

روشی برای کاهش اثر حافظه در تقویت‌کننده‌های فرکانس رادیویی (RF) با استفاده از فیلتر FIR

محمد رضا سلطانی^۱، رسول امیر فتاحی^۲، محمد رضا ادهوش^۳

۱- مری، 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- مری، دانشکده برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، zadhoosh12962@yahoo.com

چکیده

در این مقاله انواع روش‌های خطی‌سازی تقویت‌کننده‌های RF را مورد مطالعه قرار می‌دهیم و از بین این روش‌ها کارآمدترین روش یعنی استفاده از یک مدار پیش‌اعوجاج‌ساز دیجیتالی را به‌طور خاص تحلیل و بررسی می‌کنیم و سپس روشی برای تطبیقی کردن این مدار دیجیتالی پیشنهاد می‌کنیم و مزایا و معایب آن را نسبت به مدارهای مرسوم پیش‌اعوجاج‌ساز 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 مبتنی بر یک سیستم پردازش سیگنال ساده برای از بین بردن اثر 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، تقویت‌کننده‌های RF، خطی‌سازی، فیلتر FIR.

۱- مقدمه

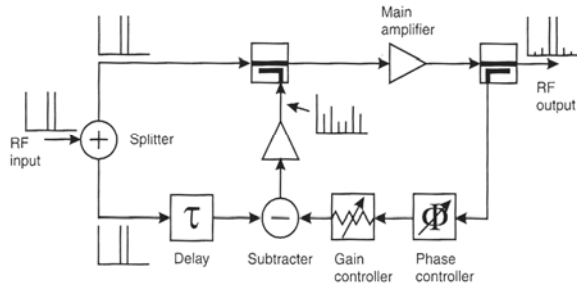
با گسترش روزافزون سیستم‌های مخابراتی استفاده از تقویت‌کننده‌های قدرت RF رونق زیادی پیدا کرده است و به‌همان نسبت نیاز به خطی‌سازی آنها افزایش یافته است. عامل اصلی تهدید خطی بودن تقویت‌کننده‌ها، اعوجاج است. دو دسته اصلی اعوجاج، اعوجاج دامنه و اعوجاج فاز است. اعوجاج دامنه بر روی دامنه سیگنال ورودی اثر می‌گذارد و آن را تغییر می‌دهد. ولی اعوجاج فاز، فاز سیگنال ورودی را به‌طور نامنظمی شیفت داده و حالت خطی فاز را از بین 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 بدست آوردن پایداری آسان می‌شود. هنگامی که 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 در نظر گرفته شوند. عامل دیگری که باید مد نظر داشت این است که میزان خطی بودن مورد نیاز در سیستم‌های RF بسیار بیشتر از سیستم‌های

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.

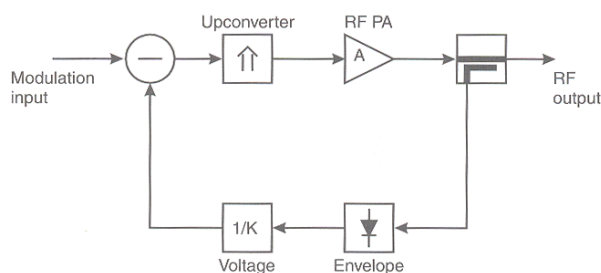


شکل ۲- شمای کلی فیدبک اعوجاج [1]

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 در نظر گرفتن مشکلات فیدبک در محیط‌های صوتی بسیاری از مشکلات مربوطه نه تنها رفع نمی‌شود بلکه شدت بیشتری پیدا می‌کنند. شکل (۳) یک شمای کلی از این نوع فیدبک را به ما نشان می‌دهد.



شکل ۳- شمای کلی فیدبک پوش

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 هر یک را جداگانه بررسی می‌کنیم سپس برای روش پیش‌اعوجاج یک مدار دیجیتالی قابل تطبیق پیشنهاد می‌کنیم همچنین با توجه به اینکه مشکل اصلی تقویت‌کننده‌های RF 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 می‌کنیم که اعوجاج و نویز به‌انتهای تقویت‌کننده اصلی در مسیر پیشرو اضافه شوند.

$$y(t) = AX_e(t) + d(t) \quad (1)$$

$$y_r(t) = \frac{y(t)}{k} \quad (2)$$

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

$$x_e(t) = x(t) - y_r(t) \quad (3)$$

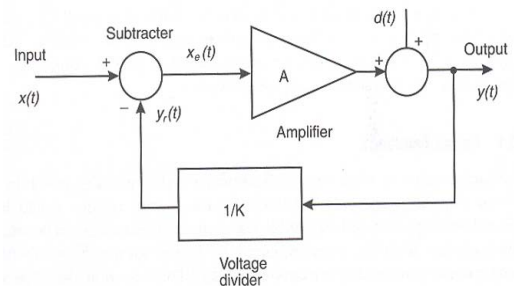
با ترکیب سه رابطه بالا داریم:

$$y(t) = \frac{k(Ax(t) + d(t))}{k + A} \quad (4)$$

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

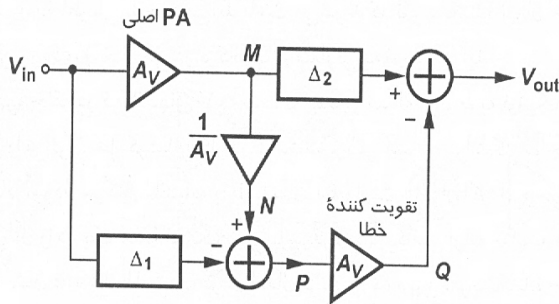
$$y(t) = kx(t) + \frac{kd(t)}{A} \quad (5)$$

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



شکل ۱- ساختار کلی فیدبک

استفاده از خط تأخیر برای جبران اختلاف فاز دو تقویت کننده موجود در مدار در فرکانس‌های بالا است به طوری که Δ_1 اختلاف فاز P_A و Δ_2 اختلاف فاز تقویت کننده 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 P و M به تفریق کننده دوم می‌رسند را حلقه حذف خطا می‌نامند.

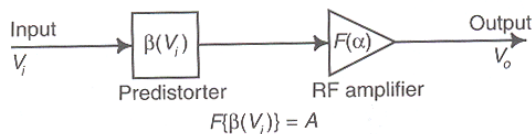


شکل ۴- ساختار کلی روش فیدفوروارد

روش فیدفوروارد نیز دارای مزایا و معایبی است از مزایای آن می‌توان پایداری ذاتی آن نسبت به روش فیدبک و دقت آن در خطی سازی را نام برد ولی خطی سازی به کمک روش فیدفوروارد چند عیب مهم نیز دارد. نخست این که پیاده سازی عنصر ایجاد تأخیر به صورت آنالوگ نیاز به ادوات پسیو مثل خطوط میکرواستریپ دارد. دوم این که فریق کننده خروجی را باید با عناصر کم اتلاف ساخت مثل ترانسفورماتور فرکانس بالا. سوم این که خطی شدن به یکسان بودن بهره و فازی که دو سیگنال ورودی هر تفریق کننده دارند بستگی دارد.

۵- روش پیش اعوجاج

در این روش در ورودی تقویت کننده اعوجاج‌هایی به طور مصنوعی تولید می‌شود و با سیگنال ورودی جمع می‌شود به طوری که این اعوجاج‌ها، اعوجاج‌های ناشی از تقویت کننده را خنثی می‌کنند و سیگنال بدون اعوجاج خواهد شد. ساختار اصلی خطی سازی با استفاده از پیش‌اعوجاج ساز در شکل (۵) نشان داده شده است. در این شکل تابع پیش‌اعوجاج ساز $B(V_i)$ طوری روی سیگنال ورودی تأثیر می‌گذارد که در خروجی یک شکل موج تقریباً بدون اعوجاج ببینیم.



شکل ۵- ساختار کلی روش پیش اعوجاج

عملکرد این مدل بر مبنای مقایسه‌ی خروجی مدوله شده 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 خطی سازی 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 به وسیله آشکارسازی پوش صورت گرفته و اطلاعات فاز نیاز نمی‌باشد بکار می‌رود. انواع پیشرفته تر این تکنیک با استفاده از سیگنال‌های قطبی یا کارترین 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 شیفیت فاز کریور در فرکانس‌های بالا صورت می‌پذیرد. بهره کم یک طبقه نشان دهنده فیدبک نامناسب بکار رفته در آن طبقه می‌باشد. مشکلات شیفیت فاز کریور در تقویت کننده‌های چندطبقه منجر به مشکلات پایداری نیز می‌شود. مدل بکار رفته در این سیستم برخلاف دو سیستم قبلی یک تقویت کننده تنها نیست و فرستنده کامل می‌باشد. به وسیله 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 تقویت کننده‌های غیرخطی را به صورت جمع یک ضریب خطی از ورودی و یک سیگنال خطا در نظر گرفت [۱]. توپولوژی فیدفوروارد این خطا را محاسبه می‌کند و با ضریب مناسب آن را از شکل موج خروجی کم می‌کند. همان طور که در شکل (۴) نشان داده شده خروجی تقویت کننده اصلی، V_M در $1/A_V$ ضرب می‌شود تا V_N تولید شود. ورودی با یک اختلاف فاز Δ_1 از V_N کم می‌شود و نتیجه A_V برابر شده و از V_M با یک اختلاف فاز Δ_2 کم می‌شود. باید توجه کرد که اگر

$$V_M = A_V V_{in} + V_D \quad (6)$$

که V_D نمایانگر اعوجاج است آنگاه:

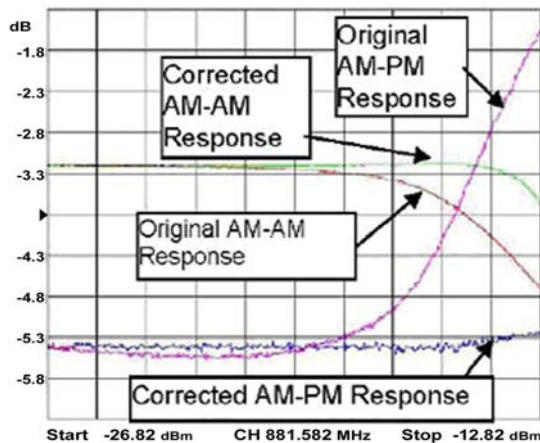
$$V_N = V_{in} + V_D / A_V \quad (7)$$

در نتیجه:

$$V_Q = V_D, \quad (8)$$

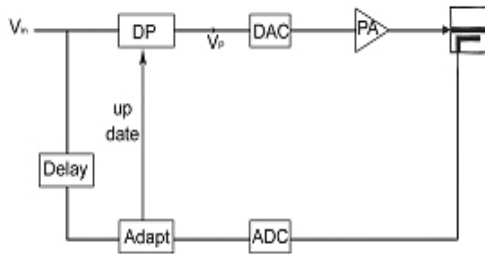
و بنابراین $V_P = V_D / A_V$

$$V_{out} = A_V V_{in} \quad (9)$$



شکل ۷- اثر پیش اعوجاج دیجیتال بر روی اعوجاج‌های AM-AM, AM-PM

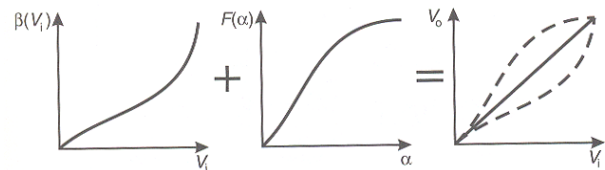
در این مقاله در ابتدا الگوریتمی برای تطبیقی کردن پیش اعوجاج‌سازهای دیجیتالی پیشنهاد می‌کنیم. ساختار کلی روش پیشنهادی در شکل (۸) نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است این مدار دارای یک تطبیق‌دهنده است که با یک سیگنال فیدبک از خروجی و همچنین سیگنال تأخیر داده شده ورودی تغذیه می‌شود.



شکل ۸- روش پیش اعوجاج‌ساز دیجیتالی 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 در سیگنال ورودی ضرب می‌کند این ضریب باید به‌گونه‌ای باشد که تابع غیرخطی تقویت‌کننده را در آن 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 علاوه بر اعوجاج اندازه بتوانیم اعوجاج فاز را نیز خنثی کنیم.

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].



شکل ۶- عملکرد سیستم پیش‌اعوجاج

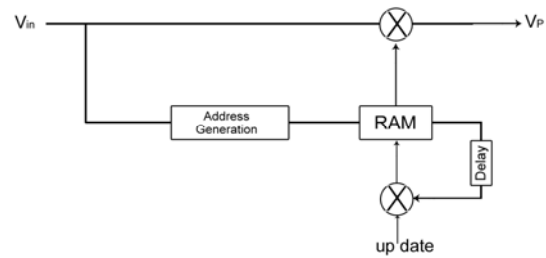
مدل آنالوگ مدارهای پیش اعوجاج‌ساز دارای معایبی است. از معایب آن می‌توان به مقدار نسبتاً کم خطی‌سازی و مشکل در خنثی‌سازی انواع اعوجاج‌ها اشاره کرد ولی مدل دیجیتالی آن توانایی بالاتری در خطی‌سازی دارد و به‌همین دلیل امروزه کاربرد بیشتری دارد [۳]. مدارهای پیش‌اعوجاج‌ساز دیجیتالی دارای ساختار پیچیده‌ای هستند.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

۲- یک پیش‌اعوجاج‌ساز دیجیتالی با قابلیت تطبیق

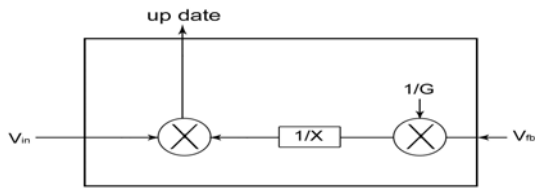
همان‌طور که اشاره شد پیش‌اعوجاج‌سازهای آنالوگ دارای دقت بالایی نیستند و به‌همین دلیل نمی‌توانند اعوجاج‌های تولیدی در تقویت‌کننده را تا حد زیادی خنثی کنند ولی پیش‌اعوجاج‌سازهای دیجیتالی به‌علت استفاده از تکنیک‌های دیجیتالی دارای دقت بسیار بیشتری هستند. در شکل (۷)، اثر پیش‌اعوجاج‌سازهای دیجیتالی روی تقویت‌کننده‌های 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 دیجیتالی 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 همان‌طور که اشاره شد مشکل اصلی پیچیدگی آنها است که هزینه و انرژی مصرفی را بالا می‌برد. همچنین این مدارها قابلیت تطبیق ندارند و در اثر تغییر شرایط کار به هر دلیلی، از حالت بهینه فاصله می‌گیرند [۲].

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 میدلهای بکار رفته و همچنین تأخیر 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.



شکل ۹- ساختار داخلی مدار پیش‌اعوجاج‌ساز



شکل ۱۰- ساختار داخلی مدار تطبیق دهنده

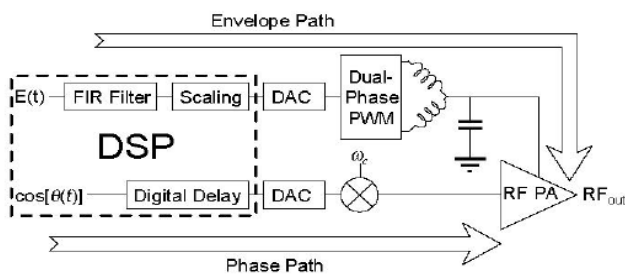
علت استفاده از مدار تأخیر هم‌فاز کردن سیگنال ورودی و سیگنال خروجی فیدبک شده است. مقدار تأخیر را می‌توان به‌طور دقیق تنظیم کرد تا دیگر نیازی به تنظیم‌کننده فاز در مدار نباشد و این خود به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای به‌سادگی مدار کمک می‌کند. مدارهای پیش‌اعوجاج‌ساز رایج با وجود کارایی نسبتاً خوب و قابلیت خطی‌سازی بالا دارای یک مشکل اصلی هستند و آن اثر حافظه است. اثر حافظه باعث می‌شود خروجی مدار در هر لحظه علاوه بر 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 دیجیتال طراحی کنیم که اثر 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 اثر 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 اثر آنها را به حداقل رساند و اعوجاج سیگنال را نیز خنثی کرد.

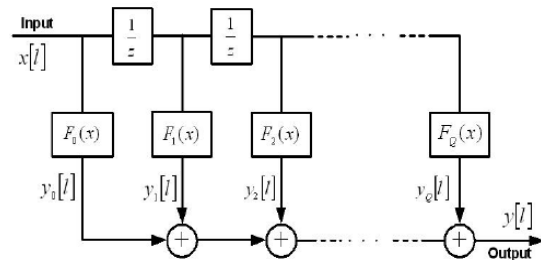
پس نیاز به یک حافظه موقت داریم تا این ضرایب را به‌ازای مقادیر مختلف دامنه سیگنال ورودی در آن ذخیره کنیم. این حافظه موقت را می‌توان با یک RAM پیاده‌سازی کرد. یک تولیدکننده آدرس سیگنال ورودی به RAM را تولید می‌کند و به‌ازای دامنه سیگنال ورودی در هر پالس به یکی از خانه‌های RAM اشاره می‌کند. پس فقط کافی است برای هر تقویت‌کننده در این 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 تقویت‌کننده حالت خطی دارد و هنوز فشرده‌گی 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 هر بار که تولیدکننده آدرس به خانه‌ای از RAM اشاره می‌کند علاوه بر ضرب محتوای خانه مزبور در سیگنال 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 تقویت‌کننده تقسیم می‌کنیم و سپس سیگنال حاصله در

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 می‌توان به راحتی با محدود کردن 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 تقویت کننده با راندمان بالا مثل تقویت کننده‌ای کلاس C یا D یا E تقویت می‌شود. این تقویت کننده‌ها اطلاعات مدولاسیون فاز را حفظ می‌کنند و آن‌ها را به خروجی سیستم انتقال می‌دهند. سیگنال AM باند پایه توسط یک تقویت کننده صوتی با راندمان مناسب تقویت می‌شود و در نهایت سیگنال توان بالای صوتی تولید شده و به کلکتور یا ورودی تغذیه تقویت کننده RF اعمال می‌شود و با فرض اینکه تأخیر در مسیر یکسان باشد یک نسخه توان بالای ورودی در خروجی ایجاد می‌شود و این روش بر پایه تنظیم پویای ولتاژ منبع برای برگرداندن اندازه روی فاز مدوله شده سیگنال ورودی استوار است [۶]. آشکارکننده فاز و محدودکننده دیجیتال 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 به کمک آن فرکانس سیگنال ورودی به فیلتر FIR را کاهش می‌دهیم. شکل (۱۳) نحوه پیاده‌سازی مدار پیشنهادی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳- 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) به منظور تغذیه تقویت کننده قدرت استفاده



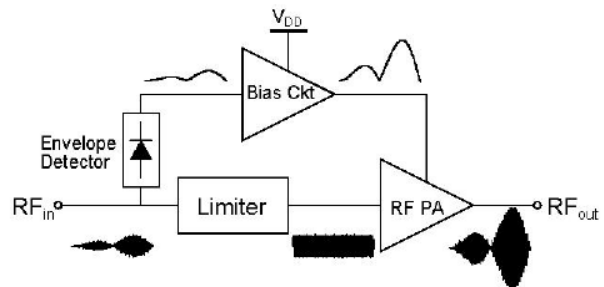
شکل ۱۱- پیش‌اعوجاج‌ساز دیجیتالی با حافظه چندجمله‌ای

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

$$y(l) : \sum_{q=0}^Q \sum_{k=1}^n a_{2k-1} |x[l-q]|^{2(k-1)} x[l-q] \quad (10)$$

به کمک این روش اثر حافظه می‌تواند با تأخیر قابل قبولی جبران شود. مشکل اصلی این روش تضاد بین سرعت با دقت و انرژی مصرفی است یعنی این که برای کاهش اثر حافظه در حد قابل قبول 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 باز یافت پوش سیگنال است. تکنیک حذف و بازگرداندن پوش (EE&R) اولین بار در سال ۱۹۵۲ پیشنهاد شد. از این تکنیک می‌توان هم به عنوان یک فرستنده خطی کامل و هم به عنوان یک تقویت کننده 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 به دلیل راندمان بالا در فرستنده‌های توان بالای رادیویی نیز کاربرد دارد. همچنین کاربرد آنها در سیستم‌های موبایل نیز پیشنهاد شده است [۴].

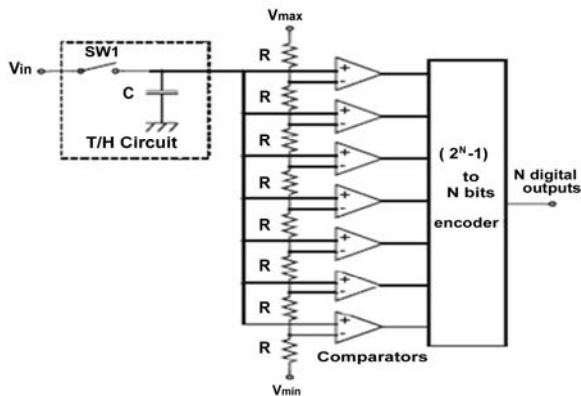
ساختار کلی یک تقویت کننده (EE&R) در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۲- ساختار کلی یک تقویت کننده EE&R

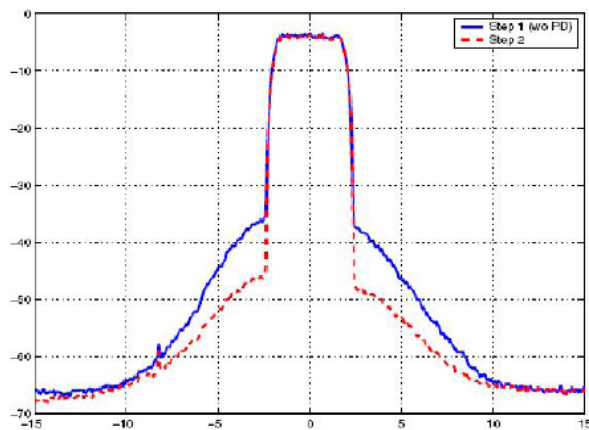
کردیم.

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].

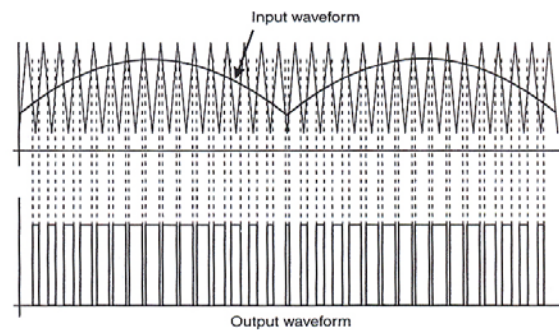


شکل ۱۶- مبدل آنالوگ به دیجیتال FLASH

در این 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.

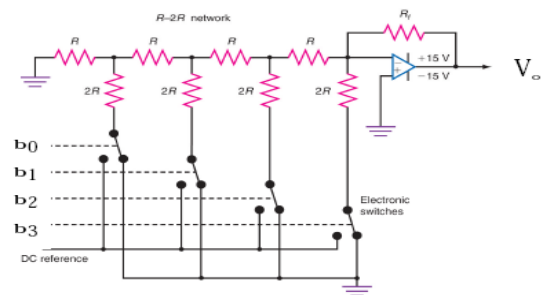


شکل ۱۷- خروجی سیستم به‌ازای سیگنال WCDMA ورودی



شکل ۱۴- 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 هر جا 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 سویچینگ PWM به سرعت clock وابسته است ولی در فرکانس‌های clock بالا به دلیل تلفات سویچینگ 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 در محدوده 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. در این 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.

شکل ۱۵- مبدل دیجیتال به آنالوگ نردبانی R-2R

- 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. Potheary, 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.

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 دیجیتالی 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 مبتنی بر DSP برای کاهش اثر حافظه ارائه کردیم و کارایی آن را به کمک شبیه‌سازی نشان دادیم. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در نسبت توان کانال مجاور بیش از ۸db 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