



بسمه تعالی

درس طراحی سیستم‌های نهفته مبتنی بر FPGA

آزمایش ۱: طراحی و پیاده‌سازی یک سیستم برای انتقال و پردازش اطلاعات

پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

دکتر بیژن علیزاده

دستیاران آموزشی:

علی ایمانقلی ali.imangholi@ut.ac.ir

عرفان ایروانی Iravanierfan98@ut.ac.ir

نیم‌سال اول ۱۴۰۱-۰۲

مدت آزمایش: دو جلسه

اهداف آزمایش:

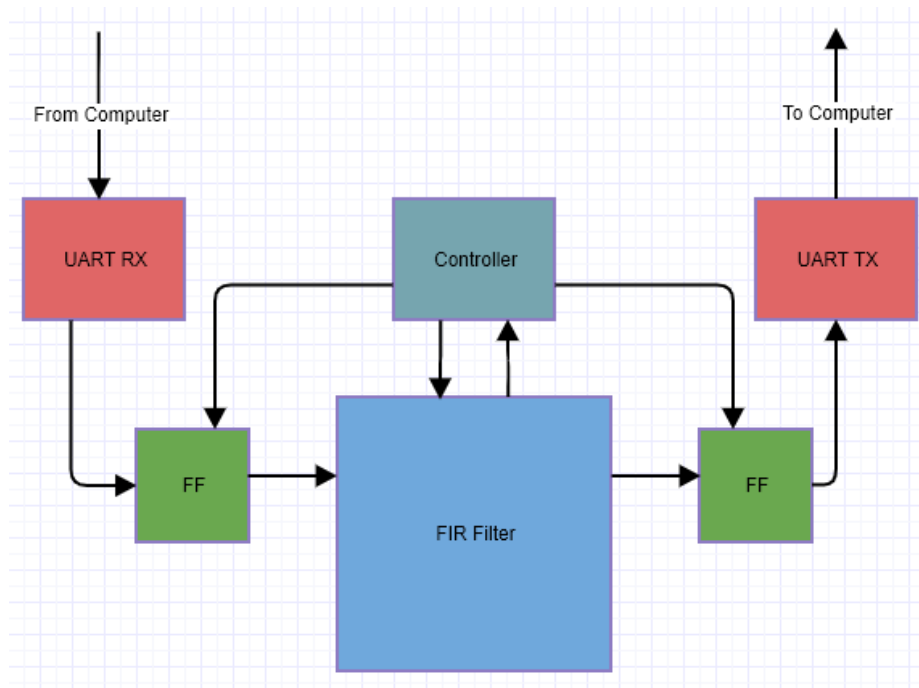
- ✓ آشنایی با برد DE2
- ✓ آشنایی با درگاه سریال RS-232
- ✓ ارسال و دریافت سخت‌افزاری اطلاعات با PC
- ✓ ایجاد یک سیستم کامل دیجیتال با اتصال و کنترل چند ماژول مستقل
- ✓ آشنایی با Signal Tap Logic Analyzer

مقدمه

در این آزمایش به طراحی یک سیستم کامل شامل واحد ارسال و دریافت داده، واحد پردازشی و واحد نمایش اطلاعات می‌پردازیم. اطلاعات از طریق PC و پورت سریال به سیستم منتقل می‌شود و پس از پردازش، نتیجه به PC ارسال می‌گردد. پردازش مورد نظر اعمال فیلتر دیجیتال بر روی نمونه‌های داده است.

شرح آزمایش

شمای کلی سیستم مورد نظر در این آزمایش در شکل ۱ آمده است. در این سیستم، داده از طریق درگاه سریال وارد شده و پس از پردازش (اعمال فیلتر FIR) از طریق درگاه سریال به کامپیوتر داده می‌شود. یک کد متلب شامل توابع ارسال و دریافت داده به همراه دستور کار بارگذاری شده است. هدف نهایی این آزمایش خواندن یک فایل صوتی، حذف نویز از آن به کمک فیلتر FIR و در نهایت ذخیره فایل خروجی است.



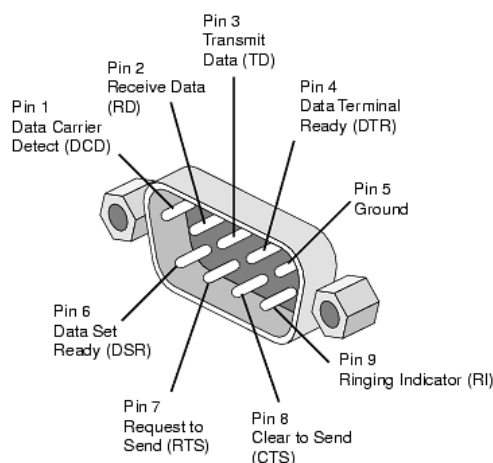
شکل ۱ شمای کلی آزمایش اول

مراحل زیر را به ترتیب انجام دهید:

۱- ارتباط با کامپیوتر از طریق درگاه سریال

درگاه سریال یکی از ارتباطات خوب و مناسب کامپیوتر با دنیای بیرون به شمار می‌رود که اجازه می‌دهد اطلاعات به صورت دو طرفه انتقال یابد. این درگاه با استاندارد RS-232 کار می‌کند. اغلب کامپیوترهای شخصی یک یا دو درگاه COM برای واسط RS-232 دارند که معمولاً از یک کانکتور DE9 استفاده کرده و توانایی یک انتقال تمام دوطرفه (full-duplex) را دارند. لازم به ذکر است امروزه با توجه به نیاز به سرعت‌های انتقال بالاتر، درگاه‌های سریال RS-232 جای خود را به سایر استانداردهای ارتباط سریال و خصوصاً USB داده‌اند. با این وجود نه تنها استفاده از درگاه RS-232 هنوز منسوخ نشده است، بلکه در بسیاری از مواقع به دلایل اقتصادی و فنی استفاده از این درگاه ترجیح داده می‌شود.

استاندارد RS-232 و به طور صحیح‌تر TIA/EIA-232، مشخصات الکتریکی، مکانیکی و عملکردی سیگنال‌های ارتباطی را مشخص می‌کند. این استاندارد اولین بار در سال ۱۹۶۲ برای استانداردسازی ارتباط میان کامپیوترها (DTEها)، مودم‌ها (DCEها) و ایجاد امکان اتصال دستگاه‌های تولید شده توسط شرکت‌های مختلف مخابراتی وضع شد، اما کاربردهای گسترده‌تری خارج از این حوزه نیز یافت. در سال ۱۹۸۳ با انتشار کامپیوترهای شخصی توسط IBM، استاندارد RS-232 در این کامپیوترها در قالب کانکتور DE9 به کار گرفته شد. شکل ۲ کانکتور DE9 و شماره‌ی پین‌های آن را نشان می‌دهد.



شکل ۲ کانکتور DE9، پین‌ها و سیگنال‌های متناظر آن

¹ Data Terminal Equipment

² Data Communicating Equipment

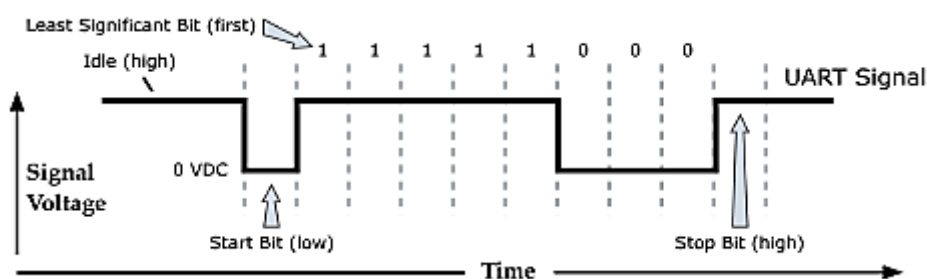
پایه‌های نشان داده شده در شکل ۲ برای ارتباط با مودم استفاده می‌شود و در این آزمایش فقط از ۳ پایه مهم زیر استفاده می‌کنیم:

۱- پایه شماره ۲، RxD که همان داده سری دریافتی است.

۲- پایه شماره ۳، TxD که همان داده سری ارسالی است.

۳- پایه شماره ۵، GND که پایه زمین می‌باشد.

در ارتباط سریال یک بیت داده در هر لحظه ارسال می‌گردد، پس یک خط برای انتقال در هر جهت کافی است، اما استاندارد RS-232 پروتکل ارتباطی مشخصی را تعیین نمی‌کند. با این وجود در این استاندارد معمولاً از پروتکل UART^۳ استفاده می‌شود. در این پروتکل اطلاعات به صورت بسته‌های داده ۸ بیتی انتقال داده می‌شود به این صورت که ابتدا بیت صفرام، سپس بیت ۱ ام و ... ارسال می‌گردند. توجه شود که این ارتباط به صورت آسنکرون می‌باشد، به این معنی که سیگنال کلاک به همراه داده ارسال نمی‌شود و قبل از شروع ارسال یا دریافت، فرستنده و گیرنده روی پارامترهای ارتباطی نظیر سرعت انتقال داده، فرمت داده و غیره بطور یکسان تنظیم می‌شوند. زمانی که انتقال داده‌ای روی خط ارتباطی نداریم، فرستنده روی خط مقدار ۱ قرار می‌دهد. فرستنده قبل از شروع ارسال هر بایت داده، یک بیت start (با مقدار ۰) روی خط قرار می‌دهد. بعد از بیت شروع، ۸ بیت داده با سرعت و فرمتی که قبلاً برای هر دو طرف تنظیم شده است، ارسال و دریافت می‌گردد. در انتها نیز فرستنده یک یا دو بیت stop (با مقدار ۱) به معنای اتمام ارسال ۸ بیت، روی خط قرار می‌دهد. به عنوان مثال شکل ۳ ارسال 0x1F را نشان می‌دهد.



شکل ۳ فریم داده‌ی 0x1F در پروتکل UART

سرعت انتقال اطلاعات با baud rate مشخص می‌شود که نشان می‌دهد چند نمونه داده (در انتقال UART هر بیت یک نمونه محسوب می‌شود) در ثانیه ارسال شده است. برای مثال ۱۰۰۰ baud یعنی در ثانیه ۱۰۰۰ بیت

³ Universal Asynchronous Receiver Transmitter

انتقال می‌یابد. به عبارت دیگر انتقال هر بیت ۱ میلی‌ثانیه طول می‌کشد. کامپیوترهای شخصی معمولاً فقط سرعت‌های مشخصی از انتقال داده را پشتیبانی می‌کنند که برابر ۱۲۰۰، ۹۶۰۰، ۳۸۴۰۰ و ۱۱۵۲۰۰ baud است. در ۱۱۵۲۰۰ baud هر بیت ۸٫۶ میکروثانیه طول می‌کشد و ارسال ۱۱ بیت (شامل یک بیت شروع، ۸ بیت داده و دو بیت خاتمه) حدود ۹۵٫۵ میکروثانیه طول خواهد کشید.

کد فرستنده UART در سایت درس بارگذاری شده است. شما در این آزمایش باید یک ماژول نوشته که بتواند از طریق درگاه RS_232 با کامپیوتر در ارتباط باشد. برای این کار، گام‌های زیر را طی کنید:

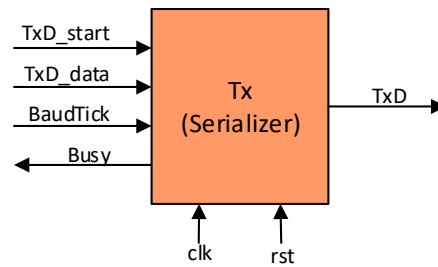
گام ۱

ماژول BaudTickGen برای تولید نرخ baud ۱۱۵۲۰۰ را طراحی کنید. این ماژول با دریافت پالس ساعت ۵۰ مگاهرتز و شمارش آن به تعداد مورد نیاز، در هر ثانیه باید ۱۱۵۲۰۰ پالس تیک تولید کند. توجه نمایید خروجی ماژول، پالس ساعت نیست، بلکه در هر ثانیه، از میان ۵۰ میلیون پالس ساعت، در ۱۱۵۲۰۰ پالس مقدار خروجی این ماژول یک و در بقیه پالس‌ها صفر است. جهت آشنایی با interface این ماژول، فایل مربوط به این ماژول بر روی سایت درس، بارگذاری شده است که در صورت نیاز، می‌توانید سیگنال‌های ورودی و خروجی آن را تغییر دهید.

گام ۲

ماژول `async_transmitter`، مطابق با شکل ۴ داده‌ی ۸ بیتی ورودی را با فعال شدن سیگنال `TxD_start` به صورت سریال از طریق خط `TxD` ارسال می‌کند. پارامترهای UART به صورت ۸ بیت داده، ۱ بیت خاتمه و بدون بیت parity انتخاب شده است (این تنظیمات معمولاً به صورت 8n1 نمایش داده می‌شود. بیت parity یک تک بیت است که می‌تواند جهت بررسی صحت دریافت داده در سمت گیرنده استفاده شود). فرستنده در حالتی که در حال ارسال داده است از `TxD_start` صرف نظر می‌کند، اما خروجی `busy` را در این مدت ۱ نگه می‌دارد.

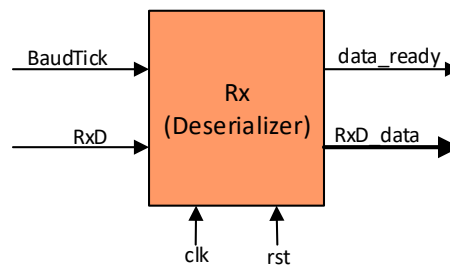
صحت عملکرد ماژول Tx را با شبیه‌سازی تحقیق کنید. پس از مشخص کردن تخصیص پین‌ها، با استفاده از نرم‌افزارهای ارتباط سریال مانند TeraTerm، RealTerm یا سایر نرم‌افزارهای مربوطه، عملکرد صحیح ماژول TX را بر روی برد DE2 تحقیق کنید.



شکل ۴ ماژول فرستنده

گام ۳

دیاگرام کلی ماژول گیرنده در شکل ۵ آمده است. در این ماژول داده از طریق خط RxD دریافت شده و به صورت بایت تبدیل می‌شود و روی بایس RxD_data قرار می‌گیرد. هنگام آماده‌شدن داده، data_ready به مدت یک سیکل کلاک یک می‌شود.



شکل ۵ ماژول گیرنده

مسأله‌ای که می‌تواند مشکل‌ساز شود، دریافت آسنکرون داده‌ها است. گیرنده‌ی UART به منظور سنکرون شدن با داده ورودی آن را با نرخ بالاتر از نرخ انتقال داده نمونه‌برداری می‌کند (مثلاً چهار برابر نرخ baud) و پس از آن با نرخ baud از سیگنال ورودی نمونه‌برداری می‌کند. ماژول async_receiver وظیفه دریافت UART را بر عهده دارد. کلاک ورودی این ماژول دارای فرکانس ۴ برابر فرستنده است. به عبارت دیگر پارامتر oversampling در گیرنده ۴ می‌باشد. این پالس را با ماژول BaudTickGen با پارامتر $\text{oversampling} = 4$ تولید کنید. این کار منجر به شمارش متفاوت نسبت به حالت قبلی می‌گردد. جهت آشنایی با interface این ماژول، فایل مربوط به این ماژول بر روی سایت درس، بارگذاری شده است که در صورت نیاز، می‌توانید سیگنال‌های ورودی و خروجی آن را تغییر دهید.

صحت عملکرد ماژول Rx را با شبیه‌سازی تحقیق کنید. همچنین می‌توانید با استفاده از دو ماژول Tx و یک ماژول Rx، صحت عملکرد این ماژول را بر روی بورد بررسی کنید. توجه داشته باشید که باید از صحت عملکرد ماژول Tx در گام ۲ مطمئن شده باشید. برای بررسی صحت ماژول Rx، از یک شمارنده ۸ بیتی استفاده کنید و عدد

مربوط به این شمارنده را به ورودی Tx اول متصل کنید. سپس خروجی سریال Tx به ورودی سریال Rx متصل شده و عدد شمارنده، توسط Rx دریافت می‌شود. برای بررسی صحت عدد دریافتی، این عدد به ماژول Tx دوم داده شده و خروجی سریال این ماژول، به پورت سریال DE2 متصل می‌گردد تا خروجی از طریق نرم‌افزارهای ارتباط سریال، قابل مشاهده باشد.

گام ۴

در نهایت ماژولی با نام UART بنویسید که شامل ماژول‌های گیرنده، فرستنده باشد. علاوه بر تخصیص پین‌ها مشابه گام ۲، این ماژول هنگام دریافت داده آن را بر روی LEDهای قرمز رنگ نشان می‌دهد. مشابه بالا با استفاده از نرم‌افزار داده‌ای را بفرستید و صحت آن را چک کنید.

۲- راه‌اندازی فیلتر FIR با استفاده از ضرایب ذخیره شده در حافظه (امتیازی)

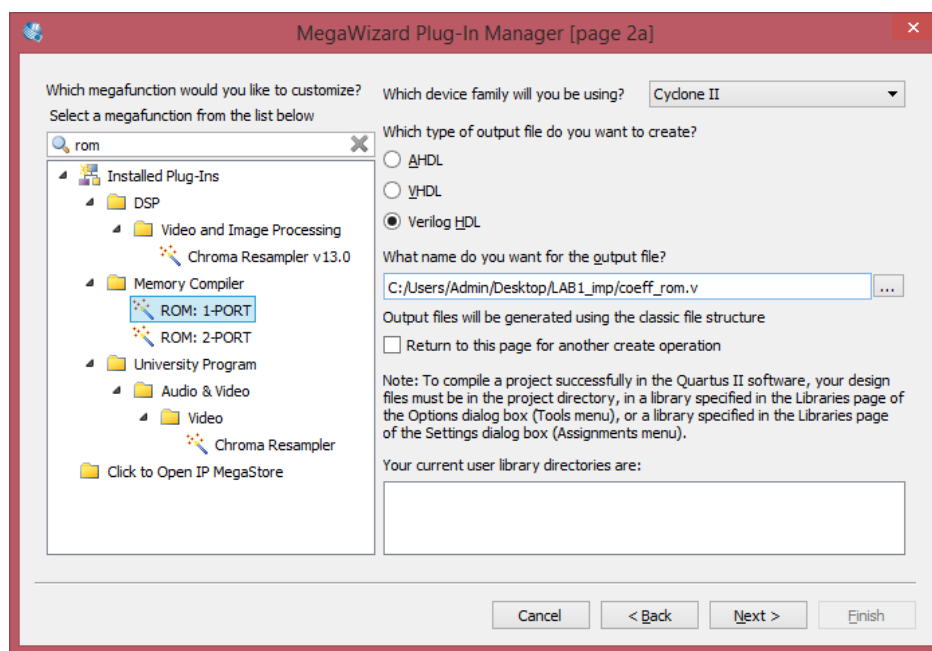
در این بخش فیلتر FIR طراحی شده در تکلیف کامپیوتری ۱ را با پارامترهای عرض بیت ۱۶ و طول فیلتر ۶۴ استفاده می‌کنیم. برای ذخیره سازی ضرایب می‌توانید آن‌ها به صورت مستقیم در داخل ماژول FIR تعریف کنید. این بدین معنا است که به تعداد ضرایب، رجیستر در نظر می‌گیرید. توجه کنید که در این روش، صرفاً لازم است به تعداد ضرایب مورد نظر و با عرض مشخص، داخل ماژول FIR رجیستر تعریف و آن‌ها مقدار دهی اولیه کنید. روش دیگر که نمره امتیازی دارد استفاده از بلوک‌های حافظه اختصاصی می‌باشد. برای پیاده‌سازی حافظه در یک FPGA هم می‌توان از LUT^۵های مورد استفاده در پیاده‌سازی لاجیک (روش اول) و هم از بلوک‌های حافظه تخصیص داده شده در FPGA استفاده کرد. در Cyclone II حافظه‌های اختصاصی از نوع بلوک‌های M4K هستند که هر کدام شامل ۴۰۹۶ بیت حافظه هستند. در این حافظه‌ها امکان پیکربندی با اندازه‌های مختلف (به صورت تعداد کلمات و عرض هر کلمه) وجود دارد که اصطلاحاً به آن Aspect Ratio گفته می‌شود. برای این کار گام‌های زیر را به ترتیب انجام دهید.

⁵ Look-Up Table

گام ۱

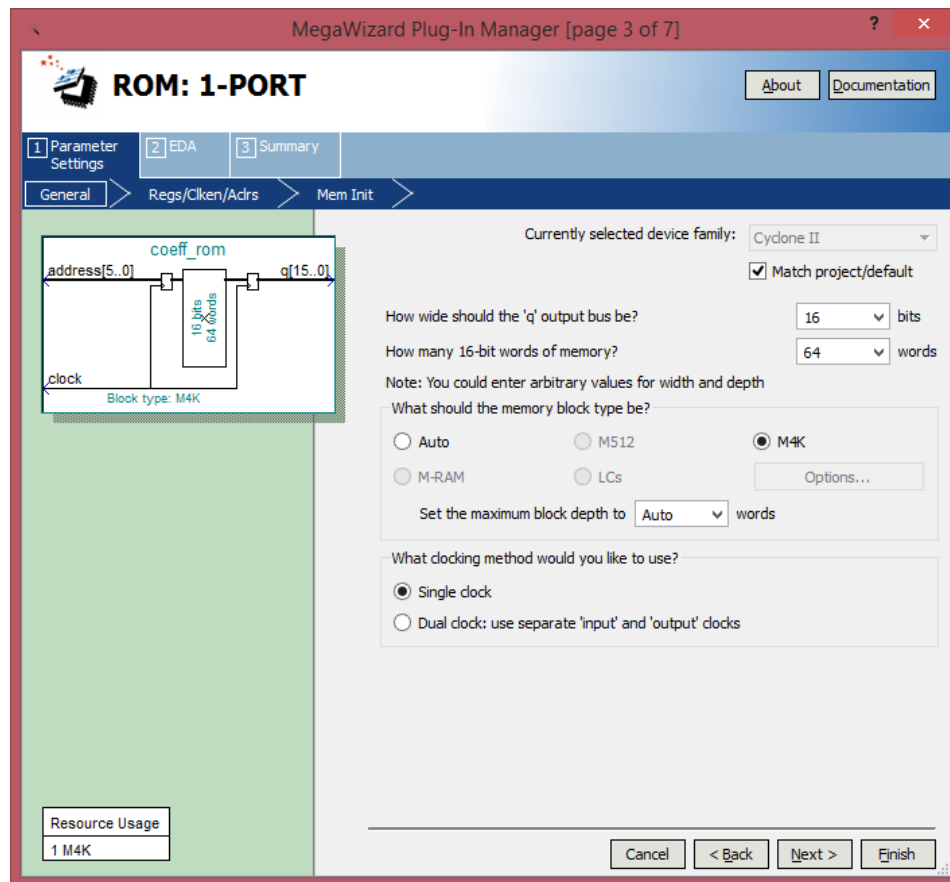
در گام اول یک حافظه‌ی ROM برای ذخیره‌سازی ضرایب ایجاد می‌کنیم و آن را تست می‌کنیم. بدین منظور مراحل زیر را انجام دهید:

(۱) در قسمت Tools > MegaWizard Plug-In Manager ایجاد یک megafunction جدید را انتخاب کنید. در صفحه‌ی دوم در قسمت Select a megafunction from the list below، از گروه Memory Compiler، حافظه‌ی ROM: 1-PORT را انتخاب کنید (شکل ۶). مطمئن شوید فایل خروجی با فرمت Verilog انتخاب شده است.



شکل ۶ انتخاب ROM: 1-PORT

(۲) در صفحه بعد ساختار حافظه را به صورت ۶۴ کلمه ۱۶ بیتی انتخاب کنید. نوع حافظه را نیز M4K قرار دهید (شکل ۷).



شکل ۷ انتخاب اندازه‌ی حافظه‌ی ضرایب

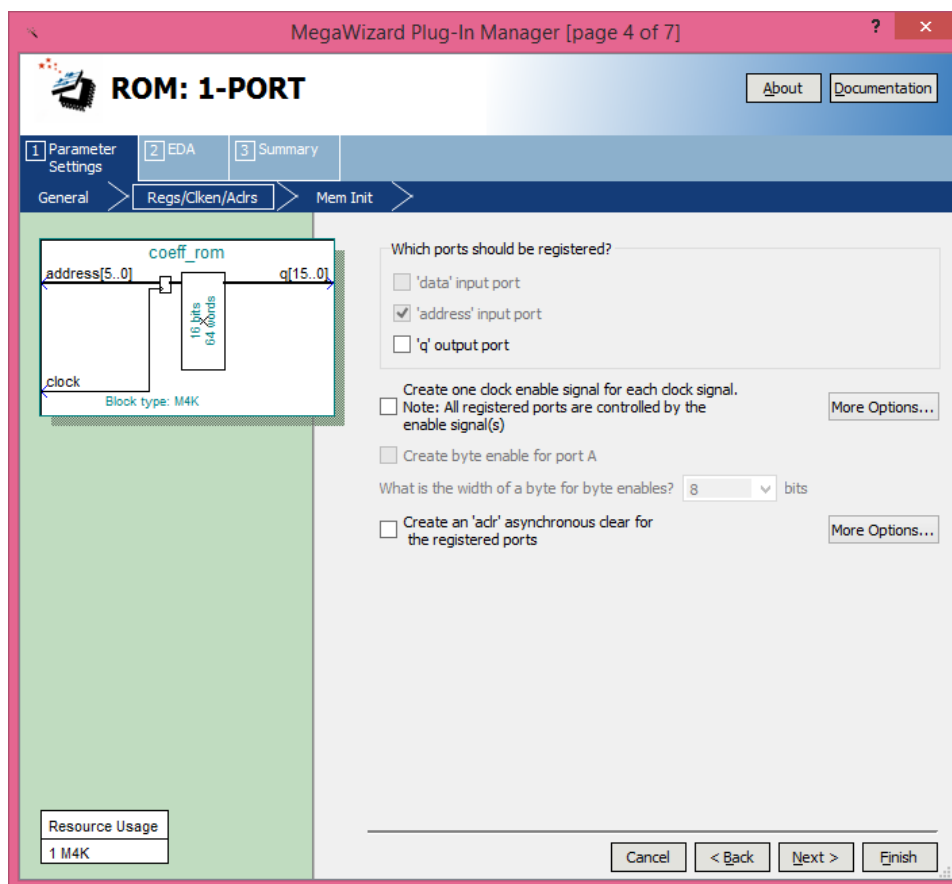
۳) در صفحه‌ی چهارم output port 'q' را از حالت انتخاب خارج سازید تا رجیستر خروجی حذف گردد. استفاده از رجیستر در ورودی بلوک M4K به دلیل سنکرون بودن این بلوک‌ها اجباری است (شکل ۸).

۴) ضرایب فیلتر FIR در قالب یک فایل MIF^۶ (و فایل مشابهی با فرمت hex) به همراه دستور کار در سایت قرار گرفته است. در صفحه‌ی بعد این فایل را انتخاب کنید.

۵) برای بقیه تنظیمات از مقادیر پیش‌فرض استفاده کنید.

۶) به منظور تست فایل ایجاد شده، آن را در یک ماژول نمونه‌گیری کنید. درگاه address را به سوئیچ‌ها و پورت q (خروجی) را به LEDها متصل کنید. پس از پروگرام کردن FPGA فایل MIF (یا فایل معادل hex) را باز کرده و از تطبیق مقادیر بر این فایل اطمینان حاصل کنید.

^۶ Memory Initialization File



شکل ۸ پیکربندی ورودی/خروجی بلوک حافظه

گام ۲

با اعمال تغییراتی در کد تکلیف کامپیوتری ۱ خود، حافظه تولیدی را با حافظه موجود در کد تکلیف کامپیوتری ۱ جایگزین کنید. با استفاده از تست‌بنچ مورد استفاده در تکلیف کامپیوتری ۱ از صحت عملکرد فیلتر مطمئن شوید. نکته مهم: حافظه تولید شده داده را یک کلاک بعد از درخواست آن به شما تحویل می‌دهد. در صورت نیاز، حتماً طرح فیلتر خود را متناسب با این موضوع تغییر دهید.

۳- راه اندازی و درستی سنجی کل سیستم

در این بخش، کل سیستم پیاده سازی و درستی سنجی خواهد شد. در حال حاضر تمامی اجزای شکل ۱ را به غیر از واحد Controller در اختیار داریم. مراحل زیر را انجام دهید تا واحد کنترلر نیز آماده گردد:

گام ۱

واحد کنترلر را با یک ماشین حالت پیاده سازی کنید به طوری که فرآیند زیر را کنترل کند:

(۱) در حالت بیکاری، کنترلر منتظر می ماند تا داده ای از ورودی دریافت شود. هر وقت واحد گیرنده (Rx) سیگنال data_ready را منتشر کرد، کنترلر باید داده را به فیلتر FIR انتقال داده و سیگنال کنترلی input_valid را به مدت یک سیکل فعال کند. چون محاسبات به صورت ۱۶ بیتی انجام می شود، باید ساختاری پیاده کنید که گیرنده پس از دو بار دریافت داده ۸ بیتی، ورودی فیلتر را فعال کند. ابتدا بسته داده ۸ بیتی با ارزش مکانی بالا و سپس بسته داده ۸ بیتی با ارزش مکانی پایین ارسال می گردد.

(۲) سپس کنترلر منتظر می ماند تا محاسبات فیلتر FIR تمام شده و output_valid فعال گردد. کنترلر باید داده خروجی ۱۶ بیتی را در قالب دو داده ۸ بیتی بفرستد و برای این کار باید از طریق سیگنال های کنترلی TxD_start و busy با واحد فرستنده (Tx) در ارتباط باشد. در این مرحله نیز ابتدا بسته داده ۸ بیتی با ارزش مکانی بالا و سپس بسته داده ۸ بیتی با ارزش مکانی پایین ارسال می گردد.

(۳) پس از اتمام ارسال دو داده ۸ بیتی کنترلر به حالت اولیه باز می گردد و منتظر دریافت ورودی بعدی می شود.

گام ۲

حال تمامی اجزای سیستم آماده است. در ابتدا برای یک داده از صحت کار مدار مطمئن شوید. این بدان معنی است که دوتا داده ۸ بیتی به وسیله نرم افزار (نرم افزار استفاده شده برای UART) فرستاده می شود و سپس باید جواب درست به نرم افزار برگردد. پس از آن کد متلبی که در اختیارتان قرار گرفته است را به دقت مطالعه کنید و عملکرد آن باید در گزارش شرح داده شود. سپس با استفاده از کد مطلب درستی سیستم کد را تحقیق کنید. باید خروجی فیلتر کاملاً بدون نویز باشد.

برای عیب‌یابی سیستم می‌توانید از Signal Tap استفاده کنید. زمانی که سیستم دچار مشکل است و خروجی درستی ندارد، یکی از راه‌های رفع مشکل، استفاده از برنامه‌ای است که بتوان به وسیله آن، سیگنال‌های داخل FPGA را مشاهده کرد. به طور کلی برای مشاهده مقدار سیگنال‌های داخلی، از نرم افزار های متفاوتی (analyzer) استفاده می‌شود. نرم‌افزار مورد استفاده در Quartus II ، نرم‌افزار Signal Tap است. شیوه کار بدین صورت است که یک سیگنال توسط کاربر به عنوان مبنا معرفی می‌شود و با توجه به این سیگنال، از وضعیت سایر سیگنال‌های مشخص شده نمونه‌برداری می‌شود. این کار برای پیدا کردن محل خطا بسیار مناسب است. نحوه کار با Signal Tap در سایت درس بارگذاری شده است. در صورت نیاز به اطلاعات بیشتر می‌توانید از منابع موجود در سایت شرکت اینتل استفاده کنید.

۴ - نکات پیشرفته‌تر اما اساسی

گام ۱

برای آنکه ابزار سنتز بتواند زمان‌بندی مسیرهای ترکیبی بین فلیپ‌فلاپ‌های مدار را به درستی در هنگام سنتز و جایابی مدار انجام دهد، نیاز به دانستن فرکانس کلاک دارد. کلاک ورودی به مدار شما فرکانس ۵۰ مگاهرتز دارد. (یک constraint file با پسوند sdc. اضافه کنید که در آن ذکر کنید که فرکانس کلاک ورودی ۵۰ مگاهرتز می‌باشد.) برای این کار می‌توانید از رابط گرافیکی Quartus کمک بگیرید. بدین منظور از منوی Assignments گزینه TimeQuest Timing Analyzer Wizard... را انتخاب کنید. در بخش Clock می‌توانید محدودیت مد نظر خود را اعمال کنید. محدودیت اعمال شده را در فایل sdc. تولید شده مشاهده و گزارش نمایید و آن را توضیح دهید. چه محدودیتهای زمانی دیگری را می‌توان توسط این Wizard مشخص کرد؟

گام ۲

Routing کلاک معمولاً با بقیه سیگنال‌ها متفاوت است (چرا؟). بنابراین باید به ابزار سنتز گفته شود که کدام سیگنال کلاک می‌باشد که آن را بر روی مسیرهای از پیش مشخص کلاک در FPGA سنتز نماید.

این کار در Quartus II به صورت خودکار انجام می‌شود (این ابزار سنتز چگونه کلاک را شناسایی می‌کند و این کار را انجام می‌دهد؟ اگر کلاک‌های شناسایی شده در مدار بیشتر از مسیرهای از پیش مشخص شده در FPGA باشد با چه منطقی مناسب‌ترین سیگنال‌ها را برای انتقال روی شبکه‌های کلاک شناسایی می‌کند؟)

حال شما باید این کار را دستی انجام دهید. برای این کار باید خودکار Quartus II را خاموش کنید. (چگونه؟) سپس کلاک مورد نظر را به عنوان کلاک معرفی کنید. جهت راهنمایی به مرجع [1] مراجعه کنید. در بعضی از FPGA ها با توجه به محدودیت‌های موجود در طراحی باید این کار را انجام داد.

خواسته‌ها:

- توضیحات مربوط به عملکرد هر یک از ماژول‌ها گزارش شود.
- کد پیاده‌سازی سخت‌افزاری ماژول تولیدکننده baud را ارسال نمایید.
- کد پیاده‌سازی سخت‌افزاری ماژول گیرنده را ارسال نمایید.
- کد پیاده‌سازی سخت‌افزاری سیستم کلی را ارسال نمایید.
- پاسخ مربوط به سوالات داخل متن در گزارش آورده شود.

نکات مهم:

- (۱) رعایت استایل کدنویسی ارائه شده در کلاس ضروری است.
- (۲) نیازی به گزارش تمامی مراحل انجام آزمایش نیست اما اهداف، کلیات، مقدار پارامترهای مختلف، شرایط درستی‌سنجی، نتیجه‌ی درستی‌سنجی و سایر نکات مهم را حتماً در گزارش خود قید نمایید.
- (۳) آپلود فایل‌های شبیه‌سازی به همراه فایل گزارش ضروری است.

مراجع

[1] “How do I assign a clock in my design to use specific global, regional, dual-regional, or periphery clock networks?” Online: https://www.altera.com/support/support-resources/knowledge-base/solutions/rd09282011_171.html

موفق باشید