

# سنجش TEC به منظور تصحیح خطای یونوسفری در مخابرات ماهواره‌ای به روش نهفتگی رادیویی

شروین امیری<sup>۱\*</sup> و محمد فهامی<sup>۲</sup>

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

۲- گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین

\*شهریار، بعد از سعید آباد، زیرگذر پل بادامک، مجتمع تحقیقاتی عصر انقلاب

amiri@irost.org

در این مقاله روش نهفتگی رادیویی GPS روشی برای استخراج چگالی الکترونی یونوسفر معرفی شده است. همچنین لزوم مانیتورینگ چگالی الکترونی یونوسفر برای تصحیح خطای ناشی از آن در مخابرات ماهواره‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. در این روش گیرنده GPS بر روی ماهواره‌ای که در مدار نزدیک به زمین پرواز می‌کند، نصب می‌شود و با تعقیب دامنه و فاز سیگنال آکولت شده (خم شده توسط لایه یونوسفر) یک ماهواره موقعیت‌یابی، به محاسبه چگالی الکترونی آن قسمت از لایه یونوسفر که در مسیر عبور سیگنال قرار دارد می‌پردازد. سیستم موقعیت‌یابی GPS که ابزاری برای این روش است به اجمال معرفی شده است. یک رویداد نهفتگی در نزدیکی یکی از ایستگاه‌های یونوسوند برزیل مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت نمودارهای چگالی الکترونی به دست آمده از روش نهفتگی رادیویی با دیتای گزارش شده از یونوسوند مقایسه شده است.

واژه‌های کلیدی: نهفتگی رادیویی، خطای یونوسفری، جی پی اس، یونوسوند، چگالی الکترونی

## علائم و اختصارات

$s$	تأخیر اضافی مسیر	$C_r$	خطای پالس فرستنده
TEC	چگالی الکترونی	$C_t$	خطای پالس گیرنده
$v$	نویز گیرنده	$f_2, f_1$	فرکانس‌های کریر سیگنال GPS
$\Delta r$	ضخامت عمودی لایه یونوسفر	$L$	فاصله مجازی فرستنده جی پی اس تا گیرنده
$\Delta n_e$	تعداد الکترون در سانتی متر مکعب	$L_{CL}$	فاصله مجازی جی پی اس کالیبره تا گیرنده
		$L_{CG}$	فاصله مجازی جی پی اس کالیبره تا ایستگاه زمینی
		$L_{OG}$	فاصله مجازی جی پی اس آکولت شده تا ایستگاه زمینی
		$L_s$	فاصله مجازی تصحیح شده به روش تفاضل تکی
		$L_D$	فاصله مجازی تصحیح شده به روش تفاضل دوبل
		$\tilde{L}$	فاصله مجازی اصلاح شده ناشی از تفاضل دوبل
		$r$	فاصله واقعی فرستنده GPS تا گیرنده

## مقدمه

یکی از منابع مهم خطا در مخابرات ماهواره‌ای، لایه یونوسفر است. پارامتر معروف یونوسفر، مقدار چگالی الکترون<sup>۳</sup> موجود در این لایه است [۱]. تغییرات ناگهانی و زیاد TEC در بخش‌های مختلف یونوسفر مدل‌سازی آن را برای تصحیح خطا، پیچیده می‌کند. فعالیت‌های خورشیدی از جمله مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر مقدار TEC است. انفجارات شدید خورشیدی، میزان بسیار زیادی

۱. استادیار (نویسنده مخاطب)

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد

3. Total Electron Content (TEC)

F2 تقسیم می‌شود. ارتفاع هر یک از این لایه‌ها در تمامی نقاط کره زمین یکسان نیست. حتی ارتفاع این بخش‌ها با گذر زمان کم و زیاد می‌شود.

لایه یونوسفر برای سیگنال‌های تا فرکانس حدود ۳۰ مگاهرتز به شکل آینه عمل می‌کند و سیگنال را به طرف زمین بازمی‌گرداند. اما در فرکانس‌های بالاتر رادیویی و ماهواره‌ای امواج از یونوسفر عبور می‌کنند. این لایه علاوه بر تولید خطا (ایجادکردن تقدم و تأخیر در فاز سیگنال) سبب تغییر یافتن پولاریزاسیون سیگنال ماهواره‌ای نیز می‌شود که این موضوع از جمله پیچیده‌ترین چالش‌ها در زمینه سیستم‌های مخابرات ماهواره‌ای است.

## اثرات لایه یونوسفر در تولید خطا بر سیگنال‌های ماهواره‌ای

لایه یونوسفر مملو از الکترون‌های آزاد و یون‌هاست. سرعت امواج رادیویی در نقاط مختلف لایه یونوسفر به وسیله میزان چگالی الکترون موجود در آن نقطه تعیین می‌شود. در حقیقت هر چه چگالی الکترون‌ها بیشتر باشد، سرعت انتشار امواج نیز بالاتر خواهد بود. سیگنال کاربر موج سینوسی با یک فاز ویژه با عبور از این لایه، سریع‌تر و زودتر از زمانی که سیگنال در محیط خلأ انتشار می‌یابد به محل گیرنده خواهد رسید. این دریافت سریع سیگنال در اصطلاح پیشرفت فازی<sup>۶</sup> نام دارد. از سویی دیگر سیگنال مدوله‌کننده کاربر به وسیله لایه یونوسفر تأخیر داده می‌شود که به تأخیر گروه<sup>۷</sup> معروف است. میزان پیشرفت فازی و تأخیر گروه تابعی از فرکانس سیگنال کاربر هستند [۲]. در واقع در فرکانس‌های بالاتر تأثیرات ناشی از لایه یونوسفر بر سیگنال ماهواره‌ای کمتر خواهد بود که به این رفتار و ویژگی لایه یونوسفر در اصطلاح تفرق<sup>۸</sup> می‌گویند.

برای توصیف فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی رخ داده در لایه یونوسفر پروفایلی موسوم به پروفایل عمودی لایه یونوسفر<sup>۹</sup> ارائه می‌شود. این پروفایل به وسیله سیستم‌هایی موسوم به یونوسوند<sup>۱۰</sup> یا همان سیستم‌های سنجش یونیزاسیون لایه یونوسفر حاصل می‌شود. در روش به‌کارگرفته شده در انواع Sounderها، سیگنالی با فرکانس مشخص به منطقه مورد نظر ارسال می‌شود و سپس با تحلیل سیگنال بازگشتی به اطلاعات مطلوب و مورد نظر دسترسی می‌یابیم.

ذرات پرانرژی را در فضا پرتاب می‌کند که ضمن به خطر انداختن جان فضاوردان و معیوب ساختن ادوات الکترونیکی محموله‌های فضایی سبب تغییرات ناگهانی شدید در TEC لایه یونوسفر نیز می‌شود. بنابراین مانیتور کردن مداوم پارامتر TEC برای مدل‌سازی و تصحیح خطای ناشی از این لایه بر مخابرات ماهواره‌ای مسئله‌ای اجتناب‌ناپذیر است.

روش GPS نهفتگی رادیویی<sup>۴</sup> یکی از روش‌های دقیق و کاربردی در مانیتور کردن پارامترهای جوی زمین است. این مقاله به معرفی ساز و کار اندازه‌گیری TEC به روش GPS نهفتگی رادیویی و بررسی نتایج آن می‌پردازد.

## لایه یونوسفر

دومین لایه از لایه‌های کره زمین بعد از لایه تروپوسفر، لایه یونوسفر است. لایه یونوسفر از جمله چالش‌های پیش رو در لینک‌های مخابراتی است. به طور کلی می‌توان گفت که لایه یونوسفر از ارتفاع حدود ۵۰ کیلومتری سطح زمین شروع می‌شود و تا حدود ۱۰۰۰ کیلومتری سطح زمین گسترش می‌یابد. این لایه مملو از الکترون‌های آزاد و یون‌هاست که سبب ایجاد بسیاری از پیچیدگی‌ها در بحث انتشار امواج رادیویی می‌شود. پارامتر توصیف‌کننده این لایه TEC است. TEC در بازه‌های زمانی اندک به میزان چشمگیری تغییر می‌کند.

به‌طور کلی بازه‌های زمانی شبانه‌روز، فصل‌های آب و هوایی مختلف، چگونگی فعالیت‌های مغناطیسی زمین، سیکل فعالیت‌های خورشیدی، نور فرابنفش، تشعشعات پرتویی x خورشیدی، پرتوهای کیهانی<sup>۵</sup>، ظاهر شدن انواع لکه‌های خورشیدی، تخلیه‌های الکتریکی و مغناطیسی درون خود لایه از جمله مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر مقدار TEC هستند. البته درصد تأثیر هر یک از عوامل یاد شده تابعی از ارتفاع لایه یونوسفر است. از این میان انفجارها و فعالیت‌های خورشیدی بیشترین سهم را در تغییر مقدار TEC در لایه یونوسفر دارند.

به‌طور کلی این لایه را به سه قسمت تقسیم می‌کنند [۲]، قسمت اول در اصطلاح، ناحیه D نام دارد که از ارتفاع حدود ۵۰ کیلومتری سطح زمین شروع می‌شود و تا حدود ۸۰ کیلومتری سطح زمین ادامه می‌یابد. قسمت دوم ناحیه E نام دارد که از ارتفاع حدود ۸۰ کیلومتری سطح زمین شروع می‌شود و تا حدود ۱۴۵ کیلومتری سطح زمین ادامه می‌یابد. قسمت سوم از لایه یونوسفر نیز به نام ناحیه F مطرح شده است که از ارتفاع حدود ۱۴۵ کیلومتری سطح زمین شروع شده و به‌طور کلی تا حدود ۱۰۰۰ کیلومتری سطح زمین ادامه می‌یابد. البته این لایه خود به دو بخش موسوم به لایه F1 و

6. Phase Advance

7. Group Delay

8. Dispersion

9. Vertical Profile Of the Ionosphere

10. Ionosonde

4. Global Positioning System Radio Occultation

5. Cosmic Radiation

## شبکه ماهواره‌ای GPS

سیستم مکان یابی جهانی یک سیستم ناوبری ماهواره ای است که شامل ۲۴ ماهواره در فاصله ۲۰۲۰۰ کیلومتری زمین است که در شش مدار مختلف با سرعت ۳۸۲۴ متر بر ثانیه به دور کره زمین در حال چرخش هستند. سیگنال ارسالی از هر ماهواره به سمت زمین دارای سه جزء موج حامل، دیتای پیام ماهواره و کد C/A است. موج حامل L1 دارای فرکانس ۱۵۷۵/۷۵ مگاهرتز و کد C/A شامل ۱۰۲۳ بیت است که هر ۱ میلی ثانیه تکرار می شوند. موج حامل L2 دارای فرکانس ۲۷/۱۲/۶۰ مگاهرتز است. علاوه بر این هر دو حامل دارای کدهای نظامی P(Y) نیز هستند که در دسترس کاربران تجاری قرار ندارد.

شبکه ماهواره‌ای GPS متشکل از ۳ زیرمجموعه فضایی، کنترل و کاربران شبکه است. زیرمجموعه فضایی متشکل از ۳۲ ماهواره در فضا است که از این تعداد ۲۴ ماهواره در مدار چرخش قرار دارند و مرتباً سیگنال به سمت زمین ارسال می کنند. زیرمجموعه کنترل شامل ۵ ایستگاه زمینی است که در مراکز با عرض جغرافیایی معین در نقاط مختلف کره زمین نصب شده و اطلاعات ماهواره‌ها را جمع‌آوری کرده و به ایستگاه اصلی در کلرادو آمریکا ارسال می کنند. این ایستگاه هم دیتای لازم و فرامین مرتبط با مدار چرخش ماهواره‌ها را در باند S برای آنها ارسال می کند. زیرمجموعه سوم کاربران یا گیرنده‌های GPS هستند که وظیفه دریافت و تحلیل اطلاعات را برعهده دارند.

## تاریخچه نهفتگی رادیویی

روش نهفتگی رادیویی یا همان RO اولین بار در سال ۱۹۶۰ مطرح شد [۴ و ۳]. جذابیت ایده و کارایی آن انگیزه استفاده از این روش در سنجش از دور جو زمین را بیشتر کرد [۵]. البته به علت اینکه در آن زمان برای تحقق این روش احتیاج به ارسال دو سری ماهواره (یک سری فرستنده و یک سری گیرنده سیگنال) بود، این روش تا اواسط سال ۱۹۸۰، یعنی تا زمان ظهور سیستم موقعیت‌یابی جی پی اس، به علت زیادبودن هزینه، عملیاتی نشد. ولی بعد از ظهور ناوگان GPS، ایده مذکور از نقطه نظر هزینه و علمی مفهومی عملیاتی پیدا کرد [۷] و [۶]. این روش اولین تجربه خود را تحت عنوان هواشناسی به کمک GPS<sup>۱۷</sup> در سال‌های ۱۹۹۵ تا ۱۹۹۷ با موفقیت پشت سر گذاشت [۸]. موفقیت مذکور منجر به نصب گیرنده بلک جک<sup>۱۸</sup> بر ماهواره‌های CHAMP<sup>۱۹</sup> و SAC-C<sup>۲۰</sup> شد [۹-۱۱]. ماهواره Grace<sup>۲۱</sup> نیز با این

## تأثیر فعالیت‌های خورشیدی در چگونگی رفتار لایه یونوسفر

اغتاشات و طوفان‌های یونوسفریک در چگونگی رفتار لایه یونوسفر بیشترین سهم را دارند. اغتاشات موجود در لایه یونوسفر می‌تواند ناشی از اغتاشات موجود در خورشید یا اغتاشات موجود در میدان مغناطیسی زمین باشد. حتی اغتاشات مغناطیسی زمین نیز به دلیل برخی رخداد‌های اتفاق افتاده در خورشید پدید می آید. به بیان بهتر اغتاشات یونوسفریک به طور مستقیم یا غیرمستقیم مرتبط با رخداد‌های موجود در خورشید است. طوفان‌های یونوسفری نیز به دلیل انفجارهای شدید خورشیدی تولید می‌شود. انفجارهای شدید خورشیدی، میزان بسیار زیادی ذرات پرانرژی را به فضا پرتاب کرده که در اصطلاح، شعله‌زنی‌های خورشیدی<sup>۱۱</sup> خوانده می‌شوند. رخ دادن این انفجارهای شدید خورشیدی حتی جان فضاوردان را به مخاطره می‌اندازد و سبب نابود شدن ادوات الکترونیکی ماهواره‌ها نیز در بعضی شرایط می‌شود. پرتوی X تولید شده از این فعالیت‌ها و انفجارها در محیط تشعشع می‌کند و می‌تواند حتی به ناحیه D از لایه یونوسفر نیز نفوذ کند که از این پدیده با نام موج کوتاه عادی<sup>۱۲</sup> یاد می‌شود.

قابل توجه است که اغتاشات یونوسفری می‌تواند با جاری شدن باد‌های بسیار سریع خورشیدی<sup>۱۳</sup> نیز آغاز شود. طوفان‌های مغناطیسی زمین که اغلب به واسطه شعله‌زنی‌های خورشیدی و همچنین باد‌های سریع خورشیدی تولید می‌شوند، اغلب افزایشی لحظه‌ای و آبی را در مقدار جذب امواج رادیویی تولید می‌کنند.

سیکل یازده ساله فعالیت خورشیدی از دیگر پدیده‌های تأثیرگذار در میزان TEC این لایه است. سطحی از خورشید که قابل مشاهده است موسوم به فوتوسفر<sup>۱۴</sup> است. یک لکه خورشیدی<sup>۱۵</sup> در حقیقت منطقه‌ای از سطح فوتوسفر است که به صورت لکه‌ای تاریک ظاهر می‌شود. به بیان بهتر این لکه‌های خورشیدی در واقع، تمرکز بسیار زیادی از شار مغناطیسی را دارند. این لکه‌ها به صورت تیره ظاهر می‌شوند که علت این مسئله نیز این موضوع است که این لکه‌ها در مقایسه با محیط پیرامونی خود در سطح فوتوسفر، سردتر هستند. هنگامی که تعداد این لکه‌های خورشیدی افزایش می‌یابد، همراه با آن پیچیدگی‌های مغناطیسی نیز رشد می‌یابد و به این ترتیب به صورت یک منبع آزادسازی ذرات پر انرژی تبدیل می‌شوند که از آن با نام شعله‌های خورشیدی<sup>۱۶</sup> یاد می‌شود.

11. Solar Flares
12. Shortwave Fadeout
13. High Speed Solar Wind Stream
14. Photosphere
15. Sunspot
16. Solar Flares

17. GPS/Meteorology

18. Black Jack

19. Challenging Minisatellite Payload

20. SatelitedeAplicacionesCientificas-C

21. Gravity Recovery And Climate Experiment

کرده باشد، به طوری که بتوان مسیر حرکت آن از میان جو زمین را قسمتی از محیط یک دایره به مرکزیت زمین دانست. اندازه‌گیری دامنه و فاز کاربر سیگنال دریافتی، تحت تابعی از زمان می‌تواند منجر به استخراج پروفایل عمودی شاخص TEC یونسفر شود.

مهم‌ترین مرحله در اندازه‌گیری نهفتگی استخراج تأخیر زمانی تحمیلی از جانب اتمسفر زمین<sup>۳۰</sup> بر سیگنال دریافتی از ماهواره GPS است. به طور کلی مدت زمانی که طول می‌کشد تا سیگنال GPS از هر ماهواره به گیرنده برسد، برحسب طول به فاصله مجازی<sup>۳۱</sup> معروف است که با  $L$  نشان داده می‌شود.  $L$  متأثر از ۵ عامل است که در رابطه (۱) به آنها اشاره شده است.

$$L = r + S + C_I + C_r + v \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $r$  فاصله هندسی گیرنده تا فرستنده،  $S$  متأثر از تأخیر ناشی از اتمسفر زمین،  $C_I$  متأثر از خطای پالس فرستنده،  $C_r$  متأثر از خطای پالس گیرنده و  $v$  متأثر از نویز اندازه‌گیری است که شامل نویز گرمایی و نویز لینک است. همه پارامترهای رابطه (۱) در واحد طول هستند. به منظور استخراج  $S$  یا همان مسیر اضافی فاز نیاز به دانستن مقادیر دیگر موجود در رابطه (۱) است که یک به یک مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۱.  $L$  یا همان فاصله مجازی: مشابه کد  $C/A$  دریافتی از سیگنال

GPS، یک کد  $C/A$  نیز در گیرنده تولید می‌شود و با تطبیق زمانی

این دو کد پی به کل زمانی که سیگنال در راه بوده می‌برند.

۲.  $r$  گیرنده با محاسبه مختصات ماهواره GPS و مختصات ماهواره LEO به راحتی فاصله هندسی بین فرستنده و گیرنده را محاسبه می‌کند.

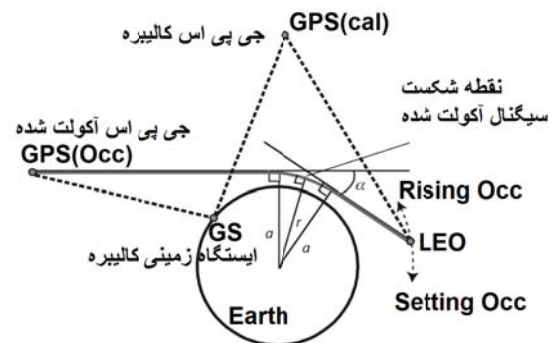
۳.  $v$  به دلیل کوچک بودن مقدار خطای نویز در مقابل پارامترهای دیگر قابل صرف نظر کردن است.

۴.  $C_I$  و  $C_r$  ساعت‌های به کار گرفته شده در فرستنده و گیرنده دارای خطا هستند. اندکی انحراف در محاسبات زمانی منجر به ایجاد خطای بزرگی در محاسبات فاصله مجازی می‌شود. از سویی محاسبه مقدار خطای فرستنده و گیرنده به طور دقیق و مستقیم تقریباً عملی نیست. به همین علت بدون محاسبه مقدار خطا و با استفاده از برقراری لینک‌های اضافی بین فرستنده و گیرنده اقدام به حذف خطای ساعت فرستنده و گیرنده می‌کنند. برای تنظیم یا کالیبراسیون پالس‌های فرستنده ماهواره‌های GPS و گیرنده LEO روش رایج، به کارگیری روش تفاضل دوبل<sup>۳۲</sup> است [۱۴]. این روش می‌تواند  $C_I$  و  $C_r$  در تأخیرهای اندازه‌گیری شده را حذف کند. لینک‌های اضافی برای حذف خطای ساعت فرستنده و گیرنده

مأموریت در سال ۲۰۰۶ در مدار قرار گرفت. از دیگر ماهواره‌های GPS RO می‌توان به کاسمیک<sup>۲۲</sup> که به فرمسات مشهور است اشاره کرد [۱۲]. البته روش RO محصور به ناوگان GPS نیست و با وجود سیستم‌های موقعیت‌یابی دیگر مانند گالیله<sup>۲۳</sup> یا بیودو<sup>۲۴</sup> و تنوع فناوری‌های گیرنده‌های آنها، پیاده‌سازی این روش با استفاده از سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی<sup>۲۵</sup> به ابزاری قدرتمند و منبع اطلاعاتی مهم در زمینه سنجش از دور جو زمین تبدیل خواهد شد.

## اندازه‌گیری نهفتگی

خمیدگی سیگنال ارسالی از ماهواره‌های موقعیت‌یابی<sup>۲۶</sup> یا همان GNSS RO وقتی ثبت و اندازه‌گیری می‌شود که یک گیرنده GNSS بر روی سکوی پروازی در مدار پایین نزدیک به زمین<sup>۲۷</sup> یک ماهواره GNSS را که در حال طلوع<sup>۲۸</sup> یا غروب<sup>۲۹</sup> از میان جو زمین استردیابی و تعقیب کند. شکل (۱) بیانگر هندسه این روش است [۱۳]. می‌توان با تحلیل اطلاعات فاز و دامنه سیگنال ردیابی شده به چگالی الکترونی اتمسفر زمین دست یافت. گیرنده نصب شده بر روی ماهواره مدار نزدیک به زمین یک یا چند سیگنال GPS (در حالت کلی GNSS) را که از جو زمین عبور می‌کنند دریافت می‌کند.



شکل ۱- سیگنال ارسال شده از ماهواره GPS در شرایطی که گیرنده روی ماهواره LEO می‌رسد که هنگام عبور از جو زمین با زاویه  $\alpha$  نسبت به مسیر مستقیم سیگنال خمیده می‌شود که تحت تقارن کروی برای هر سیگنال با پارامتر منحصر به فرد  $a$  مشخص می‌شود [۱۳]

سیگنال خم شده یا همان سیگنال نهفتگی سیگنالی است که به قدر کافی هنگام عبور از جو مسافتی را موازی سطح زمین حرکت

22. Constellation Observing System for Meteorology, Ionospheric, and Climate  
23. Galileo  
24. Beidou  
25. Global Navigation Satellite System  
26. GNSS Radio Occultation  
27. Low Earth Orbit  
28. Rising Occultation  
29. Setting Occultation

30. Phase Path Excess  
31. Pseudorange  
32. Double Differencing

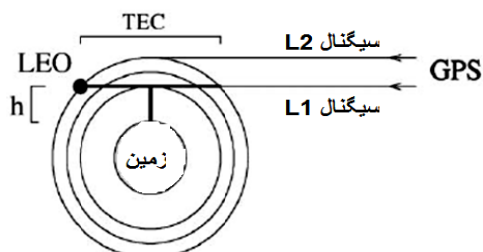
است، از خطاهای پالس گیرنده هم می‌توان چشم‌پوشی کرد و در آن صورت نیازی به استفاده از روش‌های تفاضلی نیست [۱۴]. در واقع گیرنده نصب‌شده بر ماهواره گریس<sup>۳۶</sup> از هیچ روش تفاضلی استفاده نمی‌کند یا اصطلاحاً از روش تفاضل صفر<sup>۳۷</sup> پیروی می‌کند. البته باید توجه داشت که این اندازه‌گیری‌ها تابع خطاهای منظم در لینک‌های تنظیم شده دیگر نیست. به هر حال اگر به پشتوانه دقیق بودن ساعت گیرنده LEO از روش‌های تفاضلی استفاده نشود، این مشکل که اندازه‌گیری‌ها ممکن است شامل خطاهای پالس باشد، هنوز هم وجود دارد. اگر از خطای نویز صرف‌نظر شود برای به‌دست‌آوردن تأخیر اضافی ناشی از اتمسفر، کافی است فاصله هندسی بین گیرنده LEO و فرستنده GPS Occ از  $L_D$  (تکنیک تفاضل دوپل) یا  $L_S$  (تکنیک تفاضل تکی) کم شود.

به دلیل اینکه گیرنده‌های نصب‌شده بر ماهواره‌های کاسمیک از تکنیک تفاضل دوپل استفاده می‌کنند و در این مقاله اندازه‌گیری‌ها مبتنی بر داده‌های ماهواره کاسمیک است، از رابطه (۴) استفاده می‌شود. با اجرای رابطه (۴) و به‌دست آمدن  $\tilde{L}$  با تقریب خوبی می‌توان آن را همان  $S$  در نظر گرفت. به این ترتیب  $\tilde{L}$  را تأخیر اضافی فاز مسیر ناشی از تفاضل دوپل<sup>۳۸</sup> می‌نامند.

$$\tilde{L} = L_D - r \quad (4)$$

مراحل ذکر شده یکبار در باند L1 و بار دیگر در باند L2 انجام می‌شود و در پایان با تفاضل تأخیرهای زمانی به‌دست آمده در دو باند فرکانسی و به‌دست آوردن  $S_1$  و  $S_2$  طبق رابطه (۵) می‌توان به TEC دست یافت. هندسه این روش در شکل (۲) آمده است.  $f_1$  و  $f_2$  فرکانس‌های کریر سیگنال‌های L1 و L2 هستند. واحد TEC تعداد الکترون بر متر مربع است. TEC را معمولاً بر حسب TECU بیان می‌کنند. هر یک TECU معادل  $10^{16}$  TEC است.

$$TEC = \frac{1}{403} \left( \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) (S_1 - S_2) \quad (5)$$



شکل ۲- تفاضل تأخیرهای یونوسفری در باندهای L1 و L2 منجر به استخراج TEC

می‌شود [۱۵]

در شکل (۱) مشخص هستند. در این روش گیرنده LEO یکی از ماهواره‌های GPS در دید خود را به عنوان ماهواره کالیبره در نظر می‌گیرد و فاصله مجازی لینک برقرار شده با ماهواره GPS کالیبره را از فاصله مجازی لینک ماهواره‌ای که سیگنال آن آکولت شده (GPS Occ) کم می‌کند. به علت اینکه خطای پالس گیرنده برای هر دو لینک مقدار یکسانی است، با انجام این تفاضل خطای پالس گیرنده از محاسبات لینک حذف می‌شود. همچنین برای حذف خطای ساعت فرستنده GPS از یک ایستگاه زمینی گیرنده GPS نیز استفاده می‌شود. بدین ترتیب که ایستگاه زمینی به محاسبه فاصله مجازی یکبار برای سیگنال دریافتی از ماهواره‌ای که سیگنال آکولت شده آن به ماهواره LEO رسیده و یکبار هم برای سیگنال دریافتی از ماهواره GPS کالیبره می‌پردازد و با تفاضل دو فاصله مجازی محاسبه شده، با فرض اینکه ماهواره GPS که سیگنال آن آکولت شده (خم شده) و ماهواره GPS که به عنوان ماهواره کالیبره در نظر گرفته شده خطای ساعت یکسانی داشته باشند، خطای پالس فرستنده سیگنال GPS از محاسبات لینک حذف می‌شود. رابطه (۲) بیانگر دو تفاضل ذکر شده است که به رابطه تفاضل دوپل مشهور است.

$$L_D = (L - L_{CL}) - (L_{CG} - L_{OG}) \quad (2)$$

در رابطه (۲)  $L_{CL}$  مربوط به لینک مابین GPS کالیبره (GPS Cal) و گیرنده LEO،  $L_{CG}$  مربوط به لینک مابین GPS کالیبره و گیرنده زمینی،  $L_{OG}$  مربوط به لینک مابین GPS که سیگنال آن آکولت شده (GPS Occ) و گیرنده زمینی است. مشکل استفاده از روش‌های تفاضلی این است که به علت برقراری لینک‌های اضافی نویز بیشتری بر محاسبات فاصله مجازی تحمیل می‌شود. با حذف دسترسی سلیقه‌ای<sup>۳۳</sup> از سال ۲۰۰۲ ساعت‌های GPS می‌توانند با دقت کافی مشخص شوند، یعنی خطای آنها به قدری کم شده که می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. به همین علت امکان دستیابی به سیستم‌های دقیق با استفاده از تکنیک تک تفاضل سیگنال<sup>۳۴</sup> فراهم شده است. در این روش فرض می‌شود که ساعت فرستنده GPS بدون خطاست و فقط به حذف خطای پالس گیرنده LEO می‌پردازد. بنابراین فقط از دو لینک استفاده می‌شود که منجر به کاهش خطای نویز نسبت به روش تفاضل دوپل در محاسبات می‌شود. رابطه (۳) بیانگر روش تک تفاضلی است.

$$L_S = L - L_{CL} \quad (3)$$

اگر ساعت LEO ثبات قابل قبولی داشته باشد، همانگونه که گیرنده ماهواره GRACE با اسیلاتورهای فوق پایا<sup>۳۵</sup> تجهیز شده

36. GRACE

37. Zero Differencing

38. Double Differenced Phase Path Excess

33. Selective Availability

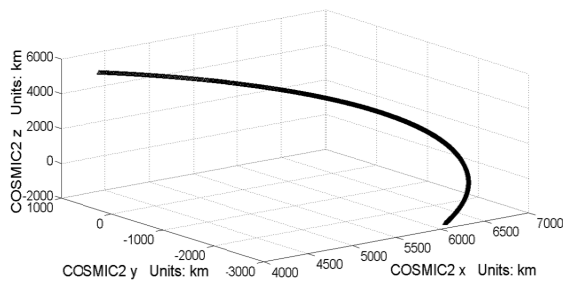
34. Single Differencing

35. USOS

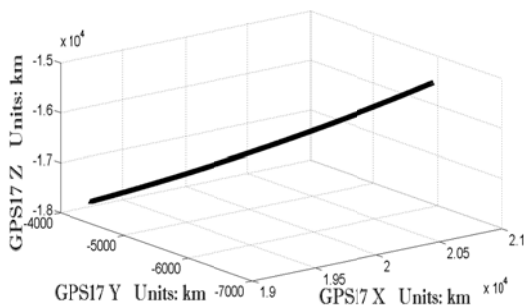
است [۱۶]. از جدول نهفتگی سایت ماهواره کاسمیک یک رویداد نهفتگی متناسب با طول (۴۴-) و عرض جغرافیایی (۲۴-) ایستگاه یونوسوند در کشور برزیل در تاریخ ۲۶ سپتامبر سال ۲۰۰۶ انتخاب شده است.

پارامترهایی که از سایت اینترنتی کاسمیک استخراج شده‌اند به قرار زیر هستند:

۱. فاصله مجازی<sup>۴۲</sup> اندازه‌گیری شده با گیرنده نصب شده بر ماهواره کاسمیک برای سیگنال‌های L1 و L2 از فایل دیتای مشاهدات خام GPS با فرمت راینیکس<sup>۴۳</sup>، در طول زمان نهفتگی.
۲. آشکارسازی موقعیت مداری فرستنده GPS و گیرنده LEO در طول زمان نهفتگی با استخراج موقعیت مداری فرستنده GPS و گیرنده LEO با فرمت netCDF در دستگاه مختصات به مرکزیت زمین<sup>۴۴</sup>. شکل (۳) بیانگر موقعیت مداری ماهواره کاسمیک ۲ در طول زمان نهفتگی است. همچنین شکل (۴) اشاره به موقعیت مداری ماهواره‌ای از ناوگان GPS می‌کند که سیگنال آن دچار آکولت شده و به گیرنده کاسمیک ۲ رسیده است.



شکل ۳- موقعیت هندسی ماهواره کاسمیک ۲ در دستگاه مختصات ECF هنگام دریافت سیگنال در رویداد نهفتگی



شکل ۴- موقعیت هندسی ماهواره GPS17 در دستگاه مختصات ECF هنگام ارسال سیگنال در رویداد نهفتگی

TEC به دست آمده مربوط به بخشی از لایه یونسفر است که سیگنال از آن عبور کرده و به گیرنده رسیده است. تفکیک‌پذیری مقادیر اندازه‌گیری شده در راستای عمودی با توجه به نرخ نمونه‌برداری در حدود چند صد متر است. به طور خلاصه می‌توان مراحل اندازه‌گیری GPS RO را به صورت زیر بیان کرد:

۱. تعیین اطلاعات مداری فرستنده GPS و گیرنده LEO
  ۲. حذف خطای پالس فرستنده و گیرنده با استفاده از روش‌های تفاضلی
  ۳. تعیین مسیر اضافی فاز<sup>۳۹</sup> برای باندهای L1 و L2
  ۴. استخراج TEC متناسب با مسیر اضافی فاز
- تغییرات پارامتر TEC طبق رابطه (۶) با تغییرات چگالی الکترونی متناسب است [۱۵].

$$\Delta n_e \sim (TEC - \langle TEC \rangle) / (2\sqrt{2r\Delta r}) \quad (6)$$

$\langle TEC \rangle$  بیانگر مقدار میانگین پارامتر TEC است.  $r$  شعاع استوانه‌ای به محوریت نقطه شکست سیگنال است.  $\Delta r$  نیز ضخامت عمودی لایه یونسفر در نقطه شکست سیگنال است. به طور معمول  $r$  برابر ۶۴۷۰ کیلومتر و  $\Delta r$  بین ۰/۶ تا ۲ کیلومتر است. با استفاده از این رابطه می‌توان به تغییرات چگالی الکترونی  $\Delta n_e$  بر حسب تعداد الکترون‌ها در سانتی‌متر مکعب دست یافت.

تعداد رویداد نهفتگی که با گیرنده LEO اندازه‌گیری و ثبت می‌شود بستگی به ارتفاع پروازی ماهواره LEO و سرعت آن دارد. از میان رویدادهای ثبت شده برخی مربوط به نهفتگی هنگام صعود سیگنال<sup>۴۰</sup> و برخی مربوط به نهفتگی هنگام کاهش ارتفاع<sup>۴۱</sup> در نقطه شکست سیگنال هستند. نرخ نمونه‌برداری گیرنده‌های LEO در حدود ۵۰ هرتز و تفکیک‌پذیری عمودی اندازه‌گیری‌ها در تابع نرخ نمونه‌برداری و در حدود چند صد متر است.

## انتخاب رویداد نهفتگی

در این مقاله اندازه‌گیری نهفتگی ماهواره کاسمیک مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. ماهواره‌های کاسمیک روزانه ۱۰۰۰ تا ۲۵۰۰ پروفایل چگالی الکترونی را استخراج می‌کنند. برای اندازه‌گیری پارامتر TEC یونسفر احتیاج به دیتای خام نهفتگی است. در این مقاله دیتای خام اندازه‌گیری نهفتگی که توسط گیرنده ماهواره کاسمیک تهیه شده است، از سایت اینترنتی کاسمیک استخراج شده و با استفاده از آن به محاسبه پارامتر TEC و چگالی الکترونی یونسفری پرداخته شده

42. Pseudorange

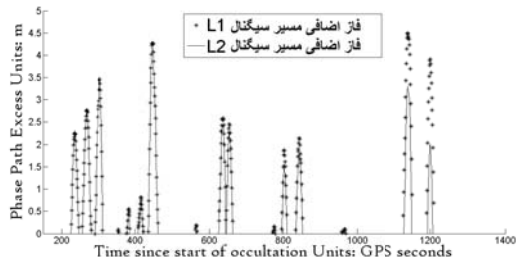
43. RINEX

44. Earth-Centered, Fixed Coordinate System

39. Phase Path Excess

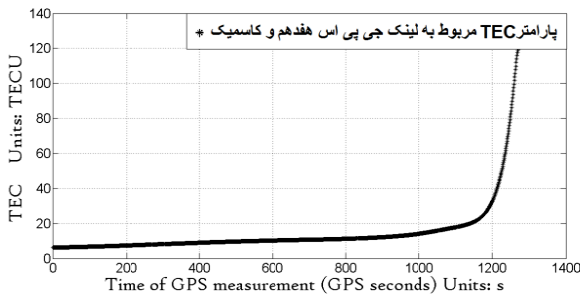
40. Rising Occultation

41. Setting Occultation



شکل ۷- تأخیرهای یونوسفری برای سیگنال‌های L2 و L1

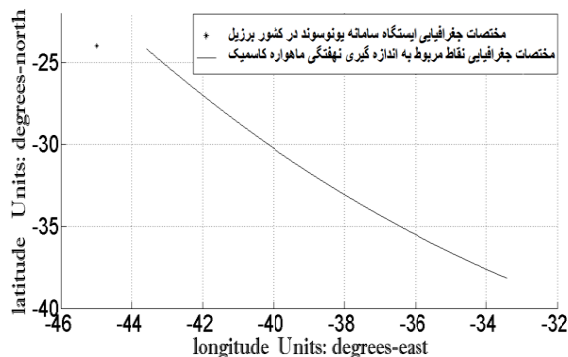
اینک با داشتن مسیر اضافی فاز برای سیگنال‌های L1 و L2 و با استفاده از رابطه (۵) به پارامتر TEC دست می‌یابیم. شکل (۸) بیانگر TEC برای رویداد نهفتگی تحت بررسی است.



شکل ۸- پارامتر TEC به دست آمده از تأخیر یونوسفری

همچنین موقعیت استقرار سامانه یونوسوند در کشور برزیل که در نزدیکی محل جغرافیایی رویداد نهفتگی بررسی می‌شود در شکل (۹) نشان داده شده است.

موقعیت جغرافیایی رویداد نهفتگی نزدیک محل استقرار سامانه یونوسوند است. بنابراین دیتای چگالی الکترونی سامانه یونوسوند برای ارزیابی رویداد نهفتگی تحت بررسی قابل استناد است.

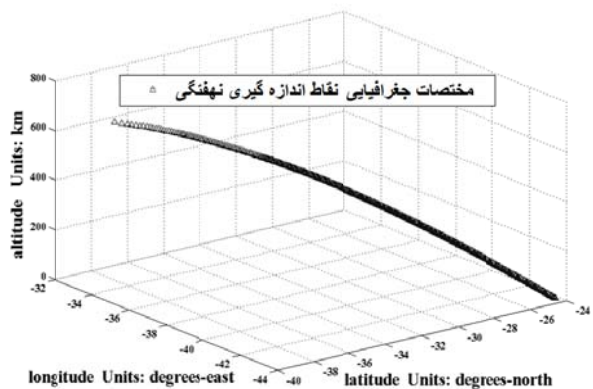


شکل ۹- موقعیت جغرافیایی ایستگاه یونوسوند برزیل و رویداد نهفتگی

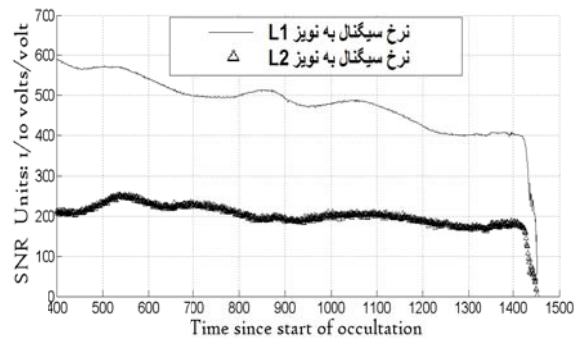
با جایگذاری TEC در رابطه (۶) چگالی الکترونی در محل نهفتگی به دست می‌آید که در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

۳. استخراج خطای پالس فرستنده GPS و گیرنده کاسمیک ۲ در واحد متر با فرمت TXT

این نهفتگی از نوع تنظیم نهفتگی<sup>۴۵</sup> است. سیگنال GPS17 هنگام پایین آمدن از یونوسفر در ارتفاع‌های مختلف دچار شکست می‌شود. شکل (۵) مکان هندسی نقاطی که سیگنال GPS17 در این نهفتگی دچار شکست شده است را نشان می‌دهد. به طور کلی در تنظیم نهفتگی، با کاهش ارتفاع نقطه شکست سیگنال، نسبت سیگنال به نویز کاهش می‌یابد. شکل (۶) SNR را برای سیگنال‌های L1 و L2 نشان می‌دهد.



شکل ۵- مکان هندسی نقاطی که سیگنال GPS17 دچار شکست شده بر حسب عرض جغرافیایی، طول جغرافیایی و ارتفاع



شکل ۶- نسبت سیگنال به نویز برای سیگنال‌های L1 و L2

### استخراج پارامتر TEC

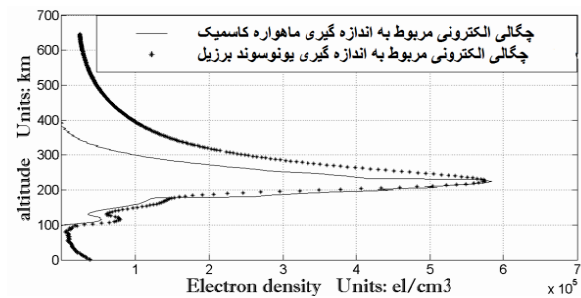
با جایگذاری دیتای خام اندازه‌گیری شده توسط گیرنده ماهواره کاسمیک ۲ در رابطه (۱) به تأخیر تحمیلی ناشی از یونوسفر بر سیگنال آکولت شده برای سیگنال‌های L1 و L2 در واحد متر دست می‌یابیم. شکل (۷) مسیر فاز اضافی را برای این اندازه‌گیری نهفتگی نشان می‌دهد.



- [2] Klobuchar, J. A., *Ionospheric Effects on GPS Air Force*, Geophysics Laboratory, 1991.
- [3] Fjeldbo, G., Kliore, A. J. and Eshleman, V. R., "The Neutral Atmosphere of Venus as Studied with the Mariner V Radio Occultation Experiments," *Astron. Journal.*, Vol. 76, 1971, pp.123-140.
- [4] Tyler, G. L., "Radio Occultation Experiments in the Outer Solar System with Voyager," *Proceeding IEEE*, Vol.75, Issue 10, 1987, pp.1404-1431.
- [5] Lusignan, B., et al, "Sensing the Earth's Atmosphere with Occultation Satellites," *Proceeding IEEE*, Vol. 57, Issue.4, April 1969, pp. 458-467.
- [6] Gurvich, A. S. and Krasil'nikova, T. G. "Navigation Satellites for RADIO Sensing of the Earth's Atmosphere (in Russian)," *Soviet Journal Remote Sensing*, Vol. 6, 1987, pp.89-93.
- [7] Yunck, T. P., Lindal, G. F. and Liu, C. H. "The ROLE of GPS in Precise Earth Observation," *IEEE Position, Location and Navigation Symposium*, Orlando, 1988.
- [8] Ware, R., et al, "GPS Sounding of the Atmosphere from Low Earth Orbit-Preliminary Results," *Bull. Am. Meteorol. soc.* Vol.77, 1996, pp.19-40.
- [9] Rocken, C., et al, "Analysis and Validation of GPS/MET Data in the Neutral Atmosphere," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 102, Issue D25, 1997, pp.29849-29866.
- [10] Wickert, J., et al, "Atmospheric Sounding by GPS Radio Occultation: First Results from CHAMP," *Geophysical Research Letters*, Vol. 28, Issue.17, 2001, pp.3263-3266.
- [11] Hajj, G. A., et al, "CHAMP and SAC-C Atmospheric Occultation Results and Intercomarisons," *Journal of Geophysical Research: Atmospherec*, Vol. 109, Issue D6, 2004, p. D06109.
- [12] Anthes, R. A., et al, "The COSMIC/FORMOSAT-3 Mission: Early Results," *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 89, Issue 3, 2008, pp. 313-333.
- [13] Smith, E. K. and Weintraub, S. "The Constants in the Equation for Atmospheric Refractive Index at Radio Frequencies," *Proceedings of the IRE*, Vol. 41, Issue 8, 1953, pp.1035-1037.
- [14] Hajj, G. A., et al, "A Technical Description of Atmospheric Sounding by GPS Occultation," *Journal Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 64, Issue.4, 2002, pp.451-469.
- [15] Hockea, K. and Igarashia, K., "Global Sounding of Sporadic E Layers by the GPS/MET Radio Occultation Experiment," *JPL Publication*, 1994, pp.94-18.
- [16] The Website of Cosmic Mission, Available:[on line], <http://Cosmic-io.Cosmic.Ucar.Edu/Cdaac/>.

همچنین در شکل (۱۰) چگالی الکترونی به دست آمده از سامانه یونوسوند نیز برای مقایسه آمده است.

بیشترین مقدار چگالی الکترونی مربوط به ارتفاع ۲۲۷ کیلومتری از سطح زمین است. از سطح زمین تا این ارتفاع دو نمودار تطبیق خوبی با هم دارند. ولی با افزایش ارتفاع از کیفیت تطبیق کاسته می شود. یکی از دلایل عدم تطبیق آن است که حساسیت یونوسوندا با افزایش ارتفاع در لایه های یونوسفری کاهش می یابد.



شکل ۱۰- چگالی الکترونی به دست آمده از اندازه گیری نهفتگی و یونوسوند

## نتیجه گیری

با تعقیب دامنه و فاز سیگنال آکولت شده (خم شده توسط لایه یونوسفر) یک ماهواره موقعیت یابی، می توان پارامتر TEC آن قسمت از لایه یونوسفر را محاسبه کرد که در مسیر عبور سیگنال قرار دارد. مراحل پردازش دیتای خام گیرنده هایی که با هدف نهفتگی رادیویی بر روی ماهواره های مدار نزدیک به زمین نصب می شوند بررسی شده است. با توجه به رویکرد کشورمان در توسعه ساخت ماهواره های سنجش از دور، طراحی و ساخت سامانه GPS نهفتگی رادیویی و نصب آن بر یکی از ماهواره های سنجش از دور، گامی بزرگ در بومی سازی فناوری های فضایی محسوب خواهد شد.

## مراجع

- [1] Kaplan, E. D. and Hegarty, Ch. J., Editors, *Understanding GPS, Principles and Application*, Boston/London: Artech House, 1996.