

Guía de Estudio de Sistemas de Comunicaciones Electrónicas basada en Tomasi

Fundamentos Teóricos y Análisis de Señales

El campo de las comunicaciones electrónicas se fundamenta en un conjunto de conceptos teóricos que describen cómo la información puede ser transferida eficientemente de un punto a otro. El primer paso para entender cualquier sistema de comunicación es familiarizarse con la terminología básica y las herramientas matemáticas necesarias para analizar las señales involucradas ³. Los capítulos iniciales del texto de Tomasi establecen esta base crucial, presentando conceptos como el espectro electromagnético, el ancho de banda, la capacidad de información y el análisis de señales, que son pilares para toda la materia.

Un concepto fundamental es el demodulación y demodulación. La modulación es el proceso mediante el cual una propiedad de una señal de alta frecuencia (llamada portadora) se varía de acuerdo con una señal de baja frecuencia que contiene la información a transmitir ³. Este proceso es indispensable porque las señales de información, como la voz humana, tienen frecuencias muy bajas (típicamente entre 300 Hz y 3.4 kHz) y no pueden viajar largas distancias por sí solas. Al modular estas señales de bajo nivel sobre una portadora de alta frecuencia, se les proporciona la energía y la longitud de onda adecuadas para propagarse a través de medios como el aire o los cables ¹ ³. La demodulación es el proceso inverso, realizado en el receptor, donde se extrae la señal original de la señal modulada ³.

La organización de las diferentes señales de comunicación en el dominio de la frecuencia se conoce como el espectro electromagnético ³. Este espectro abarca todo tipo de ondas electromagnéticas, desde las de radio más bajas hasta las de rayos gamma más altas. Para las comunicaciones electrónicas, las bandas de radiofrecuencia (RF) son particularmente importantes. La asignación de diferentes porciones de este espectro a diversas aplicaciones (radio comercial, televisión, telefonía móvil, Wi-Fi, etc.) es gestionada por organismos reguladores internacionales y nacionales para evitar interferencias. Un principio clave derivado

de esto es el ancho de banda, que se define como el intervalo de frecuencias ocupado por una señal de comunicación ³. Es una medida directa de la cantidad de información que una señal puede transportar; un mayor ancho de banda generalmente permite una tasa de transmisión de datos más alta. Por ejemplo, una señal de radio AM típica tiene un ancho de banda de unos 10 kHz, mientras que una señal de TV analógica requiere un ancho de banda mucho mayor, de aproximadamente 6 MHz.

La capacidad de información de un canal de comunicación es otra métrica fundamental. Se refiere a la máxima velocidad a la que se puede transmitir información de manera fiable a través de ese canal. Esta capacidad depende directamente del ancho de banda del canal y de la relación señal-ruido (SNR). Cuanto mayor sea el ancho de banda y mejor sea la relación señal-ruido, mayor será la capacidad del canal. Finalmente, el ruido es una perturbación aleatoria que se superpone a la señal deseada durante su transmisión. Puede provenir de diversas fuentes, como el ruido térmico generado por los electrones en los componentes eléctricos, el ruido atmosférico o las interferencias de otras señales. El ruido limita la calidad de la comunicación y es uno de los principales desafíos en el diseño de sistemas de comunicaciones robustos ³.

Una vez establecidos estos conceptos generales, el siguiente paso es aprender a analizar las señales. El análisis de señales es el estudio de las propiedades de las señales en los dominios del tiempo y de la frecuencia ³. En el dominio del tiempo, una señal se representa como una función del tiempo, mostrando cómo cambia su amplitud. Sin embargo, para el análisis de comunicaciones, el dominio de la frecuencia es a menudo más revelador. Utilizando herramientas como la Transformada de Fourier, cualquier señal periódica compleja puede descomponerse en una suma de sinusoides puros de diferentes frecuencias, amplitudes y fases. Este proceso produce un espectro de frecuencia, que es una gráfica que muestra la magnitud de cada componente de frecuencia presente en la señal ³. El espectro de frecuencia es vital para diseñar filtros, calcular el ancho de banda y comprender cómo una señal interactuará con un canal de comunicación.

Para generar las señales de radiofrecuencia necesarias para la modulación, se utilizan dispositivos llamados osciladores. Un oscilador es un circuito electrónico que produce una salida sinusoidal continua a una frecuencia precisa y estable ³. Los osciladores son el corazón de muchos transmisores y receptores. Existen varios tipos de osciladores, incluyendo los de cristal de cuarzo, que ofrecen una excelente estabilidad de frecuencia, y los osciladores controlados por tensión (VCO, por sus

siglas en inglés), cuya frecuencia de salida puede ser variada aplicando una tensión de control. Los VCOs son componentes clave en los bucles de enganche de fase (PLL).

Un PLL es un circuito de control de retroalimentación complejo que se utiliza para generar o recuperar una señal de alta frecuencia con una fase y frecuencia precisas ³. Su propósito principal es mantener una relación de frecuencia constante y predecible entre dos señales. Un PLL típico consta de tres componentes principales: un detector de fase, un filtro de bucle y un oscilador controlado por tensión (VCO). El detector de fase compara la fase de una señal de referencia de entrada con la fase de la señal de salida del VCO. La diferencia de fase se convierte en una señal de error de voltaje, que luego pasa a través de un filtro de bucle para eliminar las componentes de alta frecuencia no deseadas. La salida limpia del filtro de bucle controla el VCO, ajustando su frecuencia hasta que la fase de la señal de salida del VCO se alinee con la de la señal de referencia. Cuando el PLL alcanza este estado de equilibrio, se dice que está "enganchado" o "sintonizado". Los PLLs son extremadamente versátiles y se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, como la generación de frecuencias en sintetizadores de frecuencia, la demodulación de FM y la recuperación de la sincronización de reloj en sistemas de datos digitales ¹ ³.

Los sintetizadores de frecuencia son circuitos que utilizan PLLs para generar una serie de frecuencias muy precisas y estables a partir de una sola fuente de referencia de alta precisión, como un oscilador de cristal de cuarzo ¹ ³. En lugar de utilizar un gran número de osciladores físicos para cubrir un rango de frecuencias, un sintetizador puede usar un divisor de frecuencia programable en el bucle de retroalimentación de un PLL. Al cambiar el valor del divisor, se puede lograr que el VCO genere una nueva frecuencia de salida mientras mantiene la relación de frecuencia correcta con la señal de referencia. Esto permite la sintonización precisa y rápida de frecuencias, lo cual es esencial en sistemas de radio modernos, como los teléfonos celulares y los radios de dos vías. Por lo tanto, el análisis de señales, los osciladores, los PLLs y los sintetizadores de frecuencia son herramientas y componentes interconectados que forman la columna vertebral para crear y manipular las señales de RF necesarias para cualquier sistema de comunicación analógico o digital.

Componente/ Fundamento	Descripción	Función Principal
Modulación/ Demodulación	Proceso de variar una propiedad de una señal portadora según una señal de información.	Permitir la transmisión de señales de bajo nivel a largas distancias. 3
Espectro Electromagnético	Rango completo de todas las frecuencias de ondas electromagnéticas.	Organizar y asignar frecuencias para diferentes servicios de comunicación. 3
Ancho de Banda	Intervalo de frecuencias que ocupa una señal.	Determina la capacidad de transmisión de datos de un canal. 3
Capacidad de Información	Máxima velocidad de transmisión de datos fiable en un canal.	Métrica clave para evaluar el rendimiento de un sistema de comunicación. 3
Análisis de Señales	Estudio de las propiedades de las señales en los dominios del tiempo y de la frecuencia.	Herramienta para diseñar y optimizar sistemas de comunicación. 3
Osciladores	Circuitos que generan una señal sinusoidal continua a una frecuencia específica.	Generar la señal portadora de alta frecuencia para la modulación. 3
PLL (Phase-Locked Loop)	Circuito de control de retroalimentación para generar o recuperar señales de RF precisas.	Mantener una relación de fase y frecuencia constante. 1 3
Sintetizadores de Frecuencia	Circuitos que usan PLLs para generar múltiples frecuencias precisas a partir de una fuente de referencia.	Proporcionar sintonización precisa y rápida de frecuencias en transmisores y receptores. 1 3

Sistemas de Comunicación Analógica: Modulación y Demodulación

Una vez establecidos los fundamentos teóricos, el siguiente paso lógico es explorar en profundidad los sistemas de comunicación analógica, que han sido la piedra angular de las telecomunicaciones durante décadas. Estos sistemas se centran en la modulación de una señal portadora de radiofrecuencia (RF) con una señal de información analógica, como la voz o la música. Los capítulos 4 a 8 del libro de Tomasi se dedican a este tema, examinando detalladamente tres técnicas principales: Amplitud Modulación (AM), SSB (Single-Sideband) y Modulación Angular (FM/PM) [1](#) [3](#). Cada técnica ofrece un compromiso diferente entre la complejidad del sistema, el ancho de banda requerido y la resistencia al ruido.

La Amplitud Modulación (AM) es la forma más antigua y simple de modulación de portadora. En AM, la amplitud de la onda portadora se varía linealmente con la amplitud de la señal moduladora (la información) [3](#). Matemáticamente, si $m(t)$ es

la señal moduladora y $A_c \cos(2\pi f_c t)$ es la onda portadora, la señal AM resultante $s_{AM}(t)$ se expresa como:

$$s_{AM}(t) = [A_c + m(t)] \cos(2\pi f_c t)$$

Si se expande esta ecuación, se puede ver que la señal AM consiste en la portadora en la frecuencia f_c , una banda inferior (USB, Upper Sideband) centrada en $f_c + f_m$ y una banda superior (LSB, Lower Sideband) centrada en $f_c - f_m$, donde f_m es la frecuencia de la señal moduladora ³. Por lo tanto, el ancho de banda total requerido para transmitir una señal AM es el doble de la frecuencia más alta presente en la señal moduladora. Por ejemplo, para transmitir audio de banda completa (hasta 15 kHz), se necesita un ancho de banda de 30 kHz. Una de las principales desventajas de la AM es que la mayoría de la potencia transmitida reside en la portadora, que no contiene ninguna información útil, lo que resulta en una baja eficiencia energética. Además, es muy susceptible al ruido y a las interferencias, ya que el ruido suele manifestarse como cambios en la amplitud de la señal recibida ³.

Para abordar las deficiencias de la AM, especialmente su ineficiencia de potencia y ancho de banda, se desarrollaron sistemas más sofisticados. Uno de ellos es la Modulación de Banda Única (SSB). Como sugiere su nombre, la SSB transmite solo una de las dos bandas laterales (USB o LSB) y suprime la otra banda lateral y la portadora ³. Esto reduce significativamente el ancho de banda necesario a solo el doble de la frecuencia más alta de la señal moduladora, duplicando así la capacidad del canal. También aumenta drásticamente la eficiencia de potencia, ya que toda la potencia se concentra en la banda lateral que transporta la información. Hay varias técnicas para generar señales SSB, como el método de filtrado, que implica generar una señal DSB (Dual-Sideband) y luego usar un filtro de alta selectividad para eliminar una de las bandas laterales, y el método de fase, que utiliza circuitos de fase para cancelar una de las bandas laterales. La demodulación de una señal SSB es más compleja que la de la AM; requiere que el receptor genere una nueva portadora local con la misma frecuencia y fase exactas que la portadora original, un proceso conocido como reconstrucción de portadora. Si la frecuencia o la fase no coinciden, la señal demodulada estará distorsionada ^{1 3}.

La Modulación Angular es una categoría de modulación en la que la amplitud de la portadora permanece constante, pero su frecuencia o su fase se varían de acuerdo con la señal moduladora. Esta familia de técnicas incluye la Modulación de Frecuencia (FM) y la Modulación de Fase (PM). Ambas son inherentemente más resistentes al ruido que la AM, ya que el ruido afecta principalmente a la amplitud

de una señal, y los detectores de FM/PM están diseñados para ignorar las variaciones de amplitud y responder únicamente a las variaciones de frecuencia o fase ³. La Modulación de Frecuencia (FM) es quizás la aplicación más conocida de la modulación angular. En FM, la frecuencia instantánea de la portadora se desvía de su frecuencia central (f_c) en proporción a la amplitud de la señal moduladora. La magnitud de esta desviación se llama desviación de frecuencia (Δf). El parámetro clave en FM es el índice de modulación (β), definido como $\beta = \Delta f / f_m$, donde f_m es la frecuencia más alta de la señal moduladora. El ancho de banda de una señal FM no está tan claramente definido como en AM y se puede estimar utilizando la regla de Carson: $BW \approx 2(\Delta f + f_m)$. Aunque el ancho de banda de FM es considerablemente mayor que el de AM para la misma señal moduladora, su principal ventaja es una calidad de audio mucho más alta y su notable inmunidad al ruido, lo que la hace ideal para la transmisión de audio de alta fidelidad, como en la radio FM ¹ ³.

La demodulación de FM se realiza típicamente con un circuito denominado discriminador de frecuencia o detector de Foster-Seeley. Más comúnmente hoy en día se utiliza un PLL para realizar la demodulación de FM. El PLL se sintoniza inicialmente a la frecuencia central de la señal FM. A medida que la frecuencia de la señal de entrada varía debido a la modulación, el VCO dentro del PLL debe variar su propia frecuencia para seguir el cambio. La tensión de control del VCO, que es proporcional a la frecuencia del VCO, se convierte en la señal demodulada de audio ³. La Modulación de Fase (PM) es muy similar a la FM; en PM, es la fase de la portadora la que se desvía en proporción a la señal moduladora. La FM y la PM están estrechamente relacionadas matemáticamente; una señal PM puede convertirse en una FM y viceversa. En la práctica, ambas se utilizan en sistemas de comunicaciones digitales avanzados, aunque la FM es predominante en las comunicaciones analógicas de audio. Juntos, estos sistemas de modulación analógica representan un cuerpo de conocimiento fundamental que sigue siendo relevante y constituye la base sobre la cual se construyen muchas tecnologías de comunicación modernas.

Característica	Amplitud Modulation (AM)	Single-Sideband (SSB)	Frequency Modulation (FM)
Variable Modulada	Amplitud de la portadora	Amplitud de una banda lateral	Frecuencia de la portadora
Ancho de Banda	$2 \times f_{max}$	$1 \times f_{max}$	Variable, aproximadamente $2(\Delta f + f_{max})$
Eficiencia de Potencia	Baja (potencia en portadora)	Alta (sin portadora ni banda lateral)	Alta (amplitud constante)
Resistencia al Ruido	Baja	Moderada	Alta
Complejidad del Sistema	Baja	Media (demodulación compleja)	Alta
Uso Típico	Radio AM, aviación	Comunicaciones militares, HF	Radio FM, TV (audio)
Referencia	1 3	1 3	1 3

Transmisión de Datos Digitales y Multiplexación

Con el advenimiento de las computadoras y la necesidad de transmitir información en formato binario, la tecnología de comunicaciones evolucionó hacia la transmisión digital. Este paradigma implica convertir la información (ya sea analógica o digital) en una secuencia de dígitos binarios (bits) y luego transmitir esa secuencia a través de un canal de comunicación. Los capítulos 9 a 11 del libro de Tomasi se centran en los fundamentos de esta transmisión digital, cubriendo las técnicas de modulación digital, el proceso de digitalización de señales analógicas y los métodos para combinar múltiples canales de datos en un único medio de transmisión [1](#) [3](#).

Las técnicas de modulación digital son métodos para transmitir datos binarios utilizando una onda portadora analógica. A diferencia de la modulación analógica donde la amplitud, frecuencia o fase de la portadora cambian de forma continua, en la modulación digital estos parámetros cambian discretamente entre un número finito de estados. Las técnicas más básicas incluyen la Amplitud-Shift Keying (ASK), la Frecuencia-Shift Keying (FSK) y la Phase-Shift Keying (PSK). En ASK, la presencia o ausencia de la portadora representa los bits '1' y '0', respectivamente. En FSK, dos frecuencias de portadora ligeramente separadas representan los bits '1' y '0'. En PSK, la fase de la portadora se altera para representar los bits. Por ejemplo, en Binary PSK (BPSK), una fase de 0 grados podría representar un '1' y una fase de 180 grados podría representar un '0'. Estas técnicas simples se pueden combinar para mejorar la eficiencia espectral. La Quadrature Amplitude Modulation (QAM), por

ejemplo, varía tanto la amplitud como la fase de la portadora para representar múltiples bits por símbolo, permitiendo una mayor tasa de transmisión de datos en un ancho de banda dado ³. La elección de la técnica de modulación digital depende de un equilibrio entre la velocidad de transmisión de datos, la robustez contra el ruido y la complejidad del hardware del transmisor y receptor ³.

Antes de poder transmitir una señal analógica (como la voz) como datos digitales, primero debe ser digitalizada. El proceso de conversión de una señal analógica en una secuencia de bits se llama Muestreo y Cuantificación, y el resultado se denomina Codificación de Impulsos (PCM). El PCM es el estándar de facto para la digitalización de la voz en las redes telefónicas digitales. El proceso de PCM consta de tres pasos principales: muestreo, cuantificación y codificación. Primero, la señal analógica se muestrea repetidamente a lo largo del tiempo a una velocidad mínima de dos veces la frecuencia más alta de la señal (Teorema de Muestreo de Nyquist). Segundo, cada muestra de amplitud se cuantifica, es decir, se le asigna un valor discreto de un conjunto finito de niveles posibles. Esta cuantificación introduce un pequeño error conocido como ruido de cuantificación. Tercero, cada nivel de cuantificación se codifica en un código binario. La resolución del PCM, que determina la cantidad de ruido de cuantificación, se define por el número de bits utilizados para codificar cada muestra. Por ejemplo, el estándar de voz PCM utilizado en Europa emplea 8 bits por muestra, realizada a una tasa de 8,000 muestras por segundo, lo que resulta en una tasa de datos de 64 kbps ³. El Capítulo 10 del libro de Tomasi se centra en este proceso fundamental de digitalización ³.

Una vez que las señales de voz o datos se han convertido en flujos de bits, surge la necesidad de combinar múltiples canales de comunicación en un único medio de transmisión más grande para maximizar su uso. Este proceso se llama multiplexación. Existen dos tipos principales de multiplexación: multiplexión por división de frecuencia (FDM) y multiplexión por división de tiempo (TDM). FDM, que fue dominante en las comunicaciones analógicas, asigna a cada canal una porción diferente del ancho de banda disponible del medio de transmisión ³. Sin embargo, en el mundo digital, la TDM es la técnica predominantemente utilizada. En TDM, múltiples flujos de datos digitales se combinan en un único flujo de alta velocidad. El tiempo en el canal de transmisión se divide en segmentos iguales llamados "tiempos de ranura" o "slots". Cada flujo de datos se asigna a un tiempo de ranura específico en un ciclo repetitivo. Así, cada canal de datos tiene acceso al medio por un corto período de tiempo antes de que el siguiente canal tenga su turno. Esto crea un patrón de transmisión de "estacada" donde los datos de todos

los canales se envían en ráfagas alternadas. La TDM es ideal para señales digitales porque permite que los datos de diferentes fuentes compartan eficientemente el mismo canal sin interferirse entre sí, siempre que los transmisores y receptores estén perfectamente sincronizados en el tiempo ³.

La implementación de la TDM en las redes telefónicas digitales se conoce como Jerarquía Digital Norteamericana (NADH) o Hierarquía Digital Norte Americana (NADH) ³. Esta jerarquía define una serie de velocidades de transmisión estándar para la multiplexión de canales de voz PCM. El nivel más bajo, el T-1, multiplexa 24 canales de voz de 64 kbps cada uno, resultando en una velocidad de transmisión de línea de 1.544 Mbps. Niveles superiores como T-2 (6.312 Mbps), T-3 (44.736 Mbps) y T-4 (274.176 Mbps) multiplexan grupos de líneas inferiores para proporcionar mayores capacidades de transmisión. Junto a la TDM, también se utiliza la Multiplexión por División de Longitud de Onda (WDM) en sistemas de fibra óptica de alta capacidad. WDM es la versión óptica de FDM; multiplexa múltiples longitudes de onda (colores) de luz láser, cada una de las cuales actúa como un canal independiente de alta velocidad, a través de una única fibra óptica ³. Juntas, estas tecnologías de digitalización y multiplexación forman la base de la infraestructura de comunicaciones moderna, permitiendo la transmisión eficiente y a gran escala de voz, datos e imágenes.

Medios de Transmisión y Propagación de Ondas

Una vez que una señal ha sido generada y modulada, debe viajar desde el transmisor hasta el receptor. Este viaje a través de un medio físico es un aspecto crítico de cualquier sistema de comunicación. Los capítulos 12 a 15 del libro de Tomasi exploran en detalle los diferentes medios a través de los cuales pueden viajar las señales y los principios que gobiernan su propagación ¹ ³. Estos medios se pueden clasificar en dos categorías principales: guiados y no guiados. Los medios guiados confinan la señal dentro de un conductor físico, como un cable o una guía de onda, mientras que los medios no guiados, o de espacio libre, permiten que la señal se propague a través del aire o el vacío.

Los medios de transmisión guiados incluyen los cables metálicos y la fibra óptica. Los cables metálicos, como los pares trenzados y el cable coaxial, han sido la columna vertebral de las redes de datos y la telefonía durante mucho tiempo. Los pares trenzados consisten en dos conductores de cobre aislados que están entrelazados.

Son económicos y fáciles de instalar, pero son susceptibles a la interferencia electromagnética (EMI) y a la atenuación, que limita la distancia y la velocidad de transmisión. El cable coaxial ofrece una protección mejorada contra la EMI debido a su blindaje exterior y puede soportar velocidades de datos y distancias mayores que los pares trenzados. Sin embargo, ambos tipos de cables metálicos tienen una capacidad de ancho de banda relativamente limitada en comparación con la fibra óptica ^{1 3}. La fibra óptica, descrita en el Capítulo 13, es un medio de transmisión guiado que utiliza haces de luz para transmitir datos a través de fibras de vidrio o plástico ultrafinas ^{1 3}. Sus ventajas son enormes: una capacidad de ancho de banda extremadamente alta, muy baja atenuación (permitiendo transmisiones a grandes distancias sin repetidores), inmunidad total a la interferencia electromagnética y una alta seguridad, ya que es difícil "escuchar" una señal óptica sin interceptar físicamente la fibra. La principal desventaja es su costo de instalación y equipamiento de conexión, que históricamente era más alto que el de los cables metálicos. No obstante, a medida que la demanda de ancho de banda crece exponencialmente, la fibra óptica se ha convertido en el estándar para la infraestructura de red a larga distancia y para las conexiones de última milla a alta velocidad ³.

Independientemente del medio, la señal debe propagarse desde el punto de origen. El propagación de ondas electromagnéticas es el fenómeno físico que describe cómo las ondas de radio viajan a través del espacio. La velocidad de propagación de una onda electromagnética en el vacío es constante y equivalente a la velocidad de la luz ($c \approx 3 \times 10^8$ m/s). En otros medios, como el aire, la velocidad es ligeramente menor. La forma en que se propaga una onda de radio depende de su frecuencia y de las condiciones de la atmósfera. Existen varios modos de propagación:

1. Propagación Terrestre (Ground Wave): Las ondas de baja y media frecuencia (LF/MF) pueden seguir la curvatura de la Tierra. Esta propagación se utiliza para la radio AM a nivel regional. 2. Propagación Espacial (Space Wave): También conocida como propagación por línea de vista (line-of-sight), esta es la trayectoria más directa entre el transmisor y el receptor. Es el modo predominante para frecuencias de VHF, UHF y superiores, y para comunicaciones por satélite. La distancia máxima de la línea de vista está limitada por la curvatura de la Tierra y se puede extender usando torres altas o satélites geoestacionarios. 3. Propagación Ionosférica (Sky Wave): Las ondas de alta frecuencia (HF) pueden ser reflejadas por la ionosfera, una capa de la atmósfera superior cargada eléctricamente. Este fenómeno permite la comunicación a largas distancias, incluso a través de continentes, pero es variable y depende de las condiciones solares y la hora del día ^{1 3}.

Otros efectos físicos como la reflexión, la difracción y la dispersión también juegan un papel importante en la propagación de ondas, especialmente en entornos urbanos densos donde las señales pueden llegar al receptor por múltiples caminos, causando interferencia.

Para iniciar y recibir estas ondas de radio, se utilizan dispositivos especializados llamados antenas. Una antena es un dispositivo diseñado para convertir una corriente eléctrica en una onda electromagnética (radiación) o, inversamente, para capturar una onda electromagnética y convertirla en una corriente eléctrica ¹ ³ . La eficacia de una antena para emitir o recibir energía se conoce como ganancia. Las antenas vienen en una variedad casi infinita de formas y tamaños, desde simples dipolos hasta antenas parabólicas grandes y complejas, y su diseño está optimizado para diferentes frecuencias, polarizaciones y patrones de radiación. Junto a las antenas, en sistemas de microondas de alta frecuencia, se utilizan guías de onda. Una guía de onda es un tubo hueco, generalmente de metal rectangular o circular, diseñado para conducir ondas de radio a frecuencias de microondas con una pérdida mínima. Actúan como un medio guiado para las microondas, similar a cómo un cable coaxial guía señales de radiofrecuencia más bajas, pero son más eficientes a frecuencias mucho más altas ¹ ³ . En conjunto, los medios de transmisión, los principios de propagación y los dispositivos de radiación como las antenas y las guías de onda definen el "camino" físico que la información debe recorrer, y su diseño y selección son cruciales para el éxito de cualquier sistema de comunicación.

Evolución hacia las Redes Modernas: Del Teléfono Tradicional al Celular

La historia de las comunicaciones está marcada por una progresiva integración y automatización de los sistemas para servir a una población cada vez mayor. Los capítulos 16 a 20 del libro de Tomasi trazan esta evolución, comenzando con los fundamentos del sistema telefónico público tradicional (PSTN) y culminando con la revolucionaria tecnología de telefonía celular ¹ ³ . Estos capítulos ilustran cómo los principios de modulación y multiplexión discutidos anteriormente se aplican en la construcción de redes de comunicación masivas y complejas.

El sistema telefónico público es un ejemplo clásico de un sistema de comunicación analógico diseñado para conectar millones de usuarios. El sistema se compone de varias partes interconectadas. En el extremo del usuario final, encontramos los instrumentos telefónicos, que incluyen el teléfono, el auricular, el timbre y los interruptores de marcaje (dial o tonos DTMF) ^{1 3}. La señal de voz de un hablante se convierte en una señal eléctrica analógica dentro del teléfono. Estas señales, junto con otras señales de supervisión como el tono de marcado y el tono de marcado, viajan a través de la línea de abonado, que típicamente es un par trenzado de cobre desde el teléfono hasta el centro local de la compañía telefónica ^{1 3}. Dentro del centro local, un equipo llamado central telefónica (o central de conmutación) dirige las llamadas entrantes y salientes. La central telefónica es el corazón del sistema PSTN. Su función principal es conectar temporalmente dos o más líneas de abonado para permitir una conversación bidireccional. Históricamente, estas centrales eran mecánicas, pero ahora son casi universalmente electrónicas y digitales, utilizando la multiplexión por división de tiempo (TDM) para enrutar miles de canales de voz simultáneamente a través de una red de conmutación interna ³. Las centrales locales están interconectadas para formar la Red Telefónica Pública Conmutada (PSTN), una red de conmutación de circuitos masiva que permite que cualquier persona pueda llamar a cualquier otra persona en el mundo ^{1 3}.

A pesar de su éxito, el sistema telefónico tradicional tenía limitaciones, especialmente en cuanto a la movilidad. La solución a este problema fue la telefonía celular, que se explora en los capítulos 19 y 20 del libro de Tomasi ^{1 3}. El concepto fundamental detrás de la telefonía celular es la división de frecuencia (Frequency-Division Multiple Access - FDMA), que permite que el espectro de radiofrecuencia se divida en múltiples canales y se reutilice en diferentes áreas geográficas. En lugar de tener una sola estación base grande que cubra un área vasta, el área de servicio se divide en regiones más pequeñas llamadas celdas. Cada célula tiene su propia estación base que opera en un conjunto único de frecuencias. Crucialmente, las mismas frecuencias pueden ser utilizadas en células que no están contiguas, un principio conocido como reutilización de frecuencia. Esto permite que un número finito de canales de radio se utilice eficientemente para servir a un número prácticamente ilimitado de usuarios, ya que cada usuario solo necesita estar en contacto con la estación base más cercana.

El proceso de manejar una llamada cuando un usuario se mueve de una celda a otra se llama handoff o transferencia de llamada. Cuando un teléfono móvil se acerca al borde de una celda, la estación base monitorea continuamente la intensidad de la

señal. Cuando la señal de la celda actual disminuye por debajo de un umbral y la señal de una celda adyacente aumenta por encima de él, la estación base de la celda actual inicia un handoff, transfiriendo la llamada a la nueva estación base sin interrupción audible para el usuario. Este proceso, junto con la conmutación centralizada en las redes de telefonía celular, permite una comunicación móvil fluida y transparente. La telefonía celular representa una transición fundamental desde un modelo de comunicación fijo y costoso a uno de comunicación móvil y accesible, sentando las bases para la explosión de la comunicación inalámbrica que hemos visto en las últimas décadas.

Concepto Clave	Descripción	Componente/Papel en el Sistema
Línea de Abonado	Par de cables de cobre que conecta el teléfono del usuario al centro local de la compañía telefónica.	Transporta la señal de voz analógica y las señales de supervisión. 1 3
Central Telefónica (Switching Office)	Equipo que conecta las líneas de abonados para establecer llamadas.	Corre la conmutación de circuitos para conectar llamadas entrantes y salientes. 1 3
Red Telefónica Pública Conmutada (PSTN)	Red global de centrales telefónicas interconectadas que permite la comunicación entre usuarios.	La infraestructura de red que hace posible la telefonía mundial. 1 3
Célula (Cell)	Pequeña región geográfica servida por una estación base de telefonía celular.	Base para el diseño de redes celulares y la reutilización de frecuencias. 1 3
Reutilización de Frecuencia	Principio de usar los mismos canales de radio en células no contiguas para aumentar la capacidad.	Permite que un número finito de frecuencias sirva a un gran número de usuarios. 1 3
Handoff (Transferencia de Llamada)	Proceso de transferir una llamada activa de una estación base a otra a medida que un usuario se mueve.	Mantiene la continuidad de la llamada durante la movilidad del usuario. 1 3

Introducción a las Redes de Datos y Telecomunicaciones Avanzadas

La convergencia de las tecnologías de la información y las comunicaciones ha llevado a la creación de redes de datos que van mucho más allá de la simple transmisión de voz. Los capítulos 21 a 23 del libro de Tomasi introducen los conceptos fundamentales de las redes de datos, los protocolos de enlace de datos y las arquitecturas de red, sentando las bases para comprender cómo se comunican las computadoras y otros dispositivos inteligentes 1 3 . Posteriormente, los capítulos 24 a 26 se adentran en las tecnologías de telecomunicaciones de largo alcance, como las comunicaciones por microondas terrestres y las comunicaciones por satélite, que son cruciales para conectar estas redes a nivel global 1 3 .

Una red de datos es un conjunto de dispositivos (computadoras, impresoras, servidores, etc.) interconectados que pueden compartir recursos y comunicarse entre sí. A diferencia de una red de telefonía tradicional, que está diseñada principalmente para la comunicación de voz, una red de datos está optimizada para la transmisión de información digital, que puede ser texto, imágenes, video u otros tipos de datos. Los componentes básicos de una red de datos incluyen nodos (dispositivos que se conectan a la red), medios de transmisión (cables o enlaces inalámbricos) y protocolos de red ³. Los protocolos de red son un conjunto de reglas y convenciones que gobiernan cómo los datos se envían y reciben. Estos protocolos se organizan en capas, como en el modelo OSI (Open Systems Interconnection), que descompone el proceso de comunicación en varias funciones distintas y manejables. Una capa superior se comunica con la capa inferior a través de una interfaz bien definida, y cada capa proporciona un servicio a la capa superior.

El Protocolo de Enlace de Datos es una de las capas más importantes. Su función es organizar los bits brutos que viajan a través del medio de transmisión en unidades de datos significativas llamadas tramas. Este protocolo se ocupa de la entrega fiable de datos entre dos nodos directamente conectados. Incluye funciones como la delimitación de tramas, la detección de errores (usando técnicas como la suma de verificación o el polinomio CRC) y el control de flujo (para asegurar que un emisor rápido no sobrecargue a un receptor lento). Dos de los conceptos más importantes en este contexto son el control de errores y la accesibilidad al medio. El control de errores garantiza la integridad de los datos, mientras que la accesibilidad al medio determina cómo los múltiples dispositivos en una red compiten o cooperan para usar el canal de comunicación compartido. Los métodos de acceso al medio incluyen CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection), utilizado en Ethernet, y CSMA/CA (Collision Avoidance), utilizado en redes inalámbricas como el Wi-Fi ³.

Además de los protocolos, las redes de datos también se caracterizan por su topología física y lógica. La topología física describe cómo están físicamente conectados los nodos (por ejemplo, en bus, en estrella, en anillo o en malla). La topología lógica describe cómo los datos realmente viajan a través de la red, lo cual puede ser diferente de la topología física. Ejemplos de topologías lógicas incluyen broadcast (todas las estaciones reciben todos los mensajes) y token ring (un token se pasa de mano en mano para conceder el derecho de transmisión). La arquitectura de red describe la estructura general de la red, incluyendo su tamaño, administración y políticas de seguridad. Las redes de área local (LAN), de área personal (PAN) y de área metropolitana (MAN) son ejemplos de diferentes arquitecturas de red ³.

Finalmente, para conectar estas redes a nivel nacional e internacional, se utilizan tecnologías de comunicaciones terrestres y satelitales. Las comunicaciones por microondas terrestres utilizan enlaces de radio de línea de vista de alta frecuencia para transportar grandes volúmenes de datos, voz y video entre torres de transmisión ¹ ³. Estos sistemas son flexibles y rápidos de desplegar para conectar puntos remotos. El balance de potencia y ganancia del sistema es un concepto crucial en estos sistemas, que calcula la potencia recibida en el receptor en función de la potencia transmitida, las ganancias de las antenas y las pérdidas en el camino. Por otro lado, las comunicaciones por satélite utilizan un satélite en órbita como una estación repetidora de microondas para proporcionar cobertura a grandes áreas geográficas ¹ ³. Un desafío clave en las comunicaciones por satélite es el acceso múltiple, que se refiere a cómo múltiples estaciones terrenas pueden compartir los canales limitados del satélite. Los métodos principales de acceso múltiple incluyen FDMA (donde cada estación usa una frecuencia de canal dedicada), TDMA (donde las estaciones comparten un canal de frecuencia, pero se les asignan tiempos de ranura temporales exclusivos) y CDMA (donde cada estación modula su señal con un código único, permitiendo que todas las señales se transmitan simultáneamente en el mismo canal de frecuencia).

En resumen, la guía de estudio ha recorrido un camino desde los fundamentos teóricos de las señales y el espectro electromagnético, pasando por los sistemas de comunicación analógica clásicos (AM, FM, SSB), hasta la transición inevitable hacia la digitalización. Se han explorado los principios de la digitalización (PCM), la multiplexión (TDM) y los medios de transmisión (cables, fibra óptica). La evolución ha seguido hacia sistemas de comunicación complejos como el PSTN y la telefonía celular, y finalmente ha llegado a la era de las redes de datos, con sus protocolos y arquitecturas, y las telecomunicaciones de largo alcance que conectan nuestro mundo globalizado. Cada concepto está intrínsecamente ligado al siguiente, demostrando que los sistemas de comunicaciones electrónicas no son una colección de temas aislados, sino un campo coherente y en constante evolución.

Referencia

1. Electronic communications systems : fundamentals through ... <https://archive.org/details/electroniccommun0005toma>

2. **Electronic Communication Systems by Wayne Tomasi pdf ...** <https://thealdwin.wordpress.com/2017/12/28/electronic-communication-systems-by-wayne-tomasi-pdf-summary/>
3. **Electronic Communications System: Fundamentals ...** <https://www.amazon.com/Electronic-Communications-System-Fundamentals-Advanced/dp/0130494925>