

Analog Dialogue

アナログ・デバイセズに寄せられた珍問/難問集 Issue 175 LTspice でWAVファイルを 活用する―ステレオ音声データの 再生/生成/暗号化

著者: Simon Bramble、シニア・フィールド・アプリケーション・エンジニア

質問

LTspice上でオーディオ用のWAVファイルを使用したいと考え ています。ステレオ・データを再生/生成したり、ボイス・メッ セージを暗号化したりすることはできますか?



回答

音楽がお好きなら、ぜひLTspice[®]でWAVファイルを利用して シミュレーションを実行してみてください。

本稿では、LTspice上でWAVファイルを活用する方法を紹介し ます。特に、ステレオ(またはより多くのチャンネル)に対応す るオーディオ・データの扱い方について詳しく解説します。

LTspiceでは、回路シミュレーションの出力結果としてWAV ファイルを生成したり、回路シミュレーション用の入力データと してWAVファイルをインポートしたりすることができます。モ ノラルのデータについては、LTspice上でWAVファイルを入力 として使用したり、LTspiceの出力を基にWAVファイルを生成 したりする方法を詳しく説明したドキュメントやビデオが公開されています。本稿では、ステレオ(またはより多くのチャンネル) 用のWAVファイルをLTspice上で使用する方法について詳しく 説明します。

LTspiceは数多くの機能を備えています。それらのなかでも、 オーディオ・データの処理機能は優れたものだと言うことができ ます。コンピュータの画面上で回路の実際の動作を確認できるの は魅力的なことです。それに加え、LTspice以外でも再生可能な オーディオ・データを生成できるなら、実際の聴感をシミュレー ションによって評価できることになります。以下では、ステレオ・ データを保存したWAVファイルをLTspiceにエクスポート/イ ンポートする方法を示します。また、WAVファイルを更に活用 できるようにするためのヒントや使い方のコツも紹介します。

ステレオ対応のWAV ファイルの生成

まず、モノラル信号を基にWAVフォーマットのステレオ・デー タを作成する方法を説明します。図1に示したのは、振幅が1V、 周波数が1kHzのサイン波を生成し、2つのチャンネルCH1、 CH2に対して交互に信号を入力する回路です。各チャンネルに は、1kHzのトーン信号が2秒間隔で入力されます。



図1. シミュレーション用の回路。各チャンネルに対し、 1kHzのトーン信号が2秒間隔で入力されます。2つのチャンネルで 生成された2つの信号はWAVファイルとして保存されます。



「.wave "C:\export.wav" 16 44.1k V(CH1) V(CH2)」というコ マンドは、16ビットの分解能、44.1kSPSのサンプリング・レー トで各チャンネルの信号をデジタル化し、生成されたオーディ オ・データを「C:\export.wav」として保存するという意味です。 WAVファイル内では、このコマンドでサンプリング・レートの 次に指定している各信号が各チャンネルのデータとして扱われま す。LTspiceでは、1つのWAVファイル内に最大6万5535チャ ンネルのデータを保存できます。チャンネル数の拡張に必要な作 業は、上記のコマンドに信号名を追加するだけです。

LTspiceの.waveコマンドは、デフォルトでは1つ目に指定した 信号をオーディオ・チャンネルの左側のデータとして保存し、2 つ目に指定した信号を右側のデータとして保存します。上記の例 の場合、export.wavをメディア・プレーヤで再生すると、回路 上のノード名とは関係なく、CH1のデータが左側チャンネルの データとして、CH2のデータが右チャンネルのデータとして読 み出されます。デフォルトでは、CH1とCH2のデータはそれぞ れ.wavファイル内に「chan 0」、「chan 1」のデータとして保存 されます。このルールは、以下で説明するデータの読み出し方法 において重要な意味を持ちます。

シミュレーションを実行すると、export.wavがエクスポートされます。このファイルに含まれる2つのチャンネルのデータは、別の回路が備える2つのチャンネルに入力する信号として使用することができます。ここで言う別の回路の例を図2に示しました。





ご覧のように、LTspice上では、電圧源V1とV2が通常どおり に配置されています。ここで、「CTRL」キーを押しながら各電圧 源を右クリックすると、コンポーネントの属性を編集するための エディタが表示されます(図3)。このエディタにより、export. wavに含まれるデータを各チャンネルに割り当て、そのデータを 基に電圧信号を印加することができます。

🕫 Component Attribute Editor 🛛 🗙		
Open Symbol:	C:\Users\sbramble\Documents\LTspiceXVII\lib\sym\volt	age.asy
Attribute	Value	Vis.
Prefix	V	
InstName	V1	х
SpiceModel		
Value	wavefile="C:\export.wav" chan=0	X
Value2		
SpiceLine		
SpiceLine2		
Car	Icel	

図3. 図2の回路の電圧源 V1の設定。 export.wavのステレオ・データを入力信号の印加に使用します。 V1への入力は export.wavの chan 0のデータを基に 生成するよう設定しています。

先述したように、LTspiceでWAVファイルを生成し、信号をデ ジタル化して保存する際には、6万5535個ものチャンネルを設 定することができます。必要な作業は、所望の数のチャンネル を.waveコマンドの末尾に追加するだけです。デフォルトでは、 最初のチャンネルにchan 0という名前が付けられ、次のチャ ンネルにはchan 1という名前が付加されます。以下、チャンネ ルの数に応じて同様の処理が繰り返し行われます。本稿の例の 場合、図1のシミュレーションで生成したexport.wavでは、電 EV(CH1)のデータがchan 0のデータで、V(CH2)のデータが chan 1のデータとして保存されます。電圧源を使用して各チャ ンネルの信号を生成するには、電圧源の値の行に、使用する.wav ファイル名とチャンネルの番号を指定します。例えば、以下のよ うな具合です。

- 図1のV(CH1)のデータを再生するようにV1を設定する: wavefile="C:\export.wav" chan=0
- 図1のV(CH2)のデータを再生するようにV2を設定する: wavefile="C:\export.wav" chan=1

オーディオ信号のチャンネル・セパレーション

メディア・プレーヤでexport.wavを再生すると、まず1kHzの トーンが左のスピーカ(またはヘッドフォン)で2秒間再生され、 続いて右のスピーカで2秒間再生されるはずです。しかし、実際 には、完全なチャンネル・セパレーションが確保されていないか もしれません。これは、メディア・プレーヤを実行するハードウェ アの品質に依存します。

図4に示したのは、ノート型PC上でexport.wavのデータを再 生し、得られた信号をオシロスコープで観測した結果です。これ は左チャンネル(黄色)の信号の約30%が右チャンネル(青色) に現れているということを示しています。



図4. ノート型PCでexport.wavのデータを再生した結果。 左チャンネル (黄色) から右チャンネル (青色) に 約30%のフィードスルーが生じていることがわかります。

2000年ごろに製造された携帯電話機を使って同じWAVファイルを再生したところ、より良好なセパレーションが得られました(図5)。クロストークは認められませんが、フル・ボリュームで再生すると若干の歪みが生じます。



図5.2000年ごろに製造された携帯電話機によって export.wavの データを再生した結果。クロストークは認められませんが、 フル・ボリュームで再生すると歪みが生じます。

2018年製の携帯電話機を使って実験を繰り返したところ、最大振幅が1Vの信号を再生してもクロストーク、歪み共にほとんど認められませんでした(図6)。なお、図6では、オシロスコープの感度を500mV/divに設定している点に注意してください。



図6.2018年製の携帯電話機によって export.wav のデータを 再生した結果。振幅、クロストーク、歪みのいずれについても、 非常に優れた性能が得られることがわかります。

上では、3種のデバイスと単一のWAVファイルを使って実験を 行った結果を示しました。LTspiceで生成したWAVファイルで は、完全なセパレーションが確保されています。しかし、それを 再生した結果は、プレーヤのオーディオ品質に大きく依存するこ とがわかります。

音声の暗号化

図7に示した回路は、音声データの基本的な暗号化方法を示した ものです。音声データ(オーディオ信号)は、乱数シーケンスを 用いて暗号化したり、その後復号化したりすることができます。



図7. 音声データの暗号化方法。電圧源によりランダムな信号を生成し、 得られたデータを暗号化/復号化する例を示しています。 voice.wavは、元の音声データを保存したファイルです。一方、 random.txtは、ランダムなデータを保存したテキスト・ファイ ルです(図8)。そのデータは、「Excel」で乱数列を使用すること で生成しました。乱数値は、100マイクロ秒ごとに変化させるよ うにしています。このファイルを基に、LTspiceのPWL(折れ線 波形)電圧源によって、ランダムに変化する電圧V(RAND)を生 成します。

🧾 random.txt - Notepad		
File Edit F	ormat 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	

図8. random.txt に保存したデータ。 このデータはExcelを用いて生成しました。

暗号化の処理では、まずビヘイビア電圧源B1を用いて音声信号 にV(RAND)が加算されます。B1では、更にその結果に対して V(RAND)が乗算されます。得られた結果は、encrypt.wavとい うファイルに出力されます。encrypt.wavを再生しても、元の オーディオ信号はほとんど認識することができませんでした。続 いて、もう1つのビヘイビア電圧源B2を使用して元のオーディ オ信号を復号化しました。得られた結果は、decrypt.wavとして 保存しました。

図9に、元の音声データ、暗号化された音声データ、復号化され た音声データを再生して得られた信号を示しました。表示には、 LTspiceのプロット・ウィンドウを使用しています。



図9. 各音声データに対応する信号。 元の音声データ、暗号化した音声データ、復号化した 音声データの再生結果をプロットしています。

差動電圧源から WAV ファイルを生成する

.waveのコマンドでは、構文上、差動電圧信号をデジタル化する ことはできません。しかし、この問題は図10に示すビヘイビア 電圧源を使用することで容易に解決できます。



図10. 差動電圧信号からWAVファイルを生成するための回路

ビヘイビア電圧源B1は、V(OUT1) - V(OUT2)という電圧を出 力します。これであれば、.waveコマンドにおいて通常の方法で 使用することができます。

ビヘイビア電圧源では、回路内の任意の電圧/電流を変数として 使用し、LTspiceの数学関数を使用して任意の処理を行うことが 可能です。得られた結果は、通常の方法でWAVファイルに出力 することができます。

LTspiceは強力なシミュレータです。得られた結果を、LTspice の環境内にとどめておく必要はありません。.waveコマンドを使 えば、メディア・プレーヤで再生可能なオーディオ・ファイルを インポート/エクスポート/処理することができます。



著者について

Simon Bramble (simon.bramble@analog.com) は、アナログ・デバイセズのシニア・フィールド・アプ リケーション・エンジニアです。Linear Technology(現在はアナログ・デバイセズに統合)に在籍してい るときから、アナログ回路を担当していました。ロンドンのブルネル大学でアナログ技術と電源技術を専攻 し、1991年に電気工学と電子工学の学位を取得しています。



アナログ・デバイセズ株式会社

お住いの地域の本社、販売代理店などの情報は、<u>analog.</u> <u>com/jp/contact</u> をご覧ください。

オンラインサポートコミュニティEngineerZoneでは、アナ ログ・デバイセズのエキスパートへの質問、FAQの閲覧がで きます。 ©2020 Analog Devices, Inc. All rights reserved. 本紙記載の商標および登録商標は、各社の所有に属します。 Ahead of What's Possibleはアナログ・デパイセズの商標です。

VISIT ANALOG.COM/JP

AD5403-0-3/20