

معرفی باس I²C و جایگاه آن در طراحی سیستم های دیجیتال

علی اکبر مصدق عنبران

ali_mosaddegh2000@yahoo.com

موسسه آموزش عالی سجاد مشهد

چکیده :

هدف اصلی از این مقاله معرفی و بررسی ویژه گی های پروتکل یک باس سریال به نام I²C است، که امکان پیاده سازی سیستمهای دیجیتالی و ارتباط بین آنها را با استفاده از فقط یک باس دو خطی فراهم می کند. این باس دارای امتیازات منحصر به فردی است که آن را از سایر باس های مشابه متمایز میکند که در این مقاله به آن اشاره خواهد شد. هم اکنون این پروتکل برای تبادل اطلاعات بین Device های کنترلی هوشمند از جمله میکروکنترلرها و یا مدارات چند منظوره ای از جمله راه انداز های^۱ LCD، حافظه ها، پورت های I/O متحرک^۲ و مدارات کاربرد گرای^۳ از جمله مدارات قابل تنظیم دیجیتالی^۴ و پردازش سیگنال برای سیستم های رادیویی و ویدئویی به کار می رود.

واژه گان کلیدی : I²C , Clock Synchronization , Arbitration , Start Byte , HS-Device

1- مقدمه :

ابزارهای جانبی در یک سیستم معمولاً با استفاده از یک I/O Device به mcu متصل می گردند و از باس های موازی آدرس و دیتا و احياناً دیکودرهای آدرس استفاده می شود که منجر به سیم کش زیادی بر روی برد مدار چاپی برای مسیرهای آدرس و دیتا می شود. این مسئله در محصولات از جمله TV-set، VCR ها و تجهیزات صوتی قابل قبول نیست. به علاوه این مشکل در چنین ابزارهایی باعث افزایش حساسیت دستگاه به تداخل امواج الکترومغناطیسی^۵ و نیز تخلیه الکترواستاتیکی^۶ می گردد. تحقیق در زمینه حل این مشکلات در شرکت فیلیپس منجر به ابداع این پروتکل گردید. در اوایل دهه 1980 این شرکت یک باس ساده دو خطی برای کنترل کارآمد درون IC ابداع کرد. این باس Inter-IC و یا I²C نامیده شد. در سال 2000 آخرین ویرایش این پروتکل ارائه شد و هم اکنون تولیدات این شرکت شامل رنج گسترده ای از محصولات است که از این باس استفاده می کنند. بر روی تمامی Device های سازگار با این پروتکل یک مدار واسطی قرار گرفته است که امکان تبادل اطلاعات را با یکدیگر به راحتی بر روی باس پیدا کنند. هابهای ارائه شده و تکرار کننده باس و سویچ های دو جهته و مالتی پلکسرها باعث افزایش تعداد Device هایی شده اند که باس می تواند بپذیرد. باس I²C فضا را حفظ می کند و باعث کاهش چشمگیر هزینه نهایی می شود. دو خط باس به معنی سیم های چاپی کمتر و در نتیجه برد های مدار چاپی خیلی کوچکتر و تست و عیب یابی راحتتر و سریعتر است.

¹ Driver

² Remote I/O Ports

³ Application oriented circuits

⁴ Digital tuning circuits

⁵ EMI

⁶ ESD

2- اصطلاحاتی در این پروتکل :

Master : Device ای که شروع کننده ارسال دیتا و تولید کننده کلاک باس و پایان دهنده ارسال دیتا می باشد.

Slave : Device ای که توسط Master آدرس دهی شده است.

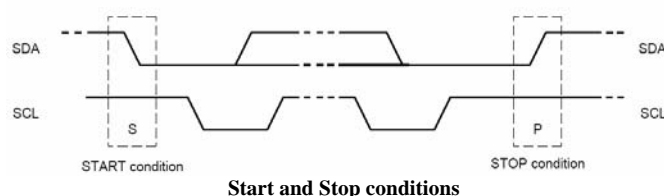
Multi-Master : بیش از یک Master می توانند برای تصاحب باس بدون از بین بردن دیتای یکدیگر تلاش کنند.

Arbitration : مکانیزمی است که اطمینان می دهد اگر بیش از یک Master همزمان بخواهند یک باس را به کنترل خود درآورند تنها یکی از آن ها بدون این که اطلاعات از بین رود موفق خواهد شد.

Clock Synchronization : مکانیزمی است که در آن سیگنال کلاک دو یا چند Device بر روی باس با هم، همزمان می شود.

Start condition : یک حالت خاص است که برای اعلان شروع هر انتقال توسط Master ایجاد می شود.

Stop condition : یک حالت خاص است که برای اعلان پایان هر انتقال توسط Master ایجاد می شود.



3- بعضی از ویژه گی های باس I²C :

1. قابلیت آدرس دهی 7 بیتی (127 Device متفاوت بر روی باس در مد Standard) و نیز آدرس دهی 10 بیتی در ویرایش جدید این پروتکل (1024 Device بر روی باس).
2. باس تنها به دو خط SCL و SDA نیاز دارد.
3. هر Device بر روی باس با استفاده از نرم افزار قابل آدرس دهی به وسیله یک آدرس منحصر به فرد است.
4. این باس در حقیقت یک باس Multi-Master است که امکان جدال¹ را به چندین Master می دهد.
5. بر روی باس دیتاهای 8 بیتی به صورت دو جهت با نرخ ارسال 10 kbit/s در مد Standard و بیش از 400 kbit/s در مد Fast و بیش از 3.4 Mbit/s در مد High-Speed(HS) ارسال می شوند.
6. فیلتر گنجانده شده بر روی چیپها امکان حذف موجک های² خط SDA باس را فراهم می کند. به طوریکه با استفاده از بافر ویژه ارایه شده از طرف شرکت فیلیپس طول باس به یک کیلو متر نیز خواهد رسید.
7. امکان ایجاد یک باس Mixed-speed وجود دارد. یعنی Device های HS ، Standard و Fast به باس متصل شوند.
8. نیاز به طراحی مدار واسط برای این باس وجود ندارد چرا که این مدار به صورت مجتمع بر روی Device ها قرار می گیرد.
9. هم زمان بودن آدرس دهی و ارسال دیتا این پروتکل را به یک پروتکل کاملاً نرم افزار گرا تبدیل کرده است.
10. Device هایی که به باس متصل هستند می توانند بدون این که در کار سایر Device ها اختلالی ایجاد کنند از باس حذف شوند و یا Device های جدیدی به باس متصل شوند.
11. Device های I²C که با تکنولوژی CMOS طراحی می شوند مزایایی همچون جریان مصرفی پایین، ایمنی نویز بالا، رنج تغذیه زیاد و رنج گسترده دمای کار را فراهم می کند.
12. هر master می تواند فرکانس کلاک خود را بر روی باس داشته باشد.

¹ Arbitration

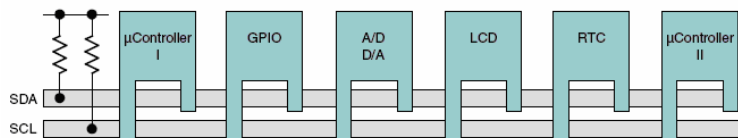
² Spike

13. امکان اتصال Device هایی با ولتاژ تغذیه و سطوح منطقی متفاوت به باس وجود دارد.

4- مشخصات عمومی باس :

باس I^2C از دو مسیر SDA و SCL تشکیل شده است که دو جهت می باشند. به طوری که SDA به معنی مسیر دیتای سریال و SCL به معنی مسیر کلاک سریال است. هر Device ای که به باس متصل می شود آدرس منحصر به فرد خود را دارد و هیچ فرقی نمی کند که یک mcu یا راه انداز LCD و یا حافظه باشد. هر کدام از این Device ها می توانند نقش فرستنده و یا گیرنده را با توجه به موقعیت و عملکردشان در مدار به خود بگیرند. تولید کلاک باس تنها وظیفه Master می باشد و هر Master می تواند فرکانس کلاک خود را داشته باشد.

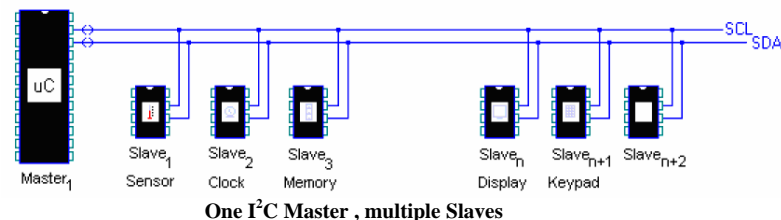
طبقه خروجی هر Device، Open-Drain و یا Open-Collector است تا بتواند عملکرد wire-AND را انجام دهد. بنابراین این دو خط SDA و SCL توسط دو مقاومت Pull-up به ولتاژ تغذیه متصل می شوند.



عملکرد wire-AND ویژگی های خاصی را به این باس می دهد که در ادامه به بعضی از این موارد اشاره می شود. سیگنال های Start و Stop همواره توسط Master ایجاد می شود و باس پس از حالت Start مشغول به حساب آمده و دوباره پس از ایجاد حالت Stop آزاد می گردد.

5- یک انتقال ساده :

برای مثال از آنجا که معمولا Master ها یک میکروکنترلر می باشند با توجه به شکل زیر فرض می کنیم که mcu می خواهد دیتایی را به یکی از Slave هایش بفرستد.



در ابتدا mcu یک حالت Start بر روی باس ایجاد می کند. این یک سیگنال توجه ای است برای تمامی Device هایی که به باس متصلند، از آن به بعد تمام Device ها متوجه باس شده و منتظر دیتا می باشند. سپس mcu آدرس Slave ای را که می خواهد به آن دسترسی پیدا کند را می فرستد و در آن مشخص می سازد که می خواهد از Slave مربوطه دیتایی بخواند و یا به آن بفرستد.

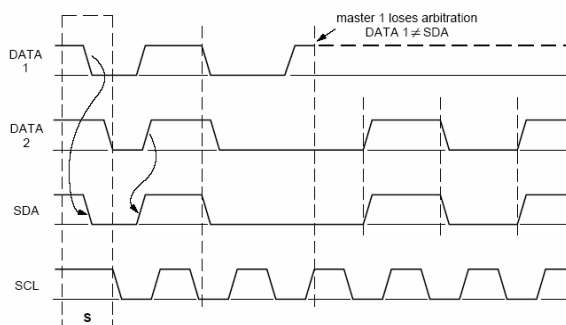


به محض فرستادن این آدرس آن را تمامی Device ها دریافت کرده و با آدرس خود مقایسه می کنند. هر Device ای که این دو آدرس را مساوی ببیند یک پاسخ برای Master ایجاد می کند که سیگنال تصدیق کردن¹ نامیده می شود. به محض دریافت این سیگنال توسط Master تبادل اطلاعات با Slave آغاز می شود. در نهایت Master یک حالت Stop ایجاد می کند که به معنی آزاد شدن باس می باشد.

¹ Acknowledge (ACK)

6- Arbitration :

یک Master تنها زمانی یک انتقال دیتا را شروع می کند که باس را آزاد ببیند و به محض اینکه حالت Start بر روی باس ایجاد شد سایر Device ها برای ارسال دیتا تا آزاد شدن باس باید صبر کنند. اما اگر زمانی که باس آزاد است دو یا چند Device هم زمان حالت Start را ایجاد کنند از دید باس قابل قبول خواهد بود و تمامی آن Device ها به عنوان Master شناخته خواهند شد. در چنین وضعیتی برای مشخص شدن یک Master باید بین آنها جدال صورت گیرد. شکل زیر جدال بین دو (که البته تعداد بیشتری نیز می توانند باشند)، Master را نشان می دهد.

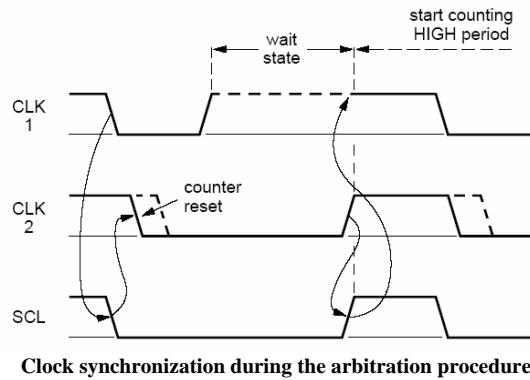


Arbitration procedure of two masters

در این روند در هر لحظه که یک تفاوت بین سطح دیتای داخلی Master (DATA1) و سطح واقعی که بر روی SDA وجود دارد توسط هر کدام از Master ها احساس شود به معنی باخت و خروج از مبارزه می باشد تا سرانجام یک Master باقی بماند. بنابر این Master پیروز همواره سطح دیتای داخلی اش با سطح دیتای روی خط SDA در طول جدال یکی بوده و به همین خاطر این روند اگر چه طولانی گردد هیچ دیتایی از Master پیروز از بین نمی رود. برخلاف روند همزمان سازی کلاک، که بر روی خط SCL اجرا می شود این روند بر روی خط SDA انجام می شود. این روند ممکن است به تعداد زیادی بیت ادامه یابد تا Master پیروز بر روی باس مشخص شود. اگر چندین Master بخواهند در طول این روند به یک Slave دسترسی پیدا کنند این امر امکان پذیر است. حتی اگر یک Master که در این جدال شرکت کرده و بازنده شده است و امکان تبدیل شدن به یک Slave را داشته باشد (برای مثال یک میکروکنترلر که هم می تواند برنامه Slave و هم Master را اجرا کند) می تواند پس از اتمام این روند فوراً از الگوریتم Master به الگوریتم Slave تغییر عملکرد داده و توسط Master پیروز که تا لحظاتی قبل به جدال با او می پرداخت آدرس دهی شود. جدال تنها بین Master ها اجرا می شود و هیچ Slave ای نمی تواند در آن شرکت کند. از آنجا که کنترل باس توسط آدرس دهی Master و یا جدال بین چند Master مشخص می شود در نتیجه برای کنترل باس هیچ Central Master و یا اولییتی وجود ندارد.

7- Clock Synchronization :

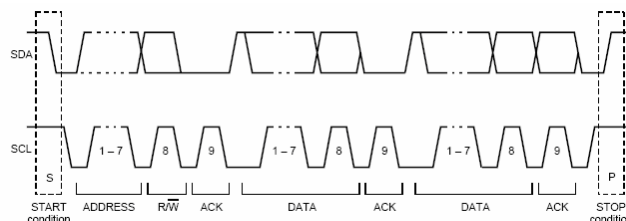
هر Master به هنگام انتقال اطلاعات، می تواند دیتای خود را با کلاک مخصوص به خود انتقال دهد. اما در اجرای روند جدال بین چند Master با کلاک متفاوت نیاز به یک کلاک تعریف شده است. با توجه به شکل از آنجا که خروجی کلاک تمامی Device ها به خط SCL متصل است هرگاه کلاک یک Device ، صفر گردد خط SCL صفر می شود و در این صورت گذر پایین به بالای سایر کلاک ها اگر تنها یک کلاک همچنان صفر باشد بر روی خط SCL تغییری ایجاد نمی کند.



در واقع همزمان سازی کلاک به دلیل Wire-AND بودن درایورهای رابط I^2C که به خط SCL متصل هستند امکان پذیر است. در هنگام جدال Device ها دیتای خود را با کلاک همزمان شده بیرون می دهند.

8- آدرس دهی 7 بیت :

پس از حالت Start در قالب یک فریم 8 بیتی آدرس Slave فرستاده می شود که 7 بیت می باشد و به دنبال آن هشتمین بیت، که جهت دیتا را نشان می دهد، ارسال می شود.

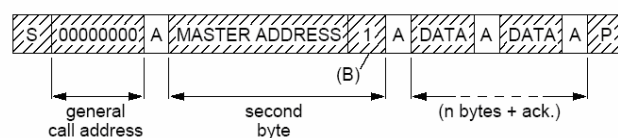


A complete data transfer

صفر بودن این بیت نشان دهنده فرستادن دیتا به Slave و یک بودن آن درخواست دیتا از Slave می باشد. با استفاده از بایت ادرس مشخص می شود که کدام Slave آدرس دهی شده است.

9- General Call :

آدرس فراخوان عمومی¹ یک آدرس رزرو شده و برای آدرس دهی همه Device هایی است که به باس I^2C متصل می باشند. از این حالت می توان در مواقعی که یک Master می خواهد یک دیتا را برای تمامی Device های روی باس ارسال کند و یا هنگامی که Master آدرس Slave مورد نظر خود را نمی داند استفاده کرد (از جمله یک صفحه کلید و یا یک پوینده² که نمی تواند برای فرستادن ادرس Slave مورد نظر خود برنامه ریزی شود). پس با وجود اینکه Master ادرس Slave خود را نمی داند می تواند با تولید این ادرس و سپس ادرس خودش، خود را به سیستم بشناساند. ادرس این Master



Data transfer from a hardware master-transmitter

توسط یک Device هوشمند که به باس متصل است (مثلا یک میکرو کنترلر) شناسایی شده و اطلاعات دریافت می شود.

¹ General Call Address

² Scanner

10- Start Byte :

یک Device هوشمند به دو روش می تواند به باس I^2C متصل شود : 1) با استفاده از رابط سخت افزاری باس که بر روی Device ها تعبیه می شود. به این ترتیب به راحتی می توان برنامه ریزی شود تا در هنگامی که از طرف باس آدرس دهی می شود، با استفاده از منبع وقفه رابط باس، مورد وقفه قرار گیرد. 2) بدون رابط سخت افزاری. در این حالت Device باید بطور پیوسته باس را با استفاده از نرم افزار مانیتور کند. واضح است که CPU هر چقدر بیشتر به این کار بپردازد بیشتر از انجام توابع داخلی خود بازمی ماند. برای رفع این مشکل حالت Start طولانی تر از حالت طبیعی خود اجرا می شود. بنابراین به جای یک بیت Start یک بایت Start ارسال خواهد شد.

Device ای که با نرخ پایین باس را مانیتور می کند فرصت دارد تا این بایت را تشخیص داده، پس از آن به نرخ بالاتری برای دریافت اطلاعات سوئیچ کند. حال اینکه یک master بر روی باس از بیت Start استفاده کند یا بایت Start بسته به حضور و یا عدم حضور چنین slave هایی بر روی باس دارد که این امر توسط رجیسترهای کنترلی هر master قابل انتخاب است.

11- Fast mode :

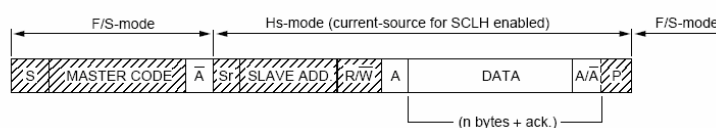
در این پروتکل به غیر از مد standard مد دیگری به نام مد Fast وجود دارد که در آن Device ها می توانند با نرخ 400 kbit/s دیتا را دریافت و ارسال کنند. Device های مد Fast با Device های مد standard انطباق داشته و می توانند با یکدیگر بر روی باس ارتباط برقرار کنند.

12- High-Speed-mode :

Device های HS یک جهش خوبی را در سرعت انتقال این باس ایجاد کرده اند. در این مد محدودیت هایی از جمله عدم امکان جدال و همزمان سازی کلاک وجود دارد. اما سایر مشخصات باس و فرمت انتقال دیتا با مد standard تفاوتی ندارد. Device های HS با نرخ انتقالی بیش از 3.4 Mbit/s می توانند کاملاً در حالت انطباق با Device هایی در مد fast و standard بر روی یک باس mixed-speed تبادل دیتا داشته باشند.

13- فرمت انتقال دیتا در HS-mode :

در مد HS یک master یک کد هشت بیتی به نام کد master¹ که برای هر master ثابت و منحصر به فرد است را ارسال می کند. این کد به صورت نرم افزاری قابل تعیین بوده و توسط طراح انتخاب می شود. همان طور که گفته شد در این حالت همزمان سازی کلاک و جدال امکان پذیر نیست. لذا تمامی Device های HS ابتدا در مد fast شروع به کار می کنند.



Data transfer format in Hs-mode

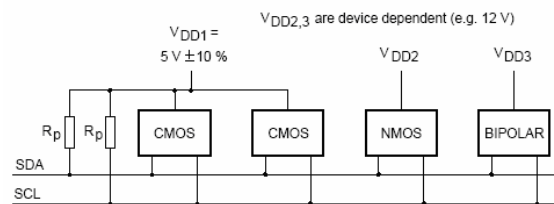
در نتیجه وقتی که یک master در این مد می خواهد slave خود را آدرس دهی کند ابتدا به مد fast سوئیچ می کند. اگر در همان لحظه چند master دیگر نیز بخواهند باس را در اختیار بگیرند نیاز به جدال و همزمان سازی کلاک است که در مد fast انجام می شود. چون هر master در این مد دارای یک کد منحصر به فرد است، جدال در طول 8 بیت این کد پایان می پذیرد و علاوه بر اینکه master پیروز مشخص می شود کد خود را نیز به سایر Device های روی باس فرستاده و این کد نشانه آن است که یک انتقال HS آغاز می شود. سپس master پیروز از مد fast به مد HS سوئیچ می کند و آدرس slave را می فرستد. سایر مراحل مانند مد standard ادامه می یابد. در این روند اگر در ابتدا جدال رخ نمی داد، باز هم master در

¹ Master Code

ابتدا باید کد master را برای تمامی Device ها ارسال می کرد تا نشان دهنده یک انتقال HS بر روی یک باس mixed-speed باشد. این کد تضمین می کند که جدال مطمئناً در طول حداکثر همین 8 بیت پایان پذیرد. master پس از انتقال دیتای خود در مد HS و ایجاد یک حالت Stop مجدداً به مد Fast یا Standard سوئیچ می کند.

14- اتصال Device هایی با سطح منطقی متفاوت :

یک مدار شیفت سطح ولتاژ¹ در طبقه خروجی هر Device قرار دارد. عملکرد این مدار شیفت سطح ولتاژ بر روی باس است. یعنی Device هایی با سطح ولتاژ تغذیه متفاوت (مثلاً 3 ولت، 5 ولت و یا 10 ولت) می توانند به این باس متصل شوند.



Devices with input levels related to V_{DD} (supply V_{DD1}) mixed with fixed input level Devices (supply $V_{DD2,3}$) on the I2C-bus

15- محصولات از خانواده I^2C :

I^2C در عمل به یک استاندارد جهانی تبدیل گشته و هم اکنون بر روی بیش از 1000 نوع IC متفاوت پیاده شده و بیش از 50 کمپانی بزرگ صنعت الکترونیک از جمله Intel، Atmel، Xico و Analog Device و ... آن را بکار می گیرند. در زیر تنها نمونه هایی از تولیدات شرکت فیلیپس در زمینه این باس آورده شده است.

*** مبدل آنالوگ به دیجیتال و دیجیتال به آنالوگ با رابط I^2C : این IC ها برای دریافت داده ورودی و یا ارسال نمونه گرفته شده از این باس استفاده می کنند.

*** کنترلر باس موازی به باس I^2C : امکان اتصال باس های 8 بیتی موازی میکروپروسسوری را به باس I^2C می دهد.
 *** تکرار کننده باس²، هاب و توسعه دهنده باس I^2C : باعث ایزوله شدن ظرفیت خازنی باس شده در نتیجه تعداد Device های بیشتر و طول بلندتر باس را نتیجه می دهد.

*** Dip Switch های I^2C مبتنی بر حافظه EEPROM : کانال انتخاب شده را ثبت کرده و با پایین آمدن ناگهانی تغذیه کانال انتخاب شده از بین نمی رود.

*** دایمر و نمایشگر های LED مبتنی بر I^2C : امکان ارسال دستورات کنترلی برای تنظیم فرکانس و روشنایی را از طریق این باس به کاربر می دهد.

*** توسعه دهنده I/O همه منظوره³ I^2C : امکان ارتباط باس I^2C را به باس SMBus و نیز ارتباط باس های موازی را به باس های سریال I^2C و SMBus می دهد.

*** سوئیچ ها و مالتی پلکس های I^2C : امکان اتصال یک این باس را به چندین باس I^2C و نیز انتخاب یک باس I^2C از بین چندین باس توسط Master فراهم می کند.

*** I^2C Read-Time Clock

*** راه انداز های مبتنی بر I^2C

*** حافظه های EEPROM سریال I^2C

*** سنسورهای ولتاژ و دمای I^2C : امکان گزارش دما و ولتاژ را از طریق این باس به پردازنده فراهم می کند.

¹ Level - shifter

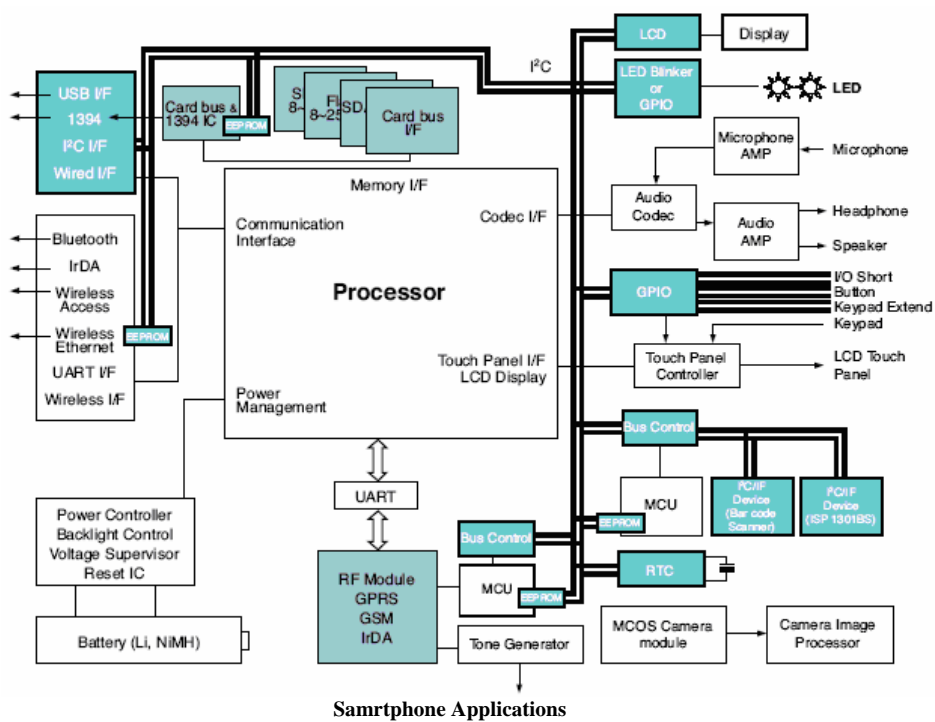
² Bus Repeaters

³ GPIO

¹ Smart Phone

The diagram illustrates the system architecture for LCD TV applications. It features a central **Main Display Chip** (containing **Main** and **PIP** sections) which is the core of the system.
Input Sources:
 - **S-Video** and **CVBS1** inputs feed into a **Video Decoder**, which outputs **4:2:2/4:4:4 YCoCr/RGB 16 bit/24 bit** to the Main section of the Display Chip.
 - **CVBS2** input feeds into another **Video Decoder**, which outputs **4:2:2/4:4:4 YCoCr/RGB 16 bit/24 bit** to the PIP section of the Display Chip.
 - An **RF** input feeds into a **Tuner**, which then feeds into the **Video Decoder** for CVBS2.
Internal Components and Connections:
 - **SDRAM** (Static Dynamic Random Access Memory) is connected to the Main Display Chip at **100/133 MHz**.
 - An **MCU** (Microcontroller Unit) is connected to a **Bus Control** block at **50MHz**.
 - The **Bus Control** block is connected to the Main Display Chip at **100/400 kHz**.
 - A **DIP Switch** (labeled **Mode Select Data ROM**) is connected to the Bus Control block.
 - A **GPIO** (General Purpose Input/Output) block is connected to the Bus Control block and also receives **Relay** and **Keypad** inputs.
 - The **GPIO** block is connected to an **Expander or Switch** block, which in turn is connected to the Bus Control block.
 - The **Bus Control** block is connected to an **LED Blinker** block at **100/400 kHz**.
Outputs and Other Components:
 - The Main Display Chip outputs **Digital RGB** and **Hsync, Vsync** signals to the **LCD Panel**.
 - The system also includes **Audio** and **Power Supply** components.
 - The **LED Blinker** block provides **LED control** to the **LEDs** (represented by star symbols).

و یا بلاک دیگرام یک تلفن هوشمند^۱ که بکار گیری تعدادی از محصولات I^2C موجب کاهش چشمگیر حجم طراحی و ایجاد امتیازات بسیاری در آن شده است.



16- نتیجه گیری :

وقتی تعدادی Device بر روی یک باس سریال با هم تبادل اطلاعات می کنند باید از پروتکلی پیروی کننده که از تمامی اغتشاشات ممکن از جمله از بین رفتن دیتا بر روی باس و بلوکه شدن اطلاعات جلوگیری کند. Device های پر سرعت بتوانند با Device های کم سرعت بدون مشکل ارتباط برقرار کنند. سیستم به Device های روی باس اطمینان داشته باشد یعنی تغییر و تحول و به روز رسانی و یا گسترش سیستم امکان پذیر باشد و اگر Device هایی با سرعت کلاک متفاوتی به باس متصل شدند مرجع کلاک باس مشخص باشد و اخلاقی در ارسال دیتا پیش نیاید. اینها جزیی از نگرانی های هر طراح یک سیستم دیجیتال است و در عین حال معیارهایی است که در مشخصات این پروتکل دیده شده است. در این مقاله تعدادی از ویژه گی های عمده و امتیازات این پروتکل مورد بررسی قرار گرفت و مواردی از Device ها و سیستم های مبتنی بر این باس معرفی گردید. امید است این مقاله موجب آشنایی و تحقیق بیشتر مهندسين و طراحان سیستم های دیجیتال در مورد این باس و به کار گیری آن در تجهیزات و صنایع الکترونیک داخلی گردد.

17- مراجع :

- [1]: D.Paret and C.Fenger , *The I²C Bus from Theory to Practice* , John Wiley & Sons , Portland , 1999.
- [2]: www.semiconductors.philips.com/buses/i2c/
- [3]: www.mcc-us.com
- [4]: www.esacademy.com/index.htm
- [5]: www.i2cchip.com/