



مقاله علمی- ترویجی

## ابر منظومه‌های ماهواره‌ای و بومی‌سازی مدل‌های انتشار امواج رادیویی: پدیده‌ها، پارامترها، روش‌های اندازه‌گیری و پیشنهاد چیدمان بومی‌سازی مدل‌ها

رضا بحری<sup>\*</sup>، عضو هیات علمی پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، reza.bahri@itrc.ac.ir

پروین سجادی، پژوهشگر پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، p.sojoodi@itrc.ac.ir

میده‌اشم مدام حسینی، عضو هیات علمی پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، maddah@itrc.ac.ir

\*نویسنده مسئول

### چکیده

ابر منظومه‌های مخابراتی آخرین دستاورده عصر جدید فضایی است. این فناوری با داشتن تعداد ماهواره‌های زیاد، در ارتفاع پایین مداری، امکان ارائه خدمات با پهنای باند بالا، تاخیر کم و قابل رقابت با سایر بسترها ارتباطی زمینی را فراهم می‌نماید. از جمله الزامات مهم در برقراری ارتباط مطمئن و پایدار در مخابرات ماهواره‌ای، مطالعه نحوه انتشار امواج رادیویی در باندهای فرکانسی مختلف جهت استخراج پارامترهای موثر در کارایی لینک ماهواره و ایجاد مدل و الگوی مناسب برای پیش‌بینی اثرات عوامل موثر بر انتشار امواج بر اساس پارامترهای بدست آمده برای مناطق مختلف می‌باشد. در این مقاله ضمن بررسی مختصرا ویژگی‌های کلیدی ابر منظومه‌های ماهواره‌ای و همچنین بررسی دقیق‌تر یک نمونه از این نوع فناوری فضایی جدید، موضوع پدیده‌های جوی تاثیرگذار در انتشار امواج ماهواره‌ای در فرکانس‌های  $Ka$  و  $Ku$  مورد بررسی قرار گرفته است. در این بررسی نه تنها مدارت با ارتفاع پایین، بلکه تا مدار زمین آهنگ پدیده‌های مختلف جوی و اثرگذاری آنها بر کیفیت سیگنال ماهواره‌ای بیان شده است. همچنین متناسب با روش‌های معرفی شده یک نمونه چیدمان پیشنهادی برای اندازه‌گیری هم‌زمان سیگنال ماهواره و پارامترهای هواشناسی ارائه و نتایج اندازه‌گیری عملیاتی نیز ارائه شده است.

**کلمات کلیدی:** ابر منظومه‌ها، انتشار امواج ماهواره‌ای، مدل‌های انتشار امواج، باند  $Ku$  و  $Ka$

## Mega Satellite Constellations and Localization of Radio Wave Propagation Models: Phenomena, Parameters, Measurement Methods and the Suggestion of Localization of Models

Reza Bahri\*, Faculty member of ICT Research Institute, Tehran,Iran, reza.bahri@itrc.ac.ir

Parvin Sojoudi, Researcher of ICT Research Institute, Tehran,Iran, p.sojoodi@itrc.ac.ir

Seyed Hashem Maddah Hosseini,Faculty member of ICT Research Institute, Tehran,Iran, maddah@itrc.ac.ir

\*Corresponding Author

### Abstract

Mega Satellite Constellations are the latest achievement of the new space age. This technology, with a large

number of satellites, at a low orbital altitude, provides the possibility of providing services with high bandwidth, low delay and competitive with other terrestrial communication platforms. One of the important requirements in establishing reliable and stable communication in satellite communication is the study of the propagation of radio waves in different frequency bands in order to extract parameters effective in the efficiency of the satellite link and creating a suitable model for predicting the effects of factors affecting wave propagation based on the parameters obtained for different regions. In this paper, in addition to a brief review of the key features of satellite constellations, as well as a more detailed review of an example of this type of new space technology, the issue of atmospheric phenomena affecting the propagation of satellite waves at Ku and Ka frequencies has been investigated. In this study, not only LEO orbit, but also the earth's GEO various atmospheric phenomena and their effects on the satellite signal quality are described. Also, in accordance with the introduced methods, a proposed arrangement sample for simultaneous measurement of satellite signal and meteorological parameters has been presented and operational measurement results have also been presented.

**Keywords:** Mega Satellite Constellations, Satellite Wave Propagation, Radio Wave Propagation Model, Ku, Ka

## ۲- منظومه‌های ماهواره‌ای

به طور سنتی ماهواره‌های مدار زمین آهنگ (GEO) ارتباطات ماهواره‌ای را در مناطق وسیع برقرار می‌نمایند. انتقال اطلاعات در این ماهواره‌ها با نرخ داده پایین و تاخیر بالا همراه است. با این وجود در مناطقی که دسترسی به زیرساخت ارتباطی، از لحاظ کیفیت و قیمت غیر عملیاتی باشد، این نوع ارتباط قابل استفاده است. در سال‌های اخیر، ظهور ماهواره‌های زمین آهنگ پرظرفیت (GEO HTS) تا حدودی مشکل ظرفیت و سرعت ارتباطی را برطرف نموده است، اما همچنان به خاطر تاخیر ذاتی لینک‌های ماهواره‌ای در مدار GEO، در کاربری‌های حساس به تاخیر قابل استفاده نیستند.

در سال ۲۰۲۰ بر طبق آمار یونسکو حدود ۱۳٪ جمعیت در کشورهای توسعه یافته و بیش از ۵۳٪ در کشورهای در حال توسعه به اینترنت دسترسی ندارد [۱]. ابر منظومه‌های ماهواره‌ای با توجه به ماهیت‌شان می‌توانند ارتباطات پهن‌باند را برای کاربران مختلف در سراسر دنیا فراهم نمایند و به نظر می‌رسد بازار بسیار مناسبی در کشورهای در حال توسعه در آینده نزدیک خواهد داشت. ابر منظومه‌های ماهواره‌ای در مدار پایین قادر خواهد بود که به جمعیت‌های ساکن در عرض جغرافیایی بالا مانند آلاسکا، شمال کانادا، اسکاندیناوی و روسیه، که فاقد زیرساخت‌های زمینی هستند و همچنین خارج ناحیه پوشش ماهواره‌های GEO هستند، ارائه خدمات نمایند که تحول بسیار مهمی خواهد بود. منظومه‌های ماهواره‌ای کاربردهای متنوعی دارند. منظومه‌های ماهواره‌ای موجود برای کاربردهای موقعیت‌یابی، پخش سراسری، کاربرد پایش و کاربرد ارتباطات دو طرفه به کار می‌روند. مهم‌ترین منظومه‌های ارتباطی دو طرفه منظومه‌های اینمارست، گلوبال استار، ایریدیوم، O3B، منظومه ارب کام، سَت کام، ویاست و ثریا می‌باشند. این هشت منظومه پیش از رقابت گسترش ابر منظومه‌ها در سال‌های اخیر، طراحی و به کارگیری شده‌اند. تاریخچه منظومه‌های ماهواره‌ای بسیار پر افت و خیز بوده است. در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۲ میلادی دو شرکت ایریدیوم و گلوبال استار اقدام به برنامه‌ریزی گسترش برای ارائه خدمات مخابراتی نظیر ارتباطات صوتی از منظومه‌های با بیش از ۱۰۰ ماهواره نمودند، ولی این طرح‌ها پس از چندین پرتاپ موفق در نهایت از لحاظ برآوردهای مالی با شکست مواجه شد. هر دو شرکت به این نتیجه رسیدند که هزینه‌های ارسال و نگهداری ماهواره در مدار، بسیار بالاتر از درآمد های احتمالی منظومه‌ها خواهد بود. در نهایت این دو شرکت با حفظ

## ۱- مقدمه

ابر منظومه‌های مخابراتی آخرین دستاوردهای عصر جدید فضایی است. این فناوری با داشتن تعداد ماهواره‌های زیاد، در مدار پایین زمین (LEO)، امکان ارائه خدمات با پهنای باند بالا، تاخیر کم و قابل رقباً با سایر بسترهای ارتباطی زمینی را فراهم می‌نماید. از طرفی از جمله از این امدادات می‌در برق‌ارای ارتباط مطمئن و پایدار در مخابرات ماهواره‌ای، مطالعه نحوه انتشار امواج رادیویی در باندهای فرکانسی جهت استخراج و ارزیابی پارامترهای موثر در کارایی لینک ماهواره و ایجاد مدل و الگوی مناسب برای پیش‌بینی اثرات عوامل موثر بر انتشار امواج بر اساس پارامترهای بدست آمده برای مناطق مختلف می‌باشد. در مسیر انتشار امواج ماهواره‌ای، وجود گازهای جوی، بخار آب، مولکول‌های اکسیژن، ابرها، طوفان، رعد و برق، گرد و غبار و مه گرفتگی در لایه‌های مختلف فضا، اعم از تروپسفر و یونسفر، می‌توانند سبب تضعیف و یا قطع امواج ماهواره‌ای شوند که به نوبه خود، باعث افت کیفیت یا در برخی موارد، عدم دریافت سرویس شود. این پدیده‌های طبیعی باعث بوجود آمدن خطاهای و مشکلاتی مانند تضعیف، تغییر پلاریزاسیون، محشده‌گی، تأخیر و پاشندگی و ... در سیگنال شده و کیفیت یک ارتباط ماهواره‌ای را تحت تاثیر قرار می‌دهند که اثرات آنها باید به نحو مناسب در بودجه‌بندی لینک ماهواره لحاظ گردد [۱].

در این مقاله ابتدا مروری بر موضوع ارتباطات ماهواره‌ای انجام شده است. ابر منظومه‌های ماهواره‌ای و مشخصات و ویژگی‌های کلیدی آنها مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به پیش‌تازی ابر منظومه استارلینک از شرکت X-Space، در بخش بعدی فعالیت‌های این شرکت مورد بررسی قرار گرفته است. پدیده‌های تاثیرگذار بر انتشار امواج رادیویی در لینک ماهواره نظری پدیده‌ها و اثرات تروپسفر و مدل‌های پیش‌بینی آنها، تضعیف گازهای اتمسفری و مدل پیش‌بینی جهانی، تضعیف توسط باران و دیگر نزولات جوی و ابرها، اثرات هوای صاف، سینتیلیشن و محشده‌گی چند مسیره، تضعیف حاصل از طوفان‌های شنی و خاکی، اثرات پلاریزاسیون متقابل مورد بررسی قرار گرفتند. موضوع مهم دیگر روش‌های اندازه‌گیری پارامترها است که در این راستا اندازه‌گیری رادیومتریک، اندازه‌گیری راداری و اندازه‌گیری با استفاده از سیگنال بیکن ماهواره بررسی شده‌اند. با توجه به راه اندازی نمونه پایلوت اندازه‌گیری پارامترهای انتشار امواج ماهواره‌ای در پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، در همین زمینه نمونه اندازه‌گیری و چیدمان پیشنهادی برای هر سناریو ارائه شده است.

## عصربرق

ASR-E-BARQ

[Downloaded from kiaee.ir on 2025-08-21]

[Page 20]

ماهواره‌های خود در مدار، طرح‌های توسعه و جایگزینی آن‌ها را کنار گذاشتند. در حال حاضر ایریدیوم با ۶۶ ماهواره و گلوبال استار با ۴۸ ماهواره در مدار LEO حضور دارند و سهم ناچیزی از بازار ارتباطات مخابراتی را در اختیار دارند.

پس از این دو منظومه، منظومه‌های O3B با ۲۰ ماهواره در مدار MEO و ارب کام با ۱۷ ماهواره در مدار LEO نیز برای کاربران دریایی و نقاط دور افتاده، خدمات دو طرفه را برقرار نمودند. علاوه بر آن، منظومه‌های ثریا، اینمارست، سنت کام و ویاست نیز هر کدام با سه یا چهار ماهواره در مدار GEO حضور دارند و عمدتاً خدمات صوت یا ارتباطات ماشین به ماشین (M2M) را برقرار می‌نمایند. با توجه به تأخیر بالای منظومه‌های GEO و نرخ داده پایین، این منظومه‌ها در مکان‌هایی که هیچ ارتباط زمینی برقرار نیست کاربرد دارند.

باتوجه به کاهش هزینه‌های تولید و پرتاب ماهواره، ایده ابرمنظومه‌ها در عصر فضایی جدید و از سال ۲۰۱۵ مطرح شد. این فناوری با هزاران ماهواره در مدار ارتفاع پایین LEO امکان ارائه سرویس پهن‌باند را برای کاربران زمینی با نرخ داده مناسب و تأخیر کم را فراهم می‌نماید. با طرح این ایده توسط شرکت وان‌وب، شرکت‌های دیگر نظری X نیز به رقابت برای کسب بازار اینترنت ماهواره‌ای پرداختند. در سال ۲۰۲۱ بیش از ۳۰ شرکت از سراسر دنیا قصد دارند ایده منظومه ماهواره‌ای برای ارائه سرویس اینترنت را در سال‌های آتی پیگیری نمایند. در حال حاضر حدود ۲۰۰۰ ماهواره از انواع مختلف فعال (GSO, Non-GSO) در مدار زمین وجود دارد. این در حالی است که فقط دو شرکت وان‌وب در فاز اولیه خود بیش از ۶۰۰۰ ماهواره استارلینک X در حدود ۱۲۰۰۰ ماهواره به فضا پرتاب خواهد نمود. این شرکت‌ها تعداد ماهواره‌های خود را چهار برابر افزایش خواهند داد که نسل جدیدی از ارتباطات ماهواره‌ای را رقم خواهد زد. پس از پیشگامی این دو شرکت، ده شرکت دیگر از چین، کانادا و اروپا اقدام به اخذ مجوز برای ابرمنظومه نموده‌اند. سرعت‌های ارتباطی نسل نوین ابرمنظومه‌ها بسیار بیشتر از سرعت‌های منظومه‌های موجود فعلی است. در حالی که اینمارست و ایریدیوم سرعت‌های در حدود ۵۰۰ کیلوبیت بر ثانیه را ارائه می‌نمایند، منظومه وان‌وب یک جریان ویدئو هم‌زمان با سرعت ۴۰۰ مگابیت بر ثانیه را آزمایش نموده است. در حال حاضر منظومه استارلینک X سرعت ۱۰۰ مگابیت بر ثانیه را در نقاط مختلف آمریکا حتی در شرایط ابری و بارانی ارائه می‌نماید. طبق اعلام این شرکت با تکمیل منظومه امکان ارائه سرویس با سرعت ۲۰۰ مگابیت برای کاربران فراهم خواهد شد. منظومه استارلینک X در بعضی مراجع ادعای دسترسی به سرعت ۱ گیگابیت بر ثانیه را برای کاربران اعلام نموده است.

### ۱-۲- منظومه استارلینک

پرروژه استارلینک با هدف ایجاد پهنه‌ای باند کافی برای پشتیبانی از ۵۰٪ ترافیک بکهال و ۱۰٪ ترافیک اینترنت در مناطق پر جمعیت دنیال می‌شود. در این پروژه در طی دو فاز، در مجموع نزدیک به ۱۲۰۰۰ ماهواره تا اواسط سال ۲۰۲۷ در مدار قرار می‌گیرد. علاوه بر ۱۲۰۰۰ ماهواره قبلی، شرکت درخواست خود را برای تخصیص طیف فرکانسی به منظور قرار دادن ۳۰۰۰ ماهواره دیگر در مدار برای اتحادیه جهانی مخابرات ITU ارسال کرده است. با در نظر گرفتن درخواست قبلی شرکت، در نهایت تعداد کل ماهواره‌های این منظومه در آینده به تعداد ۴۲۰۰۰ ماهواره افزایش خواهد

یافت و عملای تبدیل به یک ابرمنظومه خواهد شد [۲۰].

۱۲۰۰۰ ماهواره ابتدایی در دو ارتفاع حدود ۳۰۰ کیلومتر و ۵۰۰ کیلومتر قرار می‌گیرد. نزدیک به ۴۵۰ ماهواره در ارتفاع ۵۰۰ کیلومتری، و حدود ۷۵۰ ماهواره در ارتفاع ۳۰۰ کیلومتری در باند Ku و Ka قرار می‌گیرند.

نوع ماهواره‌های منظومه استارلینک از کلاس ماهواره‌های کوچک بین ۱۰۰ تا ۵۰۰ کیلوگرم می‌باشند. ماهواره‌های این منظومه در پرتاب‌های مختلف، دقیقاً مشابه یکدیگر نیستند و تفاوت‌هایی با یکدیگر دارند. ماهواره‌هایی که در پرتاب‌های سال ۲۰۱۹ استفاده شده‌اند، دارای وزن ۲۲۷ کیلوگرم بوده‌اند. بر طبق فایلینگ Space X ماهواره‌ها دارای لینک اپتیکی، آنتن‌های آرایه فازی و تکنولوژی پردازش در باند Ku و Ka بودند. ماهواره‌هایی که تا ژوئن ۲۰۲۰ پرتاب شده‌اند فاقد لینک اپتیکی بوده‌اند. بر طبق اطلاعات ارائه شده، ماهواره‌های با لینک اپتیکی، از سال ۲۰۲۱ در مدار گرفته‌اند. ماهواره‌هایی که در نوامبر ۲۰۱۹ در مدار قرار گرفت علاوه بر ویژگی‌های جدید نسبت به قبل مجهز به فناوری باند Ka نیز شد.

در منظومه استارلینک که نمایی از ماهواره آن در شکل (۱) نشان داده شده است، ماهواره‌ها کاملاً تخت هستند. این ساختارهای تخت هر کدام مجهز به چندین پنل آرایه فازی مسطح و لینک‌های اپتیکی هستند. هر ماهواره دارای چهار آنتن آرایه فازی دو عدد برای ارتباط با ایستگاه زمینی و دو عدد برای ارتباط با کاربر در نظر گرفته شده است. یکی از هر دو آنتن به عنوان پشتیبان است. این ساختار مسطح هر کدام وزنی در حدود ۲۰۰ کیلوگرم دارند. شرکت Space X سه نوع دریافت کننده زمینی دارد که عبارتند از ایستگاه‌های فرمان و کنترل TT&C، دروازه‌های زمینی و ترمینال کاربر نهایی. ایستگاه‌های TT&C در تمام کره زمین پراکنده شده‌اند و آنتن‌های آن از نوع رفلکتور و در حدود ۵ متر قطر دارد. ترمینال زمینی (دوازه) و آنتن چه برای کاربر و نوی نوع آنتن‌های آرایه فازی می‌باشند. هر آنتن چه برای کاربر و چه برای ایستگاه زمینی (دوازه) برای ارسال و دریافت استفاده می‌شود. تعداد دروازه‌های زمینی X در حدود ۱۲۰ دروازه در سراسر کره زمین خواهد بود. همان‌طور که پیش از این عنوان شد باند فرکانسی Ka برای ارتباط ماهواره با دروازه‌های زمینی در نظر گرفته شده است.

در ماهواره‌های استارلینک باند فرکانسی Ka برای ارتباط ماهواره با ایستگاه‌های زمینی (دوازه) در نظر گرفته شده است. جدول (۱) نحوه برقراری ارتباط با کاربر و با ایستگاه زمینی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این منظومه برقراری ارتباط با کاربر و ایستگاه زمینی با آنتن چند پرتویی برقرار می‌شود. تعداد پرتوهای سمت دروازه زمینی ۹ پرتو (Beam) و سمت کاربر ۸ پرتو می‌باشد. قابلیت چرخش پرتو روی زمین و جایه‌جایی پرتو (Beam Steerable) برای سمت کاربر و دروازه زمینی وجود دارد ولی در مورد شکل‌دهی پرتو (Beam Forming) و تغییر پوشش دهی آنتن برای سمت کاربر امکان‌پذیر است. اما برای سمت دروازه امکان‌پذیر نیست. پوشش دروازه به علت بالابردن نرخ داده برای جایه‌جایی حجم زیادی از داده در زمان رویت ایستگاه زمینی کاهش یافته است ولی چون نرخ داده سمت کاربر کمتر از سمت دروازه است، منطقه پوشش افزایش یافته است. تفاوت نرخ داده سمت کاربر و دروازه در جدول (۱) ارائه شده است. بهره آنتن و اطلاعات تکمیلی بودجه لینک در جدول (۲) آورده شده است [۴].

جدول ۱: نحوه برقراری ارتباط در منظمه استارلینک [۴]

Downlink/User	Downlink/Gateway	
8	9	تعداد پرتو
بله	بله	قابلیت چرخش
بله	خیر	قابلیت شکل دهی
2800 km <sup>2</sup>	780km <sup>2</sup>	پوشش هر پرتو
250 MHz	250 MHz	پهنای باند
36.7 dBW	39.44 dBW	EIRP
RHCP	R/LHCP	پلاریزاسیون

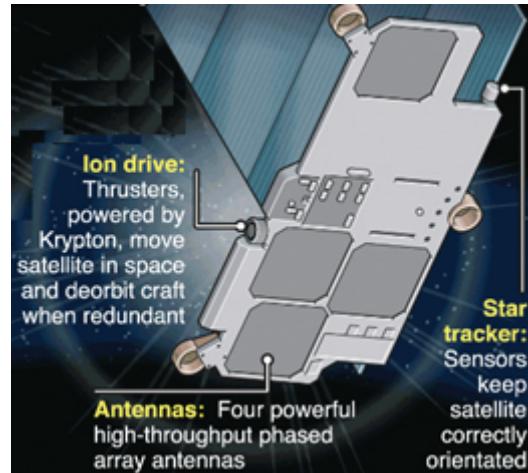
جدول ۲: خلاصه کانال های مورد استفاده در منظمه استارلینک [۴]

کل پهنای باند	ضریب استفاده دوباره	تعداد کانال	پهنای باند کانال	
2000 MHz	4-5	8	250 MHz	Downlink/User
500 MHz	4-5	4	125MHz	Downlink/User
2250 MHz	1	9	250MHz	Downlink/Gateway
4000 MHz	1	8	500MHz	Uplink /Gateway
150 MHz	----	----	----	Downlink /TTC
150 MHz	----	----	----	Uplink /TTC

جدول ۳: بودجه لینک ماهواره استارلینک با کاربر زمینی و ایستگاهها زمینی (دوازه) [۴]

User	Gateway	پارامتر
13.5 GHz	28.5 GHz	فرکانس °
250 MHz (downlink)	500 MHz (uplink)	پهنای باند °
	3.5 Meter	قطر آتنن فرستنده ایستگاه زمینی °
37.7 dBi	40.9 dBi	بهره آتنن گیرنده ایستگاهی زمینی °
16 APSK	256 APSK	نوع مدولاسیون
36.7 dBW	68.4 dBW	EIRP
1684 Km	1684 Km	فاصله مسیر
40°	40°	زاویه ارتفاع °
179.6 dB	186.4 dB	تضعیف فضای آزاد °
0.53 dB	2.9 dB	تلفات اتمسفر
674.3 Mbps	2682.1 Mbps	نرخ داده

می شود. طبق اعلان شرکت به زودی کاربرانی در انگلیس از اینترنت استارلینک استفاده خواهند کرد. فروش فعلی بسیار محدود است و به صورت اولویت ثبت نام صورت می بذیرد. اکثر کاربران فعلی رضایت بسیار بالایی از سامانه داشته اند و سرعت

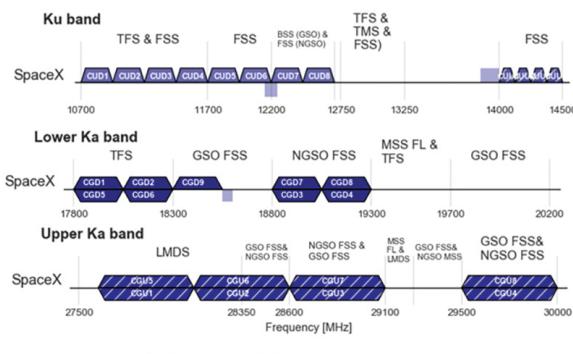


شکل ۱: شماتیک از ماهواره استارلینک [۲]

بر اساس اطلاعات موجود از شرکت Space X، فرکانس های کاربران در محدوده باند Ku و دارای هم پوشانی با باندهای FSS است. همچنین فرکانس های ایستگاه های زمینی در دو بخش از باند Ka قرار دارد. شرح کامل فرکانس های Space X در جدول (۲) نشان داده شده است. کل پهنای باند و تفکیک کانال ها در باند فرکانسی در شکل (۲) آورده شده است [۵]. در جدول (۴) بودجه لینک برای ارتباط ماهواره های استارلینک با ایستگاه های زمینی و کاربران آورده شده است. پارامترهای سtarlink در جدول بر اساس اطلاعات ثبت شده FCC در Space X، کمیسیون ارتباطات فدرال آمریکا تعیین شده اند. سایر پارامترها بر اساس ارزیابی های موجود در مرجع [۴] تعیین شده اند.

آتنن کاربر زمینی Space X یک آتنن بازتابی به منظور تنظیم خودکار زاویه به سمت مورد نظر در آسمان می باشد و به نظر می رسد، سامانه زمینی دارای هدایت همزمان الکتریکی و مکانیکی است. در حالی که منظمه ماهواره های استارلینک Space X به اندازه نهایی پیش بینی شده اش نزدیک نیست، اما این شرکت به اندازه های کافی ماهواره در مدار پایین زمین دارد که بخواهد سرویس خود را به صورت آزمایشی محدود با نام «بتا بهتر از هیچی» راه اندازی نماید [۷].

در سال ۲۰۲۱ شرکت بیش از ده هزار کاربر در آمریکای شمالی داشته و البته به سرعت بر تعداد کاربران این منظمه افزوده



شکل ۲: فرکانس های مورد استفاده در منظمه استارلینک [۴]

Key	
GSO	Geostationary satellite orbit
TFS	Terrestrial fixed service
FSS	Fixed satellite service
MSS	Mobile satellite service
BSS	Broadcast satellite service
MSS FL	Mobile satellite service feeder links
LMDS	Local multipoint distribution service
NGSO	Non-geostationary satellite orbit

ضعیف مسیر عمود (زاویه ارتفاع ۹۰ درجه) را می‌توان به دست آورد که به آن تضعیف اوج گفته می‌شود. فشار جو، دمای هوا و رطوبت در ارتفاعات مختلف اتمسفر برای محاسبه تضعیف ویژه گازها نیاز می‌باشد. در حالت ایده‌آل، اندازه‌گیری این پارامترها در ارتفاعات مختلف اتمسفر توسط رادیوسوند می‌باشد، اما در اکثر مواقع این امر امکان پذیر نمی‌باشد. به جای اندازه‌گیری‌های به دست آمده از رادیوسوند می‌توان از روابطی استفاده کرد که مقدار دما، فشار و بخار آب در ارتفاعات مختلف جو را با استفاده از مقدار متناظر این پارامترها روی سطح زمین به صورت تقریبی به دست می‌دهد.

#### -**ضعیف توسط باران و دیگر نزولات جوی و ابرها**

مدل‌های بسیاری برای تخمین و پیشگویی تضعیف ناشی از باران در امتداد یک مسیر مایل را ارائه شده‌اند [۹]. علاوه بر باران که تأثیرگذارترین پدیده جوی در انتشار امواج ماهواره‌ای است، دیگر ذرات مانند برف و کریستال‌های بخی نیز موجب تضعیف امواج ارسالی می‌شوند. علاوه بر این ابر و مه نیز دارای اثرات تضعیف و دی‌پاریزاسیون ناشی از عدم تقارن فیزیکی ذرات هستند.

#### -**اثرات هوای صاف**

به جز جذب توسط اتمسفر، اثرات هوای صاف در غیاب نزولات جوی معمولاً محوشدنی جدی را برای سیستم‌های مخابرات ماهواره‌ای که در فرکانس‌های پایین‌تر از 10GHz و زوایای ارتفاعی بالای ۱۰ درجه کار می‌کنند، ایجاد نمی‌کند. این در حالی است که برای زوایای کمتر از ۱۰ درجه و فرکانس‌های بالای 10GHz نوسانات تروپوسفری رخ دهنده می‌توانند سبب پایین آمدن کارکرد سیستم شوند. در زوایای ارتفاعی خیلی کم (کمتر از ۴ درجه برای لینک‌های به دور از ساحل و کمتر از ۵ درجه برای لینک‌های روی آب و یا لینک‌های ساحلی) محوشدنی ناشی از اثرات انتشاری چند مسیره، می‌تواند خیلی شدید باشد. در بعضی از مکان‌ها نوسانات یونوسفری در فرکانس‌های پایین‌تر از 6GHz می‌تواند مهم باشد [۱۱].

#### -**سینتیلیشن و محوشدنی چند مسیره**

دامنه سینتیلیشن (scintillation) ناشی از تروپوسفر به دامنه و ساختار تغییرات ضریب شکست بستگی دارد و با افزایش فرکانس و طول لینک افزایش و با کاهش پهنای بیم آتنن کاهش پیدا می‌کند. متوسط ماهیانه r.m.s نوسانات با جمله Nwet انکسار که واپس‌تۀ به مقدار بخار آب اتمسفر است به خوبی واپس‌تۀ است. Nwet طی دوره‌هایی از یک ماه و یا طولانی‌تر، از داده‌های هوشمناسی به دست آمده در سطح، قابل حصول است. در درصد بسیار کمی از زمان و یا بالعکس محوشدنی زیاد (بزرگ‌تر از ۱۰ dB)، در زوایای ارتفاعی خیلی کم مشاهده شد که محوشدنی خیلی جدی‌تر از آن مقداری است که بخارتر سینتیلیشن پیشگویی می‌شود. محوشدنی همچنین مشخصاتی مشابه محوشدنی چند مسیره روی لینک‌های زمینی دارد. مشابه لینک‌های زمینی توزیع برای لینک‌های ماهواره‌ای با زاویه کم با گرادیان انکسار هم بسته است.

#### -**ضعیف حاصل از طوفان‌های شنی و خاکی**

اطلاعات در دسترس در مورد تضعیف حاصل از گرد و غبار و شن روی لینک‌های مایل رادیویی، نشان می‌دهد در فرکانس‌های پایین‌تر از 30GHz تنها در صورتی که تمرکز ذرات بالا باشد و یا مقدار رطوبت زیاد باشد، اثرات انتشاری قابل توجه خواهد بود. در فرکانس‌های بالاتر از 30GHz به دلیل اینکه طول موج

۱۰۰ مگابیت بر ثانیه را در نقاط مختلف آمریکا حتی در شرایط ابری و بارانی دریافت کرده‌اند. شرکت اعلام نموده است که تا اواسط سال ۲۰۲۱ با افزایش تعداد ماهواره‌ها سرعت ۲۰۰ مگابیتی برای کاربران فراهم خواهد شد. البته اهداف شرکت سرعت‌های بالای ۱ گیگابیت در زمان تکمیل منظمه است. هزینه اشتراک ماهانه سرویس ۹۹ دلار و هزینه تجهیزات ۴۹۹ دلار می‌باشد. البته برخی تخمین‌ها نشان می‌دهد، هزینه‌های Space X برای منظمه به مراتب بالاتر از هزینه اشتراک ماهیانه بوده است و احتمالاً قیمت اعلام شده برای سرعت‌های پایین و کاربران اولیه در نظر گرفته شده است.

#### -**پدیده‌های جوی تاثیرگذار بر انتشار امواج ماهواره‌ای**

بررسی پدیده‌های تاثیرگذار در انتشار امواج رادیویی بین ماهواره و ایستگاه زمینی در طراحی لینک‌هایی با قابلیت دسترسی مناسب از اهمیت خاصی برخوردار است [۷]. در انتشار امواج ماهواره‌ای در باند Ka و Ku از زمین تا مدار زمین آهنگ پدیده‌های مختلف، سیگنال ارسالی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. لایه یونوسفر اتمسفر برای باندهای مذکور به صورت شفاف است و می‌توان از اثرات انتشاری آن در این باند صرف نظر کرد. لذا در این مقاله پدیده‌های موثر در لایه تروپوسفر و بعضی از مدل‌های پیش‌بینی تضعیف ناشی از این پدیده‌ها بررسی می‌شوند.

#### -۱-**اثرات تروپوسفر و مدل‌های پیش‌بینی آنها**

در ارتباط با انتشار امواج ماهواره‌ای، تلفات و تضعیف انتشاری تروپوسفر بر روی لینک‌های ماهواره‌ای نسبت به فضای آزاد را می‌توان ناشی از عوامل زیر دانست:

##### • گازهای اتمسفری

• باران و دیگر نزولات جوی و ابرها

• سینتیلیشن و اثرات چند مسیره

• طوفان‌های شنی و خاکی

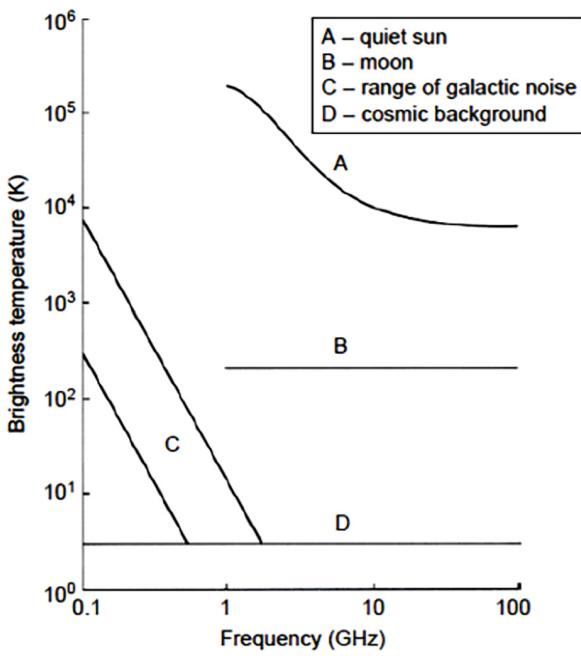
هر کدام از چهار عامل ذکر شده تابع فرکانس، موقعیت جغرافیایی و زاویه ارتفاعی می‌باشد. به عنوان نمونه در زوایای بالای ۱۰ درجه تنها تضعیف گازهای، تضعیف باران و ابر و احتمالاً سینتیلیشن قابل توجه خواهد بود. در ادامه هر کدام از عوامل مذکور مورد بررسی اجمالی قرار خواهد گرفت.

#### -**ضعیف گازهای اتمسفری و مدل پیش‌بینی ITU**

ضعیف توسط گازهای اتمسفری که تماماً بوسیله جذب رخ می‌دهد تابع فرکانس، زاویه ارتفاعی، ارتفاع از سطح دریا و چگالی بخار آب (رطوبت مطلق) می‌باشدند. در فرکانس‌های پایین‌تر از 10GHz تضعیف توسط گازها بطور معمول نادیده گرفته می‌شود. اهمیت این نوع تضعیف بالای فرکانس‌های 10GHz به ویژه برای زوایای ارتفاعی کم است. در یک فرکانس داده شده، مشارکت اکسیژن در جذب اتمسفری نسبتاً ثابت است. این در حالی است که چگالی بخار آب و پروفایل عمودی آن کاملاً متغیر هستند. به عنوان نمونه بیش‌ترین تضعیف گازی در طول فصل با بیش‌ترین مقدار ریزش باران، رخ می‌دهد. در توصیه‌نامه ITU-R P.676 مدلی برای پیش‌بینی تضعیف گازها معرفی شده است [۸].

در این مدل اتمسفر به صورت لایه‌های افقی کوچک تقسیم می‌شود و تضعیف ویژه در هر یک از این لایه‌ها بر حسب رطوبت، دما و فشار هوای آن لایه محاسبه می‌شود. با انتگرال گیری بر روی مقادیر تضعیف ویژه این لایه‌ها از سطح زمین تا یک ارتفاع اوج،





شکل ۳: منابع نویز فراز مینی<sup>[۹]</sup>

استفاده نمی‌شوند. فرکانس مشاهده منابع رادیویی آسمانی، در بیشتر موارد، دمای روشنایی موجود را تعیین می‌کند. تغییرات قابل توجهی در دمای روشنایی با فرکانس برای ستارگان رادیویی و خورشید وجود دارد. علاوه بر این، خورشید یک تغییر دوره‌ای در دمای روشنایی را نشان می‌دهد که تقریباً یک چرخه ۱۱ ساله را دنبال می‌کند.<sup>[۹]</sup>

با استفاده از روش رادیومتری می‌توان عواملی چون تضعیف، دیپلاریزاسیون و طول اضافی مسیر رادیویی در ارتباطات ماهواره را اندازه‌گیری نمود.<sup>[۹]</sup>

هر جسمی به طور مستمر از خود انرژی الکترومغناطیسی تابش می‌کند. این انرژی بر اساس تغییرات اتمی و مولکولی جسم می‌باشد. ماهیت و شدت این تغییرات به دمای آن جسم بستگی دارد. توزیع انرژی بر روی جسم، انرژی حرارتی در طیف فرکانسی را ارسال می‌کند که با استفاده از مفهوم جسم سیاه و فرضیات تئوری کوانتوم بدست می‌آید.<sup>[۱۰]</sup>

قانون پلانک برای انتشار بیان می‌دارد که برای پیدا کردن روشنایی (B) جسم سیاه تشعشع کننده در دمای T و فرکانس f داریم.<sup>[۱۱]</sup>

$$B = \frac{2hf^3}{c^2} \frac{1}{e^{hf/kT} - 1} \quad (1)$$

که در آن h ثابت پلانک، k ثابت بولتزمن و c سرعت نور می‌باشد. روشنایی جسم سیاه فقط تابعی از فرکانس و دما است و تابعی از موقعیت و جهت نمی‌باشد. در فرکانس‌های کم، رابطه (۱) به صورت زیر خلاصه می‌شود،

$$B = \frac{2f^2}{c^2} = \frac{2kT}{\lambda^2} \quad (2)$$

رابطه (۲) به نام رابطه تشعشعی رایلی-جینز شناخته می‌شود.<sup>[۵]</sup>

چگالی شار توان که خودبه‌خود توسط اتمسفر ارسال می‌شود،

میلی‌متری می‌شود لذا اثرات انتشاری بسیار قابل توجه خواهد بود.

#### - اثرات پلاریزاسیون متقابله

برای افزایش ظرفیت سیستم‌های مخابراتی معمولاً روش استفاده مجدد از فرکانس و بکار بردن دو پلاریزاسیون عمود برهم، قابل استفاده است. این روش با خاطر تبدیل پلاریزاسیون‌ها به یکدیگر با انتشار در طول مسیر، دارای محدودیت است. فرآیندهای مختلف تبدیل پلاریزاسیون در تروپوسفر حائز اهمیت است. چرخش فارادی صفحه پلاریزاسیون ناشی از یونوسفر، در توصیه‌نامه ITU-R P.531 آورده شده است. در ۱۰GHz چرخش فارادی به اندازه ۱ درجه و در فرکانس‌های پایین‌تر چرخش بیشتر خواهد شد. اگر از یک آنتن یکسان برای ارسال و دریافت سیگنال‌های مخابراتی استفاده شود آنگاه از آنجایی که چرخش صفحه پلاریزاسیون برای لینک رونده و پایین رونده در یک جهت خواهد بود، بنابراین نمی‌توان با چرخاندن سیستم تغذیه آنتن، آن را جبران کرد.

#### - اثرات دیگر

اثراتی که تفاوت ضریب انکسار جو زمین با ضریب انکسار فضای آزاد و همچنین تغییرات آن روی سیگنال دریافتی می‌گذارد، شامل خمش موج و در پی آن تغییر زاویه ارتفاع، تلف ناشی از پهن شدن یک آنتن (تلف کانونی)، تغییر طول مسیر رادیویی و در نهایت سینتیلیشن می‌باشد. خطاهای زاویه ارتفاعی ناشی از شکست و تغییرات کوتاه مدت زاویه ورود در توصیه‌نامه ITU-R P.834 بحث شده است. این تغییرات کوتاه مدت که ناشی از تغییرات ارتفاعی ضریب شکست می‌باشد، برای زاویه ارتفاعی ۱ درجه خواهد بود.<sup>[۶]</sup>

روش‌های رادیومتری برای تخمین متوسط تأخیر انتشاری و خطای برد برای لینک‌های زمین به فضا که از تروپوسفر می‌گذرد در<sup>[۱۲]</sup> قابل دسترس است. واریانس خطای در سیستم‌های دیجیتال ماهواره‌ای جهت تعیین برد ماهواره‌ای و سنکرونیزاسی زی لازم است.

#### - روش‌های اندازه‌گیری پارامترها

برای اندازه‌گیری تأثیر عوامل جوی بر انتشار امواج ماهواره‌ای روال‌های مختلفی وجود دارد. به طور کلی می‌توان گفت سه روش عمده برای این کار وجود دارد.<sup>[۸]</sup>

- اندازه‌گیری با استفاده از روش رادیومتری

- اندازه‌گیری با استفاده از رادار

- اندازه‌گیری با استفاده از سیگنال بیکن ماهواره در ادامه هر کدام از روش‌ها بطور مختصر تشریح خواهد شد.

#### -۴- اندازه‌گیری رادیومتریک

رادیومتر وسیله‌ای برای اندازه‌گیری تغییر در قدرت نویز یا دمای روشنایی یک منبع است. تکنیک اندازه‌گیری برای دهه‌ها در نجوم رادیویی استفاده شده است.<sup>[۹]</sup>

درخشنان ترین ستاره در کهکشان خودمان، از نظر نویز رادیویی در فرکانس‌های مایکروویو، کاسیوپیا A است که با فاصله نزدیک توسعه Taurus A و Cygnus A می‌شود. این نمونه‌ها اساساً منابع نقطه‌ای انرژی رادیویی هستند و به طور گسترده در کالیبراسیون ایستگاه‌های بزرگ زمینی که دارای پهنه‌ای پرتو باریکی هستند، استفاده شده‌اند ماه و خورشید نیز ساطع کننده انرژی رادیویی هستند، به ویژه خورشید، اما آنها منابع نقطه‌ای نیستند و به طور کلی برای کالیبره کردن تجهیزات ایستگاه زمینی

که در آن  $T_{mr}$  دمای میانگین تابشی یا تأثیر جوی و  $T_0$  دمای پس زمینه کیهانی (Cosmic background temperature) (معمولًا ۲,۷ درجه کلوین در نظر گرفته می شود) می باشد.

این رابطه از ارتباطه انتقال تشعشعی با فرض جذب اتمسفری کم در غیاب پراکندگی استخراج شده است. به طور کلی به فرکانس و تضعیف در فرآیندهای فیزیکی که موجب تضعیف می شوند وابسته می باشد. این پارامتر را می توان برای مقادیر تضعیف زیر  $6 \text{ dB}$  در فرکانس های زیر  $50 \text{ GHz}$  با وابستگی کمی به فرکانس تخمین زد. این مقدار می تواند در محدوده فرکانسی  $10\text{--}15 \text{ GHz}$  در حدود  $265 \text{ K}$  و در محدوده فرکانسی  $20\text{--}30 \text{ GHz}$  در حدود  $270 \text{ K}$  تخمین زده شود.

خطاهای اندازه گیری در اندازه گیری رادیومتری غیرفعال عبارتند از: تأثیرات آتن، تأثیرات غیر همنگ بودن محیط، تأثیرات پراکنده کامل بودن محیط و تخمین دمای فیزیکی.

#### ۴-۲-۴ اندازه گیری با استفاده از رادار

روش بعدی برای اندازه گیری میزان تضعیف سیگنال ناشی از پارامترهای جوی استفاده از رادار می باشد. بر خلاف دیگر تکنیک های اندازه گیری، برای اندازه گیری یا استنتاج تضعیف مسیر، روش مبتنی بر رادار می تواند حجم وسیعی از سایت رادار را، به جای بررسی یک مسیر خاص، بررسی نماید. تغییرات در انرژی دریافت شده و اطلاع از محل دقیق منبع انرژی منعکس شده تلفیقی پیچیده از تأثیرات پراکندگی و تضعیف می باشد [۹]. رادار می تواند با ارسال امواج الکترومغناطیسی به سمت هدف مورد نظر (مانند توده بارانی) و اندازه گیری توان برگشتی به رادار و با دانستن توان ارسالی، تضعیف مسیر عبوری سیگنال را محاسبه کند. استفاده از رادار در اندازه گیری تضعیف و دیپلاریزاسیون توده های باران و برف می تواند کارا باشد و در دیگر متابع تضعیف سیگنال ماهواره ای مانند تضعیف ناشی از گازها کاربردی ندارد.

معادله رادار، برد رادار را به مشخصات فرستنده و گیرنده، آتن، هدف و محیط مربوط می سازد. اگر توان فرستنده رادار  $P_T$  و آتن، فرستنده با بهره  $G_T$  باشد، چگالی شار توان (PFD) در فاصله  $r$  از رادار برابر است با توان فرستنده بر مساحت یک کره فرضی به شعاع  $r$  و یا [۹].

$$PFD = \frac{G_T P_T}{4\pi r^2} \quad (6)$$

فرض می کنیم در نقطه ای مانعی با سطح  $S$  وجود دارد که توان ارسالی را قطع می کند و به صورت ایزوتروپیک انرژی دریافت شده را پراکنده می سازد. انرژی برگشتی پراکنده شده و تابش بر روی آتن را ESC می نامیم داریم:

$$E_{SC} = \frac{G_T P_T}{4\pi r^2} \times \frac{S}{4\pi r^2} \quad (7)$$

اگر سطح مؤثر آتن گیرنده  $Ae$  باشد و آتن مشابهی برای گیرنده و فرستنده استفاده شود و بهره آتن  $\lambda^2 / (4\pi A)$  باشد، توان دریافت شده  $P_R$  برابر می شود با [۸].

$$P_R = \frac{CP_T S}{r^4} \quad (8)$$

رابطه بالا به معادله رادار معروف می باشد. بسیاری از پارامترهای معادله رادار ثابت می باشند. که در آن

$$C = \frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^8} \quad (9)$$

توسط آتنی که رو به آسمان است جمع می شود، این چگالی شار توان را به عنوان روشنایی انتسфер می شناسند. هدف رادیومتر اندازه گیری توان می باشد. اگر چه در بیشتر موارد مانند سنجش از راه دور، توان را معادل دما بیان می کنند.

رادیومتر مایکروویو، انرژی الکترومغناطیسی تشعشعی نامدوس (Incoherent) را اندازه گیری می کند. رادیومترهایی که به سوی آسمان جهت دهی شده است انرژی تابشی از گازهای اتمسفر و ذرات آب درون ابر و باران را اندازه گیری می کنند. این انرژی به فرکانس اندازه گیری و مقدار مواد درون انتسфер بستگی دارد. هر رادیومتر مایکروویو شامل یک آتن گیرنده و یک گیرنده رادیومتر می باشد. رادیومتر قسمتی معین از توان در دسترس خروجی آتن را (با پهنهای باند مشخص B) انتخاب می کند. این توان تقویت شده (با بهره G) و به قسمت بعدی می رود، سپس با یک توان سنج ساده با رابطه زیر اندازه گیری می شود [۶].

$$P = k \cdot B \cdot G \cdot T \quad (3)$$

که در آن  $k$  ثابت بولتزمن می باشد. در دسترس بودن متابع رادیویی در بیرون از اتمسفر اجازه می دهد دو نوع اندازه گیری رادیومتریک به نامهای اندازه گیری فعلی و غیر فعلی برای اندازه گیری تضعیف مسیر ارائه شود.

#### - اندازه گیری رادیومتری فعل

در اندازه گیری رادیومتری فعلی، از متابع رادیویی طبیعی بیرون از جو برای اندازه گیری تضعیف درون اتمسفر استفاده می شود. در فرکانس های بالای  $1 \text{ GHz}$  متابع نویز رادیویی خارجی، انرژی کافی را برای اندازه گیری فعلی رادیومتریک ایجاد می کنند. رادیومترهایی که به طور خاص حرکت خورشید را دنبال می کنند، رادیومترهای Sun-tracking نامیده می شوند. یک رادیومتر با پهنهای باند کوچکتر از اندازه زاویه ای خورشید، دمای انتشار Te را اندازه گیری می کند.

$$T_e = T_b \times e^{-A/3.34} \quad (4)$$

که در آن  $T_b$  دمای روشنایی خورشید و  $A$  تضعیف در طول مسیر به دستیاب می باشد. متغیر  $T_e$  مستقیماً با تغییرات A تغییر می کند. مشکل جدی این روش قابلیت به کاربردن تضعیف آماری به دست آماده از روش Sun-tracking به محث انتشار امواج مخابرات ماهواره ای است. از آنجایی که خورشید منبع ثابتی نیست، آمارهای تضعیف برای زوایای ارتفاع (Elevation) و سمت (Azimuth) مختلف بوده و همچنین در شب داده ای وجود نخواهد داشت.

#### - اندازه گیری رادیومتری غیرفعال

در اندازه گیری رادیومتری غیرفعال رادیومترها تنها از دمای منتشر شده از محیط واسطه برای محاسبه تضعیف محیط استفاده می کنند. رادیومترهای غیرفعال مستقل از متابع رادیویی سماوی می باشند. رادیومتر غیرفعال می تواند در هر مکانی روی زمین مستقر شده و رو به هر نقطه ای در فضا جهت دهی شود. تخمین تضعیف اتمسفر در مسیر ماهواره به زمین، برای مکانی معین که اطلاعات هوشنگاسی در آنجا وجود دارد، ضروری می باشد. اندازه گیری رادیومتریک برای به دست آوردن تخمین تضعیف مسیر می تواند به کار برد شود. برای تبدیل اندازه گیری رادیومتریک دمای روشنایی  $T_b$  به تضعیف مسیر A رابطه زیر به کار برد می شود [۱۴].

$$A = 10 \log \frac{(T_{mr} - T_0)}{(T_{mr} - T_b)} \quad (5)$$

برای بدست آوردن تضعیف  $\alpha$  برای مسیر، از انرژی پراکنده شده برگشتی، یا باید توزیع شکل قطرات اندازه‌گیری شود و یا بر اساس پارامترهای آماری فرض شود که در آن  $Z$  را به نرخ بارش ( $R$ ) مرتبط می‌سازد. به طور معمول از رابطه زیر برای ارتباط بین نرخ بارش و بازتاب پذیری استفاده می‌شود.

$$Z = aR^b \quad (15)$$

مقادیر  $a$  و  $b$  مقادیری تجربی می‌باشند.

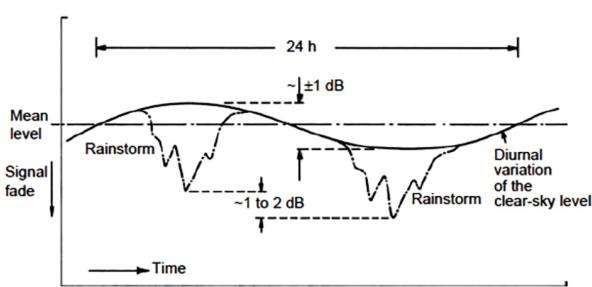
#### ۴-۳-اندازه‌گیری با استفاده از سیگنال بیکن ماهواره

سومین روش اندازه‌گیری پارامترهای انتشار امواج ماهواره‌ای اندازه‌گیری سیگنال بیکن (Beacon) ماهواره است. این روش در حال حاضر مؤثرترین و پر کاربردترین روش اندازه‌گیری پارامترهای انتشار امواج ماهواره‌ای می‌باشد که در دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد. سیگنال بیکن ماهواره‌ای، سیگنالی است مرجع با فرکانس ثابت و توان ثابت، معمولاً مدوله شده نمی‌باشد و توسط ماهواره ارسال می‌شود.

سیگنال بیکن ماهواره به طور معمول با یک منبع کریستال فوق العاده ثابت ایجاد می‌شود که نویز فاز و اینترمودولاسیون کمی دارد [۹]. این بدان معنی است که بیشتر انرژی در یک پهنه‌ای باند باریک در فرکانس مرکزی مورد نظر وجود دارد. از آنچایی که تمامی انرژی سیگنال در نزدیکی فرکانس حامل می‌باشد، گیرنده سیگنال بیکن بر روی زمین با پهنه‌ای باند باریکی ساخته می‌شود. بنابراین نویز در گیرنده که با پهنه‌ای باند متناسب است، بسیار کم می‌شود [۱۶]. در گیرنده سیگنال بیکن به دلیل اینکه سیگنال دریافتی توان بسیار کمی دارد، پهنه‌ای باند بخش IF باید کم باشد. این کار برای دست‌یابی به رنج دینامیکی زیاد می‌باشد [۱۷].

با مشخص بودن تمامی مشخصات سیگنال ارسالی از ماهواره و با دریافت و تحلیل این سیگنال با استفاده از گیرنده‌های اندازه‌گیر این سیگنال در ایستگاه زمینی، می‌توان پارامترهای انتشار امواج ماهواره‌ای در شرایط مختلف جوی را بررسی نمود. در شکل (۲) تغییرات سطح سیگنال بیکن اندازه‌گیری شده در یک نمونه اندازه‌گیری در طول باران نشان داده است. تفاوت بین سطح سیگنال در هوای صاف و اتفاق مورد نظر (مثلاً باران)، تضعیف در اتفاق مورد نظر را میدهد.

خطاهای بالقوه در اندازه‌گیری سیگنال بیکن ماهواره عبارتند از: خطاهای ناشی از ماهواره (خطای موقعیت و خطای ناشی از مشخصات ترنسپوندر) و خطاهای ناشی از ایستگاه زمینی (تأثیرات میدان نزدیک و خطاهای از دست دادن قفل حلقه).



شکل ۵: تغییرات روزانه سطح سیگنال بیکن و خطای ناشی از آن [۹].

C به عنوان ثابت رادار شناخته می‌شود. معادله رادار فرض می‌کند که کل انرژی برخورده به سطح S پراکنده می‌شود. در بیشتر موارد جذب انرژی توسط مانع، مخصوصاً برای ذرات باران، صورت می‌گیرد که در آن، محدوده‌ای برای اندازه قطرات وجود دارد که به فاکتور برگشتی مشخصی منجر می‌شود. انرژی برگشتی در مسیر ارسال آنتن تابعی از اندازه مانع است که پرتو رادار راقطع می‌کند. سطح مقطع راداری یک هدف عبارت است از [۱۴].

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \left| \frac{E_r}{E_i} \right|^2 \quad (10)$$

که در آن  $R$  فاصله بین هدف و رادار،  $E_r$  شدت میدان برگشتی از هدف روی رادار و  $E_i$  شدت میدان تابش به هدف می‌باشد. تئوری پراکنده‌ی مایکروویو توسط باران و یا ابر با استفاده از فرض غیر همدوسی پراکنده‌ی حجمی می‌باشد. میانگین توان پراکنده شده سیگنال در این حالت متناسب با سطح مقطع پراکنده‌ی مؤثر در واحد حجم می‌باشد. داریم،

$$\eta = \int_0^\infty \sigma(\lambda, D) N(D) dD \quad (11)$$

که  $N(D)$  توزیع قطرات با قطر  $D$  تا  $D+dD$  می‌باشد. برای یک قطره کروی باران با قطر  $(mm)$   $D$  که در برابر طول موج سیگنال رادار کوچک می‌باشد، سطح مقطع پراکنده‌ی صورت زیر بیان می‌شود [۱۵].

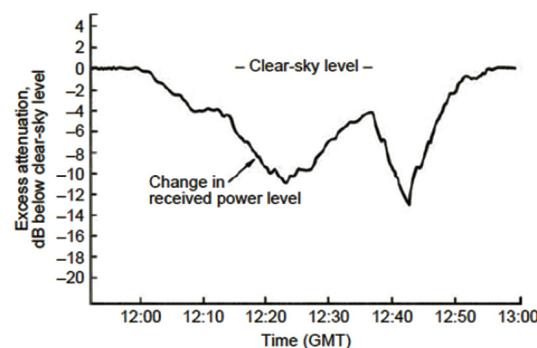
$$\sigma = \frac{\pi^5 |k|^2}{\lambda^4} \times 10^{-18} D^6 (m^2) \quad (12)$$

که در آن  $k = (n^2 - 1)(n^2 + 1)$  ضریب شکست مختلف می‌باشد. مقدار  $|k|^2$  برای قطرات آب در حدود  $0, 93$  و برای ذرات یخ  $20$  می‌باشد. این تفاوت زیاد برای ذرات مایع و جامد آب بسیار مهم می‌باشد. برای مجموعه‌ای از قطرات با توزیع اندازه  $N(D)$ ، سطح مقطع پراکنده‌ی برای هر واحد حجم  $\eta$  به صورت زیر می‌شود [۱۵].

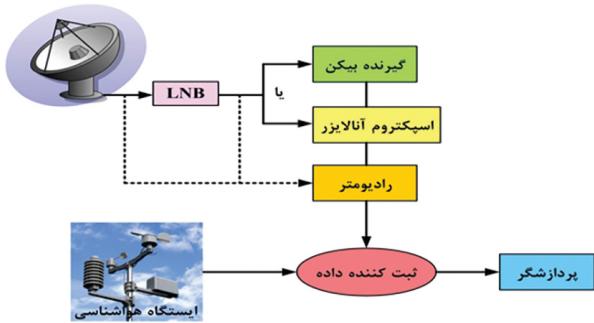
$$\eta = \frac{\pi^5 |k|^2}{\lambda^4} \times 10^{-18} \int_0^{D_{max}} N(D) D^6 dD \quad (13)$$

در رابطه (۱۳) بخش انتگرالی  $\int_0^{D_{max}} N(D) D^6 dD$  فقط به توزیع شکل قطرات در حجمی که توسط رادار تابیده شده بستگی دارد. فاکتور  $Z$ ، فاکتور بازتاب پذیری (Reflectivity) (Namideh می‌شود،

$$Z = \int_0^{D_{max}} N(D) D^6 dD \quad (14)$$



شکل ۶: تغییرات سطح سیگنال بیکن دریافتی در یک ساعت اندازه‌گیری [۹].



شکل ۶: چیدمان پیشنهادی اندازه‌گیری پارامترهای سیگنال و هواشناسی برای بررسی عوامل مؤثر در انتشار امواج ماهواره ای [۸].

می شود تا تأثیرات پارامترهای هوشمناسی بر سیگنال ماهواره مشخص و الگوی مناسب انتشار امواج ماهواره‌ای استخراج گردد.

#### ۶- روش اندازه‌گیری پیشنهادی و پیاده‌سازی شده

با در نظر گرفتن ستاریوی پیشنهادی شکل (۶)، چیدمان ارائه شده در شکل (۷) در پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات پیاده‌سازی شده است. برای اندازه‌گیری سیگنال بیکن، تجهیزات VSAT در پژوهشگاه نصب شد. چیدمان نصب شده در واقع بعثتوان یک گره از شبکه VSAT می‌باشد که با اضافه شدن یک تحلیلگر طیف برای اندازه‌گیری در این پروژه مورد استفاده قرار می‌گیرد. این چیدمان برای اندازه‌گیری در باند KU می‌باشد. تجهیزات استفاده شده در اندازه‌گیری به صورت زیر می‌باشد:

- انتن (٨/١ متری)
  - تغذیه انتن (انتن شیپوری)
  - TRF
  - OMT (Transducer Mode Orthogonal)
  - BUC (Convertor Up Block)
  - LNB (Block Noise Low)
  - VSAT (Antenna Aperture Small Very مودم)
  - تحلیلگ طف

شکل (۷) نحوه اتصال و چیدمان تجهیزات اندازه‌گیری پارامترهای انتشار امواج ماهواره‌ای را نشان می‌دهد. از این چیدمان به دو صورت می‌توان برای اندازه‌گیری اثرات انتشار امواج ماهواره‌ای استفاده کرد:

در روش نخست با دانستن فرکانس سیگنال بیکن ماهواره مورد نظر، اندازه‌گیری دامنه این سیگنال در شرایط مختلف جوی صورت می‌گیرد. در این روش دیگر نیازی به TRF و OMT نیست و می‌توان این تجهیزات را حذف نمود.

در روش دوم به جای استفاده از سیگنال بیکن ماهواره، یک سیگنال خام به صورت موج پیوسته (CW) از مبدأ ارسال می‌شود. در این حالت ماهواره به صورت یک رله مخابراتی عمل کرده و سیگنال ارسالی را پس از تقویت به سمت زمین ارسال می‌نماید. از این روش می‌توان در اندازه‌گیری نسبی دامنه سیگنال بهره جست. هر چند به دلیل فرکانس ارسال و دریافت متفاوت سیگنال و طی کردن دو مسیر رفت و برگشت در جو، نیازمند دقیق عمل بیشتری در تجزیه و تحلیل داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشد.

باید توجه نمود ماهواره سیگنال ارسالی از سمت آنتن را به

تأثیر نشان داده شده در شکل (۴) تغییرات روزانه یک مسپر ماهواره‌ای می‌باشد. ریدابی دقیق، تغییرات را به طور کامل حذف نمی‌کند و در نتیجه اندازه‌گیری همراه با رادیومتر توصیه می‌شود، زیرا مستقل از سطح میانگین می‌باشد و از تغییرات سیگنال بیکن ماهواره تأثیر نمی‌پذیرد. در اندازه‌گیری سیگنال بیکن، همراه با رادیومتری، سطح مرجع سیگنال در هوای صاف با استفاده از رادیومتر بدست می‌آید.

از دیگر موارد استفاده از سیگنال بیکن، در اندازه‌گیری سینتیلیشن (scintillation) است. سینتیلیشن، ناشی از ناپیوستگی ضربی شکست در اتمسفر می‌باشد که باعث محوشدنی و افزایش تصادفی دامنه سیگنال دریافتی می‌شود. قبل از استفاده از سیگنال بیکن خام اندازه‌گیری شده برای تحقیقات سینتیلیشن، تأثیرات دیگر فاکتورهای انتشاری از این سیگنال خام می‌باشد خارج شود [۱۸]. می‌توان با عبور سیگنال خام بیکن از یک فیلتر بالاگذر با فرکانس قطع مناسب تغییرات ناشی از سینتیلیشن را جدا نمود (تغییرات سیگنال ناشی از دیگر عوامل جوی در نزخ کمتری نسبت به سینتیلیشن انجام می‌پذیرد). اگر مقدار  $f_C$  (فرکانس قطع بالای فیلتر) کم انتخاب شود موجب تأخیر ناخواسته دیگر تغییرات سیگنال در بررسی سینتیلیشن می‌شود. اگر  $f_C$  مقدار زیادی داشته باشد، سهم سینتیلیشن در مؤلفه‌های فوریه کمتر از مقدار  $f_C$  در نظر گرفته نمی‌شود [۱۹].

موردنیاز استفاده از سیگنال بیکن در اندازه‌گیری دیپلازیاسیون ناشی از باران و برف در جو است. اگر تضعیف تفاضلی و فاز تفاضلی که توسط محیط انتشار موج ایجاد شده قابل اندازه‌گیری باشد، تمایز پلاریزاسیون متقاطع یا XPD از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد [۳].

$$XPD = 20 \log \left| \frac{E_{co}}{E_{cross}} \right| \quad (18)$$

می‌توان گفت کامل‌ترین در عین حال کم‌هزینه‌ترین روش اندازه‌گیری دیپلاریزاسیون استفاده از OMT به همراه دو گیرنده سیگنال بیکن می‌باشد.

## ۵- تجهیزات هواشناسی مورد نیاز

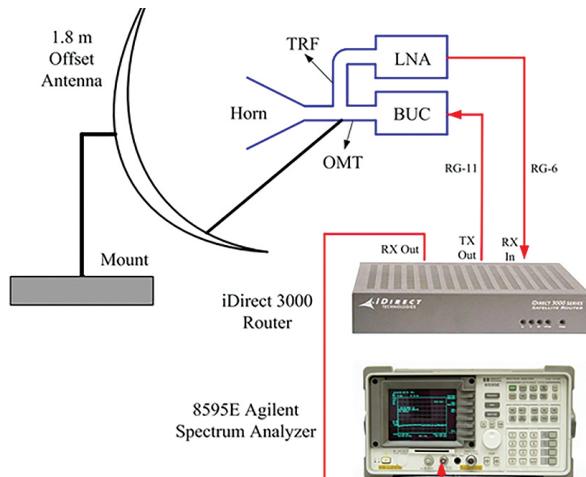
بررسی پدیده‌های انتشار امواج ماهواره‌ای در باندهای Ku و Ka نیازمند دانستن اطلاعات دقیق هوشناسی به طور همزمان است. بدون دانستن شرایط جوی در مسیر سیگال ماهواره‌ای، بررسی مدل‌های موجود و اصلاح و استخراج مدل‌های جدید انتشار امواج ماهواره‌ای امکان‌پذیر نیست. تجهیزات هوشناسی مورد نیاز عبارتند از:

- داماسنج، رطوبت‌سنج و فشارسنج (در سطح و سطوح فوقانی جو)
  - باران‌سنج (برف‌سنج، دیسدرومتر و ...)
  - دستگاه اندازه‌گیری کننده میدان دید
  - ادا، هواشناسی، ...

در شکل (۶) چیدمان پیشنهادی اندازه‌گیری هم‌زمان سطحی سیگنال بیکن ماهواره و پارامترهای هواشناسی مورد نیاز نشان داده شده است. برای اندازه‌گیری سطح سیگنال بیکن، هم از گیرنده سیگنال و هم از تحلیلگر طیف می‌توان استفاده نمود. برای دققت بیشتر و حذف خطای اندازه‌گیری سیگنال بیکن می‌توان از رادیومتر نیز در اندازه‌گیری بهره برد. اطلاعات جمع‌آوری شده از اندازه‌گیری سیگنال و پارامترهای هواشناسی به پردازشگر داده



شکل ۹: چیدمان اندازه‌گیری سیگنال و پارامترهای هواشناسی پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات [۸].

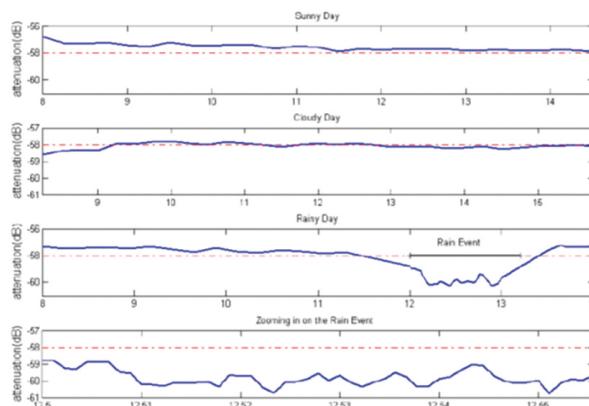


شکل ۷: چیدمان اندازه‌گیری تضعیف سیگنال ماهواره‌ای در پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات [۸].

- دماسنجد، رطوبت‌سنج و فشارسنج (در سطح و سطوح فوقانی جو)
- باران‌سنج (برفسنج، دیسدرومتر و ...)
- دستگاه اندازه‌گیری کننده میزان دید
- رادار هواشناسی و ...

ایستگاه هواشناسی خودکار نصب شده در پژوهشگاه شامل سنسورهای رطوبت، فشار و دما در سطح، باران‌سنج و دستگاه ثبت و ارسال داده‌های هواشناسی می‌باشد. با استفاده از روابط موجود در ITU-R P.618 می‌توان دما، رطوبت و فشار در سطح زمین را با تقریب مناسبی به دما، رطوبت و فشار در تروپوسفر تبدیل نمود. در شکل (۹) تجهیزات اندازه‌گیری سیگنال و پارامترهای هواشناسی که در پژوهشگاه نصب شده‌اند، نشان داده شده است.

از این چیدمان برای اندازه‌گیری سیگنال بین ماهواره IS-15 در شرایط آب و هوایی مختلف استفاده می‌شود. همچنین در شکل (۱۰) یک نمونه نتایج اندازه‌گیری سطح سیگنال بین در سه روز آفتابی، ابری و بارانی با استفاده از چیدمان پیشنهادی نشان داده شده است. در همین راستا اندازه‌گیری‌ها در قالب یک نرم‌افزار شکل (۱۱) انجام شده است که متناسب با هر نوع تضعیف سیگنال، اندازه‌گیری نمایش داده می‌شود.



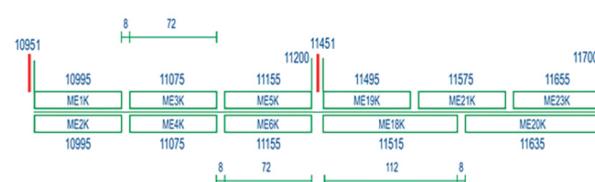
شکل ۱۰: نتایج اندازه‌گیری عملی سیگنال ماهواره در سه روز آفتابی، ابری و بارانی [۸].

صورت خطی تقویت و به سمت زمین ارسال می‌نماید. در صورت بالا بودن توان ارسالی احتمال غیر خطی عمل کردن تقویت توسط ماهواره وجود دارد. برای ارسال سیگنال بدون حامل از امکانات مودم VSAT می‌توان استفاده نمود.

روش دوم در مواقعی که امکان دریافت سیگنال بین وجود نداشته باشد و یا دریافت سیگنال در فرکانسی خاص مدنظر باشد، می‌تواند به کار برده شود. در غیر این صورت به دلیل فرکانس ارسال و دریافت متفاوت در دو مسیر رفت و برگشت، استفاده از این روش با خطا و ملاحظات بیشتری همراه می‌باشد که برای اندازه‌گیری سیگنال توصیه نمی‌شود.

با توجه به روش پیشنهادی، برای اندازه‌گیری سیگنال بین از ماهواره IS-15 (IS-15 INTELSAT 15) واقع در مدار ۸۵/۱۵ درجه شرقی استفاده شده است. این ماهواره برای سرویس داده و تصویر در باند Ku در نواحی خاورمیانه، اقیانوس هند و روسیه توسط شرکت Intelsat ساخته شده است. این ماهواره از انواع ماهواره‌های سه محوره بوده و شامل دو بازتابدهنده ۲/۳ متری و یک بازتابدهنده ۱/۴ متری می‌باشد. این ماهواره در سال ۲۰۰۹ میلادی از ایستگاه بایکونور قراقشستان به مدار ثابت زمینی ارسال شده است. ماهواره IS-15 دارای دو سیگنال بین در باند دو فرکانس ۱۰/۹۵۱ GHz و ۱۱/۴۵۱ GHz می‌باشد. در شکل ۸ پلن فرکانسی ترانسپوندر ماهواره IS-15 در مسیر downlink به همراه دو سیگنال بین این ماهواره نشان داده شده است.

برای استخراج الگوی انتشار امواج ماهواره‌ای، در کنار تجهیزات دریافت سیگنال نیاز به تجهیزات هواشناسی نیز است. تجهیزات هواشناسی مورد نیاز عبارتند از:



شکل ۸: پلن فرکانسی ترانسپوندر ماهواره IS-15 در مسیر downlink [۸].

فناوری اطلاعات انجام شده است.

## مراجع

- [1] Available at: <https://www.weforum.org/agenda/2020/04/coronavirus-covid-19-pandemic-digital-divide-internet-data-broadband-mobmble/>
- [2] <https://www.graphicnews.com/en/pages/40637/space-spacexs-starlink-enters-beta-phase>
- [3] <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/o/oneweb>
- [4] del Portillo, Inigo, Bruce G. Cameron, and Edward F. Crawley. "A technical comparison of three low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband." *Acta Astronautica*, 2019, pp. 123-135.
- [5] "Musk said that Starship Starship will take over Starlink and replace the role of Falcon 9" Minnews, 2021, URL: <https://www.spacex.com/>
- [6] [https://www.teslarati.com/spacex-custom-built-starlink-satellite-antenna-patent-grant/phased\\_array\\_radiation\\_pattern/](https://www.teslarati.com/spacex-custom-built-starlink-satellite-antenna-patent-grant/phased_array_radiation_pattern/)
- [7] رضا بحری و تیم تحقیقاتی پروژه، "بررسی عوامل موثر بر انتشار امواج ماهواره‌ای .. پژوهشگاه ارتباطات و فناوری ارتباطات، پژوهشکده فناوری ارتباطات، گروه رادیو، ۱۳۹۱."
- [8] رضا بحری و تیم تحقیقاتی پروژه، "بررسی روش‌ها و تجهیزات اندازه‌گیری پارامترهای تصنیف سیگنال و هواشناسی ...، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، پژوهشکده فناوری ارتباطات، گروه رادیو، ۱۳۹۱."
- [9] Allnutt, J. E., Satellite-to-ground radiowave propagation, IEE Electromagnetic Waves Series 29, Peter Peregrinus Ltd., 1989.
- [10] Recomandation and Reports for CCIR, XVIth Plenary Assembly, 1986, Vol. V; Report 702-1: Radio emission from natural sources in the frequency range above about 50 MHz.
- [11] Chukhlantsev, A. A., Microwave Radiometry of Vegetation Canopies, Springer-Verlag New York Inc., 2006.
- [12] Skou, N., and D. L. Vine, Microwave Radiometer Systems; Design and Analysis, 2ed Edition, Artech House, 2006.
- [13] Recommendation ITU-R P.1322, "Radiometric estimation of atmospheric attenuation," 1997.
- [14] Skolnik, M. I., Introduction to Radar Systems, McGraw-Hill (International Editions: Electrical Engineering Series), 3rd Edition, 2001.
- [15] Hall, M. P. M., Effects of troposphere on radio communications, PeterPerigrinus, 1979.
- [16] Gardner, F. M., Phaselock Techniques, John Willey & Sons, 1966.
- [17] Allnutt, J. E., and J. E. Goodyer, "Design of receiving stations for satellite to ground propagation research at frequency above 10 GHz," IEE J. Microwaves, Optic & acoustics, Vol. 1, 1977, pp.157-164.
- [18] Howel, R. G., Harris, J. W., and Mehler, M., "Satellite copular measurements at BT laboratories," By Tech. J., Oct. 1992, 10, pp.34-51
- [19] Otung, I. E., M. O. Al-Nuaimi, and B.G Evans, "Extracting Scintillations from Satellite BeaconPropagation Data," IEEE Trans. Antenna Propagat. Vol.46, 1998, pp. 1580-1581.
- [20] <https://spacenews.com/spacex-submits-paperwork-for-30000-more-starlink-satellites/>

\*\*\*



شکل ۱۱: نرم افزار بومی سازی پارامترهای انتشار امواج ماهواره‌ای [۸]

## ۷- نتیجه‌گیری

با توجه به پیشرفتهای اخیر در زمینه ارتباطات ماهواره‌ای و عملیاتی شدن ابرمنظومه‌ها به صورت منطقه‌ای و در آینده نزدیک جهانی، موضوع بومی سازی پارامترهای انتشار امواج ماهواره‌ای در باندهای فرکانسی Ku و Ka برای برقراری یک ارتباط پایدار و مطمئن از اهمیت روز افزونی نسبت به گذشته برخوردار خواهد بود. در این مقاله ضمن معرفی اجمالی ابرمنظومه‌های ماهواره‌ای و تاریخچه مختصر آن، به موضوع پدیده‌های جوی تاثیرگذار در انتشار امواج پرداخته شد. برای موضوع اندازه‌گیری سیگنال، روش‌های اندازه‌گیری رادیومتری، راداری و سیگنال بیکن شناسایی و معرفی شدند. امروزه استفاده از رادار برای اندازه‌گیری میزان تعییف ناشی از پدیده‌های جوی، به علت عدم دقت کاربرد زیادی نداشته و از رادار فقط برای اندازه‌گیری تاثیرات توده‌های بارانی استفاده می‌شود. استفاده از رادیومتر امروزه کمتر شده و بیشتر در اندازه‌گیری تعییف ناشی از گازها و میزان تأخیر سیگنال عبوری از تروپوسفر استفاده می‌شود. امروزه از رادیومتر به عنوان سیگنال مرجع در هوای صاف و در کنار گیرنده سیگنال بیکن ماهواره استفاده می‌شود. بر اساس بررسی‌ها و مطالعات انجام شده، استفاده از اندازه‌گیری سیگنال بیکن ماهواره در اولویت می‌باشد. با داشتن مشخصات دقیق سیگنال بیکن ارسالی از ماهواره می‌توان از این روش برای اندازه‌گیری تغییرات سیگنال ماهواره‌ای در شرایط مختلف جوی را استفاده نمود. ضمن معرفی چیدمان پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات برای بومی سازی پارامترهای انتشار امواج ماهواره‌ای، چیدمان پیشنهادی برای اندازه‌گیری سیگنال بیکن ماهواره به همراه سامانه اندازه‌گیری پارامترهای هواشناسی معرفی شد. در انتهای نیز نمونه اندازه‌گیری برای سه روز آفتابی، ابری و بارانی ارائه شد. نمایی از نرم افزار اندازه‌گیری پارامترهای انتشار امواج ماهواره‌ای نشان داده شد.

## سپاسکزاری

این پژوهه تحت حمایت‌های مادی و معنوی پژوهشگاه ارتباطات و