



E-ISSN: 2676-4253

Journal of Technology in Aerospace Engineering

Vol. 8, No. 3, pp. 63-74, 2024

<https://doi.org/10.22034/jtae.2024.8.3.5>

Journal Homepage: <https://jtae.ari.ac.ir>



Original Research Paper

Conceptual Design of Store and Forward Payload for LEO Satellite

Elham Hosseini* and Razieh Narimani

Satellite Systems Research Institute (SRI), Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received 21 January 2023

Revised 06 September 2023

Accepted 20 September 2023

Available Online 05 November 2023

Keywords:

Thermal barrier coating communication

Network protocol

Conceptual design

Store and forward payload

Satellite communication link

Redundancy

ABSTRACT

One of the satellite telecommunication services is the S&F service. In this article, the service characteristics are analyzed and the impact of them on the design parameters is explained. One of the challenges of telecommunication payload design is the mapping of service parameters to the technical requirements of payload components. First, analytical relationships between service parameters (the number of users, traffic, and delay) and technical requirements (network capacity and onboard memory) are presented. Then, the protocol stack and its parameters are selected with the aim of optimizing the power and network efficiency while considering the link conditions. By systematically identifying the service specification's impact on the design parameters and the design process, payload requirements in order to develop a network are easily extracted. One of the effective factors in the payload block diagram design is its reliability. The design of redundancy is proposed by considering the component's reliability and its function with the aim of achieving reliability and reducing fault propagation.

* Corresponding Author's E-mail: e.hosseini@isrc.ac.ir

How to Cite this Article:

E. Hosseini and R. Narimani, "Conceptual Design of Store and Forward Payload for LEO Satellite," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, Vol. 8, No. 3, pp. 63-74, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jtae.2024.8.3.5>.

COPYRIGHTS

Authors retain the copyright and full publishing rights.

Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article licensed under the [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).





طراحی مفهومی محموله ذخیره و ارسال یک ماهواره LEO

الهام حسینی^{۱*} و راضیه نریمانی^۲

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

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

چکیده

یکی از سرویس‌های مخابرات ماهواره‌ای سرویس ذخیره و ارسال است که در این مقاله تحلیل مشخصات این سرویس و تبیین تأثیر هر یک از آن‌ها روی پارامترهای طراحی محموله انجام شده است. یکی از چالش‌های طراحی محموله مخابراتی نگاهت پارامترهای سرویس به الزامات فنی اجزای محموله است. ابتدا روابط تحلیلی بین پارامترهای سرویس (تعداد کاربران، ترافیک هر کاربر و تأخیر مجاز) و الزامات فنی (ظرفیت شبکه و حافظه روی برد) ارائه شده است. سپس پروتکل‌های لایه‌های شبکه و پارامترهای آن‌ها باهدف بهینه‌سازی توان و بازده شبکه بر اساس شرایط لینک مخابرات ماهواره‌ای انتخاب می‌شود. با مشخص شدن اثرگذاری مشخصات سرویس روی پارامترهای طراحی و سیستماتیک کردن فرایند طراحی، استخراج الزامات محموله در مسیر توسعه شبکه به راحتی انجام می‌شود. یکی از عوامل مؤثر در طراحی بلوک دیاگرام محموله مخابراتی قابلیت اطمینان آن است. نوع و طرح افزونگی با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان اجزای محموله مخابراتی و کارکرد هر جزء باهدف حصول قابلیت اطمینان محموله و کاهش انتشار خطا پیشنهاد شده است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱ بهمن ۱۴۰۱
بازنگری ۱۵ شهریور ۱۴۰۲
پذیرش ۲۹ شهریور ۱۴۰۲
اولین انتشار ۱۴ آبان ۱۴۰۲

واژه‌های کلیدی:

پروتکل شبکه‌های مخابراتی
طراحی مفهومی
محموله ذخیره و ارسال ماهواره‌ای
لینک مخابرات ماهواره‌ای
افزونگی

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: e.hosseini@isrc.ac.ir

How to Cite this Article:

E. Hosseini and R. Narimani, "Conceptual Design of Store and Forward Payload for LEO Satellite," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, Vol. 8, No. 3, pp. 63-74, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jtae.2024.8.3.5>.

COPYRIGHTS

Authors retain the copyright and full publishing rights.

Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article licensed under the [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

۱ مقدمه

امروزه ماهواره‌ها یکی از مهم‌ترین درگاه‌های ارتباطی برای انتقال انواع سرویس‌های مخابراتی، سنجشی و ناوبری در سراسر جهان محسوب می‌شوند. سرعت توسعه تکنولوژی در صنعت فضایی، ناحیه تحت پوشش وسیع، مقاوم‌بودن در مقابل تداخل‌های زمینی، عدم نیاز به زیرساخت زمینی در زمان حوادث طبیعی و دسترسی آسان به مناطق صعب‌العبور سبب شد که در حال حاضر شبکه‌های مخابراتی مبتنی بر ماهواره جزء شبکه‌های ارائه سرویس مخابراتی پرمخاطب قرار گیرند. به‌طور کلی سرویس‌های مخابراتی ماهواره‌ای از منظر تأخیر در دودسته سرویس‌های بلادرنگ و سرویس‌های ذخیره و ارسال جای می‌گیرند که در این مقاله طراحی مفهومی محموله‌های ذخیره و ارسال مورد بررسی قرار می‌گیرد. خواستگاه اصلی سرویس ذخیره و ارسال در لینک ماهواره‌ای، محدودیت زمان دسترسی شبکه ارتباطی مبتنی بر ماهواره‌های مدار LEO, MEO است که امروزه با ظهور منظومه‌های ماهواره و رشد تکنولوژی، محدودیت‌های زمان دسترسی تقریباً از بین رفته است. اما از آنجایی که این سرویس با نرخ بیت پایین ارائه می‌شود و امکان برقراری ارتباط با ترمینال‌های ساده و ارزان‌قیمت را فراهم می‌نماید همچنان کاربردهای مختص به خود را دارد. اولین بار مفهوم سرویس پیامکی ماهواره‌ای در سال ۱۹۵۷ معرفی شد که پس از سه سال در محموله PACSAT پیاده شد. در سال ۱۹۸۴ یک ترنسپوندر دیجیتال در ماهواره UOSAT-2 برای ارائه سرویس ذخیره و ارسال طراحی و ساخته شد [۱]. شبکه‌های تأخیرپذیر^۱ یکی از راهکاری پیشنهادی برای مقابله با محدودیت‌های لینک ماهواره‌ای مانند تأخیر انتشار و زمان دسترسی است. در مرجع [۲] معماری و عملکرد شبکه‌های تأخیرپذیر بر بسترهای مختلف از جمله ماهواره ارائه شده است. شبکه‌های تأخیرپذیر مبتنی بر نرم‌افزار راه‌حلی برای چالش مقیاس‌پذیری شبکه‌های تأخیرپذیر هستند. مقیاس‌پذیری شبکه‌های مخابرات ماهواره‌ای باند باریک داده‌ای در [۳] با بهره‌گیری از مفهوم خوشه‌بندی به مناطق کوچک‌تر تقسیم شده و مدیریت منابع رادیویی در هر یک از خوشه‌ها انجام می‌شود.

یکی از چالش‌های مهم در طراحی محموله‌های مخابراتی ماهواره نگاشت الزامات دینامیک ماهواره و سرویس کاربری به مشخصات فنی ماژول‌های مخابراتی است. از طرف دیگر معرفی پارامترهای قابل مصالحه در طراحی و بیان کمی تأثیر هر یک از آن‌ها در مأموریت اصلی نیز در کاهش زمان برای رفت و برگشت‌های طراحی و کاهش هزینه نقش بسزایی را برعهده دارد. در این مقاله فرایند طراحی مفهومی محموله مخابراتی ذخیره و ارسال را با تحلیل الزامات سرویس و نگاشت پارامترهای سرویس به الزامات فنی ماژول‌ها ارائه می‌شود.

اولین مرحله طراحی، انتخاب مدل لایه‌های شبکه، طراحی پشته پروتکل و تعیین الزامات هر یک از لایه‌ها است. طراحی لایه فیزیکی باید مطابق با شرایط کانال ماهواره‌ای و همچنین الزامات پروتکل‌های لایه‌های بالاتر است. در [۴] دو پشته پروتکل $M2M^2/IOT$ پرکاربرد روی کانال دسترسی تصادفی بر مبنای استاندارد $DVB-RCS2^3$ مورد ارزیابی قرار گرفته است. متریک ارزیابی معرفی شده در این مقاله زمان تکمیل فرایند است که معرف بهترین سطح عملکرد پشته پروتکل است. معماری شبکه و تکنیک‌های دسترسی چندگانه برای ترمینال‌های زمینی کم هزینه با توان مصرفی پایین در [۵] معرفی شد و با معیارهای مصرف انرژی و ظرفیت سیستم مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. طراحی و آنالیز پروتکل کنترل لینک داده ساده شده برای یک شبکه مخابرات ماهواره LEO با در نظر گرفتن اثر تعداد کاربران، طول بسته و نرخ بیت در بازده کلی شبکه در [۸] ارائه شده است. یکی از موضوعات مهم در طراحی شبکه‌های مخابراتی با سویچینگ بسته، طراحی الگوریتم یافتن مسیر بهینه برای انتقال بسته از مبدا به مقصد است که در [۹، ۱۰] الگوریتم‌هایی برای کمینه کردن مسیر انتقال بسته‌ها ارائه شده است.

طراحی محموله سرویس ذخیره و ارسال در فرکانس UV با در نظر گرفتن پروتکل TDM در لینک پایین‌رو و SRMA در لینک بالا رو برای ماهواره سینا در مدار LEO ارائه شده است [۱۱]. در [۱۲] روند توسعه مشخصات سرویس‌های ذخیره و ارسال به سمت سرویس‌های بلادرنگ را با به‌کارگیری مفهوم منظومه‌های ماهواره‌ای مورد بررسی قرار می‌دهد. به‌عبارت دیگر مفهوم منظومه‌های ماهواره‌ای برای افزایش زمان دسترسی ماهواره به کاربران در ارتفاع‌های مداری پایین و در نتیجه کمینه کردن تأخیر زمانی تحویل بسته‌ها پیشنهاد شد. اولین گام در ارائه الگوریتم‌های مسیریابی تعیین معیارهای ارزیابی مسیرهای انتقال بسته‌ها است که در [۱۳] معیارهای مقایسه انواع الگوریتم‌های مسیریابی مانند تعداد دست‌به‌دست شدن‌ها، تأخیر تحویل بسته به مقصد و جیت‌ر معرفی شده است.

در هیچ‌یک از مراجع روابط بین پارامترهای سرویس و الزامات فنی به‌صورت جامع ارائه نشده است. در این مقاله روابط بین پارامترهای سرویس و الزامات فنی به‌منظور انجام مصالحه بین آن‌ها برای ارائه بهترین طرح استخراج شد. از طرف دیگر موضوع مهم دیگری که در طراحی و ساخت ماژول‌های ماهواره‌ای مدنظر است قابلیت اطمینان آن‌ها است که به دلیل عدم تعمیرپذیری باید در مرحله طراحی و با توجه به حساسیت ماژول‌ها طرح افزونگی مناسب برای محموله ارائه شود. در این مقاله طرح افزونگی مناسب شامل نوع و تعداد افزونگی با مصالحه بین بودجه‌های فنی و قابلیت اطمینان پیشنهاد شده است.

برای محاسبه زمان رویت ابتدا باید زمان موردنیاز برای یک دور زمین محاسبه شده و سپس بر اساس نیم زاویه پوشش ماهواره زمان رویت ماهواره در ناحیه پوشش محاسبه شود [۶].

$$T_{sat} = 2\pi \left[\frac{a^3}{\mu} \right]^{1/2}; \quad \mu = 3.986 \times 10^{14} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}, \quad a = h + R_T \quad (2)$$

μ ثابت گرانشی است. برای ارتفاع مداری ۵۰۰ کیلومتر، زمان یک دور مداری برابر ۹۴/۶ است. زمان رویت ایستگاه زمینی توسط ماهواره از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۶].

$$T_u = \frac{T_{sat} \times \theta}{\pi} = \frac{94.6 \times 0.2452}{\pi} = 7.4 \text{ min} \quad (3)$$

به این ترتیب متوسط زمان دسترسی ایستگاه زمینی در هر رد زمینی برابر ۷/۴ دقیقه است که باید طراحی ارتباطات نوده‌های زمینی را مطابق با این الزام طراحی کنیم.

طراحی سیستمی محموله مخابراتی از تحلیل الزامات کاربری شروع شده و به استخراج الزامات فنی محموله ختم می‌شود. هزینه تمام شده سرویس، هزینه اولیه، سهولت نصب و راه‌اندازی و ایمنی تجهیزات کاربری و از طرف دیگر محدودیت‌های بودجه‌های فنی ماهواره‌ها از قیود حل مسئله طراحی سیستمی محموله‌های مخابراتی در بستر ماهواره به شمار می‌روند. نمودار مراحل طراحی محموله ذخیره و ارسال در شکل ۲ نشان داده شده است. مطابق شکل ۲ اولین مرحله در طراحی محموله مخابراتی تحلیل مشخصات سرویس موردنظر است. محموله ذخیره و ارسال وظیفه دریافت پیام از ایستگاه‌های کاربری در پهنه جغرافیایی مشخص و ذخیره آن را به عهده دارد و پس از رویت مقصد باید پیام به مقصد ارسال شود. پس از نگاشت مشخصات سرویس به الزامات سیستم، ظرفیت شبکه محاسبه شده و با در نظر گرفتن توپولوژی پیشنهادی شبکه و تعیین نقش عناصر شبکه، لینک مخابراتی به‌عنوان بستر ارتباط، طراحی شده و متناسب با سطح تکنولوژی در دسترس، پیاده‌سازی انجام می‌شود. به این ترتیب ورودی‌های طراحی پلتفرم ماهواره که شامل بودجه‌های فنی و الزامات محموله مخابراتی است برای طراحی پلتفرم مناسب جهت پشتیبانی از محموله ارائه می‌شود. در این مقاله برای روشن شدن روند طراحی یک مثال کمی آورده شده است.

در این مقاله ابتدا روند طراحی سیستمی ارائه می‌شود. تحلیل مشخصات سرویس درخواستی به‌منظور نگاشت به مشخصات فنی ماژول‌ها در بخش ۳ انجام می‌شود. قبل از طراحی پشته پروتکل باید سناریوی ارتباطی مطابق با محدودیت‌های کانال مخابرات ماهواره‌ای مشخص شود. طراحی لینک مخابراتی براساس نیازمندی‌های سناریو انجام می‌شود. نهایتاً طراحی بلوک دیاگرام بخش فضایی با در نظر گرفتن ملاحظات قابلیت اطمینان و افزونگی مناسب انجام می‌شود.

۲ طراحی سیستمی

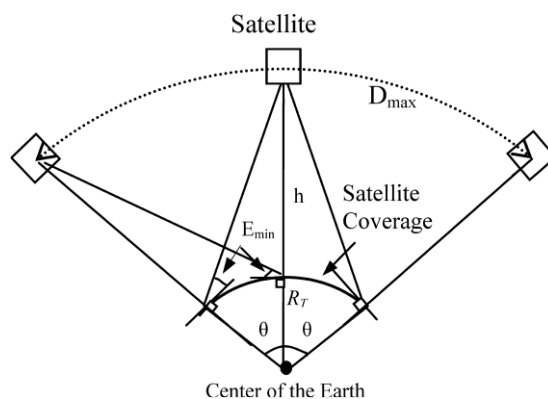
پارامترهای یک شبکه مخابراتی چندکاربره مبتنی بر ارتباط ماهواره‌ای مدار پایین (LEO) مؤثر در طراحی سیستم مخابراتی آن شامل موارد زیر است [۶].

(۱) ناحیه تحت پوشش

(۲) زمان رویت ماهواره توسط ایستگاه زمینی

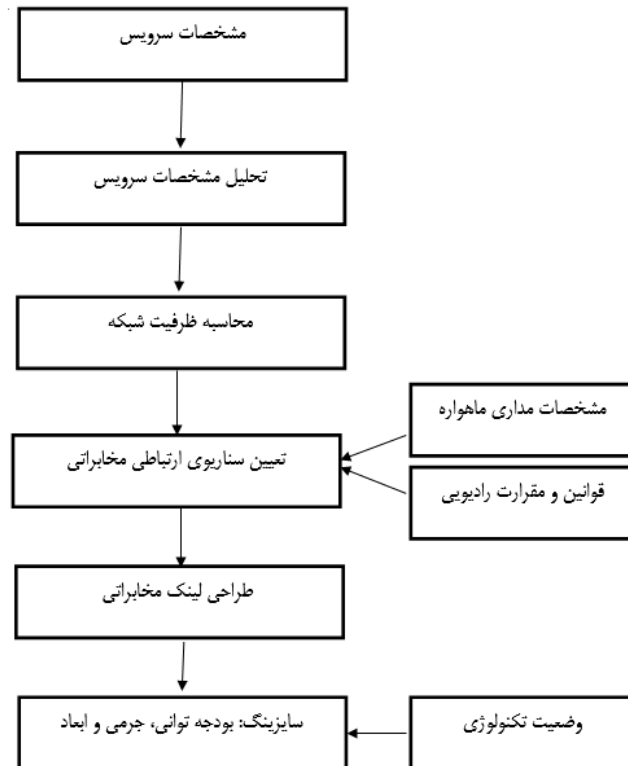
پارامترهای مؤثر سطح پوشش ماهواره در شکل ۱ نشان داده شده است. به منظور محاسبه ناحیه تحت پوشش باید ارتفاع مداری و کمینه زاویه فراز مورد نظر مشخص شده باشد. به این ترتیب نیم زاویه پوشش ماهواره از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\theta = [\text{Arcos}[\frac{R_T}{R_T + h} \cos(E_{\min})] - E_{\min}] \text{ (radians)} \quad (1)$$



شکل ۱- سطح پوشش ماهواره [۶]

به ترتیب کمینه زاویه فراز، شعاع زمین و ارتفاع مداری ماهواره است. برای کمینه زاویه فراز ۱۰ درجه و ارتفاع مداری ۵۰۰ کیلومتر، نیم زاویه پوشش ماهواره برابر ۰/۲۴۵۲ رادیان است.



شکل ۲- نمودار مراحل پیشنهادی طراحی سیستمی محموله مخابراتی

۳ مشخصات سرویس

سادگی پیاده‌سازی، هزینه تمام شده، نصب و راه‌اندازی و ایمنی از جمله مشخصات تجهیزات کاربری به شمار می‌روند. به‌منظور تبیین ارتباط پارامترها، طراحی سیستمی یک مثال نوعی از محموله ذخیره و ارسال با مشخصات سرویس و نقطه اثر آن‌ها مطابق جدول ۱ انجام می‌شود.

جدول ۱- مشخصات سرویس محموله ذخیره و ارسال ماهواره‌ای

ردیف	مشخصه	مقدار	نقطه اثر
۱	ارتفاع مداری	۵۰۰ Km	طراحی لینک، پروتکل دسترسی
۲	کمینه زاویه فراز	۱۰°	طراحی لینک، پروتکل دسترسی
۳	طول عمر ماهواره	۵ سال <	طراحی بلوک دیاگرام افزونه
۴	منطقه تحت پوشش	ایران	طراحی لینک، توپولوژی شبکه
۵	نوع مأموریت	ذخیره و ارسال	طراحی سیستمی
۶	نوع کاربر	خانگی - ثابت	پروتکل دسترسی، طراحی لینک
۷	تعداد کاربران خانگی	۱۰۰۰	ظرفیت لینک، توپولوژی شبکه
۸	حجم متوسط پیام	۵۰۰ byte	ظرفیت لینک، طراحی لینک، تجهیزات ایستگاه کاربری
۹	نوع ارتباط	دوطرفه غیرهم‌زمان	سناریوی ارتباط، تجهیزات ایستگاه کاربری
۱۰	تأخیر مجاز	۱ روز	توپولوژی شبکه
۱۱	سرویس‌های امنیت شبکه	احراز هویت، یکپارچگی پیام، محرمانگی	طراحی سیستمی، تجهیزات ایستگاه کاربری
۱۲	نوع انتقال	نقطه‌به‌نقطه	طراحی سیستمی
۱۳	حجم ترافیکی	burst	طراحی سیستمی
۱۴	قوانین تخصیص	سیاست‌گذاری شبکه	پروتکل دسترسی

به این ترتیب طول بافر مورد نیاز در فرستنده و گیرنده به منظور پشتیبانی از پروتکل ارسال مجدد از رابطه زیر محاسبه می شود [۱۴].

$$\text{size of Buffer} = R_b \times (T_{pd} + T_f) \quad (5)$$

برای ارسال یک فریم است. T_f, T_{pd}, R_b به ترتیب نرخ بیت، تأخیر انتشار و زمان مورد نیاز

(۱) سربار فریم ناشی از پروتکل دسترسی: از پروتکل AX.25 [۱۵] شخصی سازی شده در این مقاله استفاده شده است که سربار پروتکل دسترسی آن ۰/۰۴۵ است. به این ترتیب داده ترافیکی خام در هر رد از رابطه زیر به دست می آید.

$$RW = NM \times SM \times (1 + \eta_{MAC}) \times \left(\frac{1 + \eta_{MOD}}{R_c}\right) \times (1 + FER) \quad (6)$$

$$= 1000 \times (500) \times 1.045 \times 2.41 \times 1.028 = 1.295 \text{ MByte}$$

هر پیام، سربار باز یابی کلاک، سربار پروتکل دسترسی، نرخ کد و احتمال خطای فریم است. $FER, R_c, \eta_{MAC}, \eta_{MOD}, SM, NM$ به ترتیب تعداد پیام ها، حجم

۲.۳ حجم حافظه روی برد

پارامتر مهم دیگر در طراحی محموله ذخیره و ارسال حافظه روی برد مورد نیاز است. فاکتورهای مؤثر در محاسبه حافظه عبارت اند از:

- ظرفیت تبدالی شبکه
 - ضریب بهره برداری از حافظه: در کاربردهای فضایی به دلیل ملاحظات قابلیت اطمینان کمتر از ۷۰٪ ظرفیت حافظه باید مورد استفاده قرار گیرد.
 - سربار ناشی از الگوریتم مقاومت سازی: به منظور مقاومت سازی حافظه در مقابل تشعشعات فضایی از روش هایی مانند ذخیره سه برابری اطلاعات و کدینگ حافظه استفاده می شود.
 - تأخیر مجاز: با فرض چهار رد در هر روز، حجم ترافیکی یک پیام در هر رد و با توجه به تأخیر ۱ روز، برای هر کاربر در حافظه امکان ذخیره کردن ۴ پیام در نظر گرفته شده است.
- به این ترتیب حجم حافظه مورد نیاز از رابطه زیر به دست می آید.

$$M = 4 \times RW \times \left(\frac{1}{\eta_M}\right) \times (F_{TMR})_{\max} \quad (7)$$

$$= 4 \times 1.295 \times \left(\frac{1}{0.8}\right) \times 3 = 19.425 \text{ MByte}$$

الزامات ماهواره و الزامات سرویس کاربری مطابق جدول ۱ نقطه شروع طراحی محموله مخابراتی است. دو هدف از طراحی مفهومی محموله مخابراتی در این مقاله مدنظر قرار گرفته است.

- (۱) استخراج پارامترهای فنی برای متخصصین حوزه مخابرات جهت طراحی و پیاده سازی ماژول های مخابراتی
 - (۲) استخراج بودجه های فنی برای متخصصین زیرسیستم های ماهواره جهت طراحی و ساخت پلتفرم ماهواره
- در ادامه دو پارامتر اساسی حجم داده ترافیکی و حجم حافظه مورد نیاز ماهواره با توجه به مشخصات سرویس محاسبه می شوند. بر اساس حجم ترافیکی شبکه، نوع روش دسترسی چندگانه و ظرفیت لینک مخابراتی مورد نیاز مشخص می شود. حجم حافظه مورد نیاز یکی از الزامات طراحی بخش فضایی است.

۱.۳ ظرفیت ترافیکی شبکه

اولین خروجی تحلیل سرویس مخابراتی محاسبه ظرفیت ترافیکی شبکه است. پارامترهای مؤثر در محاسبه ظرفیت شبکه عبارت اند از:

- (۱) **حجم ترافیکی:** در این مسئله فرض شده است که هر کاربر ترافیک پایین غیر پیوسته به شبکه اعمال می کند. به منظور کمی سازی آن یک پیام برای هر کاربر در هر رد در نظر گرفته شده است.

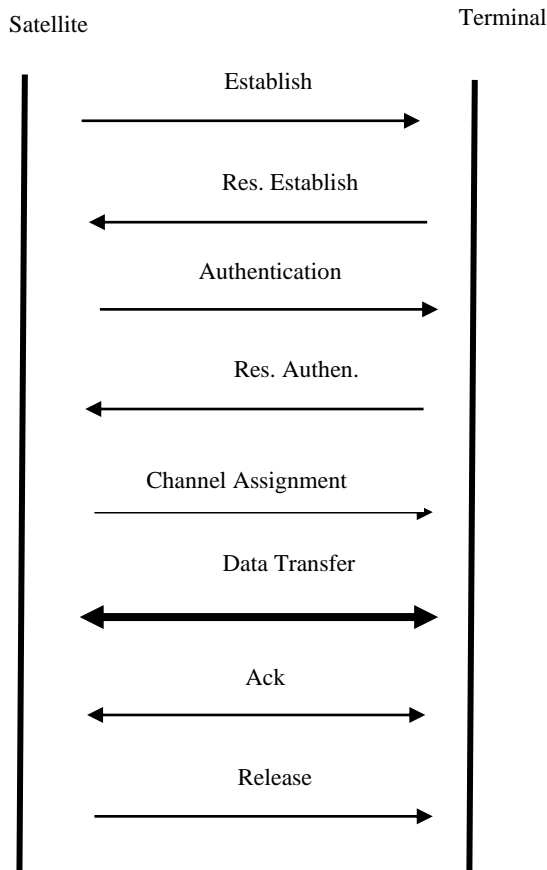
- (۲) **نرخ خطای بیت:** این پارامتر تعیین کننده سربار ناشی از کدینگ و باز یابی داده بر اساس نوع مدولاسیون و توان ارسال است. در این مقاله به منظور حصول نرخ خطای بیت معادل 10^{-6} از کدینگ الحاقی (RS(223,255), CONV(1/2)) با نرخ کدینگ برابر ۰/۴۳ استفاده شده است. نوع مدولاسیون BPSK است که درصد سربار اضافه شده به منظور باز یابی کلاک معادل ۰/۰۴ است.

- (۳) **طول هر پیام:** طول پیام علاوه بر تعیین فیلد داده فریم، با توجه به وضعیت کانال مخابراتی و الگوریتم ارسال مجدد، سرباری به شبکه اعمال می کند. در این مقاله از الگوریتم ARQ-selective استفاده شده است و با توجه به نرخ خطای بیت کانال و طول فریم داده معادل ۲۲۳ بایت، نرخ خطای فریم از رابطه زیر به دست می آید [۱۴].

$$FER = 1 - (1 - BER)^N = 1 - (1 - 10^{-6})^{223 \times 8} = 0.028 \quad (4)$$

سیاست‌های کلی شبکه، کاربران را در یک صف جا داده و مطابق جریان داده شکل ۴ به هر کاربر سرویس ارائه می‌کند. با توجه به انتخاب نوع ارتباط (connection oriented) برای تبادل داده بین کاربران و ماهواره باید فرایند تخصیص کانال قبل از تبادل داده انجام شود. فرایند تخصیص کانال مطابق پروتکل AX.25 شخصی شده انجام می‌شود. تفاوت پروتکل پیشنهادی طراحی شده در این مقاله با AX.25 به‌قرار زیر است.

- احراز هویت کاربران قبل از فرایند تخصیص کانال توسط ماهواره انجام می‌شود.
- یکپارچگی پیام نیز بعد از انتقال اطلاعات انجام می‌شود.
- طرح کدینگ بر اساس الزام لینک مخابراتی انتخاب شده است.
- فریم بر اساس الزام لایه فیزیکی شخصی‌سازی شده است.



شکل ۴- جریان داده تبادلی بین ماهواره و کاربر مطابق با طرح پیشنهادی

۱.۴ پروتکل ارتباطی

رشد شبکه‌های ناهمگون الزام به وقتی بودن طراحی شبکه در راستای حصول بهینه‌سازی عملکرد شبکه مخابراتی را به همراه دارد. ساختارهای

در نتیجه حافظه ذخیره مورد نیاز برای ذخیره اطلاعات Mbyte ۱۹/۴۲۵ در نظر گرفته شد.

۴ سناریوی ارتباطی

مطابق الزامات سرویس ارائه شده در جدول ۱، محموله ذخیره و ارسال وظیفه برقراری ارتباط بین ترمینال‌های کاربری خانگی ثابت را مطابق شکل ۳ بر عهده دارد. مرکز کنترل و مدیریت ارتباط ماهواره است که از طریق کانال کنترلی درخواست کاربران را دریافت می‌کند و با لحاظ کردن سیاست‌های بالادستی، فرایند تسهیم منابع رادیویی بین کاربران را مدیریت می‌کند. به این منظور یک ارتباط دوطرفه غیرهم‌زمان بین کاربران و ماهواره وجود دارد که امکان ارسال و دریافت پیام برای هر کاربر را فراهم می‌کند. فرضیات زیر برای تعریف سناریوی ارتباطی کاربران زمینی مدنظر قرار گرفته است.

(۱) سرویس connection oriented برای ارتباط M2M در نظر گرفته شده است.

(۲) زمان دسترسی در هر رد با در نظر گرفتن کمینه زاویه فراز 10° و ارتفاع مداری ۵۰۰ Km به‌طور متوسط ۳۰۰ ثانیه فرض شده است.

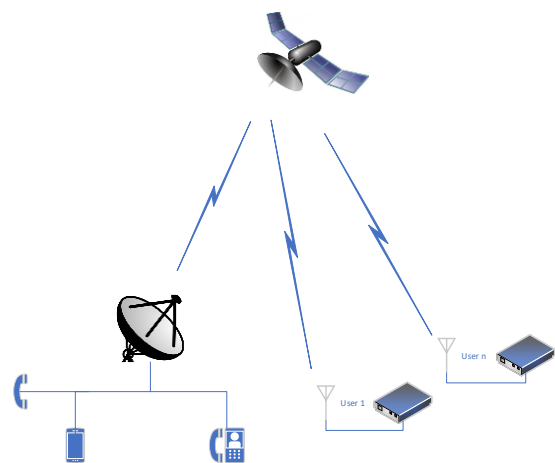
(۳) ماهواره به‌عنوان مرکز کنترل مأموریت، مدیریت ارتباط را بر عهده دارد.

(۴) تسهیم منابع مطابق با سیاست‌های شبکه انجام می‌شود.

(۵) از تکنیک TDM برای مالتی پلکس کانال‌های کنترلی و ترافیکی استفاده می‌شود.

(۶) سرویس‌های امنیت شبکه

- سرویس احراز هویت
- سرویس یکپارچگی پیام
- سرویس محرمانگی



شکل ۳- سیستم ارتباطی ماهواره

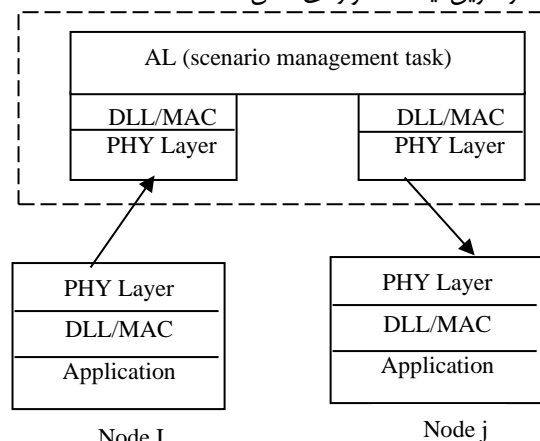
همان‌طور که پیش‌ازین نیز ذکر شد شروع کننده ارتباط در این سناریو ماهواره است. ماهواره مطابق اطلاعات جمع‌آوری شده در کانال کنترلی و

مقررات رادیویی و مشخصات محیط انتشار رادیویی فرکانس عملیاتی انتخاب می‌شود. باتوجه به باند باریک بودن سیگنال رادیویی و قیود تجهیزات زمینی کاربران یکی از گزینه‌های پیشنهادی باند فرکانسی UHF است. شایان ذکر است باتوجه به شلوغ بودن باند فرکانسی UHF موضوعات تداخلی باید در تحلیل بودجه لینک در نظر گرفته شود. پروتکل AX.25 یکی از پیشنهادات مناسب برای لایه پیوند داده و کنترل دسترسی رسانه است. این پروتکل سرویس‌های زیر را ارائه می‌کند.

- (۱) سرویس اتصال گرا با تصدیق دریافت^۲ به لایه بالاتر
- (۲) سرویس کنترل خطا؛ علاوه بر کدینگ از تکنیک‌های ارسال مجدد هم استفاده می‌شود.
- (۳) سرویس کنترل جریان داده

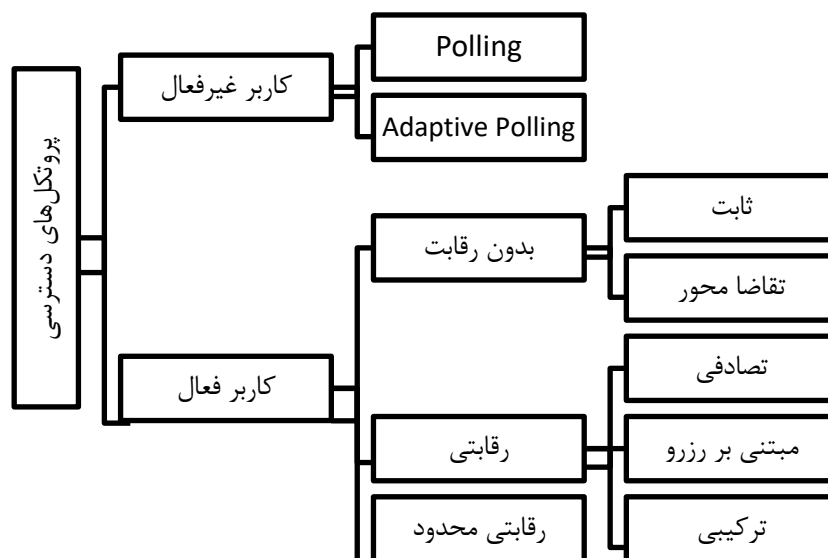
از آنجایی که پروتکل AX.25 امکان ارائه سرویس اتصالگرا را دارد و سه نوع قالب بندی با در نظر گرفتن آدرس مبدا و مقصد و فیلدهای کنترلی تعریف شده است با تعریف یک بلوک پردازشی و استخراج لیست ترمینال‌های کاربری براساس اولویت‌های آن‌ها می‌توان مدیریت دسترسی به منابع رادیویی را انجام داد. نظر به سیار بودن ماهواره، کنترل مرکزی توسط ماهواره و پراکنده بودن ترمینال‌های کاربری در پهنه جغرافیایی ایران در هر رد باید وضعیت حضور ترمینال‌های کاربری و درخواست آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد. به منظور تحقق این مهم از روش‌های مختلف دسترسی استفاده کرد که باتوجه به ویژگی‌های هریک و محدودیت‌های سیستم یکی از روش‌ها انتخاب می‌شود. انواع تکنیک‌های دسترسی از منظر نوع کاربر در شکل ۶ آورده شده است.

لایه‌ای مرسوم در حوزه شبکه‌های مخابراتی بهینه‌سازی پویا را تضمین نمی‌کند به همین منظور پروتکل‌های چندلایه‌ای^۱ به منظور استفاده بهینه از منابع مخابراتی در شبکه‌هایی با طول بسته کوتاه ارائه شد. یکی از چالش‌های مهم سیستم‌های مخابرات ماهواره‌ای، نحوه مدیریت بهینه منابع رادیویی است. در شکل ۵ لایه‌های موردنیاز برای یک ارتباط M2M از طریق لینک ماهواره‌ای نشان داده شده است.



شکل ۵- معماری شبکه پیشنهادی

انتخاب پشته پروتکل مبتنی بر مشخصات و الزامات سرویس باند باریک انتخاب می‌شود. یکی از متداول‌ترین مدولاسیون‌ها در سرویس‌های باند باریک BPSK است که باتوجه به باند باریک بودن سرویس و نبود محدودیت طیف فرکانسی، بهینه‌سازی توان مصرفی هدف اصلی انتخاب لایه فیزیکی است. همچنین مطابق با قوانین و



شکل ۶- انواع تکنیک‌های دسترسی چندگانه [۱۵]

1. Cross layer Protocol
2. Connection Oriented

در جدول ۲ مقایسه بین چند تکنیک‌های دسترسی متداول ارائه شده است.

جدول ۲- تکنیک‌های دسترسی چندگانه [۱۵]

تکنیک	پایه‌سازی	تأخیر	بازده طیف	تصادم
Polling	آسان	بالا	متوسط	ندارد
FDMA	آسان	ندارد	پایین	ندارد
TDMA	متوسط	ندارد	متوسط	ندارد
CDMA	متوسط	ندارد	پایین	ندارد
Reservation	متوسط	متوسط	نسبتاً بالا	ندارد
Aloha	آسان	متوسط	متوسط	دارد
Slotted Aloha	متوسط	متوسط	پایین	دارد

جدول ۳- ظرفیت لینک‌های مخابراتی

ظرفیت	لینک	
35 Kbps	کاربر خانگی به ماهواره	۱
9.6 Kbps	ماهواره به کاربر خانگی	۲
35 Kbps	ماهواره به درگاه زمینی	۳
9.6 Kbps	درگاه زمینی به ماهواره	۴

باتوجه به فرضیات زیر تحلیل پارامترهای لینک‌های مخابراتی انجام می‌شود.

- پلاریزاسیون آنتن کاربر خانگی خطی فرض شده است.
- به منظور کاهش تلف، پلاریزاسیون آنتن ماهواره و درگاه زمینی دایروی فرض شده است.
- نرخ بیت کانال پایه 9.6 Kbps فرض شده است.
- بر اساس استاندارد فضایی مدولاسیون فاز در نظر گرفته شده است.
- به منظور سادگی ترمینال خانگی، پهنای باند آنتن ماهواره، کاربر خانگی و درگاه زمینی به ترتیب حدود ۱۳۰، ۱۷۰ و ۳۰ درجه در نظر گرفته شده است.
- حداقل دقت نشانه روی ماهواره ۵ درجه فرض شده است.
- کمینه زاویه فراز ۱۰ درجه در نظر گرفته شده است.
- مدار ماهواره ۵۰۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است.

بودجه چهار لینک ماهواره به کاربران خانگی، کاربران خانگی به ماهواره، ماهواره به GW و GW به ماهواره در جدول ۴ آورده شده است. باتوجه به تحلیل لینک حساسیت گیرنده کاربران خانگی زمینی، GW،

در این مقاله به دلیل نرخ بیت مؤثر پایین و تعداد زیاد کاربران، روش‌های ثابت دسترسی چندگانه زمانی^۱ و فرکانسی^۲ به ترتیب انتخاب مناسبی برای کانال ترافیکی است. به دلیل محدودیت زمانی و در نظر گرفتن معیار مقیاس پذیری شبکه از روش دسترسی تصادفی برای ارسال داده‌های کنترلی استفاده می‌شود.

۵ طراحی لینک مخابراتی

به منظور طراحی لینک‌های مخابراتی باید ظرفیت کانال مورد نیاز محاسبه شود. ورودی‌های مورد نیاز برای محاسبه ظرفیت عبارت‌اند از:

- حجم داده تبادلی
- حاشیه زمانی مورد نیاز: این حاشیه به اختلاف تأخیر انتشار نزدیک‌ترین و دورترین کاربر وابسته است.

$$t_m = \frac{\Delta d}{c} = \frac{(2200 - 550) \times 10^3}{3 \times 10^8} = 5.5 \text{ msec} \quad (8)$$

- مدت زمان دسترسی
- به این ترتیب ظرفیت کانال مخابراتی داده مورد نیاز از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$r_t = \frac{data_t + r_b \times t_m}{t_{access}} = \frac{1.295 \times 8 \times 10^6 + 10 \times 5.5}{300} = 34.5 \text{ kbps} \quad (9)$$

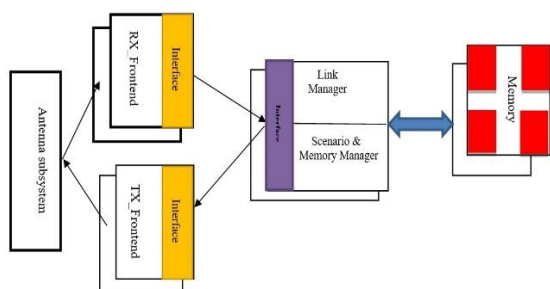
به منظور تبادل داده‌های کاربران خانگی، ماهواره و درگاه زمینی مطابق الزامات، ۴ لینک پیشنهاد شده است. باتوجه به تحلیل‌های انجام شده ظرفیت لینک‌های ۱ تا ۴ در جدول ۳ آورده شده است.

کاربران خانگی به ماهواره و GW به ماهواره به ترتیب برابر dBm - 120.2، -114.3، -119.6، -113.6 است.

جدول ۴- بودجه لینک

Link parameters	User to/from SAT		GW to/from SAT		Unit
	UL	DL	UL	DL	
Max. slant range	1695	1695	1695	1695	km
Freq downlink	402	430	400	435	MHz
Tx EIRP	5.01	-0.99	12.01	-0.99	dBW
Free space loss	149.12	149.70	149.08	149.81	dB
other loss	1.50	1.50	1.50	1.50	dB
system noise temperature	489.1	1358.3	489.1	1358.3	k
Pr	-118.6	-119.2	-111.6	-112.3	dBm
G/T	-29.89	-28.33	-29.89	-21.33	dB/K
link margin	1	1	2	2	dB
Bit rate	9.6	9.6	35	35	kbps
Rx sensitivity	-119.6	-120.2	-113.6	-114.3	dBm

مطابق جدول ۵ برای حصول قابلیت اطمینان ۹۵٪ محموله مخابراتی ارائه شده دو راهکار وجود دارد. اول اینکه در انتخاب قطعات سختگیری شود و قابلیت اطمینان هر جز افزایش یابد. و در صورتیکه امکان تغییر طراحی اجزا وجود ندارد باید از افزونگی برای حل مسئله استفاده کرد. با فرض طرح افزونگی ۲:۱ بلوک دیاگرام بخش فضایی مطابق شکل ۷ پیشنهاد می‌شود.



شکل ۷- بلوک دیاگرام پیشنهادی بخش فضایی محموله ذخیره و ارسال

باتوجه به اهمیت حافظه سیستم در محموله ذخیره و ارسال چه حافظه سناریوی ارتباطی و چه حافظه ذخیره‌سازی پیامها، در انتخاب معماری افزونه حافظه، تقسیم‌بندی سخت‌افزاری حافظه در نظر گرفته شده‌است. به این ترتیب که اگر حافظه موردنیاز سیستم 64 MB است از چهار حافظه 16 MB که هر یک دارای افزونگی ۲:۱ گرم هستند استفاده شده‌است. نوع افزونگی موردنیاز برای بخش‌های مختلف به فراخور نقش

۶ بلوک دیاگرام بخش فضایی

در طراحی بلوک دیاگرام بخش فضایی با در نظر گرفتن کاهش هزینه‌ها و استفاده از قطعات COTS برای برآورده کردن عملکرد مناسب در محیط فضا در طول عمر تعریف شده باید آنالیز قابلیت اطمینان انجام شود. با فرض بودجه‌های وزنی و عدد قابلیت اطمینان نوعی برای بخش‌های مختلف محموله مخابراتی مطابق جدول ۵ طراحی بلوک دیاگرام محموله را با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان ۹۵٪ انجام می‌شود.

جدول ۵- مشخصات نوعی اجزای محموله مخابراتی

ردیف	عنصر	وزن (گرم)	توان مصرفی (وات)	قابلیت اطمینان
۱	RX-Frontend	۴۰۰	۴	۹۰٪
۲	TX-Frontend	۶۰۰	۱۵	۹۰٪
۳	*Processor	۵۰۰	۵	۸۵٪
۴	Antenna	۵۰۰	-	~۱

* پردازشگر شامل حافظه موردنیاز و بلوک مدیریت لینک و سناریو می‌شود.

مخابرات ماهواره‌ای، سناریوی ارتباطی و مشخصات لینک مخابراتی و پروتکل‌های آن پیشنهاد شده‌است. ظرفیت شبکه و حافظه روی برد موردنیاز ماهواره بر اساس تعداد کاربران، ترافیک هر کاربر و تأخیر مجاز محاسبه شده‌است. یکی از مهم‌ترین موضوعات در انتخاب قطعات و توزیع سخت‌افزاری به‌منظور کاهش اثر خرابی سخت‌افزاری در مأموریت ماهواره قابلیت اطمینان محموله است. معماری محموله با شکست حافظه روی برد روی چهار مدار مجتمع و ارتباطات ضربدری بین بخش‌های مختلف به‌منظور افزایش قابلیت اطمینان ارائه شده‌است و نهایتاً وزن و توان مصرفی محموله مخابراتی برای طراحی پلتفرم مناسب محاسبه شد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده‌است.

مراجع

- [1] J. Ward, "store-and-forward message relay using microsatellites: the uosat-3 pacsat communications payload," in *4th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 1990.
- [2] J.P.C. Rodrigues, *Advances In Delay-Tolerant Networks (Dtns): Architecture And Enhanced Performance*, 2nd ed., Woodhead Publishing, 2020.
- [3] D. Ta, S. Booth, and R. Dudukovich, "Towards software-defined delay tolerant networks," *Network*, vol. 3, no. 1, pp. 15-38, 2023, <https://doi.org/10.3390/network3010002>.
- [4] M. Bacco, M. Colucci, and A. Gotta, "Application protocols enabling internet of remote things via random access satellite channels," in *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Paris, France, 2017, pp. 1-6, <https://doi.org/10.1109/ICC.2017.7997292>.
- [5] G. Cocco and C. Ibars, "On the feasibility of satellite m2m systems," in *30th AIAA International Communications Satellite System Conference (ICSSC)*, Ottawa, Canada, 2012, Paper ICSSC74, <https://doi.org/10.2514/6.2012-15074>.
- [6] A. Addaim, A. Kherras and E. B. Zantou, "Design and analysis of store-and-forward data collection network using low-cost leo small satellite and intelligent terminals," *Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication*, vol. 5, no. 2, pp. 35-46, 2008, <https://doi.org/10.2514/1.34276>.
- [7] W. A. Beech, D. E. Nielsen, and J. Taylor, "AX. 25 link access protocol for amateur packet radio," *Tucson Amateur Packet Radio Corporation*, pp. 1-133, 1998.

هر یک از آن‌ها در مأموریت کلی در جدول ۶ آورده شده‌است. به‌این ترتیب داده‌های مدیریت سناریوی ارتباطی و پیام‌های تبادل هم‌زمان در دو حافظه ذخیره می‌شوند که هر دو frontend اصلی و افزونه به آن دسترسی دارند. از طرف دیگر در صورتی که یکی از تراشه‌های حافظه در اثر شرایط محیطی فضا آسیب ببیند تنها اطلاعات بخشی از مشترکین از دست می‌رود. در صورتی که امکان برنامه‌ریزی حین عملیات نیز تعریف شده باشد می‌توان سناریو را مطابق با نقص سخت‌افزاری به وجود آمده به‌روزرسانی کرد.

جدول ۶- افزونگی سیستم

نوع افزونگی	المان	
سرد ۲:۱	RX-Frontend	۱
سرد ۲:۱	TX-Frontend	۲
سرد ۲:۱	Link manager	۳
گرم ۲:۱	Scenario manager	۴
ترکیبی ۲:۱	Memory	۵

باتوجه به طرح افزونگی و قابلیت اطمینان اجزاء، عدد قابلیت اطمینان کلی سیستم از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$R = [1 - \prod_{i=1}^2 (1 - R_{FE-Rx/Tx})]^2 \times [1 - \prod_{i=1}^2 (1 - R_{processor})]^2$$

$$= [1 - \prod_{i=1}^2 (1 - 0.9)]^2 \times [1 - \prod_{i=1}^2 (1 - 0.85)]^2 = 0.98 \times 0.9775$$

$$= 0.958 \quad (10)$$

در نهایت بودجه‌های فنی محموله مخابراتی مطابق با فناوری در دسترس و مشخصات فنی قطعات موردنیاز تعیین شده و به‌منظور طراحی پلتفرم به‌قرار زیر است.

$$w = 2 \times (400 + 600 + 500) + 500 = 3.5 \text{ Kg}$$

$$p_{con} = 4 + 15 + 2 \times 5 = 29 \text{ w} \quad (11)$$

نتیجه‌گیری

یکی از مراحل بااهمیت در طراحی محموله‌های مخابراتی نگاشت مشخصات سرویس به الزامات فنی ماژول‌هاست. پس از تحلیل الزامات سرویس با توجه به وجود راهکارهای متنوع، انتخاب نوع و مقدار پارامترها فرایند زمان‌بری است. استانداردهای مخابرات فضایی با جمع‌آوری تجربیات موفق و پیشنهاد راهکارهای عملیاتی می‌توانند در جهت‌دهی و تسریع فرایند طراحی کمک‌کننده باشند. در این مقاله ابتدا تحلیل مشخصات سرویس به‌منظور نگاشت پارامترهای سرویس به الزامات فنی اجزای محموله مخابراتی انجام شد و متناسب با الزامات و شرایط کانال

Journal of Electrical Engineering, vol. 10, no. 3, pp. 7-17, 2016.

[12] L. Franck, "Store and forward for real-enough-time services in satellite constellations," in *Broadband Satellite Communication Systems and the Challenges of Mobility: IFIP TC6 Workshops on Broadband Satellite Communication Systems and Challenges of Mobility, World Computer Congress*, Toulouse, France, 2005, pp. 75-80, https://doi.org/10.1007/0-387-24043-8_8.

[13] H. Cruz-Sánchez, L. Franck, and A. L. Beylot, "Routing metrics for store and forward satellite constellations," *The Institute of Engineering and Technology Communications*, vol. 4, no. 13, pp. 1563-1572, 2010.

[14] R. Dhaou, A. Beylot, M. J. Montpetit, D. Lucani, and L. Mucchi, "Personal satellite services," in *5th International ICST Conference*, Toulouse, France, 2013.

[15] S. V. Krishnamurthy, C. Liu, and V. Gupta, "Medium access control protocols for satellite communications," in *Internetworking and Computing Over Satellite Networks*, Y. Zhang, Ed. Boston, MA: Springer US, 2003, pp. 35-93, https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0431-3_3.

[8] K. Martin, V. Venkatesan, and U. N. Das, "Data link control in the LEO satellite store and forward network," in *TENCON 2003. Conference on Convergent Technologies for Asia-Pacific Region*, Bangalore, India, 2003, pp. 1234-1238 Vol. 3, <http://dx.doi.org/10.1109/TENCON.2003.1273444>.

[9] H. Cruz-Sánchez, L. Franck, and A. L. Beylot, "Precomputed routing in a store and forward satellite constellation," in *IEEE 66th Vehicular Technology Conference*, Baltimore, MD, USA, 2007, pp. 240-243, <https://doi.org/10.1109/VETECONF.2007.64>.

[10] H. Cruz-Sánchez, G. S. Staples, R. Schott and Y. Q. Song, "Operator calculus approach to minimal paths: Precomputed routing in a store and forward satellite constellation," in *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Anaheim, CA, USA, 2012, pp. 3431-3436, <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2012.6503645>.

[11] D. Abbasi-Moghadam, S. M. H. N. Hotkani, and M. Abolghasemi, "Store and forward communication payload design for LEO satellite systems," *Majlesi*