زمان برای یک گیرنده GPS بهتر

(Time for a Better Receiver)

نویسنده:

John Kitching - فیزیکدان موسسه ملی استانداردها و فن‌آوری NIST در Boulder کلرادو آمریکا

مترجمان:

فاطمه اصل بهار کارشناس اداره کل نظارت و کنترل فنی، سازمان نقشه‌برداری کشور
aslebahar@ncc.org.ir

محمدرضا خداکرمی کارشناس اداره کل نظارت و کنترل فنی، سازمان نقشه‌برداری کشور
khodakarami@ncc.org.ir

محمد رضا حسینی کارشناس اداره کل نظارت و کنترل فنی، سازمان نقشه‌برداری کشور
hosseini-mr@ncc.org.ir

چکیده

دکتر جان کیچینگ دارای مدرک کارشناسی فیزیک از دانشگاه Mc Gill (مونترال کانادا) در سال ۱۹۹۰ و کارشناسی ارشد و دکترا در رشته فیزیک کاربردی از انستیتوی فنی کالیفرنیا در سال ۱۹۹۵ میلادی است. وی فیزیکدان بخش فرکانس و زمان موسسه ملی استانداردها و فن‌آوری NIST [۱] در Boulder کلرادو است. تحقیقات مورد علاقه دکتر کیچینگ شامل استانداردهای فرکانس اتمی، نوسان‌سازهای میکروویو با نویز کم، مغناطیس‌سنج (Magnetometer) اتمی و ژیروسکوپ‌ها می‌باشد. وی در سال ۲۰۰۱ میلادی مراجع فرکانس اتمی که به اندازه ریز ساخته می‌شوند (Micro fabricate) را در NIST راه‌اندازی کرد و محقق عمده در این زمینه به‌شمار می‌رود.

۱. مقدمه

ساعت‌سازها در طول زمان، کار سخت و مشقت‌آمیزی را برای پایداری فرکانس ساعت انجام داده‌اند. نیاز به ساعتی که تا حد امکان زمان را ثابت نگه دارد و ناوبری را به پیشرفت برساند، جـــــان هریســـــون (John-Harrison) را بر آن داشت که یکسری کرنومترهای دریایی که هر کدام توسعه یافته‌تر از قبلی بودند را ابداع کند. وی سرانجام H4 را ساخت که تعیین طول جغرافیایی با دقت کمتر از سی دقیقه در سفرهای طولانی دریایی در زمان شش ماه را قادر می‌سازد. هر ساعتی شامل یک نوسان‌ساز یا مرجع فرکانس است. میزان مزیت حفظ زمان بستگی به پایداری این مرجع دارد. فنرها و چرخ دنده‌های نوسان‌کننده جان هریسون جای خود را به کریستال‌های کوارتز دقیق‌تر و مدارات الکترونیکی دادند. امروزه نوسان‌سازهای کریستال کوارتزکه به‌طور انبوه تولید می‌شوند درهر قطعه الکترونیکی از ساعت‌های مچی گرفته تا گیرنده‌های GPS یافت می‌شوند. اما آنها به عوامل محیطی از قبیل تغییر دمای پیرامون حساس هستند. نوسان‌سازهای کریستال کوارتز در گیرنده‌های GPS حتی اگر نسبت به تغییر دما نیز تعدیل شوند باز هم دارای ناپایداری‌هایی هستند که به خطاهای ساعت منجر می‌شوند و باید توسط گیرنده GPS در هنگام محاسبه موقعیت، برآورد شده و یا حذف شوند. حال در نظر بگیریم اگر ساعت گیرنده GPS به اندازه کافی بدون خطا باشد تا بتوانیم تعیین موقعیت بدون تاثیر خطای ساعت گیرنده GPS را داشته باشیم، مسلما در این صورت موقعیت، با سیگنال‌های ماهواره‌های کمتر قابل برآورد است. به‌طوری که با سه ماهواره می‌توانیم موقعیت سه‌بعدی را تعیین کنیم. مراجع فرکانس اتمی به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهتر از نوسان‌سازهای کریستال کوارتز عمل می‌کنند. اما دارای حجم زیاد بوده و توان بالایی را مصرف می‌کنند، لذا نمی‌توان آن

را به‌عنوان گزینه‌ای در گیرنده دستی GPS درنظر گرفت. اما همان‌گونه که جان هریسون در رابطه با ابداع ساعت قابل حمل با پایداری در حد ساعت‌های امروزه عمل کرد، جان هریسون‌های امروزی در رابطه با کوچک کردن ابعاد ساعت‌های اتمی در حد یک تراشه الکترونیکی که بر روی یک صفحه مدار کوچک چاپ می‌شود عمل می‌کنند تا بتوانند از آنها برای ابزار دستی مانند گیرنده‌های GPS استفاده کنند. در این مقاله به نحوه ساخت و عمل مراجع فرکانس اتمی در مقیاس تراشه الکترونیکی پرداخته می‌شود. این اعجاز مینیاتوری جدید در حال انتقال از آزمایشگاه به کارخانه می‌باشد. ساعت‌های اتمی و زمان سنجی دقیق، هسته اصلی هر موضوع در سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی GNSS هستند. یک گیرنده GNSS موقعیت خود را با توجه به زیر مجموعه‌ای از مدارات ماهواره‌های به‌دور زمین با اندازه‌گیری زمان سپری‌شده توسط یک فرکانس رادیویی RF برای مسیر فاصله بین ماهواره و گیرنده تعیین می‌کند. یک گیرنده با استفاده از روش چند ضلعی‌بندی به تعیین مختصات سه‌بعدی خود و خطای ساعت گیرنده با استفاده از اطلاعات سیگنال حداقل چهار ماهواره قادر می‌باشد. زمان‌سنجی در حد نانو ثانیه برای این تعیین موقعیت در رسیدن به دقت یک متر مورد نیاز است.در بیشتر گیرنده‌های GNSS ، ساعت آن به شکل نوسان‌ساز کریستال کوارتز تعدیل‌کننده دما TCXO [۲] است. این مراجع فرکانس کوچک، کم‌مصرف و ارزان بوده و برای بیشتر عملیات پایه‌ای GNSS کافی هستند و امکان حصول خدمات تعیین موقعیت استاندارد SPS در سیستم GPS را فراهم می‌کنند. در یک تعیین موقعیت معمولی، ساعت گیرنده به‌طور تلویحی با زمان GPS توسط الگوریتمی که به تعیین موقعیت هم منجر می‌گردد، همزمان می‌شود. لیکن در شرایط معین، داشتن گیرنده‌ای که دارای ساعت پایدارتری از یک نوسان‌ساز کریستال کوارتز تعدیل‌کننده دما TCXO به‌خصوص در طول مدت زمان طولانی باشد سودمندتر است. وقتی عمل همزمانی انجام گیرد از آنجایی‌که زمان گیرنده تعیین شده‌است تعیین موقعیت فقط با سه ماهواره امکان‌پذیر می‌گردد. مزایای دیگر چنین ساعتی را در انتهای مقاله خواهیم خواند. در طول شش سال اخیر آژانس طرح‌های تحقیقاتی پیشرفته دفاعی DARPA[۳]، انستیتوی ملی استانداردها و فن‌آوری NIST و چندین موسسه تجاری دیگر را برای توسعه مراجع فرکانس اتمی کم‌مصرف و بسیار کوچک مورد استفاده در کاربردهای قابل حمل مورد استفاده با باطری مانند گیرنده‌های GNSS پشتیبانی نموده‌است. اهداف این برنامه شامل ساخت ساعت اتمی با کارکرد کامل با حجم کمتر از یک سانتی‌متر مکعب (تقریبا در ابعاد یک تراشه الکترونیکی) ، توان مصرفی کمتر از سی میلی‌وات و ناپایداری فرکانس 10^{-11} در زمان متوسط یک ساعت می‌باشد. در صورتی‌که چنین اهدافی حاصل شود پیشرفت صد برابر نسبت به وضعیت کنونی در ابعاد و توان مصرفی استانداردهای اتمی Compact کنونی حاصل می‌شود. همچنین پیشرفت هزار برابر در پایداری فرکانس در مدت زمان یک ساعت نسبت به مرجع فرکانس کریستال کوارتز با همان اندازه، ابعاد و توان مصرفی مشابه خواهیم داشت.

ساخت سازه‌هایی در ابعاد کمتر از میلی‌متر با استفاده از فتولیتوگرافی و ایجاد خراش شیمیایی موضوع مورد مطالعه رشته سیستم‌های میکرو الکترو مکانیک (MEMS[۴]) است. بسیاری از ابزارهای مورد استفاده در این روش مانند ابزاری است که در صنعت میکرو الکترونیک به‌کار گرفته می‌شوند اما برای ساخت ابزاری که هم از نظر مکانیکی و هم از نظر الکتریکی فعال هستند مورد استفاده قرار می‌گیرد. فن‌آوری‌های کلیدی که با استفاده از MEMS امکان‌پذیر گردید شامل شتاب‌دهنده‌های کیسه‌های هوا و پردازشگر سیگنال‌های رقومی در بسیاری از تلویزیون‌های با صفحه نمایش بزرگ می‌باشد. MEMS علاوه بر ابعاد کوچک آن و در نتیجه انتشار توان گرمایی کم آن، مزیت ساخت موازی بسیاری از ابزارها بر روی یک صفحه نازک و در نتیجه کاهش هزینه ساخت برای وسایل حجیم را فراهم می‌نماید. فن‌آوری ساعت اتمی در ابعاد تراشه الکترونیکی CSAC[۵] دو فن‌آوری پردازش MEMS با تهییج اتم و لیزر نیمه‌هادی را با هم ترکیب می‌کند. این سه نوآوری (پردازش MEMS + تهییج اتم + لیزر نیمه‌هادی) امکان ساخت ساعت اتمی در ابعاد یک صدم حجم ساعت‌های اتمی قبل را پدید می‌آورند. پیشرفت‌های تکمیلی در ابعاد ساخت و توان در حد گیگا هرتز نوسان

سازها و میکرو پروسسورهای با توان مصرفی کم برای به کار گیری سرو موتورها (Servo motors) امکان ادغام بسته‌های فیزیکی پیشرفته جدید را در نمونه ساعت‌های اتمی فراهم نموده‌است. با پیشرفت‌های انجام شده و قابل اطمینان شدن این ابزار و ساخت آنها به زودی شاهد ورود آنها در عرصه کاربردهای مختلف خواهیم بود.

۲. بسته فیزیکی ساعت[۶]

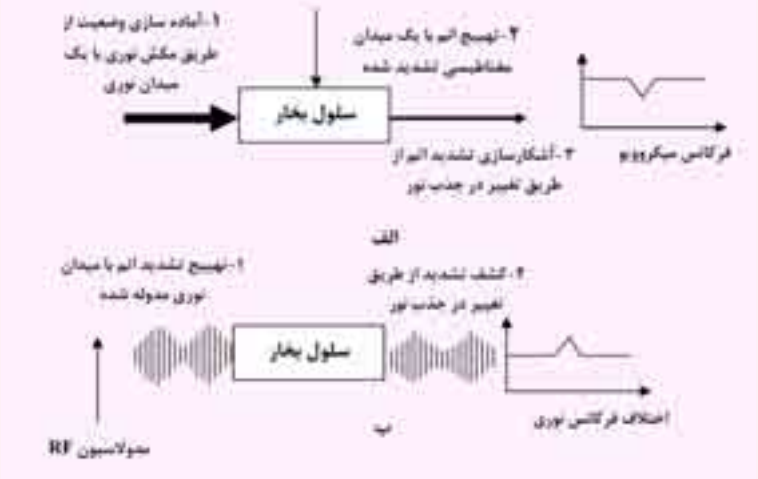
«بسته فیزیکی ساعت» قلب هر ساعت اتمی است که شامل اتم‌های روبیدیم یا سزیم می‌باشد. این اتم‌ها نوسان متناوب دقیقی که اساس کار ساعت است را پدید می‌آورند. به‌دلیل اهمیت این عنصر در ساعت و به‌دلیل نقشی که فیزیک بنیادی در تعیین ابعاد آن دارد کار زیادی در این زمینه انجام می‌شود. لیکن، هر مرجع فرکانس (غیر فعال Passive) نیاز به نوسان‌ساز محلی LO[۷] برای تولید فرکانس(ناپایدار) اولیه دارد که اتم‌ها را تحریک کرده و یک سیستم کنترل را برای اعمال تصحیح فعال نماید. عملکرد بینابین این سه زیر مجموعه (LO- تحریک اتم‌ها- سیستم کنترل) در شکل نشان داده شده‌است.

در یک ساعت اتمی مرسوم با سلول‌های بخار(شکل۲-الف را ملاحظه کنید) انتقال اتم از طریق به کارگیری مستقیم یک میدان مایکروویو به اتم‌ها انجام می‌شود. اول اتم‌ها در یکی از زیر ترازهای وضعیت بالا Sublevels- Split ground State-

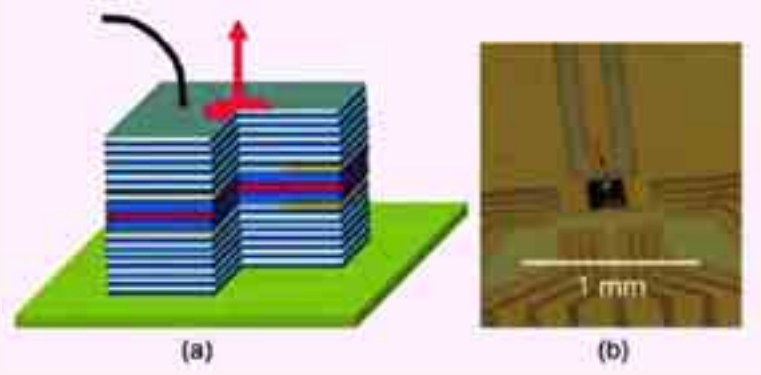
شکل ۱. سه زیر مجموعه یک مرجع فرکانس غیر فعال Passive و عملکرد بین آنها

Hyperfine توسط یک میدان نوری با استفاده از یک لامپ فراهم می‌شوند. میدان مایکروویو دو زیر تراز وضعیت زمانی جدا شده تراز بالا را کوپل کرده یک ممان مغناطیسی نوسان کننده در اتم را در فرکانس مایکروویو تولید می‌کند. تغییر وضعیت اتمی در این ممان نوسان‌کننده از طریق تغییرات در جذب میدان نوری برای فراهم کردن اتم‌ها بر روی صفحه نمایش مشاهده می‌گردد. مشکلی که در پیکربندی ساعت‌های مرسوم با سلول‌های بخار وجود دارد این است که معمولا سلول در داخل محفظه مایکروویو قرار دارد و محفظه امواج مایکروویو در نزدیکی اتم‌ها را محبوس کرده و داپلر جابه‌جایی هایی را که موقع حرکت میدان موج مایکروویو ایجاد می‌شوند را کاهش می‌دهد. برای اینکه عمل تشدید فراهم گردد ساده‌ترین محفظه‌های مایکروویو بایستی بزرگتر از طول موج انتشار مایکروویو (مثلا ۳/۲ سانتی‌متر در مورد اتم سزیم) باشد. لذا این امر در مورد کوچک شدن بسته فیزیکی محدودیت ایجاد می‌کند.

بیشتر طرح‌ها برای بسته‌های فیزیک ساعت اتمی در ابعاد تراشه الکترونیکی از شکل مربوط به طول موج انتشار مایکروویو با استفاده از حبس توده یکپارچه CPT[۸] انتقال اتم استفاده می‌کنند. این عمل به‌وسیله تجزیه تراز بالای وضعیت زمینی اتم به دو فرکانس جدا از هم انجام می‌شود که به‌طور همزمان به اتم‌ها تابیده می‌شوند. رفتار غیرخطی اتم‌ها سبب ایجاد یکپارچگی (و در نتیجه یک ممان مغناطیسی نوسانی) در اختلاف فرکانس در میدان نوری می‌شود. دامنه این یکپارچگی را



شکل ۲. مکانیزم‌های فیزیکی مربوط به (الف) فرکانس مرجع متداول سلول بخار تحریک شده به‌وسیله موج مایکروویو (ب) فرکانس‌های مرجع بر اساس حبس توده CPT



شکل ۳. قالب عمودی لیزر ساتع شده
(الف) ساختار اصلی رفلکتورهای Bragg که در بالا و پایین یک منطقه gain ایجاد می شود.
(ب) شکل یک قالب لیزر ساطع شده که بر روی صفحه اصلی نصب شده است.

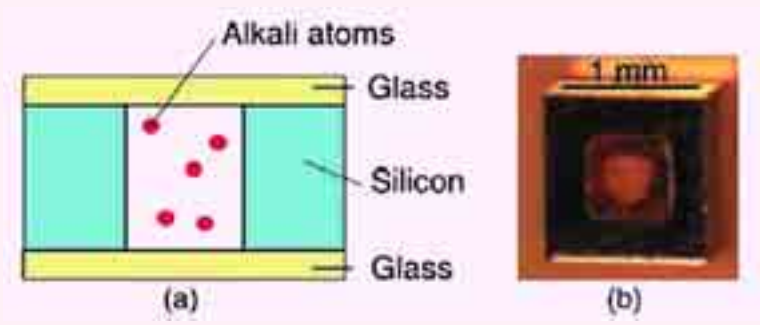
می توان با استفاده از آشکارسازی جذب یک نمونه اتمی اندازه گیری کرد.

وقتی اختلاف فرکانس بین میدان های نوری در نزدیکی فرکانس تجزیه کننده تراز بالای اتم باشد جذب توسط نمونه ها کاهش می یابد. راه متداول برای تولید میدان نوری دو فرکانسه استفاده از مدولاسیون جریان تزریق شده یک دیود لیزری می باشد. این مدولاسیون فرکانس (تولید شده توسط نوسان ساز محلی) وقتی به انتقال اتم ها متصل می شود برای مدت های طولانی پایدار مانده و خروجی آن ساعت اتمی می گردد. لیکن بیشتر دیودهای لیزری برای فعالیتشان در حدود ۱۰۰ میلی وات توان الکتریکی لازم دارند و لذا مدوله کردن آنها در فرکانس های گیگا هرتز مشکل است. لیزرهای تابش کننده از سطح محفظه قائم VCSELs [۹] که در طول دهه پیش توسعه یافته اند دارای جریان های آستانه بسیار پایین (در حد میلی آمپر) هستند و لذا به توان بسیار کمی برای فعالیت نیاز دارند. یک لیزر VCSEL با رشد لایه های مواد با ضریب شکست متغیر ساخته می شوند و بدین گونه شکل آینه های چند لایه ای که اصطلاحا رفلکتورهای Bragg نامیده می شوند در بالا و پایین یک منطقه gain بر روی یک صفحه نازک (wafer) ایجاد می شود. معمولا رفلکتورهای Bragg دارای انعکاس بالایی هستند که سبب جریان آستانه بسیار پایینی می شوند. همچنین بسیاری از این لیزرها برای سیستم های مخابراتی بهینه طراحی شده اند و لذا دارای عرض باند مدولاسیون بالایی که گاهی به ۱۰ گیگا هرتز هم می رسد می باشند. نمایی از ساختار لیزر و عکس یک قالب لیزری نصب شده در شکل ۳ نشان داده شده است.

ساعت های اتمی که بر اساس حبس توده یکپارچه هستند با توجه به طول موج تابش مایکروویو محدودیت ندارند، زیرا هیچ میدان مایکروویو به اتمها اعمال نمی شود و به محفظه مایکروویو نیز نیاز ندارد. لذا ساعت اتمی بسیار کوچکی با این روش می تواند ساخته شود. آزمایش های رومیزی انجام شده با این روش و با استفاده از ساعت های اتمی، ناپایداری بخش کوتاه مدت فرکانس کمتر از (10^{-12})در ثانیه را نشان می دهد.

۳. سلول های بخار قلیایی

شاید مهم ترین روش که در آن سیستم های میکرو الکترو مکانیک در طراحی ساعت های اتمی با ابعاد تراشه الکترونیکی نقش دارند در رابطه با سلول بخار قلیایی است که اتم ها را محبوس می کند. در بیشتر ساعت های اتمی متداول، این سلول با دمیدن در شیشه ساخته می شود. به این صورت که به دو انتهای یک لوله شیشه ای پنجره هایی نصب می شوند. یک لوله تخلیه به دیواره شیشه ای متصل شده و سیستم تخلیه می شود و فلز قلیایی



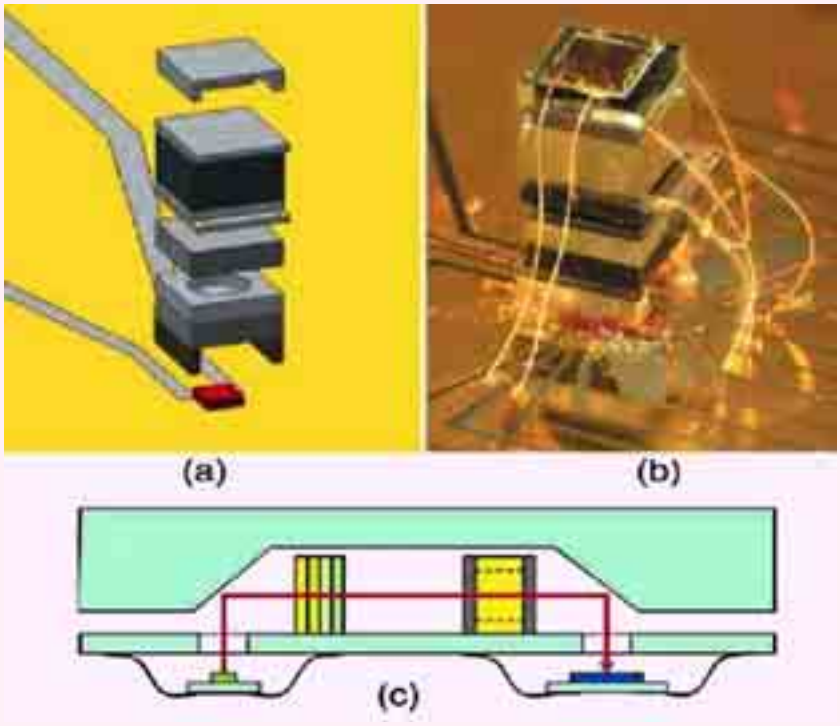
شکل ۴. (الف) هندسه سلول MEMS پایه (از نگاه پهلو)
(ب) عکس سلول در ابعاد یک میلی متری در NIST در سال ۲۰۰۳ میلادی (از نگاه بالا)

(روبیدیم یا سزیم) به داخل سلول تزریق می‌شود. در مقابل آن سلول‌های بخار قلیایی سیستم‌های میکرو الکترو مکانیک در بیشتر ساعت‌های اتمی در مقیاس تراشه الکترونیکی با خراش دادن یک سوراخ در یک صفحه بسیار نازک سیلیکون به ضخامت چند صد میکرومتر و بستن صفحه‌های بالایی و تحتانی آن توسط صفحه‌های نازک شیشه‌ای ساخته می‌شوند. نمایی از هندسه سلول سیستم میکرو الکترو مکانیک و عکس یک سلول کامل در شکل ۴ ملاحظه می‌شود.

ساخت سلول با این روش دارای مزایایی نسبت به روش‌های سنتی است. اول اینکه ساخت سلول‌ها با این روش در حجم بسیار کوچک امکان‌پذیر است. زیرا که سوراخ در صفحه سیلیکون با الگو سازی لیتوگرافی تعریف می‌شود. دوم، در این روش می‌توان محدودیت ابعاد را از میان برد. سلول‌هایی که به‌طور نمونه برای بسته‌های فیزیک ساخته می‌شوند دارای اندازه در حدود یک میلی‌متر هستند، لیکن در روند مبنایی پر شدن سلول که نیاز به ساخت سلول‌های با اندازه بسیار کوچکتر است تغییری پدید نمی‌آید. سوم، این روش امکان ساخت همزمان چندین سلول بر روی یک صفحه نازک با سلسله مراحل مشابه را فراهم می‌کند. این امر به کاهش قابل ملاحظه هزینه در ساخت بسته‌های فیزیک ساعت اتمی منجر می‌شود. بالاخره، این ساختار صفحه‌ای امکان ادغام با دیگر سیستم‌های نوری و الکترونیکی را فراهم می‌کند. مخصوصا میدان نوری مورد نیاز برای تهییج حبس توده یکپارچه اتم‌ها می‌تواند به‌سهولت از طریق پنجره‌های شیشه‌ای وارد سلول شده و از آن خارج شوند.

۴. بسته‌های فیزیک ساعت‌های اتمی در ابعاد تراشه الکترونیکی

برای اینکه سلول‌ها دارای فشار بخار اتم‌های قلیایی کافی برای ارائه سیگنال قابل قبولی باشند به‌دلیل کوچک بودن ابعاد آنها بایستی تا نزدیکی ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شوند. گرمادهنده سلول می‌تواند با قراردادن یک لایه نازک (به ضخامت ۳۰ نانومتر) اکسید قلع ایندیم ITO[۱۰] بر روی یک لایه زیرین شیشه‌ای ساخته شود. ITO هم شفاف و هم رساناست و لذا ماده مناسبی برای این نوع گرماسازها می‌باشد. جریان از داخل آن عبور کـــــرده (و سلول را گرم می‌کند) و در بالای پنجره‌های سلول برای تماس حرارتی خوب با سلول بدون ایجاد مانع برای عبور نور نصب می‌شود. راه دیگر برای ایجاد گرما، استفاده از اثر(رد) مارپیچی فلز است که در کنار لبه‌های سلول برای ساختن گرماساز اهمی به‌کار گرفته می‌شود. سلول و گرماسازها در یک مجموعه نوری کنار هم قرار می‌گیرند تا پرتو نوری مورد استفاده برای تهییج اتم‌ها را تولید کنند. این مجموعه نوری شامل یک قاب لیزرهای تابش کننده از



شکل ۵. (الف) نمایی از یک ساعت اتمی با ابعاد تراشه الکترونیکی با هندسه قائم
(ب) نمایی از یک ساعت اتمی پیش ساخته در NIST
(ج) نمایی از یک ساعت مجتمع با هندسه افقی

توانمندترین تولید کنندهٔ نقشه و اطلاعات مکانی

دربین کشورهای منطقه ،

آمادهٔ ارائه خدمات فنی و مهندسی

به‌همه‌ی بخش‌های اجرایی و برنامه‌ریزی

در سطح ملی و منطقه‌ای

تلفن امور مشتریان : ۶۶۰۷۱۱۰۵

فروش اینترنتی : www.ncceshop.ir

رسالت خطیر

سازمان نقشه‌برداری کشور

تهران

راهبری ، نظارت و ساماندهی تولید و انتشار نقشه و اطلاعات مکانی در سطح ملی

سال ۱۳۸۸

تدوین الگوی توسعه ایرانی ـ اسلامی

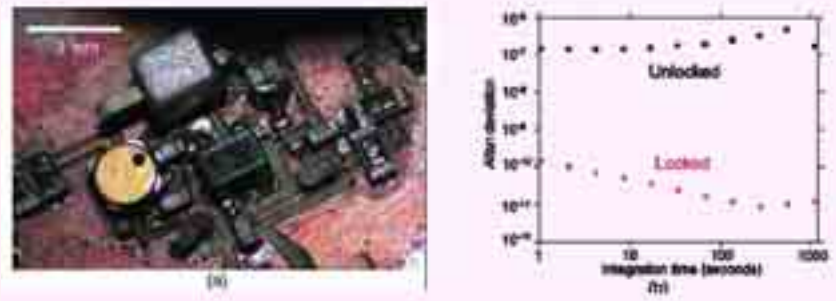
با

منظومه ملی اطلاعات مکانی

سطح محفظه قائم VCSELS ، یک صفحه موج برای ایجاد قطبش مدور، یک فیلتر چگالی خنثی برای رقیق نمودن توان نور و گاهی یک عدسی موازی ساختن پرتو نور و یک قطبی کننده برای حفظ یک قطبش خروجی ثابت است. یک فتو دیود Photo diode کوچک در کنار سلول در مقابل لیزر قرار داده می شود تا توان نوری فرستاده شده را کشف کند. در ساعت های اتمی با ابعاد تراشه الکترونیکی که به صورت هندسی قائم جمع آوری می شوند، مولفه ها (از قبیل لیزر، سیستم نوری و سلول) بر روی هم قرار می گیرند و شکل یک برج در مقیاس میلی متر را به صورت هایی که در اشکال ۵-الف و ۵-ب ملاحظه می شود پدید می آورند. در ابزار به صورت هندسی افقی، نور ارسال شده از لیزر موازی با صفحه نازک منعکس شده و سیستم نوری و سلول بر روی سطح صفحه نازک اعمال شده و سبب عبور نور منتشره به صورت افقی می شوند. سپس نور به سطح صفحه نازک مجددا منعکس شده و به آشکار ساز نوری[11] می رسد. نمایی از یک ساعت مجتمع با هندسه افقی در شکل ۵-ج نشان داده شده است.

۵. نوسان‌سازهای محلی و سیستم کنترل

یک نوسان‌ساز با ولتاژ کنترل شده با توان کم و به صورت فشرده که قابلیت تولید یک سیگنال در هارمونیک زیرین فرکانس تشدید ۶/۸ گیگا هرتز(روبیدیم) یا ۹/۲ گیگا هرتز(سزیم) را داشته باشد برای تحریک بسته فیزیک مورد نیاز است. نوسان سازهای محلی که در بازار وجود دارند در محدوده ۲۰ تا ۴۰ میلی وات مصرف دارند. این زیر سیستم از بخش های مجزا که شامل تشدیدکننده های هم محور در حد میکرومتر از جنس سرامیک هستند و با ضرایب Q در محدوده ۱۰۰ پر می شوند ساخته می شوند. تشدیدکننده های صوتی با پوشش فیلم نازک نوع دیگری از فن آوری تشدیدکننده هاست که ضرائب Q بالاتر در فرکانس های گیگا هرتز و تصحیح متناظر در نویز فاز نوسان ساز محلی را فراهم می کند. نوسان سازی که در شکل ۶-الف نشان داده می شود بر اساس یک تشدیدکننده هم محور در حد میکرومتر است که با توان جریان مستقیم کمتر از ۵ میلی وات و به طور معمول در حد ۲ میلی وات عمل می کند. در این توان، رادیو فرکانسی با توان ۰/۲۵ میلی وات در ۳/۴ گیگا هرتز و با بار ۵۰ اهم تولید می شود که می تواند به حدود ۳ مگا هرتز با دیود Varactor کوپل شده ضعیف تغییر داده شود. وقتی نوسان ساز محلی به تشدید می رسد همان گونه که در شکل ۶-ب دیده می شود، پایداری آن به طور قابل ملاحظه ای بالاتر می رود. برای بسیاری از ساعت های اتمی در ابعاد تراشه الکترونیکی پایداری در حد 10^{-8} در حد یک ثانیه قابل دسترس است و با افزایش زمان به متوسط 10^{-11} در یک ساعت می رسد. اغلب نوسان ساز با ولتاژ کنترل شده به حلقه قفل شده با فاز با توان کم PLL[12] با نوسان ساز کریستال کوارتز ۱۰ مگا هرتز بسته می شود. سپس این نوسان ساز با فرکانس پایین به عنوان خروجی ساعت عمل می کند. استفاده از چنین نوسان سازی توان مورد نیاز برای فعالیت دستگاه را افزایش می دهد. اما به طور قابل ملاحظه ای نویز فاز را افزایش می دهد. همچنین فرکانس خروجی ۱۰ مگا هرتز برای بسیاری از کاربردها مناسب تر است. به علاوه اینکه مدولاسیون نوسان ساز محلی مورد نیاز برای ادامه تشدید را می توان در حلقه قفل شده با فاز تولید کرد و خروجی ۱۰ مگا هرتز را بدون مدولاسیون



شکل ۶. زیرساختارهای نوسان ساز محلی ساعت اتمی در ابعاد تراشه الکترونیکی
(الف) نمایی از نوسان ساز محلی بر پایه یک نوسان ساز هم محور در فرکانس ۳/۴ گیگا هرتز
(ب) وقتی نوسان ساز محلی به تشدید می رسد پایداری فرکانس آن در حالت های قفل شده و قفل نشده به شکل یک بسته فیزیکی با عملکرد بالا و اندازه بزرگ با کنترل الکترونیکی تبدیل می شود.

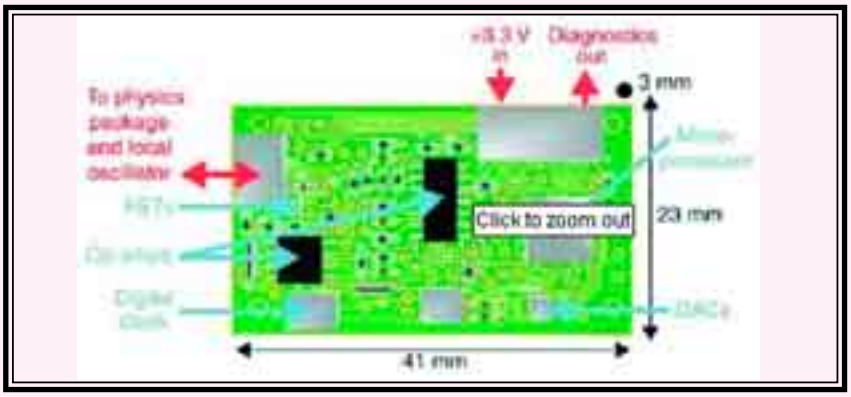
مورد استفاده قرار داد.

یک سیستم کنترل، خروجی بسته فیزیک را مورد پردازش قرار داده و سیگنالی را جهت پایدار نمودن فرکانس آن به نوسان‌ساز محلی بر می‌گرداند. این سیستم کنترل به‌صورت رقومی با یک میکرو پروسور با توان کم به‌کار گرفته می‌شود. سیستم کنترل علاوه بر پایدار نمودن فرکانس نوسان‌ساز محلی، اعمال دیگری از قبیل پایدار نمودن دمای سلول(و شاید دمای لیزر)، حفظ طول موج لیزر در مرکز انتقال نوری در اتم‌ها، و نمایش پارامترهایی از قبیل توان خروجی لیزر که برای عملکرد دستگاه حیاتی هستند را انجام می‌دهد (شکل ۷ را ببینید).

۶. کارکرد

همان‌گونه که بیان شد، بیشتر ساعت‌های اتمی در مقیاس تراشه الکترونیکی دارای ناپایداری فرکانس در حد 10^{-10} در یک ثانیه هستند که در مجموع به خطایی در حدود 10^{-11} در یک ساعت می‌رسد. محدودیت‌ها برای زمان‌های انتگرال‌گیری کوتاه (بین یک تا ۱۰۰ ثانیه) شامل عرض خط انتقال بزرگتر (معمولا چندین کیلو هرتز در ۶/۸ یا ۹/۲ گیگا هرتز) و اندازه بزرگترین سیگنال می‌باشد. عرض خط در درجه اول به‌وسیله عرض سلول بخار تعیین می‌شود و لذا ضریبی از ۱۰ یا بیشتر از عرض خط در ساعت‌های اتمی با سلول‌های بخار بزرگتر می‌باشد.

ناپایداری‌ها در زمان‌های انتگرال‌گیری طولانی ناشی از منابع مختلفی می‌باشد. تغییرات در دمای لیزر سبب انتقال‌های AC Strak (انتقال‌های فرکانس تشدید مربوط به تغییرات شدت نور) می‌شود، در حالی که تغییرات در دمای سلول سبب انتقال‌های ناشی از خواص متغیر برخوردهای بین اتم‌ها می‌شود. این انتقال‌ها در حالی که از طریق طراحی تا حدود زیادی کاهش می‌یابند هنوز به پایدارهای دمای لیزر و سلول در حد میلی‌کلوین در مدت زمان طولانی برای حفظ ناپایداری در حد 10^{-11} کسر فرکانس نیاز دارد. نمونه‌های کنونی ساعت‌های اتمی در مقیاس کوچک دارای حجم در حدود ۱۰ سانتی‌متر مکعب هستند و تقریبا با ۱۰۰ میلی‌وات توان الکتریکی کار می‌کنند. لیکن، انتظار می‌رود طرح‌های جدید تا آخر سال به حجم مورد نظر یک سانتی‌متر مکعب برسند. همچنین در دستگاه‌های بدون خروجی ۱۰ مگا هرتز به توان الکتریکی ۳۰ میلی وات بتوان رسید. زیرا احتمالا یک توان اضافه ۱۰ الی ۲۰ میلی‌وات برای تولید این خروجی ۱۰ مگا هرتز مورد نیاز است. جالب است اگر کارآیی پایداری توان ساعت‌های اتمی در مقیاس تراشه الکترونیکی را با منابع فرکانس دیگر مقایسه کنیم. همان گونه که در شکل ۸ نشان داده شده‌است، یک ساعت اتمی در مقیاس کوچک با توان ۳۰ میلی‌وات که دارای زمان‌سنجی یک میکرو ثانیه در طول یک روز است می‌تواند برتری قابل ملاحظه‌ای به ساعت‌های تجاری داشته باشد که امروزه در زمینه زمان‌سنجی دقیق وجود دارند. قابلیت اطمینان موضوع قابل توجه در مورد همه ساعت‌های اتمی است، اما به‌خصوص در مورد دستگاه‌هایی که ممکن است در فنون بحرانی از قبیل GNSS به‌کار گرفته شوند بیشتر اهمیت دارد. یک منبع عمده ضعف در این زمینه VSEL است که برای ایجاد تشدید اتمی استفاده می‌شود. به‌منظور اجتناب از مصرف بیشتر توان ناشی از سرد شدن دستگاه، دمای VSEL بایستی تا حدودی بیش از حداکثر محدوده دمای محیط پایدار بماند. این دما برای بعضی از کاربردها در محدوده ۴۰C- تا ۸۰C+ می‌باشد. نتایج اخیر به‌دست آمده از آزمایش‌های زمان عمر شتاب داده شده



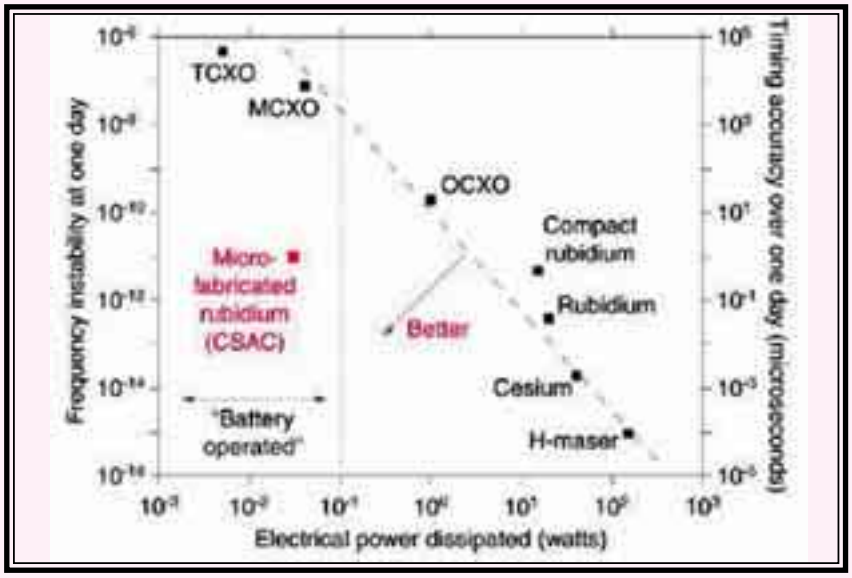
شکل ۷. نمایی از یک سیستم کنترل به‌صورت رقومی با در نظر گرفتن سطح اشتراک و بعضی از اجزای آن شامل تقویت کننده موثر،ترانزیستور و مبدل رقومی به آنالوگ.

بیانگر زمان عمر بیش از شش سال برای VSEL در عملکرد تحت دمای ۹۰C است.

۷. کاربردها در GNSS

ساعت‌های اتمی کوچک با مصرف کم می‌توانند به روش‌های مختلف و قابل توجهی کارآیی گیرنده‌های GNSS را بالا ببرند. شاید مهم‌ترین آنها توانایی بارز کسب کد است که زمان سنجی دقیق در زمان طولانی را فراهم می‌کند. برای کسب کد GNSS، گیرنده باید در فرکانس و زمان جستجویی انجام داده و زمان و فرکانس واحد را که همبستگی بالایی بین کد تولید شده توسط گیرنده و کد دریافت شده از ماهواره را نشان می‌دهد، تعیین می‌کند. اگر نامعینی در زمان و فرکانس بزرگ باشد، نیاز به توان پردازش قابل ملاحظه‌ای وجود دارد. به‌خصوص در زمانی که سیگنال دریافت شده ضعیف است و یا همان‌گونه که در مورد کد GPS P(y) داریم کد طولانی است. به‌عنوان مثال، در شرایطی که در محیط‌های سر بسته قرار داریم و سیگنال‌های ماهواره‌ها توسط ساختمان تضعیف می‌شوند، نسبت کاهش یافته سیگنال به نویز بیان می‌کند که جمع‌آوری مشاهدات در مدت زمان طولانی‌تر برای تعیین تابع همبستگی در هر بخش جستجوی فرکانس-زمان مورد نیاز است. این خود به طولانی شدن زمان کسب کد منجر می‌گردد. همچنین، مدت زمان طولانی‌تر برای جمع‌آوری مشاهدات به این معنی است که هر مخزن جستجوی فرکانس که باریک‌تر است برای تعیین انحراف فرکانس گیرنده جستجوی بیشتری لازم است. آگاهی دقیق از زمان و فرکانس، گیرنده را به باریک نمودن پنجره جستجو در هر دو کمیت فرکانس و زمان قادر نموده و لذا کد را در زمان کوتاهتری کسب می‌کند. ملاحظات مشابهی برای کسب کد P(y) نیز به‌کار گرفته می‌شود، حتی تحت شرایطی که توان سیگنال نرمال داریم، اینها بیان کننده حساسیت گیرنده نسبت به اختلال و تداخل موج می‌باشد. کسب کد P(y) در بسیاری از گیرنده‌های (به خصوص قدیمی) نظامی اول با کسب کد C/A که دارای طول کمتری است انجام می‌گیرد وسپس با استفاده از این اطلاعات زمانی برای کد P(y) حاصل می‌شود. در حالی‌که این عمل کسب کد به‌خوبی در هر شرایطی کار می‌کنند، اما ایرادات قابل ملاحظه‌ای به‌دلیل انتشار C/A در عرض باند باریک‌تر نسبت به کد P(y) در محیط مختل پدید می‌آید و لذا اختلال موج تاثیر قابل ملاحظه‌ای ایجاد می‌کند. در این حالت اگر یک ساعت کوچک با زمان‌سنجی یک میلی‌ثانیه در مدت زمان طولانی در گیرنده داشته باشیم نیازی به کسب کد C/A نخواهد بود.

مزیت دیگر آگاهی داشتن به زمان دقیق در گیرنده‌های GNSS این است که اصولا موقعیت را می‌توان با تعداد ماهواره‌های کمتر از چهار ماهواره تعیین نمود. از آنجایی‌که زمان گیرنده یک متغیر معلوم است، فقط سه مجهول در حل موقعیت-زمان باقی می‌ماند و لذا فقط سه جزء اطلاعات برای سه ضلع‌بندی مورد نیاز است. این ممکن است به‌خصوص در محیط شهری در جایی که ساختمان‌ها و موانع دیگر به‌طور منظم دید نسبت به



شکل ۸. مقایسه پایداری زمانی فرکانس مرجع و توان لازم برای تجهیزاتی که شامل میکروپروسسور و نوسان‌ساز کریستال هستند.

ماهواره‌ها را دچار مشکل می‌کند، اهمیت خاصی داشته باشد. در خاتمه، یک ساعت دقیق می‌تواند باعث تعیین بهتر ارتفاع نسبت به سطح زمین توسط گیرنده شود. معمولا مولفه ارتفاعی جواب به‌دست آمده برای موقعیت به‌دلیل تاثیر GDOP و عدم قطعیت در تاخیر مدل اتمسفری با دقت خوبی به‌دست نمی‌آید.

۸. نتیجه‌گیری

امروزه، ساعت‌های اتمی در مقیاس تراشه الکترونیکی، با حجم یک سانتی‌متر مکعب و مصرف ۳۰ میلی‌وات به بازار عرضه می‌شوند. این دستگاه‌ها پایداری فرکانس در حد 10^{-11} را فراهم می‌کنند و در نتیجه زمان‌سنجی در حد یک میکرو ثانیه در طول یک شبانه روز و یک میلی‌ثانیه در طول یک سال را فراهم می‌کنند. مبنای اتمی دقیق برای گیرنده‌های GPS دستی که با باتری‌های معمولی کار می‌کنند توانایی‌های جدیدی از قبیل مقاومت بالاتر در برابر اختلال و تداخل امواج، کسب سریع‌تر زمان و عملکرد مطمئن‌تر گیرنده را فراهم می‌کنند. این دستگاه‌ها بر اساس تقارب سه زمینه جداگانه: فیزیک اتمی، سیستم‌های میکرو الکترو مکانیکی و لیزرهای نیمه‌هادی کم‌مصرف هستند. همچنین دستگاه‌های دیگری بر اساس طرح‌ها و روش‌های ساخت مشابه در حال توسعه هستند. این دستگاه‌ها شامل مغناطیس‌سنج‌های اتمی با حساسیت‌های در حد دستگاه‌های تداخل کوانتم ابررسانا (SQUIDS)[13] و ژیروسکوپ‌های در درجه ناوبری می‌باشند.

۹. پانوشت‌ها

1- National Institute Of Standards and Technology

2- Temperature Compensated Ouartz Crystal Oscillator

3- Defence Advanced Research Project Agency

4- Micro Electro Mechanical Systems

5- Chip Scale Atomic Clock

6- Clock Physic Package

7- Local Oscillator

8- Coherent Population Trapping

9- Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers

10- Indium Tin Oxide

11- Photo Detector

12- Phase-Locked Loop

13- Super Conducting Quantum Interference Devices

۱۰. منبع

1-"Time for a Better Receiver: Chip-Scale Atomic Frequency References" by John Kitching in GPS World, Nov 1, 2007, pp. 52-57.

www.ncc.org.ir