

成功实现高性能数字无线电

作者: T.V.B. Subrahmanyam 和 Mohammed Chalil

数字无线电的演化过程

调幅(AM)是 20 世纪前 80 年无线电广播的主要形式,但通道衰落、失真和噪声导致接收质量不佳。随着调频(FM)的引入,这些问题在一定程度上得到了缓解。FM 还能提供立体声传输和 CD 音质的音频,但模拟无线电仍然无法完全消除通道缺陷效应和覆盖区域有限等问题。2003 年间,两家新创商业公司 XM 和 Sirius (后合并为 SiriusXM™) 在美国推出了基于订阅的大范围数字卫星无线电服务,其盈利模式与付费电视频道类似。大约与此同时,WorldSpace Radio 开始为亚洲和非洲提供卫星广播。

借助“卫星数字音频无线电服务”(SDARS),汽车收音机听众可以在卫星覆盖范围内的任何地方收听同一无线电台,只有当卫星信号被建筑物、树叶和隧道等遮挡时才会临时中断。XM 卫星无线电带头通过安装地面中继器来克服遮挡问题,中继器在稠密市区发射相同的卫星音频信号,构成一个卫星与地面广播结合的架构。

几乎同时,传统地面广播公司也绘制了数字广播蓝图,原因有二。第一,他们认识到,他们在模拟道路上很快就要走到尽头,因为全世界都在向更高质量的数字跑道迁移。第二,频谱资源越来越稀少,要在相同带宽内传输更多内容,只有通过数字化和压缩新旧内容,打包后进行广播。因此,全世界都已开始从模拟无线电转向数字无线电。这些无线电广播技术具有接收更清晰、覆盖区域更广的优势,能够在可用模拟无线电通道的现有带宽内传输更多内容和信息,而且用户可以更灵活地控制要获取和收听的节目素材(图 1)。

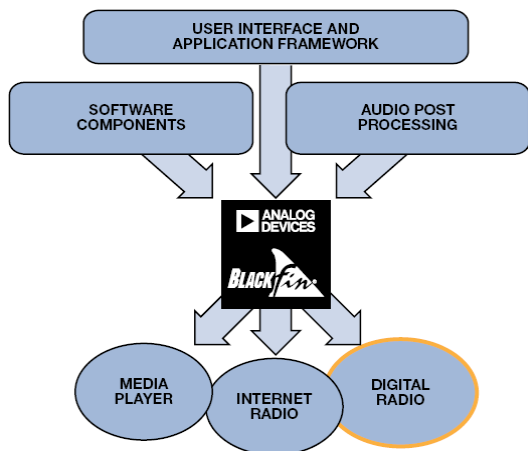


图 1. 汇聚处理器上的数字无线电

数字无线电发展示例：印度

地面广播有两种开放标准——数字多媒体广播(DMB)和通用数字无线电™ (DRM),以及一种专有标准 HD Radio™ (由 iBiquity 开发,是唯一经过 FCC 批准用于美国 AM/FM 音频广播的标准)。DMB 指定了数字音频广播的多种格式,包括 DAB、DAB+和 T-DMB,采用 VHF 频段 III 和 L 频段。DRM 采用 DRM30,工作频率范围是 150 kHz 到 30 MHz; DRM+则采用 VHF 频段 I、II 和 III。

VHF 频段的有效传播基本上局限于很小地理区域内的视线范围。而短波传播则可在电离层中多次反射,从而到达世界上几乎任何地方。对于人口密集且地理范围较小的国家/地区,采用 VHF 频段 III 和 L 频段传输 DMB 非常有效。对于面积广袤的国家/地区,中短波传输能够实现有效的覆盖。因此,在试用 DAB 和 DRM 几年之后,印度政府决定采用 DRM。

2007 年间,印度国家广播电台(AIR)、亚太广播联盟(ABU)和 DRM 联合体在新德里进行了 DRM 的第一次现场试验。试验为期三天,当时采用了三个发射器,并测量了各种参数。除了新德里的这些试验以外,AIR 还进行了长距离测量。结果表明,DRM 凭借有限数量的发射器就能服务更多人口,优势明显。此外,日益提高的节能要求将功耗考虑提高到极其重要的地位。DRM 的电源效率高出 50%,对于支持生态平衡和让地球更环保而言至关重要。

数字无线电接收机和 DSP

物理世界是模拟性的,但科学家和工程师们发现,在数字域中更容易进行大量计算和符号操作。采样理论、信号处理技术和各种数据转换器的出现,使工程师们得以轻松顺利地利用模数转换器(ADC)和带可编程内核的数字信号处理器来设计、实现和测试复杂的数字信号处理(DSP)系统。

强大高效 DSP 的发展以及信息和通信理论的进步,促成了媒体技术与通信的融合。数字无线电的出现归功于这些技术进步。

数字无线电接收机最初是作为实验室原型而设计的,然后投入试生产。像大多数技术一样,第一代产品一般是利用分立器件组装而成。随着市场规模和竞争水平的提高,制造商发现,通过降低成品价格可以进一步扩大市场。更高出货量前景吸引半导体制造商投入资金,努力集成更多分立器件以降低成本。随着时间推移,不断缩小的芯片尺寸导致成本进一步降低,同时产品功能愈加完善。许多产品都有过这样的持续演进过程,包括 FM 收音机和手机。

数字无线电中的信号处理

典型的数字通信系统（图 2）先将模拟信号转换为数字信号，再进行压缩，并添加纠错码，然后将多个信号打包以最大限度地利用通道容量。要传输 RF 信号（它存在于“实际”的模拟能量世界），须将数字信号转换为模拟信号并调制到载波频率上。接收机端发生的过程刚好相反，首先是解调载波频率。然后，将信号转换为数字信号，检查有无错误并解压缩。基带音频信号转换为模拟信号，最终产生声音。

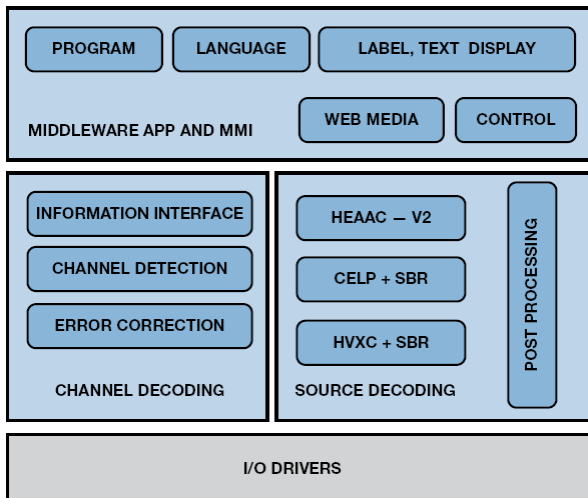


图 2. 数字无线电的软件架构

数字无线电接收机中的信号处理算法可以分为以下几类：

- 信道解码
- 信源解码
- 音频后处理
- 中间件
- 用户界面(MMI)

在数字无线电中，“信源编码”和“信道编码”分别可以映射到高效音频编解码器和错误控制系统组件。实际上，如果编解码器采用容错设计，则可以更好地执行错误控制。

理想的信道编码器应能从传输错误中恢复。理想的信源编码器应能将消息压缩到最高信息含量（香农熵），但如果输入流包含错误，高度压缩的消息将导致非常高的音频失真。因此，高效的源编码还应确保解码器能够检测流中的错误并隐藏其影响，使得整体音质不降低。

DRM 采用了信源编码和信道编码的相关技术创新，从而提供更好的音频体验。所选的 DRM 音频信源编码算法可确保：

- 高效的音频编码——以更低的比特率实现更高的音质。
- 更好的容错性——在存在传输错误时降低音频质量以保证传输

高效音频源编码

活动图像专家组(MPEG)技术可以说是学术界、工业界和技术论坛有效合作的渠道与框架。在音频领域，这种合作结出了硕果，例如分别用于广播和存储/分发的 MPEG Layer II、MP3 和 AAC（高级音频编码）等，鼓励着工业界实施进一步的研究计划。虽然 MP3 仍是网络分发和存储应用最受欢迎的“非官方”格式，但 AAC 的授权规范更简单，外加苹果公司决定采用 AAC 作为 iPod 的媒体格式，使得 AAC 更受业界关注。

下面看看 MPEG 社区开发的 AAC 格式，以便了解信源编码涉及到的一些重要技术。“心理声学模型”（图 3）和“时域混叠抵消”（TDAC）可以说是宽带音频源编码领域最初的两大突破性创新。

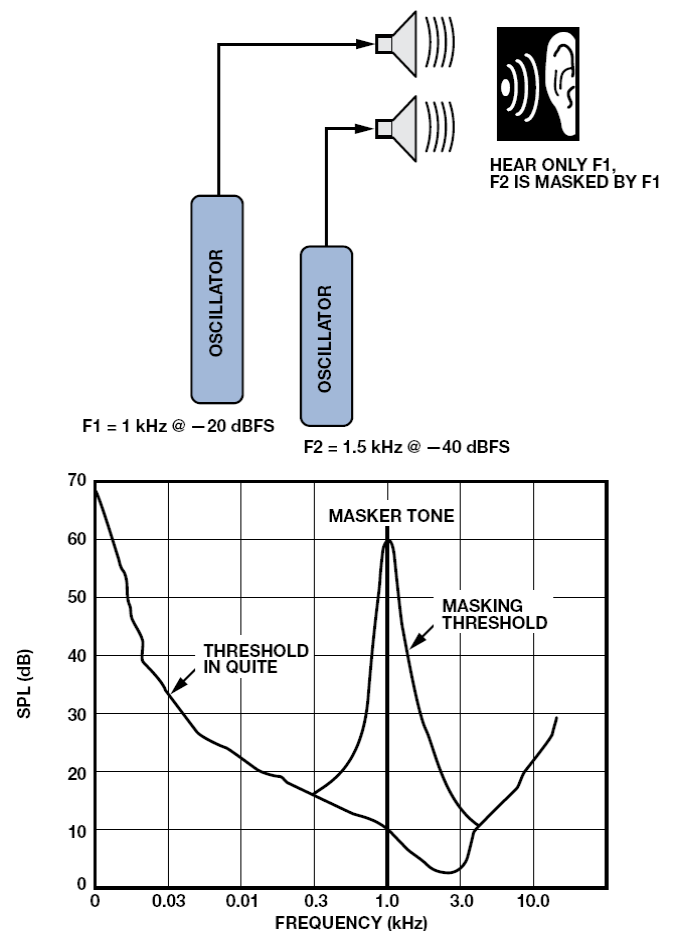


图 3. 了解心理声学音调掩蔽

工业界和学术界开发的“频带复制”（SBR，图 4）以及“空间音频编码”或“双耳线索编码”技术，可以说是随后的两大突破性创新。这两项突破性的关键创新进一步增强了 AAC 技术，使其具有可扩展编码性能，从而让 HE-AAC v2 和 MPEG 环绕声实现标准化，受到工业界的热烈欢迎。Dolby®、AC3 和 WMA®等业界主要标准也采取了相似的步骤，以便在最新媒体编码中利用类似的技术创新。

“频带复制”(SBR)工具将解码采样速率变为 AAC-LC 采样速率的 2 倍。“参数立体声”(PS)工具将单声道 LC 流解码为立体声。

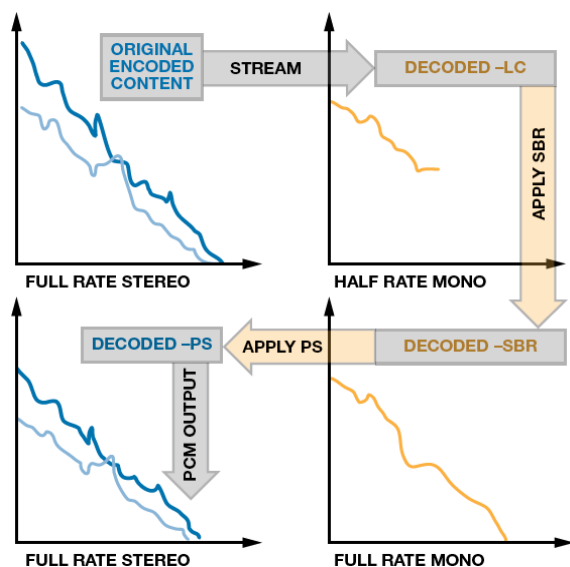


图 4. 音频解码中的 AAC-LR、SBR 和 PS

像所有其它改进计划一样，测量技术也在音质改进计划中发挥了重要作用。音质评估工具和标准，如“音质感知评估”(PEAQ)和“隐藏参考和基准的多刺激法”(MUSHRA)等，帮助提高了技术试验的评估速度。

优雅降级/容错性

一般而言，对于给定的流错误水平，压缩程度越高，则音频失真越多。例如，MPEG Layer II 流比 AAC 流更能容错。Layer II 频谱数据部分中的单比特错误不会造成任何恼人的失真，因为最大频谱值由比特分配值决定。AAC 则不然，同样的单比特错误会导致霍夫曼解码器发生故障并应用帧错误隐藏，重复的帧错误将使音频静音，直到错误率降至最小值为止。长时间的静默会使系统无法保证优雅降级。

在以下附加工具的帮助下，容错(ER) AAC 编码可以保证系统在发生比特流错误时优雅降级：

- HCR (霍夫曼码字重排)：通过将频谱数据划分为固定大小的数段来防止错误在频谱数据内传播。HCR 将最重要的数据放在各段的起始位置。
- VCB11 (编码本 11 的虚拟编码本)：在特殊码字映射的帮助下检测频谱数据内的严重错误。

- RVLC (可逆可变长度编码)：避免比例因子数据中的错误传播。

ER-AAC 特性与 UEP 一起，可以为 DRM 提供足够的容错性。

DRM 规范

通用数字无线电(DRM)是欧洲电信标准协会(ETSI)制定的一种开放标准，适用于数字窄带音频的中短波广播。虽然 DRM 支持 4.5 kHz、5 kHz、9 kHz、10 kHz、18 kHz、20 kHz 的带宽及四种收发模式，但若若要兼容现有 AM 标准，带宽和比特率必须分别以 10 kHz 和 24 kbps 为限。

表 1. DRM 比特率和带宽

30 MHz 时的带宽	带宽(kHz)	比特率(kbps)
标称带宽	9 至 10	8 至 20
半带宽	4.5 至 5	2 或 4
双倍带宽	18 至 20	20 至 80

为满足这一要求，必须采用高效音频编码：Meltzer-Moser MPEG-4 HE-AAC v2 (国际标准化组织/国际电工委员会—ISO/IEC) 是一个不错的选择，但容错版本的 HE-AAC v2 (Martin Wolters, 2003) 在防止信道衰落方面性能更佳，可谓最佳选择。

表 2. DRM 支持的不同编解码器

比特率(kbps)	20 至 80	8 至 20	2 至 4
编解码器	AAC	CELP	8 至 20
音频速率	12、24 或 48	8 至 16	2 或 4
SBR	是	是	是
PS	是	—	—
双倍带宽	是	是	是

除 AAC 外，DRM 标准还定义了用于传输语音的谐波矢量激励编码(HVXC)和编码激励线性预测(CELP)编解码器。DRM 标准还支持流传输图像、幻灯片、HTML 网页之类的原始数据。

DRM 架构

DRM 系统包括三条主要传输路径：主服务通道(MSC)、服务描述通道(SDC)和快速存取通道(FAC)。FAC 承载正交频分复用(OFDM)信号属性和 SDC/MSC 配置，速率以 72 比特/帧为限。SDC 包含 MSC 解码所需的信息，如复用帧结构等，以及其它信息。

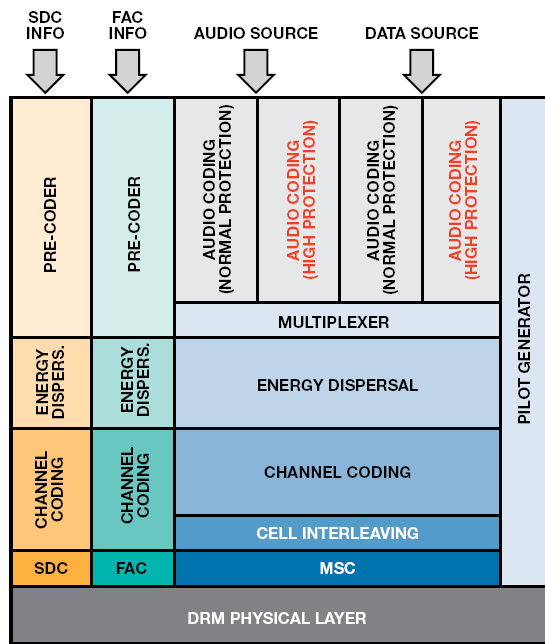


图 5. DRM 中的多路复用和信道编码

MSC 对多路复用器产生的帧进行编码。选项有标准映射、对称分层映射和混合分层映射。MSC 采用不等错误保护 (UEP, 图 6), 其中复用帧分为保护级别不同的两个部分: 高保护级别数据部分和低保护级别数据部分。

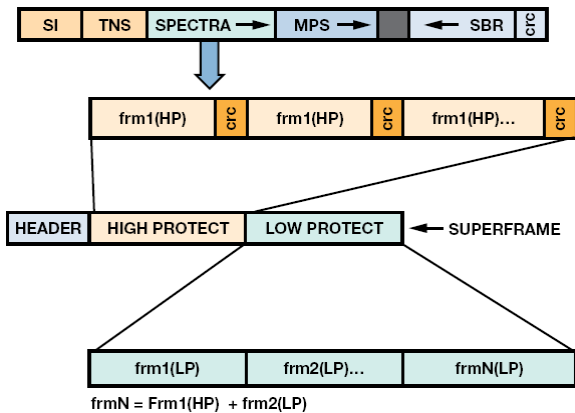


图 6. DRM 中的不等错误保护

采用 Blackfin 的数字无线电

Blackfin® 处理器 (图 7) 非常适合同时需要数字信号处理和微控制器功能的操作。ADSP-BF5xx 系列尤其适合此类应用, 而且还提供多种外设。硬件和软件开发工具、多种第三方软件组件以及参考设计一应俱全, 使它成为多功能产品的理想平台。多代产品、可靠来源提供的成熟软件 IP、ADI 公司的可靠支持以及大量高性能模拟集成电路, 有助于设计人员开发出高质量终端产品。

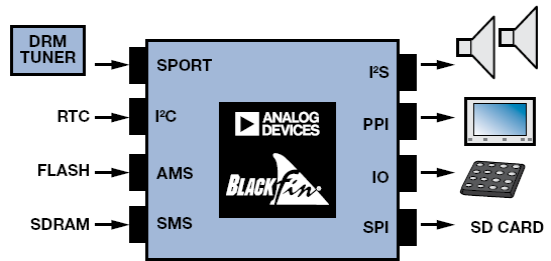


图 7. 基于 Blackfin 处理器的数字无线电

无论是基于 Blackfin 处理器的数字无线电, 还是互联网收音机和多功能产品, 都可以利用 ADI 公司为这些产品创建的现有生态系统来进行开发。

除了创建所需的生态系统以及提供各种软件模块之外, ADI 公司还为数字无线电创建了自有的解码器库。其中一个主要组件是 HE-AAC v2 解码器, 它能优化所需大量 MIPS 提供的性能。

HE-AAC V2 解码器的架构

HE-AAC v2 解码器组件 (图 8) 构成 DRM 源解码器的一部分。MPEG-4 HE-AAC v2 解码器 (支持 ETSI DAB 和 DRM 标准) 集成了高级音频编码(AAC)、频带复制(SBR)和参数立体声(PS)。该解码器向后兼容 AAC-LC。

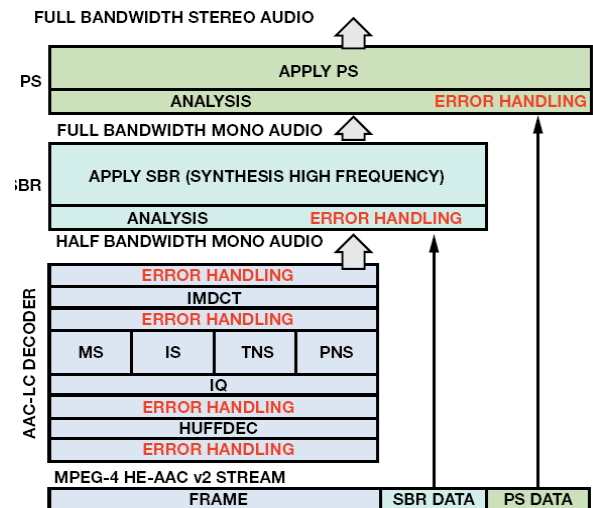


图 8. MPEG-4 HE-AAC v2 解码器

主要特性包括:

- MPEG-4 ER-AAC 可扩展解码器, 可以处理 960 样本/帧
- 支持 AAC-LC/HE-AAC v1/v2/DRM/DAB
- 支持错误隐藏
- 支持 DRC
- 针对存储器 and MIPS 进行高度优化
- 针对一整套 ISO/DAB/DMB 和 ETSI 矢量进行验证

表 3. MPEG-4 HE-AAC v2 解码器性能

存储器(kB)	代码	表	数据	MIPS
DAB	115	61	182	8 至 20
DRM	115	62	182	2 或 4

该解码器实施了标准要求的全部音频编码工具，包括：

- MDCT/TDAC 提高频率分辨率和编码效率
- 自适应模块切换降低预回声效应
- 非线性量化
- 霍夫曼编码
- 利用 Kaiser-Bessel 导出的窗口函数消除频谱泄漏
- 可变帧大小改善比特分配
- IS/MS 立体声/TNS 和 PNS 工具
- 频带复制(SBR)
- 参数立体声(PS)

数字无线电测试结果

表 4 给出了一组典型的测试结果。

表 4. 数字无线电测试结果

参数	结果
灵敏度	40 dB
半带宽	比 MRR 高 5 dB
交调	>57 dB
动态范围	比 MRR 多 25 dB
邻道抑制	MRR + 5 dB (± 10 kHz 时)
接收频率偏移	比 MRR 好 400 Hz
工作电压	6.5 V 至 12 V

结束语

ADI 公司是实施数字无线电并对参考设计进行现场试验的先行者。基于 Blackfin 处理器的 DRM 无线电是首先满足 DRM

标准规定的所有“最低接收机要求”(MRR)的设计之一。这一成功归功于 ADI 公司与英国 BBC、美国 Dolby (erstwhile Coding Technologies)、德国 Deutsche Welle 及 AFG Engineering 的出色合作。此后，设备制造商采用了该技术及参考设计来开发和生产产品。

现在，印度和其它国家/地区的更多公司开始利用这一设计制造数字无线电。ADI Blackfin 处理器是 DSP 和微控制器功能的完美结合，构成高性价比 DRM 无线电接收机的内核。现成的软件工具、经验丰富的应用团队的支持、第三方提供的必要软件模块和参考设计，使得这种实施方案成为印度及其它地方制造商开发并大规模生产 DRM 无线电的不错选择。

欢迎您在中文技术论坛上的模拟对话社区对数字无线电发表评论。

参考文献

Feilen, Michael. “The Hitchhikers Guide to Digital Radio Mondiale (DRM).” *The Spark Modulator*, 2011.

Subrahmanyam, T.V.B., and Mohammed Chalil. “Emergence of High Performance Digital Radio.” *Electronics Maker*, pp. 56-60, November 2012. www.electronicsmaker.com

作者简介

T.V.B. Subrahmanyam [tvb.subbu@analog.com]是一位拥有 30 年经验的业界元老，最初就职于印度境内代表 ADI 的公司，后与他人共同创办了一家代表 ADI（印度）的公司。他在 ADI 公司先后从事过电机控制、电能计量和电力线通信的销售、全球营销及项目管理工作，最近担任 Soundbar 和数字桌面音频设备的泛亚消费市场营销经理。他拥有印度理工学院(IIT)硕士学位。

Mohammed Chalil [mohammed.chalil@analog.com]是 ADI 公司处理器和 DSP 产品部门软件与工具工程分部的工程经理。他于 1994 年获得印度地区工程学院科技学士学位，后又获得印度博拉理工学院(Bits)硕士学位。

