



REVIEW PAPER

Radio Sounding and Tomography of Ionosphere based on GNSS

S. Barzegar^{*1}, M. Khoshima²¹ Department of space science, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran² Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

ABSTRACT

Received: 14 August 2024
 Reviewed: 15 September 2024
 Revised: 06 October 2024
 Accepted: 24 November 2024

KEYWORDS:

Radio Sounding
 Tomography
 GNSS
 Total Electron Content
 Ionosphere
 Ionospheric Plasma Bubble

* Corresponding author

✉ sbarzegar@ut.ac.ir

☎ (+98918) 3638160

Background and Objectives: Radio sounding and tomography techniques play a crucial role in studying the structure and dynamics of the ionosphere. Specifically, tomography is an advanced method for creating three-dimensional models of electron density within the ionospheric layer. By utilizing observational data, such as GPS measurements, tomography generates accurate maps of electron distribution. Ionospheric tomography provides high-precision insights into temporal and spatial variations in electron density. This precision is essential for applications like satellite navigation, radio communications, and meteorological predictions. Researchers focus on the upper layers of Earth's atmosphere, using specialized radars called ionosondes to obtain precise information about electron density and the structure of ionized layers. Tomography, an imaging technique, relies on radio wave propagation through the ionosphere. It produces two- or three-dimensional images of electron distribution within this layer. Widely used in weather forecasting, radio communications, and space studies, tomography significantly advances our understanding of ionospheric phenomena. Technological advancements, including satellite-based measurements, enable even more accurate analyses, ultimately enhancing global communication and aviation safety. In this paper, the existing method for how to obtain the electron density change of the ionosphere layer based on the total electron content (TEC) parameter by using the phase difference analysis created in the communication signal of the global navigation satellite system GNSS when passing through different layers of the ionosphere has been investigated and studied. For this purpose, communication signals from low-orbit and high-orbit satellites were studied, and the method of obtaining TEC from phase difference was explained for each. Then, we studied the existing methods and algorithms for converting TEC (Total Electron Content) data into tomographic images. At the end of this article, as an example, we implemented the radio tomography method to visualize plasma bubbles in the equatorial region and compared the results with images taken from optical instruments. It was shown that radio tomography can be used as an accurate method for visualizing the structure of plasma bubbles. At the end of this article, we compared the method studied here with methods such as all-sky imaging, incoherent scatter radars, etc., and discussed the advantages and disadvantages of these methods relative to each other.

Methods: In current research on ionospheric sounding and tomography, significant progress has been made using the Global Navigation Satellite System (GNSS). Recent studies indicate that GNSS can model the ionospheric structure in three dimensions with high precision. Electron distribution in the ionosphere is analyzed using radio data obtained from satellites at Low Earth Orbit (LO) and High Earth Orbit (HO). Collecting ionospheric information via GNSS is a complex and precise process that relies on advanced technology to measure and analyze various ionospheric parameters. These systems, which include Earth-orbiting satellites, transmit signals to ground-based receiver stations. These signals contain precise temporal and spatial information about the satellites, allowing accurate determination of receiver positions on Earth. The distribution of electron density in the ionospheric layer directly affects the propagation of GNSS radio waves, including their path, shape, and phase. Any disruption in the ionospheric layer significantly impacts satellite communications, precise navigation, and long-range communications. In fact, GNSS utilizes this capability to measure the Total Electron Content (TEC) of the ionosphere, a key indicator for understanding its state. This process occurs through signals transmitted from satellites to ground stations. As these signals pass

through the ionosphere, they are influenced by electron density variations, which can be measured with high accuracy.

Findings: In this comprehensive study, current research on ionospheric radio tomography using Total Electron Content (TEC) measurements from GNSS has been conducted. The concept of TEC and its impact on the phase and shape of signals received from the examined satellites has been explored. The application and methodology of using Low Earth Orbit (LEO) and High Earth Orbit (HEO) satellite data to obtain detailed TEC information are described. The validation and accuracy assessment of satellite data in ionospheric radio tomography, which is crucial for the reliability of the final product and the production process, have been addressed. Finally, a technique for reconstructing tomographic images using TEC measurements via GNSS signals is reviewed. It has been demonstrated that this reconstruction technique works well for imaging plasma bubbles. Horizontal distributions obtained from Vertical TEC (VTEC) depletions are compared with images captured by optical instruments, yielding similar results. Even in regions where GNSS signals are weak, this method can yield good outcomes if the bubble structures are sufficiently large.

Conclusion: In summary, GNSS tomography represents a dynamic and evolving field with significant potential for improving accuracy and efficiency in weather predictions. As we continue our research and development efforts, we anticipate the emergence of new methods and technologies that can address existing challenges and enhance the quality and precision of tomographic models. These advancements hold promise for diverse applications of GNSS tomography, including meteorology, climate change studies, and disaster management.



NUMBER OF REFERENCES

45



NUMBER OF FIGURES

8



NUMBER OF TABLES

3

مقاله مروری

سنجش رادیویی و توموگرافی یون‌سپهر توسط سامانه ماهواره‌ای ناوبری جهانی (GNSS)

سحر برزگر^{۱*}، مسعود خوش‌سیما^۲

^۱ گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: تکنیک‌های سنجش (sounding) رادیویی و توموگرافی، برای مطالعه ساختار و دینامیک یون‌سپهر به کار می‌روند. توموگرافی یکی از روش‌های پیشرفته برای مطالعه و مدل‌سازی سه‌بعدی چگالی الکترونی در لایه یون‌سپهر است. این روش از داده‌های مشاهداتی مانند GNSS برای تولید نقشه‌های دقیق از توزیع الکترون‌ها در این لایه استفاده می‌کند. توموگرافی یون‌سپهر به ما امکان تشخیص تغییرات زمانی و مکانی چگالی الکترونی را با دقت بالا می‌دهد. که این امر برای برنامه‌های کاربردی مانند ناوبری ماهواره‌ای، ارتباطات رادیویی و پیش‌بینی‌های متئورولوژیکی حیاتی است. توسعه اندازه‌گیری و توموگرافی یون‌سپهر، که به مطالعه و تحلیل لایه‌های بالایی جو زمین می‌پردازد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این فرآیند، که از اوایل قرن بیستم آغاز شده، شامل تکنیک‌های مختلفی برای بررسی توزیع الکترون‌ها در یون‌سپهر است. اندازه‌گیری یون‌سپهر، که با استفاده از رادارهای مخصوصی به نام ایونوسوندها انجام می‌شود، به دانشمندان این امکان را می‌دهد تا اطلاعات دقیقی در مورد تراکم الکترونی و ساختار لایه‌های یونیزه شده به دست آورند. توموگرافی یک روش تصویربرداری است، که از انتشار امواج رادیویی در یون‌سپهر برای تولید تصاویر دو یا سه‌بعدی از توزیع الکترون‌ها در این لایه استفاده می‌کند. این تکنیک، که به طور گسترده‌ای در پیش‌بینی شرایط جوی، مخابرات رادیویی و مطالعات فضایی به کار می‌روند، نقش مهمی در پیشرفت علم جوسپهری داشته‌اند. با پیشرفت تکنولوژی، ابزارهای اندازه‌گیری پیشرفته‌تر و دقیق‌تر شده‌اند، که این امر به درک بهتری از پدیده‌های مختلف یون‌سپهر

تاریخ دریافت: ۲۴ مرداد ۱۴۰۳

تاریخ داور: ۲۵ شهریور ۱۴۰۳

تاریخ اصلاح: ۱۵ مهر ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: ۰۴ آذر ۱۴۰۳

واژگان کلیدی:

صداسنجی رادیویی

سامانه راهبری ماهواره‌ای جهانی

محتوای کلی الکترونی

یون‌سپهر

حباب پلاسما یون‌سپهری

* نویسنده مسئول

sbarzegar@ut.ac.ir

۰۹۱۸-۳۶۳۸۱۶۰

منجر شده است. امروزه، با استفاده از ماهواره‌ها و سایر فناوری‌های پیشرفته، دانشمندان قادر به انجام اندازه‌گیری‌های دقیق‌تر و تحلیل‌های عمیق‌تری از این لایه هستند، که این امر در نهایت به بهبود ارتباطات جهانی و افزایش ایمنی پروازهای هوایی کمک می‌کند. در این مقاله، روش موجود برای چگونگی بدست آوردن تغییر چگالی الکترونی لایه یونسفر مبتنی بر پارامتر محتوای کلی الکترون (TEC) با استفاده از تحلیل تفاضل فازی ایجاد شده در سیگنال مخابراتی سامانه ماهواره‌ای راهبری جهانی GNSS در هنگام عبور از لایه‌های مختلف یونسفر مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. به این منظور سیگنال‌ها مخابراتی از ماهواره‌های مدار پایین و مدارهای بالا مطالعه شده‌اند و روش بدست آوردن TEC از تفاضل فازی بر هر یک توضیح داده شد. سپس به مطالعه روش‌ها و الگوریتم‌های موجود برای تبدیل اطلاعات TEC به تصاویر توموگرافیک پرداختیم. در انتهای این مقاله به عنوان یک مثال روش توموگرافی رادیویی را برای مصورسازی حباب‌های پلاسمایی در منطقه استوایی پیاده‌سازی کرده و نتایج آن را با تصاویر گرفته شده از ادوات اپتیکی مقایسه کردیم. نشان داده شد که توموگرافی رادیویی می‌تواند به عنوان روشی دقیق برای مصورسازی ساختار حباب‌های پلاسمایی به کار گرفته شود. در انتهای این مقاله به مقایسه روش مطالعه شده در اینجا با روش‌هایی نظیر تصویربرداری تمام آسمان، رادارهای پراکندگی غیر همدوس و غیره، پرداخته شد و مزایا و معایب این روش‌ها نسبت به یکدیگر بیان شد.

روش‌ها: در تحقیقات کنونی در زمینه صدادایی و توموگرافی یونسفر با استفاده از GNSS، پیشرفت‌های قابل توجهی صورت گرفته است. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که با استفاده از GNSS، می‌توان ساختار یونسفر را به صورت سه‌بعدی و با دقت بالا مدل‌سازی کرد. توزیع الکترونی یونسفر با استفاده از داده‌های رادیویی که از ماهواره‌های در ارتفاع کم (LO) و ارتفاع بالا (HO) به دست می‌آیند، تجزیه و تحلیل می‌شود. جمع‌آوری اطلاعات یونسفر با استفاده از GNSS یک فرآیند پیچیده و دقیق است که از تکنولوژی پیشرفته برای اندازه‌گیری و تحلیل پارامترهای مختلف یونسفر بهره می‌برد. این سیستم‌ها، که شامل ماهواره‌هایی در مدار زمین هستند، سیگنال‌هایی را به ایستگاه‌های گیرنده روی زمین مخابره می‌کنند. این سیگنال‌ها حاوی اطلاعات زمانی و مکانی دقیق ماهواره‌ها هستند که با استفاده از آن‌ها می‌توان موقعیت دقیق گیرنده‌ها را روی زمین تعیین کرد. نحوه توزیع چگالی الکترونی در لایه یونسفر بر روی نحوه انتشار امواج رادیویی GNSS و تغییر مسیر، شکل و فاز این امواج به طور مستقیم تأثیرگذار است. هرگونه اختلال در لایه یونسفر، تأثیر جدی در ارتباطات ماهواره‌ای، ارتباطات دقیق ناوبری و ارتباطات دوربرد می‌گذارد. در حقیقت، GNSS از این قابلیت برای اندازه‌گیری محتوای کلی الکترون (TEC) یونسفر استفاده می‌کند، که یک شاخص کلیدی برای درک وضعیت یونسفر است. این فرآیند با استفاده از سیگنال‌هایی که از ماهواره‌ها به ایستگاه‌های زمینی فرستاده می‌شوند، صورت می‌گیرد. این سیگنال‌ها هنگام عبور از یونسفر تحت تأثیر تغییرات الکترونی قرار می‌گیرند و این تغییرات می‌توانند با دقت بالایی اندازه‌گیری شوند.

یافته‌ها: در این پژوهش مطالعه جامعی بر روی تحقیقات کنونی در زمینه توموگرافی رادیویی یونسفر با استفاده از اندازه‌گیری TEC یونسفر توسط GNSS انجام شده است. مفهوم TEC و نحوه تأثیر آن بر روی فاز و شکل سیگنال‌های دریافت شده از ماهواره‌های مدار پایین و مدار بالا مورد بررسی قرار گرفته است. کاربرد و روش استفاده از داده‌های ماهواره‌های LO و HO برای بدست آوردن TEC به تفصیل توضیح داده شده‌اند. به اعتبارسنجی و صحت‌سنجی داده‌های ماهواره‌ای در توموگرافی رادیویی یونسفر که ضامن درستی عملکرد محصول نهایی و فرآیند تولید آن است، پرداخته شده است. در انتها مروری بر یک تکنیک برای بازسازی تصاویر توموگرافی حباب‌های پلاسمایی با اندازه‌گیری TEC از طریق سیگنال‌های GNSS انجام شد. نشان داده شد که این تکنیک بازسازی توموگرافی روی تصویربرداری از حباب‌های پلاسمایی به خوبی عمل می‌کند. توزیع‌های افقی گرفته شده از کاهش پلاسمای VTEC با تصاویر گرفته شده از ادوات اپتیکی مقایسه گردید و نشان داده شد که نتایج مشابهی حاصل می‌شود. همچنین نتایج بیان می‌کنند که در صورت بزرگ بودن ساختار حباب حتی در نواحی که سیگنال GNSS در آن‌ها ضعیف است، می‌توان نتیجه درستی از این روش بدست آورد.

نتیجه‌گیری: در مجموع، توموگرافی GNSS یک حوزه پویا و در حال توسعه است که پتانسیل زیادی برای بهبود دقت و کارایی در پیش‌بینی‌های جوی دارد. با تحقیق و توسعه بیشتر، می‌توان انتظار داشت که روش‌ها و فناوری‌های جدیدی در این زمینه معرفی شوند که می‌توانند به حل چالش‌های موجود و بهبود کیفیت و دقت مدل‌های توموگرافی کمک کنند. این پیشرفت‌ها می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر کاربردهای متنوع توموگرافی GNSS، از جمله در زمینه‌های هواشناسی، تغییرات اقلیمی و مدیریت بلایا داشته باشند.

مقدمه

توموگرافی یون‌سپهر روشی برای بازسازی چگالی سه‌بعدی الکترونی این لایه با استفاده از داده‌های سامانه ماهواره‌ای ناوبری جهانی (GNSS) است. تکنیک‌های سنجش رادیویی و توموگرافی، برای مطالعه ساختار و دینامیک یون‌سپهر به کار می‌روند. یون‌سپهر لایه‌ای از جو زمین حاوی یون‌ها و الکترون‌های آزاد است که می‌توانند بر روی انتقال امواج رادیویی تأثیر بگذارند. آشکارسازی سیگنال‌های عبوری از یون‌سپهر با استفاده از GNSS و شبکه‌های گیرنده زمینی انجام می‌شود. این آشکارسازها قادر به اندازه‌گیری یون‌سپهر در جهات مختلف، پردازش داده‌ها با روش‌های توموگرافیکی و بازسازی توزیع فضایی چگالی الکترونی آن هستند. بطور کلی روش‌های توموگرافی رادیویی (RT) بر اساس ماهواره‌های ناوبری در مدار پایین زمین (LEO) و مدار بالای زمین (HEO) و همچنین روش‌های اختفای رادیویی (RO) که از داده‌های تقریباً مماسی استفاده می‌کنند، استوار هستند. این تکنیک‌ها برای ما امکان درک ساختار یون‌سپهر برای به‌کارگیری در سامانه‌های ناوبری، مکان‌یابی و ارتباطی را فراهم می‌آورد. توموگرافی یون‌سپهر، با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته رادیویی و امکانات ماهواره‌ای، امکان بررسی یون‌سپهر را در محدوده وسیعی از موقعیت‌های جغرافیایی سیستم‌های فرستنده-گیرنده فراهم می‌آورد. در سال‌های اخیر توموگرافی یون‌سپهر به حوزه‌ی فعال تحقیقاتی برای دانشمندان سراسر جهان تبدیل شده است [۱-۴].

توموگرافی از داده‌های مشاهداتی مانند سامانه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) برای تولید نقشه‌های دقیق از توزیع الکترون‌ها در لایه یون‌سپهر استفاده می‌کند. همچنین این روش امکان مدل‌سازی تغییرات زمانی و مکانی چگالی الکترونی در یون‌سپهر را فراهم می‌آورد که در آن تغییرات افقی چگالی الکترونی با استفاده از توابع هارمونیک کروی و تغییرات عمودی آن با استفاده از توابع متعامد تجربی مدل‌سازی می‌شوند. این تکنیک به ما اجازه می‌دهند تا ساختار یون‌سپهر را در ابعاد مختلف بررسی کنیم و به درک بهتری از تأثیرات محیطی آن بر روی سیگنال‌های مخابراتی دست یابیم. توموگرافی به ویژه در شرایط تغییرات شدید مانند طوفان‌های مغناطیسی یا امواج جاذبه، اهمیت پیدا می‌کند. این روش به ما در درک چگالی پاسخ یون‌سپهر به این شرایط و مقابله با چالش‌های ناشی از آن کمک می‌کند. نقشه‌های دقیقی که با این روش از توزیع الکترونی یون‌سپهر تهیه می‌شوند می‌توانند در بهبود دقت سیستم‌های ناوبری و ارتباطی مورد استفاده قرار گیرند. توموگرافی یک ابزار قدرتمند برای مطالعه و پیش‌بینی تأثیرات یون‌سپهر بر روی سیستم‌های مختلف است که می‌تواند به بهبود ایمنی و کارایی آنها کمک کند [۵-۸].

نحوه توزیع چگالی الکترونی در لایه یون‌سپهر بر روی نحوه انتشار امواج رادیویی GNSS و تغییر مسیر، شکل و فاز این امواج به طور مستقیم تأثیرگذار است. هرگونه اختلال در لایه یون‌سپهر، تأثیر جدی در ارتباطات ماهواره‌ای، ارتباطات دقیق ناوبری و ارتباطات دوربرد می‌گذارد. بنابراین، شناخت مقادیر میانگین و توزیع نصف النهاری مقادیر

الکترون‌های آزاد در این لایه منجر به شناخت پراشیدگی و اختلال‌های احتمالی ناشی از آن می‌کند. یک روش پذیرفته‌شده در تحقیق ساختار زمانی و فضایی و تغییرپذیری الکترون‌های آزاد یون‌سپهر، برآورد محتوای کلی الکترون (TEC) است. TEC مجموع الکترون‌های موجود در استوانه‌ای با سطح مقطع یک متر مربع است که در مسیر ماهواره تا گیرنده وجود دارد. GNSS امکان اندازه‌گیری دقیق TEC در لایه یون‌سپهر را فراهم می‌آورد. این اطلاعات برای درک بهتر پدیده‌هایی مانند اختلالات یون‌سپهری، شعله‌های خورشیدی، طوفان‌های مغناطیسی و پراکندگی، ضروری هستند. علاوه بر این، دانش دقیق از شرایط لایه یون‌سپهر، به‌ویژه در زمینه درک صحیح توزیع الکترون‌های آزاد، می‌تواند به بهبود تکنیک‌های ژئودزی فضایی در سطوح مختلف مانند اثرات یون‌سپهری درجه بالا، ناوبری دقیق GNSS، جهت‌یابی GNSS با یک آنتن و هواشناسی GNSS به صورت کنون‌بینی کمک کند. از طریق مدل‌سازی و نظارت دقیق بر یون‌سپهر با استفاده از داده‌های GNSS، می‌توان به درک عمیق‌تری از پدیده‌ها دست یافت و برای کاربردهای مختلف GNSS، از جمله ناوبری، مکان‌یابی و زمان‌بندی دقیق، یک پایه محکم فراهم آورد. این امر به‌ویژه در شرایط اقلیمی فضایی شدید و اختلالات مرتبط با آن، که می‌تواند بر دقت و قابلیت اطمینان خدمات GNSS تأثیر بگذارد، اهمیت دارد [۹-۱۲]. در نهایت، تحقیقات مداوم توسط محققان اقلیم فضایی برای شناسایی، پیش‌بینی و کاهش تأثیرات بالقوه بر صحت، دقت و قابلیت اطمینان کاربری در حال توسعه GNSS ضروری است. این تحقیقات می‌تواند به توسعه استراتژی‌های مقابله با خطرات اقلیم فضایی کمک کند و شرایطی نظیر لکه‌های قطبی، چگالی تقویت‌شده طوفان و شفق قطبی را که تأثیر زیادی بر کاربران و عملیات سامانه دارند، دربرگیرد. درک پدیده‌های یون‌سپهری ناشی از رویدادهای اقلیم فضایی پارامتری کلیدی است، چراکه آگاهی از توزیع چگالی الکترون لایه یون‌سپهر به طور مستقیم بر انتشار سیگنال‌های GNSS تأثیر می‌گذارد. این مطالعات می‌تواند به توسعه مدل‌های پیش‌بینی دقیق و روش‌های کاهش خطر برای کاربردهای مختلف GNSS کمک کند [۱۳-۱۵].

در این مقاله، روش موجود برای چگونگی بدست آوردن تغییر چگالی الکترونی لایه یون‌سفر مبتنی بر پارامتر TEC با استفاده از تحلیل تفاضل فازی ایجاد شده در سیگنال مخابراتی سامانه ماهواره‌ای راهبری جهانی GNSS در هنگام عبور از لایه‌های مختلف یون‌سفر مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. به این منظور سیگنال‌ها مخابراتی از ماهواره‌های مدار پایین و مدارهای بالا مطالعه شده‌اند و روش بدست آوردن TEC از تفاضل فازی برا هر یک توضیح داده شد. سپس به مطالعه روش‌ها و الگوریتم‌های موجود برای تبدیل اطلاعات TEC به تصاویر توموگرافیک پرداختیم و با استفاده از مثالی ساده روش پیاده سازی این الگوریتم‌ها بیان شد. در انتهای این مقاله به عنوان یک مثال روش توموگرافی رادیویی را برای مصورسازی حباب‌های پلاسمايي در منطقه استوایی پیاده‌سازی کرده و نتایج آن را با تصاویر گرفته شده از ادوات اپتیکی مقایسه کردیم. نشان

توموگرافی رادیویی به عنوان RT به وسیله ماهواره‌های مدار پایین ($LORT$) و RT به وسیله ماهواره‌های مدار بالا ($HORT$) پرداخته شده است.

توموگرافی رادیویی یون‌سپهر با ماهواره‌های مدار پایین ($LORT$)

توموگرافی رادیویی یون‌سپهر با استفاده از ماهواره‌های مدار پایین ($LORT$) از سیگنال‌های رادیویی ارسال شده از ماهواره‌های مدار پایین برای اندازه‌گیری و نقشه‌برداری تغییرات چگالی الکترون‌ها در یون‌سپهر استفاده می‌کند. این سیگنال‌ها هنگام عبور از لایه‌های مختلف یون‌سپهر تأخیر فاز پیدا می‌کنند که این تأخیر به دلیل تغییرات چگالی الکترون‌ها است. با تحلیل داده‌های تأخیر فاز و استفاده از تکنیک‌های توموگرافی، نقشه‌های سه‌بعدی از چگالی الکترون‌ها ایجاد می‌شود که به دانشمندان کمک می‌کند تغییرات زمانی و مکانی چگالی الکترون‌ها را مدل‌سازی و پیش‌بینی کنند.

سامانه‌های ناوبری امروزی بر پایه ماهواره‌های مدار پایین که در مدارهای تقریباً دایره‌ای شکل و در ارتفاع حدود ۱۰۰۰ تا ۱۱۵۰ کیلومتر حرکت می‌کنند، ساخته شده‌اند. این سامانه‌ها از زنجیره‌ای از گیرنده‌های زمینی استفاده می‌کنند که داده‌های RT را در طول پرتوهای مختلف دریافت می‌کنند. در آزمایش‌های RT ، اختلاف فاز بین دو سیگنال همدوس که از ماهواره با فرکانس‌های ۱۵۰ و ۴۰۰ مگاهرتز ارسال می‌شوند، در مجموعه‌ای از ایستگاه‌های گیرنده روی زمین ثبت می‌شود. گیرنده‌ها در زنجیره‌ای موازی با تصویر زمینی مسیر ماهواره قرار گرفته‌اند و فاصله بین گیرنده‌های همسایه معمولاً چند صد کیلومتر است. فازهای کاهش یافته φ که در سایت‌های گیرنده ثبت شده‌اند، داده‌های ورودی برای تصویربرداری RT هستند. انتگرال‌های چگالی الکترون N در طول پرتوهایی که گیرنده‌های زمینی را به فرستنده ماهواره‌ای متصل می‌کنند، متناسب با فاز مطلق (Φ) هستند که شامل فاز اولیه ناشناخته φ_0 می‌شود:

$$\alpha \lambda r_e \int N d\sigma = \Phi = \varphi_0 + \varphi \quad (1)$$

در اینجا λ ، طول موج سیگنال رادیویی ماهواره، $d\sigma$ المان پرتو و r_e شعاع کلاسیک الکترون است. ضریب مقیاس α (از مقیاس واحد) به فرکانس‌های رادیویی استفاده شده بستگی دارد. معادله (۱) می‌تواند به صورت اپراتوری بازنویسی شود [۴] که شامل نویز اندازه‌گیری غیرهمبسته معمولی ξ است:

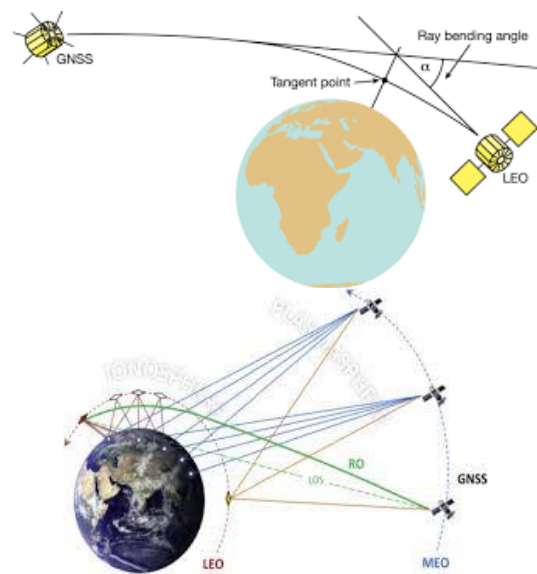
$$PN = \Phi + \xi \quad (2)$$

در اینجا، P اپراتور تصویری است که توزیع دو بعدی N (۲D) را به مجموعه‌ای از تصاویر یک بعدی Φ (۱D) نگاشت می‌کند. بنابراین، مسئله وارونگی توموگرافی به حل معادلات انتگرالی خطی (۲) برای غلظت الکترون N کاهش می‌یابد. یکی از راه‌های احتمالی برای حل (۲) این است که اپراتور تصویری P را گسسته‌سازی (تقریب) کنیم. این

داده شد که توموگرافی رادیویی می‌تواند به عنوان روشی دقیق برای مصورسازی ساختار حباب‌های پلازما به کار گرفته شود.

هندسه سنجش رادیویی ماهواره‌ای

شکل ۱ نشان‌دهنده‌ی کاوش رادیویی ماهواره‌ای محیط نزدیک زمین است که شامل جو، یون‌سپهر و پروتونوسفر می‌شود. فرستنده‌های موجود در ماهواره‌های LO و HO و گیرنده‌های زمینی مجموعه‌ای از پرتوها را فراهم می‌کنند که فضای نزدیک زمین را قطع می‌کنند و امکان تعیین مسیرهای گروه و فاز (در مورد LO تنها مسیرهای فازی) سیگنال‌های رادیویی در امتداد پرتوهای مربوطه را فراهم می‌سازند. گیرنده‌های موجود در ماهواره‌های LO که امواج رادیویی از ماهواره‌های HO را دریافت می‌کنند نیز برای تعیین مسیرهای گروهی و فازی سیگنال در طول مجموعه‌ای از پرتوها که به صورت شبه‌مماس با سطح زمین می‌باشند، مناسب هستند (شکل ۱ب). به‌طور کلی این اندازه‌گیری‌ها برای سنجش محیط فضای نزدیک در جهات مختلف و محاسبه انتگرال‌ها (یا تفاوت انتگرال‌ها) شاخص ضریب شکست در این محیط مناسب هستند. این مجموعه از انتگرال‌ها می‌تواند توسط روش RT برای پارامترهای محیط معکوس شود. در مورد یون‌سپهر، انتگرال‌های ضریب شکست به انتگرال‌های چگالی الکترون یون‌سپهر کاهش می‌یابند [۲۴].



شکل ۱: هندسه سنجش رادیویی ماهواره‌ای [۲۳].
Fig. 1: The geometry of the satellite radio sounding the near-Earth environment [23].

روش‌های توموگرافی رادیویی با GNSS

روش‌های توموگرافی رادیویی ماهواره‌ای یون‌سپهر در حال حاضر با موفقیت در حال توسعه هستند. از اوایل دهه ۱۹۹۰، روش‌های RT مبتنی بر سیستم‌های ناوبری LO عملیاتی شده‌اند. در سال‌های اخیر، مطالعات RT مبتنی بر اندازه‌گیری‌های استفاده از سامانه‌های ناوبری HO به‌طور گسترده‌ای انجام شده است [۶-۸]. در ادامه، به انواع مختلف

یونسفر و حل مسئله پراکندگی معکوس در سنجش رادیویی را فراهم می‌کند [۶-۸]. در آینده نزدیک، برنامه‌هایی برای راه‌اندازی سامانه‌های ماهواره‌ای گالیله اروپایی و بییدو چینی وجود دارد. سیگنال‌های GPS/GLONASS امروزی به طور مداوم در شبکه‌های دریافت منطقه‌ای و جهانی مانند شبکه‌ای که توسط سرویس بین‌المللی GNSS، IGS، که شامل حدود دو هزار گیرنده است ثبت می‌شوند. این داده‌ها برای بازسازی چگالی الکترون یون‌سپهر و TEC مناسب هستند.

مسائل پراکندگی معکوس در سنجش رادیویی بر اساس داده‌های GPS/GLONASS که به مسائل توموگرافی با داده‌های ناقص مربوط می‌شوند، ذاتاً دارای ابعاد بالا هستند. به دلیل سرعت زاویه‌ای نسبتاً پایین ماهواره‌های مداری بالا (LO)، در نظر گرفتن تغییرات زمانی یون‌سپهر ضروری می‌شود. این موضوع مسئله RT را چهار بعدی می‌کند (سه مختصه فضایی و یک مختصه زمان) که این موضوع ناقص بودن داده‌ها را تشدید می‌کند؛ لزوماً پرتوهای که ماهواره‌ها و گیرنده‌ها را به هم متصل می‌کنند، از همه نقاط فضا عبور نمی‌کنند، بنابراین شکاف‌های داده در مناطقی که فقط تعداد کمی گیرنده موجود است، ایجاد می‌شود. بنابراین حل این مسئله نیاز به رویکردهای ویژه‌ای دارد [۱۳].

روش‌های سنجش یون‌سپهر معمولاً فازهای سیگنال‌های رادیویی را که از ماهواره به گیرنده زمینی در دو فرکانس به‌طور هم‌زمان و چندگانه منتشر می‌شوند، تحلیل می‌کنند. به عنوان مثال، در سنجش‌های مبتنی بر GPS، این فرکانس‌ها $f_1 = 1575.42 \text{ MHz}$ مگاهرتز و $f_2 = 1227.60 \text{ MHz}$ هستند. L_1 و L_2 مسیریهای فاز سیگنال‌های رادیویی هستند که در واحدهای طول موج سیگنال سنجش اندازه‌گیری می‌شوند. پارامتر دیگری که می‌تواند در تحلیل استفاده شود، شبه‌فاصله‌ها (مسیریهای گروهی سیگنال‌ها) است که زمان لازم برای انتشار قطارهای موج در فرکانس‌های f_1 و f_2 از منبع به گیرنده است. تأخیرهای فاز L_1 و L_2 متناسب با TEC هستند که خود TEC برابر است با انتگرال چگالی الکترون در طول پرتو بین ماهواره و گیرنده.

$$TEC = \left(\frac{L_1}{f_1} - \frac{L_2}{f_2} \right) \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \frac{c}{K} + const \quad (۶)$$

که در آن $K = 40.308 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$ و $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ سرعت نور در خلاء است. توجه داشته باشید که با استفاده از داده‌های تأخیر فاز، تنها می‌توان مقدار TEC را تا یک ثابت مشخص که به عنوان جمله افزایشی در فرمول (۶) نشان داده شده است، محاسبه کرد. رابطه (۶) مشابه فرمول (۱) است البته با ثابتی ناشناخته در سمت راست معادله. مقادیر TEC همچنین می‌توانند از شبه‌بردهای P_1 و P_2 استخراج شوند [۱۷]:

$$TEC = \frac{P_2 - P_1}{K \left(\frac{1}{f_2^2} - \frac{1}{f_1^2} \right)} \quad (۷)$$

با این حال، در مقایسه با داده‌های فاز، داده‌های شبه‌برد به شدت تحریف شده و با نویز آلوده هستند. سطح نویز در P_1 و P_2 معمولاً ۲۰-

منجر به سیستم معادلات خطی (SLE) مربوطه با اپراتور گسسته L می‌شود:

$$LN = \Phi + \xi + E, E = LN - PN \quad (۳)$$

در اینجا، E خطای تقریب است که به خود راه حل N بستگی دارد. توجه داشته باشید که معادلات (۲) و (۳) معادل هستند اگر خطای تقریب E شناخته شده باشد. با این حال، در مورد بازسازی داده‌های یک آزمایش واقعی RT، E ناشناخته است و در واقع، یک SLE کاملاً متفاوت حل می‌شود:

$$LN = \Phi + \xi \quad (۴)$$

سیستم (۴) معادل SLE (۳) نیست. به عبارت دیگر، تفاوت بین راه‌حل‌های (۳) و (۴) ناشی از تفاوت در هر دو جزء شبه‌نویز و خطای تقریب همبسته (در زمان و پرتوها) E است. برای حل SLE (۴)، فاز مطلق Φ همراه با φ_0 باید شناخته شوند. خطاهای φ_0 که توسط گیرنده‌های مختلف تخمین زده می‌شوند، می‌توانند منجر به داده‌های متناقض و ناسازگار شوند که منجر به بازسازی‌های RT با کیفیت پایین می‌شود. برای جلوگیری از این مشکل، روش توموگرافی رادیویی اختلاف فاز RT بر اساس تفاوت انتگرال‌های خطی در طول پرتوهای همسایه توسعه داده شد [۱۶] که نیازی به تعیین فاز اولیه φ_0 ندارد. SLE اختلاف فاز RT توسط اختلاف زیر تعیین می‌شود:

$$AN = LN - L'N = F - F' = D + \xi \quad (۵)$$

در اینجا، $LN = \Phi$ ؛ SLE اولیه است و $L'N = \Phi'$ سیستم معادلات خطی در طول مجموعه‌ای از پرتوهای همسایه می‌باشد.

الگوریتم‌های متعددی، هم مستقیم و هم تکراری، وجود دارند که SLE‌های (۴) و (۵) را حل می‌کنند. در حال حاضر، در مسائل توموگرافی رادیویی پرتوهای یون‌سپهر، الگوریتم‌های تکراری محبوب‌تر هستند، اگرچه الگوریتم‌های غیر تکراری نیز استفاده می‌شوند. این الگوریتم‌ها از تجزیه مقدار منفرد با اصلاحات آن، منظم‌سازی انحراف ریشه میانگین مربعات (RMS)، تجزیه متعامد، حداکثر آنتروپی، برنامه‌ریزی درجه دوم، رویکرد بیزی و غیره استفاده می‌کنند [۴-۳].

مدل‌سازی عددی گسترده و تصویربرداری LORT از داده‌های تجربی متعدد، ترکیب‌های کارآمد روش‌های مختلف و الگوریتم‌هایی که بهترین بازسازی‌ها را ارائه می‌دهند، را نشان دادند. روش LORT با تفاوت فاز نتایج بسیار بهتری و حساسیت بالاتری نسبت به روش‌های فازی تنها ارائه می‌دهد. این موضوع توسط بازسازی داده‌های تجربی نیز تأیید شده است [۴، ۷]. وضوح افقی و عمودی LORT در فرمول‌بندی خطی آن به ترتیب ۲۰-۳۰ کیلومتر و ۳۰-۴۰ کیلومتر است. اگر انکسار پرتوها در نظر گرفته شود، وضوح مکانی LORT می‌تواند به ۱۰-۲۰ کیلومتر بهبود یابد [۷].

توموگرافی رادیویی یون‌سپهر با ماهواره‌های مدار بالا (HORT)

استقرار سامانه‌های ناوبری جهانی (GPS و GLONASS) در ایالات متحده و روسیه امکان اندازه‌گیری مداوم سیگنال‌های رادیویی عبور کرده از

بسیار کمتری نسبت به LORT دارد. به طور معمول، وضوح عمودی و افقی HORT در بهترین حالت ۱۰۰ کیلومتر است و گام زمانی (فاصله بین دو بازسازی متوالی) معمولاً ۲۰ تا ۶۰ دقیقه است. در مناطقی که توسط شبکه‌های دریافت متراکم پوشش داده شده‌اند (اروپا، ایالات متحده و آلاسکا)، وضوح می‌تواند به ۳۰-۵۰ کیلومتر با فاصله ۱۰ تا ۳۰ دقیقه بین بازسازی‌های متوالی بهبود یابد. وضوح ۱۰-۳۰ کیلومتر با گام زمانی ۲ دقیقه فقط در مناطقی با شبکه‌های دریافت بسیار متراکم (کالیفرنیا و ژاپن) قابل دستیابی است.

چگونگی تبدیل داده‌های TEC به نقشه‌های توموگرافی

در این قسمت از مقاله تکنیک‌های مورد استفاده برای تهیه نقشه‌های توموگرافی از داده‌های TEC منتج شده از سیگنال‌های GNSS مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. دریافت کننده‌های GNSS سیگنال‌ها را از چندین ماهواره دریافت می‌کنند. همانطور که تا کنون توضیح داده شد این سیگنال‌ها شامل اطلاعات TEC در امتداد خط عبور سیگنال از ماهواره تا دریافت کننده هستند که می‌توان با استفاده از روش‌هایی بیان شده برای ماهواره‌های LORT و HORT که مبتنی بر تفاضل فاز بین دو فرکانس است TEC را بدست آورد [۴۵-۴۲].

تبدیل محتوای کل الکترون (TEC) به محتوای کل الکترون عمودی (VTEC) با استفاده از توابع نگاشت که هندسه مسیر سیگنال را در نظر می‌گیرند، ممکن می‌شود. رابطه اساسی بین TEC و VTEC با رابطه زیر تعریف می‌شود

$$VTEC = \frac{TEC}{M(z)} \quad (9)$$

که در آن $M(z)$ تابع نگاشت است که به زاویه زینت (z) مسیر سیگنال بستگی دارد.

چندین تابع نگاشت معمولاً برای تبدیل TEC به VTEC استفاده می‌شوند. مدل تک لایه (SLM) فرض می‌کند که یون‌سپهر یک پوسته نازک در ارتفاع ثابت، معمولاً حدود ۳۵۰-۴۵۰ کیلومتر، است و از تابع نگاشت $(M(z) = 1/\cos(E))$ استفاده می‌کند، که در آن (E) زاویه نسبت به افق ماهواره است. مدل تک لایه اصلاح شده (MLSM) مدلی مشابه است اما شامل تنظیماتی برای ارتفاعات متغیر یون‌سپهر و وابستگی‌های دقیق‌تر زاویه ماهواره نسبت به افق است. برای ماهواره‌های LEO، تابع نگاشت هندسی Foelsche and Kirchengast اغلب مورد استفاده قرار می‌گیرد، زیرا ارتفاعات متغیر یون‌سپهر را در نظر می‌گیرد و برای مشاهدات فضایی مناسب‌تر است. علاوه بر این، تابع نگاشت پارامتر آزیموت (APMF) پارامترهای آزیموت را برای کاهش خطاهای پیش‌بینی، به ویژه در زوایای کم ماهواره نسبت به افق، در نظر می‌گیرد.

یک جنبه مهم از این توابع نگاشت، در نظر گرفتن ارتفاع مؤثر یون‌سپهر است که اغلب به عنوان ارتفاع پوسته یون‌سپهر شناخته می‌شود. این ارتفاع می‌تواند به صورت مکانی و زمانی متغیر باشد و روش‌های مختلفی مانند روش مرکز جرم و روش انترگرال برای تخمین

۳۰٪ و حتی بیشتر است، در حالی که در داده‌های فاز کمتر از ۱٪ است و به ندرت به چند درصد می‌رسد. بنابراین، برای HORT، داده‌های فاز ترجیح داده می‌شوند.

به‌طور کلی مسئله HORT را با استفاده از مجموعه‌ای از انترگرال‌های خطی حل می‌شود [۶]. در این روش، فرض می‌شود که داده‌های TEC به اندازه کافی دقیق از داده‌های تأخیر فاز و گروه تعیین شده‌اند (Y) و (۶). با این حال، TEC مطلق (Y) در مقابل تفاوت‌های TEC که با دقت بالایی محاسبه می‌شوند، با عدم قطعیت زیادی تعیین می‌شود. بنابراین، روش تفاوت فاز در این مورد نیز اعمال می‌شود [۱۰، ۱۲]. به عبارت دیگر، به جای TEC مطلق، مشتقات زمانی $d(TEC)/dt$ به عنوان داده‌های ورودی برای مسئله RT استفاده شدند.

مسئله توموگرافی رادیویی مبتنی بر GNSS چهار بعدی را می‌توان با روشی که در LORT دو بعدی توسعه یافته است، حل کرد. در این روش، توزیع چگالی الکترون به صورت یک سری گسترش از توابع پایه محلی خاص نمایش داده می‌شود. در این مورد، مجموعه‌ای از انترگرال‌های خطی یا تفاوت‌های آن‌ها به SLE تبدیل می‌شود. با این حال، برخلاف LORT دو بعدی، در اینجا لازم است یک روش اضافی برای درون‌یابی راه‌حل‌ها در مناطق فاقد داده معرفی شود. اجرای این روش در مناطقی که توسط شبکه‌های دریافت متراکم پوشش داده شده‌اند (مانند آمریکای شمالی و اروپا) با شبکه محاسباتی نسبتاً درشت و اسپیلیان‌های مناسب با همواری‌های مختلف [۱۳، ۱۸] بسیار کارآمد بوده است.

رویکرد دیگر به دنبال راه حل‌های به اندازه کافی هموار برای مسئله است تا الگوریتم‌ها درون‌یابی خوبی را در منطقه با داده‌های گمشده ارائه دهند. عنوان مثال، یک سوبولف (Sobolev) را هنجار کنید و به دنبال راه حلی باشید که این هنجار را در مجموعه بی‌نهایت راه حل‌های مسئله توموگرافی اولیه (نامشخص) به حداقل برساند:

$$AN = D, \min \|f - f_0\|_{W_n^2} \quad (8)$$

در اینجا تابع f تابع راه‌حل با وزن داده شده است.

پایه‌سازی عملی این روش با مشکلاتی در ارتباط با حل مسئله بهینه‌سازی محدود مواجه است. روش مستقیم با استفاده از روش ضرایب نامعین لاگرانژ، SLE با ماتریس‌های با ابعاد بالا (به دلیل تعداد زیاد پرتوها) را ارائه می‌دهد که هیچ ساختار خاصی ندارند تا حل مسئله را ساده کند. بنابراین، ما این مسئله بهینه‌سازی را با یک روش تکراری [۱۳] که نسخه‌ای از تکنیک SIRT است، با هموارسازی اضافی (با فیلتر کردن) افزوده‌های تکراری بر روی متغیرهای فضایی حل می‌کنیم. این روش اجازه می‌دهد تا از اطلاعات پیشین استفاده شود که می‌تواند هم از طریق تقریب اولیه برای تکرارها و هم از طریق ضرایب وزنی که شدت نسبی تغییرات چگالی الکترون در ارتفاعات مختلف را تعیین می‌کنند، معرفی شود.

مدل‌سازی با کمک رایانه نشان می‌دهد که ساختارهای شبه‌ثابت یون‌سپهر می‌توانند با دقت معقول بازسازی شوند، اگرچه HORT وضوح

مورد نظر یک مکعب با طول ضلع ۱۰۰۰ کیلومتر است که به $10 \times 10 \times 10$ وکسل تقسیم شده است و طول هر وکسل ۱۰۰ کیلومتر است. در ابتدا، یک چگالی الکترون یکنواخت به هر وکسل اختصاص می‌دهیم. به عنوان مثال، چگالی الکترون (10^8) الکترون در هر سانتی‌متر مکعب. هر مسیر سیگنال GNSS چندین وکسل را قطع می‌کند. به عنوان مثال، یک سیگنال از یک ماهواره به یک گیرنده ممکن است از وکسل‌های $(1,1,1)$ ، $(2,2,2)$ و $(3,3,3)$ عبور کند. مقدار TEC اندازه‌گیری شده بر اساس طول مسیر در هر وکسل توزیع می‌شود. یک دستگاه معادلات خطی جفت شده ایجا می‌شود که مقادیر TEC اندازه‌گیری شده را به چگالی‌های الکترون ناشناخته در وکسل‌ها مرتبط می‌کند. به عنوان مثال، اگر مقدار TEC برای یک مسیر خاص ۳۰۰ واحد TEC باشد و مسیر به طور مساوی سه وکسل را قطع کند، می‌توانیم معادله‌ای مانند این داشته باشیم:

$$300 = 100N(1,1,1) + 100N(2,2,2) + 100N(3,3,3)$$

که $N(i,j,k)$ چگالی الکترون در وکسل i,j,k است. با استفاده از یک الگوریتم وارون‌سازی، مانند تکنیک بازسازی جبری (ART)، ما به صورت تکراری چگالی‌های الکترون در وکسل‌ها را بدست می‌آوریم تا تفاوت بین مقادیر TEC اندازه‌گیری شده و محاسبه شده به حداقل برسد. برای اطمینان از یک راه‌حل پایدار، تکنیک‌های تنظیم و محدودیت‌های اضافی اعمال می‌شود. به عنوان مثال، ممکن است یک شرط پیوستگی چگالی اعمال کنیم که تفاوت‌های بزرگ در چگالی الکترون بین وکسل‌های مجاور را از بین ببرد. در نهایت، چگالی‌های الکترون در وکسل‌ها را مصورسازی می‌کنیم تا یک نقشه سه‌بعدی از یون‌سپهر ایجاد کنیم.

اعتبارسنجی و صحت‌سنجی توموگرافی رادیویی

یون‌سپهر

اعتبارسنجی و صحت‌سنجی دو مفهوم کلیدی در توموگرافی رادیویی یون‌سپهر هستند که به ترتیب به بررسی درستی عملکرد محصول نهایی و فرآیند تولید آن می‌پردازند. اعتبارسنجی به معنای اطمینان از این است که توموگرافی انجام شده، نیازهای مورد نظر را برآورده می‌کند و در شرایط واقعی قابل استفاده است. از سوی دیگر، صحت‌سنجی به بررسی این موضوع می‌پردازد که آیا فرآیندهای انجام شده در توموگرافی به درستی و بر اساس استانداردهای تعیین شده صورت گرفته‌اند یا خیر. در توموگرافی رادیویی یون‌سپهر، که برای مدل‌سازی سه‌بعدی این لایه از جو زمین استفاده می‌شود، این دو مفهوم اهمیت ویژه‌ای دارند. مدل‌سازی دقیق یون‌سپهر، به دلیل تغییرات پیچیده زمانی و مکانی که در این لایه از جو رخ می‌دهد، چالش‌برانگیز است. توموگرافی رادیویی با استفاده از داده‌های GPS به ما امکان می‌دهد تا ساختار چگالی الکترونی یون‌سپهر را با دقت بالا بازسازی کنیم و از این طریق، تأثیرات این لایه بر روی سیگنال‌های

آن استفاده می‌شود. با اعمال این توابع نگاشت، دانشمندان می‌توانند به دقت TEC را به VTEC تبدیل کنند و بینش‌های ارزشمندی در مورد توزیع چگالی الکترون یون‌سپهر ارائه دهند.

بعد از تبدیل TEC به VTEC، مرحله ایجاد شبکه وکسل (Voxel) در فرآیند تصویربرداری توموگرافی و ایجاد نقشه‌های یون‌سپهر از داده‌های GNSS است که مراحل آن در ادامه ارائه شده است:

۱. تعریف منطقه مورد نظر: اولین مرحله تعریف منطقه‌ای از یون‌سپهر است که قصد نقشه‌برداری از آن را داریم. این منطقه معمولاً یک فضای سه‌بعدی است که از سطح زمین تا لایه یون‌سپهر بالایی امتداد دارد.

۲. تقسیم به وکسل‌ها: منطقه تعریف شده به یک شبکه از پیکسل‌های حجمی کوچک سه‌بعدی به نام وکسل‌ها (مخفف "پیکسل‌های حجمی") تقسیم می‌شود. هر وکسل نمایانگر یک بخش کوچک از یون‌سپهر است. اندازه وکسل‌ها می‌تواند بسته به وضوح مورد نظر و منابع محاسباتی موجود متفاوت باشد.

۳. اختصاص مقادیر اولیه: مقادیر اولیه برای چگالی الکترون یا سایر پارامترهای مرتبط به هر وکسل اختصاص داده می‌شود. این مقادیر اولیه می‌تواند بر اساس دانش قبلی، مدل‌های تجربی یا به سادگی در صورتیکه مقادیر اولیه مشخصی وجود نداشته باشد، به یک مقدار یکنواخت تنظیم شود.

۴. ادغام داده‌ها: داده‌های GNSS، مانند اندازه‌گیری‌های TEC، در شبکه وکسل ادغام می‌شوند. هر مسیر سیگنال GNSS چندین وکسل را قطع می‌کند و مقدار TEC بر اساس طول مسیر در هر وکسل توزیع می‌شود.

۵. وارون‌سازی توموگرافی: یک الگوریتم وارون‌سازی برای حل چگالی الکترون در هر وکسل اعمال می‌شود. این مرحله شامل تنظیم و حل یک همزمان سیستم معادلات خطی جفت شده است که مقادیر TEC اندازه‌گیری شده را به چگالی‌های الکترون ناشناخته در وکسل‌ها مرتبط می‌کند. تکنیک‌های وارون‌سازی معمول شامل تکنیک‌های بازسازی جبری (ART) و روش‌های کمترین مربعات است.

۶. بالابردن دقت: شروطی مانند همواری یا پیوستگی توزیع چگالی الکترون در وکسل‌ها، می‌تواند برای بهبود دقت راه‌حل اعمال شود. داده‌های منابع دیگر، مانند یونوسوندها یا رادارهای پراکندگی غیرهمدوس، نیز می‌توانند برای بالا بردن دقت نتایج مدل ادغام شوند.

۷. مصورسازی: هنگامی که چگالی‌های الکترون برای همه وکسل‌ها تعیین شد، داده‌ها می‌توانند برای ایجاد یک نقشه سه‌بعدی از یون‌سپهر مصورسازی شوند.

در ادامه یک مثال ساده از تولید نقشه‌های توموگرافی یون‌سپهر با استفاده از داده‌های GNSS را مرور کنیم. فرض کنید یک شبکه از گیرنده‌های GNSS در یک منطقه در دسترس داریم. هر مسیر سیگنال از طریق یون‌سپهر اطلاعاتی درباره TEC فراهم می‌کند. منطقه مورد نظر در یون‌سپهر را تعریف کرده و آن را به یک شبکه سه‌بعدی تشکیل شده از وکسل‌ها تقسیم می‌کنیم. برای سادگی، فرض شده که منطقه

نامنظمی‌ها باید به لحاظ فضایی و اندازه ساختار مشابهی را نشان دهند.

استفاده از مدل‌های پیش‌بینی: مدل‌های پیش‌بینی یون‌سپهر می‌توانند به عنوان مرجع برای اعتبارسنجی نتایج توموگرافی استفاده شوند. این مدل‌ها معمولاً بر اساس داده‌های تاریخی و فیزیکی یون‌سپهر ساخته می‌شوند و می‌توانند به عنوان یک معیار برای ارزیابی دقت نتایج توموگرافی به کار روند. با مقایسه نتایج توموگرافی با پیش‌بینی‌های مدل، می‌توان دقت و صحت نتایج را ارزیابی کرد. برای مثال می‌توان داده‌های GNSS را به زیرمجموعه‌های آموزش و اعتبارسنجی تقسیم کرد. در این روش یون‌سپهر با استفاده از داده‌های آموزش بازسازی می‌شود و سپس با داده‌های اعتبارسنجی مقایسه می‌گردد [۴۰].

روش‌های آماری برای پیدا کردن مقدارخطا: استفاده از روش‌های آماری مانند تحلیل خطا و محاسبه معیارهای آماری مختلف (مانند میانگین مربعات خطا) می‌تواند به ارزیابی دقت و صحت نتایج توموگرافی کمک کند. این روش‌ها می‌توانند نشان دهند که نتایج توموگرافی چقدر با داده‌های واقعی همخوانی دارند و میزان خطاهای موجود در نتایج چقدر است. این تحلیل‌ها می‌توانند به شناسایی نقاط ضعف و قوت روش‌های توموگرافی کمک کنند [۴۱].

توموگرافی حباب‌های پلاسمایی یون‌سپهری با استفاده از GNSS

حباب‌های پلازما ساختارهای در مقیاس بزرگ با کاهش چگالی در یون‌سپهر زمین هستند. حباب‌های پلازما توسط مکانیسم‌های ناپایداری پلازما در ناحیه پایین لایه F ایجاد می‌شوند و در راستای میدان مغناطیسی تا ۱۵۰۰ کیلومتر در منطقه استوایی رشد می‌کنند [۲۵]. مشاهدات یونوسندی، چگالی نامنظم پلاسمایی حباب‌ها را به عنوان عامل اصلی [۲۶] نوسان شدید در فاز و دامنه سیگنال‌های عبور کننده از یون‌سپهر معرفی کردند [۲۸، ۲۷]. ساختار حباب می‌تواند باعث تداخل، محو شدن ارتباطات در فرکانس رادیویی و اختلال در بسیاری از برنامه‌ها شود. بنابراین، توصیف گسترش حباب پلازما و تحولات زمانی موضوع تحقیقات بسیاری از دانشمندان برای دهه‌ها بوده است [۳۳، ۲۹].

در این قسمت از این مقاله به مطالعه یکی از روش‌های نوآورانه پیشنهادی برای توموگرافی حباب پلازما و چگونگی انجام آن می‌پردازیم [۳۵]. یکی از روش‌های مرسوم حال حاضر جهان در مصورسازی ساختارهای حباب پلازما یون‌سپهری، تکنیک‌های اپتیکی هستند. اما اخیراً استفاده از داده‌های TEC برای شناسایی مشخصات این حباب‌ها نیز به عنوان راه‌حلی هوشمندانه در نظر گرفته شده است. اندازه‌گیری‌های TEC ارائه شده توسط GNSS نتایج موفقیت‌آمیزی را برای ثبت مشخصات حباب‌های پلازما در استوا ارائه کرده‌اند. در حقیقت، بازتولید صحیح چگونگی کاهش پلازما و سطح چگالی الکترون هنوز یک چالش مرتبط برای تصویربرداری توموگرافی یون‌سپهر است. در این مقاله، اولین نتایج تکنیکی جدید برای بازسازی

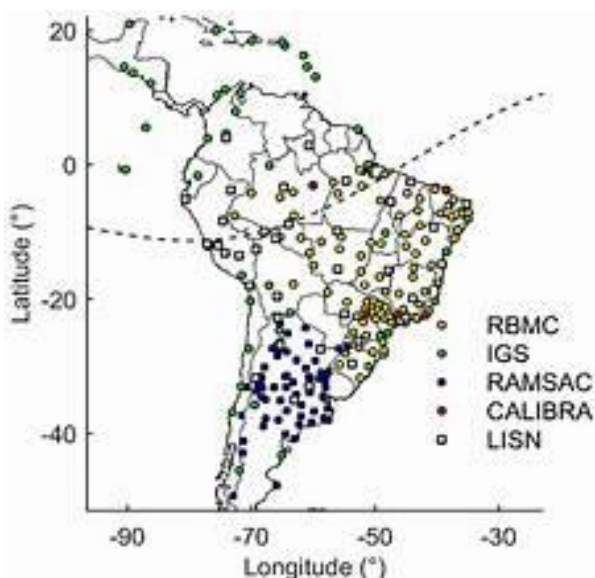
الکترومغناطیسی را مطالعه نماییم. این روش، که به تکنیک بازسازی جبری نیز شناخته می‌شود، در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است. نتایج حاصل از این روش نشان‌دهنده موفقیت آن در مقایسه با روش‌های مستقیم اندازه‌گیری ساختار یون‌سپهر است و می‌تواند در مطالعه واکنش این لایه به طوفان‌های مغناطیسی و امواج جاذبه نیز مورد استفاده قرار گیرد. اعتبارسنجی و صحت‌سنجی در توموگرافی رادیویی یون‌سپهر به ما کمک می‌کند تا از صحت و دقت مدل‌های ساخته شده اطمینان حاصل کنیم و بتوانیم از این مدل‌ها در کاربردهای عملی مانند ناوبری و پیش‌بینی شرایط جوی استفاده نماییم [۲۰، ۱۹].

اعتبارسنجی و صحت‌سنجی توموگرافی رادیویی یون‌سپهر شامل چندین مرحله و روش مختلف است که به منظور اطمینان از دقت و صحت نتایج به کار می‌روند. یکی از روش‌های اصلی اعتبارسنجی، مقایسه نتایج توموگرافی با داده‌های مستقل از منابع دیگر مانند داده‌های ماهواره‌ای، رادارهای زمینی، و ایستگاه‌های یونوسوند است که می‌توانند نشان دهند که آیا نتایج توموگرافی با داده‌های واقعی همخوانی دارند یا خیر. همچنین، مدل‌های پیش‌بینی یون‌سپهر می‌توانند به عنوان مرجع برای اعتبارسنجی نتایج توموگرافی استفاده شوند و به عنوان یک معیار برای ارزیابی دقت نتایج به کار روند. استفاده از روش‌های آماری مانند تحلیل خطا و محاسبه معیارهای آماری مختلف نیز می‌تواند به ارزیابی دقت و صحت نتایج توموگرافی کمک کند و نشان دهد که نتایج چقدر با داده‌های واقعی همخوانی دارند و میزان خطاهای موجود چقدر است. علاوه بر این، استفاده از روش‌های تکراری و هموارسازی می‌تواند به بهبود دقت نتایج توموگرافی کمک کند و شامل تکرار محاسبات با استفاده از داده‌های جدید و به‌روزرسانی نتایج با استفاده از فیلترهای مختلف برای کاهش نویز و خطاهای موجود در داده‌ها است. این روش‌ها و تکنیک‌ها می‌توانند به اطمینان از دقت و صحت نتایج توموگرافی رادیویی یون‌سپهر کمک کنند و به بهبود کیفیت داده‌های به دست آمده منجر شوند [۲۲، ۲۱]. در ادامه برای هر یک از روش‌های بیان شده، توضیحاتی به اختصار گفته می‌شود.

مقایسه با داده‌های مستقل: این روش شامل مقایسه نتایج توموگرافی با داده‌های مستقل از منابع دیگر مانند داده‌های ماهواره‌ای، رادارهای زمینی، و ایستگاه‌های یونوسوند است. این مقایسه‌ها می‌توانند نشان دهند که آیا نتایج توموگرافی با داده‌های واقعی همخوانی دارند یا خیر. اگر نتایج توموگرافی با داده‌های ماهواره‌ای همخوانی داشته باشند، می‌توان نتیجه گرفت که نتایج به دست آمده دقیق و معتبر هستند [۳۵]. برای مثال یونوسوند می‌تواند پروفایل عمودی چگالی الکترونی را در مکان‌های مشخص تعیین کنند. برای انجام مقایسه رایج است که یک نمودار پراکنده از مقادیر چگالی الکترون برگرفته از توموگرافی برحسب اندازه‌گیری‌های یونوسوند رسم می‌شود. این داده‌ها باید با یکدیگر مرتبط باشند. برای مثال حباب‌های پلازما و سایر

کرد. بنابراین، امکان درون‌یابی $B_0, B_1, H_0, \frac{\partial H}{\partial h}, N_m, h_m$ برای یک شبکه منظم خاص در UT ایجاد شد و چگالی الکترون در هر ارتفاعی برای محاسبه چگالی پس‌زمینه برای توموگرافی در شبکه وکسل‌های منطقه برزیل بدست آمد.

پس از محاسبه چگالی پس‌زمینه یون‌سپهر، توموگرافی منطقه‌ای با استفاده از گیرنده‌های فرکانس دوگانه زمینی از ایستگاه‌های GNSS به طور مداوم در سراسر آمریکای جنوبی کار می‌کنند، انجام می‌شود. در این مقاله از داده‌های GNSS ایستگاه‌های RBMC، IGS، CALIBRA، LISN و LAMSAC برای بدست آوردن تصاویر توموگرافیک استفاده شده است. شکل ۱ مکان ایستگاه‌های GNSS را در روز ۳ از سال ۲۰۱۴ نشان می‌دهد.



شکل ۲: ایستگاه‌های سیستم ماهواره ای ناوبری جهانی (GNSS) در سراسر آمریکای جنوبی در روز سال (DOY) ۳ از ۲۰۱۴. علائم رنگی مکان ایستگاه‌ها را برای شبکه‌های مختلف نشان می‌دهد، جایی که خط چین استوای مغناطیسی را نشان می‌دهد [۳۵].

Fig. 2: Global navigation satellite system (GNSS) stations operating throughout South America in Day of Year (DOY) 3 of 2014. The colored marks indicate the location of the stations for the different networks, where the dashed line shows the magnetic equator [35].

در این مقاله توموگرافی یون‌سپهر با استفاده از وضوح زمانی ۶ دقیقه و تفکیک افقی ۱ درجه در طول جغرافیایی و ۱ درجه در عرض جغرافیایی به منظور پوشش طول‌های جغرافیایی از ۹۱.۵ W تا ۱۸ W و عرض‌های جغرافیایی از ۵۱.۵ جنوبی تا ۲۲ شمالی انجام شده است. وضوح عمودی شبکه سه‌بعدی با اندازه‌های گام متمایز، از ۵۰ کیلومتر تا ۵۰۰ کیلومتر، به منظور کاهش تعداد سلول‌ها و بهبود فرآیند زمانی ساخته شده است. هر سلول از شبکه سه‌بعدی با چگالی الکترونی اولیه داده شده توسط پروفایل چگالی پس‌زمینه پر شده است. سپس، یک روش کمی متفاوت از الگوریتم MART معمولی به منظور به‌روزرسانی مکرر چگالی الکترون اولیه هر سلول Z با استفاده از اندازه‌گیری‌های TEC استفاده گردیده است. سیستم توموگرافی عمومی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد [۳۶]:

توموگرافی حباب پلاسما، بر اساس داده‌های GNSS و اختفای رادیویی بیان شده است. این تکنیک برای نقشه‌برداری از توزیع حباب‌های پلاسما یون‌سپهر در یکی از چالش‌برانگیزترین شرایط منطقه استوایی یعنی برزیل انجام شده است.

روش توموگرافی یونسفری

فرمول ریاضی روش بازسازی توموگرافی در دو مرحله توسعه می‌یابد. روش اول از مدل اقلیمی ارائه شده توسط PROI و همکاران برای ساختن شکل پروفایل‌های پس‌زمینه یون‌سپهر بر اساس مشاهدات اختفای رادیویی جهانی (RO) استفاده می‌کند [۳۴]. در روش دوم اصلاح جزئی تکنیک بازسازی جبری ضریبی (MART) برای به‌روز رسانی تکراری میدان چگالی الکترون پس‌زمینه با استفاده از مشاهدات منطقه‌ای TEC انجام می‌شود.

پروفایل چگالی پس‌زمینه یون‌سپهر بر اساس یک مدل اقلیمی، با استفاده از پروفایل‌های چگالی منتج شده از RO، که از سامانه رصد صور فلکی برای هواشناسی، یون‌سپهر و اقلیم (COSMIC)/ماموریت ماهواره‌ای Formosa 3 (COSMIC/FORMOSAT-3) استخراج شده، توسعه داده شده است. در این مقاله شش پارامتر برای توصیف الگوهای اقلیمی پروفایل‌های چگالی یون‌سپهر برآورد شده است: چگالی الکترون در اوج (N_m)، ارتفاع قله (h_m)، ارتفاع مقیاس سمت بالا نسبت به ارتفاع قله (H_0)، مقیاس گرادیان ارتفاع در سمت بالا ($\partial H / \partial h$) ضخامت قسمت پایین (B_0) و مقیاس فاکتور قسمت پایین (B_1). پارامترهای اوج N_m و h_m به طور مستقیم از پروفایل‌های یون‌سپهر پردازش شده توسط شرکت دانشگاه برای تحقیقات جوی (UCAR) بازیابی شده‌اند. از سوی دیگر، برازش حداقل مربعات برای تخمین سمت بالا و پایین انجام شده است. معادله زیر برای قسمت بالا:

$$n_e^t = N_m e^{-0.5(1-z_t - e^{-z_t})} \quad (10)$$

که $z_t = (h - h_m) / (\frac{\partial H}{\partial h} (h - h_m) + H_0)$ و معادله بعد برای قسمت پایین:

$$n_e^b = \frac{N_m e^{(-z_b) B_1}}{\cosh(z_b)} \quad (11)$$

که $z_b = (h_m - h) / B_0$ بدست می‌آید. N_e نشان دهنده چگالی الکترون مشاهده شده در ارتفاع h برای سمت بالا (n_e^t) و سمت پایین (n_e^b) است.

در این مقاله جهت بدست آوردن مقادیر اولیه چگالی الکترونی در مربوط به هر وکسل برای انجام توموگرافی، یک پنجره سی روزه با استفاده از اندازه‌گیری‌های RO تعریف گردید. درون‌یابی دوخطی فضایی برای پارامترهای $(h_m, N_m, H_0, \frac{\partial H}{\partial h}, B_0, B_1)$ بر اساس زمان محلی (LT) و عرض جغرافیایی مغناطیسی انجام شد. نقشه‌های جهانی حاصل به چارچوب مرجع ثابت زمین آورده شدند و نقشه‌های LT همراه با خطوط ژئومغناطیسی نیز پیش‌بینی شدند. در نتیجه این کار، می‌توان شبکه‌های دو بعدی با وضوح فضایی ۲ درجه در عرض جغرافیایی و ۴ درجه در طول جغرافیایی و وضوح زمانی ۶ دقیقه در زمان جهانی تولید

استفاده از هر دو اندازه‌گیری TEC در امتداد سیگنال و VTEC، امکان بازسازی نقشه توموگرافی با تعداد بیشتری از وکسل‌ها را ایجاد می‌کند، که این موضوع یک مزیت مهم برای نقشه‌برداری از ساختارهای حباب پلاسما است.

در ادامه به تأیید روش توموگرافی به عنوان یک ابزار برای نقشه‌برداری توزیع چگالی افقی حباب‌های پلاسما می‌پردازیم. این امکان به‌وسیله مقایسه نقشه‌های توموگرافی VTEC بازسازی‌شده با تصاویر گرفته‌شده از دستگاه‌های اپتیکی انجام می‌شود. در ابتدا امکان تهیه نقشه‌های توزیع افقی حباب‌های پلاسمایی به وسیله چندین مثال مقایسه‌ای بین نقشه حباب‌های پلاسما بازسازی‌شده با VTEC و تصاویر ایرگلو (Airglow) نشان می‌دهیم. سپس در قسمت بعد اعتبار روش پیشنهاد شده را به وسیله تحلیل‌های سیستماتیک در طی چندین روز مشخص خواهیم کرد. برای هر دو آزمایش، سه دستگاه اپتیکی با پوشش کل آسمان با لنز ۱۸۰ درجه بازوی گرد استفاده شده است تا خط قرمز اکسیژن اتمی در ۶۳۰ نانومتر در آشکارسازی کند. دو تا از این دستگاه‌ها در منطقه استوایی، در São João do Cariri (۷.۴ درجه جنوبی، ۳۶.۵ درجه غربی، عرض جغرافیایی ۱۱.۱۱ درجه جنوبی) و Boa Vista (۲.۸ درجه شمالی، ۶۰.۷ درجه غربی، عرض جغرافیایی ۱۵.۱۴ درجه شمالی) قرار دارند و دیگری در قله جنوبی ناهمگنی یونیزاسیون استوایی (EIA) در Cachoeira Paulista (۲۲.۷ درجه جنوبی، ۴۵.۰ درجه غربی، عرض جغرافیایی ۱۹.۷ درجه جنوبی) قرار دارد. تصاویر OI ۶۳۰ نانومتر به صورت رایگان توسط INPE ارائه شده‌اند و دامنه عرضی و طولی به اندازه 1280×1280 کیلومتر را با وضوح پیکسلی ۲.۵ کیلومتر برای ارتفاع ۲۵۰ کیلومتر را پوشش می‌دهند. تصاویر ایرگلو با وضوح زمانی ۶ دقیقه ضبط شده‌اند، که همانند نقشه‌های VTEC است.

امکان ایجاد نقشه‌های حباب پلاسما با روش توموگرافی

در ادامه تصاویر رنگی نشان دهنده نقشه‌های توموگرافی VTEC و نقشه‌های سیاه و سفید تصویر گرفته شده از ایرگلو OI ۶۳۰ نانومتر است. شکل ۳ نمونه‌ای از نقشه VTEC بازیابی‌شده از الگوریتم توموگرافی (پنل چپ) و تصاویر مرتبط OI ۶۳۰ نانومتر (پنل راست) در روز از سال ۲۰۱۴ از ۳ در و ساعت ۱.۹ UT (زمان جهانی) نشان می‌دهد. دو کاهش در VTEC در امتداد خطوط میدان مغناطیسی در اطراف ساعت‌های ۲۱ و ۲۴ به وقت محلی مشاهده می‌شود که با اثرات حباب پلاسما در تصاویر ایرگلو هم‌زمان هستند. در چنین لحظاتی، پلاسما که به ارتفاع‌های بالاتر انتقال یافته است (نتیجه غروب آفتاب و دریافت $E \times B$)، نرخ رشد ناپایداری‌های پلاسما انتشاری را افزایش داده است. بنابراین، ناهمگنی‌های حباب پلاسما بزرگ مقیاس که به ارتفاع‌های بالاتر گسترش می‌یابند، کاهش‌های مشاهده‌شده در سطح VTEC را ایجاد می‌کنند. همانطور که انتظار می‌رود، ما کاهش‌های VTEC را هم‌زمان با کاهش شدت تصاویر OI

$$y = Ax + \varepsilon \quad (12)$$

که در آن y از اندازه‌گیری‌های TEC تشکیل شده است، x توسط بردار ناشناخته چگالی الکترون تشکیل شده است، A ماتریس طراحی است که توسط عناصر طول مسیر سیگنال‌های GNSS در داخل مرزهای وکسل تشکیل شده است، و ε مخفف نویزهای اندازه‌گیری و خطای گسسته‌سازی است.

این مسئله به طور کلی به دلیل ابعاد یون‌سپهر شامل پارامترهای زیادی می‌شود. علاوه بر این، تعداد محدود زوایای دید GNSS باعث می‌شود که وارون‌سازی توموگرافی یک مسئله با شرایط مرزی و اولیه مناسب نباشد. بنابراین، با جمع‌بندی ابعاد بزرگ ماتریس‌ها و نویز اندازه‌گیری که بر این سیستم تأثیر می‌گذارد، معمولاً از یک روش حل تکراری برای انجام بدست آوردن جواب‌های صحیح استفاده می‌شود. در این راستا، الگوریتم MART با استفاده از معادلات زیر به کار گرفته می‌شود [۳۷]:

$$x_j^{k+1} = x_j^k \left(\frac{y_i}{A_{ij} x_j^k} \right)^{w_{A_{max}}} \quad (13)$$

$$x_j^{k+2} = x_j^{k+1} \left(\frac{y_i^v}{A_{ij}^v x_j^{k+1}} \right)^{w_{A_{max}^v}} \quad (14)$$

در این معادله x_j^{k+1} عضو j از بردار چگالی الکترون x در تکرار $k+1$ است A_{ij} ، طول مسیر سیگنال i در داخل مرزهایی که سلول‌ها را قطع می‌کند نشان می‌دهد، A_{max} بزرگترین طول مسیر سیگنال مربوطه است، حاصل ضرب داخلی A_i و x_k TEC پس‌زمینه را تولید می‌کند، w یک پارامتر وزنی است که همگرایی الگوریتم را کنترل می‌کند، و y_i و y_i^v به ترتیب TEC و VTEC مبتنی بر GNSS مشاهده شده هستند، که در آن k با گام ۲ به دلیل به‌روزرسانی VTEC تغییر می‌کند. فرآیند تکرار از طریق تمام مسیرهای پرتو ۷۰ بار با پارامتر وزنی $w = 0.2$ انجام می‌شود، هر دو پارامتر به صورت تجربی به دست آمده‌اند. تفاوت جزئی با MART متعارف در این روش با گنجاندن مشاهدات TEC عمودی علاوه بر TEC در راستای عبور سیگنال تعریف شده است. در این جهت، به‌روزرسانی‌ها با استفاده از A_{ij}^v و A_{max}^v به عنوان فاصله عمودی طول مسیرهای A_{ij} و A_{max} به ترتیب انجام می‌شود.

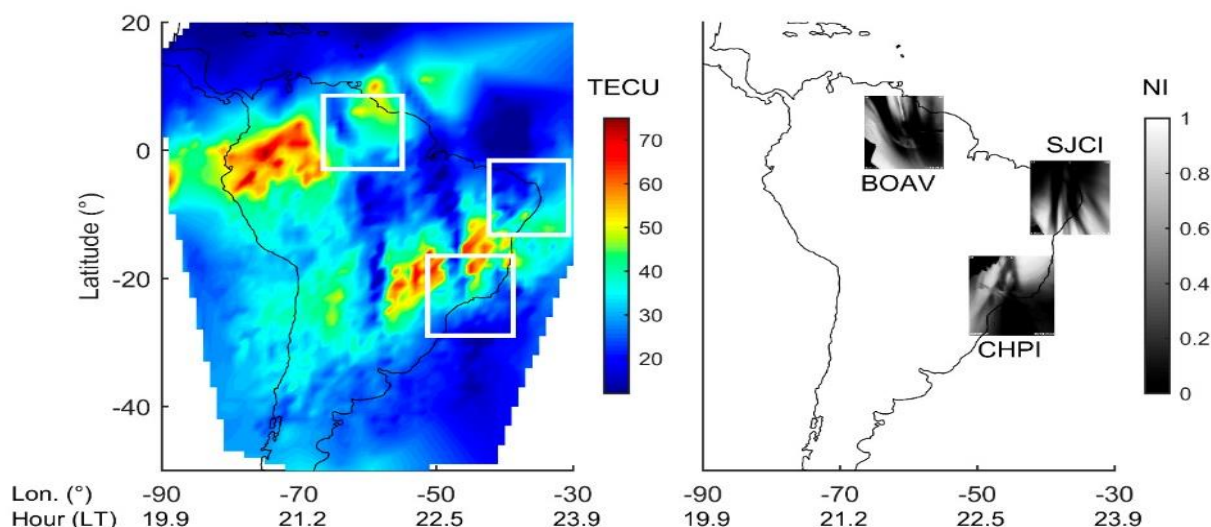
مقادیر از TEC معادله (۱۲) با استفاده از فرآیند کالیبراسیون دقیق توسعه یافته توسط Prol و همکاران [۳۴] به دست می‌آید، و VTEC از معادله (۱۳) با استفاده از رابطه $VTEC = \frac{TEC}{M(z)}$ که در قسمت قبل در مورد آن صحبت شد، استخراج می‌شود. در حالی که به‌روزرسانی‌های TEC مربوط به مجموعه‌ای از سلول‌ها در جهت مایل سیگنال GNSS است، برآوردهای VTEC مربوط به ستون عمودی وکسل‌ها در بالا و پایین نقطه نفوذ یون‌سپهر مربوط به ارتفاع پوسته ۴۵۰ کیلومتری است. این استراتژی توصیف ویژگی‌های افقی یون‌سپهر را در مناطقی که فاقد TEC مایل هستند، بهبود می‌بخشد، بدون اینکه به طور قابل توجهی بر برآورد TEC در مناطقی با تعداد زیادی مشاهدات مایل تأثیر بگذارد. بنابراین،

کاهش‌های VTEC نه تنها با موقعیت و ابعاد مشابه به مشاهدات ایرگلو مشاهده می‌شوند، بلکه همچنین جهت حباب پلاسما را دنبال می‌کنند. به عنوان مثال، شکل ۵ نشان می‌دهد که زاویه کاهش VTEC که در CHPI در روز ۳ از ۲۰۱۴ نقشه‌برداری شده است، با زاویه شدت‌های تاریک ایرگلو تغییر می‌کند، که همچنین برای سایر ابزارها و روزها نیز اتفاق افتاده است. در تمام موارد با تشخیص حباب‌های پلاسما، یک ناهمگنی طولی نیز می‌تواند بین کاهش VTEC و نشانه‌های تاریک هواگلو مشاهده شود. ناهمگنی مشابهی در [۳۸] مشاهده شده است که ممکن است نشان‌دهنده این باشد که حباب به سمت غرب با افزایش ارتفاع کج شده است [۳۹].

ارزشیابی سیستماتیک

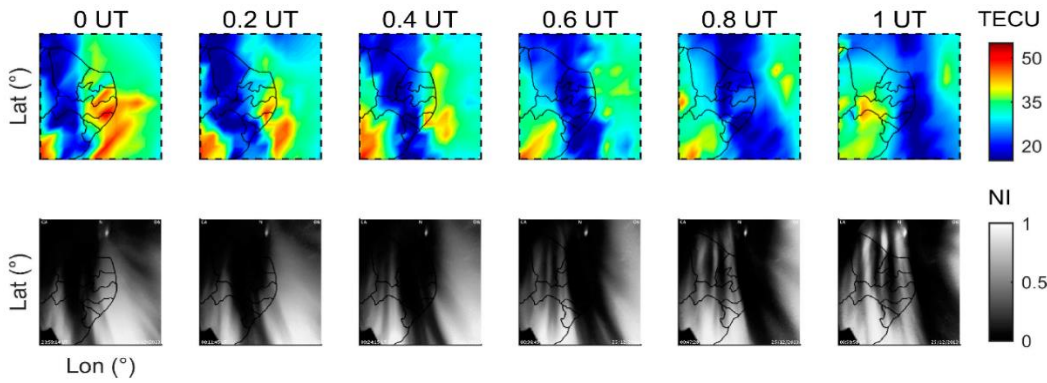
در این مقاله برای ارائه یک نمای کلی از کارایی بازسازی توموگرافی برای نقشه‌برداری از حباب‌های پلاسما، مقایسه‌های تجربی شکل‌های ۳-۵ در یک تحلیل سیستماتیک بر روی چندین رویداد دیگر انجام شده است. بیست و سه روز در طول خورشید تابستانی دوره حداکثر خورشیدی سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ انتخاب شدند، زمانهایی که با استفاده از ابزارهای نوری شواهد واضحی از وجود حباب‌های پلاسما در منطقه برزیل اثبات شده بود، مشخص گردید. روزهای انتخاب شده شامل روزهای ۳۵۸-۳۶۳ سال ۲۰۱۳ و همچنین روزهای ۳-۶، ۸، ۹، ۱۱ و ۲۱-۳۰ سال ۲۰۱۴ بودند. نتایج نشان دادند، امکان تحلیل تکامل زمانی کاهش‌های VTEC همسو با اثرات حباب‌های پلاسما در تصاویر ایرگلو برای بسیاری از رویدادها وجود دارد.

۶۳۰ نانومتر که توسط علائم تاریک در پنل سمت راست شکل ۳ ایجاد شده‌اند را مشاهده کرده‌ایم. کاهش‌های پلاسمایی در نقشه‌های VTEC در Cachoeira Paulista (CHPI) و Boa Vista (BOAV) نسبت به São João do Cariri (SJCI) واضح‌تر بودند. در واقع، SJCI در لبه منطقه بازسازی قرار دارد، جایی که پوشش هندسی سیگنال GNSS برای انجام توموگرافی جوی بسیار ضعیف است. همچنین مهم است به این نکته اشاره کنیم که تعداد کمی مشاهدات در منطقه شمال شرقی، بالاتر از ۱۰ درجه شمالی، و در سمت شرقی ۵۰ درجه غربی استفاده شده‌اند. در واقع، تعدادی از سیگنال‌های GNSS از یون‌سپهر بالا عبور می‌کنند، اما تعداد کمی مشاهدات در نزدیکی ارتفاع قله وجود دارد. نمایش VTEC این بخش به طور اصولی به مدل پس‌زمینه مرتبط است و همانطور که انتظار می‌رود، برخی از آثار در تصاویر بازسازی شده به دلیل تغییرات بالای TEC در انتقال بین پس‌زمینه و بازسازی منطقه‌ای مشاهده می‌شوند. اگرچه حباب پلاسما در SJCI در روز ۳ از سال ۲۰۱۴ به اندازه‌ای کافی واضح نبود، اما کاهش مقدار پلاسما به وضوح در نقشه‌های VTEC مرتبط با روز ۳۵۹ از ۲۰۱۳ در شکل ۴ مشاهده شوند. می‌توانید کاهش VTEC را با نشانه‌های تاریک تصاویر ایرگلو به دلیل ابعاد طولی بزرگ‌تر حباب پلاسمای روز ۳ از ۲۰۱۴ مشاهده کنید. بنابراین، حتی با مشکلات پوشش در بازسازی توموگرافی در SJCI، امکان تشخیص حباب‌های پلاسما وجود دارد در صورتی که ابعاد ساختار یون‌سپهری به اندازه کافی بزرگ باشند تا قابل ثبت شدن باشند.

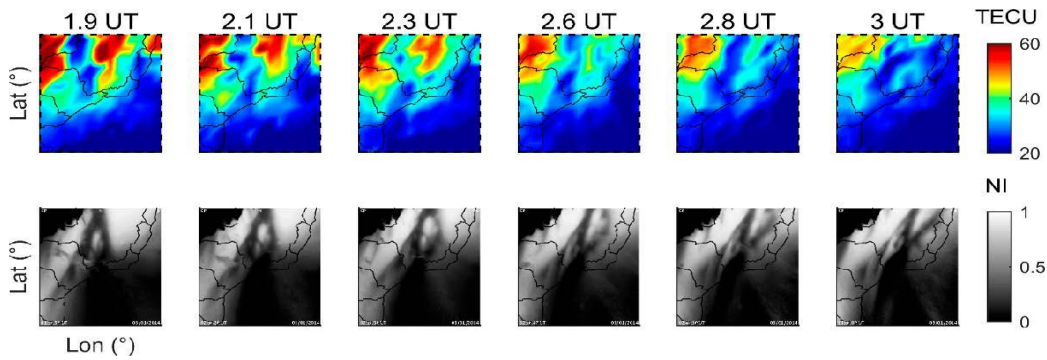


شکل ۳: مثال مقایسه‌ای بین VTEC (چپ) و مشاهدات ایرگلو (راست). مربع‌های سفید رنگ در نقشه VTEC مکان دقیق تصاویر OI 630 nm مکان‌یابی شده را نشان می‌دهد و مقیاس خاکستری در واحد شدت نرمالیزه است [۳۵].

Fig. 3: Comparative example between the Vertical Total Electron Content (VTEC) depletions and the dark brands of the airglow observations. The white square shows the exact location of the Geo-referenced OI 630 nm images and the grayscale is in units of normalized intensity (NI) [35].



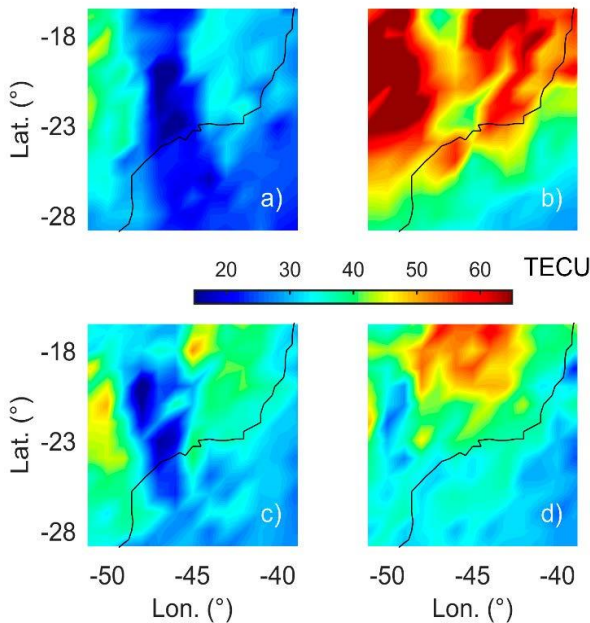
شکل ۴. مثالی از انتشار حباب پلاسما که در SICI منتشر می‌شود که توسط بازسازی های VTEC (ردیف بالا) و مشاهدات ابزار اپتیکی ایرگلو (ردیف پایین) [۳۵].
 Fig. 3: Example of a plasma bubble propagating through São João do Cariri (SICI) in DOY 359 of 2013, detected by the VTEC reconstructions and the optical instruments [35].



شکل ۵: مثالی از انتشار حباب پلاسما در CHPI در روز ۳ از سال ۲۰۱۴ گرفته شده به وسیله VTEC (ردیف بالا) و ابزار اپتیکی ایرگلو (ردیف پایین) [۳۵].
 Fig. 4: Example of a plasma bubble propagating through Cachoeira Paulista (CHPI) in DOY 3 of 2014 detected by the VTEC reconstructions and the optical instruments [35].

عنوان یک حباب پلاسما تفسیر شود. بنابراین، با نگاه به کل منطقه آمریکای جنوبی، می‌توان عدم وجود حباب‌های پلاسما را تأیید می‌کنیم.

طبقه‌بندی تصاویر ۶ تا ۸ در ادامه آمده است. (a) تصاویر با حباب‌های پلاسما که به طور متقابل توسط روش توموگرافی و ابزارهای نوری شناسایی شده‌اند، در روز سال ۲۰۱۴ از ۲۲ UT در ۱.۵؛ (b) حباب‌های پلاسما که توسط تصاویر ایرگلو شناسایی شده‌اند، اما در بازسازی‌های VTEC شناسایی نشده‌اند؛ در روز سال ۲۴ از ۲۰۱۴ از ۰.۸ (c) تصاویر حباب‌های پلاسما که در VTEC شناسایی شده‌اند اما در تصاویر ایرگلو شناسایی نشده‌اند؛ در روز سال ۳۸۵ از ۲۰۱۳ UT در ۰.۵ (d) حباب‌های پلاسما که توسط هیچ کدام از ابزارها شناسایی نشده‌اند، در روز سال ۳۶۰ از ۲۰۱۳ در ۰.۰ UT. شکل‌های ۶-۸ مثال‌هایی از این طبقه‌بندی را نشان می‌دهد.



شکل ۶: تصاویر ۴ مورد a, b, c, و d با استفاده از روش توموگرافی بازسازی VTEC در CHPL [۳۵].

یک مطالعه دقیق از تصاویر VTEC و ایرگلو انجام شد. به عنوان مثال با گرفتن مورد (a)، می‌توانیم به وضوح یک کاهش پلاسما در سطح VTEC در شکل a ۶ و یک نوار تاریک همزمان در شکل a ۷ را ببینیم. هنگامی که به کل سناریوی آمریکای جنوبی در شکل ۸ نگاه می‌کنیم، تأیید می‌کنیم که کاهش VTEC مربوطه به یک بی‌نظمی بزرگ مقیاس همسو با خط میدان ژئومغناطیسی اشاره دارد. در واقع، شکل ۸ برای تحلیل دقیقتر و تصمیم‌گیری درست ترسیم شده است، زیرا معمولاً بی‌نظمی‌های کوچک مقیاس هم می‌توانند کاهش‌های VTEC را نشان دهند که اگر در مقیاس بزرگتر مشاهده شوند، مشخص خواهد شد که ساختار حباب پلاسما ندارند. به عنوان مثال، مورد (b) یک کاهش کوچک VTEC را در شکل ۶ نشان می‌دهد که می‌تواند به اشتباه به

Fig. 6: Four cases a, b, c, and using the VTEC reconstruction in CHPL [35].

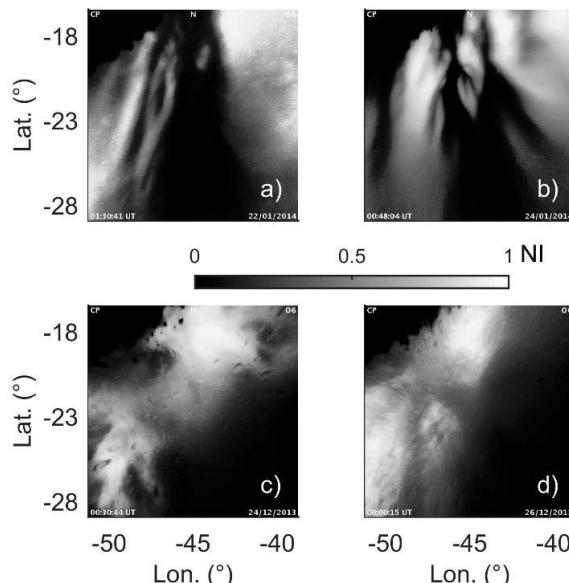
۱۱۷ تصویر ایرگلو حباب‌های پلاسما را شناسایی کرده‌اند که در نقشه‌های VTEC دیده نشده‌اند. این یکی از مهم‌ترین ویژگی‌ها است، زیرا مستقیماً خطاهای به‌دست‌آمده با روش توموگرافی را در مقایسه با تصاویر شب‌تاب نشان می‌دهد. از سوی دیگر، خط سوم و ستون اول نشان می‌دهد که ۲۱ حباب پلاسما توسط روش توموگرافی شناسایی شده‌اند، اما توسط ابزارهای نوری ثبت نشده‌اند. این نیز یک نکته مهم است، زیرا نشان می‌دهد که روش توموگرافی در برخی موارد دقیق‌تر است که احتمالاً به دلیل محدودیت‌های هواشناسی تابش‌های ایرگلو درست است.

تحلیل کلی نتایج ارائه شده در جداول ۱ تا ۳ نشان می‌دهد که بیشترین تعداد حباب‌های پلاسما که توسط ابزارهای نوری شناسایی شده‌اند، در CHPI به‌دست‌آمده است، زیرا داده‌های ایرگلو بیشتری برای این ایستگاه وجود دارد. نرخ موفقیت روش توموگرافی با گرفتن نسبت حباب‌های پلاسما که به‌طور مشترک شناسایی شده‌اند (خط اول و ستون اول) از مجموع تعداد حباب‌های پلاسما که فقط توسط تصاویر اپتیکی شناسایی شده‌اند (تمام ستون‌های خط اول) تعریف شده است. در این زمینه، نرخ موفقیت روش توموگرافی برای شناسایی حباب‌های پلاسما به ترتیب ۵۴.۲٪، ۳۱.۵٪ و ۲۵.۷٪ برای BOAV، SJCI و CHPI بود. در واقع، پایین‌ترین نرخ موفقیت در CHPI نشان می‌دهد که روش توموگرافی در عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر بهتر عمل می‌کند، که البته همین انتظار هم می‌رود زیرا ابعاد حباب‌های پلاسما در چنین مناطقی بزرگ‌تر است. منطقه CHPI ۵۱ تصویر با حباب‌های پلاسما در نقشه‌های VTEC ارائه می‌دهد که توسط تصاویر ایرگلو شناسایی نشده بودند. این موضوع عمدتاً به دلیل شرایط هواشناسی در CHPI است، چراکه در این موقعیت ابرهای بارشی تصویربرداری از حباب‌های پلاسما را مشکل می‌کنند و حتی آلودگی ناشی از روشنایی نور ماه نیز می‌تواند در این مورد موثر باشد.

مقایسه تکنیک توموگرافی به‌وسیله GNSS با به سایر روش‌ها

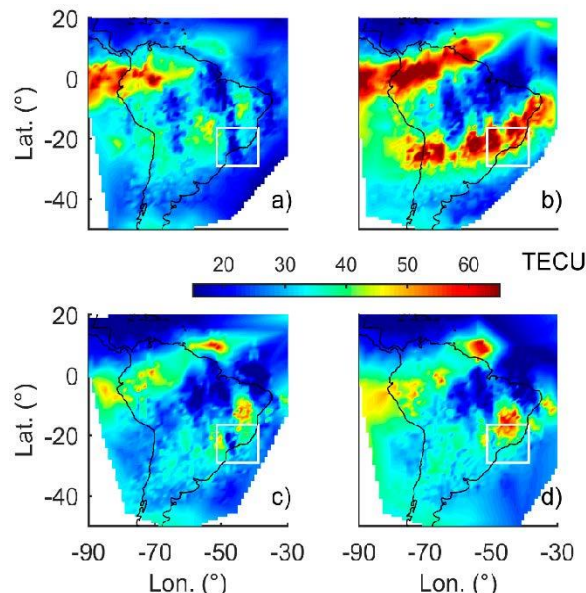
علاوه بر تکنیک بررسی شده در این مقاله بر توموگرافی یونسفر، روش‌های دیگری نظیر استفاده از روش‌ها تصویربرداری تمام آسمان، رادارهای پراکندگی غیرهمدوس، توموگرافی مبتنی بر اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای نظیر اختفای رادیویی (RO) نیز وجود دارند که منجر به تهیه نقشه‌های توموگرافی از لایه یون‌سپهر می‌شوند.

توموگرافی سیستم ناوبری ماهواره‌ای جهانی (GNSS) از سیگنال‌های چندین ماهواره GNSS برای بازسازی توزیع چگالی الکترون در یون‌سپهر استفاده می‌کند. روش توموگرافی به وسیله سیگنال‌های GNSS که در این مقاله به آن پرداخته شده است به دلیل ارائه وضوح مکانی و زمانی بالا، امکان تصویربرداری سه‌بعدی دقیق از حباب‌های پلاسما را فراهم می‌کند. این روش بسیار کم هزینه است و همچنین پوشش جغرافیایی وسیعی را دارد، که البته این موضوع به دلیل وجود زیرساخت‌های



شکل ۷: تصاویر ۴ مورد، a, b, c, و d با استفاده از مشاهدات ایرگلو در CHPL [۳۵].

Fig. 6: Four cases a, b, c, and d using the airglow observations in CHPL [35].



شکل ۸: چهار مورد، a, b, c, و d با استفاده از بازسازی‌های VTEC در کل منطقه آمریکای جنوبی، مربع سفید پوشش تصاویر CHPI را نشان می‌دهد [۳۵].

Fig. 8: Four cases a, b, c, and d using the VTEC reconstructions over all the South America region. The white square shows the coverage of the CHPI images [35].

جدول ۱ اعداد به‌دست‌آمده در Boa Vista را در طول ۲۳ رو مشاهده نشان می‌دهد، جایی که خط اول و ستون اول جدول به تعداد تصاویری اشاره دارد که حباب‌های پلاسما به‌طور مشترک توسط مشاهدات VTEC و ایرگلو شناسایی شده‌اند. به عنوان مثال، عدد ۱۸۱ نشان می‌دهد که ۱۸۱ حباب پلاسما به‌طور مشترک توسط ابزارها دیده شده‌اند که ۲۹٪ از تصاویر استفاده‌شده در تحلیل در Boa Vista را نشان می‌دهد. آخرین موقعیت جدول واقع در خط سوم و ستون سوم تعداد تصاویری را نشان می‌دهد که در هیچ کدام از روش‌ها حباب پلاسما را شناسایی نمی‌کنند. همچنین اطلاعات مربوط به خط اول و ستون سوم نشان می‌دهد که

یون‌سپهر را فراهم می‌کند. با این حال، وابسته به شرایط آب و هوایی است و فقط در مناطقی با آسمان صاف مؤثر است. پوشش ابری و سایر شرایط نامساعد جوی می‌تواند به طور قابل توجهی کیفیت مشاهدات را تحت تأثیر قرار دهد.

رادار پراکندگی غیرهمدوس (ISR) پراکندگی برگشتی از الکترون‌های یون‌سپهری را برای تعیین پروفایل‌های چگالی الکترون اندازه‌گیری می‌کند. این روش اندازه‌گیری‌های بسیار دقیقی از چگالی الکترون و سایر پارامترهای یون‌سپهری ارائه می‌دهد و برای مطالعات دقیق فرآیندها و دینامیک‌های یون‌سپهری ایده‌آل است. ISR پروفایل‌های عمودی دقیقی ارائه می‌دهد، اما ساخت و نگهداری آن هزینه‌بر است و پوشش آن به مکان‌های تأسیسات ISR محدود می‌شود.

ترکیب چندین روش، مانند توموگرافی GNSS با RO یا تصویربرداری تمام آسمان، می‌تواند دقت و وضوح تشخیص حباب‌های پلاسما را افزایش دهد. این رویکرد از نقاط قوت هر روش برای ارائه درک جامع‌تری از یون‌سپهر بهره می‌برد. در حالی که ترکیب داده‌ها از منابع مختلف می‌تواند دقت کلی و قابلیت اطمینان را بهبود بخشد، نیاز به الگوریتم‌های پیچیده برای یکپارچه‌سازی داده‌ها دارد و می‌تواند منابع زیادی را مصرف کند. ادغام منابع داده مختلف نمای جامع‌تری از پدیده‌های یون‌سپهری ارائه می‌دهد و آن را به یک رویکرد قدرتمند برای مطالعات جامع یون‌سپهر تبدیل می‌کند.

موجود GNSS است. با این حال، دقت توموگرافی مبتنی بر GNSS می‌تواند تحت تأثیر تلاطم‌های یون‌سپهری و هندسه شبکه گیرنده‌های GNSS قرار گیرد. در صورت متراکم بودن شبکه گیرنده‌ها این روش نتایج بهتری ارائه می‌دهد، اما اثربخشی این روش در مناطقی با پوشش کم گیرنده‌ها محدود است.

از سوی دیگر تکنیک اختفای رادیویی که نیز مبتنی بر تکنولوژی GNSS است، شامل اندازه‌گیری تغییرات در سیگنال‌های GNSS هنگام عبور از یون‌سپهر است و پروفایل‌های چگالی الکترونی این لایه را با وضوح عمودی بالا فراهم می‌کند. این تکنیک برای پروفایل‌سازی ساختار عمودی یون‌سپهر عالی است و پوشش جهانی ایجاد می‌کند که حتی امکان سنجش لایه یونسفر در مناطق دورافتاده و اقیانوسی که در آنجا وسایل اندازه‌گیری‌های زمینی در دسترس نیست، ایجاد می‌شود. با این حال، RO دارای وضوح افقی محدود است و اثربخشی آن به مدارهای ماهواره‌های RO بستگی دارد که می‌تواند کاربرد آن را برای نقشه‌برداری افقی حباب‌های پلاسما محدود کند.

تصویربرداری تمام آسمان از دوربین‌های زمینی مجهز به فیلترها برای ثبت تابش‌های ایرگلو از یون‌سپهر استفاده می‌کند و نمای بصری مستقیم از حباب‌های پلاسما و سایر پدیده‌های یون‌سپهری را فراهم می‌کند. در قسمت پایانی این مقاله این روش با روش توموگرافی رادیویی برای نقشه برداری از حباب‌های پلاسما مورد بررسی قرار گرفت. این روش وضوح زمانی بالایی دارد و امکان مشاهده تغییرات سریع در

جدول ۱: تعداد حباب‌های پلاسمایی که به وسیله بازسازی توموگرافی و ابزارهای اپتیکی گرفته شده در ناحیه Boa Vista.

Table 1: The number of plasma bubbles captured by tomography reconstruction and optical instruments in the Boa Vista region.

		Tomoraphy		
		With Bubbles	Uncertain	Without Bubbles
Airglow	With Bubbles	181 (29%)	36 (5.9%)	117 (19%)
	Uncertain	6 (0.9%)	34 (5.6%)	80 (13%)
	Without Bubbles	21 (3.4%)	0 (0%)	135(22%)

جدول ۲: تعداد حباب‌های پلاسمایی که به وسیله بازسازی توموگرافی و ابزارهای اپتیکی گرفته شده در ناحیه São João do Cariri.

Table 2: The number of plasma bubbles captured by tomography reconstruction and optical instruments in the São João do Cariri region.

		Tomoraphy		
		With Bubbles	Uncertain	Without Bubbles
Airglow	With Bubbles	133 (18%)	102 (14%)	187 (26%)
	Uncertain	5 (0.7%)	28 (3.9%)	29 (4.1%)
	Without Bubbles	21 (2.9%)	0 (0%)	204 (29%)

جدول ۳: تعداد حباب‌های پلاسمایی که به وسیله بازسازی توموگرافی و ابزارهای اپتیکی گرفته شده در ناحیه Cachoeira Paulista.

Table 3: The number of plasma bubbles captured by tomography reconstruction and optical instruments in the Cachoeira Paulista region.

		Tomoraphy		
		With Bubbles	Uncertain	Without Bubbles
Airglow	With Bubbles	108 (15%)	71 (9.6%)	242 (33%)
	Uncertain	0 (0%)	23 (3.1%)	33 (4.5%)
	Without Bubbles	51 (6.9%)	32 (4.3%)	179 (24%)

خلاصه و نتیجه‌گیری

این مقاله به طور خلاصه تکنیک‌های مبتنی بر GNSS را برای سنجش و توموگرافی یون‌سپهر بیان می‌کند. چگونگی اندازه‌گیری محتوای کل الکترونی (TEC) در یون‌سپهر از طریق سیستم‌های ناوبری ماهواره‌ای جهانی (GNSS) به تفصیل توضیح داده شده‌است. نحوه تأثیرپذیری سیگنال‌های GNSS نسبت به تغییرات TEC هنگام عبور از یون‌سپهر مطالعه گردید. روش موجود برای چگونگی بدست آوردن تغییر چگالی الکترونی لایه یونسفر مبتنی بر پارامتر TEC با استفاده از تحلیل تفاضل فازی ایجاد شده در سیگنال مخابراتی سامانه ماهواره‌ای راهبری جهانی GNSS در هنگام عبور از لایه‌های مختلف یونسفر مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. به این منظور سیگنال‌ها مخابراتی از ماهواره‌های مدار پایین و مدارهای بالا مطالعه شده‌اند و روش بدست آوردن TEC از تفاضل فازی برا هر یک توضیح داده شد. سپس به مطالعه روش‌ها و الگوریتم‌های موجود برای تبدیل اطلاعات TEC به تصاویر توموگرافیک پرداختیم و با استفاده از مثالی ساده روش پیاده‌سازی این الگوریتم‌ها بیان شد. نشان داده شد که روش تفاضل فازی در LORT نتایج دقیق‌تر با حساسیت بالاتری را نسبت به روش تک فازی ارائه می‌دهد. مدل‌سازی به کمک رایانه نشان می‌دهد که ساختارهای یون‌سپهری شبه ثابت را می‌توان با دقت معقولی بازسازی کرد، اگرچه HORT وضوح کمتری نسبت به LORT دارد.

در انتهای این مقاله، مروری بر یک تکنیک برای بازسازی تصاویر توموگرافی حباب‌های پلاسمایی با اندازه‌گیری TEC از طریق سیگنال‌های GNSS انجام گرفت. نشان داده شد که این تکنیک بازسازی توموگرافی روی تصویربرداری از حباب‌های پلاسمایی به خوبی عمل می‌کند. توزیع‌های افقی گرفته شده از تخلیه‌های پلاسمای VTEC با تصاویر گرفته شده از ادوات اپتیکی مقایسه گردید و نتایج مشابهی حاصل شد. نشان داده شد در صورت بزرگ بودن ساختار حباب حتی در نواحی که سیگنال GNSS در آن‌ها ضعیف است، می‌توان نتیجه خوبی از این روش بدست آورد. در انتهای این مقاله به مقایسه روش مطالعه شده در اینجا با روش‌هایی نظیر تصویربرداری تمام آسمان، رادارهای پراکندگی غیر همدوس و غیره، پرداخته شد و مزایا و معایب این روش‌ها نسبت به یکدیگر بیان شد.

مطالعات یون‌سپهری مبتنی بر GNSS کاربردهای عملی فراوانی در زمینه‌های مختلف دارند. از جمله این کاربردها می‌توان به ناوبری، ارتباطات و نظارت بر اقلیمی فضایی اشاره کرد. در ناوبری، دقت و قابلیت اطمینان سیستم‌های موقعیت‌یابی به شدت به اطلاعات دقیق یون‌سپهری وابسته است. GNSS از طریق اندازه‌گیری TEC، امکان پایش تغییرات یون‌سپهری را فراهم می‌آورد که برای بهبود دقت ناوبری حیاتی است. در زمینه ارتباطات، تأثیرات لایه یون‌سپهر می‌تواند بر کیفیت انتقال سیگنال‌های رادیویی و ماهواره‌ای تأثیر بگذارد، بنابراین مطالعات GNSS می‌تواند به کاهش اختلالات و بهبود ارتباطات کمک کند. در نظارت بر اقلیم فضایی، داده‌های GNSS به عنوان ابزاری برای پیش‌بینی و تحلیل پدیده‌های فضایی مانند طوفان‌های مغناطیسی و تأثیرات آن‌ها

بر زمین استفاده می‌شوند. این اطلاعات می‌تواند به محافظت از سیستم‌های فناوری حیاتی و پیشگیری از اختلالات ناشی از شرایط فضایی کمک کنند. در مجموع، مطالعات یون‌سپهری مبتنی بر GNSS نقش مهمی در پیشرفت فناوری‌های رادیویی و افزایش امنیت و کارایی آن‌ها دارند.

مشارکت نویسندگان

در این مقاله، نویسندگان به نسبت سهم برابر مشارکت داشته‌اند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از تمام افرادی که در جمع‌آوری اطلاعات و تجزیه و تحلیل نمونه‌ها ما را در این تحقیق یاری رساندند، تشکر و تقدیر می‌نمایند.

تعارض و منافع

«هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

منابع و مآخذ

- [1] Kunitsyn, V. E, & Tereshchenko, E. D. Tomography of the Ionosphere. Moscow: Nauka; (1991). (In Russian).
- [2] Kunitsyn, V. E, & Tereshchenko, E. D. Radiotomography of the Ionosphere. IEEE Antennas and Propagation Magazine (1992). 34, 22-32.
- [3] Leitinger, R. Ionospheric tomography. In: Stone R. (ed.) Review of Radio Science 1996-1999. Oxford: Science Publications; (1999). p.581-623.
- [4] Kunitsyn, V. E, & Tereshchenko, E. D. Ionospheric Tomography. Berlin, NY: Springer; (2003).
- [5] Kunitsyn, V. E, Andreeva, E. S, Kozharin, M. A, & Nesterov, I. A. Ionosphere Radio Tomography using high-orbit navigation system. Moscow University Physics Bulletin (2005). 60(1), 94-108.
- [6] Bust, G. S, & Mitchell, C. N. History, current state, and future directions of ionospheric imaging. Reviews of Geophysics (2008). 46, RG1003, doi: 10.1029/2006RG000212
- [7] Kunitsyn, V. E, Tereshchenko, E. D, & Andreeva, E. S. Radio Tomography of the Ionosphere. Moscow: Nauka; (2007). (In Russian).
- [8] Kunitsyn, V. E, Tereshchenko, E. D, Andreeva, E. S, & Nesterov, I. A. Satellite radio probing and radio tomography of the ionosphere. Uspekhi Fizicheskikh Nauk (2010). 180(5), 548-553.
- [9] Mitchell, C, Alfonsi, L, De Franceschi, G, Lester, M, Romano, V, & Wernik, A. GPS TEC and scintillation measurements from the polar ionosphere during the October 2003 storm. Geophysical Research Letters (2005). 32, L12S03,

- [23] <https://www.ecmwf.int/en/about/media-centre/news/2023/data-assimilation-and-climate-specialist-jean-noel-thepaut-bows-out>
- [24] Kunitsyn VE, Andreeva ES, Nesterov IA, Padokhin AM. Ionospheric Sounding and Tomography by GNSS. In book: Geodetic Sciences-Observations, Modeling and Applications, S. Jin.
- [25] Abdu, M.A. Equatorial ionosphere–thermosphere system: Electrodynamics and irregularities. *Adv. Space Res.* 2005, 35, 771–787.
- [26] Lee, C.-C.; Su, S.-Y.; Reinisch, B.W. Concurrent study of bottomside spread F and plasma bubble events in the equatorial ionosphere during solar maximum using digisonde and ROCSAT-1. *Ann. Geophys.* 2005, 23, 3473–3480.
- [27] Haase, J.S.; Dautermann, T.; Taylor, M.J.; Chapagain, N.; Calais, E.; Pautet, D. Propagation of plasma bubbles observed in Brazil from GPS and airglow data. *Adv. Space Res.* 2011, 47, 1758–1776.
- [28] Paznukhov, V.V.; Carrano, C.S.; Doherty, P.H.; Groves, K.M.; Caton, R.G.; Valladares, C.E.; Seemala, G.K.; Bridgwood, C.T.; Adeniyi, J.; Amaeshi, L.L.N.; et al. Equatorial plasma bubbles and L-band scintillations in Africa during solar minimum. *Ann. Geophys.* 2012, 30, 675–682.
- [29] Singh, S.; Bamgboye, D.K.; McClure, J.P.; Johnson, F.S. Morphology of equatorial plasma bubbles. *J. Geophys. Res.* 1997, 102, 20019–20029. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/97JA01724>
- [30] Burke, W.J.; Gentile, L.C.; Huang, C.Y.; Valladares, C.E.; Su, S.Y. Longitudinal variability of equatorial plasma bubbles observed by DMSP and ROCSAT-1. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2004, 109, A12301. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2004JA010583>
- [31] Nishioka, M.; Saito, A.; Tsugawa, T. Occurrence characteristics of plasma bubble derived from global ground-based GPS receiver networks. *J. Geophys. Res.* 2008, 113, A05301. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2007JA012605>
- [32] Patel, K.; Singh, A.K. Characteristic of plasma bubbles observed by DMSP in the topside ionosphere during the year 2005. *J. Earth Syst. Sci.* 2010, 119, 211–220.
- [33] Xiong, C.; Lüher, H.; Ma, S.Y.; Stolle, C.; Fejer, B.G. Features of highly structured equatorial plasma irregularities deduced from CHAMP observations. *Ann. Geophys.* 2012, 30, 1259–1269.
- [34] Prol, F.S.; Hernández-Pajares, M.; Camargo, P.O.; Muella, M.T.A.H. Spatial and temporal features of the topside ionospheric electron density by a new model based on GPS radio occultation data. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2018, 123, 2104–2115.
- <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2004GL021644>
- [10] Kunitsyn, V, Nesterov, I, & Shalimov, S. Japan Earthquake on March 11, 2011: GPSTEC Evidence for Ionospheric Disturbances. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters* (2011). 94(8), 616-620.
- [11] Kunitsyn, V. E, Tereshchenko, E. D, & Andreeva, E. S. Radio Tomography of the Ionosphere. Moscow: Nauka; (2007). (In Russian).
- [12] Kunitsyn, V. E, Tereshchenko, E. D, Andreeva, E. S, & Nesterov, I. A. Satellite radio probing and radio tomography of the ionosphere. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk* (2010). 180(5), 548-553.
- [13] Kunitsyn, V. E, Andreeva, E. S, Kozharin, M. A, & Nesterov, I. A. Ionosphere Radio Tomography using high-orbit navigation system. *Moscow University Physics Bulletin* (2005). 60(1), 94-108.
- [14] Hofmann-Wellenhof, B, Lichtenegger, H, & Collins, J. Global Positioning System: theory and practice. Berlin, NY: Springer; (1992).
- [15] Franke, S. J, Yeh, K. C, Andreeva, E. S, & Kunitsyn, V. E. A study of the equatorial anomaly ionosphere using tomographic images. *Radio Science* (2003). 38(1), doi:10.1029/2002RS002657.
- [16] Andreeva, E. S, Kunitsyn, V. E, & Tereshchenko, E. D. Phase difference radiotomography of the ionosphere. *Annales Geophysicae* (1992). 10, 849-855.
- [17] Hofmann-Wellenhof, B, Lichtenegger, H, & Collins, J. Global Positioning System: theory and practice. Berlin, NY: Springer; (1992).
- [18] Kunitsyn, V. E, Kozharin, M. A, Nesterov, I. A, & Kozlova, M. O. Manifestations of helio-geophysical disturbances in October, 2003 in the ionosphere over West Europe from GNSS data and ionosonde measurements. *Moscow University Physics Bulletin* (2004). 59(6), 68-71.
- [19] Lu W, Ma G, Wan Q, Li J, Wang X, Fu W, Maruyama T. Virtual reference station-based computerized ionospheric tomography. *GPS Solutions.* 2021 Jan;25:1-2.
- [20] Lu W, Ma G, Wan Q. A review of voxel-based computerized ionospheric tomography with GNSS ground receivers. *Remote Sensing.* 2021 Aug 29;13(17):3432.
- [21] Zheng D, Yuan P, He C, Yao Y, Nie W, Lin D, Liao M, Xiong Z. Virtual reference station technology for voxels without signal ray in ionospheric tomography based on machine learning. *GPS Solutions.* 2023 Oct;27(4):166.
- [22] Chen B, Wu L, Dai W, Luo X, Xu Y. A new parameterized approach for ionospheric tomography. *GPs solutions.* 2019 Oct; 23:1-5.

[44] Zhong J, Lei J, Dou X, Yue X. Assessment of vertical TEC mapping functions for space-based GNSS observations. *GPS solutions*. 2016 Jul;20:353-62.

[45] Huo X, Long Y, Liu H, Yuan Y, Liu Q, Li Y, Liu M, Liu Y, Sun W. A novel ionospheric TEC mapping function with azimuth parameters and its application to the Chinese region. *Journal of Geodesy*. 2024 Feb;98(2):13.

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2017JAO24936>

[35] Prol FS, Hernández-Pajares M, Muella MT, Camargo P. Tomographic imaging of ionospheric plasma bubbles based on GNSS and radio occultation measurements. *Remote Sens* 10 (10): 1529.

[36] Moraes, A.O.; Vani, B.C.; Costa, E.; Abdu, M.A.; de Paula, E.R.; Sousasantos, J.; Monico, J.F.G.; Forte, B.; Negreti, P.M.S.; Shimabukuro, M.H. GPS availability and positioning issues when the signal paths are aligned with ionospheric plasma bubbles. *GPS Solut*. 2018, 22, 95.

[37] Tsai LC, Liu CH, Tsai WH, Liu CT. Tomographic imaging of the ionosphere using the GPS/MET and NNSS data. *Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics*. 2002 Dec 1;64(18):2003-11.

[38] Takahashi, H.; Wrasse, C.M.; Otsuka, Y.; Ivo, A.; Gomes, V.; Paulino, I.; Medeiros, A.F.; Denardini, C.M.; Sant'anna, N.; Shiokawa, K. Plasma bubble monitoring by TEC map and 630 nm airglow image. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys*. 2015, 130, 151–158.

[39] Makela, J.J.; Kelley, M.C. Field-aligned 777.4-nm composite airglow images of equatorial plasma depletions. *Geophys. Res. Lett*. 2003, 30, 1442. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2003GL017106>

[40] Wen D, Tang Y, Chen X, Zou Y. A Double-Adaptive Adjustment Algorithm for Ionospheric Tomography. *Remote Sensing*. 2023 Apr 27;15(9):2307.

[41] Lin J, Shen X, Hu L, Wang L, Zhu F. CSES GNSS ionospheric inversion technique, validation and error analysis. *Science China Technological Sciences*. 2018 May; 61:669-77.

[42] Rao KD, Dutt VS. An assessment of mapping functions for VTEC estimation using measurements of low latitude dual frequency GPS receiver. *Int. J. Appl. Eng. Res*. 2017;12(4):422-7.

[43] Xiang Y, Gao Y. An enhanced mapping function with ionospheric varying height. *Remote Sensing*. 2019 Jun 25;11(12):1497.

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



سحر برزگر دارای مدرک دکتری مهندسی پلاسما از دانشگاه شهید بهشتی می‌باشد. بعد اخذ مدرک دکتری، ایشان به مدت ۲ سال به‌عنوان پژوهشگر پسادکتری در پژوهشگاه دانش‌های بنیادی تحقیق نموده و از سال ۱۴۰۲ تا کنون به‌عنوان استادیار در گروه

فیزیک فضا مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران مشغول به فعالیت هستند. حوزه فعالیت ایشان در زمینه علوم فضایی، سنجش از دور، شبیه‌سازی و مدلسازی پلاسماهای فضایی و یادگیری ماشین است.

Barzegar, S. Assistant Professor at the Department of Space Physics, University of Tehran, Iran.

sbarzegar@ut.ac.ir



مسعود خوش‌سیما به‌عنوان استادیار پژوهشگاه فضایی ایران در حوزه علوم و فناوری فضایی و سنجش از دور فعالیت می‌نماید. در حال حاضر ایشان بیش از ۳۰ مقاله علمی در مجلات و کنفرانس‌های علمی ارائه نموده‌اند و همچنین در کمیته علمی و داوری بیش از ۲۰ مجله و کنفرانس علمی ملی و بین‌المللی فعالیت داشته‌اند.

Khoshsima, M. Assistant Professor at Satellite Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

m.khoshsima@isrc.ac.ir

Citation (Vancouver): Barzegar S, Khoshsima M. [Radio Sounding and Tomography of Ionosphere based on GNSS]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2024; 2(2): 247-264

<https://doi.org/10.22061/jrsg.2024.11166.1081>



COPYRIGHTS

© 2024 The Author(s). This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)