

تأثیر شرایط جوی و ریزش برف و باران بر انتشار امواج رادیویی

یاسره یوسف تبار^۱، مهدی رضاتبار^۲

^۱ کارشناس ارشد مهندسی کامپیوتر، نرم افزار، دانشگاه مازندران.

^۲ کارشناس ارشد مهندسی فناوری اطلاعات، شبکه‌های کامپیوتری، دانشگاه مازندران.

نام نویسنده مسئول:

مهدی رضاتبار

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۳/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۵/۳۱

چکیده

انتشار امواج رادیویی یکی از پدیده‌های مهم در زندگی روزانه ما می‌باشد. طوری که تقریباً ضروری و بدون آن ارتباطات ما دچار اختلال می‌شود. اما، در عین حال تعداد عوامل تاثیر گذار در انتشار امواج رادیویی اجتناب ناپذیر است و در چندین دهه گذشته، بررسی پدیده‌های تأثیر گذار در انتشار امواج رادیویی بین ماهواره و ایستگاه زمینی اهمیت خاصی پیدا کرده است. در این مقاله صرفاً اثرات پدیده‌های غیر یونیزه که شامل انواع بارندگی مانند باران، برف، مه و کریستال‌های یخی که همگی ناشی از موقعیت جغرافیایی منطقه مورد نظر می‌باشد بررسی می‌شود. در محیط‌های غیر یونیزه امواج الکترومغناطیسی به دو صورت تحت تأثیر قرار می‌گیرند. اولاً این امواج تضعیف می‌شوند و ثانیاً دی‌پلاریزاسیون در آن‌ها رخ می‌دهد که در واقع نوعی انرژی است که از پلاریزاسیون عمودی به پلاریزاسیون افقی و یا بالعکس از عدم تقارن ذرات ناشی می‌شود.

واژگان کلیدی: امواج الکترومغناطیسی، تضعیف امواج، پراکندگی امواج، محیط‌های غیر یونیزه.

مقدمه

امواج رادیویی پس از ارسال از آنتن فرستنده تا هنگام دریافت آن‌ها توسط آنتن گیرنده تحت تأثیر پدیده‌های گوناگون محیط جو هستند که مطالعه و شناخت آن‌ها برای بهره‌برداری صحیح از ارتباطات رادیویی شایان توجه می‌باشد. امواج حاصل در شبکه‌های بی‌سیم^۱ که از نوع الکترومغناطیس^۲ می‌باشند، به شدت تحت تأثیر متغیرهای محیطی قرار می‌گیرند که از آن جمله می‌توان به پدیده‌های جوی غیر یونیزه مانند باد، باران، برف، مه، دما و فشار که همگی ناشی از موقعیت جغرافیایی منطقه مورد نظر می‌باشند اشاره کرد. در فرکانس‌های بالاتر از ۵ گیگاهرتز به خصوص در فرکانس‌های مایکروویو، نزولات جوی و گازهای موجود در جو باعث کاهش کیفیت لینک مخابراتی می‌گردد و تضعیف صورت گرفته ناشی از رفتار متغیر با زمان در لایه‌های اتمسفر بر روی امواج رادیویی می‌باشد.

در این مقاله به طور مختصر تأثیر این پدیده‌ها در تضعیف فرکانس امواج رادیویی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

پدیده‌های انتشار امواج رادیویی

به طور کلی وقتی یک موج رادیویی در یک محیط منتشر می‌شود تحت تأثیر پدیده‌های مختلفی قرار می‌گیرد که مهم‌ترین آن‌ها تضعیف امواج، شکست و انحنای مسیر^۳، پراکندگی و تغییر پلاریزاسیون^۴ می‌باشد. این پدیده‌ها تابع عوامل مختلفی هستند که عمدتاً تابع فرکانس امواج بوده و جهت محاسبه‌ی میزان تضعیف حاصله، داشتن آمار میزان بارش حائز اهمیت است [۱]. برخی از این عوامل عبارتند از:

- زمین و عوامل طبیعی نظیر انحناء، پستی و بلندی‌ها و ساختار آن از نظر جنس و صاف بودن.
- شرایط اقلیمی ترکیبات پایدار جو زمین نظیر درجه‌ی حرارت، رطوبت، اکسیژن، ازت و بخار آب.
- اثرات پدیده‌ی جوی نظیر باد، طوفان، گرد و خاک، رعد و برق، ابر، باران، برف و تگرگ.
- اثرات آسمانی نظیر طوفان‌های مغناطیسی و لکه‌های خورشیدی و روز و شب ایام سال.

عوامل موثر بر تضعیف امواج در محیط آزاد

تضعیف^۵ به معنای کاهش شدت سیگنال رادیویی است. عوامل متعددی در تضعیف سیگنال دخیل هستند که مورد بحث ما اثرات برف و باران و مه که در تضعیف امواج در فضاهای آزاد بیشتر خودنمایی می‌کنند می‌باشد. کلاً آب در رده مواد جاذب امواج الکترومغناطیسی قرار می‌گیرد و به همین دلیل دستگاه‌های مخابرات زیرآب از امواج رادیویی بهره نمی‌گیرند. با افزایش فرکانس سیگنال میزان تضعیف آب نیز افزایش می‌یابد. آنچه که در مورد آب بیان شد در محیطی یکپارچه مثل دریا و اقیانوس صادق است ولی باران، مه و برف که ذرات معلق آب در هوا هستند، در شرایط خاص هرگاه قطرات آب قطری حدود طول موج سیگنال رادیویی داشته باشند باعث تضعیف جدی سیگنال خواهند شد و انرژی سیگنال رادیویی را منعکس، پراکنده یا جذب می‌کنند.

مشکل محیط‌های مرطوب و بارانی در فرکانس‌های بالای ۱۲ گیگاهرتز جدی می‌شود. جایی که طول موج سیگنال از ۲/۵ سانتی‌متر کمتر است، قطرات باران و برف، حتی به تعداد محدود، باعث تضعیف جدی و غیر قابل جبران سیگنال خواهد شد. در فرکانس ۲/۴ گیگاهرتز طول موج سیگنال حدود ۱۲/۵ سانتی‌متر است و در فرکانس ۵ تا ۶ گیگاهرتز حدود ۶ سانتی‌متر است و چون قطرات باران یا برف با چنین قطری دیده نشده، بنابراین در فرکانس‌های کار شبکه بی‌سیم محلی فعلاً تضعیف ناشی از برف یا باران یا مه ناچیز تلقی می‌شود مگر آنکه این پدیده‌ها به همراه وارونگی^۶ هوا (جو) ظاهر شوند. پدیده وارونگی زمانی

1. Wireless
 2. Electro Magnetic: EM
 3. Path Loss
 4. Depolarization
 5. Attenuation
 6. Inversion

اتفاق می افتد که دمای لایه های هوا در سطوح نزدیک به زمین سردتر از لایه فوقانی باشد و عموماً در فصل زمستان و آن هم در شرایط خاصی اتفاق می افتد. از آنجایی که امواج الکترومغناطیسی بسته به طول موجشان اندکی شکسته و منحرف می شوند لذا پدیده وارونگی می تواند منجر به شکست غیر قابل پیش بینی امواج و عدم دریافت سیگنال توسط آنتن های دور از هم شود.

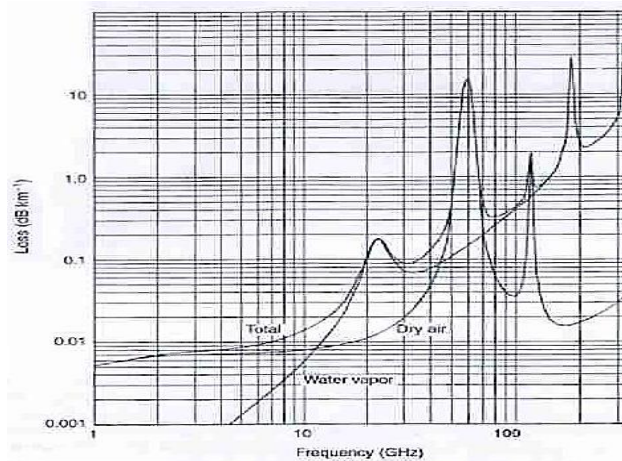
شکست امواج الکترومغناطیسی در اتمسفر

امواج وایرلس در لایه تروپوسفر^۷ که از سطح زمین شروع شده و بسته به موقعیت زمین و شرایط جوی به ارتفاع ۱۰ تا ۱۷ کیلومتر هم می رسد، انتشار می یابند. لایه تروپوسفر شامل مجموعه ای از گازها و همچنین بخار آب می باشد [۱]. با افزایش ارتفاع به ازای هر ۳۰۰ متر، دما ۲ درجه کاهش می یابد و سرعت فاز جبهه موج در ارتفاعات بالاتر کمی بیشتر خواهد بود که باعث ایجاد انحناء در امواج الکترومغناطیسی می شود. مسیر انتشار جبهه موج با عبور از اتمسفر^۸ انحناء پیدا می کند که به این خم شدگی "پدیده شکست" گفته می شود. ضریب شکست به عوامل فشار کلی اتمسفر، فشار بخار آب و دمای هوا بستگی دارد.

جذب امواج الکترومغناطیسی در اتمسفر

جو زمین را نمی توان خلاء تصور کرد و وجود گازها در جو خود عامل تضعیف سیگنال است. در فواصل کوتاه این تضعیف بسیار ناچیز نشان می دهد و در فرکانسهای بالا مقدار تضعیف تا حد قابل توجهی افزایش می یابد. مولکول های قطبی موجود در اتمسفر مانند بخار آب، خود را با نوسانات تغییر بردار میدان الکتریکی موج تنظیم می کنند و انرژی مورد نیاز خود را از موج الکترومغناطیسی جذب می نمایند که با افزایش فرکانس میزان جذب نیز افزایش می یابد [۲]. در شکل ۱ نمودار جذب اتمسفری بر حسب فرکانس نشان داده شده است.

زمان نوسان مولکول هایی مانند اکسیژن نیز با میدان موج تابشی تنظیم می شود که خود این امر باعث جذب انرژی موج می گردد که تابعی از فرکانس می باشد. با افزایش طول مسیر میزان جذب نیز افزایش می یابد.



شکل ۱. نمودار جذب اتمسفری بر حسب فرکانس

تأثیر باران بر انتشار امواج

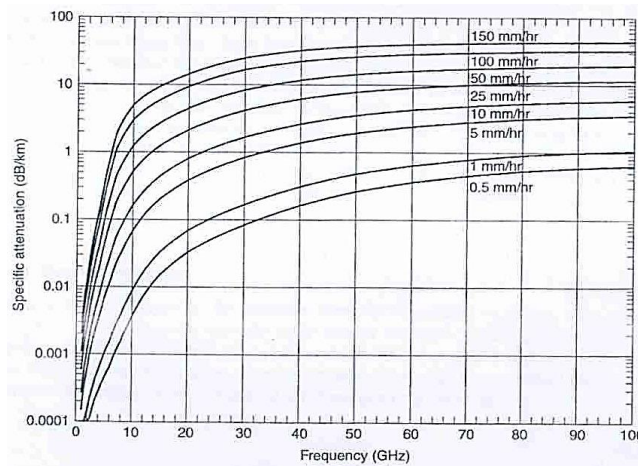
انتشار امواج در یک محیط بارانی تابع عوامل گوناگونی همچون نرخ بارش، دما، نوع باران، فرکانس و ... می باشد. بر اساس مطالعات صورت گرفته اندازه قطرات باران از اندازه های بسیار کوچک که در ابرها یافت می شود تا اندازه های بزرگ که عموماً در مناطق گرمسیر پیدا می شود تغییر می نماید. اما شعاع بزرگ ترین قطرات باران از ۴ میلی متر بیشتر نمی شود [۳].

7. Troposphere

8. Atmosphere

باران از ۳ طریق بر انتشار امواج الکترو مغناطیسی تأثیر می گذارد:

- ۱- قطرات باران با شعاعی کمتر از طول موج تابشی، انرژی موج را با استفاده از تأثیر گرمایی جذب می کنند و باعث کاهش انرژی موج می شوند که به شدت وابسته به فرکانس موج تابشی می باشد.
- ۲- قطرات بزرگ تر باران که تقریباً اندازه طول موج تابشی هستند، باعث پراکندگی طول موج می گردند و این امر باعث کاهش دامنه موج می شود. میزان پراکندگی طول موج به میزان توزیع قطرات باران، جهت گیری قطرات باران، شدت قطرات باران و میزان مسیری که موج در معرض باران قرار دارد بستگی دارد.
- ۳- قطرات باران باعث می شوند قطبیت موج تابشی به دلیل پراکندگی از بین برود و موج تابشی تضعیف گردد. در شکل ۲ نمودار تضعیف ایجاد شده در اثر باران به صورت تابعی از فرکانس نمایش داده شده است.

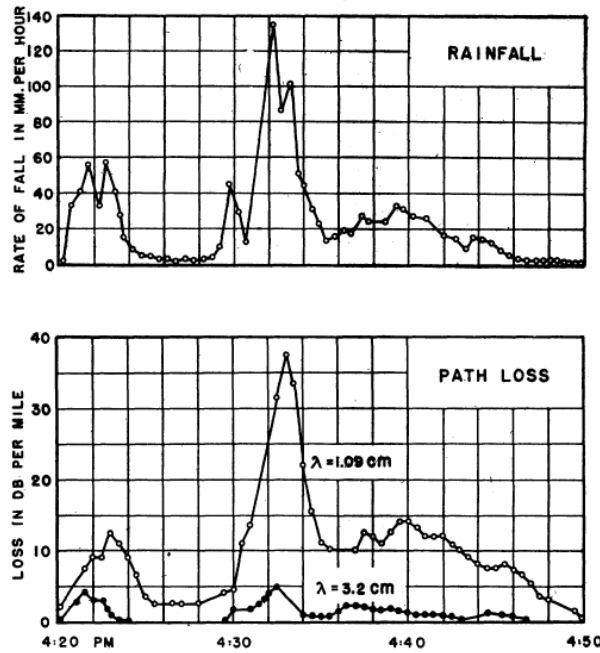


شکل ۲. نمودار تضعیف ایجاد شده در اثر باران به صورت تابعی از فرکانس

تأثیر تضعیف باران

باران نقش مهمی در جذب ناخواسته امواج رادیویی در پایین جو ایفا می کند و باعث جذب در قدرت سیگنال می شود، در نتیجه موجب تضعیف سیگنال می شود. تضعیف باران تابعی از نرخ باران است و میزان بارش در یک واحد از زمان است که عموماً برحسب اینچ در ساعت بیان می شود. در محاسبه تضعیف امواج رادیویی، نرخ باران برحسب میلی متر در ساعت اندازه گیری می شود و در اصل درصدی از یک زمان است که از مقادیر مشخص شده تجاوز کرده است و درصد معمولاً در مدت یک سال است [۴].

به عنوان مثال، نرخ باران ۰/۰۰۱ درصد به این معنی است که نرخ باران باید برای ۰/۰۰۱ درصد از یک سال یا ۵/۳ دقیقه در طول یک سال تجاوز کرده است. در این مورد نرخ باران $R_{0.001}$ می شود. به طور کلی درصد از زمان توسط p و میزان باران توسط R_p نمایش داده می شود [۴]. در شکل ۳ ارتباط متناظر بین بارندگی و تضعیف سیگنال نشان داده شده است [۵].



شکل ۳. نمودار تنوع بارش و تاثیر متناظر آن در تضعیف سیگنال

محاسبه تضعیف باران

انجام محاسبه تضعیف امواج توسط باران طی مراحل انجام می‌گردد که در ادامه شرح داده می‌شود. به عنوان نمونه، در شکل ۴ نمودار ضریب تضعیف باران برای نرخ بارش ۱۰۰-۰ میلی متر بر ساعت و فرکانس ۳۰۰-۰ گیگاهرتز نشان داده شده است.

گام ۱: حداکثر شدت بارندگی برای بیش از ۰/۰۱ درصد از زمان به طریق آمارگیری بر حسب mm/h تعیین و با R و یا $R_{0.01}$ نمایش داده می‌شود. در صورت عدم وجود آمار، می‌توان به نمودارهای تقریبی در این خصوص از جمله توصیه‌ی شماره‌ی $ITU-R, P.563$ که توسط ارگان بین‌المللی مخابرات ارائه شده مراجعه و مقدار قریب به واقع R را به دست آورد.

گام ۲: با معلوم بودن فرکانس و پلاریزاسیون موج می‌توان ضرایب K و α را با استفاده از جدول ۱ به دست آورده و مقادیر تضعیف ویژه γR را بر حسب dB/km از فرمول زیر محاسبه نمود:

$$\gamma R = KR^{\alpha} \quad (1)$$

گام ۳: طول مؤثر مسیر با نماد de که تحت تأثیر باران می‌باشد با استفاده از رابطه‌ی تجربی زیر محاسبه می‌گردد:

$$d_e = \frac{90}{90 + 4d} \times d \quad (2)$$

در این رابطه، d طول واقعی و de طول مؤثر بوده و هر دو بر حسب کیلومتر می‌باشند.

گام ۴: مقدار تضعیف برای بیش از ۰/۰۱ درصد از زمان با استفاده از فرمول زیر به دست می‌آید:

$$A_{0.01} = \gamma R \cdot d_e \quad (3)$$

جدول ۱: ضرایب k و α بر حسب پلاریزاسیون و فرکانس

Frequency (GHz)	K_H	K_V	α_H	α_V
1	0.0000387	0.0000352	0.912	0.880
2	0.000154	0.000138	0.963	0.923
3	0.00650	0.000591	1.121	1.075
4	1.00175	0.00155	1.308	1.265
5	0.00301	0.00265	1.332	1.312
6	0.00454	0.00395	1.327	1.310

در جدول ۱ مقادیر K و α برای پلاریزاسیون افقی و عمودی و به ازای فرکانس های مختلف ارائه شده است. با توجه به عدم وجود مدل مناسب و کامل جهت پیش بینی تضعیف باران، فرمول های متعددی بر اساس مقادیر اندازه گیری شده وجود دارد که در ادامه نمونه ای از آن بیان شده است.

$$\gamma = AR^B \quad (4)$$

در رابطه ی فوق γ همان میزان تضعیف ویژه ی باران بر حسب dB/km و هر یک از پارامترهای A و B به شرح زیر معین می گردند:

$$A = af^\alpha \quad (5)$$

$$a = 6.39 \times 10^{-5}, \alpha = 2.03, f < 2.9 \text{ GHz}$$

$$a = 4.21 \times 10^{-5}, \alpha = 2.42, 2.9 \text{ GHz} \leq f < 54 \text{ GHz}$$

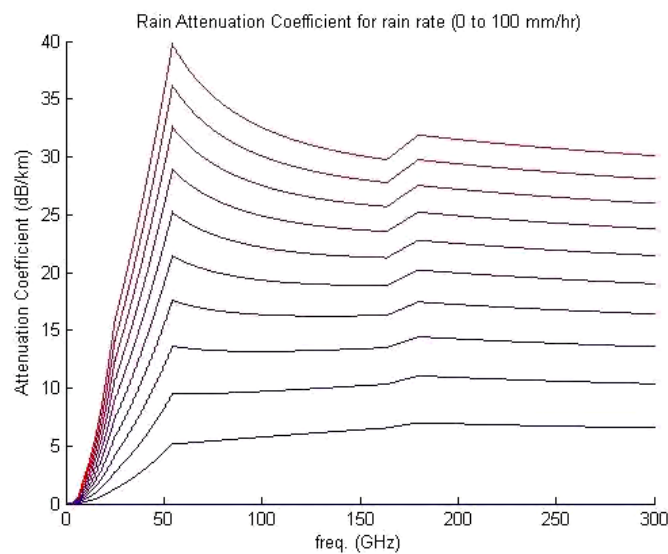
$$a = 4.09 \times 10^{-2}, \alpha = 0.699, 54 \text{ GHz} \leq f < 180 \text{ GHz}$$

$$B = bf^\beta \quad (6)$$

$$b = 0.851, \beta = 0.158, f < 8.5 \text{ GHz}$$

$$b = 1.41, \beta = -0.0779, 8.5 \text{ GHz} \leq f < 25 \text{ GHz}$$

$$b = 2.63, \beta = -0.0272, 25 \text{ GHz} \leq f < 164 \text{ GHz}$$



شکل ۴. ضریب تضعیف باران برای نرخ بارش (۰ تا ۱۰۰ mm/hr)

تأثیر پراکندگی باران

پراکندگی^{۱۰} سیگنال‌های رادیویی در جهت‌های مختلف توسط قطرات باران به عنوان پراکندگی باران شناخته شده است و تابعی از طول موج امواج رادیویی و اندازه ذرات پراکندگی می‌باشد [۱].

تصویربرداری از قطرات باران با شعاع‌های مختلف نشان می‌دهد که قطرات باران واقعاً کروی نیستند و برای شعاع‌های بالاتر از ۱ میلی‌متر به شکل بیضی گون تخت^{۱۱} می‌باشد و منجر به تضعیف امواج پلاریزه شده مختلف می‌شود و توسط قطره باران پراکنده و جذب می‌شود. از این رو، پراکندگی باران بستگی به پلاریزه شدن امواج رادیویی دارد. یک موج پلاریزه شده افقی که در جهت جلو یا عقب پراکنده می‌شود، محدوده انتشار آن در حالت پراکندگی جلو به ۸۰۰ کیلومتر افزایش می‌یابد و موج پلاریزه شده عمودی با پراکندگی به صورت یک طرفه می‌باشد [۴].

تأثیر مه و برف بر امواج

مه که همان مجموعه‌ای از قطرات بخار آب می‌باشد و دانه‌های برف موجود در هوا هم به دلیل شکل تقریباً کروی که دارند، باعث ایجاد پراکندگی در امواج الکترومغناطیس و در نتیجه تضعیف امواج می‌شود. میزان تضعیف به طول موج نور تابشی، میزان تراکم و اندازه دانه‌های برف و طول مسیری که موج در معرض برف و مه قرار دارد بستگی دارد [۶].

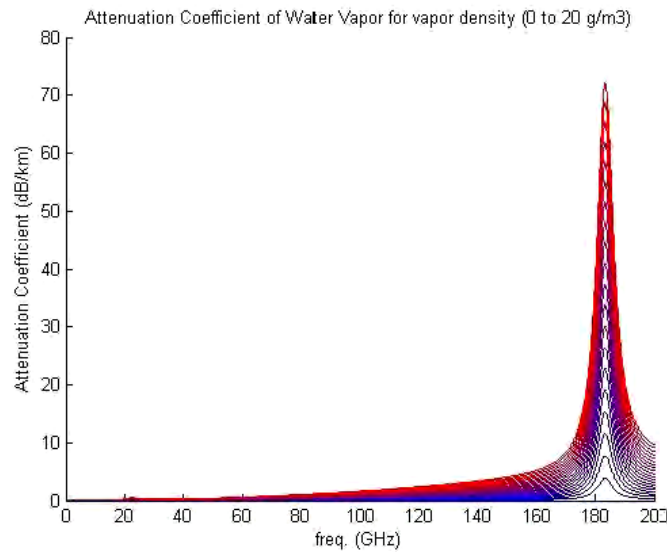
تأثیر باد بر آنتن‌های فرستنده امواج

وزش باد نیز به عنوان یک پدیده تأثیر گذار، با فشار وارده بر روی آنتن‌ها و ایجاد لرزش و انحراف در آن، باعث کاهش کارایی شبکه‌های بی‌سیم می‌شود و دو عامل تغییر جهت آنتن و لرزش آنتن باعث کاهش میزان پوشش آنتن و در نتیجه افت شدید سیگنال دریافتی می‌شود.

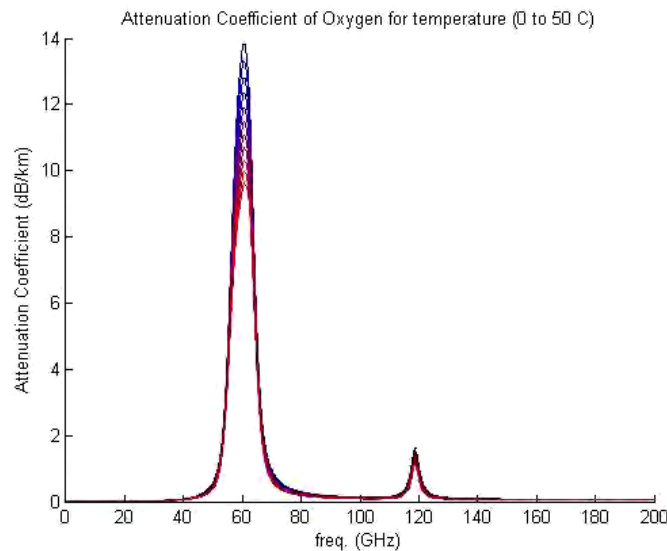
تضعیف سایر ذرات جو

علاوه بر ابر و مه و پدیده‌های تروپوسفری مربوطه در جو، ذرات و مولکول‌های تأثیر گذار دیگری از جمله گرد و خاک، بخار آب و اکسیژن نیز وجود دارد که در خصوص آن‌ها نکات زیر حائز اهمیت است:

- ذرات گرد و خاک ناشی از طوفان‌ها نیز اثراتی در انتشار امواج الکترومغناطیسی دارد. تجربیات آزمایشگاهی روی فرکانس‌های ۱۰ گیگاهرتز نشان داده که به ازای ذرات گرد و خاک معادل 10^{-5} g/cm^3 ، ضریب افت ویژه‌ی خاک برابر 0.4 dB/km می‌باشد [۶].
- بخار آب و اکسیژن موجود در هوا نیز اثرات ناچیزی در فرکانس‌های کمتر از ۲۰ گیگاهرتز داشته است. در شکل‌های ۵ و ۶ میزان افت ویژه‌ی بخار آب و اکسیژن منعکس شده است.



شکل ۵. نمودار تلفات بخار آب برای تراکم بخار (۰ تا 20 g/m^3)



شکل ۶. نمودار تلفات اکسیژن برای اکسیژن در دمای (۰ تا 50°C)

درخشش اتمسفری و تأثیر آن بر امواج الکترومغناطیسی

درخشش اتمسفری یکی از پدیده‌های حاصل از شکست نور مرئی است و این پدیده از تغییرات سریع دما و رطوبت حاصل می‌شود. درخشش زمین در بیابان‌های داغ و چشمک زدن ستاره‌ها از نمونه‌های این پدیده هستند. در مناطقی که وسعت حوزه درخشش از میزان توسعه پرتو کمتر است، پرتو پراکنده می‌شود و دامنه سیگنال کاهش می‌یابد. به عبارتی باعث کم‌رنگ شدن سیگنال نوری و کاهش میزان سیگنال به نویز تا حد آستانه می‌شود. میزان تأثیر این اثر بر امواج الکترومغناطیس، بستگی به وسعت حوزه درخشش دارد.

تأثیر کلی فضای آزاد در اتلاف انرژی موج

در حالت کلی می‌توان گفت میزان اتلاف انرژی موج^{۱۲} در اثر انتشار در فضای آزاد به عوامل فاصله^{۱۳} و فرکانس^{۱۴} موج بستگی دارد که از طریق رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$L = C + 20 \times \text{Log}(D) + 20 \times \text{Log}(F) \quad (7)$$

L = Loss (dB)

C = Constant = 36.6 (dB)

D = Distance (Km)

F = Frequency (MHz)

نتیجه گیری

در فصل زمستان در ناحیه اطراف سیگنال که برگ درختان در حال سقوط کردن هستند و برگ درخت که به علت رطوبت، حاوی مقدار زیادی از آب است، مانع انتشار امواج رادیویی می‌گردد. سیگنال دریافتی هنگام بارش باران می‌تواند بهتر و یا بدترین سیگنال باشد، دلیل دریافت سیگنال بهتر آن است که باران مواد آلاینده در هوا در موقعیت‌های سلولی را می‌شوید، و دلیل دریافت بدترین سیگنال آن است که رطوبت اغلب سیگنال دریافت شده را توسط آب جذب می‌کند و البته نتایج نشان می‌دهد که تاخیر تروپوسفری عامل اضافی برای افزایش خطا می‌باشد که در نهایت باعث تضعیف سیگنال دریافتی می‌گردد.

همچنین، در زمان‌هایی که انتقال سیگنال به طور قابل ملاحظه‌ای در اثر بارندگی ضعیف می‌شود، تضعیف امواج با طول موج ۳/۲ سانتی متر بسیار نادر می‌باشد ولی در طول موج ۱ سانتی متری، می‌توان انتظار تضعیف نسبتاً زیاد در زمان بارندگی‌های شدید یا حتی متوسط داشت، به ویژه اگر فاصله‌ها زیاد باشد. این تلفات بیشتر تا حدی با افزایش آنتن که می‌تواند در طول موج‌های کوتاه انجام شود جبران می‌شود.

بنابراین در ارتفاع بالاتر سطح سیگنال گیرنده بهتر است زیرا در ارتفاع بالاتر موانع کمتری دخالت دارند. هوا بر روی امواج الکترومغناطیس، نوعی اثر تضعیف کننده دارد که در اصطلاح، "تضعیف جوی" نامیده می‌شود و این مسئله باید در طراحی توان و فرکانس فرستنده مورد توجه قرار گیرد.

¹². Free Space Loss

¹³. Distance

¹⁴. Frequency

منابع و مراجع

- [1] Dalip & Vijay Kumar (2014). "Effect of Environmental Parameters on GSM and GPS", Indian Journal of Science and Technology, 7(8), pp. 1183-1188.
- [2] Pawlowski, W. (2000). "Radio wave propagation effects in high-altitude platform systems", 13th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications, Mikon, pp. 185-188, Doi: 10.1109/mikon.2000.913904.
- [3] T. Oguchi, (1983). "Electromagnetic wave propagation and scattering in rain and other hydrometeors", Proceedings of the IEEE, 71(9), pp. 1029-1079, Doi: 10.1109/PROC.1983.12724.
- [4] Ashish Sharma & Prashant Jain (2010). "Effects of Rain on Radio Propagation in GSM", International Journal of Advanced Engineering & Applications, pp. 83-86.
- [5] Robertson, S. D. & King, A. P. (1946). "The Effect of Rain upon the Propagation of Waves in the 1- and 3-Centimeter Regions", Proceedings of the IRE, 34(4), pp. 178-180, Doi: 10.1109/JRPROC.1946.234239.
- [6] David J. Daniels (2010). "EM Detection of Concealed Targets", John Wiley & Sons, Inc Hoboken, New Jersey, pp. 51-58, ISBN: 978-0-470-12169-6.