

افزایش پهنای باند CCII برای استفاده در اترنت سریع بی سیم نوری

احسان فغفوری

باشگاه پژوهشگران جوان دانشگاه آزاد تبریز

e_faghfoury@yahoo.com

چکیده - در این مقاله مشکلات پهنای باند مربوط به استفاده از نسل دوم حامل‌های جریان در سیستم‌های اپتیکی بی سیم بحث شده و سپس یک تقویت کننده مد جریانی جدید با پهنای باند گسترده و دامنه دینامیک ورودی وسیع معرفی می گردد که برای استفاده در شبکه های اترنت سریع بی سیم، مناسب می باشد. این تقویت کننده مد جریانی برای ایجاد ارتباط ما بین آشکارسازهای نوری ارزان قیمت (با ظرفیت داخلی بزرگ) و تقویت کننده های امپدانس بالا، به منظور غلبه بر محدودیت‌های خاص پهنای باند که توسط مبدل ورودی ایجاد می گردد، استفاده می شود. اساس معماری تقویت کننده مد جریانی مورد نظر بر پایه یک حامل جریان نسل دوم با امپدانس ورودی پائین، بنا نهاده شده است.

کلید واژه- CCII، اترنت سریع، تقویت کننده مد جریانی.

1- مقدمه

افزایش سرعت ارتباطات در LAN در سایه توسعه فزاینده پهنای باند به دست می آید. به عنوان مثال سرعت در ارتباطات اترنت جریانی کنونی به سهولت به محدوده 100Mb/s رسیده است. این توسعه بی وقفه مشکلات جدی برای اتصالات اپتیکی بی سیم فراهم نموده است. افزایش سرعت های ارتباط در این سیستم ها مستلزم افزایش پهنای باند مدارهای واسطه نوری موجود در این سیستم ها است که باعث بروز چندین مشکل تکنیکی می شود.

معمولاً این مدار واسطه نوری از یک آشکارساز (PD : Photodetector) و یک تقویت کننده امپدانس بالا تشکیل می شود. افزایش پهنای باند در یک تقویت کننده امپدانس بالا که باعث افزایش پهنای باند در سیستم های اپتیکی بی سیم می شود، در کل کار آسانی نخواهد بود. این ارتباط، چندین مشکل وجود دارد:

(1) امپدانس ورودی تقویت کننده همراه با ظرفیت داخلی بالای آشکارساز که قطب غالبی در پهنای باند سیستم ایجاد می کند.

(2) امپدانس انتقالی بالا، (که برای داشتن حساسیت بالا لازم است) ماکزیمم دامنه دینامیک ورودی قابل دسترس را محدود می کند و این کار باعث اعمال محدودیت های قوی در فاصله ما بین سیستم های منبع و مقصد می شود.

(3) نویز سیستم، محدودیت کمی بر سطوح سیگنال ورودی گذاشته و دامنه دینامیک ورودی و پهنای باند سیستم را محدود می نماید: کاهش نویز سیستم و افزایش پهنای باند سیستم به طور توأم در کل امری است غیر ممکن. نتیجه

داده می شود [6][7] که اگر همراه با تکنیک بیان شده در مرجع [8]، برای سیستم های نوری بی سیم مورد استفاده قرار گیرد، رفتار فرکانسی بهتری برای این مدارهای جریانی به دست خواهد آمد. باتوجه به پهنای باند، بهره جریان و نویز ورودی معادل تعدادی دستورالعمل مطرح شده و همچنین مداری که برای ارتباط بی سیم نوری اترنت سریع بهینه سازی شده به همراه مدل کامل سیستم ارائه خواهد شد.

2- طرح CCH بهبود یافته و بررسی عملکرد فرکانسی آن

امپدانس ورودی رابط های بی سیم اپتیکی بایستی برای سیستم هایی با پهنای باند زیاد، بی نهایت پایین باشد. نسل دوم حامل جریان (CCII) بهترین کاندیدها برای این منظور هستند، زیرا نشان داده شده است که امپدانس ورودی آن را می توان با استفاده از تکنیک هایی کاهش داد [8]. بنابراین CCII به عنوان تقویت کننده مد جریان ورودی، برای سیستم های اپتیکی بی سیم مناسب به نظر می رسد. با این وجود تاثیرات فرکانس بالا در CCII باعث ایجاد مشکلاتی در کارایی سیستم می شود.

1-2 ویژگی های CCII بهبود یافته

یک نسل دوم حامل جریان (شکل 1) را می توان توسط معادله ماتریسی زیر کاملاً توصیف نمود:

$$\begin{bmatrix} I_y \\ V_x \\ I_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_y & 0 & 0 \\ A_v & r_x & 0 \\ 0 & A_i & g_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_y \\ I_x \\ V_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

درایه های درون ماتریس سیستم، پارامترهای مربوط به حامل جریان که وابسته به فرکانس هستند را نشان می دهد.

این که، با داشتن یک آشکارساز خاص، سعی می شود ما بین بهره، پهنای باند، دامنه دینامیک ورودی و نویز مصالحه ای صورت گیرد. [1]

در سال های اخیر، گرایش به سمت تکنولوژی مد جریانی برای طراحی سیستم هایی که دارای پهنای باند و بهره بالا باشد، بیشتر شده است [4][3][2]. به ویژه، استفاده از نسل دوم حامل های جریان امکان وجود امپدانس های کوچک ورودی را ممکن نموده است. کاهش دادن امپدانس ورودی تقویت کننده به قدمی ضروری در جهت افزایش پهنای باند سیستم نوری بی سیم می باشد. می دانیم ظرفیت بالای ورودی آشکارساز و امپدانس ورودی بالا، قطبی قوی را در اغلب ورودی های شبکه نوری در سیستم های نوری بی سیم ایجاد می کند [5]. آشکارساز های ساخته شده با استاندارد جهانی به عنوان عاملی اصلی کاهش امپدانس ورودی شناخته شده است. برای جبران یک بافر جریان مجزا بر روی سیستم بی سیم نوری به کار گرفته شده است [4]. همچنین نشان داده شده است که [4] این بافر زمانی که ما بین آشکارساز و تقویت کننده قرار می گیرد می تواند 30٪ افزایش در پهنای باند سیستم بوجود آورد (حتی بدون وجود تقویت کننده های امپدانس بالای طرح سنتی).

در ادامه در مورد عوامل اصلی تاثیرگذار در بهبود پهنای باند مدارهای مد جریانی که در سیستم های بی سیم استفاده می شود، بحث خواهد شد. این مدارهای مد جریانی به عنوان بافر واسط بین مبدل نوری و تقویت کننده های امپدانس بالای ساده عمل می کند. در این راستا تغییراتی بر روی طرح سنتی کلاس AB نسل دوم حامل های جریان

$$r_{xcomp} = r_x - \frac{A_v A_i R_{comp}}{1 + (g_y + g_z) R_{comp}} \quad (2)$$

رابطه (2) نشان می‌دهد که با این طرح فیدبک، امکان کاهش امپدانس ورودی موثر به مقادیر کوچک دلخواه وجود دارد. با در نظر گرفتن بهره ولتاژ و جریان نزدیک به یک و همینطور یک مقدار از R_{comp} نزدیک به r_x ، ترکیب امپدانس ورودی را می‌توان صفر کرد. با این وجود به خاطر رفتار فرکانس بالای غیر ایده‌آل حامل، پارامترهای ماتریس نیز وابسته به فرکانس خواهد شد. این وابستگی باعث دو رفتار نامطلوب می‌شود: نوسان و یا ماکزیمم شدن بهره جریان. هر دو تاثیر فوق با به حداکثر رسیدن امپدانس ورودی در فرکانس‌های بالا مرتبط هستند. بررسی‌ها نشان می‌دهند که این تاثیرات در صورتیکه مشخصات خروجی Z_b و ورودی X مشابه باشند به حداقل می‌رسد.

2-3- افزایش پهنای باند

برای رسیدن به پهنای باند قابل دسترس از یک تقویت کننده مد جریان مبتنی بر CCII، چهار محدودیت اصلی با این ساختار فیدبک وجود دارد:

(1) جریان‌های پولاریزه کننده (قطبی کننده)

(2) اثر ترانزیستور

(3) مقاومت جبرانی R_{comp}

(4) ظرفیت ذاتی آشکارساز

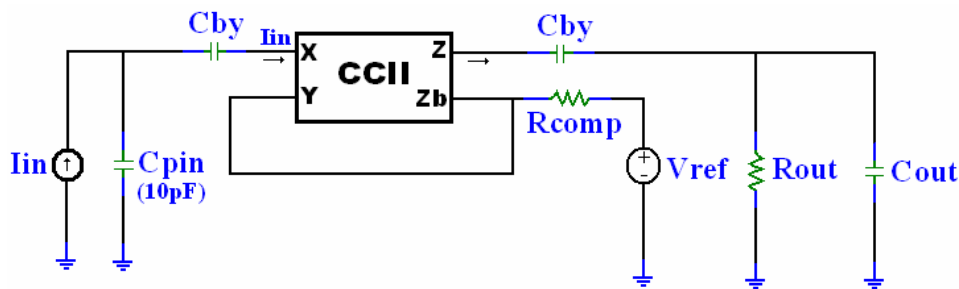
ظرفیت ذاتی آشکارساز نوری عموماً به خاطر ملزومات سیستم (آشکارساز نوری، ولتاژ پلاریزاسیون، سطح و غیره) می‌باشد و معمولاً برای داشتن پهنای باند زیاد تا حد ممکن، پایین گرفته می‌شود. در غیر این صورت اگر کاهش پهنای



شکل (1): نسل دوم حامل جریان (بهبود یافته)
 A_v نشان دهنده بهره ولتاژ گره‌های Y و X و A_i نشانگر بهره جریان ما بین ورودی X و خروجی کلی Z است. برای منظور کردن تاثیرات ورودیهای X, Y و خروجی Z، در ماتریس سیستم، امپدانس‌های موجود در ترمینال‌های Z, Y, X نیز به حساب آورده شده است. اگرچه می‌توان ماتریس سیستم را به صورت ایده‌آل (که تنها از دو پارامتر غیر صفر A_v , A_i تشکیل شده و معمولاً مقادیر امپدانس بسیار پایین دارد) در نظر گرفت ولی، وابسته بودن آن به فرکانس ملزم می‌کند که برای آنالیز فرکانس بالا این مقادیر را نیز در نظر بگیریم.

2-2- کنترل امپدانس ورودی

امپدانس ورودی CCII را می‌توان توسط مدار نشان داده شده در شکل 3 کنترل کرد. (در این شکل مدل‌هایی نیز برای نشان دادن ظرفیت پارازیتی آشکار ساز و بار حامل جریان در نظر گرفته شده است). Z_b یک خروجی ساختگی با ویژگی‌های همانند خروجی Z است. پایانه‌های حامل Y و Z_b هر دو به مقاومت کنترل (R_{comp}) متصل شده و به پتانسیل ثابتی وصل گردیده‌اند. این طرح، فیدبک منفی در امپدانس ورودی مشاهده شده در پایانه X بوجود می‌آورد [8]. وقتی در این طرح از ماتریس رابطه (1) استفاده می‌شود، امپدانس ورودی موثر در پایانه X از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:



شکل (2): تقویت کننده مد جریانی CCII

می شود و با افزایش ابعاد، کاهش می یابد. این مقدار W_{opt} نزدیک به $80\mu m$ در تکنولوژی $0.8\mu m$ است. این ترانزیستورها هم چنین بایستی بزرگتر از ترانزیستورهای موجود در آینه های جریان باشند. هم چنین مشخص می شود که طبقه خروجی نیز محدودیت هایی را در رفتار سیستم با پهنای باند وسیع ایجاد می کند.

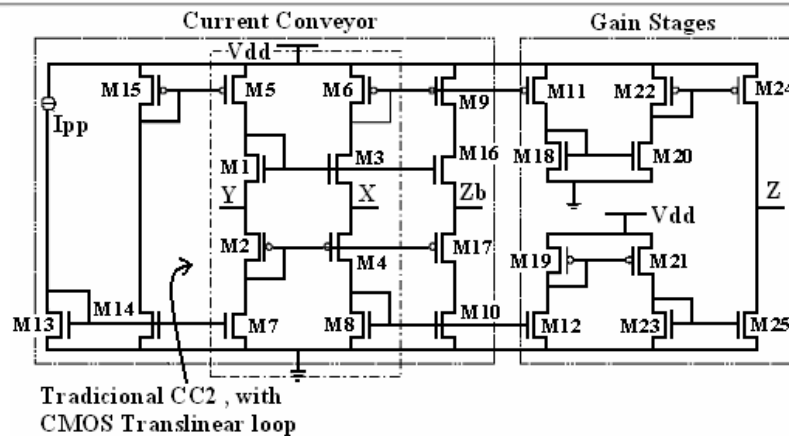
3- معماری تقویت کننده پیشنهادی

تغییراتی را در CCII سنتی همان طور که در شکل 4 نمایش داده شده، ایجاد کرده ایم که براساس رهنمودهای زیر بنا نهاده شده است. این CCII به عنوان یک تقویت کننده مد جریان به همراه آشکارساز در ورودی آن و یک پیکربندی فیدبک (شکل 2) به کار برده می شود. این مدار از یک حامل جریان و یک طبقه بهره تشکیل شده که در آن ورودی تقویت کننده، پایانه X حامل و Z خروجی آن است. حامل جریان ما یک حامل نسل دوم کلاس AB فرکانس بالا می باشد.

این نوع از حامل های جریان از یک حلقه تراخطی تشکیل شده اند، که در اینجا ترکیبی از ترانزیستورهای M_1 الی M_4 می باشد. ترانزیستورهای M_{16} و M_{17} خروجی ساختگی Z_b را به وجود می آورند که به منظور فراهم آوردن ویژگی های مشابه ورودی X طراحی شده است. این

باند تقویت کننده (بدون نیاز به تغییر پارامترهای دیگر مدار) مد نظر باشد، می توان این مقدار را کاهش داد. از جریان های پولاریزه کننده در CCII کلاس سنتی AB (شکل 3) می توان برای کاهش یا افزایش پهنای باند تقویت کننده استفاده کرد. با افزایش جریان، طبیعتاً پهنای باند نیز افزایش می یابد. با این وجود، افزایش جریان، امپدانس ورودی را نیز تحت تاثیر قرار می دهد و در نهایت می تواند به رفتارهای نوسانی منتهی شود. رفتارهای نوسانی را می توان با اندکی افزایش R_{comp} از بین برد. (و همان طور که از رابطه (2) برمی آید به امپدانس های ورودی کوچکتر منجر می شود). این دو اثر، مقدار بهینه ای از جریان پولاریزه کننده ایجاد می کنند. علاوه بر این مقدار بهینه، پهنای باند دیگر با افزایش جریان پولاریزه کننده افزایش نمی یابد، زیرا برخی از ترانزیستورها ناحیه عملکرد بهینه خود را ترک می کنند.

با در نظر گرفتن سائز ترانزیستور، مطالعات برای افزایش پهنای باند نشان داد که یک مقدار بهینه برای ابعاد ترانزیستورهای موجود در CCII وجود دارد. برای مقادیر بالای یک پهنای بهینه W_{opt} ، ترانزیستورهای موجود در در حلقه تراخطی (Translinear) (M_1 , M_4) پیکربندی شکل (4) پهنای باند توسط ظرفیت های پارازیتی محدود



شکل (3): حامل جریان بهبود یافته

1) طراحی مدار با در نظر گرفتن نسبت ابعاد بزرگتر برای ترانزیستورهای M_1 و M_4 نسبت به ترانزیستورهای دیگر

2) کاهش دادن جریان بایاس (I_{pp})

اولین استراتژی با ایده‌های بیان شده فوق وقتی جنبه‌های ماکزیمم کردن پهنای باند را در نظر بگیریم، سازگار است. اما این سازگاری برای استراتژی دوم وجود ندارد، کاهش I_{pp} باعث کاهش پهنای باند نیز می‌شود. نتیجه آن که، مدار ما با این ساختار نمی‌تواند حداکثر پهنای باند ممکن را داشته باشد.

3-2- محدوده دینامیک موثر ورودی

دامنه ورودی خطی توسط عملکرد حلقه تراخطی تعیین می‌شود. بنابراین با نوشتن معادلات حلقه داریم:

$$\begin{cases} I_{D4} = I_{D3} + I_x \\ |V_{gs1} + V_{gs2}| = V_{gs3} + |V_{gs4}| \end{cases} \quad (3)$$

با در نظر گرفتن این که تمام ترانزیستورها در ناحیه اشباع کار می‌کنند، رابطه (3) می‌تواند به ترتیب به جریان های I_{D3} و I_{D4} منجر شود:

$$I_{D3,4} = kI_{pp} \left(1 \pm \frac{I_x}{4kI_{pp}} \right)^2 \quad (4)$$

تغییر (اصلاح) کوچک رفتار فرکانسی بهتر و بالاتری را تامین می‌کند، تاثیر اصلی این تغییر بر روی بهره جریان A_i (رابطه 4) ما بین ورودی X و خروجی ساختگی Z_b دیده می‌شود. پاسخ فرکانسی بهره جریان بین این دو ترمینال، بهره ای کوچکتر از 1 (یک) همراه با رفتار فرکانسی بالارا نشان می‌دهد، و از این طریق پیکربندی پایدارتری را برای مقادیر کوچکتری از امپدانس ورودی ممکن می‌سازد.

طبقه بهره از سه آینه جریان با نسبت بزرگنمایی 2 تشکیل شده است. که بدین ترتیب بهره جریان 6 برای خروجی Z فراهم می‌شود.

3-1- بهینه‌سازی نویز

بررسی ها نشان می‌دهند [7] که نویز کلی معادل ورودی در حامل جریان کلاس AB، نسبت مستقیم با مربع ضریب هدایت متقابل ترانزیستورها در آینه‌های جریان و نسبت معکوس با ضریب هدایت متقابل ترانزیستورها در حلقه ترا خطی دارد. بررسی های ما نیز به همان نتایج منتهی شده است. ما از دو استراتژی متفاوت برای کاهش نویز پیروی نموده ایم:

صورت موازی با هم قرار دارند به عنوان بار خروجی در نظر گرفته شده اند. مقدار جریان قطبی کننده I_{pp} برابر با 180 uA است. دو خازن $1nF$ (C_{by}) برای حذف جریان آفست (offset) استفاده شده است و بالاخره R_{comp} به مقدار 300Ω بهینه شده است. با این پارامترها (البته بادر دست داشتن پارامترهای ترانزیستورهای CMOS مورد نظر شرکت AMS) نتایج زیر قابل تحقق خواهد بود:

(1) تقویت کننده، بهره جریانی برابر با 18 dB، در پهنای باند 130MHz دارد.

(2) امپدانس ورودی مقداری در حدود 210Ω تا فرکانس 10MHz دارد، و پیکی در حدود 480Ω در فرکانس 780MHz نشان می دهد و پاسخ فاز تقریباً برای همه باندها صفر است.

(3) سطح نویز ورودی در حدود $9.2pA/\sqrt{Hz}$ است که حساسیت تقویت کننده را به 1uA محدود می کند.

(4) دامنه دینامیکی ورودی 65dB است که برای سیگنال های دیجیتال مورد نظر ما بوده است. (با این فرض، بهره جریان در سیگنال های ورودی بزرگ، اندکی کاهش نشان خواهد داد بدون این که با تمامی سیگنال ها هماهنگی باشد).

با تقویت کننده مشابه می توان پهنای باند 160MHz را به دست آورد که برای این کار، فقط کافی است جریان قطبی کننده I_{pp} و مقاومت جبرانی R_{comp} و ظرفیت پارازیتی 10pF آشکارساز، ورودی را تنظیم شوند. کاهش ظرفیت آشکارساز هم چنین اجازه می دهد که پهنای باند

که در آن I_{pp} جریان بایاس، I_x جریان ورودی گره X و k نسبت ابعاد بین ابعاد ترانزیستورهای $M_1(M_2)$ و $M_3(M_4)$ است. این نتایج تنها برای مقادیر I_x مابین $-4kI_{pp}$ و $4kI_{pp}$ معتبر می باشد، (این مقادیر، مقادیر ماکزیمم جریان ورودی به عنوان تقریب مرتبه اول) بهره هستند که در آن تقویت کننده وابستگی خطی به جریان ورودی را حفظ می کند. رابطه (4) بیان می کند که کنترل دامنه دینامیک ورودی از طریق تغییر مقیاس دوباره ابعاد ترانزیستورهای حلقه ای تراخطی امکان پذیر است، با این وجود، از آن جایی که برای کاربرد مورد نظر ما به اترنت سریع می باشد، خود به خود به خطی بودن نیازی نیست و محدوده دینامیکی موثر می تواند بزرگتر باشد.

4- نتایج شبیه سازی

مدار عملی با تکنولوژی CMOS $0.8\mu m$ ، متعلق به شرکت AMS با هدف سازگاری ما بین پهنای باند، نویز و توان مصرفی، اتصالات اپتیکی مسیر در یک اترنت سریع، طراحی شده است. همه ترانزیستورهای NMOS دارای نسبت W/L برابر با $20\mu m/1.2\mu m$ هستند به جز M_1 و M_3 که با نسبت $70\mu m/1.2\mu m$ طراحی شده اند. ترانزیستورهای M_{12} و M_{20} و M_{25} نیز دارای نسبت طراحی متفاوت $40\mu m/1.2\mu m$ هستند، تا بتوانند مقداری بهره جریان مناسب بین ورودی X و خروجی Z برقرار سازند. تمام ترانزیستورهای PMOS دارای نسبت اندازه 1.4 برابر ترانزیستورهای NMOS هستند.

مدار توسط آشکارساز با ظرفیت پارازیتی 10 PF شبیه سازی شده است. مقاومت 50Ω و خازن 10PF که به

تقویت کننده به مقادیر 350MHz تغییر یابد، در حالی که هنوز دامنه دینامیکی ورودی زیادی را دارد.

نتایج فوق برای مدار با تکنولوژی CMOS 0.8um و با Level 49 که متعلق به شرکت AMS است، بدست آمده اند. اما به علت در اختیار نداشتن پارامترها و عدم در اختیار گذاردن این پارامترها از طرف شرکت AMS جهت آنالیز در نرم افزار Hspice(2004)، به ناچار به صورت تئوری و آنالیز با استفاده از پارامترهای تکنولوژی دیگر صورت گرفت. اما به علت عدم سازگاری طرح با تکنولوژی مربوطه نتایج دلخواه بدست نیامد. افت بهره، تغییر رفتار فرکانسی سیستم، تغییرات ناگهانی امپدانس ورودی در جاروب AC از معایبی بود که در استفاده از تکنولوژی جدید بدست آمد. با تغییر W/L چند CMOS سعی شد تابهره سیستم در فرکانس مورد نظر افزایش داده شود، برای این کار، مقادیر W/L ترانزیستورهای M_{12} و M_{20} و M_{25} به $100\mu\text{m}/1.2\mu\text{m}$ تغییر یافت که در نتیجه این تغییر مولفه های P_s , P_D , A_s , A_D (که رابطه مستقیم با W/L ها دارند) نیز تغییر یافتند. رابطه زیر بیانگر این تغییر است:

$$P_s = P_D = W + L_{\min} \quad (5)$$

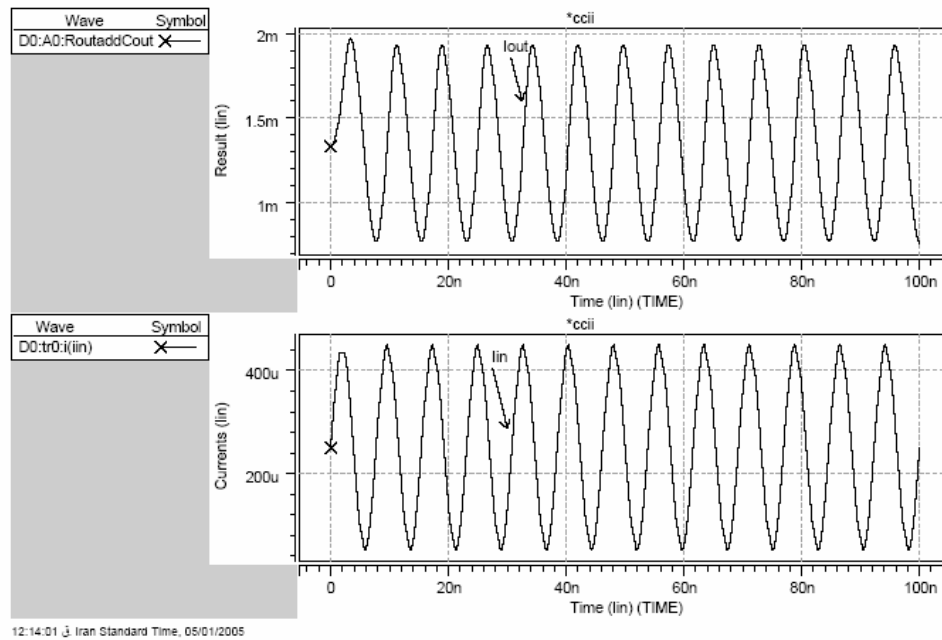
$$A_s = A_D = W * L_{\min}$$

بدین ترتیب بهره 9dB در فرکانس 130MHz از این سیستم گرفته شد (شکل 4)، اما این تغییرات تاحدودی پاسخ فرکانسی (به خصوص در فرکانس های بالای 100MHz)، امپدانس ورودی و همچنین حساسیت سیستم نسبت به نویز را تحت تاثیر قرار داد که توصیه می شود جهت بهینه

سازی عملکرد سیستم از پارامترهای مربوط به تکنولوژی AMS استفاده گردد.

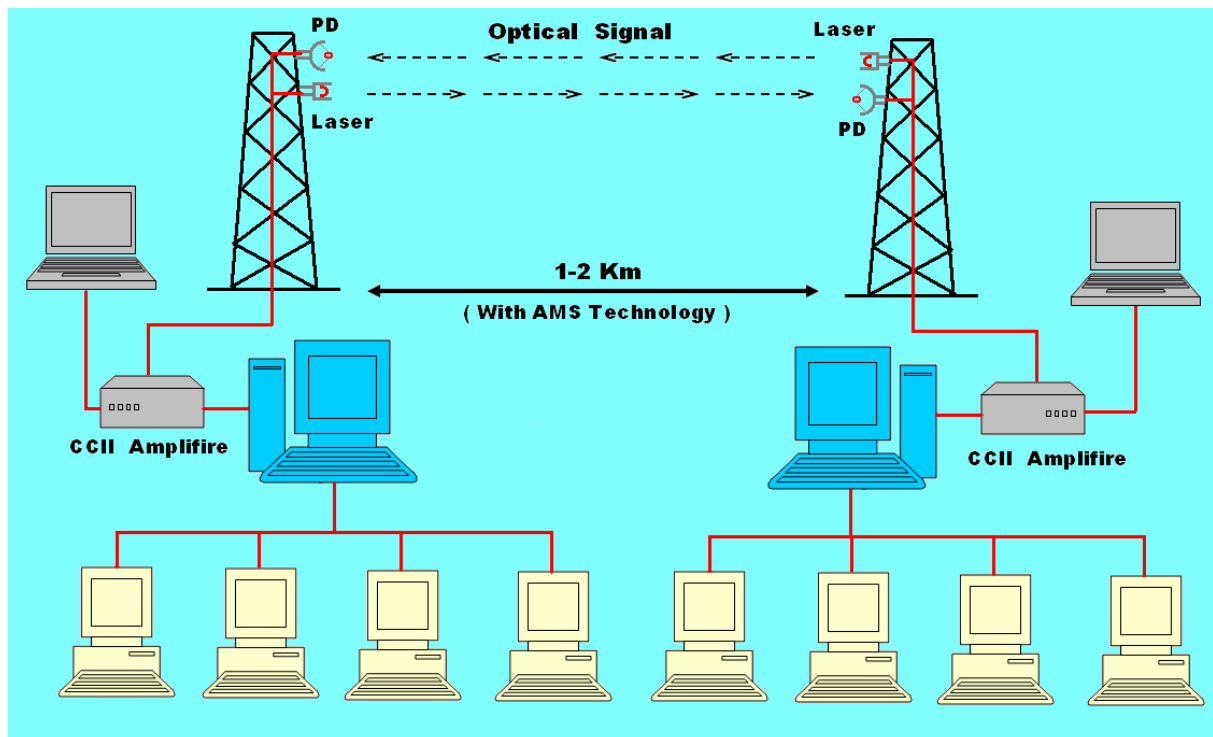
5- نتیجه گیری

یک حامل جریان نسل دوم کلاس AB بهبود یافته، معرفی شد. این حامل، کنترل امپدانس بهتری (وقتی به عنوان تقویت کننده مد جریانی، بین گره های X,Z قرار می گیرد) نسبت به حامل های قبلی که به دامنه دینامیک بالایی نیازمند بودند، از خود به نمایش گذاشت. این مدار می تواند بسته به ظرفیت آشکارساز، پهنای باندی تا حدود 350MHz را نشان دهند. مدار پیشنهاد شده برای کاربردهای اپتیکی بی سیم اترنت سریع بهینه سازی شده است (شکل 5) و می تواند ماکزیمم دامنه دینامیکی ورودی در حدود 65dB را با توان مصرفی 12mw ارائه نمایند. این مدل ها برای ارتباطات اپتیکی به فواصل 1 تا 2 کیلومتر مناسب است.



شکل (4): جریان ورودی و جریان خروجی

منحنی ها با استفاده از پارامترهای موجود و W/L های تغییر یافته (با استفاده از نرم افزار Hspice 2004) بدست آمده اند.



شکل (5): دیاگرام اتترنت سریع بی سیم نوری با استفاده از CCII بهبود یافته



سپاسگذاری

دپارتمان الکترونیک و مخابرات سنتیاگو- پرتقال و دکتر

شهرام مینائی از دانشکده مهندسی الکترونیک و کامپیوتر
استانبول- ترکیه کمال تشکر را دارم.

در پایان از کمک های دکتر حسن رسولی سقایی از دانشگاه
آزاد علوم و تحقیقات تهران- ایران و دکتر لوئیز نرو آلو از

مراجع

- [1] R.L. Aguiar, A. Tavares, J.L. Cura, E. Vasconcelos, L.N. Alves, R. Valadas, D.M. Santos, "Considerations on the design of transceivers for wireless optical LANs", IEE Electronics & Communications, Colloquium on Optical Wireless Communications, London, England, Jun. 1999.
- [2] T. Ruotsalainen, P. Palojärvi, J. Kostamovaara, "A Current-Mode Gain-Control Scheme with Constant Bandwidth and Propagation Delay for a Transimpedance Preamplifier", IEEE Journal of Solid State Circuits, Vol. 34, February 1999.
- [3] C.H. Lee, J. Cornish, K. McClellan, J. Choma Jr., "Current-Mode Approach for Wide-Gain Bandwidth Product Architecture", IEEE Trans. Cir. Sys. II, Vol. 45, May 1998.
- [4] L.N. Alves, R.L. Aguiar, "A Differential Current-ConveyorBased Buffer for High-Bandwidth Low-Signal Applications", ICECS99, Paphos, Cyprus, Sep. 1999.
- [5] E. de Vasconcelos, J.L. Cura, R.L. Aguiar, D.M. Santos, "ANovel High-Gain, High-Bandwidth CMOS Differential Front-End for Wireless Optical Systems", ISCAS99 Orlando, Florida, May 1999.
- [6] T. Kurashina, S. Ogawa, K. Watanabe, "A High Performance Class AB Current Conveyor", ISCAS98 Monterey, Florida, May 1998.
- [7] E. Bruun, "Noise Properties of CMOS Current Conveyors", ISCAS96, Atlanta, May 1996.
- [8] G. Palumbo, S. Pennisi, "A Technique for the Reduction of the Input Resistance of Current-Mode Circuits, ISCAS98 Monterey, Florida, May 1998.