



طراحی حلقه های قفل فاز CMOS

از سطح مدار تا سطح معماری



تألیف :

دکتر بهزاد رضوی

(استاد دانشگاه کالیفرنیا UCLA)

مترجمان :

مصطفی یارقلی

(دانشیار گروه برق دانشگاه زنجان)

محمد محمدی

(دانشجوی کارشناسی ارشد گروه برق دانشگاه زنجان)

سرشناسه : بهزاد رضوی .
عنوان و نام پدیدآور : طراحی حلقه های قفل فاز CMOS: از سطح مدار تا سطح معماری
نویسنده : بهزاد رضوی - مترجمان مصطفی یارقلی، محمد محمدی

مشخصات نشر : زنجان: دانشگاه زنجان، انتشارات، ۱۴۰۰.
مشخصات ظاهری : ۹۳۰ص: مصور ، نمودار
شابک : ۹۷۸-۶۲۲-۶۹۳۳-۲۶-۱
وضعیت فهرست نویسی : فیپا
یادداشت :
موضوع :
موضوع :
موضوع :
شناسه افزوده :
شناسه افزوده :
شناسه افزوده :
شناسه افزوده :
رده بندی کنگره :
رده بندی دیویی :
شماره کتابشناسی ملی :
وضعیت رکورد : فیپا

دانشگاه زنجان

طراحی حلقه های قفل فاز CMOS

از سطح مدار تا سطح معماری

مترجمان :
دکتر مصطفی یارقلی - محمد محمدی
ویراستار ادبی : دکتر محمد ابراهیم پور نمین

سال چاپ : ۱۴۰۰
نوبت چاپ: اول
قیمت : تومان
ناشر: انتشارات دانشگاه زنجان

صفحه آرایی ، طراحی جلد و چاپ : ماهان
شابک : ۹۷۸-۶۲۲-۶۹۳۳-۲۶-۱

زنجان، کیلومتر ۵ جاده تبریز، دانشگاه زنجان، حوزه معاونت پژوهشی، واحد انتشارات.
تلفن: ۰۲۴-۳۳۰۵۲۶۴۱ فاکس: ۰۲۴-۳۲۲۸۳۰۷۷

حق چاپ برای ناشر محفوظ است.

فهرست مطالب

فصل ۸: بررسی طراحی حلقه های قفل فاز ۴۲۹

۸-۱ بررسی بیشتر توابع تبدیل حلقه قفل فاز ۴۲۹

۸-۱-۱ محدودیت های تقریب زمان پیوسته ۴۳۶

۸-۲ مشکلات آشکار ساز فاز فرکانس ۴۳۸

۸-۳ مشکلات پمپ بار ۴۳۹

۸-۳-۱ چرخش بالا و پایین ۴۳۹

۸-۳-۲ تبعیت ولتاژ و مدولاسیون کانال ۴۴۰

۸-۳-۳ عدم تطابق تصادفی ۴۴۴

۸-۳-۴ تزریق بار و نشت ساعت ۴۴۵

۸-۳-۵ دیگر اثرات غیر ایده‌آل پمپ بار ۴۴۷

۸-۴ پمپ‌های بار بهبود یافته ۴۴۹

۸-۵ حلقه های قفل فاز با تنظیم گسسته نوسان‌ساز کنترل شده با ولتاژ ۴۵۲

۸-۶ کاهش ریپل با فیلتر نمونه بردار ۴۵۴

۸-۷ نشتی فیلتر حلقه ۴۵۶

۸-۸ کاهش خازن فیلتر ۴۵۷

۸-۹ مصالحه بین پهنای باند و سطح مولفه ناخواسته ۴۵۹

۸-۱۰ نویز فاز در حلقه های قفل فاز ۴۶۱

۸-۱۰-۱ شکل دهی نویز فاز ورودی ۴۶۱

۸-۱۰-۲ شکل دهی نویز فاز نوسان ساز کنترل شده با ولتاژ ۴۶۵

۸-۱۰-۳ نویز پمپ بار ۴۷۱

۸-۱۰-۴ نویز فیلتر حلقه ۴۷۶

۸-۱۰-۵ نویز منبع ۴۷۸
فصل ۹: بررسی طراحی حلقه قفل فاز ۴۸۵
۹-۱ فرایند طراحی ۴۸۶
۹-۲ طراحی آشکارساز فاز/فرکانس ۴۸۸
۹-۳ طراحی پمپ بار ۴۸۸
۹-۳-۱ اولین طراحی پمپ بار ۴۸۸
۹-۳-۲ دومین طراحی پمپ بار ۴۹۵
۹-۳-۳ سومین طراحی پمپ بار ۴۹۶
۹-۳-۴ چهارمین طراحی پمپ بار ۴۹۷
۹-۳-۵ تداخل پمپ بار و آشکار ساز فاز / فرکانس ۴۹۸
۹-۴ شبیه سازی‌های رفتاری حلقه قفل فاز ۵۰۲
۹-۴-۱ ساده سازی حلقه ۵۰۲
۹-۴-۲ پویایی حلقه ۵۰۴
۹-۴-۳ اثر ریپل ۵۰۶
۹-۵ شبیه سازی تابع تبدیل حلقه قفل فاز ۵۰۸
۹-۵-۱ تقریب تک قطبی ۵۰۸
۹-۵-۲ استفاده از منبع مدولاسیون فرکانسی در ورودی ۵۰۹
۹-۵-۳ استفاده از مدولاسیون فازی تصادفی ۵۱۲
۹-۶ اثر نویز فاز نوسان‌ساز کنترل‌شده با ولتاژ ۵۱۵
۹-۶-۱ مدل نویز فاز نوسان‌ساز کنترل‌شده با ولتاژ ۵۱۵
۹-۶-۲ کاهش نویز فاز نوسان‌ساز کنترل‌شده با ولتاژ ۵۱۶

۹-۷ نویز فیلتر حلقه ۵۲۰

۹-۸ دو برابر سازی فرکانس مرجع ۵۲۱

۹-۸-۱ طراحی دو برابر کننده ۵۲۱

۹-۸-۲ مشکلات دو برابرسازی فرکانس ۵۲۲

۹-۸-۳ طراحی مجدد حلقه قفل فاز با مرجع دو برابر شده ۵۲۴

۹-۸-۴ شبیه‌سازی‌های حلقه قفل فاز ۵۲۵

۹-۹ طراحی تقسیم کننده پس خورد ۵۲۶

۹-۹-۱ انتخاب توپولوژی ۵۲۶

۹-۹-۲ طراحی مدار تقسیم کننده ۵۲۹

۹-۱۰ استفاده از آشکارسازهای قفل برای کالیبراسیون ۵۳۰

۹-۱۱ خلاصه طراحی ۵۳۵

فصل ۱۰: حلقه های قفل فاز دیجیتال ۵۴۱

۱۰-۱ مفاهیم پایه ۵۴۱

۱۰-۲ مبانی تبدیل آنالوگ به دیجیتال ۵۴۴

۱۰-۲-۱ کوانتیزه سازی ۵۴۴

۱۰-۲-۲ مبدل آنالوگ به دیجیتال نوری ۵۴۶

۱۰-۲-۳ درون یابی ۵۴۹

۱۰-۳ تبدیل زمان به دیجیتال ۵۵۱

۱۰-۳-۱ توپولوژی پایهٔ مبدل زمان به دیجیتال ۵۵۱

۱۰-۳-۲ اثر نویز کوانتیزه شونده ۵۵۷

۱۰-۳-۳ محدودهٔ پویایی مبدل زمان به دیجیتال ۵۵۹

۱۰-۳-۴ نواقص مبدل زمان به دیجیتال ۵۶۱
۱۰-۴ طراحی مبدل زمان به دیجیتال در سطح ترانزیستوری ۵۶۵
۱۰-۵ مبدل های زمان به ساعت بهبود یافته ۵۷۱
۱۰-۵-۱ مبدل زمان دیجیتال Vernier ۵۷۱
۱۰-۵-۲ مبدل های زمان به دیجیتال چند مسیره ۵۷۴
۱۰-۶ اتصال نوسان‌ساز و مبدل زمان به دیجیتال ۵۷۸
۱۰-۷ نوسان‌سازهای کنترلی دیجیتالی ۵۸۲
۱۰-۷-۱ مشکل فرکانس های گسسته ۵۸۳
۱۰-۷-۲ اصول تبدیل دیجیتال به آنالوگ ۵۸۶
۱۰-۷-۳ ساختار ماتریسی ۵۹۱
۱۰-۷-۴ مبدل های دیجیتال به آنالوگ درشت و ریز ۵۹۵
۱۰-۷-۵ توپولوژی‌های نوسان‌ساز کنترل‌شوندهٔ دیجیتالی ۵۹۶
۱۰-۸ پویایی حلقه ۶۰۸
۱۰-۸-۱ پیاده‌سازی فیلتر دیجیتال ۶۰۸
۱۰-۸-۲ تناظر بین حلقه‌های قفل فاز آنالوگ و دیجیتال ۶۱۱
فصل ۱۱: حلقه های قفل تأخیر ۶۹۱
۱۱-۱ ایدهٔ پایه‌ای ۶۱۹
۱۱-۲ پویایی حلقه ۶۲۳
۱۱-۳ انتخاب تعداد طبقات تأخیر ۶۲۶
۱۱-۴ اثرات غیرایده‌آل ۶۲۷
۱۱-۴-۱ غیر ایده‌آل های اتصال پمپ بار و آشکارساز فاز/فرکانس..... ۶۲۷

۱۱-۴-۲ نویز منبع ۶۲۸
۱۱-۴-۳ نویز فاز ۶۳۰
۱۱-۵ ایجاد فازهای چندگانه ۶۳۲
۱۱-۶ حلقه های قفل تأخیر ضرب فرکانسی ۶۳۷
۱۱-۶-۱ توپولوژی‌های پایه ۶۳۷
۱۱-۶-۲ معایب طراحی ۶۴۱
۱۱-۶-۳ استفاده از ضرب فرکانسی برای جستجوی قفل شدگی اشتباه ۶۴۴
۱۱-۷ حلقه‌های قفل فاز/ قفل تأخیر دوگانه ۶۴۴
۱۱-۸ درون‌یابی فاز ۶۴۸
۱۱-۹ طراحی آشکار ساز فاز سرعت بالا ۶۵۴
۱۱-۱۰ تصحیح چرخهٔ کار ۶۵۶
فصل ۱۲: ترکیب فرکانس رادیویی ۶۶۳
۱۲-۱ ملزومات ترکیب فرکانس رادیویی ۶۶۳
۱۲-۲ ترکیب کننده‌های N-صحیح ۶۶۷
۱۲-۳ ترکیب کننده‌های N کسری ۶۷۰
۱۲-۳-۱ لزوم تصادفی‌سازی آهنگ ۶۷۲
۱۲-۳-۲ شکل‌گیری نویز ۶۸۰
۱۲-۳-۳ مدل زمان گسسته ۶۸۶
۱۲-۳-۴ ترکیب کننده های کسری ΔΣ ۶۹۱
۱۲-۳-۵ مدولاتورهای ΔΣ مرتبه بالاتر ۶۹۵
۱۲-۴ اثرات غیر ایده حلقه های N کسری ۷۱۰

۱۲-۴-۱ غیر خطینگی پمپ بار ۷۱۲
۱۲-۴-۲ رفتار استقرار پمپ بار ۷۱۷
۱۲-۵ کاهش نویز کوانتیزه شده ۷۲۰
۱۲-۵-۱ پیش خورد مبدل آنالوگ به دیجیتال ۷۲۰
۱۲-۵-۲ از بین رفتن نویز توسط تبدیل دیجیتال به زمان ۷۲۵
۱۲-۵-۳ دوبرابر سازی فرکانس مرجع ۷۲۷
فصل ۱۳: مبانی بهبود داده و ساعت ۷۳۵
۱۳-۱ بررسی های کلی ۷۳۵
۱۳-۲ ویژگی های داده دودویی تصادفی ۷۳۹
۱۳-۲-۱ طیف داده غیر برگشتی به صفر ۷۴۰
۱۳-۳ بهبود ساعت با آشکارسازی لبه ۷۴۳
۱۳-۴ بهبود ساعت با قفل فاز ۷۴۹
۱۳-۴-۱ آشکار ساز فاز Bang-Bang ۷۵۰
۱۳-۴-۲ آشکار ساز فاز Alexander ۷۶۰
۱۳-۴-۳ آشکار ساز فاز Hogge ۷۴۴
۱۳-۵ مشکل دامنهٔ نوسانات داده ۷۸۰
فصل ۱۴: مبانی پیشرفته ساعت و بهبود داده ۷۸۵
۱۴-۱ آشکارسازهای فاز نیم رخ ۷۸۵
۱۴-۱-۱ آشکارسازهای فاز Bang-Bang نیم نرخ ۷۸۶
۱۴-۱-۲ آشکارسازهای خطی نیم نرخ ۷۹۰
۱۴-۲ معماری‌های بهبود داده و ساعت بدون نوسان ساز ۷۹۵

۱۴-۲-۱ مدارهای بهبود داده و ساعت بر پایه حلقه قفل تأخیر ۷۹۶
۱۴-۲-۲ مدارهای بهبود داده و ساعت براساس PI ۷۹۹
۱۴-۲-۳ مدارهای بهبود داده و ساعت دیجیتال ۸۰۲
۱۴-۳ ردگیری فرکانسی ۸۱۴
۱۴-۴ مشخصه های لرزش ۸۱۸
۱۴-۴-۱ شکل گیری لرزش ۸۱۸
۱۴-۴-۲ انتقال لرزش ۸۱۹
۱۴-۴-۳ خطای لرزش ۸۲۴
فصل ۱۵: تقسیم کننده‌های فرکانسی ۸۳۷
۱۵-۱ بررسی کلی ۸۳۷
۱۵-۲ روشهای طراحی لچ ۸۴۱
۱۵-۲-۱ لچهای ایستا ۸۴۱
۱۵-۲-۲ منطق‌های دینامیک ۸۴۹
۱۵-۳ طراحی مدار تقسیم بر ۲ ..... ۸۶۱
۱۵-۴ پیش سنجها با ضریب دوگانه ۸۶۶
۱۵-۵ طراحی تقسیم کننده برای ترکیب فرکانس رادیویی ۸۷۶
۱۵-۵-۱ تقسیم کننده جذب کننده پالس ۸۷۷
۱۵-۵-۲ تقسیم کننده Vaucher ۸۸۰
۱۵-۶ تقسیم کننده میلر ۸۸۵
۱۵-۷ تقسیم کننده های تزریق قفل شده ۸۸۸
۱۵-۸ تقسیم کننده های کسری ۸۹۳

۱۵-۹ تاخیر و نویز فاز تقسیم کننده ۸۹۸
واژه نامه ۹۰۵

۸

بررسی طراحی حلقه‌های قفل فاز

حلقه‌های قفل فاز پمپ بار که در فصل هفتم معرفی شد، در هنگامی‌که چندین چالش که از نواقص پدیدار می‌شود، باید بر اساس پارامترهای مشخصی طراحی شوند. همه بلوک‌های سازنده در حلقه، همانند ورودی، عملکرد سیستم را، با تغییر درجات، کاهش می‌دهند. این فصل، ابتدا به تابع تبدیل حلقه قفل فاز می‌پردازد، مشکلات آن را بیان می کند و در آخر روش‌های مداری را برای رفع آن‌ها ارائه می‌دهد. یکی از ویژگی‌های مهم تحلیل‌های ما این است که مشخص کنیم که کدام اثرات غیر ایده‌آل‌ها در یک عملکرد داده‌شده، جدی‌تر می‌شوند.

۸-۱ بررسی بیشتر توابع تبدیل حلقه قفل فاز

بررسی حلقه‌های ساده قفل فاز با پمپ بار، به توابع تبدیل حلقه-باز مختلف از نقاط مختلف به خروجی منتهی می‌شود. به‌طور خلاصه، فهمیدیم که (الف) تغییرات فاز ورودی، یک تابع تبدیل پایین‌گذر مرتبه دوم همراه با یک صفر دارد، (ب) نویز ولتاژها به‌صورت سری با بخش کنترلی یا منبع نوسان‌ساز کنترل‌شده با ولتاژ، یک پاسخ میان‌گذر دارد. در ادامه، در این بخش، توابع تبدیل حلقه قفل فاز را بررسی می‌کنیم. تابع تبدیل ورودی/ خروجی که توسط معادله ۷-۲۳ بیان شد، می‌تواند به‌صورت زیر بازنویسی شود:

$$H(S)=\frac{2\zeta\omega_n s+{\omega_n}^2}{S^2+2\zeta\omega_n s+{\omega_n}^2}. \quad (۱-۸)$$

صفر در $\omega_z= -\omega_n/(2\zeta)$ و قطب‌ها در

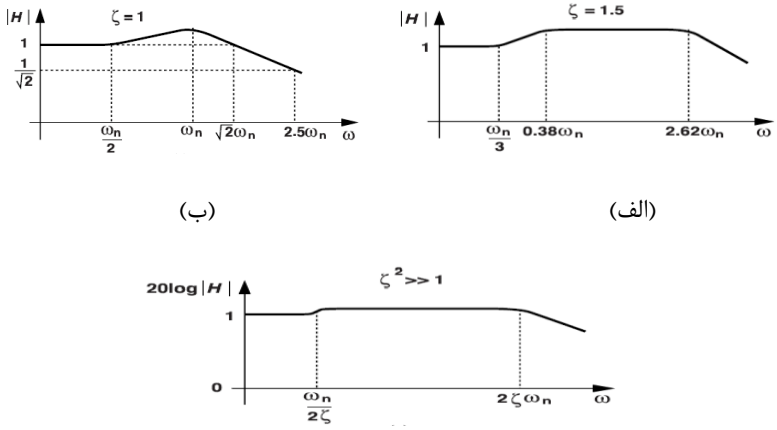
$$\omega_{p1,2}=(-\zeta+\sqrt{\zeta^2-1})\omega_n \quad (۲-۸)$$

قرار گرفته‌اند. برای $\zeta=1$، داریم: $\omega_z= -\omega_n/(2)$ و $\omega_{p1,2}= -\omega_n$. به عبارت دیگر، اگر $1 \ll \zeta^2$، در آن صورت $\sqrt{\zeta^2-1} = \zeta [1-1/(2\zeta^2)]= \zeta-1/(2\zeta)$ که حاصل می‌شود:

$$\omega_{p1} = \frac{-\omega_n}{2\zeta} = \frac{-1}{R_1C_1} \quad (۳-۸)$$

$$\omega_{p2}=-2\zeta\omega_n= \frac{-R_1I_pK_{VCO}}{2\pi}. \quad (۴-۸)$$

به ازای نسبت تقسیم پس‌خورد M، باید در این نتیجه K_{VCO} را با K_{VCO}/M جایگذاری کنیم. اکنون دو مورد را مشاهده می‌کنیم: ω_{p1} اکنون در نزدیکی ω_z است که تا حدودی اثر آن را از بین می‌برد. (۲)$\omega_{p1}\omega_{p2}/= \zeta^2 4>>1$، بیانگر این است که تابع تبدیل تقریباً معادل با یک سیستم تک‌قطبی با فرکانس گوشه برابر با $\omega_{p2}=-(R_1I_PK_{VCO})/(2\pi)$ است. شکل ۸-۱ اندازه H(S) را برای سه مقدار ζ رسم می‌کند. توجه داشته باشید که اگر برای بعضی از فرکانس‌های لرزش، $|H| > 1$، می‌گوییم که حلقه، افزایش پاسخ بسامدی را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، نویز فاز ورودی را تقویت می‌کند. ما مقدار افزایش پاسخ بسامدی را در فصل ۱۴ محاسبه می‌کنیم. تقریب تک‌قطبی برای محاسبهٔ پهنای باند مفید است، اما افزایش بسامد لرزش نیز همیشه مشهود است.



(ب) (الف)

(ج)

شکل ۸ پاسخ حلقه قفل فاز حلقه بسته برای مقادیر مختلف ζ

پهنای باند 3- dB پاسخ‌های قبلی نیز موردنظر هستند. برای مثال، در بعضی موارد، می خواهیم مشخص کنیم که نویز فاز خروجی تا چه اندازه توسط حلقه قفل فاز فیلتر می شود. با قرار دادن $|H(S=j\omega)|$ در معادله ۸-۱ برابر با $1/\sqrt{2}$، به دست می‌آوریم:

$$\omega_{-3dB}{}^2=[2\zeta^2+1+\sqrt{1+(2\zeta^2+1)^2}\,]\omega_n{}^2. \qquad (۵-۸)$$

که به دست می‌آید:

$$\omega_{-3dB}=2.5\omega_n \text{ به ازای } \zeta=1 \qquad (۶-۸)$$

$$\omega_{-3dB}=3.3\omega_n \text{ به ازای } \zeta=1.5 \qquad (۷-۸)$$

$$\omega_{-3dB}=2\zeta\omega_n \text{ به ازای } 1<<\zeta \qquad (۸-۸)$$

آخرین عبارت با تقریب تک‌قطبی نشان‌داده‌شده در شکل ۸-۱ (ج) مطابقت دارد. با بالاتر رفتن ζ از $1/\sqrt{2}$ به مقادیر بزرگ‌تر، ω_{-3dB} از $3\,\zeta\omega_n$ به $2\,\zeta\omega_n$ تغییر می‌کند. به عبارت

دیگر، زمان نشست به‌طور متناسب افزایش می‌یابد. علاوه بر پهنای باند حلقه بسته، به پهنای باند حلقه باز با بهره واحد، ω_u، نیز علاقه‌مند هستیم. از معادله ۷-۳۵ داریم:

$$\omega_u{}^2 = [2\zeta^2 + \sqrt{(4\zeta^4 + 1)}\,]\omega_n{}^2. \qquad (۵-۸)$$

که به دست می‌آید:

$$\omega_u = 2.1\omega_n \quad ،\zeta = 1 \text{ به ازای} \qquad (۶-۸)$$

$$\omega_u = 3\omega_n \quad ،\zeta = 1.5 \text{ به ازای} \qquad (۷-۸)$$

$$\omega_u = 2\,\zeta\omega_n \quad ،1 >> 4\zeta^4 \text{ به ازای} \qquad (۸-۸)$$

این نتایج با مثال ۷-۲۲ مطابقت دارد. مشاهده می‌کنیم که به ازایζ>=1، ω_{-3dB} و ω_u به هم خیلی نزدیک هستند. به همین دلیل، عبارت پهنای باند حلقه برای هر دو به کار می‌رود.

مثال ۸-۱

توضیح دهید که چرا برای مقادیر بزرگ ζ، ω_{-3dB} و ω_u مستقل از C_1 هستند.

راه‌حل

به یاد داریم که تابع تبدیل حلقه باز داده‌شده، توسط رابطه $[I_P/2\pi][R_1+1/(C_1S)][K_{VCO}/S]$ بیان می‌شود. برای فرکانس‌های خیلی پایین یا خیلی بالاتر از فرکانس صفر، این عبارت به ترتیب به $[I_P/2\pi][R_1][K_{VCO}/S]$ و $[I_P/2\pi][1/(C_1S)][K_{VCO}/S]$ کاهش می‌یابد (شکل ۸-۲). اگر ζ به اندازه کافی بزرگ باشد و ω_u با عبارت دوم مطابق باشد، می‌گوییم که C_1 در فرکانس ω_u به‌عنوان مدار اتصال کوتاه عمل می‌کند که نقش قابل‌توجهی در پهنای باند حلقه بازی نمی‌کند. همچنین مشاهده می‌کنیم که با "۱" قرار دادن عبارت $\omega_u = [I_P][R_1][K_{VCO}/S]$ حاصل می‌شود. به دلیل این‌که حذف صفر و قطب به ما $\omega_u = \omega_{-3dB} = 2\,\zeta\omega_n$ را نتیجه می‌دهد، پهنای باند حلقه بسته نیز مستقل از C_1 می‌شود.