



هئیت کنفرانس دانشجویی مهندسی برق ایران
ISCEE2004



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
تاسیس ۱۳۷۷

موسیقی از دریچه سیگنال دیجیتال، پیاده سازی نرم افزار نوازنده

نیما دارابی

nimadarabi@yahoo.com

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

چکیده: این مقاله شامل تئوری کلی طراحی و گزیده ای از پیاده سازی نرم افزار نوازنده، با هدف اجرای قطعات موسیقی با سازهای دلخواه، ترکیب آنها و اعمال جلوه های ویژه بر روی سیگنال های موسیقی است. نوازنده یک محیط کد نویسی است که خود با Borland Delphi 5 نوشته شده است و توانایی دریافت نت های موسیقی در قالب فایل متنی به زبان ویژه خود و ذخیره آهنگ حاصل در فایل خروجی را دارد. موسیقیدان آشنا به برنامه نویسی با نوازنده می تواند با تعیین ویژگی شکل موج چون زمان اوج و فرود، ضریب میرایی، شکل پوش دامنه، ضرایب هارمونیک (شکل موج) و ... جنس صدای هر سازی را شبیه سازی و نت وارده را با ساز دلخواه اجرا کرده و بشنود. امکانات ریاضی، اعمال افکت روی آهنگ، تبدیل یکنواخت صدای سازها و ایجاد ساز جدید را در اختیار می گذارد؛ کاری که نه در نرم افزارهای موجود آنالیز صوت ممکن است و نه بسته های نرم افزاری تک منظوره مورد استفاده موسیقیدانان. بسته نرم افزاری نوازنده هم اینک یک برنامه کاربردی آماده بهره برداری است.

واژگان کلیدی: سیگنال دیجیتال، تبدیل فوریه سریع (FFT)، موسیقی، نوازنده

۱- مقدمه

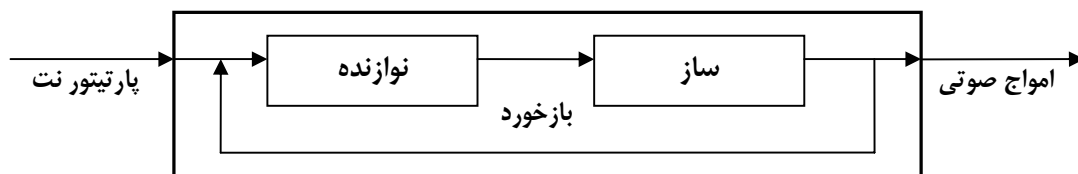
موسیقی را به عنوان امواج صوتی منتشر در هوا می شناسیم. این امواج به شیوه های طبیعی (مکانیکی) و یا مصنوعی (نرم افزاری) قابل تولید و شنیدن است. نوازنده برای هدف دوم ساخته شده است. امروزه نرم افزارهای گوناگونی این کار را انجام می دهند، اما غالباً دارای محدودیت هایی هستند: این نرم افزارها در غرب نگاشته شده اند و معمولاً توانایی اجرای فواصل فرکانسی کوچکتر از نیم پرده مانند موسیقی شرقی را ندارند. آنها حتی اگر صداها ساز گوناگون را بشناسند، در فهرست آنها یک ساز ایرانی هم وجود ندارد. به علاوه صدای برخی از سازهای شبیه سازی شده مصنوعی به گوش می رسد.

نرم افزار نوازنده بر این مشکلات فائق آمده و افزون بر این توانایی هایی دارد که در نرم افزارهای موجود در بازار بی سابقه است. برای نمونه هر ساز موسیقی توانایی اجرای جلوه های خاص خود را بر روی نت نواخته شده دارد: بیشتر سازهای زهی و برخی از بادی ها امکان Vibration (لرزش صدا) یا Glisando (جاروی پیوسته فرکانسی بین دو نت) را دارند، اما پیانو از آنها بی بهره است. نوازنده تمامی توانایی های یک ساز را در اختیار سازهای دیگر قرار می دهد. با نوازنده می توان یک قطعه موسیقی را با یک ساز آغاز نمود و به مرور جنس صدا را تغییر داد تا با ساز دیگری به پایان برد. همچنین می توان به جای طراحی مکانیکی ساز، صدای آن را طراحی نمود و حتی ساز نویی تألیف کرد. به علاوه دستکاری جزئیات دقیق و ریاضی گونه کد برنامه نویسی

ورودی نوازنده - که درباره آن توضیح خواهیم داد - می تواند تغییرات بدیعی را در شیوه اجرای قطعه اولیه پدید آورد؛ کد های نوشته شده به راحتی می توانند برداشته شده یا با هم ادغام شوند. می توان تعریف ویژگی صدای یک ساز را از یک فایل و خود قطعه نواخته شده را از فایلی دیگر برداشت و قطعه را با آن ساز اجرا کرده و نتایج را شنید و اصلاح نمود. در واقع با وساطت زبان برنامه نویسی، آهنگساز می تواند به جای آنکه ایده هایش را بر روی زبان سمبلک نت نویسی اعمال کند، آنها را مستقیماً روی امواج صوتی به اجرا در آورد. اینها از امتیازات نوازنده است. چون جستجوی نگارنده در راه یافتن نرم افزاری با این امکانات برای مصارف شخصی ناکام ماند، به تولید آن اقدام شد. کلیه روش ها و روابط ریاضی به کار رفته توسط نگارنده استخراج شده اند.

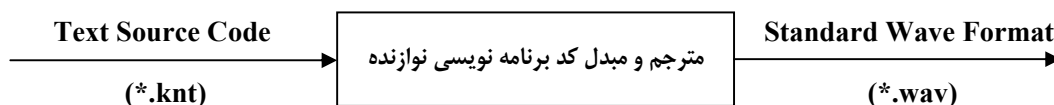
۲- تعریف پروژه: نگرش سیستمی به پدیده نوازنده

همانگونه که گفتار را با حروف الفبا می نگاریم، نگارش اصوات موسیقی نیز با رسم الخط نت نویسی انجام می شود. شخص نوازنده اطلاعات پارتیتور (قطعه ی نت) را به این زبان می خواند. سپس اعمالی مکانیکی روی سازش انجام می دهد یعنی آن را می نوازد. صدای تولید شده، خروجی این سیستم است. این صدا خود به عنوان بازخورد برای اصلاح و تنظیم نواختن نت ها روی نوازنده اثر می گذارد. در یک مدلسازی ساده فرآیند نواخته شدن یک قطعه توسط نوازنده و سازش از شکل ۱ پیروی می کند:



شکل ۱- دیاگرام بلوکی ساده سیستم نواخته شدن یک قطعه موسیقی بر اساس نت ورودی

اگر ما نرم افزاری بسازیم که قطعه نت موسیقی را دریافت نموده و در خروجی سیگنال صوتی ناشی از اجرا شدن آن قطعه را به گوش برساند، یک نوازنده را به همراه ساز او (کل سیستم شکل ۱) شبیه سازی کرده ایم. در اینجا ما نوازنده را از سازش جدا نمی کنیم. هدف اصلی نرم افزار نوازنده تحقق همین سیستم است. جنس ورودی و خروجی نرم افزار را از میان قالب های فایل های رایانه ای انتخاب می کنیم: قطعه نت را به شیوه ای مانند کدنویسی رایانه ای به صورت فایل متنی شامل دستورالعمل ها به سیستم وارد کرده و صوت خروجی را پس از تبدیل به سیگنال دیجیتال در قالب استاندارد فایل های صوتی ذخیره خواهیم کرد:



شکل ۲- نمودار بلوکی تعریف نرم افزار نوازنده به عنوان مترجم یک کد برنامه نویسی با هدف تولید سیگنال موسیقی

قالب فایل ورودی: آهنگساز برای استفاده از نرم افزار باید قطعه نت آهنگ خود را به دستورهای قرارداد شده در زبان صوری ویژه این نرم افزار در آورد. این پرونده ها به صورت کد ASCII و در فایل هایی به پسوند KNT ذخیره می شوند.
قالب فایل خروجی: از فایل های صوتی موجی استفاده می کنیم. رایج ترین فرمت، فایل های صوتی موجی *.wav یا Standard Wave Format است که یک سیگنال صوتی را به صورت داده های دیجیتال با دقت مطلوب (فرکانس نمونه برداری، دقت نمونه برداری، تعداد کانال ها و ...) ذخیره می کند. برای آشنایی با جزئیات این قالب به این نشانی اینترنتی زیر مراجعه کنید^۱.

۳- به کارگیری رایانه برای اجرای نوازنده

تنها به روش های نرم افزاری می توانیم همناواری مجموعه کاملی از سازها را شبیه سازی کنیم. کار را از اجرا و ذخیره سازی یک سیگنال ساده سینوسی تا رسیدن به اجرای یک قطعه موسیقی ارکستری کامل پی می گیریم:

۳-۱- تولید سیگنالی با فرکانس و مدت زمان مطلوب

مهم ترین مشخصه یک نت موسیقی بسامد آن است. اصوات موسیقی معمولاً متناوب اند، یعنی تک فرکانس اند یا بسامد غالب دارند. هنگامی که ما از نت A3 (نت لا، اکتاو ۳) نام می بریم، بسامد ۴۴۰ هرتز را در همه سازها در نظر داریم. در موسیقی غربی، فواصل موسیقی نیم پرده ای است. پرده واحد معرفی فاصله فرکانسی (نسبت فرکانس) دو صدا است. فرکانس نت های متوالی در موسیقی یک تصاعد هندسی را تشکیل می دهد: هر اکتاو معادل شش پرده (دوازده نیم پرده) و فرکانس هر نت دو برابر فرکانس نت معادل آن در یک اکتاو پایین تر است. پس می توان قدر نسبت این تصاعد (نسبت فرکانس هر نت نسبت به نت نیم پرده پایین تر) را یافت:

$$q = 2^{\frac{1}{12}} = 1.05946 \quad (1)$$

سطر نخست شکل ۳ شامل نام نت های تشکیل دهنده یک اکتاو است. سطر سوم آن معرف مقادیر عددی فرکانس ها نسبت به نت مبدأ (C - دو اکتاو پایین) است و تصاعدی هندسی با قدر نسبت ۱/۰۵۹۴۶ را می سازد. اما سطر دوم که معادل خطی فواصل فرکانسی را بر حسب پرده بیان کرده است، حاصل لگاریتم گرفتن از سطر سوم است و تصاعدی عددی است.

| | | | | | | | | | | | | |
|-----|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| C | C# | D | D# | E | F | F# | G | G# | A | A# | B | C |
| 0 | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 |
| 1 | 1.059 | 1.122 | 1.189 | 1.26 | 1.335 | 1.414 | 1.498 | 1.587 | 1.682 | 1.782 | 1.888 | 2 |

شکل ۳- مقایسه طیف خطی فواصل موسیقی غربی با طیف لگاریتمی بسامد آنها

اکنون اگر نتی با فرکانس پایه f_1 را به عنوان نت مبدأ انتخاب کنیم، بسامد نتی که m_{21} پرده ($2m_{21}$ نیم پرده) از آن زیرتر است (f_2) قابل محاسبه می باشد:

$$\frac{f_2}{f_1} = 2^{\frac{2m_{21}}{12}} = 2^{\frac{m_{21}}{6}} \quad (2)$$

اکنون می توانیم بسامد یک نت (f_0) را با داشتن نامش، بر اساس نت پایه ای که بسامدش را می دانیم محاسبه کرده و آن را به وسیله الگوریتم یک سیگنال ژنراتور با دامنه دلخواه (V_0) تولید کرده و آن را با فرکانس نمونه برداری f_s و ریزنمایی N bps ذخیره کنیم و نمونه ها را در فایل صوتی خروجی ذخیره کنیم و به سیگنال صوتی که به یک آژیر ممتد می ماند، گوش فرا دهیم. i امین نمونه از سیگنال سینوسی تولید شده که باید در فایل ذخیره شود عبارت است از:

$$DigitalSample = V_0 \cos(2\pi \cdot i \cdot \frac{f_0}{f_s}) 2^n \quad (3)$$

۳-۲- تعیین شکل موج سیگنال

شکل موج سیگنال صوتی خروجی یک ساز، اساسی ترین عامل در شناخت جنس صدای آن ساز است. عامل اصلی تفاوت صدای یک پیانو با یک سنتور تفاوت شکل موج آن دو است. سازهای هم خانواده که ساختار فیزیکی یا صدای مشابهی دارند، شکل موج های شبیهی هم خواهند داشت. پس برای سنتز صدای یک ساز باید نخست شکل موج آن را شناسایی کنیم. بر اساس نظریه فوریه شکل موج یک سیگنال متناوب به مقدار ضرایب هارمونیک های آن وابسته است. هارمونیک ها سیگنال های ساده سینوسی هستند که فرکانس آنها مضرب صحیحی از فرکانس سیگنال پایه است. می دانیم که اگر تابع پرودیک

حقیقی چون $F(t+T)=F(t)$ داشته باشیم، می توانیم آن را از جمع جبری این هارمونیک ها تولید کنیم. یعنی به ازای هر موج متناوب رشته های حقیقی A_k و P_k وجود دارند که به ازای آنها رابطه زیر برقرار باشد:

$$Func(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{K=\infty} A_k \cdot \sin(2k\pi f_0 t + P_k) \quad (4)$$

با افزایش k ضرایب A_k رفته رفته کم می شوند، فرض می کنیم که ما به h هارمونیک اول بسنده کنیم. به علاوه تغییر فاز هارمونیک ها (رشته P_k) هر چند که در شکل موج ظاهری سیگنال صدا موثر است، در جنس صدای شنیده شده نقشی ندارد. همچنین سیگنال صوتی سطح DC ندارد. این نکات رابطه فوق را ساده تر می کند. با دانستن ضرایب چند هارمونیک اصلی یک ساز می توان امتداد صدای آن را به خوبی شبیه سازی نمود. برای ذخیره سازی سیگنال تولید شده فرمول (۳) را گسترش می داده و نمونه i ام ذخیره سازی در فایل Wave را از جمع جبری سیگنال های هارمونیک های مختلف آن به دست می آوریم:

$$DigitalSample = \sum_{k=h}^{K=1} V_0 A_k \cdot \sin(2\pi i \frac{f_0}{f_s} t) \quad (5)$$

۳-۳- تغییر هارمونیک ها در واحد زمان

برای افزایش دقت در تولید صدای یک ساز باید در زمان های مختلف نواختن نت، از هارمونیک های آن نمونه برداریم. این زمان ها می توانند دوره های حرکت اولیه، اوج گیری، ماندگاری و میرایی موج باشند. در پیاده سازی نرم افزار نوازنده امکان تبدیل پیوسته رشته های ضرایب هارمونیک داده شده در طول مدت نواخته شدن یک نت ایجاد شده است.

۳-۴- شبیه سازی سازهای کوبه ای و مولفه های نویزی سازهای تک فرکانس

ساز های کوبه ای نت ندارند. صدای آنها تک فرکانس نیست و طیف وسیعی از فرکانس ها را در خود دارد و از این رو به نویز سفید می ماند. حتی سازهای تک فرکانس هم الگوهایی از این دست را آشکار می سازند. صدای زخمه در آغاز نت سازهای زهی زخمه ای، فوت نوازنده نی، نویز تماس آرشه با سیم در زهی های آرشه ای و تقه اول نت پیانو از این جمله اند. جمع جبری نویزهای زمانی تولید شده با اصوات تک فرکانس فرمول (۵) صدا را طبیعی تر جلوه می دهد. این کار را با اعمال الگوریتم تبدیل فوریه معکوس سریع ($IFFT^2$) بر روی طیف های فرکانسی طراحی شده یا نمونه برداری شده از ساز های واقعی انجام دادیم.

۳-۵- ایجاد لرزش در صدا

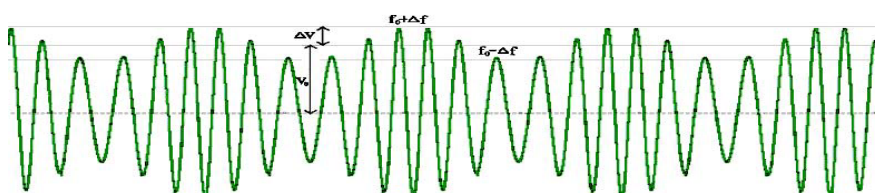
بیشتر سازهای بادی و زهی امکان ایجاد لرزش جزئی در دامنه و فرکانس صدای خود را دارا هستند. این امر در سازهای بادی با حرکت جزئی انگشتان روی سوراخ ها، و در سازهای زهی با لرزش انگشتان بر روی سیمها پدید می آید. پس از آنالیز سیگنال های سازهای مختلف در حال ویراسیون مدل ساده و کارآمدی به دست آمد: ویراسیون در دامنه یعنی تغییر نوسانی دامنه ی سیگنال مانند مدولاسیون AM عمل می کند که سیگنال پیام سینوسی با فرکانس لرزش انگشت نوازنده (در حد چند هرتز) را روی موج حامل با فرکانس لرزش سیمها (در حدود صدها یا هزاران هرتز) سوار می کند. این مدولاسیون پیام می تواند مانند مدولاسیون FM در فرکانس نیز صورت گیرد، یعنی فرکانس نواخته شدن نت در حال ویراسیون حول فرکانس مرکزی نوسان کند. در واقع مطالعه ی یک نت لرزان نشان می دهد که ویراسیون یک نت توأمان هر دو نوع مدولاسیون AM و FM را روی سیگنال حامل اصلی (سیگنال صاف و بدون لرزش) اعمال می کند. برای شبیه سازی ویراسیون سه پارامتر را تعریف می کنیم: $VibVol$ میزان نسبی تغییرات پرودییک پوش دامنه (دامنه سیگنال پیام در مدولاسیون AM) را نشان می دهد. $VibSpeed$ یا فرکانس پیام در هر دو نوع مدولاسیون هم معرف فرکانس تغییرات نوسانی پوش است و هم بیانگر فرکانس تغییرات نوسانی در فرکانس نت اصلی. $VibFreq$ هم نسبت فرکانس ماکزیمم به فرکانس پایه نت را نشان می دهد و به دامنه سیگنال پیام در مدولاسیون FM

وابسته است (شکل ۴). اینک دامنه پوش نت سینوسی با فرکانس پایه f_0 که دامنه ی پوش آن در حالت عادی V_0 بوده و با پارامترهای فوق لرزانده شده باشد، در لحظه t عبارت است از:

$$V = V_0 + V_0(\text{VibVol} - 1)\text{Sin}(2\pi \cdot \text{VibSpeed} \cdot t) \quad (۶)$$

که دامنه سیگنال حاصل از مدوله شدن پیام $\text{Sin}(2\pi \cdot \text{VibSpeed} \cdot t)$ روی موج حامل است. این دامنه در سیگنال اصلی ضرب خواهد شد. برای ایجاد تغییرات فرکانسی نیز از این پس به جای سینوس گرفتن از کمان $\varphi = 2\pi f_0 t$ بر اساس مدولاسیون FM، کمان زیر را جایگزین می کنیم:

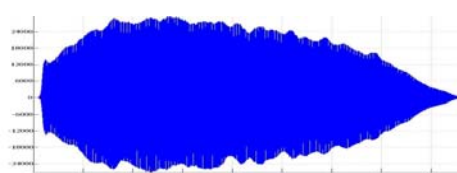
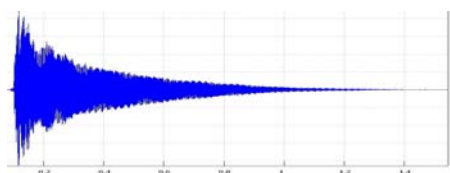
$$\varphi = 2\pi f_0 t + 2\pi \text{VibFreq} \int_0^t \text{Sin}(2\pi \cdot \text{VibSpeed} \cdot t) dt \quad (۷)$$



شکل ۴- استفاده از مدولاسیون های FM و AM برای ایجاد لرزش در صدای یکتواخت ساز

۳-۶- طراحی پوش دامنه صدا

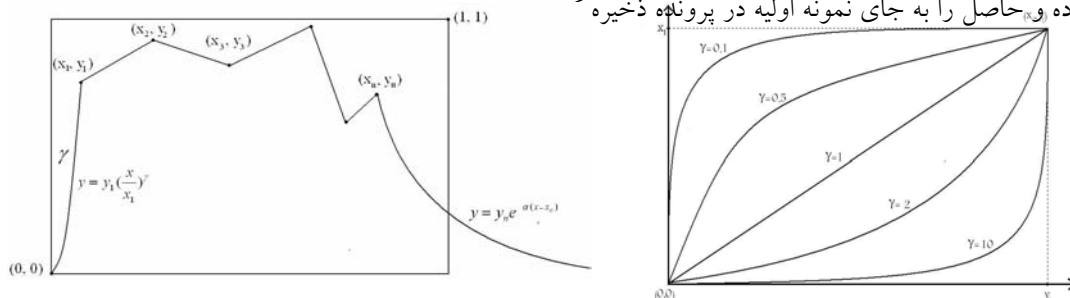
منظور از پوش دامنه صدا، شکل پوش سیگنال صوتی است که از اتصال ماکزیمم پریودهای متوالی به یکدیگر حاصل می شود. این نمودار، عامل مهم دیگری در شناخت ویژگی های صدای یک ساز است. سازهای گوناگون از این حیث متفاوت اند. سازهای زهی معمولاً از زخمه زدن بر تار که دو سر آن ثابت نگاه داشته شده است، موج ساکنی را ایجاد می کنند که با گذشت زمان میرا می شود. این میرایی معمولاً از تضعیف نمایی پیروی می کند. بنابراین می توان یک ضریب میرایی نمایی را به موج نسبت داد که موج پس از رسیدن ناگهانی به اوج به مرور تضعیف شده و از میان می رود (شکل ۵ - چپ). در سازهای بادی در واقع چنین پژواکی وجود ندارد و مادامی که هوا توسط ریه نوازنده یا هر منبع بیرونی به ساز دمیده می شود، صدای آن شنیده خواهد شد. در شکل ۵ (راست) در تمام مدتی که دامنه در حال کاسته شدن است ساز ابوا (نوعی ساز بادی چوبی) در حال نواخته شدن است، یعنی کاستن دامنه ی موج توسط بازدم شخص نوازنده جزئی از فرآیند نواختن است. پس از پایان نواختن نت، موج به سرعت میرا شده و از بین می رود. این سازها همچنین به آرامی اوج می گیرند و زمان اوج (Rise Time) بیشتری دارند.



شکل ۵- سمت راست: صدای چنگ ناگهان اوج گرفته و به تدریج میرا می شود و دنباله ای خفیف از آخرین صدا را در فضا منتشر می کند. سمت چپ: نت ابوا به آرامی اوج می گیرد و مادام که نوازنده در آن می دمد به گوش می رسد، اما پس از نواختن پژواکی وجود ندارد

با مطالعه اشکال گوناگون شکل دامنه صدای سازها به یک قالب کلی قراردادی دست یافتیم که تغییر در پارامترهای آن بتواند شکل کلی پوش سیگنال را به هر یک از اشکال مورد نیاز تبدیل کند. در طراحی نوازنده از شکل ۶ (چپ) به این منظور استفاده شده است. مقدار ۱ روی محور زمان نشان دهنده مدت زمان نواخته شدن نت است. در طول مدت نواخته شدن نت از زمان ۰ تا ۱ واحد، دامنه موج بر اساس الگوی تعیین شده توسط نقاط (X_i, Y_i) تعیین می شود. نقاط با خطوطی به یکدیگر متصل می شوند.

اگر ضابطه تابع شکل ۶ (چپ) را $f(t)$ بنامیم، برای اعمال پوش دامنه کافی است هر نمونه از سیگنال یکدست پیشین را در $f(t)$ ضرب کرده و حاصل را به جای نمونه اولیه در پرونده ذخیره



شکل ۶- چپ: الگوی کلی به کار گرفته شده در نرم افزار نوازنده برای تعیین پوش سیگنال یک نت موسیقی

راست: تغییر پارامتر γ تقعر رشد منحنی رشد دامنه نت از لحظه آغاز نواخته شدن تا نخستین نقطه تعیین شده را مشخص می کند

همه نقاط (x_i, y_i) با خط راست به یکدیگر متصل شده اند، به جز اتصال مبدأ مختصات به نقطه (x_1, y_1) که ضابطه اتصال آن به صورت رابطه (۸) است. این ضابطه چنان که ما می خواهیم از نقاط $(0,0)$ و (x_1, y_1) عبور می کند، ولی نوع خم این اتصال را پارامتر γ تعیین می کند، در صورتی که $\gamma = 1$ باشد، این اتصال خط راست است، برای $\gamma > 1$ تقعر آن رو به بالا و به ازای $\gamma < 1$ تقعرش رو به پایین خواهد بود. پارامتر γ به جهت هر چه طبیعی تر ساختن چگونگی افزایش دامنه موج در لحظه آغاز نواختن نت در این مدل وضع شده است. شکل ۶ (راست) این امر را به خوبی نشان می دهد. پس از نواخته شدن نت و دستور توقف نواختن آن، اثر ارتعاشی صوت همچنان ادامه خواهد یافت. قسمت انتهایی نمودار زمانی شکل ۶ (چپ) نشاندهنده تضعیف دامنه موج با ضریب میرایی α است. با مقدار دهی مناسب به مقادیر γ ، α و تعیین نقاط (x_i, y_i) می توان الگوی پوش دلخواه را برای دامنه موج پدید آورد:

$$y = y_1 \left(\frac{x}{x_1} \right)^\gamma \quad (8)$$

۳-۷- شبیه سازی صداهای همزمان

در یک قطعه موسیقی، معمولا اصوات گوناگون به طور همزمان با هم ترکیب می شوند. این همزمانی از سه رو رخ می دهد:

- ترکیب پژواک باقی مانده از نت های پیشتر نواخته شده با نت های کنونی
- نواخته شدن همزمان بیش از یک نت توسط یک ساز مانند آکورهای همزمان پیانو
- هم نوازی سازهای گوناگون با یکدیگر مانند یک قطعه ارکستری

برای شبیه سازی ترکیب صدای سازها باید بتوانیم این هر سه همزمانی را ایجاد کنیم. یعنی محاسبات مربوط به صدای سازهای گوناگون را جداگانه انجام داده و حاصل را پس از جمع جبری در پرونده ذخیره کنیم. از این راه ما می توانیم صدای یک ارکستر کامل را با تک تک سازهایش شبیه سازی کنیم. هر ساز قطعه نت (فایل متنی ورودی) مخصوص به خود را خواهد داشت.

۴- محیط نرم افزار نوازنده

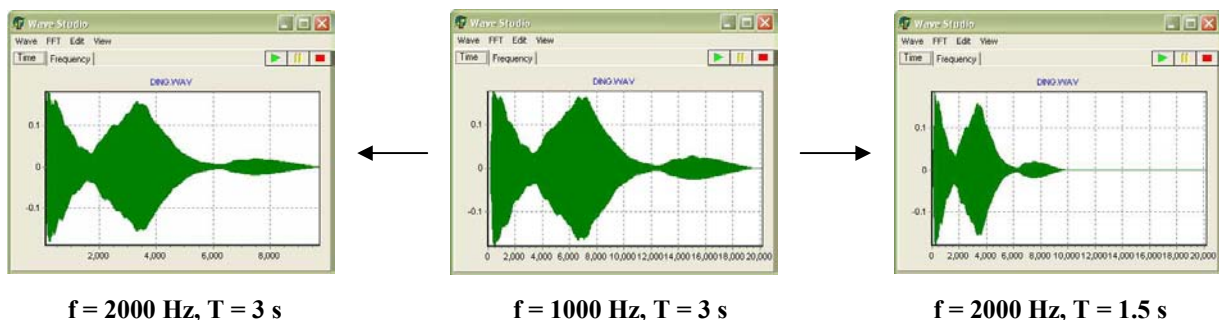
۴-۱- محیط برنامه نویسی نوازنده

ظاهر محیط برنامه نویسی نوازنده، محیطی به سادگی برنامه ی ویرایشگر متن ویندوز (Notepad) است. متن درون آن، کدی در بردارنده دستورات عمل های توالی نتها و ویژگی های معرف صدای ساز است که به نوعی ترجمه قطعه نت مورد اجرا به زبان صوری نوازنده است. پس از اجرای این متن یک فایل صوتی ذخیره می شود که شامل صوت حاصل از اجرای دستورها است. نوازنده مانند یک مترجم همزمان (interpreter) عمل کرده و دستورها را خط به خط اجرا می کند و در صورت رسیدن به اشکال آن را گزارش کند. این مانند مترجمی است که خروجی آن کد زبان ماشین نبوده و یک فایل صوتی است. متن برنامه نوازنده تا این

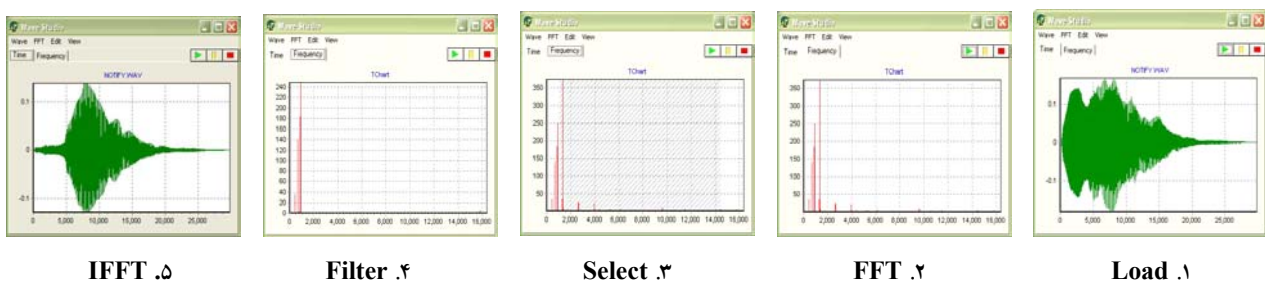
لحظه در حدود ۲۵ دستور و تعدادی ثابت دارد. از دو بخش سربرنامه و بدنه تشکیل شده است. فرآیند خطایابی آنها بر اساس با کامپایلر های LALR است که سرعت خطایابی خوبی دارند.^۳ در این مقاله شرح رویه های ترجمه و خطایابی که برای تولید نرم افزار نوازنده استفاده شده است و نیز توضیح دستورات، حلقه ها و خطاهای خود محیط برنامه نویسی امکان پذیر نیست. در شکل ۱۰ (در انتهای مقاله) به عنوان نمونه بخشی از کد اجرای آهنگ زرد ملیحه اثر استاد ابولحسن صبا (تکنوازی با ساز تار) درج شده است. پس از اجرای این برنامه، خروجی در فایل Wave ذخیره شده و قابل شنیدن خواهد بود.

۲-۴- محیط کارگاه موج نوازنده

کارگاه موج به عکس محیط برنامه نویسی نوازنده که برای ترکیب (ستتر) و تولید امواج صوتی به کار می رفت، ابزاری برای تجزیه (آنالیز) اصوات پیش ساخته است. این محیط، ابزاری جانبی برای ذخیره و بازیابی و مشاهده سیگنال ها با امکانات بزرگنمایی و انتخاب، محاسبه و تغییر پارامترهای کمی و کیفی ذخیره سازی فایل های صوتی، تبدیل فوریه (FFT) و عکس آن (IFFT)، نمایش توأم حوزه های فرکانس و زمان و اعمال فیلترینگ روی سیگنالها در هر یک از دو حوزه و ... می باشد. این بخش به این منظور به نرم افزار اضافه شد که به واسطه تحلیل یک نت هر چند کوتاه از یک ساز که در محیط برنامه نویسی نوازنده می خواهیم صدایش را شبیه سازی کنیم، به استخراج پارامترهای آن کمک کند. جلوه های صوتی گوناگون روی قطعه موسیقی نیز در کارگاه موج امکان پذیر است. برای نمونه شکل ۷ امکان افزایش فرکانس یک سیگنال صوتی را با کاهش زمان آن (با تغییر مقیاس در حوزه زمان) و نیز بدون کاهش زمان سیگنال (از طریق تبدیل فوریه، تغییر مقیاس در حوزه فرکانس و تبدیل معکوس فوریه) نشان می دهد. در شکل ۸ نیز مراحل اعمال یک فیلتر میان نگذر مشاهده می شود.^۴



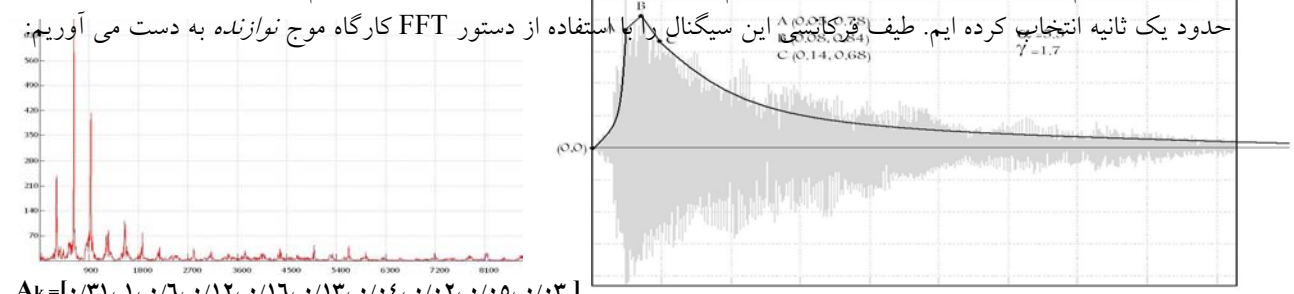
شکل ۷- حاصل اصلاح فرکانس سیگنال با استفاده از گزینه Scale در حوزه زمان و فرکانس متفاوت است.



شکل ۸- مراحل اعمال یک فیلتر میان نگذر ایده آل در کارگاه موج نوازنده

۳-۴- یک نمونه عملی:

(1.1) می خواهیم صدای تار ایرانی را شبیه سازی کنیم. به نت ساده و خالصی از ساز تار نیازمندیم. سیگنالی از بسامد دلخواه و در



$$A_k = [0.31, 1, 0.76, 0.12, 0.16, 0.13, 0.04, 0.02, 0.05, 0.03]$$

شکل ۹- راست: نمودار زمانی نت نمونه تار ایرانی، پارامترهای تعیین شکل پوش دامنه را به دست می دهد.

چپ: نمودار طیف فرکانسی، ضرایب هارمونیک های اصلی را تعیین می کند.

با ضرب اعداد رشته A_k (شکل ۹ - چپ) در توابع سینوسی هارمونیک های اول تا دهم فرمول (۵) می توان شکل موجی با تقریب قابل قبول ایجاد نمود که زنگ صدای آن از جنس زنگ (امتداد) صدای تار باشد. اما شکل پوش سیگنال هم باید شبیه سازی شود. این امر بررسی صدای تار را در حوزه زمان می طلبد. برای این منظور شکل سیگنال نتی را که می خواهیم الگو قرار دهیم، از لحظه آغاز نواخته شدن نت تا لحظه پایان آن در مربع واحد محاط می کنیم. سپس نقاطی را به تعداد کافی برای تقریب زدن شکل پوش روی آن تعیین می کنیم. با توجه به شکل موج در حال میرایی، ضریب α و با توجه به نوع صعود از نقطه $(0, 0)$ تا اولین نقطه نیز ضریب γ را به دست می آوریم. پارامترهای تعیین شده در شکل ۱۰، می توانند شکل پوش دامنه را به خوبی شبیه سازی کنند. از این پس ما می توانیم هر آهنگی را با صدای هر سازی بشنویم، تنها اگر به پارامترها به درستی مقدار داده باشیم:

```

MaliJeh.KNT
File Run Tools Help
(* Zard = MaliJeh - Tar - Abolhasan Saba *)
HEAD
tempo = 180      (* Bits per Minutes *)
frequency = 44100 (* Sampling Frequency *)
channels = 2     (* Stereo *)
bps = 16        (* Sampling Resolution *)
volume = 0.75

begin
  SynchronNotes = 3
  transpose = 2.2
  alpha = 5.5
  Gamma = 1.7
  Ultrate = (0.09, 6, 0.001)
  Oct = 1

  (* The first point on the Time Signal *)
  plot (0.05, 0.78, 0)
  Domain (0.31, 1, 0.6, 0.12, 0.16, 0.13, 0.04, 0.02, 0.05, 0.03)
  Phase (0)

  (* The second point *)
  plot (0.05, 0.84, 0)
  Domain (0.31, 1, 0.6, 0.12, 0.16, 0.13, 0.04, 0.02, 0.05, 0.03)
  Phase (0)

  (* The third (last) point *)
  plot (0.14, 0.68, 0)
  Domain (0.31, 1, 0.6, 0.12, 0.16, 0.13, 0.04, 0.02, 0.05, 0.03)
  Phase (0)

  Loop 2
  (* Times & Notes *)
  play (3, EA)
  play (1, B3)
  play (2, B3)
  play (2, CA)
  play (3, D4)
  play (1, EA)
  play (2, B3)
  play (2, CA)
  ...
End Loop
end
  
```

شکل ۱۰ - کد اجرای قطعه زرد ملیجه، در دستگاه شور استاد ابوالحسن صبا

۵- منابع:

[1] <http://ccrma.stanford.edu/CCRMA/Courses/422/projects/WaveFormat>

[2] Steven W. Smith, *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*, California Technical Publishing, pp. 169_184, pp. 311_318, 1999.

[۳] آلفرد وی. اهو، کامپایلرها، اصول، ابزارها و روش ها، انتشارات باغانی، مشهد، ۱۳۷۹.

[۴] نیما دارابی، پردازش و تولید سیگنال های دیجیتال موسیقی (پایان نامه)، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۲.