

FM 101.0: 调频技术介绍

[Lawrence Der](#)

[Ph.D. Silicon Laboratories Inc.](#)

2008-03-27

前言

Edwin H. Armstrong 是无线广播技术的发展先驱之一，他在 1918 和 1933 年分别发明了超外差无线接收机和调频技术^[1]，这两项概念和他在 1912 年发展的再生电路技术已成为现代无线电子的基础。美国的调频电台广播频率为 88-108MHz，频道带宽 200kHz。调频收音机在 1940 年问世时仅支持单声道，立体声则要到 1960 年才出现。本文提供一套调频技术基础课程，内容包括 MPX 多路信号以及立体/单声道混合（**stereo**-mono blending）与软静音（soft mute）等噪声消除技术。

调频技术基础

频率调变是模拟角度调变的一种，它会利用携带信息的基带信号改变载波频率，这些基带信号通常称为信息或信息信号 $m(t)$ 。调频广播通讯最常传送音频信号，但它也能传送带有低带宽数字信息的数字数据，这些数字信息在欧洲称为无线数据系统（RDS），在美国则称为无线广播数据系统（RBDS）。调频信号的最简单产生方法是如图 1 所示，直接把信息信号加到压控振荡器（VCO）。

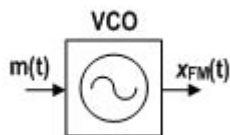


图 1：利用压控振荡器（VCO）产生调频信号

图 1 将电压信息信号 $m(t)$ 加到压控振荡器的控制电压，输出信号 $x_{FM}(t)$ 则是固定振幅的正弦载波，其频率在理想情形下应该是控制电压的线性函数。当没有信息或者信息信号为零时，载波频率等于其中心频率 f_c ；若有信息信号存在，输出信号的瞬间频率会根据下式变得高于或低于中心频率：

$$f_i(t) = f_c + K_{VCO} m(t)$$

其中 K_{VCO} 是压控振荡器的电压频率转增益，其单位为 Hz/V。K_{VCO} × m(t) 则是瞬间频率偏移量。输出信号的瞬间相位则如下式，等于 2π 乘以瞬间频率的积分：

$$\theta_i(t) = 2\pi f_c t + 2\pi K_{VCO} \int_0^t m(t) dt$$

此处为简单起见，已假设相位初始值为零，因此调频输出信号 x_{FM}(t) 可表示如下：

$$x_{FM}(t) = A_c \cos \left[2\pi f_c t + 2\pi K_{VCO} \int_0^t m(t) dt \right]$$

观察调频输出信号可以发现几件事。首先，无论信息信号为何，调频信号的振幅永远保持不变，这使它具有固定包络线的性质，而且输出功率等于驱动 1 Ω 电阻。其次，调频输出信号 x_{FM}(t) 会非线性相依于信息信号 m(t)，这使调频信号的特性分析很困难。在估计调频信号的带宽时，多半会用如下所示的单频 (single tone) 信息信号：

$$m(t) = A_m \cos(2\pi f_m t)$$

其中 A_m 是信息信号的振幅，f_m 则是信息信号的频率。将此信息信号代入上式即可发现：

$$\begin{aligned}
 x_{FM}(t) &= A_c \cos \left(2\pi f_c t + \frac{K_{VCO} A_m}{f_m} \sin(2\pi f_m t) \right) \\
 &= A_c \cos \left(2\pi f_c t + \frac{\Delta f}{f_m} \sin(2\pi f_m t) \right) \\
 x_{FM}(t) &= A_c \cos(2\pi f_c t + \beta \sin(2\pi f_m t))
 \end{aligned}$$

其中 $\Delta f = K_{VCO} A_m$ 代表调频信号与中心频率之间的最大频率偏移量，它直接正比于信息信号的振幅及压控振荡器的增益。 Δf 则称为最大瞬间频率偏移量。频率偏移量 Δf 与信息信号频率 **f_m** 的比值称为调变指数 (modulation index)，通常以 β 代表。

对单频信息信号而言，输出频谱的有效旁波带 (significant sideband) 数目是调变指数的函数。这只要将调频输出信号如下表示为第一类 n 阶 Bessel 函数即可看出 [2, 3]：

$$x_{FM}(t) = A_c \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta) \cos(2\pi(f_c + n f_m)t)$$

对上式进行傅里叶变换，即可发现调频输出信号的频谱为离散频谱，且其振幅系数如下式所示等于 β 的函数：

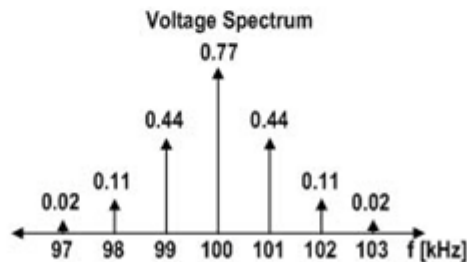
$$x_{FM}(f) = \frac{A_c}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta) [\delta(f - f_c - n f_m) + \delta(f + f_c + n f_m)]$$

调频信号的旁波带数目及其相关振幅系数皆可利用表 1 之类的 Bessel 函数表求出。

β	J0	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8
0	1								
0.25	0.98	0.12							
0.5	0.94	0.24	0.03						
1.0	0.77	0.44	0.11	0.02					
2.0	0.22	0.58	0.35	0.13	0.03				
3.0	-0.26	0.34	0.49	0.31	0.13	0.04	0.01		
4.0	-0.40	-0.07	0.36	0.43	0.28	0.13	0.05	0.02	
5.0	-0.18	-0.33	0.05	0.36	0.39	0.26	0.13	0.05	0.02

► 表1：四舍五入至小数点以下两位数的第一类Bessel函数

如果 $\beta=1$, $\beta=1$, $f_m = 1\text{kHz}$ 和 $f_c = 100\text{kHz}$, 即可得到图2所示的调频信号电压频谱。



► 图2： $\beta=1$, $\beta=1$, $f_m = 1\text{kHz}$ 和 $f_c = 100\text{kHz}$ 的调频信号电压频谱

调变指数 β 有一项重要特性：它决定调频信号的有效旁波带数目，这会进而决定信号的带宽。例如 $\beta = 0.25$ 时只需要 1 个旁波带；但若 $\beta = 5$ ，就需要 8 个旁波带。调变指数还有另一重要特性：就算频率偏移量不变，它也可能受到信息信号频率改变的影响而出现很大变动。一般而言，随着调变指数增加，旁波带数目和带宽都会变大；但若调变指数是因为信息频率下降而增加（前面提到 $\beta = \Delta f / f_m$ ），调频信号带宽就不见得会变大。这个带宽等于离散频谱单频 (tone) 的数目乘上信息信号频率 f_m 所决定的频率间隔。对于较复杂的信息信号，我们也可利用 BWFM $\approx 2(\beta + 1)f_m$ (Carson's rule) 估计调频信号带宽 [2, 3]。根据经验关系式，在不包括载波的情形下，调频频谱的有效频谱单频 (significant spectral tone) 数目大约等于 $2(\beta + 1)$ 。举例来说 [2]，北美地区商业调频广播的最大频率偏移 Δf 为 75kHz，如果音频的最大信息频率为 15kHz，那么 β 就等于 $75\text{kHz}/15\text{kHz} = 5$ ，调频信号带宽则等于 $\text{BWFM} = 2(5+1) \times 15\text{kHz} = 180\text{kHz}$ ，很接近所规定的 200kHz 频道带宽。若以 Bessel 函数估计带宽则会得到 $(2 \times 8 + 1)15\text{kHz} = 255\text{kHz}$ 。在实际应用里，最旁边的几个单频信号几乎不会提供任何功率，因此带宽大约会减至 200kHz (假设 -10dBc 以下单频信号可忽略)。同样的，设计人员应记住这些方程式是从单频信息信号导出，这与同时包含许多不同频率的实际信息信号大不相同；在分析实际信号时，应使用实际信息信号的最大频率做为 f_m 的近似值。

调频信号必须经过频率解调，才能取出所含的信息信号。最基本的频率解调器包含一个鉴频器，它是由一个微分电路及其后连接的包络线检测器组成 (图 3)。

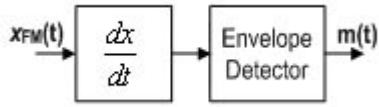


图 3：理想鉴频器

如下所示，微分电路会把调频信号转换为调幅信号：

$$\frac{dx_{FM}(t)}{dt} = -A_c(2\pi f_c + 2\pi K_{VCO}m(t)) \sin(2\pi f_c t + 2\pi K_{VCO} \int_0^t m(t)dt)$$

包络线检测器则用来取出信息信号 $m(t)$ [4]。微分是调频信号解调的关键步骤之一，然而微分却有个副作用：它会放大高频噪声，降低信息信号复原后的信号杂波比（SNR）。为了弥补这项缺点，调频广播公司会在调频发射机的前面加入一个预加重滤波器（pre-emphasis filter），以便放大信息信号的高频部份。所有调频接收机都会在接收电路的后面连接一个去加重滤波器（de-emphasis filter），利用它衰减高频噪声和干扰，并将信息信号的频率响应恢复为平坦形状。图 4 是调频发射机与预加重滤波器 $H_{pe}(f)$ 方块图，以及调频接收机和去加重滤波器 $H_{de}(f)$ 方块图。

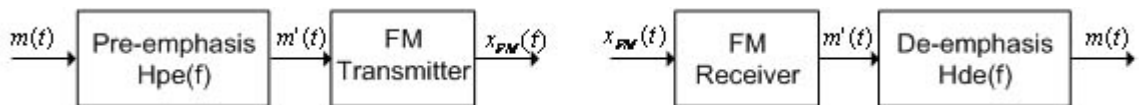


图 4：调频系统里的预加重（Pre-Emphasis）和去加重（De-Emphasis）电路

预加重滤波器的高通特性转移函式如下所示：

$$H_{pe}(f) = 1 + j2\pi f\tau_x$$

去加重滤波器的低通特性转移函数如下所示：

$$H_{de}(f) = \frac{1}{1 + j2\pi f\tau_x}$$

其中时间常数 τ_x 是预加重/去加重时间常数，它在美国及世界某些地区为 $75 \mu s$ ，在欧洲和其它地区则为 $50 \mu s$ 。

在不使用预加重和去加重滤波器的情形下，单声道调频信号的信号杂波比为：

$$SNR_{FM} = 3\beta^2(\beta+1) CNR$$

$$SNR_{FM} \approx 3\left(\frac{B_T}{2W}\right)^3 CNR$$

其中 B_T 为调频传输带宽 (= BWFM)， W 为信息信号带宽 (? **fm**)，至于 CNR 则是载波噪声比 (carrier-to-noise ratio)，它等于 $A_c^2/2B_TN_o$ ，其中 N_o 是白噪声 (white noise) 的双边功率频谱密度 [2]，这个信号杂波比公式描述了信息信号质量 (SNR) 与调频传输带宽之间的取舍关系。在 200kHz 调频传输带宽和 15kHz ($\beta \approx 5.67$) 信息信号带宽下，调频接收机输出的信号杂波比应能让调频增益比载波噪声比还高出 27dB。然而上述信号杂波比方程式只有在载波噪声比很大时才有效，随着调频鉴频器输入端的载波噪声比降低，它最终会产生脉冲噪声，导致喇叭发出各种噪声。脉冲噪声的出现代表调频接收机已进入一个噪声临界区，这称为临界效应。调频临界值是指在特定的调频信号杂波比下，既能改善调频信号又不使其过度偏离理论方程式的最小载波噪声比 [2]。如前所述，预加重和去加重滤波器是消除高频噪声，以便提高调频系统信号杂波比的方法之一。在使用预加重和去加重滤波器的调频接收机里，输出信号杂波比的实际改善因子 I (improvement factor) 可由下式计算：

$$I = \frac{\left(\frac{W}{f_x}\right)^3}{3\left[\left(\frac{W}{f_x}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{W}{f_x}\right)\right]}$$

其中 $f_x = 1/2 \pi \tau_x$ 是预加重和去加重滤波器的 3dB 转角频率 (corner frequency) ^[2]。在 3dB 转角频率为 2.1kHz 和信息信号带宽为 15kHz 的情形下，预加重和去加重滤波器可以提供 13dB 的改善因子。值得注意的是，这个改善因子同样假设调频鉴频器输入端的载波噪声比很大，因此在调频传输带宽 200kHz、信息信号带宽 15kHz、以及 3dB 预加重和去加重转角频率为 2.1kHz 时 ($\tau_x = 75 \mu s$)，调频增益以及预加重和去加重滤波器可针对超出临界值的单声道信号，提供大约 $27\text{dB} + 13\text{dB} = 40\text{dB}$ 的信号杂波比改善幅度。尽管这是从前述方程式推导所得，我们在解读该结果时仍要很谨慎，因为该方程式似乎暗示它能在 0dB 载波噪声比时得到 40dB 的调频信号杂波比。然而一般情形却非如此，因为标准调频鉴频器通常有 12dB 载波信号比的临界值，这会使前述结果变为无效。另外，对超出临界值的载波信号比而言，立体信号的信号杂波比改善幅度只会比载波信号比高出 17dB ^[5]。下列方程式即为调频音频的信号杂波比改善幅度：

$$SNR_{\text{MONO}} = 40 + CNR [\text{dB}]$$

$$SNR_{\text{STEREO}} = 17 + CNR [\text{dB}]$$

其中载波信号比 (CNR) 必须高于临界值 ^[5]。

立体声调频——多路信号

单声道音频广播在 1961 年以前是调幅、调频和电视的标准，当时的调频广播还包含辅助通讯授权 (Subsidiary Communications Authorization, **SCA**) 服务，它会通过多路方式与主要声道共同播送，提供背景音乐和其它服务给企业和商店。到了 1961 年，美国联邦通讯委员会 (FCC) 核准播送立体声道，这将信号多路的想法扩大到立体音频的产生。立体多路信号的一项要求是兼容于众多现有的调频单声道收音机，为了达成这个目标，多路信号 (MPX) 的 0-15kHz 基带部份须同时包含左声道 (L) 和右声道 (R) 信息 (L+R)，让单声道收音机也能收听立体广播。除此之外，它还会利用 (L-R) 信息对 23-53kHz 基带频谱内的 38kHz 抑制副载波进行振幅调变，以便提供立体音效。多路信号还会包含一个 19kHz 的前导信号，协助调频立体接收机检测和解码左声道与右声道信号。这种复合基带信号格式既兼容于现有的调频单声道接收机，又提供足够信息让调频立体接收机解码产生左声道和右声道立体输出。今天的 MPX 信号还包含一个 57kHz 副载波，它会携带 RDS 和 RBDS 信号 [6]。现代的 MPX 基带信号频谱如图 5 所示。

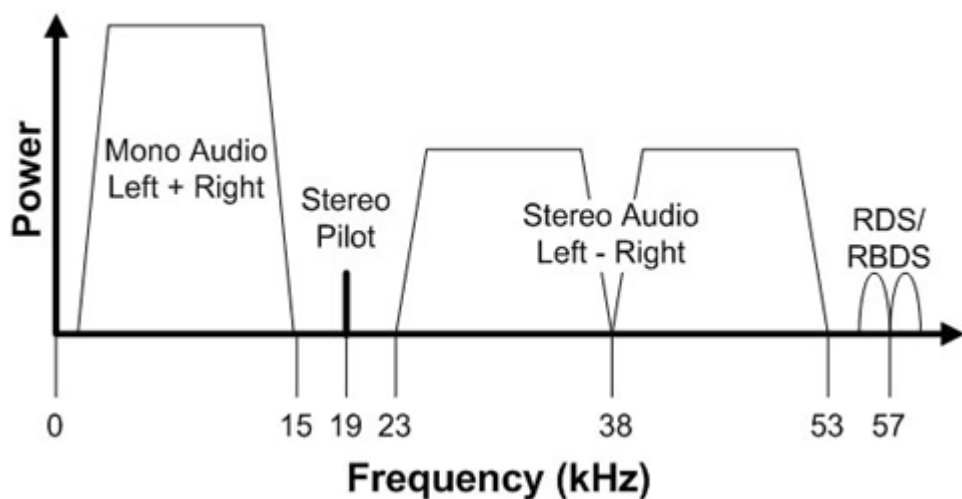


图 5: MPX 信号的基带频谱

前面的数学分析都假设信息信号 $m(t)$ 是单频正弦信号，然而今日调频广播所用的信息信号却是 MPX 信号，它的基带频谱与图 5 很像。FCC 规定立体声传输的最大调变百分比为 100%（75kHz 的瞬间频率偏移量相当于 100%调变），SCA 多路副载波在某些情形下可达到 110%调变 [5]。图 6 是典型 MPX 信息信号里的各种信号发生调变位准崩溃 (modulation level breakdown) 的例子。

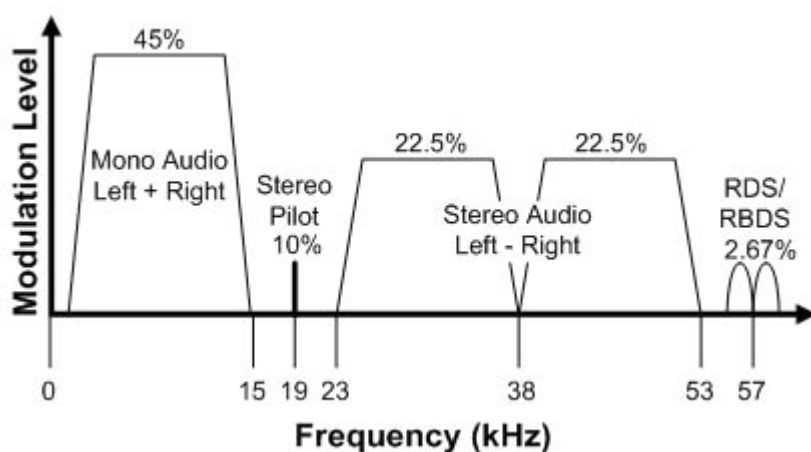


图 6: MPX 频谱的信号调变位准

假设图 6 里各个信号之间没有任何关联性，那么 MPX 信号的调变位准就等于所有次通道位准的算术和，这相当于 102.67%最大调变百分比或 77.0025kHz 峰值频率偏移量。从前面提到的 $\Delta f = KVC0 A_m$ 可知，频率偏移量等于信息信号振幅乘上常数 KVC0，故当 KVC0 固定不变时，MPX 信息信号内的所有次信道信号振幅都必须调整，以便得到适当的总频率偏移量。

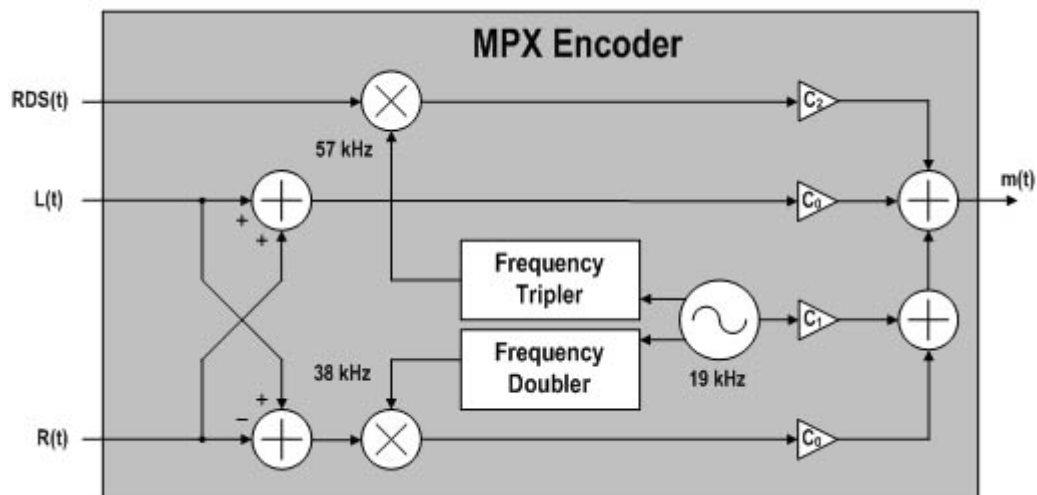


图 7：MPX 编码器

图 7 是用来产生 MPX 信号的 MPX 编码器概念方块图，其中 $L(t)$ 和 $R(t)$ 代表左声道和右声道的时域波形， $RDS(t)$ 代表 RDS/RBDS 信号的时域波形。此时可将 MPX 信息信号表示如下：

$$m(t) = C_0[L(t) + R(t)] + C_1 \cos(2\pi \cdot 19\text{kHz} \cdot t) + C_0[L(t) - R(t)] \cos(2\pi \cdot 38\text{kHz} \cdot t) + C_2 RDS(t) \cos(2\pi \cdot 57\text{kHz} \cdot t)$$

其中 C_0 、 C_1 和 C_2 都是增益值，分别用来调整 $(L(t) \pm R(t))$ 信号、19kHz 前导信号和 RDS 副载波信号的振幅，以便产生适当的调变位准。

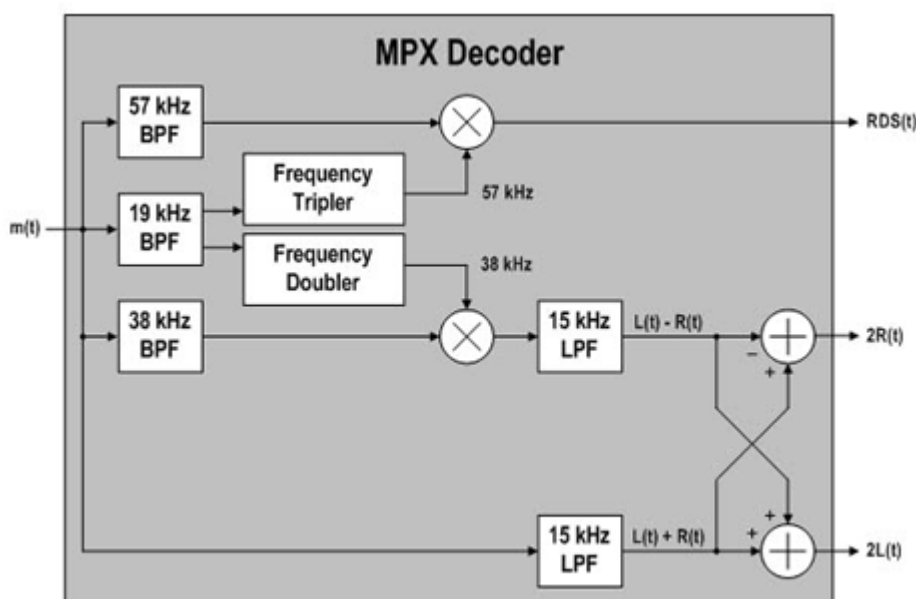


图 8: MPX 译码器

图 8 是 MPX 译码器的概念方块图，可从 MPX 信息信号 $m(t)$ 取出左声道，右声道和 RDS 信号。信息信号会送到三个中心频率为 19、38 及 57kHz 的带通滤波器和一个 3dB 截止频率为 15kHz 的低通滤波器。19kHz 带通滤波器是个高 Q 值滤波器，能从 MPX 信息信号取出 19kHz 前导信号。这个前导信号的频率会被提高 2 和 3 倍，以便产生 $(L-R)$ 和 RDS 信号解调所需的本地振荡器 (LO) 信号。接着只要将 $(L+R)$ 和 $(L-R)$ 信号相加与相减，就能得到左声道与右声道立体音频。电路还可将 RDS 信号与 57kHz 本地振荡器信号混波降频，然后将信号送到匹配滤波器取出 RDS 数据。

从前述分析可看出维持良好立体分离度 (**stereo** separation) 的困难所在。首先，若将单声道信号送到译码器输入，则由于单声道信号未包含前导信号、 $(L-R)$ 和 RDS 信号，所以它们都会等于零。此时，译码器的左声道和右声道输出都是 $(L+R)$ 信号，这等于将单声道信号复原。其次，在产生 MPX 信号或还原左声道和右声道时，任何增益或相位不匹配都会造成立体隔离度下降，这会让左声道包含一些右声道信息，右声道也会有些左声道信息（这又称为声道分离度或串讯）。例如在图 8 所示的译码器里，假设 15kHz 低通滤波器的增益不匹配程度为 1%，那么立体分离度就约为 -46dB。这个例子说明若要维持良好的立体分离度，左声道与右声道信号路径的振幅与相位都必须完美匹配，这对利用模拟电路设计的编码器和译码器相当困难。

噪声消除技术

为了提高调频广播的音质，新出现的调频调谐器都已采用立体与单声道混合以及软静音等噪声消除技术，例如 Silicon Laboratories 的 Si4700 调频调谐器和支

持 RDS/RBDS 功能的 Si4701 调频调谐器。

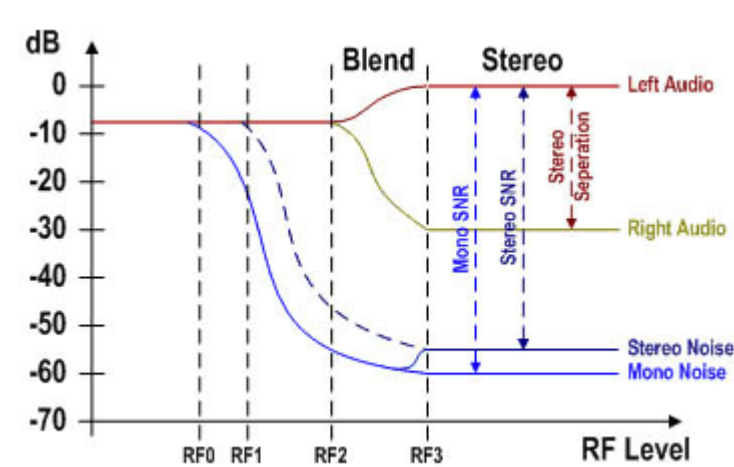


图 9：调频特性曲线

图 9 是典型的调频特性曲线，X 轴代表射频信号强度，Y 轴代表左声道音频输出相对其最大输出强度的正规值，亦即 0dB 代表左声道音频输出信号的最大输出强度。图 9 包含左声道音频、右声道音频、立体声噪声和单声道噪声，这些信号全都以相对于左声道音频强度的方式绘制。在这个例子中，射频信号输入强度超过 RF3 就会使调谐器进入完全立体声模式，并提供 30dB 的立体分离度和 55dB 的立体信号杂波比。如果调谐器被迫在此区内进入单声道模式，单声道信号杂波比将高达 60dB。单声道信号杂波比的增加是因为它的带宽较小，只有 15kHz；相形之下，立体声 MPX 信号就需要 53kHz 带宽。

如果射频信号强度在 RF2 与 RF3 之间，左右声道的音频就会开始混合，产生立体与单声道混音现象。左右声道混合也会造成立体噪声与单声道噪声混合，进而提高音频的信号杂波比。如果没有混合现象，立体噪声就会成为图里的蓝黑虚线，音频信号杂波比与射频接收灵敏度也会小于出现立体单声混合的调谐器。在此例中，RF0 代表调谐器在立体单声混合下的接收灵敏度，RF1 则是没有立体单声混合时的灵敏度。灵敏度一般定义为“达到一定音频信号杂波比所需的最小射频输入强度”，此处则具体定义为达成 1dB 音频信号杂波比所需的射频信号强度。

另外，当调谐器的射频输入强度下降时，噪声强度会迅速增加，且其增幅远超过音频输出的下降速度。在此例中，当射频信号降到灵敏度 (RF0) 以下时，音频输出只会从最大输出值下降约 6dB，噪声却大幅增到和音频输出同样强度。当此情形出现时，不仅噪声和音频强度完全相同，而且只比最大音频输出小 6dB，所以听起来会很吵。要将射频信号微弱区的噪声减至最少，一个方法是利用软静音技术同时衰减音频和噪声。图 10 是包含软静音的调频特性曲线，此时启动软静音功能会让音频和噪声都衰减 14dB，变成比最大音频输出还低 20dB，这能将噪声减至最少和提供更好的产品使用经验。

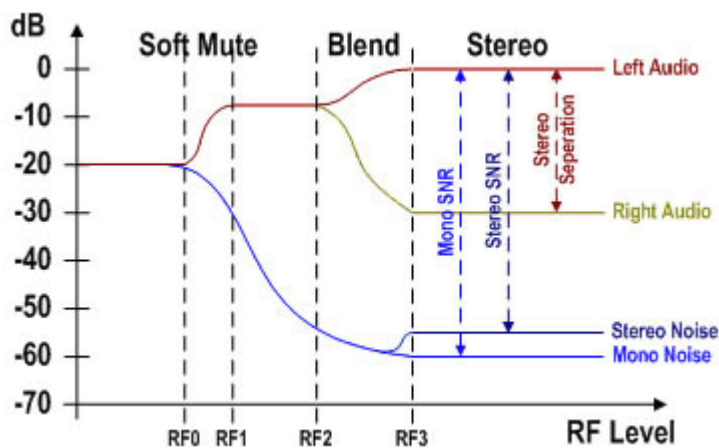


图 10: 包含软静音功能的调频特性曲线

Si4700/01 调频调谐器

Si4700 和 Si4701 调频调谐器是业界最先采用数字低中频架构和全 CMOS 工艺技术的收音机调谐器组件，整个解决方案仅需一颗外接电源旁路电容和不到 20 平方毫米的电路板面积。图 11 就是这两款组件的功能方块图。数字低中频架构不仅省下多颗外部元器件，而且不必为了补偿模拟工艺变异而在工厂进行调整。这种混合信号架构可以利用 DSP 执行通道选择 (channel selection)、调频解调和立体音频处理，进而提供超越传统模拟架构的更高效能。

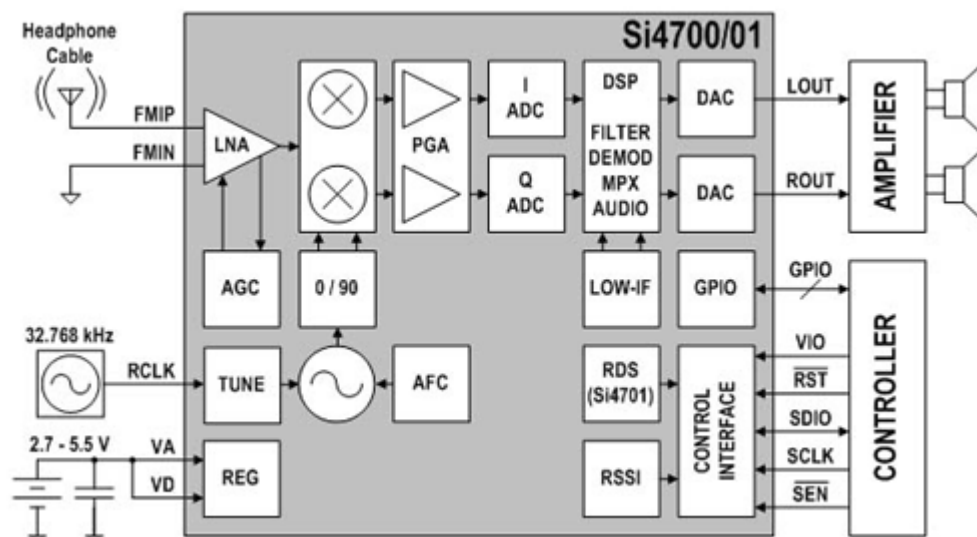


图 11: Si4700/01 数字低中频 **FM** 调谐器的功能方块图

Si4700 与 Si4701 调频调谐器包含可程序、立体/单声道噪声临界值和软静音参数，能以最大弹性降低噪声。这两款组件都利用 DSP 在各种收讯条件下提供最佳音质，这种丰富的功能以及优异的整合度与效能全都来自数字低中频无线架构，以及利用数字技术实作的调频解调、MPX 译码和噪声消除功能。除了简化与加速设计导入作业外，数字低中频架构还有很高的功能整合度，只需外接一个旁路电容就能完成设计，这能提高质量和改善可制造性。

调频广播已成为全球最主要的大众传播媒介之一。由于世界各地购买和使用调频收音机的听众不断增加，越来越多的便携式产品设计人员开始将调频收音机功能加入其产品，例如 MP3 播放机和行动电话。了解调频收音机的基本原理可以协助设计人员开发更高效能的产品，包括传统的独立收音机或下一代多用途装置。

参考资料:

- [1] E. H. Armstrong Web Site, <http://users.erols.com/oldradio/>
- [2] S. Haykin, Communication **Systems**, 3rd Edition, Wiley, 1994
- [3] R. E. Ziemer, W. H. Tranter, Principles of Communications, **Systems**, Modulation, and Noise, Fourth Edition, Wiley, 1995
- [4] B. Razavi, RF Microelectronics, Prentice Hall, 1998
- [5] J. Kean, “**FM Stereo** and **SCA Systems**”, National Association of Broadcasters Engineering Handbook, 9th Edition, NAB, 1999, pgs 591 - 608.
- [6] S. A. Wright, “Radio Broadcast Data System (RBDS)”, National Association of Broadcasters Engineering Handbook, 9th Edition, NAB, 1999, pgs. 633 - 642.

射频和天线设计培训课程推荐

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;我们于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

易迪拓培训推荐课程列表: <http://www.edatop.com/peixun/tuijian/>



射频工程师养成培训课程套装

该套装精选了射频专业基础培训课程、射频仿真设计培训课程和射频电路测量培训课程三个类别共 30 门视频培训课程和 3 本图书教材;旨在引领学员全面学习一个射频工程师需要熟悉、理解和掌握的专业知识和研发设计能力。通过套装的学习,能够让学员完全达到和胜任一个合格的射频工程师的要求...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/110.html>

手机天线设计培训视频课程

该套课程全面讲授了当前手机天线相关设计技术,内容涵盖了早期的外置螺旋手机天线设计,最常用的几种手机内置天线类型——如 monopole 天线、PIFA 天线、Loop 天线和 FICA 天线的设计,以及当前高端智能手机中较常用的金属边框和全金属外壳手机天线的设计;通过该套课程的学习,可以帮助您快速、全面、系统地学习、了解和掌握各种类型的手机天线设计,以及天线及其匹配电路的设计和调试...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/133.html>



WiFi 和蓝牙天线设计培训课程



该套课程是李明洋老师应邀给惠普 (HP) 公司工程师讲授的 3 天员工内训课程录像,课程内容是李明洋老师十多年工作经验积累和总结,主要讲解了 WiFi 天线设计、HFSS 天线设计软件的使用,匹配电路设计调试、矢量网络分析仪的使用操作、WiFi 射频电路和 PCB Layout 知识,以及 EMC 问题的分析解决思路等内容。对于正在从事射频设计和天线设计领域工作的您,绝对值得拥有和学习!...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/134.html>

CST 学习培训课程套装

该培训套装由易迪拓培训联合微波 EDA 网共同推出,是最全面、系统、专业的 CST 微波工作室培训课程套装,所有课程都由经验丰富的专家授课,视频教学,可以帮助您从零开始,全面系统地学习 CST 微波工作的各项功能及其在微波射频、天线设计等领域的设计应用。且购买该套装,还可超值赠送 3 个月免费学习答疑...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/24.html>



HFSS 学习培训课程套装

该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程,是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装,可以帮助您从零开始,全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装,更可超值赠送 3 个月免费学习答疑,随时解答您学习过程中遇到的棘手问题,让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>

ADS 学习培训课程套装

该套装是迄今国内最全面、最权威的 ADS 培训教程,共包含 10 门 ADS 学习培训课程。课程是由具有多年 ADS 使用经验的微波射频与通信系统设计领域资深专家讲解,并多结合设计实例,由浅入深、详细而又全面地讲解了 ADS 在微波射频电路设计、通信系统设计和电磁仿真设计方面的内容。能让您在最短的时间内学会使用 ADS,迅速提升个人技术能力,把 ADS 真正应用到实际研发工作中去,成为 ADS 设计专家...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/ads/13.html>



我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年,10 多年丰富的行业经验,
- ※ 一直致力并专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 经验丰富的一线资深工程师讲授,结合实际工程案例,直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>