



Available in:
Journal.isrc.ac.ir

Journal of Space Science,
Technology & Applications
(Persian)

Vol. 5, No. 2, pp.: 123-135
2026

DOI:
[10.22034/jssta.2025.501317.1225](https://doi.org/10.22034/jssta.2025.501317.1225)

Article Info

Received: 2025-01-15
Accepted: 2025-07-06

Keywords

Direct Satellite to Device,
power Link Budget,
Narrowband Service,
Wideband Service

How to Cite this article

R. Karimzadeh Bae, P. Hajipour, H. Samimi, L. Mohammadi, M. Ahmadi, "Technical feasibility of Direct Satellite Connection to Terrestrial Communication Equipment and Service Provision in Iran", *Journal of Space Science, Technology & Applications*, Vol. 5, No. 2, pp. 123-135, 2026.

Technical feasibility of Direct Satellite Connection to Terrestrial Communication Equipment and Service Provision in Iran

Roghieh Karimzadeh Bae¹, Pedram Hajipour^{2*}, Hossein Samimi³, Leila Mohammadi⁴, Marzieh Ahmadi⁵

¹Assistant Professor, Satellite Communication Group, Faculty of Communications Technology, ICT Research Institute, Tehran, Iran
rkbaee@itrc.ac.ir

^{2*}Assistant Professor, Satellite Communication Group, Faculty of Communications Technology, ICT Research Institute, Tehran, Iran
hajipour@itrc.ac.ir

³Associate Professor, Radio Communication Group, Faculty of Communications Technology, ICT Research Institute, Tehran, Iran
hossein-samimi@itrc.ac.ir

⁴Assistant Professor, Satellite Communication Group, Faculty of Communications Technology, ICT Research Institute, Tehran, Iran
mohamady@itrc.ac.ir

⁵Assistant Professor, Satellite Communication Group, Faculty of Communications Technology, ICT Research Institute, Tehran, Iran
mar.ahmadi@itrc.ac.ir

Abstract

Direct satellite-to-Device is an efficient solution for complete coverage and enabling access, especially in areas outside the coverage of terrestrial telecommunications systems. Given the importance of this technology, the provision of experimental services, technical development, standardization, etc., is being carried out rapidly. Therefore, analyzing and examining its various dimensions is necessary to adopt an appropriate approach to dealing with this technology in the country. In the meantime, identifying satellite systems that have the ability to provide this service within the territorial limits of Iran and assessing the technical feasibility of its exploitation is of particular importance, which is examined in this article. In this regard, seven satellite systems were initially considered. By considering the technical specifications of each of these systems, a comprehensive analysis and review of the link budget in a single satellite mode for providing two types of services (narrowband and broadband) was presented. Then, by comparing the performance results of 7 satellite systems and based on the complementary analyses conducted for the city of Tehran, satellite systems suitable for providing this type of service were introduced and technical considerations such as the carrier-to-noise ratio (CNR) and the effect of increasing the number of satellites on increasing the number of accessible points were evaluated.

امکان‌سنجی فنی اتصال مستقیم ماهواره به تجهیزات ارتباطی زمینی و ارائه سرویس در ایران

رقیه کریم زاده بائی^۱، پدram حاجی پور^{۲*}، حسین صمیمی^۳، لیلا محمدی^۴ و مرضیه احمدی^۵

- ۱- استادیار پژوهشی، گروه ارتباطات ماهواره‌ای، پژوهشکده فناوری ارتباطات، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، تهران، ایران - rkbaee@itrc.ac.ir
- ۲- استادیار پژوهشی، گروه ارتباطات ماهواره‌ای، پژوهشکده فناوری ارتباطات، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، تهران، ایران - hajipour@itrc.ac.ir
- ۳- دانشیار پژوهشی، گروه ارتباطات رادیویی، پژوهشکده فناوری ارتباطات، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، تهران، ایران - hossein-samimi@itrc.ac.ir
- ۴- استادیار پژوهشی، گروه ارتباطات ماهواره‌ای، پژوهشکده فناوری ارتباطات، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، تهران، ایران - mohamady@itrc.ac.ir
- ۵- استادیار پژوهشی، گروه ارتباطات ماهواره‌ای، پژوهشکده فناوری ارتباطات، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، تهران، ایران - mar.ahmadi@itrc.ac.ir

نویسنده مسئول *

چکیده

اوری ارتباط مستقیم ماهواره با تجهیزات ارتباطی زمینی، راهکاری کارآمد برای تکمیل پوشش‌دهی و امکان دسترسی به ویژه در مناطق خارج از پوشش سیستم‌های مخابراتی زمینی است. با توجه به اهمیت این فناوری، ارائه سرویس‌های آزمایشی، توسعه فنی، استانداردسازی و غیره به سرعت در حال انجام است. لذا، تحلیل و بررسی ابعاد مختلف این فناوری برای اتخاذ رویکرد مناسب جهت مواجهه با آن در کشور ضرورت می‌یابد. در این میان شناسایی سیستم‌های ماهواره‌ای که قابلیت ارائه این سرویس در محدوده سرزمینی کشور ایران را دارند و امکان‌سنجی فنی بهره‌برداری از آن، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که در این مقاله بررسی شده است. در این راستا ابتدا هفت سیستم ماهواره‌ای در نظر گرفته شده و با لحاظ نمودن مشخصات فنی هر کدام از این سیستم‌ها تحلیل و بررسی جامعی روی بودجه لینک در حالت تک ماهواره، برای ارائه دو نوع سرویس (باند باریک و باند پهن)، آورده شده است. سپس با مقایسه نتایج عملکردی این ۷ ماهواره و براساس تحلیل‌های تکمیلی انجام شده برای شهر تهران، سیستم‌های ماهواره‌ای مناسب برای ارائه این نوع سرویس معرفی و ملاحظات فنی نظیر مقدار حامل به نویز و نیز تاثیر افزایش تعداد ماهواره‌ها بر افزایش نقاط قابل دسترسی، مورد ارزیابی قرار گرفته است.



دسترسی پذیر در نشانی:

Journal.isrc.ac.ir

دوفصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای فضایی

سال پنجم، شماره ۲، صفحه ۱۳۵-۱۲۳
پاییز و زمستان ۱۴۰۴

DOI:

10.22034/jssta.2025.501317.1225

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۲

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۵

واژه‌های کلیدی

ارتباط مستقیم ماهواره با دستگاه، بودجه توانی لینک، سرویس باند باریک، سرویس باند پهن

نحوه استناد به این مقاله

رقیه کریم زاده بائی، پدram حاجی پور، حسین صمیمی، لیلا محمدی و مرضیه احمدی، "امکان‌سنجی فنی اتصال مستقیم ماهواره به تجهیزات ارتباطی زمینی و ارائه سرویس در ایران"، دوفصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای فضایی، جلد پنجم، شماره دوم، صفحات ۱۳۵-۱۲۳، ۱۴۰۴.

۱- مقدمه

پایین‌رونده^۹ (DL) و از طریق تجهیز زمینی در لینک بالا‌رونده^{۱۰} (UL) است [۵-۱۳]. FCC به این سرویس نوپا به عنوان پوشش تکمیلی از فضا^{۱۱} (SCS) اشاره می‌کند و به تازگی اصطلاح ارتباط مستقیم به دستگاه، محبوبیت پیدا کرده است؛ که این دستگاه می‌تواند گوشی همراه، تبلت یا هر نوع دستگاه بی‌سیم باشد [۱۴]. موضوع DtC در کنفرانس جهانی ارتباطات رادیویی در سال ۲۰۲۳ میلادی^{۱۲} (WRC-23) به میزبانی کشور امارات متحده عربی (شهر دبی) نیز مورد بررسی قرار گرفته که نشان‌دهنده اهمیت این موضوع است. در این کنفرانس، یک دستور کار تصویب شد که ITU-R را موظف به مطالعه تخصیص اضافی سرویس ماهواره‌ای متحرک در باندهای سیستم‌های سلولی، از ۶۹۴/۶۹۸ MHz تا ۲/۷ GHz می‌کند. در واقع این اقدام نشان‌دهنده روند رو به رشد رویکرد D2D در جهان و توسعه شرایط نظارتی جدید برای تسهیل کاربرد آن تا سال ۲۰۲۷ میلادی است [۱]. همچنین در نظر گرفتن سرویس DtC به عنوان دستور کار برای WRC-27، علاقه به پوشش تکمیلی از فضا را برجسته می‌کند. ضمن اینکه WRC-23 مطالعات جدیدی را برای ماهواره‌ها به منظور داشتن اتصال مستقیم با گوشی‌های همراه در باندهای UHF بین ۷۰۰ تا ۲۷۰۰ مگاهرتز تایید کرده است. این مطالعات منجر به استفاده از ماهواره‌های غیر زمین‌آهنگ^{۱۳} (NGSO) برای اتصال مستقیم به پایانه‌های موبایل زمینی با استفاده از فناوری ارتباطات سیار بین‌المللی^{۱۴} (IMT) خواهد شد [۱۵]. ایده اولیه فناوری DtC شامل یک آنتن ماهواره‌ای خارجی در گوشی برای پشتیبانی از داده‌های کم سرعت و سرویس صوتی بوده است. به دلیل وجود آنتن خارجی، در این نوع سرویس نیاز به هماهنگی دقیق با ماهواره برای برقراری ارتباط وجود داشته که منجر به ایجاد محدودیت در تحرک گوشی می‌شود. علاوه بر آن، در مقایسه با گوشی‌های موجود در مخابرات سلولی زمینی، فناوری DtC دارای سرعت ارتباطی کمتر (2.4kbps-9.6kbps) و همچنین هزینه‌های بالاتر بود که قادر به فراهم کردن تجربه مشابه اتصال متقابل گوشی همراه زمینی با همان پهنای باند موجود، نیست [۱۶]. در ادامه و در نتیجه‌ی توسعه فناوری DtC، گوشی‌های هوشمند جدید و تجهیزات

امروزه، تقریباً ۹۰ درصد از سطح زمین و ۷۵ درصد از خشکی آن به دلیل هزینه‌های بالای استقرار و سودآوری پایین، به‌ویژه در مناطقی با تراکم جمعیت کم یا جایی که استقرار عملاً غیرممکن است (مانند اقیانوس‌ها) فاقد پوشش شبکه‌های سلولی است. راه‌اندازی شبکه‌های سلولی در این مناطق از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نبوده و اغلب از نظر فنی نیز امکان‌پذیر نیست، که این مسئله چالشی مهم برای کشورهایی با قلمروهای بزرگ مانند کشور ایران است [۱]. فضا، نقطه رشد کسب و کار جدید برای شبکه‌های مخابرات سلولی است. امروزه منظومه‌های ماهواره‌ای نوظهور در ارتفاع پایین مداری^۱ (LEO) مانند: Starlink, Iridium, GLOBALSTAR, AST و Lynk مکمل شبکه‌های زمینی هستند تا حفره‌های پوشش این شبکه‌ها را برای ۲/۷ میلیارد کاربر جهانی «غیرمتصل»^۲ از بین ببرند و به گوشی‌های معمولی یا تجهیزات هوشمند امکان دسترسی مستقیم ماهواره‌ای را از طریق نسل چهارم شبکه ارتباطی^۳ (4G)، نسل پنجم شبکه ارتباطی^۴ (5G) و فراتر از آن را بدهند [۲، ۳]. در همین راستا، فناوری ماهواره به طور قابل توجهی تکامل یافته و امکان اتصال مستقیم بین ماهواره‌ها و همچنین دستگاه‌های گوشی همراه فراهم شده که اغلب اتصال مستقیم به دستگاه^۵ (D2D) یا اتصال مستقیم به سلول^۶ (DtC) نامیده می‌شود. این قابلیت یک ویژگی امیدوارکننده و حیاتی برای شبکه‌های غیرزمینی^۷ (NTN) آینده است که سیستم‌های ماهواره‌ای را قادر می‌سازد تا به صورت مستقیم به میلیارد‌ها کاربر گوشی همراه دسترسی پیدا کنند. اتصال مستقیم می‌تواند استفاده انبوه از ماهواره‌ها را ممکن کند و امکان استفاده از اتصالات ماهواره‌ای با پایانه‌های معمولی دستی را فراهم نماید. تخمین زده شده است که تعداد مشترکان می‌تواند تا سال ۲۰۳۰ میلادی به ۳۵۰ میلیون نفر برسد و طی بازه زمانی ده سال (۲۰۲۰ تا ۲۰۳۰ میلادی) درآمدی بالغ بر ۶۰ میلیارد دلار ایجاد شود [۴]. در این فناوری، هدف هر بخش از شبکه ارتباطی، ارائه سرویس DtC از طریق یک ایستگاه پایه^۸ (BS) از فضا در لینک

⁸ Base station

⁹ Down link

¹⁰ Uplink

¹¹ Supplemental coverage from space

¹² World radio communication conferences

¹³ Non-Geosynchronous orbit

¹⁴ International Mobile Telecommunications

¹ Low earth orbit

² Unconnected

³ Fourth generation

⁴ Fifth generation

⁵ Direct to Device

⁶ Direct to cell

⁷ Non-Terrestrial networks

روابط مورد نیاز با استفاده از نرم افزار MATLAB پرداخته خواهد شد. سپس تحلیل مناسب از دیدگاه فنی و بر حسب نوع سرویس انتخابی پهن باند^{۱۷} (WB) و باند باریک^{۱۸} (NB) برای بررسی و مقایسه ماهواره های فوق، ارائه خواهد شد. در این بخش نسبت C/N برای زاویه فراز^{۱۹} (EA) محاسبه شده است و در مقایسه با مرجع [۱۹]، از فاصله مورب^{۲۰} (SR) برای محاسبه بودجه لینک استفاده شده است. علاوه بر این، برای تعیین مقدار دمای تجهیزات کاربری (TUE) از رابطه دقیق تری نسبت به مرجع [۱۹]، استفاده شده است.

۲- پس از بررسی و تحلیل نتایج بودجه توانی لینک، بررسی سناریوی ارائه سرویس DtC برای کشور ایران (خاص شهر تهران)، برای ماهواره Starlink در بخش بعدی ارائه شده است. در این بخش به کمک نرم افزار STK، پوشش دهی شهر تهران توسط تک ماهواره Starlink از منظر C/N بر حسب زاویه فراز، بررسی شده است. نتایج شبیه سازی ها نشان می دهد که در زوایای فراز بالاتر از ۷۰ درجه نیز امکان ارائه سرویس DtC با تک ماهواره Starlink وجود دارد. این در حالی است که در سناریوی تک ماهواره Starlink، تعداد نقاط دسترسی در زوایای بالاتر از ۷۰ درجه، بسیار کم هستند. بنابراین، افزایش تعداد ماهواره ها در قالب منظومه ماهواره ای Starlink به منظور بهبود پوشش دهی شهر تهران برای ارائه سرویس پیوسته DtC می تواند مورد توجه باشد. در همین راستا، به بررسی تعداد ماهواره های مورد نیاز بر حسب زاویه فراز برای داشتن پوشش دهی مناسب در شهر تهران پرداخته شده است. بررسی های این پژوهش نشان می دهد که با افزایش تعداد ماهواره ها، تعداد دسترسی های کاربران در زوایای فراز بالاتر، بیشتر می شود و در نتیجه احتمال دریافت سرویس DtC نیز افزایش خواهد یافت. لذا ضرورت دارد که نهادهای نظارتی، رگولاتوری و حاکمیتی، برنامه ریزی های لازم را برای ورود این فناوری مطابق با مجوز سرزمینی^{۲۱} کشور ایران داشته باشند. در نهایت، میزان نرخ قابل حصول برای ماهواره Starlink و ارائه این نوع سرویس در شهر تهران مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

اینترنت اشیا^{۱۵} (IoT) که امروزه در بازار انبوه عرضه می شوند، می توانند به طور یکپارچه با شبکه های گوشی همراه زمینی و یا شبکه های ماهواره ای در زمانی که خارج از محدوده اتصال زمینی باشند، ارتباطات برقرار نمایند. این موضوع تضمین می کند که ایجاد ارتباطات برای هر کسی در هر نقطه از جهان در دسترس خواهد بود [۱۷]. در روند توسعه این فناوری، با وجود کاهش فاصله بین نقاط پایانی با استفاده از ماهواره های LEO و کاهش افت مسیر با به کارگیری باندهای فرکانسی S و L، محاسبات بودجه لینک نشان می دهد برای اتصال ماهواره ای DtC نیازمند تلاش زیادی در سمت ماهواره است تا بتوان سرویسی با کیفیت مناسب ارائه کرد. به عنوان نمونه، برای بهبود بودجه لینک در ارتباطات DtC، یک رویکرد مرسوم مبتنی بر استفاده از آنتن های آرایه فازی و یا استفاده از آرایه های تغذیه فازی برای بازتابنده های بزرگ در نظر گرفته شده است. البته این روند منجر به افزایش هزینه تولید ماهواره ها می شود. علاوه بر این، افزایش اندازه ماهواره باعث افزایش وزن و در نتیجه افزایش هزینه های پرتاب می شود [۱۸]. در این مقاله، با توجه به تاثیر مستقیم بودجه لینک در عملکرد سرویس DtC، ابتدا به بررسی هفت سیستم ماهواره ای با قابلیت ارائه این سرویس براساس بودجه لینک توانی آنها پرداخته شده است. در بخش اول، عملکرد این سیستم های ماهواره ای با استفاده از نرم افزار MATLAB، که نرم افزار متداولی در شبیه سازی های بودجه لینک است، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. سپس به دلیل اهمیت ورود این نوع فناوری به کشور ایران (به طور خاص شهر تهران) و براساس مقایسه و تحلیل های فنی صورت گرفته، ماهواره Starlink انتخاب شد. در شبیه سازی های بعدی از نرم افزار STK که توانایی ارائه مدل واقعی تری نسبت به نرم افزار MATLAB با به کارگیری موقعیت مکانی تجهیزات ارتباطی، شامل طول و عرض جغرافیایی و همچنین ارائه مدل پستی و بلندی زمینی در محدوده تحت پوشش دهی ماهواره را دارد، استفاده گردید تا ارائه سرویس DtC برای شهر تهران مورد ارزیابی قرار گیرد. در نتیجه، نوآوری این مقاله پژوهشی به ترتیب مراحل زیر خواهد بود:

۱- ابتدا، به هفت سناریوی مختلف ماهواره ای در حوزه DtC از منظر بودجه توانی لینک و به طور خاص میزان حامل بر حسب نویز^{۱۶} (C/N) در حالت تک ماهواره در دو مسیر UL و DL با ارائه تمامی

¹⁹ Elevation angle

²⁰ Slant range

²¹ Landing rights

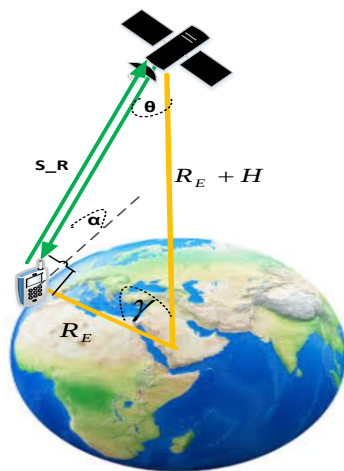
¹⁵ Internet of thing

¹⁶ Carrier per noise

¹⁷ Wideband

¹⁸ Narrowband

≥ است حاصل شود و نرخ داده ۳٫۵ Mbits/s با پهنای باند kHz ۲۵۲۰ کیلوهرتز (14 PRBs) زمانی که $C/N \geq 4\text{dB}$ باشد، حاصل شود. این محدودیت‌ها مطابق با شاخص صفر و یازده MCS در [۲۵] است. توان انتقالی محدود و بهره کم آنتن ترمینال‌های دستی، چالش‌هایی را برای ارتباطات قابل اعتماد ایجاد می‌کند. برای بودجه‌های توانی لینک همه سیستم‌ها، ابتدا مقادیر نسبت حامل به نویز^{۲۷} (C/N) برای EA محاسبه می‌شود. در اینجا محاسبات بودجه توانی لینک برای زاویه فراز از ۰ تا ۹۰ درجه انجام می‌شود. در شبیه‌سازی لینک‌های ماهواره‌ای در نرم‌افزار MATLAB، فرکانس مرکزی با افزودن نیمی از پهنای باند موردنیاز سرویس NB یا WB به ابتدای بازه‌ی فرکانسی در جدول ۱، تعیین می‌شود.



شکل (۱): موقعیت مکانی ماهواره و گوشه در ارائه سرویس DtC

۲-۱- نحوه محاسبه افت کلی برای ماهواره‌های DtC

پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی محاسبات بودجه لینک در جدول ۲ آمده است. برای انجام این محاسبات در ابتدا افت کلی مسیر UL و DL مورد بررسی قرار می‌گیرد. افت‌های مسیر شامل: افت فضای آزاد (L_{FS})، افت نشانه‌روی آنتن (L_p)، افت اتمسفر^{۲۸} (L_{Atm})، افت پلاریزاسیون^{۲۹} (L_{Pol})، افت scanning (L_S) و افت Shadowing (L_{FS}) در UL و DL هستند [۲۶-۲۷]. افت ناشی از فضای آزاد بر حسب زاویه EA و S_R به‌دست می‌آید. بنابراین، لازم

۲- بررسی بودجه توانی لینک سرویس DtC در

سیستم‌های ماهواره‌ای مختلف

هدف از محاسبه بودجه توانی لینک، استخراج ملزومات ارائه لینک‌های 5G NR DtC، با استفاده از سیستم‌های ماهواره‌ای موجود یا برنامه‌ریزی شده با حداقل تغییر در دستگاه‌های 5G NR دستی است. بررسی. هفت نوع سیستم ماهواره‌ای (شامل ۶ ماهواره ارائه شده در مرجع [۱۹] و ماهواره Starlink در مرجع [۲۰، ۲۱]) که مدعی تست و راه‌اندازی سرویس DtC است، انتخاب شدند که طیف وسیعی از پارامترها و تنظیمات (مانند به‌کارگیری SR در محاسبه فاصله ماهواره با تجهیزات زمینی) را برای مطالعه ترکیب‌های مختلف در ارزیابی فنی بودجه توانی لینک نشان می‌دهند. پارامترهای این نوع سیستم‌ها از قبیل ارتفاع مداری و همچنین مشخصات فنی شامل: فرکانس کاری (در مسیر UL و DL)، توان موثر همسانگرد^{۲۲} (EIRP) و گین برحسب دمای سیستم^{۲۳} (G/T) در جدول ۱ ارائه شده است. نمایی از مدل سیستمی ارتباطات بین پایانه دستی و ماهواره نیز در شکل ۱ نشان داده شده است. در محاسبات، تداخل بین لینک‌ها در نظر گرفته نشده است، زیرا می‌توان آن را از طریق روش‌هایی از قبیل تخصیص منابع زمان-فرکانس-فضا^{۲۴} کاهش داد و خارج از محدوده مطالعه این پژوهش است. هر دو گزینه سرویس‌های NB و WB برای تحلیل بودجه لینک توانی بر حسب پهنای باند مورد نیاز هر کدام در نظر گرفته می‌شوند. در کاربرد NB، نرخ داده ۱۶ kbits/s در نظر گرفته شده که برای سرویس‌های اینترنت اشیاء و صوت و متن از طریق NR، یک فرض واقعی است. برای کاربرد WB نیز، نرخ داده Mbits/s ۳٫۵ هدف‌گذاری شده است. پهنای باند با استفاده از نرخ خطای بلوک خاص طرح مدولاسیون و کدگذاری (MCS^{25}) K نسبت به نتایج شبیه‌سازی C/N برای کانال نویز سفید گوسی سفید تک خروجی تک ورودی از [۲۰] و جداول 5.1.3.1-1 و 5.1.3.1-2 در [۲۱] برآورد می‌شود. در ادامه، نرخ داده برای پهنای باند انتخابی محاسبه می‌شود. پهنای باند، چند برابر بلوک‌های منابع فیزیکی ($PRBs^{26}$) یعنی kHz ۱۸۰ است. به عنوان مثال، نرخ داده ۱۶ kbits/s می‌تواند به ترتیب با پهنای باند kHz ۳۶۰ (2 PRBs) زمانی که $C/N = 6\text{dB}$

²⁶ Physical resource blocks

²⁷ Carrier to Noise

²⁸ Atmospheric loss

²⁹ Polarization loss

²² Equivalent isotropic radiated power

²³ Gain over temperature

²⁴ Time-Frequency-Space resource allocation

²⁵ Modulation and coding scheme

است تا در ابتدا میزان SR بر حسب EA مطابق با رابطه (۱) محاسبه شود [۲۸].

$$L_{Total} = L_{Pol} + L_{Atm} + L_{Sh} + L_P + L_{FS} + L_S \quad (۴)$$

۲-۲- محاسبه C/N برای ماهواره‌های DtC

در این مرحله C/N در مسیر UL را می‌توان بر حسب رابطه (۵) بر حسب دسیبل (dB) به‌دست آورد [۱۹].

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{UL} = EIRP_{UE} - L_T + \left(\frac{G}{T}\right)_{sat} - k - B \quad (۵)$$

در رابطه فوق، $EIRP_{UE}$ و B به ترتیب، توان تابشی همسانگرد موثر گوشه‌ای و پهنای باند پیش‌بینی شده بر حسب نوع سرویس در جدول ۲ است. علاوه بر این، میزان C/N در مسیر DL را می‌توان بر حسب رابطه (۶) و بر حسب دسیبل به‌دست آورد [۱۹].

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{UL} = EIRP_{sat} - L_T + G_{UE} - T_{UE} - k - B \quad (۶)$$

در رابطه (۶)، مقدار دمای تجهیزات کاربری (T_{UE}) بر حسب دمای آنتن (T_a) و عدد نویز گوشه (NF_{UE}) از رابطه (۷) به‌دست می‌آید [۳۱].

$$T_{UE} = NF_{UE} + 10 \times \log(290 + (T_a - 290) \times 10^{(-0.1 \times NF_{UE})}) \quad (۷)$$

در برخی از سناریوهای شبیه‌سازی، مشخصه pfd ماهواره مشخص است. در این موارد، برای تبدیل میزان pfd به $EIRP_{sat}$ از رابطه (۸) استفاده شده است [۳۲]:

$$EIRP = pfd \times (4 \times \pi \times H^2) \quad (۸)$$

$$\theta = \arcsin\left(\frac{R_E}{R_E + H} \times \sin(EA + 90)\right)$$

$$\gamma = 180 - (EA + 90) - \theta \quad (۱)$$

$$S_R = \sqrt{R_E^2 + (R_E + H)^2 - 2 \times R_E \times (R_E + H) \times \cos(\gamma)}$$

سپس با استفاده از رابطه زیر و بر حسب میزان S_R ، می‌توان افت ناشی از فضای آزاد را محاسبه کرد.

$$L_{FS} = 20 \times \log(4 \times \pi) - 20 \times \log(c) + 20 \times \log(S_R) + 20 \times \log(f) \quad (۲)$$

علاوه بر این، برای محاسبه افت Scanning بر حسب زاویه EA، می‌توان از رابطه (۳) استفاده کرد [۲۹].

$$L_S = |10 \times \log(\cos(EA)^{\frac{1}{3}})| \quad (۳)$$

افت shadowing، مبتنی بر مدل roadside-tree shadowing [۳۰] در نظر گرفته شده است. میزان این افت، برای فرکانس‌های مورد نظر و در زاویه فراز ۴۰ درجه، بین یک تا دو دسیبل تغییر می‌کند که در شبیه‌سازی‌ها بدترین حالت یعنی دو دسیبل لحاظ شده است. در مجموع، افت کل (L_{Total}) ناشی از مجموع افت‌های موجود در مسیر را می‌توان بر حسب جدول ۲ به صورت زیر به‌دست آورد.

جدول (۱): پارامترهای ماهواره‌های منتخب در ارتباط مستقیم ماهواره با گوشه

نام ماهواره	ارتفاع ماهواره (H) (Km)	فرکانس (f) (MHz)	$EIRP_{sat}$ و $\left(\frac{G}{T}\right)_{sat}$
Inmarsat-6 F2 [۱۹]	۳۵۷۸۶ (GEO 0E)	۱۵۵۹-۱۵۲۵ (DL) ۱۶۲۶/۱۶۶۰-۵۵ (UL)	Estimated EIRP per 5MHz channel= ۵۳[dBw] [dB/K]۱۰(G/T)=
EchoStar XXI [۱۹]	۳۵۷۸۶ (GEO 10E)	۲۲۰۰-۲۱۸۰ (DL) ۲۰۲۰-۲۰۰۰ (UL)	Max EIRP= ۵۳[dBw] [dB/K]۱۹(G/T) _{sat} =
GLOBALSTAR-2 [۱۹] (۲۴ ماهواره پرتابی از ۴۸ ماهواره برنامه‌ریزی شده)	۱۴۱۴	۲۴۸۳/۲۵۰۰-۵ (DL) ۱۶۱۸-۱۶۱۰/۲۲۵ (UL)	Max pfd [dBW/m ² /MHz] = -۱۲۶ / -۱۲۲/۷ / -۱۱۹/۵ / -۱۱۶/۲ / -۱۱۳ / -۱۱۳ (۰°-۵° / ۵°-۱۰°) / ۱۰°-۱۵° / ۱۵°-۲۰° / ۲۰°-۲۵° / ۲۵°-۹۰°) (G/T) _{sat} =-۶/۸۹[dB/K]
Iridium NEXT [۱۹] (۶۶ ماهواره)	۷۸۰	۱۶۲۶-۵ (DL و UL) ۱۶۱۶	Max EIRP= ۵۳[dBw] [dB/K]-۳/۱(G/T) _{sat} =
Lynk [۱۹] (۶ ماهواره پرتابی از ۱۰ ماهواره در فاز تست - ۵۰۰۰ ماهواره برنامه‌ریزی شده)	۵۵۰-۵۰۰	(DL)۹۶۰-۶۱۷ (UL) ۹۱۵-۶۶۳	Max pfd [dBW/m ² /MHz] = -۱۱۵/۸ / -۱۱۲/۸ / -۱۱۰/۵ / -۱۰۸/۴ / -۱۰۶/۶ / - ۹۷/۴۳ (۰°-۵° / ۵°-۱۰°) / ۱۰°-۱۵° / ۱۵°-۲۰° / ۲۰°-۲۵° / ۲۵°-۹۰°) (G/T) _{sat} =-۵/۴۹[dB/K]

Max pfd [dBW/m ² /kHz] = -۱۱۱/۱/-۱۰۹/۶/-۱۰۸/۳/-۱۰۷/۷/-۱۰۵/۹/-۱۰۰/۰ (۰°-۵°/۵°-۱۰°/۱۰°-۱۵°/۱۵°-۲۰°/۲۰°-۲۵°/۲۵°-۳۰°) (<۱GHz) (G/T) _{sat} = ۱۴ [dB/K] < ۱	(DL) ۹۶۰-۶۱۷ (UL) ۹۱۵-۶۶۳	۷۴۰-۷۲۵	AST 900 AST 2000 MHz [۱۹]-[۲۰] (۲ ماهواره پرتابی - ۲۴۳ ماهواره (BlueWalker) (BlueBird) برنامه ریزی شده)
Max pfd [dBW/m ² /kHz] = -۱۰۷/۷/-۱۰۶/۲/-۱۰۴/۸/-۱۰۳/۶/-۱۰۲/۵/-۹۶/۶ (۰°-۵°/۵°-۱۰°/۱۰°-۱۵°/۱۵°-۲۰°/۲۰°-۲۵°/۲۵°-۳۰°) (>۱GHz) (G/T) _{sat} = ۲۰ [dB/K] > ۱	(DL) ۲۳۶۰-۱۸۰۵ (UL) ۲۳۲۰-۱۷۱۰		
[dBW] ۳۹,۴۴ Max EIRP = (dB) ۸,۷ (G/T) _{sat} =	(DL) ۱۹۹۵-۱۹۹۰ (UL) ۱۹۱۵-۱۹۱۰	۵۵۰-۵۰۰	Starlink [۲۱]-[۲۲] (227 ماهواره عملیاتی (DtC)

مشاهده می‌شود که حاشیه‌های مثبت DL، تنها برای سرویس NB را می‌توان برای هر دو ماهواره GEO به‌دست آورد و برای سرویس WB این حاشیه منفی است. بنابراین، سیستم‌های ماهواره‌ای GEO با مشخصات مطرح شده قابلیت ارائه سرویس WB را نخواهند داشت. همچنین، این دو ماهواره GEO در مسیر UL هر دو سرویس NB و WB چالش دارند که علت آن توان پایین گوشی‌های کاربران زمینی است. لذا این دو ماهواره GEO به‌عنوان کاندید ارائه سرویس در کشور ایران مورد ارزیابی قرار نخواهند گرفت. مطابق با نتایج به‌دست آمده در جدول ۳ و بودجه توانی لینک، ماهواره‌های LEO با آنتن‌های بزرگ، مانند AST، با داشتن حاشیه لینک مثبت‌تر در مقایسه با دیگر ماهواره‌ها، کاندیدهای مناسب‌تری برای دسترسی مستقیم ماهواره‌ای 5G در هر دو جهت UL و DL هستند. همانطور که از جدول ۳ مشاهده می‌شود، AST دارای بالاترین حاشیه لینک مثبت برای UL و DL در هر دو باند فرکانسی ۹۰۰ مگاهرتز و ۲ گیگاهرتز است. ماهواره Lynk نسبت به ماهواره AST عملکرد پایین‌تری در C/N دارد که این به‌دلیل عدم داشتن آنتن بزرگ به اندازه AST و همچنین محدودیت بیشتر ماسک pfd ماهواره Lynk است. به همین دلایل، حاشیه‌های UL در ماهواره Lynk برای سرویسی با نرخ داده ۳/۵ Mbits/s، منفی به‌دست آمده است. از سوی دیگر ماهواره Starlink، در سرویس NB دارای حاشیه C/N مثبت‌تری نسبت به Lynk دارد و انتظار می‌رود عملکرد مناسب‌تری داشته باشد و در سرویس WB نیز برای UL حاشیه منفی کمتری نسبت به Lynk دارد. با توجه به اینکه ارائه سرویس‌های DtC اولیه ارائه شده در دنیا، متمرکز به سرویس NB بود و تست‌های اولیه در ارائه این نوع سرویس مانند SoS در گوشی‌های اپل و سامسونگ عملیاتی شده است، بنابراین می‌توان گفت که در مجموع، Starlink

نتایج حاصل از شبیه‌سازی C/N برحسب نوع سرویس در جدول ۳ ارائه شده است. در جدول ۳ حاشیه لینک برای هر سیستم ماهواره‌ای بر حسب سرویس‌های انتخابی (NB یا WB)، برای یک زاویه فراز نوعی (۴۰ درجه) مطابق با مرجع [۱۹] نشان داده شده است. حاشیه مثبت نشان می‌دهد که C/N محاسبه شده چند دسیبل بالاتر از حداقل C/N مورد نیاز برای سرویس انتخابی است و حاشیه منفی نیز نشان می‌دهد که C/N محاسبه شده چند دسیبل کمتر از C/N مورد نیاز است.

جدول (۲): پارامترهای شبیه‌سازی در محاسبات بودجه لینک [۱۹]

پارامتر شبیه‌سازی	مقدار پیش‌بینی شده
بهره آنتن فرستنده/ گیرنده گوشی (G_{UE})	۰ (dBi)
عدد نویز گوشی (NF_{UE})	۷ (dB)
توان فرستنده گوشی	-۷ (dB)
ثابت بولتزمن (K)	-۲۲۸,۶ (dB)
دمای آنتن گوشی (T_e)	۲۹۰ (K)
شعاع زمین (R_E)	۶۳۷۱ (Km)
سرعت نور (C)	۱۶۹,۵۴۲۴ (dB)
افت ناشی از پلاریزاسیون (L_{pol})	۳ (dB)
افت ناشی از اتمسفر (L_{atm})	۰,۵ (dB)
افت ناشی از Shadowing 30 (L_{sh})	۲ (dB)
افت ناشی از نشانروی آنتن 31 (L_p)	۱ (dB)
پهنای باند مورد نیاز برای سرویس باند باریک در UL و DL	۳۶۰ (kHz)
پهنای باند مورد نیاز برای سرویس پهن باند در UL	۲۵۲۰ (kHz)
پهنای باند مورد نیاز برای سرویس باند باریک در DL	۵ (MHz)

همانطور که نتایج شبیه‌سازی ارائه شده در جدول ۳ نشان می‌دهد چنانچه سیستم‌های ماهواره‌ای زمین آهنگ^{۳۲} (GEO) بررسی شده، بهینه‌سازی و تغییراتی در مشخصات نداشته باشند به حاشیه‌های مثبت لینک برای ارتباطات 5G NR UL نمی‌رسند. اما

³² Non-Geosynchronous orbit

³⁰ Roadside-tree shadowing loss

³¹ Antenna pointing loss

اتصال DtC هستند. اما با توجه به جدول ۱ و اینکه تعداد ماهواره‌های پرتابی AST و Lynk تا به امروز محدود بوده و توسعه نیافته است، بنابراین ظرفیت کمتری برای ارائه سرویس DtC در دنیا خواهند داشت. در حالیکه منظومه Starlink دارای تعداد ماهواره پرتابی بیشتری است و عملیاتی‌تر هستند. بنابراین در بخش بعدی مقاله، تحلیل‌ها و بررسی‌های بیشتری بر روی این منظومه انجام شده است. به منظور مقایسه بهتر سیستم‌های ماهواره‌ای مدنظر، نتایج DL و UL برای هر دو سرویس NB و WB بر حسب زاویه فراز در شکل‌های ۲ و ۳ رسم شده است. باید توجه داشت که براساس جدول ۱، ماهواره‌های 900 MHz AST، 2000 MHz AST، Lynk و GLOBALSTAR، دارای چند ضابطه‌ای برحسب زوایای فراز هستند، بنابراین گسستگی‌هایی در منحنی‌های C/N مسیر DL این ماهواره‌ها در شکل‌های ۲-الف و ۳-الف دیده می‌شود.

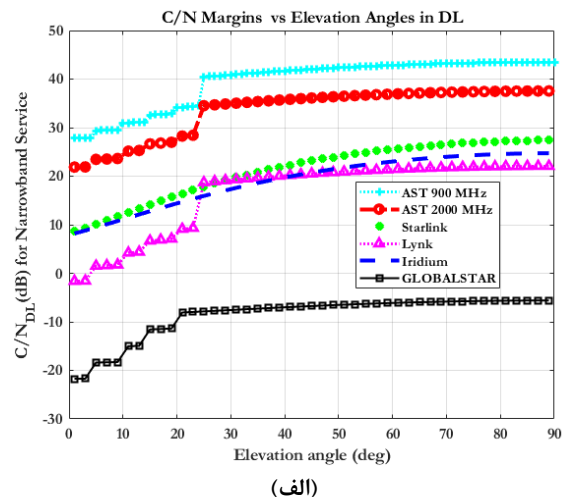
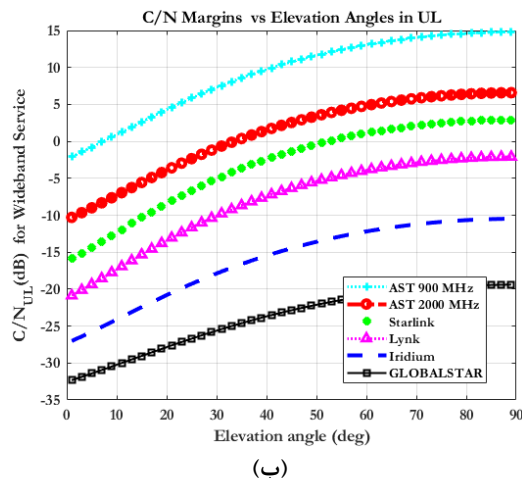
عملکرد بهتری نسبت به Lynk و ضعیف‌تر نسبت به AST دارد. از سوی دیگر، Iridium دارای حاشیه‌های مثبت در C/N در UL و DL برای همه سناریوهای انتخاب شده، به جز UL در باندهای وسیع‌تر است، اما حاشیه لینک در مقایسه با AST و Lynk، بسیار کمتر است و عملکرد ضعیف‌تری دارد. همچنین علی‌رغم اینکه ماهواره GLOBALSTAR در زمره ماهواره‌های LEO است اما با توجه به حاشیه منفی بودجه توانی لینک آن در تمام مسیرهای UL و DL و برای هر دو نوع سرویس NB و WB، بدون پیشرفت و بهبود مشخصات، نمی‌تواند کاندید مناسبی برای ارائه سرویس DtC در مدار LEO باشد. در مجموع ماهواره‌های GEO موجود بدون بهبود مشخصات فنی فقط قادر به ارائه سرویس DtC باند باریک در مسیر DL خواهند بود. در حالی که AST، امیدوار کننده‌ترین کاندید و ماهواره‌های Starlink و Lynk گزینه‌های بعدی ماهواره LEO برای

جدول (۳): نتایج شبیه‌سازی بودجه لینک سیستم ماهواره‌ای در زاویه فراز ۴۰ درجه با به‌کارگیری نرم‌افزار MATLAB

سرویس باند باریک		سرویس باند پهن		نام سیستم ماهواره
UL	DL	UL	DL	
Target:16kbps B:360 kHz C/N target:-6 dB	Target:16kbps B:360 kHz C/N target:-6 dB	Target:3.5Mbps B:2520 kHz C/N target:4/12 dB	Target: 3.5Mbps B:5 MHz C/N target:-0.05 dB	
-۵۵۱	+۵۳۹	-۲۳۹۶	-۱۱۵۴	EchoStar
-۱۲۷۱	+۶۴۹۴	-۳۱۱۷	-۱۰۴۴	Inmarsat
+۲۹۸	+۱۹۷۳	-۱۵۴۷	+۲۷۹	Iridium
-۵۲۳	-۷۲۸	-۲۳۶۸	-۱۲۵۱	GLOBALSTAR
+۱۱۰۳	+۲۰۱۲	-۷۴۲	+۱۴۵۹	Lynk
+۲۸۲۲	+۴۱۶۷	+۹۷۵	+۳۶۱۴	AST 900MHz band
+۲۵۹۹	+۳۵۷۵	+۷۵۳	+۳۰۲۴	AST 2 GHz band
+۱۵۶۸	+۲۲۰۷	-۲۷۷	+۵۱۴	Starlink

ارائه شده و عملیاتی‌تر بودن ماهواره Starlink نسبت به AST و Lynk و همچنین مطرح بودن سرویس باند باریک DtC در تست‌ها و راه‌اندازی‌های اولیه گزارش شده توسط اپراتورها، در ادامه به بررسی فنی‌تر و مفصل‌تر ارائه این سرویس توسط ماهواره Starlink پرداخته شده است. از سوی دیگر با توجه به نوظهور بودن این سرویس و مطرح بودن ارائه آن به صورت NB در دنیا، در این پژوهش به امکان‌سنجی دریافت این سرویس در کشور و به طور خاص شهر تهران پرداخته شده است.

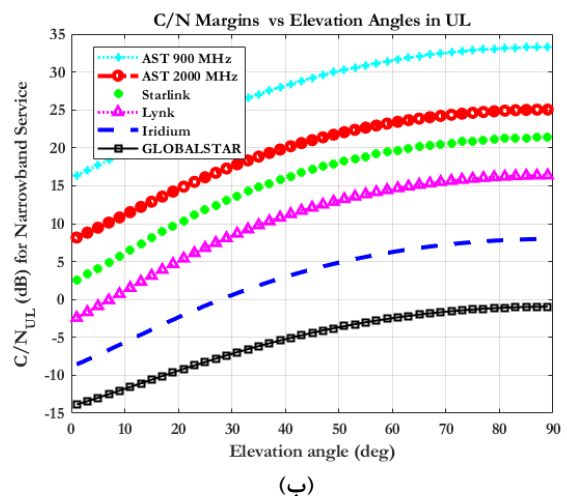
براساس نتایج شکل ۲ و با توجه به حاشیه مثبت لینک، دریافت سرویس NB در هر دو مسیر UL و DL برای اکثر زوایای فراز در ماهواره‌های AST2000، AST900، Starlink و Lynk امکان‌پذیر است. در ادامه با استفاده از شبیه‌سازی بودجه لینک در نرم‌افزار MATLAB به بررسی دریافت سرویس پهن باند DtC پرداخته می‌شود. همانطور که در شکل ۳ نشان داده می‌شود دریافت سرویس پهن باند برای اکثر زوایای فراز بیشتر از ۳۰ درجه در مسیر DL برای ماهواره‌های AST900، AST2000 و Lynk و Starlink اتفاق می‌افتد. همان‌طور که پیش از این نیز به آن اشاره شد، Starlink در مسیر UL برای تمام زوایای فراز، حاشیه لینک توانی منفی داشته و قابلیت ارائه سرویس WB در مسیر UL را ندارد. با توجه به نتایج



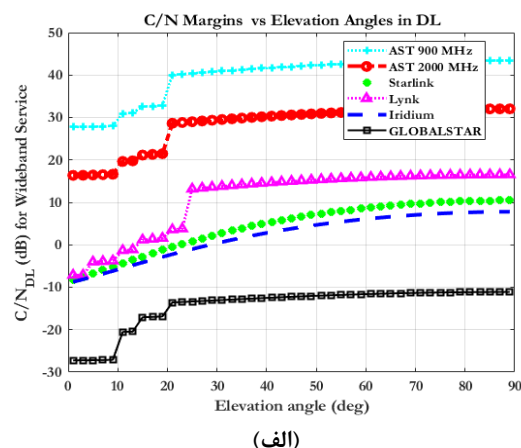
شکل (۳): مقایسه حاشیه C/N سرویس WB براساس نتایج شبیه‌سازی بودجه لینک در MATLAB (الف - DL و ب - UL)

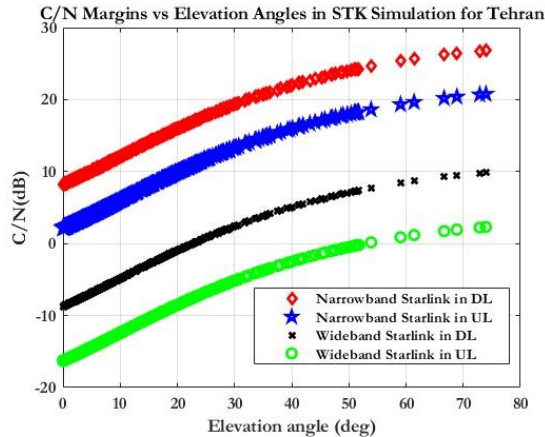
۳- بررسی فنی ارائه سرویس DtC توسط ماهواره Starlink برای شهر تهران

هدف این بخش، ارائه تحلیل‌های دقیق‌تری از حاشیه بودجه لینک توانی ماهواره Starlink، نسبت به نتایج بخش قبلی است. این تحلیل‌ها بر روی نتایج شبیه‌سازی به‌دست آمده از نرم‌افزاری صورت می‌گیرد که موقعیت کاربر نسبت به ماهواره، مانورهای مداری ماهواره در یک مدل واقعی‌تر، پستی بلندی‌های زمین و غیره را در تعیین C/N لحاظ می‌کند. در همین راستا، در این بخش از نرم‌افزار STK که دارای چنین قابلیت‌هایی است، استفاده شده است. البته این نرم‌افزار محدودیت‌هایی از قبیل زمان‌بر بودن شبیه‌سازی یک منظومه ماهواره‌ای با تعداد ماهواره زیاد در یک سناریوی واقعی و غیره در شبیه‌سازی‌های مدنظر، داشته است. در ادامه، برای انجام امکان‌سنجی ارائه سرویس DtC با سیستم ماهواره‌ای انتخابی در کشور ایران، شبیه‌سازی‌های مرتبط با بودجه لینک در نرم‌افزار STK برای کشور ایران و به‌طور خاص شهر تهران انجام شده است. در این شبیه‌سازی در ابتدا سناریوی تک ماهواره پیاده‌سازی شده است. مطابق با شکل ۴، برای انجام شبیه‌سازی در ابتدا برای تعیین موقعیت مکانی شهر تهران در نرم‌افزار STK، از بخش دیتابیس این نرم‌افزار، شهر تهران را جستجو کرده و به داخل محیط شبیه‌سازی نرم‌افزار انتقال می‌یابد. با این کار، مشخصات واقعی طول و عرض جغرافیایی شهر تهران در شبیه‌سازی‌ها لحاظ می‌شود. سپس ماهواره Starlink



شکل (۲): مقایسه حاشیه C/N سرویس NB براساس نتایج شبیه‌سازی بودجه لینک در MATLAB (الف - DL و ب - UL)



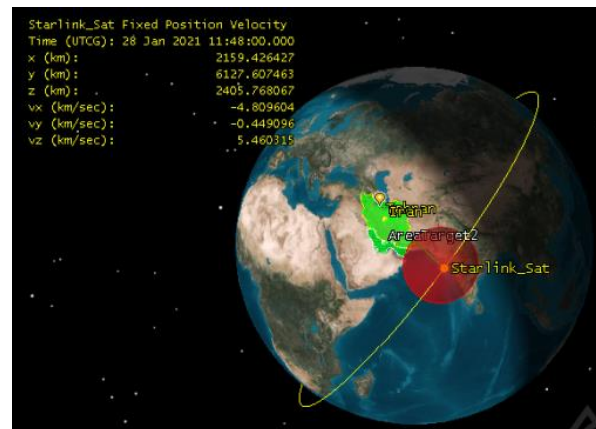


شکل (۵): مقایسه حاشیه C/N دریافت سرویس DtC در شهر تهران از ماهواره Starlink براساس نتایج شبیه سازی STK در سناریوی تک ماهواره

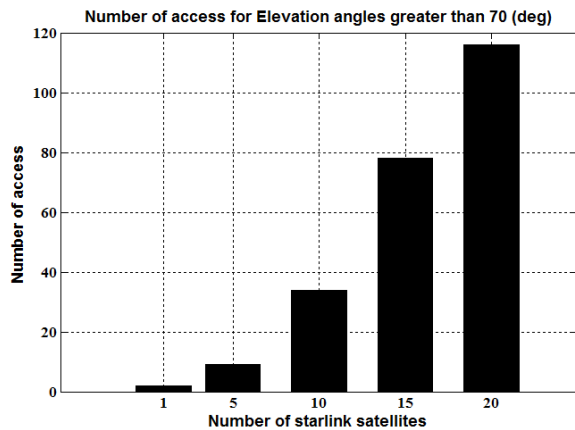
در شکل ۵ مقایسه حاشیه C/N تک ماهواره Starlink برای دریافت سرویس NB و WB شهر تهران براساس نتایج شبیه سازی در نرم افزار STK آورده شده است. همانطور که دیده می شود، حاشیه C/N سرویس NB برای تمام زوایای فراز، مثبت است. لذا، احتمال دریافت سرویس DtC از نوع NB در تمامی زوایای فراز در شهر تهران با حاشیه توانی مناسبی فراهم است. با توجه به اینکه در نتایج به دست آمده از نرم افزار MATLAB در حالت کلی، حاشیه لینک مثبتی برای ارائه سرویس NB توسط Starlink حاصل شد، در این بخش نیز برای شهر تهران، همان روند حاشیه لینک مثبت با استفاده از نرم افزار STK به دست آمد. اما با مقایسه شکل ۲ و شکل ۵ برای ماهواره Starlink، مشاهده می شود که در زوایای فراز بیش از ۵۵ درجه، ارائه سرویس NB برای شهر تهران در تمامی زوایای فراز، امکان پذیر نیست.

این به دلیل لحاظ نمودن شرایط واقعی در محیط شبیه سازی است. این درحالی است که حاشیه C/N سرویس WB در شهر تهران فقط برای زوایای فراز بیشتر از ۷۰ درجه، مثبت است. با این حال، تعداد دسترسی ها برای دریافت سرویس پهن باند DtC در زوایای فراز بالاتر از ۷۰ درجه، بسیار کم است. لذا، احتمال دریافت سرویس پهن باند DtC در زوایای فراز بالاتر از ۷۰ درجه، در شهر تهران بسیار کم است و چالش دریافت سرویس در این زوایای فراز با سناریوی تک ماهواره Starlink وجود دارد. در بخش بعدی مقاله، به بررسی بررسی نحوه رفع این چالش با افزایش تعداد ماهواره های Starlink پرداخته می شود.

را از دیتابیس نرم افزار STK، استخراج کرده و برای آن فرستنده/گیرنده مطابق با مشخصات فنی ارائه شده در جدول ۱، اضافه می شود. برای انجام تحلیل بودجه لینک توانی در دو مسیر DL و UL، یک تحلیلگر با عنوان Chain داخل محیط نرم افزار STK، استفاده شده است. در این نوع تحلیلگر از فرستنده شهر تهران به گیرنده ماهواره Starlink و از فرستنده ماهواره Starlink به گیرنده شهر تهران تهران فرآیند Assigned Objects انجام می شود. به عبارتی دیگر، در مسیر UL فرستنده گوشی کاربر در شهر تهران به گیرنده ماهواره Starlink متصل نموده و در مسیر DL، فرستنده ماهواره Starlink را به گیرنده گوشی کاربر برای ارائه سرویس، متصل می کند. با این فرآیند، کل زنجیره ارتباطی در یک مسیر دوطرفه مابین گوشی و ماهواره ایجاد می شود. برای استخراج گزارش بودجه لینک توانی از نرم افزار STK، روی تحلیلگر Chain، گزینه Compute Access انتخاب شده و سپس بعد از اجرای شبیه سازی در بخش Report، گزینه Access AER که شامل گزارش زاویه آزیموت، EA و SR ماهواره است را انتخاب می کنیم. نتایج این تحلیل برای دو نوع سرویس NB و WB برای سناریوی تک ماهواره، در شکل ۵ ارائه شده است.



شکل (۴): شبیه سازی ماهواره Starlink در محیط نرم افزاری STK برای شهر تهران (کشور ایران)

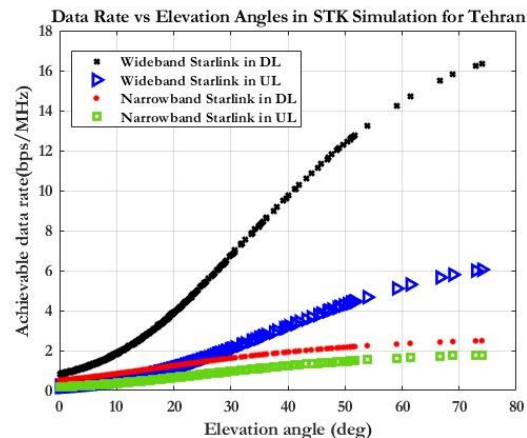


شکل (۷): تاثیر افزایش تعداد ماهواره‌ها بر تعداد نقاط قابل دسترس
زوایای فراز بالاتر از ۷۰ درجه در منظومه ماهواره‌ای Starlink

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، امکان ارائه سرویس DtC براساس سیستم‌های ماهواره‌ای مختلف، براساس نتایج بودجه توانی لینک DL و UL برای دو نوع سرویس NB و WB مورد بررسی قرار گرفت. تجزیه و تحلیل نتایج شبیه‌سازی‌های بودجه توانی لینک، نشان داده است که اکثر سیستم‌های ماهواره‌ای بررسی شده قادر به پشتیبانی از سرویس اینترنت اشیاء باند باریک از مدارهای LEO و GEO در DL هستند. این درحالی است که مسیر UL برای هر دو نوع سرویس NB و WB، با توجه به حاشیه منفی بودجه لینک توانی چالش برانگیزتر است. علاوه براین، بهره محدود آنتن دستگاه‌های زمینی موجب می‌شود که به آنتن‌های قدرتمند در سمت ماهواره و pfd مجاز بالاتر نیاز باشد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در حال حاضر، تنها AST به دلیل قرارگیری در مدار پایین و داشتن EIRP بالاتر، قادر به ارائه اتصال پهن باند است. اما AST فقط دو ماهواره عملیاتی دارد که آزمایش‌های موفقیت‌آمیزی در خصوص ارائه DtC انجام داده است و منظومه آن تکمیل نشده است. علاوه براین، امروزه و در فاز اول عملیاتی شدن، ارائه سرویس NB مانند سرویس‌های اضطراری در اولویت هستند. به همین دلیل، محتمل‌ترین گزینه ارائه سرویس DtC امروزی، می‌تواند ماهواره Starlink برای ارائه سرویس NB در مقایسه با دو ماهواره AST و Lynk باشد. در هر حال، به منظور کم کردن شکاف حاشیه C/N، پیشرفت‌های فنی و تغییرات رگولاتوری برای ارائه هر دو نوع سرویس NB و WB مورد نیاز است. در این پژوهش، پشتیبانی سرویس DtC به کشور ایران و به‌طور خاص شهر

نرخ داده قابل حصول سناریوی تک ماهواره Starlink برحسب زاویه فراز، در شکل ۶ آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، میزان نرخ داده قابل حصول با افزایش زاویه فراز، به صورت تصاعدی افزایش می‌یابد.



شکل (۶): مقایسه نرخ داده قابل حصول سرویس DtC در شهر تهران از ماهواره Starlink براساس نتایج شبیه‌سازی STK

۳-۱- بررسی اثر افزایش تعداد ماهواره‌های Starlink در ارائه سرویس DtC در شهر تهران

در این بخش، بررسی تاثیر افزایش تعداد ماهواره‌های Starlink بر دسترسی‌ها در زوایای فراز بالاتر، شبیه‌سازی خواهد شد. در همین راستا، منظومه‌های Starlink با تعداد مختلفی از ماهواره مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است. همانگونه که در شکل ۷ نمایش داده شده است، با افزایش تعداد ماهواره‌ها تعداد نقاط قابل دسترس از حیث زاویه فراز برای شهر تهران از میزان ۲ دسترسی در سناریوی تک ماهواره به تعداد ۱۱۴ دسترسی در سناریوی ۲۰ ماهواره، افزایش می‌یابد. به عبارتی دیگر با افزایش تعداد ماهواره‌های Starlink، در زوایای فراز بیشتر از ۷۰ درجه، می‌توان ارتباط پیوسته‌تری برای دریافت سرویس DtC و پوشش‌دهی بیشتری در شهر تهران داشت.

- [4c94b37e7d4424f50000/analysys_mason_spacex_tmobile_satellites_aug2022_rma18.pdf](https://www.analysysmason.com/contentassets/d8d18fb0ac374c94b37e7d4424f50000/analysys_mason_spacex_tmobile_satellites_aug2022_rma18.pdf)
- [5] O. B. Yahia, Z. Garroussi, B. Sansò, J.-F. Frigon, S. Martel, A. Lesage-Landry, and G. K. Kurt, "A scalable architecture for future regenerative satellite payloads," *arXiv preprint arXiv:2407.06075*, pp. 1–5, 2024.
 - [6] A. Pastukh, V. Tikhvinskiy, S. Dymkova, and O. Varlamov, "Challenges of using the L-band and S-band for direct-to-cellular satellite 5G-6G NTN systems," *Technologies*, vol. 11, no. 4, pp. 1–18, 2023.
 - [7] A. Pastukh, E. Devyatkin, A. Savochkin, and V. Tikhvinskiy, "Interference analysis of UWB devices to the satellite services in the 7240–8240 MHz frequency band," *Synchroinfo Journal*, vol. 8, no. 3, pp. 2–6, 2022.
 - [8] D. Chivanov and S. Dymkova, "Impact of 5G network performance on users loyalty," *Synchroinfo Journal*, vol. 10, no. 1, pp. 39–52, 2024.
 - [9] S. Dymkova, "Applicability of 5G subscriber equipment and global navigation satellite systems," *Synchroinfo Journal*, vol. 7, no. 5, pp. 36–48, 2021.
 - [10] A. Pastukh, V. Tikhvinskiy, E. Devyatkin, and A. Kulakayeva, "Sharing studies between 5G IoT networks and fixed service in the 6425–7125 MHz band with Monte Carlo simulation analysis," *Sensors*, vol. 22, no. 4, pp. 1–14, 2022.
 - [11] A. Pastukh, V. Tikhvinskiy, E. Devyatkin, and A. Kostin, "Interference analysis of 5G NR base stations to fixed satellite service bent-pipe transponders in the 6425–7125 MHz frequency band," *Sensors*, vol. 23, no. 1, pp. 1–19, 2023.
 - [12] A. Pastukh, V. Tikhvinskiy, and E. Devyatkin, "Exploring interference issues in the case of n25 band implementation for 5G/LTE direct-to-device NTN services," *Sensors*, vol. 24, no. 4, pp. 1–16, 2024.
 - [13] B. Daneshmand, "Comparative analysis of the concept of creation and development of 5G/IMT-2020 networks in Russia, China, USA and Europe," *T-Comm*, vol. 15, no. 6, pp. 20–32, 2021.
 - [14] K. L. Jones and A. L. Allison, *The Great Convergence and the Future of Satellite-Enabled Direct-to-Device*, Aerospace Corporation, 2023. [Online]. Available: https://cps.aerospace.org/sites/default/files/2023-09/Jones_Allison_GreatConvergence_20230919.pdf
 - [15] N. K. Bhola, "Future spectrum studies for WRC-2027 based on outcomes of WRC-23," 2024. [Online]. Available: <https://iafi.in/learnings-from-wrc23-conference/presentation/4NKBhola.pdf>
 - [16] Y. He, Y. Xiao, S. Zhang, M. Jia, and Z. Li, "Direct-to-smartphone for 6G NTN: Technical routes, challenges, and key technologies," *IEEE Network*, vol. 38, no. 4, pp. 128–135, 2024.
 - [17] Global Satellite Operators Association, *Satellite Direct-to-Device Connectivity: Bringing Connectivity to Everyone, Everywhere, Anytime*, Nov. 2, 2023. [Online]. Available: <https://gsoasatellite.com/wp-content/uploads/GSOA-D2D-Paper.pdf>
 - [18] D. Tuzi, E. F. Aguilar, T. Delamotte, G. Karabulut-Kurt, and A. Knopp, "Distributed approach to satellite direct-to-cell connectivity in 6G non-terrestrial networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 30, no. 6, pp. 28–34, 2023.
 - [19] S. Boumard, I. Moilanen, M. Lasanen, T. Suihko, and M. H. Hoyhtya, "A technical comparison of six satellite systems: Suitability for direct-to-device satellite access," in *Proc. 9th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, pp. 1–6, 2023.

تهران توسط تک ماهواره Starlink مورد بررسی قرار گرفت. با ایجاد یک سناریوی پوشش‌دهی واقعی توسط تک ماهواره در نرم‌افزار STK، نشان داده شد که امکان ارائه سرویس باند باریک و پهن باند DtC در شهر تهران به ترتیب در زوایای فراز بالاتر از ۵۵ و ۷۰ درجه برای تک ماهواره Starlink وجود دارد. در حالی که دسترسی در زوایای فراز بالاتر با وجود تک ماهواره، بسیار کم است. نشان داده شد که با افزودن تعداد ماهواره‌ها در شبیه‌سازی در قالب منظومه Starlink، امکان ارائه سرویس DtC در شهر تهران فراهم خواهد بود. لذا با توجه به نتایج شبیه‌سازی به‌دست آمده در این مقاله، امکان ارائه هر دو نوع سرویس DtC برای کشور ایران، در صورت رعایت قوانین و مقررات حقوقی و رگولاتوری کشور ایران و داشتن مجوزهای قانونی مربوط به حوزه فضایی در آینده نزدیک دور از ذهن نخواهد بود. البته این امر نیازمند مطالعات فنی، حقوقی و رگولاتوری توسط سازمان‌ها و نهادهای مربوطه خواهد بود. ضمن اینکه به منظور قانون‌مند کردن سرویس DtC، اقدامات و چارچوب‌هایی از سوی برخی کشورها و سازمان‌های بین‌المللی در دست اجرا است که کشور ایران می‌تواند با مشارکت در این توافقات و همکاری‌های بین‌المللی و منطقه‌ای، در صورت ارائه چنین نوع سرویسی در کشور از امنیت داده‌های خود در ارتباطات ماهواره‌ای مطابق با مجوز سرزمینی محافظت نماید.

تعارض منافع

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است."

مراجع

- [1] A. Pastukh, V. Tikhvinskiy, O. Mironova, and V. Akhmediarov, "Analysis of the possibility to use hybrid satellite-terrestrial systems (direct-to-device) in the IMT bands of terrestrial cellular networks," in *Proc. Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, pp. 1–6, 2024.
- [2] L. Liu, Y. Li, H. Li, J. Yang, W. Liu, J. Lan, Y. Wang, J. Li, J. Wu, Q. Wu, and J. Liu, "Democratizing direct-to-cell low Earth orbit satellite networks," in *Proc. 21st USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI '24)*, pp. 791–808, 2024.
- [3] ITU, *Measuring Digital Development: Facts and Figures 2022*, 2022. [Online]. Available: <https://www.itu.int/itu-reports/statistics/facts-figures-2022/>
- [4] L. Goldman, L. Palerm, and S. Piot, "SpaceX and T-Mobile focus on direct satellite-to-smartphone to improve mobile coverage in remote areas," *Analysys Mason*, pp. 1–5, 2022. [Online]. Available: https://www.analysysmason.com/contentassets/d8d18fb0ac374c94b37e7d4424f50000/analysys_mason_spacex_tmobile_satellites_aug2022_rma18.pdf

- Transactions on Vehicular Technology*, vol. 73, no. 8, pp. 11543–11555, 2024.
- [28] V. Akan, “Design of polyrod antenna having isoflux radiation characteristic for satellite communication systems,” *International Advanced Researches and Engineering Journal*, vol. 4, no. 3, pp. 226–232, 2020.
- [29] “Which is the cause of ‘scan losses’ in a linear phased antenna array?,” *Electronics Stack Exchange*, May 17, 2021. [Online]. Available: <https://electronics.stackexchange.com/questions/565542/which-is-the-cause-of-scan-losses-in-a-linear-phased-antenna-array>
- [30] ITU-R, “Propagation data required for the design systems in the land mobile-satellite service,” Recommendation ITU-R P.681-11, 2019.
- [31] D. Wang, C. Sun, X. Wang, L. Liu, and B. Wang, “5G integrated user downlink adaptive transmission scheme for low Earth orbit satellite Internet access network,” *Mobile Networks and Applications*, vol. 28, no. 4, pp. 1553–1564, 2023.
- [32] S. Marin, “Interference relationships between point-to-multipoint stations at about 28 GHz authorized by area license,” 2000. [Online]. Available: https://www.ieee802.org/16/tg2_orig/contrib/802162c-00_12.pdf
- [20] Federal Communications Commission, DA 24-756, Washington, DC, USA, Aug. 2, 2024. [Online]. Available: <https://docs.fcc.gov/public/attachments/DA-24-756A1.pdf>
- [21] “SpaceX Starlink has 227 direct to cellphone capable satellites,” *NextBigFuture*, Oct. 7, 2024. [Online]. Available: <https://www.nextbigfuture.com/2024/10/spacex-starlink-has-227-direct-to-cellphone-capable-satellites.html>
- [22] A. Aguilar, P. Butler, J. Collins, and M. Guerster, “Tradespace exploration of the next generation communication satellites,” American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), pp. 1–30, 2019.
- [23] Federal Communications Commission, DA 24-222, Washington, DC, USA, Mar. 8, 2024. [Online]. Available: <https://docs.fcc.gov/public/attachments/DA-24-222A1.pdf>
- [24] M. Fuentes *et al.*, “5G new radio evaluation against IMT-2020 key performance indicators,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 100880–110896, 2020.
- [25] 3GPP, *Physical Layer Procedures for Data (Release 17)*, 3GPP TS 38.214, 2022.
- [26] Z. Xu, Y. Gao, G. Chen, R. Fernandez, V. Basavarajappa, and R. Tafazolli, “Enhancement of satellite-to-phone link budget by using distributed beamforming,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 18, no. 4, pp. 85–93, 2023.
- [27] Z. Xu, G. Chen, R. Fernandez, Y. Gao, and R. Tafazolli, “Enhancement of direct LEO satellite-to-smartphone communications by distributed beamforming,” *IEEE*