

تکنیک اندازه گیری با دقت بالا برای مبدل های استرین گیج

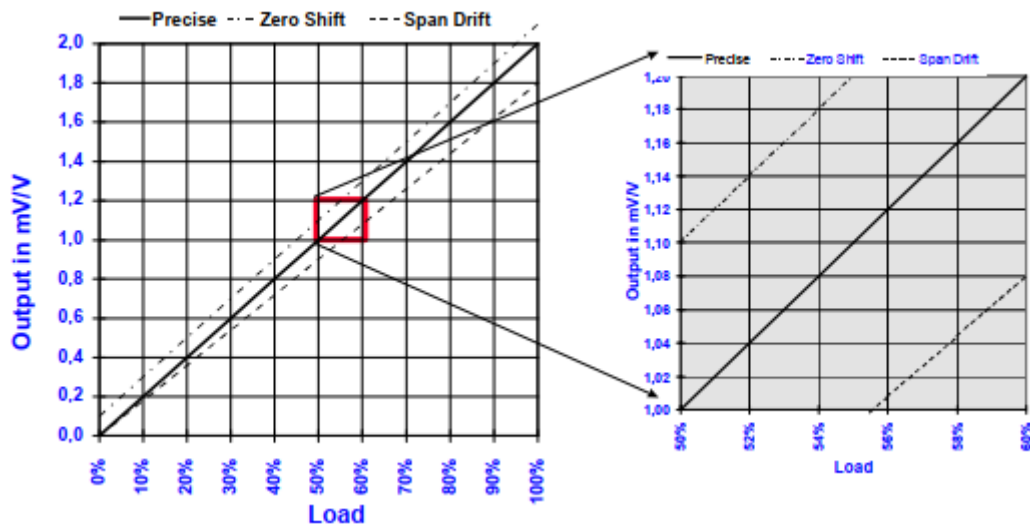
چکیده: سیگنال های مبدل های استرین گیج بسیار کوچک هستند. در نتیجه، سیگنال های خطا حتی می توانند از دامنه سیگنال اندازه گیری تجاوز کنند و بنابراین باید این سیگنال های مزاحم توسط مدارهای اندازه گیری پیچیده از بین بروند. این مقاله مشکلات و راه حل هایی را برای تفکیک پذیری و پایداری بالا، سرکوب و میرایی کارآمد سیگنال های خطا و سیگنال های دینامیکی ناخواسته را مورد بحث قرار می دهد.

همچنین محدودیت های فیزیکی برای رزولشن سیگنال های خروجی مبدل های استرین گیج بحث خواهد شد، و اینکه چگونه تکنیک فرکانس حامل می تواند برای رسیدن به حداکثر رزولشن قابل دستیابی به لحاظ نظری بسیار نزدیک شود، نیز توصیف داده خواهد شد.

پایداری بهره بسیار بالا را می توان با تقسیم کننده های القایی بسیار دقیق به عنوان منابع سیگنال مرجع و با چرخه های کالیبراسیون خودکار به دست آورد. تحقق این فلسفه برای واحدهای اندازه گیری استاتیکی با دقت بالا و برای سیستم های تقویت کننده باند پهن همه کاره نشان داده شده است.

1 – کاربرد ابزارهای با دقت بالا

کاربردهای زیادی وجود دارد که به ابزارهای اندازه گیری با دقت بالا نیاز دارند. بالاترین دقت توسط مؤسسه ملی استاندارد مانند NIST در ایالات متحده یا PTB در آلمان به ویژه در زمینه های اندازه گیری نیرو و سیستم های توزین درخواست شده است. تمامی سازندگان مبدل استرین گیج همچنین به ابزارهای اندازه گیری بسیار پایدار، دقیق و قابل اعتماد برای اهداف کالیبراسیون در خطوط تولید خود نیاز دارند.



شکل 1: تفکیک پذیری بالا مستلزم پایداری بالا است

اما همچنین مشتریان و کاربران معمولی به سیستم‌های اندازه‌گیری استرین گیج با دقت بالا به طور فزاینده‌ای علاقه مند هستند. یک دلیل ساده، جستجوی زنجیره‌های اندازه‌گیری است که در آن خطاها فقط به مبدل‌ها بستگی دارد و می‌توان از خطاهای ابزار چشم پوشی کرد. در این حالت، در صورت خرابی ابزار، بدون کالیبراسیون مجدد، می‌توان آن را با یک ابزار جدید جایگزین کرد.

2- تعریف دقت و تفکیک پذیری بالا

در ادامه، این مقاله به چگونگی طراحی ابزارها برای دستیابی به تفکیک پذیری و پایداری بالا می‌پردازد. محدودیت‌های فیزیکی برای دستیابی به تفکیک پذیری بالا را مورد بحث قرار می‌دهیم و نشان می‌دهیم که چقدر می‌توانیم با از بین بردن همه منابع سیگنال خطای مختلف، به آنها نزدیک شویم. البته بالاترین دقت را می‌توان در زمینه اندازه‌گیری سیگنال استاتیکی به دست آورد. اما اصل نشان داده شده را می‌توان برای تقویت کننده‌های پهن باند نیز اعمال کرد. بهترین ابزارهای اندازه‌گیری استاتیکی قادر به تفکیک و نمایش سیگنال مبدل استرین گیج با حساسیت 2mV/V با $2.000.000$ گام دیجیتال هستند. آنها مشخصات زیر را دارا می‌باشند:

کلاس دقت $0.0005\% = 5$ قسمت در میلیون

رزولوشن $2.000.000$ دیجیت

خطای خطی کوچکتر از 5 ppm (بخش در میلیون)

رانس نقطه صفر کوچکتر از 3 ppm در هر 10 درجه فارنهایت

خزش طولانی مدت کوچکتر از 5 ppm در سال

Houshmand Sanat Tav Electronic CO.,LTD.

وضوح 2.000.000 دیجیت برای سیگنال های آنالوگ بسیار کوچک 2mV/V واقعا قابل توجه است.

اگر یک مبدل، از کرنش سنج با طول شبکه 3 میلی متر استفاده کند، میزان بسط به وجود آمده در این کرنش سنج تحت بار اسمی، فقط 0.1% یا 3 میکرومتر است. $1/2000000$ رزولشن بار اسمی به این معنی است که گنج ها فقط تا 1.5pm (پیکو متر) تغییر طول می دهند. این تنها 1% از قطر کوچکترین (نه سبکترین) اتم (هلیوم) است. بنابراین ما در حال حاضر در محدوده زیر اتمی هستیم و بنابراین تعجب آور نیست که ولتاژهای نویز ناشی از حرکت وابسته به دما اتم ها و الکترون ها، افزایش بیشتر تفکیک پذیری سیگنال را محدود می کند.

3 – محدودیت های فیزیکی تفکیک پذیری

سطح نویز تولید شده را می توان با فرمول شناخته شده زیر محاسبه کرد:

$$V_{rms} = \sqrt{4k \cdot T \cdot R \cdot B}$$

که در آن:

V_{rms} : ولتاژ موثر نویز

K: ثابت بولتزمن و مقدار آن $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

T: دما بر حسب کلوین

R: مقاومت بر حسب اهم

B: پهنای باند بر حسب هرتز

ولتاژ نویز حرارتی تولید شده توسط مقاومت مبدل ها، حد فیزیکی مطلق برای تفکیک پذیری سیگنال است. ولتاژ نویز یک مبدل 350 اهمی برابر با $2.4\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ است. با تقویت کننده کم نویز عالی، کل نویز زنجیره اندازه گیری (تقویت کننده و سایر قطعات الکترونیک با هم) را می توان در کمتر از دو برابر ولتاژ نویز مبدل نگه داشت. بنابراین کل سطوح ولتاژ نویز قابل دستیابی کوچکتر از $5\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ است. با توجه به این واقعیت که ما علاقه ای به توان ولتاژ نویز نداریم، اما در بازه عدم قطعیت تولیدی اندازه گیری، ولتاژ پیک تا پیک را محاسبه می کنیم که با قوانین آماری مرتبط است. در حوزه فنی، محاسبه با انحراف معیار استاندارد $\sigma = 2$ رایج است. این منجر به $V_p = 2 * V_{rms}$ و $V_{pp} = 4 * V_{rms}$ می شود.

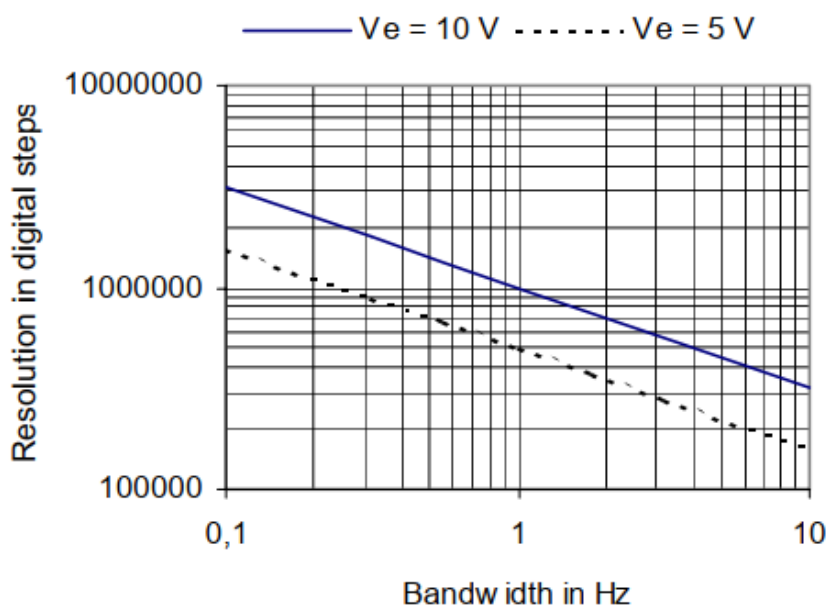
با تعریف $\sigma = 2$ ، سطوح ولتاژ لحظه ای، 95.4% در داخل مرزهای $\pm 2 \times V_{rms}$ باقی می ماند و از این مرزها، سطوح ولتاژ فقط در 2.3% از کل زمان اندازه گیری از این سطح بالاتر و در طول 2.3% از کل زمان اندازه گیری از این سطح پایین تر می ماند.

ولتاژ نویز پیک تا پیک برابر با $V_{pp} = 20nV/\sqrt{Hz}$ است.

اگر یک مبدل با ولتاژ 10 ولت تغذیه شود، ولتاژ خروجی آن در بار نامی 20 میلی ولت است. بنابراین اگر پهنای باند 1 هرتز باشد، نسبت ولتاژ اندازه گیری به نویز $\frac{20mV}{20nV} = 1.0$ است. شکل 2 حداکثر میزان تفکیک پذیری ممکن را برای ولتاژهای تحریک 5 ولت و 10 ولت به عنوان تابعی از پهنای باند نشان می دهد. برای دستیابی به 2.000.000 دیجت تفکیک پذیری، مبدل باید با 10 ولت تغذیه شود و پهنای باند باید به 0.25 هرتز کاهش یابد.

ولتاژهای نویز تنها سیگنال های مزاحم نیستند. اما آنها تنها سیگنال هایی هستند که نمی توانیم به طور کامل از شر آنها خلاص شویم. ما فقط می توانیم با کاهش پهنای باند سطح نویز را کاهش دهیم.

طبق فرمول فوق، ما همچنین می توانیم تا حد زیادی دمای T مبدل و تقویت کننده را به سمت نقطه صفر مطلق کاهش دهیم تا سطوح نویز را کاهش دهیم. اما این را نمی توان در محیط های اندازه گیری معمولی اعمال کرد. کاهش مقاومت مبدل R نیز کمکی نمی کند زیرا اگر توان تحریک ثابت فرض شود، ولتاژ تحریک باید به همان اندازه کاهش یابد و نسبت سیگنال به نویز تغییر نخواهد کرد.



شکل 2: ماکزیمم تفکیک پذیری برای سیگنال های $2mV/V$

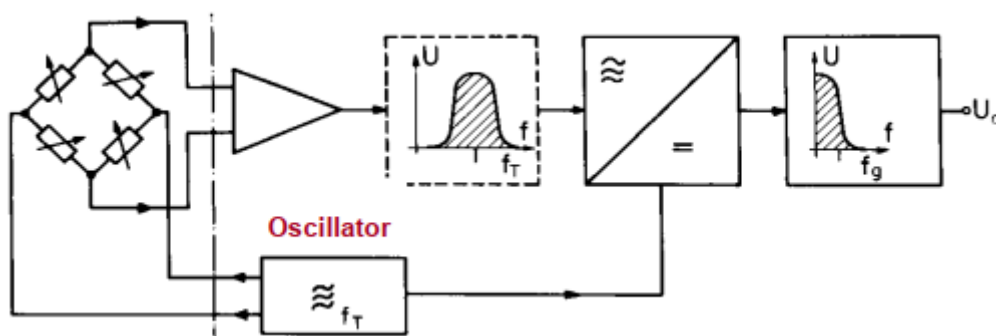
4 - تکنیک فرکانس حامل

سایر سیگنال های خطا عبارتند از ولتاژ ترموکوپل، رانش خروجی تقویت کننده، تداخل خطوط تغذیه و انواع تداخل الکترومغناطیسی فرکانس بالا (EMI).

یک ترموکوپل مس/کنسنتان $42.5 \mu V/K$ تولید می کند. اگر در طول چرخه اندازه گیری اختلاف دمای فقط 1 کلوین رخ دهد، این سیگنال خطا تقریباً 0.2% سیگنال اسمی مبدل، 20 میلی ولت است. بنابراین رزولشن قابل اعتماد از 2.000.000 دیجیت، تنها به 470 دیجیت کاهش می یابد.

رانش رایج تقویت کننده $1 \mu V/K$ ، در تغییر دمای محیط به اندازه 10 کلوین، وضوح را به 2000 دیجیت کاهش می دهد.

تکنیک فرکانس حامل یک تکنیک اثبات شده برای از بین بردن بسیاری از این خطاها است اما نه همه آنها. شکل 3 بلوک دیاگرام تقویت کننده فرکانس حامل را نشان می دهد. مبدل توسط یک ولتاژ متناوب تغذیه می شود و بنابراین مانند یک مدولاتور کار می کند.

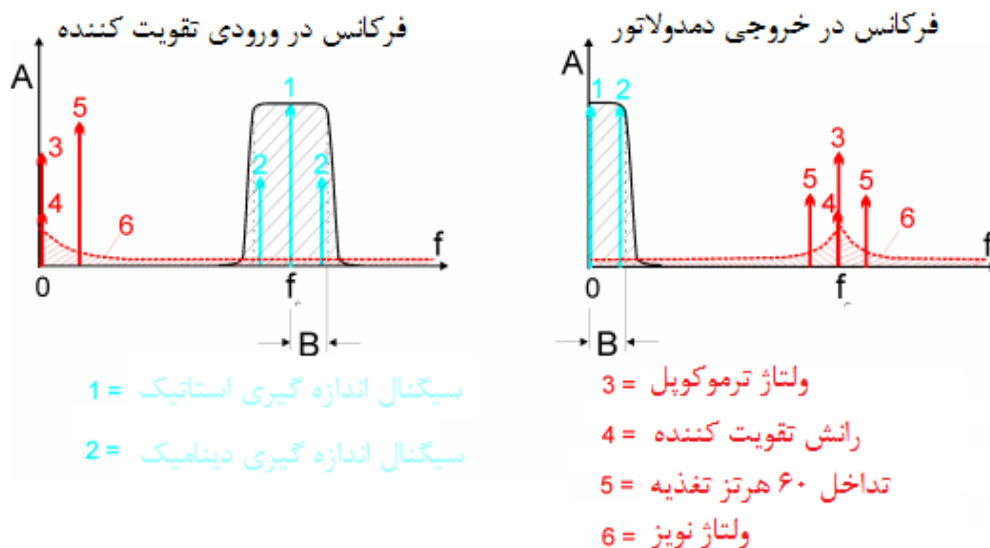


شکل 3: اصول تقویت کننده فرکانس حامل

اگر به عنوان مثال قرار باشد که یک سیگنال ارتعاش مکانیکی 60 هرتز اندازه گیری شود، و خط برق هم همزمان سیگنال خطای 60 هرتز را به عنوان نویز القا کند، هر دو سیگنال را می توان به راحتی با استفاده از تکنیک فرکانس حامل از هم جدا کرد. تداخل 60 هرتز توسط فیلتر باند گذر میرا می شود، و فرکانس حامل به راحتی از این فیلتر عبور کرده و وارد دمدولاتور می شود. در این قسمت و توسط فیلتر پایین گذر، سیگنال مکانیکی 60 هرتز از فرکانس حامل جدا می شود.

شکل 4 سیگنال ها را در ورودی تقویت کننده و در خروجی دمدولاتور نشان می دهد. یک سیگنال اندازه گیری استاتیک با دامنه (1) به همراه فرکانس حامل نشان داده شده است. سیگنال های اندازه گیری دینامیک (2) با پهنای باند B محدود شده اند و همچنین با فرکانس هایی در محدوده فرکانس حامل نشان داده شده اند. بسیاری از سیگنال های خطا،

فرکانس های نزدیک به صفر دارند. اینها ولتاژهای ترموکوپل (3)، رانش آفست تقویت کننده (4) و همچنین تداخل خط برق 60 هرتز (5) هستند. پس از دمودولاسیون سیگنال ها جای خود را



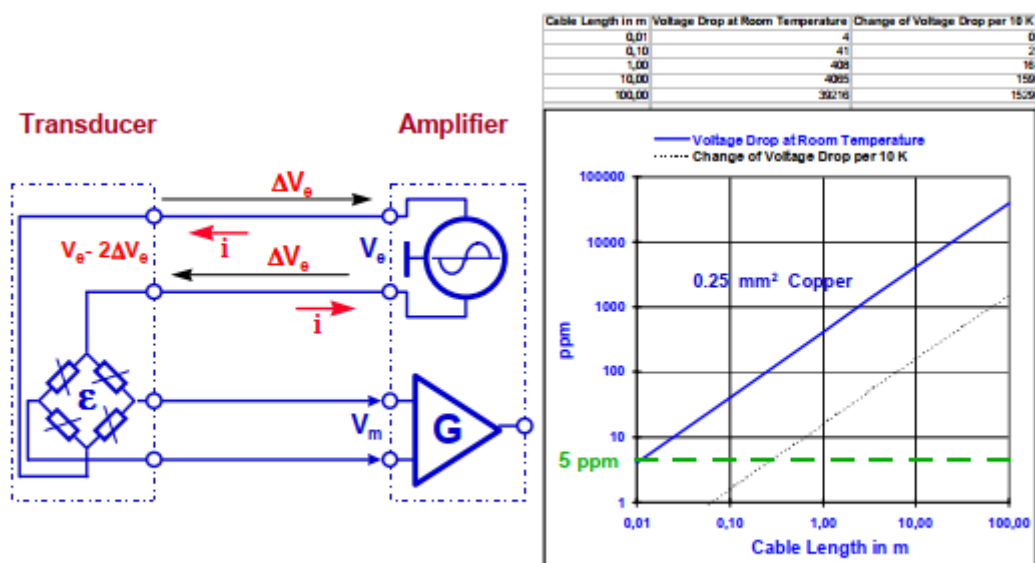
شکل 4: تبدیل فرکانس توسط تکنیک فرکانس حامل

تغییر می دهند. در واقع یک تبدیل فرکانس انجام شده و اکنون سیگنال اندازه گیری استاتیک (1) فرکانس صفر هرتز واقعی خود را دارد، در حالی که ولتاژهای ترموکوپل صفر هرتز (3) به فرکانس حامل f_c تبدیل می شوند. همچنین یک تبدیل فرکانس ولتاژهای نویز نیز وجود دارد (6). نویز آزاددهنده تر $1/f$ فرکانس پایین را می توان با تکنیک فرکانس حامل از بین برد در حالی که سطح پایین تر نویز سفید کاملاً با رنج سیگنال اندازه گیری مرتبط است.

5 - مدار 6 سیمه با چرخه کالیبراسیون خودکار

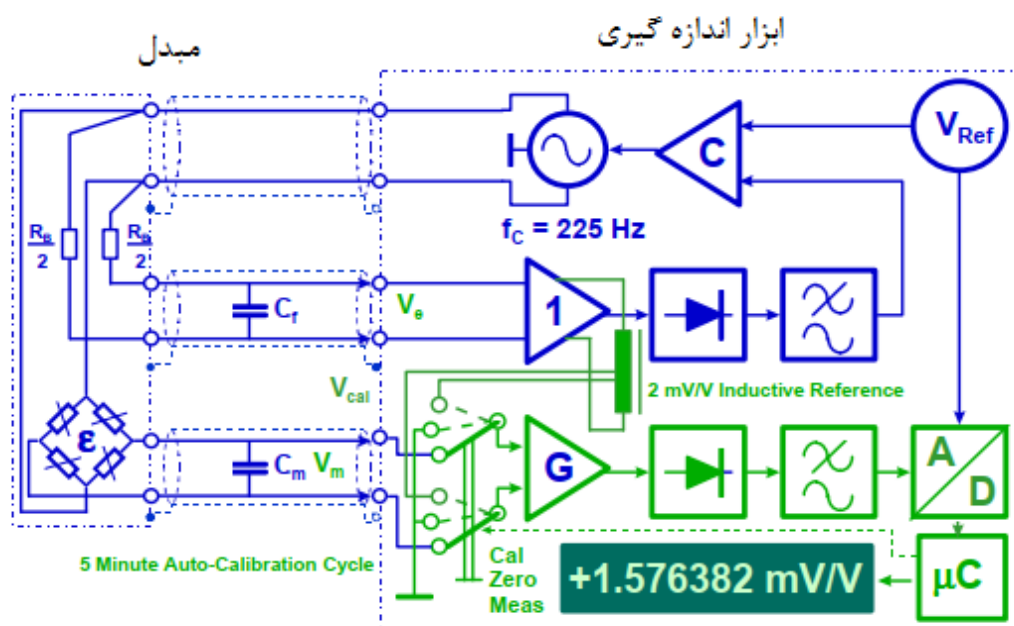
روش فرکانس حامل وسیله ای برای به دست آوردن وضوح بالا و سرکوب بسیاری از منابع خطا است. اما مشکلات دیگری هنوز باقی مانده است. مبدل و ابزار اندازه گیری تنها بخش های یک زنجیره اندازه گیری نیستند. همیشه یک کابل بین آنها وجود دارد. و این کابل می تواند خطاهای بزرگی در اندازه گیری ایجاد کند.

اگر یک کابل بین مبدل و ابزار اندازه گیری متصل شود، جریان تغذیه (i) باعث افت ولتاژ قابل توجهی در دو سر سیم تحریک پل می شود که حساسیت زنجیره اندازه گیری را کاهش می دهد. شکل 5 کاهش حساسیت را به عنوان تابعی از طول کابل نشان می دهد. یک اقدام متقابل ساده ایجاد یک کالیبراسیون جدید است که شامل کابل باشد. اما این تنها بخشی از مشکل را حل می کند. تغییر مقاومت سیم های مسی به عنوان تابعی از تغییر دمای محیط هنوز به عنوان عامل مزاحم در سیستم وجود دارد. شکل 5 نشان



شکل 5: افت ولتاژ تغذیه با مدار 4 سییم (مبدل 350Ω و سییم مسی 0.25 میلی متر مربع)

می دهد که یک مبدل 350Ω که در آن از یک کابل 4 سیمه با سطح مقطع سیم مسی 0.25 میلی متر استفاده شده است، حساسیت را تا 1% (10 ppm) زمانی که طول کابل 25 متر است کاهش می دهد. طول کابل تنها 0.5 اینچ کاهش بهره را به اندازه کلاس دقت (5ppm) یک ابزار اندازه گیری با دقت بالا ایجاد می کند. به همین دلیل است که مدارهای 6 سیم، همانطور که در شکل 6 نشان داده شده است، باید استفاده شوند.



شکل 6: مدار 6 سیم / دو کانال با تکنیک کالیبراسیون خودکار

ولتاژ تحریک V_e به ورودی منبع تغذیه مبدل متصل شده و دامنه ولتاژ ورودی مبدل را به ابزار اندازه گیری باز می گرداند. سپس ژنراتور ولتاژ تحریک، ولتاژ خروجی خود را به اندازه افت ولتاژ $\Delta V_e * 2$ افزایش می دهد و بنابراین مبدل همیشه ولتاژ تحریک مناسب V_e را در ورودی خود دریافت می کند.

شکل 6 همچنین اصل مهم دیگری را نیز نشان می دهد. ولتاژ مرجع V_{ref} هم به واحد کنترل دامنه و همچنین به ورودی مرجع مبدل $A2D$ اعمال می شود. با انجام این کار، هر تغییر ولتاژ مرجع هیچ تاثیری بر مقدار اندازه گیری شده ندارد زیرا ولتاژ اندازه گیری در ورودی ADC و ولتاژ مرجع ADC به طور متناسب تغییر می کنند.

اما برخی از مشکلات هنوز حل نشده باقی مانده است. هنگامی که از روش فرکانس حامل استفاده می شود، کوپلینگ خازنی و القایی بین سیم های مجاور رخ می دهد. خطرناک ترین کوپلینگ C_{em} بین سیم های تحریک و اندازه گیری است زیرا ولتاژ تحریک 500 برابر بیشتر از ولتاژ اندازه گیری نامی است. همچنین کوپلینگ خازنی C_m بین دو سیم ولتاژ اندازه گیری V_m باعث تغییر فاز و کاهش دامنه می شود زیرا امپدانس خروجی 350Ω مبدل و ظرفیت C_m یک فیلتر پایین گذر را ایجاد می کنند.

کوپلینگ متقابل بین ولتاژ تحریک و سیم های اندازه گیری را می توان به سادگی با شیلد جداگانه و به هم تاباندن جفت های سه سیمه مهار کرد. شیلد کردن در برابر کوپلینگ خازنی موثر است، در حالی که تاباندن سیم ها بیشتر کوپلینگ القایی را سرکوب می کند. البته شیلدینگ برای جلوگیری از تأثیرات EMI نیز ضروری است. با این حال، این کابل مبدل شیلد شده ویژه نمی تواند ظرفیت کوپلینگ C_m بین دو سیم اندازه گیری را حذف کند، حتی اگر هر سیم دارای محافظ خاص خود باشد. این منبع خطا را می توان با ولتاژ فیدبک V_f مانند ولتاژ اندازه گیری جبران کرد. برای این کار دو مقاومت $R_b/2$ در مسیر ولتاژ بازخورد به صورت سری گنجانده شده است. امپدانس منبع اندازه گیری و امپدانس منبع بازخورد برابر هستند و بنابراین تغییر فاز و تغییرات حساسیت ولتاژ اندازه گیری و فیدبک نیز برابر خواهد بود. حلقه کنترل ولتاژ تحریک، ولتاژ فیدبک V_f را در سطح ولتاژ تحریک V_e به صورت دقیق تثبیت می کند، با این کار همچنین ولتاژ اندازه گیری تا سطح دقیق V_m در ورودی تقویت کننده افزایش می یابد. با این روش ولتاژ اندازه گیری V_m و ولتاژ فیدبک V_f در ورودی های تقویت کننده را در سطوح دقیق خود نگه داشت. به همین دلیل است که می توان تاثیر خطای کابل را کاملاً مهار کرد.

Houshmand Sanat Tav Electronic CO.,LTD.

کدام منابع خطا هنوز مانده اند؟ رانش بهره و همچنین مقداری رانش نقطه صفر تقویت کننده، ژنراتور ولتاژ تحریک و ADC هنوز بررسی نشده اند. اقدام متقابل برای این خطاها تکنیک کالیبراسیون خودکار است که در شکل 6 نشان داده شده است.

اگر به عنوان مثال هر 5 دقیقه یک بار ورودی تقویت کننده به طور خودکار به سیگنال صفر، و پس از آن به سیگنال مرجع $2mV/V$ بسیار دقیق سوئیچ شود و اندازه گیری ها ذخیره شوند، یک میکرو کامپیوتر می تواند به راحتی افست نقطه صفر و انحراف دستگاه را با دقت بسیار دقیق تنظیم کند. این روش به یک سیگنال مرجع mV/V بسیار دقیق و پایدار نیاز دارد. مرجع mV/V یک تقسیم کننده ولتاژ است که باید به ولتاژ فیدبک V_e متصل شود.

در عمل بالاترین دقت و بهترین پایداری طولانی مدت، تقسیم کننده های القایی هستند که تنها در صورتی قابل استفاده هستند که مبدل با فرکانس حامل تغذیه شود. این دومین استدلال بسیار قوی برای استفاده از تکنیک فرکانس حامل است. فرکانس حامل سینوسی نسبتاً کم 225 هرتز برای ساخت ابزارهای با دقت بالا بسیار مناسب است. با فرکانس حامل 225 هرتز، بهره تقویت کننده بسیار پایدار است و فرکانس در حال حاضر به اندازه کافی بالا است تا تقسیم کننده های القایی کوچک و بسیار پایدار را ساخت.