

مبانی انتشار امواج در شبکه‌های بی‌سیم

بررسی مکانیزم‌ها، مدل‌ها و چالش‌ها

اعضای گروه:

علی کارگر

سید محمد طاهّا موسوی

رضا بوذرجمهری

پاییز ۱۴۰۴

مبانی انتشار امواج

در این بخش می خواهیم ببینیم سیگنالی که در فرستنده تولید می کنیم، چطور در مسیر حرکت می کند، چه رویدادهایی برای آن رخ می دهد و چرا گاهی به گیرنده نمی رسد یا ضعیف و نویزی دریافت می شود. اگر این رفتار را خوب بفهمیم، بعداً در طراحی لینک، انتخاب فرکانس، توان فرستنده و نوع آنتن، تصمیم های منطقی خواهیم گرفت.

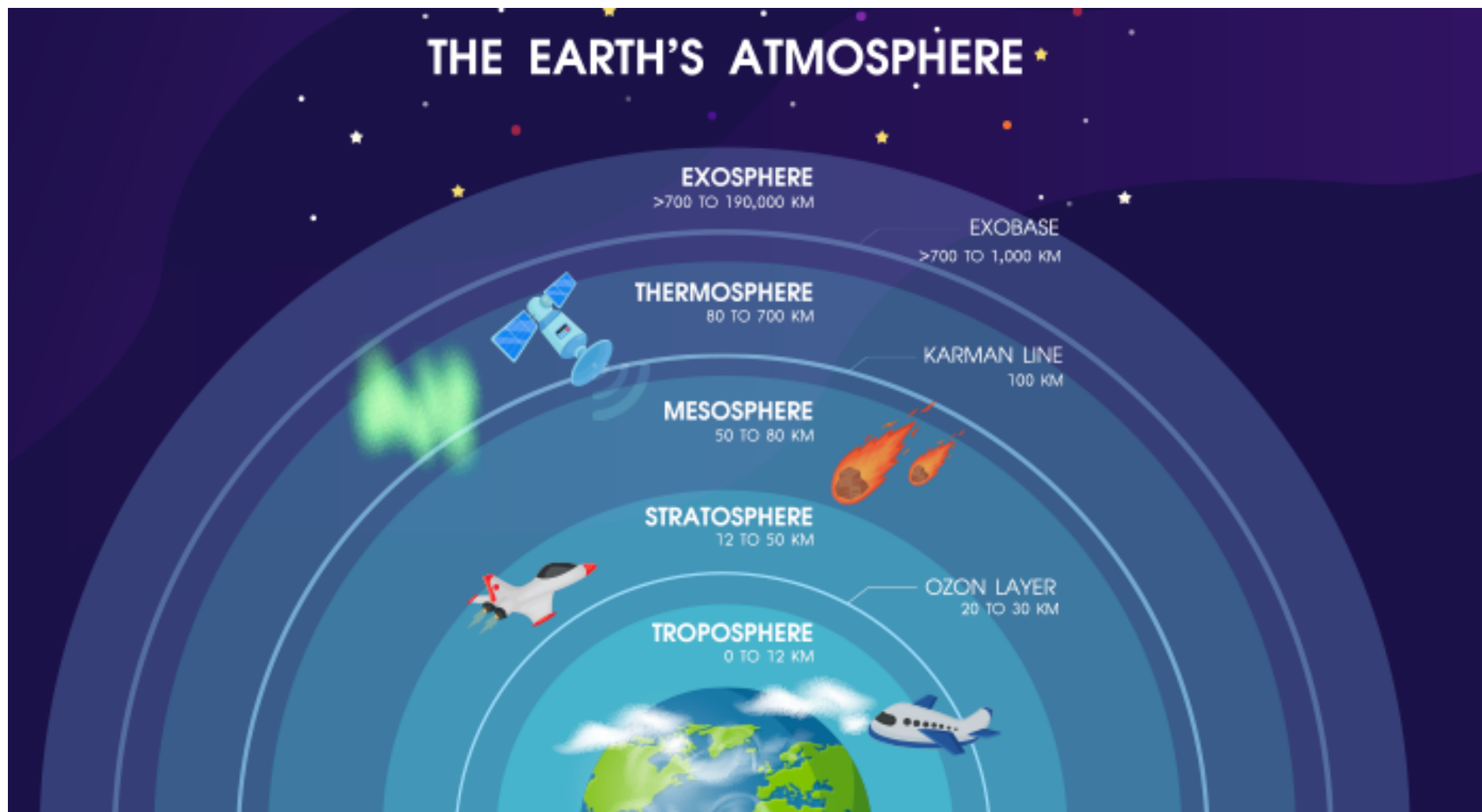
- شبکه های سلولی، Wi-Fi، لینک های مایکروویو و رادیوهای HF همگی بر پایه انتشار امواج الکترومغناطیسی عمل می کنند.
- کانال بی سیم همان محیط انتشار است که حاوی تمام پدیده هایی است که روی موج اثر می گذارند.

ساختار جو

جو زمین محیطی است که موج رادیویی از آن عبور می کند. این محیط از چندین لایه متمایز تشکیل شده، هر کدام با خواص فیزیکی و شیمیایی متفاوت. شناخت این لایه ها کمک می کند بفهمیم سیگنال در فرکانس های مختلف، در چه قسمت هایی از جو با مسائل روبه رو می شود.

- هر لایه جو دارای دمای خاص، دانسیته متفاوت و ترکیب شیمیایی منحصر به فرد است.
- برای مخابرات بی سیم، دو لایه بسیار مهم اند: **تروپوسفر** (نزدیک زمین) و **یونوسفر** (ارتفاعات بالا).

- سایر لایه ها (استراتوسفر، مزوسفر و ترموسفر) نقش های کمک کننده دارند.



شکل ۱: لایه های اتمسفر

تروپوسفر: لایه‌ای که در آن زندگی می‌کنیم

تروپوسفر نزدیک‌ترین لایه به سطح زمین است و از سطح تا حدود 10-18 کیلومتر کشیده شده است. این لایه نقش بسیار مهمی در انتشار امواج رادیویی دارد.

ویژگی‌های فیزیکی تروپوسفر عبارتند از: دمای آن در سطح زمین حدود 15 درجه سلسیوس است و با افزایش ارتفاع، به میزان تقریبی 6 درجه سلسیوس برای هر کیلومتر کاهش می‌یابد. این لایه حاوی بخار آب، ابر، باران، مه و ذرات معلق دیگری است که باعث جذب و پراکندگی امواج رادیویی می‌شوند.

تأثیر تروپوسفر بر فرکانس‌های مختلف متفاوت است. برای فرکانس‌های بسیار پایین، تأثیر آن اندک است؛ اما در فرکانس‌های مایکروویو و بالاتر (5 GHz به بالا)، به‌خصوص در شرایط بارانی، جذب و پراکندگی بسیار قابل ملاحظه‌اند.

استراتوسفر و مزوسفر: لایه‌های واسط

استراتوسفر از حدود 18 تا 50 کیلومتر ارتفاع کشیده شده است. برخلاف تروپوسفر، دمای استراتوسفر با ارتفاع تقریباً ثابت است یا حتی افزایش می‌یابد (زیرا ازن نور ماوراءبنفش خورشید را جذب می‌کند). نقش مستقیم آن در ارتباطات زمینی عادی کم است، اما بخشی از مسیر امواج الکترومغناطیسی عبوری است.

مزوسفر بین 50 تا 85 کیلومتر قرار دارد و سردترین بخش جو است (دما تا 100- درجه سلسیوس می‌رسد). نقش آن در ارتباطات عادی بی‌سیم اندک است، اما در برخی سامانه‌های رادار بسیار بالا وجود دارد. هر دو این لایه بیشتر به عنوان محیط واسط بین تروپوسفر و ترموسفر فعالیت می‌کند.

ترموسفر و اگزوسفر: بخش‌های بالایی جو

ترموسفر بین 85 تا 600 کیلومتری ارتفاع قرار دارد. این لایه بسیار گرم است (دما از 500 تا 2000 درجه سلسیوس می‌تواند تجاوز کند). ترموسفر حاوی ذرات باردار (یون‌ها و الکترون‌ها) است و **یونوسفر** بخشی از ترموسفر است که برای ارتباطات رادیویی فوق‌العاده مهم است. **اگزوسفر** بالاتر از 600 کیلومتر و تا حدود 1000 کیلومتری قرار دارد. در این لایه، ذرات به قدری پراکنده هستند که رفتار گازی ندارند. محل قرارگیری بسیاری از ماهواره‌های مدار پایین (LEO) و معمول (MEO) است.

کمرندهای ون‌آلن نواحی حاوی ذرات پرانرژی (الکترون‌ها و پروتون‌ها) در میدان مغناطیسی زمین‌اند. این کمرندها برای طراحی سامانه‌های ماهواره‌ای و فضایی بسیار اهمیت دارند.

یونوسفر: آینه رادیویی برای امواج برد بلند

یونوسفر بخشی از ترموسفر است (تقریباً 60 تا 1000 کیلومتر ارتفاع) و یکی از مهم‌ترین اجزای جو برای مخابرات بی‌سیم است. این لایه توسط تابش الکترومغناطیسی خورشید یونیزه می‌شود، یعنی اتم‌ها و مولکول‌های هوا الکترون خود را از دست داده و به یون تبدیل می‌شوند. یونوسفر پر از یون‌ها و الکترون‌های آزاد است. این ذرات باردار می‌توانند با امواج الکترومغناطیسی (به‌خصوص در باندهای فرکانسی پایین مثل HF) برهم‌کنش داشته باشند. امواج رادیویی با فرکانس‌های پایین (3 - 30 MHz در باند HF) می‌توانند بازتاب شوند یا تحت تأثیر قرار گرفته و مسیرشان خم شود. این خاصیت باعث می‌شود سیگنال از زمین به یونوسفر برود، آنجا بازتاب شود و دوباره به زمین برگردد.

سیگنال می‌تواند چندین بار بین زمین و یونوسفر رفت و آمد کند (چندین Hop) و فاصله‌های هزاران کیلومتری را پوشش دهد. این همان چیزی است که رادیوهای HF را قادر می‌سازد ارتباطات برد بسیار بلند برقرار کنند.

رویدادهای اصلی انتشار

در مسیر حرکت موج رادیویی، پنج رویداد فیزیکی اصلی رخ می‌دهد. هر یک از این رویدادها به‌طور مستقل بررسی می‌شود.

این رویدادها عبارتند از:

۱. بازتاب (Reflection)

۲. جذب (Absorption)

۳. شکست (Refraction)

۴. پراش (Diffraction)

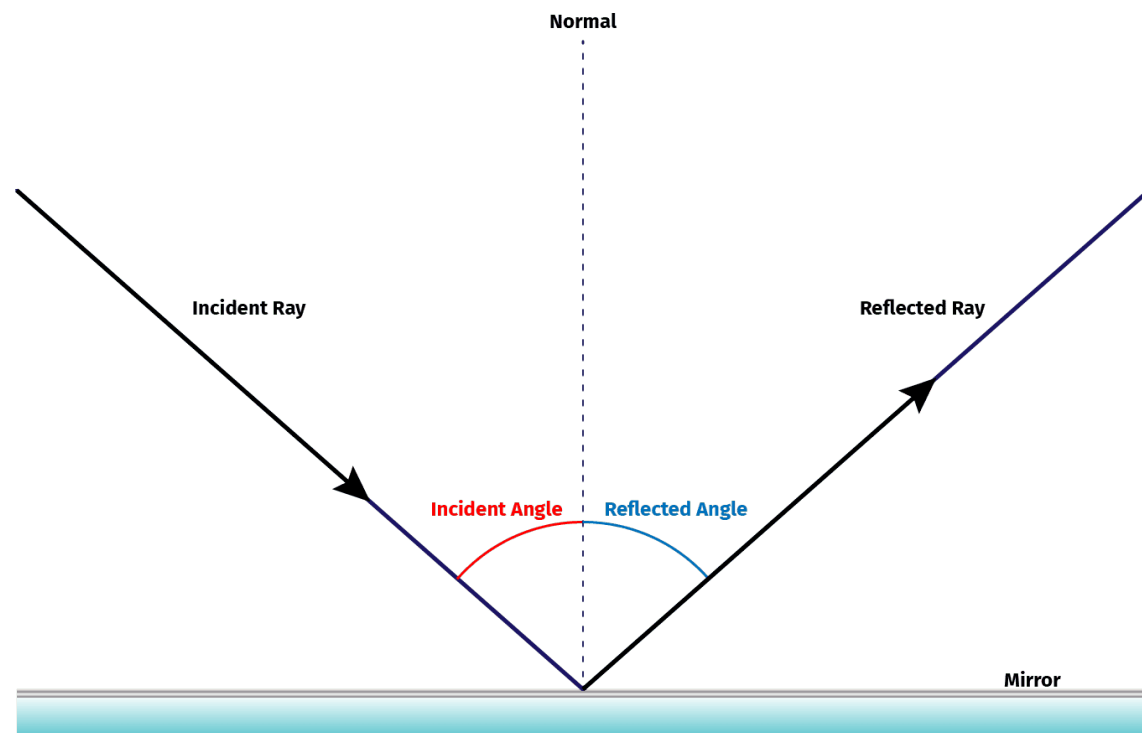
۵. پراکنش (Scattering)

بازتاب (Reflection)

وقتی موج الکترومغناطیسی به سطحی برخورد می کند، بخشی از انرژی اش در جهتی مشخص برمی گردد. این پدیده را بازتاب می نامیم.

بازتاب زمانی به خوبی رخ می دهد که ابعاد سطح انعکاس دهنده از طول موج بسیار بزرگ تر باشد. مثال هایی مثل دیوارهای ساختمان، سطح زمین، سطح دریا و فلزات، بسیار خوب موج را بازتاب می دهند. برای نمونه، موج Wi-Fi (با طول موج چند سانتی متری) هنگام برخورد به دیوار ساختمان بسیار خوب بازتاب می شود.

به طور فیزیکی، زاویه تابش برابر با زاویه بازتاب است. اگر موج با زاویه 30° برخورد کند، با همان زاویه بازتاب می شود. این قانون را قانون انعکاس می نامیم.



شکل ۲: نمایش بازتاب در هنگام برخورد به سطح صاف

جذب (Absorption)

بخشی دیگری از انرژی موج، به جای بازتاب یا عبور، توسط محیط جذب می‌شود. در جذب، انرژی الکترومغناطیسی به انرژی گرمایی تبدیل می‌شود.

مکانیزم فیزیکی جذب به گونه‌ای است که وقتی موج الکترومغناطیسی از محیطی عبور می‌کند، الکترون‌های اتم‌ها و مولکول‌های محیط تحت تأثیر میدان الکتریکی موج قرار می‌گیرند. این الکترون‌ها نوسان می‌کنند و این نوسان باعث تولید گرما می‌شود.

برخی مواد بسیار جاذب‌اند. بخار آب بسیار جاذب است و خاصیت جاذبی‌اش به فرکانس بستگی دارد. مواد حاوی کربن (مثل مقاومت‌ها) خواص جاذب‌کننده قوی دارند. ابر و باران نیز ذرات درون خود باعث جذب شدیدی می‌شوند. نتیجه جذب، تضعیف تدریجی دامنه موج است؛ هرچه مسافت در محیط جاذب بیشتر باشد، تضعیف شدیدتر است.

شکست (Refraction)

وقتی موج از یک محیط به محیط دیگری عبور می‌کند (به‌خصوص اگر خواص فیزیکی دو محیط متفاوت باشد)، جهت انتشار موج تغییر می‌کند. این پدیده را شکست می‌نامیم. رفتار موج در مرز دو محیط توسط قانون اسنل توصیف می‌شود:

قانون اسنل

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

که در آن n_1 و n_2 ضرایب شکست محیط‌های اول و دوم، θ_1 زاویه تابش (نسبت به عمود بر سطح) و θ_2 زاویه شکست است. ضریب شکست برابر است با $n = \frac{c}{v}$ که در آن c سرعت نور در خلأ و v سرعت انتشار موج در آن محیط است.

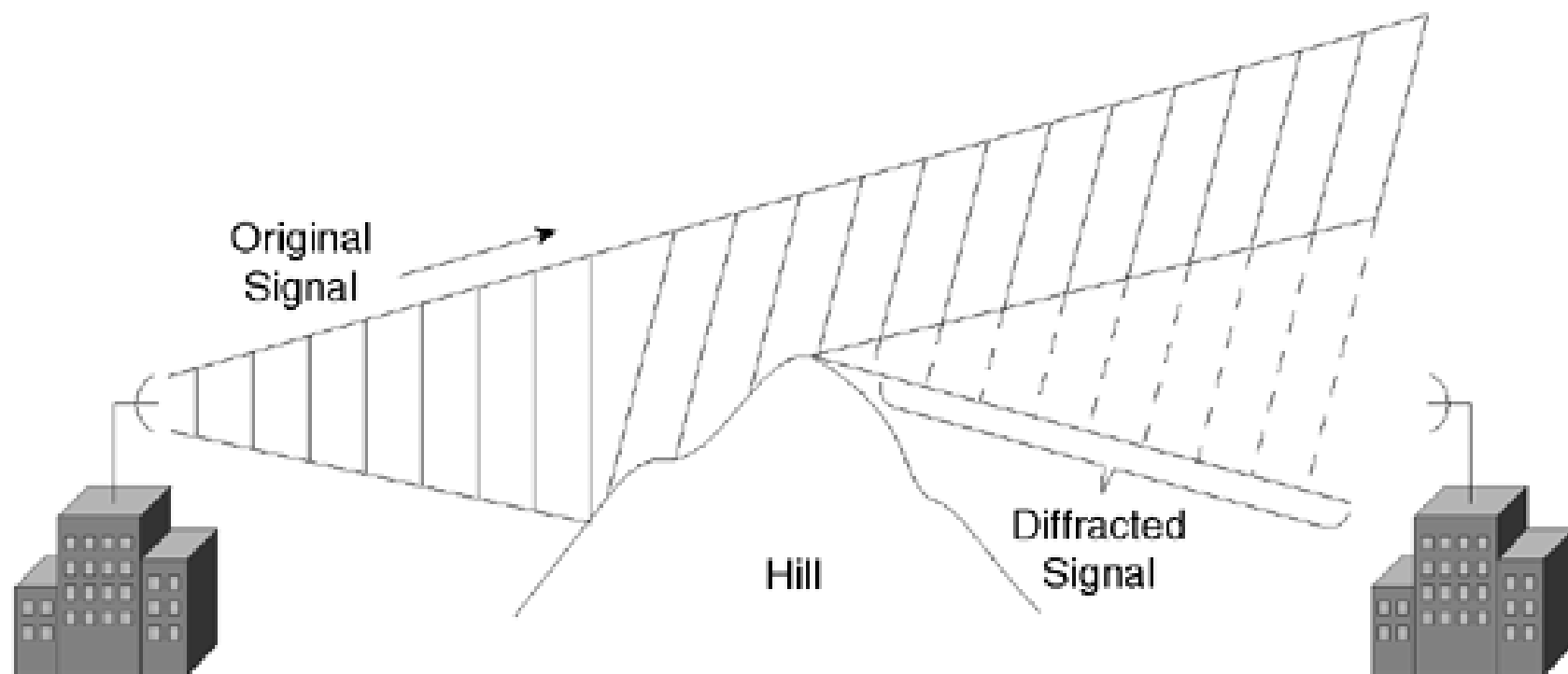
به عنوان مثال، اگر موج از هوا (ضریب شکست $n \approx 1$) وارد آب (ضریب شکست $n \approx 1.33$) شود، جهتش خم می شود. همین اتفاق در جو نیز می افتد، اما به صورت تدریجی زیرا ضریب شکست جو به آرامی با ارتفاع تغییر می کند و مسیر موج تدریجاً خم می شود.

پراش (Diffraction)

پراش یکی از مهم‌ترین رویدادهای انتشار است. این پدیده‌ای است که باعث می‌شود موج حول لبه‌های مانع عبور کند.

وقتی موج با مانع برخورد می‌کند، در لبه‌های مانع خم می‌شود و به نواحی «پشت مانع» یا نواحی سایه نیز می‌رسد. پراش بیشتر زمانی قابل توجه است که ابعاد مانع قابل مقایسه با طول موج باشد یا حتی کمتر. برای نمونه، موج با طول موج یک متری که با لبه تیزی برخورد کند، به خوبی پراش می‌کند.

در عمل، یک کاربر Wi-Fi پشت دیوار سیگنال دریافت می‌کند زیرا موج از لبه‌های دیوار پراش کرده و به داخل اتاق می‌رسد. همچنین، یک ساختمان بلند بین فرستنده و گیرنده باعث می‌شود سیگنال از بالای ساختمان پراش کند.



شکل ۳: پراش امواج در اطراف مانع

پراکنش (Scattering)

پراکنش رویدادی است که زمانی رخ می‌دهد موج الکترومغناطیسی با ذرات ریزی برخورد کند.

وقتی موج با ذراتی برخورد می‌کند که اندازه‌شان از طول موج کمتر یا قابل مقایسه باشد، موج در جهت‌های مختلف پخش می‌شود. این پخش شدگی را پراکنش می‌نامیم. منابع پراکنش متنوع‌اند. قطرات باران هر کدام باعث می‌شوند موج کمی تضعیف شود و در جهت‌های مختلف پخش شود. ذرات برف و کریستال‌های یخ نیز پراکنش ایجاد می‌کنند. قطرات آب معلق در مه یا ابر، برگ‌ها و شاخه‌های درختان در محیط‌های جنگلی، و ذرات معلق در هوا مثل گرد و غبار همگی باعث پراکنش می‌شوند. شدت پراکنش به شدت به اندازه ذرات و فرکانس موج بستگی دارد. در فرکانس‌های بسیار بالا (مثل باند میلی‌متری)، پراکنش بسیار شدید است.

خلاصه و روابط متقابل رویدادها

در محیط‌های واقعی، این پنج رویداد معمولاً همزمان رخ می‌دهند. یک موج رادیویی در محیط شهری، جنگلی یا فضای باز با تمام این رویدادها روبه‌رو است. بازتاب از ساختمان‌ها، جذب توسط هوا و بخار آب، شکست در لایه‌های جو، پراش از لبه‌های موانع و پراکندگی توسط ذرات همگی بر مسیر و شکل سیگنال اثر می‌گذارند. درک جداگانه هر یک از این رویدادها بنیاد لازم برای تحلیل و طراحی سامانه‌های مخابراتی مناسب است.

مکانیزم‌های انتشار

سه پدیده اصلی که بر سیگنال تأثیر می‌گذارند:

۱. بازتاب (Reflection): برخورد موج به مانعی بزرگ‌تر از طول موج (مثل ساختمان).
۲. تفرق یا پراش (Diffraction): خمش موج در لبه‌های تیز موانع که نقاط کور را پوشش می‌دهد.
۳. پراکندگی (Scattering): برخورد موج با اجسام ریز (مثل قطرات باران یا برگ درختان).

تلفات مسیر (Path Loss)

- تعریف: کاهش توان سیگنال با افزایش فاصله از فرستنده.

فرمول فضای آزاد (FSPL)

$$L_{dB} = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 32.44$$

• d : فاصله (کیلومتر)

• f : فرکانس (مگاهرتز)

نتیجه: با دو برابر شدن فاصله، توان سیگنال ۶ دسی بل افت می کند.

انتشار چندمسیره و فیدینگ

توضیح: سیگنال از مسیرهای مختلفی به گیرنده می‌رسد.

انواع محوشدگی (Fading):

- بزرگ‌مقیاس (Large-scale): ناشی از موانع بزرگ و سایه (Shadowing).
- کوچک‌مقیاس (Small-scale): نوسانات سریع ناشی از تداخل امواج.

راهکار مقابله

استفاده از MIMO و OFDM در شبکه‌های 4G/5G.

هدف: محاسبه تمام توان‌ها و تلفات برای تضمین اتصال.

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - L_{Path} - L_{Misc} \quad (۱)$$

- P_{RX} : توان دریافتی (باید بیشتر از حساسیت گیرنده باشد).
- L : مجموع تمام تلفات (مسیر، کابل، کانکتور).

پایان

با تشکر از توجه شما