

Original Research Paper

Payload Conceptual Design with Propagation Channel Study Mission for BIU CubeSat in Geostationary Orbit

Razieh Narimani*, Behzad Ahmadi, Elham Hosseini, and Leila Farhoudi

Satellite Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Receive 16 July 2025

Revise 01 October 2025

Accept 01 October 2025

Available Online 07 October 2025

Keywords

Scientific payload

Propagation parameters

CubeSat

Ka band, Ku band

Bringing into use

ABSTRACT

The rapid advancement of space technologies, alongside the growth of the communications industry, has intensified competition within the telecommunications sector—particularly in securing orbital points and associated frequency allocations. Given the strategic importance of geostationary orbit in global communications, national security, and economic development, preserving orbital positions for potential future use has become a critical priority for many nations. According to the regulations of the International Telecommunication Union (ITU), frequency allocation in geostationary orbit is granted only if a space station capable of transmitting and receiving at the designated frequency, occupies the declared orbital location for a continuous period of 90 days. Consequently, the development and deployment of small satellites equipped with telecommunications payloads have garnered significant interest due to their reduced design and manufacturing timelines. As emerging satellite communication services increasingly demand high-speed broadband channels, congestion in lower frequency bands (below Ku) has driven the shift toward higher bands such as Ku and Ka. However, these bands are more susceptible to atmospheric disturbances. While numerous models have been proposed to characterize these effects, their validation requires robust, real-world measurements over satellite propagation channels. This study presents the conceptual design of a telecommunications payload suitable for integration into a CubeSat platform. The payload is intended to evaluate propagation parameters in the Ku and Ka frequency bands to support the preservation of an orbital point in the geostationary orbit.

* Corresponding Author's E-mail: r.narimani@isrc.ac.ir

How to Cite this Article:

R. Narimani, B. Ahmadi, E. Hosseini, and L. Farhoudi, "Payload conceptual design with propagation channel study mission for BIU CubeSat in geostationary orbit," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 18, No. 3, pp. 17-27, 2025, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2025.1559>.



COPYRIGHTS

© 2025 by the authors. Published by ARI 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/)



مقاله پژوهشی

طراحی مفهومی محموله پایش پارامترهای کانال انتشاری برای ماهواره مکعبی با هدف حفظ نقطه مداری در مدار زمین ثابت

راضیه نریمانی^{۱*} (ID)، بهزاد احمدی^۲، الهام حسینی^۳ (ID)، و لیلا فرهودی^۴

۱- مربی، پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

۲-۳- استادیار، پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

۴- کارشناس، پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده

همگام با پیشرفت‌های صنعت ارتباطات، گسترش فناوری‌های فضایی یک محیط رقابتی در صنعت مخابرات از حیث دستیابی به نقاط مداری و فرکانس‌های مربوط به آن، تشکیل داده است. با توجه به نقش مدار زمین ثابت در ارتباطات جهانی، امنیت ملی و توسعه اقتصادی کشورها، حفظ یک نقطه مداری در این مدار به جهت استفاده احتمالی در آینده یک دغدغه جدی برای همه کشورها به‌شمار می‌رود. بر اساس قوانین اتحادیه بین‌المللی مخابرات، تخصیص فرکانس در مدار زمین ثابت در صورتی امکان‌پذیر است که یک ایستگاه فضایی با قابلیت ارسال و دریافت در فرکانس مورد نظر به مدت نود روز متوالی در موقعیت مداری اعلام شده قرار گیرد. از این رو ساخت و قرارگیری یک ماهواره کوچک به‌همراه یک محموله مخابراتی با توجه به کوتاهتر بودن زمان طراحی و ساخت آن مورد توجه بسیاری از کشورها قرار گرفته است. نیاز سرویس‌های ارتباط ماهواره‌ای جدید به کانال‌های پرسرعت پهن‌بند و شلوغ شدن باندهای فرکانسی پایین‌تر از Ku، تقاضای استفاده از باندهای بالاتر را افزایش داده است ولی از زیاد اثرات جوی با بالارفتن فرکانس، چالش جدی پیش‌روی طراحان در استفاده از این فرکانس‌ها به‌شمار می‌رود. مدل‌های بسیاری جهت شبیه‌سازی این اثرات ارائه شده است ولی پذیرش آن‌ها مستلزم وجود اندازه‌گیری‌های مطمئن و کافی در شرایط واقعی و روی کانال‌های انتشار ماهواره‌ای است. در این مقاله به طراحی مفهومی یک محموله مخابراتی مناسب برای قرارگیری بر روی یک ماهواره مکعبی با هدف ارزیابی پارامترهای انتشاری در باند فرکانسی Ku و Ka و حفظ نقطه مداری در مدار زمین ثابت پرداخته شده است.

تاریخچه مقاله:

دریافت ۲۵ تیر ۱۴۰۴
بازنگری ۰۹ مهر ۱۴۰۴
پذیرش ۰۹ مهر ۱۴۰۴
اولین انتشار ۱۵ مهر ۱۴۰۴

واژه‌های کلیدی:

محموله تحقیقاتی
پارامترهای انتشاری
ماهواره مکعبی
باند ka، باند Ku
حفظ نقطه مداری

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: r.narimani@isrc.ac.ir

How to Cite this Article:

R. Narimani, B. Ahmadi, E. Hosseini, and L. Farhoudi, "Payload conceptual design with propagation channel study mission for BIU CubeSat in geostationary orbit," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 18, No. 3, pp. 17-27, 2025, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2025.1559>.

COPYRIGHTS

© 2025 by the authors. Published by ARI 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/)



متوالی قرار گرفته باشد. نکته‌ای که در این میان حائز اهمیت است و باید به آن توجه نمود این است که درخواست‌ها در ITU به ترتیب ثبت‌شدن مورد بررسی قرار می‌گیرند و این مساله در کنار طولانی بودن فرایند طراحی و بهره‌برداری از یک سیستم پیچیده مانند ماهواره که ممکن است سال‌ها به طول انجامد، نگرانی‌هایی در خصوص ثبت نقطه مداری در کشورهایی که ماهواره آماده ندارند، ایجاد شده است. بنابراین ساخت و قرارگیری یک ماهواره کوچک‌تر به همراه یک محموله مخابراتی با توجه به کوتاهتر بودن زمان طراحی و ساخت آن، یکی از جذابترین راه‌کارهای حفظ نقطه مداری برای کشورها به‌شمار می‌رود [۳]. انتخاب ماموریت این ماهواره‌ی کوچک به‌منظور توجیه تعریف آن و درخواست باند فرکانسی مورد نظر در راستای ماموریت تعریف شده، گام مهمی در این مرحله می‌باشد.

سرویس‌های ارتباطی ماهواره‌ای جدید نیاز به کانال‌های پرسرعت پهن باند دارند و از آن‌جا که باندهای فرکانسی پایین‌تر از Ku روز به روز شلوغ‌تر می‌شوند، تقاضای استفاده از باندهای فرکانسی بالاتر رو به گسترش است ولی با توجه به ازدیاد اثرات جوی با بالارفتن فرکانس، چالش‌های پیش روی طراحان نیز افزایش یافته و تعیین مشخصات کانال ارتباطی جهت کمک به برطرف نمودن این چالش، اهمیت بسیاری پیدا نموده و می‌تواند مبنای تعریف ماموریت یک ماهواره مکعبی تحقیقاتی قرار گیرد. مطالعات و آزمایشات بسیاری در خصوص شناسایی اثرات جوی روی سیگنال‌های ماهواره‌ای انجام شده است [۹-۴] که در برخی موارد منجر به توسعه چندین مدل کانال و ثبت آن در ITU گردید که می‌توان به مدل‌های استوت‌من و دیشمن [۱۰]، گارسیا-لوپز [۱۱]، بریانت [۱۲] و مدل ITU-R P.618-9 [۱۳] اشاره کرد.

تخمین افت کانال ارتباطی یکی از مهم‌ترین پارامترها در طراحی لینک‌ها و شبکه‌های ماهواره‌ای بوده و پذیرش مدل‌های ارائه شده مستلزم وجود اندازه‌گیری‌های مطمئن و کافی در شرایط واقعی روی کانال‌های انتشار ماهواره‌ای است. اتحادیه بین‌المللی مخابرات نیز استانداردهای متفاوتی در زمینه مدل‌های مختلف تضعیف و افت ناشی از شرایط جوی دارد. بنابراین قرارگیری محموله‌ای جهت شناسایی کانال انتشار در مدار زمین ثابت بسیار مفید و ضروری خواهد بود تا بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده بتوان مدل بهینه را انتخاب نمود.

افت ناشی از باران را در یک کانال ارتباط ماهواره‌ای می‌توان با اندازه‌گیری تغییرات توان سیگنال بیکن ارسالی از ماهواره مشخص نمود. با ثابت بودن توان سیگنال ارسالی از ماهواره، می‌توان نوسانات دامنه سیگنال دریافتی در ایستگاه زمینی را ناشی از اثرات لایه تروپوسفر در حین انتشار سیگنال دانست. علاوه بر این با توجه به متفاوت بودن میزان

فهرست علائم

| | |
|-------|----------------------------|
| EIRP | توان تشعشی موثر |
| GEO | مدار زمین ثابت |
| IL | افت عبوری |
| ITU | اتحادیه بین‌المللی مخابرات |
| SCIEX | محموله آزمایشات علمی |

مقدمه

با گسترش استفاده از تجهیزات رادیویی و ارسال سیگنال در فرکانس‌های مختلف، اتحادیه بین‌المللی مخابرات به‌منظور اطمینان از بهینه بودن استفاده از طیف وسیع فرکانسی، فرایندهای گوناگون و موثری ارائه می‌کند که کلیه ایستگاه‌های رادیویی زمینی و فضایی و سیگنال‌های ارسال شده از آن‌ها، می‌بایست به‌طور کامل از آن قوانین تبعیت کنند. در کنار پیشرفت‌های صنعت ارتباطات، توسعه فناوری‌های ارتباطات فضایی نیز منجر به یک محیط رقابتی در صنعت مخابرات از حیث دستیابی به نقاط مداری در مدار زمین ثابت و فرکانس‌های مربوط به آن ایجاد نموده است؛ به طوری که مطابق با اطلاعات اعلامی این اتحادیه در حدود ۴۰۰ تا ۵۰۰ مورد درخواست برای یک شبکه جدید در هر سال ثبت شده و سالانه این تعداد نیز رو به افزایش است.

نقش مدار زمین ثابت در ارتباطات جهانی، امنیت ملی و توسعه اقتصادی کشورها، بسیار زیاد است. ثبات موقعیت ماهواره‌ها نسبت به زمین و قرارگیری ماهواره‌های مخابراتی و تلویزیونی در آن از یک سو و محدود بودن تعداد نقاط مداری در آن از سوی دیگر، منجر به رقابت کشورهای مختلف برای استفاده از نقاط مداری شده و تخصیص یک نقطه مداری و حفظ آن برای کشورها اهمیت بسیاری یافته است. این در حالی است که اگر یک کشور نتواند نقطه مداری خود را حفظ کند، ممکن است آن را از دست داده و از سوی ITU آن نقطه به کشور دیگری واگذار شود. در این شرایط کشور اول ملزم به پذیرش تأثیرات اقتصادی و سیاسی آن خواهد بود، به همین سبب امروزه حفظ یک نقطه مداری برای استفاده احتمالی در آینده به‌عنوان یک دغدغه جدی برای کشورها مطرح می‌شود [۲-۱].

بر اساس قوانین ITU، تمدید زمان ثبت نقطه مداری برای هر کشوری که در بازه زمانی اولیه نتواند از آن نقطه مداری بهره‌برداری عملیاتی انجام دهد، به شرطی امکان‌پذیر است که یک ایستگاه فضایی با قابلیت ارسال و دریافت در نقطه مداری مورد نظر به مدت ۹۰ روز

می‌کند. این محموله مخابراتی از یک فرستنده مخابراتی و دو آنتن جهت ارسال سیگنال فرستنده‌ها تشکیل می‌شود.

جدول ۱ - الزامات سیستمی محموله مخابراتی.

Table 1. Payload requirements.

| Parameter | Value | |
|---------------------------------------|--------------------------|--------------|
| Transmitter Frequency (GHz) | 10.7-12.7 | |
| Bandwidth (MHz) | 18-21 | |
| Frequency Sweep Step (MHz) | 500 | |
| Maximum Measurable rain Loss (dB/kHz) | 1 st Scenario | Ku:27, Ka:29 |
| | 2 nd Scenario | Ku:17, Ka:19 |
| Orbit Height (Km) | 36000 | |
| Size | 1 st Scenario | 2U |
| | 2 nd Scenario | 1U |
| Life Time | 90 Day | |
| Satellite Dimension | 12U | |

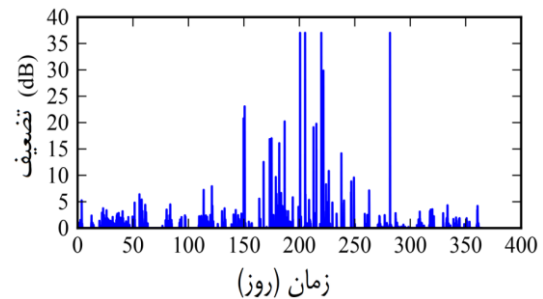
محاسبات بودجه لینک

اولین گام در طراحی لینک مخابراتی، تحلیل بودجه لینک مخابراتی است. در محاسبات بودجه لینک مخابراتی شرایط محیطی کانال انتشار، نرخ بیت موردنیاز، کیفیت سیگنال ارسالی (احتمال خطای بیت) و تکنولوژی در دسترس تاثیرگذارند. با توجه به حساسیت بالای امواج در باند فرکانسی Ku و Ka به تلفات باران و شرایط محیط انتشار، توان ارسالی براساس الزام پیشینه تلف باران قابل اندازه‌گیری مشخص می‌شود.

شناخت دامنه تضعیف و تغییرات پلاریزاسیون سیگنال رادیویی در فرکانس‌های کاری برای طراحی لینک‌های مخابرات ماهواره‌ای ضروری است. تضعیف ناشی از باران در فرکانس‌های بالاتر از ۵GHz، به‌میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد ولی با افزایش تقاضا و شلوغ شدن روز به روز طیف فرکانسی، استفاده کاربران از فرکانس‌های بالاتر توجه اقتصادی پیدا می‌کند. با توجه به ازدیاد اثرات جوی با بالا رفتن فرکانس، لازم است مشخصات کانال مخابراتی فرکانس بالا در شرایط جوی مختلف شناخته شود. موثرترین راه برای استخراج تضعیف باران، اندازه‌گیری تجربی میزان تضعیف توان یک سیگنال بیکن ماهواره‌ای در شرایط مختلف آب‌وهوایی است.

سیگنال ارسالی برای مطالعه پارامترهای انتشاری، یک سیگنال Tone می‌باشد زیرا تغییرات دامنه (توان) دریافتی این سیگنال پارامتر مورد مطالعه است. از آن‌جا که این سیگنال دارای پهنای باند خاصی نمی‌باشد، به‌صورت تئوری می‌توان از پهنای باند 1Hz برای اندازه‌گیری دامنه استفاده نمود. ولی به‌دلیل محدودیت‌های پیاده‌سازی، پهنای باند پیشنهادی بررسی این پارامتر، 1KHz در نظر گرفته شده است.

تغییرات لحظه‌ای افت مربوط به بخارات آب اکسیژن ابر و باران می‌توان آن‌ها را از یکدیگر متمایز نمود. به‌طور ویژه تلفات ناشی از باران بر دیگر تلفات غالب بوده و به راحتی از روی تغییرات سیگنال بیکن قابل استخراج است [۱۷-۱۴]. شکل ۱ نمونه‌ای از اندازه‌گیری تضعیف در باند Ka توسط ONERA در سال ۲۰۱۴ بین ماهواره زمین ثابت Astra 3B و ایستگاه دریافتی در شهر تولوز فرانسه را نشان می‌دهد [۱۸]. همانطور که مشاهده می‌شود این تضعیف در برخی ایام سال به‌حدی بالا است به‌شدت عملکرد ماهواره‌ها را تحت تاثیر قرار خواهد داد.



شکل ۱ - نمونه‌ای از پروفایل روزانه تلف باران در باند Ka [۱۸].

Fig. 1. Typical attenuation due to rain in Ka band [18].

در این مقاله طراحی مفهومی یک محموله مخابراتی با قابلیت حفظ نقطه مداری و ارزیابی پارامترهای انتشاری در دو باند فرکانسی Ku و Ka برای به‌کارگیری در یک ماهواره مکعبی در مدار زمین ثابت ارائه شده است.

محموله مخابراتی SCIEX

ماموریت اصلی ماهواره حفظ نقطه مداری در مدار زمین‌آهنگ در باندهای فرکانسی Ku و Ka است. به این منظور این محموله مخابراتی می‌بایست قابلیت ارسال سیگنال مخابراتی به‌مدت ۹۰ روز متوالی در رنج فرکانسی تعریف شده را داشته باشد. از طرف دیگر از این محموله می‌توان برای مطالعه پارامترهای انتشاری کانال مخابرات ماهواره‌ای باندهای Ku و Ka در منطقه تحت پوشش بهره‌برداری کرد.

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، در این مقاله ابعاد کلی ماهواره 12U در نظر گرفته شده است و با توجه به الزامات سیستمی طراحی محموله مخابراتی در دو سناریوی سایزینگ 1U و 2U انجام شده است.

محدودیت‌های سیستمی یک ماهواره مکعبی در طراحی محموله مخابراتی مورد نظر اثر داشته و رعایت الزامات توان مصرفی و جانمایی در یک ماهواره مکعبی در مدار زمین ثابت، الزام سختگیرانه باند باریک بودن و جاروب فرکانسی فرستنده را به محموله SCIEX تحمیل

| | | | |
|--------------------------|---------|---------|------|
| System noise temperature | 24 | 24 | dBk |
| Rx Antenna Gain | 52.6 | 57.82 | dB |
| G/T | 28.6 | 33.82 | dB/K |
| k | -228.60 | -228.60 | dB |
| C/No | 66.53 | 64.63 | dBHz |
| Signal Bandwidth | 1 | 1 | kHz |
| Minimum C/N Required | 7 | 7 | dB |
| Required C/N (1 kHz) | 37 | 37 | dB |
| Margin (1 Hz) | 59.53 | 57.63 | dB |
| Margin (1 kHz) | 29.53 | 27.63 | dB |

محاسبات بودجه لینک بر اساس مطالعات مشابه، برای پهنای باند ۱ KHz و ۱ Hz انجام شده است. بر مبنای محاسبات انجام شده در سناریو اول با فرستنده‌های ۱ وات و برای پهنای باند ۱ Hz، در باند Ku حدود ۵۹ dB و در باند Ka حدود ۵۷ dB حاشیه برای اندازه‌گیری تلفات باران و دیگر مشخصات جوی وجود دارد. در سناریو دوم با فرستنده‌های ۰/۱ وات و همان پهنای باند ۱ Hz، این مقادیر به حدود ۴۹ dB برای Ku و ۵۷ dB برای Ka کاهش یافته است.

جدول ۳- بودجه لینک باند Ku و Ka محموله SCIEEX برای سناریو دوم (توان خروجی ۰/۱ وات).

Table 3. SCIEEX Ku and Ka-band link budget for the second scenario (0.1-Watt output power).

| Link parameters | Downlink | Downlink | Unit |
|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------|
| | 2 nd Scenario Ku | 2 nd Scenario Ka | |
| Orbit height | 36000 | 36000 | km |
| Min. Elevation angle | 40 | 40 | deg |
| Max. slant range | 37997 | 37997 | km |
| Freq. downlink | 11000 | 20000 | MHz |
| Tx RF power | -10 | -10 | dBW |
| Tx antenna gain | 15 | 15 | dB |
| Tx EIRP | 5 | 5 | dBW |
| Free space loss (Ls) | 204.87 | 210.07 | dB |
| Pointing loss | 0.82 | 2.72 | dB |
| System noise temperature | 24 | 24 | dBk |
| Rx Antenna Gain | 52.6 | 57.82 | dB |
| G/T | 28.6 | 33.82 | dB/K |
| k | -228.60 | -228.60 | dB |
| C/No | 56.53 | 54.63 | dBHz |
| Signal Bandwidth | 1 | 1 | kHz |
| Minimum C/N Required | 7 | 7 | dB |
| Required C/N (1 kHz) | 37 | 37 | dB |
| Margin (1 Hz) | 49.53 | 47.63 | dB |
| Margin (1 kHz) | 19.53 | 17.63 | dB |

برای پهنای باند ۱ kHz مقادیر حاشیه لینک در سناریو اول در باند Ku حدود ۲۹ dB و در باند Ka حدود ۲۷ dB است. در حالی که در سناریو دوم این مقادیر به ۱۹ dB و ۱۷ dB کاهش می‌یابد که در عمل مقادیر محاسبه شده برای فرستنده‌های ۰/۱ وات در پهنای باند ۱ kHz بیان‌گر این است که

محاسبات بودجه لینک‌های باندهای Ku و Ka محموله SCIEEX

با در نظر گرفتن شرایط زیر مطابق جداول ۲ و ۳ ارائه شده است.

(۱) پهنای باند سیگنال تک فرکانس، مطابق با توضیحات فوق

و همچنین بر اساس محاسبات انجام شده در محموله تحقیقاتی TDP5 در ماهواره آلفاست، در اینجا نیز محاسبات برای پهنای باند ۱ Hz و ۱ KHz انجام شده است.

(۲) بهره آنتن‌های بخش فضایی مطابق با تکنولوژی‌های موجود برای هر دو باند Ku و Ka برابر ۱۵ dBi در نظر گرفته شده است.

(۳) تلف بین خروجی فرستنده و ورودی آنتن برابر ۲ dB در نظر گرفته شده که مطابق بلوک دیاگرام شکل‌های ۲ و ۳ لحاظ شده است.

(۴) دو آنتن ۵ متری برای آنتن‌های زمینی محموله SCIEEX در باندهای Ku و Ka خواهیم داشت که بهره‌های آن‌ها به ترتیب ۵۲ dBi و ۵۷ dBi است.

(۵) دقت نشانه‌روی ایستگاه زمینی به سمت ماهواره در این مقاله حدود ۰/۱° در نظر گرفته شده است.

(۶) بر اساس کاتالوگ دستگاه‌های اسپکتروم و نیز متن استاندارد EMC-STD-461G، برای اندازه‌گیری دقیق دامنه سیگنال تک تون این سیگنال باید از سطح نویز حداقل ۶ dB بالاتر باشد، همچنین در محاسبات محموله تحقیقاتی ماهواره آلفاست این مقدار ۷dB در نظر گرفته شده است به همین خاطر مقدار لازم برای بازیابی سیگنال در این مقاله نیز ۷ dB در نظر گرفته شد.

(۷) دمای نویز سیستم برای هر دو باند به ۲۵۰ K، معادل dBK ۲۴ تقریب زده شده است.

جدول ۲- بودجه لینک باند Ku و Ka محموله SCIEEX برای سناریو اول (توان خروجی ۱ وات).

Table 2. SCIEEX Ku and Ka-band link budget for the first scenario (1 watt output power).

| Link parameters | Downlink | Downlink | Unit |
|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|------|
| | 1 st Scenario Ku | 1 st Scenario Ka | |
| Orbit height | 36000 | 36000 | km |
| Min. Elevation angle | 40 | 40 | deg |
| Max. slant range | 37997 | 37997 | km |
| Freq. downlink | 11000 | 20000 | MHz |
| Tx RF power | 0 | 0 | dBW |
| Tx antenna gain | 15 | 15 | dB |
| Tx EIRP | 15 | 15 | dBW |
| Free space loss (Ls) | 204.87 | 210.07 | dB |
| Pointing loss | 0.82 | 2.72 | dB |

باید در نظر داشت که با توجه به تاثیر محدودیت‌های مورد اشاره روی مشخصات نهایی محموله و به تبع آن بودجه لینک و حاشیه لینک، این محدودیت‌ها موجب تغییرات دقت و رنج دینامیکی نهایی سیستم خواهد شد. واحد MCU در این بلوک، وظیفه برنامه‌ریزی سینتی‌سایزرهای (PLL) مورد استفاده و مانیتورینگ پارامترهای تله‌متری و ارتباط با سایر بخش‌های ماهواره را بر عهده دارد و از آنجایی که هدف اندازه‌گیری تغییرات توان سیگنال دریافتی با زمان می‌باشد، دقت خیلی بالایی برای فرکانس سیگنال ارسالی مورد نیاز نیست زیرا می‌توان گیرنده زمینی را با فرکانس دریافتی تطبیق داد.

جدول ۴، مشخصات کلی دو طرح پیشنهادی برای ترنسپوندر و مقایسه آن‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، محدودیت‌های اصلی اشاره شده، در انتخاب طرح نهایی بسیار تاثیرگذار است.

جدول ۴- مقایسه ساینینگ دو طرح پیشنهادی محموله مخابراتی.

Table 4. Comparison of two proposed payloads.

| Parameter | 1 st Scenario | | | 2 nd Scenario | | |
|------------------------------|--------------------------|----|------|--------------------------|----|-----|
| | Ku | *C | Ka | Ku | *C | Ka |
| Power Consumption (W) | 12.9 | 3 | 13.5 | 4 | 3 | 4.6 |
| Dimension (cm ³) | <20×10×10 | | | <10×10×10 | | |
| Mass (Kg) | <2 | | | <1.5 | | |

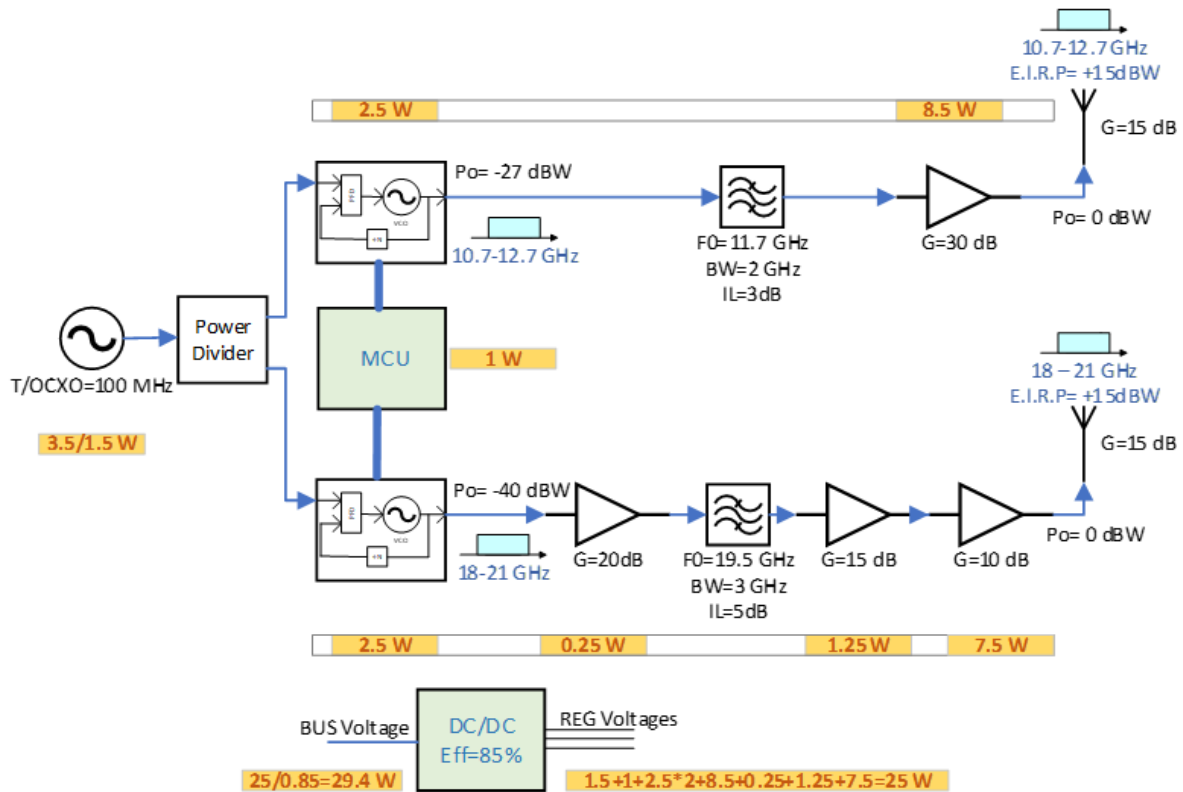
* The common section between two frequency bands

این محموله برای اندازه‌گیری در حالت تغییرات جوی گسترده چندان مطلوب نیست و در صورت عدم امکان افزایش توان ارسالی به دلیل محدودیت‌های طراحی، می‌بایست اندازه‌گیری‌ها در پهنای باند ۱ Hz انجام شود.

طراحی فرستنده‌های باند Ka/Ku

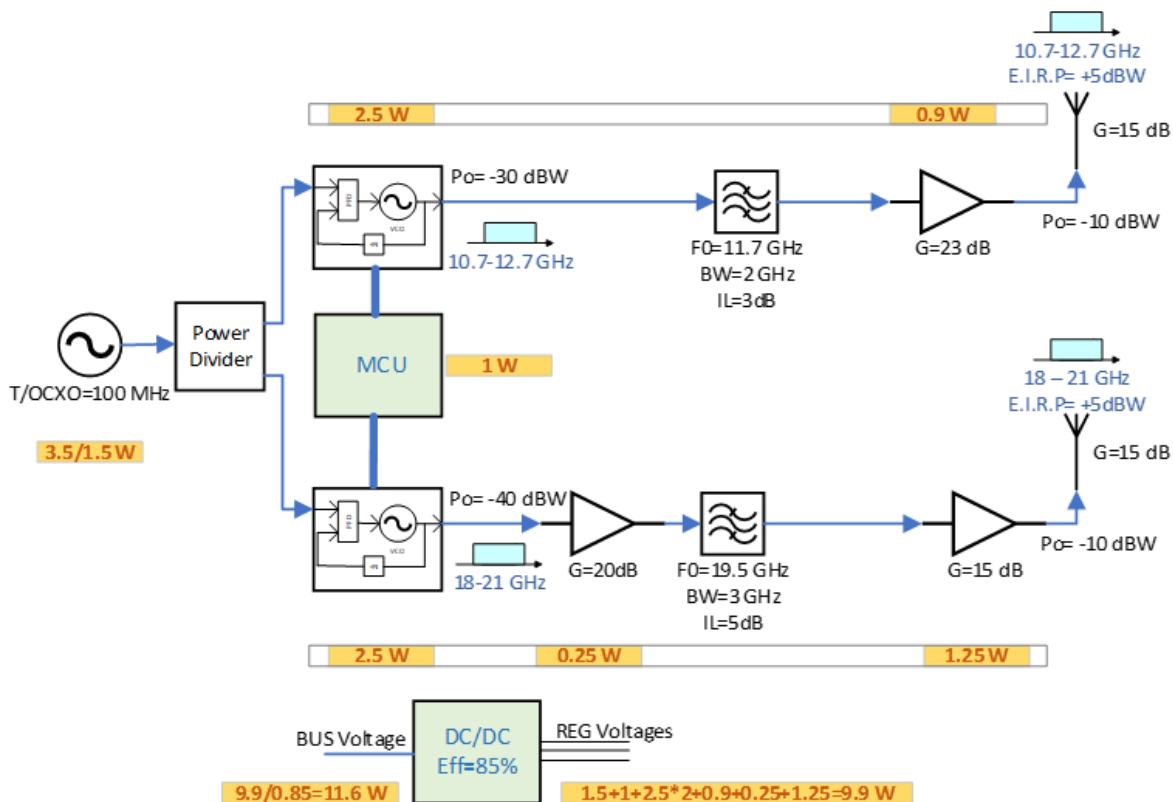
با توجه به الزامات سیستمی از جمله محدودیت جرم و توان مصرفی در ماهواره کوچکی که در این مقاله مورد نظر است، فرستنده محموله مخابراتی، یک فرستنده تک کاناله و فاقد افزونگی در نظر گرفته شده است. بر این اساس دو طرح مختلف بر اساس توان متفاوت ارسالی فرستنده‌ها ارائه شده است. مزیت طرح پیشنهادی تجمیع فرستنده هر دو باند در یک جعبه است به این ترتیب سه بلوک تغذیه، میکرو کنترلر و اسیلاتور بین دو فرستنده به اشتراک گذاشته شده است. و در نتیجه جرم، ابعاد و توان مصرفی کلی کاهش یافته است.

بلوک دیاگرام این دو طرح در شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب برای توان ارسالی ۱ وات و ۰/۱ وات نشان داده شده است. با توجه به محدودیت جدی تامین توان در ماهواره مکعبی و اهمیت میزان توان مصرفی فرستنده در انتخاب نهایی طرح، توان مصرفی تقریبی هر بخش در یک نوار زرد رنگ نمایش داده شده است. در پایان بر اساس راندمان بخش تغذیه، توان مصرفی دیده شده از سمت سیستم ماهواره و بخش توان محاسبه شده است.



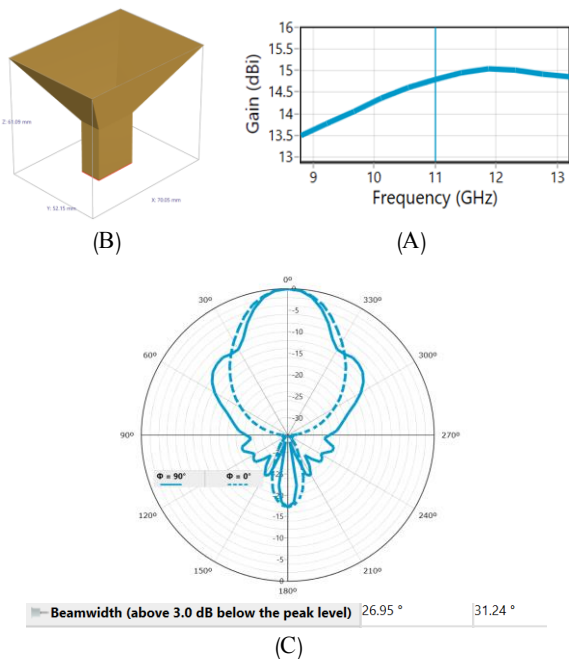
شکل ۲- بلوک دیاگرام طرح ۱.

Fig. 2. Block diagram of first scenario.



شکل ۳- بلوک دیاگرام طرح ۲.

Fig. 3. Block diagram of second scenario.



شکل ۴- آنتن شیپوری فرستنده ماهواره در باند Ku.

Fig. 4. Ku-band satellite transmitter horn antenna.

آنتن فرستنده باند Ku

با توجه به اینکه ماهواره مورد نظر از دسته ماهواره‌های کیوب‌ست در نظر گرفته شده است، امکان‌سنجی آنتن‌های قابل استفاده در باند Ku برای استفاده در پلتفرم ماهواره‌ای کیوب‌ست شامل دو دسته آنتن‌های شیپوری و آرایه میکرواستریپ است. این آنتن‌ها با توجه به الزامات موجود، قابل پیاده‌سازی هستند. شکل ۴ مشخصات مربوط به آنتن شیپوری را نشان می‌دهد که بهره و پترن تشعشی آن در کاربرد مورد نظر مناسب است.

در ادامه، یک نمونه تجاری از آنتن آرایه میکرواستریپ برای باند فرکانسی ۸/۲-۸/۴ GHz در شکل ۵ ارائه شده است. این آنتن دارای بهره بهتر از ۱۶ dBi با ابعاد $10 \times 8 \times 1$ cm می‌باشد. بر اساس فرکانس نهایی مورد نظر در ماهواره، باز طراحی این آنتن در باندهای ۱۱ و ۱۳ گیگاهرتز به سادگی امکان‌پذیر خواهد بود.

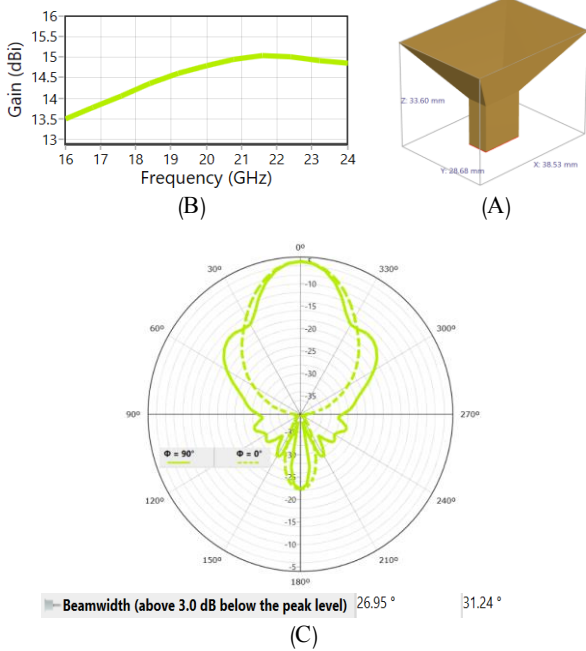
جدول ۶- مشخصات آنتن ماهواره انتخابی در باند Ku.

Table 6. Ku band selected satellite antenna specification.

| | |
|------------------------------|-------------------|
| Frequency (GHz) | 10.7-11.7 |
| Bandwidth (GHz) | 1 |
| Gain (dBi) | 15-20 |
| Beamwidth | 15-30 |
| Power (W) | More than 2W |
| Input Aperture | Coax or Waveguide |
| Mass (g) | Less than 200 |
| Dimension (cm ³) | Less than 10*10*2 |

آنتن فرستنده باند Ka

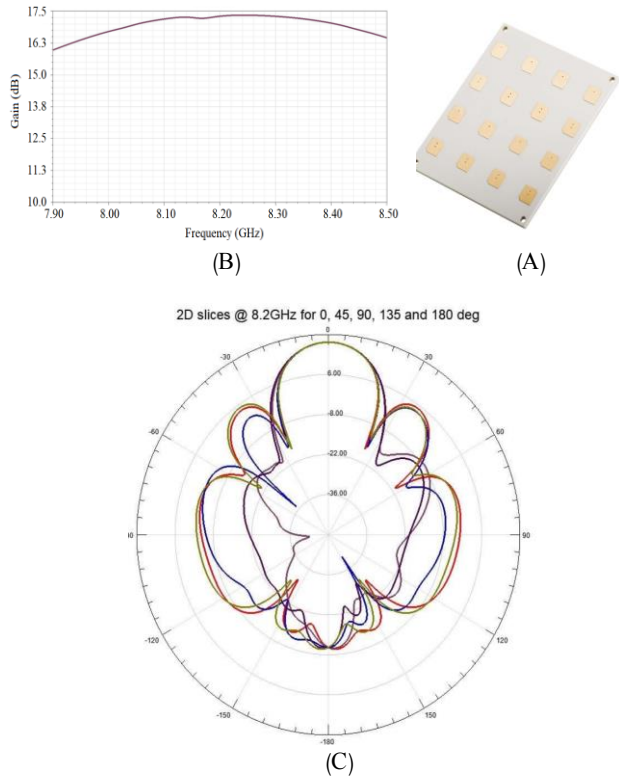
مشابه با آنتن‌های باند فرکانسی Ku، در این بخش به امکان‌سنجی آنتن‌های قابل استفاده در باند Ka برای استفاده در پلتفرم ماهواره‌ای کیوب‌ست پرداخته شده است. شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب نمونه‌هایی از آنتن‌های شیپوری و آرایه مایکرواستریپ در این باند فرکانسی را نشان می‌دهند.



شکل ۶- آنتن شیپوری فرستنده ماهواره در باند Ka.

Fig. 6. Ka-band satellite transmitter horn antenna.

با توجه به بررسی‌های انجام شده و محدودیت‌های جانمایی موجود در ماهواره‌های مکعبی، آنتن‌های باند Ka در باند ارسال با وزن کمتر از ۱۰۰ گرم مناسب هستند. جدول ۷ مشخصات آنتن‌های پیشنهادی ماهواره در باند Ka را بیان می‌کند.



شکل ۵- آنتن آرایه مایکرواستریپ فرستنده ماهواره در باند X.

Fig. 5. X-band satellite transmitter microstrip antenna.

مقایسه بین مشخصات آنتن‌ها در جدول ۵ آورده شده است. مطابق با جدول ۵ و با توجه به محدودیت‌های جانمایی موجود، آنتن‌های باند Ku در باند ارسال با وزن کمتر از ۲۰۰ گرم انتخاب مناسبی در این ماهواره هستند. ابعاد بزرگ آنتن‌های هورن در این باند فرکانسی، مانع بزرگی در به‌کارگیری این دسته از آنتن‌ها به‌شمار رفته و آنتن‌های مایکرواستریپی با بهره ۱۵-۲۰ دسیبل می‌توانند با ابعاد و وزن مناسبی در این پروژه مورد بهره‌برداری قرار گیرند. در جدول ۶ مشخصات نهایی این دسته از آنتن‌ها آورده شده است.

جدول ۵- مشخصات آنتن‌های پیشنهادی ماهواره در باند Ku.

Table 5. Ku band satellite antennas specifications.

| Antenna Type | Maximum Gain (dBi) | Beamwidth | Dimension* (mm ³) | Mass (g) |
|--------------|--------------------|-----------|-------------------------------|----------|
| Horn | 15 | 28 | 71×53×62 | 1200 |
| Microstrip | 15-20 | 15-30 | 100×100×20 | <200 |

* Without holder and connections

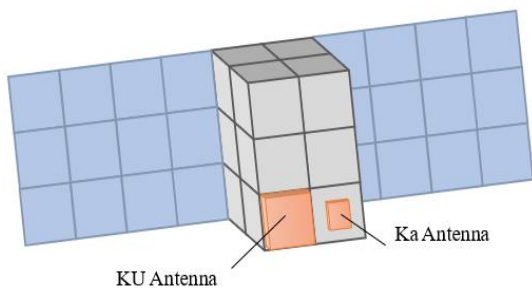
بودجه جرمی و توان مصرفی

در گام نهایی با توجه به انتخاب بلوک فرستنده و آنتن‌های ماهواره در هر دو باند بودجه جرمی و ابعادی برای محموله SCIEX به صورت تخمینی برای دو طرح پیشنهادی در جدول ۹ آورده شده است. همانطور که گفته شد طرح اول و دوم به ترتیب مناسب برای جانمایی در فضای تخصیص یافته به محموله مخابراتی به اندازه‌ی 2U و 1U، ارائه شده است. جانمایی تجهیزات بر اساس طراحی انجام شده در شکل‌های ۸-۱۰ قابل مشاهده است.

جدول ۹- بودجه جرمی و ابعادی محموله مخابراتی SCIEX.

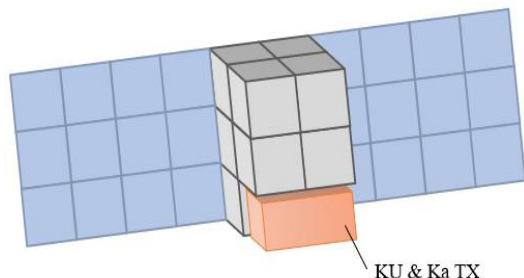
Table 9. Weight budget of SCIEX payload.

| Parameter | 1 st Scenario | | 2 nd Scenario | |
|-------------------|------------------------------|----------|------------------------------|----------|
| | Dimension (cm ³) | Mass (g) | Dimension (cm ³) | Mass (g) |
| Ka/Ku Transmitter | <20×10×10 | <2000 | <10×10×10 | <1500 |
| Ku Antenna | <2×10×10 | <200 | <2×10×10 | <200 |
| Ka Antenna | <5×5×5 | <200 | <5×5×5 | <200 |



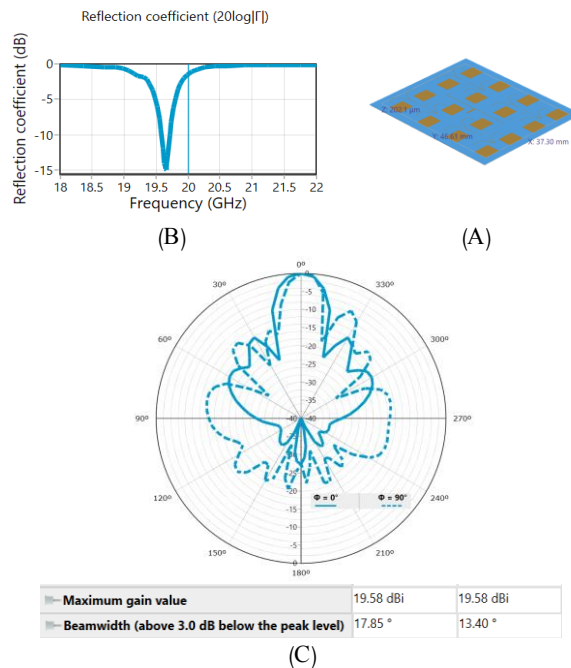
شکل ۸- جانمایی آنتن‌ها در ماهواره 12U.

Fig. 8. Antenna placement on 12U satellite.



شکل ۹- جانمایی فرستنده‌های Ku و Ka در طرح ۱.

Fig. 9. Ku & Ka TX placement for the first scenario.



شکل ۷- آنتن آرایه مایکرواستریپ فرستنده ماهواره در باند Ka.

Fig. 7. Ka-band satellite transmitter microstrip antenna.

جدول ۷- مشخصات آنتن‌های پیشنهادی ماهواره در باند Ka.

Table 7. Ka band satellite antennas specifications.

| Antenna Type | Maximum Gain (dBi) | Beamwidth | Dimension* (mm ³) | Mass (g) |
|--------------|--------------------|-----------|-------------------------------|----------|
| Horn | 15 | 28 | 39×29×34 | <100 |
| Microstrip | 15-20 | 15-30 | 50×50×50 | <100 |

* Without holder and connections

امکان انتخاب آنتن‌های مختلف و بررسی مشخصات آن‌ها در کنار محدودیت‌های موجود، در نهایت منجر به انتخاب آنتنی با مشخصات اشاره شده در جدول ۸ برای این کاربرد شده است.

جدول ۸- مشخصات آنتن ماهواره در باند Ka.

Table 8. Ka band satellite antenna requirements.

| | |
|------------------------------|-------------------|
| Frequency (GHz) | 17-20 |
| Bandwidth (GHz) | 3 |
| Gain (dBi) | 15-20 |
| Beamwidth | 15-30 |
| Power (W) | More than 2W |
| Input Aperture | Coax or Waveguide |
| Mass (g) | Less than 200 |
| Dimension (cm ³) | 5*5*5 |

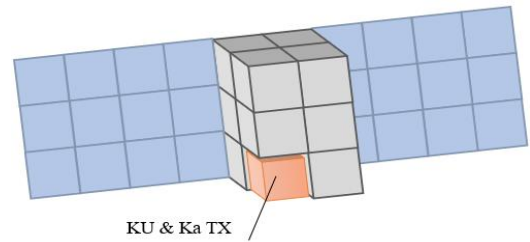
است. در گام‌های بعد انجام طراحی جزئی و پیاده‌سازی نمونه آزمایشگاهی مورد نظر خواهد بود. ساخت نمونه کیفی/پروازی، پرتاب کیوب‌ست و اندازه‌گیری مشخصات انتشاری در مدار به صورت عملیاتی به‌عنوان هدف نهایی از این پژوهش قابل حصول خواهد بود.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده‌است.

مراجع

- [1] X. Wang, "ITU regulatory procedures for small satellites," *International Telecommunication Union (ITU)*, KiboCUBE (UNOOSA), 2023.
- [2] A. Matas, Y. Henri, and Ch. Chern Loo, "The ITU radio regulations - challenges for small satellites," in *Small Satellites: Regulatory Challenges and Chances*, vol. 11, I. Marboe, Ed. Brill Nijhoff, 2016, pp. 237-264, https://doi.org/10.1163/9789004312234_014.
- [3] "Notification and recording of frequency assignments," in *Radio Regulations*, Ed. 2020, vol. 1, Article 11, International Telecommunication Union, 2020, pp. 211-224.
- [4] Y. Maekawa, "A study on long-term rain attenuation characteristics in Ka and Ku band satellite communications links," *IEICE Transactions on Communications*, vol. E108-b, no. 10, pp. 1202-1216, 2025, <https://doi.org/10.23919/transcom.2024EBP3192>.
- [5] Y. Wang, R. Li, J. Ma, Y. Song, L. Liu, and X. Wang, "Effect of rain attenuation on the availability of LEO satellite communication system," in *5th International Conference on Electronics and Communication, Network and Computer Technology (ECNCT)*, Guangzhou, China, 2023, pp. 11-17, <https://doi.org/10.1109/ECNCT59757.2023.10281194>.
- [6] J. X. Yeo, Y. H. Lee, and J. T. Ong, "Rain attenuation prediction model for satellite communications in tropical regions," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 11, pp. 5775-5781, 2014, <https://doi.org/10.1109/TAP.2014.2356208>.
- [7] J. X. Yeo, Y. H. Lee, and J. T. Ong, "Ka-band satellite beacon attenuation and rain rate measurements in Singapore - comparison with ITU-R models," in *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, North Charleston, SC, USA, 2009, <https://doi.org/10.1109/APS.2009.5172073>.
- [8] J. S. Ojo, M. O. Ajewole, and S. K. Sarkar, "Rain rate and rain attenuation prediction for satellite communication in Ku and Ka bands over Nigeria," *Electromagnetics Research B.*, vol. 5, pp. 207-223, 2008, <https://doi.org/10.2528/PIERB08021201>.



شکل ۱۰- جانمایی فرستنده‌های Ku و Ka در طرح ۲.

Fig. 10. Ku & Ka TX placement for the second scenario.

توان مصرفی محموله طبق طرح‌های پیشنهادی محاسبه شده و در جدول ۱۰ ارائه شده است. در طرح پیشنهادی اول و دوم به ترتیب ۱۰٪ و ۲۶٪ کاهش توان به واسطه تجمیع دو فرستنده در یک بلوک ارائه شده است.

جدول ۱۰- بودجه توانی محموله مخابراتی SCIEX.

Table 10. Power budget of SCIEX payload.

| Parameter | 1 st Scenario | 2 nd Scenario |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|
| Ka/Ku Transmitter | 29.4 W | 11.6 W |

نتیجه‌گیری

در این مقاله یک محموله تحقیقاتی جهت ماهواره مکعبی حفظ نقطه مداری تعریف شده است که در دو باند Ku و Ka ارسال تک فرکانس داشته و در پهنای باند مناسب جاروب می‌شوند. با توجه به محدودیت جرم و توان مصرفی در ماهواره کوچکی که در این‌جا مورد نظر است، فرستنده تک کاناله در نظر گرفته و دو طرح برای فرستنده با دو رنج متفاوت دقت اندازه‌گیری تلف باران پیشنهاد شده است. بر اساس محاسبات انجام شده برای پهنای باند ۱ Hz به ترتیب در باند Ku و Ka، ۵۹ dB و ۵۷ dB حاشیه برای اندازه‌گیری تلفات باران و دیگر مشخصات جوی وجود دارد و در سناریو دوم این مقادیر به ترتیب به ۴۹ dB و ۴۷ dB کاهش می‌یابد.

مقادیر حاشیه لینک برای پهنای باند ۱ kHz، در حدود ۳۰ dB کاهش یافته که باعث می‌شود در عمل مقادیر طرح دوم برای اندازه‌گیری مشخصات کانال ماهواره‌ای با تغییرات جوی گسترده مطلوب نباشد.

کارهای آینده

در این مقاله طراحی مفهومی یک محموله تحقیقاتی جهت ماهواره مکعبی حفظ نقطه مداری با هدف شناسایی کانال انتشار تعریف شده

- International Symposium on Telecommunications (IST'2014)*, Tehran, Iran, 2014, pp. 145-149, <https://doi.org/10.1109/ISTEL.2014.7000686>.
- [15] M. Rytir, "Results from simultaneous Ka- and X-band long-term satellite propagation measurements at low elevation angle in the arctic," in *19th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Stockholm, Sweden, 2025, pp. 1-5, <https://doi.org/10.23919/EuCAP63536.2025.10999369>.
- [16] T. V. Omotosho, J. S. Mandeep, and M. Abdullah, "Atmospheric gas impact on fixed satellite communication link a study of its effects at Ku, Ka and V bands in Nigeria," in *IEEE International Conference on Space Science and Communication (IconSpace)*, Penang, Malaysia, 2011, pp. 69-72, <https://doi.org/10.1109/IConSpace.2011.6015854>.
- [17] H. J. Hansen, A. S. Kulessa, W. Marwood, M. Forrest, D. Borg, and O. Reinhold, "Multipath and anomalous propagation studies of Ka band emissions using a distributed transmit-receive radio link network experiment," in *Asia-Pacific Microwave Conference*, Melbourne, VIC, Australia, 2011, pp. 749-752.
- [18] I. Dahman, P. Arbogast, N. Jeannin, and B. Benammar, "Rain attenuation prediction model for satellite communications based on the Météo-France ensemble prediction system PEARP," *NHESS Articles*, vol. 18, no. 12, pp. 3327-3341, 2018, <https://doi.org/10.5194/nhess-18-3327-2018>.
- [9] K. C. Igwe, O. D. Oyedum, M. O. Ajewole, and A. M. Aibinu, "Evaluation of some rain attenuation prediction models for satellite communication at Ku and Ka bands," *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 188, pp. 52-61, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.03.005>.
- [10] W. L. Stutzman and W. K. Dishman, "Correction to a simple model for the estimation of rain-induced attenuation along earth-space paths at millimeter wavelengths," *Radio Science*, vol. 17, no. 6, pp. 1465-1476, 1982, <https://doi.org/10.1029/RS017i006p01465>.
- [11] J. A. Garcia-Lopez, J. M. Hernando, and J. Selga, "Simple rain attenuation method for satellite radio links," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 36, no. 3, pp. 444-448, 1988, <https://doi.org/10.1109/8.192129>.
- [12] G. H. Bryant, I. Adimula, C. Riva, and G. Brussard, "Rain attenuation statistics from rain column, diameters and heights," *International Journal of Satellite Communications*, vol. 19, no. 3, pp. 263-283, 1999, <https://doi.org/10.1002/sat.673>.
- [13] *Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design of Earth-Space Telecommunication Systems*, Recommendation P.618-9 (08/07), International Telecommunication Union (ITU), 2007.
- [14] R. Bahri, M. Keshavarzi, H. Yarmohammadi, and G. Moradi, "Typical Ka band satellite beacon receiver design for propagation experimentation," in *7th*