



۱ کاربرد پروتکل CDMA و چرایی توسعه آن

CDMA یا Code Division Multiple Access یکی از روش‌های multiple access در سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم است که به کاربران مختلف اجازه می‌دهد به‌طور همزمان از یک باند فرکانسی مشترک استفاده کنند. برخلاف روش‌های سنتی مانند FDMA (دسترسی چندگانه با تقسیم فرکانس) و TDMA (دسترسی چندگانه با تقسیم زمان)، در CDMA کاربران از یک پهنای باند مشترک استفاده می‌کنند اما هر کاربر با یک کد منحصر به فرد شناسایی و از سایر کاربران متمایز می‌شود. این تکنیک باعث افزایش ظرفیت شبکه، بهبود کیفیت تماس‌ها، کاهش تداخل و افزایش امنیت ارتباطات می‌شود.

ایده اصلی CDMA بر اساس تکنیکی به نام spread spectrum بنا شده است که در آن سیگنال‌های کاربران با استفاده از کدهای شبه تصادفی گسترش می‌یابند. این روش نه تنها امنیت را افزایش می‌دهد بلکه در محیط‌هایی که نویز و تداخل زیاد است، ارتباطات را پایدارتر می‌کند. به دلیل این ویژگی‌ها، CDMA به عنوان یک فناوری کلیدی در شبکه‌های تلفن همراه نسل دوم (2G)، نسل سوم (3G) و برخی از فناوری‌های ارتباطی مدرن مورد استفاده قرار گرفته است.

دلایل توسعه CDMA

قبل از توسعه CDMA، بیشتر سیستم‌های مخابراتی از روش‌های FDMA و TDMA استفاده می‌کردند. در FDMA، پهنای باند کلی به باندهای فرکانسی کوچکتر تقسیم می‌شود و هر کاربر یک باند مشخص را اشغال می‌کند. این روش اگرچه ساده است، اما کارایی کمی دارد و ظرفیت شبکه را محدود می‌کند. در TDMA، زمان به شکاف‌هایی تقسیم می‌شود و هر کاربر در یک بازه زمانی مشخص داده‌های خود را ارسال می‌کند. با افزایش تعداد کاربران، کارایی این روش کاهش می‌یابد و تأخیر ارتباطات افزایش پیدا می‌کند.

CDMA به عنوان راه‌حلی برای این محدودیت‌ها توسعه یافت. این فناوری با استفاده از کدهای شبه تصادفی، امکان ارسال همزمان سیگنال‌های مختلف را در یک باند فرکانسی مشترک فراهم می‌کند. از آنجاکه سیگنال‌های کاربران با کدهای متفاوت مدوله می‌شوند، گیرنده می‌تواند سیگنال مربوط به خود را شناسایی و بازیابی کند، بدون آنکه تحت تأثیر سیگنال‌های دیگر قرار گیرد. این ویژگی باعث می‌شود ظرفیت شبکه به میزان قابل توجهی افزایش یابد، زیرا همه کاربران می‌توانند به صورت همزمان در یک باند مشترک فعالیت کنند. علاوه بر این، CDMA نسبت به نویز و تداخل مقاوم‌تر است، که آن را به گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای نظامی و ارتباطات ایمن تبدیل کرده است.

کاربردهای CDMA

CDMA در طیف وسیعی از فناوری‌های مخابراتی و ارتباطی مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از مهم‌ترین کاربردهای آن در شبکه‌های تلفن همراه است. در نسل دوم (2G) و نسل سوم (3G) تلفن‌های همراه، CDMA به عنوان یک فناوری اصلی به کار گرفته شد تا کیفیت تماس‌ها افزایش

یابد، ظرفیت شبکه بهینه شود و ارتباطات ایمن تر گردد. به دلیل قابلیت های بالای CDMA، بسیاری از اپراتورهای مخابراتی مانند Verizon و Sprint در ایالات متحده از این فناوری در شبکه های خود استفاده کردند.

علاوه بر شبکه های سلولی، CDMA در ارتباطات ماهواره ای نیز کاربرد دارد. این فناوری به ویژه در سیستم های مخابراتی نظامی برای جلوگیری از استراق سمع و افزایش امنیت ارتباطات مورد استفاده قرار می گیرد. در سیستم های GPS (سامانه موقعیت یابی جهانی)، CDMA به عنوان یک فناوری کلیدی برای ارسال سیگنال های موقعیت یابی با دقت بالا به کار گرفته شده است. همچنین، در شبکه های بی سیم مانند Wi-Fi و Bluetooth، از اصول spread spectrum که اساس CDMA است، برای افزایش کیفیت و کاهش تداخل استفاده می شود.

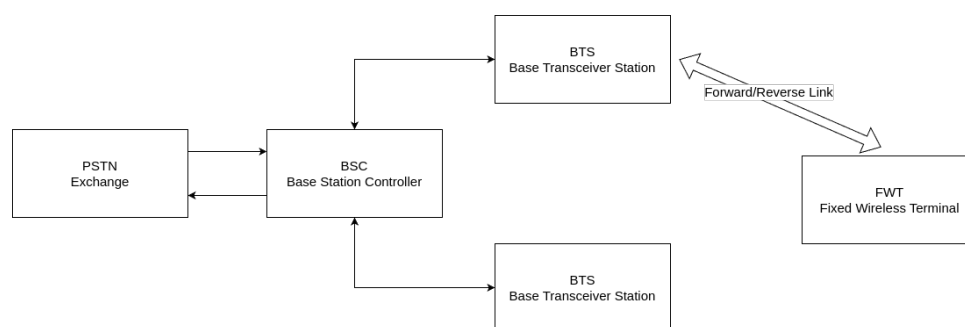
یکی دیگر از کاربردهای مهم CDMA در سامانه های حسگر بی سیم و اینترنت اشیا (IoT) است. این فناوری به دستگاه های کوچک و کم مصرف اجازه می دهد که در یک محیط با تراکم بالا به طور همزمان ارتباط برقرار کنند، بدون آنکه کیفیت سیگنال افت پیدا کند. به دلیل این قابلیت ها، CDMA همچنان به عنوان یک فناوری مهم در بسیاری از سیستم های مخابراتی و ارتباطی مدرن مورد استفاده قرار می گیرد.

۲ اتصالات و مدارات لایه فیزیکی

از آنجا پروتکل CDMA یک پروتکل wireless است، اتصالات فیزیکی در آن مفهوم چندانی ندارند. با این حال ما معماری لایه فیزیکی آن را به طور دقیق بررسی می کنیم. پروتکل CDMA به طور مستقیم جزئیات پیاده سازی را ارائه نکرده است و به آن را سازنده واگذار کرده است. ما برای مثال پیاده سازی cdmaOne را بررسی می کنیم.

معماری و کانال های cdmaOne

در شبکه cdmaOne (IS-95)، اجزای BTS، BSC، FWT و Exchange PSTN نقش های مهمی در برقراری ارتباط بین کاربران موبایل و شبکه عمومی سوئیچ شده تلفن (PSTN) ایفا می کنند. در شکل زیر نحوه ارتباط آنها با یکدیگر مشخص است:



:FWT - Fixed Wireless Terminal

ترمینال بی سیم ثابت دستگاهی است که از طریق سیگنال های رادیویی به شبکه متصل می شود و خدماتی مشابه تلفن ثابت ارائه می دهد. sFWT به کاربران در مکان های ثابت این امکان را می دهد که بدون نیاز به اتصالات سیمی، از خدمات شبکه موبایل استفاده کنند. این دستگاه ها به ویژه در مناطقی که کشیدن کابل های فیزیکی دشوار یا پرهزینه است، مفید هستند.

:BTS - Base Transceiver Station

ایستگاه فرستنده-گیرنده پایه تجهیزاتی است که ارتباط بی‌سیم بین ایستگاه‌های موبایل و شبکه را فراهم می‌کند. sBTS وظیفه انتقال و دریافت سیگنال‌های رادیویی را بر عهده دارند و کارهایی مانند انتقال و دریافت سیگنال، تغییر فرکانس و کنترل توان را انجام می‌دهند. آن‌ها معمولاً در سایت‌های سلولی قرار دارند و مسئول پوشش مناطق جغرافیایی خاصی به نام سلول هستند.

:BSC - Base Station Controller

کنترل‌کننده ایستگاه پایه، چندین BTS را در یک شبکه مدیریت می‌کند. sBSC بر راه‌اندازی، نگهداری و خاتمه کانال‌های رادیویی نظارت می‌کند، جابجایی بین sBTS را مدیریت می‌کند و پارامترهای کنترل توان و تغییر فرکانس را تنظیم می‌کند. آن‌ها به‌عنوان واسطه‌ای بین شبکه دسترسی رادیویی و شبکه هسته عمل می‌کنند و از استفاده بهینه از منابع و مدیریت تماس‌ها اطمینان حاصل می‌کنند.

:PSTN Exchange - Public Switched Telephone Network Exchange

سوئیچ شبکه عمومی تلفن سوئیچ‌شده، مؤلفه‌ای مرکزی در شبکه تلفن سنتی است که تماس‌ها را بین خطوط تلفن مختلف مسیریابی می‌کند. در زمینه cdmaOne، PSTN Exchange با شبکه موبایل ارتباط برقرار می‌کند تا کاربران موبایل را به سیستم تلفن عمومی متصل کند. این سوئیچینگ تماس‌ها، مسیریابی و اطمینان از اتصال صحیح تماس‌ها به تلفن‌های ثابت و سایر شبکه‌ها را انجام می‌دهد.

رابط هوا (Air Interface) و انواع کانال‌ها در cdmaOne

رابط هوا، واسطه‌ای است که ارتباط بی‌سیم بین ایستگاه‌های پایه و ایستگاه‌های موبایل را فراهم می‌کند. در cdmaOne، این رابط از تکنیک‌های دسترسی چندگانه تقسیم کدینک (CDMA) استفاده می‌کند تا چندین کاربر بتوانند به‌صورت هم‌زمان از پهنای باند مشترک استفاده کنند.

کانال پایلوت (Pilot Channel):

کانالی است که توسط ایستگاه پایه ارسال می‌شود و سیگنالی بدون مدولاسیون است. کانال پایلوت به ایستگاه‌های موبایل کمک می‌کند تا با شبکه همگام‌سازی شوند و کیفیت کانال را تخمین بزنند.

کانال همگام‌سازی (Synchronization Channel):

این کانال اطلاعات زمان‌بندی را به ایستگاه‌های موبایل ارائه می‌دهد. کانال همگام‌سازی به ایستگاه‌های موبایل کمک می‌کند تا با ساختار فریم شبکه همگام شوند.

کانال پیجینگ (Paging Channel):

کانالی است که توسط ایستگاه پایه برای هشدار دادن به ایستگاه‌های موبایل درباره تماس‌های ورودی یا پیام‌ها ارسال می‌شود. کانال پیجینگ به ایستگاه‌های موبایل اطلاع می‌دهد که تماس یا پیامی برای آن‌ها وجود دارد.

کانال ترافیک (Traffic Channel):

تعریف و نقش: کانالی است که داده‌های کاربر، از جمله مکالمات صوتی و داده‌ها، بین ایستگاه پایه و ایستگاه موبایل منتقل می‌کند. کانال ترافیک مسئول انتقال داده‌های کاربر است و می‌تواند نرخ‌های مختلفی داشته باشد.

کانال دسترسی (Access Channel):

این کانال به ایستگاه‌های موبایل اجازه می‌دهد تا ارتباطی با ایستگاه پایه برقرار کنند، معمولاً برای درخواست‌های راه‌اندازی تماس. کانال دسترسی به ایستگاه‌های موبایل این امکان را می‌دهد که با ایستگاه پایه ارتباط برقرار کنند و درخواست‌های خود را ارسال کنند.

کانال تأیید (Acknowledgment Channel):

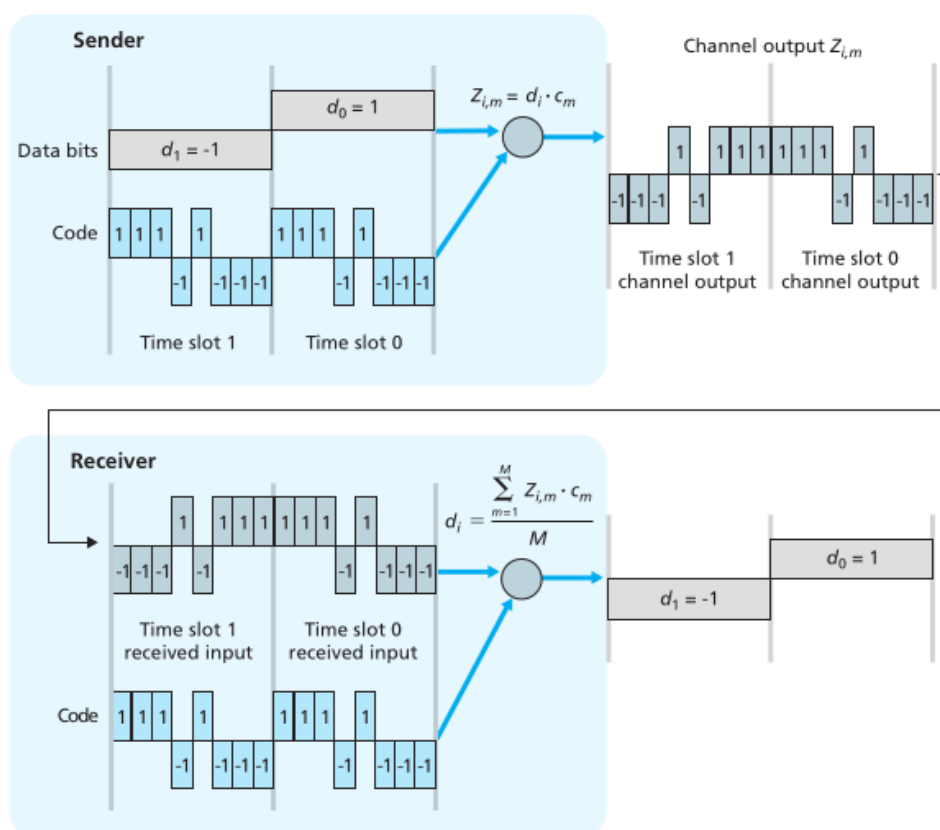
این کانال به ایستگاه‌های موبایل اجازه می‌دهد تا بازخوردی به ایستگاه پایه ارسال کنند، مانند تأیید دریافت بسته‌های داده. کانال تأیید به ایستگاه‌های موبایل این امکان را می‌دهد که به ایستگاه پایه اطلاع دهند که داده‌ها به درستی دریافت شده‌اند.

این اجزا و کانال‌ها با همکاری یکدیگر، ارتباطات بی‌سیم را در شبکه cdmaOne ممکن می‌سازند و از کیفیت و کارایی بالای خدمات اطمینان حاصل می‌کنند.

۳ انکودینگ و نحوه تولید سیگنال

۱.۳ انکودینگ

همان طور که در بخش ۱ هم اشاره شد، پروتکل یک پروتکل Code Division است. بنابراین انکودینگ آن بر اساس اختصاص یک کد به هر فرستنده اختصاص داده می‌شود صورت می‌گیرد. هر فرستنده یک Chip Rate دارد که کوچکترین واحد سیگنالینگ آن است. سپس هر داده به واسطه یک کد M بیتی کد می‌شود. به این صورت که هر ۰ یا ۱ در نظر می‌گیریم. سپس مقدار بیت داده را در تمام بیت‌های کد ضرب می‌کنیم و ارسال می‌کنیم. گیرنده نیز با ضرب دوباره محتوای کد شده را کدکشی می‌کند. در تصویر زیر این فرآیند مشخص شده است.



تولید سیگنال

در مدل های اولیه CDMA، از روش سیگنالینگ BPSK استفاده می شد. در نمونه های جدیدتر مانند CDMA2000 از QPSK استفاده می شود.

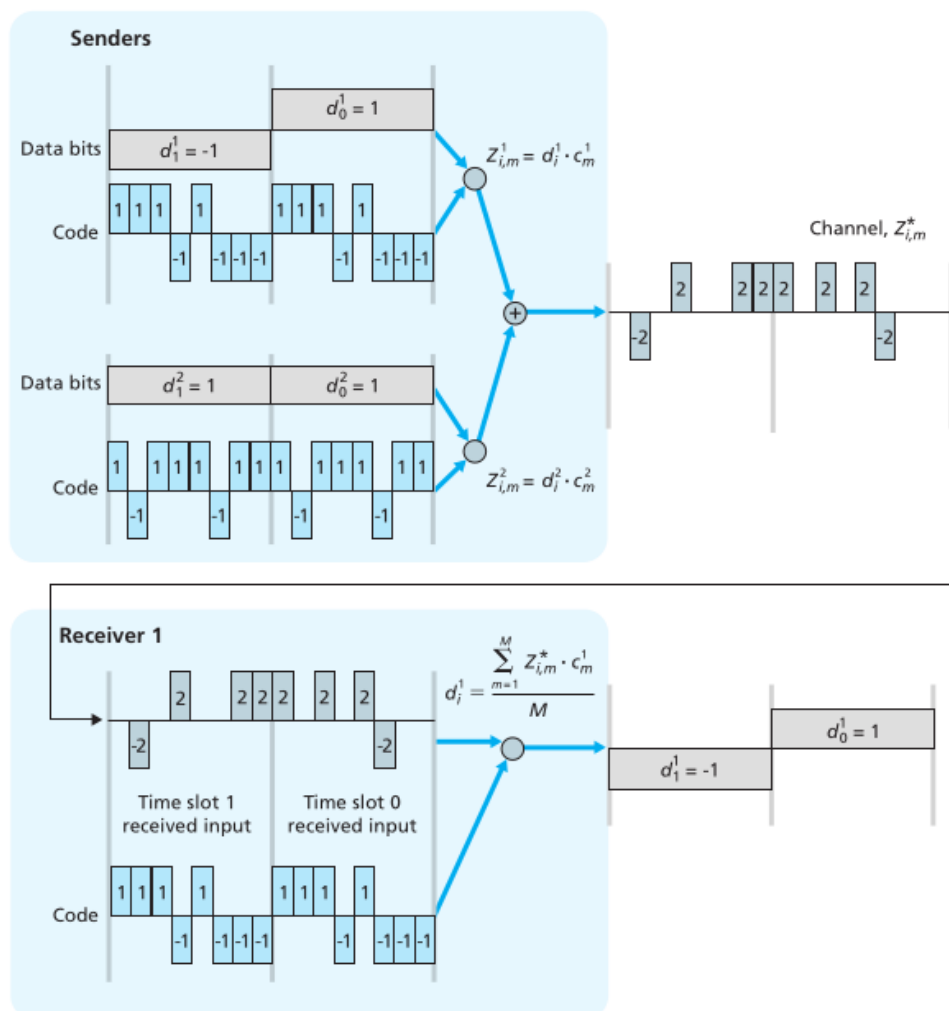
۴ اتصال چندین دستگاه و مدیریت برخورد

در CDMA، چندین فرستنده می توانند به طور همزمان داده های خود را ارسال کنند بدون اینکه تداخل و برخوردی میان آن ها رخ دهد. این ویژگی به دلیل استفاده از کدهای خاصی به نام کدهای شبه تصادفی (PN codes) یا کدهای متعامد (Orthogonal codes) است. هر فرستنده یک کد منحصر به فرد دریافت می کند که به عنوان یک شناسه ی ویژه برای آن فرستنده عمل می کند. این کدها به گونه ای طراحی شده اند که در هنگام جمع شدن سیگنال های مختلف، امکان تفکیک هر سیگنال بدون ایجاد تداخل فراهم شود.

اورتگونال بودن این کدها بدین معناست که اگر دو کد متعلق به دو فرستنده مختلف را در هم ضرب داخلی بگیریم، نتیجه صفر خواهد شد. این خاصیت باعث می شود که گیرنده بتواند سیگنال مربوط به هر فرستنده را با اعمال همان کد بر روی سیگنال دریافتی استخراج کند. در واقع، هر گیرنده با دانستن کد فرستنده ی مورد نظر، می تواند تنها اطلاعات مربوط به آن را بازیابی کند و سایر سیگنال ها را که به عنوان نویز دیده می شوند، نادیده بگیرد.

در عمل، فرستنده های مختلف داده های خود را با استفاده از کدهای خود ضرب کرده و سپس به صورت یک سیگنال ترکیبی روی کانال ارسال می کنند. در سمت گیرنده، این سیگنال ترکیبی با کد مربوطه همبستگی داده می شود که باعث استخراج داده ی صحیح آن فرستنده می شود. سایر سیگنال هایی که از فرستنده های دیگر آمده اند، به دلیل اورتگونال بودن کدها، به صفر میل کرده و تأثیری بر سیگنال بازیابی شده ندارند.

به این ترتیب، امکان ارتباط همزمان چندین فرستنده بدون ایجاد برخورد یا تداخل فراهم می‌شود. در شکل زیر فرآیند فرستادن کد همزمان توسط دو فرستنده و عدم تداخل آنها در گیرنده به علت متعام بودن نشان داده شده است:



۵ آدرس‌دهی و مسیریابی

در CDMA، برخلاف شبکه‌های IP، کاربران آدرس‌های مشخصی برای مسیریابی ترافیک ندارند. در عوض، کدهای تخصیص‌یافته به هر کاربر به عنوان شناسه‌ای منحصر به فرد عمل می‌کنند که کاربران و کانال‌های مختلف را از یکدیگر متمایز می‌سازد.

کانال‌های منطقی و ساختار آنها

منابع مختلف به بررسی کانال‌های منطقی (Logical Channels) پرداخته‌اند که شامل F-FCH, R-ACH, F-PCH, F-DCCH, R-DCCH, F-SCH, R-SCH می‌شود. این کانال‌ها به کانال‌های فیزیکی نگاشت شده و برای کاربران مشخصی تخصیص داده می‌شوند. ایستگاه پایه (Base Station) مسئول پیگیری و مدیریت تخصیص این کانال‌ها و کدهای متناظر آنها است.

- کانال‌های مستقیم و معکوس (Forward and Reverse Channels): بین کانال‌های مستقیم (از ایستگاه پایه به موبایل)

و کانال‌های معکوس (از موبایل به ایستگاه پایه) تفاوت وجود دارد. هر نوع کانال دارای فضای آدرس‌دهی و کدگذاری مخصوص به خود است.

- کانال‌های اختصاصی و مشترک (Dedicated and Common Channels): برخی کانال‌ها مانند کانال‌های ترافیکی فقط برای یک کاربر اختصاص داده می‌شوند، در حالی که برخی دیگر مانند کانال دسترسی (Access Channel) و کانال پیجینگ (Paging Channel) مشترک هستند.

کدهای متعامد و تفکیک کاربران

- کدهای Walsh: این کدها برای گسترش (Spreading) سیگنال‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. هر کاربر یک کد Walsh یکتا دریافت می‌کند که در ارتباطات خود از آن استفاده می‌کند.
- کد به عنوان شناسه (Code as Identifier): این کدها به عنوان شناسه‌ی کاربران در یک سلول عمل کرده و باعث تفکیک سیگنال‌های کاربران از یکدیگر می‌شوند.

تخصیص پویا و متمرکز کدها

- تخصیص متمرکز (Centralized Assignment): تخصیص کدها معمولاً به صورت متمرکز توسط ایستگاه پایه مدیریت می‌شود.
- هنگامی که یک موبایل درخواست اتصال ارسال می‌کند، این درخواست بر روی یک کانال مشترک (Common Channel) مانند Access Channel فرستاده می‌شود.
- ایستگاه پایه پس از بررسی وضعیت شبکه، یک کد Walsh منحصر به فرد به موبایل تخصیص داده و این تخصیص را از طریق یک کانال کنترلی (Control Channel) اعلام می‌کند.
- ایستگاه پایه اطلاعات مربوط به تخصیص کدها را برای ارتباطات مستقیم و معکوس در پایگاه داده خود ذخیره می‌کند.

اعلام کدهای تخصیص یافته

- ارتباط ایستگاه پایه با موبایل (Base Station to Mobile Station): ایستگاه پایه از طریق پیام‌های سیگنالینگ بر روی کانال اختصاصی (F-CACH) کد تخصیص یافته و اطلاعات مربوط به کانال را به موبایل ارسال می‌کند.
- عدم اطلاع‌رسانی مستقیم بین کاربران (No User-to-User Notification): در CDMA، کاربران به طور مستقیم کدهای تخصیص یافته را به یکدیگر اعلام نمی‌کنند، زیرا تمامی ارتباطات از طریق ایستگاه پایه مدیریت می‌شود.

تحويل اتصال (Handoff)

هنگامی که یک کاربر از محدوده‌ی پوشش یک ایستگاه پایه خارج شده و وارد محدوده‌ی جدیدی می‌شود، ایستگاه پایه‌ی جدید یک کد جدید برای آن کاربر تخصیص داده و این فرآیند از طریق پروتکل‌های مدیریت تحويل اتصال انجام می‌شود.

۶ مدیریت جریان داده

مدیریت جریان داده در CDMA شامل مجموعه‌ای از فرایندها و تکنیک‌هایی است که برای کنترل ارسال و دریافت داده‌ها در یک محیط چندکاربره بدون تداخل و با حداکثر بهره‌وری استفاده می‌شود. این فرآیند شامل کنترل نرخ داده، تخصیص منابع، زمان‌بندی انتقال داده، و مکانیزم‌های تصحیح خطا می‌شود.

کنترل نرخ داده

کنترل نرخ داده در CDMA به منظور جلوگیری از ازدحام در شبکه و بهینه‌سازی استفاده از پهنای باند انجام می‌شود. در مسیر مستقیم (از ایستگاه پایه به موبایل)، نرخ ارسال داده بر اساس شرایط کانال و کیفیت سیگنال دریافتی توسط موبایل تنظیم می‌شود که معمولاً با استفاده از اطلاعات بازخوردی انجام می‌شود. در مسیر معکوس (از موبایل به ایستگاه پایه)، موبایل نرخ ارسال داده‌های خود را بر اساس میزان تداخل در سلول تنظیم می‌کند تا از ایجاد تداخل بیش از حد در کانال جلوگیری شود. ایستگاه پایه این فرایند را نظارت کرده و دستورات کنترلی لازم را به موبایل ارسال می‌کند.

تخصیص منابع و زمان‌بندی انتقال داده

در CDMA، تخصیص پهنای باند به کاربران به صورت پویا انجام می‌شود و شامل تنظیم توان ارسالی، تخصیص کدهای Walsh و تعیین پارامترهای دسترسی به کانال است. زمان‌بندی انتقال داده نیز به صورت پویا مدیریت می‌شود تا کاربران مختلف بسته به اولویت و شرایط شبکه، نرخ ارسال داده متناسبی داشته باشند. این زمان‌بندی معمولاً بر اساس الگوریتم‌های تطبیقی انجام شده و هدف آن توزیع عادلانه‌ی منابع در کنار حفظ کیفیت سرویس کاربران حساس به تأخیر است.

مدیریت توان و کیفیت سیگنال

در CDMA، مدیریت توان یکی از عوامل کلیدی در کاهش تداخل میان کاربران مختلف است. هر فرستنده باید توان ارسال خود را به گونه‌ای تنظیم کند که سیگنال دریافتی در ایستگاه پایه یا موبایل گیرنده دارای کیفیت مناسبی باشد. این کنترل توان در دو سطح انجام می‌شود: کنترل توان حلقه‌ی داخلی که موبایل به طور مداوم سطح توان سیگنال دریافتی را بررسی کرده و تنظیمات لازم را اعمال می‌کند، و کنترل توان حلقه‌ی خارجی که ایستگاه پایه میانگین کیفیت سیگنال را تحلیل کرده و دستورات کلی برای تنظیم توان ارسال را به موبایل ارسال می‌کند. علاوه بر این، به منظور افزایش کیفیت سیگنال و کاهش تأثیر نویز و تداخل، سیستم از روش‌هایی مانند کدگذاری کانال (Channel Coding) و تکرار بسته‌ها استفاده می‌کند.

مدیریت صف‌ها و جلوگیری از ازدحام

مدیریت صف‌ها در CDMA تضمین می‌کند که بسته‌های داده با اولویت بالا زودتر پردازش شوند و تأخیر در انتقال داده کاهش یابد. در این سیستم، بسته‌ها می‌توانند بر اساس ترتیب ورود پردازش شوند (FIFO) یا با استفاده از مکانیزم‌های اولویت‌بندی، بسته‌های حیاتی مانند داده‌های کنترلی و تماس‌های صوتی در اولویت قرار گیرند. علاوه بر این، پروتکل‌های جلوگیری از ازدحام با کاهش نرخ ارسال داده در شرایط شلوغی شبکه، عملکرد سیستم را پایدار نگه می‌دارند. این راهکارها باعث بهینه‌سازی استفاده از منابع شبکه و جلوگیری از کاهش کیفیت ارتباطات می‌شوند.

۷ تشخیص خطا در لایه‌های مختلف

فرآیند تشخیص خطا در CDMA مشخص نشده است و در اینجا برای پروتکل CDMA2000 را بررسی می‌کنیم. تشخیص خطا در CDMA2000 در چندین لایه انجام می‌شود که هرکدام مکانیزم‌های خاص خود را دارند. این فرآیند شامل تشخیص خطا در لایه فیزیکی، لایه MAC و لایه‌های بالاتر است.

تشخیص خطا در لایه فیزیکی

لایه فیزیکی از روش‌هایی مانند شاخص کیفیت فریم، بررسی CRC و تشخیص دریافت یا عدم دریافت فریم استفاده می‌کند. یکی از مهم‌ترین مکانیزم‌ها در این سطح، ارائه‌ی شاخص کیفیت فریم به لایه MAC است که در قالب مقادیر «کافی» یا «ناکافی» مشخص می‌شود. اگر کیفیت فریم ناکافی باشد، زیرلایه‌ی مالتی‌پلکس ممکن است یک بلوک داده‌ی خالی را به لایه‌های بالاتر ارسال کند. همچنین، اگر هیچ فریمی دریافت نشود، لایه فیزیکی این موضوع را گزارش خواهد کرد. علاوه بر این، در برخی کانال‌ها مانند SCH، از بررسی CRC برای تشخیص خطا استفاده می‌شود و در صورت نادرست بودن CRC، زیرلایه‌ی مالتی‌پلکس قادر به شناسایی MuxPDUها در واحد انتقالی نخواهد بود.

تشخیص خطا در زیرلایه‌ی MAC

زیرلایه‌ی مالتی‌پلکس در MAC با استفاده از مکانیزم‌هایی مانند شناسایی MuxPDU، پردازش واحدهای انتقالی منطقی (LTU) و بررسی اندازه فریم، به تشخیص خطا کمک می‌کند. در این فرآیند، اگر نوع MuxPDU دریافت‌شده قابل شناسایی نباشد، داده‌ی خالی به لایه‌های بالاتر ارسال می‌شود. شناسایی MuxPDUها بر اساس گزینه‌های مالتی‌پلکس انجام می‌شود و در کانال SCH، اگر CRC مربوط به LTU نادرست باشد، شناسایی MuxPDUها انجام نمی‌شود. علاوه بر این، زیرلایه‌ی مالتی‌پلکس، آمار دریافت را ذخیره می‌کند و تعداد واحدهای انتقالی منطقی دریافت‌شده و تعداد آن‌هایی که دارای CRC صحیح هستند را ثبت می‌کند. همچنین، اندازه‌ی فریم نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد و اگر اندازه‌ی دریافتی مطابق انتظار نباشد، داده‌ی خالی ارسال خواهد شد.

تشخیص خطا در لایه‌های بالاتر

هنگامی که زیرلایه‌ی MAC داده‌ها را به لایه‌های بالاتر منتقل می‌کند، از مکانیزم‌های خاصی مانند MAC-Data. Indication برای اعلام کیفیت فریم استفاده می‌کند. این مکانیزم به لایه‌های بالاتر اجازه می‌دهد تا در صورت دریافت داده‌های دارای خطا، آن را مدیریت کنند. همچنین، ارسال بلوک داده‌ی خالی از سوی زیرلایه‌ی مالتی‌پلکس به لایه‌های بالاتر، نشان‌دهنده‌ی وجود خطا در دریافت داده است. این لایه‌ها می‌توانند با استفاده از مکانیزم‌هایی مانند ARQ، درخواست ارسال مجدد داده را صادر کنند تا از تحویل داده‌های صحیح اطمینان حاصل شود.

دسته‌بندی خطاها

هنگام تشخیص خطا، زیرلایه‌ی مالتی‌پلکس ممکن است دسته‌بندی‌هایی را به MuxPDU اختصاص دهد که نشان‌دهنده‌ی نوع خطا باشند. این دسته‌ها می‌توانند شامل کیفیت ناکافی فریم در لایه فیزیکی، دریافت یک فریم خالی از لایه فیزیکی، یا ناتوانی در تعیین نرخ بیت فریم دریافت‌شده باشند. همچنین، برخی از این دسته‌بندی‌ها مختص انواع خاصی از MuxPDUها مانند نوع ۱، ۲، ۴، ۵ و ۶ هستند.

تشخیص خطا در کانال‌های خاص

در کانال‌های خاص مانند FCH و DCCH، شناسایی MuxPDUها با استفاده از جداول مشخص انجام می‌شود و اگر MuxPDU معتبر نباشد، داده‌ی خالی ارسال خواهد شد. در کانال SCCH، شناسایی MuxPDUها با جداول مخصوصی انجام می‌شود و در صورت نامعتبر بودن، داده‌ی خالی به لایه‌های بالاتر منتقل خواهد شد. همچنین، در کانال SCH، زیرلایه‌ی مالتی‌پلکس علاوه بر شناسایی MuxPDU، بررسی CRC را نیز انجام می‌دهد. در مورد کانال‌های دسترسی مانند R-ACH و R-EACH، لایه فیزیکی پارامتر کیفیت فریم را در Indication Primitives ارائه می‌دهد و زیرلایه‌ی MAC داده‌های دریافتی را بررسی می‌کند.

۸ رویکردهای تصحیح خطا

در این بخش نیز به رویکردهای تصحیح خطا در cdma2000 می‌پردازیم.

تصحیح خطا در cdma2000 عمدتاً از طریق Forward Error Correction (FEC) در لایه فیزیکی انجام می‌شود که با افزودن افزونگی به داده‌های ارسالی، گیرنده را قادر می‌سازد خطاها را بدون نیاز به ارسال مجدد تصحیح کند. منابع، مکانیزم‌های FEC زیر را مشخص کرده‌اند:

کدگذاری کانولوشن

این یک تکنیک متداول FEC است که در چندین کانال cdma2000 استفاده می‌شود:

- **کانال همگام‌سازی:** از کدگذاری کانولوشن استفاده می‌کند.
- **کانال پیچینگ:** از کدگذاری کانولوشن بهره می‌برد.
- **کانال گرانت فوروارد:** از کدگذاری کانولوشن استفاده می‌کند.
- **کانال‌های کنترل اختصاصی فوروارد و ریورس:** از کدگذاری کانولوشن بهره می‌برند.
- **کانال‌های اساسی فوروارد و ریورس:** از کدگذاری کانولوشن استفاده می‌کنند.
- **کانال درخواست ریورس:** از کدگذاری کانولوشن استفاده می‌کند.
- **حذف نمادهای کد:** پس از کدگذاری کانولوشن، برخی از نمادهای کد حذف می‌شوند تا نرخ کد دلخواه حاصل شود.

کدگذاری توربو

کدهای توربو برای نرخ‌های داده بالاتر استفاده می‌شوند و مکانیزم FEC قدرتمندتری ارائه می‌دهند:

- **کانال داده بسته‌ای ریورس:** از کدگذاری توربو استفاده می‌کند.
- **حذف نمادهای کد توربو:** نمادهای کد توربو ممکن است برای دستیابی به نرخ کد دلخواه حذف شوند.

تکرار نمادهای کد

این روش شامل تکرار برخی نمادهای کد برای افزایش افزونگی و بهبود احتمال رمزگشایی صحیح است:

- کانال کنترل عمومی ریورس
- کانال همگام‌سازی
- کانال پیچینگ
- کانال تاییدیه فوروارد
- کانال‌های کنترل اختصاصی فوروارد و ریورس
- کانال‌های اساسی فوروارد و ریورس
- کانال مکمل فوروارد
- کانال درخواست ریورس

درهم‌ریزی

درهم‌ریزی برای بازآرایی بیت‌های کد شده قبل از ارسال استفاده می‌شود تا خطاهای ناگهانی را توزیع کند و اصلاح آن‌ها را آسان‌تر نماید:

- کانال داده بسته‌ای ریورس
- کانال دسترسی
- کانال دسترسی پیشرفته و کانال کنترل عمومی ریورس
- کانال درخواست ریورس
- کانال‌های کنترل اختصاصی فوروارد و ریورس
- کانال همگام‌سازی
- کانال پیچینگ
- کانال کنترل داده بسته‌ای فوروارد
- کانال اساسی فوروارد
- کانال مکمل فوروارد
- کانال داده بسته‌ای فوروارد

رمزگذاری داده‌ها

رمزگذاری داده برای تصادفی‌سازی الگوهای داده و کاهش تداخل استفاده می‌شود:

- کانال کنترل پخش

- کانال کنترل عمومی فوروارد
- کانال کنترل داده بسته‌ای فوروارد
- کانال‌های کنترل اختصاصی فوروارد و ریورس
- کانال اساسی فوروارد
- کانال مکمل فوروارد
- کانال داده بسته‌ای فوروارد

پوشش متعامد

در کانال تاییدیه فوروارد، پوشش متعامد برای بهبود جداسازی سیگنال و کاهش تداخل اعمال می‌شود.

تصحیح خطا با ARQ

- در حالی که منابع بر FEC تمرکز دارند، ممکن است سیستم از مکانیزم‌های (ARQ) Automatic Repeat Request در لایه‌های بالاتر نیز استفاده کند.
- پروتکل Radio Link Protocol (RLP) که اتصال‌گرا و مبتنی بر بازخورد منفی است، می‌تواند برای ارسال مجدد داده‌های دارای خطا مورد استفاده قرار گیرد.
- زیرلایه مالتی‌پلکس آمار دریافت، از جمله تعداد LTUهای دریافت‌شده با CRC صحیح را ذخیره می‌کند، که ممکن است برای تصمیم‌گیری در مورد نرخ داده یا ارسال مجدد به کار گرفته شود.

۹ انواع پیام

در cdma2000، داده‌ها در لایه‌های مختلف به بسته‌ها تقسیم می‌شوند که هر کدام فرمت خاص خود را دارند. در اینجا تجزیه و تحلیلی از انواع بسته‌ها و فرمت‌های آن‌ها ارائه شده است:

لایه فیزیکی

- واحدهای داده لایه فیزیکی (SDU): این واحدها داده‌های اساسی هستند که بین زیرلایه MAC و لایه فیزیکی منتقل می‌شوند. واحد داده لایه فیزیکی توسط مولد و موجودیت QoS تولید شده و برای ارسال به لایه فیزیکی تحویل داده می‌شود.
- واحدهای داده لایه فیزیکی از طریق عملیات رابط سرویس بین زیرلایه Multiplex و لایه فیزیکی مبادله می‌شوند.
- فرمت واحد داده لایه فیزیکی بسته به کانال (SCH، SCCH، DCCH، FCH) و گزینه ترکیب در حال استفاده متفاوت است.
- لایه فیزیکی یک واحد داده لایه فیزیکی را به زیرلایه Multiplex از طریق عملیات رابط سرویس دریافت اعلان فیزیکی برای کانال خاص ارسال می‌کند.
- لایه فیزیکی می‌تواند اعلام کند که آیا کیفیت فریم لایه فیزیکی کافی، ناکافی است یا فریمی دریافت نشده است.

- **واحد داده فیزیکی FCH:** واحد داده فیزیکی FCH هر ۲۰ میلی ثانیه ارسال می شود، یا ممکن است از واحد داده ۵ میلی ثانیه در حالت B استفاده شود.
- یک واحد داده فیزیکی FCH حداکثر شامل یک MuxPDU است.
- **زیرلایه Multiplex واحد داده فیزیکی FCH** را که سرهم شده است به لایه فیزیکی از طریق عملیات رابط سرویس PHY-FCH.Request ارسال می کند.
- **واحد داده فیزیکی DCCH:** واحد داده فیزیکی DCCH حداقل هر ۲۰ میلی ثانیه ارسال می شود، یا ممکن است از واحد داده ۵ میلی ثانیه در حالت B استفاده شود.
- یک واحد داده فیزیکی DCCH حداکثر شامل یک MuxPDU است.
- **زیرلایه Multiplex واحد داده فیزیکی DCCH** را که سرهم شده است به لایه فیزیکی از طریق عملیات رابط سرویس PHY-DCCH.Request ارسال می کند.
- **واحد داده فیزیکی SCCH:** واحد داده فیزیکی SCCH هر ۲۰ میلی ثانیه ارسال می شود و حداکثر شامل یک MuxPDU است.
- **زیرلایه Multiplex واحد داده فیزیکی SCCH** را که سرهم شده است به لایه فیزیکی از طریق عملیات رابط سرویس PHY-SCCH.Request ارسال می کند.
- **واحد داده فیزیکی SCH:** واحد داده فیزیکی SCH هر ۲۰، ۴۰ یا ۸۰ میلی ثانیه سرهم می شود.
- **زیرلایه Multiplex واحد داده فیزیکی SCH** را که سرهم شده است به لایه فیزیکی از طریق عملیات رابط سرویس PHY-SCH.Request ارسال می کند.
- **واحد داده فیزیکی R-EACH:** واحد داده فیزیکی R-EACH با افزودن بیت های پرکننده پس از PDU انتسابی لایه ۲ تشکیل می شود.
- **واحد داده فیزیکی R-CCCH:** واحد داده فیزیکی R-CCCH با افزودن بیت های پرکننده به داده ها تشکیل می شود.
- **واحد داده فیزیکی F-PCH:** واحد داده فیزیکی F-PCH با افزودن بیت های پرکننده به داده ها تشکیل می شود.
- **واحد داده فیزیکی F-BCCH:** واحد داده فیزیکی F-BCCH با افزودن بیت های پرکننده به داده ها تشکیل می شود.
- **واحدهای انتقال منطقی فیزیکی (LTUs):** این ها مختص SCH هستند و شامل یک یا چند MuxPDU با CRC ۱۶ بیتی هستند.
- اندازه LTU برابر با ۳۶۸ بیت است اگر اندازه واحد داده فیزیکی SCH برابر با ۷۴۴، ۱۵۱۲ یا ۳۰۴۸ بیت باشد، و ۵۶۰ بیت است اگر اندازه واحد داده فیزیکی SCH برابر با ۱۱۲۸، ۲۲۸۰ یا ۴۵۸۴ بیت باشد.
- اگر تعداد MuxPDU ها برای پر کردن هر LTU در واحد داده فیزیکی SCH کافی نباشد، زیرلایه Fill MuxPDU Multiplex را وارد می کند.

زیرلایه MAC

- **MuxPDU (واحد داده پروتکلی زیرلایه Multiplex):** یک MuxPDU یک یا چند بلوک داده است که مطابق با قوانین گزینه ترکیب ترکیب شده اند.
- MuxPDU ها در یک واحد داده فیزیکی سرهم می شوند.

- ساختار MuxPDU شامل یک هدر و بلوک‌های داده است. فرمت و محتوای آن بستگی به نوع MuxPDU دارد.
- یک MuxPDU در هر واحد داده فیزیکی FCH یا DCCH وجود دارد.
- نوع MuxPDU تعیین می‌کند که چگونه بلوک‌های داده ترکیب شوند.
- نوع MuxPDU ۱: این نوع برای مجموعه نرخ ۱ برای FCH، DCCH و SCCH استفاده می‌شود.
- شامل یک هدر (مشابه با فرمت بیت‌های TIA/EIA-۹۵-B) و بلوک‌های داده است.
- ترکیب‌های بلوک داده در جدول ۲-۱۹ مشخص شده‌اند.
- نوع MuxPDU ۲: این نوع برای مجموعه نرخ ۲ برای FCH، DCCH و SCCH استفاده می‌شود.
- شامل یک هدر، حالت فریم و بلوک‌های داده است.
- ترکیب‌های بلوک داده در جدول ۲-۲۰ مشخص شده‌اند.
- نوع MuxPDU ۳: این نوع برای SCH زمانی که از گزینه‌های ترکیب ۰x۹۰۹، ۰x۹۰a، ۰x۹۱۱، ۰x۹۱۲، ۰x۹۲۱ یا ۰x۹۲۲ استفاده می‌شود.
- شامل $d'_{sr} - 21$ است.
- نوع MuxPDU ۴: این نوع برای یک MuxPDU ۵ میلی‌ثانیه برای FCH یا DCCH استفاده می‌شود.
- فقط یک هدر را شامل می‌شود.
- نوع MuxPDU ۵: این نوع برای SCH زمانی که از گزینه ترکیب ۰xf۴۰ استفاده می‌شود.
- شامل $d'_{sr} - 23$ است.
- نوع MuxPDU ۶: این نوع برای مجموعه نرخ ۱ یا ۲ برای FCH یا DCCH استفاده می‌شود.
- فرمت آن در جداول تقسیم‌بندی مشخص شده است.
- MuxPDU پرکننده: این یک MuxPDU نوع ۳ است که به هیچ سرویسی وابسته نیست و به عنوان پرکننده هنگام سرهم کردن یک واحد داده فیزیکی SCH استفاده می‌شود.
- این شامل یک بلوک داده پر شده با بیت‌های '۰' است.
- MuxPDU Null: این یک MuxPDU است که هیچ بیتی ندارد.
- ممکن است زمانی که داده‌ای موجود نیست یا برای فریم‌های خالی استفاده شود.
- یک MuxPDU ترافیک null فقط شامل پایین‌ترین بلوک داده ترافیک اصلی با نرخ ارسال توافق‌شده است که همه بیت‌ها آن به '۱' تنظیم شده‌اند.
- پیام R-ACH (کپسول پیام): یک کپسول پیام R-ACH شامل یک PDU انتسابی لایه ۲ و بیت‌های پرکننده‌ای است که توسط زیرلایه Multiplex کانال مشترک اضافه می‌شود.

- طول کپسول پیام R-ACH تعداد صحیحی از فریم‌های R-ACH است.
 - پرکننده به انتهای کپسول پیام اضافه می‌شود تا فریم‌های R-ACH را پر کند.
- در شکل زیر یک شماتیک کلی از لایه‌های CDMA2000 و نحوه ارتباط آنها وجود دارد.

