مقاله علمی-ترویجی

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

رضا بحری*، عضو هیات علمی پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، reza.bahri@itrc.ac.ir

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

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

*نویسنده مسئول

چکیده

ابرمنظومه‌های مخابراتی آخرین دستاورد 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 بسترهای 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 مختصر ویژگی‌های کلیدی ابرمنظومه‌های ماهواره‌ای و همچنین بررسی دقیق‌تر یک نمونه از این نوع فناوری فضایی جدید، موضوع پدیده‌های جوی تاثیرگذار در انتشار امواج ماهواره‌ای در فرکانس های *Ku* و *Ka* 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

[Downloaded from kiaeee.ir on 2025-11-22]

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

۱-مقدمه

ابر منظومه‌های مخابراتی آخرین دستاورد 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 رقابت با سایر بسترهای ارتباطی زمینی را فراهم می‌نماید. از طرفی از جمله الزامات مهم در برقراری 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، باران، 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 خطاها و مشکلاتی مانند تضعیف، تغییر پلاریزاسیون، محوشدگی، 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. ابرمنظومه‌های ماهواره‌ای و مشخصات و ویژگی‌های کلیدی آنها مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به پیشتازی ابر منظومه استارلینک از شرکت Space X، در بخش بعدی فعالیت‌های این شرکت مورد بررسی قرار گرفته است. پدیده‌های تاثیرگذار بر انتشار امواج رادیویی در لینک ماهواره نظیر 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 محوشدگی 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 شده اند. با توجه به راه‌اندازی 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.

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 خواهند داشت. ابرمنظومه‌های ماهواره‌ای در مدار پایین قادر خواهند 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، گلوبال‌استار، ایریدیوم، O3B، منظومه اُرب‌کام، سَت‌کام، ویاسَت و ثریا می‌باشند. این هشت منظومه پیش از رقابت گسترده ابرمنظومه‌ها 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 گلوبال‌استار اقدام به برنامه‌ریزی گسترده برای ارائه خدمات مخابراتی نظیر ارتباطات صوتی از منظومه‌ای با بیش از ۱۰۰ ماهواره نمودند، ولی این طرح‌ها پس از چندین پرتاب 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 درآمدهای احتمالی منظومه‌ها خواهد بود. در نهایت این دو شرکت با حفظ

[Downloaded from kiaeee.ir on 2025-11-22]

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 ارب‌کام 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، سَت‌کام و ویاسَت نیز هر کدام با سه یا چهار ماهواره در مدار GEO حضور دارند و عمدتا خدمات صوت یا ارتباطات ماشین به ماشین(M2M) را برقرار می‌نمایند. باتوجه به تاخیر 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 تاخیر کم را فراهم می‌نماید. با طرح این ایده توسط شرکت وان‌وِب، شرکت‌های دیگری نظیر Space 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 ۶۰۰ ، ماهواره استارلینک Space 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 Space 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 مگابیتی برای کاربران فراهم خواهد شد. منظومه استارلینک Space X در بعضی مراجع ادعای دسترسی به سرعت ۱ گیگابیت بر ثانیه را برای کاربران اعلام نموده است.

۲-۱- منظومه استارلینک

پروژه استارلینک با هدف ایجاد پهنای باند کافی برای پشتیبانی از ۵۰٪ ترافیک بکهال و ۱۰٪ ترافیک اینترنت در مناطق پرجمعیت دنبال 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 ۳۰۰۰۰ 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 عملا تبدیل به یک ابرمنظومه خواهد شد[۲۰].

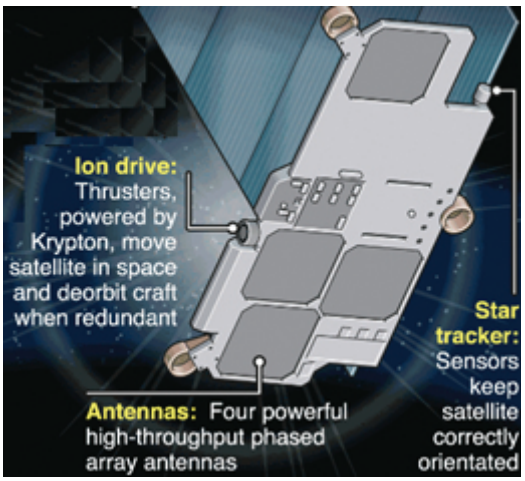
۱۲۰۰۰ ماهواره ابتدایی در دو ارتفاع حدود ۳۰۰ کیلومتر و ۵۰۰ کیلومتر قرار می‌گیرد. نزدیک به ۴۵۰۰ ماهواره در ارتفاع ۵۰۰ کیلومتری، و حدود ۷۵۰۰ ماهواره در ارتفاع ۳۰۰ کیلومتری در باند Ku و Ka قرار می‌گیرند.

نوع ماهواره‌های منظومه استارلینک از کلاس ماهواره‌های کوچک بین ۱۰۰ تا ۵۰۰ کیلوگرم می‌باشند. ماهواره‌های این منظومه در پرتاب‌های مختلف، دقیقا 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 Xماهواره‌ها دارای لینک اپتیکی، آنتن‌های آرایه فازی و تکنولوژی پردازش در باند Ku وKa 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 قرار 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 کاملا تخت هستند. این ساختارهای تخت هرکدام 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 به‌عنوان 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 (دروازه) و آنتن کاربر نهایی هر دو از نوع آنتن‌های آرایه فازی می‌باشند. هر آنتن چه برای کاربر و چه برای ایستگاه زمینی (دروازه) برای ارسال و دریافت استفاده می‌شود. تعداد دروازه‌های زمینی Space X در حدود ۱۲۰ دروازه در سراسر کره زمین خواهد بود. همان‌طورکه 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 (دروازه) 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 جابه‌جایی 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 بالا بردن نرخ داده برای جابه‌جایی 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].

[Downloaded from kiaeee.ir on 2025-11-22]

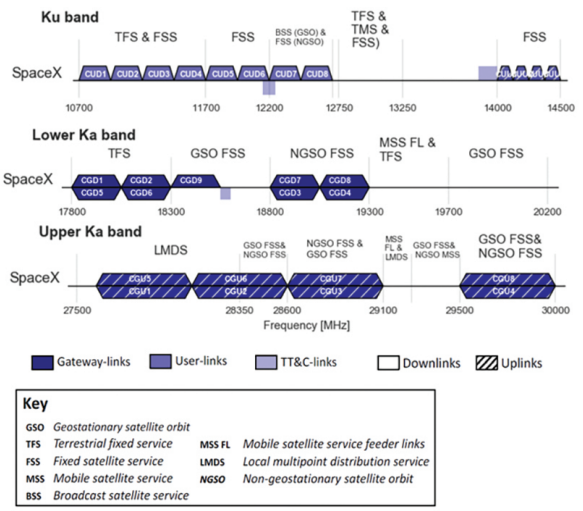


شکل ۱: شمایی از ماهواره استارلینک[۲].

بر اساس اطلاعات موجود از شرکت Space X، فرکانس‌های کاربران در محدوده باند Ku و دارای هم‌پوشانی با باندهای FSS است. همچنین فرکانس‌های ایستگاه‌های زمینی در دو بخش از باند Ka قرار دارد. شرح کامل فرکانس‌های Space X در جدول (۲) نشان داده شده است. کل پهنای باند و تفکیک کانال‌ها در باند فرکانسی در شکل (۲) آورده شده است[۵]. در جدول (۴) بودجه لینک برای ارتباط ماهواره‌های استارلینک با ایستگاه‌های زمینی و کاربران آورده شده است. پارامترهای ستاره‌دار در جدول بر اساس اطلاعات ثبت شده Space X در FCC، کمیسیون ارتباطات فدرال آمریکا تعیین شده‌اند. سایر پارامترها بر اساس ارزیابی‌های موجود در مرجع [۴] تعیین شده‌اند.

آنتن کاربر زمینی Space X یک آنتن بازتابی به منظور تنظیم خودکار زاویه به سمت مورد نظر در آسمان می‌باشند و به نظر می‌رسد، سامانه زمینی دارای هدایت همزمان الکتریکی و مکانیکی است. در حالی که منظومه ماهواره‌های استارلینک Space X به اندازه نهایی پیش‌بینی‌شده‌اش نزدیک نیست، اما این شرکت به اندازه‌ای کافی ماهواره در مدار پایین زمین دارد که بخواهد سرویس خود را به صورت آزمایشی محدود با نام «بتا بهتر از هیچی» راه‌اندازی نماید[۷].

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



شکل ۲: فرکانس‌های مورد استفاده در منظومه استارلینک [۴].

جدول ۱: نحوه برقراری ارتباط در منظومه استارلینک[۴].

	Downlink/Gateway	Downlink/User
تعداد پرتو	9	8
قابلیت چرخش	بله	بله
قابلیت شکل‌دهی	خیر	بله
پوشش هر پرتو	780km2	2800 km2
پهنای باند	250 MHz	250 MHz
EIRP	39.44 dBW	36.7 dBW
پلاریزاسیون	R/LHCP	RHCP

جدول ۲: خلاصه کانال‌های مورد استفاده در منظومه استارلینک [۴].

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

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

پارامتر	Gateway	User
فرکانس*	28.5 GHz	13.5 GHz
پهنای باند*	500 MHz (uplink)	250 MHz (downlink)
قطر آنتن فرستنده ایستگاه زمینی*	3.5 Meter	
بهره آنتن گیرنده ایستگاهی زمینی*	40.9 dBi	37.7 dBi
نوع مدولاسیون	256 APSK	16 APSK
EIRP	68.4 dBW	36.7 dBW
فاصله مسیر	1684 Km	1684 Km
زاویه ارتفاع*	40^0	40^0
تضعیف فضای آزاد[۱۰]	186.4 dB	179.6 dB
تلفات اتمسفر	2.9 dB	0.53 dB
نرخ داده	2682.1 Mbps	674.3 Mbps

می‌شود. 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 می‌پذیرد. اکثر کاربران فعلی رضایت بسیار بالایی از سامانه داشته‌اند و سرعت

[Downloaded from kiaeee.ir on 2025-11-22]

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 منظومه است. هزینه اشتراک ماهانه سرویس ۹۹ دلار و هزینه تجهیزات ۴۹۹ دلار می‌باشد. البته برخی تخمین‌ها نشان می‌دهد، هزینه‌های Space X برای منظومه به مراتب بالاتر از هزینه اشتراک ماهیانه بوده است و احتمالا قیمت اعلام شده برای سرعت‌های پایین و کاربران اولیه در نظر گرفته شده است.

۳- پدیده‌های جوی تاثیرگذار بر انتشار امواج ماهواره ای

بررسی پدیده‌های تأثیرگذار 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 تروپسفر و بعضی از مدل‌های پیش‌بینی تضعیف ناشی از این پدیده‌ها بررسی می‌شوند.

۳-۱- اثرات تروپسفر و مدل‌های پیش بینی 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. به‌عنوان نمونه در زوایای بالای ۱۰ درجه تنها تضعیف گازها، تضعیف باران و ابر و احتمالاً سینتیلیشن قابل توجه خواهد بود. در ادامه هر کدام از عوامل مذکور مورد بررسی اجمالی قرار خواهند گرفت.

- تضعیف گازهای اتمسفری و مدل پیش‌بینی ITU

تضعیف توسط گازهای اتمسفری که تماماً بوسیله جذب رخ می‌دهد تابع فرکانس، زاویه ارتفاعی، ارتفاع از سطح دریا و چگالی بخار آب (رطوبت مطلق) می‌باشند. در فرکانس‌های پایین‌تر از 10GHzتضعیف 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. به‌عنوان 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 انتگرال‌گیری بر روی مقادیر تضعیف ویژه این لایه‌ها از سطح زمین تا یک ارتفاع اوج، تضعیف 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 مقادیر دما، فشار و بخار آب در ارتفاعات مختلف جو را با استفاده از مقادیر متناظر این پارامترها روی سطح زمین به صورت تقریبی به دست می‌دهد.

- تضعیف توسط باران و دیگر نزولات جوی و ابرها

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

- اثرات هوای صاف

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

- سینتیلیشن و محو شدگی چند مسیره

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

- تضعیف 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

[Downloaded from kiaeee.ir on 2025-11-22]

میلی‌متری می‌شود لذا اثرات انتشاری بسیار قابل توجه خواهد بود.

- اثرات پلاریزاسیون متقابل

برای افزایش ظرفیت سیستم‌های مخابراتی معمولاً روش استفاده مجدد از فرکانس و بکار بردن دو پلاریزاسیون عمود برهم، قابل استفاده است. این روش بخاطر 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. 11 آورده شده است. در 10GHz 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 بالا 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 پهن‌شدگی بیم آنتن (تلف کانونی)، تغییر طول موثر 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 می باشد، برای زاویه ارتفاعی ۱ درجه خواهد بود. [۶].

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

۴- 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[۸].

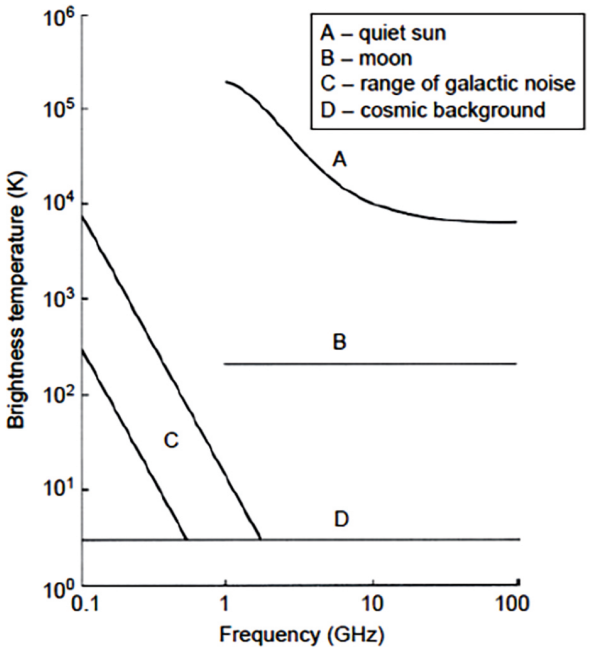
- اندازه‌گیری با استفاده از روش رادیومتری
- اندازه‌گیری با استفاده از رادار
- اندازه‌گیری با استفاده از سیگنال بیکن ماهواره

در ادامه هر کدام از روش‌ها بطور مختصر تشریح خواهد شد.

۴-۱- اندازه‌گیری رادیومتریک

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

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



شکل ۳: منابع نویز فرازمینی[۹].

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. [۹].

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

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[۱۰].

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

$$B = \frac{2hf^3}{c^2}\frac{1}{e^{hf/kT}-1} \qquad (۱)$$

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،

$$B = \frac{2f^2}{c^2} = \frac{2kT}{\lambda^2} \qquad (۲)$$

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

چگالی شار توان که خودبه‌خود توسط اتمسفر ارسال می‌شود،

[Downloaded from kiaeee.ir on 2025-11-22]

توسط آنتنی که رو به آسمان است جمع می‌شود، این چگالی شار توان را به‌عنوان روشنایی اتمسفر می‌شناسند. هدف رادیومتر اندازه‌گیری توان می‌باشد. اگر چه در بیشتر موارد مانند سنجش از راه دور، توان را معادل دما بیان می‌کنند.
رادیومتر مایکروویو، انرژی الکترومغناطیسی تشعشعی ناهمدوس (Incoherent) را اندازه‌گیری می‌کند. رادیومترهایی که به سوی آسمان جهت‌دهی شده است انرژی تابشی از گازهای اتمسفر و ذرات آب درون ابر و باران را اندازه‌گیری می‌کنند. این انرژی به فرکانس اندازه‌گیری و مقدار مواد درون اتمسفر بستگی دارد. هر رادیومتر مایکروویو شامل یک آنتن گیرنده و یک گیرنده رادیومتر می‌باشد. رادیومتر قسمتی معین از توان در دسترس خروجی آنتن را (با پهنای باند مشخص B) انتخاب می‌کند. این توان تقویت شده (با بهره G) و به قسمت بعدی می‌رود، سپس با یک توان‌سنج ساده با رابطه زیر اندازه گیری می‌شود [۶].

$$P = k.B.G.T \quad (۳)$$

که در آن k ثابت بولتزمن می‌باشد.
در دسترس بودن منابع رادیویی در بیرون از اتمسفر اجازه می‌دهد دو نوع اندازه‌گیری رادیومتریک به نام‌های اندازه‌گیری فعال و غیر فعال برای اندازه‌گیری تضعیف مسیر ارائه شود.

- اندازه‌گیری رادیومتری فعال

در اندازه‌گیری رادیومتری فعال، از منابع رادیویی طبیعی بیرون از جو برای اندازه‌گیری تضعیف درون اتمسفر استفاده می‌شود. در فرکانس‌های بالای 1 GHz منابع نویز رادیویی خارجی، انرژی کافی را برای اندازه‌گیری فعال رادیومتریک ایجاد می‌کنند. رادیومترهایی که به‌طور خاص حرکت خورشید را دنبال می‌کنند، رادیومترهای Sun-tracking نامیده می‌شوند. یک رادیومتر با پهنای باند کوچک‌تر از اندازه زاویه‌ای خورشید، دمای انتشار Te را اندازه‌گیری می‌کند.

$$T_e = T_b \times e^{-A/3.34} \quad (۴)$$

که در آن Tb دمای روشنایی خورشید و A تضعیف در طول مسیر به دسیبل می‌باشد. متغیر Te مستقیماً با تغییرات A تغییر می‌کند. مشکل جدی این روش قابلیت به کاربردن تضعیف آماری به‌دست آماده از روش Sun-tracking به مبحث انتشار امواج مخابرات ماهواره‌ای است. از آنجایی که خورشید منبع ثابتی نیست، آمارهای تضعیف برای زوایای ارتفاع (Elevation) و سمت (Azimuth) مختلف بوده و همچنین در شب داده‌ای وجود نخواهد داشت.

- اندازه‌گیری رادیومتری غیرفعال

در اندازه‌گیری رادیومتری غیرفعال رادیومترها تنها از دمای منتشر شده از محیط واسط برای محاسبه تضعیف محیط استفاده می‌کنند. رادیومترهای غیرفعال مستقل از منابع رادیویی سماوی می‌باشند. رادیومتر غیرفعال می‌تواند در هر مکانی روی زمین مستقر شده و رو به هر نقطه‌ای در فضا جهت‌دهی شود.
تخمین تضعیف اتمسفر در مسیر ماهواره به زمین، برای مکانی معین که اطلاعات هواشناسی در آنجا وجود دارد، ضروری می‌باشد. اندازه‌گیری رادیومتریک برای به‌دست آوردن تخمین تضعیف مسیر می‌تواند به کار برده شود. برای تبدیل اندازه‌گیری رادیومتریک دمای روشنایی Tb به تضعیف مسیر A رابطه زیر به کار برده می‌شود [۱۴].

$$A = 10\log\frac{(T_{mr} - T_0)}{(T_{mr} - T_b)} \quad (۵)$$

که در آن Tmr دمای میانگین تابشی یا تأثیر جوی و T_0 دمای پس‌زمینه کیهانی (Cosmic background temperature) (معمولاً ۲٫۷ درجه کلوین در نظر گرفته می‌شود) می‌باشد.
این رابطه از رابطه انتقال تشعشعی با فرض جذب اتمسفری کم در غیاب پراکندگی استخراج شده است. به طور کلی Tmr به فرکانس و تضعیف در فرآیندهای فیزیکی که موجب تضعیف می‌شوند وابسته می‌باشد. این پارامتر را می‌توان برای مقادیر تضعیف زیر ۶ dB در فرکانس‌های زیر 50 GHz، T_{mr} با وابستگی کمی به فرکانس تخمین زد. این مقدار می‌تواند در محدوده فرکانسی ۱۵-۱۰ GHz در حدود ۲۶۵ K و در محدوده فرکانسی ۳۰-۲۰ GHz در حدود ۲۷۰ K تخمین زده شود.
خطاهای اندازه‌گیری در اندازه‌گیری رادیومتری غیر فعال عبارتند از: تأثیرات آنتن، تأثیرات غیر همگن بودن محیط، تأثیرات پراکنده کامل نبودن محیط و تخمین دمای فیزیکی.

۴-۲- اندازه‌گیری با استفاده از رادار

روش بعدی برای اندازه‌گیری میزان تضعیف سیگنال ناشی از پارامترهای جوی استفاده از رادار می‌باشد. بر خلاف دیگر تکنیک‌های اندازه‌گیری، برای اندازه‌گیری یا استنتاج تضعیف مسیر، روش مبتنی بر رادار می‌تواند 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 می‌باشد [۹].
رادار می‌تواند با ارسال امواج الکترومغناطیسی به سمت هدف مورد نظر (مانند توده بارانی) و اندازه‌گیری توان برگشتی به رادار و با دانستن توان ارسالی، تضعیف مسیر عبوری سیگنال را محاسبه کند. استفاده از رادار در اندازه‌گیری تضعیف و دیپلاریزاسیون توده‌های باران و برف می‌تواند کارا باشد و در دیگر منابع تضعیف سیگنال ماهواره‌ای مانند تضعیف ناشی از گازها کاربردی ندارد.
معادله رادار، برد رادار را به مشخصات فرستنده و گیرنده، آنتن، هدف و محیط مربوط می‌سازد. اگر توان فرستنده رادار P_T و آنتن 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].

$$PFD = \frac{G_T P_T}{4\pi r^2} \quad (۶)$$

فرض می‌کنیم در نقطه‌ای مانعی با سطح S وجود دارد که توان ارسالی را قطع می‌کند و به صورت ایزوتروپیک انرژی دریافت شده را پراکنده می‌سازد. انرژی برگشتی پراکنده شده و تابش بر روی آنتن را ESC می‌نامیم داریم:

$$E_{SC} = \frac{G_T P_T}{4\pi r^2} \times \frac{S}{4\pi r^2} \quad (۷)$$

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

$$P_R = \frac{C P_T S}{r^4} \quad (۸)$$

رابطه بالا به معادله رادار معروف می‌باشد. بسیاری از پارامترهای معادله رادار ثابت می‌باشند. که در آن

$$C = \frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^8} \quad (۹)$$

[Downloaded from kiaeee.ir on 2025-11-22]

C به‌عنوان ثابت رادار شناخته می‌شود. معادله رادار فرض می‌کند که کل انرژی برخوردی 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 مانعی است که پرتو رادار را قطع می‌کند. سطح مقطع راداری یک هدف عبارت است از [۱۴].

$$\sigma = \lim_{R\to\infty} 4\pi R^2 \left|\frac{E_r}{E_i}\right|^2 \quad (۱۰)$$

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 پراکندگی مایکروویو توسط باران و یا ابر با استفاده از فرض غیر همدوسی پراکندگی حجمی می‌باشد. میانگین توان پراکنده شده سیگنال در این حالت متناسب با سطح مقطع پراکندگی مؤثر در واحد حجم می‌باشد. داریم،

$$\eta = \int_0^\infty \sigma(\lambda, D).N(D)dD \quad (۱۱)$$

که N(D) توزیع قطرات با قطر D تا D+dD می‌باشد.

برای یک قطره کروی باران با قطر D (mm) که در برابر طول موج سیگنال رادار کوچک می‌باشد، سطح مقطع پراکندگی به صورت زیر بیان می‌شود [۱۵].

$$\sigma = \frac{\pi^5 |k|^2}{\lambda^4} \times 10^{-18} D^6 (m^2) \quad (۱۲)$$

که در آن $k = (n^2-1)(n^2+1)$ ضریب شکست مختلط می‌باشد. مقدار $|k|^2$ برای قطرات آب در حدود ۰٫۹۳ و برای ذرات یخ ۰٫۲۰ می‌باشد. این تفاوت زیاد برای $|k|^2$ برای ذرات مایع و جامد آب بسیار مهم می‌باشد. برای مجموعه‌های از قطرات با توزیع اندازه N(D)، سطح مقطع پراکندگی برای هر واحد حجم η به صورت زیر می‌شود[۱۵].

$$\eta = \frac{\pi^5 |k|^2}{\lambda^4} \times 10^{-18} \int_0^{D_{\max}} N(D) D^6 dD \quad (۱۳)$$

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 بازتاب‌پذیری (Reflectivity) نامیده می‌شود،

$$Z = \int_0^{D_{\max}} N(D) D^6 dD \quad (۱۴)$$

برای بدست آوردن تضعیف α 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 بازتاب‌پذیری استفاده می‌شود.

$$Z = aR^b \quad (۱۵)$$

مقادیر a و b مقادیری تجربی می‌باشند.

۴-۳- اندازه‌گیری با استفاده از سیگنال بیکن ماهواره

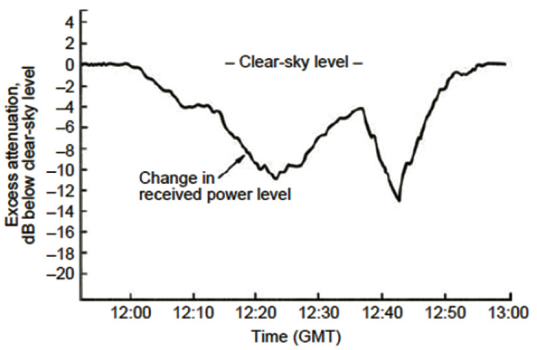
سومین روش اندازه‌گیری پارامترهای انتشار امواج ماهواره‌ای اندازه‌گیری سیگنال بیکن (Beacon) ماهواره است. این روش در حال حاضر مؤثرترین و پر کاربردترین روش اندازه‌گیری پارامترهای انتشار امواج ماهواره‌ای می‌باشد که در دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد. سیگنال بیکن ماهواره‌ای، سیگنالی است مرجع با فرکانس ثابت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

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

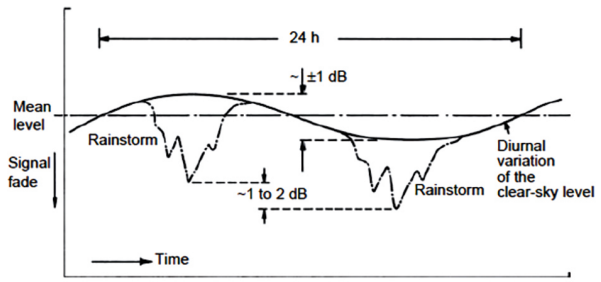
با مشخص بودن تمامی مشخصات سیگنال ارسالی از ماهواره و با دریافت و تحلیل این سیگنال با استفاده از گیرنده‌های اندازه‌گیر این سیگنال در ایستگاه زمینی، می‌توان پارامترهای انتشار امواج ماهواره‌ای در شرایط مختلف جوی را بررسی نمود.

در شکل (۲) تغییرات سطح سیگنال بیکن اندازه‌گیری شده در یک نمونه اندازه‌گیری در طول باران نشان داده شده 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 ۴: تغییرات سطح سیگنال بیکن دریافتی در یک ساعت اندازه‌گیری[۹].



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

[Downloaded from kiaeee.ir on 2025-11-22]

تأثیر نشان داده شده در شکل (۴) تغییرات روزانه یک مسیر ماهواره‌ای می‌باشد. ردیابی 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 ضریب شکست در اتمسفر می‌باشد که باعث محوشدگی 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 می‌بایست 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 نرخ کمتری نسبت به سینتیلیشن انجام می‌پذیرد). اگر مقدار fc (فرکانس قطع بالای فیلتر)کم انتخاب شود موجب تأثیر ناخواسته دیگر تغییرات سیگنال در بررسی سینتیلیشن می‌شود. اگر fc مقدار زیادی داشته باشد، سهم سینتیلیشن در مؤلفه‌های فوریه کمتر از مقدار fc در نظر گرفته نمی‌شود [۱۹].

مورد دیگر استفاده از سیگنال بیکن در اندازه‌گیری دیپلاریزاسیون 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].

$$XPD = 20\log\left|\frac{E_{co}}{E_{cross}}\right| \qquad (۱۶)$$

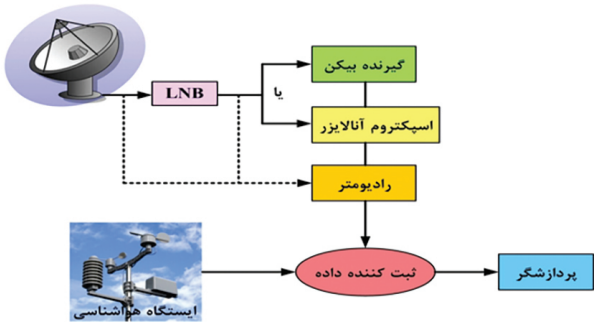
می‌توان گفت کامل‌ترین در عین حال کم‌هزینه‌ترین روش اندازه‌گیری دیپلاریزاسیون استفاده از OMT به همراه دو گیرنده سیگنال بیکن می‌باشد.

۵- تجهیزات هواشناسی مورد نیاز

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

- دماسنج، رطوبت‌سنج و فشارسنج (در سطح و سطوح فوقانی جو)
- باران‌سنج (برف سنج، دیسدرومتر و ...)
- دستگاه اندازه‌گیری کننده میدان دید
- رادار هواشناسی و ...

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

می‌شود تا تأثیرات پارامترهای هواشناسی بر سیگنال ماهواره مشخص و الگوی مناسب انتشار امواج ماهوارهای استخراج گردد.

۶- روش اندازه‌گیری پیشنهادی و پیاده‌سازی شده

با در نظر گرفتن سناریوی 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 به‌عنوان 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:

- آنتن (۱/۸ متری)
- تغذیه آنتن (آنتن شیپوری)
- TRF
- OMT (Transducer Mode Orthogonal)
- BUC (Convertor Up Block)
- LNB (Block Noise Low)
- مودم(VSAT (Antenna Aperture Small Very
- تحلیلگر طیف

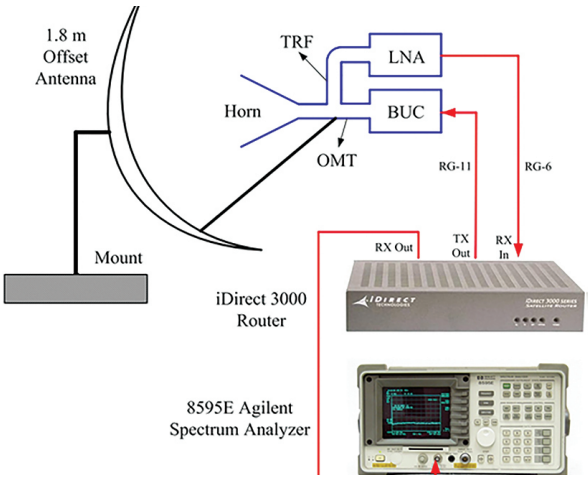
شکل (۷) نحوه اتصال و چیدمان تجهیزات اندازه‌گیری پارامترهای انتشار امواج ماهواره‌ای را نشان می‌دهد. از این چیدمان به دو صورت می‌توان برای اندازه‌گیری اثرات انتشار امواج ماهواره‌ای استفاده کرد:

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 BUC، OMT و TRF 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 دقت عمل بیشتری در تجزیه و تحلیل داده‌های اندازه گیری شده می‌باشد.

باید توجه نمود ماهواره سیگنال ارسالی از سمت آنتن را به

[Downloaded from kiaeee.ir on 2025-11-22]



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

شکل ۹:چیدمان اندازه‌گیری سیگنال و پارامترهای هواشناسی پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات [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 بیکن وجود نداشته باشد و یا دریافت سیگنال در فرکانسی خاص مد نظر 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.

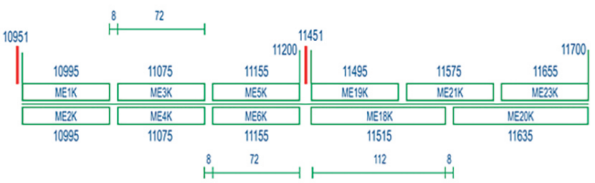
با توجه به روش پیشنهادی، برای اندازه‌گیری سیگنال بیکن از ماهواره(IS-15) INTELSAT 15 واقع در مدار ۸۵/۱۵ درجه شرقی استفاده شده است. این ماهواره برای سرویس داده و تصویر در باند Ku در نواحی خاورمیانه، اقیانوس هند و روسیه توسط شرکت Intelsat ساخته شده است. این ماهواره از انواع ماهواره‌های سه محوره بوده و شامل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

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

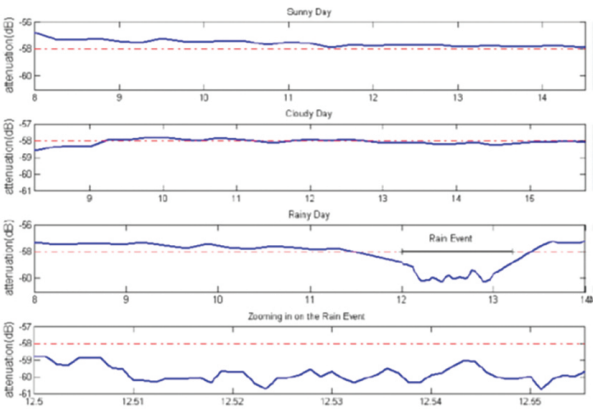
- دماسنج، رطوبت‌سنج و فشارسنج (در سطح و سطوح فوقانی جو)
- باران‌سنج (برف‌سنج، دیسدرومتر و ...)
- دستگاه اندازه‌گیری کننده میزان دید
- رادار هواشناسی و ...

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 بیکن ماهواره IS-15 در شرایط آب و هوایی مختلف استفاده می‌شود. همچنین در شکل (۱۰) یک نمونه نتایج اندازه‌گیری سطح سیگنال بیکن 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 ۸: پلن فرکانسی ترنسپوندر ماهواره IS-15 در مسیر downlink [۸].



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

[Downloaded from kiaeee.ir on 2025-11-22]

شکل ۱۱: نرم افزار بومی‌سازی پارامترهای انتشار امواج ماهواره‌ای[۸].

۷- نتیجه‌گیری

با توجه به پیشرفت‌های اخیر در زمینه ارتباطات ماهواره‌ای و عملیاتی شدن ابرمنظومه‌ها به‌صورت منطقه‌ای و در آینده نزدیک جهانی، موضوع بومی‌سازی 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 تضعیف 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 تضعیف ناشی از گازها و میزان تأخیر سیگنال عبوری از تروپوسفر استفاده می‌شود. امروزه از رادیومتر به‌عنوان 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 دانستن 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 بومی‌سازی پارامترهای انتشار امواج ماهواره‌ای، چیدمان پیشنهادی برای اندازه‌گیری سیگنال بیکن ماهواره به همراه سامانه اندازه‌گیری پارامترهای هواشناسی معرفی شد. در انتها نیز نمونه اندازه‌گیری برای سه روز آفتابی، ابری و بارانی ارائه شد. نمایی از نرم‌افزار اندازه‌گیری پارامترهای انتشار امواج ماهواره‌ای نشان داده شد.

سپاسگزاری

این پروژه تحت حمایت‌های مادی و معنوی پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات انجام شده است.

مراجع

[1]Avilable at:https://www.weforum.org/agenda/2020/04/coronavirus-covid-19-pandemic-digital-divide-internet-data-broadband-mobbile/

[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 Astronautic, 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/

[۷] رضا بحری و تیم تحقیقاتی پروژه، "بررسی عوامل موثر بر انتشار امواج ماهواره‌ای ..."، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، پژوهشکده فناوری ارتباطات، گروه رادیو، ۱۳۹۱.

[۸] رضا بحری و تیم تحقیقاتی پروژه، "بررسی روش‌ها و تجهیزات اندازه‌گیری پارامترهای تضعیف 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 Assembley, 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, Peter Perigrinus, 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/

***

[Downloaded from kiaeee.ir on 2025-11-22]