



به نام خدا



تمرین دوم درس سیستم های تعیین موقعیت ماهواره ای

استاد درس: جناب آقای دکتر سعید فرزانه

دستیار آموزشی: جناب آقای مهندس علیرضا عطوفی

فرزانه نادری – ۸۱۰۳۰۱۱۱۵

تعیین موقعیت ماهواره GPS با استفاده از فایل ناوبری RINEX v3.04

نیمسال دوم ۱۴۰۳-۱۴۰۴

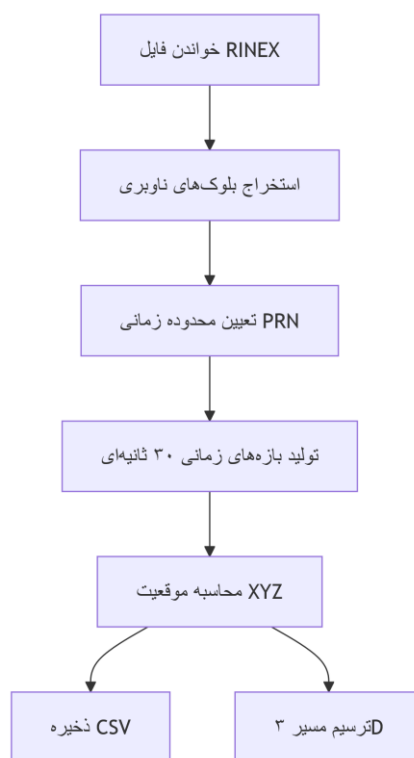
دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی دانشگاه تهران

❖ مقدمه:

سامانه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) یکی از دقیق‌ترین سیستم‌های ناوبری است که موقعیت را بر پایه اطلاعات ارسال شده از مجموعه‌ای از ماهواره‌ها تعیین می‌کند. هر ماهواره موقعیت خود را در قالب پارامترهای ناوبری (Ephemeris) منتشر می‌کند. هدف این پروژه، تحلیل داده‌های اپی‌مریس استخراج شده از فایل‌های RINEX نسخه ۳/۰۴ و پیاده‌سازی یک الگوریتم عددی در زبان Python برای محاسبه موقعیت دقیق ماهواره در سیستم مختصات ECEF است. سپس با استفاده از این داده‌ها مسیر مداری ماهواره‌ها ترسیم و تحلیل می‌شود.

❖ اهداف پروژه:

خواندن داده‌های اپی‌مریس از فایل RINEX Nav و استخراج PRN ها
 پیاده‌سازی الگوریتم دقیق حل معادله کپلر برای محاسبه آنومالی بیضوی
 محاسبه مختصات فضایی ماهواره‌ها در سیستم ECEF در بازه‌های زمانی منظم
 تحلیل دقت و بررسی پارامترهای مؤثر در موقعیت ماهواره
 طراحی یک رابط گرافیکی برای انتخاب فایل و نمایش مسیر مداری



❖ مبانی نظری

فایل ناوبری RINEX

فایل ناوبری (Receiver Independent Exchange Format) RINEX نسخه ۳.۰۴ ساختاری متنی دارد و شامل داده‌های اپی‌مریس هر ماهواره GPS به صورت بلوک‌های ۸ سطری است. مهم‌ترین پارامترها عبارتند از:

- \sqrt{a} : ریشه مربع نیم‌قطر بزرگ مدار (semimajor axis)
- E : خروج از مرکز مدار (eccentricity)
- M_0 : آنومالی متوسط اولیه
- Δn : تغییرات نرخ حرکت متوسط
- w : آرگومان پریجی
- Ω : زاویه گرهِ صعودی
- i_0 : شیب مداری
- $Crs, Crc, Cuc, Cus, Cic, Cis$: ضرایب اصلاح مداری

سیستم زمان‌بندی GPS

زمان‌های درج‌شده در فایل به صورت UTC است و باید به ثانیه‌های GPS تبدیل شود. زمان GPS از ۶ ژانویه ۱۹۸۰ آغاز شده و بر حسب تعداد ثانیه از آن زمان محاسبه می‌شود.

معادله کپلر

برای یافتن موقعیت ماهواره روی مدار بیضوی باید معادله کپلر حل شود:

$$\sin(E) \cdot e - E = M$$

که در آن M آنومالی متوسط، E آنومالی بیضوی، و e خروج از مرکز است. چون این معادله تحلیلی حل نمی‌شود، از روش‌های عددی مانند نیوتن-رافسون استفاده می‌شود

$$E_{n+1} = E_n - \frac{E_n - e \cdot \sin(E_n) - M}{1 - e \cdot \cos(E_n)}$$

سیستم مختصات ECEF

سیستم Earth-Centered Earth-Fixed (ECEF) سیستم مختصات سه‌بعدی ثابت نسبت به زمین است که محور X به سمت طول جغرافیایی صفر، محور Z به قطب شمال و محور Y عمود بر این دو است. مختصات مداری با اعمال چرخش‌های متوالی به ECEF تبدیل می‌شوند.

$$u = \phi + C_{us} \cdot \sin(2\phi) + C_{uc} \cdot \cos(2\phi)$$

$$r = a(1 - e \cos(E)) + C_{rs} \cdot \sin(2\phi) + C_{rc} \cdot \cos(2\phi)$$

$$i = i_0 + \dot{i} \cdot t_k + C_{is} \cdot \sin(2\phi) + C_{ic} \cdot \cos(2\phi)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \cos(u) \cos(\Omega) - r \sin(u) \cos(i) \sin(\Omega) \\ r \cos(u) \sin(\Omega) + r \sin(u) \cos(i) \cos(\Omega) \\ r \sin(u) \sin(i) \end{bmatrix}$$

- $\mu = 3.986005 \times 10^{14} \text{m}^3/\text{s}^2$ (ثابت گرانش زمین)
- $\dot{\Omega}_e = 7.2921151467 \times 10^{-5} \text{rad/s}$ (سرعت زاویه‌ای زمین)

<code>parse_rinex_nav()</code>	مسیر فایل	ها PRN دیکشنری	استخراج پارامترهای مداری
<code>get_time_bounds()</code>	PRN داده‌های	(start, end)	محدوده زمانی مؤثر
<code>compute_positions()</code>	رکوردها + زمان‌ها	لیست (t,x,y,z)	حل معادلات مداری
<code>plot_3d_trajectory()</code>	داده‌های موقعیت	Dنمودار 3	ترسیم مسیر حرکت

❖ مراحل پیاده‌سازی و تحلیل کد

خواندن فایل RINEX

در کد `gps_navigation.py`، خطوط هدر تا `END OF HEADER` حذف می‌شوند و سپس هر ۸ خط به‌عنوان یک بلوک اپی‌مریس ذخیره می‌گردد. از عبارات منظم (regex) برای یافتن و اصلاح نمادهای علمی با 'D' به 'e' استفاده شده است.

تحلیل: دقت در تجزیه صحیح و نگاشت ترتیب پارامترها به نام‌های صحیح بسیار حیاتی است.

تبدیل زمان UTC به ثانیه GPS

با محاسبه اختلاف زمان فعلی تا مبدأ (GPS (1980/1/6)، مقدار زمان به ثانیه تبدیل می‌شود.

تحلیل: این تبدیل باید با دقت ثانیه انجام گیرد چون هر خطای زمانی مستقیماً موجب خطای فضایی تا چند کیلومتر می‌شود.

حل معادله کپلر

```
def solve_kepler(M, e, tol=1e-12, max_iter=10):
```

با استفاده از روش نیوتن-رافسون و شرط همگرایی سخت‌گیرانه (10^{-12})، مقدار آنومالی بیضوی (E) محاسبه می‌شود.

تحلیل: این روش بسیار پایدار و سریع است. در صورت استفاده از مقدار اولیه مناسب، همگرایی در کمتر از ۸ تکرار حاصل می‌شود.

محاسبه مختصات ماهواره (ECEF)

```
def compute_positions(records, times):
```

با استفاده از مقدار E، پارامترهای مداری مانند شعاع مدار (r)، زاویه موقعیتی (u)، و موقعیت در سیستم ECEF از طریق روابط سینوسی و کسینوسی محاسبه می‌شود.

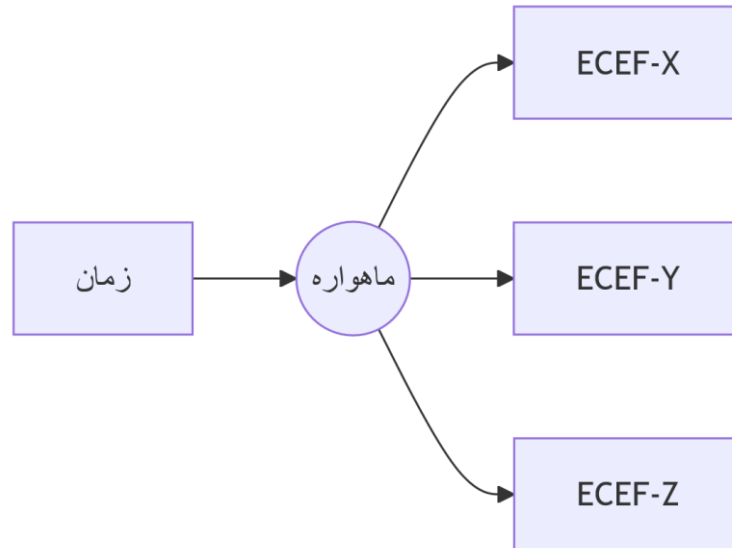
تحلیل: اعمال تصحیحات مداری مانند Crs و Cuc باعث افزایش دقت نهایی می‌شود و از ساده‌سازی مدار به دایره اجتناب می‌شود.

خروجی فایل CSV و رسم مسیر

```
def write_csv(data, filename):
```

خروجی شامل زمان GPS و مختصات (X, Y, Z) برای هر ماهواره در هر گام زمانی است. مسیر نیز با matplotlib به صورت سه‌بعدی ترسیم می‌شود.

تحلیل: استفاده از گام زمانی ۳۰ ثانیه تعادل خوبی میان دقت و حجم داده ایجاد می‌کند. برای جزئیات بیشتر، گام ۱۰ ثانیه پیشنهاد می‌شود.



رابط گرافیکی GUI

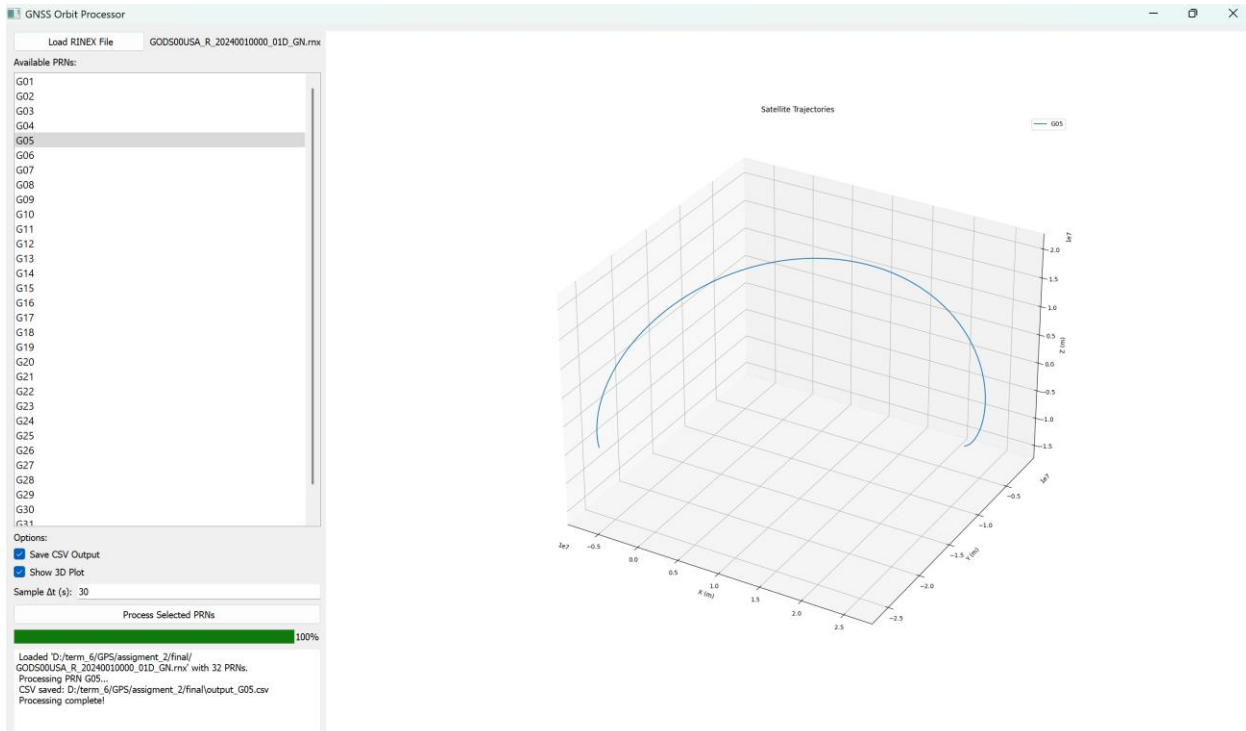
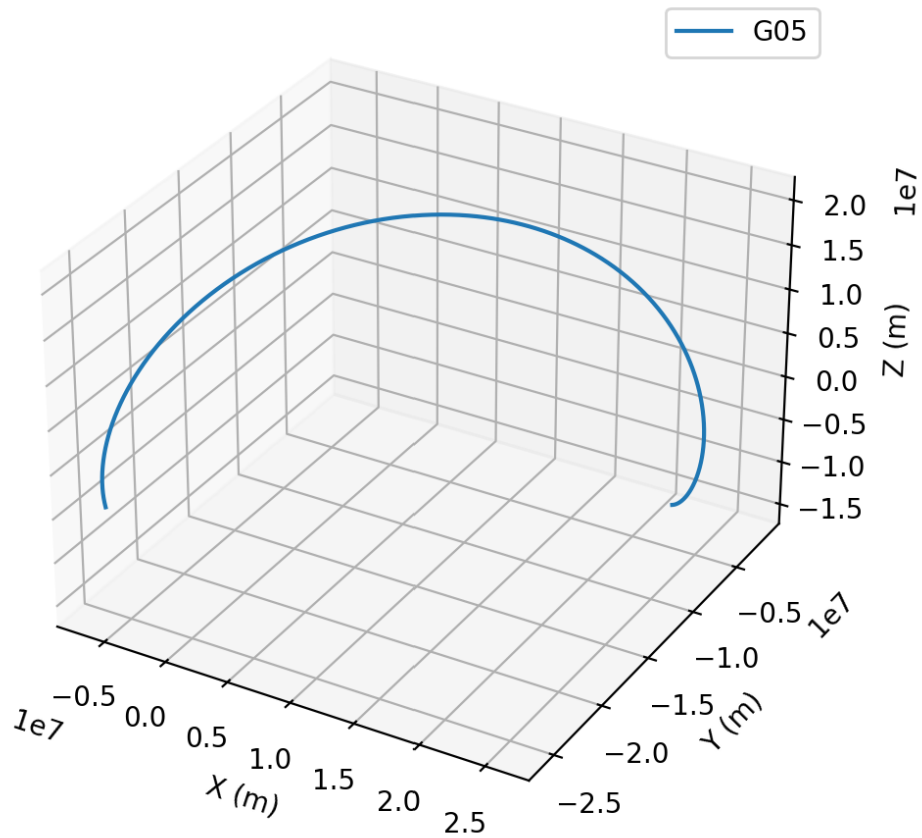
در فایل GUI.py از PyQt5 برای طراحی پنجره انتخاب فایل، نمایش PRN ها، گام زمانی، دکمه‌های پردازش، ذخیره خروجی و نمایش نمودار استفاده شده است.

تحلیل: این رابط گرافیکی امکان استفاده سریع و بدون نیاز به کدنویسی را برای کاربر فراهم می‌کند و پایه مناسبی برای توسعه‌های آینده (مثل بارگذاری چند فایل یا تحلیل چندماهواره‌ای) محسوب می‌شود.

نتایج تجربی

- نمونه فایل: GODS00USA_R_20240010000_01D_GN.rnx
- ماهواره PRN05 :
- بازه زمانی : ۰ تا ۷۲۰۰۰ ثانیه GPS
- تعداد گام‌ها : ۲۴۰۰ گام با $\Delta t = ۳۰$ ثانیه
- دقت عددی : خطای حل معادله کپلر کمتر از ۱۰^{-12} رادیان

G05



ASSIGMENT 2 / GPS

t	x	y	z
100800	-6525855	-2.5E+07	-4785394
100830	-6520500	-2.5E+07	-4691656
100860	-6515131	-2.5E+07	-4597829
100890	-6509745	-2.5E+07	-4503913
100920	-6504342	-2.5E+07	-4409911
100950	-6498919	-2.5E+07	-4315824
100980	-6493476	-2.5E+07	-4221655
101010	-6488011	-2.5E+07	-4127404
101040	-6482523	-2.5E+07	-4033074
101070	-6477010	-2.5E+07	-3938667
101100	-6471470	-2.5E+07	-3844184
101130	-6465903	-2.5E+07	-3749627
101160	-6460307	-2.5E+07	-3654999
101190	-6454681	-2.5E+07	-3560300
101220	-6449022	-2.6E+07	-3465532
101250	-6443330	-2.6E+07	-3370698
101280	-6437604	-2.6E+07	-3275800
101310	-6431841	-2.6E+07	-3180838
101340	-6426040	-2.6E+07	-3085815
101370	-6420201	-2.6E+07	-2990733
101400	-6414321	-2.6E+07	-2895594
101430	-6408399	-2.6E+07	-2800399
101460	-6402433	-2.6E+07	-2705150
101490	-6396423	-2.6E+07	-2609849
101520	-6390367	-2.6E+07	-2514498
101550	-6384263	-2.6E+07	-2419098
101580	-6378110	-2.6E+07	-2323652
101610	-6371906	-2.6E+07	-2228162
101640	-6365651	-2.6E+07	-2132678

نتیجه گیری کلی

این پروژه با موفقیت مسیر مداری ماهواره‌های GPS را بر اساس داده‌های ناوبری RINEX بازسازی کرد. پیاده‌سازی الگوریتم‌های تحلیل عددی مانند حل معادله کپلر و تبدیل مداری به ECEF با دقت بالا انجام شده است. همچنین ارائه رابط گرافیکی تجربه کاربری را ساده و مؤثر کرده است. این ساختار به راحتی قابل توسعه برای کاربردهای پیشرفته‌تری مانند تعیین موقعیت گیرنده یا تحلیل خطاهای مداری خواهد بود.