

بررسی منظومه‌های ماهواره‌ای مخابراتی و امکان‌پذیری ساخت بومی

حمید خدادادی^۱، علی قربانی^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد دانشگاه امیرالمومنین^(ع)، نرسا

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۰۸، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۱۲)

چکیده

دنیای قرن بیست و یکم تحت سلطه و نفوذ حداکثری تبادل اطلاعات و داده‌های مختلف از بسترهای مخابراتی گوناگونی است. در این بین، اینترنت و شبکه جهانی وب یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین ابزارهای انتقال و دریافت اطلاعات است. همچنان چند میلیارد نفر از جمعیت جهان، دسترسی به اینترنت ندارند و یا از داشتن یک اینترنت با سرعت قابل قبول و بدون قطعی، محروم هستند. از جمله دلایل این اتفاق را، می‌توان به هزینه‌بر بودن، پیاده‌سازی سخت و عدم توجیه اقتصادی استفاده از زیرساخت‌های مبتنی بر سیم مانند فیبر نوری در بسیاری از مکان‌ها دانست. از زمان‌های گذشته جهت دسترسی همه‌جانبه به اینترنت در اقصی نقاط دنیا، استفاده از ماهواره و اینترنت ماهواره‌ای مرسوم بوده و پیشنهادهایی جهت استفاده از ماهواره در مدارهای مختلف زمین، داده شده است. در این مقاله ابتدا به بررسی روند شکل‌گیری منظومه‌های مخابراتی ماهواره‌ای اشاره خواهد شد. سپس به بیان اهمیت و ضرورت گسترش این منظومه‌ها اشاره می‌گردد. در ادامه با معرفی منظومه‌های مهم موجود در جهان به مقایسه آنها پرداخته می‌شود. در انتها با تشریح منظومه بزرگ استارلینک مربوط به شرکت اسپیس ایکس، به مشخصات فنی مربوط به طراحی منظومه و سیستم‌های اصلی اشاره خواهد شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که منظومه استارلینک دارای مزیت‌های رقابتی حائز اهمیتی نسبت به دیگر منظومه‌ها است و به طور محتمل موفق‌ترین پروژه در راستای تحقق بزرگ‌ترین منظومه ماهواره‌ای جهان با بیشترین تعداد کاربر و نرخ دیتای مطلوب خواهد بود. از این رو سهم قابل توجهی از درآمدهای مبتنی بر فضا را به خود اختصاص خواهد داد. از طرفی به مقایسه ماهواره‌های مکعبی با استارلینک می‌پردازیم. همچنین امکان‌پذیری و محدودیت‌های ساخت یک منظومه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت، نکات و پیشنهادها قابل توجهی در خصوص بومی‌سازی منظومه‌های مخابراتی ارائه می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: منظومه ماهواره‌ای، مدار پایین، استارلینک، ماهواره مکعبی

۱- مقدمه^۱

ماهواره و اینترنت ماهواره‌ای پیشنهاد شده است و پیشنهادهایی جهت استفاده از ماهواره در مدارهای مختلف زمین، داده شده است. در ابتدا و به طور سنتی استفاده از ماهواره در مدار GEO زمین جهت مخابره اطلاعات پیشنهاد شد. در این پیشنهادها ماهواره در فاصله بیش از ۳۶۰۰۰ کیلومتری زمین قرار می‌گیرند و تنها با استفاده از سه ماهواره، می‌توان کل نقاط دنیا را تحت پوشش قرار داد [۱]. همچنین استفاده از این مدار باعث می‌شود که پوشش همه‌جانبه‌ای روی زمین وجود داشته باشد و گیرنده (ایستگاه) زمینی نیاز به دنبال کردن دقیق ماهواره نداشته باشد [۱]. شرکت‌های مختلفی در این زمینه ماهواره‌هایی را نیز به فضا ارسال کردند؛ از جمله SPACEWAY و ViaSat لیکن مهم‌ترین مشکل این نوع ارتباط، تأخیر زیاد حتی تا حدود ۶۰۰ میلی ثانیه و پهنای باند محدود برای کاربران می‌باشد [۱]. نمای کلی از این نوع ارتباط در شکل (۱) نمایش داده شده است. هم‌اکنون از این نوع ارتباطات در کاربردهایی مانند استفاده در کشتی، تلفن‌های ماهواره‌ای، تلفن‌های دولتی، خدمات هوایی و... استفاده می‌گردد ولی جایگاهی در استفاده عموم به خصوص برای اینترنت ندارد.

دنیای قرن بیست و یکم تحت سلطه و نفوذ حداکثری تبادل اطلاعات و داده‌های مختلف از بسترهای مخابراتی گوناگونی می‌باشد. در این بین، اینترنت و شبکه جهانی وب یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین ابزارهای انتقال و دریافت اطلاعات است. اما توجه به این نکته نیز مهم است که با این همه پیشرفت در حوزه مخابرات و رایانه، همچنان چند میلیارد نفر از جمعیت جهان دسترسی به اینترنت ندارند و یا از داشتن یک اینترنت با سرعت قابل قبول و بدون قطعی، محروم هستند. از جمله دلایل این اتفاق، می‌توان به هزینه‌بر بودن، پیاده‌سازی سخت و عدم توجیه اقتصادی استفاده از زیرساخت‌های مبتنی بر سیم مانند فیبر نوری در بسیاری از مکان‌ها دانست. از زمان‌های گذشته جهت دسترسی همه‌جانبه به اینترنت در اقصی نقاط دنیا، استفاده از

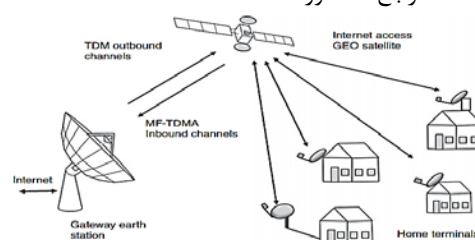
* رایانامه نویسنده مسئول: seven.mybox@gmail.com

بر جدول فوق بر اساس [۷] مقایسه می‌کنیم. Telesat در دو فاز کاری، پرتاب شده و سرویس دهی می‌کند؛ فاز اول ماهواره‌هایی که به دور مدارهای قطبی زمین می‌گردند و به‌منظور پوشش سراسری پرتاب می‌شوند و فاز دوم که حاوی ماهواره‌های بر مدارهایی خاص هستند که برای سرویس‌دهی در مناطق پرجمعیت‌تر زمین، پرتاب خواهند شد. ارتباطات بین ماهواره‌ای از طریق لینک‌های نوری بین ماهواره است و هر ماهواره به‌عنوان یک گره از IP شبکه شناخته می‌شود. سه ایستگاه مختلف نیز به‌منظور نظارت، کنترل و هدایت شبکه، تعبیه شده است (یک ایستگاه در اوتاوا کانادا است).

جدول (۱). مقایسه منظومه‌های پیشنهادی در مدارهای نزدیک به زمین [۱][۶]

نام	باند فرکانسی (GHz)	تعداد ارسال شده تا اواخر ۲۰۲۰	مدارهای کاری فعلی (km)	تعداد کل ماهورها	مدارهای کاری کلی (km)
Starlink	Ka (26.5-40) Ku (12-18) V (40-75)	۸۰۰ بیش از	۵۵۰	۱۲۰۰۰ -	برنامه‌ریزی برای ۴۲۰۰۰ ۱۲۷۵-۱۱۲۰-۱۱۰-۵۵۰ ۳۴۵۴-۳۴۰۸-۳۳۵۹-۱۳۲۵
OneWeb	Ka	بیشتر از ۷۰	۱۲۰	۴۵۴۰	۸۵۰۰-۱۲۰۰
TelSat	V	۲۰۲۳ شروع	۱۰۰۰	۱۱۷	۱۳۴۸-۱۰۰۰
Kuiper	Ka	-	۵۹۰	۳۳۳۶	۶۳-۶۱-۵۹۰
LeoSat	Ka	-	۱۴۰۰	۱۰۸	۱۴۰۰
Iridium	L (1-2 GHz)	۶۶- آخرین ارسال در ۲۰۱۹	۷۸۰	۹۵	۷۸۰

دلایل دیگر عدم استفاده به مبحث هزینه‌ها و گیرنده مربوط است که البته در ادامه درباره این دو موضوع بیشتر صحبت می‌شود. البته در سالیان مختلف اینترنت ماهواره‌ای از شرکت‌های مختلفی در GEO یا LEO قرار گرفته‌اند که مشکلاتی از قبیل عدم پوشش سراسری دنیا، تأخیر زیاد، پهنای باند کم و عدم توجیه اقتصادی، باعث شده تا در سطح پهن باند و سراسری برای عموم مردم دنیا استفاده نشود [۱]. جزئیات ماهواره‌های GEO در صفحات ۵۹۲-۶۰۴ مرجع [۲] آورده شده است.

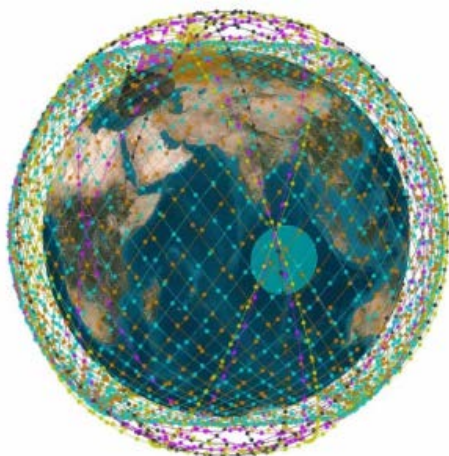


شکل (۱). ماهواره‌های GEO [۲]

۲- معرفی منظومه‌های مخابراتی

اعلام استفاده از ماهواره‌های سبک و ارزان در مدارهای نزدیک‌تر به زمین موجب ظهور نقطه عطفی در زمینه مخابرات ماهواره‌ای می‌باشد که باعث می‌شود مشکلات تأخیر، توجیه اقتصادی و پوشش سراسری، رفع گردد. هرچند طبق [۳] مقوله تأخیر فقط به ارتفاع وابسته نیست و به سیستم و مسیریابی نیز وابسته است، اما در حالت کلی تأخیر تا حدود بسیاری کمتر می‌شود. در این طرح، ماهواره‌های کوچک، منظومه‌های تشکیل می‌دهند و با ارتباط بین ماهواره‌ای، پوششی گسترده و خدماتی پرسرعت را ارائه می‌دهند. منظور از منظومه، گردآوری ماهواره‌های با چپش گسسته است که در تعامل با یکدیگر کار می‌کنند [۴، ۵]. معروف‌ترین منظومه‌های پیشنهادی در این دسته عبارت است از استارلینک (Starlink)، وان وب (One Web)، پروژه کوپر (Kuiper)، تلسات (Telsat) و لئوسات (LeoSat) در این منظومه‌ها از ویژگی انتشار سرعت نور در خلأ برای ارتباطات بین ماهواره‌ای استفاده می‌شود؛ چراکه سرعت نور در فضای آزاد بیشتر از سرعت نور در فیبر نوری است و باعث می‌شود تا اینترنت پرسرعت برای کاربران زمینی فراهم شود [۱]. دلیل نیاز به ارتباط مؤثر بین ماهواره‌ها این است که چون ارتفاع ماهواره‌هایی که در مدار LEO هستند، نسبت به بقیه مدارها کمتر است، پوشش سراسری برای کل سطح زمین فراهم نمی‌شود. پس باید در تعامل با یکدیگر این ارتباط کامل شود. در سال‌های گذشته و در پروژه‌هایی، به‌منظور حل این مشکل از ماهواره‌هایی در دیگر مدارها به‌عنوان پشتیبان شبکه استفاده می‌شده که مطمئناً در این صورت تأخیر زیادی برای کل سیستم وجود دارد [۴]. برای حل این مشکل استفاده از منظومه‌های بزرگی که ماهواره‌ها در آن‌ها توانایی ارتباط مستقیم با یکدیگر را دارند، پیشنهاد شده است [۴]. اطلاعات کلی از منظومه‌های بزرگ مخابراتی (به‌اختصار منظومه‌ها) ذکر شده فوق در جدول ۱، گردآوری شده است. سه منظومه معروف‌تر را علاوه

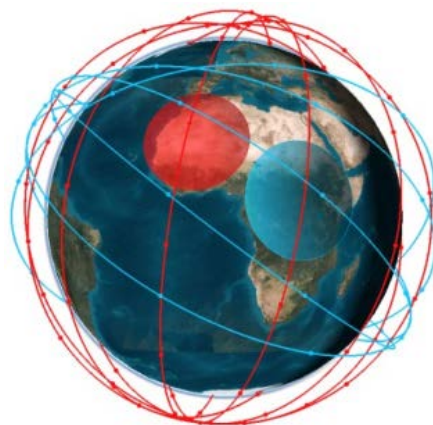
منظومه استارلینک در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۴). منظومه استارلینک [۷]

در جدول (۱) ملاحظه می‌شود که مدارهای کاری و باندهای فرکانسی هر منظومه متفاوت است. سازمان‌هایی که مسئول تنظیم مقررات در این زمینه هستند، کمیسیون مخابرات فدرال (FCC) [۸] و اتحادیه بین‌المللی مخابرات (ITU) ذکر شده [۹]؛ که اکثر فعالیت FCC در تخصیص طیف و به اشتراک‌گذاری طیف و فرکانس است درحالی‌که فعالیت ITU جهت تسهیل در همکاری‌های بین‌المللی درباره مدارهای گردشی و استانداردهای مربوطه است. البته در آمریکا هرگونه استفاده از فضا منوط به اجازه گرفتن از FCC است [۱۰] و چون اسپیس ایکس یک شرکت آمریکایی است باید مطابق قوانین FCC عمل کند. مطابق [۱۱] تخصیص طیف توسط فرآیندهای پیچیده‌ای که جنبه‌های مختلف تاریخی، فنی و اقتصادی را در نظر می‌گیرند، توسط ITU انجام می‌شود. ITU یک کمیته بین‌المللی زیرمجموعه سازمان ملل است که علاوه بر کشورهای مختلف، انجمن‌های علمی زیادی نیز عضو (به نام مشاور نیز شناخته می‌شوند) آن هستند و هر چهار سال یک‌بار در کنفرانسی به نام (WRC) تشکیل جلسه می‌دهند. برخی از مشاوران عبارت‌اند از: کنفرانس اروپایی مخابرات و پست (CEPT) کمیسیون مخابرات آمریکا (CITEL)، اتحادیه مخابرات آفریقا (ATU) و غیره.

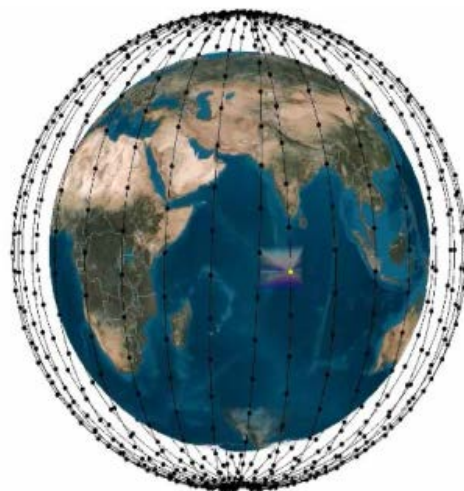
حال که از جنبه‌های مختلف نکاتی کلی از اینترنت ماهواره‌ای گفته شد، با پروژه استارلینک بیشتر آشنا می‌شویم. دلیل اینکه به این پروژه پرداخته می‌شود، این است که این پروژه سروصدای زیادی در محافل مختلف داشته و توانسته به شرکتی پیشرو در این زمینه تبدیل شود. این پروژه در شرکت SpaceX پیشنهاد شده و تاکنون ماهواره‌های مختلفی را در مدار LEO زمین، پرتاب کرده است. نقطه عطف این پروژه صرف اقتصادی داشتن پرتاب



شکل (۲). منظومه تلست [۷]

پهنای باند انتقال از ماهواره به زمین برابر ۱,۸ گیگاهرتز (۱۷,۸-۲۰,۲ گیگاهرتز) و در حالت زمین به ماهواره برابر ۲/۱ گیگ (۲۷/۵-۳۰ گیگاهرتز) می‌باشد. دلیل بیشتر بودن پهنای باند حالت زمین به ماهواره در منظومه‌ها، احتمالاً به دلیل ارسال سیگنال‌های کنترلی از زمین است. Telesat شبیه شکل (۲) می‌باشد.

منظومه OneWeb شامل ۱۸ مدار دور زمین در ارتفاع ۱۲۰۰ کیلومتری است که ماهواره‌های خاص آن طوری تنظیم می‌شود که هیچ نقطه زمین بدون پوشش نباشد. این منظومه به شکل (۳) آورده شده است.



شکل (۳). منظومه وان وب [۷]

محدوده فرکانسی ۱۲,۷-۱۰,۷ و ۱۴,۵-۱۲,۷۵ گیگ برای حالت ارسال به زمین و ۱۷,۸-۲۰,۲ برای ارسال از زمین می‌باشد. به نظر می‌رسد طراحی منظومه به این نحو است که برای دریافت نیاز به دیش‌های ماهواره با قطری بین ۳۰ تا ۷۵ سانت نیاز است. انواع فناوری‌های مختلف هدایت امواج مانند آنتن‌های آرایه‌ای فاز نیز در OneWeb وجود دارد.

نیست، اما در مقوله هزینه و کاربرد سراسری هیچ رقیبی تاکنون ندارد.

گیرنده زمینی استارلینک یک دیش ماهواره‌ای کوچک است که طبق گفته سایت اسپیس ایکس، کافی است به برق زده شده تا ارتباط برقرار گردد. این نکته و عدم نیاز به تعیین وضعیت آنتن زمینی از آنجایی نشأت می‌گیرد که در استارلینک از آنتن‌های آرایه‌ای فازی استفاده می‌شود که باعث می‌شود تا کنترل الگوی انتشار را داشته باشد و نیازی به چرخش و تعیین وضعیت نباشد [۱۸]. آنتن‌ها آرایه‌ای فازی در ابتدا در صنایع نظامی برای اسکن سریع آسمان برای یافتن اجسام متحرک استفاده شد و به دلیل توانایی هدایت الگو، در زمینه‌های مختلف رادار، لیدار، هواشناسی و... نیز پرکاربرد شد [۱۹]. به‌طور خلاصه آنتن آرایه‌ای فاز می‌تواند در جهت خاص به انتشار موج بپردازد و در جهتی دیگر، به دریافت موج. اطلاعات تکمیلی و فرمول‌بندی در منابع مختلفی آمده است مثل منبع [۱۹]. این آنتن‌ها هم در گیرنده وجود دارد و هم در ماهواره‌ها لیکن در سمت ماهواره‌ها پیچیدگی بیشتری دارند [۲] و باید چند پرتو مختلف را برای ردیابی ترمینال زمینی، تولید کند (اگر ماهواره در مدارات بسیار پایین مثلاً ۳۵۰ کیلومتری باشد، حداکثر زمان در دید بودن، ۱۳۴ ثانیه و اگر در مدارات بالاتر باشد مثلاً ۱۲۰۰ کیلومتر، حداکثر زمان در دید بودن ماهواره برای ترمینال زمینی، ۳۲۲ ثانیه است [۲]). همچنین ماهواره‌ها نیاز به یک سری آنتن‌های آرایه‌ای دیگر برای ارتباط با درگاه‌های زمینی (Gateway) نیز هستند و اگر این درگاه‌ها در دسترس نبود (مثلاً عبور ماهواره از روی اقیانوس‌ها)، باید با ماهواره‌های کناری تبادل اطلاعات داشته باشند. مباحث مربوط به زاویه آنتن‌ها، توان و دیگر مسائل در [۲] آورده شده است. بر طبق [۲۰] استفاده از فناوری‌های آنتن آرایه‌ای منجر به استفاده مجدد از فرکانس (مشابه سیستم‌های سلولی) می‌شود. در همین باره توضیح داده شده که هر ماهواره در ارتباط با گیت وی‌ها، می‌تواند دو پرتو با فرکانس یکسان به‌صورت راست‌گرد و چپ‌گرد، مخابره کند و با فرض ارتباط چهار ماهواره با یک گیت وی، هشت پرتو بین هر ماهواره و گیت وی ردوبدل می‌گردد.

درگاه‌های زمینی معمولاً در مکان‌هایی وجود دارند که بارش باران‌های سنگین، به‌ندرت اتفاق می‌افتد، بارش باران‌های سنگین بر کارایی تأثیر می‌گذارد [۲]. در درگاه‌های زمینی یک دسته از دیش‌ها، به‌منظور ردیابی چندین ماهواره، وجود دارد. معمولاً چندین دیش اضافی در این درگاه‌ها وجود دارد تا در صورت نیاز و یا تعمیرات دیگر دیش‌ها، کارایی کاهش نیابد. بر طبق [۲۰] یکی از وظایف گیت وی‌ها، تولید پرتوهای هدایت شده با گین بسیار بالا، جهت ارتباط با چندین ماهواره می‌باشد. دیگر وظیفه آن‌ها، تأمین لینک‌های اینترنتی مورد نیاز اسپیس ایکس از شبکه

ماهواره و به‌تبع آن پایین آمدن هزینه اینترنت می‌باشد [۱۲]. ماهواره‌های اسپیس ایکس با موشک‌هایی به نام فالکون به فضا پرتاب می‌شوند که باعث شده هزینه‌های پرتاب تا حدود بسیار خوبی، کاهش یافته [۱۳] و حتی گفته می‌شود تا حدود ۲۵۰ هزار دلار به ازای هر ماهواره برسد [۱۴]. این تحول در ساختارهای اقتصادی شامل استفاده مجدد از بسیاری از قسمت‌های گران‌قیمت ماهواره و دیگر فناوری‌های پیشرو می‌باشد [۱۵].

اسپیس ایکس منظومه استارلینک را در فازهای مختلف به فضا پرتاب می‌کند؛ برای مثال طبق برنامه‌ریزی‌ها در فاز اول ۱۵۸۴ ماهواره در ۲۴ مدار (هر مدار ۶۶ ماهواره) قرار خواهند گرفت [۱۶]. به گفته مدیرعامل اسپیس ایکس، هر ۶۰ ماهواره در حدود ۱ ترا هرتز پهنای باند تأمین می‌کنند که می‌توانند برای حدود ۴۰۰۰۰ کاربر، کیفیت سرویس خوبی ارائه دهند (به نظر این پهنای باند برای فاز اول است) [۱۶]. قبل از پرتاب ماهواره‌های پروژه استارلینک، شرکت اسپیس ایکس در سال‌های ۲۰۱۶-۲۰۱۷ جهت تست‌های مختلف، تعدادی ماهواره‌های به‌نام‌های Microsat-2a و Microsat-2b به مدارهای LEO برای ۲۰ ماه پرتاب کرد. در این ماهواره‌ها دو حالت پیش‌بینی شده بود، یک حالت برای تست ارتباطاتی که از فناوری آنتن‌های پهن باند استفاده می‌کرد و یک حالت جهت استفاده از نور خورشید برای شارژ و مسائل مربوط به توان، اطلاعات مربوط به پروژه از جمله فرکانس‌های کاری، مدولاسیون‌ها، توان ارسالی، مکان ایستگاه زمینی و غیره در [۱۷] موجود است. پس‌ازاین تجربه، پروژه استارلینک در سال ۲۰۱۹ شروع به کار کرد.

ماهواره‌های این شرکت چیزی در حدود ۲۶۰ کیلوگرم وزن داشته و شامل صفحات ۳ متری آنتن‌های مخابراتی و صفحات ۹ متری پنل‌های خورشیدی [۶] می‌باشد. حتی گفته می‌شود با گسترش تکنولوژی ماهواره‌های نانو سائز، وزن ماهواره‌های اسپیس ایکس بسیار کمتر خواهد شد و به پایین‌ترین در کلاس خود خواهد رسید [۸]. نکات مربوط به ماهواره‌ها از لحاظ نوع پرتاب، هزینه‌ها و ... به‌طور کامل در [۸] بحث شده است.

هرچند پهنای باند و سرعت‌های فعلی تست شده استارلینک به‌عنوان یک پیشرفت شگرف مطرح نمی‌شود؛ لیکن اسپیس ایکس مدعی شده که می‌تواند پهنای باندی بیشتر از ۱ گیگ بر ثانیه فراهم سازد [۱۴، ۱]. هرچند در مقایسه با OneWeb که پهنای باند ۲.۵ گیگی را مطرح کرده و یا سیستم‌های نسل ۵ و ۶ زمینی، این ادعای اسپیس ایکس همچنان انقلابی در سرعت

یعنی چیزی در حدود ۲۳,۷ ترا بیت بر ثانیه، محاسبه شده است. در مورد ایستگاه‌های زمینی، شرکت آمازون یک سرویسی تحت عنوان AWS راه‌اندازی کرده که طی آن، عملیات محاسبه و استفاده از انواع ماهواره‌ها را در زمینه‌های مختلف هواشناسی، مخابراتی و مسیریابی انجام می‌دهد. درواقع این سرویس، یک زیرساخت زمینی کمک‌کننده به شرکت‌های آرایه دهنده‌ی خدمات فضایی است که عملیات‌های مختلف موردنیاز آن‌ها را (بدون ساختن ایستگاه زمینی جدید) انجام می‌دهد. فعلاً برنامه‌ریزی برای شش عدد مکان جهت سرویس‌دهی AWS انجام شده و برحسب نیاز مشتری، ایستگاه‌های دیگر نیز ساخته می‌شود [۲۲].

۲-۱- بررسی جنبه‌های مختلف استارلینک

طبق [۲۳]، پروژه استارلینک در طبقه‌بندی رادار پسیو، به حساب آورده شده و به محاسبات برخی پارامترها به روش محاسبه پارامترهای ماهواره‌های GPS که به عنوان GNSS شناخته می‌شود، پرداخته می‌شود. از دید این مقاله، استارلینک شبکه‌های سلولی در فضا مانند مخابرات سلولی زمینی، به وجود می‌آورد و هر آنتن یک ماهواره، به عنوان یک سلول در نظر گرفته می‌شود. بر اساس تئوری مقاله، اگر ماهواره در مدار ۱۱۵۰ کیلومتری باشد، توانایی پوشش شعاعی برابر ۱۰۶۰ کیلومتر روی زمین را دارد (شکل ۱). البته این مقدار به ارتفاع، مدار کاری و غیره نیز وابسته است. برای مثال در [۲۴] شعاع ۵۰۰ کیلومتری زمین تحت پوشش قرار گرفته است. بر اساس همین مفروضات و ماهواره‌های GNSS، محاسباتی (بیشتر در حوزه توان) انجام شده که در جدول ۳، آورده شده است. در سیستم‌های GNSS نیز، تئوری ماهواره‌های زیاد در LEO مطرح است که در مقالات مختلفی در حال بررسی می‌باشد. برای مثال در [۲۵] چالش‌های این موضوع از جمله عدم استانداردسازی و توضیح کامل این موضوع و عدم تطابق GNSS فعلی با GNSS پیشنهادی در مدارات LEO بررسی شده و یک راه‌حل جهت حل مشکل داپلر در گیرنده‌ها، بنام اندازه‌گیری فاز حامل سیگنال، پیشنهاد شده است. در مقاله‌ای دیگر ذکر شده که سیستم‌های GNSS مدارات LEO نیاز به محاسبه شیفت داپلر دارند. برای رفع این مشکل در این مقاله از فیلتر کالمن گسترش یافته استفاده شده است [۲۶].

همچنین طبق محاسبات [۲۳]، توان مؤثر تابش ایزوتروپیک (EIRP) آنتن‌های استارلینک، حدود ۵۰- و چگالی قدرت شار مغناطیسی (PFD) در نزدیکی زمین برابر ۱۸۲,۲- خواهد بود. مطالب کلی درباره پروژه استارلینک، ماهواره‌ها، فاکتور و... در [۲۷] آمده است، هر چند بسیاری از وضعیت‌های کلیدی مانند نحوه ارتباطات بین ماهواره‌ها در منظومه و چگونگی تغییرات مدارهای کاری شرح داده نشده و شرکت توضیحی ارائه نداده

جهانی نت می‌باشد. همچنین درباره ترمینال‌های کاربری نیز توضیح داده که در استارلینک حداقل زاویه مورد نیاز جهت ارتباط ترمینال کاربر با ماهواره، ۴۰ درجه می‌باشد (درباره گیت وی‌ها هم صدق می‌کند). بر طبق گزارش سایت این منظومه که وضعیتی آنلاین از ماهواره‌های استارلینک را نشان می‌دهد، مکان ایستگاه‌های زمینی حال حاضر، در ایالت‌های مختلفی از امریکا مانند تگزاس، کالیفرنیا و غیره است. در این سایت و سایت‌های مشابه می‌توان وضعیت ماهواره‌ها را به‌طور آنلاین مشاهده کرد. برای مثال طبق همین سایت‌ها، ماهواره‌هایی که در وضعیت ۵۳ درجه هستند، از آسمان ایران عبور می‌کنند. هرچند چون منظومه ناقص است، نمی‌توان درباره‌ی ماهواره‌های عبوری از آسمان ایران اظهارنظری کرد و چنانچه علاقه‌مند باشیم، باید کل منظومه را از لحاظ مختلف مطالعه نمود. همچنین در گوگل مپ قسمتی با عنوان گیت وی‌های استارلینک وجود دارد و نشان می‌دهد که در امریکا، کانادا و استرالیا، این مکان‌ها وجود دارند.

پس به‌طور کلی مشخص شد که منظومه‌ها متشکل از ماهواره‌هایی در فضا، درگاه‌ها و ایستگاه‌های زمینی و ترمینال‌های کاربری هستند. برای استارلینک مشخصات فرکانسی قسمت‌های مختلف منظومه عبارت است از [۲۰]:

دانلود از ماهواره به زمین: ۱۰,۷-۱۲/۷ گیگاهرتز (۲ گیگاهرتز پهنای باند) --- آپلود: ۱۴-۱۴/۵ گیگاهرتز (۵,۰ گیگ پهنای باند)

دانلود ماهواره به گیت وی: ۱۷,۸-۱۸/۶ (۹,۰ گیگاهرتز) و ۱۸/۸-۱۹/۳ گیگاهرتز (۵,۰ گیگاهرتز پهنای باند)

--- آپلود: ۲۷/۵ - ۲۹/۱ گیگاهرتز (۶,۰ گیگاهرتز) و ۲۷/۵-۳۰ گیگاهرتز (۵,۰ گیگاهرتز پهنای باند)

کنترل، ردیابی و دورسنجی: دانلود ۱۲/۱۵-۱۲/۲۵ (۲۵,۰ گیگاهرتز پهنای باند) و ۱۸/۵۵-۱۸/۶۰ گیگاهرتز (۵,۰ گیگاهرتز پهنای باند)

--- آپلود: ۱۳/۸۵-۱۴ گیگاهرتز (۱۵,۰ گیگاهرتز پهنای باند)

علاوه بر مقایسه ماهواره‌ها از دیدگاه‌های مختلف، می‌توان مقایسه‌ای بین تعداد درگاه‌های زمینی، مکان درگاه‌ها، تعداد آنتن‌ها در درگاه‌ها و... داشت. اما سؤال اینجاست که درگاه‌های زمینی کجا مستقر می‌شوند. در این زمینه در [۲۱] با استفاده از عواملی مانند جمعیت و مدارهای کاری، تعداد درگاه‌های زمینی برای سه منظومه استارلینک، وان وب و تلست را محاسبه کرده است. برای تعداد ۴۴۲۵ ماهواره اسپیس ایکس، ۱۲۳ درگاه زمینی با حدود ۳۵۰۰ آنتن برای دستیابی به بیشترین توان

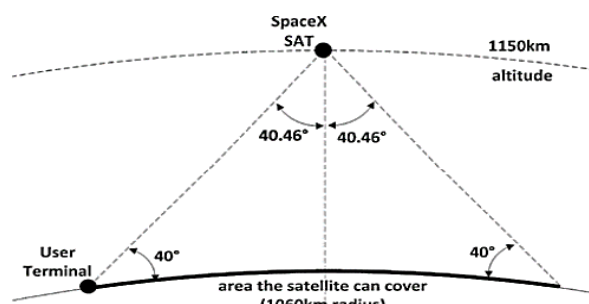
برای اینکه تا حدودی با پروتکل های ارتباطی بین ماهواره ها و یا ماهواره با زمین آشنایی پیدا شود، پروژه CubeSat یا ماهواره های مکعبی توضیح داده می شود. مشابهت های کمی بین CubeSat و استارلینک وجود دارد (مثلا در انتن ها استفاده شده). این پروژه در سال ۱۹۹۹ در دانشگاه استنفورد آغاز شد و پیشنهاد شده که ماهواره های کوچکی با وزن سبک در مدارهای LEO، به منظور مقاصد مختلفی (به خصوص وزن سبک ماهواره و ارزان بودن و کم مصرف بودن) برای کاربردهای مختلف ساخته شود. در مقاله [۲۹] یک تاریخچه کامل از این پروژه آورده شده است؛ لیکن قسمت مهم برای ما پروتکل های ارتباطی ماهواره به زمین (که با علامت C2G نشان داده شده) و پروتکل ارتباطی بین ماهواره ها (C2C) است. برای CubeSat، راه های ارتباطی، مخابرات نور مرئی (VLC) و امواج رادیویی (RF) پیشنهاد شده است. در حالت C2G، ارتباطات لیزر توانسته با سرعت ۱۰۰ مگابیت و نرخ خطا (10^{-6}) مخابرات شود لیکن ارتباطات لیزری در C2G با مشکلاتی هم چون جذب، پراکندگی، تلاطم های جو، نویز پشت زمینه و... مواجه است. RF نیز در این حالت مشکلاتی از قبیل محوشدگی، نبود LOS و ... دارد. جنبه مثبت RF این است که می توان فناوری های مختلفی از قبیل CDMA، MIMO را جهت افزایش بهره وری استفاده کرد. مخابرات VLC نیز در C2G، در فاز تحقیقات قرار دارد. در مقاله ای دیگر، لینک ارتباطی CubeSat با ایستگاه زمینی تجربه و تحلیل شده است [۳۰] که شامل پارامترهای توان، امیدانس و ... می باشد.

در حالت C2C، مهم ترین نکته استفاده از RF این است که نیاز به هم جهتی دقیق بین ماهواره ها نیست و می توان از فناوری های مختلف استفاده کرد و البته باید دانست که RF نیاز به توان نسبتاً بالایی دارد و این نکته منفی در CubeSat به شمار می آید. استفاده از لیزر در C2C میتواند مفید باشد؛ البته نکات منفی نیز دارد که بیشتر به خاطر تفاوت در سرعت نسبی ماهواره ها و ایجاد فرکانس داپلر و نویز پشت زمینه (خوشید) است. فناوری VLC و استفاده از LED نیز محدود بررسی شده است. حسن این فناوری، توان مصرفی بسیار پایین LED می باشد ولی فعلاً سرعت پایینی را پشتیبانی می کند [۲۹].

۳- امکان پذیری ساخت بومی

منظومه ماهواره LEO از این امتیاز ویژه برخوردار است که اولاً نسبت به ماهواره های مخابراتی GEO هزینه کمتری داشته و ثانیاً با توجه به شرایط کشور در پرتاب موفقیت آمیز ماهواره های چند سال اخیر نظیر امید، نور ۱ و غیره و پیچیدگی های ساخت ماهواره های مخابراتی GEO، امکان پذیری ساخت منظومه ماهواره

است. مسئله شیف داپلر در ماهواره های مدار LEO، حائز اهمیت است زیرا این ماهواره ها بسته به ارتفاعی که نسبت به زمین دارند، سرعت حرکت نسبی نسبت به زمین دارند.



شکل (۵). پوشش دهی یک ماهواره در مدار خاص از منظومه استارلینک [۲۳]

جدول (۳). محاسبه یک مقاله درباره جنبه های مختلف استارلینک

پارامتر	مقدار در اسپیس ایکس
فرکانس مرکزی ^۱	11.575 GHz
پهنای باند	250 MHz
ارتفاع آنتن رادار	1.5 m
سطح مؤثر آنتن	۱ مترمربع
عرض پرتو آنتن	۱,۳ درجه
بهره آنتن	42.7 dB
دمای نویز	۳۰۰
نویز محیط	-118.4 dB
عدد نویز گیرنده	1.4 dB
اتلاف سیستم	6 dB
محدوده رزولوشن	0.6 m

برای مثال برای ماهواره های مدار ۵۰۰ کیلومتری، این سرعت برابر ۷,۶ کیلومتر بر ثانیه است. اما تنها نباید سرعت نسبت به زمین را در نظر داشت، چرا که سرعت ماهواره ها در مدارهای گوناگون نیز مختلف است. این دو سرعت متفاوت باعث ایجاد دو مشکل می شود؛ یکی پویا بودن منظومه که باعث احتمال ایجاد برخورد بین ماهواره های می شود و دومی شیف داپلر که مقداری بیشتر از نمونه های زمینی خواهد داشت [۲۸]. در همین مقاله درباره ی سیگنال های RF، استفاده از فیلتر جهانی چند حامل (UFMC)، مالتی پلکسینگ فرکانس تعمیم یافته (GFDM) و بانک فیلتر چندحامل (FBMC) جهت تقویت شکل موج نسبت به شیف داپلر، پیشنهاد شده است.

^۱ تفاوت هایی که بعضاً در قسمت های مختلف است، به این دلیل است که مقالات مختلف بر اساس فرضیات در نظر گرفته شده مانند مدارهای کاری متفاوت، اطلاعات ارائه داده اند.

لینک‌های لیزری و رادیویی پایدار بین ماهواره‌ای از الزامات منظومه ماهواره‌ای است که تاکنون تجربه‌ای در کشور در این حوزه وجود ندارد.

ج- لازمه موفقیت در منظومه ماهواره و امنیت اطلاعات کاربران نسبت به سیستم‌های ماهواره‌ای موجود، داشتن شبکه ملی اطلاعات بومی و قابل‌اتکا است.

ح- در کل دنیا ارتباطات ماهواره‌ای پرهزینه و برای کاربردهای خاص و یا نقاط غیرقابل‌دسترس فیبر نوری است لذا در صورتی که شبکه ملی اطلاعات تقویت شود و یا شبکه فیبر داخل کشور و همچنین سرعت تبادل اطلاعات بهبود یابد عمده مشترکین ترجیح می‌دهند از این سرویس به جای منظومه ماهواره‌ای داخلی و یا خارجی استفاده کنند.

خ- به نظر نمی‌رسد پیاده‌سازی منظومه بومی به‌تنهایی بتواند مانع استفاده از منظومه‌های موجود باشد و پاسخگوی تهدیدات امنیتی متصور در این زمینه باشد.

د- امکان‌پذیری پرتاب چند ماهواره با یک ماهواره‌بر چند بار مصرف می‌تواند هزینه‌های این سیستم را کاهش دهد در غیر این صورت هزینه‌های متصور می‌تواند توجیه اقتصادی طرح را به چالش بکشد.

ذ- کاربرد ماهواره‌های مکعبی در حال افزایش است. آن‌ها از لحاظ انرژی، وزن، حجم، قیمت و کارایی، بهینه هستند. امکان اجاره تعدادی از این نوع ماهواره یا اجاره یونیت‌های آن وجود دارد. از طرفی هزینه‌های ساخت و پرتاب این ماهواره‌ها بسیار کمتر از انواع دیگر بوده و ساخت آن‌ها نیز در افق زمانی کوتاه‌تری در کشور قابل‌تصور است. یک ماهواره مکعبی از نوع ۴ یا ۶ یونیت دارای مزیت نسبی نسبت به دیگر انواع آن پیش‌بینی می‌شود. در یک کیوبست ۶ یونیت، حداقل ۲ یونیت برای قرارگرفتن سلول‌های خورشیدی در نظر گرفته خواهد شد.

۴- نتایج و پیشنهادها

در این مقاله اقدام به بررسی و مقایسه منظومه‌های مخابراتی مهمی از جمله وان وب، تلسنت، کوپر، لئوست، ایریدیوم و استارلینک شد. باتوجه‌به اینکه دیتا و صوت همچون گذشته به‌صورت مجزا تلقی نمی‌شوند و سیستم‌های مبتنی بر دیتا قادر به تبادل صوت نیز هستند. از

LEO و همچنین ماهواره‌بر ساده‌تر است و ساخت آن امکان‌پذیر می‌باشد ولیکن موارد زیر باید مدنظر قرار گیرد.

الف- با توجه به شرایط مدار LEO ماهواره‌ها غیر هماهنگ با زمین حرکت کرده و مدت‌زمان کوتاهی ماهواره بالای فضای کشور قرار دارد لذا اگر در نظر است ماهواره فقط برای کاربردهای داخلی استفاده شود باید پذیرفت که درصد زمان زیادی از زمان عملکرد ماهواره بدون استفاده است که این امر هزینه‌های ارتباط را به‌شدت افزایش می‌دهد. در صورتی که کاربری ماهواره به‌صورت جهانی مدنظر باشد به اخذ مجوز از دیگر کشورها نیاز است که این موضوع نیز با توجه شرایط امروز جهان پیچیدگی‌های خاص خود را دارد.

ب- با توجه به نزدیکی ماهواره با زمین میزان طول عمر مفید ماهواره حدود پنج سال برآورد می‌شود لذا به‌طور متوسط ۲۰ درصد از تعداد ماهواره‌ها باید هرسال تعویض گردد لذا هزینه‌های عملکردی منظومه بالاست و در صورتی که تعداد کاربران محدود باشد این مقوله می‌تواند هزینه‌های سیستم را به‌طور چشمگیری افزایش دهد.

پ- حداقل تعداد ماهواره موردنیاز برحسب فاصله ماهواره از زمین و با فرض آنکه بتواند در کل مدت شبانه‌روز جغرافیایی موردنظر تحت پوشش باشد طراحی می‌شود، قاعدتاً همان‌گونه که گفته شد این حداقل است از طرفی به‌واسطه نزدیکی مدار ماهواره با زمین، میزان خرابی ماهواره زیاد بوده و طراح باید به‌منظور افزایش قابلیت اطمینان سیستم و همچنین با در نظر گرفتن میزان متقاضیان این سرویس و محدودیت پهنای باند هر ماهواره اقدام به محاسبه تعداد ماهواره کند به‌عبارت‌دیگر ظرفیت سیستم تعیین‌کننده تعداد ماهواره می‌شود که به‌مراتب این تعداد بیشتر از تعداد ماهواره‌ای است که در محدودیت پوشش مدنظر است، لذا پیاده‌سازی یک منظومه با تعداد ماهواره کم نمی‌تواند از کارآمدی موردنیاز و قابل‌رقابت با منظومه‌های موجود برخوردار باشد.

ت- شرط داشتن ارتباط پایدار با حداقل تأخیر داشتن لینک‌های بین ماهواره‌ای و همچنین سکوه‌های زمینی هدایت، ناوبری و دروازه‌های تبادل اطلاعات در سطح کشورهای دنیا است لذا تعامل با دیگر کشورها در این خصوص بسیار حائز اهمیت است.

ث- طراحی و ساخت بومی گیرنده آرایه فازی باکیفیت و اقتصادی قابل‌رقابت با گیرنده اسپیس ایکس و همچنین

¹ Unit

- Access, vol. 6, pp. 20390–20411, 2018.
- [5] N. U. L. Hassan, C. Huang, C. Yuen, A. Ahmad, and Y. Zhang, “Dense Small Satellite Networks for Modern Terrestrial Communication Systems: Benefits, Infrastructure, and Technologies,” *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 27, no. 5, pp. 96–103, 2020.
- [6] J. C. McDowell, “The Low Earth Orbit Satellite Population and Impacts of the SpaceX Starlink Constellation,” *Astrophys. J.*, vol. 892, no. 2, p. L36, 2020.
- [7] I. del Portillo, B. G. Cameron, and E. F. Crawley, “A Technical Comparison of Three Low Earth Orbit Satellite Constellation Systems to Provide Global Broadband,” *Dep. Aeronaut. Astronaut. Massachusetts Inst. Technol.*, pp. 123–135, 2019.
- [8] C. Niederstrasser and S. Madry, “New Launchers for Small Satellite Systems,” *Handb. Small Satell.*, pp. 423–436, 2020.
- [9] J. N. Pelton, S. Madry, and S. Camacho-Lara, “Handbook of satellite applications,” *Handb. Satell. Appl.*, vol. 1–2, pp. 1–1228, 2013.
- [10] M. Harris, “Tech giants race to build orbital internet [News],” *IEEE Spectr.*, vol. 55, no. 6, pp. 10–11, 2018.
- [11] V. Tornatore, H. Hase, B. Winkel, and P. Bolli, “VGOS Wideband Reception and Emerging Competitor Occupations of the VLBI Spectrum,” *Ivsc.Bkg.Bund.De*, pp. 32–36, 2013.
- [12] by Jean-Marie BOCKEL, “ECONOMIC AND SECURITY COMMITTEE (ESC) THE FUTURE OF THE SPACE INDUSTRY General Report,” *NATO*, no. November, 2018.
- [13] M. Graydon and L. Parks, “‘Connecting the unconnected’: a critical assessment of US satellite Internet services,” *Media, Cult. Soc.*, vol. 42, no. 2, pp. 260–276, 2020.
- [14] <https://www.zoomit.ir/internet-network/362424-everything-about-starlink-satellite-internet/>.
- [15] D. E. S. C. E. T. Sous-commissions and L. Liste, “ANNUAL SESSION HALIFAX (CANADA),” no. October, 2018.
- [16] S. Up, “Support TESMANIAN on Patreon MODEL S MODEL 3 MODEL X MODEL Y HOME DECOR LIFESTYLE GIFT CARD SpaceX Starlink Internet Satellite Mission and Tech Details,” 2019.
- [17] A. C, “microsat,” *Вестник Росздравнадзора*, vol. 6, no. 0356, pp. 5–9, 2017.
- [18] A. Sayin, M. Cherniakov, and M. Antoniou, “Passive radar using Starlink transmissions: A theoretical

طرفی مشترکین، نرخ ارسال دیتا قابل قبولی برای ارتباطات صوت، تصویر و انواع دیتا نیاز داشته و خواستار هستند؛ لذا منظومه‌هایی که دارای نرخ ارسال پایین و پوشش جغرافیایی کمتری باشند دارای اقبال کمتری نیز خواهند بود. از این میان شرکت اسپیس ایکس با موشک‌های ارزان قیمت فالکون و تدابیر مختلفی که در راستای مقرون به صرفه نمودن پروژه منظومه ماهواره‌ای استارلینک انجام داده است باعث شده تا هزینه‌های تمام شده برای خدمات این شرکت و مشترکین دیتای ماهواره‌ای به شدت کاهش یابد و در آینده نیز در راستای این امر پیش خواهد رفت. از طرفی پروژه استارلینک باعث کمک شایانی به مقرون به صرفه شدن و تکمیل پروژه‌های دیگر نیز خواهد نمود؛ لذا پروژه استارلینک با گام‌هایی جلوتر از دیگر پروژه‌ها و شرکت‌های ارائه‌کننده خدمات اینترنت ماهواره‌ای در راستای کسب بیشترین منفعت اقتصادی از سودآوری پیش‌بینی شده خدمات داده مبتنی بر فضا خواهد بود.

همچنین امکان ساخت بومی منظومه در داخل کشور، امتیازها و محدودیت‌های این طرح از ابعاد مختلف نیز مورد بررسی قرار گرفت. معرفی ضمنی ماهواره‌های مکعبی انجام شد و این ماهواره‌ها به عنوان یک راهبرد برای دستیابی به هدف این مقاله مطرح گردید.

پیشنهاد می‌شود به منظور بررسی دقیق‌تر موضوع منظومه‌های ماهواره‌ای به صورت دائمی پایش و مورد بررسی دقیق محققان این حوزه قرار گیرد زیرا تغییرات در طراحی این منظومه و ساختارها و سیستم‌های آن، تأثیرات قابل توجهی بر فناوری و توجیه اقتصادی برای ساخت آن‌ها خواهد داشت.

۵- مراجع

- [1] J. D. Scanlan, J. M. Styles, D. Lyneham, and M. H. Lützhöft, “New internet satellite constellations to increase cyber risk in ill-prepared industries,” *Proc. Int. Astronaut. Congr. IAC*, vol. 2019-Octob, no. October, pp. 21–25, 2019.
- [2] T. C. Tozer and D. J. Withers, *Satellite communications*, no. 3. 2020.
- [3] <https://www.mehrnews.com/news/4950265/>.
- [4] J. A. R. De Azua, A. Calveras, and A. Camps, “Internet of Satellites (IoSat): Analysis of Network Models and Routing Protocol Requirements,” *IEEE*

- [25] J. Khalife, M. Neinavaie, and Z. M. Kassas, "Navigation with Differential Carrier Phase Measurements from Megaconstellation LEO Satellites," 2020 IEEE/ION Position, Locat. Navig. Symp. PLANS 2020, pp. 1393–1404, 2020.
- [26] P. Date, "New-Age Satellite-Based Navigation STAN," *Insid. GNSS Mag.*, vol. 14, no. 4, 2019.
- [27] "SpaceX," 2020. www.spacex.com.
- [28] B. Soret et al., "LEO small-satellite constellations for 5G and beyond-5G communications," *arXiv*, pp. 184955–184964, 2019.
- [29] [31] N. Saeed, A. Elzanaty, H. Almorad, H. Dahrouj, T. Y. Al-Naffouri, and M. S. Alouini, "CubeSat Communications: Recent Advances and Future Challenges," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 22, no. 3, pp. 1839–1862, 2020.
- [30] A. G. Cappiello, D. C. Popescu, J. S. Harris, and O. Popescu, "Radio link design for cubesat-to-ground station communications using an experimental license," *ISSCS 2019 - Int. Symp. Signals, Circuits Syst.*, pp. 1–4, 2019.
- study," *Proc. Int. Radar Symp.*, vol. 2019-June, pp. 1–7, 2019.
- [19] R. Adlakha, M. Moghaddaszadeh, M. A. Attarzadeh, A. Aref, and M. Nouh, "Frequency selective wave beaming in nonreciprocal acoustic phased arrays," *Sci. Rep.*, vol. 10, no. 1, 2020.
- [20] M. Albulet, "SpaceX Non-Geostationary Satellite System - Attachment A," 2016.
- [21] "Low Earth orbit," pp. 1–16, 2016.
- [22] AWS, "AWS Ground Station," 2020, [Online]. Available: <https://aws.amazon.com/ground-station/>.
- [23] A. Sayin, M. Cherniakov, and M. Antoniou, "Passive radar using Starlink transmissions: A theoretical study," *Proc. Int. Radar Symp.*, vol. 2019-June, 2019.
- [24] <https://www.zoomit.ir/fundamental-science/342227-spacx-starlink-satellite-internet/>.