

مبانی انتشار امواج در شبکه‌های بی‌سیم

بررسی مکانیزم‌ها، مدل‌ها و چالش‌ها

اعضای گروه:

علی کارگر

سید محمد طاهای موسوی

رضا بوذرجمهری

پاییز ۱۴۰۴

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 «کم‌طاقت» می‌شود و زودتر انرژی‌اش را از دست می‌دهد.

• **طول موج (λ):** فاصله‌ی فیزیکی بین دو قله‌ی موج. هرچه طول موج بزرگ‌تر باشد، سیگنال صبورتر است و قدرت عجیبی در «دور زدن» موانع و انحنای زمین دارد.

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

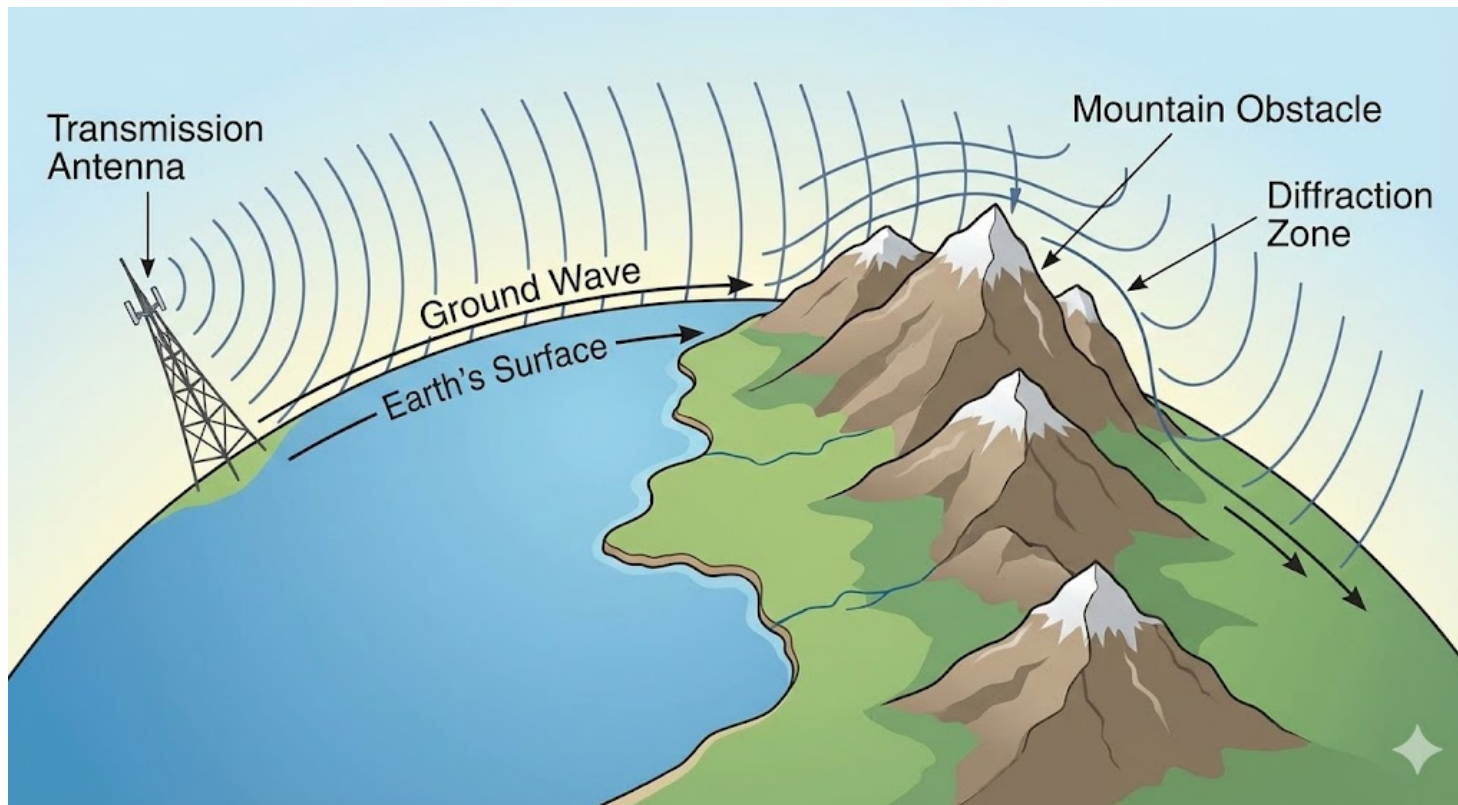
۴. نقشه راه: ما از کدام مسیر می‌رویم؟

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).

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.



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.

فصل دوم: آینه‌ای در دل آسمان

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

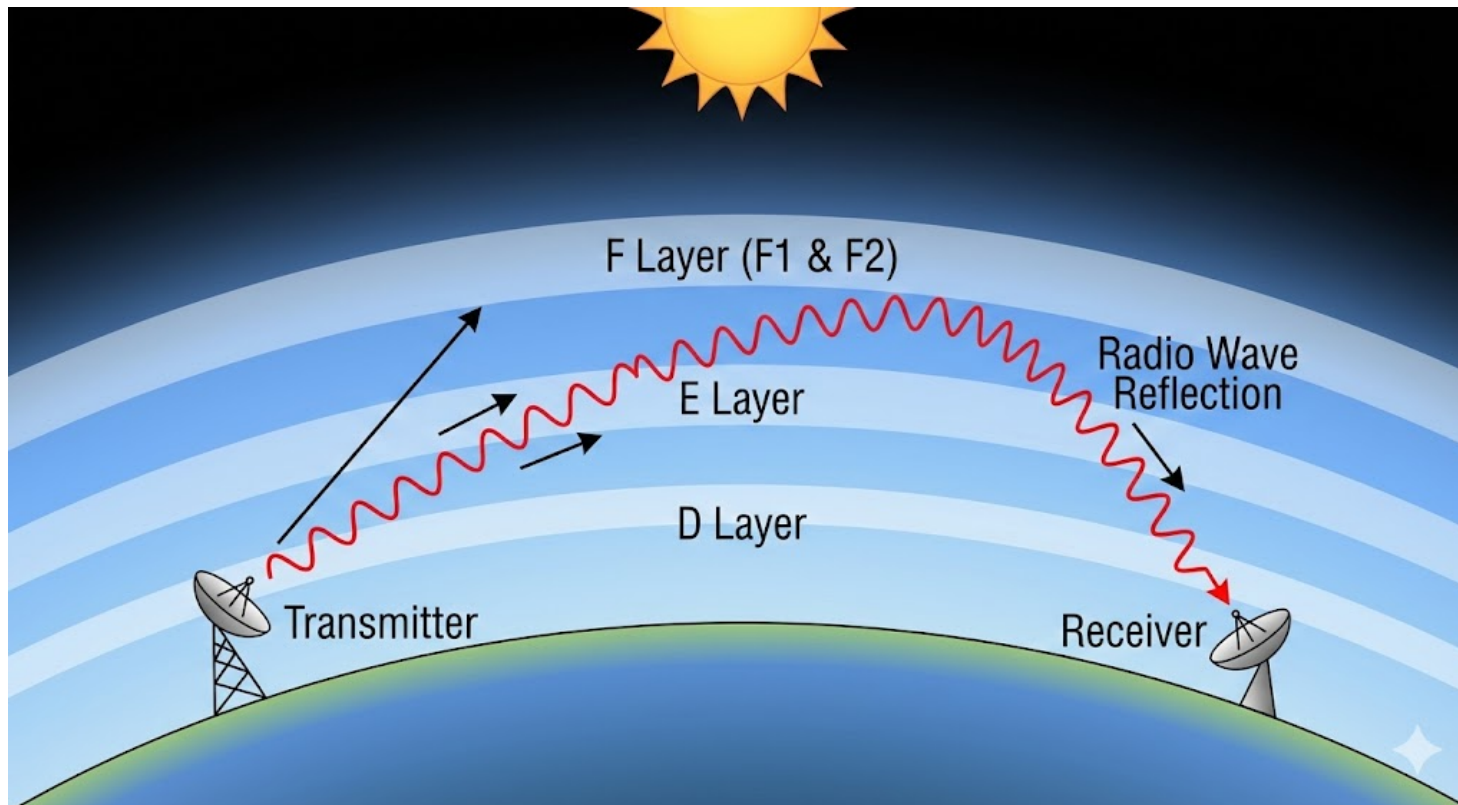
تابش شدید پرتوهای فرابنفش و ایکس خورشید به مولکول‌های نازک جو در ارتفاعات بالا، باعث جدا شدن الکترون‌ها از اتم‌ها می‌شود.

- 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:



- **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 می شکند: مفهوم فرکانس بحرانی

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

تعریف فرکانس بحرانی (f_c)

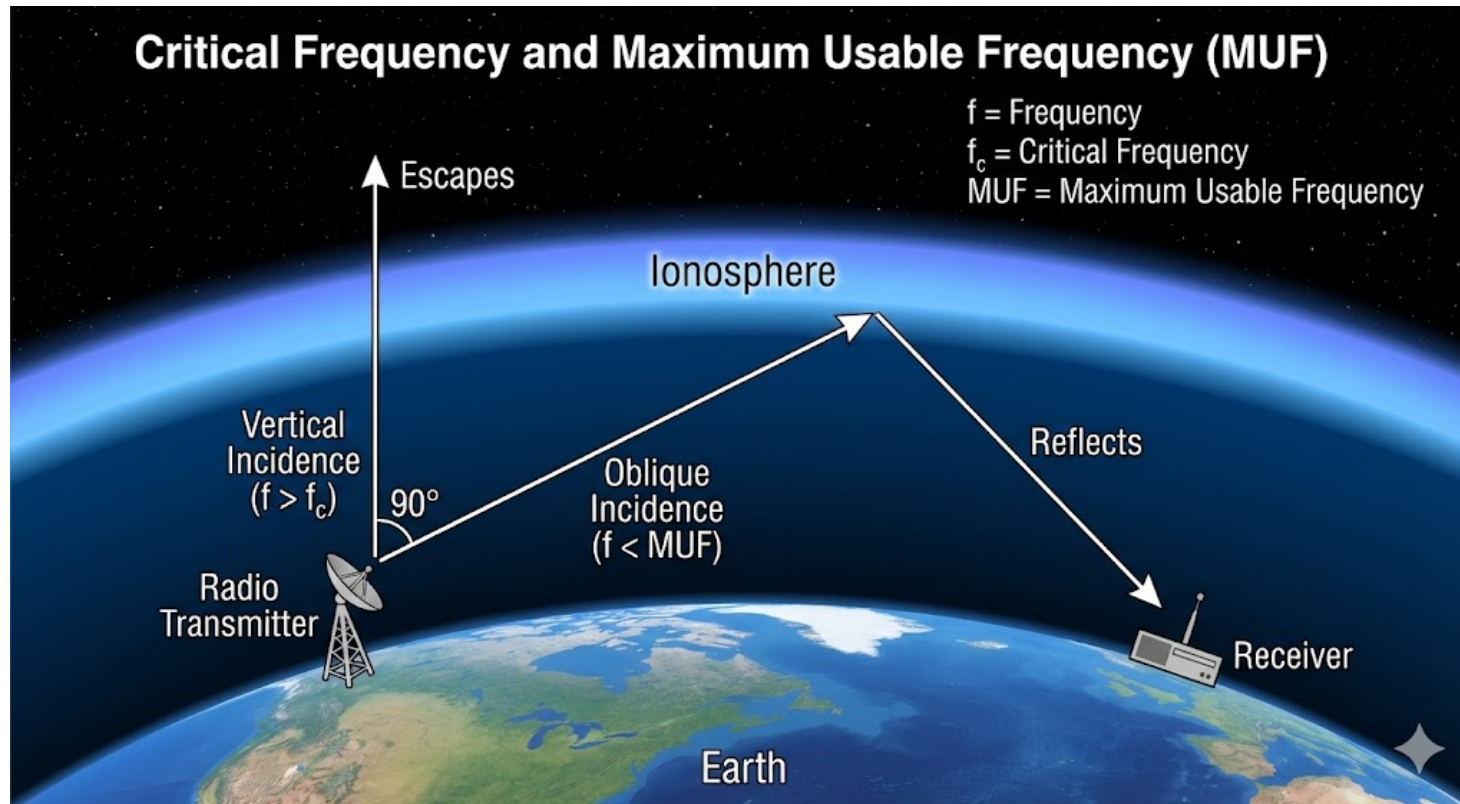
حداکثر فرکانسی است که اگر سیگنال آن را کاملاً عمودی (با زاویه ۹۰ درجه) به سمت یونوسفر بفرستیم، همچنان قادر به بازتاب آن به زمین باشد.

نبرد موج و پلاسما:

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

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.



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).

فصل سوم: عبور از جو

۱۴. عصر مدرن: چرا موج فضایی (Space Wave)؟

وقتی از فرکانس‌های بالای 30MHz صحبت می‌کنیم، طول موج‌ها آنقدر کوتاه می‌شوند که دیگر نمی‌توانند انحنای زمین را دور بزنند یا از یونوسفر بازتاب شوند. در این مرحله، استراتژی ما به «شلیک مستقیم» تغییر می‌کند.

- **سوراخ کردن آسمان:** این امواج انرژی کافی برای عبور از لایه‌های یونیزه جو را دارند و مستقیماً به فضا می‌روند.
- **رفتار نورگونه:** در این باند (VHF تا EHF)، موج دقیقاً مثل پرتو نور عمل می‌کند؛ یعنی در خط مستقیم حرکت کرده و با برخورد به هر مانع کدر، مسدود می‌شود.
- **کاربردها:** از پخش تلویزیونی و رادیو FM گرفته تا شبکه‌های موبایل و رادارهای پیشرفته.

۱۵. چالش دید مستقیم (Line of Sight)

در این روش، فرستنده و گیرنده باید «دید مستقیم» داشته باشند. اما دو عامل اصلی این دید را محدود می‌کنند:

۱. انحنای زمین: حتی در یک دشت کاملاً تخت، گرد بودن زمین باعث می‌شود که پس از طی مسافتی، آنتن گیرنده پشت افق پنهان شود.

۲. موانع جغرافیایی: ساختمان‌ها، کوه‌ها و حتی پوشش گیاهی غلیظ می‌توانند مسیر مستقیم سیگنال را قطع کنند.

راهکار مهندسی: افزایش ارتفاع آنتن‌ها تنها راه برای عقب راندن «افق» و افزایش برد در این روش است.

۱۶. جو زمین؛ یک عدسی نامرئی (Refraction)

سیگنال‌های ما در لایه‌ی پایینی جو (تروپوسفر) حرکت می‌کنند. این لایه یک محیط یکنواخت نیست و با افزایش ارتفاع، غلظت و فشار هوا کم می‌شود.

پدیده شکست (Refraction)

تغییر چگالی هوا باعث تغییر «ضریب شکست» می‌شود. این یعنی لایه‌های بالای جو، سرعت موج را کمی بیشتر از لایه‌های پایین تغییر می‌دهند.

- نتیجه: مسیر مستقیم موج، کمی به سمت زمین خم می‌شود.
- مزیت: این خمیدگی به ما اجازه می‌دهد فراتر از افق نوری (آنچه چشم می‌بیند) را پوشش دهیم.

۱۷. مدل ریاضی: قانون $4/3$ و شعاع مؤثر زمین

مهندسان برای اینکه محاسبات پیچیده‌ی شکستِ جو را ساده کنند، از یک ترفند ریاضی استفاده می‌کنند. آن‌ها فرض می‌کنند که مسیر موج «صاف» است، اما در عوض زمین را کمی بزرگتر تصور می‌کنند!

- ضریب K : در شرایط استاندارد جوی، این ضریب برابر 1.33 (یا همان $4/3$) است.
- محاسبه برد افق رادیویی: با استفاده از این مدل، مسافت تا افق رادیویی (d) بر حسب کیلومتر و ارتفاع آنتن (h) بر حسب متر چنین تخمین زده می‌شود:

$$d \approx 4.12 \times \sqrt{h}$$

نکته: این یعنی افق رادیویی حدود ۱۵ درصد دورتر از افق واقعی است.

۱۸. منطقه فرنل (Fresnel Zone): چرا دیدن کافی نیست؟

یک تصور اشتباه این است که اگر گیرنده را ببینیم، ارتباط کامل است. اما واقعیت این است که موج نیاز به یک «فضای حیاتی» در اطراف خط مستقیم دارد.

- **بیضوی فرنل:** سیگنال رادیویی شبیه یک لوله باریک نیست، بلکه به شکل یک بیضوی پخش می‌شود.

- **قانون ۶۰ درصد:** اگر موانعی وارد این بیضوی شوند، حتی اگر خط مستقیم را قطع نکنند، باعث تداخل فازی و تضعیف شدید سیگنال می‌شوند.

- **اهمیت در طراحی:** دکل‌ها باید آنقدر بلند باشند که حداقل ۶۰٪ از منطقه اول فرنل کاملاً خالی از مانع باشد.

۱۹. موانع جوی: وقتی باران دشمن می‌شود

در فرکانس‌های بالای 10GHz (مثل ماهواره‌های تلویزیونی و 5G)، ابعاد قطرات باران با طول موج سیگنال رقابت می‌کنند.

- **تضعیف بارانی (Rain Fade):** قطرات باران انرژی موج را جذب کرده یا آن را پراکنده (Scattering) می‌کنند.

- **جذب گازی:** مولکول‌های بخار آب و اکسیژن در فرکانس‌های خاصی (مثل 22 و 60GHz) انرژی موج را به شدت می‌بلعند.

چرا 5G برد کمی دارد؟ یکی از دلایل اصلی، همین حساسیت شدید به موانع جوی و جذب توسط اکسیژن هواست.

۲۰. محوشدگی (Fading) و مسیرهای چندگانه

در محیط‌های شهری، سیگنال مستقیم تنها چیزی نیست که به گوشی ما می‌رسد. موج به دیوارها برخورد کرده و نسخه‌های متعددی از آن به گیرنده می‌رسد.

- **تداخل مخرب:** اگر نسخه‌ی بازتابی با اختلاف فاز به گیرنده برسد، می‌تواند سیگنال اصلی را خنثی کند.

- **نتیجه:** این پدیده باعث می‌شود با یک حرکت کوچک گوشی، کیفیت سیگنال تغییر کند (Multipath Fading).

۲۱. مرز نهایی: ارتباطات ماهواره‌ای

وقتی سیگنال از تمام لایه‌های جو عبور می‌کند، وارد فضای خلأ می‌شود. ماهواره‌ها در این مرحله نقش «تکرارکننده‌های معلق» را بازی می‌کنند.

- ماهواره‌های GEO و LEO: از فاصله‌ی ۵۰۰ کیلومتری (استارلینک) تا ۳۶ هزار کیلومتری، سیگنال مسیر طولانی را طی می‌کند.

- کمربند وان‌آلن: این منطقه مملو از ذرات پرانرژی است که می‌تواند باعث ایجاد «نویز ضربه‌ای» یا آسیب به سخت‌افزار ماهواره شود.

فصل چهارم: فیزیک تعامل و تغییرات در مسیر

۲۲. واقعیتِ مسیر: موج در میدان نبرد

در دنیای واقعی، هیچ سیگنالی در خلأ مطلق حرکت نمی‌کند. هر موجی با هر فرکانسی، در مسیر خود با ۵ پدیده فیزیکی اصلی روبروست.

یک اصل بنیادین

پدیده‌های بازتاب، شکست، پراش، پراکنش و جذب در تمام فرکانس‌ها وجود دارند؛ اما بسته به «طول موج» و «جنس محیط»، شدت اثرگذاری یکی از آن‌ها به بقیه غلبه می‌کند.

۲۳. بازتاب (Reflection): برخورد با آینه‌های محیطی

زمانی رخ می‌دهد که موج به سطحی بزرگتر از طول موج خود برخورد کند.

- رفتار هندسی: زاویه تابش و بازتاب برابر است. سطوح صیقلی مثل شیشه ساختمان‌ها یا سطح آب، بهترین بازتاب‌دهنده‌ها هستند.
- در عمل: بازتاب باعث می‌شود سیگنال از مسیرهای مختلف (Multipath) به ما برسد؛ این اتفاق گاهی باعث تقویت و گاهی باعث خنثی شدن سیگنال می‌شود.

۲۴. شکست (Refraction): خم شدن در مرز محیط‌ها

شکست، تغییر جهت موج هنگام عبور از محیط‌هایی با چگالی متفاوت است. این پدیده، «مغز متفکر» ارتباطات دوربرد است.

- **شکست جوی:** غلظت هوا در تروپوسفر و یونوسفر یکنواخت نیست. این تغییر غلظت باعث می‌شود سرعت موج تغییر کرده و مسیر آن به سمت زمین «خم» شود.
- **نقش استراتژیک:** اگر شکست نبود، امواج آسمانی هرگز از یونوسفر به زمین برنمی‌گشتند و امواج فضایی نمی‌توانستند انحنای زمین را تا حدی پوشش دهند.

۲۵. پراش (Diffraction): هنر دور زدن موانع

- پراش به موج اجازه می‌دهد تا لبه‌های تیز موانع را دور بزند و به «سایه‌ی رادیویی» نفوذ کند.
- وابستگی به فرکانس: در فرکانس‌های پایین (رادیو AM)، پراش بسیار قدرتمند است و کوه‌ها را دور می‌زند.
 - در فرکانس‌های بالا: با افزایش فرکانس، پدیده پراش ضعیف می‌شود. به همین دلیل در شبکه ۵G، کوچکترین مانع (مثل یک درخت) می‌تواند ارتباط را قطع کند.

۲۶. پراکنش (Scattering): تفرق در سطوح ناهموار

اگر ابعاد مانع کوچک تر یا در حد طول موج باشد (مثل برگ درختان یا قطرات باران)، موج در تمام جهات پخش می شود.

- تفاوت با بازتاب: در اینجا نظمِ زاویه‌ی بازتاب وجود ندارد و انرژی سیگنال در فضای اطراف پراکنده می شود.

- نتیجه: باعث می شود سیگنال ضعیف شود اما در عین حال امکان دریافت سیگنال در نقاطی که دید مستقیم ندارند را فراهم می کند.

۲۷. جذب (Absorption): پایان سفر انرژی

در این پدیده، انرژی الکترومغناطیسی موج توسط ماده بلعیده شده و به گرما تبدیل می شود.

- **موانع جاذب:** دیوارهای بتنی خیس، فلزات و حتی مولکول های اکسیژن در فرکانس های خاص.

- **تضعیف بارانی:** در فرکانس های بالای ۱۰ GHz، قطرات باران مثل اسفنج انرژی سیگنال را جذب می کنند.