El Concepto Celular - Fundamentos de Diseño de Sistemas

El objetivo de diseño de los primeros sistemas de radio móvil era lograr un área de cobertura grande utilizando un único transmisor de alta potencia con una antena montada en una torre alta. Aunque este enfoque alcanzó una cobertura muy buena, también significó que era imposible reutilizar esas mismas frecuencias en todo el sistema, ya que cualquier intento de lograr la reutilización de la frecuencia resultaría en interferencia. Por ejemplo, el sistema móvil de Bell en la ciudad de Nueva York en la década de 1970 sólo podía soportar un máximo de doce llamadas simultáneas de más de mil millas cuadradas [Cal88]. Frente al hecho de que las agencias reguladoras gubernamentales no podían hacer asignaciones de espectro en proporción a la creciente demanda de servicios móviles, se hizo imprescindible reestructurar el sistema de radiotelefonía para lograr una alta capacidad con espectro de radio limitado y al mismo tiempo cubrir áreas muy grandes.

3.1 Introducción

El concepto celular fue un gran avance en la solución del problema de la congestión espectral y la capacidad del usuario. Ofrecía una capacidad muy alta en una asignación limitada del espectro sin grandes cambios tecnológicos. El concepto de celular es una idea a nivel de sistema que requiere reemplazar un solo transmisor de alta potencia (célula grande) con muchos transmisores de baja potencia (células pequeñas), cada uno proporcionando cobertura a sólo una pequeña porción del área de servicio. A cada estación base se le asigna una parte del número total de canales disponibles para todo el sistema, y ​​las estaciones base cercanas se asignan a diferentes grupos de canales de manera que todos los canales disponibles estén asignados a un número relativamente pequeño de estaciones base vecinas. A las estaciones base vecinas se les asignan diferentes grupos de canales de modo que se minimice la interferencia entre las estaciones base (y los usuarios móviles bajo su control). Al espaciar sistemáticamente las estaciones base y su canal.

los canales disponibles se distribuyen por toda la región geográfica y pueden reutilizarse tantas veces como sea necesario, siempre y cuando la interferencia entre estaciones de cochanel se mantenga por debajo de los niveles aceptables. A medida que aumenta la demanda de servicio (es decir, se necesitan más canales dentro de un mercado particular), se puede aumentar el número de estaciones base (junto con una disminución correspondiente en la potencia del transmisor para evitar interferencias adicionales) aumento adicional del espectro radioeléctrico. Este principio fundamental es la base de todos los modernos sistemas de comunicación inalámbrica, ya que permite que un número fijo de canales sirvan a un número arbitrariamente grande de abonados reutilizando los canales a lo largo de la región de cobertura. Además, el concepto de celular permite que cada pieza de equipo de abonado dentro de un país o continente se fabrique con el mismo conjunto de canales para que cualquier móvil pueda ser utilizado en cualquier parte de la región.

3.2 Reutilización de la frecuencia

Los sistemas de radio celular se basan en una asignación y reutilización inteligente de los canales a lo largo de una región de cobertura [Oet83]. A cada estación base celular se le asigna un grupo de canales de radio para ser utilizado dentro de un área geográfica pequeña llamada célula. Las estaciones base en celdas adyacentes están asignadas a grupos de canales que contienen canales completamente diferentes que las celdas vecinas. Las antenas de la estación base están diseñadas para lograr la cobertura deseada dentro de la celda particular. Al limitar el área de cobertura dentro de los límites de una célula, se puede usar el mismo grupo de canales para cubrir diferentes células que están separadas unas de otras por distancias suficientemente grandes para mantener niveles de interferencia dentro de límites tolerables. El proceso de diseño de seleccionar y asignar grupos de canales para todas las estaciones base celulares dentro de un sistema se denomina reutilización de frecuencias o planificación de frecuencias [Mac79]. La Figura 3.1 ilustra el concepto de reutilización de la frecuencia celular, donde las células etiquetadas con la misma letra usan el mismo grupo de canales. El plan de reutilización de frecuencias se superpone a un mapa para indicar dónde se utilizan diferentes canales de frecuencia. La forma de célula hexagonal mostrada en la Figura 3.1 es conceptual y es un modelo simplista de la cobertura de radio para cada estación base, pero ha sido universalmente adoptada ya que el hexágono permite un análisis fácil y manejable de un sistema celular. La cobertura de radio real de una célula se conoce como la huella y se determina a partir de mediciones de campo o modelos de predicción de propagación. Aunque la huella real es de naturaleza amorfa, se necesita una forma de célula regular para el diseño sistemático del sistema y la adaptación para el crecimiento futuro. Si bien puede parecer natural elegir un círculo para representar el área de cobertura de una estación base, los círculos adyacentes no pueden superponerse sobre un mapa sin dejar huecos o crear regiones superpuestas. Así, al considerar formas geométricas que cubren toda una región sin superposición y con área igual, hay tres opciones sensibles: un cuadrado, un triángulo equilátero y un hexágono. Una célula debe estar diseñada para servir a los móviles más débiles dentro de la huella, y éstos se encuentran típicamente en el borde de la célula. Para una distancia dada entre el centro de un polígono y sus puntos perimetrales más lejanos, el hexágono tiene la mayor área de los tres. Por lo tanto, utilizando la geometría hexagonal, el menor número de células puede cubrir una región geográfica, y el hexágono se aproxima mucho a un patrón de radiación circular que se produciría para una base omnidireccional antena de la estación y propagación del espacio libre. Por supuesto, la huella celular real está determinada por el contorno en el que un transmisor dado sirve a los móviles con éxito. Cuando se usan hexágonos para modelar áreas de cobertura, los transmisores de estaciones base se representan bien en el centro de la célula (células excitadas en el centro) o en tres de los seis vértices celulares (células excitadas por los bordes). Normalmente, las antenas omnidireccionales se utilizan en el centro de células excitadas y antenas sectoriales direccional se utilizan en las células de esquina excitada. Las consideraciones prácticas generalmente no permiten que las estaciones base se coloquen exactamente como aparecen en la disposición hexagonal. La mayoría de los diseños del sistema permiten que una estación base se posicione hasta un cuarto del radio de la celda lejos de la ubicación ideal. Para entender el concepto de reutilización de frecuencia, considere un sistema celular que tiene un total de canales dúplex S disponibles para su uso. Si a cada célula se le asigna un grupo de k canales (k <S), y si los canales S se dividen entre N células en grupos de canales únicos y disjuntos que tienen cada uno el mismo número de canales, el número total de canales de radio disponibles puede ser expresada como (3.1) Las N células que utilizan colectivamente el conjunto completo de frecuencias disponibles se llama un grupo. Si un clúster se replica M veces dentro del sistema, el número total de canales dúplex, C, se puede usar como medida de capacidad y es dado por Como se ve en la ecuación (3.2), la capacidad de un sistema celular es directamente proporcional al número de veces que un grupo se repite en un área de servicio fijo. El factor N se llama el tamaño del clúster y es típicamente igual a 4, 7, o 12. Si el tamaño del grupo N se reduce mientras el tamaño de la celda se mantiene constante, se requieren más grupos para cubrir un área dada, y por lo tanto más capacidad ( se obtiene un valor mayor de C). Un gran tamaño de agrupamiento indica que la relación entre el radio de la célula y la distancia entre las células co-canal es pequeña. Por el contrario, un pequeño tamaño de agrupación indica que las células co-canal se encuentran mucho más cerca. El valor de N es una función de la cantidad de interferencia que una estación móvil o base puede tolerar manteniendo una calidad de comunicaciones suficiente. Desde un punto de vista de diseño, el valor más pequeño posible de N es deseable para maximizar la capacidad sobre un área de cobertura dada (es decir, para maximizar C en la Ecuación (3.2)). El factor de reutilización de frecuencia de un sistema celular se da por 1 / N, ya que cada célula dentro de un grupo sólo se asigna 1 / N del total de canales disponibles en el sistema. Debido a que la geometría hexagonal de la figura 3.1 tiene exactamente seis vecinos equidistantes y que las líneas que unen los centros de cualquier célula y cada uno de sus vecinos están separadas por múltiplos de 60 grados, sólo hay ciertos tamaños de clúster y diseños de celdas que son posibles [Mac79]. La geometría de los hexágonos es tal que el número de células por racimo, N, sólo puede tener valores que satisfagan la ecuación (3.3).

Donde i y j son enteros no negativos. Para encontrar los vecinos más cercanos de una celda en particular, se debe hacer lo siguiente: (1) mover las celdas a lo largo de cualquier cadena de hexágonos y luego (2) girar 60 grados en sentido contrario a las agujas del reloj y mover las celdas j. Esto se ilustra en la Figura 3.2 para i = 3 y j = 2 (ejemplo, N = 19).

3.3 Estrategias de Asignación de Canales

Para una utilización eficiente del espectro radioeléctrico es necesario un esquema de reutilización de frecuencias que sea consistente con los objetivos de aumentar la capacidad y minimizar la interferencia. Se han desarrollado una variedad de estrategias de asignación de canales para lograr estos objetivos. Las estrategias de asignación de canales pueden clasificarse como fijas o dinámicas. La elección de la estrategia de asignación de canales afecta el rendimiento del sistema, particularmente en cuanto a cómo se gestionan las llamadas cuando un usuario móvil es transferido de una celda a otra [Tek91], [LiC93], [Sun94], [Rap93b]. En una estrategia de asignación de canal fijo, a cada célula se le asigna un conjunto predeterminado de canales de voz. Cualquier intento de llamada dentro de la celda sólo puede ser servido por los canales no utilizados en esa celda en particular. Si todos los canales de esa celda están ocupados, la llamada se bloquea y el abonado no recibe servicio. Existen varias variaciones de la estrategia de asignación fija. En un enfoque, denominado estrategia de endeudamiento, se permite a una célula tomar prestados canales de una celda vecina si todos sus propios canales ya están ocupados. El centro de conmutación móvil (MSC) supervisa tales procedimientos de préstamo y asegura que el préstamo de un canal no interrumpa o interfiera con ninguna de las llamadas en curso en la célula donadora. En una estrategia de asignación dinámica de canales, los canales de voz no se asignan permanentemente a diferentes celdas. En su lugar, cada vez que se realiza una petición de llamada, la estación base de servicio solicita un canal desde el MSC. A continuación, el conmutador asigna un canal a la celda solicitada siguiendo un algoritmo que tiene en cuenta la probabilidad de bloqueo futuro dentro de la célula, la frecuencia de uso del canal candidato, la distancia de reutilización del canal y otras funciones de coste.

Por consiguiente, el MSC asigna solamente una frecuencia dada si esa frecuencia no está actualmente en uso en la célula o cualquier otra célula que cae dentro de la distancia restringida mínima de reutilización de frecuencia para evitar la interferencia de co-canal. La asignación dinámica de canales reduce la probabilidad de bloqueo, lo que aumenta la capacidad de trunking del sistema, ya que todos los canales disponibles en un mercado son accesibles a todas las células. Las estrategias de asignación dinámica de canales requieren que el MSC recoja datos en tiempo real sobre la ocupación del canal, la distribución del tráfico y las indicaciones de la potencia de la señal de radio (RSSI) de todos los canales de forma continua. Esto aumenta el almacenamiento y la carga computacional en el sistema, pero proporciona la ventaja de una mayor utilización del canal y una menor probabilidad de una llamada bloqueada.

3.4 Estrategias de transferencia

Cuando un móvil se desplaza a una celda diferente mientras una conversación está en progreso, el MSC transfiere automáticamente la llamada a un nuevo canal perteneciente a la nueva estación base. Esta operación de transferencia no sólo implica la identificación de una nueva estación base, sino que también requiere que las señales de voz y de control estén asignadas a canales asociados con la nueva estación base. Procesar transferencias es una tarea importante en cualquier sistema de radio celular. Muchas estrategias de transferencia priorizan solicitudes de transferencia sobre solicitudes de iniciación de llamada cuando asignan canales no utilizados en un sitio de célula. Los traspasos deben realizarse con éxito y con la menor frecuencia posible, e imperceptibles para los usuarios. Para cumplir con estos requisitos, los diseñadores de sistemas deben especificar un nivel de señal óptimo para iniciar un traspaso. Una vez que se especifica un nivel de señal determinado como el valor mínimo para una calidad de voz aceptable en el receptor de la estación base (normalmente tomada entre -90 dBm y -100 dBm), se utiliza un nivel de señal ligeramente más fuerte como umbral en el que se realiza un traspaso. Este margen, dado por Δ = Pr handoff - Pr mínimo utilizable, no puede ser demasiado grande o demasiado pequeño. Si Δ es demasiado grande, pueden ocurrir traspasos innecesarios que cargan el MSC y si Δ es demasiado pequeño, puede haber un tiempo insuficiente para completar un traspaso antes de que se pierda una llamada debido a condiciones de señal débiles. Por lo tanto, Δ se elige cuidadosamente para satisfacer estos requisitos en conflicto. La figura 3.3 ilustra una situación de traspaso. La figura 3.3 (a) muestra el caso en el que no se realiza un traspaso y la señal cae por debajo del nivel mínimo aceptable para mantener activo el canal. Este evento de llamada caída puede ocurrir cuando hay un retraso excesivo por parte del MSC al asignar un traspaso o cuando el umbral Δ se establece demasiado pequeño para el tiempo de traspaso en el sistema. Los retrasos excesivos pueden ocurrir durante las condiciones de alto tráfico debido a la carga de cálculo en el MSC o debido al hecho de que no hay canales disponibles en ninguna de las estaciones bases cercanas (obligando así al MSC a esperar hasta que un canal en una celda cercana se vuelva libre).

Al decidir cuándo traspasar, es importante asegurarse de que la caída en el nivel de señal medido no se deba a un desvanecimiento momentáneo y que el móvil se está alejando realmente de la estación base de servicio. Para garantizar esto, la estación base supervisa el nivel de señal durante un cierto período de tiempo antes de que se inicie un traspaso. Esta medición de la intensidad de la señal en funcionamiento debe optimizarse de forma que se eviten traspasos innecesarios, al tiempo que se garantiza que los traspasos necesarios se completan antes de finalizar una llamada debido a un nivel de señal bajo. El tiempo necesario para decidir si un traspaso es necesario depende de la velocidad a la que se esté moviendo el vehículo. Si la pendiente del nivel de señal recibido en el promedio de corto plazo en un intervalo de tiempo dado es empinada, el handoff se debe hacer rápidamente. La información sobre la velocidad del vehículo, que puede ser útil en las decisiones de traspaso, también se puede calcular a partir de las estadísticas de la señal de desvanecimiento de corto plazo recibida en la estación base. El tiempo durante el cual se puede mantener una llamada dentro de una celda, sin transferencia, se denomina tiempo de espera [Rap93b]. El tiempo de permanencia de un usuario particular está gobernado por una serie de factores, incluyendo propagación, interferencia, distancia entre el abonado y la estación base, y otros efectos variables en el tiempo. El Capítulo 5 muestra que incluso cuando un usuario móvil está parado, el movimiento ambiental en la proximidad de la estación base y el móvil puede producir desvanecimiento; por lo tanto, incluso un suscriptor estacionario puede tener un tiempo de espera aleatorio y finito. Análisis en [Rap93b] indica que las estadísticas de tiempo de permanencia varían mucho, dependiendo de la velocidad del usuario y el tipo de cobertura de radio. Por ejemplo, en las células maduras que proporcionan cobertura para usuarios de vehículos en carretera, la mayoría de los usuarios tienden a tener una velocidad relativamente constante y recorrer caminos fijos y bien definidos con buena cobertura de radio. En tales casos, el tiempo de permanencia para un usuario arbitrario es una variable aleatoria con una distribución que está altamente concentrada alrededor del tiempo de permanencia medio. Por otra parte, para los usuarios en entornos densos y desordenados de micro células, típicamente hay una gran variación del tiempo de permanencia alrededor de la media, y los tiempos de permanencia son típicamente más cortos de lo que la geometría celular podría sugerir. Es evidente que las estadísticas de tiempo de permanencia son importantes en el diseño práctico de los algoritmos de traspaso [LiC93], [Sun94], [Rap93b].

En sistemas celulares analógicos de primera generación, las mediciones de intensidad de señal son realizadas por las estaciones base y supervisadas por el MSC. Cada estación base monitorea constantemente las intensidades de la señal de todos sus canales de voz inversa para determinar la ubicación relativa de cada usuario móvil con respecto a la torre de la estación base. Además de medir el RSSI de las llamadas en curso dentro de la célula, se utiliza un receptor de repuesto en cada estación base, denominado receptor localizador, para explorar y determinar las fuerzas de señal de los usuarios móviles que están en celdas vecinas. El receptor localizador es controlado por el MSC y se utiliza para monitorizar la intensidad de la señal de los usuarios en las celdas vecinas que parecen estar en necesidad de transferencia y reporta todos los valores RSSI al MSC. Basándose en la información de la intensidad de la señal del receptor del localizador de cada estación base, el MSC decide si un traspaso es necesario o no. En los sistemas de segunda generación de hoy en día, las decisiones de traspaso son asistidas por dispositivos móviles. En el traspaso asistido móvil (MAHO), cada estación móvil mide la potencia recibida de las estaciones base circundantes y comunica continuamente los resultados de estas mediciones a la estación base de servicio. Se inicia un traspaso cuando la potencia recibida desde la estación base de una célula vecina empieza a exceder la potencia recibida desde la estación base actual por un cierto nivel o durante un cierto período de tiempo hora. El método MAHO permite que la llamada se entregue entre las estaciones base a un ritmo mucho más rápido que en los sistemas analógicos de primera generación, ya que las mediciones de traspaso son realizadas por cada móvil y el MSC ya no supervisa constantemente las intensidades de la señal. MAHO es particularmente adecuado para ambientes micro celulares donde los traspasos son más frecuentes.

Durante el curso de una llamada, si un móvil se desplaza de un sistema celular a otro sistema celular controlado por un MSC diferente, se hace necesario un traspaso entre sistemas. Un MSC se involucra en un traspaso entre sistemas cuando una señal móvil se vuelve débil en una célula dada y el MSC no puede encontrar otra célula dentro de su sistema a la que pueda transferir la llamada en curso. Existen muchas cuestiones que deben abordarse al implementar un traspaso entre sistemas. Por ejemplo, una llamada local puede convertirse en una llamada de larga distancia cuando el móvil se desplaza de su sistema doméstico y se convierte en un roamer en un sistema vecino. Además, la compatibilidad entre los dos MSC debe determinarse antes de implementar un hinterverter entre sistemas. El Capítulo 10 demuestra cómo se implementan las transferencias entre sistemas en la práctica.

Los diferentes sistemas tienen diferentes políticas y métodos para gestionar solicitudes de traspaso. Algunos sistemas manejan las solicitudes de handoff de la misma manera que manejan las llamadas de origen. En tales sistemas, la probabilidad de que una petición de traspaso no sea atendida por una nueva estación base es igual a la probabilidad de bloqueo de las llamadas entrantes. Sin embargo, desde el punto de vista del usuario, tener una llamada abruptamente terminada mientras en medio de una conversación es más molesto que ser bloqueado de vez en cuando en un nuevo intento de llamada. Para mejorar la calidad de servicio percibida por los usuarios, se han ideado diversos métodos para priorizar peticiones de handoff sobre solicitudes de iniciación de llamada cuando se asignan canales de voz.

3.4.1 Priorización de los traspasos

Un método para dar prioridad a los traspasos se denomina concepto de canal de guarda, por lo que una fracción del total de canales disponibles en una celda está reservada exclusivamente para solicitudes de traspaso de llamadas en curso que pueden ser entregadas en la celda. Este método tiene la desventaja de reducir el tráfico total transportado, ya que se asignan menos canales a las llamadas de origen. Sin embargo, los canales de guardia ofrecen una utilización eficiente del espectro cuando se utilizan estrategias dinámicas de asignación de canales, que minimizan el número de canales de guardia requeridos mediante asignación eficiente basada en la demanda.

La cola de las solicitudes de transferencia es otro método para disminuir la probabilidad de terminación forzada de una llamada debido a la falta de canales disponibles. Hay una compensación entre la disminución en la probabilidad de terminación forzada y el tráfico total transportado. La puesta en cola de traspasos es posible debido al hecho de que hay un intervalo de tiempo finito entre el momento en que el nivel de la señal recibida cae por debajo del umbral de traspaso y el tiempo en que la llamada se termina debido a un nivel de señal insuficiente. El tiempo de retardo y el tamaño de la cola se determinan a partir del patrón de tráfico del área de servicio particular. Cabe señalar que la puesta en cola no garantiza una probabilidad cero de terminación forzada, ya que los grandes retardos harán que el nivel de la señal recibida caiga por debajo del nivel mínimo requerido para mantener la comunicación y, por lo tanto, conducir a la terminación forzada.

3.4.2 Consideraciones Prácticas de Traspaso

En sistemas celulares prácticos, surgen varios problemas al intentar diseñar para una amplia gama de velocidades móviles. Los vehículos de alta velocidad pasan a través de la región de cobertura de una celda en cuestión de segundos, mientras que los usuarios peatones pueden nunca necesitar un traspaso durante una llamada. Particularmente con la adición de micro células para proporcionar capacidad, el MSC se puede cargar rápidamente si los usuarios de alta velocidad se pasan constantemente entre células muy pequeñas. Se han ideado varios esquemas para manejar el tráfico simultáneo de usuarios de alta velocidad y de baja velocidad al tiempo que se minimiza la intervención de transferencia del MSC. Otra limitación práctica es la capacidad de obtener nuevos sitios de células. Aunque el concepto celular proporciona claramente una capacidad adicional mediante la adición de sitios celulares, en la práctica es difícil para los proveedores de servicios celulares obtener nuevas localizaciones de células físicas en zonas urbanas. Las leyes de zonificación, las ordenanzas y otras barreras no técnicas a menudo hacen que sea más atractivo para un proveedor de telefonía celular instalar canales adicionales y estaciones base en la misma ubicación física de una celda existente, en lugar de buscar nuevas ubicaciones de sitio. Mediante el uso de diferentes alturas de antena (a menudo en el mismo edificio o torre) y diferentes niveles de potencia, es posible proporcionar "grandes" y "pequeñas" células que se co-ubicados en un solo lugar. Esta técnica se denomina enfoque de celda paraguas y se utiliza para proporcionar cobertura de área grande a usuarios de alta velocidad mientras proporciona cobertura de área pequeña a usuarios que viajan a velocidades bajas. La figura 3.4 ilustra una célula paraguas que está colocada con algunas microceldas más pequeñas. El enfoque de célula paraguas asegura que el número de transferencias se minimice para usuarios de alta velocidad y proporcione canales de microcélula adicionales para usuarios peatones. La velocidad de cada usuario puede ser estimada por la estación base o MSC mediante la evaluación de la rapidez con que la intensidad de la señal promedio a corto plazo en el RVC cambia con el tiempo, o pueden usarse algoritmos más sofisticados para evaluar y dividir a los usuarios. Si un usuario de alta velocidad en la célula paraguas grande se está acercando a la estación base y su velocidad está disminuyendo rápidamente, la estación base puede decidir entregar el usuario a la microcélula co-ubicada, sin intervención del MSC.

Otro problema práctico de traspaso en sistemas de microcélulas se conoce como arrastre de células. El arrastre de celdas resulta de usuarios peatonales que proporcionan una señal muy fuerte a la estación base. Tal situación ocurre en un entorno urbano cuando hay una trayectoria de radio de línea de mira (LOS) entre el abonado y la estación base. A medida que el usuario se aleja de la estación base a una velocidad muy lenta, la intensidad media de la señal no se descompone rápidamente. Incluso cuando el usuario ha viajado mucho más allá del intervalo diseñado de la célula, la señal recibida en la estación base puede estar por encima del umbral de traspaso, por lo que no se puede realizar un traspaso. Esto crea un problema potencial de interferencia y gestión de tráfico, ya que el usuario ha viajado entretanto en el interior de una célula vecina. Para resolver el problema de arrastre de celdas, los umbrales de traspaso y los parámetros de cobertura de radio deben ajustarse cuidadosamente. En los sistemas celulares analógicos de primera generación, el tiempo típico para realizar un traspaso, una vez que el nivel de señal se considera que está por debajo del umbral de traspaso, es de aproximadamente 10 segundos. Esto requiere que el valor de Δ sea del orden de 6 dB a 12 dB. En los sistemas celulares digitales como el GSM, el móvil ayuda con el procedimiento de transferencia determinando los mejores candidatos de transferencia, y el traspaso, una vez que se toma la decisión, normalmente requiere sólo 1 ó 2 segundos. Por consiguiente, Δ es

generalmente entre 0 dB y 6 dB en sistemas celulares modernos. El proceso de transferencia más rápido soporta una gama mucho mayor de opciones para manejar usuarios de alta velocidad y baja velocidad y proporciona al MSC un tiempo considerable para "rescatar" una llamada que necesita una transferencia. Otra característica de los nuevos sistemas celulares es la capacidad de tomar decisiones de transferencia basadas en una amplia gama de métricas distintas de la intensidad de la señal. Los niveles de interferencia de canal coaxial y de canal adyacente pueden medirse en la estación base o en el móvil y esta información puede usarse con datos de intensidad de señal convencionales para proporcionar un algoritmo multidimensional para determinar cuándo se necesita un traspaso. El sistema celular de espectro ensanchado de acceso múltiple por división de código IS-95 (CDMA) descrito en el Capítulo 11 y en [Lib99], [Kim00] y [Gar99], proporciona una capacidad de traspaso única que no se puede proporcionar con otros sistemas inalámbricos. A diferencia de los sistemas inalámbricos canalizados que asignan diferentes canales de radio durante un traspaso (denominado "hard handoff"), los móviles de espectro extendido comparten el mismo canal en cada célula. Por lo tanto, el término transferencia no significa un cambio físico en el canal asignado, sino más bien que una estación base diferente maneja la tarea de comunicación por radio. Mediante la evaluación simultánea de las señales recibidas desde un único abonado en varias estaciones base vecinas, el MSC puede decidir realmente qué versión de la señal del usuario es la mejor en cualquier momento en el tiempo. Esta técnica explora la diversidad espacial macroscópica proporcionada por las diferentes ubicaciones físicas de las estaciones base y permite al MSC tomar una decisión "suave" en cuanto a qué versión de la señal del usuario debe pasar a la PSTN en cualquier instancia [Pad94]. La capacidad de seleccionar entre las señales recibidas instantáneas de una variedad de estaciones base se llama transferencia suave.

3.5 Interferencia y capacidad del sistema

La interferencia es el principal factor limitante en el rendimiento de los sistemas de radio celular. Las fuentes de interferencia incluyen otro móvil en la misma célula, una llamada en curso en una célula vecina, otras estaciones base que operan en la misma banda de frecuencias, o cualquier sistema no celular que inadvertidamente

filtra la energía en la banda de frecuencia celular. La interferencia en los canales de voz provoca la conversación cruzada, donde el abonado escucha la interferencia en el fondo debido a una transmisión no deseada. En los canales de control, la interferencia conduce a llamadas perdidas y bloqueadas debido a errores en la señalización digital. La interferencia es más grave en las zonas urbanas, debido al mayor nivel de ruido de RF y al gran número de estaciones base y móviles. La interferencia ha sido reconocida como el principal cuello de botella en el aumento de la capacidad y es a menudo responsable de las llamadas caídas. Los dos tipos principales de interferencia celular generada por el sistema son la interferencia co-canal y la interferencia de canal adyacente. Aunque a menudo se generan señales de interferencia dentro del sistema celular, son difíciles de controlar en la práctica (debido a efectos de propagación aleatoria). Aún más difícil de controlar es la interferencia debida a los usuarios fuera de banda, que surge sin previo aviso debido a la sobrecarga frontal de equipos de abonado o productos intermitentes de intermodulación. En la práctica, los transmisores de portadores celulares competidores son a menudo una fuente significativa de interferencia fuera de banda, ya que los competidores a menudo ubican sus estaciones base muy próximas entre sí para proporcionar una cobertura comparable a los clientes.

3.5.1 Interferencia de Co-Canal y Capacidad del Sistema

La reutilización de frecuencia implica que en un área de cobertura dada hay varias células que usan el mismo conjunto de frecuencias. Estas células se llaman células co-canal, y la interferencia entre las señales de estas células se llama interferencia co-canal. A diferencia del ruido térmico que puede superarse aumentando la relación señal-ruido (SNR), no se puede combatir la interferencia co-canal simplemente incrementando la potencia portadora de un transmisor. Esto se debe a que un aumento en la potencia de transmisión del portador aumenta la interferencia a las células vecinas co-canal. Para reducir la interferencia co-canal, las células co-canal deben estar físicamente separadas por una distancia mínima para proporcionar suficiente aislamiento debido a la propagación.

Cuando el tamaño de cada célula es aproximadamente el mismo y las estaciones base transmiten la misma potencia, la relación de interferencia co-canal es independiente de la potencia transmitida y se convierte en una función del radio de la célula (R) y la distancia entre centros de las células de co-canal más cercanas (D). Al aumentar la relación de D / R, se incrementa la separación espacial entre células co-canal con relación a la distancia de cobertura de una célula. Por lo tanto, la interferencia se reduce del aislamiento mejorado de la energía RF de la célula co-canal. El parámetro Q, denominado co-channel reuse ratio, está relacionado con el tamaño del cluster (ver Tabla 3.1 y Ecuación (3.3)). Para una geometría hexagonal Un pequeño valor de Q proporciona mayor capacidad ya que el tamaño del clúster N es pequeño, mientras que un gran valor de Q mejora la calidad de transmisión, debido a un menor nivel de interferencia de canal compartido. Debe hacerse un trade-off entre estos dos objetivos en el diseño celular real.

donde S es la potencia de señal deseada desde la estación de base deseada e Ii es la potencia de interferencia causada por la estación de base de célula co-canal interferente i-ésimo. Si se conocen los niveles de señal de las células co-canal, entonces se puede encontrar la relación S / I para el enlace directo utilizando la ecuación (3.5).

Las mediciones de propagación en un canal de radio móvil muestran que la intensidad media de la señal recibida en cualquier punto disminuye como una ley de potencia de la distancia de separación entre un transmisor y un receptor. La potencia media recibida Pr a una distancia d de la antena transmisora ​​es aproximada por donde P0 es la potencia recibida en un punto de referencia cercano en la región de campo lejano de la antena a una pequeña distancia d0 de la antena transmisora ​​y n es el exponente de pérdida de trayectoria. Ahora considere el enlace directo donde la señal deseada es la estación base de servicio y donde la interferencia se debe a las estaciones base de co-canal. Si Di es la distancia del i-ésimo interferente desde el móvil, la potencia recibida en un móvil dado debido a la i-ésima célula interferente será proporcional a (Di) -n. El exponente de pérdida de trayectoria típicamente oscila entre dos y cuatro en sistemas celulares urbanos [Rap92b].

Cuando la potencia de transmisión de cada estación base es igual y el exponente de pérdida de trayectoria es el mismo en toda la zona de cobertura, S / I para un móvil puede aproximarse como Considerando solamente la primera capa de células interferentes, si todas las estaciones base interferentes están equidistantes de la estación base deseada y si esta distancia es igual a la distancia D entre centros celulares, entonces la Ecuación (3.8) simplifica a La ecuación (3.9) relaciona S / I con el tamaño del clúster N, que a su vez determina la capacidad total del sistema a partir de la Ecuación (3.2). Por ejemplo, suponga que las seis células más cercanas están lo suficientemente cerca como para crear una interferencia significativa y que son todas aproximadamente equidistantes de la estación base deseada. Para el sistema celular AMPS de Estados Unidos que usa canales FM y 30 kHz, las pruebas subjetivas indican que se proporciona suficiente calidad de voz cuando S / I es mayor o igual a 18 dB. Utilizando la ecuación (3.9), se puede mostrar que para cumplir con este requisito, el tamaño del clúster N debe ser al menos 6,49, suponiendo un exponente de pérdida de trayectoria n = 4. Por lo tanto, un tamaño mínimo de clúster de siete es necesario para cumplir con un S / I de 18 dB. Debe tenerse en cuenta que la ecuación (3.9) se basa en la geometría hexagonal de células en la que todas las células interferentes son equidistantes del receptor de la estación base y, por lo tanto, proporciona un resultado optimista en muchos casos. Para algunos planes de reutilización de frecuencias (por ejemplo, N = 4), las células interferentes más cercanas varían ampliamente en sus distancias desde la célula deseada. Usando una disposición exacta de la geometría de la célula, puede demostrarse para un racimo de siete células, con la unidad móvil en el límite de la célula, el móvil es una distancia D-R de las dos células interferentes del co-canal más cercano y es exactamente D + R / 2, D, D - R / 2 y D + R de las otras células interferentes en el primer nivel, como se muestra rigurosamente en [Lee86]. Utilizando la geometría aproximada que se muestra en la Figura 3.5, la ecuación (3.8) y suponiendo n = 4, la relación señal-interferencia en el peor de los casos puede ser muy aproximada como (una expresión exacta es elaborada por Jacobs meyer [Jac94]

Para N = 7, la relación de reutilización co-canal Q es 4.6, y el peor caso S / I es aproximado como 49.56 (17 dB) usando la Ecuación (3.11), mientras que una solución exacta usando la Ecuación (3.8) produce 17.8 dB [Jac94 ]. Por lo tanto, para un grupo de siete células, la relación S / I es ligeramente inferior a 18 dB para el peor de los casos. Para diseñar el sistema celular para un rendimiento adecuado en el peor de los casos, sería necesario aumentar N al siguiente tamaño más grande, que a partir de la ecuación (3.3) se encuentra 12 (correspondiente a i = j = 2). Esto obviamente implica una disminución significativa en la capacidad, ya que la reutilización de 12 células ofrece una utilización del espectro de 1/12 dentro de cada célula, mientras que la reutilización de siete células ofrece una utilización del espectro de 1/7. En la práctica, una reducción de capacidad de 7/12 no sería tolerable para dar cabida a la peor situación que rara vez ocurre. De la discusión anterior, está claro que la interferencia co-canal determina el rendimiento del enlace, que a su vez dicta el plan de reutilización de frecuencias y la capacidad total de los sistemas celulares.

3.5.2 Planificación de canales para sistemas inalámbricos La asignación juiciosa de los canales de radio apropiados a cada estación base es un proceso importante que es mucho más difícil en la práctica que en teoría. Mientras que la ecuación (3.9) es una regla valiosa para determinar la proporción apropiada de reutilización de frecuencia (o tamaño de clúster) y la separación apropiada entre células de co-canal adyacentes, el ingeniero inalámbrico debe lidiar con las dificultades reales de propagación de radio e imperfecta regiones de cobertura de cada célula. En la práctica, los sistemas celulares rara vez obedecen la hipótesis de pérdida de trayectoria de propagación homogénea de la ecuación (3.9). En general, el espectro de radio móvil disponible se divide en canales, que son parte de un estándar de interfaz de aire que se utiliza en todo un país o continente. Estos canales generalmente están formados por canales de control (vitales para iniciar, solicitar o llamar una llamada), y canales de voz (dedicados a transportar tráfico generador de ingresos). Normalmente, alrededor del 5% de todo el espectro móvil está dedicado a canales de control, que llevan mensajes de datos que son muy breves y ráfagas en naturaleza, mientras que el 95% restante del espectro está dedicado a canales de voz. Se pueden asignar canales

por el operador inalámbrico de la manera que elija, ya que cada mercado puede tener sus propias condiciones de propagación particulares o servicios particulares que desea ofrecer y puede desear adoptar su propio esquema de reutilización de frecuencias específico que se ajuste a sus condiciones geográficas o elección de tecnología de interfaz aérea. Sin embargo, en los sistemas prácticos, el estándar de interfaz de aire asegura una distinción entre los canales de voz y de control, y por lo tanto los canales de control generalmente no se permiten utilizar como canales de voz, y viceversa. Además, puesto que los canales de control son vitales para el lanzamiento exitoso de cualquier llamada, la estrategia de reutilización de la frecuencia aplicada a los canales de control es diferente y generalmente más conservadora (por ejemplo, se proporciona mayor protección S / I) que para los canales de voz. Esto se puede ver en el Ejemplo 3.3, donde los canales de control son asignados utilizando la reutilización de 21 células, mientras que los canales de voz se asignan usando la reutilización de siete células. Típicamente, los canales de control son capaces de manejar una gran cantidad de datos de manera que sólo se necesita un canal de control dentro de una célula. Como se describe en la Sección 3.7.2, la sectorización se utiliza a menudo para mejorar la relación señal-interferencia, lo que puede dar lugar a un tamaño de clúster más pequeño, y en tales casos, sólo un único canal de control se asigna a un sector individual de una célula. Una de las características clave de los sistemas CDMA es que el tamaño del clúster es N = 1, y la planificación de frecuencias no es tan difícil como para los sistemas TDMA o de primera generación [Lib99]. Sin embargo, las consideraciones de propagación requieren que la mayoría de los sistemas CDMA prácticos utilicen algún tipo de reutilización de frecuencias limitadas cuando las condiciones de propagación son particularmente malas en un mercado particular. Por ejemplo, en la proximidad de cuerpos de agua, las células interferentes en el mismo canal que la celda de servicio deseada pueden crear sobrecarga de interferencia que excede el rango dinámico de capacidades de control de potencia CDMA, lo que provoca llamadas perdidas. En tales casos, el enfoque más popular es utilizar lo que se denomina planificación de celdas f1 / f2, donde las celdas vecinas más cercanas utilizan canales de radio que son diferentes de su vecino más cercano en ubicaciones particulares. Tal planificación de frecuencia requiere que los teléfonos CDMA hagan transferencias duras, como lo hacen los teléfonos TDMA y FDMA.

En CDMA, un solo canal de radio de 1,25 MHz lleva las transmisiones simultáneas del canal de control individual con hasta 64 canales de voz simultáneos. Por lo tanto, a diferencia de los sistemas TDMA GSM de 30 kHz IS-136 o 200 kHz, donde la región de cobertura y los niveles de interferencia están bien definidos cuando se utilizan canales de radio específicos, el sistema CDMA tiene una región de cobertura dinámica variable en el tiempo que varía dependiendo el número instantáneo de usuarios en el canal de radio CDMA. Este efecto, conocido como célula de respiración, requiere que el ingeniero inalámbrico planifique cuidadosamente los niveles de cobertura y señal para los casos mejores y peores para las celdas de servicio, así como las celdas vecinas más cercanas, tanto desde el punto de vista de cobertura como de interferencia. El fenómeno de la célula de respiración puede conducir a las llamadas caídas abruptas que resultan de cambios abruptos de la cobertura simplemente debido a un aumento en el número de usuarios en una estación de base de CDMA de la porción. Por lo tanto, en lugar de tener que tomar decisiones cuidadosas sobre los esquemas de asignación de canales para cada estación base celular, los ingenieros CDMA deben tomar decisiones difíciles sobre los niveles de potencia y umbrales asignados a los canales de control, canales de voz y cómo estos niveles y umbrales deben ajustarse para cambiar la intensidad del tráfico. Además, los niveles de umbral para los traspasos CDMA, tanto en el caso de traspaso suave como en el caso de traspaso duro, deben planificarse y medirse con frecuencia cuidadosamente antes de activar el servicio. De hecho, el problema de planificación de celdas f1 / f2 llevó al desarrollo de la TSB-74, que añadió capacidades de hard-handoff entre diferentes canales de radio CDMA a la especificación original IS-95 CDMA descrita en el Capítulo 11.

3.5.3 Interferencia de canal adyacente

La interferencia resultante de señales que son adyacentes en frecuencia a la señal deseada se denomina interferencia de canal adyacente. La interferencia de canal adyacente resulta de filtros de receptor imperfectos que permiten que las frecuencias cercanas se escapen en la banda de paso. El problema puede ser particularmente grave si un usuario de canal adyacente está transmitiendo muy cerca del receptor de un abonado, mientras que el receptor intenta recibir una estación base en el canal deseado. Esto se conoce como efecto de cerca de lejos, donde un transmisor cercano (que puede o no ser del mismo tipo que el utilizado por el sistema celular) capta el receptor del abonado. Alternativamente, el efecto cercano al extremo ocurre cuando un móvil cercano a una estación base transmite en un canal cercano a uno que está siendo utilizado por un móvil débil. La estación base puede tener dificultad para discriminar al usuario móvil deseado de la "sangría" causada por el móvil de canal adyacente cercano. Las interferencias de canales adyacentes pueden minimizarse mediante un cuidadoso filtrado y asignación de canales. Puesto que cada célula recibe sólo una fracción de los canales disponibles, no es necesario asignar a una célula canales que estén todos adyacentes en frecuencia. Manteniendo la separación de frecuencia entre cada canal en una célula dada lo más grande posible, la interferencia de canal adyacente puede reducirse considerablemente. Así, en lugar de asignar canales que forman una banda contigua de frecuencias dentro de una célula particular, se asignan canales de tal manera que la separación de frecuencia entre canales en una célula dada se maximiza. Al asignar secuencialmente canales sucesivos en la banda de frecuencias a diferentes celdas, muchos esquemas de asignación de canales son capaces de separar canales adyacentes en una celda con tantos anchos de banda de canal N, donde N es el tamaño de agrupación. Algunos esquemas de asignación de canales evitan también una fuente secundaria de interferencia de canal adyacente al evitar el uso de canales adyacentes en sitios celulares vecinos. Si el factor de reutilización de frecuencia es grande (por ejemplo, N pequeño), la separación entre canales adyacentes en la estación base puede no ser suficiente para mantener el nivel de interferencia de canal adyacente dentro de límites tolerables. Por ejemplo, si un móvil de cierre es 20 veces más próximo a la estación base que otro móvil y tiene un desbordamiento de energía de su banda de paso, la relación de señal a interferencia en la estación base para el móvil débil (antes del filtrado del receptor) es aproximadamente

Para un exponente de pérdida de trayecto n = 4, esto es igual a -52 dB. Si el filtro de frecuencia intermedia (IF) del receptor de la estación base tiene una pendiente de 20 dB / octava, entonces un interferente de canal adyacente debe ser desplazado por lo menos seis veces la anchura de banda de banda pasiva desde el centro de la banda de frecuencia de receptor para alcanzar 52 dB atenuación. En este caso, se requiere una separación de aproximadamente seis anchos de banda de canal para filtros típicos con el fin de proporcionar SIR de 0 dB desde un usuario de canal adyacente cercano. Esto implica que se necesitan más de seis separaciones de canal para llevar la interferencia del canal adyacente a un nivel aceptable. Los filtros estrechos de la estación base son necesarios cuando los usuarios cercanos y distantes comparten la misma celda. En la práctica, los receptores de estaciones base están precedidos por un filtro de alta cavidad Q para rechazar la interferencia de canal adyacente.

3.5.4 Control de energía para reducir interferencias

En los sistemas prácticos de radio celular y de comunicación personal, los niveles de potencia transmitidos por cada unidad de abonado están bajo control constante por las estaciones base de servicio. Esto se hace para asegurar que cada móvil transmite la menor potencia necesaria para mantener un enlace de buena calidad

en el canal inverso. El control de potencia no sólo ayuda a prolongar la duración de la batería para la unidad de abonado, sino que también reduce drásticamente el canal inverso S / I en el sistema. Como se muestra en los capítulos 9 y 11, el control de potencia es especialmente importante para los nuevos sistemas de espectro ensanchado CDMA que permiten a cada usuario de cada celda compartir el mismo canal de radio.

3.6 Troncales y grado de servicio

Los sistemas de radiocomunicaciones celulares dependen de los enlaces para acomodar a un gran número de usuarios en un espectro radioeléctrico limitado. El concepto de trunking permite a un gran número de usuarios compartir el número relativamente pequeño de canales en una celda al proporcionar acceso a cada usuario, a petición, de un conjunto de canales disponibles. En un sistema de radio troncalizado, a cada usuario se le asigna un canal por llamada, y al terminar la llamada, el canal previamente ocupado se devuelve inmediatamente al grupo de canales disponibles. Trunking explota el comportamiento estadístico de los usuarios de manera que un número fijo de canales o circuitos pueda acomodar una gran comunidad de usuarios al azar. La compañía telefónica utiliza la teoría de trunking para determinar el número de circuitos telefónicos que deben asignarse a los edificios de oficinas con cientos de teléfonos, y este mismo principio se utiliza para diseñar sistemas de radio celular. Existe una compensación entre el número de circuitos telefónicos disponibles y la probabilidad de que un usuario determinado encuentre que no hay circuitos disponibles durante el tiempo de llamada de pico. A medida que disminuye el número de líneas telefónicas, es más probable que todos los circuitos estén ocupados para un usuario determinado. En un sistema de radio móvil troncalizado, cuando un usuario particular solicita servicio y todos los canales de radio ya están en uso, el usuario se bloquea o se deniega el acceso al sistema. En algunos sistemas, puede utilizarse una cola para contener a los usuarios solicitantes hasta que un canal esté disponible.

Para diseñar sistemas de radio troncalizados que puedan manejar una capacidad específica en un "grado de servicio" específico, es esencial entender la teoría de trunking y la teoría de colas. Los fundamentos de la teoría del trunking fueron desarrollados por Erlang, un matemático danés que, a finales del siglo XIX, se embarcó en el estudio de cómo una gran población podía ser acomodada por un número limitado de servidores. Hoy en día, la medida de intensidad de tráfico lleva su nombre. Un Erlang representa la cantidad de intensidad de tráfico transportada por un canal que está completamente ocupado (es decir, una llamada hora por hora o una llamada minuto por minuto). Por ejemplo, un canal de radio que está ocupado durante treinta minutos durante una hora lleva 0.5 Erlangs de tráfico. El grado de servicio (GOS) es una medida de la capacidad de un usuario para acceder a un sistema truncado durante la hora más activa. La hora ocupada se basa en la demanda del cliente en la hora más ocupada durante una semana, mes o año. Las horas ocupadas para los sistemas de radio celular típicamente ocurren durante las horas pico, entre las 4 p.m. y 6 p.m. un jueves o un viernes por la noche. El grado de servicio es un punto de referencia utilizado para definir el rendimiento deseado de un sistema truncado particular especificando una probabilidad deseada de que un usuario obtenga acceso a un canal dado un número específico de canales disponibles en el sistema. Es el trabajo del diseñador inalámbrico estimar la capacidad máxima requerida y asignar el número adecuado de canales para cumplir con el GOS. GOS se suele dar como la probabilidad de que una llamada se bloquea, o la probabilidad de que una llamada experimente un retraso mayor que un cierto tiempo de cola.

Set-up Time (Tiempo de configuración):

El tiempo necesario para asignar un canal de radio truncado a un usuario solicitante.

Llamada bloqueada: llamada que no se puede completar en el momento de la solicitud, debido a la congestión. También se conoce como una llamada perdida.

Tiempo de espera: duración media de una llamada típica. Denotado por H (en segundos).

Intensidad del tráfico: Medida de la utilización del tiempo del canal, que es la ocupación media del canal medida en Erlangs. Esta es una cantidad adimensional y puede usarse para medir la utilización del tiempo de canales individuales o múltiples. Denotado por A.

Carga: Intensidad de tráfico en todo el sistema de radio troncalizado, medido en Erlangs.

Grado de Servicio (GOS): Una medida de la congestión que se especifica como la probabilidad de que una llamada sea bloqueada (para Erlang B), o la probabilidad de que una llamada sea retrasada más allá de cierto tiempo (para Erlang C).

Request Rate: El número medio de solicitudes de llamada por unidad de tiempo. Denotado por λ segundos-1.

Una serie de definiciones enumeradas en la Tabla 3.3 se usan en la teoría de trunking para hacer estimaciones de capacidad en sistemas truncados. La intensidad de tráfico ofrecida por cada usuario es igual a la tasa de solicitud de llamada multiplicada por el tiempo de espera. Es decir, cada usuario genera una intensidad de tráfico de Au Erlangs dada por donde H es la duración media de una llamada y λ es el número medio de solicitudes de llamada por unidad de tiempo para cada usuario. Para un sistema que contiene usuarios de U y un número no especificado de canales, la intensidad total de tráfico ofrecida A se da como Además, en un sistema troncalizado de canal C, si el tráfico está distribuido equitativamente entre los canales, entonces la intensidad de tráfico por canal, Ac, se da como

Tenga en cuenta que el tráfico ofrecido no es necesariamente el tráfico que es transportado por el sistema troncalizado, sino sólo el que se ofrece al sistema troncalizado. Cuando el tráfico ofrecido excede la capacidad máxima del sistema, el tráfico transportado se limita debido a la capacidad limitada (es decir, un número limitado de canales). El máximo tráfico posible es el número total de canales, C, en Erlangs. El sistema celular AMPS está diseñado para un GOS de bloqueo del 2%. Esto implica que las asignaciones de canal para los sitios de celda están diseñadas para que 2 de cada 100 llamadas se bloqueen debido a la ocupación del canal durante la hora más concurrida. Hay dos tipos de sistemas troncales que se utilizan comúnmente. El primer tipo no ofrece colas para las solicitudes de llamada. Es decir, para cada usuario que solicita servicio, se supone que no hay tiempo de configuración y el usuario tiene acceso inmediato a un canal si está disponible. Si no hay canales disponibles, el usuario solicitante se bloqueará sin acceso y podrá volver a intentarlo más tarde. Este tipo de trunking se llama llamadas bloqueadas borradas y asume que las llamadas llegan según lo determinado por una distribución de Poisson. Además, se supone que hay un número infinito de usuarios también

Como lo siguiente: (a) hay llegadas sin memoria de solicitudes, lo que implica que todos los usuarios, incluidos los usuarios bloqueados, pueden solicitar un canal en cualquier momento; (b) la probabilidad de que un usuario ocupe un canal se distribuya exponencialmente, de modo que es más probable que las llamadas más largas ocurran como se describe por una distribución exponencial; y (c) hay un número finito de canales disponibles en el grupo de troncales. Esto se conoce como una cola M / M / m / m, y conduce a la derivación de la fórmula de Erlang B (también conocida como la fórmula borrada de llamadas bloqueadas). La fórmula Erlang B determina la probabilidad de que una llamada se bloquee y es una medida del GOS para un sistema truncado que no proporciona ninguna cola para llamadas bloqueadas. La fórmula de Erlang B se deriva del Apéndice A y está dada por

onde C es el número de canales troncales ofrecidos por un sistema de radio troncalizado y A es el tráfico total ofrecido. Aunque es posible modelar sistemas truncados con usuarios finitos, las expresiones resultantes son mucho más complicadas que el resultado de Erlang B, y la complejidad agregada no está garantizada para sistemas truncados típicos que tienen usuarios que superan en número a los canales disponibles por órdenes de magnitud. Además, la fórmula de Erlang B proporciona una estimación conservadora del GOS, ya que los resultados de los usuarios finitos siempre predicen una menor probabilidad de bloqueo. La capacidad de un sistema de radio truncado donde se pierden llamadas bloqueadas se tabula para varios valores de GOS y números de canales en la Tabla 3.4

The second kind of trunked system is one in which a queue is provided to hold calls which are blocked. If a channel is not available immediately, the call request may be delayed until a channel becomes available. This type of trunking is called Blocked Calls Delayed, and its measure of GOS is defined as the probability that a call is blocked after waiting a specific length of time in the queue. To find the GOS, it is first necessary to find the likelihood that a call is initially denied access to the system. The likelihood of a call not having immediate access to a channel is determined by the Erlang C formula derived in Appendix A

Si no hay canales disponibles inmediatamente, la llamada se retrasa, y la probabilidad de que la llamada retrasada sea forzada a esperar más de t segundos viene dada por la probabilidad de que una llamada se retrasa, multiplicada por la probabilidad condicional de que el retraso sea mayor que t segundos . El GOS de un sistema truncado donde las llamadas bloqueadas se retrasan es por lo tanto dado por

El retardo medio D de todas las llamadas en un sistema en cola viene dado por

(3.19)

donde el retardo promedio para aquellas llamadas que están en cola está dado por H / (C - A). Las fórmulas Erlang B y Erlang C se representan gráficamente en las figuras 3.6 y 3.7. Estos gráficos son útiles para determinar GOS de forma rápida, aunque simulaciones de computadora se utilizan a menudo para determinar los comportamientos transitorios experimentados por usuarios particulares en un sistema móvil. Para usar las figuras 3.6 y 3.7, localice el número de canales en la parte superior del gráfico. Localice la intensidad de tráfico del sistema en la parte inferior del gráfico. La probabilidad de bloqueo Pr [bloqueo] se muestra en la abscisa de la figura 3.6, y Pr [delay]> 0 se muestra en la abscisa de la figura 3.7. Con dos de los parámetros especificados, es fácil encontrar el tercer parámetro.

La eficiencia de trunking es una medida del número de usuarios a los que se puede ofrecer un GOS particular con una configuración particular de canales fijos. La forma en que se agrupan los canales puede alterar sustancialmente el número de usuarios manejados por un sistema truncado. Por ejemplo, en la Tabla 3.4, 10 canales truncados en un GOS de 0,01 pueden soportar 4,46 Erlangs de tráfico, mientras que dos grupos de cinco canales truncados pueden soportar 2 × 1,36 Erlangs, o 2,72 Erlangs de tráfico. Claramente, 10 canales troncalizados juntos soportan un 60% más de tráfico en un GOS específico que los dos troncales de cinco canales. Debe quedar claro que la asignación de canales en un sistema de radio troncalizado tiene un impacto importante en la capacidad general del sistema.

3.7 Aumento de la cobertura y capacidad de los sistemas celulares

A medida que aumenta la demanda de servicios inalámbricos, el número de canales asignados a una celda se vuelve insuficiente para soportar el número requerido de usuarios. En este punto, las técnicas de diseño celular son necesarias para proporcionar más canales por unidad de área de cobertura. Técnicas como la división de células, sectorización y enfoques de zonas de cobertura se utilizan en la práctica para ampliar la capacidad de los sistemas celulares. La división celular permite un crecimiento ordenado del sistema celular. Sectoring utiliza antenas direccionales para controlar aún más la interferencia y la frecuencia de reutilización de los canales. El concepto de microcélula de zona distribuye la cobertura de una célula y extiende el límite celular a lugares de acceso difícil. Mientras que la división celular aumenta el número de estaciones base con el fin de aumentar la capacidad, las microceldas de sectorización y de zona dependen de las ubicaciones de las antenas de la estación base para mejorar la capacidad reduciendo la interferencia entre canales. Las técnicas de división de células y de microcélulas de zona no sufren las ineficiencias de trunking experimentadas por las células sectorizadas y permiten a la estación base supervisar todas las tareas de traspaso relacionadas con las microceldas, reduciendo así la carga de cálculo en el MSC. Estas tres técnicas populares de mejora de la capacidad se explicarán en detalle.

3.7.1 División de células

La división de células es el proceso de subdividir una célula congestionada en células más pequeñas, cada una con su propia estación base y una reducción correspondiente en la altura de la antena y la potencia del transmisor. La división de células aumenta la capacidad de un sistema celular, ya que aumenta el número de veces que canales se reutilizan. Mediante la definición de nuevas células que tienen un radio más pequeño que las células originales y mediante la instalación de estas células más pequeñas (llamadas microcélulas) entre las células existentes, aumenta la capacidad debido al número adicional de canales por unidad de área. Imagínese si cada célula en la Figura 3.1 se redujo de tal manera que el radio de cada célula se cortó por la mitad. Con el fin de cubrir toda el área de servicio con células más pequeñas, se requerirían aproximadamente cuatro veces más células. Esto se puede demostrar fácilmente considerando un círculo con el radio R. El área cubierta por tal círculo es cuatro veces más grande que el área cubierta por un círculo con el radio R / 2. El aumento del número de células aumentaría el número de racimos sobre la región de cobertura, lo que a su vez aumentaría el número de canales y, por tanto, la capacidad, en el área de cobertura. La división de células permite que un sistema crezca reemplazando células grandes con células más pequeñas, sin alterar el esquema de asignación de canales requerido para mantener la cociente de reutilización mínima co-canal Q (ver Ecuación (3.4)) entre celdas co-canal. Un ejemplo de división de células se muestra en la Figura 3.8. En la Figura 3.8, las estaciones base se colocan en las esquinas de las celdas, y se supone que el área servida por la estación base A está saturada con tráfico (es decir, el bloqueo de la estación base A excede las velocidades aceptables). Por lo tanto, se necesitan nuevas estaciones base en la región para aumentar el número de canales en la zona y para reducir el área servida por la única estación base. Obsérvese en la figura que la estación base A original ha estado rodeada por seis microcélulas nuevas. En el ejemplo mostrado en la Figura 3.8, las células más pequeñas se añadieron de tal manera que se conserva el plan de reutilización de frecuencia del sistema. Por ejemplo, la estación base de microcélula marcada con G se colocó a medio camino entre dos estaciones más grandes utilizando el mismo conjunto de canales G. Esto es también el caso para las otras microceldas de la figura. Como puede verse en la figura 3.8, la división de células simplemente escala la geometría del grupo. En este caso, el radio de cada nueva microcélula es la mitad de la de la célula original.

Para que las nuevas células sean de menor tamaño, se debe reducir la potencia de transmisión de estas células. La potencia de transmisión de las nuevas células con un radio de la mitad de las células originales se puede encontrar examinando la potencia recibida Pr en los límites de celdas nuevas y viejas y poniéndolas iguales entre sí. Esto es necesario para asegurar que el plan de reutilización de frecuencias para las nuevas microceldas se comporte exactamente igual que para las células originales. Para la figura 3.8

(3,20)

y

(3.21)

donde Pt1 y Pt2 son las potencias de transmisión de las estaciones de base de células más grandes y más pequeñas, respectivamente, yn es el exponente de pérdida de trayecto. Si tomamos n = 4 y ponemos las potencias recibidas iguales entre sí, entonces En otras palabras, la potencia de transmisión debe reducirse en 12 dB para llenar el área de cobertura original con microceldas, manteniendo al mismo tiempo el requisito S / I. En la práctica, no todas las células se dividen al mismo tiempo. A menudo es difícil para los proveedores de servicios para encontrar bienes raíces que está perfectamente situado para la división celular. Por lo tanto, diferentes tamaños de celda existirán simultáneamente. En tales situaciones, se debe tener especial cuidado para mantener la distancia entre las células cochannel en el mínimo requerido, y por lo tanto las asignaciones de canales se vuelven más complicados [Rap97]. Además, los problemas de traspaso deben ser abordados de manera que el tráfico de alta velocidad y baja velocidad pueda ser acomodado simultáneamente (se usa comúnmente el enfoque de celda paraguas de la Sección 3.4). Cuando hay dos tamaños de celda en la misma región que se muestra en la Figura 3.8, la Ecuación (3.22) muestra que no se puede usar la potencia de transmisión original para todas las nuevas celdas o la nueva potencia de transmisión para todas las celdas originales. Si se utiliza la mayor potencia de transmisión para todas las células, algunos canales utilizados por las células más pequeñas no estarían suficientemente separados de las células co-canal. Por otra parte, si la potencia de transmisión más pequeña se utiliza para todas las células, habría partes de las células más grandes dejadas sin servicio. Por esta razón, los canales en la celda vieja deben dividirse en dos grupos de canales, uno que corresponde a los requisitos de reutilización de células más pequeños y el otro que corresponde a los requisitos de reutilización de células mayores. La celda más grande se dedica generalmente al tráfico de alta velocidad de modo que las transferencias ocurran con menos frecuencia. Los tamaños de grupo de dos canales dependen de la etapa del proceso de división. Al comienzo del proceso de división de células, habrá menos canales en los grupos de energía pequeños. Sin embargo, a medida que crezca la demanda, se necesitarán más canales, por lo que los grupos más pequeños necesitarán más canales. Este proceso de división continúa hasta que todos los canales en un área se usan en el grupo de potencia inferior, momento en el cual se completa la división de células dentro de la región y todo el sistema se vuelve a ajustar para tener un radio más pequeño por célula. El downtilting de la antena, que deliberadamente enfoca la energía irradiada de la estación base hacia el suelo (en lugar de hacia el horizonte), se usa a menudo para limitar la cobertura de radio de microcélulas recién formadas.

3.7.2 Sectorización

Como se muestra en la Sección 3.7.1, la división de celdas logra la mejora de la capacidad esencialmente reescalonando el sistema. Al disminuir el radio de la célula R y mantener la relación de reutilización co-canal D / R sin cambios, la división de células aumenta el número de canales por unidad de área. Sin embargo, otra forma de aumentar la capacidad es mantener el radio de la celda sin cambios y buscar métodos para disminuir la relación D / R. Como mostramos ahora, sectoring aumenta SIR de modo que el tamaño del racimo puede ser reducido. En este enfoque, en primer lugar el SIR se mejora utilizando antenas direccionales, a continuación, la mejora de la capacidad se logra mediante la reducción del número de células en un grupo, lo que aumenta la frecuencia de reutilización. Sin embargo, para hacer esto con éxito, es necesario reducir la interferencia relativa sin disminuir la potencia de transmisión. La interferencia co-canal en un sistema celular puede disminuirse reemplazando una única antena omnidireccional en la estación base por varias antenas direccionales, cada una irradiando dentro de un sector especificado. Mediante el uso de antenas direccionales, una célula dada recibirá interferencia y transmitirá con sólo una fracción de las células de co-canal disponibles. La técnica para disminuir la interferencia co-canal y así incrementar el rendimiento del sistema usando antenas direccionales se denomina sectorización. El factor por el que se reduce la interferencia co-canal depende de la cantidad de sectorización utilizada. Una celda se divide normalmente en tres sectores de 120 ° o seis sectores de 60 ° como se muestra en la Figura 3.10 (a) y (b).

Cuando se emplea el sector, los canales utilizados en una celda particular se desglosan en grupos sectoriales y se utilizan sólo en un sector particular, como se ilustra en la Figura 3.10 (a) y (b). Suponiendo la reutilización de siete células, para el caso de los sectores de 120 °, el número de interferentes en el primer nivel se reduce de seis a dos. Esto se debe a que sólo dos de las seis células de co-canal reciben interferencia con un grupo de canales con un sector particular. Con referencia a la figura 3.11, considere la interferencia experimentada por un móvil ubicado en el sector más a la derecha en la celda central etiquetada como "5". Hay tres sectores de celdas cochannel etiquetados "5" a la derecha de la celda central, y tres a la izquierda de la celda central. De estas seis células co-canal, sólo dos celdas tienen sectores con patrones de antena que irradian en la célula central, y por lo tanto un móvil en la célula central experimentará interferencia en el enlace directo de sólo estos dos sectores. El S / I resultante para este caso se puede encontrar usando la ecuación (3.8) para ser 24.2 dB, lo cual es una mejora significativa con respecto al caso omnidireccional en la Sección 3.5, donde se mostró que el peor caso S / I era 17 dB. Esta mejora S / I permite al ingeniero inalámbrico a continuación, disminuir el tamaño del clúster N con el fin de mejorar la frecuencia de reutilización, y por lo tanto la capacidad del sistema. En los sistemas prácticos, se consigue una mejora adicional en S / I mediante el downtilting de las antenas de sector de tal manera que el patrón de radiación en el plano vertical (elevación) tenga una muesca a la distancia de celda de co-canal más próxima.

La mejora de S / I implica que con un sectoraje de 120 °, el S / I mínimo requerido de 18 dB puede lograrse fácilmente con la reutilización de siete células, en comparación con la reutilización de 12 células para la peor situación posible en el caso sin sector Sección 3.5.1). Por lo tanto, sectoring reduce la interferencia, lo que equivale a un aumento en la capacidad por un factor de 12/7, o 1,714. En la práctica, la reducción de la interferencia ofrecida por sectorización permite a los planificadores reducir el tamaño del clúster N, y proporciona un grado adicional de libertad en la asignación de canales. La penalización por S / I mejorado y la mejora de capacidad resultante del tamaño de agrupamiento que se contrae es un número creciente de antenas en cada estación base y una disminución en la eficiencia de trunking debido al sectoring de canales en la estación base. Dado que el sectoring reduce el área de cobertura de un grupo particular de canales, el número de traspasos también aumenta. Afortunadamente, muchas estaciones base modernas apoyan la sectorización y permiten que los móviles sean transferidos de un sector a otro dentro de la misma celda sin intervención del MSC, por lo que el problema de traspaso no suele ser una preocupación importante. Es la pérdida de tráfico debido a la disminución de la eficiencia de los enlaces que hace que algunos operadores eviten el enfoque sectorial, particularmente en áreas urbanas densas donde los patrones direccionales de antena son algo ineficaces en el control de propagación de radio. Debido a que sectoring utiliza más de una antena por estación base, los canales disponibles en la célula deben ser subdivididos y dedicados a una antena específica. Esto divide la agrupación de canales trunked disponible en varias agrupaciones más pequeñas y disminuye la eficiencia de la conexión.

3.7.3 Repetidores para extensión de alcance

A menudo, un operador inalámbrico tiene que proporcionar una cobertura dedicada para las áreas de difícil acceso, como dentro de los edificios, o en valles o túneles. Los retransmisores de radio, conocidos como repetidores, se usan a menudo para proporcionar tales capacidades de extensión de alcance. Los repetidores son de naturaleza bidireccional y, simultáneamente, envían señales y reciben señales desde una estación base de servicio. Los repetidores trabajan con señales de sobre-aire, por lo que pueden instalarse en cualquier lugar y son capaces de repetir una banda celular o PCS entera. Al recibir señales de un enlace directo de estación base, el repetidor amplifica y reradiata las señales de estación base a la región de cobertura específica. Desafortunadamente, el ruido recibido y la interferencia también son redirigidos por el repetidor tanto en el enlace directo como inverso, por lo que se debe tener cuidado de colocar correctamente los repetidores y ajustar los diversos niveles de amplificador de enlace directo y inverso y patrones de antena. Los repetidores se pueden considerar fácilmente como "tubos doblados" bidireccionales que retransmiten lo que se ha recibido. En la práctica, las antenas direccionales o los sistemas distribuidos de antena (DAS) están conectados a las entradas o salidas de los repetidores para la cobertura localizada del punto, particularmente en túneles o edificios. Mediante la modificación de la cobertura de una celda de servicio, un operador puede dedicar una cierta cantidad de tráfico de la estación base a las áreas cubiertas por el repetidor. Sin embargo, el repetidor no añade capacidad al sistema, simplemente sirve para redirigir la señal de la estación base en ubicaciones específicas. Los repetidores se utilizan cada vez más para proporcionar cobertura en y alrededor de los edificios, donde la cobertura ha sido tradicionalmente débil [Rap96], [Mor00]. Muchos transportistas han optado por proporcionar penetración inalámbrica en el edificio mediante la instalación de microcélulas fuera de los edificios grandes, y luego instalar muchos repetidores con redes DAS dentro de los edificios. Este enfoque proporciona cobertura inmediata a las áreas seleccionadas, pero no se ajusta a los aumentos de capacidad que se producirán debido al aumento del tráfico de usuarios al aire libre y en interiores. Con el tiempo, se necesitarán estaciones base dedicadas dentro de los edificios para dar cabida al gran número de usuarios celulares en construcción.

La determinación de la ubicación adecuada de los repetidores y los sistemas de antenas distribuidas dentro de los edificios requiere una planificación cuidadosa, en particular debido al hecho de que los niveles de interferencia son redirigidos hacia el edificio desde la estación base y desde el interior del edificio hasta la estación base. Además, los repetidores deben ser aprovisionados para que coincidan con la capacidad disponible de la estación base de servicio. Afortunadamente, los productos de software, como SitePlanner [Wir01], permiten a los ingenieros determinar rápidamente las mejores ubicaciones para los repetidores y la red DAS requerida, al mismo tiempo que calcula el tráfico disponible y el costo asociado de la instalación. SitePlanner está protegido por la patente estadounidense 6.317.599 y otras patentes. Con SitePlanner, los ingenieros pueden determinar muy rápidamente el aprovisionamiento adecuado para un determinado nivel de extensión de alcance (vea la Figura 3.12).

3.7.4 Un concepto de zona Microcell

El aumento del número de traspasos requeridos cuando se emplea sectorización da como resultado una mayor carga sobre los elementos de enlace de conmutación y control del sistema móvil. Una solución a este problema fue presentada por Lee [Lee91b]. Esta propuesta se basa en un concepto de microcélula para la reutilización de siete células, como se ilustra en la Figura 3.13. En este esquema, cada uno de los tres (o posiblemente más) sitios de zona (representados como Tx / Rx en la figura 3.13) están conectados a una única estación base y comparten el mismo equipo de radio. Las zonas están conectadas mediante cable coaxial, cable de fibra óptica o enlace de microondas a la estación base. Varias zonas y una sola estación base forman una celda. Cuando un móvil viaja dentro de la célula, es servido por la zona con la señal más fuerte. Este enfoque es superior al de sectorización puesto que las antenas se colocan en los bordes exteriores de la célula y cualquier canal de estación base puede ser asignado a cualquier zona por la estación base. Cuando un móvil viaja de una zona a otra dentro de la célula, retiene el mismo canal. Por lo tanto, a diferencia de la sectorización, no es necesario un traspaso en el MSC cuando el móvil viaja entre zonas dentro de la célula. La estación base simplemente cambia el canal a un sitio de zona diferente. De esta manera, un canal determinado está activo sólo en la zona particular en la que se mueve el móvil, y por lo tanto la radiación de la estación base se localiza y se reduce la interferencia. Los canales se distribuyen en el tiempo y el espacio por las tres zonas y también se reutilizan en células co-canal de la manera normal. Esta técnica es particularmente útil a lo largo de carreteras oa lo largo de los corredores de tráfico urbano. La ventaja de la técnica de célula de zona es que mientras la célula mantiene un radio de cobertura particular, se reduce la interferencia co-canal en el sistema celular, puesto que una estación base central grande es reemplazada por varios transmisores de baja potencia (transmisores de zona) en los bordes de la célula. La disminución de la interferencia de co-canal mejora la calidad de la señal y también conduce a un aumento de la capacidad sin la degradación de la eficiencia de trunking causada por la sectorización. Como se mencionó anteriormente, se requiere típicamente un S / I de 18 dB para un funcionamiento satisfactorio del sistema en FM de banda estrecha. Para un sistema con N = 7, se demostró un D / R de 4,6 para lograr esto. Con respecto a

No se experimenta ninguna pérdida en la eficiencia de trunking. Las arquitecturas de celdas de zonas se están adoptando en muchos sistemas de comunicación celular y personal.