来实现, 该算法包接收未降级的麦克风信号。

下面详细比较了标准线性BF和ADI专有算法, 以便大家充分了解高级BF算法的性能潜力。图1中的曲线显示了三种不同BF算法在波束内和波束外方向的极性特征和频率响应。基于双麦克风阵列的标准线性超心型算法用作基准 (黑色曲线)。基准曲线显示了典型零角度方向的最大衰减 (即最大波束外衰减), 以及180°处的“后瓣”, 此处波束外衰减较低。由此产生的后瓣是线性算法中与波束宽度权衡的结果。心形梁 (未示出) 恰好在180°处有最大衰减。然而, 其接受面积比超心型配置更宽。后瓣较不明显且波束外衰减更高的波束可以通过非线性算法实现, 红色曲线显示了该类的ADI专有双麦克风算法 (麦克风间距: 20 mm)。

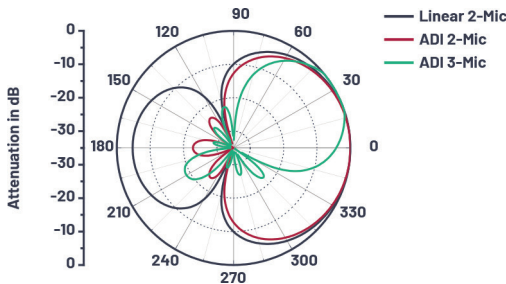


图1. 不同BF算法的极性衰减特征。

阵列中有两个全向麦克风, 因此波束形状总是存在旋转对称性。换句话说, 极性图中 x° 的衰减与 $360^\circ - x^\circ$ 的衰减相同。这假设极性图的 0° 至 180° 线等同于连接两个麦克风的想象线。三维波束形状可以通过绕该麦克风轴旋转二维极性曲线来想象。无旋转对称性的不对称波束形状或更窄波束需要至少三个麦克风以三角形布置。例如, 在典型的头顶控制台安装中, 双麦克风阵列可以衰减来自挡风玻璃的声音。然而, 当如此定向时, 双麦克风阵列无法区分驾驶员与乘客。将阵列旋转 90° 可以区分驾驶员与乘客, 但挡风玻璃产生的噪声与座舱内的声音将会无法区分。只有使用三个或更多个配置成阵列的全向麦克风, 才能衰减挡风玻璃噪声并区分驾驶员和乘客。图1中的绿色曲线显示了相应的ADI专有三麦克风算法的示例性极性特征, 其中麦克风以等边三角形布置, 间距为20 mm。

极性图利用从不同角度到达麦克风阵列的带限白色噪声计算。音频带宽限制为100 Hz至7000 Hz, 这是先进蜂窝电话网络的宽带 (或高清语音) 带宽。图2比较了不同算法类型的频率响应曲线。在波束内方向上, 所有算法的频率响应在期望音频带宽内都是平坦的, 符合预期。波束外频率响应针对波束外半空间 (90° 至 270°) 进行计算, 确认在宽频范围内波束外衰减很高。

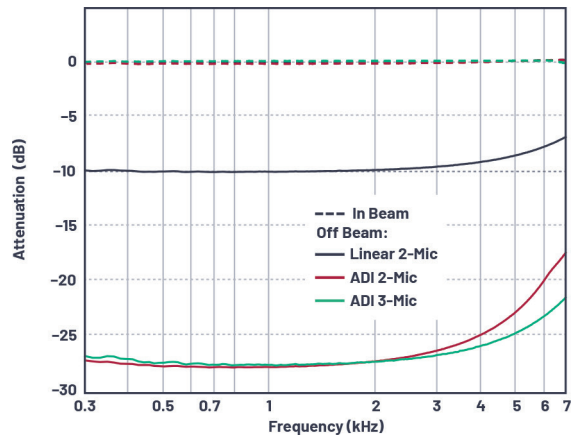


图2. 不同BF算法的波束内 (虚线) 和波束外 (粗线) 频率响应。

阵列麦克风间距和音频带宽与采样速率之间的关系值得进一步讨论。宽带高清语音使用16 kHz的采样速率, 这是语音传输的良好选择。当前16 kHz宽带采样速率与早前窄带系统所使用的8 kHz采样速率相比, 在语音质量和语音清晰度方面差异巨大。由于语音识别提供商的推动, 对更高采样速率 (如24 kHz或32 kHz) 的需求不断增长。语音频段应用可能要求高达48 kHz的采样速率, 这通常是主系统音频采样速率。底层动机是避免在内部进行采样速率转换。然而, 支持这些高采样速率所需的额外计算资源与其产生的实际效果并不相称, 因此现在广泛接受16 kHz或24 kHz作为大多数语音频段应用的推荐采样速率。

对于波束成型应用, 高采样速率是有问题的, 因为在频率等于声速除以麦克风间距两倍的地方会发生空间混叠。在这种混叠频率无法进行波束成型, 因此不希望发生空间混叠。如果将麦克风间距限制在21 mm或更小, 则可以避免宽带系统 (16 kHz采样速率) 中发生空间混叠。如果采样速率更高, 则间距需要更小才能避免空间混叠。然而, 麦克风间距过小也不行, 因为麦克风容差, 特别是麦克风传感器的内在 (非声学) 噪声会成为问题。如果间距很小, 一个阵列的麦克风之间的干扰 (如内在噪声) 和灵敏度偏差可能会压倒麦克风之间的信号差异, 导致信号差异变得微不足道。在实践中, 麦克风间距不应小于10 mm。

A²B技术概述

A²B技术专门用来简化新兴汽车麦克风和传感器密集型应用的连接挑战。从实现角度看, A²B是单个主器件、多个子节点 (最多10个) 的串行拓扑结构。目前全面量产的第三代A²B收发器系列有五个成员, 全部都提供汽车、工业和消费电子温度范围。全功能AD2428W与四款功能减少、成本更低的衍生器件——AD2429W、AD2427W、AD2426W和AD2420W——构成ADI公司最新的引脚兼容增强型A²B收发器系列。

AD2427W和AD2426W的功能有所减少 (仅用于子节点), 主要针对免提、ANC/RNC或ICC等麦克风连接应用。AD2429W和AD2420W是入门级A²B衍生器件, 相对于全功能器件具有显著的成本优势, 特别适合于汽车eCall和多元件麦克风阵列等成本敏感的应用。表1比较了各种第三代A²B收发器的特性。

表1. A²B收发器特性比较

特性	AD2420/ AD2420W	AD2426/ AD2426W	AD2427/ AD2427W	AD2428/ AD2428W	AD2429/ AD2429W
支持主节点	否	否	否	是	是
可发现的子节点数	—	—	—	最多10个	最多2个
TRX功能模块	仅A	仅A	A + B	A + B	仅B
I ² S/TDM支持	否	否	否	是	是
PDM麦克风输入	2个 麦克风	4个 麦克风	4个 麦克风	4个 麦克风	4个 麦克风
节点间最大线缆长度	5米	15米	15米	15米	5米

AD242x系列支持通过菊花链将单个主器件和最多10个子节点连接起来, 总线总距离可达40米, 各节点之间距离最长可达15米。相比于现有环形/并行拓扑结构, A²B的菊花链拓扑结构是一个重要优势, 对整体系统的完整性和鲁棒性很有利。如果A²B菊花链的一个连接受到影响, 整个网络不会崩溃。只有故障连接下游的节点会受影响。A²B的嵌入式诊断可以确定故障的起因, 发出中断信号, 并启动纠正措施。

与现有数字总线架构相比, A²B的主器件-从节点拓扑结构本身更为高效。启动简单的总线初始化流程之后, 无需更多处理器干预, 总线即可正常运行。A²B的独特架构带来的一个附加优点是, 系统延迟是完全确定的 (小于50 μ s), 并且延迟与音频节点在A²B总线上的位置无关。此特性对ANC/RNC和ICC等语音和音频应用极其重要, 在这些应用中, 必须以时序一致的方式处理多个远程传感器的音频样本。

所有A²B收发器都能在一条非屏蔽双绞线上传输音频、控制、时钟和供电信号。这可降低系统总成本, 原因如下。

- ▶ 与传统实施方案相比, 减少了物理线缆的数量。
- ▶ 实际采用的线缆可以是成本更低、重量更轻的非屏蔽双绞线, 而非更昂贵的屏蔽电缆。
- ▶ 最重要的是, 对于特定的应用场景, A²B技术可提供总线供电能力, 将不超过300 mA的电流传输至A²B菊花链上的音频节点。有了这个总线供电能力, 便无需在音频ECU上使用本地电源, 从而进一步降低系统成本。

A²B技术提供的总计50 Mbps总线带宽最多可支持使用标准音频采样速率 (44.1 kHz、48 kHz等) 和位宽 (16、24位) 的至多51个上行和下行音频通道。这可为广泛的音频I/O设备提供相当大的灵活

性和连接能力。在音频ECU之间维持全数字音频信号链可保证高质量的音频品质, 不会因ADC/DAC转换造成音频性能下降。

系统级诊断功能是A²B技术的一个重要组成部分。所有A²B节点都有能力识别各种故障状况, 包括开路、电线短路、电线反接、电线短路至电源或地。从系统完整性角度看, 该功能非常重要, 因为在出现开路、电线短路或电线反接等故障时, 故障点上游的A²B节点仍然能够正常工作。诊断功能还提供高效隔离系统级故障的能力, 从汽车经销商/安装人员的角度来看, 这一点至关重要。

最近宣布的第四代A²B收发器AD243x是在现有技术基础上的发展, 提高了关键功能参数 (节点数增加到17, 总线供电功率增加到50 W), 同时添加了额外的SPI控制通道(10 Mbps), 为智能A²B节点的远程编程提供了高效的软件空中更新(SOTA)能力。AD243x系列的新特性使其非常适合于新应用, 如超高级麦克风架构中装有LED的麦克风节点。

A²B麦克风和传感器在汽车行业中的应用

从单个语音麦克风到用于HF通信的多元件BF麦克风阵列, 从ANC到RNC, 从ICC到警报声检测, 麦克风在汽车行业中的应用越来越多。依照技术和市场趋势, 如今上路行驶的几乎每辆新车都配备了至少一个用于HF通信的麦克风模块。高级和豪华车可能有六个或更多麦克风模块, 这是实现BF、AEC、ANC、RNC、ICC等的全部潜能所必需的, 数字MEMS麦克风在这些应用中具有明显的优势。

越来越多的麦克风给车辆信息娱乐系统工程师提出了一个重大挑战——如何简化连接线束并使其重量最轻。对于传统模拟系统而言, 这不是简单的任务。模拟麦克风至少需要一对双屏蔽线 (接地和信号/电源)、引脚及连接器腔用于互连。电线量始终是系统中麦克风模块数量的两倍。同时, 连接每个麦克风模块所需的线材长度会导致线束总重量增加得更快。缓解此问题的一种简单方法是在多个应用之间共享麦克风信号, 从而减少系统中使用的麦克风数量。例如, 同一麦克风信号既可用于HF通信, 也可以用作ANC系统中的Error输入。但是, 不同应用可能需要不同的麦克风特性。在前面提到的例子中, HF麦克风信号常常更希望具有上升频率响应形状 (即灵敏度随着频率的降低而降低), 以消除座舱内的低频噪声内容。这是一种有用且非常有效的技术, 可以提高语音麦克风传递的语音清晰度。相反, ANC麦克风在低频时需要足够高的灵敏度水平, 因为ANC算法的主要目的是降低低频噪声。因此, 为了让一个模拟系统中的两个应用共享同一麦克风, 需要将来自麦克风的信号馈送到不同电路中以进行适当的频率滤波。这种情况下可能形成一个或多个接地环路, 从而可能造成严重的噪声问题。

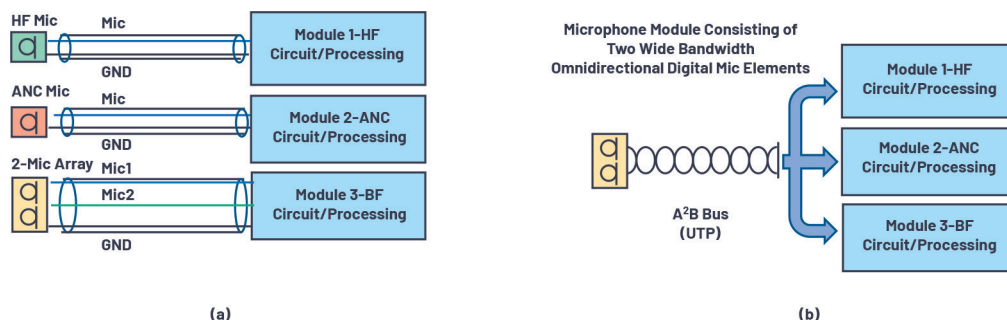


图3. (a) 采用模拟麦克风元件的模拟系统设计 (屏蔽线)。 (b) 采用数字麦克风元件的数字系统设计 (A²B技术和UTP线)。

作为一种具有菊花链连接能力的数字总线，A²B技术与数字MEMS麦克风一起提供一种多麦克风信号互连和/或共享解决方案，非常适合满足车辆中迅速扩张的音频、语音、噪声消除和其他声学应用的需求。考虑一种虚构但有示范意义的情况：某个汽车应用需要一个HF麦克风模块、一个ANC麦克风模块和由两个用于BF的麦克风元件组成的简单阵列麦克风模块，所有三个模块都集成在顶灯模组周围。图3a和3b分别显示了如何利用传统模拟系统和数字A²B系统来实现这种设计。

由于模拟系统不能轻松支持麦克风共享，因此每个应用模块 (HF、ANC和BF) 需要专用麦克风和单独的线束来连接相应的功能电路。这导致需要四个单独的麦克风元件和三组线束 (总共七根线加屏蔽)。另一方面，数字A²B系统则能轻松支持共享信号，所以麦克风元件的数量可以从四个减少到两个。在这个具体例子中，由两个宽带全向麦克风元件组成的单个麦克风模组可用来提供两个声学信号通道，满足所有应用模块的需求。一旦这两个通道的信号通过简单的UTP线到达中央处理单元 (例如音响主机或独立功放)，就可以共享并进行数字处理以支持HF、ANC和BF应用。

虽然图3所示的例子可能不代表实际情况，但它清楚展示了A²B技术相对于传统模拟技术的优势。A²B技术等数字音频总线系统解

决了汽车制造商的挑战，使它们可以提出新的音频和声学相关概念来增强用户体验，并支持将这些概念更快推向市场。

实际上，A²B技术的商业化已经使得汽车市场的许多应用成为可能，其中既有新应用，也有以前难以实现的应用。例如，汽车音频解决方案的领先提供商Harman International开发了一系列数字麦克风和传感器模块，其利用A²B系统来赋能各种汽车应用。图4显示了一些常见的汽车A²B麦克风和传感器以及它们如何用于汽车上。这些传感器包括：单个A²B麦克风，用于ANC和语音通信的多元件麦克风阵列，用于RNC的A²B加速度计，外部安装的保险杠A²B麦克风，以及用于紧急警报检测和声学环境监测的车顶A²B麦克风阵列。在这些A²B麦克风和加速度计的赋能下，越来越多需要多传感器输入的应用解决方案正在开发当中，以进一步增强汽车行业的用户体验。

总结

未来的车辆架构将越来越依赖于麦克风和加速度计之类的高性能声学检测技术。包括传感器、互连和处理器的完全数字化方法可带来重要的性能和系统成本优势。ADI公司正与Harman International合作提供经济高效的解决方案，以为最终客户创造价值并实现差异化。

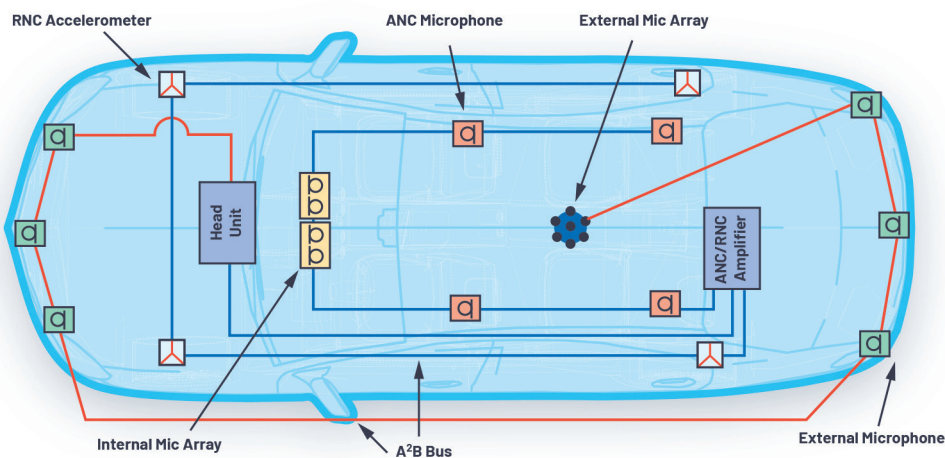


图4. 常见A²B麦克风和传感器。



作者简介

Ken Waurin是ADI公司的战略营销经理, 总体负责汽车音频总线(A²B)技术。自1996年加入ADI公司以来, 他从事过产品管理、业务开发、战术和战略营销工作, 涉及多种技术领域, 包括DSP、MEMS、转换器、视频和连接。他主要关注汽车信息娱乐系统和推动车辆差异化的新兴应用, 例如高级音频、路噪降噪和车内分区通信。联系方式: kenneth.waurin@analog.com。



作者简介

Dietmar Ruwisch是ADI公司高级音频技术专家。他曾在德国姆斯特学习物理学, 1998年凭借一篇关于人工神经网络的论文获得博士学位。从那时起, 他的重点关注区域一直是音频信号处理, 他在该领域拥有多项专利。他致力于改善音频通信质量——包括人类之间和人与机器之间——以及麦克风和麦克风阵列信号的相应处理。联系方式: dietmar.ruwisch@analog.com。



作者简介

Yu Du是Harman International Industries高级首席声学工程师。他拥有清华大学(中国北京)汽车工程学士和硕士学位, 并从佛吉尼亚理工大学(美国弗吉尼亚州布莱克斯堡)获得机械工程博士学位。他的研发经历超过20年, 涉及声学的多个领域, 包括结构声学、主动和被动振动与噪声控制、MEMS传感器设计和仿真、听力科学、声学信号处理。他目前在Harman的工作侧重于汽车应用的先进麦克风和传感器技术开发。Du博士是美国声学学会(ASA)、音频工程学会(AES)和美国机械工程师协会(ASME)的会员。他目前还服务于AES汽车音响技术委员会。

