# روشی برای کاهش اثر حافظه درتقویت‌کننده‌های فرکانس رادیویی (RF) بااستفاده از فیلترFIR

محمدرضاسلطانی[۱]، رسول امیرفتاحی[۲]، محمدرضازادهوش[۳]
۱- مربی، دانشکده برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، m_soltani_iaun@yahoo.com
۲- استادیار، دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی اصفهان، fattahi@cc.iut.ac.ir
۳- مربی، دانشکده برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، zadhoosh12962@yahoo.com

## چکیده

**دراین مقاله انواع روش‌های خطی‌سازی تقویت‌کننده‌های RF را مورد مطالعه قرار می‌دهیم و از بین این روش‌ها کارآمدترین روش یعنی استفاده از یک مدار پیش اعوجاج‌ساز دیجیتالی را به‌طور خاص تحلیل و بررسی می‌کنیم و سپس روشی برای تطبیقی‌کردن این مدار دیجیتالی پیشنهاد می‌کنیم و مزایا و معایب آن را نسبت به مدارهای مرسوم پیش اعوجاج‌ساز دیجیتالی بررسی می‌کنیم. مدارهای پیش‌اعوجاج‌ساز یک مشکل اصلی برای رسیدن به حالت مطلوب دارند و آن مشکل اثر حافظه است. در ادامه کار یک مدار جدید مبتنی‌بر یک سیستم پردازش سیگنال ساده برای ازبین‌بردن أثر حافظه پیشنهاد می‌کنیم سپس این مدار جدید را شبیه‌سازی کرده و با بررسی نتایج شبیه‌سازی آشکار می‌گردد که بیش از ۸ دسی‌بل در نسبت توان کانال مجاور کاهش ایجاد شده که نتیجه قابل قبولی می‌باشد.**

## واژه‌های کلیدی

**پیش‌اعوجاج‌ساز،تقویت کننده‌هایRF، خطی‌سازی، فیلتر FIR.**

## ۱–مقدمه

با گسترش روزافزون سیستم‌های مخابراتی استفاده از تقویت‌کننده‌های قدرت RF رونق زیادی پیدا کرده است و به‌همان نسبت نیاز به خطی‌سازی آنها افزایش یافته است. عامل اصلی تهدید خطی‌بودن تقویت‌کننده‌ها، اعوجاج است. دو دسته اصلی اعوجاج، اعوجاج دامنه و اعوجاج فاز است. اعوجاج دامنه بر روی دامنه سیگنال ورودی اثر می‌گذارد و آن را تغییر می‌دهد. ولی اعوجاج فاز، فاز سیگنال ورودی را به‌طور نامنظمی شیفت داده و حالت خطی فاز را ازبین می‌برد. ساده‌ترین راه خطی‌سازی و کاهش اعوجاج استفاده از فیدبک است. این روش کاربرد زیادی در کنترل پروسه‌ها دارد ولی کاربرد اصلی آن در تقویت‌کننده‌های صوتی است. در فرکانس‌های صوتی بدست آوردن بهره زیاد و همچنین پایداری با توجه به پهنای باند کوچک مورد نیاز آسان می‌باشد. در فرکانس‌های پایین تأخیر زمانی گذرا ناشی از یک طبقه در مقایسه با یک سیکل کامل از سیگنال مطلوب کوچک می‌باشد و به این علت مشکل بدست‌آوردن پایداری آسان می‌شود. هنگامی‌که صحبت از تقویت‌کننده‌های RF می‌شود شکل استفاده از فیدبک قوت بیشتری پیدا می‌کند و طراحی باید با دقت بیشتری انجام پذیرد. پهنای باند بیشتر و سیکل زمانی کوتاهتر و گران‌تر بودن مدار و ... همگی مسائلی هستند که باید درنظر گرفته شوند. عامل دیگری که باید مد نظر داشت این است که میزان خطی‌بودن مورد نیاز در سیستم‌های RF بسیار بیشتر از سیستم‌های

Archive of SID



www.SID.ir

صوتی است، بنابراین تاکنون تلاش‌های زیادی برای خطی‌سازی تقویت‌کننده‌های RF در دنیا صورت گرفته و سه روش کلی برای این کار پیشنهاد شده است که عبارتند از روش فیدبک، روش فیدفوروارد و روش پیش‌اعوجاج. در این مقاله ابتدا این سه روش را به‌طور مختصر توضیح داده و نقاط ضعف و قوت هریک را جداگانه بررسی می‌کنیم سپس برای روش پیش اعوجاج یک مدار دیجیتالی قابل تطبیق پیشنهاد می‌کنیم همچنین با توجه به اینکه مشکل اصلی تقویت‌کننده‌هایRF اثر حافظه است با استفاده از یک سیستم DSP پیشنهادی سعی می‌کنیم این اثر را کاهش دهیم.

## الف– روش فیدبک

شاید ساده‌ترین و واضح‌ترین روش برای از بین بردن اعوجاج در تقویت‌کننده‌ها و خطی‌سازی آنها استفاده از فیدبک باشد. برای بررسی اثر فیدبک در کاهش اعوجاج همان‌طور که در شکل (۱) مشخص است فرض می کنیم که اعوجاج و نویز به‌انتهای تقویت‌کننده اصلی در مسیر پیشرو اضافه شوند.

$$y(t)=AX_e(t)+d(t) \quad (۱)$$

$$y_r(t)=\frac{y(t)}{k} \quad (۲)$$

سیگنال خطای $x_e(t)$ نیز برابر است با:

$$x_e(t)=x(t)-y_r(t) \quad (۳)$$

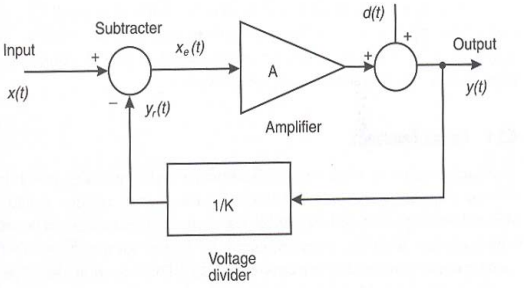
با ترکیب سه رابطه بالا داریم:

$$y(t)=\frac{k(Ax(t)+d(t))}{k+A} \quad (۴)$$

حال اگر فرض کنیم که A>>K پس $k+A\sim A$ و داریم:

$$y(t)=kx(t)+\frac{kd(t)}{A} \quad (۵)$$

پس اعوجاج تولید شده توسط تقویت‌کننده اصلی به‌اندازه $\frac{K}{A}$ تضعیف می‌شود.

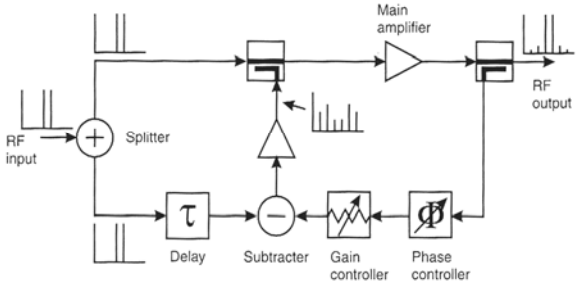



**شکل ۱- ساختار کلی فیدبک**

از مزایای روش خطی‌سازی با فیدبک می‌توان به قابل پیش‌بینی بودن و سادگی نسبی اشاره کرد و از معایب آن می‌توان به ازدست دادن بهره به‌علت عمل فیدبک و کاهش بازده به‌علت تلفات توان در شبکه فیدبک اشاره کرد [۲].

## ب– فیدبک اعوجاج

این روش سعی بر خنثی‌سازی مؤلفه‌های اصلی فرکانس از سیگنال فیدبک شده دارد. بنابراین تنها مؤلفه‌های غیرخطی و اعوجاج در سیگنال فیدبک باقی می‌ماند که باعث تقویت عملکرد غیرخطی و اعوجاج کل تقویت‌کننده می‌شود. بلوک دیاگرام این روش در شکل (۲) نشان داده شده است.

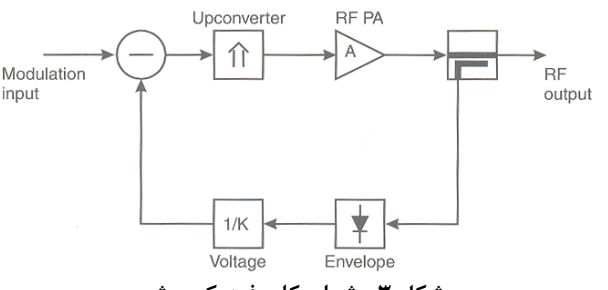



**شکل ۲- شمای کلی فیدبک اعوجاج[1]**

بهره و فاز باید به‌طور اتوماتیک کنترل شوند و این امر به‌خاطر جبران حرارتی و تغییر در پاسخ فاز یا بهره تقویت‌کننده در اثر بار شدن به‌وسیله سیگنال‌های مختلف لازم است.

## ج– فیدبک پوش

این نوع فیدبک در واقع گسترش منطقی نظریه حاکم بر فیدبک RF است. با درنظرگرفتن مشکلات فیدبک در محیط‌های صوتی بسیاری از مشکلات مربوطه نه تنها رفع نمی‌شود بلکه شدت بیشتری پیدا می‌کنند. شکل (۳) یک شمای کلی ازاین نوع فیدبک را به ما نشان می‌دهد.




**شکل ۳- شمای کلی فیدبک پوش**

Archive of SID

www.SID.ir

عملکرد این مدل برمبنای مقایسه‌ی خروجی مدوله‌شده با مدولاسیونی که در ورودی اعمال شده است می‌باشد سیگنال خطا از نسخه قبل از اعوجاج سیگنال ورودی تولید می‌شود. توجه کنید که این طرح خطی‌سازی برای یک فرستنده‌ی کامل می‌باشد پس سیگنال ورودی نیاز به مدولاسیون داشته و خروجی تولید شده یک سیگنال RF مدوله شده می‌باشد. این مدل ساده از فیدبک پوش توانایی جبران اعوجاج فاز را ندارد و بیشتر در فرستنده‌های AM یعنی جایی که آشکارسازی به‌وسیله آشکارسازی پوش صورت گرفته واطلاعات فاز نیاز نمی‌باشد بکار می‌رود. انواع پیشرفته‌تر این تکنیک با استفاده از سیگنال‌های قطبی یا کارتزین توانایی حفظ کردن اطلاعات فاز را نیز دارند. پهنای باند مورد نیاز برای فیدبک پوش بستگی به نوع مدولاسیون بکار رفته در فرستنده دارد. پیشرفت این تکنیک در جهت فائق آمدن بر مشکلاتی مانند بهره کم و شیفت فاز کریر در فرکانس‌های بالا صورت می‌پذیرد. بهره کم یک طبقه نشان دهنده فیدبک نامناسب بکار رفته در آن طبقه می‌باشد. مشکلات شیفت فاز کریر در تقویت‌کننده‌های چندطبقه منجر به مشکلات پایداری نیز می‌شود. مدل بکار رفته در این سیستم برخلاف دو سیستم قبلی یک تقویت‌کننده تنها نیست و فرستنده کامل می‌باشد. به‌وسیله یک سری المان‌های اضافی می‌توان مدولاسیون بکار رفته بر روی سیگنال ورودی را شناسایی کرد. پس مدولاتور بکار رفته تنها برای تصحیح اعوجاج می‌باشد و یک مدولاسیون کامل را انجام نمی‌دهد.

## د– روش فیدفوروارد

می‌توان سیگنال خروجی تقویت‌کننده‌های غیرخطی را به‌صورت جمع یک ضریب خطی از ورودی و یک سیگنال خطا درنظر گرفت [۱]. توپولوژی فیدفوروارد این خطا را محاسبه می‌کند و با ضریب مناسب آن را از شکل موج خروجی کم می‌کند. همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده خروجی تقویت‌کننده اصلی، $V_M$ در $1/A_V$ ضرب می‌شود تا $V_N$ تولید شود. ورودی با یک اختلاف فاز $\Delta_1$ از $V_N$ کم می‌شود و نتیجه $A_V$ برابر شده و از $V_M$ با یک اختلاف فاز $\Delta_2$ کم می‌شود. باید توجه کرد که اگر

$$V_M=A_V V_{in}+V_D \quad (۶)$$

که $V_D$ نمایانگر اعوجاج است آنگاه:

$$V_N=V_{in}+V_D/A_V \quad (۷)$$

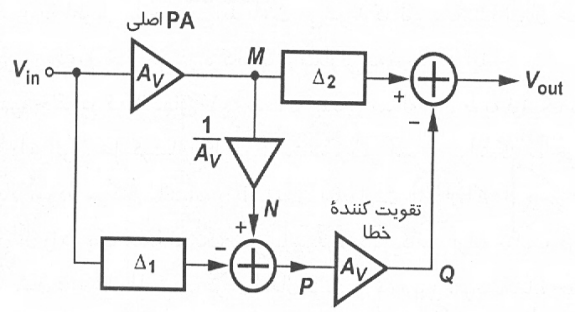
در نتیجه:

$$V_Q=V_D, \quad (۸)$$

$V_P=V_D/A_V$ و بنابراین:

$$V_{out}=A_V V_{in} \quad (۹)$$

استفاده از خط تأخیر برای جبران اختلاف فاز دو تقویت‌کننده موجود در مدار در فرکانس‌های بالا است به‌طوری‌که $\Delta_1$ اختلاف فاز $P_A$ و $\Delta_2$ اختلاف فاز تقویت‌کننده خطا را جبران می‌کند. دو مسیری که از $V_{in}$ به اولین تفریق کننده منتهی می‌شوند را حلقه حذف سیگنال نامیده و دو مسیری که از M و P به تفریق کننده دوم می‌رسند را حلقه حذف خطا می‌نامند.

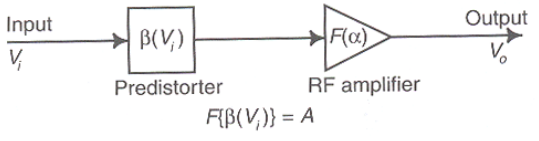



**شکل۴- ساختار کلی روش فیدفوروارد**

روش فیدفوروارد نیز دارای مزایا و معایبی است از مزایای آن می‌توان پایداری ذاتی آن نسبت به‌روش فیدبک و دقت آن در خطی‌سازی را نام برد ولی خطی‌سازی به کمک روش فیدفوروارد چند عیب مهم نیز دارد. نخست این‌که پیاده‌سازی عنصر ایجاد تأخیر به‌صورت آنالوگ نیاز به ادوات پسیو مثل خطوط میکرواستریپ دارد. دوم این‌که فریق‌کننده خروجی را باید با عناصر کم اتلاف ساخت مثل ترانسفورماتور فرکانس بالا. سوم این‌که خطی‌شدن به یکسان بودن بهره و فازی که دو سیگنال ورودی هر تفریق‌کننده دارند بستگی دارد.

## ه– روش پیش اعوجاج

در این روش در ورودی تقویت‌کننده اعوجاج‌هایی به‌طور مصنوعی تولید می‌شود و با سیگنال ورودی جمع می‌شود به‌طوری که این اعوجاج‌ها، اعوجاج‌های ناشی از تقویت‌کننده را خنثی می‌کنند و سیگنال بدون اعوجاج خواهد شد. ساختار اصلی خطی‌سازی با استفاده از پیش‌اعوجاج‌ساز در شکل (۵) نشان داده شده است. در این شکل تابع پیش‌اعوجاج‌ساز $B(V_i)$ طوری روی سیگنال ورودی تأثیر می‌گذارد که در خروجی یک شکل موج تقریباً بدون اعوجاج ببینیم.



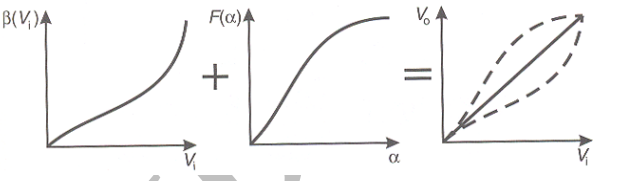

**شکل۵- ساختار کلی روش پیش‌اعوجاج**

Archive of SID



www.SID.ir

نکته‌ای که در مورد روش پیش‌اعوجاج اهمیت زیادی دارد این است که سیگنال پیش‌اعوجاج تولید شده تا حد امکان با تقویت‌کننده هماهنگ باشد تا بتواند سیگنالی تولید کند که اعوجاج تقویت‌کننده را خنثی کند، بنابراین باید اندازه و فاز این سیگنال را به‌خوبی تنظیم کرد [۹].



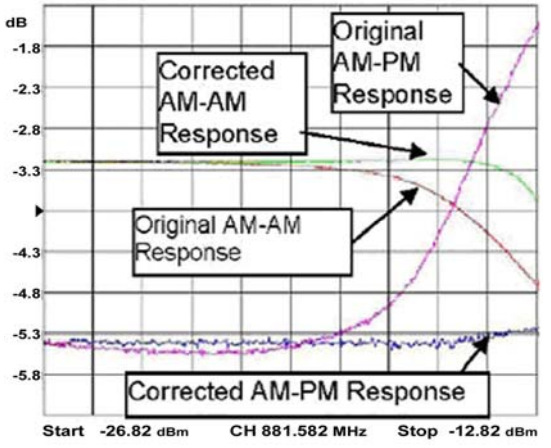

**شکل۶- عملکرد سیستم پیش‌اعوجاج**

مدل آنالوگ مدارهای پیش اعوجاج‌ساز دارای معایبی است. از معایب آن می‌توان به مقدار نسبتاً کم خطی‌سازی و مشکل در خنثی‌سازی انواع اعوجاج‌ها اشاره کرد ولی مدل دیجیتال آن توانایی بالاتری در خطی‌سازی دارد و به‌همین دلیل امروزه کاربرد بیشتری دارد [۳]. مدارهای پیش‌اعوجاج‌ساز دیجیتالی دارای ساختار پیچیده‌ای هستند. دراین مقاله الگوریتمی برای تطبیقی کردن این مدارات پیشنهاد می‌کنیم.

## ۲-یک پیش‌اعوجاج‌ساز دیجیتالی با قابلیت تطبیق

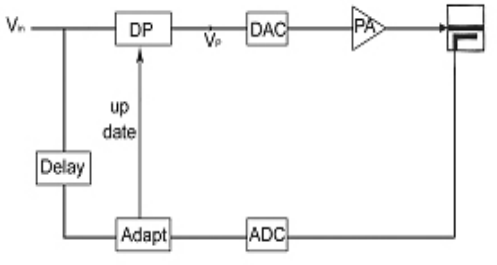
همان‌طور که اشاره شد پیش‌اعوجاج‌سازهای آنالوگ دارای دقت بالایی نیستند و به‌همین دلیل نمی‌توانند اعوجاج‌های تولیدی در تقویت‌کننده را تا حد زیادی خنثی کنند ولی پیش اعوجاج‌سازهای دیجیتالی به‌علت استفاده از تکنیک‌های دیجیتالی دارای دقت بسیار بیشتری هستند. در شکل(۷)، اثر پیش اعوجاج‌سازهای دیجیتالی روی تقویت‌کننده‌های قدرت نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است بهبود قابل ملاحظه‌ای در هر دو نوع اعوجاج دامنه (AM-AM) و اعوجاج فاز (AM-PM) بدست آمده است.

در سال‌های اخیر با توجه به پیشرفت روز افزون سیستم‌های دیجیتال استفاده از این سیستم‌ها در ترکیب با سیستم‌های آنالوگ گسترش یافته است. یک مثال از این ترکیب استفاده از سیستم‌های پیش‌اعوجاج‌ساز دیجیتالی در ترکیب با تقویت‌کننده‌های قدرت RF برای بهبود کارایی و افزایش رنج خطی بودن این تقویت‌کننده‌ها است. پیش‌اعوجاج‌سازهای دیجیتالی دارای دقت بالایی هستند ولی همان‌طورکه اشاره شد مشکل اصلی پیچیدگی آنها است که هزینه و انرژی مصرفی را بالا می‌برد. همچنین این مدارها قابلیت تطبیق ندارند و دراثر تغییر شرایط کار به هر دلیلی، از حالت بهینه فاصله می‌گیرند[۲].




**شکل۷- اثر پیش اعوجاج دیجیتال بر روی اعوجاج‌های AM-AM,AM-PM**

دراین مقاله در ابتدا الگوریتمی برای تطبیقی‌کردن پیش اعوجاج‌سازهای دیجیتالی پیشنهاد می‌کنیم. ساختار کلی روش پیشنهادی درشکل(۸) نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است این مدار دارای یک تطبیق‌دهنده است که با یک سیگنال فیدبک از خروجی و همچنین سیگنال تأخیر داده شده ورودی تغذیه می‌شود.

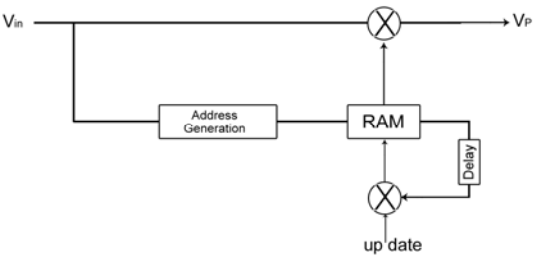



**شکل۸- روش پیش‌اعوجاج‌ساز دیجیتال تطبیقی**

ساختار داخلی مدار پیش‌اعوجاج‌ساز دیجیتالی در شکل (۹) نشان داده شده است. اساس کار این مدار به این صورت است که به‌ازای هر مقدار مشخص از دامنه سیگنال ورودی یک ضریب پیش اعوجاج مختلط تولید می‌کند و آن را درسیگنال ورودی ضرب می‌کند این ضریب باید به‌گونه‌ای باشد که تابع غیرخطی تقویت‌کننده را درآن دامنه خاص خطی کند یعنی پس از این‌که این ضریب در سیگنال ورودی ضرب شد و سیگنال حاصل توسط تقویت‌کننده غیرخطی در آن دامنه مشخص تقویت شد سیگنال حاصل خطی شود. علت مختلط بودن این ضریب این است که علاوه‌بر اعوجاج اندازه بتوانیم اعوجاج فاز را نیز خنثی کنیم.

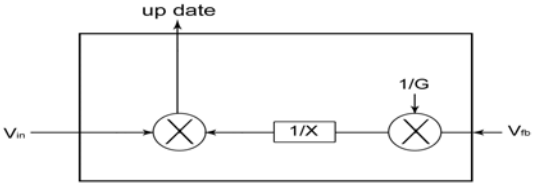
Archive of SID


www.SID.ir




**شکل۹- ساختار داخلی مدار پیش‌اعوجاج‌ساز**

پس‌نیاز به یک حافظه موقت داریم تا این ضرایب را به‌ازای مقادیر مختلف دامنه سیگنال ورودی در آن ذخیره کنیم. این حافظه موقت را می‌توان با یک RAM پیاده‌سازی کرد. یک تولیدکننده آدرس سیگنال ورودی به RAM را تولید می‌کند و به‌ازای دامنه سیگنال ورودی در هر پالس به یکی ازخانه‌های RAM اشاره می‌کند. پس فقط کافی است برای هر تقویت‌کننده دراین خانه‌های RAM ضرایبی را قرار دهیم که به‌ازای هر مقدار از دامنه ورودی بهره مدار یک مقدار ثابت باشد. این ضرایب را می‌توان به نسبت دامنه در فاصله‌های مساوی تقسیم کرد. یعنی مثلاً اگر RAM گنجایش ۱۰۰ ضریب را دارد پیک دامنه سیگنال ورودی را به ۱۰۰ قسمت مساوی تقسیم کنیم و برای هر قسمت یک خانه RAM را اختصاص دهیم. ولی راه حل بهتری نیز وجود دارد و آن این است که در دامنه‌های کم سیگنال ورودی که خود تقویت کننده حالت خطی دارد و هنوز فشردگی بهره اتفاق نیفتاده تعداد ضرایب را کمتر کنیم و در دامنه‌های زیاد که تقویت‌کننده حالت غیرخطی بیشتری دارد تعداد ضرایب را بیشتر کنیم. به‌عبارت دیگر در دامنه‌های کم سیگنال ورودی، تولیدکننده آدرس RAM با تغییرات بزرگتری از سیگنال ورودی تغییر مقدار دهد و در دامنه‌های بزرگتر با تغییرات کوچکتری از سیگنال ورودی تغییر مقدار دهد. برای پیاده‌سازی این روش کافی است سیگنال ورودی را به توان ۲ برسانیم و سپس به تولیدکننده آدرس وصل کنیم تا ضرایب برای دامنه‌های بالاتر تراکم بیشتری پیدا کنند [۲]. اما برای تطبیق مقادیر ذخیره‌شده در RAM و تغییر این ضرایب متناسب با تغییر شرایط باید هربار که تولیدکننده آدرس به خانه‌ای از RAM اشاره می‌کند علاوه برضرب محتوای خانه مزبور درسیگنال ورودی و تولید سیگنال پیش‌اعوجاج، این مقدار ذخیره شده با یک تأخیر در سیگنال حاصل از مدار تطبیق ضرب شده تا ضرایب جدید متناسب با شرایط مدار در RAM ذخیره شود یا به‌عبارتی ضرایب RAM به‌روز شود. الگوریتم تطبیق پیشنهادی به این صورت است که ابتدا سیگنال فیدبکی که از خروجی گرفته شده را بر بهره تقویت کننده تقسیم می‌کنیم و سپس سیگنال حاصله در همان لحظه را معکوس کرده و در سیگنال تأخیر یافته ورودی ضرب می‌کنیم تا ضریب تطبیق مورد نظر بدست آید. لازم به ذکر است که مقدار این تأخیر باید متناسب با سرعت مبدل‌های بکار رفته و همچنین تاخیر مدار معکوس کننده تنظیم شود. حال اگر مقدار سیگنال فیدبک شده خروجی از مقدار مطلوب کمتر باشد ضریب تطبیق بیشتر از یک می‌شود و سیگنال خروجی را افزایش می‌دهد و اگر سیگنال فیدبک شده خروجی از مقدار مطلوب بیشتر باشد ضریب تطبیق کمتر از یک شده و سیگنال خروجی را کاهش می‌دهد.




**شکل۱۰- ساختار داخلی مدار تطبیق دهنده**

علت استفاده از مدار تأخیر هم‌فاز کردن سیگنال ورودی و سیگنال خروجی فیدبک شده است. مقدار تأخیر را می‌توان به‌طور دقیق تنظیم کرد تا دیگر نیازی به تنظیم‌کننده فاز در مدار نباشد و این خود به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای به‌سادگی مدار کمک می‌کند. مدارهای پیش‌اعوجاج‌ساز رایج با وجود کارایی نسبتاً خوب و قابلیت خطی‌سازی بالا دارای یک مشکل اصلی هستند و آن أثر حافظه است. أثر حافظه باعث می‌شود خروجی مدار در هر لحظه علاوه‌بر ورودی به خروجی لحظات قبل نیز وابسته باشد و این امر تا حدی باعث غیرخطی شدن مدار می‌شود. پس در ادامه سعی می‌کنیم یک پیش‌اعوجاج‌ساز دیجیتالی طراحی کنیم که أثر حافظه را نیز کاهش دهد.

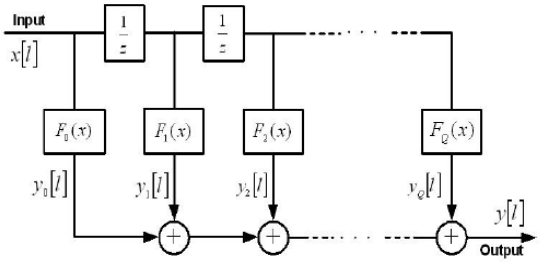
## ۳- مدار پیشنهادی

در این مقاله برای کاهش اثر حافظه سعی می‌کنیم سیگنال‌های ورودی زمان‌های قبلی را که خروجی فعلی به آنها وابسته است ذخیره کنیم و با اعمال تابع پیش‌اعوجاج بر روی این سیگنال‌ها اثر آن‌ها را در خروجی تا حد امکان کاهش دهیم به این طریق می‌توانیم هم‌زمان اعوجاج‌های سیگنال ورودی را با اعمال این تابع پیش‌اعوجاج خنثی کنیم و أثر حافظه را نیز تا حد زیادی کاهش دهیم. شکل (۱۱) نحوه پیاده‌سازی این ایده را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است با $Z^{-1}$ گرفتن از ورودی می‌توان به ورودی‌های زمان‌های قبل که تقویت‌کننده به آن‌ها وابسته است دسترسی پیدا کرد و با انتخاب توابع پیش‌اعوجاج مناسب برای این ورودی‌ها أثر آنها را به حداقل رساند واعوجاج سیگنال را نیز خنثی کرد.

Archive of SID



www.SID.ir



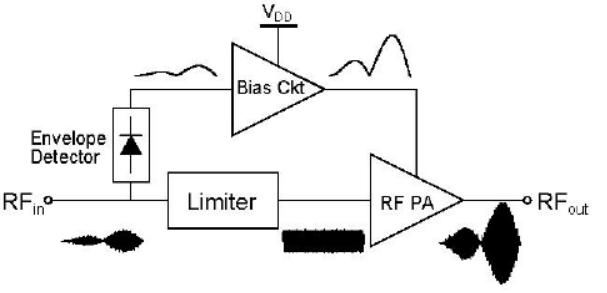

**شکل ۱۱- پیش‌اعوجاج‌ساز دیجیتالی با حافظه چندجمله‌ای**

با دقت در ساختار مدار می‌توان فهمید که این مدار در حقیقت یک نوع فیلتر FIR است. نحوه عملکرد این سیستم را می‌توان به‌صورت ریاضی با عبارت (۱۰) توصیف کرد.

$$y(l):\sum_{q=0}^{Q}\sum_{k=1}^{n} a_{2k-1}\left|x[l-q]\right|^{2(k-1)}x[l-q] \qquad (۱۰)$$ [۴]

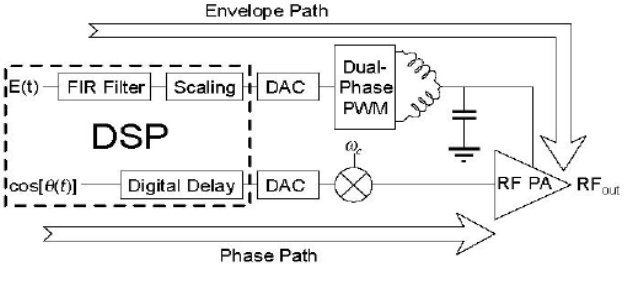
به‌کمک این روش اثر حافظه می‌تواند با تاخیر قابل قبولی جبران شود. مشکل اصلی این روش تضاد بین سرعت با دقت و انرژی مصرفی است یعنی این‌که برای کاهش اثر حافظه درحد قابل‌قبول باید از یک فیلتر FIR بزرگتر استفاده کنیم که این امر در فرکانس‌های بالا هم تأخیر مدار و هم توان مصرفی را زیاد می‌کند. پس باید راهی برای کاهش فرکانس سیگنال ورودی که به فیلتر FIR وارد می‌شود پیدا کنیم. یک راه استفاده از روش حذف و بازیافت پوش سیگنال است. تکنیک حذف و بازگرداندن پوش (EE&R) اولین با در سال ۱۹۵۲ پیشنهاد شد. از این تکنیک می‌توان هم به‌عنوان یک فرستنده خطی کامل و هم به‌عنوان یک تقویت‌کننده خطی RF استفاده کرد و معمولاً حالت دوم کاربرد بیشتری دارد. تکنیک (EE&R) دراصل برای تقویت خطی سیگنال‌های SSB در فرکانس بالا بکار می‌رود ولی به‌دلیل راندمان بالا در فرستنده‌های توان بالای رادیویی نیز کاربرد دارد. همچنین کاربرد آنها در سیستم‌های موبایل نیز پیشنهاد شده است [۴].

ساختار کلی یک تقویت‌کننده (EE&R) در شکل (۱۲) نشان داده شده است.




**شکل۱۲- ساختار کلی یک تقویت‌کننده EE&R**

سیگنال ورودی می‌تواند هم شامل مدولاسیون دامنه و هم شامل مدولاسیون فاز باشد. این سیگنال ورودی به دو مسیر تقسیم می‌شود یکی مسیر باند پایه که فقط پوش سیگنال ورودی را شامل می‌شود و دیگری مسیر RF که شامل سیگنال حامل با فاز مدوله شده و اندازه ثابت است. این سیگنال را می توان به‌راحتی با محدودکردن ورودی RF برای حذف مدولاسیون دامنه تولید کرد تا فقط مدولاسیون فاز (یا فرکانس) سیگنال ورودی باقی بماند. سیگنال باند پایه را نیز می‌توان با استفاده از دیود آشکارساز تولید کرد. سیگنال حامل مدوله شده فاز توسط یک تقویت‌کننده با راندمان بالا مثل تقویت‌کننده‌ای کلاس C یا D یا E تقویت می‌شود. این تقویت‌کننده‌ها اطلاعات مدولاسیون فاز را حفظ می‌کنند و آن‌ها را به خروجی سیستم انتقال می‌دهند. سیگنال AM باند پایه توسط یک تقویت‌کننده صوتی با راندمان مناسب تقویت می‌شود و در نهایت سیگنال توان بالای صوتی تولید شده و به کلکتور یا ورودی تغذیه تقویت‌کننده RF اعمال می‌شود و با فرض اینکه تأخیر در مسیر یکسان باشد یک نسخه توان بالای ورودی درخروجی ایجاد می‌شود و این روش برپایه تنظیم پویای ولتاژ منبع برای برگرداندن اندازه روی فاز مدوله شده سیگنال ورودی استوار است [۶]. آشکارکننده فاز و محدودکننده دیجیتالی در باند پایه قابل پیاده‌سازی هستند. بنابراین شکل دیجیتالی سیگنال اجازه استفاده از تکنیک‌های پیشرفته DSP را برای دستیابی به حالت خطی بهتر و بهبود کارایی می‌دهد بنابراین ما از این روش استفاده می‌کنیم و به‌کمک آن فرکانس سیگنال ورودی به فیلتر FIR را کاهش می‌دهیم. شکل (۱۳) نحوه پیاده‌سازی مدار پیشنهادی را نشان می‌دهد.



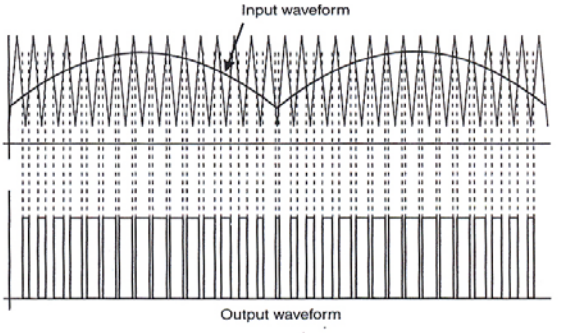

**شکل۱۳- مدار پیشنهادی**

در مدار فوق از یک فیلتر FIR با ۴ اتصال وسط استفاده کردیم سپس خروجی فیلتر را نرمالیزه کردیم و آن را به یک مبدل آنالوگ به دیجیتال دادیم همچنین برای افزایش بازده از یک موج PWM (مدولاسیون پهنای پالس) به‌منظور تغذیه تقویت‌کننده قدرت استفاده

Archive of SID

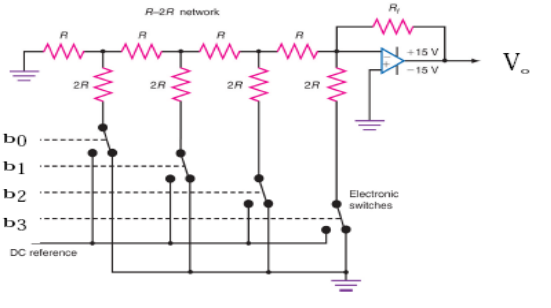
www.SID.ir

کردیم.




**شکل۱۴- نحوه تولید موج PWM**

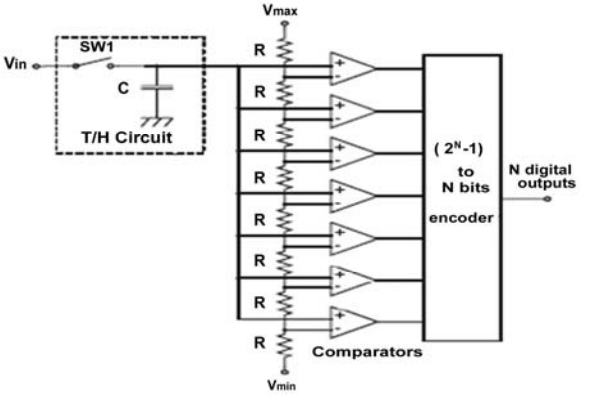
در شکل بالا محور افقی محور زمان و محور عمودی محور فرکانس است. مدار تولیدکننده موج PWM شکل موج ورودی را با یک شکل موج مثلثی مقایسه می‌کند و هر جا دامنه شکل موج مثلثی از شکل موج ورودی بیشتر باشد یک سیگنال با دامنه ثابت تولید می‌کند و هرجا دامنه شکل موج مثلثی از شکل موج ورودی پایین‌تر بود خروجی آن صفر می‌شود. در مدار EE&R موج PWM تولید شده وارد یک تقویت‌کننده با راندمان بالا می‌شود و پس از آن از یک فیلتر پایین‌گذر عبور می‌کند تا به حالت سینوسی باز گردد و وارد تقویت‌کننده RF می‌شود [۸]. پهنای باند مبدل‌های سوییچینگ PWM به‌سرعت clock وابسته است ولی در فرکانس‌های clock بالا به‌دلیل تلفات سوییچینگ وسایل فعال، کارایی تا حد زیادی کاهش می‌یابد. برای بهبود پهنای باند بدون افزایش سرعت clock می‌توان عدم تطابق و تأخیر موجود در سیستم را درمحدوده دیجیتال جبران کرد. اما یک مشکل اصلی همه مدارهایی که از ترکیب سیستم‌های دیجیتال و آنالوگ استفاده می‌کنند سرعت و دقت مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال و دیجیتال به آنالوگ است. دراین مدار از مبدل دیجیتال به آنالوگ نردبانی R-2R استفاده می‌شود. DAC نردبانی R-2R یکی از رایج‌ترین مدارهای DAC است که دارای سرعت بالایی است و با




یک پالس ساعت کار می‌کند.

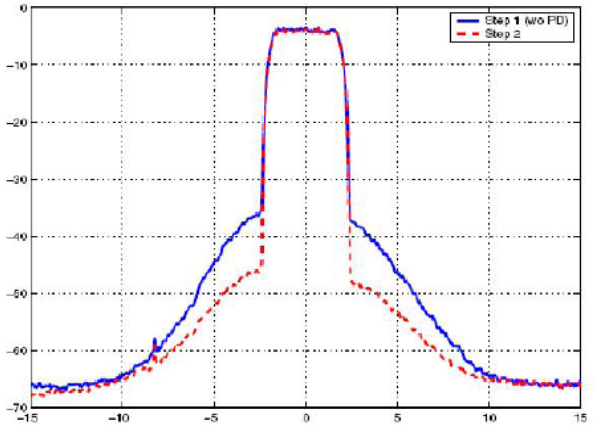
**شکل۱۵- مبدل دیجیتال به آنالوگ نردبانیR-2R**

همچنین برای مبدل آنالوگ به دیجیتال از یک FLASH ADC استفاده می‌کنیم. FLASH ADC یک ADC با سرعت بالا است که نیازی به استفاده از تقویت‌کننده‌های کاربردی ندارد و قابلیت خوبی برای کار در ولتاژ پایین دارد [۷].




**شکل۱۶- مبدل آنالوگ به دیجیتالFLASH**

دراین مدار از یک فیلتر FIR با فاز خطی به‌عنوان یک فیلتر جبران‌کننده در پوش فاز استفاده کردیم. شکل (۱۷) خروجی سیستم بهازای یک سیگنال ورودی WCDMA را نشان می‌دهد. محور افقی محور نرمالیزه شده فرکانس و محور عمودی محور نرمالیزه شده دامنه است. نمودار آبی رنگ خروجی تقویت‌کننده RF پس از استفاده از مدار پیشنهادی است، همان‌طور که از شکل مشخص است بهبود قابل ملاحظه‌ای در نسبت توان کانال مجاور بدست آمده است که نشان دهنده کاهش اثر حافظه است یعنی توانستیم یک پیش‌اعوجاج‌ساز دیجیتالی با قابلیت کاهش اثر حافظه تولید کنیم.




**شکل۱۷- خروجی سیستم به‌ازای سیگنال WCDMA ورودی**

Archive of SID



www.SID.ir

همان‌طور که در شکل مشخص است نسبت توان کانال مجاور بیش از ۸dB کاهش یافته است و نتیجه بدست آمده با نتایج حاصل از سیستم‌های بسیار پیچیده پیش‌اعوجاج‌ساز دیجیتالی که در مراجع ۱ و ۴ پیشنهاد شده و از نرم‌افزارهای پیچیده کامپیوتری استفاده می‌کنند قابل قیاس است همچنین این مدار در مقایسه با سیستم‌های پیش‌اعوجاج‌ساز معمول دارای دقت بیشتر و قابلیت کاهش اثر حافظه می‌باشد.

## ۴–نتیجه‌گیری

در این مقاله دو نوع پیش‌اعوجاج‌ساز آنالوگ و دیجیتال را مقایسه کردیم و مزایای نوع دیجیتالی را مورد بررسی قرار دادیم و یک ساختار پیش‌اعوجاج‌ساز دیجیتالی قابل تطبیق پیشنهاد کردیم. یکی از مهمترین مشکلات تقویت‌کننده‌های RF دیجیتالی اثر حافظه است که تلاش‌های بسیاری برای حذف آن با استفاده از سیستم‌های آنالوگ صورت گرفته ولی نتایج بدست آمده چشمگیر نبوده است. با توجه به پیشرفت زیاد سیستم‌های DSP در سال‌های اخیر در این مقاله یک مدار مبتنی‌بر DSP برای کاهش اثر حافظه ارائه کردیم وکارایی آن را به کمک شبیه‌سازی نشان دادیم. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در نسبت توان کانال مجاور بیش از۸db کاهش داشتیم و این نتیجه با پیش‌اعوجاج‌سازهای دیجیتالی با ساختارهای بسیار پیچیده قابل مقایسه است.

## ۵– تقدیر و تشکر

در پایان از زحمات بی‌دریغ آقای دکتر دهقانی که ما را در انجام این پروژه یاری کردند تشکر می‌نماییم.

## ۱۲– مراجع

[1] E. G. Jeckeln, F. M. Ghannouchi, M. A. Sawan; **“A new adaptive predistortion technique using software-defined radio and DSP technologies suitable for base-station 3G power amplifiers”**, IEEE Trans. Microw. Theory Tech., Vol. 52, No. 9, pp. 2139–2147, Sep. 2004.

[2] R. Dinis, A. Palhau; **“A class of signal-processing schemes for reducing the envelope fluctuations of CDMA signals”**, IEEE Trans. Commun., Vol. 53, No. 5, pp. 882–889, May 2005.

[3] M. Isaksson, D. Wisell, D. RÖnnow; **“A comparative analysis of behavioral models for RF power amplifiers”**, IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques, Vol. 54, No. 1, pp. 348–359, Jan. 2006.

[4] J.cha, J YI J kim, B kim; **"optimum design of a predistortion RF amplifier for multicarrier wcdma opplications"**, IEEE Trans Microw .Theory Tech , Vol. 52, No. 2 , PP.655 – 663 , Feb. 2004

[5] F. H. Raab, P. As beck, S. Cripps, P. B. Kensington, Z. B. Popovic, N. Pothecary, J. F. Sevic, N. O. Sokal; **"Power amplifiers and transmitters for RF and microwave"**, IEEE Trans. Microw. Theory Tech, Vol. 50, No. 3, pp. 814-826, Mar. 2002.

[6] J. H. Chen, P. Fedorenko, J. S. Kenney; **"A Low Voltage W-CDMA Polar Transmitter with Digital Envelope Path Gain Compensation"**, submitted to IEEE Microwave and Wireless Lett.

[7] R. Sperlich, J. A. Sills, J.S. Kenney; **"Closed-Loop Digital Pre-Distortion with Memory Effects Using Genetic Algorithms"**, 2005 Int. Microwave Microwave Symp., June 12-17, 2005, Long Beach, CA, pp. 1557-60.

[8] Y. Bayram, J. L. Volakis; **"Hybrid S-parameters for transmission line networks with linear/nonlinear load terminations subject to arbitrary excitations"**, *IEEE Trans.* Microw. Theory Tech., Vol. 55, No. 5, pp. 941–950, May 2007.

[9] W. Woo, M. Miller, DJ. S. Kenney; **"A Hybrid Digital/RF Envelope Predistortion Linearization System for Power Amplifiers"** Vol. 53, No. 1, IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., pp. 229-237, Jan. 2007.

[10] W. Woo, J. S. Kenney, **"Predistortion Linearization System for High Power Amplifiers"** IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig, Ft. Worth, TX, pp. 677-80, June 6-10, 2004.

Archive of SID



www.SID.ir