

非常见问题第175期： LTspice音频WAV文件： 使用立体声和加密语音消息

作者：Simon Bramble，高级现场应用工程师

问题：

能否通过LTspice音频WAV文件利用立体声数据和加密语音消息？



答案：

假如音乐是爱情的食粮，那么就仿真吧。

本非常见问题解释如何使用LTspice®音频WAV文件生成立体声语法（以及更高的通道计数）。

LTspice可用于生成WAV文件作为电路仿真的输出，也可用于导入WAV文件来激励电路仿真。大量文档记载单声道WAV文件可用作LTspice中的输入，而LTspice可用于生成WAV输出。本文详细说明如何使用LTspice音频WAV文件生成不太为人所知的立体声语法（以及更高的通道计数）。

LTspice拥有许多超级功能，但它处理音频文件的能力是令人印象较深刻的功能之一。虽然在计算机屏幕上看到逼真的电路令人着迷，但是创建一个可以在LTspice之外播放的声音文件则能够让工程师以另一种感测方式来评估仿真。使用单声道LTspice音频WAV文件的相关文档非常完备。本文对立体声（或更多通道）展

开讨论，并说明如何从LTspice音频WAV文件导出立体声数据，以及如何将立体声数据导入LTspice音频WAV文件。它还阐述了WAV文件的一些使用技巧和诀窍，使读者能够进一步利用WAV文件。

生成立体声WAV文件

首先，从单声道信号生成立体声波形文件。图1显示的电路生成1 V、1 kHz正弦波，并将其分成两个通道，从而在两个通道之间交替传输信号——在CH1和CH2之间以2秒间隔切换1 kHz信号音。

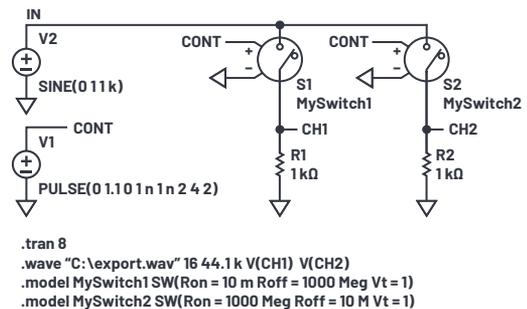


图1. 在本仿真中，在CH1和CH2之间以2秒间隔切换1 kHz正弦波。生成的两通道信号导出到一个音频WAV文件中。

命令.wave "C:\export.wav" 16 44.1k V(CH1) V(CH2)以16位分辨率对每个通道进行数字化处理，以44.1 kSPS速率进行采样，并将生成的音频数据存储在C:\export.wav中。在上述命令中，在采样速率之后列出的每个信号在WAV文件中都生成自己的通道数据。LTspice可在单个LTspice音频WAV文件中存储多达65,535个通道——只需根据需要要将信号附加到上述命令即可。

默认情况下，LTspice的.wave命令将列出的第一个通道数据另存为左音频通道，将列出的第二个通道数据另存为右音频通道。在这种情况下，当通过媒体播放器播放export.wav时，无论电路节点命名规则如何，CH1都将被读取为左通道，CH2将被读取为右通道。请注意，默认情况下，CH1和CH2在.wav文件中分别存储为通道0和通道1，这对于读取下面讨论的文件至关重要。

导出的这个立体声音频文件可用于激励图2所示的另一个电路，该电路使用export.wav中的两个通道，作为信号输入。

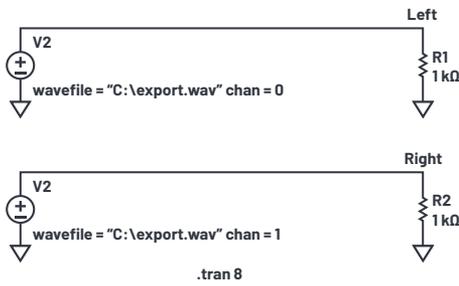


图2. export.wav中的两个立体声通道用于激励两个独立电路。

电压源V1和V2照常放置，然后按住CTRL键并右键单击每个电压源，显示元件属性编辑器（如图3所示），来分配export.wav中的电压信号。

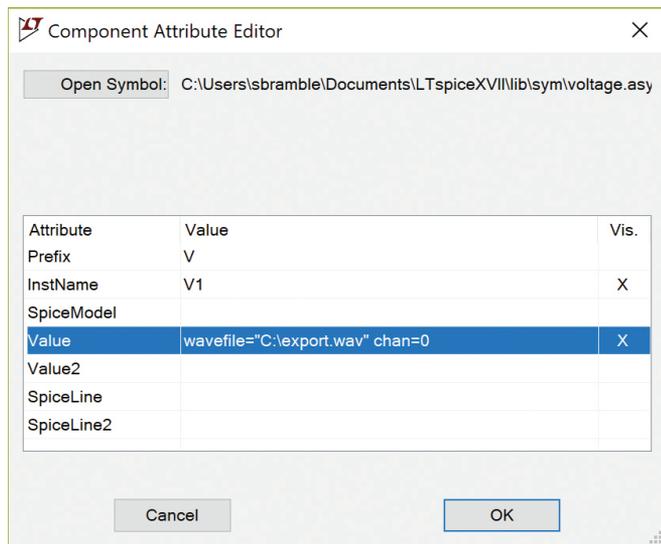


图3. export.wav中的立体声信号用作图2电路的输入。这是V1的分配，值设置为从export.wav中拉出通道0。

如上所述，首次生成LTspice音频WAV文件时，多达65,535个通道可数字化为一个WAV文件——只需在.wave命令的末尾附加任意多个通道即可。记住，默认情况下，LTspice将第一个通道命名为通道0，将下一个通道命名为通道1，以此类推。在这种情况下，由图1仿真生成的export.wav将电压V(CH1)存储为通道0，将V(CH2)存储为通道1。要使用电压源播放这些通道，请在该电压源的值行中指定.wav文件和通道。这种情况下：

- ▶ 要指示V1回放图1的V(CH1)：**wavefile="C:\export.wav" chan=0**
- ▶ 要指示V2回放图1的V(CH2)：**wavefile="C:\export.wav" chan=1**

音频分离

从理论上讲，通过媒体播放器播放export.wav应在完全通过左扬声器（或耳机）播放1 kHz信号音2秒钟和通过右扬声器播放2秒钟之间切换。尽管如此，仍然无法保证立体声完全分离，这取决于播放过程中使用的媒体播放器的质量。

通过笔记本电脑播放export.wav显示，在示波器上测量时约30%的左通道出现在右通道上，如图4所示。

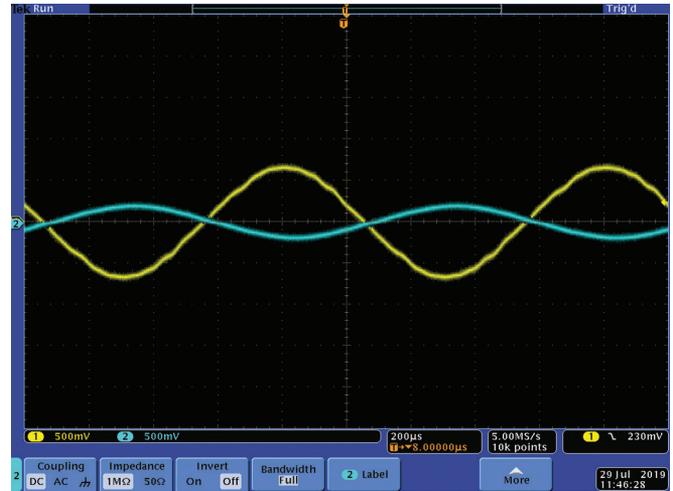


图4. 左（黄色）通道显示，在笔记本电脑上播放时约30%馈入右（蓝色）通道。

在（2000年时代）手机上播放相同的文件会得到一个更加分离的结果，显示没有可感知的串扰，但是在最大音量下会有轻微的真失真，如图5所示。

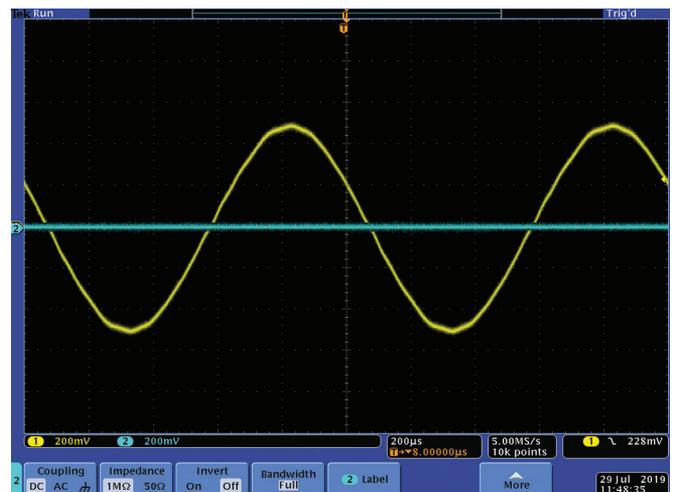


图5. 2000年的手机显示没有串扰，但在最大音量下会失真。

在后来2018年时代的手机上重复这个实验，结果显示没有可感知的串扰，但有一个完整的1V峰值信号和很小的失真，如图6所示。请注意，所绘示波器曲线图的灵敏度为500 mV/div。

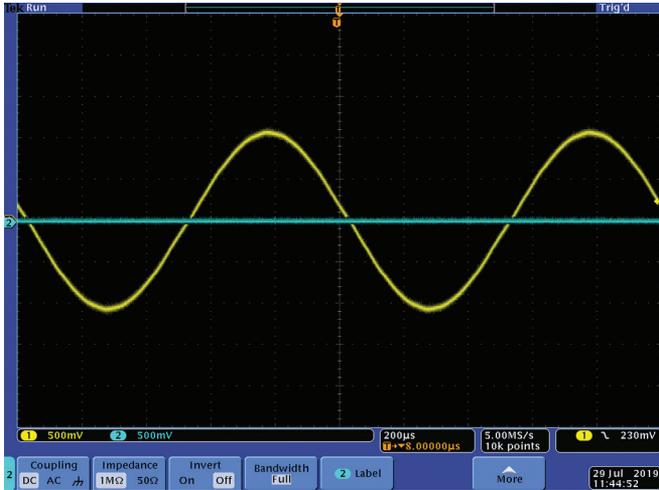


图6. 后来一代手机在串扰、失真和振幅方面表现出更好的性能。

在所有三个平台上使用相同的文件，结果显示LTspice可以生成能够完全分离的WAV文件，但最终的回放在很大程度上取决于播放器音频级的质量。

语音加密

图7中的电路显示了语音加密的基本方法，就是使用随机数序列加密音频信号，然后解密。

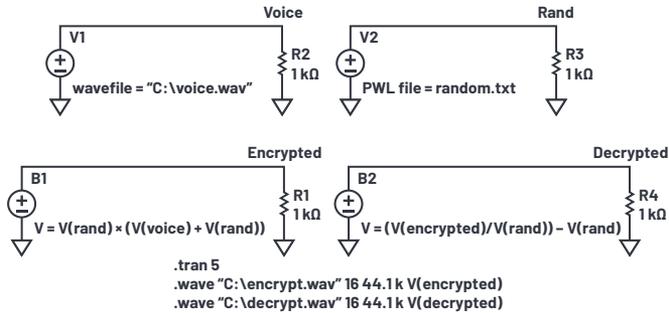


图7. 使用随机电压源加密/解密音频文件。

文件voice.wav包含原始音频。Excel电子表格用于生成变化周期为100 µs的随机数序列。结果复制到名为random.txt的文本文件中。random.txt的摘录如图8所示。

random.txt - Notepad

```

File Edit Format View Help
0.0001 0.327131708
0.0002 0.255264367
0.0003 0.449501477
0.0004 0.766355784
0.0005 0.575313343
0.0006 0.701312673
0.0007 0.340756767
0.0008 0.753989598
0.0009 0.302313769
0.0010 0.347387693
0.0011 0.787691945
0.0012 0.39198052
0.0013 0.785073942
0.0014 0.432171423
0.0015 0.594320182
0.0016 0.23842122
0.0017 0.99717587
0.0018 0.477852578
0.0019 0.025679592
0.0020 0.237590291
0.0021 0.850743226
0.0022 0.10486141

```

图8. 使用Excel生成并保存到文本文件中的随机电压。

该文件用于使用LTspice中的分段线性(PWL)电压源生成随机变化的电压V(RAND)。

使用行为电压源B1将V(RAND)添加到语音信号中。然后将输出乘以V(RAND)，并将结果发送到encrypt.wav文件。收听encrypt.wav发现，原始音频几乎无法感知。

图9显示了LTspice图窗口的原始语音、加密语音和解密语音信号。

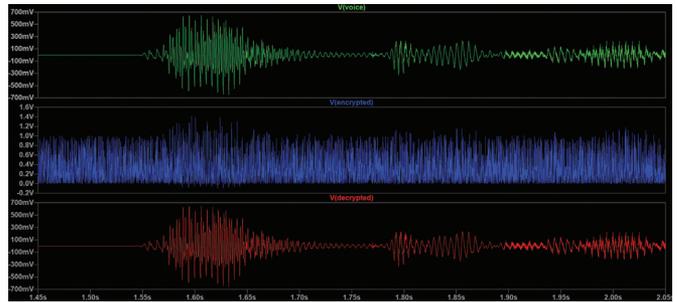


图9. 原始、加密和解密语音信号的输出。

然后使用第二个行为电压源解密原始音频信号，并将结果发送到decrypt.wav文件。

从差分电压源生成WAV文件

.wave命令的语法不允许数字化差分电压。但是，使用行为电压源(B1)可轻松解决此问题，如图10所示。

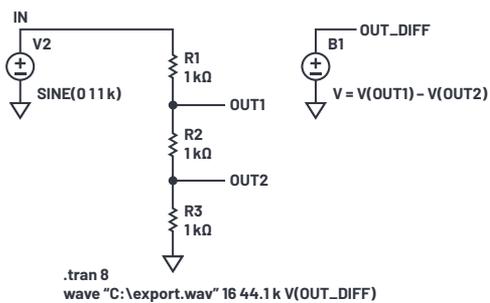


图10. 从差分电压创建WAV文件。

行为电压源(B1)输出电压等于 $V(\text{OUT1}) - V(\text{OUT2})$ ，这可以按常用方式在.wave命令中使用，如图所示。

事实上，行为电压源函数中的变量可以包括电路中的任何电压或电流，并且可以使用LTspice的任何数学函数控制这些变量。然后，可以通过正常方式将最终结果导出到LTspice音频WAV文件。

LTspice是一个功能强大的仿真器，但其仿真结果不必包含在LTspice内。使用.wave命令，LTspice可以导入、操作和导出音频文件，以便在媒体播放器上播放。



作者简介

Simon Bramble于1991年毕业于伦敦布鲁内尔大学，拥有电气工程和电子学学位，专门从事模拟电子器件和电源工作。他的职业生涯主要从事模拟电子器件工作，就职于凌力尔特（现为ADI公司的一部分）。
联系方式：simon.bramble@analog.com。

