Vol. 5, No. 3, 2012

JSST
Journal of Space Science & Technology

GPS Signal Simulation in Intermediate Frequency (IF)

Shervin Amiri[1*], Mohammad Ali Dalir[2] and Hossein Talaiee[3]

1. Electrical and Information Technology Institute, Iranian Research Organization for Science & Technology (IROST)

2. Department of Institute for Higher Education Allame-dehkhoda of Gazvin

3. Department of Electrical Engineering, Amirkabir University of Technology

*P.O. Box: 37575-115, Tehran, IRAN

amiri@irost.org

The NAVSTAR Global Positioning System (GPS) is a satellite-based navigation and positioning system which includes a constellation of 32 satellites, remote control stations and its receivers and can be used for determination the geographical positions of its users. GPS signal simulator needs for test and verification of GPS receiver's performances in special applications at the Laboratory. For this mission we should simulate the various static and dynamic scenarios for GPS receiver tracks and generate GPS signals for all the satellites. For GPS signals, generation of all its elements like the Navigation messages, C/A codes, frame and subframe structures should be defined and used in this project.

Keywords: GPS Signal, Navigation data, C/A code, Simulator

1. Assistant Professor (Corresponding Author)
2. M.Sc.
3. M. Sc. Student

Recived: 2011.09.21 , Accepted: 2012.08.13

JSST
فصلنامهٔ علمی - پژوهشی علوم و فناوری فضایی

جلد ۵ / شمارهٔ ۳ / پاییز ۱۳۹۱
ص. ص ۴۰- ۳۳

شبیه‌سازی سیگنال ماهواره‌های GPS در فرکانس میانی

شروین امیری[۱*]، محمدعلی دلیر[۲] و حسین طلایی[۳]

۱- پژوهشکدهٔ مهندسی برق و فناوری اطلاعات، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران

۲- مؤسسهٔ آموزش عالی علامهٔ دهخدا

۳- دانشگاه مهندسی برق و مخابرات، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

*تهران، صندوق پستی ۱۱۵- ۳۷۵۷۵

amiri@irost.org

سیگنال ارسالی از ماهواره‌های GPS به سمت زمین سه جزء موج حامل، دیتای پیام ماهواره و کد C/A دارد. موج حامل L1 دارای فرکانس ۱۵۷۵/۷۵ مگاهرتز و کد C/A شامل ۱۰۲۳ بیت است که هر ۱ میلی ثانیه تکرار می‌شوند. مطالعهٔ دقیق این سه مؤلفه امکان شبیه‌سازی سیگنال ماهوارهٔ GPS را فراهم می‌کند. با استفاده از این شبیه‌ساز می‌توان انواع موقعیت‌های استاتیکی و دینامیکی را برای گیرنده‌های GPS تحت آزمون شبیه‌سازی کرد. در تدارک موقعیت و مسیر گیرنده و تعیین ماهواره‌های در دسترس و استخراج فواصل مجازی بین ماهواره‌ها تا گیرنده از نرم‌افزار STK استفاده شده است که دقت بالایی دارد. خروجی این شبیه‌سازی یک فایل باینری حاوی دیتای پیام کلیهٔ ماهواره‌ها به همراه کد C/A آنهاست که آمادهٔ مدوله‌کردن سیگنال کریر در سیگنال ژنراتور است.

واژه‌های کلیدی: سیگنال GPS، دیتای پیام، کدC/A

علائم و اختصارات

توان سیگنال	$\sqrt{2p_t}$
دیتای پیام ماهواره	D_i
کد شبه‌تصادفی (C/A)	C_i
فرکانس حامل سیگنال ماهواره	f_L

مقدمه

شبیه‌سازی دیتای پیام و کد C/A ماهواره‌های GPS نیازمند مطالعات جامع دربارهٔ محتوای دیتای ارسالی، چینش، فرمت و نرخ ارسال قاب‌ها و ... است تا بتوانیم آن را تولید کنیم. در شکل (۱) چیدمان داده‌های ارسالی آورده شده است. همچنین تسلط کامل به نرم‌افزارهای پیاده‌سازی شامل C برای آماده‌سازی دیتای خام اولیه STK[۴]برای پیاده‌سازی الگوریتم مسیر، C# برای تدارک interface مناسب الزامی است.

شبکهٔ ماهواره‌ای GPS

شبکهٔ ماهواره‌ای GPS متشکل از ۳ زیرمجموعهٔ فضایی، کنترل و کاربران شبکه است. زیرمجموعهٔ فضایی متشکل از ۳۲ ماهواره در فضاست که از این تعداد ۲۴ ماهواره در مدار چرخش قرار دارند و مرتباً سیگنال به سمت زمین ارسال می‌کنند.

زیرمجموعهٔ کنترل شامل ۵ ایستگاه زمینی است که در مراکزی با عرض جغرافیایی معین در نقاط مختلف کرهٔ زمین نصب شده و اطلاعات ماهواره‌ها را جمع‌آوری می‌کند و به ایستگاه اصلی در کلورادو آمریکا ارسال می‌کنند. این ایستگاه دیتای لازم و فرامین مرتبط با مدار چرخش ماهواره‌ها را در باند S برای آنها ارسال می‌کند.

زیرمجموعهٔ سوم کاربران یا گیرنده‌های GPS هستند که وظیفهٔ

۱. استادیار (نویسنده مخاطب)
۲ . کارشناس ارشد
۳ . دانشجوی کارشناسی ارشد

4. Satellite toolkit

دریافت مقاله: ۹۰/۰۶/۳۰ ، تأیید مقاله: ۹۱/۰۵/۲۳

دریافت و آنالیز اطلاعات و استخراج موقعیت جغرافیایی، سرعت و زمان را بر عهده دارند.

سیگنال ماهوارهٔ GPS

سیگنال ارسالی ماهواره شامل ۳ مؤلفه است. اولین مؤلفه کدهای شبه‌تصادفی است که به کد C/A معروف است. دومین مؤلفه دیتای پیام است که اطلاعات مربوط به موقعیت مداری ماهواره‌ها (که به اطلاعات افمریس ماهواره معروف است) در آن قرار دارد. سومین مؤلفه هم موج حامل سیگنال است. هر ماهواره از ۲ موج در فرکانس‌های ۱۵۷۵مگاهرتز و ۱۲۲۷ مگاهرتز که به L1 و L2 معروفند استفاده می‌کند. این سه مؤلفه سیگنال را می‌توان در قالب فرمول زیر بیان کرد:

$$S_{Li} = \sum_{n=1}^{k} \sqrt{2p_i} D_i(t) \times C_i(t) \cos(\omega_L(t)) \qquad (۱)$$

در رابطهٔ (۱)، مؤلفهٔ $\sqrt{2p_t}$ توان سیگنال، D_i دیتای پیام ماهواره، C_i کد شبه‌تصادفی (C/A) و f_L هم فرکانس حامل سیگنال ماهواره است.

برای اینکه یک کاربر بتواند موقعیت خود را به‌طور مستقل به‌دست بیاورد باید سیگنال‌های ارسال شده از حداقل چهار ماهواره در دید خود را دریافت کند و با اندازه‌گیری تأخیر زمانی هر یک از سیگنال‌های دریافتی و محاسبهٔ فاصلهٔ مجازی خود تا ماهواره‌ها به محاسبهٔ موقعیت جغرافیایی (شامل طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع) و نیز سرعت و جهت حرکت خود بپردازد. به‌منظور تفکیک سیگنال‌های ماهواره‌های مختلف از یکدیگر که همگی در یک فرکانس در حال ارسال هستند از کدهای منحصربه‌فرد و شبه‌تصادفی (C/A) استفاده می‌شود.

کد C/A یا کدهای تصادفی شبه‌نویز

کدهای C/A رشته‌هایی باینری با ماهیتی تصادفی و معروف به PRN[5] هستند که برای کلیه ماهواره‌ها به‌طور تصادفی به‌طور همزمان تولید و ارسال می‌شوند. ماهیت تصادفی و شبه‌نویزبودن این کدها سیگنالینگ در شبکهٔ ماهواره‌ای را به‌صورت طیف گسترده تبدیل کرده و مانع از تداخل و اثرپذیری سیگنال‌های هم فرکانس بر یکدیگر خواهد شد. هر ماهواره کد مخصوص به خود را تولید می‌کند. در گیرندهٔ GPS نیز مشابه همین کدها دائماً تولید و با تطبیق این رشته با سیگنالی که از ماهواره دریافت شده تعیین می‌شود- چه سیگنالی از کدام ماهواره ارسال شده است. با دانستن زمان دقیق ارسال این سیگنال، مدت زمانی‌که سیگنال در راه است و بنا بر این فاصله، بین ماهواره و گیرنده قابل اندازه‌گیری است. هر ماهواره ۲ کد PRN مختلف را تولید می‌کند:

۱. کد C/A[6]
۲. کد P[7]

کد P تنها برای گیرنده‌های نظامی قابل دسترس است و کاربران معمولی توانایی رمز گشایی آن را ندارند و موضوع بحث ما در این مقاله نیست.

کد C/A یک رشته از ۱۰۲۳ عدد باینری (یا chip) است که در هر یک میلی ثانیه تکرار می‌شود. بنابراین فرکانس تولید و ارسال هر چیپ باید ۱/۰۲۳ مگاهرتز باشد. هر چیپ روی موج کریر با سرعت نور سوار شده و در هر یک میکرو ثانیه مسافتی برابر با ۳۰۰ متر را طی می‌کند.

از سویی ساعت اتمی ماهواره‌های GPS فرکانس دقیق ۱۰/۲۳ مگاهرتز دارد و نرخ تولید و ارسال کدهای C/A و پهنای باند ارسالی همگی مضاربی از این ساعت اتمی هستند. طیف فرکانسی سیگنال رادیویی مدوله شده با کد C/A با نرخ چیپ ۱/۰۲۳ مگاهرتز لوب اصلی با پهنای ۲/۰۴۶ مگاهرتز در طیف فرکانسی دارد. عرض زمانی هر چیپ تقریباً ۹۷۷/۵ نانوثانیه و پهنای باند ارسالی از ماهواره GPS در فرکانس L1 تقریباً ۲۰ مگاهرتز است.

نحوهٔ تولید کدهای C/A

کدهای C/A از خانوادهٔ کدهای طلایی[8] هستند. این کدها با ترکیبی از دو کد G1 و G2 ۱۰۲۳ بیتی به روش زیر تولید می‌شوند.

در این روش از دو مولد کد خطی شیفت رجیستری مرتبهٔ ۱۰ با کلاک ۱/۰۲۳ مگاهرتز استفاده می‌شود. قاعدهٔ کلی این دو مولد شبیه یکدیگر است بنابراین فقط روی مولد G2 متمرکز می‌شویم. ماکزیمم طول جملات (MLS) مولد می‌تواند با یک شیفت رجیستر با فیدبک مخصوص ایجاد شود. اگر شیفت رجیستر n بیتی باشد طول جملات تولید شده $2^n - 1$ خواهد بود. هر دو شیفت رجیستر G1 و G2 ۱۰ بیتی هستند، بنابراین طول جملات $2^{10} - 1$ یا ۱۰۲۳ بیت خواهد بود. مدار فیدبک یک جمع‌کنندهٔ مادول ۲ است. روش عملکردی این جمع کننده در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱- مادول جمع‌کنندهٔ ۲

ورودی ۱	ورودی ۲	تولید
۰	۰	۰
۰	۱	۱
۱	۰	۱
۱	۱	۰

5. Pseudo-random noise

6. Coarse/acquisition code
7. Precision code
8. Golden codes

وقتی هر دو ورودی شبیه همدیگرند (یا صفر یا یک) خروجی صفر و در غیراین‌صورت ۱ خواهد بود. موقعیت مدار فیدبک تعیین‌کنندهٔ فرم خروجی جملات خواهد بود. فیدبک G1 از بیت‌های ۳ و۱۰ است که در شکل (۱) نشان داده شده است. مترادف چند جمله‌ای آن می‌تواند به‌صورت زیر نوشته شود:

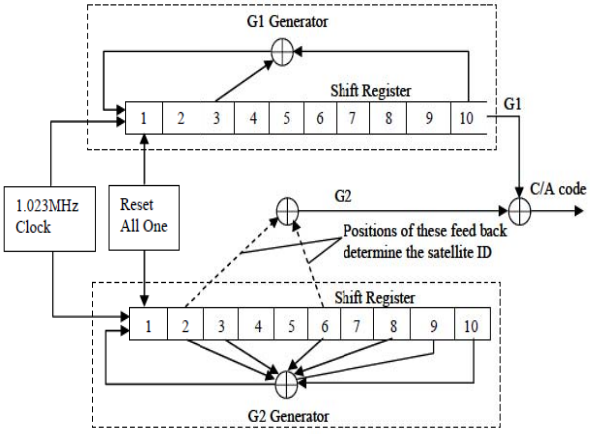
$$G1 = 1 + X^3 + X^{10}$$

فیدبک G2 هم از بیت‌های ۲، ۳، ۶، ۸، ۹ و ۱۰ است که در شکل آورده شده است و مترادف چندجمله‌ای زیر است.

$$G2 = 1 + X^2 + X^3 + X^6 + X^8 + X^9 + X^{10}$$

عموماً خروجی از آخرین بیت شیفت رجیستر خروجی استخراج می‌شود.

شکل (۱) مولد کد C/A را برای فرکانس L1 نشان می‌دهد. مقادیر اولیهٔ هر دو شیفت رجیستر G1 وG2 یک است که ابتدا در رجیستر بارگذاری می‌شود. کد شناسه ماهواره از خروجی‌های مولد G2 تعیین می‌شود. این مولد امکان تولید ۳۷ کد منحصربه‌فرد را دارد. ۳۲ کد از این ۳۷ خروجی به کدهای C/A ۳۲ ماهواره اختصاص دارد (که فقط ۲۴ ماهواره به‌طور همزمان در فضا هستند) و ۵ خروجی دیگر رزرو بوده و برای سایر کاربری‌ها از قبیل ارسال اطلاعات خاص تله‌متری به ایستگاه‌های کنترل زمینی به‌کار می‌روند.



شکل ۱- مولد کد C/A [۱]

در جدول (۲) نحوهٔ کارکرد و تخصیص کد به ماهواره‌ها تشریح شده است. اولین ستون شمارهٔ ماهواره و از ۱ تا ۳۲ است. ستون دوم کد PRN متناظر با هر ماهواره (از ۱ تا ۳۲) و ستون سوم انتخاب فاز کد و ستون چهارم اختلاف فاز متناظر با هر کد را شامل می‌شود. این اختلاف فازها به خروجی مولد G2 اعمال می‌شود. ستون آخر جدول ۱۰ بیت اول کد C/A تولید شده نمونهٔ ماهواره‌ها را به فرمت اکتال به عنوان نمونه نمایش می‌دهد.

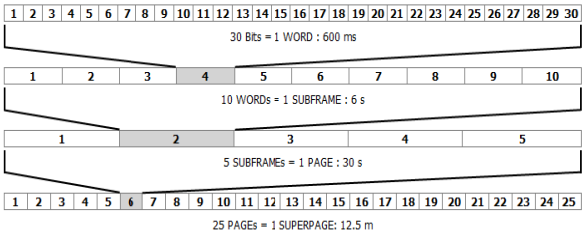
جدول ۲- جدول تخصیص کد نمونه به ماهواره‌ها

Satellite ID	PRN GPS	Code Phase	Code Delay Chip	First 10 Chip C/A
۱	۱	۲+۶	۵	۱۴۴۰
۲	۲	۳+۷	۶	۱۶۲۰
۳	۳	۴+۸	۷	۱۷۱۰
۴	۴	۵+۹	۸	۱۷۴۴

ساختار دیتای پیام ناوبری

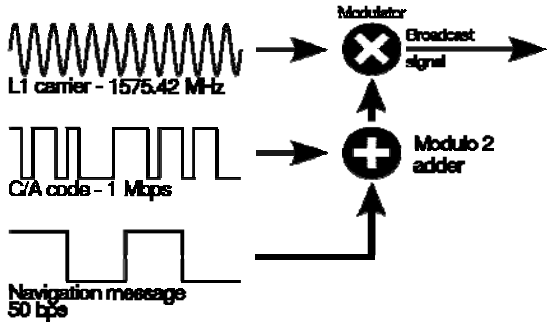
اطلاعات افمریس هر ماهواره در قالب دیتای پیام ارسال می‌شود و شامل اطلاعات با دقت بالایی از پارامترهای مدار چرخش ماهواره، ضرایب اصلاح کلاک یا ساعت اتمی آن و سلامت یا عدم سلامت ماهواره‌ها و ضرایب اصلاح خطاهای یونسفری است. اطلاعات افمریس برای موقعیت‌یابی ضروری است یعنی بدون این قسمت گیرندهٔ GPS قادر به مکان‌یابی نیست.

دیتای آلماناک هم شامل اطلاعات افمریس ماهواره‌ها با دقت پایین‌تر برای همهٔ ماهواره‌های در چرخش است. دیتای آلماناک اجازه می‌دهد تا گیرنده موقعیت ماهواره‌ها را برای هر ساعت از شبانه‌روز تعیین کند. در شکل (۲) فرمت دیتای پیام ارسالی از هر ماهواره آورده شده است.



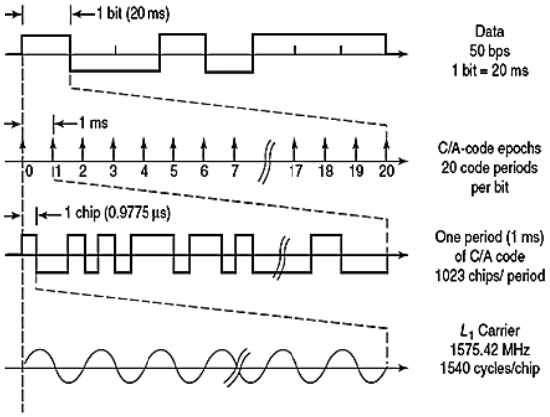
شکل ۲- چیدمان پارامترهای ارسالی هر ماهوارهٔ GPS

دیتای پیام ناوبری GPS بعد از جمع‌شدن با کد C/A روی سیگنال‌های حامل L1 و L2 با فرکانس‌های ۱۵۷۵ مگاهرتز و ۱۲۲۷ مگاهرتز با مدولاسیون شیفت فاز باینری (BPSK) مدوله می‌شود (شکل ۳).



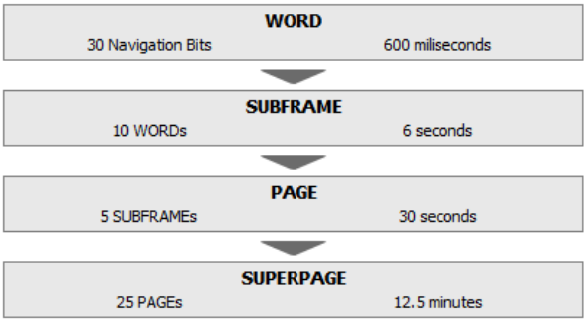
شکل ۳- دیاگرام تولید سیگنال ماهوارهٔ GPS در باند L1

داده‌ها در قالب super page ارسال می‌شود. هرsuper page شامل ۲۵ page است. هر page یا قاب شامل ۵ زیرقاب و هر زیرقاب از ۱۰ word و هر word شامل۳۰ بیت دیتای ناوبری مربوط به ماهواره است (شکل ۴).



شکل۴- مراحل تولید سیگنال ارسالی ماهواره

شکل (۵) زمان لازم برای ارسال اطلاعات افمریس[9] ماهواره‌ها را نشان می‌دهد. هر قالب اصلی[10] به دوازده و نیم دقیقه برای ارسال کامل نیازمند است. هر قاب ۳۰ ثانیه، هر زیر قاب ۶ ثانیه، هر word ۶۰۰ میلی‌ثانیه و در نهایت هر بیت دیتای پیام ۲۰ میلی‌ثانیه زمان نیاز دارد. به‌عبارتی نرخ تولید و ارسال دیتای پیام ماهواره‌ها ۵۰ بیت در ثانیه است.

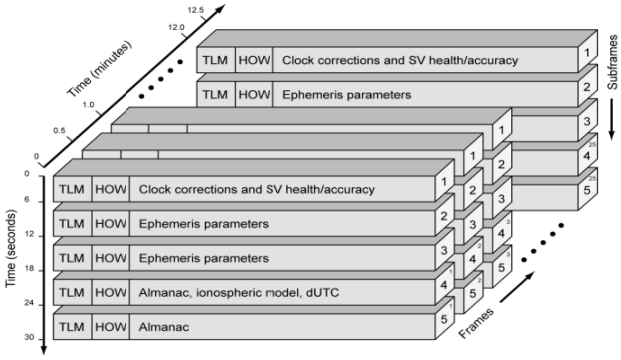


شکل ۵- حجم اطلاعات و زمان ارسال دیتای افمریس ماهواره

همانگونه که گفته شد، هر قاب از ۵ زیرقاب مساوی تشکیل شده است. هر ماهواره در زیرقاب ۱ تا ۳ اطلاعات مربوط به موقعیت و سرعت خود، ضرایب اصلاح کلاک ماهواره و پارامترهای اصلاح یونوسفر خود را ارسال می‌کند. زیرقاب‌های ۴ و ۵ شامل اطلاعات آلماناک برای مجموعهٔ ماهواره‌هاست. ارسال دیتای آلمانک مجموعه ماهواره‌ها نیازمند ارسال ۲۵ زیرقاب ۴ و ۵ است که تقریباً ۱۲/۵دقیقه (۵×۲۵×۶S) زمان لازم دارد تا دیتای پیام کل ماهواره‌ها به زمین ارسال شود (شکل ۶).

هر زیرقاب در مجموع از ۳۰۰ بیت تشکیل شده است که در گروه‌های ۳۰ بیتی که word نام دارد طبقه‌بندی شده است. در هر word ۲۴ بیت دیتا قرار دارد و ۶ بیت باقی‌مانده هم بیت‌های پریتی هستند. این بیت‌های پریتی به‌منظور پشتیبانی از دیتای پیام در برابر بیت‌های خطا اضافه می‌شوند. دو word اول هر زیرقاب شامل wordهای TLM (اطلاعات مسافت‌سنجی) و HOW (زمان) است. از ویژگی‌های جزیی‌تر در چیدمان دیتا می‌توان به نکات زیر اشاره کرد:

۱. بیت‌های مقدمه در word اول هر زیرقاب ۱۰۰۰۱۰۱۱ است.
۲. دو بیت ۲۹ و ۳۰ از word HOW آخر با صفر پر می‌شود.
۳. شماره زیرقاب (عددی بین ۱ تا ۵) از HOW استخراج می‌شود.
۴. معیار ماهواره در دید زاویه رؤیت از افق ۵ درجه است.



شکل ۶- کل دیتای ارسالی ماهواره ،زیرقاب ۱ تا ۳ شامل دیتای خود ماهواره و زیرقاب ۴ و ۵ اطلاعات بقیهٔ ماهواره ها

گام بعدی در شبیه‌سازی و چینش دیتای پیام جایگذاری اطلاعات مربوط به زمان است که در word HOW قرار می‌گیرد. مبدأ آغازین این زمان که GPS Time نامیده می‌شود ۶ ژانویه ۱۹۸۰ است و زمان هفتگی TOW را می‌توان از آن استخراج کرد. زمان در word HOW، ۱۷ بیتی است و واحد آن ۶ ثانیه‌ای است. یعنی اگر زمان یک هفته را بر حسب ثانیه حساب کنیم (۷×۲۴×۳۶۰۰=۶۰۴۸۰۰S) و اگر این عدد را به ۶ تقسیم کنیم به عدد ۱۰۰۸۰۰ خواهیم رسید که در ارسال ماهواره‌ها از آن استفاده می‌شود و این عدد یک عدد ۱۷ بیتی است که در محل تعیین شده قرار می‌گیرد.

ملاحظات مربوط به شبیه‌سازی و الگوریتم تولید سیگنال

محتوای اطلاعاتی سیگنال‌های GPS به دو دسته تقسیم می‌شوند. دستهٔ اول کد C/A و دستهٔ دوم اطلاعات پیام ناوبری ماهواره که شامل

9. Ephemeries
10. Super page

اطلاعات مربوط به موقعیت مداری ماهواره، اطلاعات مربوط به زمان و ساعت ماهواره، اطلاعات مربوط به شماره ماهواره و اطلاعات مربوط به ضریب دقت آرایش هندسی ماهواره‌هاست. برای شبیه‌سازی سیگنال ماهواره، ابتدا باید محتوای اطلاعات در پیام ارسالی از ماهواره را تحلیل و چگونگی چینش wordها و تشکیل زیرقاب‌ها را استخراج کنیم.

اطلاعات جزیی‌تر مرتبط با دقت محاسبات در برخی از wordها قرار دارد. به طور مثال در زیرقاب یک، wordهای ۳ تا ۱۰ اطلاعاتی از قبیل شماره هفته (که مربوط به تعداد هفته‌ها از تاریخ ۶ ژانویه ۱۹۸۰ است و هر ۱۰۲۳ هفتهٔ بازنویسی مجدد می‌شود)، دقت ماهواره[11] که به اختصار با SA نمایش داده می‌شود، تأخیر تفاضلی گروهی ماهواره و در نهایت ضرایب تصحیح کلاک ماهواره (af0, af1, af2, Toe) قرار دارند.

این داده‌ها علاوه بر موقعیت‌یابی کاربردهای دیگری هم دارند که می‌توان به استفاده از ضرایب تصحیح کلاک ماهواره در اصلاح خطای ساعت ماهواره اشاره کرد.

حال که با بخشی از محتوای سیگنال پیام آشنا شدیم به دیتای افمریس و آلمانک که در تولید دیتای پیام استفاده می‌شوند می‌پردازیم. اطلاعات Ephemeris[12] ماهواره‌ها را می‌توان از طریق اینترنت و از مسیرهای زیر دانلود کرد. مأخذ این اطلاعات ایستگاه‌های زمینی است و دائماً به‌روزرسانی می‌شوند:

اطلاعات آلماناک

http://navcen.uscg.gov/gps/almanacs.htm

اطلاعات افمریس

http://cddis.gsfc.nasa.gov/gnss_datasum.html

آلماناک و افمریس شامل اطلاعاتی از قبیل موقعیت ماهواره، جهت و سرعت ماهواره در زمان معین است. فرمت دیتای آلمانک SEM و فرمت دیتای افمریس رینکس۲[13] است. نمونه‌ای از دیتای افمریس دانلود شده برای ماهواره‌های GPS شماره‌های ۲، ۴، ۷ و ۸ را در شکل (۷) مشاهده می‌کنید.

در چینش و تبدیل فرمت‌های بالا به اعداد باینری برای قرارگیری در قاب‌ها دو نکته اهمیت دارد. اول اینکه همهٔ پارامترهای word دارای تعداد بیت معین هستند و بیت تبدیل‌شده باید در خانه‌های معین‌شده قرار گیرند. ثانیاً توجه به پارامتر sf[14] است که شروع کوچک‌ترین بیت کم‌ارزش در محل تعیین شده را بیان می‌کند. جایگاه قرارگیری دیتای باینری‌شده هم معین است. در جدول (۳) اطلاعات مربوط به زیرقاب اول آورده شده است.

11. Satellite Accuracy
12. Almanac
13. RINEX2
14. Scale factor

```
     2             NAVIGATION DATA     G                   RINEX VERSION / TYPE
LEICA GEO OFFICE 3.0                   4-3-9 16:52         PGM / RUN BY / DATE
    15                                                     LEAP SECONDS
                                                           END OF HEADER
 2  9  3  3 18  0  0.0 1.557595096529)-04-1.023181539495D-12 0.000000000000D+0D
    4.700000000000D+01 5.040625000000)+01 5.109855649721D-09 4.213729109588D-01
    2.490356564522D-06 9.005132247694)-03 9.689480066299D-06 5.153621877670D+03
    2.376000000000D+05 9.313225746155)-08 1.095528317129D+00-1.247972249985D-07
    9.416482887536D-01 1.827187500000)+02 2.734845801556D+00-8.219628533368D-09
   -3.071556620130D-10 1.000000000000)+00 1.521000000000D+03 0.000000000000D+0D
    2.000000000000D+00 0.000000000000)+00-1.722946763039D-08 4.700000000000D+01
    2.376000000000D+05
 4  9  3  3 18  0  0.0 1.253094524145)-06-1.432454155292D-11 0.000000000000D+0D
    0.000000000000D+00 6.571875000000)+01 4.949491927420D-09-3.024254766682D+0D
    3.231689339916D-06 8.622963679954)-03 9.743496775627D-06 5.153696805954D+03
    2.376000000000D+05-1.266598701477)-07 1.114012379224D+00-1.750864640277D-07
    9.406673201804D-01 1.613437500000)+02 4.797931049430D-01-7.970666937716D-09
   -3.096557454696D-10 1.000000000000)+00 1.521000000000D+03 0.000000000000D+0D
    2.000000000000D+00 0.000000000000)+00-6.053596735001D-09 3.560000000000D+02
    2.376000000000D+05
 7  9  3  3 18  0  0.0 2.211425453424)-05-4.547473508865D-13 0.000000000000D+0D
    2.200000000000D+01-7.865625000000)+01 4.050883184448D-09-1.385481067922D+0D
   -4.190951585770D-06 2.319187740795)-03 8.529052138329D-06 5.153683582306D+03
    2.376000000000D+05-1.136213541031)-07-2.033797352898D+00-2.235174179077D-08
    9.661340015306D-01 2.180937500000)+02 2.918385866394D+00-7.860327499998D-09
    1.514348785239D-10 1.000000000000)+00 1.521000000000D+03 0.000000000000D+0D
    2.000000000000D+00 0.000000000000)+00-1.071020960808D-08 2.200000000000D+01
    2.376000000000D+05
 8  9  3  3 18  0  0.0-1.929728314281)-04-1.477928890381D-12 0.000000000000D+0D
    7.100000000000D+01-8.531250000000)+01 3.657652403177D-09-2.065869924140D+0D
   -4.488974809647D-06 1.046831032727)-02 8.814036846161D-06 5.153679862976D+03
    2.376000000000D+05-1.285225152969)-07-1.975187403809D+00-9.685754776001D-0B
    9.872863501308D-01 2.250625000000)+02 2.980657970494D+00-7.652818823090D-09
    2.557249412227D-10 1.000000000000)+00 1.521000000000D+03 0.000000000000D+0D
    2.800000000000D+00 0.000000000000)+00-4.656612873077D-09 7.100000000000D+01
    2.376000000000D+05
```

شکل ۷- نمونه دیتای پیام ماهواره GPS برای ۴ ماهواره ۲، ۴، ۷و ۸

بعد از آماده‌سازی کدهای C/A و دیتای پیام این دو سیگنال باید در هم ضرب شده و روی موج حامل با مدولاسیون BPSK سوار شوند.

جدول ۳- نمونهٔ پارامترهای دیتای پیام ماهواره شامل نام پارامتر، موقعیت در زیرقاب، تعداد بیت‌ها و ضریب مقیاس [۱]

Parameter	Location	Number of Bits	Scale Factor (LSB)	Effective Range	Units
C_{ic}: Amplitude of the cosine harmonic correction term to angle of inclination	61–76	16*	2^{-29}		radians
Ω_e: Longitude of ascending node of orbit plane at weekly epoch	77–84; 91–114	32*	2^{-31}		semicircles
C_{is}: Amplitude of the sine harmonic correction term to angle of inclination	121–136	16*	2^{-29}		radians
i_0: Inclination angle at reference time	137–144; 151–174	32*	2^{-31}		semicircles
C_{rc}: Amplitude of the sine harmonic correction term to the orbit radius	181–196	16*	2^{-5}		meters
ω: Argument of perigee	197–204; 211–234	32*	2^{31}		semicircles
$\dot{\Omega}$: Rate of right ascension	241–264	24*	2^{-43}		semicircles/sec
IDOE	271–278				(see text)
idot: Rate of inclination angle	279–292	14*	2^{-43}		semicircles/sec

حال نوبت به بیان فرمول تولید سیگنال است که با درنظرگرفتن همهٔ مؤلفه‌های تأخیر و شیفت داپلر ... به‌صورت زیر بیان می‌شود [۳]:

$$S_L = \sum_{i=1}^{k} \sqrt{2p_t} D_i(t-\tau_i) \times C_i(t-\tau_i) \cos(\omega_L(t-\tau_i)) \qquad (۲)$$

تأخیر زمانی بر اثر عبور سیگنال از محیط انتشار و شیفت داپلر ناشی از سرعت نسبی ماهواره و گیرنده هستند. شیفت داپلر در نرم‌افزار STK قابل محاسبه است که محدودهٔ تغییرات آن برای گیرندهٔ ثابت زیر ۵ کیلوهرتز و برای گیرنده با سرعت بالاتر تا ۱۰کیلوهرتز محاسبه و به‌دست آمد.

برای تولید سیگنال شبیه‌سازی شده به اینگونه عمل می‌کنیم که برای تک تک ماهواره‌ها در دید گیرندهٔ اطلاعات مربوطه را در قالب استاندارد تعیین‌شده (IS-GPS-200) داخل قاب‌ها و زیرقاب‌های معین قرار داده و در نتیجه سیگنال پیام یا D(t) برای ماهواره‌های در دید به‌دست می‌آید، سپس اطلاعات پیام را با کد C/A ماهوارهٔ مربوطه به صورت دودویی XOR می‌کنیم. حال که D(t)×C(t) به‌دست آمد فقط کافی است تا مقدار دامنهٔ موج حامل را در زمان تعیین‌شده به‌دست آوریم که به راحتی قابل محاسبه است.

حال که سیگنال تک تک ماهواره‌ها به صورت جداگانه محاسبه شد باید با توجه به فاصلهٔ هر ماهواره از گیرنده، موقعیت و سرعت نسبی آن، تأخیر زمانی، شیفت داپلر و توان سیگنال دریافتی را محاسبه کرد و بر سیگنال مربوطه اعمال کرد و با بقیهٔ ماهواره‌ها جمع و سیگنال برآیند را تولید کرد.

برای اعمال عوامل خطا در انتشار سیگنال ماهواره‌های GPS مانند اثرات شرایط جوی و حذف چندمسیری می‌توان از مدل‌های موجود استفاده کرد. اثر این عوامل در مدل‌ها به صورت تأخیر زمانی یا تضعیف در دامنهٔ سیگنال دریافتی قابل پیاده‌سازی است و بار محاسباتی زیادی نیز ندارد.

در عمل برای تولید سیگنال شبیه‌سازی‌شدهٔ فوق به‌صورت آنالوگ و در فرکانس رادیویی و با توجه به اینکه پهنای باند سیگنال موردنظر محدود است از روش نمونه‌برداری و کوانتیزه‌کردن استفاده کرده و با خطایی قابل اغماض به این مهم دست می‌یابیم. در این مقاله نمونه‌برداری از سیگنال آنالوگ در حوزهٔ فرکانس میانی[۱۵] با پهنای باند محدود انجام شده است.

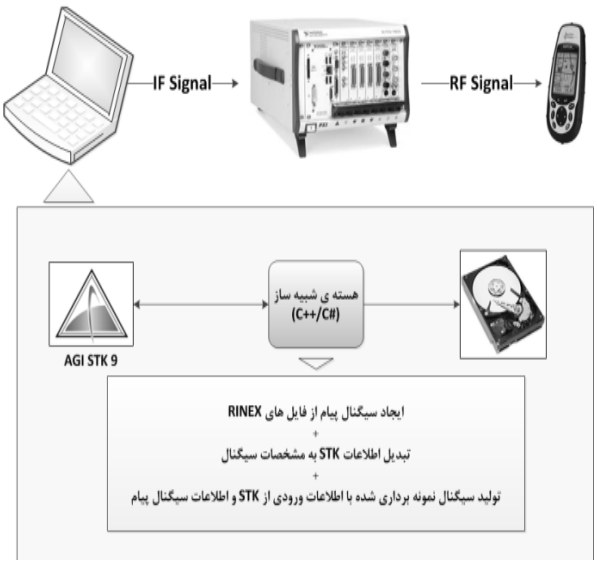
برای کاهش چشمگیر محاسبات مستقیماً سیگنال نمونه‌برداری شده به‌شکل فرمول زیر استفاده شده است :

$$S_{IF} = \sum_{i=1}^{k} \sqrt{2p_t} D_i(t-\tau_i) \times C_i(t-\tau_i) \cos(2\pi(f_{IF} - f_{dop,i})t)$$

برای داشتن سیگنال، محاسبات فقط در زمان‌های نمونه‌برداری انجام می‌شود و لازم به محاسبهٔ سیگنال در زمان‌های دیگر نیست.

15. Intermediate frequency

با تکمیل‌شدن مراحل تولید سیگنال باید ماهواره‌های در دید گیرنده تعیین شده و محاسبهٔ فاصله‌های مجازی تا گیرنده انجام شود. برای گیرنده‌های متحرک استخراج مسیر حرکت، تعیین فاصله‌های مجازی و تعداد ماهواره‌های در دید باید به‌طور همزمان انجام شود. شکل (۸) نمایی از ساختار کلی شبیه‌ساز را نشان می‌دهد.



شکل ۸- دیاگرام تولید سیگنال GPS

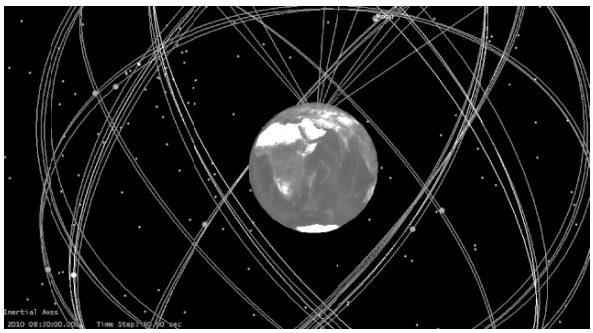
ارزیابی عملکرد شبیه‌ساز

برای اطمینان از درستی عملکرد این شبیه‌ساز و صحت سیگنال تولید شده، به دو روش اقدام شد:

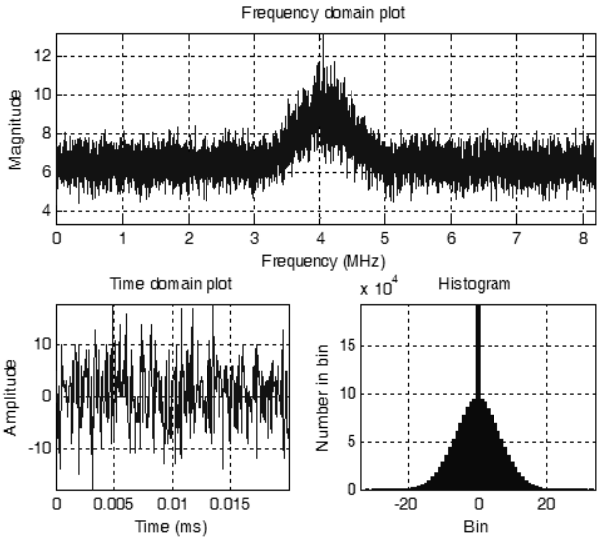
ابتدا با نرم‌افزار سافت‌جی‌ان‌اس‌اس[۱۶] نسخهٔ ۳ که در محیط متلب طراحی‌شده ارزیابی‌های اولیه انجام شد. این بسته یک گیرنده GPS نرم‌افزاری است که امکان استخراج اطلاعات مختلف از سیگنال ورودی (همچون شمارهٔ ماهواره‌های در دید) و نیز موقعیت جغرافیایی را فراهم می‌کند.

به‌منظور آزمایش، ابتدا مطابق شکل (۹) یک گیرندهٔ مستقر در تهران با مختصات جغرافیایی گردشده با طول جغرافیایی ۵۱ درجه و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ارتفاع ۲۴۰ متر را درنظرمی‌گیریم. شبیه‌ساز برای این گیرندهٔ سیگنالی با مشخصاتی شامل فرکانس میانی ۴/۰۹۲ مگاهرتز، نرخ نمونه‌برداری ۱۶/۳۶۸ مگاهرتز و C/N_0 برابر ۵۰ دسی‌بل هرتز برای ماهواره‌های در دید این گیرنده به شماره‌های ۲، ۵، ۱۰، ۱۲، ۲۱، ۲۵، ۲۹ و ۳۱ تولید می‌کند. سیگنال خروجی شبیه‌ساز به بستهٔ سافت‌جی‌ان‌اس‌اس اعمال و نتایج در شکل‌های (۱۰) تا (۱۲) ارائه شده است که بیانگر صحت سیگنالینگ تولید شده در شبیه‌ساز است.

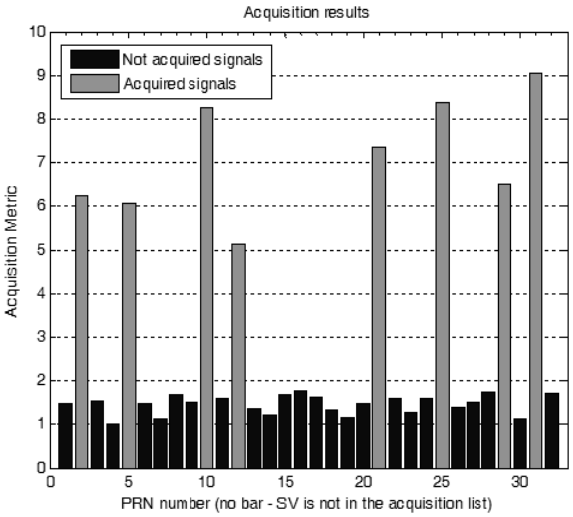
16. SoftGNSS



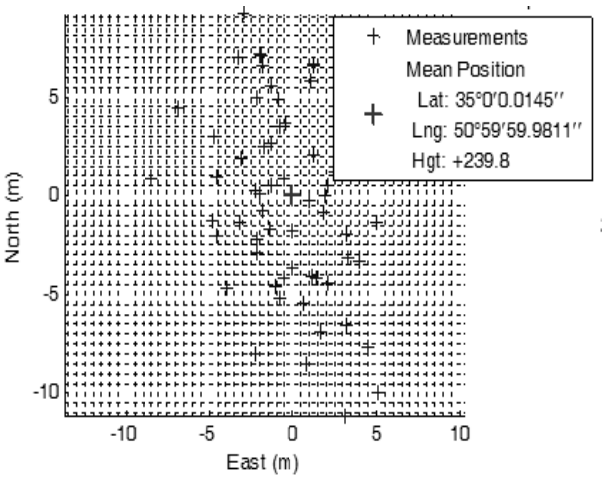
شکل ۹- شبیه‌سازی مجموعه ماهواره‌های GPS در نرم‌افزار STK با دیتای معتبر آلماناک برای استخراج زمان‌های دسترسی و فواصل مجازی ماهواره‌ها از گیرندهٔ ثابت مستقر در شهر تهران



شکل ۱۰- سیگنال نمونه‌برداری شده در حوزهٔ فرکانس و زمان

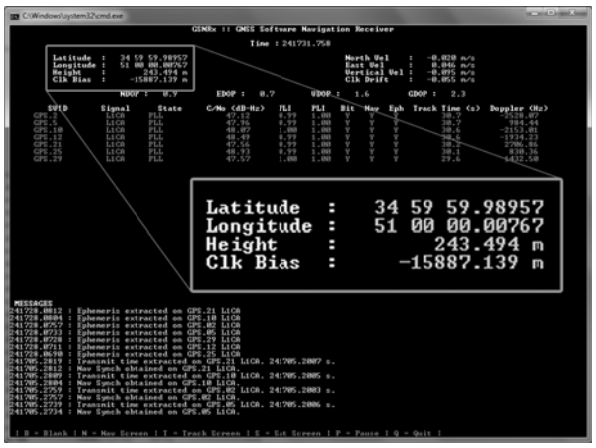


شکل ۱۱- ماهواره‌های در دید گیرندهٔ سافت‌جی‌ان‌اس‌اس با توجه به خروجی Correlation



شکل ۱۲- مختصات به‌دست آمده در طول ۶۰ ثانیه از سیگنال تولید شده توسط نرم‌افزار سافت‌جی‌ان‌اس‌اس (نقطهٔ + میانگین نقاط به‌دست آمده است)

همچنین برای اطمینان بیشتر از صحت عملکرد، سیگنال تولیدی- با تعامل صورت گرفته با متخصصان دانشگاه کلگری[17] کانادا- با بهترین گیرندهٔ GPS نرم‌افزاری موجود به نام GNSRx متعلق به دانشگاه کلگری آزمایش شد که نتایج آن در شکل (۱۳) ارائه شده است.



شکل ۱۳- مختصات به‌دست‌آمده توسط گیرنده نرم‌افزاری GNSRx

نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی سیگنال GPS نیازمند شناخت جزئیات کامل مؤلفه‌های سیگنال GPS است که در این مقاله بحث شد. اطلاعات اولیهٔ موردنیاز شبیه‌سازی، شامل دیتای آلماناک و دیتای افمریس به فرمت رینکس[18] از اینترنت دانلود شده و تحت

17. Calgary
18. RINEX

الگوریتم‌های معین و بیت به بیت در زیرقاب‌ها و صفحه‌های مربوطه جایگذاری و نحوهٔ تولید ۱۰۲۳ بیت کد C/A هر ماهواره نیز با استفاده از مولد کد ارائه شده در این مقاله پیاده‌سازی شد. پیاده‌سازی نرم‌افزاری این بخش در محیط برنامه‌نویسی C انجام شد. محاسبات مربوط به پیاده‌سازی مجموعهٔ ماهواره‌های GPS با دیتای ورودی واقعی (آلماناک)، محاسبات مربوط به تعداد ماهواره‌های در دسترس، محاسبات مربوط به پروفایل مسیر گیرنده تحت آزمون و فواصل مجازی در نرم‌افزار STK انجام شد. سیگنال تولیدشده برای یک مقطع زمانی مشخص باید در یک حافظه مطابق شکل (۸) ذخیره‌سازی شود و سپس به پورتورودی گیرندهٔ GPS در فرکانس میانی متصل شود. استفاده از گیرندهٔ IF به‌منظور آزمایش صحت روند شبیه‌سازی و تولید سیگنال است که بعد از تأیید این مرحله می‌توان با افزودن مرحلهٔ افزایش فرکانس[19] و با به‌کارگیری یک سیگنال ژنراتور به تولید رادیویی سیگنال در باند L1 اقدام کرد. بدین ترتیب امکان شبیه‌سازی و تولید سیگنال‌های ماهواره‌های GPS در محیط آزمایشگاهی برای ارزیابی عملکرد گیرنده‌های GPS خریداری شده یا طراحی شده برای نصب بر روی سامانه‌های فضایی یا موشکی فراهم خواهد شد.

مراجع

[1] Bayo yen Tsui, J., *Fundamentals of Global Positioning System Receivers- A Software Approach*, John Wiley & Sons, 2007.

[2] Jiming, G., Wei, W. and Baichong, Ch., "Model of GPS IF Signal and Its Simulation", *GEO-spatial Information Science*, Vol. 12, Issue 2, 2009, pp. 100-103.

[3] Dong, L., *IF GPS Signal Simulator Development and Verification*, University of Calgary, 2003.

[4] Yanhon, K., Dongksi,Y. and Qishan, Zh., "GPS Satellite Simulator Signal Estimation", *Journal of Electronic*, Vol. 22, Issue 5 , 2005, pp 458-464.

[5] Corbell, P. M., Design and Validation of an Accurate GPS Signal and Receiver Truth Model for Comparing Advanced Receiver Processing Techniques, (Thesis for Master Degree), Department of Air Force University 2007.

[6] BK Precision Model 4070A User's Manual.

[7] Misra, P. and Enge, P., *Global Positioning System - Signals, Measurements, and Performance*, Ganga-Jamuna Press, Massachusetts, 2001.

[8] Available, [on line]: http://navcen.uscg.gov/gps/ almanacs. htm&http://cddis.gsfc.nasa.gov/gnss_datasum.html

[9] Available, [on line]: https://github.com/kristianpaul/ SoftGNSS

[10] Available, [on line]: http://plan.geomatics.ucalgary.ca

19. Up-Convert