

Extensive Regional Telecommunications Coverage in Emergency Condition Using Tethered-Balloon Equipped with Antenna Pointing Mechanism – Part 1: Kinematic and Dynamic Modeling

Mohammad Fathi^{1*} and Javad Ranjbar²

1. Ph.D. Candidate, Electrical Engineering Department, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
2. Assistant Professor, Electrical Engineering Department, Khatam Al-Anbia University, Tehran, Iran

*Corresponding Author's E-mail: mohammad_fathi@elec.iust.ac.ir

Abstract

In emergency situations, where there is no possibility of using terrestrial-based or space-based telecommunication platforms or when there is a need for providing telecommunication services in remote, rural or hilly areas which are faced with lacking telecommunication infrastructures, typically using tethered balloon-based telecommunication technology is the best choice. Low operation cost, quick installation, larger coverage area than terrestrial facilities such as BTS and usability in emergency situations are among the advantages of using tethered balloons for telecommunication applications. Despite all the advantages of using this technology, small and limited coverage area is the biggest drawback of using tethered balloon platforms. In this paper, using a tethered balloon equipped with antenna pointing mechanism is proposed in order to, extend their small coverage area to a large region, in addition to benefit from inherent tethered balloons technology advantages. In this regard, dynamic and kinematic modeling of the proposed antenna pointing mechanism is discussed. In this research, the kinematic model is validated using RoboAnalyzer software and Robotics MATLAB toolbox. Antenna pointing mechanism provides the rotation ability for the antenna in two Azimuth and Elevation directions which increased the coverage area dramatically.

Keywords: Kinematic modeling, Antenna pointing mechanism, Tethered balloon, Coverage area enlargement



COPYRIGHTS

© 2022 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of [the Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

How to cite this article:

M. Fathi and J. Ranjbar, "Extensive Regional Telecommunications Coverage in Emergency Condition Using Tethered-Balloon Equipped with Antenna Pointing Mechanism – Part 1: Kinematic and Dynamic Modeling," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 15, No. 2, pp. 27-41, 2022 (in Persian), <https://doi.org/10.30699/jsst.2022.1312>.

پوشش دهی مخابراتی منطقه‌ای وسیع در شرایط اورژانسی با استفاده از بستر بالن مقید مجهز به مکانیزم نشانه‌روی آنتن - بخش اول: مدل‌سازی سینماتیکی و دینامیکی

محمد فتحی^{۱*} و جواد رنجبر^۲

۱- دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۲- دانشکده مهندسی برق، دانشگاه خاتم‌الانبیا، تهران، ایران

*ایمیل نویسنده مخاطب: mohammad_fathi@elec.iust.ac.ir

چکیده

در شرایط اورژانسی که امکان استفاده از بسترهای مخابراتی زمینی یا فضایی وجود ندارد و در شرایطی که نیاز به برقراری ارتباطی مخابراتی در مناطقی دورافتاده فاقد بسترهای مورد نیاز مخابراتی وجود دارد، به طور معمول از فناوری بالن‌های مقید برای تبادل اطلاعات استفاده می‌شود. هزینه پاتین، قابلیت استقرار سریع، میزان پوشش دهی بیشتر نسبت به BTSها و قابلیت استفاده در شرایط اورژانسی از جمله مزایای استفاده از بالن‌های مقید برای برقراری ارتباط مخابراتی به شمار می‌روند. فناوری بالن‌های مقید به‌رغم تمام مزایایشان، دارای عیب قابلیت پوشش دهی منطقه‌ای کوچک هستند. در این مقاله، به‌منظور بهره‌گیری همزمان از مزایای بالن‌های مقید و پوشش دهی یک منطقه وسیع، استفاده از یک بالن مجهز به مکانیزم نشانه‌روی آنتن پیشنهاد شده و به مدل‌سازی سینماتیکی و دینامیکی مکانیزم پیشنهادی پرداخته شده است. در این کار مدل سینماتیکی استخراج شده توسط نرم‌افزار روبوآنالیزر و همچنین جعبه ابزار ریاتیکیس از نرم‌افزار متلب مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است. مکانیزم مدل‌سازی شده قابلیت دوران در دو جهت قوس افقی و قوس عمودی را برای آنتن فراهم می‌آورد و بدین ترتیب ناحیه تحت پوشش آنتن را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی سینماتیکی، مکانیزم نشانه‌روی آنتن، بالن مقید، افزایش پوشش مخابراتی

Earth-Centered, Earth-Fixed
(ECEF)

زمین - مرکز، زمین - ثابت

علائم و اختصارات

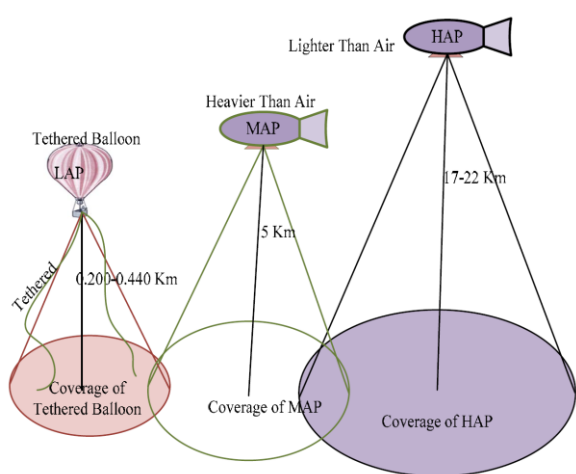
سیستم موقعیت‌یاب جهانی
شرکت تکنولوژی ماهواره ساری
پروژه پاد

Global Positioning System (GPS)
Surrey Satellite Technology Ltd.
(SSTL)
Program on Airship Design
and Development (PADD)

مقدمه

امروزه، امکان برقراری ارتباط مخابراتی در هر زمان و مکان یکی از نیازمندی‌های بشر به شمار می‌رود. این نیازمندی، در شرایط اورژانسی که در آن وقوع بلایای طبیعی همچون زلزله، سیل و غیره بسترهای

موجود در این میان، محدودیت ناحیه تحت پوشش یک بالن مقید نسبت به فناوری‌های زمینی و فضایی است. به‌طور کلی، بالن‌ها در ارتفاعات مختلفی نسبت به سطح زمین می‌توانند قرار گیرند که بر این اساس به سه دسته بالن‌های ارتفاع-بالا که در لایه استراتوسفر در ارتفاعی در بازه ۱۷ تا حدود ۱۰۰ کیلومتر قرار می‌گیرند و بالن‌های ارتفاع-متوسط و ارتفاع-کم که در ارتفاعاتی پایین‌تر در لایه تروپوسفر قرار می‌گیرند، دسته‌بندی می‌شوند. ارتفاعی که یک بالن در آن قرار می‌گیرد با ناحیه تحت پوشش بالن نسبت مستقیم خواهد داشت. در شکل (۱) ارتباط میان ارتفاع و ناحیه تحت پوشش یک بالن به صورت شماتیک نمایش داده شده است [۱۳].



شکل ۱- ارتباط میان ارتفاع بالن و ناحیه تحت پوشش [۱۳]

همانگونه که در شکل (۱) نمایش داده شده است، یکی از چالش‌هایی که بالن‌های مقید با آن مواجه هستند، ناحیه تحت پوشش کوچک است که از ارتفاع پائین آن‌ها (ارتفاعی میان ۰/۲ تا ۰/۴۴ کیلومتر) ناشی می‌شود. فرض کنید که به دلایل امدادی یا امنیتی لازم است تا در یک منطقه ارتباطی مخابراتی با استفاده از بستر بالن میان دو خودرو فراهم شود. در چنین شرایطی چنانچه آنتن بهره بالای متصل به بالن دارای بیمی ۳۰ درجه باشد، در این صورت منطقه تحت پوشش با در نظر گرفتن بیشترین ارتفاع یک بالن مقید (۴۴۰ متر) برابر با ۰/۲۰۲۷ کیلومتر مربع خواهد بود، که چنین منطقه تحت پوششی آزادی حرکت خودروهای مد نظر را صلب کرده و عملیاتی بودن مأموریت را محدود می‌کند. با توجه به این مهم، چنانچه هدف یک مأموریت برقراری یک ارتباط مخابراتی از طریق بستر بالن مقید در یک منطقه وسیع باشد، با توجه به تکنولوژی روز بالن‌های مقید، تنها راه چاره به منظور پوشش کلی منطقه، استفاده از تعداد بسیاری از

پوشش دهی مخابراتی منطقه ای وسیع در شرایط اورژانسی با استفاده از بالن مقید مجهز به مکانیزم ...

مخابراتی زمینی و فضایی را تخریب کرده است، بیش از پیش نیز احساس می‌شود. علاوه بر شرایط اورژانسی، نیاز به ایجاد یک بستر مخابراتی در مناطق دورافتاده که فاقد بسترهای مخابراتی هستند و همچنین در شرایط امنیتی که عدم استفاده از بسترهای مخابراتی عمومی به کاربران الزام شده است، یکی از چالش‌هایی است که امروزه در جهان مطرح است. در چنین شرایطی، بستری برای برقراری ارتباط مخابراتی مناسب خواهد بود که پنج ویژگی مهم را داشته باشد که این ویژگی‌ها عبارتند از: زمان راه‌اندازی کوتاه، هزینه عملیاتی معقول، پوشش منطقه‌ای مناسب، امکان بازیگر بندی ساده بر حسب نیاز و تضمین برقراری ارتباطی ایمن. از آنجاکه برقراری ارتباط مخابراتی از طریق بستر بالن مقید هر ۵ ویژگی ذکر شده را در بر دارد، امروزه در شرایط اورژانسی یا امنیتی از بالن‌های مقید برای راه‌اندازی سریع بستری مخابراتی استفاده می‌شود.

بالن‌های مقید^۳ ساختارهایی هستند که در آنها یک محفظه منعطف توسط یک گاز سبک (به طور معمول هلیوم [۱]) پر شده و بدین‌وسیله یک محموله (آنتن، دوربین یا غیره) به هوا فرستاده می‌شود. در بالن‌های مقید، بالن توسط یک کابل نگهدارنده مهار می‌شود تا بدین شکل بالن در نقطه پرتاب خود ایستا شود [۲]. بالن‌های مقید به‌عنوان یک پلتفرم مناسب برای تجهیزاتی با کاربردهای مخابراتی، پخش چندرسانه‌ای^۴، مطالعات زیست محیطی و تصویربرداری مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مراجع [۳ و ۴] از فناوری بالن‌های مقید برای کاربردهای دسترسی به اینترنت و سرویس‌دهی باند پهن^۵ استفاده و بیان شده که استفاده از فناوری بالن‌های مقید در کاهش خطرات ناشی از امواج الکترومغناطیسی بر سلامت جانداران بسیار مؤثر هستند.

در بسیاری از پروژه‌ها در سرتاسر جهان از فناوری بالن‌های مقید برای کاربرد در سرویس‌دهی‌های باند پهن و راداری، تصویربرداری و مطالعات متروپولوژی در مناطق صعب‌العبور و محروم استفاده شده است. از این جمله می‌توان به پروژه تینانتوسط ناسا [۵]، پروژه کاپانینا^۶ توسط اروپا [۶-۷] و پروژه پاد^۷ در هند [۸-۹] اشاره کرد. از دیگر پروژه‌هایی که به‌منظور دسترسی جهانی به اینترنت در هر نقطه از زمین با استفاده از شبکه‌ای از بالن‌های مقید تعریف شده، پروژه لوون^۸ است که توسط شرکت گوگل عملیاتی شده است [۱۰-۱۱]. در مرجع [۱۲] نیز از بالن‌های مقید برای ارائه خدمات مخابراتی به مناطق دور از دسترس و مرتفع مورد استفاده قرار گرفته است.

به‌رغم تمام مزایای استفاده از بستر مخابراتی بالن‌های مقید، استفاده از این بستر با چالش‌هایی نیز مواجه است. بزرگترین چالش

6. Communications from Aerial Platform Networks delivering broadband communications for All (CAPANINA)
7. Program on Airship Design and Development (PADD)
8. Loon

3. Tethered Balloon
4. MediaBroadcasting
5. Broadband

نشانه روی آنتن به سمت اهداف مورد نظر را انجام داد، لازم است تا معادلات سینماتیک مستقیم و وارون و همچنین ماتریس‌های تبدیل میان دستگاه مختصات مرجع مکانیزم نشانه‌روی آنتن و دستگاه مختصات که موقعیت اهداف مورد در آن‌ها بیان شده (ECEF) را استخراج کرد [۱۷-۱۸]. علاوه بر آن، با در اختیار داشتن مدل سینماتیکی و مسیرهای مرجع استخراج شده، معادلات دینامیکی مکانیزم نشانه‌روی آنتن را نیز باید در اختیار داشت تا بدین ترتیب گشتاورهای موردنیازی که باید توسط عملگرهای مکانیزم تولید شده تا بیم آنتن مسیرهای مرجع استخراج شده را دنبال کند، تعیین شوند [۱۸-۲۰].

در این مقاله، هدف آن است که با در نظر گرفتن ساختار یک بالن مقید مجهز به مکانیزم نشانه‌روی آنتن دو درجه آزادی به منظور افزایش ناحیه پوشش‌دهی مخابراتی، به مدل‌سازی سینماتیکی و دینامیکی ساختار مورد بحث پرداخته شود. در این راستا، توصیف سیستم‌های مختصات مورد نیاز، استخراج ماتریس‌های تبدیل میان سیستم‌های مختصات مدل‌سازی سینماتیک مستقیم و وارون و مدل‌سازی دینامیکی مکانیزم نشانه‌روی آنتن ارائه شده است. در ادامه، استخراج معادلات مورد نیاز برای طراحی مسیر مرجع نشانه‌روی آنتن، طراحی مودهای عملیاتی مکانیزم‌نشانه‌روی و طراحی کنترل‌کننده مناسب مورد بحث قرار خواهند گرفت. شایان ذکر است که نوآوری‌های ارائه شده در این مقاله نسبت به مرجع [۱۷] که به عنوان گزارشی اولیه از این پژوهش منتشر شده است را می‌توان علاوه بر ارائه توضیحات تکمیلی و به‌روزرسانی تصاویر و نتایج حاصل، به صورت زیر بیان کرد:

- اصلاح مدل‌سازی سینماتیک مستقیم مکانیزم نشانه‌روی آنتن مربوط به شرکت تکنولوژی ماهواره ساری^{۱۱} مطابق با قوانین دناویت-هارتنبرگ
- اصلاح مدل‌سازی سینماتیک وارون مکانیزم نشانه‌روی آنتن SSTL مطابق با قوانین دناویت-هارتنبرگ^{۱۲}
- اعتبارسنجی مدل سینماتیکی استخراج شده توسط نرم‌افزار رובوآنالیزر و جعبه ابزار رباتیکس از نرم‌افزار متلب
- مدل‌سازی دینامیکی مکانیزم نشانه‌روی آنتن SSTL بر اساس روش لاگرانژ

ساختار این مقاله بدین صورت تنظیم شده است: در بخش ۲ به معرفی نمادگذاری دناویت-هارتنبرگ و قراردادهای مرتبط با آن پرداخته و در بخش ۳ ساختار مکانیزم نشانه‌روی آنتن مورد بحث در این مقاله تشریح شده است. در بخش ۴ به توصیف کامل تمام سیستم‌های مختصات مورد نیاز عنوان شده است. در بخش ۵ به مدل‌سازی سینماتیک مستقیم و وارون

بالن‌ها و تشکیل یک شبکه از بالن‌های مقید برای پوشش‌دهی خواهد بود. اما به کارگیری چنین رویکردی علاوه بر آنکه پیچیدگی شبکه مخابراتی را افزایش داده و هزینه اقتصادی گزافی را به پروژه تزریق خواهد کرد و حتی ممکن است با توجه به شرایط اضطراری موجود امکان‌پذیر نیز نباشد.

در این مقاله به ارائه ساختاری با استفاده از مکانیزم‌های نشانه‌روی آنتن برای بالن‌های مقید پرداخته شده است که مشکل کوچک‌بودن ناحیه تحت پوشش این بالن‌ها را مرتفع می‌سازد. چنانچه برقراری ارتباط مخابراتی میان دو خودرو از طریق بستر بالن مقید به‌عنوان مأموریت مورد نظر مفروض شده و همچنین فرض شود که مکانیزم نشانه‌روی آنتن متصل به بالن تنها قادر به تأمین دوران ۳۰ درجه‌ای در جهت قوس عمودی^۹ و ۱۸۰ درجه‌ای در جهت قوس افقی^{۱۰} است، مساحت ناحیه تحت پوشش بالن مقاید از ۰/۲۰۲۷ کیلومتر مربع (در حالت بدون مکانیزم) به ۱/۸۲۴۵ کیلومتر مربع افزایش خواهد یافت. با توجه به این مهم، آزادی تحرک خودروها در صورتی که بالن مقید مجهز به مکانیزم نشانه‌روی آنتن باشد، نسبت به حالت قبل بسیار بیشتر بوده و ناحیه پوشش‌دهی به بیش از ۱۰ برابر افزایش می‌یابد [۱۴ و ۱۷].

در راستای نشانه‌روی آنتن متصل به بالن مقید به سمت اهداف مورد نظر (خودروها) لازم است تا آنتن قابلیت دوران در دو جهت قوس افقی و قوس عمودی را داشته باشد. مکانیزم‌های نشانه‌روی متعددی (با ساختار مشابه) برای فراهم ساختن این قابلیت در آنتن‌ها طراحی گشته‌اند که با استفاده از دو مفصل لولایی، قابلیت دوران در راستاهای قوس افقی و قوس عمودی را برای آنتن فراهم می‌سازند [۱۵-۱۶].

با مجهز ساختن بالن مقید به مکانیزم نشانه‌روی آنتن، مهمترین مسئله‌ای که مطرح می‌شود آن است که چگونه می‌توان مسیرهای مرجع مناسبی را برای جهت‌دهی آنتن توسط مکانیزم نشانه‌روی به سوی اهداف مطلوب تولید کرد. به‌عنوان مثال، فرض کنید اهداف مورد نظر در مأموریت مفروض در این مقاله (خودروهای هدف)، دارای حسگرهای GPS هستند که بردار موقعیتشان را در دستگاه مختصات زمین مرکز-زمین ثابت تولید می‌کنند. در چنین مأموریتی، مسیر مرجع مکانیزم نشانه‌روی آنتن باید چنان استخراج شود که در آن تبدیلات زنجیره دستگاه‌های میان دستگاه مختصات ECEF تا دستگاه مختصات مرجع مکانیزم نشانه‌روی آنتن همگی لحاظ شده باشند. بدین ترتیب، باید ارتباط معناداری میان بردار جهت‌گیری آنتن نسبت به دستگاه مختصات مرجع مکانیزم نشانه‌روی آنتن با بردارهای موقعیت خودروهای هدف که در دستگاه ECEF بیان شده‌اند، ایجاد شود. در همین راستا، به منظور آنکه بتوان به طور صحیح عملیات

11. Surrey Satellite Technology Ltd. (SSTL)
12. Denavit-Hartenberg (D-H)

9. Elevation
10. Azimuth

- محور \bar{X} در هر دستگاه مختصات تعریف شده، باید با محور \bar{Z} از دستگاه مختصات ماقبل خود متقاطع باشد.
- با تعریف محورهای \bar{X} و \bar{Z} در هر دستگاه مختصات، محور \bar{Y} در آن دستگاه مختصات باید به نحوی تعریف شود که دستگاه مختصات حاصل شده از قاعده دست-راست پیروی کند.

توجه به این نکته لازم است که طبق قوانین دناویت-هارتنبِrg برای تعریف دستگاه‌های مختصات، تعریف راستای محور \bar{X} مربوط به اولین دستگاه مختصات، می‌تواند به دلخواه با لحاظ کردن شرط تعامد محورها در یک دستگاه مختصات، توسط طراح انتخاب شود. در شکل (۲) طرز قرارگیری چهارچوب‌های $\{i-1\}$ و $\{i\}$ برای یک مکانیزم/روبات در حالت کلی نشان داده شده است.

پارامترهای دناویت-هارتنبِrg

پس از تعریف دستگاه‌های مختصات مورد نیاز به منظور مدل‌سازی سینماتیکی یک مکانیزم یا روبات، قدم بعد برای دستیابی به ماتریس-های تبدیل همگن میان دستگاه‌های مختصات تعریف شده و توصیف رفتار سینماتیکی مکانیزم یا روبات، تشکیل جدول پارامترهای دناویت-هارتنبِrg است. جدول پارامترهای دناویت-هارتنبِrg، میان هر دو دستگاه مختصات متوالی تعریف می‌شود و رابطه دورانی^{۱۶} و جابه‌جایی^{۱۷} را توصیف می‌نماید. در تعریف جدول پارامترهای دناویت هارتنبِrg از چهار پارامتر a_i (طول رابط)، α_i (زاویه پیچش)، θ_i (زاویه مفصلی) و d_i (انحراف رابط) که با نام پارامترهای دناویت هارتنبِrg (D-H) شناخته شده‌هستند، استفاده می‌شود. در صورتی که میان هر دو دستگاه مختصات تعریف شده، پارامترهای D-H به درستی تعریف شوند، ماتریس تبدیل همگن میان این دو دستگاه به‌طور مستقیم قابل استخراج خواهد بود.

به منظور توصیف پارامترهای D-H دو دستگاه مختصات متوالی با نام‌های $\{n-1\}$ و $\{n\}$ را در نظر بگیرید. با این فرض، پارامتر زاویه مفصلی θ میان این دو دستگاه مختصات بیانگر میزان دوران مورد نیاز حول محور \bar{Z}_{n-1} به نحوی است که پس از آن محورهای \bar{X}_n و \bar{X}_{n-1} با یکدیگر همراستا شوند. شایان ذکر است چنانچه در این تعریف، دستگاه مختصات $\{n-1\}$ مربوط به مفصلی لولایی باشد، در این صورت میزان دوران این مفصل نیز باید در تعریف زاویه مفصلی θ لحاظ شده باشد. در تعریف پارامترهای D-H، پارامتر زاویه پیچش α بیانگر میزان دوران مورد نیاز دستگاه مختصات $\{n-1\}$ حول محور \bar{X}_n به نحوی است که پس از آن محورهای \bar{Z}_n و \bar{Z}_{n-1} با یکدیگر همراستا شوند. در تعریف پارامترهای D-H، پارامتر انحراف رابط d

مکانیزم، تعیین فضای کار مکانیزم، استخراج ماتریس تبدیل‌های میان دستگاه‌های مختصات و همچنین اعتبارسنجی مدل سینماتیکی استخراج شده پرداخته شده است. مدل‌سازی دینامیکی مکانیزم نشانه‌روی نیز در بخش ۶ مورد بحث قرار گرفته و در نهایت بخش ۷ به بیان جمع‌بندی و نتیجه‌گیری اختصاص یافته است.

نمادگذاری دناویت-هارتنبِrg

به‌منظور تحلیل سینماتیکی یک مکانیزم، به‌طور معمول از نمادگذاری دناویت-هارتنبِrg برای استخراج مدل سینماتیکی استفاده می‌شود [۲۱-۲۲]. مدل‌سازی سینماتیکی با استفاده از نمادگذاری D-H بدین صورت انجام می‌گیرد که ابتدا به هر یک از مفصل‌های مکانیزم تحت مطالعه، دستگاه مختصاتی مناسب متصل و تعریف می‌شود. سپس، با استفاده از دستگاه‌های مختصات تعریف شده، برای هر یک از رابط‌های مکانیزم، چهار پارامتر که به پارامترهای D-H معروف هستند، تعیین می‌شود. با در اختیار داشتن پارامترهای D-H، ماتریس تبدیل میان دستگاه‌های مختصات مختلف تعریف شده استخراج و بدین ترتیب مدل سینماتیکی مکانیزم حاصل می‌شود.

قوانین دناویت-هارتنبِrg برای تعریف دستگاه مختصات

به‌منظور مدل‌سازی سینماتیکی یک مکانیزم یا یک روبات توسط پارامترهای D-H لازم است به تعریف و اختصاص دستگاه‌های مختصات مناسب برای هر یک از مفصل‌ها و همچنین عملگر-نهایی^{۱۳} مکانیزم مطابق با قوانین دناویت-هارتنبِrg پرداخته شود. قوانین دناویت-هارتنبِrg برای تعریف دستگاه‌های مختصات را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

- به‌منظور مدل‌سازی سینماتیکی یک مکانیزم یا روبات، حداقل باید به تعداد $n + 1$ دستگاه مختصات برای مکانیزم تعریف شود که در اینجا n بیانگر تعداد مفصل‌های مکانیزم یا روبات است، چراکه برای هر مفصل و همچنین عملگر نهایی باید دستگاه مختصات مناسب تعریف شده باشد. توجه به این نکته لازم است که در صورت نیاز می‌توان تعداد بیشتری دستگاه مختصات برای توصیف سینماتیکی روبات یا مکانیزم استفاده نمود با این حال تعریف تعداد کمتر مجاز نیست.
- محور \bar{Z} در هر دستگاه مختصات تعریف شده، باید منطبق بر جهت محور دوران مفصل (در مفصل‌های لولایی^{۱۴}) یا راستای حرکت مفصل (در مفصل‌های کشویی^{۱۵}) باشد.
- محور \bar{X} در هر دستگاه مختصات تعریف شده، باید نسبت به محور \bar{Z} از دستگاه مختصات ماقبل خود متعامد باشد.

16. Rotation Relationship
17. Displacement Relationship

13. End-Effector
14. Revolute Joints
15. Prismatic Joints

ساختار مکانیزم نشانه روی آنتن

ساختار مکانیزم نشانه روی در این مقاله مشابه با ساختار مکانیزم نشانه روی آنتن SSTL که تاکنون در ماهواره‌های متعددی از جمله NigeriaSat-2, KazEOSat-2 و TechDemoSat-1 مورد استفاده قرار گرفته، در نظر گرفته شده است [۱۵]. ساختار مکانیزم نشانه روی آنتن SSTL در شکل (۳) نمایش داده شده است. همانطور که در این شکل نمایش داده شده، مکانیزم نشانه روی آنتن مورد بررسی در این مقاله از دو مفصل لولایی تشکیل شده است که هر یک از این مفصل‌ها در واقع موتورهایی می‌باشند که دوران مورد نیاز آنتن را فراهم می‌آورند. موتور ۱- دوران مورد نیاز در جهت قوس افقی و موتور ۲- دوران مورد نیاز در راستای قوس عمودی را برای آنتن فراهم می‌کنند. دوران‌های حاصل از چرخش موتور ۱- و موتور ۲- از طریق یک شفت که به موتور ۲- متصل است، به آنتن منتقل می‌شوند. ابعاد بخش‌های مختلف مکانیزم نشانه روی آنتن SSTL در شکل (۳) به صورت شماتیک ارائه شده است.

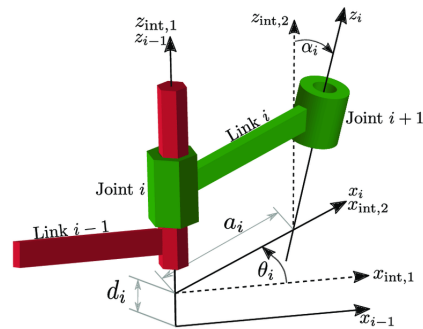
توصیف دستگاه‌های مختصات مورد نیاز

در راستای مدل‌سازی سینماتیکی مکانیزم نشانه روی آنتن، سیستم‌های مختصات مورد نیاز باید به نحوی تعریف شوند که به واسطه آنها، بردارهای موقعیتی خودروها (اهداف مفروض در این مقاله) که توسط گیرنده‌های GPS در دستگاه مختصات ECEF تولید می‌شوند را بتوان به دستگاه مختصات مرجع مکانیزم نشانه روی منتقل کرد. بدین وسیله زوایای مرجع مناسب عملگرهای مکانیزم نشانه روی آنتن (موتور-۱ و موتور-۲) را به نحوی استخراج کرد که آنتن به سمت هدف مطلوب جهت‌گیری کند. به منظور انتقال بردارهای موقعیتی اهداف از دستگاه مختصات ECEF به دستگاه مختصات مرجع مکانیزم نشانه روی آنتن و در نتیجه آن استخراج مسیر مرجع مطلوب برای عملگرها، روند نمایش داده شده در فلوجارت شکل (۴) باید دنبال شود. در ادامه به توصیف کامل هر یک از دستگاه‌های مختصات نام‌برده در فلوجارت شکل (۴) پرداخته خواهد شد.

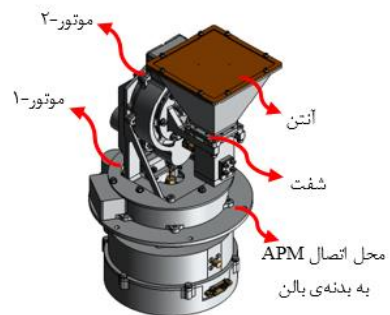
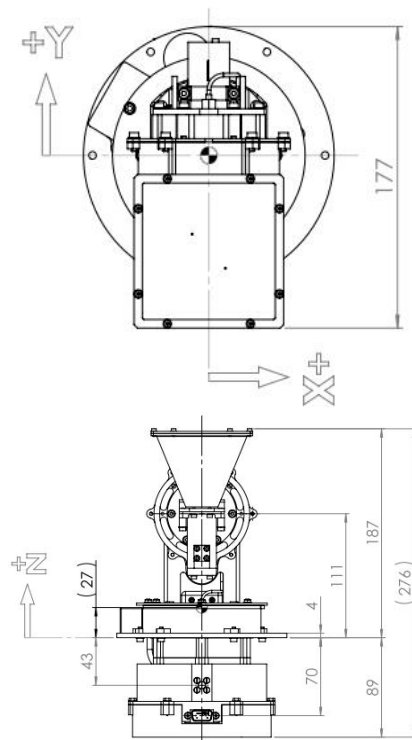


شکل ۴- روند استخراج مسیر مرجع برای موتور-۱ و موتور-۲ بر اساس ECEF در دستگاه GPS بردارهای موقعیت تولید شده توسط

بیانگر فاصله میان مبدأ دستگاه‌های مختصات $\{n-1\}$ و $\{n\}$ در راستای محور Z_{n-1} است. در نهایت، پارامتر طول رابط a نیز بیانگر فاصله میان مبدأ دستگاه‌های مختصات $\{n-1\}$ و $\{n\}$ در راستای محور X_n است. نمایش شماتیک چهار پارامتر D-H $(d_i, \theta_i, \alpha_i, a_i)$ در شکل (۲) ارائه شده است.

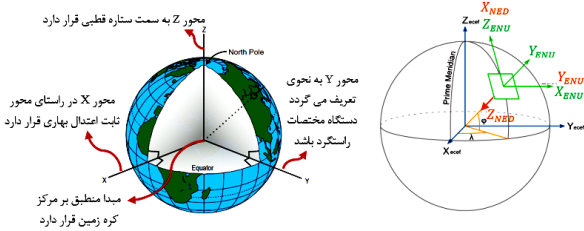


شکل ۲- نمادگذاری دناویت هارتنبرگ



شکل ۳- ساختار مکانیزم نشانه روی آنتن SSTL [۱۵]

که در آن سمت پایین از بستر هوایی با اعداد مثبت بیان گردد. چنین دستگاه مختصاتی با نام ان-ای-دی²⁰ شناخته شده است. دستگاه ENU و NED در حقیقت دستگاهی معادل اما با دو تعریف مجزا می‌باشد. در دستگاه مختصات NED، راستای شمال جغرافیایی به عنوان محور X ، راستای شرق جغرافیایی به عنوان محور Y و راستای پایین (به سوی مرکز کره زمین) به عنوان محور Z در نظر گرفته می‌شود. این دستگاه در شکل (۵) با رنگ نارنجی نمایش داده شده است.



شکل ۵- توصیف شماتیک دستگاه‌های مختصات ECI, ECEF, NED و ENU

دستگاه مختصات مرجع بالن (BR)

می‌دانیم که به دلیل وجود اغتشاشات گوناگونی همچون باد، بدنه بالن می‌تواند دچار تغییر وضعیت و انحراف از راستای مطلوب خود شود. از آنجاکه مکانیزم نشانه‌روی آنتن بر روی بدنه بالن نصب شده است، تغییر وضعیت بدنه بالن به صورت زنجیره‌وار سبب تغییر وضعیت مکانیزم نشانه‌روی آنتن نیز خواهد شد. اگر این موضوع مغفول بماند، با فرض تغییر وضعیت بدنه بالن، مکانیزم نشانه‌روی آنتن قادر به انجام نشانه‌روی صحیح به سوی هدف مطلوب نخواهد بود. بنابراین، به توصیف سیستم مختصاتی نیازمندیم که جهت‌گیری آن همواره نسبت به دستگاه مختصات ENU یا NED ثابت باشد و به کمک آن بتوان وضعیت بدنه بالن را تعریف کرد. این سیستم مختصات را سیستم مختصات مرجع بالن²¹ نامیده و مبدأ آن را بر روی مرکز جرم بالن مفروض می‌کنیم. جهت محورهای دستگاه مختصات مرجع بالن همراستا با جهت محورهای دستگاه مختصات NED تعریف می‌شوند. این دستگاه مختصات به صورت شماتیک در شکل (۶) با رنگ مشکی نمایش داده شده است.

دستگاه مختصات بدنه بالن (BB)

پس از تعریف دستگاه مختصات مرجع بالن، حال نیاز به تعریف دستگاه مختصاتی داریم که بیانگر وضعیت بدنه بالن باشد. به این منظور دستگاه مختصاتی را به بدنه بالن متصل می‌کنیم به طوری که با تغییر وضعیت بدنه بالن، این دستگاه مختصات نیز تغییر جهت دهد.

دستگاه مختصات اینرسی (ECI)

طبق تعریف، مرکز یک دستگاه مختصات اینرسی¹⁸ نسبت به ستاره‌های دور دست، نباید شتاب گرفته و همینطور موقعیت چرخشی این دستگاه نسبت به ستاره‌های خیلی دور نباید تغییر یابد. مرکز این سیستم مختصات منطبق بر مرکز جرم زمین قرار داشته، محور X_I در جهت نقطه اعتدال بهاری، محور Z_I در جهت ستاره قطبی شمالی و محور Y_I نیز در جهتی تعریف می‌شود که این سیستم مختصات راستگرد باشد. از آنجاکه محور اعتدال بهاری یک محور ثابت اینرسی بوده و محور ستاره قطبی شمالی نیز ثابت است، این دستگاه مختصات دارای دوران نبوده و صرفاً مبدأ آن با حرکت کره زمین در فضا جابه‌جا خواهد شد اما به همراه دوران کره زمین حول خود، دورانی نخواهد داشت. سیستم مختصات اینرسی در شکل (۵) به صورت شماتیک نمایش داده شده است.

دستگاه مختصات ECEF

دستگاه مختصات زمین-مرکز-زمین ثابت که به دستگاه مختصات ECEF مشهور است به زمین چسبیده و همواره با دوران کره زمین حول خود می‌چرخد. مرکز این دستگاه مختصات منطبق بر مرکز کره زمین و محور X آن در راستای نصف‌النهار مبدأ قرار گرفته است. محور Z از این دستگاه مختصات نیز در جهت ستاره قطبی شمال در نظر گرفته می‌شود. در نهایت محور Y از این دستگاه مختصات نیز به گونه‌ای تعریف می‌شود که یک دستگاه مختصات سه محور عمود برهم راستگرد را تشکیل شود. در شکل (۵) این دستگاه مختصات با رنگ آبی به صورت شماتیک نمایش داده شده است.

دستگاه مختصات ناوبری جغرافیایی (ENU)

مرکز این دستگاه مختصات بر مرکز جرم شی مورد نظر بر روی سطح زمین منطبق است. محور X از این دستگاه مختصات در راستای شرق جغرافیایی، محور Z از این دستگاه مختصات در راستای شمال جغرافیایی و محور Y نیز عمود بر سطح زمین به سمت بالا (در خلاف جهت مرکز زمین) تعریف شده است. در شکل (۵) این دستگاه مختصات با رنگ سبز رنگ به صورت شماتیک نمایش داده شده است.

شایان ذکر است در راستای آنکه زنجیره دستگاه‌های مختصات (از دستگاه ECEF تا دستگاه آنتن متصل به مکانیزم نشانه‌روی) تکمیل شود، مرکز دستگاه مختصات ای-ان-یو¹⁹ باید در نقطه‌ای از سطح زمین در نظر گرفته شود که بالن در فراز آن نقطه قرار گرفته است. در مأموریت‌هایی که در آنها از بسترهای هوایی همچون هواپیما یا بالن استفاده می‌شود، از آنجاکه از نگاه ناظر اکثر اشیاء در پایین بستر هوایی وجود دارند، بنابراین معقول است که دستگاه مختصاتی تعریف شود

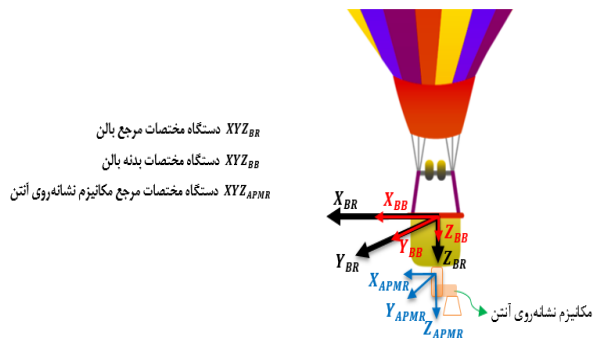
20. North-East-Down (NED)
21. Balloon Reference (BR)

18. Earth-Centered Inertial (ECI)
19. East-North-Up (ENU)

با تعریف دستگاه مختصات مینای APMR، مطابق با اصول دناویت-هارتنبگ برای تعریف دستگاه‌های مختصات مورد نیاز، به منظور آنکه بتوان وضعیت قرارگیری آنتن و در نتیجه راستای نشانه‌روی شده توسط بیم آنتن را بیان نمود، باید برای هر یک از مفصل‌های مکانیزم نشانه‌روی آنتن و همچنین برای آنتن متصل به مکانیزم دستگاه مختصاتی مناسب را تعریف کرد. در این راستا، برای هر یک از عملگرهای مکانیزم نشانه‌روی آنتن (موتور-۱ و موتور-۲) که مفصل‌های این مکانیزم به حساب می‌آیند و همچنین برای آنتن متصل به مکانیزم که نقش عملگر نهایی را بر عهده دارد، دستگاه‌های مختصات مناسبی تعریف می‌شود. دستگاه مختصات متصل به موتور-۱ را دستگاه M1²⁴ نامیده و مبدأ آن را در مرکز جرم موتور-۱ مفروض نموده و جهت محورهای آن را مطابق با قوانین D-H تعریف می‌نماییم. دستگاه مختصات M1 که در شکل (۷-الف) به صورت شماتیک نمایش داده شده است. تأثیر دوران ایجاد شده توسط موتور-۱ در جهت قوس افقی را بر جهت‌گیری آنتن اعمال می‌نماید.

دستگاه مختصات متصل به موتور-۲، دستگاه M2²⁵ نامیده شده که مبدأ آن در مرکز جرم موتور-۲ منطبق شده و جهت محورهای آن مطابق با قوانین D-H انتخاب شده‌اند. به کمک این دستگاه، اثر دوران‌های ایجاد شده توسط موتور-۲ در جهت قوس عمودی به راستای نشانه‌روی شده توسط بیم آنتن اعمال می‌شود. با تعریف دستگاه‌های مختصات M1 و M2، برای هر یک از مفصل‌های مکانیزم نشانه‌روی آنتن دستگاه مختصاتی مطابق با اصول دناویت-هارتنبگ تعریف شده است. دستگاه مختصات M2 که در شکل (۷-الف) به صورت شماتیک نمایش داده شده است. با در اختیار داشتن دستگاه‌های مختصات APMR، M1 و M2، به دستگاه مختصاتی نیاز است که به کمک آن بتوان راستای نشانه‌روی شده توسط آنتن را بیان نمود. این دستگاه مختصات را ANT نامیده و مبدأ آن در مرکز جرم آنتن لحاظ می‌کنیم. جهت محورهای این دستگاه مطابق با قوانین D-H لحاظ شده‌اند. همان‌طور که در شکل (۷-الف) مشاهده می‌شود، راستای محور Z از این دستگاه مختصات بیانگر جهتی که بیم آنتن به آن سمت نشانه‌روی کرده است. لازم به ذکر است که در شکل (۷-ب)، ساختار مکانیزم نشانه‌روی آنتن به همراه دستگاه‌های مختصات تعریف شده برای این مکانیزم به صورت ساده‌تر نمایش داده شده است. با این توصیف تمام دستگاه مختصات مورد نیاز تعریف شد و حال با استفاده از آن‌ها می‌توان مدل سینماتیکی مکانیزم نشانه‌روی آنتن را استخراج کرد.

چنین دستگاهی را دستگاه مختصات بدنه²² می‌نامیم و مبدأ آن را بر روی مرکز جرم بالن مفروض می‌کنیم. محورهای این دستگاه مختصات را نیز به نحوی تعریف می‌نماییم که در صورتی که بدنه بالن در وضعیت ایستا و مطلوب خود قرار داشته باشد (بدین معنی که به دلیل وجود اغتشاشاتی همچون باد، بدنه بالن در هوا از راستای عمودی خود منحرف نگردیده باشد)، دستگاه‌های مختصات بدنه و مرجع بالن بر روی یکدیگر منطبق شوند. لازم به ذکر است که مطابق تعریف‌های انجام شده، دستگاه مختصات مرجع بالن دستگاهی همواره نسبت به دستگاه ENU ثابت بوده که جهت محورهای آن به هیچ نحوی تغییر نمی‌یابد، اما دستگاه مختصات بدنه به بدنه بالن متصل شده است و همراه با تغییر وضعیت بدنه، محورهای آن تغییر جهت خواهند داد. در شکل (۶) دستگاه مختصات بدنه در کنار دستگاه مختصات مرجع با رنگ قرمز نمایش داده شده است.



شکل ۶- نمایش شماتیک دستگاه‌های مختصات مرجع بالن (BR)، بدنه بالن (BB) و مرجع مکانیزم نشانه‌روی آنتن (APMR)

دستگاه‌های مختصات متصل به مکانیزم نشانه‌روی آنتن

در راستای توصیف سیستم‌های مختصات مورد نیاز برای مکانیزم نشانه‌روی آنتن مطابق با اصول دناویت-هارتنبگ، اولین دستگاه مختصات مورد نیاز در محل اتصال مکانیزم نشانه‌روی آنتن به بدنه بالن باید قرار گیرد تا به عنوان مرجعی برای بیان وضعیت سایر بخش‌های مکانیزم نشانه‌روی آنتن (مفصل‌ها و آنتن) استفاده شود. چنین دستگاهی را دستگاه مختصات مرجع مکانیزم نشانه‌روی آنتن²³ نامیده، مبدأ آن را در محل اتصال مکانیزم به بالن مفروض و جهت محورهای آن را نیز هم‌راستا با جهت محورهای دستگاه مختصات BR تعریف می‌کنیم. دستگاه مختصات APMR در شکل (۶) به صورت شماتیک با رنگ آبی و همچنین در شکل (۷) نمایش داده شده است.

24. Motor-1 frame (M1)
25. Motor-2 frame (M2)

22. Balloon Body (BB)
23. Antenna Pointing Mechanism Reference (APMR)

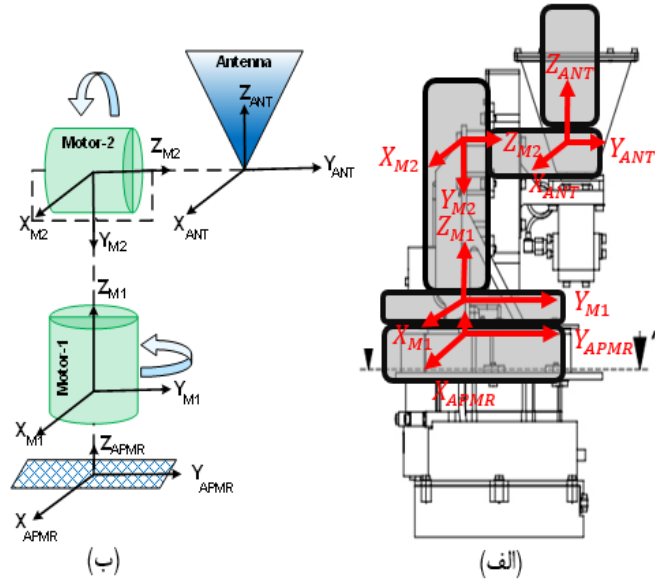
دستگاه مختصات مرجع مکانیزم نشانه‌روی آنتن XYZ_{ANTPR}

دستگاه مختصات متصل به موتور-۱ XYZ_{M1}

دستگاه مختصات متصل به موتور-۲ XYZ_{M2}

دستگاه مختصات متصل به شفت XYZ_{SHT}

دستگاه مختصات متصل به آنتن XYZ_{ANT}



شکل ۷- نمایش شماتیک دستگاه‌های مختصات توصیف شده برای مکانیزم نشانه‌روی آنتن مطابق با اصول دناویت هارتنبرگ

با استفاده از رابطه (۱) و جایگزین نمود پارامترهای دناویت- هارتنبرگ از جدول (۱) می‌توان تبدیل‌های میان سیستم‌های مختصات تعریف شده برای مکانیزم نشانه‌روی آنتن را به شکل معادله‌های (۲)-(۴) بدست آورد.

$${}^{APMR}{}_{M1}T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0.07 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^{M1}{}_{M2}T = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & -\sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0.111 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^{M2}{}_{ANT}T = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & 0 & \sin \theta_2 & 0 \\ \sin \theta_2 & 0 & -\cos \theta_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0.085 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

که در این روابط، θ_1 و θ_2 به ترتیب بیانگر دوران ناشی از موتور-۱ و موتور-۲ می‌باشند. برای استخراج تبدیل کلی ${}^{APMR}{}_{ANT}T$ با ضرب متوالی ماتریس‌های تبدیل بدست آمده در روابط (۲)-(۴) خواهیم داشت:

$${}^{APMR}{}_{ANT}T = {}^{APMR}{}_{M1}T {}^{M1}{}_{M2}T {}^{M2}{}_{ANT}T = \begin{bmatrix} c\theta_1 c\theta_2 & -s\theta_1 & c\theta_1 s\theta_2 & -0.085 s\theta_1 \\ s\theta_1 c\theta_2 & c\theta_1 & s\theta_1 s\theta_2 & 0.085 c\theta_1 \\ -s\theta_2 & 0 & c\theta_2 & 0.181 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

در رابطه (۵) پارامترهای s و c به ترتیب بیانگر مخفف توابع \sin و \cos هستند. بدین صورت تبدیل میان دستگاه متصل به آنتن و دستگاه مرجع مکانیزم مطابق معادله (۵) بدست آمد.

مدل‌سازی سینماتیکی

در بخش قبل به تعریف دستگاه‌های مختصات مناسب برای مکانیزم نشانه‌روی آنتن پرداخته شد. همان‌طور که بیان شد، هر مکانیزم را می‌توان به صورت سینماتیکی با چهار کمیت $(d_i, \theta_i, \alpha_i, a_i)$ تعریف نمود. چهار پارامتر مورد نیاز برای تعریف سینماتیکی مکانیزم نشانه‌روی آنتن مورد بررسی در این مقاله، با توجه به دستگاه‌های مختصات تعریف شده و مشخصات ساختاری مکانیزم نشانه‌روی آنتن SSTL در شکل (۳) به صورت ارایه شده در جدول (۱) هستند.

جدول ۱- کمیت‌های معرف سینماتیک مکانیزم نشانه‌روی آنتن

i	a_{i-1}	α_{i-1}	d_i	θ_i
۱	۰	۰	۰/۷۰	۰
۲	۰	$-\frac{\pi}{2}$	۰/۱۱۱	θ_1
۳	۰	$\frac{\pi}{2}$	۰/۰۸۵	θ_2

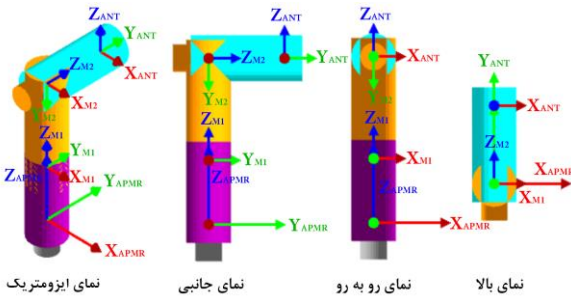
ماتریس‌های تبدیل میان دستگاه‌های مختصات

مطابق با اصول نمادگذاری دناویت- هارتنبرگ، ماتریس تبدیل همگن از دستگاه مختصات دلخواه B_i به دستگاه مختصات دلخواه B_{i-1} توسط رابطه زیر به دست می‌آید [۲۱-۲۲].

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

اعتبارسنجی مدل سینماتیکی

در این بخش به منظور اعتبارسنجی مدل سینماتیکی استخراج شده برای مکانیزم نشانه‌روی آنتن دو درجه آزادی SSTL، از نرم‌افزار روبوآنالیزر [۲۳] و همچنین جعبه ابزار رباتیک نرم‌افزار متلب [۲۴] استفاده می‌شود. با تعریف پارامترهای D-H استخراج شده در جدول (۱) در نرم‌افزار روبوآنالیزر، این نرم‌افزار مدل مکانیزم نشانه‌روی آنتن را مطابق با شکل (۸) تولید می‌کند. همان‌طور که با مقایسه خروجی این نرم‌افزار در شکل (۸) و ساختار مکانیزم نشانه‌روی آنتن SSTL در شکل (۳) می‌توان مشاهده کرد، مدل استخراج شده برای مکانیزم نشانه‌روی صحیح می‌باشد. در این شکل مکانیزم نشانه‌روی آنتن مدل شده در نرم‌افزار روبوآنالیزر از نماهای ایزومتریک، جانبی، روبه‌رو و بالا نمایش داده شده است.



شکل ۸ - مدل سینماتیکی مکانیزم نشانه‌روی آنتن SSTL در نرم‌افزار روبوآنالیزر

به‌منظور بررسی بیشتر، با تعریف یک مسیر مرجع دلخواه برای موتور-۱ و موتور-۲ که به عنوان مفصل‌های مکانیزم هستند، عملکرد مکانیزم نشانه‌روی آنتن را در جهت‌دهی بیم آنتن مطالعه می‌نماییم. بدین منظور با در نظر گرفتن زاویه دوران اولیه موتور-۱ و موتور-۲ برابر با صفر و همچنین تعریف زاویه دوران نهایی ۹۰ و ۹۰- به ترتیب برای موتور-۱ و موتور-۲، عملکرد مکانیزم در جهت‌دهی آنتن به صورت نمایش داده شده در شکل (۹) حاصل می‌شود. لازم به ذکر است که در این شکل محور Z_{ANT} بیانگر راستای بیم آنتن متصل به مکانیزم نشانه‌روی آنتن می‌باشد.

همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، تأثیر زوایای چرخش موتور-۱ و موتور-۲ در جهت‌دهی بیم آنتن با عملکرد واقعی مکانیزم نشانه‌روی آنتن SSTL مطابق است که این مسئله صحت مدل سینماتیکی استخراج‌شده در این پژوهش را نمایش می‌دهد. توجه به این نکته لازم است که محور Z_{ANT} بیانگر راستای جهت‌گیری شده توسط بیم آنتن متصل به مکانیزم است. در این سناریو، زوایای اختیارشده توسط موتور-۱ و موتور-۲ از مکانیزم نشانه‌روی آنتن و همچنین موقعیت آنتن در دستگاه مختصات APMR در نرم‌افزار روبوآنالیزر به ترتیب به صورت نمایش داده شده در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) حاصل شده است.

از آنجا که دستگاه‌های مختصات بدنه بالن (BB) و مرجع مکانیزم نشانه‌روی آنتن (APMR) هر دو دارای محورهای هم جهت بوده و فقط مبدا آنها متفاوت است، بنابراین ماتریس تبدیل میان دستگاه مختصات بدنه بالن و دستگاه پایه مکانیزم نشانه‌روی آنتن نیز به شکل زیر تعریف می‌شود:

$${}_{APMR}^{BBT} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۶)$$

ماتریس تبدیل میان دستگاه مختصات بدنه بالن (BB) و دستگاه مختصات مرجع بالن (BR) نیز به شکل زیر تعریف می‌شود:

$${}_{BB}^{BRT} = \begin{bmatrix} c\xi c\zeta & -c\xi s\zeta & s\xi \\ s\xi s\zeta c\zeta + c\xi s\zeta & -s\xi s\zeta s\zeta + c\xi c\zeta & -s\xi c\xi \\ -c\xi s\zeta c\zeta + s\xi s\zeta & c\xi s\zeta s\zeta + s\xi c\zeta & c\xi c\xi \end{bmatrix} \quad (۷)$$

که در رابطه فوق پارامترهای s و c به ترتیب بیانگر مخفف توابع \sin و \cos هستند و پارامترهای ξ ، ζ و ζ نیز به ترتیب بیانگر زوایای دوران بدنه بالن حول محورهای X_{BR} ، Y_{BR} و Z_{BR} از دستگاه مختصات مرجع بالن (BR) می‌باشند. رابطه انتقال میان دستگاه‌های مختصات مرجع بالن و ENU به صورت زیر می‌باشد [۱۷]:

$$R_{ENU} = {}_{ENU}^{ECEFT} R_{ECEFT} + \rho \quad (۸)$$

که در رابطه (۸)، R_{ENU} و R_{ECEFT} به ترتیب بیانگر بردارهای موقعیت بیان شده در دستگاه‌های مختصات ENU و ECEF بوده، ${}_{ENU}^{ECEFT}$ بیانگر ماتریس دوران میان این دو دستگاه مختصات و ρ نیز بیانگر بردار انتقال مبدا میان این دو دستگاه مختصات می‌باشند. ${}_{ENU}^{ECEFT}$ و ρ دارای تعاریف زیر هستند [۱۷]:

$${}_{ENU}^{ECEFT} = \begin{bmatrix} -\sin\Delta & \cos\Delta & 0 \\ -\sin\Delta\cos\Lambda & -\sin\Delta\sin\Lambda & \cos\Delta \\ \cos\Delta\cos\Lambda & \cos\Delta\sin\Lambda & \sin\Delta \end{bmatrix} \quad (۹)$$

$$\rho = \begin{bmatrix} X_U \sin\Delta - Y_U \cos\Delta \\ X_U \sin\Delta\cos\Lambda - Y_U \sin\Delta\sin\Lambda - Z_U \cos\Delta \\ -X_U \cos\Delta\cos\Lambda - Y_U \cos\Delta\sin\Lambda - Z_U \sin\Delta \end{bmatrix} \quad (۱۰)$$

که در رابطه (۱۰)، X_U ، Y_U و Z_U بیانگر مولفه‌های موقعیت بالن بوده و Δ و Λ نیز به ترتیب بیانگر طول جغرافیایی و عرض جغرافیایی محلی بالن می‌باشند. بدین ترتیب ارتباط میان دستگاه‌های مختصات ECEF و NED نیز تشریح شد. در نهایت ماتریس تبدیل میان دستگاه‌های مختصات NED و ENU نیز به شکل زیر تعریف می‌شود [۱۷]:

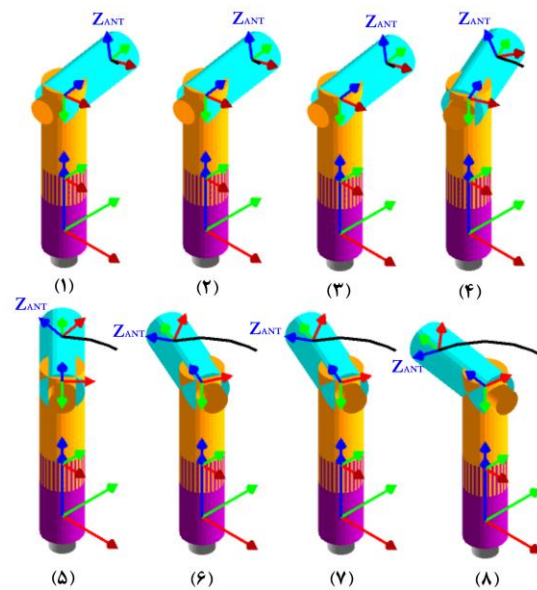
$${}_{NED}^{ENU} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (۱۱)$$

بدین ترتیب، تمامی ماتریس‌های تبدیل میان دستگاه‌های مختصات نمایش داده شده در شکل‌های (۵) تا (۷) توصیف شدند.

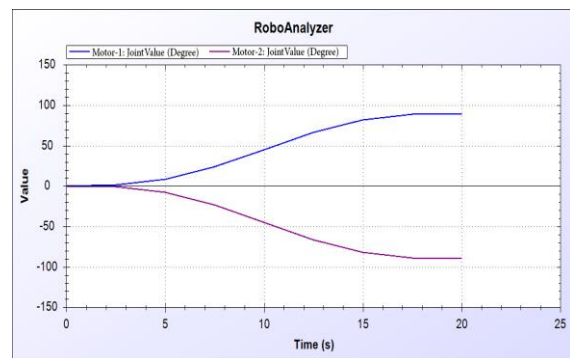


شکل ۱۱- مؤلفه‌های موقعیتی آنتن نسبت به دستگاه APMR در مسیر مرجع شکل (۹)

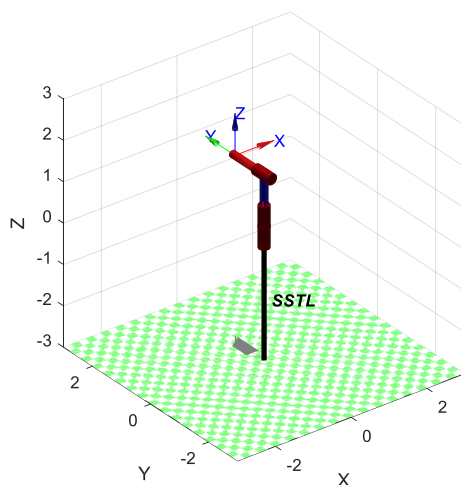
با توضیحات ارائه شده، مدل سینماتیکی استخراج شده برای مکانیزم نشانه‌روی آنتن SSTL توسط نرم‌افزار رובوآنالیزر مورد تأیید قرار گرفت. به‌منظور بررسی بیشتر، مدل استخراج شده در این پژوهش توسط جعبه ابزار روباتیک نرم‌افزار متلب نیز مورد صحت‌سنجی قرار می‌دهیم. با تعریف پارامترهای D-H استخراج شده در جدول (۱) در این جعبه ابزار، خروجی مدل سینماتیکی به صورت نمایش داده شده در شکل (۱۲) حاصل می‌شود. شایان ذکر است که در انجام شبیه‌سازی بخش (الف) از این شکل، زوایای دوران موتور-۱ و موتور-۲ به ترتیب برابر با $\theta_1 = 0^\circ$ و $\theta_2 = 0^\circ$ ، در بخش (ب) برابر با $\theta_1 = 30^\circ$ و $\theta_2 = 0^\circ$ ، در بخش (ج) برابر با $\theta_1 = 0^\circ$ و $\theta_2 = 30^\circ$ و در نهایت در بخش (د) برابر با $\theta_1 = 45^\circ$ و $\theta_2 = 45^\circ$ اختیار شده‌اند. همان‌طور که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود، تأثیر زوایای موتور-۱ و موتور-۲ در جهت‌گیری آنتن متصل به مکانیزم نشانه‌روی آنتن SSTL به‌طور کامل مطابقت دارد و بنابراین مدل سینماتیکی استخراج شده برای مکانیزم نشانه‌روی آنتن SSTL توسط جعبه ابزار روباتیک نرم‌افزار متلب نیز مورد تأیید قرار می‌گیرد.



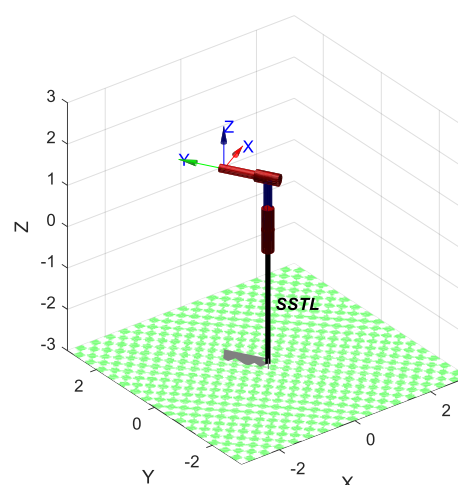
شکل ۹- تغییر جهت‌گیری بیم آنتن با توجه به دوران موتور-۱ و موتور-۲ در نرم‌افزار روبوآنالیزر



شکل ۱۰- زوایای دورانی اختیار شده توسط موتور-۱ و موتور-۲ در مسیر مرجع شکل (۹)

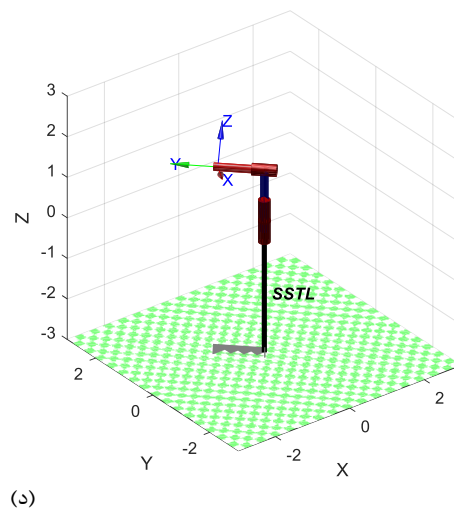
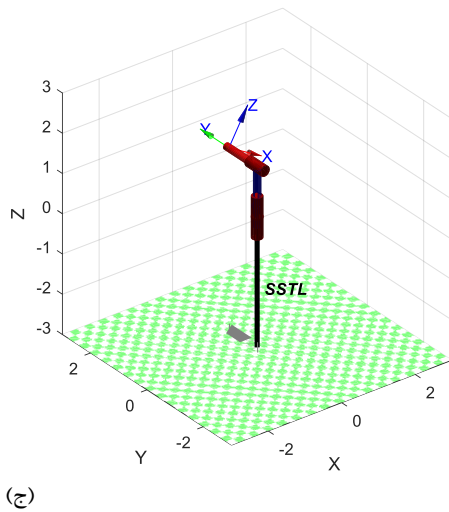


(الف)



(ب)

شکل ۱۲- عملکرد مکانیزم نشانه‌روی آنتن مدل شده در جعبه ابزار روباتیک نرم‌افزار متلب



ادامه شکل ۱۲- عملکرد مکانیزم نشانه‌روی آنتن مدل شده در جعبه ابزار روباتیک نرم‌افزار متلب

باشد، بردارهای $Beam_{APMR}$ و $Target_{APMR}$ باید بر یکدیگر منطبق باشند. بدین منظور با توجه به رابطه (۱۲) می‌توان نوشت:

$$\cos \theta_2 = Z_R \Rightarrow \theta_2 = \cos^{-1} Z_R \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} \cos \theta_1 \sin \theta_2 &= X_R \\ \sin \theta_1 \sin \theta_2 &= Y_R \end{aligned} \right\} \Rightarrow \tan \theta_1 = \frac{Y_R}{X_R} \Rightarrow \theta_1 = \tan^{-1} \frac{Y_R}{X_R} \quad (14)$$

روابط (۱۳) و (۱۴) بیانگر معادلات سینماتیک وارون مکانیزم نشانه‌روی آنتن هستند. با در اختیار داشتن مسیرهای مرجع مربوط به خودروهای هدف، روابط (۱۳) و (۱۴) بیان می‌کنند برای آنکه بیم آنتن مسیر مرجع را دنبال کند، زوایای عملگرهای مکانیزم یعنی θ_1 و θ_2 باید چه مقادیری را اختیار کنند.

فضای کار مکانیزم نشانه روی آنتن

فضای کاری^{۲۶} یک مکانیزم یا روبات در واقع فضایی را توصیف می‌کند که مکانیزم با تمام درجات آزادی در اختیار خود در مفصل‌ها قادر است المان متصل به عملگر نهایی مکانیزم که در این مقاله یک آنتن است را در آن موقعیت قرار دهد. چنین فضایی در واقع بیان می‌کند که مسیر مرجع می‌تواند در چه محدوده‌ای فضا تعریف شود. در این بخش فضای کاری مکانیزم نشانه‌روی آنتن مدل شده در این مقاله نمایش داده شده است. با در نظر گرفتن ساختار مکانیزم نشانه‌روی آنتن SSTL که در آن آنتن به شفتی با طول ۴۰ متصل شده است، فضای کاری مکانیزم به صورت نمایش داده شده در تصاویر فوقانی (نمای جانبی و نمای بالا) از شکل (۱۳) است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، فضایی کاری مکانیزم دارای ساختاری شبه-استوانه است که مرکز آن در فضای کاری وجود ندارد.

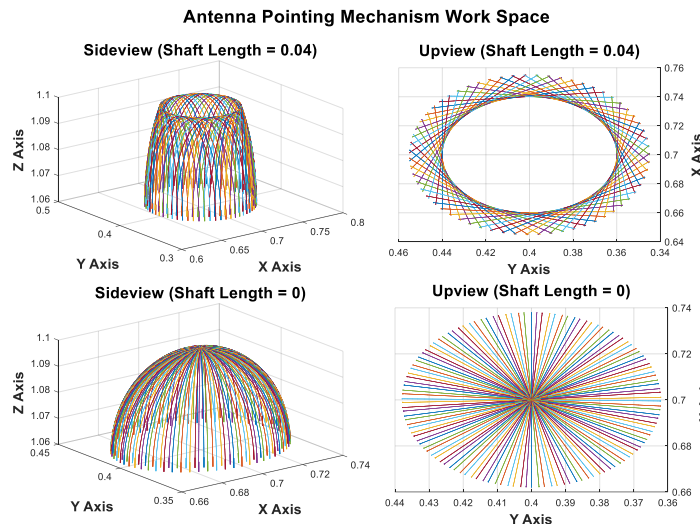
سینماتیک وارون مکانیزم نشانه‌روی آنتن

به منظور استخراج مسیرهای مرجع مناسب برای عملگرهای مکانیزم نشانه‌روی آنتن به نحوی که بیم آنتن قادر به ردیابی مسیر مرجع مربوط به خودروهای هدف باشد، باید معادلات سینماتیک وارون مکانیزم نشانه‌روی آنتن را در اختیار داشت. معادلات سینماتیک وارون در واقع بیان می‌کنند که به منظور آنکه بیم آنتن به سمت یک هدف معین جهت‌دهی شود، هر یک از عملگرهای مکانیزم (موتور-۱ و موتور-۲) باید چه زوایایی را اختیار کنند. با توجه به شکل (۷)، جهت بیم آنتن منطبق بر بردار واحد $[0 \ 0 \ 1]^T$ از دستگاه مختصات متصل به آنتن (ANT) است. به منظور استخراج معادلات سینماتیک وارون، این بردار واحد که بیانگر جهت‌گیری بیم آنتن است، با استفاده از رابطه (۵) به دستگاه مختصات مرجع مکانیزم نشانه‌روی آنتن (APMR) منتقل می‌شود که نتیجه این انتقال به صورت زیر است:

$$Beam_{APMR} = {}^{APMR}_{ANT}T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \sin \theta_2 \\ \sin \theta_1 \sin \theta_2 \\ \cos \theta_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)، $Beam_{APMR}$ بیانگر بردار نشانه‌روی بیم آنتن بیان شده در در دستگاه مختصات مرجع مکانیزم نشانه‌روی آنتن می‌باشد. از سوی دیگر، فرض کنید که مسیر مرجع مربوط به خودروهای هدف با استفاده از روابط (۶) تا (۱۱) از دستگاه مختصات ECEF به دستگاه مختصات مرجع مکانیزم نشانه‌روی آنتن منتقل شده باشد و پس از نرمال‌سازی به صورت $Target_{APMR} = [X_R \ Y_R \ Z_R]^T$ نمایش داده شود. در راستای آنکه جهت نشانه‌روی بیم آنتن منطبق بر مسیر مرجع مربوط به خودروهای هدف

مکانیزم با در نظر گرفتن طول شفت صفر، نشان داده شده است. همان طور که از این شکل ها می توان دریافت، اگر طول شفت صفر باشد، فضای کاری دارای ساختاری شبه-کره خواهد بود که تمام ناحیه حول مکانیزم را پوشش خواهد داد.



شکل ۱۳- فضای کاری مکانیزم نشانه روی آنتن با طول شفت صفر و ۰/۰۴

روش های متعددی برای بیان ماتریس ممان اینرسی وجود دارد که در این مقاله از بیان استفاده شده در مراجع [۳۵-۳۹] استفاده می شود. فرض کنید که زیر-ماتریس های ممان اینرسی^{۲۷} مربوط به بخش های دوران ساز قوس افقی و قوس عمودی از مکانیزم نشانه روی آنتن به ترتیب به صورت روابط (۱۸) و (۱۹) باشند.

$$J_{Azimuth-Part} = \begin{bmatrix} J_{axx} & 0 & 0 \\ 0 & J_{ayy} & 0 \\ 0 & 0 & J_{azz} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$J_{Elevation-Part} = \begin{bmatrix} J_{exx} & 0 & 0 \\ 0 & J_{eyy} & 0 \\ 0 & 0 & J_{ezz} \end{bmatrix} \quad (19)$$

که در این روابط با توجه به تقارن هندسی بخش های دوران ساز قوس افقی و قوس عمودی، ممان های اینرسی جانبی (J_{ayz} , J_{axz} , J_{axy})، J_{eyz} , J_{exz} , J_{exy}) ناچیز بوده و برابر صفر لحاظ شده اند. ماتریس ممان اینرسی مکانیزم نشانه روی آنتن $M(\theta)$ به صورت رابطه (۲۰) بیان می شود [۴۰-۴۲].

$$M(\theta) = \begin{bmatrix} 0.17 + J_{ayy} + J_{ezz} \cos^2 \theta_2 + J_{exx} \sin^2 \theta_2 & 0 \\ 0 & J_{eyy} \end{bmatrix} \quad (20)$$

ماتریس نیروهای کوریولیس، گریز از مرکز و ژيروسکوپ $C(\theta, \dot{\theta})$ نیز به صورت زیر تعریف می شود [۴۱]:

$$C(\theta, \dot{\theta}) = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_2 (J_{exx} - J_{ezz}) \sin \theta_2 \cos \theta_2 & \dot{\theta}_1 (J_{exx} - J_{ezz}) \sin \theta_2 \cos \theta_2 \\ \dot{\theta}_1 (J_{ezz} - J_{exx}) \sin \theta_2 \cos \theta_2 & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

این موضوع از وجود شفت در ساختار مکانیزم SSTL ناشی می شود. از آنجاکه آنتن متصل به مکانیزم دارای پهنای بیم است، این فضای تهی توسط بیم آنتن پوشش داده می شود و بنابراین این موضوع خدشه ای در فضای تحت پوشش آنتن ایجاد نخواهد کرد. در تصاویری که در بخش های زیرین شکل (۱۳) نمایش داده شده، فضای کاری

مدل دینامیکی مکانیزم نشانه روی آنتن

در این بخش، به بیان دینامیک مکانیزم نشانه روی آنتن پرداخته می شود. دینامیک مکانیزم نشانه روی آنتن مورد بحث در این مقاله که دارای دو مفصل لولایی (که از دو موتور DC به عنوان عملگر استفاده می کنند) را می توان با توجه به مدل لاگرانژ مکانیزم های روباتیکی کابل-محور [۲۵-۲۹] به صورت رابطه های (۱۶) و (۱۷) بیان کرد [۳۰-۳۴]:

$$(M(\theta) + r^2 J_m) \ddot{\theta} + (C(\theta, \dot{\theta}) + r^2 B_m) \dot{\theta} + G(\theta) = r K_r I \quad (16)$$

$$L \dot{I} + R I + K_m \dot{\theta} = u \quad (17)$$

در این روابط، $\theta \in \mathbb{R}^2$ بیانگر برداری از زوایای مفصل های مکانیزم یعنی θ_1 و θ_2 بوده، $I \in \mathbb{R}^2$ بیانگر بردار جریان آرمیچر موتورهای DC مکانیزم، $u \in \mathbb{R}^2$ بیانگر بردار ولتاژ آرمچر موتورهای DC مکانیزم، $M(\theta)$ بیانگر ماتریس ممان اینرسی مکانیزم نشانه روی آنتن، $C(\theta, \dot{\theta})$ بیانگر ماتریس نیروهای کوریولیس، گریز از مرکز و ژيروسکوپ، $G(\theta)$ بردار نیروی گرانش، J_m ماتریس ممان اینرسی عملگرهای مکانیزم، B_m ماتریس قطری ترم های میراساز، K_r ماتریس تبدیل الکترومکانیکی میان جریان و ولتاژ، r نسبت دنده، L ماتریس القای موتور، R ماتریس مقاومت موتور و K_m نیز ماتریس مشخصه ولتاژ ثابت موتورهای مکانیزم می باشند.

از ۱۰ برابر افزایش یافته است. در ادامه این راه که در قالب بخش دوم این مقاله منتشر خواهد شد، با استفاده از نتایج بدست آمده در این مقاله به استخراج معادلات مورد نیاز برای طراحی مسیر مرجع نشانده‌ی آنتن، طراحی مدهای عملیاتی مکانیزم نشانده‌ی و طراحی کنترل‌کننده مناسب پرداخته خواهد شد.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

مراجع

- [1] S. A. Khaleefa, S. H. Alsamhi, and N. S. Rajput, "Tethered balloon technology for telecommunication, coverage and path loss" *IEEE Electrical, Electronics and Computer Science (SCECS) conference*, pp. 1-4, 2014.
- [2] A.A. Kanoria, R. S. Pant, "Winged aerostat systems for better station keeping for aerial surveillance", *International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (CMAE 2011)*, pp. 273-277, 2011.
- [3] P. Bilaye, V. N. Gawande, U. B. Desai, "Low cost wireless internet access for rural area using tethered aerostat", *3rd International Conference on Industrial and Information System*, pp. 1-5, Dec 2008.
- [4] P. Chopra, Rmanchanda, Rmehrotra, S.jain, "A new technology for telecom and broadband Services in spars, remote and hilly area", *WSEAS transactions on communication*, vol. 10, Issue. 9, 2011.
- [5] J. Hall, "A Survey of Titan Balloon Concepts and Technology Status", *11th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, 2011.
- [6] S. H. Alsamhi, F. A. Almalki, O. Ma, M. S. Ansari and M. C. Angelides, "Correction to: Performance optimization of tethered balloon technology for public safety and emergency communications", *Journal of Telecommunication Systems*, 2019.
- [7] D. Grace, M. Mohorcic, M. Oodo, M. Capstick, M. B. Pallavicini, and M. Lalovic, "CAPANINA communications from aerial platform networks delivering broadband information for all," *Proceedings of the 14th IST Mobile and Wireless and Communications Summit*, 2005.
- [8] A.A. Raina, "Conceptual Design of High Altitude Aerostat for Studying Snow Patterns", *International Symposium on Snow and Avalanches: Processes & effects of global climatic change ISSA*, 2009.
- [9] A. Raina, "Enhanced methodology for arriving at the baseline specifications of a non-rigid airship", *18th AIAA Lighter-Than-Air (LTA) Systems Technology Conference*, USA, 2009.
- [10] P. Bilaye, V. Gawande, U. Desai, A. Raina, and R. Pant, "Low cost wireless internet access for rural areas using tethered aerostats," in *Industrial and Information Systems, IEEE Third International Conference on ICIS*, pp. 1-5, 2008.
- [11] L. Coy, M. R. Schoeberl, S. Pawson, and R. W. Carver, "Global assimilation of Loon stratospheric balloon observations", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019.
- [12] R. M. P. K. Chopra, R. Mehrotra, S. Jain, "A New Topology for Telecom and Broad Band Services in Spars, Remote and Hilly Areas", *WSEAS Transactions on*

بردار نیروی گرانش $G(\theta)$ نیز به صورت زیر تعریف می‌شود [۴۰-۴۲]:

$$G(\theta) = \begin{bmatrix} 0 \\ k_g \sin \theta_2 \end{bmatrix} \quad (22)$$

با انتخاب متغیرهای حالت $x_4 = \alpha_3 = I_1$, $x_2 = \theta_1$, $x_1 = \theta_1$ و $x_5 = \theta_2$, $x_6 = I_2$ و معادلات (۱۶) و (۱۷) را در می‌توان به فرم فضای حالت زیر نوشت:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{[-x_2 x_5 (J_{exx} - J_{ezz}) \sin(2x_4) - x_2 r^2 B_{m1} + r K_{r1} x_3]}{0.17 + J_{ayy} + J_{exx} \sin^2(x_4) + J_{ezz} \cos^2(x_4) + r^2 J_{m1}} \\ \dot{x}_3 = \frac{-R_1 x_3 - K_{m1} x_2 + u_1}{L_1} \\ \dot{x}_4 = x_5 \\ \dot{x}_5 = \frac{[-x_5^2 \left(\frac{J_{ezz} - J_{exx}}{2}\right) \sin(2x_4) - r^2 B_{m2} x_5 - K_g \sin(x_4) + r K_{r2} x_6]}{J_{eyy} + r^2 J_{m2}} \\ \dot{x}_6 = \frac{-R_2 x_6 - K_{m2} x_5 + u_2}{L_2} \end{cases} \quad (23)$$

که رابطه (۲۳) مدل دینامیکی مکانیزم نشانده‌ی آنتن SSTL شامل دینامیک عملگرهای مکانیزم در فضای حالت توصیف می‌کند.

نتیجه گیری

در این مقاله با هدف پوشش‌دهی وسیع یک منطقه در شرایط اورژانسی جهت برقراری ارتباط مخابراتی میان دو خودروی هدف توسط یک بالن مقید، به معرفی ساختار یک بالن مجهز به مکانیزم نشانده‌ی آنتن پرداخته شد. هدف از طراحی ساختار بالن معرفی شده آن است با در اختیار داشتن بردارهای موقعیتی خودروها به کمک حسگرهای GPS، مکانیزم نشانده‌ی آنتن قادر به جهت‌دهی آنتن به سمت خودروهای هدف باشد تا بدین ترتیب ارتباط مخابراتی میان خودروها برقرار شود. از آنجا که حسگرهای GPS، بردارهای موقعیت خودروها را در دستگاه مختصات ECEF بیان می‌نمایند، به منظور آنکه بتوان بیم آنتن متصل به بالن را به نحوی جهت‌دهی نمود که به سمت خودروها نشانده‌ی آنتن، لازم است تا ارتباط معناداری میان دستگاه مختصات متصل به آنتن و دستگاه ECEF ایجاد شود. در این راستا، دستگاه‌های مختصات مورد نیاز میان این دو دستگاه تعریف شده و ماتریس‌های تبدیل میان آنها استخراج شد. همچنین، در این مقاله به مدل‌سازی سینماتیک مستقیم و وارون مکانیزم نشانده‌ی آنتن پرداخته شد تا با استفاده از آنها بتوان مسیر مرجع مناسب برای جهت‌دهی آنتن متصل به بالن را تولید نمود. مدل سینماتیکی مکانیزم نشانده‌ی آنتن استخراج شده در این پژوهش، توسط نرم‌افزار روبوآنالیزر و همچنین جعبه ابزار روباتیک نرم‌افزار متلب مورد اعتبارسنجی قرار گرفت و تأیید شد. در نهایت، با نمایش فضای کاری مکانیزم نشانده‌ی آنتن مدل شده، نشان داده شد که با استفاده از ساختار بالن مجهز به مکانیزم نشانده‌ی آنتن معرفی شده، مهم‌ترین عیب استفاده از بستر بالن‌های مقید برای کاربردهای مخابراتی که ناحیه تحت پوشش کوچک می‌باشد مرتفع می‌شود، به طوری که ناحیه تحت پوشش در این ساختار نسبت به بالن‌های مقید فاقد مکانیزم نشانده‌ی آنتن، بیش

- network”, *International Journal of Control, Automation and Systems*, Vol. 15, pp. 952–958, 2017.
- [31] S. Mobayen, F. Tchier and L. Ragoub, “Design of an adaptive tracker for n-link rigid robotic manipulators based on super-twisting global nonlinear sliding mode control”, *International Journal of Systems Science*, Vol. 48, No. 9, pp. 1990-2002, 2017.
- [32] Z. Qiu, C. Li and X. Zhang, “Experimental study on active vibration control for a kind of two-link flexible manipulator”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 118, pp. 623-644, 2019.
- [33] Y. Wang, B. Li, F. Yan and B. Chen, “Practical adaptive fractional-order nonsingular terminal sliding mode control for a cable-driven manipulator”, *International Journal of Robust Nonlinear Control*, Vol. 29, pp. 1396–1417, 2019.
- [34] A. Xiao and S. Yin, “Exponential Tracking Control of Robotic Manipulators With Uncertain Dynamics and Kinematics”, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 2, pp. 689-698, 2019.
- [35] X. Yang, S. Ge and W. He, “Dynamic modelling and adaptive robust tracking control of a space robot with two-link flexible manipulators under unknown disturbances”, *International Journal of Control*, Vol. 91, No. 4, pp. 969-988, 2018.
- [36] S. Yi and J. Zhai, “Adaptive second-order fast nonsingular terminal sliding mode control for robotic manipulators”, *ISA Transactions*, Vol. 90, pp. 41-51, 2019.
- [37] V. Sangveraphunsiri and K. Malithong. “Robust Inverse Dynamics and Sliding Mode Control for Inertial Stabilization Systems”, *Asian International Journal of Science and Technology*, in Production and Manufacturing Engineering, 2009.
- [38] Ekstrand and Bertil, “Equations of motion for a two-axes gimbal system.” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 37, no. 3, 2001.
- [39] P.J. Kennedy and R.L. Rhonda, “Direct versus indirect line of sight (LOS) stabilization”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 11, no. 1, 2003.
- [40] S. B. Kim, S. H. Kim, and Y. K. Kwak, “Robust control for a twoaxis gimbaled sensor system with multivariable feedback systems”, *IET Control Theory & Applications*, vol. 4, no. 4, 2010.
- [41] J. Mendez and et al, “Design of A Three–Axis Rotary Platform” Florida Conference on Recent Advances in Robotics–FCRAR, 2010.
- [42] R. Jahanandish, A. Khosravifard and R. Vatankhah, “Determination of uncertain parameters of a two-axis gimbal and motion tracking via Fuzzy logic control approach”, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, vol. 39, no. 5, pp. 6565-6577, 2020.
- [43] M. Khayatian and M.M. Arefi, “Adaptive dynamic surface control of a two-axis gimbal system”, *IET Science, Measurement & Technology*, 2016.
- [44] P. Wongkamchang and V. Sangveraphunsiri, “Control of Inertial Stabilization Systems Using Robust Inverse Dynamics Control and Adaptive Control”, *International Journal of Science and Technology*, Vol. 131, No. 2, 2008.
- [13] Communication, vol. 10, pp. 273-286, 2011.
- [14] S. H. Alsamhi, S. K. Gupta and N. S. Rajput, “Performance evaluation of broadband service delivery via tethered balloon technology”, 11th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS), 2016.
- [15] Ferris M. and Phillips N. The Use and Advancement of an Affordable, Adaptable Antenna Pointing mechanism. 14th European Space Mechanisms & Tribology Symposium, Germany, 2011.
- [16] Data Sheet: www.sstl.co.uk/getattachment/8627793a-3713-4bca-a720-9b28d8d06748/
- [17] High-Gain-X-Band-Antenna-Pointing-Mechanism
- [18] Data Sheet: www.space-airbuds.com/en/equipment/antenna-pointing-mechanismequipment-n5x.html
- [19] M. Fathi, J. Ranjbar "Kinematic modeling of a pointing mechanism on a two-degree-of-freedom antenna to establish telecommunication communication between two vehicles in emergency situations using a tethered balloon platform," presented at the 5th National Conference of Electrical and Mechatronics Engineering of Iran, Khwaja Nasiruddin Tosi University of Technology, December 2018 (in persian).
- [20] K S Fu, Ralph Gonzalez, C S G Lee, “Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence”, Tata McGraw-Hill, pp. 12 – 20, 2008.
- [21] Jolly Atit Shah, S.S. Rattan, B.C. Nakra, “End-Effector Position Analysis Using Forward Kinematics For 5 DOF Pravak Robot Arm”, *International Journal of Robotics and Automation (IJRA)*, Vol. 2, No. 3, pp. 112-116, September 2013.
- [22] John J. Craig, *Introduction to Robotics Mechanics and Control*, Third edition, McGraw-Hill, 2005.
- [23] Z. Ju, C. Yang and H. Ma, “Kinematics Modeling and Experimental Verification of Baxter Robot”, *IEEE International Symposium on Control*, 2014.
- [24] R.R. Serrezuela, A.F.C. Chavarro and M.A.T. Cardozo, “Kinematic Modeling of a Robotic Arm Manipulator Using Matlab”, *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 12 (7), 2017.
- [25] V. Gupta, R. G. Chittawadigi S. K. and Saha, “RoboAnalyzer: Robot Visualization Software for Robot Technicians,” *Advances in Robotics (AIR2017)*, 2017.
- [26] P.I. Corke, *Robotics, Vision & Control: Fundamental Algorithms in MATLAB*. Second edition. Springer, 2017. ISBN 978-3-319-54413-7.
- [27] Y. Wang, J. Chen, F. Yan, K. Zhu and B. Chen, “Adaptive super-twisting fractional-order nonsingular terminal sliding mode control of cable-driven manipulators”, *ISA Transactions*, Vol. 86, pp. 163-180, 2019.
- [28] A. Izadbakhsh and S. Khorashadizadeh, “Robust task-space control of robot manipulators using differential equations for uncertainty estimation”, *Robotica*, Vol. 35, No. 9, pp. 1923 – 1938, 2017.
- [29] A. Izadbakhsh, “FAT-based robust adaptive control of electrically driven robots without velocity measurements”, *Journal of Nonlinear Dynamics*, Vol. 89, pp. 289–304, 2017.
- [30] S. Jung, “Stability analysis of reference compensation technique for controlling robot manipulators by neural