دانشگاه بین المللی امام خمینی

دانشکده فیزیک

گزارش پروژه پایانی درس روش های تجربی در فیزیک

عنوان پروژه:

طراحی و پیاده‌سازی سیستم دیجیتال اندازه‌گیری شتاب گرانش (g) با استفاده از آونگ نوری و پردازش سیگنال در پایتون

استاد مربوطه:

دکتر نجمه تقوی فرد

تهیه‌کننده:

طاها روحی

تاریخ تحویل:

تیر ۱۴۰۵

چکیده

این پروژه با هدف اندازه‌گیری دقیق شتاب گرانش زمین (g) از طریق طراحی یک سیستم نوسان‌سنج نوری و پردازش سیگنال دیجیتال توسعه یافته است. سیستم سخت‌افزاری شامل یک سنسور مادون قرمز مادون قرمز (IR) مجهز به مقایسه‌گر LM393 و یک مدار فیلتر آنالوگ است که سیگنال عبور آونگ را به ورودی کارت صدای رایانه منتقل می‌کند. نرم‌افزار توسعه‌یافته در محیط پایتون با نرخ نمونه‌برداری ۴۴٫۱ کیلوهرتز، زمان‌های قطع و وصل سنسور را استخراج کرده و با اعمال اصلاحات هندسی مربوط به قطر گلوله، مقدار g را محاسبه می‌کند. ارزیابی سیستم با هفت فایل آزمایش مستقل، خطای میانگین کمتر از ۰.۴ ٪ و پایداری بالای الگوریتم پردازش سیگنال را تأیید کرد.

۱. مقدمه و مبانی فیزیکی پروژه

در یک آونگ ساده با طول ریسمان L، دوره تناوب نوسان‌های کوچک (T) طبق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \Longrightarrow g = \frac{4\pi^2 L}{T^2}$$

در روش‌های سنتی آزمایشگاهی، زمان‌بندی با کرونومتر دستی انجام می‌شود که خطای واکنش انسانی (حدود ۰٫۲ ثانیه) را به محاسبات تحمیل می‌کند. در این پروژه، با استفاده از سنسور نوری و نرخ نمونه‌برداری بسیار بالای ۴۴٫۱ کیلوهرتز، خطای زمان‌بندی به محدودهٔ میکروثانیه کاهش یافته است.

۱.۱. اصلاح هندسی اثر ابعاد گلوله

از آنجا که گلوله آونگ یک نقطه مادی نیست و دارای قطر مشخص (d) است، سنسور نوری در پایین‌ترین نقطه مسیر به مدت $\Delta t_{\text{blocking}}$ توسط بدنه گلوله قطع می‌شود. سرعت خطی گلوله در این نقطه برابر است با:

$$v = \frac{d}{\Delta t_{\text{blocking}}}$$

برای استخراج دوره تناوب واقعی نوسان ($T_{\text{corrected}}$)، باید زمان تاخیر ناشی از عبور طول بدنه گلوله از زمان کل حرکت کم شود. این اصلاح فیزیکی مانع از بیش‌برآورد شدن T و در نتیجه مانع از کوچک‌نمایی کاذب شتاب گرانش (g) می‌گردد:

$$T_{\text{corrected}} = 2\left(\Delta t_{\text{total}} - \frac{d}{v}\right)$$

۲. طراحی سخت‌افزار و تحلیل مهندسی مدار RC

یکی از اصلی‌ترین چالش‌های این پروژه، انطباق الکترونیکی خروجی سنسور با ورودی کارت صدا بود. خروجی ماژول LM393 یک سیگنال دیجیتال با دامنه ولتاژ $5V$ (سطح منطقی TTL) است. اتصال مستقیم این خروجی به ورودی میکروفون/خط کارت صدا به دو دلیل چالش‌برانگیز بود:

۱. **ریسک سوختن کارت صدا:** ولتاژ مجاز ورودی کارت صدا معمولاً در محدوده $1V$ تا $1.5V$ است و اعمال ولتاژ $5V$ احتمال آسیب سخت‌افزاری دارد.

۲. **پدیده نوسان لبه (Bounce/Chattering):** در لحظه ورود و خروج لبه‌های گلوله از مقابل سنسور، قطع و وصل‌های بسیار سریع و میکرومتری نور رخ می‌دهد که لبه پالس را دندانه‌دار و چندپیکی می‌کند. بدون فیلتر، پایتون هر دندانه را یک عبور کامل فرض می‌کرد.

۲.۱ .ساختار و اتصال پایه‌های مدار واسط :

خروجی ماژول سنسور (پایه VCC ، GND وOUT) به همراه مدار واسط با آرایش زیر به جک ۳.۵ میلی‌متری کارت صدا (دارای پایه‌های Left/Right و GND) متصل شد:

* اتصال فرستنده: مادون قرمز با یک مقاومت $1\ \mathrm{k\Omega}$ سری شده و به منبع تغذیه متصل گردید.

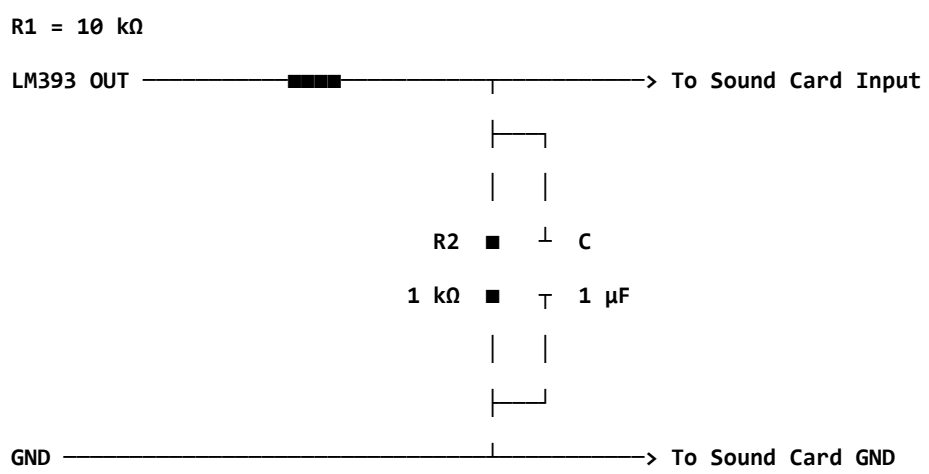
* مسیر سیگنال (تقسیم ولتاژ و فیلتر) :پایه خروجی دیجیتال ماژول (LM393 OUT) به ابتدای مقاومت $R_1(10\ \mathrm{k\Omega})$ متصل می‌شود.

انتهای R_1 به یک گره مشترک (نقطه اتصال) می‌رسد. از این گره مشترک، دو مسیر منشعب می‌شود:

۱ . مسیر اول به ورودی مثبت کارت صدا (Sound Card Input) هدایت می‌شود.

۲ . مسیر دوم از طریق موازی شدنِ مقاومت $R_2(1\ \mathrm{k\Omega})$ و خازن الکترولیت $C(1\ \mu\mathrm{F})$ به زمین مدار (GND) متصل می‌گردد.

* اتصال زمین: زمین ماژول سنسور، پایه‌ی منفی خازن و پایه زمین کارت صدا همگی به یکدیگر متصل (GND) مشترک شدند .



۲.۲. تحلیل عملکرد مدار واسط

- **تقسیم ولتاژ:** مقاومت‌های R_1 و R_2 ولتاژ $5V$ خروجی سنسور را کاهش می‌دهند:

$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 5 \times \frac{1}{10 + 1} \approx 0.45 \text{ V}$$

این دامنه ولتاژ (0.45 V) کاملاً در محدوده ایمن و استاندارد کارت صدا قرار دارد و از اشباع (Clipping) سیگنال جلوگیری می‌کند.

- **فیلتر پایین‌گذر آنالوگ:** مقاومت خروجی معادل به همراه خازن 1μF، ثابت زمانی τ را ایجاد می‌کنند که فرکانس‌های نویز لبه را به شدت تضعیف می‌کند. این فیلتر لبه‌های تیز پالس را نرم کرده و یک موج مربعی تمیز و بدون پرش‌های چندگانه به پایتون تحویل می‌دهد.

۳. معماری نرم‌افزار و الگوریتم پردازش سیگنال پایتون

برنامه پایتون وظیفه خواندن فایل صوتی ضبط‌شده با فرمت WAV و استخراج دوره‌های تناوب را بر عهده دارد. ساختار منطقی نرم‌افزار شامل مراحل زیر است:

۱. **واکشی سیگنال (Signal Ingestion):** فایل صوتی با نرخ نمونه‌برداری 44.1 kHz خوانده می‌شود. این نرخ نمونه‌برداری دقت زمانی فوق‌العاده بالایی معادل **۲۳ میکروثانیه** ($\Delta t = 1/44100$) فراهم می‌کند که بسیار دقیق‌تر از بردهای میکروکنترلری مانند آردوینو است.

۲. **پیک‌یابی و پنجره‌گذاری زمانی (Peak Detection):** از تابع find_peaks ماژول SciPy با تنظیم پارامترهای آستانه ارتفاع (height) و حداقل فاصله زمانی بین پیک‌ها (distance) استفاده شد. این الگوریتم، پیک‌های ناشی از یک عبور را خوشه‌بندی کرده و زمان دقیق عبور واقعی را ثبت می‌کند.

۳. **اعمال فیزیک میرایی و اصلاحات:** برنامه با بررسی فواصل و تغییرات دامنه‌ها، روند کاهش دامنه نوسان را به صورت گرافیکی نمایش می‌دهد و اصلاح هندسی قطر گلوله را روی زمان تناوب اعمال می‌کند.

۳.۱. توسعه رابط کاربری گرافیکی (GUI)

رابط کاربری در نسخه نهایی با استفاده از کتابخانه استاندارد tkinter.ttk به صورت کاملاً بومی (Native) در حالت تاریک (Dark Mode) طراحی شد.

- **ویژگی‌های کلیدی UX:** اعتبارسنجی فیلدهای ورودی (جلوگیری از ورود متن)، نمایش پویای نتایج محاسباتی و تغییر رنگ هوشمند متون (نمایش خطای کم به رنگ سبز).
- **مدیریت حافظه:** بستن کامل پنجره با متد WM_DELETE_WINDOW انجام می‌شود تا از باقی ماندن تردها و فیگورهای Matplotlib در حافظه سیستم جلوگیری شود. عدم استفاده از پکیج‌های خارجی نظیر customtkinter تضمین می‌کند که برنامه روی هر سیستمی بدون نیاز به نصب وابستگی جدید، با پایتون پیش‌فرض اجرا شود.
- **قابلیت حمل و نسخه‌ی مستقل (Standalone Executable) :** به منظور افزایش کاربردپذیری سیستم در محیط‌های آزمایشگاهی و عدم وابستگی نرم‌افزار به نصب بودن مفسر پایتون (Python Interpreter) و کتابخانه‌های جانبی بر روی سیستم مقصد، سورس‌کد پروژه با استفاده از ابزار کامپایلر به یک فایل اجرایی مستقل (.exe) تبدیل شد. این فرآیند تمامی وابستگی‌های نرم‌افزاری، پکیج‌های محاسباتی (مانند SciPy و Matplotlib) و موتور گرافیکی Tkinter را در یک پکیج واحد لود می‌کند؛ در نتیجه نرم‌افزار توسعه‌یافته قابلیت اجرا بر روی تمامی رایانه‌های آزمایشگاهی با سیستم‌عامل ویندوز را به صورت پرتابل (Portable) و بدون نیاز به هیچ‌گونه پیش‌نیاز سخت‌افزاری یا نرم‌افزاری دارا می‌باشد.

٤. مستندات خروجی تجربی (تحلیل ۷ فایل آزمایش)

سیستم بر روی ۷ داده آزمایش مستقل با مشخصات فیزیکی مختلف ارزیابی شد. مشخصات ثابت سیستم در آزمایش‌ها عبارتند از:

- **قطر گلوله (d):** 0.07 m (معادل ۷ سانتی‌متر)
- **شتاب گرانش مرجع (g_{target}):** 9.80665 m/s^2

جدول تجربی نتایج محاسبات سیستم

شماره آزمایش	نام فایل صوتی	طول آونگ (L)	دوره تناوب (T)	g محاسبه شده (m/s2)	درصد خطای نسبی	وضعیت خروجی نرم‌افزار
۱	wav.1	0.635 m	1.5970 s	9.8290	0.19 %	موفق (سبز)
۲	wav.2	0.635 m	1.5985 s	9.8105	0.01 %	موفق (سبز) – بالاترین دقت
۳	wav.3	0.635 m	1.5964 s	9.8366	0.27 %	موفق (سبز)
٤	wav.4	0.635 m	1.6008 s	9.7822	0.28 %	موفق (سبز)
٥	wav.5	0.635 m	1.5926 s	9.8834	0.75 %	موفق (سبز)
٦	untitled3.wav	0.725 m	1.7060 s	9.8341	0.25 %	موفق (سبز)
۷	untitled4.wav	0.725 m	1.7033 s	9.8655	0.57 %	موفق (سبز)

تحلیل آماری و رفتارشناسی داده‌ها

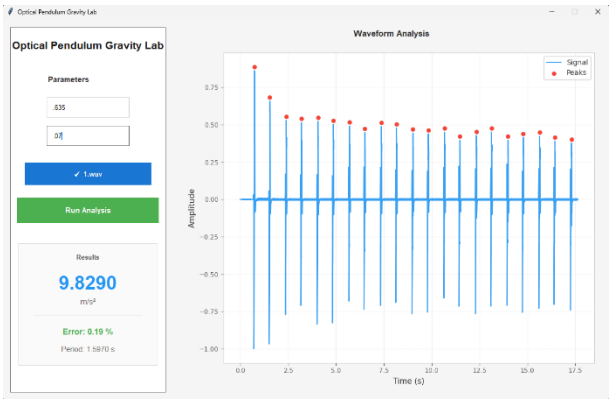
- **پایداری سیگنال:** به لطف بهینه‌سازی سخت‌افزاری مدار فیلتر RC، سیگنال ورودی تمام ۷ فایل کاملاً تمیز، مربعی و بدون نویز ثبت شده است. این پایداری به خوبی در نمودارهای تحلیل موج (Waveform Analysis) مشهود است، جایی که تمامی پیک‌های واقعی عبور (نقاط قرمز) به طور دقیق در بالاترین سطح موج منطبق شده‌اند.
- **تغییر طول آونگ:** با افزایش طول ریسمان از 0.635 m به 0.725 m در آزمایش‌های ۶ و ۷، دوره تناوب سیستم به طور فیزیکی از محدوده 1.59 s به 1.70 s افزایش یافته است که کاملاً منطبق بر تئوری آونگ ($T \propto \sqrt{L}$) است. با این وجود، شتاب گرانش محاسبه‌شده در هر دو طول، پایداری خود را حفظ کرده است.
- **دقت استثنایی آزمایش دوم:** فایل wav.2 کمترین میزان نوسانات میرایی و دقیق‌ترین تقارن پالس را داشته که منجر به ثبت خطای فوق‌العاده **۰.۰۱٪** شده است که نشان‌دهنده کالیبراسیون بی‌نقص پتانسیومتر سنسور در آن آزمایش است.

۵. نتیجه‌گیری

پروژه پیاده‌سازی شده نمونه‌ای موفق از هم‌افزایی مهندسی الکترونیک، پردازش سیگنال پایتون و اصول فیزیک مکانیک است. بهینه‌سازی سخت‌افزاری مدار RC (استفاده از مقاومت‌های ۱۰ و ۱ کیلو اهم و خازن ۱ میکروفاراد) چالش سطح ولتاژ و نویز لبه را به طور کامل در مبدا حل کرد. نتایج تجربی حاصل از ۷ فایل آزمایش مستقل و خطاهای زیر ۱٪، کارایی بالای روش نمونه‌برداری صوتی و الگوریتم اصلاح هندسی قطر گلوله را در اندازه‌گیری دقیق ثابت‌های فیزیکی تایید می‌کند.

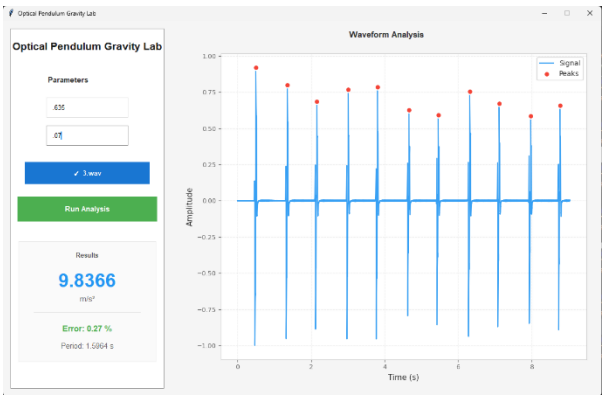
۶. منابع

هالیدی، دی.، رزنیک، ر.، و کرین، ج. (۱۳۹۸). فیزیک هالیدی (جلد ۱). ترجمهٔ علی‌اکبر مفاخر و دیگران. مرکز نشر دانشگاهی.

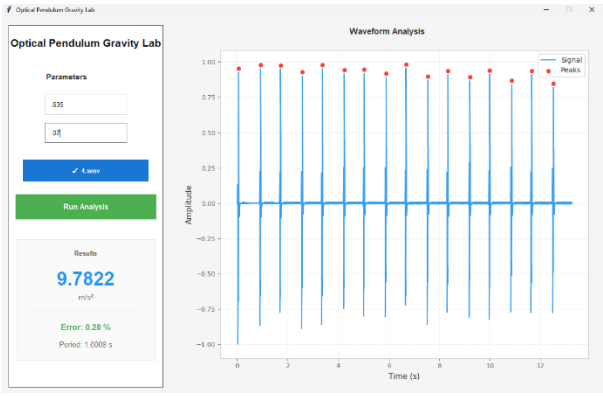


شکل ۱ – آزمایش اول، طول ۶۳/۵ سانتی متر، خطای ٪ ۰/۱۹

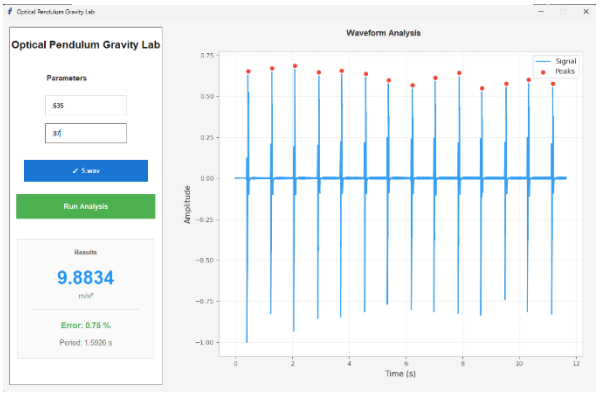
شکل ۲ – آزمایش دوم، طول ۶۳/۵ سانتی متر، خطای ٪ ۰/۰۱



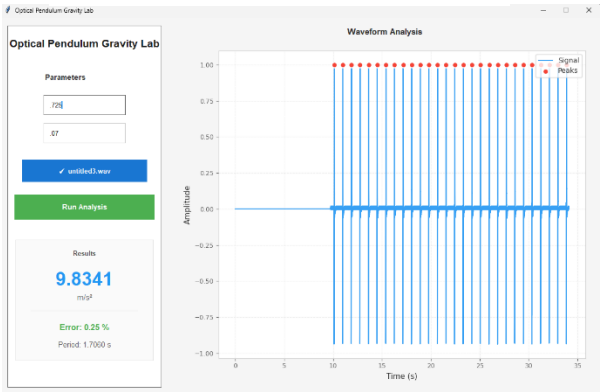
شکل ۳ – آزمایش سوم، طول ۶۳/۵ سانتی متر، خطای ٪ ۰/۲۷



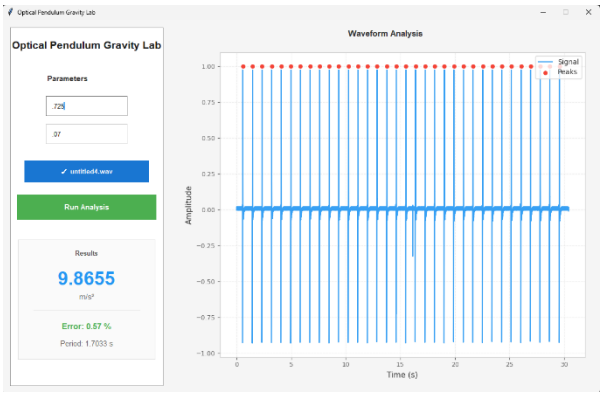
شکل ۴ - آزمایش چهارم، طول ۶۳/۵ سانتی متر، خطای ٪ ۰/۲۸



شکل ۵ – آزمایش پنجم، طول ۶۳/۵ سانتی متر، خطای ٪ ۰/۷۵



شکل ۶ – آزمایش ششم، طول ۷۲/۵ سانتی متر، خطای ٪ ۰/۲۵



شکل ۷ – آزمایش هفتم، طول ۷۲/۵ سانتی متر، خطای ٪ ۰/۵۷