فصلنامه‌ی علمی و پژوهشی شریف
تابستان ۱۳۸۶، شماره‌ی سی و هشتم، ص. ۱۰۳-۱۰۸، (یادداشت فنّی)

تحلیل حساسیت سیستم پیش‌خور برای خطی‌سازی تقویت‌کننده‌های مایکروویو نسبت به خطای دامنه و فاز اجزای آن

علی‌محمد افشین همت‌یار (دانشجوی دکتری)
فروهر فرزانه (استاد)
دانشکده‌ی مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شریف

از میان روش‌های خطی‌سازی تقویت‌کننده‌های قدرت، روش پیش‌خور از قابلیت دست‌یابی به بیشترین درجه‌ی خطی‌سازی برخوردار است. البته کیفیتِ مطلوبِ سیستم پیش‌خور مستلزم تحقق شرایطی است که مهم‌ترین آنها تطابق دامنه و فاز سیگنال‌های متناظر در بخش‌های مختلف این سیستم است. در این نوشتار به بررسی کمّی عملکرد یک سیستم پیش‌خور برای خطی‌سازی تقویت‌کننده سیگنال CDMA، با فرض عدم تطابق دامنه و فاز سیگنال‌های متناظر یا به‌عبارت دیگر یکسان نبودن میزان تضعیف و تأخیر در مسیرهای متناظر سیستم خواهیم پرداخت. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که عدم تطابق دامنه و فاز ناشی از خطای احتمالی در تحقق بخش‌های مختلف سیستم، ممکن است تأثیر بسیار نامطلوبی در عملکرد سیستم داشته باشد و کارایی آن را مختل سازد.

مقدمه

در مخابرات امروز دنیا به‌شدت بر خطی‌بودن تقویت‌کننده‌های قدرت خروجی فرستنده‌های رادیویی و مایکروویو تأکید می‌شود. گسترش روزافزون استفاده از روش‌های مدولاسیون خطی مانند مدولاسیون دامنه‌ی تربیعی (QAM)[۱] و مدولاسیون فاز تربیعی (QPSK)[۲]، و نیز بهره‌گیری از روش‌های بهینه‌سازی استفاده از ظرفیت سیستم‌ها نظیر دسترسی چندگانه در حوزه‌ی زمان (TDMA)[۳] و دسترسی چندگانه با تخصیص کد (CDMA)[۴] که نیازمند بهره‌گیری از تقویت‌کننده‌های خطی در محدوده‌ی قابل قبولی از تغییرات توان ورودی هستند[۱]، دلایل چنین تأکیدی است.[۲]

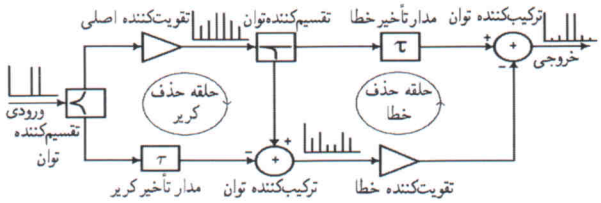
به‌طور مثال در یک سیستم CDMA که در آن برای استفاده‌ی بهینه از پهنای باند موجود، چندین کاربر با کدهای اختصاصی به‌طور همزمان از یک کانال فرکانسی بهره می‌برند، نسبت بیشینه به میانگین[۵] (PAR) سیگنال ورودی تقویت‌کننده‌ی قدرت زیاد است. لذا برای جلوگیری از تولید مؤلفه‌های انترمدولاسیون در خروجی که منجر به پهن‌شدگی طیف سیگنال، بروز تداخل و افزایش نرخ خطای بیت(BER)[۶] می‌شود خطی‌بودن تقویت‌کننده ضرورت بسیار دارد. برای خطی کردن تقویت‌کننده باید از تقویت‌کننده‌یی با قابلیت توان‌دهی بسیار بالاتر از توان مورد نظر استفاده کرد یا به‌طریقی رفتار تقویت‌کننده با قابلیت توان‌دهی معقول را خطی کرد. با توجه به ملاحظات مختلف یکی از بهترین انتخاب‌ها، خصوصاً برای سیستم‌های CDMA، بهره‌گیری از روش پیش‌خور است.

اگر چه روش پیش‌خور بهترین عملکرد را برای خطی‌سازی تقویت‌کننده‌ها دارد، ولی حساسیت به تغییرات شرایط کار و مشخصات عناصر مدار، پایداری مشخصات مطلوب سیستم را مختل می‌کند و در بسیاری موارد تعبیه‌ی تجهیزات جانبی برای بهینه‌سازی خودکار سیستم را ضروری می‌سازد.[۳و۴]

عدم تطابق دامنه و فاز و تأخیر مهم‌ترین عوامل محدودکننده‌ی میزان خطی‌سازی سیستم پیش‌خور هستند؛ و خطای پارامترهای مذکور تعیین کننده‌ی میزان اختلاف عملکرد سیستم با یک سیستم ایده‌آل است.[۵] ما در این نوشتار به بررسی کمّی عوامل مذکور در یک سیستم نمونه می‌پردازیم. لازم به‌ذکر است که تضعیف ناخواسته‌ی کوپلرها و مدارهای تأخیر موجب کاهش بازده سیستم نیز می‌شود.[۶]

چگونگی عملکرد سیستم پیش‌خور

درشکل ۱ نمودار ساده‌ی سیستم پیش‌خور برای خطی‌سازی یک تقویت‌کننده‌ی غیرخطی نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود سیگنال ورودی سیستم به دو بخش تقسیم می‌شود. یک بخش آن به ورودی تقویت‌کننده‌ی اصلی اعمال می‌شود و بخش دیگر آن پس از اعمال تأخیر، و احتمالاً تضعیف لازم به سمت ترکیب‌کننده‌ی خروجی حلقه‌ی اول هدایت می‌شود. بخشی از سیگنال خروجی تقویت‌کننده‌ی اصلی نیز به ترکیب‌کننده‌ی خروجی حلقه‌ی اول اعمال می‌شود تا با نمونه‌ی تأخیر داده شده‌ی سیگنال ورودی سیستم ترکیب شود.



شکل ۱. نمودار ساده‌ی سیستم پیش‌خور برای خطی‌سازی تقویت‌کننده‌ی غیرخطی.

سیگنال ورودی سیستم شامل دو یا چند مؤلفه در محدوده‌ی فرکانس کار مورد نظر است. سیگنال خروجی تقویت‌کننده‌ی اصلی نیز مؤلفه‌های تقویت‌شده‌ی ورودی و مؤلفه‌های انترمدولاسیون ناشی از غیرخطی‌بودن تقویت‌کننده را شامل می‌شود. در ادامه ما از کلمه‌ی «کریر» به‌جای مجموعه مؤلفه‌های مشابه سیگنال بدون اعوجاج ورودی و از «IM» به‌جای مؤلفه‌های انترمدولاسیون استفاده خواهیم کرد.

در حالت ایده‌آل که میزان تأخیر و تضعیف در دو مسیری که دو بخش سیگنال ورودی سیستم تا ورودی ترکیب‌کننده‌ی حلقه اول طی می‌کنند چنان است که دو سیگنال ورودی ترکیب‌کننده هم‌دامنه ولی در فاز متقابل‌اند. بخش مشترک دو سیگنال (یعنی کریر) حذف شده و بخش غیرمشترک آنها (یعنی IM) باقی می‌ماند.

سیگنال IM خروجی ترکیب‌کننده‌ی مذکور توسط تقویت‌کننده‌ی خطا تقویت شده و بخشی از آن در خروجی حلقه‌ی دوم با سیگنال تأخیر داده شده‌ی خروجی تقویت‌کننده‌ی اصلی ترکیب می‌شود تا این بار بخش IM موجود در سیگنال خروجی تقویت‌کننده‌ی اصلی حذف شود و سیگنالی بدون اعوجاج در خروجی سیستم داشته باشیم.

بدیهی است که تطابق دامنه و فاز سیگنال‌های وردی ترکیب‌کننده‌ی دوم نیز بسیار حائز اهمیت است و حذف IM، در صورتی که دو سیگنال ورودی ترکیب‌کننده هم‌دامنه و در فاز متقابل باشند، به‌خوبی انجام می‌پذیرد.

عدم تطابق دامنه و فاز

پیش‌تر گفته شد که میزان تطبیق دامنه و فاز اجزای متناظر در هر یک از دو حلقه‌ی سیستم پیش‌خور تأثیر به‌سزایی در میزان حذف مؤلفه‌های انترمدولاسیون (IMR) در خروجی سیستم دارد. لذا تحقق‌پذیری مشخصات تعیین شده برای اجزای سیستم پیش‌خور بسیار حائز اهمیت است. ما در این نوشتار نتایج بررسی‌های کمّی به‌عمل آمده درمورد میزان تأثیر خطای مشخصات اجزای سیستم پیش‌خور در کیفیت عملکرد سیستم را ارائه خواهیم کرد. اثرات تضعیف پیش‌بینی نشده‌ی کوپلرها و مدارهای تأخیر، و نیز خطای فاز مدارهای تأخیر از مواردی هستند که مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

تحقق کوپلرهای موردنظر با ضریب کوپلینگ و تضعیف عبوری مشخص ممکن است با خطا همراه باشد؛ همچنین ممکن است میزان تضعیف آنها بیش از مقدار پیش‌بینی شده و میزان کوپلینگ آنها نیز کم‌تر یا بیشتر از میزان پیش‌بینی شده باشد. هریک از موارد مذکور می‌تواند تطابق دامنه‌ی پیش‌بینی شده بین اجزای متناظر سیستم پیش‌خور را برهم بزند و میزان IMR سیستم را کاهش می‌دهد.

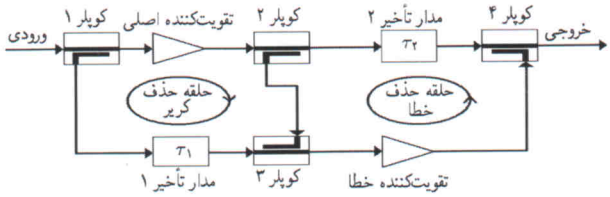
تضعیف پیش‌بینی نشده‌ی کوپلرها موجب می‌شود که تطابق دامنه‌ی سیگنال‌ها در دو مسیر منتهی به خروجی در هر یک از حلقه‌ها از بین برود. عدم تطابق دامنه‌ی سیگنال‌های ورودی به ترکیب‌کننده‌ی حلقه اول موجب می‌شود که حذف کریر به‌خوبی صورت نگیرد. عدم تطابق دامنه‌ی سیگنال‌های ورودی به ترکیب‌کننده‌ی حلقه دوم نیز موجب می‌شود که حذف مؤلفه‌های انترمدولاسیون به‌خوبی صورت نگیرد.

عدم حذف کریر در خروجی حلقه‌ی اول مستقیماً بر حذف IM در خروجی سیستم تأثیر ندارد ولی اولاً موجب بالا رفتن سطح سیگنال در ورودی تقویت‌کننده‌ی خطا می‌شود، که این امر به‌نوبه‌ی خود به تولید مؤلفه‌های انترمدولاسیون در خروجی تقویت‌کننده‌ی خطا می‌انجامد که قابل حذف نیستند و در خروجی سیستم ظاهر خواهند شد؛ ثانیاً موجب کاهش توان خروجی سیستم می‌شود که خود ناشی از وجود کریر در خروجی تقویت‌کننده‌ی خطا و کم‌شدن آن از خروجی تقویت‌کننده‌ی اصلی است. البته ممکن است که این کاهش توان محسوس نباشد.

تحقق مدارهای تأخیر با تأخیر پیش‌بینی شده و بدون تضعیف نیز امر دشواری است و امکان خطای فاز و خطای دامنه وجود دارد که بروز هریک از خطاهای مذکور می‌تواند بر میزان IMR در خروجی سیستم تأثیرگذار باشد. عدم تطابق فاز نیز مانند عدم تطابق دامنه در خروجی حلقه‌ی اول به عدم حذف کریر، و در خروجی حلقه‌ی دوم به عدم حذف IM می‌انجامد.

بررسی کمّی مسئله

در اکثر نوشتارهای موجود اهمیت تطابق دامنه و فاز اجزای مختلف سیستم به‌صورت کیفی مورد توجه قرارگرفته است. در بعضی نوشتارها نیز برای یک مورد خاص مقادیری ذکر شده و بررسی‌هایی صورت گرفته یا راه‌حلی ارائه شده است. لذا در این نوشتار برای بررسی کمّی جامع‌تر درخصوص موارد مذکور، یک سیستم پیش‌خور مطابق شکل ۲ در نظر گرفته شده که مشخصات اجزای آن در جدول ۱ ارائه شده است. برای ارزیابی سیستم از نرم‌افزار ADS [۷] استفاده شده است. ارزیابی سیستم ابتدا در شرایط ایده‌آل که در آن میزان تضعیف کوپلرها و تضعیف‌وتأخیر مدارهای تأخیر مطابق مقادیر مورد نظر تحقق یافته‌اند، صورت گرفته است. نتایج این ارزیابی نشان می‌دهد که IMR در حدود



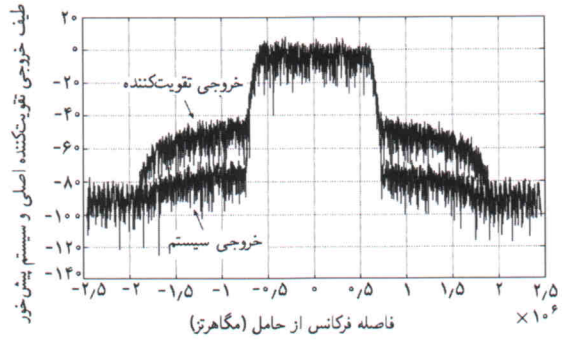
شکل ۲. سیستم پیش‌خور نمونه‌ی مورد بررسی.

۲۷dB است. شکل ۳ طیف سیگنال خروجی سیستم پیش‌خور را در مقایسه با طیف سیگنال خروجی تقویت‌کننده اصلی نشان می‌دهد. در این شکل کاهش مؤلفه‌های انترمدولاسیون به وضوح مشاهده می‌شود.

سپس سیستم برای مقادیر مختلف خطای تضعیف کوپلرها و همچنین خطای تضعیف و تأخیر مدارهای تأخیر مورد بررسی قرار گرفته، که نتایج حاصل از آن در جدول‌های ۲ تا ۵ ارائه شده‌اند. در بررسی تأثیر میزان تضعیف پیش‌بینی نشده‌ی کوپلرها، تضعیف ناخواسته‌ی هر یک از کوپلرها از صفر تا ۰٫۵dB در پله‌های ۰٫۱dB افزایش یافته و میزان توان خروجی و IMR سیستم محاسبه شده‌اند. چنان‌که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، توان خروجی سیستم متناسب با افزایش میزان تضعیف کاهش می‌یابد که کاملاً قابل پیش‌بینی است. ولی شیب تغییرات میزان IMR با تغییر تضعیف کوپلرها خیلی زیاد است که نشان می‌دهد تضعیف ناخواسته‌ی کوپلرها می‌تواند تأثیر بسیار نامطلوبی بر کیفیت عملکرد سیستم پیش‌خور داشته باشد. شکل ۴ طیف سیگنال خروجی سیستم پیش‌خور را با فرض ۰٫۵dB تلف برای هر یک از کوپلرها در مقایسه با طیف سیگنال خروجی تقویت‌کننده اصلی نشان می‌دهد.

در بررسی تأثیر تضعیف ناخواسته‌ی مدارهای تأخیر بر عملکرد سیستم نیز میزان تضعیف ناخواسته‌ی هر یک از مدارهای تأخیر از صفر تا ۰٫۵dB در پله‌های ۰٫۱dB افزایش یافته و میزان توان خروجی و IMR سیستم محاسبه شده‌اند.

چنان که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، با افزایش تضعیف مدارهای



شکل ۳. طیف سیگنال خروجی پیش‌خور با اجزای ایده‌آل، در مقایسه با طیف سیگنال خروجی تقویت کننده‌ی اصلی.

جدول ۱. مشخصات اجزای سیستم پیش‌خور شکل ۲.

تقویت‌کننده اصلی	G=۲۰ dB , P_{1dB}=۳۰ dBm , IP۳=۴۶ dBm
تقویت‌کننده خطا	G=۴۰ dB , P_{1dB}=۳۴ dBm , IP۳=۵۰ dBm
کوپلرهای ۱، ۳ و ۴	C=۱۰ dB , D=۲۰dB
کوپلر ۲	C=۲۰ dB , D=۲۰ dB
مدار تأخیر حلقه اول	T=۲۷۸ pSec , IL=۰
مدار تأخیر حلقه دوم	T=۸۳۳ pSec , IL=۰
منبع سیگنال ورودی	یکی از منابع استاندارد تعریف شده در کتابخانه برنامه ADS با پارامترهای مشخص و غیرقابل تغییر تحت نام Source_IS۹۵RevLink_linlib_ که توان آن ۷dBm تنظیم شده است.

جدول ۲. تغییرات IMR برحسب تغییرات تضعیف ناخواسته (پیش‌بینی نشده) کوپلرها.

تضعیف ناخواسته هر کوپلر (dB)	توان خروجی (dBm)	IMR (db)
۰	۲۶٫۰	۲۷٫۱
۰٫۱	۲۵٫۷	۲۳٫۴
۰٫۲	۲۵٫۴	۲۰٫۸
۰٫۳	۲۵٫۱	۱۸٫۷
۰٫۴	۲۴٫۸	۱۷٫۰
۰٫۵	۲۴٫۵	۱۵٫۵

جدول ۳. تغییرات IMR برحسب تغییرات تضعیف ناخواسته (پیش‌بینی نشده) مدارهای تأخیر.

تضعیف ناخواسته هر مدار تأخیر (dB)	توان خروجی	IMR(dB)
۰	۲۶٫۰	۲۷٫۱
۰٫۱	۲۵٫۸	۲۴٫۹
۰٫۲	۲۵٫۶	۲۳٫۱
۰٫۳	۲۵٫۴	۲۱٫۶
۰٫۴	۲۵٫۲	۲۰٫۲
۰٫۵	۲۵٫۰	۱۹٫۰

تأخیر میزان توان خروجی سیستم مطابق پیش‌بینی، متناسب با افزایش تضعیف کاهش می‌یابد. ولی در این مورد نیز شیب تغییرات میزان IMR با تغییر تضعیف مدارهای تأخیر زیاد است و نشانگر تأثیر شدید میزان تضعیف مدارهای تأخیر بر عملکرد سیستم است. شکل ۵ طیف سیگنال خروجی سیستم پیش‌خور با فرض ۰٫۵dB تلف برای هر یک از مدارهای تأخیر را در مقایسه با طیف سیگنال خروجی تقویت‌کننده اصلی نشان می‌دهد.

در بررسی تأثیر خطای میزان تأخیر مدارهای تأخیر، خطای تحقق مدار تأخیر حلقه‌ی اول (حلقه‌ی حذف کریر) و خطای تحقق مدار تأخیر حلقه‌ی دوم (حلقه‌ی حذف خطا) جداگانه بررسی شده است.

در مرحله‌ی اول خطای میزان تأخیر مدار تأخیر حلقه‌ی اول، یا

جدول ۴. تغییرات IMR برحسب تغییرات خطای تطبیق فاز در حلقه‌ی اول.

خطای فاز (درصد)	توان خروجی (dBm)	PAR (dB)	IMR (dB)
۰	۲۶٫۰	۱۳٫۸	۲۷٫۱
±۱	۲۶٫۰	۱۱٫۴	۲۷٫۱
±۲	۲۶٫۰	۸٫۶	۲۷٫۱
±۳	۲۶٫۰	۷٫۶	۲۷٫۱
±۱۰	۲۶٫۰	۵٫۷	۲۷٫۱
-۲۰	۲۶٫۰	۵٫۶	۱۸٫۰
+۲۰	۲۶٫۰	۵٫۶	۱۶٫۹
-۳۰	۲۶٫۰	۵٫۶	۸٫۳
+۳۰	۲۶٫۰	۵٫۶	۷٫۸

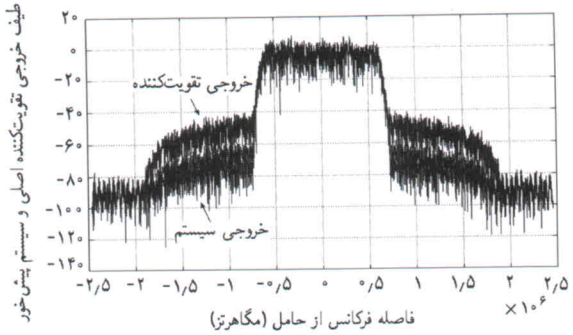
جدول ۵. تغییرات IMR برحسب تغییرات خطای تطبیق فاز در حلقه دوم.

خطای فاز (درصد)	توان خروجی (dBm)	(IMR)(dB)
۰	۲۶٫۰	۲۷٫۱
-۱	۲۶٫۰	۲۴٫۵
+۱	۲۶٫۰	۲۳٫۴
-۲	۲۶٫۰	۲۰٫۳
+۲	۲۶٫۰	۱۹٫۴
-۳	۲۶٫۰	۱۷٫۲
+۳	۲۶٫۰	۱۶٫۱
-۴	۲۶٫۰	۱۴٫۶
+۴	۲۶٫۰	۱۳٫۸
-۵	۲۶٫۰	۱۲٫۶
+۵	۲۶٫۰	۱۱٫۹
-۱۰	۲۶٫۰	۷٫۰
+۱۰	۲۶٫۰	۶٫۰

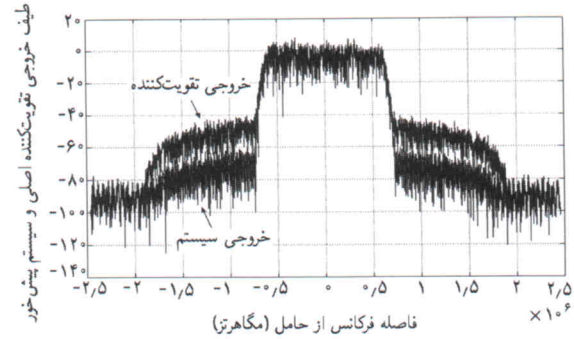
به‌عبارتی میزان خطای تطبیق فاز حلقه‌ی اول از صفر تا ۱۰ درصد تغییر داده شده، و میزان توان خروجی و IMR سیستم و نسبت بیشینه به متوسطِ سیگنال ورودی تقویت‌کننده خطا محاسبه شده‌اند.

همان‌گونه که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، حتی با ۱۰ درصد خطای تطبیق فاز توان خروجی و IMR تغییر محسوسی نمی‌کنند. ولی PAR به‌شدت کاهش می‌یابد که مؤید عدم حذف کریر در خروجی حلقه‌ی اول است.

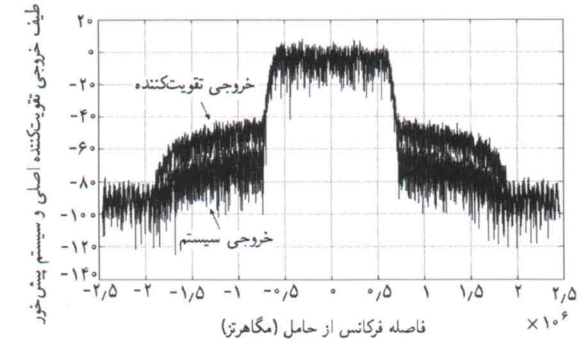
با افزایش میزان خطای تطبیق فاز حلقه اول به ۲۰ و ۳۰ درصد، توان خروجی همچنان ثابت می‌ماند ولی IMR به‌شدت کاهش می‌یابد. البته شاید خطای ۲۰ یا ۳۰ درصدی اغراق‌آمیز به‌نظر برسد؛ ولی نتایج مؤید آن است که کم‌دقتی در تحقق مدارهای تأخیر حلقه اول هم به کاهش شدید IMR می‌انجامد. شکل ۶ طیف سیگنال خروجی سیستم پیش‌خور با فرض ۲۰ درصد خطای فاز برای مدار تأخیر حلقه‌ی اول را در مقایسه با طیف سیگنال خروجی تقویت‌کننده اصلی نشان می‌دهد. در



شکل ۴. طیف سیگنال خروجی سیستم پیش‌خور با فرش ۰٫۵dB تلف برای هر کوپلر، در مقایسه با طیف سیگنال خروجی تقویت‌کننده‌ی اصلی.



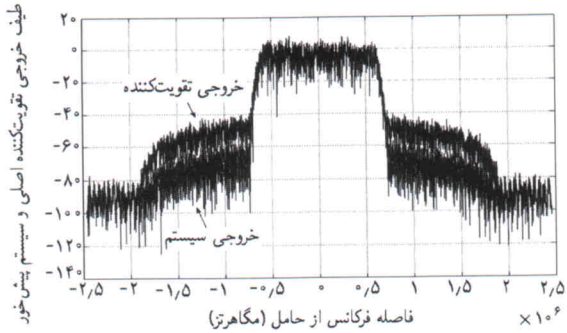
شکل ۵. طیف سیگنال خروجی سیستم پیش‌خور با فرض ۰٫۵dB تلف برای هر مدار تأخیر، در مقایسه با طیف سیگنال خروجی تقویت‌کننده‌ی اصلی.



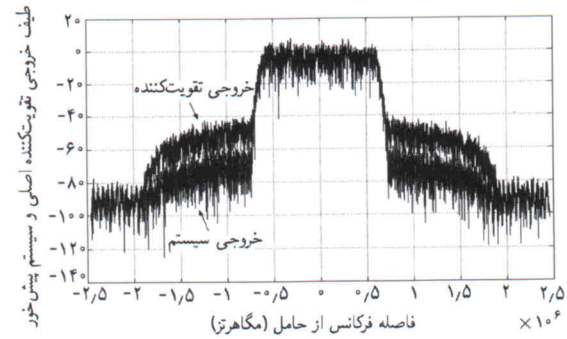
شکل ۶. طیف سیگنال خروجی سیستم پیش‌خور با فرض ۲۰ درصد خطای فاز برای مدار تأخیر حلقه‌ی اول در مقایسه با طیف سیگنال خروجی تقویت‌کننده‌ی اصلی.

مرحله‌ی دوم میزان خطای تطبیق فاز حلقه‌ی دوم از صفر تا ۱۰ درصد تغییر یافته و میزان توان خروجی و IMR سیستم نیز محاسبه شده‌اند.

همان‌گونه که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، براثر افزایش خطای تطبیق فاز حلقه‌ی دوم، IMR به‌شدت کاهش می‌یابد و حتی با ۳ درصد خطا، IMR در حدود ۱۰ dB افت می‌کند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که خطای تطبیق فاز در حلقه‌ی دوم بسیار بیش‌تر از حلقه‌ی



شکل ۷. طیف سیگنال خروجی سیستم پیش‌خور با فرض ۳ درصد خطای فاز برای مدار تأخیر حلقه‌ی دوم در مقایسه با طیف سیگنال خروجی تقویت‌کننده اصلی.



شکل ۸. طیف سیگنال خروجی سیستم پیش‌خور با فرض تحقق مدارهای تأخیر با خطوط مایکرواستریپ در مقایسه با طیف سیگنال خروجی تقویت کننده اصلی.

اول اهمیت دارد و با خطاهای ناچیز نیز افت عملکرد سیستم پیش‌خور قابل توجه است. در شکل ۷ طیف سیگنال خروجی سیستم پیش‌خور با فرض ۳ درصد خطای فاز برای مدار تأخیر حلقه‌ی دوم را در مقایسه با طیف سیگنال خروجی تقویت‌کننده اصلی ارائه شده است.

محققان خطای مدارهای تأخیر را به‌صورت حاصل‌ضرب پهنای باند در تأخیر مورد بررسی قرار داده، و به‌نتایج مشابهی دالّ بر اهمیت بیش‌تر مدار تأخیر حلقه‌ی دوم دست یافته‌اند.[۴] همچنین روشی برای جبران خطای فاز مدارهای تأخیر در کناره‌های باند فرکانسی سیستم ارائه شده[۵] که در آن جبران ۲ درصد خطای فاز مدارهای تأخیر منجر به بهبود IMR به میزان ۶dB می‌شود. اگرچه بین اثر دو مدار تأخیر تفکیکی صورت نگرفته، ولی به‌خوبی با نتایج ارائه شده در این نوشتار همخوانی دارد.

مثالی از تحقق‌اجزای سیستم

به‌منظور بررسی عملکرد سیستم پیش‌خور با اجزای تحقق‌یافته، کوپلرها و مدارهای تأخیر با استفاده از نرم‌افزار ADS به‌صورت عناصر مایکرواستریپ تحقق یافتند و جایگزین اجزای بلوکی سیستم شدند. شکل ۸ نتیجه‌ی یکی از حالات مورد بررسی را که در آن مدارهای تأخیر جایگزین خطوط مایکرواستریپ شده‌اند نشان می‌دهد. در این حالت میزان حذف انترمدولاسیون (IMR) برابر ۲۴٫۹dB و توان خروجی برابر ۲۵٫۹dBm به‌دست آمده است که نشانگر وجود حدود ۰٫۱dB تضعیف در هر یک از مدارهای تأخیر است.

نتیجه‌گیری

در این نوشتار سیستم خطی‌سازی و حذف مؤلفه‌های انترمدولاسیون به روش پیش‌خور معرفی شد و تأثیر خطای دامنه و فاز در هر یک از حلقه‌های اول و دوم سیستم بر میزان حذف انترمدولاسیون به‌صورت کمّی مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج شبیه‌سازی‌های با نرم‌افزار ADS که ویژه‌ی شبیه‌سازی مدارها و سیستم‌های مایکروویو است، نشان می‌دهد که تضعیف در کوپلرها و مدارهای تأخیر تأثیر کمی بر توان خروجی دارد، اما در کاهش میزان IMR بسیار مؤثر است. همچنین تأثیر خطای فاز در مدارهای تأخیر بر توان خروجی کم، ولی بر IMR و PAR قابل توجه است. ضمناً تأثیر خطای فاز در حلقه‌ی دوم بسیار بیش‌تر از حلقه‌ی اول است. نتایج بررسی سیستم با اجزای تحقق‌یافته نیز مؤید لزوم بررسی کمّی انجام شده است. اثرات خطای توأمان دامنه و فاز بر IMR و توان خروجی از مواردی است که در مقالات بعدی می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد.

پانوشت

1. quadrature amplitude modulation
2. quadrature phase shift keying
3. time division multiple access
4. code division multiple access
5. peak to average ratio
6. bit error rate
7. advanced design system

منابع

1. Eid, E. E. and Ghannouchi, F.M. "Adaptive nulling loop control for 1.7-GHz feedforward

linearization system", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques,* **45**(1), (1997).

2. Coskun, A.H. and Demir, S. "A mathematical characterization and analysis of feedforward circuit for CDMA applications", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,* **51**(3), (2003).
3. Larose, C. L. and Ghannouchi, F.M. "Optimization of feedforward amplifier power efficiency on the basis of drive statistics", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques,* **51**(1), (2003).
4. Cavers, J. K. "Adaptation behavior of a feedforward amplifier linearizer", *IEEE Trans. Vehicular Technology,* **44**(1), (1995).
5. Gray Hau, Y.K. Postoyalko, V. and Richardson, J.R. "Design and characterization of a microwave feedforward amplifier with improved wideband distortion cancellation", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques,* **49**(1), (2001).
6. Parsons, K. J. and Kenington, P.B. "The efficiency of feedforward amplifier with delay loss", *IEEE Trans. Vehicular Technology,* **43**(2), (1994).
7. Advanced Design System software produced by Agilent EEsof EDA (http:// eesof.tm.agilent.com)