

# Atmospheric Doppler Modelling for Open Loop Tracking in GPS-RO Receivers

L. Mohammadi<sup>1</sup>, Sh. Amiri<sup>2\*</sup> and Gh. Mohammadkhani<sup>3</sup>

1. Department of Institute for Communication Technology, ICT Research Institute

2. Department of Institute of Electrical and Information Technology, Iranian Research Organization for Science and Technology (IROST)

\*Postal Code:3353136846, Tehran, IRAN

[amiri@irost.org](mailto:amiri@irost.org)

*One of the main challenges of the Open-Loop Signal Tracking method in GPS-RO space receivers, is Doppler prediction. Almost in all satellite communication systems, accurate carrier phase tracking under difficult conditions is depend on Doppler prediction accuracy. Obviously, there are several methods for producing a predicted Doppler model, and one of the earliest is Sokolovskiy. In this paper, we are analyzing the typical and operational atmospheric Doppler prediction models for the Open-Loop Signal Tracking of radio occultation, in satellite communications. A summary and comparison between these methods will be concluded in the end of this paper. finally we propose a prediction method can be used in national GPS-RO payloads for predicting atmospheric doppler based on combination of Sokolovsky and C.O. Ao methods.*

**Keywords:** Radio occultation, Open loop tracking, Atmospheric doppler

---

1. PhD Student  
2. Associate Professor (Corresponding Author)  
3. Assistant Professor

# مدل‌های پیش‌بینی داپلر اتمسفری در گیرنده GPS-RO برای ردگیری حلقه‌باز

لیلا محمدی<sup>۱</sup>، شروین امیری<sup>۲\*</sup> و غلامرضا محمدخانی<sup>۳</sup>

۱- پژوهشکده ارتباطات و فناوری اطلاعات، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات

۲ و ۳- پژوهشکده برق و فناوری اطلاعات، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران

\* تهران، شهریار، کدپستی: ۳۳۵۳۱۳۶۸۴۶

amiri@irost.ir

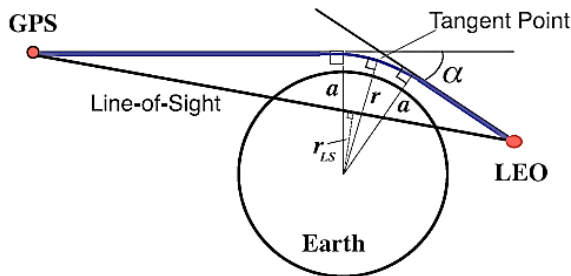
در این مقاله، ابتدا نهفتگی رادیویی و اهمیت ردگیری سیگنال برای گیرنده‌های GPS-RO شرح داده می‌شود. سپس ردگیری حلقه‌باز به عنوان ابزار توانمند و جایگزین ردگیری حلقه‌بسته، برای دریافت سیگنال‌های متفرقه‌شده GPS، گذرنده از تروپوسفر پایین، معرفی می‌شود. در تحقق ردگیری حلقه‌باز با نرخ پایین، اهمیت مدل داپلر مطرح می‌شود. در این مقاله به سه روش مهم در پیاده‌سازی مدل داپلر اتمسفری که هم‌اکنون عملیاتی شده‌اند، پرداخته می‌شود. ابتدا روش سوکولوفسکی، که از روش‌های اولیه و مهم بوده و در گیرنده ROSA به کار می‌رود، تبیین می‌شود. سپس روش سی.ا.او که در گیرنده مهم BlackJack تعبیه شده است، مطرح شده و در ادامه روش کریستنسن بیان می‌شود که در گیرنده GRAS عملیاتی شده است. نحوه اعمال ورودی‌های هندسی و اتمسفری در این روش‌ها و دقت آنها بررسی خواهد شد. سپس با بهره‌گیری از دانش به‌دست آمده از نقاط قوت و ضعف این مدل‌ها، یک مدل ترکیبی برای گیرنده GPS-RO ایرانی به همراه الگوریتم پیاده‌سازی آن مطرح می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: نهفتگی رادیویی، ردگیری حلقه‌باز، مدل داپلر اتمسفری و هندسی، زاویه شکست، پارامتر اثر، مدل هواشناسی

		علائم و اختصارات	
$f_{dop}$	داپلر کل		پارامتر اثر
$f_{dop}^0$	داپلر هندسی	$a$	سرعت نور در خلأ
$flat$	ضریب تخت شدگی زمین	$c$	تبدیل کانونیکال
FLL	حلقه‌بسته فرکانس	CT	فاصله GPS تا limb در زمان مرجع
FSI	معکوس طیف کامل	$D_G$	فاصله LEO تا limb در زمان مرجع
$H$	ارتفاع مماس در زمان مرجع	$D_L$	حلقه‌بسته تأخیر
$h$	ارتفاع تقاطع مجانب‌های پرتو (ارتفاع اثر)	DLL	فشار نسبی بخار آب
$h_0$	مقیاس ارتفاع در مدل ITU	$e$	فرکانس حامل
$h_{min}$	کمترین ارتفاع اثر	$f$	داپلر اتمسفری (اضافی)
$lat$	عرض جغرافیایی در نقطه مماس پرتو	$f_D$	
LSA	ارتفاع خط دید		
MCC	ثابت مدل منحنی		
MIPA	کمترین ارتفاع نقطه اثر		
$n$	ضریب شکست اتمسفری		

۱. دانشجوی دکتری  
۲. دانشیار (نویسنده مخاطب)  
۳. استادیار

شکل (۱)، نمایی از وقوع این پدیده و پارامترهای مشخص کننده آن را نمایش می دهد.



شکل ۱- نمایی از یک نهفتگی رادیویی که پارامتر اثر ( $a$ ) و زاویه شکست ( $\alpha$ ) و نقطه مماس از پارامترهای اساسی یک نهفتگی را نمایش می دهد.

در نهفتگی رادیویی، باتوجه به معین بودن مشخصات سیگنال ارسالی و با محاسبه مشخصات سیگنال دریافتی، می توان به ویژگی های محیط انتشار (اتمسفِر) پی برد. این ویژگی ها متناسب به منطقه شکست سیگنال، یا نقاط مماس<sup>۶</sup> است، چرا که در این نقاط سیگنال وارد عمق اتمسفِر شده و دچار شکست و تغییر در مشخصات خود همچون دامنه و فاز می شود.

از آنجاکه ماهیتاً نهفتگی رادیویی، دریافت سیگنال در شرایط افق و زیر افق است، بنابراین SNR، پایین و نرخ تغییرات فاز (جابه جایی داپلر) بالاست، و از این روروش «دریافت و ردگیری» سیگنال در گیرنده های نهفتگی که جهت ثبت داده های نهفتگی به کار می روند، پیچیدگی خاصی دارد. روش مرسوم ردگیری در گیرنده های GPS-RO، روش های حلقه بسته ( $PLL^7$ ,  $DLL^8$ ,  $FLL^9$ ) بوده است. اما این روش ها نسبت به فیدینگ آسیب پذیر هستند و نیز زمان نسبتاً طولانی برای پیدا کردن سیگنال لازم دارند. هنگامی که نقطه مماس سیگنال، در لایه های پایین اتمسفِر قرار گیرد، نرخ تغییرات فاز (داپلر اتمسفری) ناشی از شکست های زیاد سیگنال در اتمسفِر، بسیار زیاد شده و توان سیگنال دریافتی نیز پایین می شود و با روش های ردگیری مذکور، سیگنال قابل ردگیری و دریافت نیست. تحقیقات صورت گرفته، نشان داده است که عامل اصلی انحراف و خطا در استخراج پروفایل های انکسار (ضرایب شکست اتمسفِر بر حسب ارتفاع که برای تعیین مشخصات اتمسفِر به کار می روند)، از داده های نهفتگی مأموریت GPS/MET[5] و پس از آن در مأموریت های SAC-C و CHAMP[6][7][8]، همین خطای ردگیری است.

$N_0$	مقدار متوسط شکست اتمسفِر
NBDR	نمونه برداری با نرخ پایین
OL	حلقه باز
$P_D$	فشار هوای خشک
PLL	حلقه بسته فاز
$R$	شعاع منحنی محلی (در نقطه مماس)
$R_{equator}$	شعاع استوا
$R_G^{(1)}$ , $R_L^{(1)}$	شعاع ماهواره ها در $t_1$
$R_G^{(2)}$ , $R_L^{(2)}$	شعاع ماهواره ها در $t_2$
$R_G, R_L$	برداری شعاعی ماهواره ها
$r_{LS}$	شعاع خط دید مستقیم
RO	نهفتگی رادیویی
SNR	سیگنال به نویز
$T$	دما
$t_1$	زمان مرجع
$t_2$	زمان دلخواه غیر از مرجع
TEC	چگالی الکترونی کل
$v$	برداری ۶ بعدی سرعت ماهواره ها
$x$	برداری ۶ بعدی مکان ماهواره ها
$\alpha$	زاویه شکست
$\beta_G$	زاویه زینت پرتو ماهواره GPS
$\beta_L$	زاویه زینت پرتو ماهواره LEO
$\gamma$	زاویه میان بردارهای شعاعی ماهواره های LEO و GPS
$\varepsilon$	تغییرات زاویه بین شعاع های ماهواره های LEO و GPS
$\lambda$	طول موج

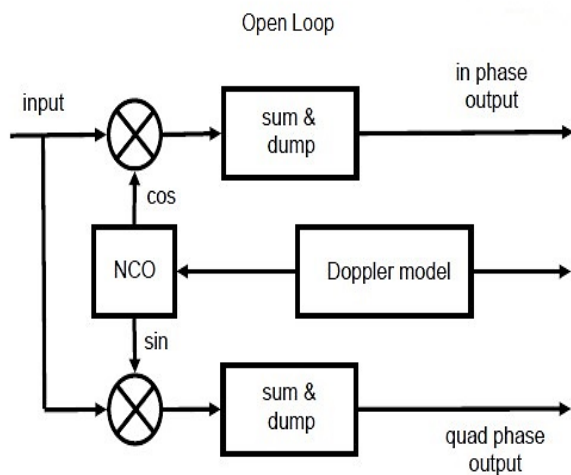
## مقدمه

امروزه، نهفتگی رادیویی<sup>۴</sup> یکی از روش های بسیار کارآمد برای شناخت محیط اتمسفِر زمین است که به واسطه قرارگیری ماهواره های ناوبری مانند GPS در مدار زمین، به عنوان فرستنده و ماهواره های LEO به عنوان گیرنده، عملیاتی شده است. نهفتگی رادیویی، هنگام دریافت سیگنال درگیرنده، زمانی که از افق عبور می کند، رخ می دهد. همچنین شناسایی لایه یونسفر، با سنجش و مانیتورینگ دقیق چگالی الکترونی یونسفر،<sup>۵</sup> با استفاده از اطلاعات ذخیره شده به روش نهفتگی رادیویی، امری متداول شده است. این روش در دقیق کردن پیش بینی های هواشناسی و همچنین پیش بینی زلزله کاربرد دارد [1][2][3][4]

6. Tangent Point  
7. Phase Locked Loop  
8. Delay Locked Loop  
9. Frequency Locked Loop

4. Radio Occultation  
5. Total Electron Content

ندارد و بر اساس نمونه‌برداری خام از سیگنال دریافتی، عمل می‌کند. نرخ این نمونه‌برداری می‌تواند آنقدر بالا باشد که بدون هیچ گونه اطلاع از مشخصات سیگنال، آن را دریافت کرد، اما حجم اطلاعات اضافی بسیار بالایی را به همراه خواهد داشت که باعث افزایش پهنای باند مورد نیاز جهت ارسال اطلاعات به ایستگاه زمینی جهت پس‌پردازش و همچنین حافظه زیاد جهت جمع‌آوری اطلاعات روی ماهواره خواهد شد. در این راستا می‌توان با داشتن اطلاعاتی از مشخصات سیگنال فرستنده و پیش‌بینی تغییرات رخ داده بر آن همچون جابه‌جایی داپلر، با نرخ نمونه‌برداری کمتری سیگنال را دریافت و ردگیری کرد. اینجاست که مدل پیش‌بینی داپلر مطرح می‌شود. هر چه میزان تخمین داپلر دقیق‌تر باشد، سیگنال را می‌توان با نرخ نمونه‌برداری پایین‌تری دریافت کرد و حجم اطلاعات ذخیره شده نیز کاهش یافته و در نتیجه پهنای باند مورد نیاز نیز کمتر خواهد بود. در جدول (۱) ارتباط نرخ نمونه‌برداری با مدل و حجم اطلاعات ارسالی در انواع روش‌های حلقه‌باز به صورت نوعی آورده شده است.



شکل ۲- جایگاه مدل داپلر در گیرنده GPS-RO در ردگیری حلقه‌باز

جدول ۱- ارتباط نرخ نمونه‌برداری و حجم اطلاعات ارسالی در روش ردگیری حلقه‌باز [6]

توضیحات	حجم اطلاعات ارسالی به زمین	نرخ نمونه‌برداری
عدم نیاز به مدل‌های پیش‌بینی داپلر	800 GB در روز	نرخ بالا: 20 MHz
نیاز به مدل پیش‌بینی داپلر هندسی	300 MB در روز	نرخ متوسط: 2 KHz
نیاز به مدل پیش‌بینی داپلر هندسی و اتمسفری	50 MB در روز	نرخ پایین: 50 Hz ( $1^2$ NBDR)

در راستای حل این چالش، مباحث متعددی برای ردگیری سیگنال GPS در تروپوسفر پایین مطرح و روش «ردگیری حلقه‌باز» به‌عنوان یک راهکار جایگزین مؤثر پیشنهاد شده است [11][10][9]. در این مقاله، این نوع ردگیری و روش‌های مرسوم در پیاده‌سازی بخش اصلی آن یعنی «مدل‌های پیش‌بینی داپلر اتمسفری» بر روی گیرنده‌های GPS-RO در مأموریت‌های نهفتگی، بررسی می‌شود.

## ردگیری حلقه‌باز

روش ردگیری حلقه‌باز از دیرباز در آزمایش‌های سیاره‌ای و مطالعه اتمسفر سیارات به‌کار رفته و با موفقیت اجرا شده است [12][13]. با نمایان شدن ضعف ردگیری حلقه‌بسته در دریافت سیگنال‌های گذرنده از لایه‌های پایین تروپوسفر، این روش برای مطالعه اتمسفر زمین نیز پیشنهاد شده است. البته در مطالعه اتمسفر زمین، سیگنال فرستنده، سیگنال GPS است و این سیگنال برخلاف آزمایش‌های سیاره‌ای، مدوله است. بنابراین در گیرنده GPS-RO نیاز به دمدولاسیون نیز وجود دارد که کمی ردگیری حلقه‌باز را پیچیده‌تر می‌کند.

به طور کلی روش ردگیری حلقه‌باز مشتمل بر دو بخش است: (۱) بخش اول که در گیرنده GPS-RO روی ماهواره است که پایه «مدل‌های پیش‌بینی داپلر» عمل می‌کند. (۲) بخش دوم که پس‌پردازش نامیده می‌شود مشتمل بر تکنیک‌هایی در ایستگاه زمینی برای استخراج اطلاعات دقیق فاز (داپلر) و دامنه سیگنال است، تا بتوان سیگنال‌های پیچیده و با دینامیک بالای گذرنده از تروپوسفر پایین را تحلیل کرد. از روش‌های مطرح در بازبازی اطلاعات، می‌توان به تبدیل کانونیکال، [14] CT<sup>10</sup>، و یا روش معکوس طیف کامل، [15] FSI<sup>11</sup>، اشاره کرد. این روش‌ها توانایی برطرف کردن مشکلات تفرق و چندمسیرگی اتمسفری را دارند. اما در این تکنیک‌ها فرض بر آن است که دامنه و فاز سیگنال نهفتگی با دقت کافی توسط گیرنده روی ماهواره ثبت شده است [6].

برای بخش اول یعنی ردگیری بر روی ماهواره، جایگاه و کارکرد مدل پیش‌بینی داپلر در یک گیرنده با قابلیت ردگیری حلقه‌باز، به‌صورت ساده و گویا در شکل (۲) نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل (۲) نیز مشاهده می‌شود، ردگیری حلقه‌باز گیرنده ماهواره، برخلاف روش حلقه‌بسته، فیدبکی از سیگنال دریافتی

10. Canonical Transform

11. Full spectrum transform

12. Narrow Band Digital Recording

(۳) روش کریستن سن<sup>۱۷</sup>

## روش سوکولوفسکی

این روش توسط سوکولوفسکی [9] در سال ۲۰۰۱ معرفی شد و مرجع تحقیق و توسعه بسیاری از فعالیت‌های بعدی قرار گرفت. در این روش، پیش‌بینی داپلر اتمسفری سیگنال نهفتگی، با استفاده از داده‌های انکسار اتمسفر و بر اساس مدل‌های هواشناسی، انجام شده است. در این روش فرض می‌شود که مدارات ماهواره‌های LEO و GPS، با دقت مناسب قابل پیش‌بینی هستند.

در این مدل، ضرایب شکست اتمسفر  $n$  بر حسب ارتفاع از زمین و عرض جغرافیایی زمین به عنوان اطلاعات هواشناسی، از قبل در گیرنده GPS-RO باید آماده باشند. برای این منظور باید از مدل‌ها و روابط هواشناسی [16][17][18] استفاده شود.

سوکولوفسکی از مدل NCEP T62 NWP برای پروفایل‌های ضریب شکست، استفاده کرده است. در این مدل ضرایب شکست با دقت حدود ۱/۹ درجه در طول و عرض جغرافیایی تهیه شده‌اند. پروفایل ضرایب شکست در ارتفاع نیز دارای دقت ۲۸ سطحی است که در نزدیکی سطح زمین فواصل حدود ۰/۱ کیلومتر و در ارتفاعات بالاتر فواصل چند کیلومتری را شامل می‌شود [19].

### پیش‌بینی داپلر

بعد از تهیه پروفایل ضرایب شکست، با استفاده از رابطه (۵)، زاویه شکست  $\alpha$  به صورت تابعی از ارتفاع و عرض جغرافیایی<sup>۱۸</sup>، محاسبه می‌شود. زاویه شکست باید برای نقاط مماس پرتو به دست آید. بنابراین در این رابطه،  $h$  ارتفاع نقطه مماس پرتو (ارتفاع اثر)،  $lat$  عرض جغرافیایی نقطه مماس پرتو، شعاع منحنی محلی بر اساس بیضوی مرجع زمین در نقطه مماس پرتو و  $\alpha = R(lat) + h$  پارامتر اثر است.

$$\alpha(h, lat) = -2a \int_a^{\infty} \frac{\partial [\ln n(z, lat)] / \partial z}{\{ [R(lat) + z]^2 n^2(z, lat) - a^2 \}^{1/2}} dz \quad (5)$$

تابع  $\alpha(h, lat)$  برای  $\alpha(h, lat) = R(lat)[n(0, lat) - 1]$  معتبر است.  $h_{min}$  مربوط به زمانی است که پرتو با بیضوی مرجع زمین تماس پیدا می‌کند.

پس از فراهم آوردن روابط محاسبه زاویه شکست، پیش‌بینی داپلر در دو مرحله با استناد به شکل (۳)، به صورت ذیل انجام می‌شود:

اولین بار محقق برجسته UCAR<sup>۱۳</sup>، سوکولوفسکی<sup>۱۴</sup> در سال ۲۰۰۱ [9] بیان کرد که با بهره‌گیری از تخمین دقیق داپلر و مدل‌سازی آن، امکان ردگیری حلقه‌باز، با نرخ نمونه‌برداری پایین، (نمونه‌برداری با نرخ ~50 Hz) در گیرنده GPS-RO قابل اجراست. همانطور که در جدول (۱) آورده شده است، در ردگیری حلقه‌باز نرخ پایین، نیاز است که در گیرنده مدل دقیق داپلر اتمسفری و هندسی تعبیه شود. در این صورت در حدود 50 MByte/day ارسال داده به زمین کافی بوده و سخت‌افزار گیرنده‌های متداول، قابلیت انجام آن را خواهند داشت. این مسئله باعث کاهش هزینه‌های اضافی سخت‌افزار بر روی ماهواره می‌شود. این مزیت بزرگ منجر به توسعه مدل‌های پیش‌بینی داپلر شده است و این مدل‌ها هم اکنون در گیرنده Black Jack ماهواره SAC-C و گیرنده IGOR<sup>۱۵</sup> ماهواره‌های TerraSAR-X و COSMIC به کار می‌روند.

در روش حلقه‌باز نرخ پایین (NBDR)، برای پیش‌بینی مقدار جابه‌جایی فرکانس حامل بر اثر داپلر هندسی و داپلر اتمسفری، در طول یک نهفتگی رادیویی به اطلاعات زیر نیاز است:

(۱) بردار مکان ماهواره‌ها در «هر لحظه»، از شروع تا پایان نهفتگی؛  
(۲) بردار سرعت ماهواره‌ها در «هر لحظه» از شروع تا پایان نهفتگی؛  
(۳) مدل‌های هواشناسی در نقاط مماس نهفتگی.

با استفاده از اطلاعات دو بخش اول، در هر لحظه داپلر هندسی محاسبه شده و همچنین نقاط مماس در هر لحظه قابل تخمین هستند. سپس با اطلاع از مدل‌های هواشناسی در نقاط مماس، ضریب انکسار اتمسفر این نقاط استخراج شده و از آن زوایای شکست و سپس داپلر اتمسفری محاسبه می‌شود.

با توجه به گیرنده‌های دقیق ناوبری موجود روی ماهواره و بالا رفتن دقت روش‌های ناوبری، داپلر هندسی که ناشی از حرکت نسبی ماهواره‌های فرستنده و گیرنده است، با دقت خوبی قابل محاسبه است. اما داپلر اتمسفری نیاز به داده‌های بیشتری اعم از داده‌های هواشناسی داشته و روش‌های مختلفی نیز برای توسعه مدل داپلر اتمسفری ارائه شده است. هر چه دقت مدل داپلر اتمسفری بیشتر باشد، امکان و توجیه نمونه‌برداری با نرخ پایین‌تر افزایش می‌یابد. در ادامه مدل‌های پیش‌بینی داپلر اتمسفری که امروزه، شناخته و عملیاتی شده‌اند، بررسی می‌شوند.

روش‌های معرفی شده جهت مدل داپلر اتمسفری عبارتند از:

(۱) روش سوکولوفسکی

(۲) روش سی.ا.ا.و<sup>۱۶</sup>

13. University Corporation for Atmospheric Research

14. Sokolovskiy

15. Integrated GPS Occ. Receiver

16. C.O.Ao

17. Christensen

18. Ray Tangent Point

استخراج در بخش پس‌پردازش است، لذا باید که این سیگنال ردگیری شود و لازمه آن پیش‌بینی داپلر است. بنابراین برای «هایی که در معادلات (۶) تا (۸) جواب ندارند (برای مثال  $h < h_{min}$  می‌شود)، ارتفاع مجانب پرتو ثابت در نظر گرفته می‌شود ( $h = h_{min}$ ). در این حالت  $\beta_L = \beta_{Lmin}$  و  $\beta_G = \beta_{Gmin}$  نیز ثابت خواهند بود که از روابط (۶) و (۷) با  $h = h_{min}$  محاسبه می‌شوند. سپس زاویه شکست در این حالت از رابطه (۹) به دست می‌آید.

$$\alpha = \beta_{Lmin} + \beta_{Gmin} + \gamma - \pi > \alpha(h_{min}) \quad (9)$$

پس از آنکه زوایای زینت  $\beta_L$  و  $\beta_G$  محاسبه شدند، میزان جابه‌جایی داپلر کل سیگنال نهفتگی، یعنی مجموع داپلر هندسی و اتمسفری،  $f_{dop}$  با استفاده از رابطه (۱۰) محاسبه خواهد شد [9]:

$$f_{dop} = fc^{-1} [\pm v_G \cos(\phi_G - \beta_G) \pm v_L \cos(\phi_L - \beta_L)] \quad (10)$$

که  $c$  سرعت نور در خلأ،  $f$  فرکانس حامل،  $v_{L,G}$  تصاویر بردارهای سرعت فرستنده و گیرنده بر صفحه نهفتگی  $\phi_L$ ،  $\phi_G$  زوایای بین این تصاویر و عمودهای محلی در گیرنده و فرستنده هستند. علائم مثبت و منفی وابسته به جهت بردارهای  $v_{L,G}$  می‌باشند.

در روش سوکولوفسکی، بیشترین حجم محاسبه مربوط به محاسبه  $\alpha(h)$  از رابطه انتگرالی (۵) است و سایر روابط، روابط جبری ساده هستند. بنابراین مناسب است که رابطه (۵) برای مقادیر مختلف ارتفاع و عرض جغرافیایی از قبل محاسبه شده و به صورت پایگاه داده در گیرنده ذخیره شده باشد. البته بهتر است که این پایگاه داده در زمان‌های متناوب به روزرسانی و مجدداً به گیرنده آپلود شود تا تغییرات فصلی در آب و هوا را دنبال کند. به علاوه می‌توان از برخی مدل‌های استاندارد و معتبر هواشناسی برای ضریب شکست همچون مدل ITU،  $\alpha(h)$  را برای تمام عرض‌ها و فصول، محاسبه کرد که در این صورت از دقت مدل داپلر کاسته می‌شود.

### دقت مدل

برای تخمین دقت پیش‌بینی داپلر در این روش، سوکولوفسکی در یک مثال خاص، به پیاده‌سازی روش خود پرداخته است. در این مثال مدارات ماهواره‌ها دایروی و هم‌صفحه تنظیم شده‌اند و عبارتند از:

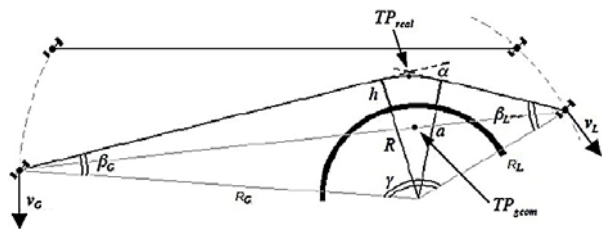
$$R_G = 26,600 \text{ km}, R_L = 7150 \text{ km}$$

$$v_G = 3.9 \text{ km s}^{-1}, v_L = 7.5 \text{ km s}^{-1}$$

ماهواره‌ها در جهت مخالف یکدیگر حرکت می‌کنند و شعاع زمین نیز  $R = 6370 \text{ km}$  در نظر گرفته شده است. همچنین پروفایل زاویه شکست، توسط مدل NCEP T62 NWP تولید شده است. با این ورودی‌ها، تابع داپلر  $f_{dop}$  از حل روابط (۶) تا (۸) و (۱۰) به دست می‌آید.

۱- محاسبه زوایای  $\beta_L$  و  $\beta_G$  (زوایای زینت پرتو<sup>۱۹</sup>)، زوایای بین مماس پرتو و عمود محلی در گیرنده و فرستنده (در امتداد بردارهای شعاعی  $R_L$  و  $R_G$ )

۲- محاسبه جابه‌جایی فرکانس حامل برای زوایای زینت محاسبه شده،  $\beta_L$  و  $\beta_G$  و بردارهای شعاعی فرستنده و گیرنده،  $R_L$  و  $R_G$  و سرعت‌های فرستنده و گیرنده  $v_L$  و  $v_G$ .



شکل ۳- پارامترهای هندسی نهفتگی برای روش سوکولوفسکی [21]

زوایای زینت پرتو ( $\beta_L$  و  $\beta_G$ ) با حل همزمان معادلات (۶) تا (۸)، به دست می‌آیند.

$$R_L \sin \beta_L = R + h \quad (6)$$

$$R_G \sin \beta_G = R + h \quad (7)$$

$$\beta_L + \beta_G + \gamma - \alpha(h) - \pi = 0 \quad (8)$$

که در اینجا  $\gamma$  زاویه میان بردارهای شعاعی  $R_L$  و  $R_G$  است.

در اینجا ۳ معادله با ۴ مجهول وجود دارد. معلومات عبارتند از بردارهای شعاعی  $R_L$  و  $R_G$ ،  $R$  و  $\gamma$  و مجهولات عبارتند از  $\beta_L$ ،  $\beta_G$ ،  $h$  و  $\alpha$ . رابطه چهارم، همان رابطه میان ارتفاعات و زاویه شکست، یعنی  $\alpha(h)$  برگرفته از رابطه (۵) خواهد بود. بنابراین مجهولات که شامل زوایای زینت نیز بودند، به دست خواهند آمد.

در مرحله بعد باید عرض جغرافیایی نقطه مماس پرتو،  $lat$  نسبت به نقطه حدس اولیه، دقیق‌تر تعیین شود. برای این منظور، بردار  $R_G$  را به سمت بردار  $R_L$ ، حول نرمال «صفحه نهفتگی»، به اندازه زاویه  $\frac{\pi}{2} - \beta_G + \frac{\alpha}{2}$  می‌چرخانیم. نقطه تقاطع این بردار

چرخش یافته با سطح زمین، عرض جغرافیایی جدید را تعیین می‌کند. صفحه نهفتگی، صفحه‌ای است که با مکان ماهواره‌ها و مرکز منحنی محلی (مرکز انکسار)، تعریف می‌شود [20]. سپس حل معادلات (۶) تا (۸) برای عرض جغرافیایی جدید تکرار می‌شود.

ممکن است برای مقادیر بزرگ زاویه مرکزی ( $\gamma$ )، هیچ پرتوی مواصلائی بین گیرنده و فرستنده وجود نداشته باشد. در این حالت، از آنجا که سیگنال نهفتگی متفرق شده، برای چنین «هایی نیز وجود دارد و محتوای اطلاعاتی آنها در مطالعه اتمسفر مهم و قابل

کمتری داشته و در نتیجه مقادیر داپلرهای اتمسفری به هم نزدیک خواهند بود.

نکته دیگری که سوکولوفسکی بر اساس تحقیقات خود به آن اشاره می‌کند، آن است که هنگامی که نقاط مماس پرتو در ارتفاعات تروپوسفری هستند، یونسفر نیز یک جابه‌جایی داپلر اضافی در مرتبه 1-2Hz را تحمیل می‌کند و به‌طور کلی این داپلر یونسفری نیز قابل مدل‌سازی با استفاده از داده‌های هواشناسی یونسفری است. اما یونسفر بسیار متغیرتر از اتمسفر خنثی بوده و مدل‌سازی پیچیده‌تری دارد و نیز از آنجاکه این داپلر یونسفری بسیار کوچک‌تر از توزیع داپلر اتمسفری خنثی است، برای ردگیری حلقه‌باز از این‌داپلر صرف‌نظر می‌شود.

یک نمونه عملیاتی روش سوکولوفسکی در گیرنده ROSA، ساخته شده توسط آژانس فضایی ایتالیا در سال ۲۰۰۶، پیاده شده است، که در تروپوسفر به صورت حلقه‌باز عمل می‌کند [21].

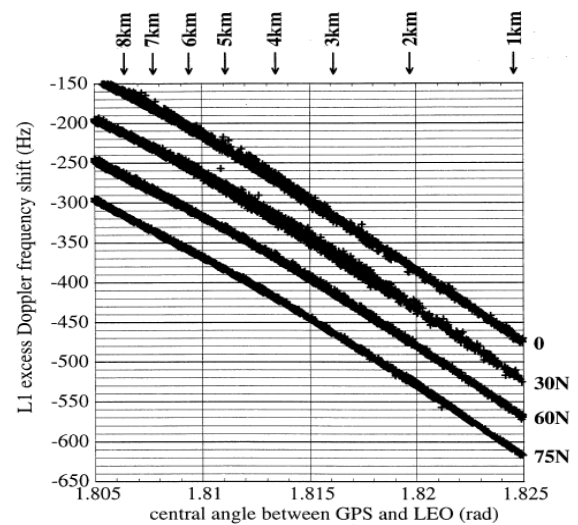
#### روش سی.ا.آو

این روش برگرفته از فعالیت‌های آقای سی.ا.آو و گروهش است و در گیرنده BlackJack به‌کار رفته است [6]. گیرنده Black Jack پایه و اساس گیرنده‌های GPS-RO در مأموریت‌های SAC-C، COSMIC، CHAMP، GRACE/C/NOFS و TerraSAR-X است [22]. تست اولین گیرنده، BlackJack، با نرم‌افزار ردگیری حلقه باز سی.ا.آو در سال ۲۰۰۶، با موفقیت به پایان رسیده و پس از آن در مأموریت SAC-C پیاده شده است. با به‌کارگیری روش حلقه‌باز در ماهواره SAC-C بیش از ۸۰ درصد پروفایل‌های آن به ارتفاعات زیر ۲ کیلومتر در مناطق استوایی رسیده است، در حالی که با ردگیری حلقه‌بسته تنها ۵۰ درصد اطلاعات مربوط به زیر ۲ کیلومتر بوده است.

در گیرنده BlackJack، در شروع نهنفتگی پایین‌رونده<sup>۲۰</sup> که شروع دریافت سیگنال بیرون از شرایط پدیدینامیک تروپوسفر است، ابتدا، سیگنال‌های L1 و L2 ردگیری می‌شوند. سپس تحت شرایطی مشخص در تروپوسفر (برای مثال هنگامی که سطح SNR سیگنال دریافتی از یک مقدار مشخص کمتر شود)، ردگیری از حلقه‌بسته به حلقه‌باز تغییر می‌یابد و در این شرایط فقط سیگنال L1 ردگیری می‌شود. در نهنفتگی بالا‌رونده<sup>۲۱</sup> ابتدا با ردگیری حلقه‌باز سعی می‌شود تا سیگنال دریافت و ردگیری شود و پس از خروج از تروپوسفر و رسیدن به شرایط مطلوب، ردگیری به حلقه‌بسته تبدیل می‌شود.

شکل (۴)، چهار مجموعه داپلر اتمسفری (داپلر اضافی)  $f_D = f_{dop} - f_{dop}^0$  را نمایش می‌دهد. همان داپلر هندسی است که تنها از حرکت ماهواره‌ها در فضا نسبت به یکدیگر و مستقل از شرایط اتمسفر به دست می‌آید و با فرض  $\alpha(h)=0$  در روابط (۶) تا (۸) و (۱۰)، محاسبه می‌شود. بدین ترتیب  $f_D$  که داپلر اتمسفری خوانده می‌شود، داپلری است که تنها به علت شرایط اتمسفر و شکست سیگنال در آن به وجود آمده است. هر مجموعه داپلر اتمسفری در شکل (۴) شامل ۱۹۲ پروفایل  $f_D$  برای یک عرض جغرافیایی در شرایط آب و هوایی مختلف است. در عرض‌های متفاوت جغرافیایی، برای نمایش بهتر در نمودار، جابه‌جایی 50Hz در محور فرکانس به ترتیب اعمال شده است. ارتفاعات تقریبی نقاط مماس پرتو (ارتفاع اثر) نیز در بالای نمودار با فلش مشخص شده‌اند.

با دقت در این شکل مشاهده می‌شود که در ارتفاعات اثر بین ۳ تا ۵ کیلومتری و در مناطق استوایی، حداکثر دامنه تغییرات داپلر اتمسفری  $\pm 15\text{Hz}$  است.



شکل ۴- توزیع جابه‌جایی فرکانس داپلر متوسط سیگنال‌های RO. مجموعه‌های متفاوت (هرکدام ۱۹۲ پروفایل) مربوط به عرض‌های متفاوت مشخص در سمت راست نمودار هستند. مجموعه‌ها در حوزه فرکانس ۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰- در محور فرکانس برای نمایش انتقال یافته‌اند. پیکان‌های بالای منحنی ارتفاعات تقریبی نقاط مماس پرتو را نمایش می‌دهند [9].

سوکولوفسکی بیان می‌کند که چنانچه یک مدل هواشناسی واحد برای تمام عرض‌ها و برای تمام فصول در گیرنده به کار رود، آنگاه داپلر متوسط با دقت حدود 15-20Hz می‌تواند پیش‌بینی شود. او علت این توزیع فرکانس کم را فاصله زیاد بین دو ماهواره می‌داند. چرا که هر چه فاصله بین دو ماهواره بیشتر باشد، سیگنال با زاویه کوچکتری وارد اتمسفر شده و زوایای شکست، تغییرات

20. Setting Occultation

21. Rising Occultation

$$\frac{1}{\sin\theta} \left( \frac{R+h}{R_L^{(2)}} - \cos\theta \right) - \frac{1}{\sin\Theta} \left( \frac{R+h}{R_G^{(2)}} - \cos\Theta \right) = \varepsilon - \alpha \quad (14)$$

همچنین روابط (۱۵) و (۱۶) نیز برقرار هستند:

$$\frac{R+h}{R_L^{(2)}} - \cos\theta = \frac{R+h}{R_L^{(2)}} - \frac{R+H}{R_L^{(1)}} = \quad (15)$$

$$\frac{R+h}{R_L^{(2)}} \left( -\frac{R_L^{(2)} - R_L^{(1)}}{R_L^{(1)}} \right) - \frac{H-h}{R_L^{(1)}}$$

$$\frac{R+h}{R_G^{(2)}} - \cos\Theta = \frac{R+h}{R_G^{(2)}} - \frac{R+H}{R_G^{(1)}} = \quad (16)$$

$$\frac{R+h}{R_G^{(2)}} \left( -\frac{R_G^{(2)} - R_G^{(1)}}{R_G^{(1)}} \right) - \frac{H-h}{R_G^{(1)}}$$

با صرف‌نظر از عبارات اول سمت راست روابط (۱۵) و (۱۶) از

ترکیب روابط (۱۴) و (۱۵) و (۱۶) رابطه (۱۷) و (۱۸) به دست می‌آید:

$$\alpha + \frac{1}{D} (H - h) = \varepsilon \quad (17)$$

$$D = \left[ \frac{1}{D_L} + \frac{1}{D_G} \right]^{-1} \quad (18)$$

که  $D_G = R_G^{(1)} \sin\Theta$  و  $D_L = R_L^{(1)} \sin\theta$  فواصل GPS تا دو طرف کمان<sup>۳۳</sup> در زمان  $t_1$  تعریف می‌شوند. با توجه به آنکه  $(h+R) \cos(\alpha/2) = a$  و پارامتر اثر است، در تقریب زاویه کوچک،  $h$  در رابطه (۱۷) می‌تواند با  $a-R$  جایگزین شود.

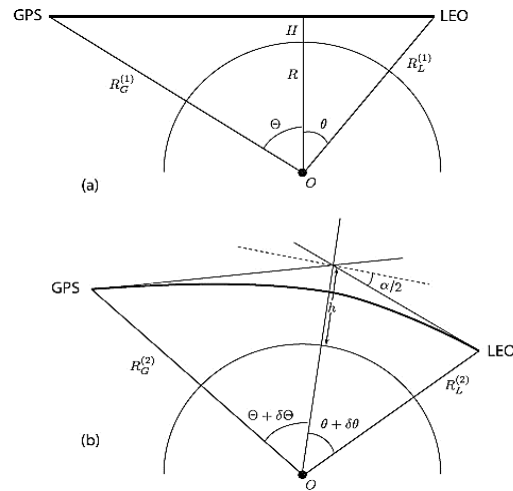
اگر چه شکل (۵)، هندسه ۲ بعدی دارد؛ اما این روابط برای فضای ۳ بعدی واقعی نیز معتبر هستند. بدین ترتیب با داشتن مکان‌های GPS و LEO می‌توان  $H$  و  $D$  و  $\varepsilon$  را به دست آورد و سپس با رابطه (۱۷) می‌توان رابطه میان زاویه شکست  $\alpha$  با ارتفاع پارامتر اثر  $h$  در هر زمان از نهفتگی را یافت. سپس با داشتن پروفایل هواشناسی در منطقه مربوطه به صورت  $\alpha(h)$  می‌توان رابطه دوم میان  $\alpha$  و  $h$  را فراهم آورده و در نهایت یک مقدار مشخص را برای زاویه شکست و ارتفاع اثر تخمین زد. سی. ا. او، تهیه پروفایل هواشناسی  $\alpha(h)$  را از طرق زیر امکان‌پذیر می‌داند:

(۱) مدل‌های هواشناسی زوایای شکست اتمسفر

(۲) مستقیماً از مشاهدات GPS-RO پیشین

در داده‌های طریق اول که همان رویکرد سوکولوفسکی نیز می‌باشد، سی. ا. او مشکل فقدان اطلاعات هواشناسی مطمئن برای لایه‌های پایین تروپوسفر را مطرح می‌کند. در رویکرد دوم نیز خطای داده‌های نهفتگی می‌تواند موجب خطا شود، اما با توجه به سهولت به کارگیری این داده‌ها، سی. ا. او استفاده از این روش را توصیه

در این گیرنده برای اطلاعات ناوبری بلادرنگ<sup>۳۲</sup> و داشتن اطلاعات مکانی ماهواره‌ها، لازم است ۶ تا ۹ ماهواره GPS به طور پیوسته ردگیری شوند و یک اسپلاتور با پایداری بالا مورد نیاز است. شکل (۵) هندسه نهفتگی برای محاسبات روش سی. ا. او را نمایش می‌دهد. در این شکل یک نهفتگی در زمان‌های متفاوت  $t_1$  و  $t_2$  به ترتیب رسم شده است.  $t_1$  زمان مرجع است که در آن سیگنال هنوز زاویه شکستی را تجربه نکرده است و مسیر پرتو یک خط مستقیم بوده و ارتفاع اثر،  $H$  است. این زمان می‌تواند لحظه شروع یک نهفتگی پایین رونده یا یکی از لحظات پایانی یک نهفتگی بالارونده باشد.  $t_2$  یک زمان دلخواه در حین نهفتگی است، همچنین ارتفاع اثر است.  $R_G^{(1)}$ ،  $R_L^{(1)}$  و  $R_G^{(2)}$ ،  $R_L^{(2)}$  شعاع‌های ماهواره‌های LEO و GPS در زمان‌های  $t_1$  و  $t_2$  هستند.



شکل ۵- هندسه روابط روش سی. ا. او. (a) هندسه نهفتگی مرجع در  $t_1$  با ارتفاع مماس  $H$  مرتبط با یک مسیر پرتوی خط مستقیم (b) هندسه نهفتگی واقعی در زمان  $t_2$  [6]

بر اساس این ساختار هندسی می‌توان یک رابطه میان زاویه شکست  $\alpha$  و تغییرات زاویه بین گیرنده و فرستنده  $\varepsilon = \delta\theta + \delta\Theta$  طبق قانون سینوس‌ها:

$$\frac{\cos(\alpha/2)}{R_L^{(2)}} = \frac{\cos(\theta + \delta\theta - \alpha/2)}{R+h} \quad (12)$$

$$\frac{\cos(\alpha/2)}{R_G^{(2)}} = \frac{\cos(\Theta + \delta\Theta - \alpha/2)}{R+h} \quad (13)$$

$R$  شعاع محلی زمین است. با فرض کوچک بودن  $\delta\Theta$  و  $\delta\theta$  و در طول یک نهفتگی، می‌توان روابط (۱۲) و (۱۳) را به صورت رابطه (۱۴) بسط داد:



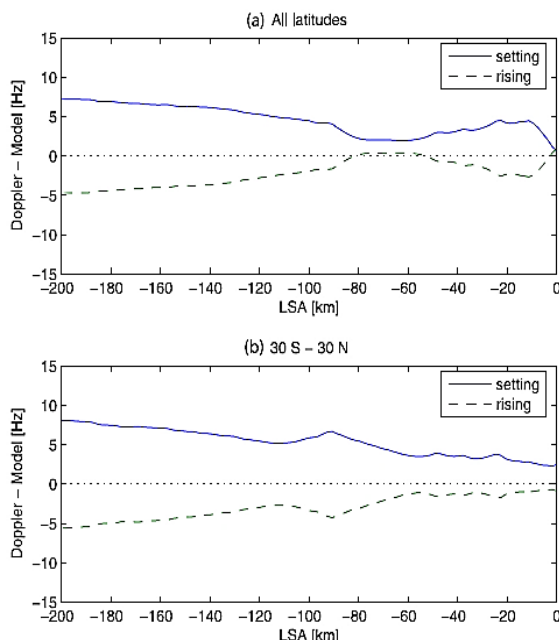
جدول  $\bar{\alpha}(h_j)$ ، یعنی  $h_{min}$  منظور می‌شود و  $\alpha = (H - h_{min}) / D$  خواهد بود.

۲- داپلر اضافی  $f_D$  از  $\alpha$  و سرعت ماهواره‌ها با فرض تقارن کروی محاسبه می‌شود [21]. از رابطه (۱۰) در روش سوکولوفسکی می‌توان استفاده کرد. در حقیقت تفاوت این دو روش در نحوه محاسبه زاویه شکست است. پس از تخمین زاویه شکست، مرحله بعد یعنی محاسبه زوایای زینت و بعد جابه‌جایی داپلر، یکسان است.

### دقت مدل

برای سنجش دقت مدل داپلر این روش، داپلر اتمسفری ناشی از نهفتگی‌های شبیه‌سازی شده برای مکان‌ها و زمان‌های نهفتگی‌های ماهواره SAC-C در بازه زمانی ۱-۵ آگوست ۲۰۰۶ پیاده شده‌اند. شکل (۷) متوسط اختلافات بین داپلرهای به‌دست آمده از نهفتگی‌های شبیه‌سازی شده و داپلرهای مدل شده بر اساس روش مذکور را به صورت تابعی از ارتفاع خط دید مستقیم،  $LSA^{34}$  نمایش می‌دهد.

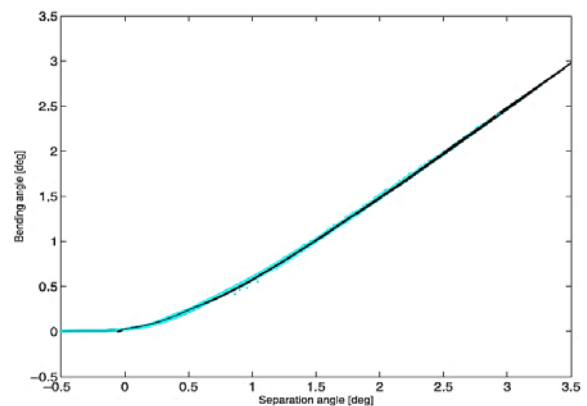
ارتفاع خط دید مستقیم برابر است با فاصله خط دید مستقیم بین GPS و LEO (شکل ۱) از مرکز زمین منهای شعاع محلی زمین و بسته به شکست سیگنال، LSA برای نقاط مماس موجود در پایین اتمسفر، منفی نیز می‌تواند باشد. شکل (۷) نشان می‌دهد که خطا در مدل داپلر وجود داشته و این خطاها در LSAهای پایین ( $LSA < -80$  km) بیشتر است، اما به طور متوسط در محدوده  $\pm 10$  Hz است.



شکل ۷- متوسط اختلافات میان داپلر محاسبه شده از نهفتگی‌های شبیه‌سازی شده و مدل‌های داپلر برای نهفتگی بالا رونده و پایین رونده. (a) برای تمام عرض‌های جغرافیایی (b) برای ناحیه استوایی (30S-30N) [6]

می‌کند و پروفایل  $\alpha(h)$  را به صورت میانگین تعداد زیادی از پروفایل‌های زاویه شکست SAC-C پیشین در نظر می‌گیرد. این پروفایل در جدولی و به صورت  $\bar{\alpha}(h_j) (j = 1, 2, \dots, M)$  شبکه‌بندی  $h_j = h_0 + (j - 1) \Delta h$  و  $h_0 = 2$  km و  $\Delta h = 1$  km) تهیه می‌شود. در این پروفایل جدولی، هنگام نیاز از درون‌یابی خطی استفاده خواهد شد. برای مثال هنگامی که هیچ یک از مقادیر گسسته ارتفاع و زاویه شکست مرتبط در این جدول نتواند رابطه (۱۷) را ارضا کند، آنگاه برای ارتفاعات میان مابین ارتفاعات گسسته موجود، زوایای شکست درون‌یابی شده مرتبط استفاده خواهد شد، تا زمانی که رابطه (۱۷) نیز برقرار گردد.

در اینجا همچون سوکولوفسکی، سی. ا. او نیز به این نکته اشاره می‌کند، که ویژگی مناسب هندسه GPS-RO و فاصله زیاد دو ماهواره، پیش‌بینی داپلر اتمسفری، با خطای کم را فراهم می‌کند. به عنوان مثال با بهره‌گیری از رابطه (۱۷)، خطا در ارتفاع، به میزان  $\delta h = 1$  km، خطایی در زاویه شکست به میزان  $\frac{\delta h}{D} \sim 3 \times 10^{-4}$  rad و خطایی در داپلر به میزان تقریبی 3Hz ایجاد خواهد کرد. نقاط آبی شکل (۶) زوایای شکست  $\alpha(\mathcal{E})$  واقعی مستخرج از تعداد زیادی نهفتگی را نمایش می‌دهد و بیانگر آن است که به‌رغم تغییرات شرایط اتمسفر، تنها در یک محدوده مشخص است. بنابراین داپلر اتمسفری پیش‌بینی شده ( $f_D$ ) چندان به خطای پروفایل  $\alpha(h)$  در محاسبات حساس نیست. خط سیاه نیز برگرفته از مدل سی. ا. او است.



شکل ۶- زاویه شکست  $\alpha$  به صورت تابعی از تغییرات زاویه جدایی  $\mathcal{E}$ . برگرفته از داده‌های یک روز از مأموریت SAC-C خط آبی نتایج حاصل از اندازه‌گیری بوده و خط سیاه ناشی از مدل پیش‌بینی داپلر است [6].

بنابراین به طور خلاصه، فرآیند محاسبه جابه‌جایی داپلر اتمسفری طی دو مرحله انجام می‌شود:

۱- در هر  $t$  و  $h$  از (۱۷) و از داده‌های جدولی،  $\bar{\alpha}(h_j)$  استخراج و محاسبه می‌شود. (در زوایای جدایی،  $\gamma$ ، بسیار بزرگ، که پرتویی ماهواره‌های GPS و LEO را اتصال نمی‌دهد، برای  $h$  کمترین مقدار در

۰/۰۳۳۵۲۸ در نظر گرفته می‌شود.  $R$  یک تقارن کروی محلی در  $lat$  دارد.

بر خلاف روش‌های دیگر، در اینجا مستقیماً از  $LSA$ ، ارتفاع پارامتر اثر،  $h$ ، سپس  $a$  و  $\alpha$  و داپلر اتمسفر، محاسبه می‌شود. ارتباط بین  $LSA$  و  $h$  براساس یک نمودار است که این نمودار از محاسبات هندسی مسیر پرتو در یک اتمسفر معمولی استخراج شده است. کریستن‌سن این ارتباط را به صورت زیر تعریف کرده است:

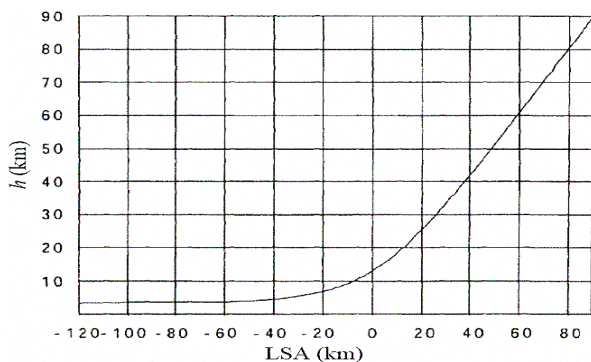
$$h(LSA) = MCC * \text{Log}_{10}(10^{MIPA/MCC} + 10^{LSA/MCC}) \quad (20)$$

که  $MCC = 35$  (km) ثابت مدل منحنی<sup>۲۹</sup> و  $MIPA = 3.2$  (km) کمترین ارتفاع نقطه اثر<sup>۳۰</sup>، تعریف می‌شوند.  $LSA$  و  $h$  نیز بر حسب کیلومتر هستند. یک نمودار از  $h$  به عنوان تابعی از  $LSA$  در شکل (۸) مشاهده می‌شود.

در محاسبات از روابط (۲۱) و (۲۲) که بین هندسه ماهواره‌ها (برای سادگی مدارات دایروی فرض شده‌اند) و جابه‌جایی داپلر است، استفاده شده است.

جابه‌جایی داپلر از پارامتر اثر،  $a$ ، با فرض تقارن کروی از این قرار است:

$$\lambda f_D = v_L \frac{a}{R_L} + v_G \frac{a}{R_G} \quad (21)$$



شکل ۸- مدلی از  $h$  بر حسب  $LSA$  [23]

و زاویه شکست،  $\alpha$ ، برابر خواهد بود با:

$$\alpha = \gamma - \text{Cos}^{-1}\left(\frac{a}{R_L}\right) - \text{Cos}^{-1}\left(\frac{a}{R_G}\right) \quad (22)$$

و زاویه بین LEO و GPS است.

این روش مبتنی بر یک رابطه کلی برای تمامی مکان‌ها و زمان‌هاست (رابطه ۲۰). بنابراین مسلماً دقت دو روش قبل را

داپلر اتمسفری پیش‌بینی شده برای نهفتگی‌های بالارونده و پایین رونده کمی متفاوت است. این تفاوت از انتخاب متفاوت زمان مرجع  $t_r$  در نهفتگی‌های بالارونده و پایین رونده، ایجاد می‌شود. در نتیجه  $R_G^{(1)}$ ،  $R_L^{(1)}$  در دو نوع نهفتگی متفاوت بوده و سپس  $R_G^{(2)}$ ،  $R_L^{(2)}$  نیز اختلاف خواهند داشت. این اختلاف بیان می‌کند که چرا منحنی‌های شبیه‌سازی برای نهفتگی‌های بالارونده و پایین رونده در شکل (۷)، کاملاً تقارن معکوس نسبت به یکدیگر ندارند.

## روش کریستن‌سن

روش تخمین داپلر در این روش، برگرفته از یک ثبت اختراع در ایالات متحده آمریکا، کاری از گروه کریستن‌سن<sup>۲۵</sup> در سال ۲۰۰۴ به سفارش Saab Ericsson Space AB (SE)، است و از این روش هم اکنون در گیرنده GRAS در مأموریت MetOp استفاده می‌شود [23].

در این روش، برای دریافت و ردگیری، اطلاعات به صورت  $I(x, \nu)$  شامل بردارهای ۶ بعدی مکان و سرعت ماهواره‌های گیرنده و فرستنده،  $x$  و  $\nu$ ، وارد سیستم شده و با پیش‌بینی جابه‌جایی داپلر در فرکانس حامل، به ردگیری سیگنال پرداخته می‌شود. سیستم مختصات نیز یک سیستم با مرکز در نقطه میانی زمین پیشنهاد می‌شود، اگر چه هر سیستم مختصات دیگر هم می‌تواند به کار رود.

سپس گیرنده ماهواره در بخشی با عنوان واحد کنترل فرکانس، یک پارامتر  $Q(x, \nu, \alpha(x))$  مرتبط با جابه‌جایی داپلر را می‌سازد.  $Q(x, \nu, \alpha(x))$  هنگامی که پرتو از اتمسفر خارج می‌شود به یک تابع  $F(x, \nu)$  تبدیل می‌شود که فقط وابسته به سرعت و مکان ماهواره و مستقل از شرایط اتمسفر است، و تنها شامل داپلر هندسی است و هنگامی که پرتو به سطح زمین می‌رسد، به یک مقدار ثابت میل می‌کند. به‌طور مشخص، در این روش «ارتفاع خط دید مستقیم»  $LSA$ ، مبنای محاسبه  $Q$  است و با فرض یک اتمسفر کروی متقارن، فواصل موسوم به پارامترهای اثر،  $a$  برابر در نظر گرفته می‌شوند.

برای محاسبه  $LSA$  نیاز به یک مدل از هندسه زمین برای تعیین شعاع زمین است که این مدل در روش کریستن‌سن، بر اساس بیضوی مرجع زمین،  $ERE$ <sup>۲۶</sup>، تعریف شده در  $WGS84$ <sup>۲۷</sup> تنظیم شده است.

$$R = R_{equator} * (1 - flat * \text{Sin}^2(lat * \pi / 180)) \quad (19)$$

در اینجا  $lat$  عرض جغرافیایی نقطه مماس،  $R_{equator}$  برابر با ۶۳۷۸.۱۳۷ کیلومتر و  $flat$  ضریب تخت‌شدگی زمین<sup>۲۸</sup>، برابر با

25. Christensen

26. Earth Reference Ellipsoid

27. World Geodetic System 1984

28. Earth Flattening Factor

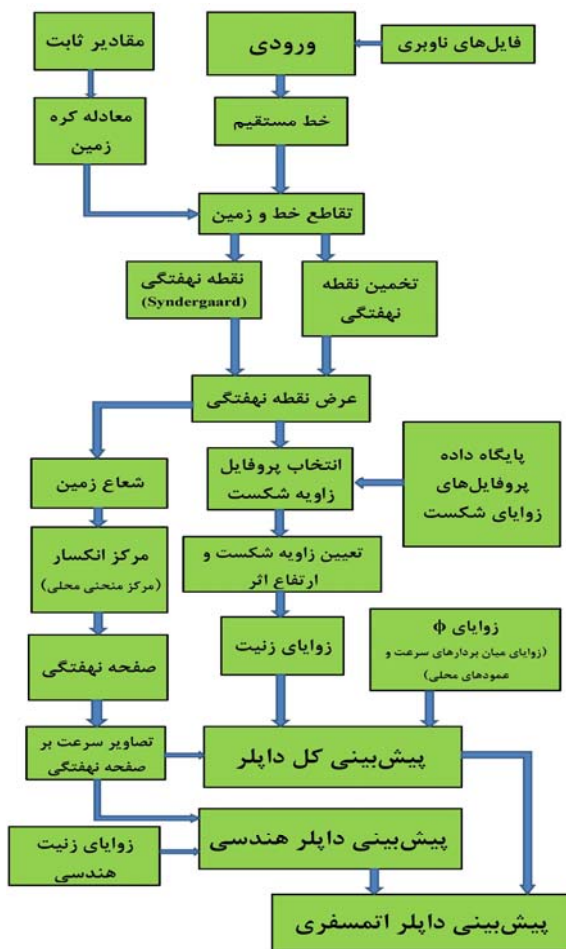
29. Model Curvature Constant

30. Minimum impact point altitude

محاسبات هندسی شامل بلوک‌های محاسبه «شعاع زمین»، محاسبه «مرکز انکسار»<sup>۳۳</sup>، «صفحه نهفتگی»<sup>۳۳</sup> و در نهایت اندازه تصویر سرعت ماهواره‌ها در هر لحظه بر صفحه نهفتگی است.

در بخش دیگر شبیه‌سازی پس از تخمین نقطه نهفتگی، در بلوک «پروفایل زاویه شکست»، بر اساس نقطه نهفتگی و با استفاده از «پروفایل‌های زاویه شکست بر حسب ارتفاع موجود در پایگاه‌های داده»، پروفایل زاویه شکست یا همان  $\bar{\alpha}(h_r)$  (روش سی. ا. او) مناسب انتخاب می‌شود.

سپس در بلوک «تعیین زاویه شکست و ارتفاع اثر»، بر اساس روابط سوکولوفسکی، زاویه شکست و ارتفاع اثر و سپس در بلوک «زوایای زینت»، زوایای زینت محاسبه می‌شوند.



شکل ۹- فلوجارت نرم‌افزار شبیه‌سازی داپلر اتمسفری

زوایای زینت و تصاویر سرعت‌ها به همراه «زوایای  $\phi$ » ورودی بلوک «پیش‌بینی داپلر کل» خواهند بود. در اینجا منظور از زوایای  $\phi$ ، همان زوایای  $\phi_{L,G}$  روش سوکولوفسکی هستند.

نخواهد داشت. اما رابطه سر راست این روش و مستقل از مدل‌های هواشناسی و داده‌های آماری، حداقل یک تخمین آسان از مدل داپلر را ارائه می‌دهد، کما اینکه این روش عملیاتی نیز شده است.

## مدل داپلر برای GPS-RO ایرانی

برای شبیه‌سازی روش حلقه‌باز برای گیرنده GPS-RO ایرانی روشی بر اساس ترکیب روش‌های گفته شده، شرح داده می‌شود. برای شبیه‌سازی کاربردی، محاسبات هندسی نیز باید به صورت دقیق صورت گیرد. در محاسبات هندسی بیان شده در روش‌ها، کلیت روش ادخال ورودی‌های مکان و سرعت در شبیه‌سازی بیان می‌شود، درحالی که هندسه نهفتگی خود پیچیدگی‌های خاصی همچون تخمین نقطه نهفتگی، محاسبه مرکز انکسار زمین و ... دارد و مطالعات خاص خود را طلب می‌کند. از نمونه پژوهش‌هایی که به‌طور تخصصی به هندسه نهفتگی پرداخته‌اند می‌توان به مراجع [25] و [20] اشاره کرد.

در حال حاضر، برای گیرنده GPS-RO ایرانی سعی بر آن است که با انتخاب یکی از روش‌های هندسی مذکور برای اعمال ورودی‌های مختصات مکان و سرعت ماهواره‌ها و نیز گزینش نحوه ورود اطلاعات اتمسفر در شبیه‌سازی، یک ترکیب بهینه و کاربردی با دقت قابل قبول به‌دست آید. این شبیه‌سازی مبتنی بر روش سوکولوفسکی و اعمال ورودی اتمسفر از پایگاه‌های داده بر اساس پیشنهاد روش سی. ا. او است. در شکل (۹) نمودار پیاده‌سازی آن نمایش داده شده است.

در ادامه بخشی از واحدهای این فلوجارت شرح داده می‌شوند. ابتدا در واحد «ورودی» اطلاعات و مختصات مکان و سرعت ماهواره‌های LEO و GPS در طول یک نهفتگی وارد می‌شود. در بلوک «خط دید مستقیم»، معادله خط دید مستقیم گذرنده از دو ماهواره در هر لحظه، ایجاد می‌شود.

سپس در بلوک «تقاطع خط و زمین»، خط مستقیم مماس و نقطه مماس آن بر سطح زمین پیدا می‌شود. معادله کره زمین نیز از مدل‌های استاندارد همچون WGS84 در بلوک «معادله زمین» فراهم می‌شود. این نقطه مماس برای تخمین شعاع زمین و محاسبات هندسی نهفتگی باید یافت شود. به این نقطه، «نقطه نهفتگی»<sup>۳۱</sup> اطلاق می‌شود که در بلوک‌های مربوطه محاسبه دقیق یا تخمین زده می‌شود.

سپس با تبدیلات دستگاه‌های مختصاتی، عرض جغرافیایی این نقطه یا همان  $lat$  ذکر شده در روابط به‌دست می‌آید. از این پارامتر در دو بخش از ادامه شبیه‌سازی استفاده می‌شود. یک بخش که شامل بلوک‌های سمت چپ می‌شود، محاسبات هندسی نهفتگی هستند.

32. Refractivity Centre  
33. Occultation Plane

31. Occultation Point

ماهواره کاسمیک به روش مقاله [۲۶] (نمودار آبی) را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، خروجی شبیه‌ساز تطابق قابل قبول با داده تست را دارد.

گیرنده نهفتگی به غیر از بخش ردیابی شامل بخش‌های مختلفی است که جهت طراحی گیرنده لازم است که شناخت دقیقی از ماهیت سیگنال دریافتی حاصل شود که نیاز به کار گسترده‌ای دارد [27].

## نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش‌های متداول و تحقق‌یافته برای مدل‌سازی داپلر اتمسفری در مأموریت‌های نهفتگی حال حاضر در جهان که قابلیت ردگیری حلقه‌باز را دارند، شرح و بررسی شد. در جدول (۲) چکیده و مقایسه‌ای از این روش‌ها به‌عنوان جمع‌بندی فراهم شده است.

جدول ۲- مقایسه مدل‌های معروف پیش‌بینی داپلر اتمسفری

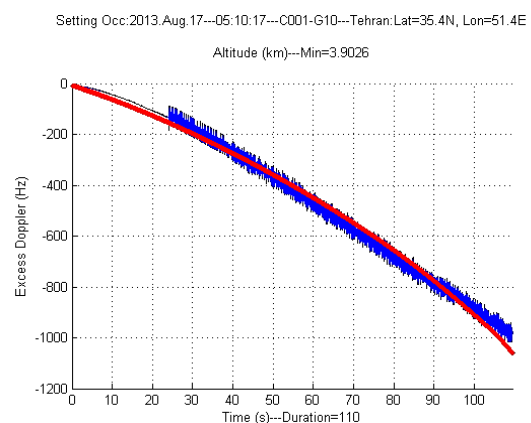
روش	مأموریت	ورودی اتمسفر	ویژگی
سوکولوفسکی	گیرنده ROSA در مأموریت آژانس فضایی ایتالیا	از رابطه ضریب شکست بر حسب ارتفاع و زاویه شکست و مدل‌های هواشناسی مانند: CIRA86aQ-UoG NCEP T62 NWP	تعیین دقیق عرض جغرافیایی نقطه تماس پرتو نیاز به مدل‌های هواشناسی دقیق و به روزرسانی متناوب آنها
سی. ا. او	گیرنده Blackjack در مأموریت SAC-C گیرنده IGOR در مأموریت COSMIC گیرنده‌های RO GPS- در مأموریت‌های C/NOFS, CHAMP, TerraSAR- و GRACE, X	مستقیماً از مشاهدات RO (میانگین تعداد زیادی از پروفایل‌های زاویه شکست مستخرج از SAC-C)	سهولت دسترسی به ورودی اتمسفر از پایگاه‌های داده همچون CDAAC احتمال ورود خطاهای مشاهدات RO
کریستین مدل	گیرنده GRAS در مأموریت Met-Op	مستخرج از محاسبات هندسی مسیر پرتو در یک اتمسفر معمولی	روابط ساده و تخمین سر راست مدل داپلر عدم دقت مناسب با توجه به رابطه واحد برای کل مکان‌ها و زمان‌ها

سپس یک روند شبیه‌سازی برای گیرنده GPS-RO ایرانی، به صورت فلوجارت، به همراه توضیحات بلوک‌های آن، مبتنی بر روش‌های سوکولوفسکی و سی. ا. او بیان شد و خروجی‌های این مدل به جهت نشان دادن دقت روش روی داده‌های واقعی که

در بلوک «پیش‌بینی داپلر هندسی»، داپلر با در نظرگیری زاویه شکست صفر محاسبه می‌شود و در نهایت داپلر اتمسفری در بلوک «پیش‌بینی داپلر اتمسفری» به دست می‌آید.

در این روش، روابط، برگرفته از روش سوکولوفسکی هستند و از تخمین‌های هندسی دو روش دیگر که از دقت مدل می‌کاهند، اجتناب شده است. اما در بخش ورود داده‌های مدل هواشناسی، رهیافت مدل سی. ا. او یعنی استفاده از زوایای شکست به دست آمده، مستقیماً از مشاهدات واقعی نهفتگی‌های پیشین در منطقه نقاط اثر، استفاده می‌شود. مزیت این روش، در دسترس بودن داده‌ها و نیز به‌روزرسانی متداوم و مستمرتر آنها در پایگاه‌های داده به نسبت داده‌های مستقیم هواشناسی است. همچنین در داده‌های مدل‌های هواشناسی همچون مدل‌های مذکور در روش سوکولوفسکی نیاز به فرآیند محاسباتی برای رسیدن به زاویه شکست است که این خود نیز هم‌زمان بر و هم موجب کاهش دقت می‌شود، در حالی که در اینجا این زوایا از ابتدا در دسترس هستند.

روش سوکولوفسکی و روش سی. ا. او از معتبرترین روش‌های ردگیری حلقه‌باز هستند و در این شبیه‌سازی سعی شده است تا تنها مبتنی بر این دو روش باشد تا خللی در دقت مدل‌ها ایجاد نگردد. بخشی از روش سوکولوفسکی که با استفاده از داده‌های هواشناسی، زاویه شکست حاصل می‌گردد، با بهره‌گیری از ایده روش سی. ا. او مستقیماً زاویه شکست از پایگاه‌های داده وارد شبیه‌سازی می‌شود. این راهکار علاوه بر تسریع بسیار در محاسبات، از تأثیر خطاهای مدل‌های هواشناسی جلوگیری می‌کند، چرا که مستقیماً از زاویه شکست اندازه‌گیری شده بهره می‌برد.



شکل ۱۰- مقایسه خروجی مدل داپلر GPS-RO ایرانی با داده تست مستخرج از مقاله [۲۶]

شکل (۱۰) یک نمونه مقایسه از مدل داپلر شبیه‌سازی شده توسط فلوجارت (نمودار قرمز) با داپلر مستخرج از فاز اضافی واقعی

- [8]Hajj and et al., "CHAMP and SAC-C Atmospheric Occultation Results and Intercomparisons," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 109, D06109, 2004
- [9]Sokolovskiy, S.V., "Tracking Tropospheric Radio Occultation Signals from Low Earth Orbit," *Radio Science*, Vol. 36, No. 3, 2001, pp. 483–498.
- [10]Ao, C.O., "Lower Troposphere Refractivity Bias in GPS Occultation Retrievals," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108, No. D18, 2003, p. 4577.
- [11]Beyerle, G., Gorbunov, M. E. and Ao, C. O. "Simulation Studies of GPS Radio Occultation Measurements," *Radio Science*, Vol. 38, No. 5, 2003, p. 1084.
- [12]Tyler, G. L. "Radio Occultation Experiments in the Outer Solar System with Voyager," *Proc. IEEE*, 75, 1987, pp. 1404–1431.
- [13]Steffes and et. al., "Radio Occultation Studies of the Venusatmosphere with the Magellan Spacecraft, 1. Experiment Description and Performance," *Icarus*, Vol. 110, 1994, pp. 71–78.
- [14]Gorbunov, M.E., "Canonical Transform Method for Processing Radio Occultation Data in the Lower Troposphere," *Radio Science*, Vol. 37, No. 5, 2002, p. 1076.
- [15]Jensen et al., "Full spectrum inversion of radio occultation Signals", *Radio Science*, Vol. 38, No. 3, 2003, p.1040.
- [16]Rec.ITU-RP.453-11;" The Radio Refractive Index: Iits Formula and Refractivity Data," *Recommendationitu-RP*. 2003, pp. 453-459.
- [17]Kirchengast et al., "The CIRA86aQ-UoG Model: An Extension of the CIRA-86 Monthly Tables Including Humidity Tables and a Fortran 95 Global Moist Air Climatology Model," *IMG/UoG Techn. Rep. 8*, Eur. Space Agency, Paris, France, 1999
- [18]Smith, E. K., Weintraub, S. "The Constants in the Equation for Atmospheric Refractive Index at Radio Requencies," *Proc. IRE*, 41. 1953
- [19]Sela, J.G., "Spectral Modeling at the National Meteorological Center," *Month, Weather Rev.*, Vol. 108, No. 9, 1980, pp. 1279-1292,
- [20]Syndergaard, S., "Modeling the Impact of the Earth's Oblateness on the Retrieval of Temperature and Pressure Profiles from Limb Sounding," *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 60, No. 2. 1998, pp. 171-180.
- [21]Hajj and et. al., "A Technical Description of Atmospheric Sounding by GPS Occultation," *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 64, No. 4, 2002, pp. 451–469.
- [22]Notarpietro, R. and et.al., "ROSA: the Italian Space Agency GPS Radio Occultation Receiver. Signal Tracking Characteristics and Terrestrial Measurement Campaign," *Atmosphere and Climate*, 2006, pp 157-168.
- [23]Mannucci, J. and et. al., "Radio Occultation Activities At NASA," *CGMS-39 White Paper*, 2011.
- [24]Christensen et al., "Apparatus and Method for Performing Open Loop Tracking of a Signal," United States Patent, US 6, 720, 916 B2. 2004.

به صورت حلقه‌باز در محدوده تهران جمع‌آوری شده بود، نشان داده شد.

نکته مهمی که در آخر باید به آن اشاره شود، روش سنجش دقت مدل‌هاست. به طور مثال در ابتدا سوکولوفسکی داپلر را از مشاهدات رادیوسوندی با دقت بالا استخراج کرده و سپس آن را با مدل خود مقایسه کرد و یا سی.ا. او از ردگیری پرتو با پروفایل‌های ضریب شکست هواشناسی به شبیه‌سازی داپلر پرداخته و آن را معیار مقایسه خود قرار داد. اما، در حال حاضر با وجود ثبت داده‌های واقعی همچون تأخیر فاز اضافی (تأخیر فاز اتمسفری) در پایگاه‌های داده و به‌کارگیری روابط میان این تأخیر فاز و داپلر اتمسفری، که از همین مدل‌ها در گیرنده‌های خود بهره برده‌اند، می‌توان داپلر اتمسفری واقعی را استخراج کرد و سپس دقت داپلر شبیه‌سازی شده را با آن اندازه‌گیری کرد.

روش استخراج داپلر اتمسفری واقعی که مستقیماً از نتایج مشاهدات نهفتگی‌ها در پایگاه‌های داده بهره می‌گیرد، در مقاله [۲۶] به تفصیل شرح داده شده است.

## مراجع

- [1]Ying, Z. and et al., "Temporal Distribution Characteristics of GNSS Ionospheric Occultation Data and its Effects in Earthquake-Ionosphere Anomaly Detection," *Journal of Geodesy and Geodynamics*, Vol. 4, Issue 4, 2013, pp. 33-40.
- [2]Kunitsyn, V. and et al., *Earthquake Prediction Research Using Radio Tomography of the Ionosphere*, Universe of Scales: From Nanotechnology to Cosmology, Springer Proceedings in Physics, 2014
- [3]Oyama, K.I. and et al., "Modifications of the Ionosphere Prior to Large Earthquakes: Report from the Ionosphere Precursor Study Group," *Official Journal of the Asia Oceania Geosciences Society, Geoscience Letters*, Vol. 3, No. 6, 2016.
- [4]Amiri, Sh. and Fahami, M., "GPS Radio Occultation Method for Ionosphere TEC Monitoring," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 6, No. 2, Summer 2013, pp. 21-29.
- [5]Rocken, C. and et al., "Analysis and Validation of GPS/MET Data in the Neutral Atmosphere," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 102(D25), No. 29, 1997, pp. 849-866.
- [6]Ao, C.O. and et al., "Rising and Setting GPS Occultations by use of Open-Loop Tracking," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 114, Issue D4, 2009.
- [7]Marquardt and et al. *Validation and Data Quality of CHAMP Radio Occultation Data, in First CHAMP Mission Results for Gravity, Magnetic and Atmospheric Studies*, Springer, 2003, pp. 384–396.