

مبانی انتشار امواج در شبکه‌های بی‌سیم

بررسی مکانیزم‌ها، مدل‌ها و چالش‌ها

اعضای گروه:

علی کارگر

سید محمد طاهای موسوی

رضا بوذرجمهری

پاییز ۱۴۰۴

فهرست مطالب: نقشه راه سفر سیگنال

۱. خوان اول: مقدمه ای برای شروع سفر
۲. خوان دوم: بسترشناسی
۳. خوان سوم: رویدادهای اصلی انتشار
۴. خوان چهارم: معمای انتقال سیگنال
۵. خوان پنجم: هدایت در مجاورت سطح (موج زمینی)
۶. خوان ششم: آینه‌ای در دل آسمان (موج آسمانی)
۷. خوان هفتم: عبور از جو (موج فضایی)

فوان اول: مقدمه ای برای شروع سفر

مقدمه: مأموریت سیگنال در دنیای واقعی

ما در عصر بی‌سیم زندگی می‌کنیم؛ جایی که داده‌ها، صداها و تصاویر به رشته‌های 0 و 1 تبدیل شده و سوار بر امواج، فضا را در می‌نوردند. اما فضای بین فرستنده و گیرنده، یک خلأ ساده نیست.

چالش اصلی

هر سیگنال در مسیر خود با موانع فیزیکی، تلاطم‌های جوی و تداخل‌هایی روبروست که می‌توانند یکپارچگی آن را به خطر بیندازند.

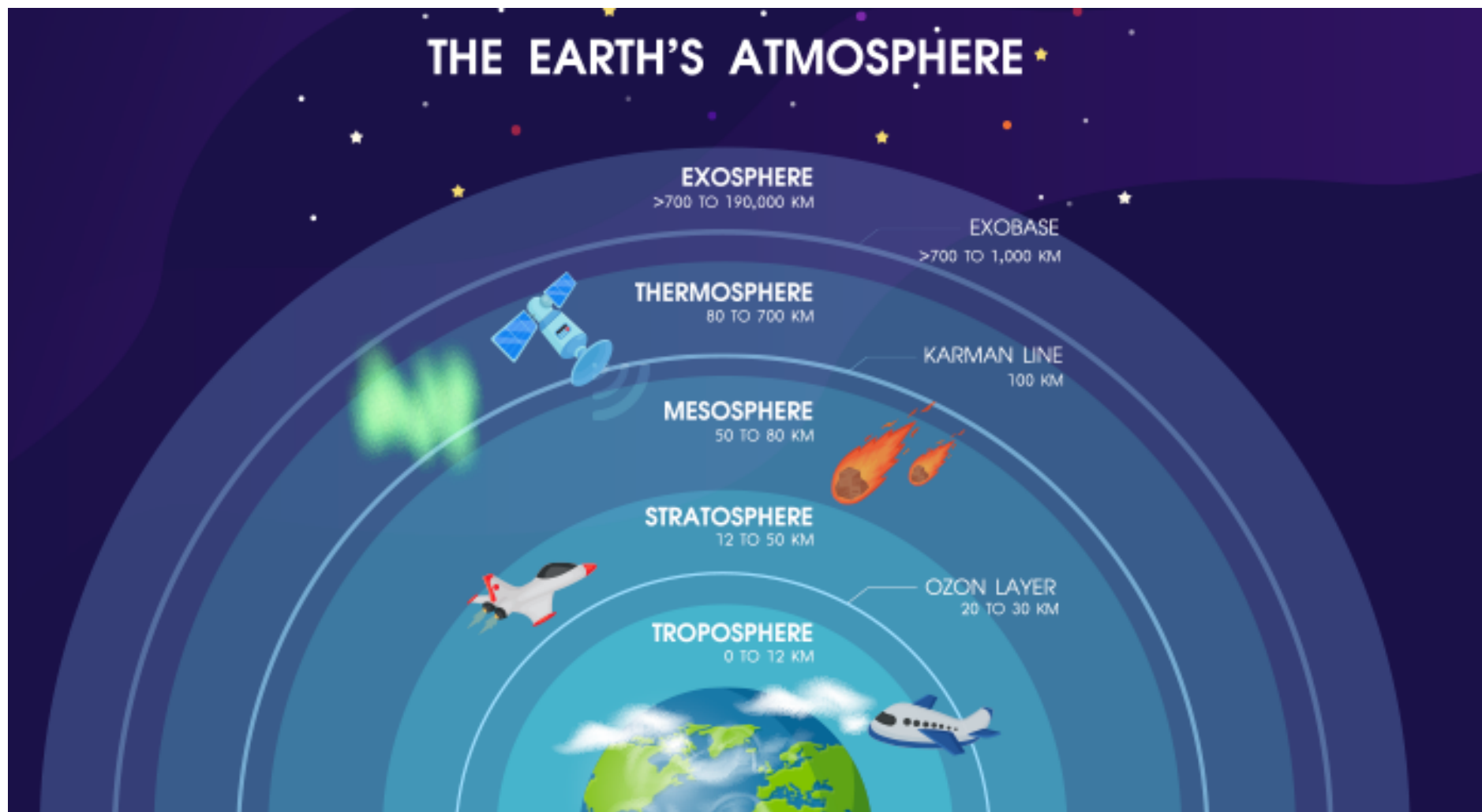
- هدف ما این است که بفهمیم چگونه می‌توان از ویژگی‌های طبیعی زمین و آسمان، نه به عنوان مانع، بلکه به عنوان یک گذرگاه برای انتقال موفق اطلاعات استفاده کرد.

فوان دوم: بستر شناسی

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.

کمربندهای ون‌آلن نواحی حاوی ذرات پرانرژی (الکترون‌ها و پروتون‌ها) در میدان مغناطیسی زمین‌اند. این کمربندها 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.

فوان سوم: ویرادهای اصلی انتشار

رویدادهای اصلی

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)

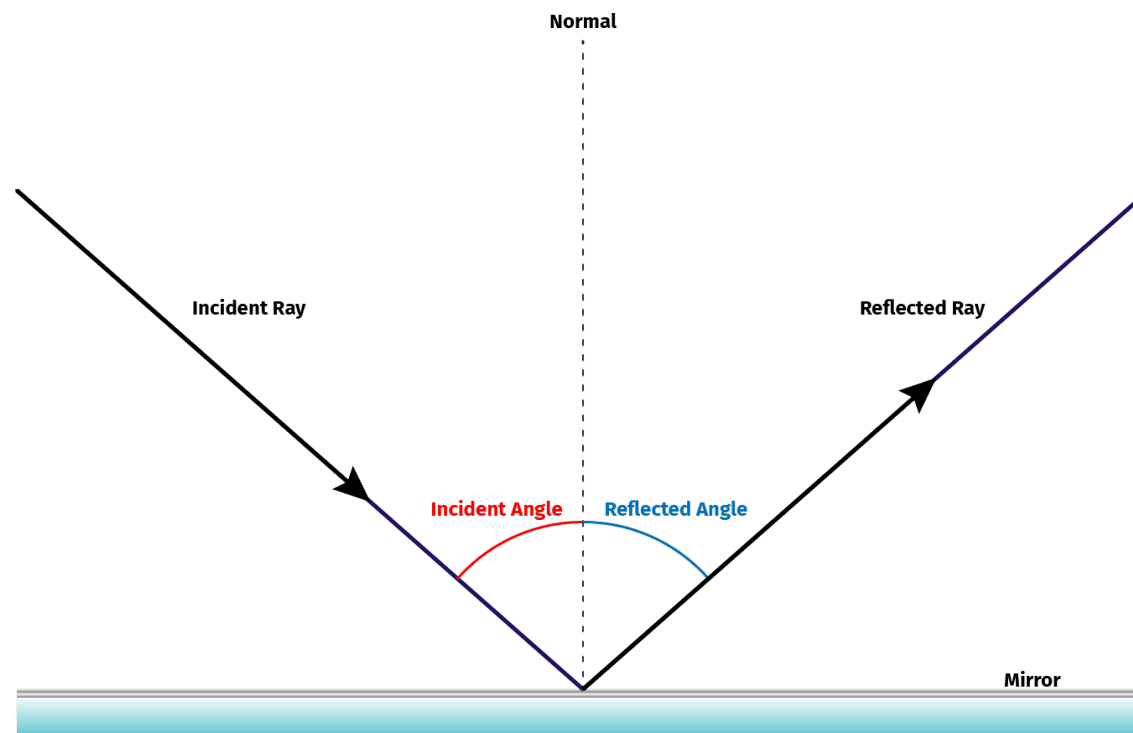
۵. پراکنش (Scattering)

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.

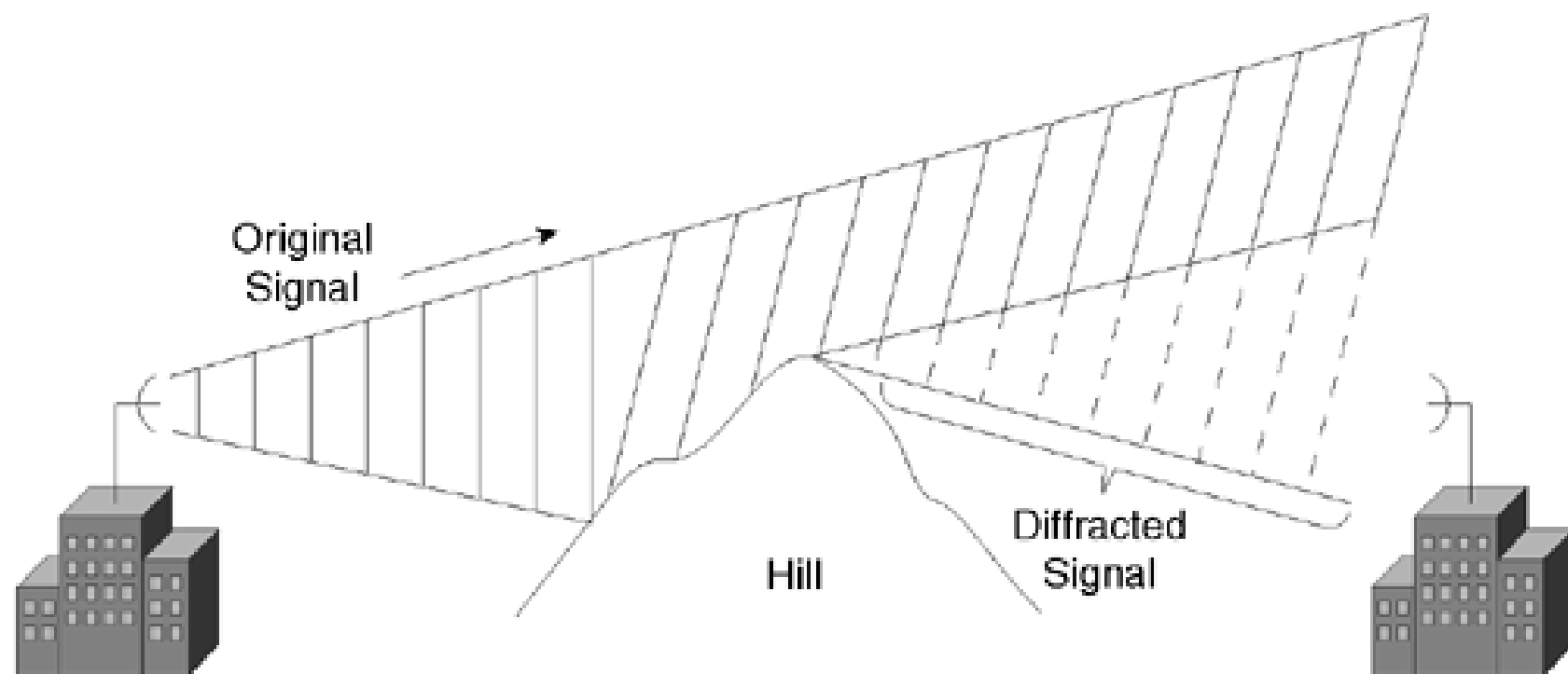
به عنوان مثال، اگر موج از هوا (ضریب شکست $n \approx 1$) وارد آب (ضریب شکست $n \approx 1.33$) شود، جهتش خم می شود. همین اتفاق در جو نیز می افتد، اما به صورت تدریجی زیرا ضریب شکست جو به آرامی با ارتفاع تغییر می کند و مسیر موج تدریجاً خم می شود.

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.



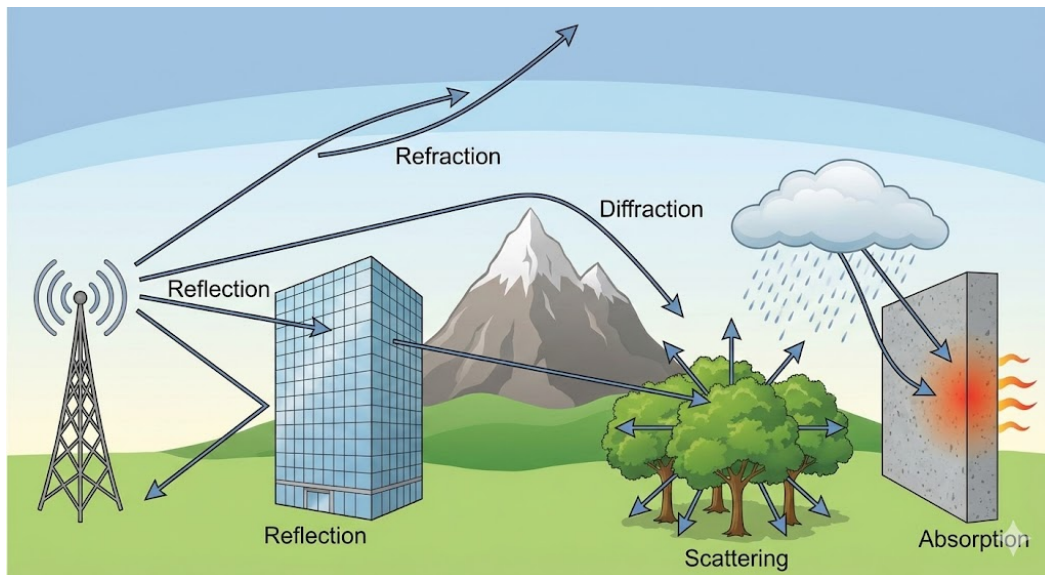
شکل ۳: پراش امواج در اطراف مانع

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



شکل ۴: نمایش رویدادها در یک قاب

- در محیط‌های واقعی، این پنج رویداد معمولاً همزمان رخ می‌دهند.
- یک موج رادیویی در محیط شهری یا جنگلی با تمام این رویدادها روبه‌رو است.
- بازتاب، جذب، شکست، پراش و پراکندگی همگی بر مسیر و شکل سیگنال اثر می‌گذارند.
- درک این رویدادها بنیاد لازم برای طراحی سامانه‌های مخابراتی است.

فوان چوارم: معمای انتقال سیگنال

۱. معمای انتقال: مأموریت سیگنال در دنیای واقعی

همه چیز با یک نیاز شروع می‌شود: انتقال اطلاعات. در دنیای مخابرات، ما داده‌ها (صدا، تصویر یا متن) را به رشته‌های صفر و یک تبدیل می‌کنیم؛ اما برای جابجایی این بیت‌ها در فضا، نیاز به یک حامل فیزیکی داریم.

- **چالش محیطی:** فضای بین فرستنده و گیرنده، یک خلأ ساده و ساکن نیست. این مسیر سرشار از موانع فیزیکی، تلاطم‌های جوی و تداخل‌هایی است که می‌توانند به راحتی یکپارچگی سیگنال ما را به چالش بکشند.

- **انطباق با طبیعت:** هدف اصلی ما این است که سیگنال را بر اساس ویژگی‌های محیط (اتم‌سفر و زمین) طراحی کنیم تا این لایه‌های طبیعی، به جای مسدود کردن مسیر، به یک «گذرگاه» برای انتقال سیگنال تبدیل شوند.

۳. شناسنامه فنی: فرکانس در برابر طول موج

قبل از اینکه سیگنال را راهی سفر کنیم، باید «شخصیت» او را تعیین کنیم. این کار با انتخاب فرکانس انجام می‌شود؛ پارامتری که مشخص می‌کند موج ما در برخورد با اتمسفر و موانع، چه واکنشی از خود نشان دهد.

رابطه طلایی: $c = f \times \lambda$

در این ترازوی فیزیکی، سرعت نور (c) ثابت است؛ بنابراین فرکانس و طول موج رابطه‌ای عکس با هم دارند:

۳. شناسنامه فنی: فرکانس در برابر طول موج

• **فرکانس (f):** تعداد نوسان در هر ثانیه. فرکانس بالاتر یعنی توانایی حمل دیتای بیشتر، اما در عین حال سیگنال در برابر موانع «کم طاقت» می شود و زودتر انرژی اش را از دست می دهد.

• **طول موج (λ):** فاصله ی فیزیکی بین دو قله ی موج. هرچه طول موج بزرگ تر باشد، سیگنال صبورتر است و قدرت عجیبی در «دور زدن» موانع و انحنای زمین دارد.

نکته راهبردی: انتخاب فرکانس، تعیین کننده مسیر حرکت سیگنال است؛ این انتخاب مشخص می کند که آیا موج باید روی سطح زمین حرکت کند، از لایه های آسمان بازتاب شود و یا به صورت دید مستقیم به مقصد برسد.

۴. نقشه راه: ما از کدام مسیر می‌رویم؟

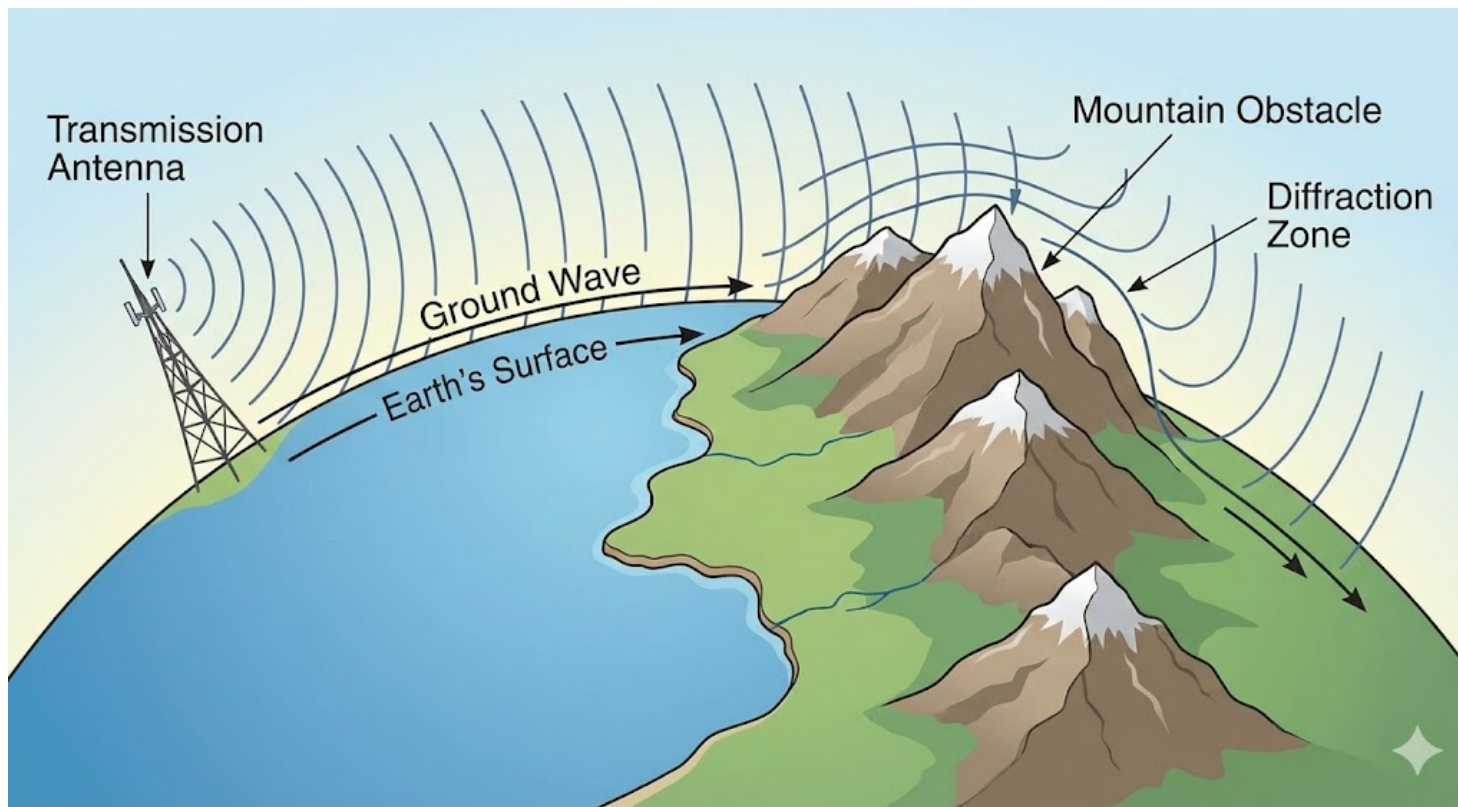
برای اینکه سیگنال را به گیرنده برسانیم، بسته به فاصله و فرکانسی که انتخاب کرده‌ایم، یکی از ۳ راه اصلی زیر را پیش رو داریم. هر کدام از این مسیرها، قوانین و چالش‌های خاص خودشان را دارند:

۱. مسیر سطحی (Ground Wave): در این روش، موج به جای فرار به فضا، انحنای زمین را «بغل» می‌کند و مسیرهای طولانی را طی می‌کند. (مختص فرکانس‌های پایین).
۲. مسیر آسمانی (Sky Wave): وقتی فاصله خیلی زیاد است، موج را به آسمان می‌فرستیم تا از لایه‌های جوی مثل یک «آینه» استفاده کند و به مقصد برسد.
۳. مسیر مستقیم (Space Wave): این راهکار دنیای مدرن است؛ شلیک مستقیم سیگنال بین دو آنتن که همدیگر را می‌بینند (مثل موبایل و ماهواره).

فوان پنجم: هدایت در مجاورت سطح
(موج زمینی)

۵. مکانیزم حرکت: فیزیک همراهی با زمین

در فرکانس‌های پایین، سیگنال به جای فرار به سمت فضا، زمین را به عنوان مسیر اصلی خود برمی‌گزیند. عامل اصلی این پدیده، ابعاد عظیم طول موج در این فرکانس‌هاست.



شکل ۵: نمایش حرکت موج زمینی در مجاورت سطح زمین

۵. مکانیزم حرکت: فیزیک همراهی با زمین

- پدیده پراش (Diffraction): زمانی که طول موج (30kHz تا 3MHz) در مقایسه با ابعاد موانع (تپه‌ها یا انحنای افق) بسیار بزرگ باشد، موج آن‌ها را «نمی‌بیند». در نتیجه، سیگنال به جای مسدود شدن، از لبه‌های مانع خم شده و نواحی پشت آن را هم پوشش می‌دهد.

نکته فنی: چرا قطبش عمودی؟

برای اینکه زمین بتواند موج را هدایت کند، میدان الکتریکی موج حتماً باید عمود بر سطح زمین باشد.

- این میدان، جریانی را در سطح زمین القا می‌کند که مثل یک «لنگر»، جبهه‌ی موج را به سمت پایین می‌کشد.

- اگر قطبش افقی باشد، زمین مثل یک اتصال کوتاه عمل کرده و بلافاصله انرژی موج را خنثی می‌کند.

در واقع زمین در این حالت نقش یک «سیم» یا «موج‌بر» را بازی می‌کند که انرژی را در امتداد
انحنای خود هدایت می‌نماید.

۶. چالش‌های مسیر: وقتی زمین انرژی را می‌بلعد

استفاده از زمین به عنوان سیم، رایگان نیست. زمین یک رسانای کامل نیست و در طول مسیر، بخشی از توان سیگنال را به گرما تبدیل می‌کند.

- تضعیف و رسانایی خاک: هرچه زمین رساناتر باشد، موج راحت‌تر حرکت می‌کند. به همین دلیل، برد موج سطحی روی آب دریا بسیار بیشتر از خاک خشک یا بیابان است.

- سقف فرکانسی: با بالا رفتن فرکانس، زمین تشنه‌تر می‌شود و انرژی را سریع‌تر جذب می‌کند. به همین دلیل این روش برای فرکانس‌های بالای 3MHz عملاً غیرممکن است.

- کاربرد در دنیای واقعی: این روش ستون فقرات رادیوهای AM و سیستم‌های ناوبری دریایی است؛ چرا که می‌تواند سیگنال را حتی به زیردریایی‌ها در اعماق کم برساند.

سوال: اگر بخواهیم فرکانس را بالا ببریم یا از اقیانوس‌ها رد شویم و زمین دیگر یاری نکند، چه باید کرد؟ (پاسخ در راهکار بعدی: موج آسمانی).

۷. پخش رادیو AM

رادیو AM، کلاسیک‌ترین و ملموس‌ترین نمونه‌ی استفاده از انتشار موج سطحی است که دهه‌هاست برای پوشش‌های محلی و منطقه‌ای به کار می‌رود.

چرا باند MF برای رادیو AM انتخاب شد؟

این رادیو در فرکانس‌های حدود 530kHz تا 1700kHz کار می‌کند.

- **طول موج‌های غول‌پیکر:** در این فرکانس‌ها، طول موج بین 175 تا 560 متر است! این ابعاد عظیم باعث می‌شود موج به راحتی ساختمان‌ها و تپه‌های شهری را دور بزند (پراش قوی).

- در طول روز، رادیو AM فقط متکی به موج سطحی است. (در بخش بعدی می‌بینیم که چرا در روز، مسیر آسمان بسته است!).

- **مزیت:** پوشش پایدار و مطمئن محلی بدون نیاز به دید مستقیم.

خوان ششم: آینه‌ای در دل آسمان
(موج آسمانی)

۸. راهکار دوم: موج آسمانی (Sky Wave)

وقتی هدف ما ارسال سیگنال به آن سوی اقیانوس‌هاست و زمین دیگر توان هدایت موج را ندارد، سرمان را بالا می‌گیریم. در این روش، به جای خزیدن روی زمین، از لایه‌های بالایی جو برای «پرش‌های بلند» استفاده می‌کنیم.

- **فراتر از افق:** برخلاف موج سطحی که با مانع برخورد می‌کند، موج آسمانی با زاویه‌ای مشخص به سمت فضا پرتاب می‌شود تا در نقطه‌ای بسیار دورتر به زمین برگردد.
- **باند فرکانسی:** این روش تخصیص فرکانس‌های HF (بین 3 تا 30 مگاهرتز) است.
- **چندین پرش (Multi-hop):** سیگنال می‌تواند بعد از برخورد به زمین دوباره به آسمان بازتاب شود و این چرخه را تا هزاران کیلومتر ادامه دهد.

۹. یونوسفر: آینه‌ی مخفی سیگنال‌ها

چه چیزی در آسمان وجود دارد که سیگنال را به زمین برمی‌گرداند؟ پاسخ در لایه‌ای به نام **یونوسفر (Ionosphere)** نهفته است که از ارتفاع ۶۰ تا ۸۰۰ کیلومتری زمین گسترده شده است.

فرآیند یونیزاسیون: ساخت آینه‌ی رادیویی

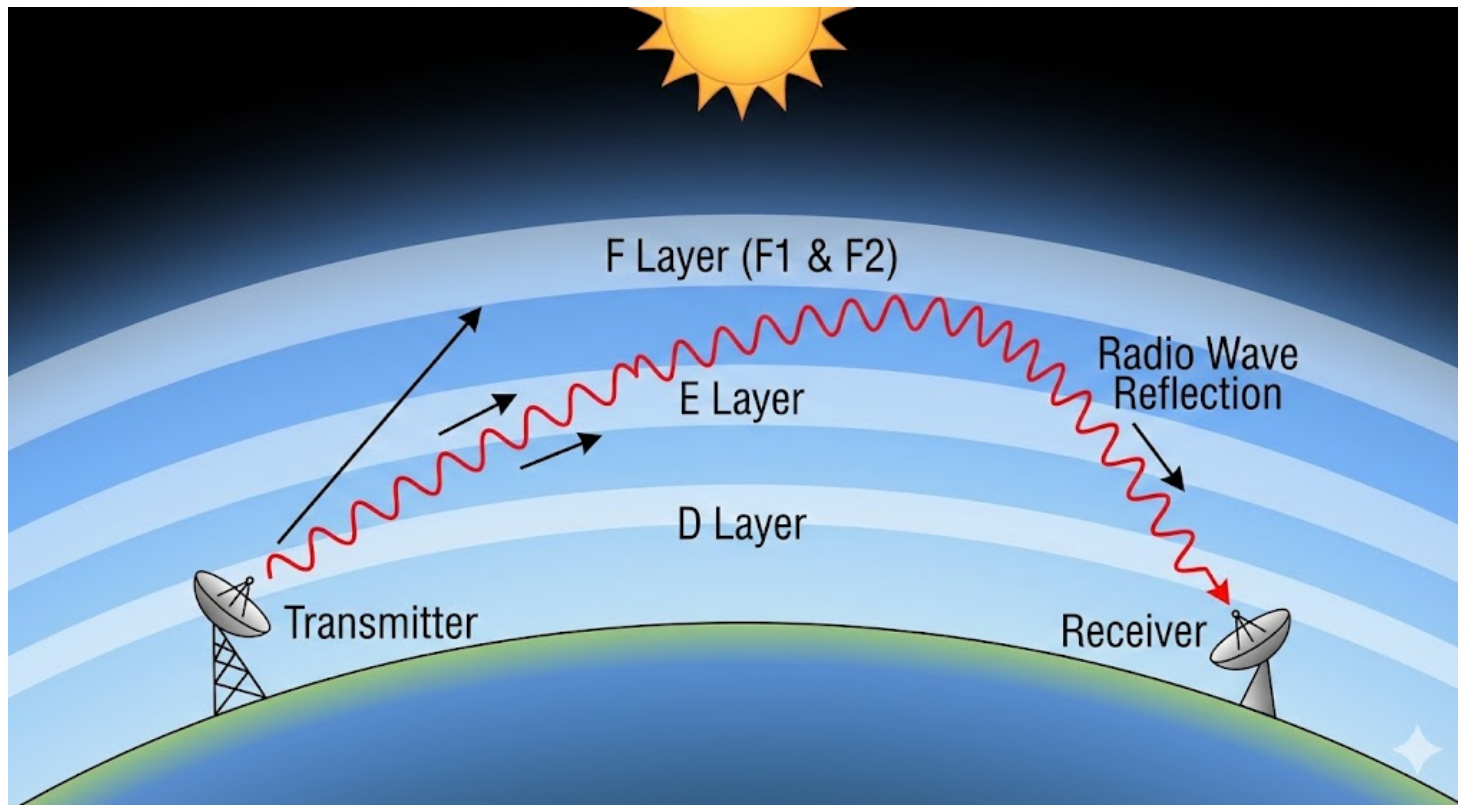
تابش شدید پرتوهای فرابنفش و ایکس خورشید به مولکول‌های نازک جو در ارتفاعات بالا، باعث جدا شدن الکترون‌ها از اتم‌ها می‌شود.

- این ابر الکترونی، محیطی رسانا ایجاد می‌کند که برای برخی فرکانس‌ها، دقیقاً مثل یک سطح فلزی صیقلی عمل می‌کند.

- سیگنال با ورود به این لایه، دچار شکست (Refraction) تدریجی شده و در نهایت به سمت زمین خم می‌شود.

۱۰. معماری آسمان: لایه‌های ED، F و

یونوسفر یک پارچه‌ی یکدست نیست؛ بلکه از لایه‌های متفاوتی تشکیل شده که هر کدام رفتار سیگنال را تغییر می‌دهند. این لایه‌ها بر اساس غلظت الکترون‌ها نام‌گذاری شده‌اند:



شکل ۶: ساختار لایه‌های یونوسفر

- **لایه D (پایین ترین لایه):** در روز تشکیل می شود و یک «دشمن» برای سیگنال است. این لایه مثل اسفنج انرژی امواج را جذب کرده و آن ها را تضعیف می کند.
- **لایه E (لایه میانی):** به بازتاب امواج کمک می کند اما با غروب خورشید به سرعت ضعیف می شود.
- **لایه F (بالا ترین و مهم ترین لایه):** قهرمان اصلی انتشار آسمانی است. در روز به دو لایه (F_1 و F_2) تقسیم می شود و در شب با هم ترکیب شده و بهترین بازتاب را فراهم می کند.

۱۱. چرا رادیو شب‌ها شفاف‌تر است؟

حالا می‌توانیم به سوالی که در بخش رادیو AM مطرح کردیم پاسخ دهیم. تغییرات شبانه‌روزی یونوسفر، کیفیت ارتباطات ما را زیر و رو می‌کند:

۱. **در طول روز:** تابش خورشید لایه سمی D را می‌سازد. سیگنال قبل از اینکه به لایه بازتاب‌دهنده اصلی (F) برسد، توسط لایه D بلعیده می‌شود. (به همین دلیل برد رادیو AM در روز کم است).

۲. **در طول شب:** خورشید می‌رود و لایه D به دلیل نبود تابش، ناپدید می‌شود.

۳. **نتیجه:** مسیر برای موج باز می‌شود؛ سیگنال مستقیماً به لایه F برخورد کرده و با کمترین تلفات به هزاران کیلومتر دورتر پرتاب می‌شود.

۱۲. وقتی آینه می‌شکند: مفهوم فرکانس بحرانی

آیا یونوسفر هر سیگنالی را با هر فرکانسی بازتاب می‌دهد؟ خیر! این لایه یک «سقف تحمل» دارد. اگر انرژی (فرکانس) موج خیلی زیاد باشد، یونوسفر دیگر نمی‌تواند آن را خم کند.

تعریف فرکانس بحرانی (f_c)

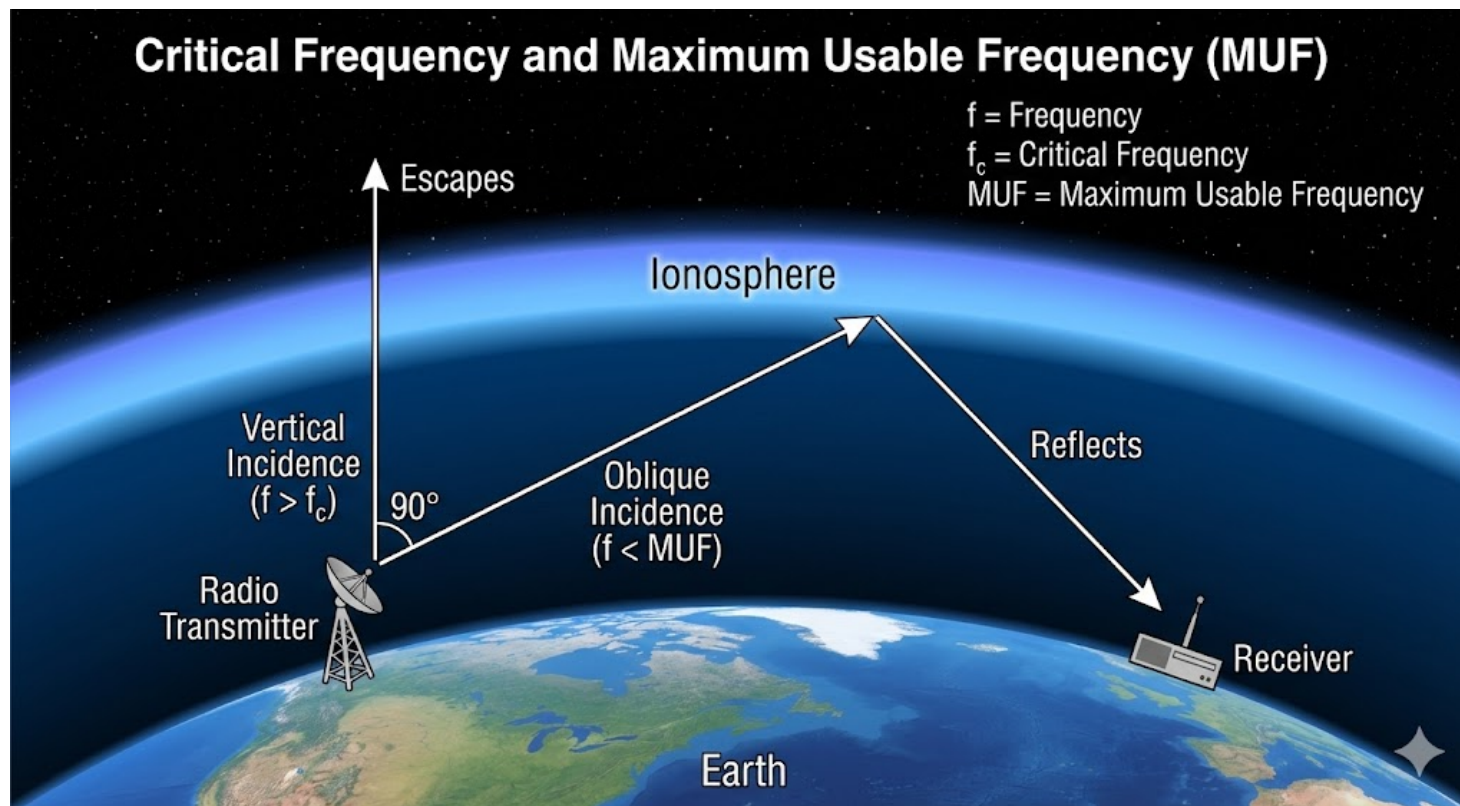
حداکثر فرکانسی است که اگر سیگنال آن را کاملاً عمودی (با زاویه ۹۰ درجه) به سمت یونوسفر بفرستیم، همچنان قادر به بازتاب آن به زمین باشد.

نبرد موج و پلاسما:

- اگر $f < f_c$: تراکم الکترون‌های یونوسفر برای خم کردن مسیر موج کافی است و سیگنال به زمین برمی‌گردد (ارتباط آسمانی برقرار است).
- اگر $f > f_c$: انرژی موج بر توانایی شکست لایه غلبه می‌کند. سیگنال، یونوسفر را «سوراخ» کرده و به فضای بیرونی فرار می‌کند.

۱۳. واقعیت مهندسی: زاویه تابش و MUF

در دنیای واقعی، ما به ندرت سیگنال را عمودی به آسمان می‌فرستیم؛ بلکه آن را با زاویه پرتاب می‌کنیم تا مسافت بیشتری را طی کند.



شکل ۷: نمایش زاویه تابش و حداکثر فرکانس قابل استفاده (MUF)

۱۳. واقعیت مهندسی: زاویه تابش و MUF

- **تأثیر زاویه:** وقتی موج با زاویه مایل به یونوسفر می خورد، راحت تر بازتاب می شود. بنابراین می توانیم از فرکانس هایی بالاتر از فرکانس بحرانی هم استفاده کنیم.
- **حداکثر فرکانس قابل استفاده (MUF):** بالاترین فرکانسی که در یک زاویه خاص، همچنان بازتاب می شود. مهندسان مخابرات HF همیشه باید زیر این مرز حرکت کنند.

جمع بندی استراتژیک و ورود به عصر جدید

پس فهمیدیم که برای فرکانس های خیلی بالا (مثل UHF و SHF که در موبایل و ماهواره استفاده می شوند)، یونوسفر دیگر آینه نیست، بلکه یک پنجره شفاف است.

سوال بعدی: حالا که سیگنال های مدرن ما از جو عبور می کنند، چه چالش های جدیدی در مسیر مستقیم (Line of Sight) و فضای بیرونی منتظر آنهاست؟ (موضوع فصل بعد).

فوان هفتم: عبور از جو (موج فضایی)

۱۴. عصر مدرن: وقتی سیگنال «مستقیم» می‌رود

در فصول قبل دیدیم که امواج یا روی زمین می‌خزیدند یا از آسمان بازتاب می‌شدند. اما با عبور از مرز ۳۰ تا ۴۰ مگاهرتز، قواعد بازی عوض می‌شود. سیگنال ما حالا آنقدر پراورزی است که لایه‌های جو دیگر برایش «آینه» نیستند، بلکه یک «پنجره شفاف» به سوی فضا هستند.

- **خروج از پیل:** این امواج (VHF تا EHF) یونوسفر را سوراخ کرده و مستقیم به فضا می‌روند.
- **شخصیت نورگونه:** در این مرحله، موج دقیقاً مثل یک «پرتو نور» رفتار می‌کند؛ فقط در خط مستقیم حرکت کرده و با برخورد به هر مانع کدر، متوقف می‌شود.
- **مأموریت:** این زیربنای دنیای مدرن ماست؛ از رادیو FM و تلویزیون تا شبکه‌های موبایل و رادارهای پیشرفته.

۱۵. استراتژی‌های نبرد: LoS، NLoS و فراتر از آن

در این دنیای «خط مستقیم»، موقعیت جغرافیایی تعیین کننده نوع ارتباط ماست. ما سیگنال را بر اساس موانع مسیر به سه روش مدیریت می‌کنیم:

- **دید مستقیم (LoS):** وضعیت ایده‌آل؛ فرستنده و گیرنده همدیگر را می‌بینند. (مثل دکل‌های مایکروویو نقطه به نقطه).
- **بدون دید مستقیم (NLoS):** سیگنال پشت ساختمان‌ها پنهان شده و فقط با «بازتاب» و «پراش» به گیرنده می‌رسد. (چالشی که هر روز با گوشی‌های موبایل‌مان داریم).
- **فراتر از افق (BLoS):** وقتی فاصله آنقدر زیاد است که انحنای زمین مانع می‌شود. در اینجا یا باید از ماهواره کمک بگیریم و یا از تکرارکننده‌ها (Repeater).

۱۶. جو زمین؛ یک عدسی نامرئی (Refraction)

اگرچه گفتیم این امواج مستقیم می‌روند، اما اتمسفر هنوز یک برگ برنده دارد. چگالی هوا با ارتفاع تغییر می‌کند و این یعنی سیگنال ما در یک «عدسی غول‌پیکر» در حال حرکت است.

پدیده شکست: کمکِ ناخواسته طبیعت

تغییر چگالی باعث می‌شود سرعت موج در ارتفاعات بالاتر کمی بیشتر باشد. نتیجه؟ مسیر مستقیم سیگنال کمی به سمت زمین خم می‌شود.

• **افق رادیویی:** به دلیل این خمیدگی، افق رادیویی حدود ۱۵ درصد دورتر از افق واقعی است.

• **قانون ۴/۳:** مهندسان برای ساده‌سازی، فرض می‌کنند زمین کمی بزرگتر است تا این «انحنای مهربان» را در محاسبات لحاظ کنند.

۱۷. منطقه فرنل: فراتر از یک نگاه ساده

یک تصور اشتباه در مهندسی این است که «اگر آنتن را می‌بینی، پس ارتباط برقرار است». اما سیگنال برای انتقال انرژی، به یک «فضای حیاتی» در اطراف خط مستقیم نیاز دارد.

- **حباب بیضوی:** موج در مسیری شبیه به یک خربزه یا بیضوی بین دو آنتن پخش می‌شود.
- **قانون ۶۰ درصد:** اگر مانعی (حتی لبه یک ساختمان) وارد این حباب شود، سیگنال را تضعیف می‌کند؛ حتی اگر مانع دقیقاً روی خط مستقیم نباشد!
- **نکته طراحی:** دکل‌ها باید آنقدر بلند باشند که این «فضای تنفس» سیگنال کاملاً خالی بماند.

۱۸. موانع محیطی: وقتی باران دشمن می‌شود

هرچه فرکانس بالاتر می‌رود (مثل ۵G)، سیگنال «نازک‌نارنجی‌تر» می‌شود! حالا حتی قطرات باران هم برای سیگنال ما تبدیل به سد می‌شوند.

- **تضعیف بارانی (Rain Fade):** در فرکانس‌های بالای ۱۰ گیگاهرتز، ابعاد قطرات باران با طول موج برابری می‌کند و انرژی سیگنال را می‌بلعد.
- **جذب گازی:** مولکول‌های اکسیژن و بخار آب در برخی فرکانس‌ها مثل اسفنج عمل کرده و انرژی را به گرما تبدیل می‌کنند.
- **دنیای شهری:** بازتاب از دیوارها باعث می‌شود نسخه‌های متعددی از یک پیام به گوشی برسد که گاهی همدیگر را خنثی می‌کنند (Fading).

۱۹. ایستگاه آخر: پیوند با ستارگان

وقتی سیگنال ما با موفقیت از تلاطم تروپوسفر و غلظت یونوسفر عبور کرد، وارد فضای بیکران می‌شود. جایی که ماهواره‌ها به عنوان «آینه‌های هوشمند» عمل می‌کنند.

- ماهواره‌های LEO و GEO: از استارلینک در نزدیکی زمین تا ماهواره‌های تلویزیونی در ارتفاع ۳۶ هزار کیلومتری.

- چالش فضایی: در خارج از جو، دیگر خبری از باران و مه نیست، اما با «کمربندهای پرانرژی وان‌آلن» و نویزهای کیهانی روبرو هستیم.

۲۰. جمع‌بندی: عصاره‌ی سفر سیگنال

در پایان این سفر هفت‌خوان، به این نتیجه می‌رسیم که مخبرات بی‌سیم صرفاً یک فرآیند الکترونیکی نیست، بلکه هنر انطباق هوشمندانه با طبیعت است.

سه رکن اصلی موفقیت در یک نگاه

- **شناخت بستر:** آموختیم که جو زمین (از تروپوسفر تا یونوسفر) نه یک سد فیزیکی، بلکه گذرگاه اصلی امواج ماست.
- **انتخاب استراتژی:** دریافتیم فرکانس تعیین می‌کند که روی زمین بخزیم (Ground)، از آسمان بپریم (Sky) یا مستقیم شلیک کنیم (Space).
- **مدیریت نبرد:** درک پدیده‌های بازتاب، شکست و پراش، مرز بین یک ارتباط قطع‌شده و یک لینک پایدار و مهندسی‌شده است.

حرف آخر: ما آموختیم که چگونه با استفاده از فیزیک، محدودیت‌های اتمسفر را به فرصت‌هایی برای اتصال بیکران در دنیای بی‌سیم تبدیل کنیم.