۷۶۲۷۳

توصیف عملکردی فرستنده گیرنده Bluetooth و کانال رادیویی مربوطه توسط VHDL

امین فیروزشاهیان
گروه مهندسی برق و کامپیوتر
دانشکده فنی دانشگاه تهران
mma@faraco.com

زین‌العابدین نوابی
گروه مهندسی برق و کامپیوتر
دانشکده فنی دانشگاه تهران
navabi@ece.neu.edu

محمود کمره‌ای
گروه مهندسی برق و کامپیوتر
دانشکده فنی دانشگاه تهران

چکیده : VHDL، یکی از قویترین ابزارهای مدلسازی و توصیف در مهندسی الکترونیک و کامپیوتر به‌شمار می‌رود. این ابزار امکاناتی بسیار جامع و قوی در اختیار استفاده کننده قرار می‌دهد که محدودهٔ وسیعی از شبیه‌سازیها را از سطح گیت تا سطح سیستم امکانپذیر می‌سازد. وجود ویژگیهایی نظیر همزمانی (Concurrency) و امکان تعریف انواع گونه‌ها (Types) آن را قادر می‌سازد که برای انجام شبیه‌سازیهای دیگری علاوه بر سخت‌افزار بکار رود. مقالهٔ حاضر در زمینهٔ شبیه‌سازی عملکرد یک تراشه فرستنده و گیرندهٔ رادیویی و کانال ارتباطی مربوطه توسط VHDL می‌باشد.

کلمات کلیدی : *Bluetooth، VHDL، شبیه‌سازی*

۱-مقدمه

شبیه‌سازی سیستم فرستنده-گیرنده Bluetooth که در این مقاله بررسی می‌شود، در قالب بخشی از یک پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد صورت پذیرفته است و هدف از انجام آن ایجاد بستری ارتباطی برای برقراری ارتباط بین دو یا چند لایهٔ Baseband از استاندارد Bluetooth بوده تا بدینوسیله بتوان ارسال و دریافت بسته‌های اطلاعاتی بین این لایه‌ها و نیز حالتهایی نظیر تاثیر نویز یا رح دادن تصادم بین بسته‌های اطلاعاتی واحدهای مختلف و اثرات آن را برروی لایهٔ Baseband شبیه‌سازی نمود.

در این نوشتار، ابتدا مروری کوتاه بر مشخصات و نحوهٔ مدولاسیون رادیویی در استاندارد Bluetooth انجام می‌شود و سپس به نحوهٔ مدلسازی یک سیگنال رادیویی بوسیلهٔ VHDL و انتقال آن به یک کانال رادیویی نظیر فضا پرداخته می‌شود و تعاریف و فرضیات لازم بیان می‌گردند و پس از آن توصیف این تراشه بوسیلهٔ VHDL بیان می‌گردد.بخش دیگرمقاله به توصیف یک کانال رادیویی که در مورد Bluetooth مشخصا فضا می‌باشد اختصاص دارد. در این بخش چگونگی برخورد با سیگنالهای رادیویی ناشی از منابع مختلف و انجام عملیات لازم به منظور شبیه‌سازی اثرات مختلف کانال رادیویی برروی سیگنال انتقالی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-مروری مختصر بر رادیوی Bluetooth

سیستم رادیویی Bluetooth از روش طیف گستردهٔ پرش فرکانسی[۱] برای انتقال اطلاعات استفاده می‌کند. باند فرکانسی مورد استفاده، باند ۲/۴ GHz صنعتی، علمی، پزشکی (ISM[۲]) می‌باشد. در اکثر کشورها این باند از ۲۴۰۰ MHz تا

---

[۱] Frequency Hopping Spread Spectrum

MHz ۲۴۸۳/۵ گسترده شده است، اما در برخی کشورها نظیر فرانسه، اسپانیا و ژاپن محدودیتهایی در استفاده از برخی قسمتهای این باند وجود دارد. در حالت عادی محدودهٔ فرکانسی یاد شده به ۷۹ کانال فرکانسی، هریک با پهنای باند MHz ۱ تقسیم می‌شود که الگوریتم خاصی یک سیستم طیف گستردهٔ پرش فرکانسی را بر روی آن پیاده می‌کند. در کشورهایی که محدودیتهای فرکانسی در آنها وجود دارد، بجای ۷۹ کانال، ۲۳ کانال فرکانسی در پهنای باند موجود تعریف می‌شود و الگوریتم پرش فرکانسی از این ۲۳ کانال استفاده می‌نماید. مدولاسیون بکار رفته در سیستم Bluetooth، مدولاسیون GFSK[۳] می‌باشد. که در آن یک منطقی با انحراف فرکانسی مثبت و صفر منطقی با انحراف فرکانسی منفی نسبت به فرکانس پایه مشخص می‌شود. مطابق استاندارد حداقل انحراف هیچگاه نباید از KHz ۱۱۵ کمتر گردد. در گیرندهٔ Bluetooth نیز حداقل حساسیت نسبت به سیگنالهای دریافتی باید dBm 70- یا بهتر باشد.

۳-توصیف عملکردی فرستنده-گیرنده Bluetooth

به منظور توصیف تراشهٔ رادیویی Bluetooth در VHDL، قبل از هرچیز تعاریف لازم باید صورت گیرد. ابتدا باید یک سیگنال رادیویی را بوسیلهٔ VHDL مدل نمود و وسیله‌ای برای انتقال آن از فرستنده-گیرنده به فضا و بالعکس فراهم کرد. با توجه به امکانات بسیار قوی VHDL برای تعریف انواع گونه‌ها[۴]، این امر بسادگی امکانپذیر است. بنابراین ابتدا به تعریف یک سیگنال رادیویی بوسیلهٔ VHDL می‌پردازیم. یک سیگنال رادیویی را می‌توان ترکیبی از یک سری سیگنالهای سینوسی فرض نمود که مؤلفه‌های آن نامیده می‌شوند. در نتیجه باید ابتدا یک سیگنال سینوسی را توصیف کرد.

یک سیگنال سینوسی با مشخصه‌های خود، فرکانس، دامنه و فاز شناخته می‌شود. لذا می‌توان هر سیگنال سینوسی را بعنوان یک رکورد که از سه بخش نامبرده تشکیل شده است تعریف نمود. اما از آنجائیکه این بحث به ارسال و دریافت سیگنالهای سینوسی مربوط می‌شود، بجای دامنه از توان سیگنال استفاده می‌کنیم. پس می‌توان تعریف یک سیگنال سینوسی را مطابق شکل ۱ دانست. تعریف گونه‌های فرکانس و توان و فاز در شکل ۲ دیده می‌شوند. بنابراین همانطورکه ذکر شد، می‌توان سیگنال رادیویی را ترکیبی از چند سیگنال سینوسی دانست و تعریف آن را همانند شکل ۱ فرض نمود.

```
TYPE Sine_Signal IS RECORD
  F : Frequency;
  P : Power;
  Ph: Phase;
END RECORD;

TYPE RF_Signal IS ARRAY (NATURAL RANGE <>) OF Sine_Signal;
```

شکل ۱ - تعریف سیگنال سینوسی و سیگنال رادیویی در VHDL

---

[۲] Industrial, Sceintific, Medical

[۳] Gaussian Frequency Shift Keying

[۴] Types

```
TYPE Frequency IS RANGE 0 TO Integer'HIGH
UNITS
  KHz;                          -- Kilo Hertz, base unit
  MHz = 1000 KHz;               -- Mega Hetrz
  GHz = 1000 MHz;               -- Giga Hertz
END UNITS;

TYPE Power IS RANGE 0 TO Integer'HIGH
UNITS
        pw;                     -- Pico watt,base unit
        nw = 1000 pw;           -- Nano watt
        uw = 1000 nw;           -- Micro watt
        mw = 1000 uw;           -- Milli watt
        w  = 1000 mw;           -- Watt
END UNITS;

SUBTYPE Phase IS Real RANGE -180.0 TO +180.0;
```

شکل ۲ - تعاریف گونه‌های فرکانس، توان و فاز در VHDL

در VHDL فرستنده-گیرندهٔ رادیویی و کانال ارتباطی آن در قالب نهاد[۵]هایی توصیف می‌شوند که برای انتقال سیگنالهای رادیویی از فرستنده-گیرنده به فضا و بالعکس باید درگاههایی از نوع ورودی/خروجی[۶] برای آنها تعریف شود. لذا باید از یک تابع تصمیم گیرنده[۷] استفاده نمود. این تابع در VHDL وظیفهٔ تصمیم گیری در مورد مقدار نهایی یک سیگنال را هنگامی که توسط چند منبع مختلف مقداردهی می‌شود، برعهده دارد. در این مورد، وظیفهٔ انتقال سیگنال رادیویی از تراشه به فضا و بالعکس بر عهدهٔ این تابع خواهد بود.

بهمین جهت، گونهٔ خاصی بنام "نقطهٔ ورود به فضا" تعریف می‌شود (شکل ۳). در یک نقطهٔ ورود به فضا، جهت سیگنال رادیویی، موقعیت مکانی فرستنده و سیگنال رادیویی ارسالی به تابع تصمیم گیرنده داده شده، سیگنال رادیویی دریافتی از وی گرفته می‌شود. بخش To_Air شامل سیگنال رادیویی است که از تراشه به فضا وارد شده و بخش From_Air سیگنال رادیویی است که از فضا به تراشه می‌رسد. تعاریف گونه‌های موقعیت و جهت در شکل ۴ آورده شده‌اند. تابع تصمیم گیرنده دو سیگنال رادیویی را از دو منبع مختلف (تراشهٔ رادیویی و فضا) دریافت نموده و با توجه به جهت، مقدار بخش To_Air از یکی و From_Air از دیگری را در یک جا جمع نموده، بعنوان نتیجه باز می‌گرداند. بدین ترتیب سیگنالهای وارد شده از دو طرف مبادله می‌شوند(شکل ۵). از نقطه نظر فیزیکی و معادل واقعی، این تابع همانند یک آنتن عمل می‌کند که وظیفهٔ آن انتقال سیگنال از تراشه به فضا و بالعکس می‌باشد.

از آنجائیکه این تابع دقیقا نقش آنتن را ایفا می‌کند، یک ضریب بهره نیز در آن در نظر گرفته شده است که توان سیگنالهای انتقالی بوسیلهٔ آن را تغییر می‌دهد. این ضریب در توان تمامی مؤلفه‌های سینوسی یک سیگنال رادیویی که از آنتن عبور می‌کند ضرب می‌شود.

---

[۵] Entity

[۶] InOut

[۷] Resolution Function

```
TYPE U_Air_Entry IS RECORD
  D : Direction;
  P : Position;
  To_Air : RF_Signal(1 TO Max_Sine_Signals);
  From_Air : RF_Signal(1 TO Max_Sine_Signals);
END RECORD;

TYPE U_Air_Entry_Vector IS ARRAY (NATURAL RANGE <>) OF U_Air_Entry;
```

شکل ۳ - تعریف یک نقطهٔ ورود به فضا

تراشهٔ رادیویی فرستنده-گیرندهٔ Bluetooth، سیگنالهای واسطی نظیر آنچه در فصل قبل ذکر شد دارد. تراشه از یک سو به آنتن متصل است و از سوی دیگر سیگنالهای کنترلی لازم را از لایهٔ Baseband دریافت نموده و به تبادل داده با آن می‌پردازد. یک سری پارامترها برای پیاده‌سازی مشخصات فرستنده و گیرنده تعریف شده‌اند که شکل ۶ آنها را نشان می‌دهد. این پارامترها، میزان انحراف فرکانسی لازم از فرکانس پایه برای ارسال بیتهای صفر و یک و پنجرهٔ مجاز برای این انحراف فرکانسی در هنگام دریافت سیگنال هستند. پارامترهای دیگر، مقدار توان ارسالی در فرستنده و میزان حساسیت نسبت به سیگنال دریافتی در گیرنده می‌باشند(شکل ۷).

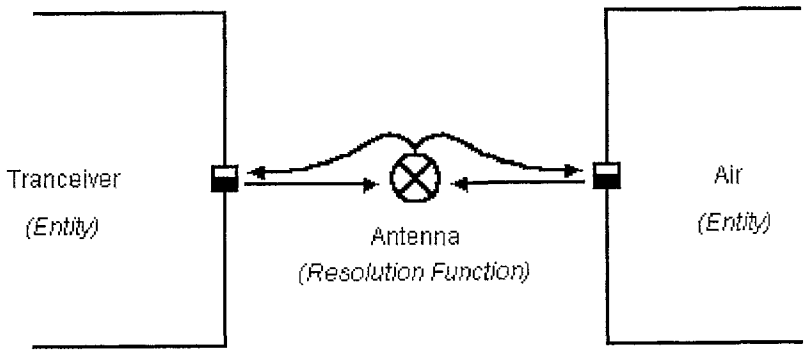
با لبهٔ بالارونده ورودی Strobe تراشه فرکانس پایهٔ خود را مطابق آنچه ورودی Freq تعیین می‌کند، تغییر می‌دهد. ورودی Freq شمارهٔ کانال فرکانسی را که عددی بین صفر تا ۷۸ برای سیستم فرکانسی ۷۹ کاناله یا صفر تا ۲۲ برای سیستم فرکانسی ۲۳ کاناله است مشخص می‌کند. این عدد بر اساس ورودی Hopping_System که نوع سیستم فرکانسی مورد استفاده را مشخص می‌نماید، تفسیر شده و فرکانس پایه محاسبه می‌شود. در این هنگام، در صورت فعال بودن سیگنال TE که فعال کنندهٔ فرستنده است، جریان داده‌های ورودی برروی خط TX تبدیل به انحرافات فرکانسی تعریف شده نسبت به فرکانس پایه گشته و با توان تعیین شده در پارامتر Transmit_Power و فاز صفر ارسال می‌گردد. در این حالت، سیگنال رادیویی خروجی که در بخش To_Air درج شده است، فقط یک مؤلفهٔ سینوسی خواهد داشت.

در هنگام دریافت، Baseband بجای فعال نمودن ورودی TE، ورودی RE را فعال می‌نماید. در اینصورت، بخش From_Air از آنتن که سیگنال دریافتی تراشه است بطور مداوم مورد بررسی قرار می‌گیرد و در صورت وجود یک مؤلفهٔ

```
TYPE Position IS RECORD
  X : Real;
  Y : Real;
  Z : Real;
END RECORD;

TYPE Direction IS (From_The_Air, To_The_Air);
```

شکل ۴ - تعریف گونه‌های موقعیت و جهت



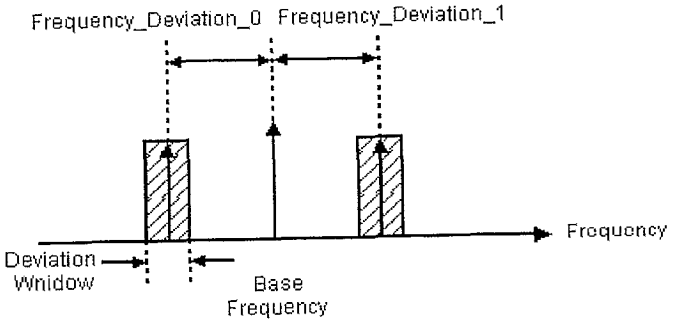
شکل ۵ - نحوهٔ عملکرد تابع تصمیم‌گیرنده

سینوسی با توان بیش از حساسیت تعریف شده برای گیرنده برروی فرکانس پایهٔ جاری، گیرنده آغاز بـه عمـل می‌کنـد. گیرنده مقدار انحراف از فرکانس پایه را محاسبه نموده و با توجه به پنجرهٔ مجاز تعریف شده برای انحراف فرکانسـی، در مورد صفر یا یک بودن بیت رسیده تصمیم گیری می‌نماید. این مقدار سپس بـرروی خـط RX بـرای Baseband ارسـال می‌گردد.

اتفاقی که در هنگام دریافت امکان رخ دادن آن وجود دارد، تصادم بین سیگنالهای رادیویی دریافت شـده از چنـد منبـع مختلف است. در اینصورت سیگنال رادیویی دریافت شده از آنتن دارای بیـش از یـک مؤلفـهٔ سینوسـی خواهـد بـود. در بررسی اولیه، مؤلفه‌های سینوسی که مربوط به فرکانس پایهٔ جـاری نیسـتند بطـور کـامل نـادیده گرفتـه شـده، حـذف می‌شوند (همانند یک فیلتر که برروی فرکانس پایهٔ جاری تنظیم شده باشد). در بررسی دوم، اگر سـیگنالهای سینوسـی رسیده همگی بیانگر یک مقدار منطقی (صفر یا یک) باشند، می‌توان فرض کرد که تصادمی پیش نیامده اسـت و مقـدار بیان شده از سوی همگی سیگنالها بعنوان یک بیت دریافت شدهٔ صحیح گزارش می‌گـردد. امـا اگـر ایـن چنـد سـیگنال سینوسی هر یک معرف مقدار منطقی متفاوتی باشند، این امر بعنوان تصادم تلقی می‌شود. از آنجائیکه خروجی RX از

```
Entity BlueRF Is
        Generic(Frequency_Deviation_1 : Frequency:=125 KHz;   -- Frequency deviation representing value 1
                Frequency_Deviation_0 : Frequency:=125 KHz,   -- Frequency deviation representing value 0
                Deviation_Window : Frequency := 5 KHz;        -- Allowed deviation tolerance
                Transmit_Power : Power:=1 mw;                 -- Transmitter power
                Receive_Sensitivity : Power:= 0.1 nw          -- Receiver sensitivity
                );
        Port(Reset : In Bit;                                  -- System reset
             Clock : In Bit;                                  -- 1MHz system clcok
             Hopping_System : THopSystem;                     -- Select between 23 or 79 Hop system
             Freq : In Integer_7Bit;                          -- Transmit or Receive Frequency channel number
             Strobe: In Bit;                                  -- Frequency hop strobe
             TE : In Bit;                                     -- Transmit Enable signal, from Baseband
             RE : In Bit;                                     -- Receive Enable signal, from Baseband
             TX : In Bit;                                     -- Transmit bit stream, from Baseband
             RX : Out Bit;                                    -- Receive bit stream, to Baseband
             CD : Out Bit;                                    -- Carrier detect signal, to Baseband
             Antenna : InOut Air_Entry;                       -- Tranceiver antenna
             Pos : In Position                                -- Current antenna position
            );
End BlueRF;
```

شکل ۶ - تعریف تراشهٔ رادیویی و پارامترهای لازم



شکل ۷ - پارامترهای فرکانسی تعریف شده برای تراشهٔ رادیویی

نوع بیت تعریف شده است، در صورت تصادم مقدار این خروجی صفر خواهد شد که یک مقدار پیش‌فرض برای حل اختلاف و قابل تغییر است.

در هنگام فعال بودن گیرنده، به محض یافتن داده‌هایی به منظور ارائه به لایهٔ بالاتر، خروجی CD فعال شده، وجود اطلاعات را به پردازشگر Baseband گزارش می‌کند و اطلاعات دریافتی بصورت رشته بیتی سریال از خروجی RX به پردازشگر Baseband تحویل می‌شوند.

۴-توصیف کانال ارتباطی

در سیستم Bluetooth، کانال ارتباطی که سیگنالهای رادیویی بوسیلهٔ آن منتقل می‌شوند، فضای اطراف ماست. برای توصیف این کانال در VHDL یک نهاد بنام Air تعریف شده است. این نهاد یک درگاه ورودی/خروجی دارد که آرایه‌ای است از نقاط ورود به فضا (شکل ۸). در هر نقطهٔ ورود به فضا سیگنالهای رادیویی ناشی از منابع مختلف به این نهاد داده می‌شوند و موقعیت مکانی آنها نیز در قالب مختصات سه بعدی (x, y, z) تعیین می‌گردد. Air با توجه به این مختصات مکانی فاصلهٔ بین هر دو نقطهٔ ورود به فضا را محاسبه نموده، توان سیگنال رادیویی را که از نقاط مختلف به یک نقطهٔ خاص می‌رسند به نسبت عکس مجذور فاصله تضعیف می‌نماید. مقدار این تضعیف از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود :

$$P_r = \frac{P_e . G_e . G_r . \lambda^2}{(4.\pi.R)^2}$$

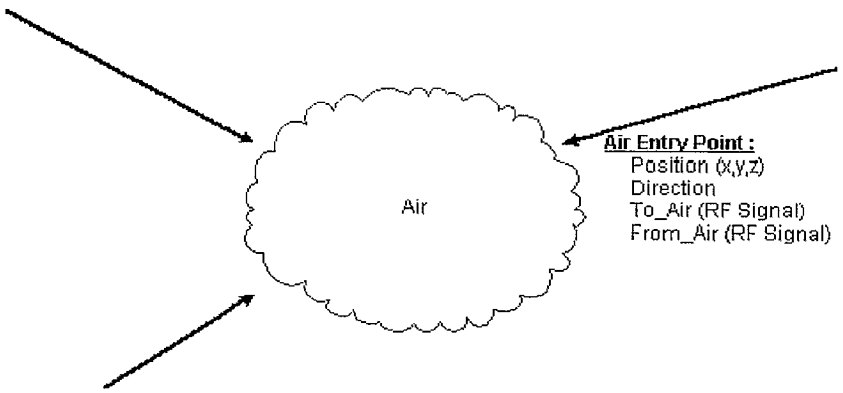
که در آن، P_r توان دریافت شده در گیرنده، P_e توان ارسال شده بوسیلهٔ فرستنده، ضریب بهرهٔ آنتن گیرنده، G_e ضریب بهرهٔ آنتن فرستنده، λ طول موج سیگنال ارسالی و R فاصلهٔ بین گیرنده و فرستنده هستند.

با توجه به اینکه ضرایب مربوط به آنتنها در تابع توصیف کنندهٔ آنتن وارد شده است، رابطهٔ فوق را می‌توان به حالت خلاصهٔ زیر نوشت :

$$P_r = P_e . \frac{\lambda^2}{(4.\pi..R)^2}$$

همانگونه که ملاحظه می‌شود، توان مربوط به تک‌تک مؤلفه‌های سینوسی سیگنالهای رادیویی که از نقاط مختلف به یک نقطهٔ خاص می‌رسند طبق رابطهٔ فوق تضعیف گشته اما فاز و فرکانس آنها تغییر نمی‌یابد. براحتی می‌توان این مدل را به هر صورت دلخواه تغییر داد تا بتواند اثرات دیگری از کانال را نیز شبیه‌سازی نماید.

این توصیف از نظر ساختار کد نوشته شده از دو حلقهٔ اصلی تشکیل می‌شود که با پویش کامل آرایهٔ نقاط ورودی، تمامی سیگنالهای ورودی از نقاط مختلف را جمع‌آوری کرده و پس از محاسبهٔ تضعیف برای هر یک از آنها نسبت به یک



شکل ۵-۱۰ - نهاد Air

نقطهٔ ورودی خاص، نتیجه را بصورت مؤلفه‌هایی سینوسی در بخش From_Air آن نقطهٔ ورودی وارد می‌سازد. در حالت خاص، اگر فاصله‌ای بین یکی از ورودیها و این ورودی خاص وجود نداشته باشد، سیگنال بدون هیچگونه تضعیفی به این نقطه می‌رسد. این امر معادل این واقعیت است که یک آنتن فرستنده سیگنال ارسالی توسط خود را بدون هیچ تضعیفی دریافت می‌نماید.

۵-نتیجه‌گیری

مدلسازی انجام شده، بطور کامل عملکرد سیستم رادیوی Bluetooth را دربر می‌گیرد و براحتی می‌توان آنرا به منظور پیاده‌سازی جزئیات بیشتر ذکر شده در استاندارد نظیر مکانیزمهای کنترل توان، بهبود بخشید. در شبیه‌سازی کانال رادیویی نیز، بستر مناسبی برای اعمال هر گونه تاثیر از سوی کانال برروی سیگنالهای رادیویی فراهم شده است که هرچند در اولین مرحله تنها اثرات تضعیف کانال برروی سیگنالها را مدل می‌نماید، اما به آسانی می‌توان هرگونه تاثیر دیگر محیط بر پارامترهای دیگر علاوه بر توان نظیر فرکانس یا فاز یا حتی اثرات پیچیده‌تر را نیز در آن وارد نمود.

با توجه به این شبیه‌سازی، می‌توان گفت که هر چند VHDL یک ابزار مدلسازی سیستمهای دیجیتال است، اما توانائیهای این زبان به این سیستمها محدود نمی‌گردد. مکانیزمهای قدرتمند این زبان نظیر امکان تعریف انواع گونه‌ها به آن اجازه می‌دهد که دامنهٔ کاربردهای خود را هر چه بیشتر گسترده سازد تا آنجا که بتوان موارد دیگری نظیر سیستمهای مخابراتی را نیز بوسیلهٔ آن مدل نمود.

۶-مراجع

[۱] فیروزشاهیان،امین، طراحی یک پردازشگر خاص برای لایهٔ Baseband از استاندارد Bluetooth، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ فنی، دانشگاه تهران، ۱۳۸۰.

[2] Bluetooth Special Interest Group, Specification of the Bluetooth System ver 1.0a - Core, 1999.

[3] Miller,Brent A., Bisdikian,Chatschik, Bluetooth Revealed, Printice Hall PTR, 2001.

[4] Navabi,Zainalabedin, VHDL Analysis and Modeling of Digital Systems, McGraw-Hill, 1998.