



دانشگاه صنعتی اصفهان  
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

# ساخت آرایه میکروفونی ۱۶ المانه به منظور مکان‌یابی منابع صوتی

پروژه دو کارشناسی مهندسی برق

دانشجو: فرهاد بیرق‌دار

استاد: احسان یزدیان

وحید غفاری‌نیا

تابستان ۹۵

## چکیده

امروزه ضمن اینکه پردازش آرایه ها، در زمینه های رادار، سونار، مخابرات سیار، کیهان شناسی رادیویی، لرزه شناسی به موفقیت های چشمگیری دست یافته است، اخیراً نیز از این تکنیک در پردازش آرایه های میکروفونی برای مکان یابی منبع صوتی در بسیاری از سیستم های ارتباطی به صورت قابل توجهی استفاده می شود. هدف از انجام این پروژه، ساخت یک آرایه میکروفونی ۱۶ المانه، با خروجی مناسب جهت مکان یابی منابع صوتی می باشد. در اکثر الگوریتم های مکان یابی صوتی، تأخیر بین سیگنال های دریافتی در هر المان از آرایه، محاسبه می شود و سپس با استفاده از این تأخیرها، مکان منبع صوتی تخمین زده می شود. در اینجا پردازش داده ها به عهده نرم افزار متلب می باشد. از همین رو، آرایه ساخته شده باید سیگنال صوتی را با دقت بسیار بالایی به صورت دیجیتال برای پردازش به پردازنده ارسال کند. بدین گونه که سیگنال صوتی توسط میکروفون خازنی به سیگنال الکتریکی تبدیل می شود اما به علت امپدانس زیاد میکروفون خازنی، دامنه سیگنال خروجی ضعیف می باشد. بنابراین سیگنال خروجی توسط تراشه MAX4469 تقویت می گردد و در قسمت تقویت کننده برای کاهش اثرات نویز از یک فیلتر مرتبه دوم استفاده شده است. سیگنال تقویت شده وارد یک مبدل آنالوگ به دیجیتال می شود و سپس با استفاده از FPGA، داده های مربوط به تمامی ۱۶ میکروفون را جمع آوری کرده و به وسیله پورت USB به نرم افزار متلب منتقل می کنیم. در این ساختار هر دو میکروفون با فاصله ی ۳ سانتی متر در کنار یکدیگر بر روی یک برد قرار گرفته اند، در نتیجه کاربر می تواند نحوه ی چیدمان آرایه را به طور دلخواه تغییر دهد. امید است با انجام این پروژه، سخت افزار مناسبی برای آزمایش انواع الگوریتم ها در این زمینه فراهم شود.

**کلمات کلیدی:** آرایه میکروفونی، مکان یابی منابع صوتی، ساخت آرایه میکروفونی

## صفحه

## فهرست عناوین

۱	مقدمه.....	۱
۲	۱,۱ پردازش آرایه‌ای.....	۲
۴	۲ معرفی برخی از آرایه‌های ساخته شده.....	۴
۴	۲,۱ آرایه میکروفونی LOUD.....	۴
۶	۲,۲ دوربین اکوستیک بر پایه FPGA.....	۶
۷	۳ ساخت آرایه میکروفونی.....	۷
۸	۳,۱ انتخاب میکروفون.....	۸
۸	3.1.1 میکروفون های ذغالی (کربن دار).....	۸
۹	۳,۱,۲ میکروفون‌های دینامیکی.....	۹
۱۰	۳,۱,۳ میکروفون‌های الکترومغناطیسی.....	۱۰
۱۰	3.1.4 میکروفون‌های پیزوالکتریک.....	۱۰
۱۱	3.1.5 میکروفون‌های خازنی.....	۱۱
۱۴	3.2 مدار پیش تقویت کننده.....	۱۴
۱۶	۳,۳ مدار مبدل آنالوگ به دیجیتال.....	۱۶
۱۶	3.3.1 سخت‌افزار مورد نیاز CS5340.....	۱۶
۱۷	۳,۳,۲ رابط I2S.....	۱۷
۱۸	۳,۳,۳ نحوه دریافت داده از تراشه CS5340.....	۱۸
۲۰	۳,۴ ارسال داده‌های دریافتی به کامپیوتر.....	۲۰
۲۱	۳,۵ شبیه‌سازی دریافت داده از مبدل CS5340 و آماده‌سازی برای ارسال به کامپیوتر.....	۲۱
۲۲	منابع و مراجع.....	۲۲

## صفحه

## فهرست اشکال

شکل ۱-۱- نمونه یک آرایه میکروفونی.....	۲
شکل ۱-۱- تصویر برد چاپ شده آرایه LOUD.....	۵
شکل ۱-۱- نمای کلی از پروژه LOUD.....	۵
شکل ۱-۱- دوربین اکوستیک با ۳۲ میکروفون.....	۶
شکل ۱-۳- مدار بایاس میکروفون.....	۱۴
شکل ۲-۳- مدار بایاس میکروفون.....	۱۵
شکل ۳-۳- مدار بافر قبل از ورودی تراشه CS5340.....	۱۷
شکل ۴-۳- محوه انتقال دیتا در رابط I2S.....	۱۸
شکل ۵-۳- ساختار یک گیرنده در رابط I2S.....	۲۰
شکل ۵-۳- نتایج شبیه‌سازی فرستنده I2S.....	۲۱
شکل ۵-۳- نتایج شبیه‌سازی ماژول ADC_read.....	۲۱

صفحه

فهرست جداول

جدول ۱-۳- تعیین فرکانس سیگنال MCLK ..... ۱۹

## ۱ مقدمه

به هر تعدادی میکروفون تمام جهته یا در جهتی خاص اطلاعات را به صورت هماهنگ باهم از محیط اطراف دریافت کنند، آرایه میکروفونی می‌گوییم. یک آرایه میکروفونی شامل تعدادی میکروفون قرار گرفته به صورتی مشخص در فضا است که با کمک یک وسیله پردازشی مثلاً کامپیوتر، اطلاعات هر میکروفون را به صورت سنکرون دریافت و پردازش کند. پردازش سیگنال‌های صوتی موجود در محیط به وسیله آرایه‌ی میکروفونی توجه ویژه‌ای را به خود معطوف کرده است، هرچند استفاده از سیستم‌های سونار در مکان‌یابی زیردریای استفاده‌های بیشتری دارد. در حالی که استفاده از آرایه میکروفونی برای کاربردهای نظامی، مانند مکان‌یابی و یا شناسایی وسایل نقلیه، هلیکوپتر، تک تیرانداز و غیره به اثبات رسیده است، اما شاید موفقیت بیشتر این سیستم‌ها طبق آمار در کاربردهای صنعتی و تجاری به ویژه مواردی که مربوط به بهبود گفتار یا افزایش دقت مکان‌یابی است، باشد. به عنوان مثال، توانایی آرایه میکروفونی برای قراردادن یک منبع صوتی مانند یک سخنران، استخراج یک سیگنال صوتی در یک محیط پر سروصدا و پرنعکاس و یا سنتز زمینه‌های مختلفی صدایی به استفاده از آنها در سیستم‌های ویدئو کنفرانس پیشرفته، سیستم‌های ارتباطی "هندزفری"<sup>۱</sup>، مراقبت از فعالیت‌های مجرمانه و شبیه سازی آکوستیک سالن‌های کنسرت برای اطلاع از درستی کارکرد منابع صوتی، منجر شده است.

---

<sup>۱</sup> Hands-free



شکل ۱-۱ - نمونه یک آرایه میکروفونی

## ۱.۱ پردازش آرایه‌ای

امروزه پردازش سیگنال‌های آرایه‌ای نقش مهمی در کاربردهای متنوع صنعتی، تجاری و نظامی دارند. اکثر سیستم‌های راداری و سوناری پیشرفته از آرایه‌هایی شامل آنتن‌ها یا میکروفون‌ها به عنوان یک بخش اساسی سیستم بهره می‌برند. در سیستم‌های مخابراتی و بی‌سیم فراوانی از آرایه‌های افقی یا آنتن‌های چند پرتویی برای دستیابی به ظرفیت مطلوب سیستم استفاده می‌کنند. در لرزه‌نگاری، برای کشف منابع نفت، آشکارسازی آزمایش‌های هسته‌ای زیرزمینی و بعضی از روش‌های تشخیص پزشکی و درمانی از آرایه‌ها استفاده می‌گردد. با توجه به روند رو به رشد کاربردهای پردازش سیگنال‌های آرایه‌ای اهمیت این موضوع بیش از گذشته نمایان شده است.

در پردازش آرایه‌ای چهار فرض مهم و اساسی وجود دارد. فرض اول این است که در یک محیط همسانگرد و غیرپراکنده انتشار امواج به صورت یکنواخت و در تمامی جهات وجود دارد. فرض دوم این است که برای پردازش آرایه‌ای با فرض میدان دور، شعاع انتشار امواج بسیار بیشتر از اندازه المان آرایه است و انتشار موج به صورت تخت وجود دارد. فرض سوم این است که سیگنال اصلی و سیگنال نویز محیط

دارای میانگین صفر هستند و بین آنها ناهمبستگی وجود دارد. در نهایت، آخرین فرض بر این است که بین سیگنال‌ها کوپلینگ وجود نداشته باشد و اصطلاحاً کالیبراسیون دقیق باشد.

هدف نهایی پردازش آرایه‌ای حسگرها آنتن‌ها یا میکروفون‌ها، تخمین مقادیر پارامترهایی با استفاده از اطلاعات موجود زمانی و مکانی، جمع‌آوری شده از طریق نمونه برداری از امواج با مجموعه‌ای از آنتن‌ها یا میکروفون‌هایی که یک ترکیب هندسی دقیقی داشته باشند، است. پردازش مجموعه‌ای از داده‌ها و اطلاعات تحت این فرض که امواج محیطی که توسط تعدادی متناهی از منابع سیگنال تولید و حاوی اطلاعاتی در مورد پارامترهای سیگنال مشخص و قابل ادراک برای سیستم آرایه‌ای موجود است، انجام می‌شود. پردازش سیگنال‌های آرایه‌ای دارای کاربردهای گسترده‌ای است که در ادامه به صورت تیتروار به بیان آن‌ها پرداخته شده است. برای منابع بیشتر به [۱] مراجعه شود.

سیستم‌های راداری و سونار

سیستم‌های مخابراتی وایرلس

سیستم‌های پیشرفته مهندسی پزشکی

پردازش‌های صوتی برای تشخیص گفتار و مکان‌یابی منابع

پردازش‌های آرایه‌ای نجومی با آرایه‌ای از تلسکوپ‌ها و ... .



## ۲ معرفی برخی از آرایه‌های ساخته شده

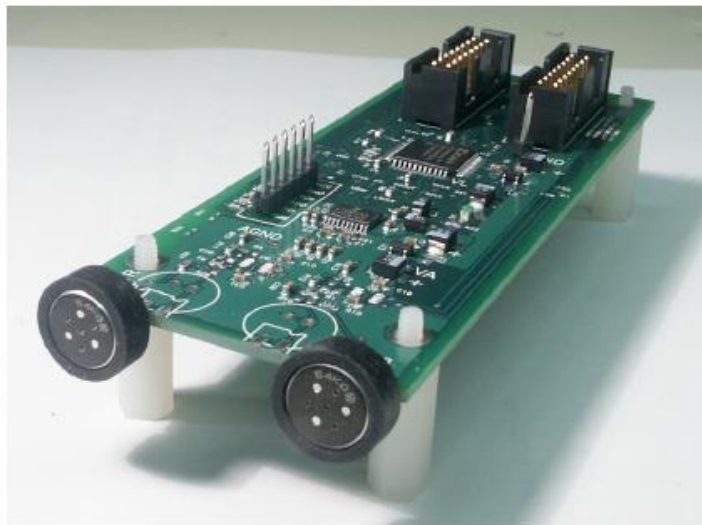
در این فصل تعدادی از آرایه‌های میکروفونی ساخته شده را به منظور آشنایی بیشتر با این نوع از آرایه‌ها بررسی می‌کنیم. از مشخصات مهم یک آرایه میکروفونی می‌توان به نوع و تعداد میکروفون، دقت تبدیل آنالوگ به دیجیتال و نحوه انتقال داده‌ها اشاره کرد. با توجه به این مشخصات و شرایط موجود، می‌توان انتخاب مناسبی برای اجزای مختلف آرایه داشت. به عنوان مثال با توجه به کیفیت صدای مطلوب، میزان نویز محیط نحوه‌ی دریافت اطلاعات میکروفون انتخاب می‌شود. سپس بر اساس میکروفون انتخاب شده مداری مناسب برای تقویت سیگنال خروجی میکروفون طراحی می‌شود. پس از آن با توجه به قدرت ارسال داده‌ها و پردازش آن‌ها، از سیگنال تقویت شده نمونه‌برداری و برای پردازش آماده می‌شود. در ادامه دو نمونه از آرایه‌های ساخته شده معرفی و اجزای مختلف آن بررسی می‌شود.

### ۲.۱ آرایه میکروفونی <sup>1</sup>LOUD

این آرایه [۱] در دانشگاه MIT با ۱۰۲۴ المان ساخته شده است. که شامل ۱۰۲۰ میکروفون به صورت ۵۱۰ برد دارای دو میکروفون می‌باشد. در این پروژه به دلیل تعداد بالای المان‌ها، طراحی بوردهای الکترونیکی بگونه‌ای صورت گرفته است که به صورت لگو<sup>۲</sup> در کنار هم قرار گیرند. هر برد چاپ شده، از دو میکروفون، یک مبدل آنالوگ به دیجیتال دوکاناله و یک تراشه کوچک CPLD تشکیل شده است. تصویر زیر یک برد چاپ شده را نشان می‌دهد.

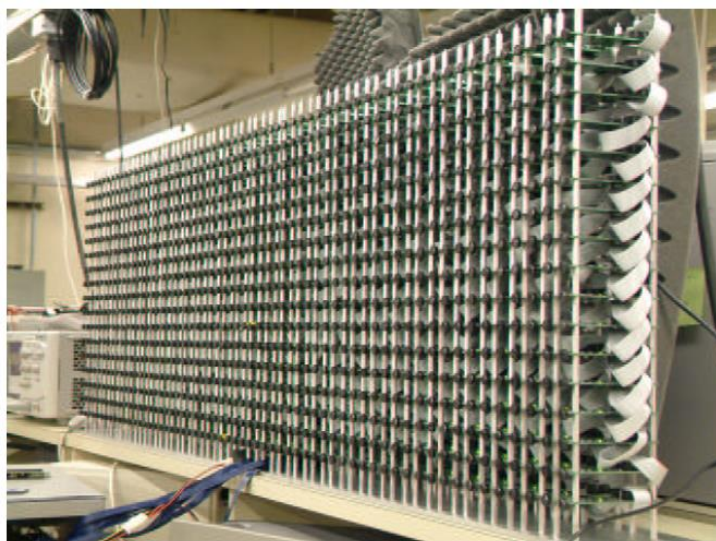
<sup>1</sup> Large acOUstic Data.

<sup>2</sup> LEGO-like.



شکل ۲-۱ - تصویر برد چاپ شده آرایه LOUD

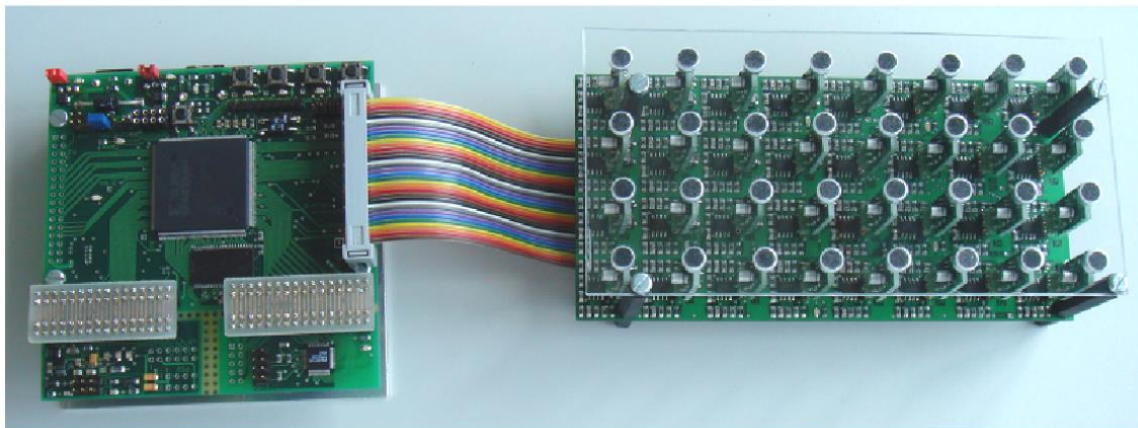
در این برد، از سیگنال آنالوگ تقویت‌شده، با فرکانس ۱۶ کیلوهرتز نمونه‌برداری می‌شود و برای هر میکروفون داده‌های ۲۴ بیتی تولید می‌گردد. به دلیل آنکه تراشه مورد استفاده برای تبدیل آنالوگ به دیجیتال دارای دو ورودی می‌باشد، بر روی هر برد چاپ شده، تنها دو میکروفون قرار گرفته است. و در نهایت این میکروفون‌ها به صورت آرایش ۳۲ در ۱۶ در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند. شکل پایین نمای کلی این پروژه بزرگ را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲ - نمای کلی از پروژه LOUD

## ۲.۲ دوربین اکوستیک<sup>۱</sup> بر پایه FPGA

در این مقاله [۱] با بکارگیری یک آرایه‌ی ۳۲ میکروفونی یک دوربین اکوستیک بر روی FPGA پیاده‌سازی شده است. داده‌های صوتی هر میکروفون پس از تقویت، به صورت دیجیتال تبدیل و پس از آن وارد FPGA می‌شود و پس از پردازش، خروجی نهایی به وسیله پورت VGA بر روی صفحه نمایش نشان داده می‌شود. آرایش میکروفون‌ها در این مقاله ثابت بوده و به صورت ۸ در ۴ می‌باشد. سیگنال خروجی هر میکروفون خازنی با استفاده از تراشه LT1677 تقویت شده و توسط ۴ تراشه CS5368 که یک مبدل آنالوگ به دیجیتال ۸ کاناله می‌باشد. داده‌ها به FPGA منتقل می‌شود. تصویر زیر نشان‌دهنده‌ی آرایه ساخته شده می‌باشد.



شکل ۳-۲ دوربین اکوستیک با ۳۲ میکروفون

<sup>۱</sup>Acoustic Camera.

### ۳ ساخت آرایه میکروفونی

در این فصل به چگونگی ساخت آرایه میکروفونی می‌پردازیم. همانطور که در فصل قبل اشاره شد، یک آرایه میکروفونی باید سیگنال صوتی را با نرخ مناسب نمونه‌برداری کرده و داده‌های مربوط به هر المان (میکروفون) را برای پردازش آماده کند. برای ساخت آرایه میکروفونی ۱۶ المانه مورد نظر، از ۸ برد الکترونیکی جداگانه که بر روی هر کدام دو میکروفون با فاصله‌ی ۳ سانتی‌متر از هم قرار گرفته‌اند، استفاده می‌کنیم. در هر برد الکترونیکی از دو میکروفون خازنی<sup>۱</sup> برای تبدیل سیگنال صوتی به سیگنال الکتریکی استفاده شده است و سپس با استفاده از تراشه MAX4469 سیگنال الکتریکی را تقویت کرده و پس از آن به وسیله‌ی مبدل آنالوگ به دیجیتال ۲۴ بیتی CS5340 از سیگنال تقویت شده نمونه‌برداری می‌کنیم. این برد توسط کابل فلت به برد واسط متصل می‌شود. برد واسط به گونه‌ای طراحی شده است که بر روی برد پازج-۱ که در آن از تراشه xc6slx9 از خانواده spartan6 استفاده شده است، قرار گیرد و امکان اتصال ۸ برد الکترونیکی را به FPGA فراهم آورد. داده‌های دیجیتال توسط FPGA خوانده می‌شود و بعد از جمع‌آوری داده‌های تمامی المان‌ها، این اطلاعات از طریق پورت USB به کامپیوتر انتقال داده می‌شود. برای ساده‌سازی کاربری این آرایه میکروفونی، در نرم‌افزار MATLAB تایی نویخته شده تا اطلاعات ارسالی توسط FPGA را دریافت کند و پس از تفکیک اطلاعات مربوط به هر المان را در خروجی برگرداند.

---

<sup>۱</sup> Electret Microphone.

### ۳.۱ انتخاب میکروفون

همانطور که می‌دانیم میکروفون حسگری است که صدا را به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل می‌کند. میکروفن‌ها کاربردهای زیادی در تلفن، ضبط صوت، سمعک، مهندسی صوت، تلفن‌های رادیویی خصوصی (همانند واکي تاکي اما در مسافت‌های بیشتر)، بلندگوهای دستی، ضبط صدا در رایانه‌ها، سیستم‌های تشخیص گفتار و نیز کاربردهای غیر صوتی (خارج از محدوده شنوایی انسان) از ۲۰ تا ۲۰۰۰۰ کیلو هرتز) مانند بررسی فراصوت و سیستم‌های عیب‌یابی دارند. امروزه بیشتر میکروفن‌ها از سیستم‌های الکترومغناطیسی (میکروفن‌های پویا)، تغییر گنجایش خازنی (میکروفن‌های خازنی)، تنش پیزوالکتریسته و سوارسازی<sup>۱</sup> نوری برای تولید سیگنال الکتریکی از امواج مکانیکی بهره می‌برند. در ادامه به اختصار عملکرد انواع میکروفون‌ها را بررسی می‌کنیم.

#### ۳.۱.۱ میکروفون‌های ذغالی (کربن دار)

میکروفون‌های ذغالی از یک مخزن ذرات ذغال تشکیل شده است، روی ذرات ذغال شاخکی قرار دارد که به دیافراگم یا ممبران متصل است که اگر در مقابل این ممبران صوت ایجاد کنیم مرتعش می‌گردد. در نتیجه مقاومت الکتریکی مجموعه مخزن تغییر می‌یابد و مشاهده می‌کنیم که متناسب با همان تغییرات فشار وارده روی ممبران جریان  $I$  که از مدار عبور می‌کند تغییر می‌یابد. این ساده‌ترین و ارزانه‌ترین میکروفون است که از سال ۱۹۸۴ تا کنون از آن استفاده می‌شود. این میکروفون دارای بازده با راندمان زیادی است. بنابراین بدون طبقات تقویت‌کننده می‌توان از آن استفاده نمود. ولی در شرایط حرفه‌ای از آن استفاده نمی‌شود چون از نظر پهنای باند فرکانسی مطلوب نمی‌باشد یعنی پهنای باند آن وسیع نیست و کیفیت مطلوب و خوبی را دارا نمی‌باشد بنابراین از آن فقط برای انتقال سخن در تلفن و در رادیو فقط در ارتباطات داخلی بین افراد استفاده می‌شود.

میکروفون ذغالی از لحاظ پاسخ فرکانسی<sup>۲</sup> دارای دو اشکال اساسی و مهم می‌باشد:

<sup>۱</sup> Modulation.

<sup>۲</sup> Frequency Response.

- پهنای باند فرکانسی آن محدود است به این ترتیب که در فرکانس‌های بالا و پایین محدودیت دارد. پهنای باند فرکانسی این میکروفون بین ۳۰۰ هرتز تا ۳۵۰۰ هرتز می باشد.
- همین عرض باند نیز خطی نیست. منظور از خطی نبودن همان تغییرات سطح دامنه باند فرکانسی نیز می باشد. همانطور که بیان شد از این میکروفون در صنعت تلفن استفاده می شود چرا که در این جا، فقط هدف ما رساندن پیام می باشد و کیفیت صدا برای ما مطرح نیست.

### ۳.۱.۲ میکروفون‌های دینامیکی<sup>۱</sup>

میکروفونهای دینامیکی تشکیل شده از یک ممبران از جنس سبک نظیر کاغذ، پلاستیک و یا آلومینیوم که یک سیم‌پیچ به ممبران (دیافراگم) متصل است و این سیم‌پیچ می تواند در داخل شکاف قطبین یک آهن‌ربا حرکت نماید. بنابراین وقتی که فشار صوتی روی این ممبران وارد می آید، ممبران و در نتیجه سیم پیچ متصل به آن با همان ریتم تغییرات صوتی نوسان می نمایند، در نتیجه یک جریان الکتریکی متناسب با همان ریتم روی سیم‌پیچ القا می گردد. این میکروفون، اولین خانواده میکروفونی است که بطور حرفه ای استفاده می شود و در این میکروفون مغناطیس ثابت و سیم‌پیچ متحرک می باشد. علت اینکه این میکروفون ها در مصارف حرفه‌ای استفاده می شود، داشتن عرض باند خطی وسیع است ولی قیمت آن بسیار گران می باشد. این میکروفون ها نسبت به میکروفون ذغالی راندمان کمتری دارد ولی دارای کیفیت بهتری است و در صنایع حرفه یا مخصوصاً در صدا و سیما بنحو احسن استفاده می گردد و از این میکروفون برای ضبط گفتار استفاده می شود.

حساسیت ولتاژ مدار باز این میکروفون نسبت به میکروفون خازنی و کریستالی از حساسیت کمتری برخوردار می باشد. امپدانس خروجی میکروفون حدود ۱۰ اهم است که نسبت به میکروفونهای خازنی و کریستالی خیلی ناچیز است و بوسیله ترانسفورماتور بالابرنده ولتاژ، در بدنه میکروفون عمل تطبیق امپدانس را انجام می شود. در ضمن میکروفون الکترو دینامیکی بدون تقویت کننده مقدماتی استفاده می شود و می توان با کابل نسبتاً طولانی سیگنال را از آن انتقال داد. پاسخ فرکانس این نوع میکروفون حدود ۱۰ تا ۱۴ کیلوهرتز می باشد و در ضبط صدای گوینده و تئاتر و ... از آن استفاده می شود.

<sup>۱</sup> Moving Coil Microphone.

### ۳.۱.۳ میکروفونهای الکترومغناطیسی<sup>۱</sup>

این میکروفونها از یک آهن ربای نعلی تشکیل یافته که دور قطبین آن سیم‌پیچ قرار دارد و ممبران آن از جنس فولاد است و وقتی که بر اثر ارتعاشات صوتی ممبران مرتعش می‌گردد صفحه فولاد به دو قطب آهنربا دور و نزدیک می‌شود، بنابراین میدان مغناطیسی در دو قطب تغییر می‌یابد و روی سیم‌پیچ‌ها یک جریان الکتریکی متناسب با ریتم ارتعاشات صوتی القا می‌گردد. نوعی دیگر از این میکروفونها بدین صورت است که بخشی از ممبران را که در برابر قطبهای آهن ربای NS دائمی است با پولکی از آهن ربای نرم می‌پوشانند تا از لرزشهای این پولک آهنی مقاومت مغناطیسی شکاف هوائی را تغییر دهد. بنابراین لرزش ممبران باعث ایجاد جریانی در سیم پیچهای روی آهن ربای می‌گردد. راندمان این میکروفون میکروفونهای دغالی است ولی باند فرکانسی وسیع تری دارد. این میکروفون بعلاوه وزن زیاد آن در حال حاضر استفاده زیادی ندارد. و همچنین وزن زیاد ممبران بازدهی میکروفون را در فرکانسهای بالا کاهش می‌دهد.

### ۳.۱.۴ میکروفونهای پیزوالکتریک<sup>۲</sup>

بلور کوارتز دارای خاصیت پیزوالکتریک است و در مقابل حرارت پایدار و بصورت خطی کار می‌نماید. از این رو در الکتروآکوستیک از آن برای ساختن میکروفون و بلندگو استفاده می‌شود. نوع بلوری که بیشتر بکار می‌رود بلور با برش X نامیده می‌شود. میکروفون کریستالی، میکروفونی می‌باشد که در آن از خاصیت پیزوالکتریک بعضی از کریستال‌ها استفاده می‌شود بدین معنی که تغییرات فشار وارد بر روی این نوع کریستال جریان متناوبی متناسب با فشار وارده در دو سر کریستال ایجاد می‌کند. فشار صوت می‌تواند مستقیماً بر صفحه کریستال تأثیر بگذارد و یا به یک ممبران فلزی وارد شود و حرکات ممبران بوسیله میله‌ای که در پشت آن قرار دارد به کریستال منتقل شود. که البته نوع دوم دارای بازده بیشتری در حدود یک تا دو میلی‌ولت بر میکروبار می‌باشد. از میکروفون پیزوالکتریک تا ۸ سال پیش در ضبط صوتهای خانگی استفاده میشد. ولی هم اکنون دیگر استفاده نمی‌شود زیرا پهنای باند آن حدود ۷ تا ۸ کیلوهرتز می‌باشد که پهنای باند آن کم است. نوع دوم میکروفون که ارتعاشات صوت توسط دیافراگم به

<sup>1</sup> Moving Magnet Microphone.

<sup>2</sup> Pizo electric Mic.

کریستال منتقل می شود و اختلاف پتانسیل دریافتی در خروجی زیاد می شود ولی پهنای باند نوار فرکانس نسبت به حالت اول کمتر می باشد. پهنای باند نوار پاسخ فرکانسی میکروفون کریستالی بین ۲۰ تا ۱۰۰۰۰ هرتز که حدود ۵ دسی بل نسبت به حساسیت متوسط تغییرات دارد. حساسیت متوسط میکروفون ۵۰ دسی بل برای یک ولت در هر میکروبار است.

### ۳.۱.۵ میکروفون های خازنی<sup>۱</sup>

میکروفون خازنی (الکترواستاتیک یا الکتروکاندستور)، میکروفونی است که از یک صفحه ثابت و یک صفحه متحرک که بعنوان دو جوشن یک خازن عمل می کند تشکیل شده است. اگر در مدار خازن یک ولتاژ و یک مقاومت قرار دهیم خازن شارژ می شود حال اگر ارتعاشات صوتی به صفحه متحرک (ممبران) وارد آید فاصله دو جوشن تغییر می نماید، بنابراین ظرفیت خازن متغیر می شود و در نتیجه جریان در مدار تغییر می نماید. با عبور جریان از مقاومت در دو سر این مقاومت یک ولتاژ الکتریکی ظاهر می شود به این وسیله توانسته ایم تغییرات فشار صوتی را به تغییرات فشار الکتریکی تبدیل نمائیم. هرگاه در عمل ضبط صدا بهترین کیفیت ممکن مورد نظر باشد، می توان از میکروفون های خازنی استفاده نمود. چون حرکت دیافراگم آن با جرم بسیار کم می تواند در برابر کوچکترین ارتعاشات، پاسخ سریع<sup>۲</sup> بدهد. و حتی این میکروفون می تواند آنقدر سریع عمل کند که صدای ضربه کوچک<sup>۳</sup> را مانند صدای یک جرقه و یا خزیدن مار بر روی برگها را دریافت نماید، و این یکی از دلایل برتری میکروفون الکترواستاتیک بر الکترودینامیک است. میکروفون الکترواستاتیک (خازنی) باعث می شود که صدای ترجمه شده یا تبدیل شده خیلی نزدیک به صدای اصلی باشد ولی میکروفون الکترودینامیک صدا را تیره می سازد.

توصیه خیلی مهم در باره این میکروفون ها آن است که به دلیل نازک بودن ممبران آن، نباید در ضبط انفجارات و صداهای شدید از آن استفاده نمود. چون این عمل باعث کاهش حساسیت آن و یا پاره شدن ممبران آن می گردد. همچنین بعلت امیدانس زیاد و راندمان کم میکروفونی خازنی دامنه سیگنال

<sup>۱</sup> Electret Condenser Microphones.

<sup>۲</sup> Transient Response.

<sup>۳</sup> Impulse.



خروجی ضعیف است بطوریکه مدار تقویت کننده الکترونیکی در بدنه میکروفون و در میکروفونهای یقه‌ای در بیرون آن تعبیه می‌شود.

معمولاً در طراحی میکروفون خازنی سعی می‌شود برای پهنه‌ی وسیعی از فرکانس طراحی شود. برای این منظور بایستی ضریب کشش دیافراگم را زیاد نمود و جرم آنرا کم انتخاب کرد. در نتیجه میکروفون دارای پاسخ فرکانسی وسیع می‌شود. البته راندمان آن با زیاد کردن ضریب کشش، کاهش می‌یابد که بوسیله مدار تقویت کننده الکترونیکی به اندازه کافی تقویت می‌شود. پاسخ فرکانسی در بازه‌ی ۲۰ تا ۲۰۰۰۰ هرتز خطی است و از این میکروفون برای ضبط موسیقی در استودیوها و آزمایشگاههای تحقیقاتی آکوستیک استفاده می‌شود. بنابراین برتری‌های میکروفون الکترواستاتیک عبارتند از:

- وسیع بودن پهنای باند
  - خطی بودن پهنای باند
  - پاسخ سریع در برابر ارتعاشات ضربه‌ای
  - سطح نویز آنها خیلی پایین است (سطح نویز یک میکروفون ناشی از الکترون‌هایی است که در اثر برخورد به یکدیگر در عنصر مورد نظر (میکروفون) ایجاد می‌شود).
- از معایب میکروفونهای خازنی می‌توان به احتمال خرابی در برابر حرارت، دود سیگار، گرد و غبار و دخانیات، رطوبت و ... و همچنین آسیب‌پذیری در مقابل ضربه اشاره کرد.
- میکروفون‌های خازنی به دو دلیل احتیاج به منبع تغذیه دارند که در حالت کلی عیب محسوب می‌شود. خازن برای عملکرد احتیاج به شارژ دارد تا تغییر فاصله بین جوشن‌ها باعث ایجاد یک جریان متغیر و این جریان متغیر در دو سر یک مقاومت تشکیل یک ولتاژ متغیر می‌دهد. و همین‌طور از آنجا که امپدانس خروجی این میکروفون زیاد است ولتاژ بسیار ناچیزی در خروجی را بیشتر از چند میلی‌متر نمی‌توان منتقل کرد. پس احتیاج به یک پیش تقویت کننده<sup>۱</sup> داریم. که با بهترین طراحی بعد از کپسول قرار می‌گیرد. البته امروزه میکروفون خازنی بدون منبع تغذیه نیز ساخته شده بطوریکه در فاصله دو جوشن ماده‌ای قرار دارد که بطور دائم بار الکتریکی در آن وجود دارد (الکتروولت) و بر اثر فشار صوت اختلاف پتانسیل در دو جوشن آن تغییر می‌کند.

<sup>۱</sup> Pre Amplifier.

مطلبی که باید به آن توجه کرد آن حساسیت میکروفون‌های الکترواستاتیک در مقایسه با میکروفون‌های الکترودینامیک در برابر ارتعاشات مکانیکی زیاد است بنابراین در جایی که باید میکروفون را حرکت داد بهترین راه این است که از میکروفون‌های الکترودینامیک استفاده کرد. مگر در مواقعی که واقعاً احتیاج به کیفیت خوب در صدابرداری باشد. میکروفون‌های الکترواستاتیک گاهی اوقات در یک محفظه از نظر مکانیکی عایق می‌شوند و ارتعاشات مکانیکی به آنها منتقل نمی‌شود. حساسیت میکروفون‌های خازنی نسبت به وزش باد خیلی بیشتر از میکروفون‌های الکترودینامیک است.

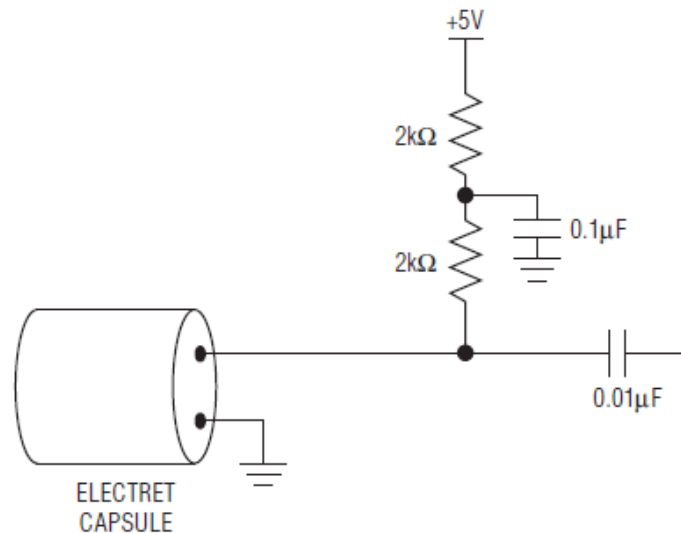
با توجه به توضیحات بیان شده در مورد انواع میکروفون‌ها، میکروفون‌های خازنی سیگنال خروجی قابل اعتمادتری دارند و نیز به دلیل آنکه پاسخ آن‌ها در تمامی جهات یکسان می‌باشد (همه جهته<sup>۱</sup>)، برای استفاده در این پروژه مناسب می‌باشد. در دلایل دیگر انتخاب این نوع میکروفون می‌توان به ارزان قیمت بودن آن‌ها و همچنین در دسترس بودن آن در بازار اشاره کرد.

---

<sup>۱</sup> Omnidirectional.

### ۳.۲ مدار پیش تقویت کننده<sup>۱</sup>

از آن جا که میکروفون مورد استفاده در این پروژه از نوع خازنی می باشد، بر طبق توضیحات بخش قبل علاوه بر مدار بایاس برای راه اندازی میکروفون، نیازمند یک مدار پیش تقویت کننده برای افزایش سطح سیگنال به مقدار مطلوب می باشیم. مدار بایاس بسیار ساده بوده و همانند شکل زیر می توان میکروفون های خازنی را بایاس نمود.



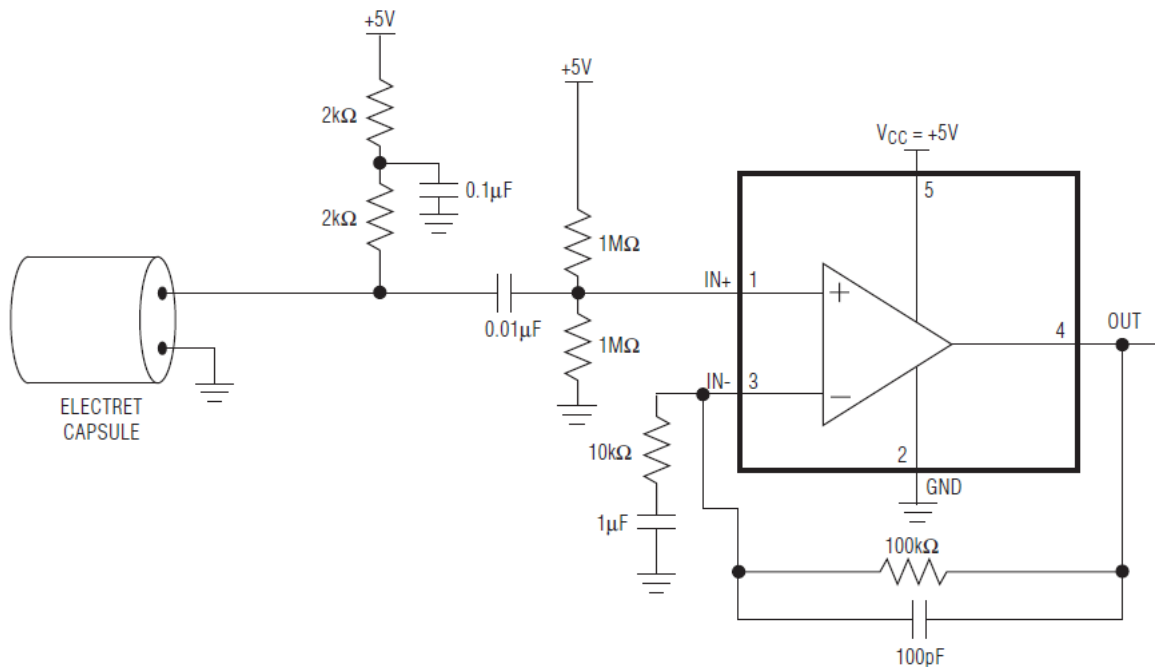
شکل ۳-۱ - مدار بایاس میکروفون

برای کاهش نویزپذیری سیگنال خروجی میکروفون، مدار پیش تقویت کننده را بلافاصله پس از مدار بایاس میکروفون قرار می دهیم. همانطور که در بخش های قبل توضیح داده شد این آرایه میکروفونی از ۸ زوج میکروفون تشکیل شده که هر سیگنال هر زوج میکروفون بر روی یک مدار جداگانه تقویت می شود. برای پیاده سازی مدار تقویت کننده می توان از دو روش استفاده کرد. طراحی مدار تقویت کننده توسط المان های گسسته و یا استفاده از تراشه های تقویت کننده عملیاتی<sup>۲</sup>. در نگاه اول طراحی مدار گسسته

<sup>۱</sup> Pre Amplifier.

<sup>۲</sup> Operational Amplifier.

درجه آزادی بیشتری را برای ما فراهم می‌کند. اما حجم و پیچیدگی مدار را نیز به شدت افزایش می‌دهد. به همین منظور از تراشه MAX4469 که دارای دو تقویت‌کننده عملیاتی در یک بسته‌بندی برای تقویت زوج میکروفون موجود بر روی هر برد استفاده شده است. این تراشه یک تقویت‌کننده عملیاتی با توان مصرفی بسیار پایین می‌باشد که برای کاربرد به عنوان پیش‌تقویت‌کننده میکروفون بهینه‌سازی شده است. همچنین این تراشه دارای بهره ثابت و پایدار و پهنای باند بهره آن برابر ۲۰۰ کیلوهرتز است. به دلیل آنکه در این تراشه ۸ پایه دو تقویت‌کننده در قالب SOT23 گنجانده شده است، حجم مدار به صورت قابل توجهی کاهش یافته است. در شکل زیر مدار پیشنهادی موجود در دیتاشیت مربوط به تقویت‌کننده آورده شده است.



شکل ۳-۲ - مدار بایاس میکروفون

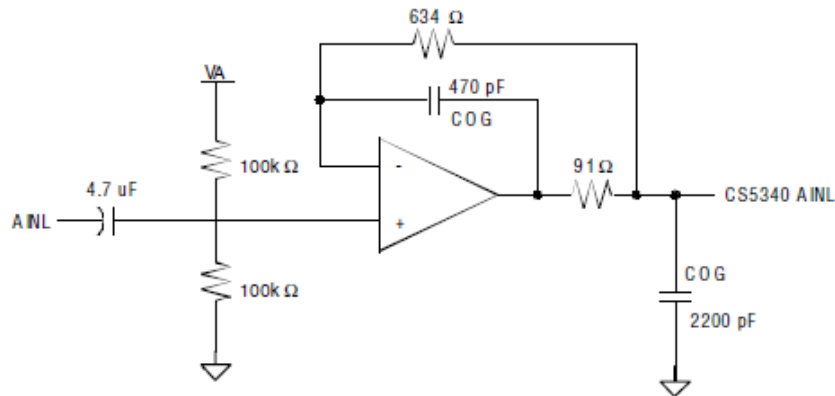
همانطور که در شکل مشاهده می‌شود متوسط سیگنال خروجی میکروفون با استفاده از خازن  $0.01\mu F$  حذف می‌شود. سپس با استفاده از مقاومت‌های  $1M\Omega$  سیگنال صوت را به حوالی ۲٫۵ ولت منتقل می‌کنیم. سپس با استفاده از فیلتر مرتبه دو فعال، سیگنال را تقویت می‌کنیم. بهره‌ی این مدار ۱۰ در نظر گرفته شده است. اما با تغییر مقاومت  $100k\Omega$  می‌توان بهره‌ی مدار را نیز تغییر داد. به طور کلی به دلیل آنکه مدار مبدل آنالوگ به دیجیتال نیز بلافاصله پس از مدار پیش‌تقویت‌کننده قرار داده شده است، نیازی به تقویت چندانی نداریم.

### ۳.۳ مدار مبدل آنالوگ به دیجیتال

در این بخش به توضیح درباره‌ی تبدیل سیگنال تقویت شده آنالوگ به یک سیگنال دیجیتال قابل دریافت توسط FPGA می‌پردازیم. می‌دانیم که سیگنال صوتی در بازه صفر تا ۵ ولت تغییرات دارد و هم‌چنین هر دو میکروفون در کنار هم بر روی یک برد ثابت شده‌اند. به همین منظور یک مبدل آنالوگ به دیجیتال دو کاناله که قابلیت تبدیل سیگنال بین صفر تا ۵ ولت را داشته باشد برای ما کفایت می‌کند. تراشه CS5340 یک مبدل آنالوگ به دیجیتال برای سیستم‌های صوتی دیجیتال می‌باشد که پس از نمونه‌برداری از سیگنال آنالوگ، تبدیل آن به دیجیتال و اعمال فیلتر آنتی‌الیاسینگ، مقادیر ۲۴ بیتی را برای هر کدام از ورودی‌های چپ و راست (سیگنال‌های صوتی) در قالب سریال با حداکثر نرخ نمونه‌برداری 200kHz برای هر کانال فراهم می‌کند. این تراشه از یک مدولاتور چند بیتی سیگما-دلتا مرتبه پنجم استفاده می‌کند. داده‌های خروجی از استاندارد I2S پشتیبانی می‌کنند.

#### ۳.۳.۱ سخت‌افزار مورد نیاز CS5340

برای استفاده از تراشه CS5340 نکاتی را باید رعایت کرد، ابتدا ولتاژ تغذیه اعمال شده به این تراشه باید به میزان قابل قبولی تثبیت شده باشد، به همین جهت از خازن‌های  $1\mu F$  و  $100nF$  برای کاهش اثرات نویز بر ولتاژ تغذیه و تثبیت آن استفاده شده است. هم‌چنین به دلیل آنکه تضعیف در فرکانس‌های پایین فیلتر درون تراشه قابل تنظیم باشد، خازن مورد نیاز آن از بیرون به تراشه متصل می‌گردد. در اینجا ما با اتصال یک خازن  $1\mu F$ ، میزان این تضعیف را در فرکانس ۳۰ هرتز به میزان  $-80dB$  تنظیم کردیم. و در نهایت با توجه به اینکه مدولاتور آنالوگ این تراشه در فرکانس  $6.144MHz$  از ورودی نمونه‌برداری می‌کند. فیلتر دیجیتال تضعیفی بر سیگنال‌هایی در این فرکانس و یا در فرکانس‌هایی که مضارب صحیحی از  $6.144MHz$  هستند، نخواهد داشت، علاوه بر آن برای انجام عمل تطبیق امپدانس برای مدولاتور از مدار بافری که در زیر آورده شده است، استفاده کردیم.



شکل ۳-۳ - مدار بافر قبل از ورودی تراشه CS5340

این تراشه از دو نوع ارتباط I2S و LF<sup>۱</sup> برای انتقال داده استفاده می‌کند. به دلیل آنکه ما در استاندارد I2S داده‌ها را دریافت می‌کنیم، پایه SDOUT از تراشه با یک مقاومت به ولتاژ تغذیه متصل شده است.

### ۳.۳.۲ رابط I2S<sup>۲</sup>

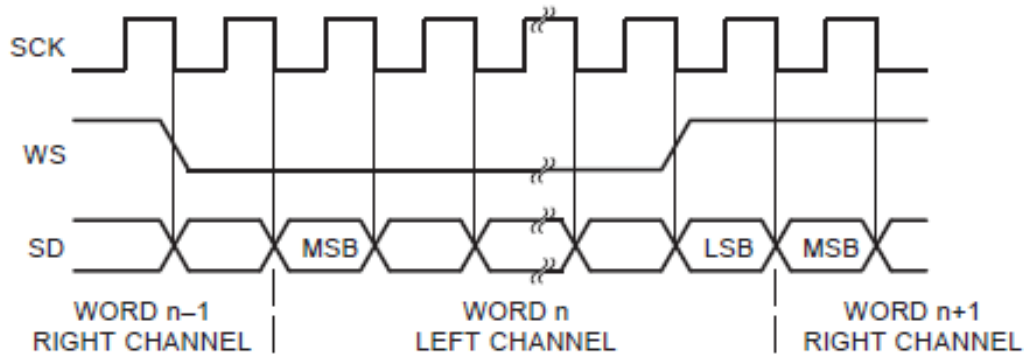
بسیاری از سیستم‌های صوتی دیجیتال نظیر دیسک‌های فشرده، پردازنده‌های صوتی دیجیتال، گیرنده‌های دیجیتال و ... به بازار عرضه شده‌اند. این سیستم‌ها توسط بسیاری از تراشه‌ها همانند مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال، مبدل‌های دیجیتال به آنالوگ، پردازنده‌های صوتی دیجیتال و فیلترهای دیجیتال بر روی سیگنال‌های صوتی دیجیتال پردازش انجام می‌دهند. ایجاد یک ساختار ارتباطی استاندارد شده، قابلیت انعطاف اینگونه سیستم‌ها را بسیار افزایش می‌دهد. به همین منظور، رابط I2S به منظور ارتباط سریال مخصوص سیگنال‌های صوتی توسعه داده شد.

بدین صورت که گذرگاه داده در این رابط، تنها شامل داده‌های سیگنال می‌باشد و سیگنال‌های کنترلی به صورت جداگانه دریافت و ارسال می‌گردد. برای کاهش تعداد پایه‌های لازم و ساده‌سازی اتصالات برای ارتباط در این استاندارد از ۳ سیم استفاده می‌شود. یک سیم برای انتقال داده‌های دو کانال به صورت

<sup>۱</sup> Left Justified.

<sup>۲</sup> Inter-IC Sound.

مالتی پلکس شده، سیم دیگر برای انتخاب کانال و یک سیم نیز برای سیگنال کلاک نیاز داریم. در تصویر زیر نمونه‌ی ارتباط را مشاهده می‌کنیم.



شکل ۳-۴ - نحوه انتقال دیتا در رابط I2S

همانطور که در شکل مشخص است در لحظات وقوع لبه‌های بالارونده و پایین‌رونده سیگنال WS، داده‌ی مربوط به کانال مربوطه به صورت سریال بر روی گذرگاه قرار می‌گیرد. سطح سیگنال WS تعیین‌کننده آن است که داده قرار گرفته بر روی گذرگاه مربوط به کدام کانال ورودی می‌باشد.

- اگر  $WS = 1$  باشد، داده مربوط به کانال ۲ و یا کانال راست می‌باشد.
- اگر  $WS = 0$  باشد، داده مربوط به کانال ۱ و یا کانال چپ می‌باشد.

توضیحات بیشتر در زمینه‌ی این رابط سریال در ضمیمه ۳ آورده شده است.

### ۳.۳.۳ نحوه دریافت داده از تراشه CS5340

همانطور که گفته شد، در این پروژه از FPGA برای دریافت اطلاعات هر میکروفون و انتقال آن به کامپیوتر استفاده می‌شود. ابتدا دریافت اطلاعات از یک جفت میکروفون را بررسی می‌کنیم.

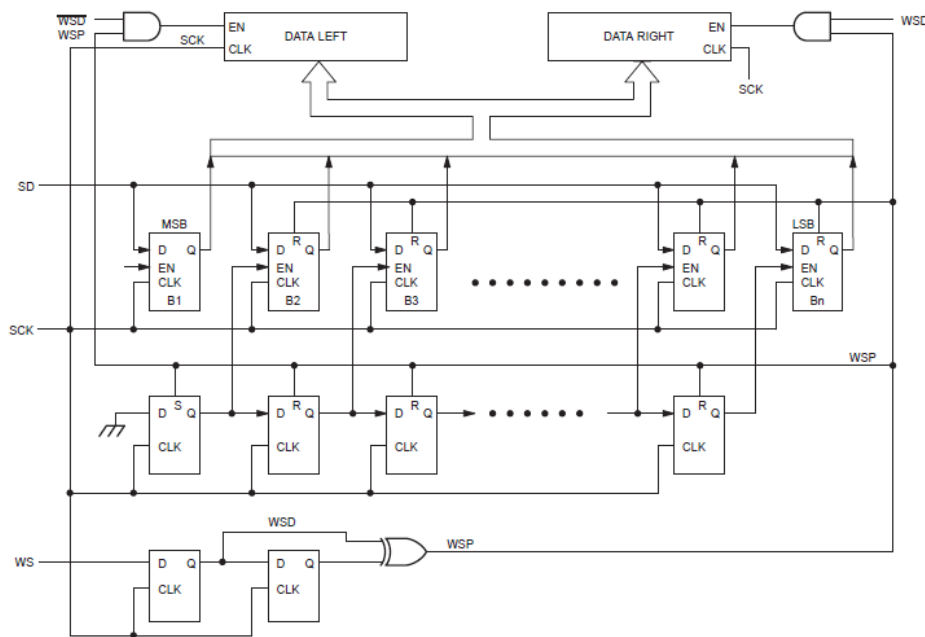
برای دریافت داده از تراشه CS5340، باید سیگنال‌های مورد نیاز را توسط FPGA تولید کنیم. مطابق با جدول زیر فرکانس مورد نظر برای سیگنال MCLK تعیین می‌گردد.

جدول ۳-۱ - تعیین فرکانس سیگنال  $MCLK$ 

فرکانس سیگنال $MCLK$	نرخ نمونه برداری ( $kHz$ )
۸,۱۹۲	۳۲
۱۱,۲۸۹۶	۴۴,۱
۲۲,۵۷۹۲	
۱۲,۲۸۸	۴۸
۲۴,۵۷۶	
۸,۱۹۲	۶۴
۱۱,۲۸۹۶	۸۸,۲
۲۵,۵۷۹۲	
۱۲,۲۸۸	۹۶
۲۴,۵۷۶	
۱۲,۲۸۸	۱۹۲
۲۴,۵۷۶	

فرکانس سیگنال  $SCK$  نیز برابر  $1MHz$  انتخاب می‌کنیم و برای تولید سیگنال  $LRCLK$  (یا همان  $WS$ ) از آنجا که هر نمونه ۲۴ بیت است، سیگنال  $SCK$  را بر ۲۵ تقسیم می‌کنیم. اکنون که سیگنال‌های مورد نیاز ساخته شده‌اند، باید داده‌ها را از مبدل دریافت کنیم. طرح زیر ساختار یک گیرنده که در آن از یک شیفت رجیستر  $n$  بیتی استفاده شده است، نشان می‌دهد.





شکل ۳-۵- ساختار یک گیرنده در رابط I2S

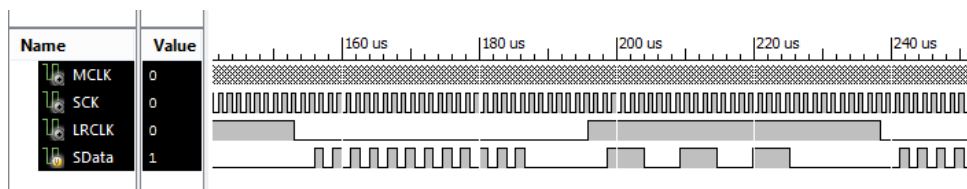
گیرنده فوق را بر روی FPGA پیاده سازی می‌کنیم. کد مربوط به این قسمت در قالب ماژول ADC\_read آورده شده است. در این ماژول علاوه بر تولید سیگنال‌های مورد نیاز تراشه CS5340، داده‌های هر دو میکروفون را به صورت یک ثابت ۶۴ بیتی به عنوان خروجی تحویل می‌دهد. به گونه‌ای که به ترتیب ۲۴ بیت مربوط به میکروفون سمت چپ و ۸ بیت مربوط به شماره میکروفون سپس ۲۴ بیت مربوط به داده میکروفون سمت راست و ۸ بیت نیز مربوط به شماره میکروفون سمت چپ می‌باشد.

### ۳.۴ ارسال داده‌های دریافتی به کامپیوتر

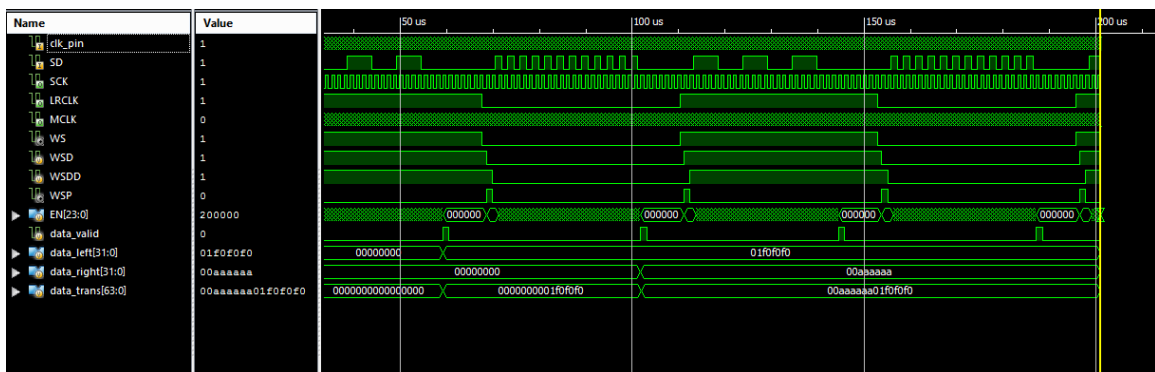
حال با فراخوانی ماژول ADC\_read می‌توان اطلاعات هر زوج میکروفون را دریافت کرد. به دلیل حجم بالای اطلاعات، نیازمند یک ارتباط پر سرعت بین FPGA و کامپیوتر هستیم. برای این منظور از تراشه FT2232H موجود بر روی برد پازج-۱ بکار گرفته شده در این پروژه، استفاده می‌کنیم. و یک ارتباط USB با نرخ  $8\text{ MB/sec}$  بین FPGA و کامپیوتر برقرار می‌کنیم [۱]. با توجه به اینکه داده‌ها بایت به بایت ارسال می‌شود. باید مجموعه‌ی داده‌ها را بایت به بایت به ماژول ارسال داده اعمال کنیم. کد مربوط به این ماژول نیز با نام data\_to\_byte در ضمیمه ۴ آورده شده است.

### ۳.۵ شبیه‌سازی دریافت داده از مبدل CS5340 و آماده‌سازی برای ارسال به کامپیوتر

برای ایجاد اطمینان از برنامه‌ی نوشته شده، نیازمند شبیه‌سازی آن هستیم. به همین منظور برنامه‌ای نوشته‌ایم تا با دریافت سیگنال‌های MCLK، SCK و LRCLK داده‌هایی را بر طبق استاندارد I2S ارسال کند. کد مربوط به این فرستنده، در ضمیمه ۴ در قسمت ADC\_testbench آورده شده است. در ادامه نتایج مربوط به ماژول‌های نوشته شده برای خواندن داده‌ها و ارسال آن‌ها مشخص می‌باشد.



شکل ۳-۶- نتایج شبیه‌سازی فرستنده I2S



شکل ۳-۷- نتایج شبیه‌سازی ماژول ADC\_read

## منابع و مراجع

- [١] Murat Torlak, *Signal and Image Processing Seminar*, “Signal Array Processing”, 2009
- [٢] <http://groups.csail.mit.edu/cag/mic-array/>
- [٣] <http://ieeexplore.ieee.org/document/5537298/>