



به نام خدا

وزارت ارتباطات و فناوری اطلاعات
اداره کل ارتباطات و فناوری اطلاعات استان اصفهان
دفتر مطالعات فناوری

رادیو نرم افزاری

اردیبهشت ماه ۱۳۹۵

«هرگونه استفاده و نشر مطالب این گزارش، با ذکر منبع بلامانع است»

فهرست مطالب

صفحه:	عنوان:
۲	۱- مقدمه.....
۳	۲- رادیو نرم افزاری.....
۵	۳- مراتب رادیو نرم افزاری.....
۷	۴- مزایای رادیو نرم افزاری.....
۹	۵- محدودیت های رادیو نرم افزاری.....
۱۰	۶- ابزارهای پیاده سازی رادیو نرم افزاری.....
۱۰	۶-۱- سخت افزار.....
۱۱	۶-۲ نرم افزار.....
۱۳	۷- منابع.....

۱- مقدمه

پیشرفت روز افزون علم و افزایش تقاضا برای ارتباطات بی سیم و در پی آن به وجود آمدن پروتکل های مختلف ارتباطی باعث شده است که نیاز برای یک سیستم مخابراتی که بتواند با پروتکل ها و استانداردهای مختلف کار کند، بیش از پیش احساس شود. واضح است پیاده کردن چنین سیستمی با استفاده از سخت افزار مشکلات زیادی از جمله حجم زیاد و هزینه بالا را در پی خواهد داشت. از طرفی با افزایش قدرت محاسباتی و سرعت پردازنده ها و انعطاف پذیری سیستم های نرم افزاری و دیجیتال، این سیستم ها به سرعت در حال گسترش بوده و جایگزین سیستم های آنالوگ می شوند. یکی از این تغییر و تحولات معرفی مفهومی به نام رادیو نرم افزاری است. با استفاده از رادیو نرم افزاری این امکان بوجود می آید که بجای سخت افزارهای متداول در سیستم های فرستنده و گیرنده، تراشه های پردازنده پرسرعت با اجرا کردن نرم افزار مناسب و پردازش سیگنال دیجیتال نقش آنها را ایفا کنند. به این ترتیب یک سیستم رادیو نرم افزاری می تواند با بکارگیری کدهای نرم افزاری برای استانداردهای مخابراتی مختلف و باندهای فرکانسی مختلف بکار گرفته شود. در عین حال هزینه تولید و ارتقاء سیستم و خدمات برای تولید کننده دستگاه های فرستنده و گیرنده و همچنین برای اپراتورها کاهش می یابد.

رادیو نرم‌افزاری اولین بار در سال ۱۹۹۱ توسط جوزف میتولا^۱ مطرح گردید و اولین مقاله درباره آن در سال ۱۹۹۲ توسط وی منتشر شد. از آن تاریخ به بعد، با گسترش فناوری‌های سخت‌افزاری و فنون پیاده‌سازی نرم‌افزاری، گستره‌ی پژوهش‌های رادیو نرم‌افزاری رو به فزونی نهاده است. امروزه بسیاری از سیستم‌های فرستنده و گیرنده از جمله تلفن‌های موبایل براساس اصول این فناوری طراحی و به بازار عرضه می‌شوند. بکارگیری نرم‌افزار در ساختار سیستم رادیو امکان هوشمندسازی رفتار رادیو را در ابعاد مختلف فراهم می‌کند. برای مثال سیستم رادیویی می‌تواند براساس تغییرات و شرایط محیطی به نوعی عمل کند که به سرعت بر اساس نیازهای مختلف کاربر خود واکنش مناسب نشان داده و افزایش بهره‌وری در بکارگیری طیف فرکانس و مدیریت آن و کاهش هزینه‌های ارتباطی را موجب شود. وجود نرم‌افزار باعث می‌شود همه این بهینه‌سازی‌ها به صورت اتوماتیک و وقفی و بدون دخالت کاربر صورت پذیرد. این گزارش چارچوب‌های کلی رادیو نرم‌افزاری و معماری آن، فناوری مبدل‌های مورد نیاز و ساختارهای پردازشی مورد استفاده را مورد بحث قرار می‌دهد.

۲- رادیو نرم‌افزاری

رادیو وسیله‌ای است که برای انتقال اطلاعات در باند RF^2 ، سیگنال را به صورت بی‌سیم ارسال و دریافت می‌کند. با این تعریف انواع فرستنده‌ها و گیرنده‌های مخابراتی به نوعی یک رادیو هستند. تمام سیستم‌های رادیویی از بخش‌های نسبتاً ثابتی تشکیل شده‌اند، که بسته به نوع و کاربرد، با تفاوت‌هایی در ساختارها ظاهر می‌شوند. به طور کلی رادیوها از اجزاء مشابه شامل آنتن، تقویت‌کننده، میکسر و مدولاتور تشکیل شده‌اند.

رادیوهای قدیمی از نظر کاربرد چندگانه محدودیت دارند. دلیل عمده آن است که در این سیستم‌ها تغییر عملکرد تنها با تغییر سخت‌افزار ممکن است که در نتیجه هزینه‌ی زیادی به سازنده تحمیل شده و انعطاف‌پذیری کاهش می‌یابد. در صورتیکه نیاز باشد یک رادیو (برای مثال یک گوشی موبایل) با استانداردهای مختلفی به

¹ Joseph Mitola

² Radio Frequency

تبادل اطلاعات پردازد، اگر از نرم افزار استفاده نشود باید برای هر پروتکل مخابراتی امکانات سخت افزاری جدیدی را به سیستم اضافه نمود. این موجب افزایش پیچیدگی سیستم، توان مصرفی، حجم و قیمت آن می شود.

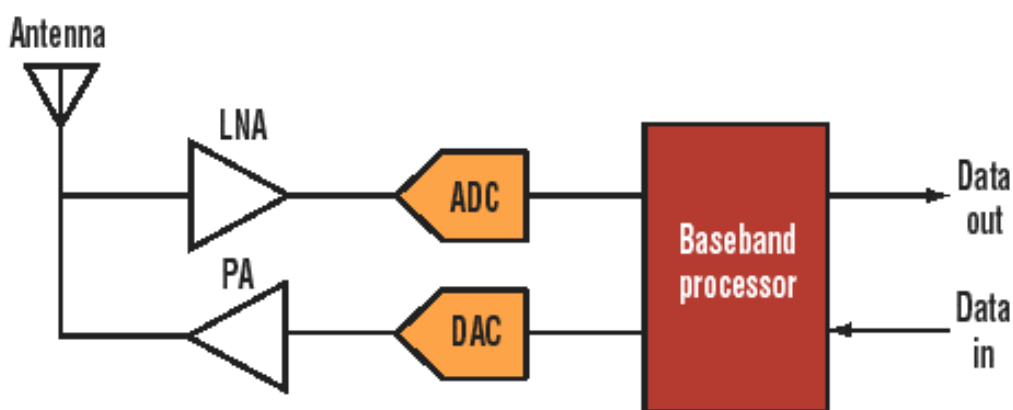
فناوری رادیو نرم افزاری راه حلی برای این مسئله است و این امکان را فراهم می آورد که سیستم های مخابراتی چندباند، چندحالت¹ و چندمنظوره قابل بهبود با ارتقای نرم افزاری داشته باشیم؛ به این صورت که انجام کلیه عملیات مخابراتی مانند مدولاسیون، دمدولاسیون و غیره توسط نرم افزار انجام می گیرد. مزیت عمده این روش این است که به جای استفاده از مدارات اضافی برای دسترسی به انواع سیگنال های رادیویی، کافی است از یک برنامه مناسب استفاده شود. با این کار یک دستگاه بر اساس نوع برنامه ریزی می تواند یک رادیو AM باشد یا یک تلفن بی سیم و یا به عنوان یک سیستم DVB ، WiFi یا Bluetooth عمل کند. این انعطاف پذیری نرم افزاری، قدرت انجام کارهای سخت یا حتی غیر ممکن توسط رادیوهای سنتی را فراهم می آورد.

در واقع رادیو نرم افزاری، نوعی فناوری است که می کوشد سهم نرم افزار را در پیاده سازی سیستم های مخابراتی افزایش دهد. در حالت ایده آل این سهم می تواند تا پایین ترین لایه های فیزیکی و نزدیکترین موقعیت به آنتن افزایش یابد به این صورت که در مسیر گیرنده پس از دریافت سیگنال از آنتن و تقویت آن بلافاصله سیگنال آنالوگ به دیجیتال تبدیل می شود و بقیه عملیات توسط نرم افزار انجام می گیرد. به همین ترتیب، در مسیر فرستنده نیز پس از انجام کلیه کارها توسط نرم افزار، نمونه های دیجیتال به آنالوگ تبدیل شده و برای ارسال تحویل آنتن می شود (شکل ۱). لکن در حال حاضر محدودیت هایی برای این کار وجود دارد از جمله محدودیت نرخ و فرکانس کار مبدل های آنالوگ به دیجیتال و دیجیتال به آنالوگ. از این رو در موارد عملی

¹ Multi Mode

عموماً لازم است تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال و بالعکس در فرکانسهای پایین تر انجام شود و برخی پردازشها در حوزه آنالوگ صورت گیرد.

نکته‌ی کلیدی در توانمندی رادیو نرم‌افزاری، قابلیت برنامه‌ریزی نرم‌افزاری است که امکان تغییر مشخصات بنیادی رادیو از جمله نوع مدولاسیون، فرکانس کار، پهنای باند، نحوه‌ی دسترسی چندگانه، روش‌های گسترده‌ن طیف فرکانسی و الگوریتم‌های رمزنگاری و رمزگشایی را فراهم می‌آورد. بستر پیاده‌سازی و اجرای نرم‌افزار در یک رادیو نرم‌افزاری می‌تواند انواع DSP، FPGA و پردازنده‌های مندرج (Embedded Processors) یا حتی پردازنده‌های رایانه‌های شخصی باشد.



شکل ۱: پیاده‌سازی ایده آل رادیو نرم‌افزاری

۳- مراتب رادیو نرم‌افزاری

برای تحقق رادیو نرم‌افزاری لازم است ابتدا امواج آنالوگ دریافتی در گیرنده پس از انتقال به باند فرکانسی پایین‌تر، با استفاده از مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال (ADC) به نمادهای دیجیتال تبدیل شوند. در واحدهای فرستنده نیز خروجی بخش‌های نرم‌افزاری با استفاده از مبدل‌های دیجیتال به آنالوگ (DAC)، به سیگنال آنالوگ ارسالی تبدیل می‌شود. این مبدل‌ها مرز بین دامنه‌های سخت‌افزار و نرم‌افزار هستند.

از جمله مشخصه‌هایی که در این مبدل‌ها مورد توجه است فرکانس نمونه‌برداری، وضوح بیتی (Resolution)، نسبت سیگنال به نویز، اتلاف توان، حوزه رفتار خطی و غیره است که برای رسیدن به حالت ایده‌آل، مبدل مورد استفاده باید مشخصه‌های مورد نیاز طراح را برآورده کند.

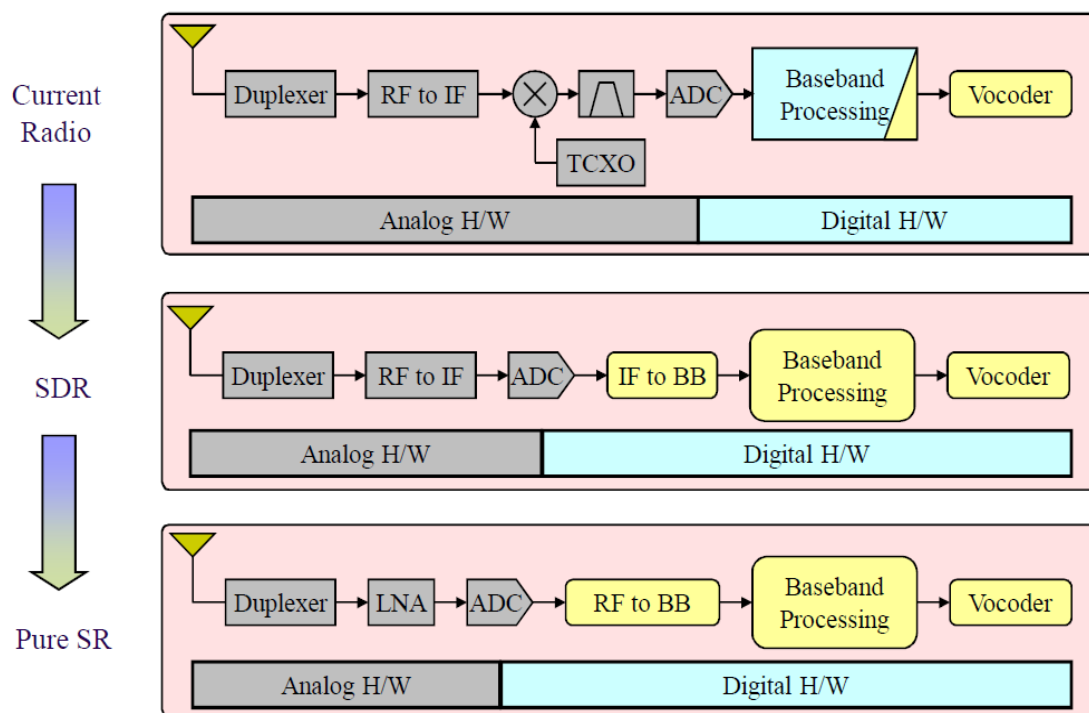
به عنوان مثال، برای آن‌که تبدیل گسسته‌زمان به پیوسته‌زمان، بدون از دست دادن اطلاعات باشد، رعایت نرخ نایکوئیست، حداقل دو برابر بالاترین فرکانس سیگنال آنالوگ، در نمونه‌برداری ضروری است. از طرف دیگر به منظور پیاده‌سازی ایده‌آل تمام قسمت‌های رادیو به صورت نرم‌افزاری، باید تا جای ممکن مبدل‌های ADC و DAC به سمت آنتن منتقل شوند تا بخش بزرگ‌تری از ساختار رادیو، در حوزه‌ی دیجیتال محقق گردد. اما سیگنال‌های آنالوگ در نزدیکی آنتن، در فرکانس‌های به نسبت بالا قرار دارند. بنابراین با توجه به وجود محدودیت‌های انتخاب مبدل‌ها و پردازنده‌ها، ممکن است مبدل‌ها در طبقات با فرکانس میانی¹ قرار گیرند. بدین ترتیب سهم کم‌تری از پیاده‌سازی به واحدهای نرم‌افزاری خواهد رسید.

از این رو با توجه به میزان استفاده از نرم‌افزار، سه سطح مختلف برای پیاده‌سازی رادیو نرم‌افزاری به صورت زیر تعریف می‌شود:

- اگر دیجیتال کردن بعد از انتقال سیگنال RF به فرکانس‌های میانی صورت گیرد، آن را Software Defined Radio (SDR) گویند. واضح است در سمت فرستنده هم مبدل دیجیتال به آنالوگ در موقعیتی مشابه قرار می‌گیرد.
- اگر تبدیل آنالوگ به دیجیتال بلافاصله بعد از آنتن یا بسیار نزدیک به آن انجام شود به آن Software Radio (SR) گویند که این کار مستلزم استفاده از مبدل‌های پر سرعت و پردازش دیجیتال سریع می‌باشد.

¹ Intermediate Frequency (IF)

- اگر به SR قابلیت هوشمندی افزوده شود به این صورت که متناسب با محیط مورد استفاده، قابلیت تصمیم‌گیری داشته باشد و خود را با محیط وفق دهد به آن Adaptive Intelligent Software Radio (AI-SR) گویند.



شکل ۲- مقایسه میزان سهم نرم‌افزار و سخت‌افزار در رادیوهای کنونی و SDR و SR

۴- مزایای رادیو نرم‌افزاری

رادیو نرم‌افزاری مزایای زیادی برای تولید کنندگان تجهیزات مخابراتی و مصرف کنندگان خواهد داشت. مهمترین این مزایا عبارتند از:

- کاهش قیمت: معمولاً به دلیل کاهش تعداد قطعات مورد نیاز و امکان استفاده مجدد از طراحی‌های قبلی، هزینه تمام شده سیستم‌های رادیو نرم‌افزاری از سیستم‌های سخت‌افزاری کمتر است. به خصوص در تولید انبوه این تفاوت چشمگیرتر خواهد بود. در یک سیستم رادیو نرم‌افزاری، می‌توان با استفاده از یک سخت‌افزار مبتنی بر پردازنده و کدهای مختلف قابلیت‌های گوناگونی را برای سیستم فراهم آورد.

- **سهولت در طراحی، ساخت و ارتقاء:** در حالت کلی، تجهیزاتی که در محدوده‌ی RF کار می‌کنند به دلیل بالا بودن فرکانس کاری، دارای رفتارهای پیچیده‌ای هستند و در نتیجه ساخت آن‌ها به دقت زیادی نیاز دارد. حال اگر چند سیستم با سخت‌افزارهای متفاوت داشته باشیم و بخواهیم این اجزا با یکدیگر به صورت بهینه کار کنند، به همان اندازه کار مشکل‌تر خواهد شد. این مساله باعث طولانی‌تر شدن مراحل طراحی، ساخت و پیاده‌سازی یک دستگاه جدید می‌گردد. در صورت استفاده از رادیوی نرم‌افزاری، هرچه دیجیتال کردن سیگنال در گیرنده زودتر اتفاق بیافتد، به همان اندازه نیاز به هماهنگی اجزای سخت‌افزاری کم‌تر بوده و چرخه‌ی طراحی یک محصول جدید ساده‌تر و سریع‌تر می‌شود و امکان استفاده مجدد از طرح‌های قبلی وجود خواهد داشت. همچنین ارتقاء یک سیستم بر مبنای نرم‌افزار به مراتب ساده‌تر از یک سیستم سخت‌افزاری است. در این سیستم‌ها، صرفاً با به‌روزرسانی نرم‌افزار می‌توان کارایی و عملکرد سیستم را بهبود داد. (مثال روشن این موضوع امکان ارتقاء کیفیت و کارآیی تلفن‌های موبایل با ارتقاء نرم‌افزار سیستم عامل است.)

- **پشتیبانی از استانداردهای مختلف:** در رادیوهای سنتی، دو طرف ارتباط می‌بایست از یک استاندارد واحد تبعیت کنند و عدم سازگاری دو طرف، مانع از برقراری ارتباط می‌شود. برای مثال واحدهای مختلف نظامی اعم از ارتش یا نیروی هوایی در برقراری ارتباط با مشکل عدم سازگاری تجهیزات روبه‌رو هستند. همچنین پلیس ممکن است همین مشکل را در برقراری ارتباط با واحدهای آتش‌نشانی داشته باشد. علاوه بر این سیستم‌های مخابراتی در محدوده‌های متفاوت جغرافیایی، از استانداردهای گوناگونی برای خدمات‌دهی استفاده می‌کنند، که در صورت ایجاد سازگاری بین محدوده‌های مختلف، رومینگ و پوشش خدمات در محدوده‌های وسیع‌تر¹، راحت‌تر اتفاق می‌افتد. فراهم کردن سازگاری بین استانداردهای مختلف ارتباطی، در محیط‌های نرم‌افزاری و از طریق الگوریتم‌های پردازشی راحت‌تر انجام می‌شود و با بکارگیری رادیو نرم‌افزاری یک سیستم می‌تواند پاسخ‌گوی نیازهای مختلف در این حوزه باشد.

¹ Global Mobility

۵- محدودیت‌های رادیو نرم افزاری

در کنار مزایای ذکر شده، این فناوری معایب و محدودیت‌هایی هم دارد که می‌توان به موارد زیر اشاره

کرد:

- به دلیل استفاده از پردازنده‌ها و سخت‌افزارهایی که برای مصارف عمومی تر طراحی شده‌اند ممکن است توان مصرفی افزایش یابد.
- چنانچه وظایف بلوک دیاگرام‌های سیستم پیچیده‌تر شود، حجم نرم‌افزاری که باید در پردازنده‌های دیجیتال ذخیره گردد، افزایش یافته و زمان ذخیره و اجرای نرم‌افزار طولانی‌تر می‌شود. با افزایش حجم نرم افزار، مدیریت و در نظر گرفتن معماری مناسب برای آن بسیار ضروری و امری تخصصی خواهد بود.
- به علت چند استاندارد بودن سیستم و وجود باند های فرکانسی مختلف به آنتن‌های باند پهن و طبقه‌ی RF با پهنای باند وسیع نیاز است. در نتیجه‌ی طراحی طبقه‌ی RF و انتخاب آنتن مناسب در رادیو نرم‌افزاری از اهمیت زیادی برخوردار است. توجه شود که با توجه به پهنای باند محدود آنتن‌ها، ممکن استفاده از چند آنتن لازم باشد، که در پایانه‌های سیار چندان مطلوب نیست.
- به علت چندحالتی و چند استاندارد بودن رادیو نرم‌افزاری و همچنین پهن باند بودن طبقه‌ی RF، رنج دینامیکی سیگنال دریافتی نسبت به سیستم‌های متداول بیشتر است. در نتیجه به علت محدودیت رنج دینامیکی ADC های موجود، باید نوعی مصالحه در طراحی سیستم و انتخاب ADC انجام شود.
- در نرم‌افزارهای ذخیره شده در سیستم، مشخصات سیستمی و انواع مهارت‌ها و تکنیک‌های بکار گرفته شده توسط برنامه نویس، اعم از روش‌های بهینه‌سازی و الگوریتم‌های محاسباتی به صورت نرم‌افزاری قابل دستیابی است و این امکان وجود دارد که این مهارت‌ها به طور غیر قانونی توسط رقبا کشف شود.

- برنامه ریزی نرم افزار و امکان دستکاری آن از سوی اشخاص غیر مسئول می تواند موجب بروز مشکلات شده و این وسایل برای مقاصد امنیتی مورد استفاده قرار گیرد.

۶- ابزارهای پیاده سازی رادیو نرم افزاری

امروزه پروژه های مبتنی بر رادیو نرم افزاری بر خلاف نام آن از دو بخش نرم افزار و سخت افزار تشکیل می شود و کاربران برای ساخت سیستم مورد نظر باید در هر دو حوزه ی نرم افزار و سخت افزار دست به طراحی و انتخاب گزینه های موجود بزنند.

در حال حاضر ابزارهای سخت افزاری و نرم افزاری آماده ای که بستری را برای آزمایش ها و پژوهش های این حوزه فراهم می آورد، وجود دارد و کاربر باید با توجه به نیازها و همچنین در نظر گرفتن محدودیت ها و ضرورت ها، مورد مناسب را انتخاب نماید. وجود چنین بستری این امکان را برای پژوهش گران فراهم می آورد که به جای صرف توان و زمان برای ساخت این ابزار، از ابزارهایی که قبلاً مورد استفاده قرار گرفته و آزمایش شده است، استفاده نمایند و همچنین از تجربیات کسانی که قبلاً با آنها کار کرده اند نیز بهره مند گردند. این ابزارها را می توان در قالب دو بخش سخت افزار و نرم افزار مورد بررسی قرار داد.

۶-۱- سخت افزار

شرکت های بزرگ که در زمینه رادیو نرم افزاری فعالیت دارند، برای تولید محصول هر یک سخت افزار خاصی را برای رسیدن به اهداف خود در پروژه ها طراحی و استفاده می کنند. ولی مراکز دانشگاهی و تحقیقاتی با توجه به محدودیت های بیشتر در هزینه ها و نیاز به تجهیزات با گستره ی عمل وسیع تر، برای اثبات عملی بودن ایده ها از سیستم های موجود در بازار با کاربرد عمومی استفاده می کنند. در انتخاب سخت افزار مولفه های مختلفی ایفای نقش می کنند که از مهمترین آنها می توان به داشتن قابلیت برآوردن نیازهای فنی پروژه، قیمت مناسب، در دسترس بودن منابع (منبع باز بودن) و سهولت استفاده اشاره نمود.

سخت افزارهای خانواده ی ¹USRP، یکی از رایج ترین سخت افزارهای مورد استفاده در انواع پروژه های رادیو نرم افزاری هستند. علاوه بر این می توان به سخت افزارهای شرکت های National Instruments، Lyrtech Signal Processing و غیره اشاره نمود که تجهیزات به نسبت گران قیمت تری را برای کاربردهای عمدتاً نظامی و تجاری ارائه می دهند.

- **USRP:** ابزار جنبی رادیو نرم افزاری جهانی یا به اختصار USRP سیستمی سخت افزاری است که توسط شرکت Ettus ارائه شده است و به کامپیوترهای شخصی امکان می دهد که به عنوان سیستم های رادیو نرم افزاری با پهنای باند بالا عمل کند. در واقع این سیستم بخش های باند پایه و فرکانس های میانی دیجیتالی یک سیستم مخابراتی را در دسترس کاربر قرار می دهد. ایده اصلی طراحی این سیستم فراهم آوردن امکان انجام تمام پردازش های مربوط به امواج رادیویی مانند مدولاسیون و دمدولاسیون در محیط دیجیتال و بر روی پردازنده مرکزی رایانه میزبان است. این تجهیزات هم اکنون در بسیاری از پروژه های رادیو نرم افزاری، به عنوان سخت افزار استفاده می شود. از جمله دلایلی که باعث محبوبیت این سخت افزار شده است می توان به متن باز بودن تمام نقشه ها و کدهای نرم افزاری مورد استفاده برای ساخت این سخت افزار اشاره کرد که کاربر را قادر می سازد به فراخور نیاز خود نسبت به تغییر و تصحیح بخش هایی از سخت افزار اقدام نماید. هم چنین هزینه ی به نسبت مناسب آن در قبال امکاناتی که در اختیار می گذارد و وجود جمع کثیری از طراحان و کاربران آشنا با سیستم که از طریق اینترنت با هم در ارتباط بوده و با همکاری یکدیگر مشکلات سیستم را مرتفع می کنند، از دیگر عوامل محبوبیت آن می باشد.

۲-۶ نرم افزار

از جمله مهمترین بسته های نرم افزاری رایگان که امروزه در حوزه ی رادیو نرم افزاری مورد استفاده پژوهشگران قرار می گیرد، می توان به بسته ی نرم افزاری GNU Radio اشاره کرد. این بسته امکاناتی را برای

¹ Universal Software Radio Peripheral

توسعه نرم‌افزاری سیستم‌های مخابراتی در اختیار کاربر قرار می‌دهد. GNU Radio، به طور پیش فرض کتابخانه‌ای را برای ارتباط با سخت‌افزارهای خانواده USRP در خود دارد، اما کاربران می‌توانند از امکانات این نرم‌افزار در ارتباط با سایر سخت‌افزارها نیز استفاده نمایند. این نرم‌افزار بر بستر سیستم عامل لینوکس نصب می‌شود و کاربران به فراخور نیازهای خود می‌توانند کدهای آن را تغییر داده و یا کدهایی به آن اضافه نمایند.

از دیگر نرم‌افزارهای رایج در حوزه‌ی رادیو نرم‌افزاری می‌توان به Simulink اشاره کرد. این نرم‌افزار که از زیرمجموعه‌های نرم‌افزار MATLAB می‌باشد، قابلیت نصب بر روی سیستم عامل‌های ویندوز و لینوکس را دارد و به صورت پیش فرض کتابخانه‌ای برای ارتباط با سخت‌افزارهای خانواده USRP در آن تعبیه شده است. کدها و بلوک‌های نرم‌افزاری آماده برای استفاده در پروژه رادیو نرم‌افزاری، روز به روز به این نرم‌افزار اضافه می‌شود و در اختیار کاربران قرار می‌گیرد.

۷- منابع

- [1] Mitola, J. , "Software radios-survey, critical evaluation and future directions" , *Proceeding of National Telesystems Conference* , 1992
- [2] Software Defined Radio Forum , Available: <http://www.sdrforum.org>
- [3] Sadiku, M. and Akujuobi, C. , "Software defined radio: a brief overview" , *IEEE*, vol 23, pp. 14- 15, Oct.-Nov. 2004
- [4] Tuttlebee,W. , *Software Defined Radio*, Enabling Technologies, J. Wiley, 2002
- [5] GNU Radio , Available: <http://gnuradio.org>
- [6] Ettus Research LLC , Available: <http://www.ettus.com>