

Universidade Federal de Minas Gerais
Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**Técnicas de Otimização aplicadas a Operação de
Sistemas de Telefonia Móvel Celular GSM**

Samuel Albasini Langa

Dissertação submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Leonardo A. B. Torres

Abril de 2005

Resumo

Com o aumento vertiginoso do número de usuários dos sistemas de telecomunicações, a tarefa de otimizar a operação de sistemas já implantados, ao invés de planejar a expansões físicas das plantas, torna-se uma alternativa bastante interessante em termos de custo.

Especificamente neste trabalho de dissertação são abordados alguns estudos acerca de otimização da operação de sistemas celulares GSM. Os sistemas GSM são os mais difundidos hoje no mundo, apresentando uma crescente variedade de serviços aos usuários, dentre os quais destaca-se, por exemplo, as redes GPRS.

Nestes sistemas existe a oportunidade de se otimizar a operação mediante a otimização do salto de frequências e do cálculo do número ótimo de canais de guarda e do número total ótimo de canais; técnicas estas estudadas neste trabalho. Para cada caso são apresentados os resultados de simulações numéricas, análises dos algoritmos e propostas de aprimoramento

Abstract

The pronounced increase in the number of telecommunication users nowadays has indicated that a better approach, in terms of cost, would be to optimize the working plant instead of starting physical expansions of the network.

In the present master dissertation the operation of GSM cellular mobile networks is considered. The GSM networks are among the most popular cellular mobile telephony systems in the world. The number of services offered by GSM have been increasing, incorporating more and more functionalities, as it can be clearly seen since the advent of GPRS networks.

In the GSM systems, optimization techniques can be applied to the problems of frequency hopping and determination of the optimum number of guard channels and the total number of channels in cell clusters. Such techniques are considered in this work. In each case numerical results, obtained from simulations, algorithms analyses and improvement propositions are presented.

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela bondade.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Leonardo A. B. Torres por seu apoio, dedicação, profissionalismo e amizade, com os quais pude contar durante quase todo o curso de mestrado no CPDEE. Durante este período tive orientação científica e uma inesquecível oportunidade de conviver com uma grande pessoa.

Agradeço aos colegas, professores e funcionários do CPDEE pelos momentos que passamos juntos.

Agradeço a senhora Zenalva Sena pelo apoio que sempre me prestou.

Agradeço a meus pais e irmãos pelo amor e confiança que me dedicam.

Agradeço a CAPES pelo auxílio financeiro recebido durante o período correspondente ao meu mestrado, na forma de bolsas de mestrado.

Sumário

Resumo	i
Abstract	ii
Agradecimentos	iii
Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	vii
Nomenclatura	viii
1 Introdução	1
1.1 Telefonia Celular	1
1.2 Motivação	2
1.3 Objetivos	3
1.4 Apresentação do trabalho	4
2 Arquitetura do GSM	5
2.1 Introdução	5
2.2 Arquitetura do Sistema GSM	5
2.2.1 O Subsistema de Rádio no GSM	8
2.3 Tipos de Canais	9
2.4 O Salto de Frequências	10
2.5 Conclusão	12
3 Proposta de Planejamento de Rede Celular GSM para a Cidade de Maputo	13
3.1 Introdução	13
3.2 Análise de Tráfego e de Cobertura	14

3.3	Cálculo do número de Estações Base	15
3.3.1	Reuso de Freqüências	16
3.3.2	Interferências	20
3.4	Planejamento Celular Nominal	23
3.5	Conclusão	24
4	Otimização do Salto de Freqüências	26
4.1	Introdução	26
4.2	O Salto de Freqüências Otimizado	27
4.2.1	Algoritmo da Otimização do salto de Freqüências	28
4.3	Análise dos Resultados	31
4.4	Conclusão	33
5	Cálculo do Número de Canais	36
5.1	Introdução	36
5.2	<i>Handoff</i> -Modelagem Matemática	37
5.3	Problema de Otimização do Número de Canais	40
5.3.1	Cálculo do Número Ótimo de Canais de Guarda	41
5.3.2	Cálculo do Número Total Ótimo de Canais	41
5.4	Análise dos Resultados	45
5.5	Conclusões	45
6	Conclusões	47
6.1	Otimização do Salto de Freqüências	48
6.2	Otimização do Cálculo de Canais	48
6.3	Sugestões para Trabalhos Futuros	49
	Bibliografia	51

Lista de Figuras

2.1	Arquitetura do sistema GSM	6
2.2	Conceito de canal TDMA	9
3.1	Agrupamentos de células	17
3.2	Geometria da interferência do <i>uplink</i> no sistema TDMA sem sectorização	21
3.3	Planejamento Nominal de Maputo	24
4.1	Variação da interferência cumulativa com o tamanho da MA.	32
4.2	Variação do desvio padrão da média de 50 realizações da interferência cumulativa com o tamanho da MA.	33
4.3	Índices dos TRXs com o maior nível de interferência cumulativa máxima	34
5.1	Modelo da Cadeia de Markov para chamadas de <i>handoff</i> . . .	39
5.2	Plano (N,g). $P_{b0} > P_{d0}$	42
5.3	Plano (N,g). Regiões de interesse.	43

Lista de Tabelas

2.1	Sumário das Especificações da Interface de Rádio do GSM. . .	10
3.1	Divisão das 48 frequências no modelo de célula 4/12.	19
4.1	Alguns níveis de interferências calculados	30
5.1	Valores ótimos de g^* para diferentes valores de P_{d0} e de P_{b0} .	42
5.2	Valores ótimos de N^* para diferentes pares de valores de P_{d0} e de P_{b0}	45

Nomenclatura

Siglas

ARFCN	Número absoluto do Canal de Rádio Frequência <i>Absolute Radio Frequency Chanel Numbers</i>
AUC	Centro de Autenticação <i>Authentication Center</i>
BSS	Subsistema de Estação Base <i>Base Station Subsystem</i>
BS	Estação Base <i>Base Station</i>
BTS	Estação Transceptora Base <i>Base Transceiver Station</i>
CIR	Razão Portadora-por-Interferência <i>Carrier-to-Interference Ratio</i>
EIR	Registrador da Identidade do Equipamento <i>Equipment Identity Register</i>
FDD	Duplex por Divisão de Frquências <i>Frequency Division Duplex</i>
FCCH	Canal de Correção de Frequência <i>Frequency Correction Channel</i>
FHMA	Acesso Múltiplo por Salto de Frequências <i>Frequency Hopped Multiple Access</i>
FH	Salto de Frequências <i>Frequency Hopping</i>
HLR	Registrador do Assinante Local <i>Home Location Register</i>
ISDN	Rede de Serviços Digitais Integrados

	<i>Integrated Services Digital Network</i>
IMSI	Identidade Internacional do Assinante Móvel <i>International Mobile Subscriber Identity</i>
LAI	Identidade da Área de localização <i>Local Area Identity</i>
MA	Alocação de frequências <i>Mobile Allocation</i>
MSC	Centro de Comutação do Sistema Móvel <i>Mobile Switching Center</i>
MS	Estação Móvel <i>Mobile Station</i>
NSS	Subsistema de Comutação e Rede <i>Network and Switching Subsystem</i>
OMC	Centro de Operação e Manutenção <i>Operation and Maintenance Center</i>
OSS	Subsistema de Suporte a Operação <i>Operation Support Subsystem</i>
PSTN	Rede Telefônica Pública Comutada <i>Public Switched Telephone Network</i>
TDMA	Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo <i>Time Division Multiple Access</i>
SCH	Canal de sincronização <i>Synchronization Channel</i>
TS	(No TDMA é o Tempo que uma MS aloca a Portadora) <i>Timeslot</i>
TCH	Canal de Tráfego <i>Traffic Channel</i>
TRX	Rádio Transceptor <i>Transceivers</i>
VLR	Registrador de localização do visitante <i>Visitor Location Register</i>

Variáveis

<i>A</i>	Tráfego
<i>C</i>	Célula com a maior interferência na rede
<i>E</i>	Erlang (Unidade de Medida do Tráfego)

E_B	Fórmula de Erlang B
f	Frequência alocada a uma célula
g	Número de canais de guarda
H	Horizonte de tempo
i e j	Índices para a célula i e j
N	Número total de canais
n	Número de chamadas por hora
P_d	Probabilidade de queda de chamadas
P_b	Probabilidades de bloqueio de chamadas
T	Tempo médio da chamada em segundo

Capítulo 1

Introdução

1.1 Telefonia Celular

Em 1897, o cientista Guglielmo Marconi demonstrou pela primeira vez a habilidade do rádio de oferecer a comunicação entre os barcos no canal da Inglaterra (Rappaport, 2002; Haring et al., 2001).

Desde então, novas formas de comunicação via rádio, como a telefonia celular, foram adotadas no mundo, particularmente, nos últimos 20 anos.

No início o objetivo do projeto dos sistemas de rádio móvel era alcançar grande área de cobertura, utilizando um transmissor de grande potência, com a antena montada em uma torre muito alta. Embora este método alcance boa cobertura, seria impossível fazer o reuso das mesmas frequências dentro do mesmo sistema porque qualquer tentativa de reuso resultaria em interferência. Desta forma, tornou-se necessário reestruturar o sistema de telefonia via rádio para atingir grande capacidade e, ao mesmo tempo, cobrir áreas muito grandes.

Dado que as autoridades governamentais regulatórias atribuem uma banda de espectro limitada para esses serviços, os operadores das redes de telefonia celular devem fazer o uso eficiente de frequências para maximizar o número de assinantes usuários do serviço.

Na telefonia celular moderna, as células são agrupadas. Nesse agrupamento todas as frequências disponíveis são distribuídas de forma otimizada com o objetivo de minimizar as interferências e posteriormente o agrupamento é

replicado ao longo de toda a rede.

Tal como as células nestes agrupamentos usam as mesmas frequências, existe a possibilidade de uma célula em um agrupamento interferir na outra célula do agrupamento vizinho.

Como tal, a capacidade desses sistemas é limitada pela quantidade de interferência.

O problema de otimização do espectro tem sido tratado como um problema de otimização combinatorial (Katzela and Naghshineh, 1996; Matsui, 2000). Muitos desses métodos são limitados quando aplicados em redes congestionadas porque a alocação de frequências é estática.

A outra forma de uso eficiente do espectro em redes GSM que suportam o salto de frequências, é a construção otimizada de seqüências do salto de frequências (S.V.Maric, 1995).

Neste trabalho são apresentados alguns estudos da otimização do salto de frequências (Bourjolly and Touhami, 2000) e o cálculo do número ótimo de canais de guarda e cálculo do número total ótimo de canais (Haring et al., 2001).

1.2 Motivação

O Sistema de comunicação Móvel Europeu, o GSM (*Global System for Mobile Communication*), está presente em praticamente todo o planeta.

Nos sistemas de comunicação móvel o uso eficiente do espectro corresponde basicamente a uma eficiente alocação de frequências para os rádios transceptores, com a conseqüente minimização de interferências.

O rápido crescimento da demanda dos serviços e a qualidade tornam pertinente o uso de algoritmos computacionais para o aperfeiçoamento da rede. No entanto, muitos países que possuem redes de telefonia celular como, por exemplo, Moçambique, com mercado crescente na área de telefonia celular, não dispõem de condições financeiras para a expansão da rede quando necessário. Ao mesmo tempo, existem alguns casos de otimização de redes GSM, onde se conseguiu maximizar o desempenho em até noventa por cento (Actix, 2004; Schema, 2004; Motorola, 2004).

Em redes GSM desenvolvidas, como por exemplo as redes da Europa e as

redes de alguns países da Ásia, os assinantes dispõem de um Serviço Gerais de Rádio por Pacotes, o GPRS¹. Esse serviço possibilita ao usuário o acesso a uma rede pública de dados ou a um provedor particular de Serviços de Internet com a sua estação móvel. Para que uma rede tenha um bom desempenho em serviços de voz e GPRS, é muito importante que na planificação de freqüências seja priorizada a maximização da densidade de reuso de canais e, ao mesmo tempo, a manutenção da razão portadora-por-interferência C/I (*Carrier-to-Interference Ratio*) em um nível adequado. A configuração física da rede deve ser feita com o objetivo de alcançar boa cobertura, minimizando sobreposições dos sinais de Rádio freqüência (RF), pois, caso contrário, podem surgir interferências.

O uso de algoritmos computacionais é uma forma de minimização do custo da rede, do aperfeiçoamento da qualidade dos serviços e da capacidade oferecidos pela rede. O uso de bons algoritmos de otimização na telefonia celular tem como consequência a maximização do desempenho e do ganho da rede.

Por isso acredita-se que todos os conhecimentos de otimização e de telefonia celular adquiridos no PPGEE serão uma contribuição útil na telefonia celular de Moçambique.

1.3 Objetivos

Para a efetivação dos testes dos algoritmos de otimização a serem apresentados, foi escolhido como primeiro objetivo a recriação do modelo da rede celular da cidade de Maputo, capital de Moçambique.

O segundo objetivo é a abordagem dos seguintes estudos acerca de otimização aplicadas à operação de redes GSM:

- A Otimização do salto de Freqüências;
- O Cálculo do Número Ótimo de Canais de Guarda;
- O Cálculo do Número Total Ótimo de Canais.

Esses objetivos forem escolhidos por serem tópicos mais importantes no que se refere ao aperfeiçoamento da qualidade e da capacidade de uma rede celular e também, a rede celular de Maputo apresenta muitos problemas que podem ser resolvidos com estas estratégias.

¹General Packet Radio Service

Por isso, o terceiro objetivo é a investigação da aplicação das técnicas estudadas no modelo proposto para a rede celular de Moçambique.

1.4 Apresentação do trabalho

No capítulo 2, são tratadas questões relacionadas ao Sistema Global para a Comunicação Móvel GSM. Nas seções 2.2, 2.3 e 2.4 são apresentados a arquitetura do sistema GSM, os tipos de canais e o salto de frequências, respectivamente.

No capítulo 3, é apresentado o planeamento GSM de uma suposta rede para a cidade de Maputo. Aqui, são descritos todos os passos seguidos no processo de planeamento celular GSM.

No capítulo 4 é apresentado o estudo do salto de frequência (FH) otimizado juntamente com um algoritmo para a sua implementação. O resultado dos cálculos do FH otimizado é comparado ao FH cíclico.

No capítulo 5 São apresentados algoritmos de determinação do número ótimo de canais de guarda para chamadas de *handoff* assim como o número total ótimo de canais para novas chamadas a partir das fórmulas de perdas derivadas do Erlang B.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho, assim como sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Arquitetura do GSM

2.1 Introdução

Antes do GSM (*Global System for Mobile Communication*), os países Europeus tinham diferentes padrões de sistemas celulares. O usuário não podia utilizar a mesma unidade de comunicação no continente. Este sistema foi desenvolvido para resolver os problemas de fragmentação dos primeiros sistemas celulares da Europa.

O GSM foi o primeiro sistema celular no mundo a especificar arquitetura com níveis de rede e serviços, sendo a tecnologia mais popular do mundo.

O sistema de comunicação móvel para a Europa em 900 MHz foi implementado, em meados de 1980, pelo comitê GSM, que era um grupo de trabalho da Conferência Européia de Correios e Telecomunicações CEPT ¹. Em 1992, o nome foi mudado para Sistema Global para a Comunicação Móvel.

O GSM foi introduzido no continente Europeu em 1991. Em 1993, muitos países da Ásia e da África, e a Austrália, aderiram ao GSM.

2.2 Arquitetura do Sistema GSM

A rede GSM consiste em três subsistemas interconectados, interligados não só um com o outro, mas também com o usuário através de enlaces da rede.

¹Conférence Européene des Postes et Télécommunications

Os três subsistemas são (Rappaport, 2002; Scourias, 2002; Ericsson, 1998):

- O Subsistema de Estação Base BSS (*Base Station Subsystem*)
- Subsistema de Comutação e Rede NSS (*Network and Switching Subsystem*)
- Subsistema de Suporte à Operação OSS (*Operation Support Subsystem*)

A Estação Móvel MS (*Mobile station*) normalmente é considerada parte do BSS por conveniência de arquitetura.

O BSS, também conhecido como Subsistema de rádio, providencia e gerencia tanto a trajetória de transmissão entre as estações móveis como a transmissão entre o Centro de Comutação Móvel MSC (*Mobile Switching Center*) e as estações móveis. O BSS também gerencia a interface de rádio entre as MSs e todos os outros Subsistemas do GSM. Cada BSS consiste de muitos Controladores de Estações Base BSCs (*Base Station Controller*) que conectam a MS ao NSS via Central de Comutação Móvel. A Fig. 2.1 mostra o diagrama de blocos da arquitetura do sistema GSM.

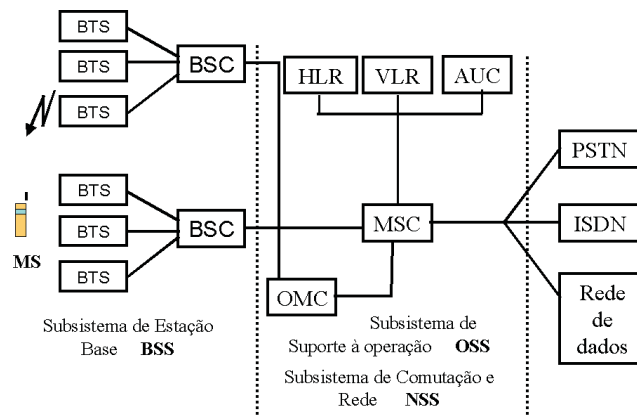


Figura 2.1: Arquitetura do sistema GSM

O NSS gerencia as funções de comutação do sistema, permitindo a comunicação com os outros sistemas como, por exemplo, a Rede Telefônica pública Comutada PSTN (*Public Switched Telephone Network*) e as Redes Digitais de Serviços Integrados.

O OSS dá suporte à operação e à manutenção do sistema, permitindo o monitoramento, o diagnóstico e a resolução de eventuais problemas da rede pelos engenheiros do sistema.

As MSs se comunicam com o BSS pela interface de rádio. O BSS consiste de muitas BSC conectadas a uma única MSC. Cada BSC controla centenas de Estações Transceptoras Base BTSs (*Base Transceiver Station*). Algumas BTSs podem ser alocadas no BSC, sendo outras distribuídas em locais remotos e conectadas ao BSC por microondas ou por linhas alugadas dedicadas.

Os *handoffs*², chamados *handovers* ou HO nas especificações do GSM, entre duas BTSs sob controle do mesmo BSC, são suportados pela BSC e não pela MSC. Esta estrutura reduz a sobrecarga de comutação da MSC.

O NSS manipula tanto a comutação das chamadas do GSM entre redes externas como os BSCs no subsistema de rádio. É também responsável por manter e providenciar o acesso externo de muitos dados dos clientes. O MSC é a unidade central do NSS, que controla o tráfego em todos os BSCs.

No NSS, existem três bases de dados, que são: O Registrador do assinante local HLR, do inglês *Home Location Register*, Registrador de Localização de Visitante VLR (*Visitor Location Register*) e o Centro de Autenticação AUC (*Authentication Center*).

O HLR é uma base de dados que contém toda a informação sobre o usuário residente na mesma cidade do MSC. A cada usuário, num mercado particular do GSM, é atribuído uma única Identidade Internacional do Usuário Móvel IMSI (*International Mobile Subscriber Identity*). Este número é utilizado para a identificação do usuário local.

O VLR é uma base de dados que armazena temporariamente o IMSI e informações comerciais de cada usuário visitante ou em *roaming*³. O VLR está ligado a vários MSCs em um mercado particular ou região geográfica, contendo informações de usuários visitantes da área. Uma vez que um móvel em *roaming* é registrado no VLR, a MSC envia a informação necessária para HLR da central de comutação móvel de origem do usuário visitante, de forma que, a chamada do móvel em *roaming* possa ser encaminhada à PSTN.

O centro de autenticação é uma base de dados super protegida, contendo a autenticação e as chaves de criptografia⁴ para cada usuário tanto no HLR como no VLR.

²Processo de mudança de célula com a chamada em prosseguimento, quando uma MS atravessa de uma célula para outra.

³Quando uma MS move-se de uma Rede GSM regional para uma outra.

⁴Codificação de dados de forma que não possa ser interpretada por qualquer outro dispositivo que não seja o receptor destinado. O GSM usa o Algoritmo A5 (Ericsson, 1998).

Os centros de autenticação contém um registrador chamado de Registrador de Identidade de Equipamento EIR (*Equipment Identity Register*), que identifica os telefones roubados ou fraudulentos.

O OSS contém um ou mais Centros de Operação e Manutenção OMC (*Operation and Maintenance Center*) que servem para monitorar e manter o funcionamento de cada MS, BSC, e MSC. O OMC deve providenciar não só o ajuste de todos os parâmetros das BTS e o procedimento da faturação, mas também conceder aos operadores do sistema a habilidade de determinarem o estado de funcionamento de cada peça de equipamento do usuário dentro do sistema.

2.2.1 O Subsistema de Rádio no GSM

Originalmente, o GSM usava dois conjuntos de bandas celulares de 25 MHz em todos os países. A banda de 890 – 915 MHz faz o enlace reverso *uplink*, ou seja, do usuário para a rede e de 935 – 960 MHz é o enlace direto *downlink* para a transmissão da rede para o usuário.

O GSM usa a duplexação por divisão de frequência FDD (*Frequency Division Duplex*), uma combinação de acesso múltiplo por divisão de tempo TDMA (*Time Division Multiple Access*) e esquemas de acesso múltiplo por salto de frequências FHMA (*Frequency Hopped Multiple Access*).

As frequências disponíveis de *uplink* e *downlink* são divididas em canais de largura de 200 kHz chamados de Números de Canal Absoluto de Frequência de Rádio ARFCNs (*Absolute Radio Frequency Chanel Numbers*). O ARFCN é o par de frequências (*uplink* e *downlink*) separadas de 45 MHz.

O sistema TDMA divide cada canal de rádio em 8 *timeslots*. Em cada slote só um usuário é permitido a fazer a transmissão ou recepção. Pela Fig. 2.2 pode-se ver que cada usuário ocupa ciclicamente um *timeslote* que se repete nos quadros TDMA.

O número total de canais na banda de 25 MHz é de 125 (assumindo que não há canais de guarda). Assim, como cada canal consiste de 8 *timeslots*, no GSM existem 1000 canais de tráfego(informação). Na implementação prática, uma banda de guarda de 100 kHz é reservada nos limites do espectro, sendo somente 124 canais implantados.

A combinação de um número de TS e o ARFCN constituem um *canal físico* para ambos o *downlink* e o *uplinks*. Cada canal físico em um sistema GSM

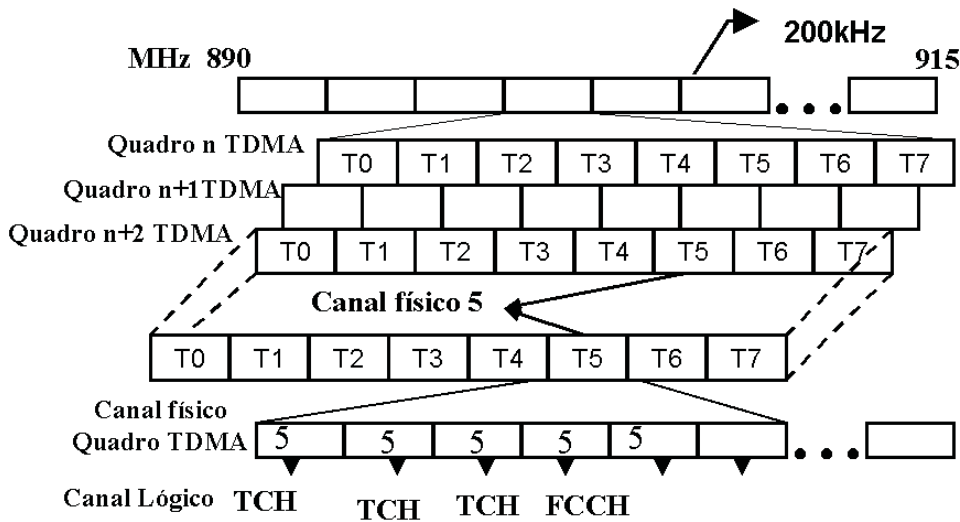


Figura 2.2: Conceito de canal TDMA

pode ser mapeado em diferentes *canais lógicos* conforme a mensagem transmitida. Isto é, cada TS ou quadro TDMA pode ser dedicado para transportar tráfego (dados do usuário tais como voz, fac-símile ou texto), dados de sinalização (necessários para o funcionamento interno do sistema GSM) ou dados de controle (a partir do MSC, estação base ou móvel do usuário).

A tabela abaixo é o sumário das especificações da interface de rádio do GSM.

2.3 Tipos de Canais

No GSM, existem dois tipos de canais lógicos: os Canais de Tráfego TCH (*Traffic Channel*) e os Canais de Controle CCH (*Control Channel*).

Os canais de tráfego transportam a voz codificada ou dados do usuário, tendo idênticas funções e formato tanto no *uplink* como no *downlink*.

Os canais de controle transportam informações de sinalização e de sincronização entre a estação base e a estação móvel.

Com a chegada dos sistemas da terceira geração, funcionando em banda larga, que exigirão referência segura de tempo, o Canal Sincronização (SCH) torna-

se mais importante no aprimoramento da qualidade dos serviços oferecidos pela telefonia celular.

2.4 O Salto de Frequências

O GSM faz uso da habilidade dos rádios transceptores e das unidades móveis que transmitem e recebem em diferentes frequências com o objetivo de implementar o Salto Lento⁵(G.W.Tunncliffe and A.R.Murch, 2000; Kostic and Maric, 1999). O salto de frequências FH (*Frequency Hopping*) é uma técnica na qual a frequência usada por uma dada BTS e por uma Estação Móvel pode variar no tempo, dentro de uma faixa prescrita (217 vezes por segundo)(K.Ivanov, 1996).

Cada célula pode ter um ou mais rádios (TRXs). A alocação de frequências MA (*Mobile Allocation*) é o conjunto de frequências alocadas para uma célula.

Quando a alocação é estática, a MA tem um número de frequências igual

⁵Quando um ou mais símbolos são transmitidos no intervalo de tempo entre um salto de frequências. No caso de Salto Rápido, mais de um salto ocorre a cada transmissão de um símbolo de informação.

Tabela 2.1: Sumário das Especificações da Interface de Rádio do GSM.

Parametros	Especificações
Frequência do Canal Reverso	890 - 915 MHz
Frequência do Canal Direto	935 - 960 MHz
Número de ARFCN	de 0 a 124 e 975 a 1023
Espaçamento das Frequências de Tx/Rx	45 MHz
Espaçamento em timeslot da Tx/Rx	8
Taxa de Dados da Modulação	270,833 kbps
Período do Quadro	4,615 ms
Usuários por quadro (Taxa Plena)	8
Período do Time Slot	576,96 μ s
Período do Bit	3,692 μ s
Modulação	0.3 GMSK
Espaçamento do Canal ARFCN	200 kHz
Interleaving (Atraso Máximo)	40 ms
Taxa de Bit do Codificador de Voz	13,4 kbps

ao número de TRXs. Cada TRX usa uma única frequência para *downlink* e simetricamente para *uplink*.

Do ponto de vista de implementação, existem dois tipos de FH: O FH de Banda Básica e o FH Sintetizado, dependendo do equipamento instalado no TRX.

No FH de Banda Básica, cada TRX é sintonizado em uma frequência fixa. O salto é alcançado com o deslocamento da informação de um TRX para o outro. Como consequência, na MA da célula, o número de frequência é igual ao número de TRXs.

No FH Sintetizado, os TRXs são capazes de se resintonizar para as diferentes frequências. Uma dada chamada passa por um TRX, mas a frequência usada varia com o tempo. Isso torna o número de frequências na MA maior do que o número de TRXs (mas não mais que 64).

Existem dois tipos de seqüências de FH(GSM, 1999):

1. O FH Aleatório.

No FH Aleatório, a seqüência dos saltos é gerada aleatoriamente.

2. O FH Cíclico.

No FH cíclico, a seqüência é cíclica nos índices das frequências existentes no MA, indo do índice mais baixo ao mais alto. O comprimento das seqüências é igual a 64 quadros do TDMA.

No GSM, o número de seqüência dos saltos HSN (*Hopping Sequence Number*) é o parâmetro que determina o tipo de família de saltos a ser usada. Se o HSN for 0, será ativado o tipo de saltos cíclico, mas, se este for um dos números pertencentes ao intervalo de 1 a 63, então, estará ativado o tipo de saltos aleatório. A cada valor corresponde um valor inicial diferente para o gerador de números aleatórios.

O deslocamento do índice de compensação da alocação móvel MAIO (*Mobile Allocation Index Offset*) é usado para evitar que dois TRXs, com o mesmo HSN, interfiram um com o outro. Esse índice assegura que dois TRXs iniciam os saltos de diferentes posições na seqüência dos saltos. Esta situação ocorre quando os TRXs pertencem à mesma célula, uma vez que eles são parte da mesma Estação Transceptora Base. Neste caso, o nível de interferência seria inaceitavelmente alto. Para evitar essa situação, a seqüência dos saltos para esses TRXs é feita por ajuste ortogonal em diferentes MAIOS.

2.5 Conclusão

Neste capítulo foi revista a estrutura básica do padrão GSM, ou seja, os componentes e as suas funções no sistema.

Destacaram-se não só a terminologia, mas também algumas definições utilizadas no sistema.

Fez-se a revisão do subsistema de estação base, na qual salienta-se o processo da formação do sistema de acesso múltiplo; a definição de canal físico e o seu mapeamento em canais lógicos.

No fim do capítulo, abordou-se a característica principal do GSM: o salto de frequências e as suas diferentes famílias.

As informações desse capítulo são necessárias para o melhor entendimento dos algoritmos de otimização da operação do sistema, apresentados nos capítulos subsequentes.

Capítulo 3

Proposta de Planejamento de Rede Celular GSM para a Cidade de Maputo

3.1 Introdução

Neste capítulo será abordada uma visão geral sobre o planejamento celular. O objetivo é destacar as etapas envolvidas no processo de planejamento celular de uma rede teórica para a cidade de Maputo.

Esse processo se tornou necessário devido as dificuldades de obtenção dos dados acerca das duas redes GSM, das operadoras MCell e Vodacom, que operam em Moçambique.

Os objetivos abordados neste capítulo são:

- Obter os parâmetros de uma rede celular que provavelmente serão próximos aos da rede celular GSM que opera em Maputo;
- Descrever o planejamento de uma rede celular GSM.

Salienta-se que este trabalho de dissertação não trata da otimização do planejamento de redes celulares GSM, mas sim, da otimização da operação destas redes.

3.2 Análise de Tráfego e de Cobertura

O planeamento celular se inicia com a análise do tráfego e da cobertura. A análise deverá produzir tanto informações sobre a área geográfica como a capacidade esperada (carga de tráfego). Os tipos de dados coletados neste caso são (Ericsson, 1998):

- O custo dos serviços;
- A capacidade esperada;
- A cobertura desejada;
- O grau de serviço (GOS);
- As frequências disponíveis;
- A qualidade de conversação;
- A capacidade de crescimento do sistema.

A base para o planeamento celular é a demanda de tráfego, ou seja, quantos assinantes utilizam a rede e quanto tráfego geram. O Erlang (E) é a unidade de medida da intensidade do tráfego. A fórmula para seu cálculo é:

$$A = n \times T / 3600 \text{ Erlang} \quad (3.1)$$

onde,

A - é o tráfego oferecido por um ou mais usuários no sistema

n - é o número de chamadas por hora por assinante

T - é o tempo médio da chamada em segundos

A distribuição geográfica da demanda do tráfego pode ser calculada pelo uso de dados demográficos como:

- A distribuição da população;
- A distribuição do nível de renda;
- A distribuição de utilização de telefone;
- Tarifa de assinatura/chamada e o preço das Estações móveis.

3.3 Cálculo do número de Estações Base

A disposição das Estações Transceptores Base, assim como a seleção e configuração das suas antenas, são a base para o nascimento da rede com a cobertura desejada.

Para determinar o número e a disposição das Estações Transceptores Base BTS (*Base Transceiver Station*), é necessário conhecer o Número de Assinantes e o Grau de Serviço GOS (*Grade of Service*).

O GOS é a medida da habilidade do usuário para acessar um sistema truncalizado¹ nas horas de pico. Em outras palavras, O GOS expressa a probabilidade de um usuário obter um canal dentro do sistema truncalizado de rádio.

Arbitrariamente pressupondo que $n = 1$ chamada/hora com a duração de $T = 90$ segundos, o tráfego por assinante é:

$$A = 1 \times 90/3600 = 25mE.$$

Em seguida, temos que:

1. Conforme dados do censo de 1999, a população de Maputo, capital de Moçambique, era de 1018938 habitantes. Pressupõe-se arbitrariamente que no início da operação de rede, 16%, ou seja, 157036 habitantes era o número de assinantes dos serviços da telefonia móvel.
2. Supõe-se que conforme a distribuição de frequências feita pelo organismo governamental de informação, foram disponibilizadas 48 frequências para a prática dos serviços de telefonia celular.
3. Para atender as exigências de cobertura e qualidade do sistema, o padrão de célula escolhido é 4/12. O padrão mais comum em redes GSM (Ericsson 1998).
4. Porque o GSM é um sistema truncalizado em que o tráfego oferecido excede o tráfego máximo, muitos sistemas GSM em operação foram planejados para um GOS de 2%, ou seja, os agrupamentos celulares são planejados de forma que, 2 em cada 100 chamadas são bloqueadas

¹A troncalização explora o comportamento estatístico dos usuários de forma que um número fixo de canais ou circuitos possa acomodar uma grande comunidade de usuários aleatórios.

Em um sistema de rádio truncado, a cada usuário é atribuído um canal na célula. Ao terminar o seu uso, este é devolvido ao sistema para a próxima alocação.

devido à ocupação de canais nas horas de provável congestionamento da rede.

Com esses dados da rede calcula-se:

- O número de frequências por célula
 $48/12 = 4$
- Conforme a seção 2.2.1, cada canal é dividido em 8 *timeslots*, o que faz com que cada quadro TDMA seja usado por 8 assinantes. Portanto, os canais de tráfego por célula são:
 $4 \times 8 - 1(\text{canal de controle}) = 31 \text{ TCH}$.
- Tendo 31 TCH(31 Canais de Tráfego) e com o GOS de 2%, conforme a (Tabela 10-1) do livro da (Ericsson, 1998), Pág. 217, implica em 22, 827 Erlangs por célula.
- O número de assinantes por célula é
 $22,827E/25 \text{ mE} = 913 \text{ assinantes por célula}$
- O número total de células
 $157036/913 = 172$

Na realidade, o tamanho das células é proporcional ao tráfego gerado por km^2 . Porém, neste caso, devido a falta de dados reais, já que a área do local da implantação da rede tem 447 Km^2 (Imensis, 2005), calculou-se a área de cobertura supondo-se uma forma hexagonal. Neste caso:

$$A_c = \frac{447 \text{ km}^2}{172} = 2,598 \text{ km}^2 \quad (3.2)$$

Com a fórmula da área do hexágono calcula-se o raio da célula:

$$R = \sqrt{\frac{A_c \times 2}{3 \times \sqrt{3}}} = 1 \text{ km} \quad (3.3)$$

3.3.1 Reuso de Frequências

Cada estação base recebe um grupo de canais de rádio a serem usados em uma pequena área geográfica chamada célula.

Às estações base em células adjacentes são atribuídas grupos de canais completamente diferentes em células vizinhas.

As antenas das estações transceptoras base são projetadas para alcançar a cobertura desejada na célula. Ao limitar a área de cobertura, o mesmo grupo de canais pode ser usado para cobrir outras células que estão separadas umas das outras por uma distância suficiente, de modo que as interferências sejam toleráveis.

A Fig.3.1 ilustra o conceito de reuso celular de frequências, onde as células marcadas com as mesmas letras usam o mesmo grupo de canais.

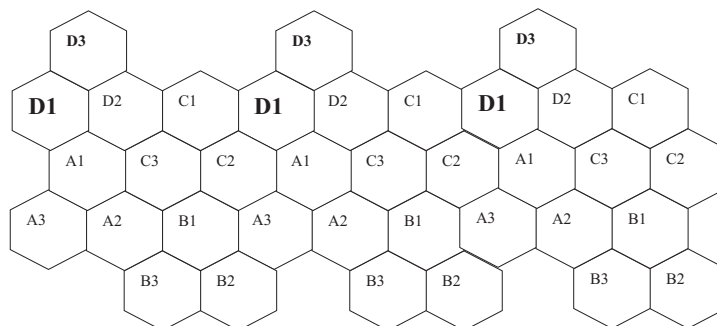


Figura 3.1: Agrupamentos de células

A cobertura real de rádio é determinada pelas medições de campo ou pelos modelos de predição.

Parece que seria melhor usar círculos para representar a área de cobertura da estação base transceptora, mas os círculos adjacentes não podem ser colocados sobre um mapa sem deixar brechas ou criar regiões sobrepostas.

Existem três alternativas de formas geométricas com áreas iguais, que podem ser dispostas sobre um mapa sem se sobrepor: um quadrado, um triângulo equilátero e um hexágono.

A forma hexagonal de célula é conceitual, sendo um modelo de simplificação de cobertura de rádio para cada estação base transceptora. Esse modelo é adotado universalmente porque o hexágono permite uma fácil análise dos sistemas celulares.

O conceito de reuso de frequências explica-se melhor, considerando um sistema celular com o número total N de canais duplex disponíveis para o uso.

À cada célula é alocado um grupo de k canais ($k < N$). Se N canais forem divididos em grupos com um número igual de canais a serem distribuídos a M células, então, o número de canais de rádio disponíveis será (Rappaport/2002):

$$N = kM \quad (3.4)$$

As M células que usam o conjunto composto pelas frequências disponíveis são chamadas de agrupamento celular *cluster*.

O agrupamento celular é replicado V vezes no sistema.

O número total dos C canais duplex pode ser usado como medida de capacidade que é dada por:

$$C = VkM = VN \quad (3.5)$$

Dessa expressão, conclui-se que a capacidade do sistema celular é diretamente proporcional ao número de vezes que o agrupamento é replicado em uma área de serviço. O número M é o tamanho do agrupamento.

Ao reduzir M e manter o tamanho da célula, seriam necessários mais agrupamentos para a cobertura de uma dada área, o que implicaria maior capacidade, ou seja, seria alcançado maior valor de N .

Grupos com tamanho maior fazem com que a razão entre o raio da célula e a distância entre células co-canais se reduzam, tornando a interferência co-canal fraca. Contrariamente, grupos com tamanho menor tem as células co-canais mais próximas. O valor de M é função da quantidade de interferência que uma MS ou estação base transceptora pode tolerar enquanto mantiver uma comunicação de qualidade suficientemente aceitável.

Do ponto de vista de planejamento, quanto menor for o valor de M , melhor a capacidade.

O fator de reuso de frequência de um sistema celular é $1/M$, ou seja, cada célula no sistema recebe $1/M$ do número total de canais disponíveis.

O número de células M , no agrupamento, conforme a geometria do hexágono, deve satisfazer a expressão (Rappaport/2002):

$$M = i^2 + ij + j^2 \quad (3.6)$$

onde i e j são números não negativos.

Para se encontrar a célula co-canal vizinha mais próxima, proveniente de uma dada célula, move-se i células ao longo de uma cadeia de hexágonos e, em seguida, torna-se 60 graus no sentido horário, movendo-se j células. No caso da rede aqui planejada, temos que $i = 2$ e $j = 2$ ou seja $M = 12$.

Os padrões de reutilização recomendados para o GSM são os padrões 4/12 e 3/9. No padrão 4/12, há quatro sítios de três setores, suportando doze células, as quais utilizam doze grupos de frequências.

Com o objetivo de melhorar a capacidade das redes, o padrão de célula 4/12 tem sido usado pelas operadoras de GSM. Na Tabela 3.1, é mostrado o plano de divisão das 48 frequências disponíveis, em um padrão de célula 4/12. Há 12 canais de separação para cada frequência em uma célula, e.g. A1: canais 1, 13, 25, e 37 (Ericsson, 1998).

Tabela 3.1: Divisão das 48 frequências no modelo de célula 4/12.

Frequências	A1	B1	C1	D1	A2	B2	C2	D2	A3	B3	C3	D3
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Canais	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48

Em uma rede real, a alocação de canais para as células não será tão uniforme como na tabela 3.1, já que algumas células irão requerer mais canais, e outras menos. Em relação a isso, um canal pode ser tomado de uma célula com baixa carga de tráfego e movido para outra com a carga de tráfego mais alta. Entretanto, ao se fazer isso, é importante garantir que a interferência ainda seja mínima.

Supõe-se que um dos requisitos da licença foi que a cobertura da rede, nas cidades, deveria permitir a cobertura de ambientes internos. Este fato, dentre outros, limita os tamanhos das células que podem ser utilizadas em alguns casos (por exemplo, prédios de concreto e janelas com camadas refletoras de calor). Por isso, o tamanho das células é variado.

Com base nos cálculos de tráfego, o padrão de células e o plano de reuso de frequências são abordados não somente para a rede inicial, mas também de forma a serem atendidas demandas futuras.

As medições de rádio são efetuadas para ajustar os parâmetros usados na

ferramenta de planejamento para a realidade. São feitos ajustes para atender aos requisitos específicos de clima e terreno do local onde o sistema será implantado.

Um transmissor de teste é montado em um veículo, e a intensidade do sinal é medida enquanto circula-se ao longo da área do local onde o sistema será implantado. Os parâmetros de planejamento podem, então, ser ajustados para corresponder às medições reais.

Uma vez que os parâmetros de planejamento tenham sido ajustados para corresponder às medições reais, o dimensionamento dos controladores das Estações Transceptoras Base, e do Centro de Controle e Comutação móvel podem ser ajustados, gerando planejamento final de célula.

3.3.2 Interferências

Segundo os autores (Lee and Steele, 1995) a interferência co-canal decresce se a potência transmitida pelas MSs e para as MSs for reduzida, mas garantindo que a potência recebida tenha um nível suficientemente alto de forma que a comunicação seja aceitável.

Os sistemas TDMA em uso no GSM suportam a transmissão descontínua (DTX). A DTX faz com que os usuários não transmitam quando não estiverem a falar, conseqüentemente reduzindo a interferência co-canal. Tal como os usuários são atribuídos slots de tempo particulares nos quadros TDMA, as interferências chegam de outros usuários que se comunicam no mesmo slot, na mesma freqüência das células de agrupamentos vizinhos. Durante qualquer TS, a interferência é reduzida se algum usuário co-canal não estiver a falar. Ao mesmo tempo um usuário em um TS ou portadora diferente pode sofrer de alguma interferência devido a DTX. A vantagem do uso do DTX é notável quando conjuntamente é empregue o FH, tal como os usuários mudam de canal a cada quadro TDMA para regular a interferência co-canal de forma que ela seja similar para todos.

Considera-se um sistema com um perfeito controle de potência, FH, DTX, células sem a sectorização e todos os canais de tráfego ocupados pelos usuários. Não são considerados os canais de sinalização e a sectorização. Considera-se uma estação base (BS_0) que recebe a potência de interferência transmitida pelas MSs na célula co-canal j .

Para um perfeito controle de potência, a potência do sinal recebido em todas

as BTs (*uplink*) deve ser uma constante S . Supõe-se que o controle de potência compensa as perdas de trajetória e os efeitos de sombreamento para cada MS.

Para qualquer MS cujo canal de rádio tem o expoente de perda por trajetória α e a variável aleatória de sombreamento λ com o desvio padrão σ , a potência por ela transmitida é :

$$P_T = S r^\alpha 10^{\lambda/10} \quad (3.7)$$

λ tem uma distribuição normal finita $(-4\sigma, 2\sigma)$.

Conforme a Fig. 3.2, a potência de interferência transmitida pela MS que esta na célula j para a célula da BS₀ é :

$$I_j = P_T d_j^{-\alpha} 10^{\lambda_0/10} \quad (3.8)$$

onde $d_j = \sqrt{(D_j^2 + r^2 - 2D_j r \cos(\phi))}$.

D_j é a distância entre as BS₀ e a BS _{j} , r é a distância entre as MSs na célula j , ϕ é definido na Fig. 3.2 e λ_0 é a variável aleatória de sombreamento na distância d_j com desvio padrão σ .

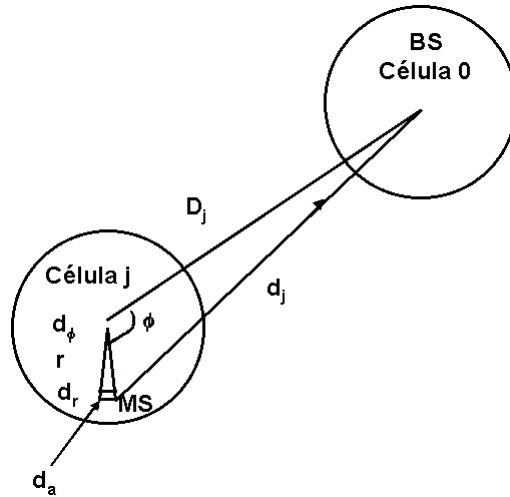


Figura 3.2: Geometria da interferência do *uplink* no sistema TDMA sem sectorização

Supõe-se que cada estação base é atribuída L portadoras, ou seja, f_1, f_2, \dots, f_L e cada portadora suporta NTS s, resultando em NL canais de tráfego por célula. O salto de frequência acontece na base de quadro por quadro. Cada usuário é atribuído um TS no quadro de tempo no qual permanece com a chamada em processamento enquanto o FH ocorre.

Considera-se um TS_k suportado pela portadora f_i . Na célula j que interfere. A cada quadro TDMA existe sempre um usuário que ocupa o TS_k da portadora f_i .

Devido ao FH em cada quadro TDMA a interferência associada com o canal especificado por TS_k e f_i pode vir de diferentes locais da célula j , se bem que a interferência vem de um usuário durante cada quadro. Eventualmente a frequência f_i será usada por um subconjunto dos L usuários que ocupam o TS_k na célula j . Se L for um número grande, então, se assume que tem uma distribuição uniforme ao longo de toda a célula e a sua PDF no TS_k na área d_a é aproximadamente:

$$f(a) \cong \frac{1}{\pi R^2} \quad (3.9)$$

onde R é o raio da célula.

A aproximação é porque R é o raio do círculo cuja área é aproximada a do hexágono.

Assume-se que as MS s se comunicam com a mais próxima BS e como tal a média da potência das MS s localizadas na célula j que usam o TS_k é

$$i_j = \int \int_A I_j f(a) d_a \quad (3.10)$$

I_j é a interferência da MS que está a distância d_j da BS_0 e i_j é a interferência na presença do FH onde a interferência pode chegar de diferentes locais da célula j .

Substituindo I_j da equação 3.8 e $f(a)$ da equação 3.9 na equação 3.10 e fazendo $d_a = r d_r d_\phi$, com d_r e d_ϕ definidos na Fig. 3.2

$$i_j = \frac{S}{\pi R^2} \int_0^R \int_0^{2\pi} \left(\frac{r}{d_j}\right)^\alpha 10^{\xi/10} r d_r d_\phi \quad (3.11)$$

Devido ao FH em cada salto, quando se verifica uma mudança de portadora na transmissão que interfere, ξ variável de sombreamento associada à mudanças no sinal que interfere, varia.

A média de i_j para a célula j é:

$$E[i_j] = \frac{S}{\pi R^2} E[10^{\xi/10}] \int_0^R \int_0^{2\pi} \left(\frac{r}{d_j}\right)^\alpha r d_r d_\phi \quad (3.12)$$

onde $\sigma = 8$ e $E[10^{\xi/10}] = 8,3$.

Ainda, neste trabalho (Lee and Steele, 1995) são apresentados cálculos para o *downlink* em casos de células com e sem setorização.

3.4 Planejamento Celular Nominal

Um planejamento celular nominal pode ser gerado da análise de tráfego e de cobertura. O planejamento celular nominal é uma representação gráfica da rede, como um padrão de células em um mapa. Em conformidade aos dados de rede calculados na seção 3.3, a Fig. 3.2 representa o planejamento nominal sobre o mapa da cidade de Maputo (Imensis/2005).

Os planejamentos celulares nominais são os primeiros planos de célula, compondo a base para o planejamento posterior.

O planejamento sucessivo deve levar em conta as propriedades de propagação de rádio do ambiente real. Esse planejamento necessita de técnicas de medição e de ferramentas de análises, auxiliadas por computador para o estudo da propagação de rádio.

Existem várias ferramentas de planejamento celular tais como o Planejador Celular de Sistema Móvel de Teste TEMS da Ericsson, o Planet da MSI, etc, incluindo pacotes de predição que provêm:

- A síntese de cobertura;
- A Predição da interferência co-canal;
- A predição da interferência do canal adjacente.

O Planejador Celular é um pacote de programas computacionais desenvolvido para simplificar o processo de planejamento e de otimização de uma

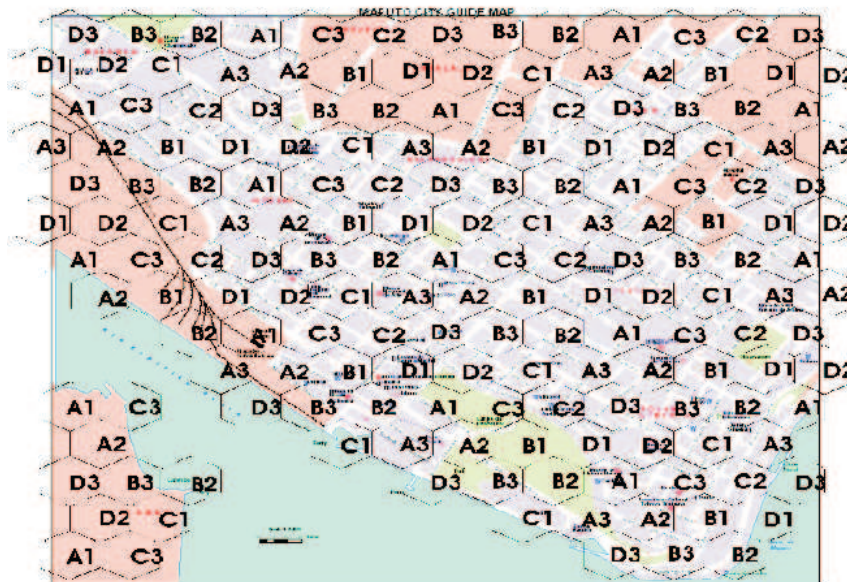


Figura 3.3: Planejamento Nominal de Maputo

rede celular. Com um Planejador Celular, o tráfego pode ser distribuído através de um mapa, utilizando diferentes cores para diferentes quantidades de Erlangs/Km². Pode-se importar dados de uma MS de teste, exibindo-os no mapa. Um Planejador Celular também pode importar arquivos de resumo de rádio, que podem ser usados para ajustar o modelo de previsão para a área onde a rede vai ser planejada. Os dados também podem ser importados para o Subsistema de Suporte à operação OSS (*Operation Support Subsystem*).

3.5 Conclusão

Nesse capítulo, foi apresentada uma seqüência geral dos procedimentos de planejamento celular GSM para uma suposta rede da cidade de Maputo. Foram calculados os parâmetros básicos para o início de um projeto de planejamento da rede.

O planejamento nominal básico sobre o mapa de Maputo, Capital da República de Moçambique, foi apresentado na seção 3.5.

As células são hexagonais, tendo todas o raio de 1 km (seção 3.2), ou seja,

as células têm o mesmo tamanho.

Esse planejamento básico se faz necessário para os estudos a serem efetuados nos capítulos de otimização da operação da rede GSM.

Capítulo 4

Otimização do Salto de Frequências

4.1 Introdução

Nos sistemas da terceira geração, para se alcançar uma boa qualidade de serviços, a sincronização é mais importante que nas redes celulares da segunda geração. Tudo indica que a qualidade dos serviços será o destaque dos sistemas da terceira geração. A tecnologia da telefonia celular da terceira geração como o Sistema Universal de Telefonia Móvel e o CDMA 2000, que funcionam em banda larga, requerem uma boa sincronização da rede para garantir o *handoff* seguro entre as Estações Base Transceptoras.

Isso será possível com uma boa distribuição de relógio por toda a rede. (Mann, 2004), depois de concluir que para estes sistemas o relógio tradicional em uso pode apresentar muitos erros, os quais podem motivar a queda e a interrupção de chamadas, sugeriu uma distribuição de relógio utilizando o Sistema Global de posicionamento GPS (*Global Positioning System*).

Estudos feitos pelos autores (Bourjolly and Touhami, 2000) revelam que, em redes congestionadas, onde a alocação de frequências é estática, quando duas MSs estiverem alocando frequências, as quais interferem em suas respectivas comunicações, a interferência permanece enquanto a frequência estabelecida para esta comunicação não muda. Se, devido à característica da rede, os níveis de interferências forem altos, os portadores das MSs em comunicação podem experimentar uma má qualidade de comunicação e até mesmo a in-

terrupção da chamada em curso.

O Salto Frequências FH é uma característica do GSM. Esse salto serve para ultrapassar estes problemas tanto através da diversificação de frequências, como através do nivelamento de interferências.

Através do salto cíclico ou aleatório, as interferências entre qualquer par de TRXs ocorrem aleatoriamente, uma vez que as chamadas chegam ao sistema aleatoriamente. O momento em que as seqüências do salto de frequências tem início é também aleatório.

Nesse capítulo, é apresentado um algoritmo do tipo Evolucionário¹, usado para otimizar a alocação de frequências, planejando o seu uso por cada MS. São também apresentados tanto os resultados das simulações numéricas como as respectivas conclusões.

4.2 O Salto de Frequências Otimizado

Uma rede sincronizada é uma rede cujos Rádios Transceptores TRXs iniciam o salto de frequências no mesmo instante e continuam em saltos, mesmo quando não estiverem envolvidos em alguma comunicação. Se for aplicada a família do salto aleatório, o nível de interferências será aleatório. Se for aplicada a família do salto cíclico, as seqüências passam a depender dos índices das frequências alocadas para a MA de cada célula conforme o capítulo 3.

A otimização do salto de frequências proposta em (Bourjolly and Touhami, 2000) é similar ao salto cíclico de frequências em uma rede não sincronizada (rede da segunda geração). A diferença é que as seqüências não serão baseadas nos índices das frequências obtidas na MA da célula, como no caso anterior, mas sim, de acordo com uma ordem estabelecida pelo algoritmo de otimização.

O processo de otimização ocorre em dois estágios:

1. A construção dos MAs das células é feita de maneira a reduzir as interferências, de uma forma otimizada. Neste contexto, os autores (Allen, 2002; Avenali, 2002; Gerke, 2002; Hurley, 2002; Jaumard, 2002; Heuvel, 2002; Smith, 2002; Fischetti, 2000; Mathar R., 2000; Matsui, 2000;

¹Algoritmo de Populações ou Evolucionário é baseado apenas em uma busca aleatória cuja “média” é deslocada à medida que são geradas novas avaliações da função objetivo.

Smith, 2000) se referem a muitos estudos que têm sido desenvolvidos, com o objetivo de aperfeiçoar os algoritmos de alocação de frequências.

2. A construção de seqüências de salto é feita por uma função objetivo de minimização de interferências.

As seqüências de salto de frequências são geradas para cada TRX no sistema. Essas seqüências correspondem ao planejamento do uso das frequências existentes na MA de cada célula. Para isso, considera-se um horizonte de tempo H (no GSM, o $H = 64$ quadros TDMA).

Considera-se que a geração de seqüências no salto otimizado é como a geração de uma matriz cujas colunas correspondem os quadros TDMA no horizonte de tempo H , e as linhas correspondem aos TRXs. Cada entrada, nesta matriz, corresponde ao índice da frequência, que está em uso no TRX.

O objetivo típico usado sob alocação estática é minimizar a soma ou, equivalente a média da interferência em todos os TRXs da rede. Como o salto de frequências introduz uma dimensão de tempo, a função objetivo deve capturá-lo. O objetivo do FH é reduzir o número de quadros TDMA consecutivos nos quais a interferência co-canal é alta, permitindo o bom funcionamento do algoritmo de recuperação de erros.

O objetivo selecionado é a minimização da interferência cumulativa máxima. Toda a interferência produzida em cada quadro TDMA é capturada para cada TRX, e o resultado é a interferência cumulativa desse TRX. O uso da interferência cumulativa máxima como objetivo tem a vantagem de produzir soluções, não sendo permitidos altos níveis de interferência em quadros consecutivos, evitando desta forma a queda de chamadas (Bourjolly and Touhami, 2000).

Em seguida, são apresentados os algoritmos de otimização do FH descritos em (Bourjolly and Touhami, 2000), destacando-se algumas ilustrações referentes aos resultados obtidos.

4.2.1 Algoritmo da Otimização do salto de Frequências

Algoritmo para a fase 1: A construção da MA

1. Inicialização. Gerar uma MA inicial para cada célula, utilizando a alocação estática de frequências. Conforme foi visto na seção 3.4,

são necessária medições para que o algoritmo heurístico seja efetivo na alocação de frequências.

2. Calcular a quantidade de interferência produzida em cada célula.

Nesta fase do trabalho de dissertação, por falta do plano de alocação de frequências, iniciou-se com a hipótese a qual se refere a um processo discreto no tempo, sendo a interferência variável aleatória com distribuição normal, ou seja, Variável Aleatória (Normal) Gaussiana². Foi construída uma matriz, a qual foi adicionada o valor calculado com a expressão 3.11

$$i_j = \frac{S}{\pi R^2} \int_0^R \int_0^{2\pi} \left(\frac{r}{d_j}\right)^\alpha 10^{\xi/10} r dr d\phi$$

onde o desvio padrão mínimo do desvanecimento por sombreamento é $\sigma = 8$ dB e $\xi = \sqrt{\sigma}$ (Lee and Steele, 1995), o fator de atenuação do sinal é $\alpha = 4$, $r = R = 1$ km e a potência do sinal recebido por todas as BSs é a constante $S = 50$ W ou seja, 47 dBm. Supõe-se que as entradas desta matriz correspondem aos níveis de interferência que uma célula exerce na outra célula co-canal.

3. Determinar o número de passos (N-pass) que é o número de vezes em que a MA inicial obtido na etapa 1 vai ser aumentada.

N-pass = 10.

4. For **pass = 1 até N-pass**

- (a) Ordenar as células em ordem decrescente por níveis de interferências.

Exemplo de ordenamento das primeiras 10 células por níveis de interferências:

15.9648; 15.9615; 14.3239; 14.2486; 14.0339; 13.9402; 13.6305; 12.8802; 11.5237; 10.5374 dBm.

- (b) Selecionar a célula com o maior nível de interferência ainda não selecionada neste passo, chamando-a $cell_i$

$cell_i = 15.96$ dBm, é a primeira célula.

²A pdf da variável aleatória de X é dada por $f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(x-m)^2/2\sigma^2}$, $-\infty < x < \infty$, onde a média m e o desvio padrão σ são números reais maiores que zero (Leon-Garcia, 1989)

- (c) Para cada frequência f que satisfaz as restrições de separação com respeito à célula i :

Avaliar o impacto de se ter acrescentado f na MA da cell i :

- (d) *Seja C_f a célula da rede com o mais alto nível de interferência por consequência de se acrescentar f na MA da cell i*

Nesta fase de cálculo, foi identificada a 1ª célula da rede, destacando-se aquela que possui o mais alto nível de interferência.

- (e) *Seja L_f o nível dessa interferência*

- (f) $f^* = \operatorname{argmin}_f L_f$

O menor nível de interferência calculado foi de 11.5237 dBm

- (g) Acrescente a frequência f^* no MA da cell i .

(Se ,no passo seguinte, não for encontrada as frequências f^* , abandone a cell i nas próximas execuções da etapa 4.b e vai para a etapa 4.a).

- (h) Faça a renovação dos níveis de interferências como na etapa 2 e vá para 4.a

Algoritmo para a fase 2: Geração de Seqüências

1. Inicialização

O número de rádios transceptores por célula: TRX = 4.

Quantidade de células na rede: célula = 172.

Número de quadros TDMA : TDMA-frames = 50.

2. For $t = 1, \dots, H$

- (a) Calcule os níveis de interferências em cada TRX.

Tabela 4.1: Alguns níveis de interferências calculados

Células	65	66	67	68
Interferências, (dBm)	11.5470	11.1353	9.0616	12.1285
	10.0446	13.8094	10.3782	10.9695
	10.8994	12.5427	13.4566	10.4016
	12.5775	7.7467	11.6536	13.1262

- (b) Ordene os TRXs em ordem decrescente por níveis de interferência.
- (c) Selecione o TRX com o maior nível de interferência cumulativa que não foi selecionado na iteração t . Chame-o TRX i .

O TRX n° 409 apresentou o maior nível de interferência cumulativa igual a 16.3541 dBm.

- (d) Para cada frequência f que satisfaz as restrições de separação originais³ com respeito ao TRX i :

Seja C_f o TRX da rede com o maior nível de interferência por consequência de se usar f no TRX i no tempo t . $C_F = 16.9342$ dbm. Esta é o TRX n° 569.

- (e) Seja L_f esse nível de interferência
- (f) $f^* = \operatorname{argmin}_f L_f$
- (g) Escolha o nível de interferência a ser usado no TRX i no tempo t . O nível de interferência a ser usado no TRX i no tempo t foi escolhido, sendo 12.5831 dBm
- (h) Organize os níveis de interferência como na etapa 2a e vá para 2b.

4.3 Análise dos Resultados

Na simulação numérica foram consideradas a rede planejada no capítulo 3 composta por 172 células, 688 TRXs. A célula tem 4 TRXs. A banda disponível é de 48 frequências, o comprimento da seqüência de saltos é 50.

Para a investigação do impacto do tamanho da MA foi permitido que o tamanho da MA inicial na célula, variasse em um número de mais 10 TRXs.

A Fig. 4.1 (FH otim.-FH otimizado e FH cicl.-FH cíclico) mostra o impacto do tamanho da MA na interferência cumulativa dos TRXs.

Comparando, pode-se observar que, o FH otimizado supera o FH cíclico tanto em termos de minimização da interferência cumulativa máxima assim com no nivelamento da variação da interferência cumulativa máxima. O tamanho da MA inicial mais três provê um bom nivelamento da variação da interferência cumulativa para o salto otimizado.

³Referenciadas na seção 3.4 como restrições do planejamento de frequências

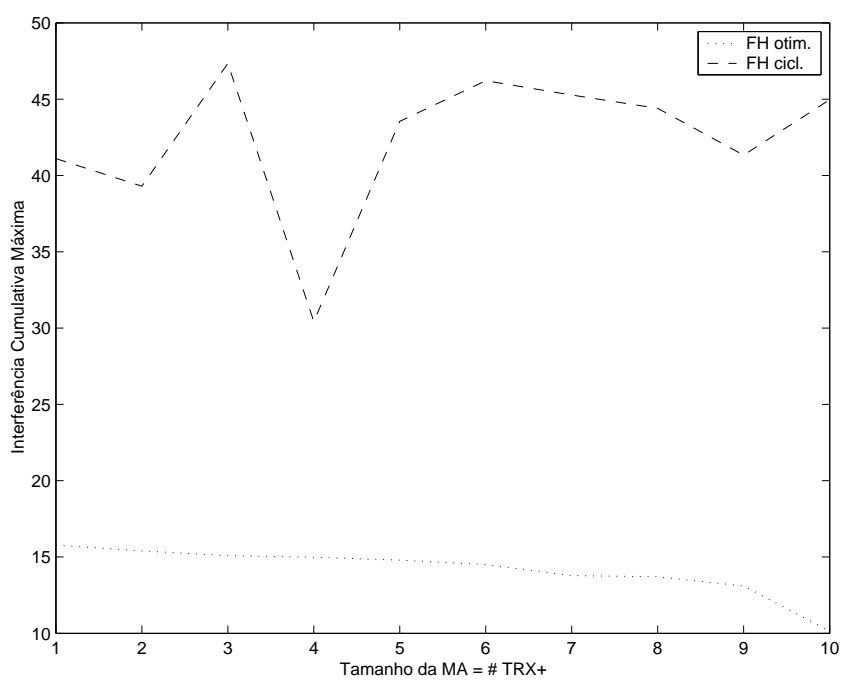


Figura 4.1: Variação da interferência cumulativa com o tamanho da MA.

Na tentativa de validar estes resultados referentes ao FH otimizado, foram feitas 50 simulações da variação da interferência cumulativa com o tamanho da MA, usando o mesmo algoritmo comentado na seção 4.2, para diferentes matrizes de interferência iniciais. Calculou-se a média destas realizações, e, posteriormente, calculou-se o desvio padrão. Na Figura 4.2, estão mostrados os resultados obtidos.

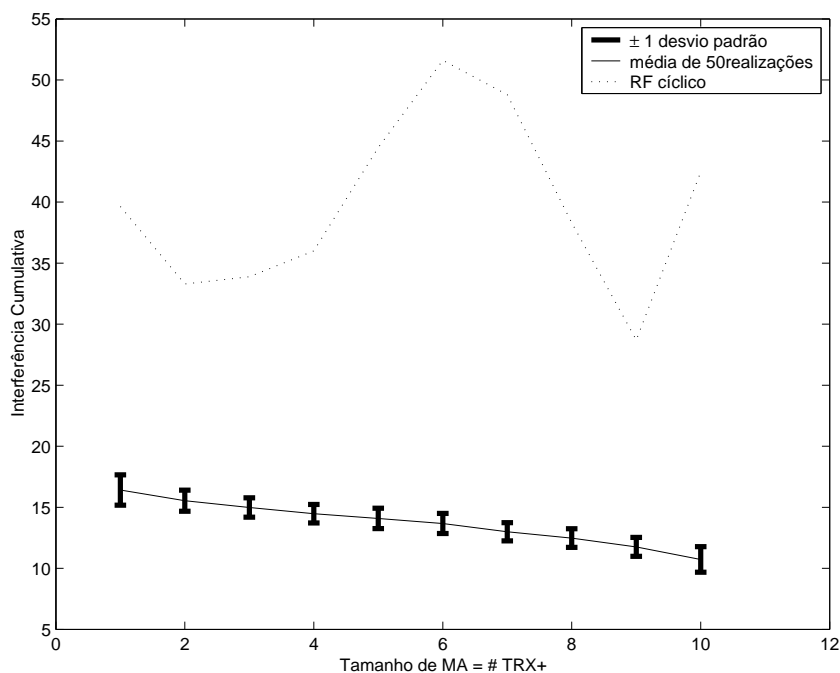


Figura 4.2: Variação do desvio padrão da média de 50 realizações da interferência cumulativa com o tamanho da MA.

A Fig. 4.3 mostra os índices dos TRXs os quais produziram os mais altos níveis de interferência cumulativa ao longo dos quadros TDMA no horizonte considerado na otimização do salto de frequência.

4.4 Conclusão

Os autores (Bourjolly and Touhami, 2000) afirmam que o FH otimizado é melhor em relação as demais famílias do FH tanto em termos de redução dos níveis de interferência como em tempo gasto nos mais altos níveis de

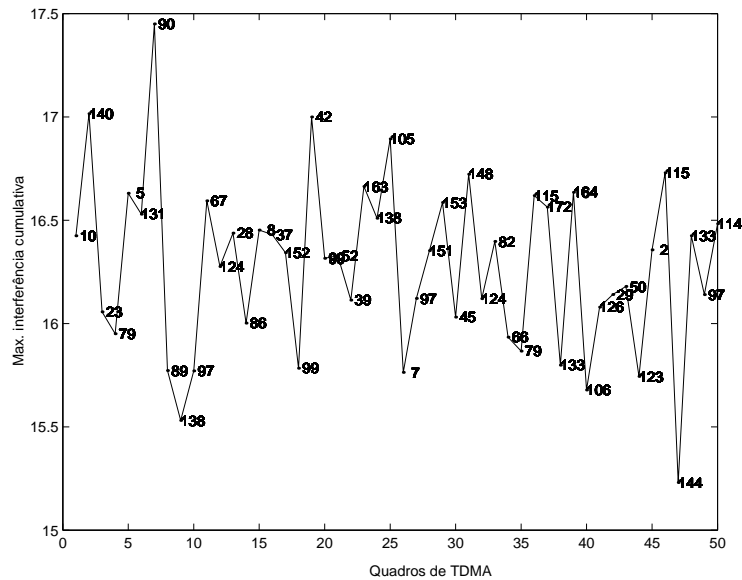


Figura 4.3: Índices dos TRXs com o maior nível de interferência cumulativa máxima

interferências. Esses autores afirmam que, na prática, comparando-se o FH otimizado, FH cíclico, aleatório e a alocação estática, a conclusão seria que a alocação estática de frequências é melhor que o FH otimizado em termos de desempenho médio. Porém a maior desvantagem é que a alocação estática não apresenta um bom mecanismo de partilha de interferências entre os TRXs na rede ao longo do tempo.

Nesse trabalho, através da análise dos resultados das seções 4.2 e 4.3, pode-se verificar que o FH otimizado supera o FH cíclico em termos de minimização de interferências. As demais comparações não são feitas porque para estas seriam necessários resultados de medições práticas.

A melhor apreciação do efeito do salto de frequências pode ser alcançado com uma análise, que considera a variação das interferências durante o tempo para cada TRX.

Permitir que o número de vezes que a MA cresce seja variável entre as células seria um potencial desenvolvimento deste algoritmo, já que isso seria uma maneira de diminuir a sobrecarga para a MSC, ou seja, aproveitando-se da estrutura do GSM, em que, uma BSC controla um número de células, o salto

de frequências realizado nestas células poderia também ser controlado pela própria BSC.

A redução do esforço no trabalho da MSC pode melhorar o salto de frequências e posteriormente pode prover boa planificação de canais para cada MS que transmite nessas células controladas pela BSC.

Capítulo 5

Cálculo do Número de Canais

5.1 Introdução

As redes celulares lidam com o fenômeno de *handoff* Fig. no qual uma chamada em progresso em uma célula, devido a mobilidade do usuário, é comutada na outra célula.

O tráfego de *handoff* em uma célula consiste de chamadas em progresso, nas células vizinhas, tentando entrar na célula em estudo para disputar o mesmo recurso usado por chamadas que podem ser iniciadas própria célula.

Em estruturas tanto micro-celulares como de alta mobilidade, o tráfego de *handoff* torna-se muito importante porque a sua probabilidade cresce.

Nos últimos anos, devido ao grande crescimento das redes celulares e serviços num espectro limitado, o seu dimensionamento é um tópico de grande importância para os provedores destes serviços e ganha muita atenção na literatura.

A hipótese mais comum em muitos modelos de dimensionamento é que a chegada de chamadas tanto novas como de *handoff* é um processo de Poisson.

As distribuições de tempo de serviço e o tempo de residência de uma chamada são desconhecidas.

Por se considerar o término forçado de chamadas indesejável em relação ao bloqueio de novas chamadas, muitos esquemas foram propostos na literatura segundo esta abordagem (D.Hong, 1986; Katzela and Naghshineh,

1996; Y.B.Lin, 1994; Tekinay and Jabbari, 1992). Estes esquemas variam em termos de complexidade, desde esquemas simples não priorizados nos quais todas as chamadas têm o mesmo tratamento (Sidi and Starobinski, 1997), até aos esquemas mais complexos que atribuem prioridade (dinamicamente) baseados em medições (Tekinay and Jabbari, 1992).

O esquema mais popular que se considera como bom compromisso em termos de desempenho e de complexidade é o esquema de canais de guarda (Haring et al., 2001; D.Hong, 1986; Katzela and Naghshineh, 1996).

Nesses esquemas, parte dos N canais disponíveis na célula é reservado para chamadas de *handoff*.

Para uma célula com a capacidade total de N canais, g canais são reservados para chamadas de *handoff*. Por isso, quando uma chamada chega ao sistema, se houver g ou menos canais disponíveis, essa chamada é rejeitada. Dentre canais disponíveis na célula, esse esquema provê a qualquer momento, um número mínimo para chamadas de *handoff* (g).

Duas medidas de qualidade de serviço foram definidas nas redes celulares;

1. A probabilidade de bloqueio de novas chamadas; essa medida é parecida com a que se encontra nos sistemas truncados de telefonia.
2. A probabilidade de queda de chamadas de *handoff*.

A queda de uma chamada de *handoff* é de extrema importância em sistemas celulares porque resulta em um fenômeno indesejável de terminação forçada da chamada.

A análise de sistemas celulares, considerando que a chegada de chamadas de *handoff* é um processo de Poisson, adotando o esquema de canais de guarda, tem merecido a atenção de muitos autores (Haring et al., 2001; Y.B.Lin, 1994; H.R.Sun and Trivedi, 1999; Yeu Ma and Trivedi, 1999; James j.Han and K.S.Trivedi, 2000).

5.2 *Handoff*-Modelagem Matemática

Assume-se que a rede celular em estudo é homogênea, ou seja, todas as células são idênticas e recebem o mesmo tipo de tráfego. Isto permite considerar apenas uma célula para o estudo. A captura de toda a interação com as células vizinhas é através da chegada de chamadas. Assume-se também que

o número de canais N , alocados na célula em estudo, é fixo, ou seja, o sistema usa o esquema de alocação estática de canais.

A queda de uma chamada de *handoff* é considerada mais severa que o bloqueio de nova chamada.

Adota-se o esquema de canais de guarda (D.Hong, 1986; Y.B.Lin, 1994) para dar prioridade as chamadas de *handoff* contra as novas chamadas que podem estar tentando se juntar ao sistema. Fixa-se à parte $g \leq N$ como canais de guarda. O número máximo de canais para as novas chamadas passa a ser $N - g$ canais.

Assume-se que os tempos em que novas chamadas e chamadas de *handoff* se completam estão distribuídos exponencialmente com o parâmetro μ_1 e o tempo em que as MSs em conversação saem da célula é também exponencialmente distribuído com o parâmetro μ_2 . Assume-se também, que os intervalos de tempo das novas chamadas estão distribuídos exponencialmente com o parâmetro λ_1 e intervalos das chamadas de *handoff* estão distribuídos com a função de distribuição (cumulativa) $P(T \leq t) = G(t)$ e a função de densidade $g(t)$ cuja média é $1/\lambda_2$ independente dos tempos das novas chamadas.

As novas chamadas que encontrarem todos os $N - g$ canais ocupados deixaram o sistema assim como chamadas de *handoff* que encontrarem todos os N canais ocupados abandonaram o sistema.

No diagrama de transição de estados Fig. 5.1, as setas indicam a transição do sistema com a chegada de chamadas de *handoff*.

A probabilidade de bloqueio de novas chamadas é a probabilidade de que uma nova chamada encontre no sistema os $N - g$ canais ocupados, enquanto que a probabilidade de queda de chamadas de *handoff* é a probabilidade de que as chamadas de *handoff* encontrem todos os canais no sistema ocupados.

Seja $C(t)$ o número de canais ocupados no momento t , então, $\{C(t) \geq 0\}$ é um processo de nascimento-morte tal como é mostrado pela Figura 5.1.

Define-se $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$, $\mu = \mu_1 + \mu_2$. Os estados-dependentes das taxas de chegada e de partida em um processo de nascimento-morte¹ são dados por:

$$Y(n) = \begin{cases} \lambda, & n = 0, 1, \dots, N - g - 1 \\ \lambda_2, & n = N - g, \dots, N - 1; \quad g > 0 \end{cases}$$

¹Cadeia de Markov na qual só ocorrem transições entre estados adjacentes.

e $M(n) = n\mu$, $n = 1, \dots, N$.

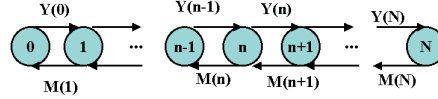


Figura 5.1: Modelo da Cadeia de Markov para chamadas de *handoff*

Baseado na estrutura da Cadeia de Markov acima pode-se escrever as soluções da equação do estado de equilíbrio da seguinte forma:

$$p_n = \lim_{t \rightarrow \infty} \text{Prob}(C(t) = n), \quad n = 0, 1, 2, \dots, N.$$

Seja $A = \lambda/\mu$, $A_1 = \lambda_2/(\mu_1 + \mu_2)$. Então, a expressão de p_n é

$$p_n = p_0 \begin{cases} \frac{A^n}{n!}, & n \geq N - g \\ \frac{A^{N-g}}{n!} A_1^{n-(N-g)}, & n \geq N - g \end{cases}$$

Onde,

$$p_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^{N-g-1} \frac{A^n}{n!} + \sum_{n=N-g}^N \frac{A^{N-g}}{n!} A_1^{n-(N-g)}}$$

A probabilidade de queda de chamadas de *handoff* é:

$$P_d(N, g) = p_N = \frac{\frac{A^{N-g}}{N!} A_1^g}{\sum_{n=0}^{N-g-1} \frac{A^n}{n!} + \sum_{n=N-g}^N \frac{A^{N-g}}{n!} A_1^{n-(N-g)}} \quad (5.1)$$

De forma similar, a expressão para as chamadas bloqueadas é:

$$P_b(N, g) = A^{N-g} \frac{\sum_{k=0}^g \frac{A_1^k}{(k+N-g)!}}{\sum_{n=0}^{N-g-1} \frac{A^n}{n!} + \sum_{n=N-g}^N \frac{A^{N-g}}{n!} A_1^{n-(N-g)}} \quad (5.2)$$

Quando $g = 0$, as expressões 5.1 e 5.2 se reduzem a distribuição Erlang B. A é o tráfego na célula e A_1 é o tráfego das chamadas de *handoff*, em Erlangs.

Se o número de canais N for muito grande existem dificuldades para o uso destas expressões, uma vez que é preciso calcular fatoriais e grandes potências de A e A_1 .

Neste contexto, são desenvolvidas fórmulas recursivas(Haring et al., 2001).

Na ausência de canais de guarda, os cálculos das probabilidades de queda de chamadas do *handoff* e a probabilidade de bloqueio de novas chamadas são feitos com a seguinte expressão recursiva:

$$E_B(A, k) = \frac{\frac{A}{k} E_B(A, k-1)}{1 + \frac{A}{k} E_B(A, k-1)} \quad (5.3)$$

sendo $E_B(A, 0) = 1.0$.

caso exista um ou mais canais de guarda ($g > 0$) e $N_1 = N - g$ seja o número de canais compartilhados para a realização de novas chamadas, calcula-se a probabilidade de queda de chamadas pela seguinte fórmula recursiva:

Seja $P_d(N_1, 0) = E_B(A_1, N_1)$.

$$P_d(N_1 + k, k) = \frac{P_d(N_1 + (k-1), k-1)}{\frac{N}{\alpha A} + P_d(N_1 + (k-1), k-1)} \quad (5.4)$$

$k = 1, 2, \dots, g$.

Da mesma forma, seja $P_b(N_1, 0) = E_B(A_1, N_1)$.

$$P_b(N_1 + k, k) = \frac{\frac{N}{\alpha A} P_b(N_1 + (k-1), k-1) + P_d(N_1 + (k-1), k-1)}{\frac{N}{\alpha A} + P_d(N_1 + (k-1), k-1)} \quad (5.5)$$

$k = 1, 2, \dots, g$.

Onde $\alpha A = A_1$ é o tráfego em Erlangs devido a chegada do *handoff*.

5.3 Problema de Otimização do Número de Canais

O problema a ser resolvido é a minimização simultânea das probabilidades de bloqueio de novas chamadas e de queda de chamadas de *handoff*. É um problema de otimização multiobjetivo. As variáveis de decisão são o número de canais de guarda g e o número de canais N . Na versão mais simples do problema, fixa-se N e g passa a ser a única variável de decisão.

Dados dois objetivos, existem diversas formas de se resolver o problema. Pode-se tomar P_b ou P_d como função objetivo a ser minimizada, impondo a outra como restrição.

5.3.1 Cálculo do Número Ótimo de Canais de Guarda

Dado A , N e α , determinar o valor ótimo de g . Ou seja,

minimize $P_b(g)$ *tal que* $P_d(g) \leq P_{d0}$,

onde P_{d0} é a probabilidade de queda da chamada de *handoff* quando $g = 0$.

Com base nas fórmulas (5.1) a (5.5), nota-se que a probabilidade de queda de chamadas $P_d(N, g)$ é uma função decrescente em relação a g (para N fixo) ou seja $P_d(N, g) < P_d(N, g - 1)$. Posto isto, é primeiro, determina-se o menor valor de g tal que $P_d(g) \leq P_{d0}$.

Por outro lado, a probabilidade de bloqueio de chamadas $P_b(N, g)$ é uma função decrescente em relação a g (para N fixo), ou seja, $P_b(N, g) < P_b(N, g - 1)$. Com esta propriedade, pode-se buscar o valor de g que minimiza $P_b(g)$.

O valor ótimo de g é calculado por uma simples busca unidimensional (1-D) dentro do conjunto $\{0, 1, 2, \dots, N - 1\}$.

$$g^* = \min \{g | P_d(g) \leq P_{d0}\} \quad (5.6)$$

Foram feitas simulações numéricas sobre uma célula da rede de Maputo projetada no Capítulo 3. Conforme os cálculos da Seção 3.3, cada célula tem a capacidade para servir 913 assinantes que produzem um tráfego de $A = 22,827$ Erlangs, o parâmetro da célula é $\alpha = 0,5$ e o número total de canais $N = 31$ TCH.

Os resultados destas simulações estão apresentados na Tabela 5.1 que dá os valores ótimo de g^* para diferentes valores de P_{d0} .

5.3.2 Cálculo do Número Total Ótimo de Canais

Dados A e α , determinar os valores ótimos de N e g tais que

$$N \text{ seja minimo e } \begin{cases} P_b(N, g) \leq P_{b0} \\ P_d(N, g) \leq P_{d0} \end{cases}$$

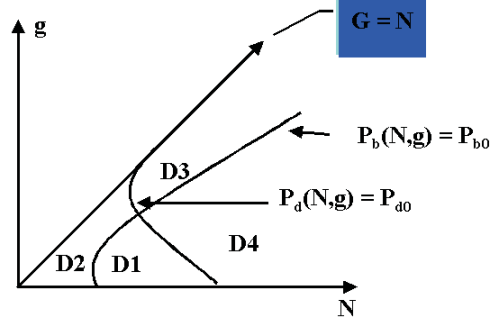


Figura 5.2: Plano (N, g) . $P_{b0} > P_{d0}$.

Para resolver o problema, considera-se o primeiro quadrante do plano (N, g) tal como é mostrado na Figura 5.2. De fato a região de interesse está abaixo da linha $g = N$. Ainda nesta linha $P_b(N, N) = 1.0$. É também importante notar que, $P_d(N, 0) = P_b(N, 0) = E_B(A, N)$. Esta propriedade evidencia um caso interessante dependente dos valores de P_{d0} e de P_{b0} .

A Figura 5.2 representa o caso de $P_{b0} > P_{d0}$. Enquanto $P_d(N, g) > P_{d0}$ pertencer à $\{D1 \cup D2\}$ e $P_b(N, g) > P_{b0}$ pertencer à $\{D2 \cup D3\}$, a região viável é região $D4$.

Para facilitar a explicação do processo de cálculo do número ótimo de canais, a Figura 5.3 mostra a parte do plano (N, g) . O tracejado vertical representa a região onde a restrição $P_d(N, g) \leq P_{d0}$ é violada e, o tracejado horizontal a restrição $P_b(N, g) \leq P_{b0}$ é também violada.

O algoritmo consiste de três partes (A, B, C) e utiliza as fórmulas recursivas rápidas para o cálculo de $P_d(N, g)$ e $P_b(N, g)$.

Algoritmo: Parte A

Calcular $E_B(A, N)$ para $N \in [1, N_{max}]$ tal que $E_B(A, N_{max}) \leq P_{d0}$.

Tabela 5.1: Valores ótimos de g^* para diferentes valores de P_{d0} e de P_{b0}

P_{d0}	g^*	$P_d(g^*)$	$P_b(g^*)$
10^{-2}	0	0.002591	0.002591
10^{-3}	2	0.000472	0.011319
10^{-4}	3	0.000044	0.023354
10^{-5}	4	0.000006	0.037591

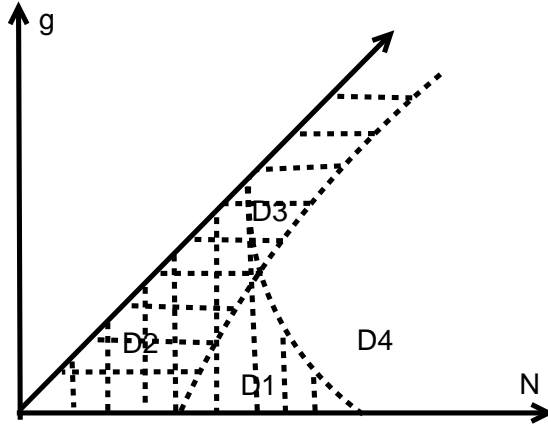


Figura 5.3: Plano (N, g) . Regiões de interesse.

Determinar N_{min} como o menor valor de $N \in [1, N_{max}]$ tal que $E_B(A, N_{min}) \leq P_{b0}$.

Fase 1: $g = 0$

$$N_{mid} = (N_{max} + N_{min}) / 2$$

$$N = N_{mid}$$

Fase 2: $g = g + 1$

$$N = N + 1$$

Calcular $P_d(N, g)$ e $P_b(N, g)$ utilizando as fórmulas (3.5) e (3.6).

Caso de:

$(N, g) \in D_1$: vai para a fase 2

$(N, g) \in D_2$: $N_{min} = N_{mid}$: vai para a fase 1

- Esta foi a etapa do teste do evento: $P_d(N, g) > P_{d0}$ em $\{D_1 \cup D_2\}$ e a violação da restrição $P_d(N, g) \leq P_{d0}$.

$(N, g) \in D_3$: $N_{min} = N_{mid}$

Calcular o menor valor de $N (= N_b) \in [N_{min} + g, N_{max} + g]$ tal que $P_b(N_b, g) \leq P_{b0}$ utilizando a parte B.

Calcular o menor valor de $N (= N_d) \in [N_{min} + g - 1, N_{max} + g - 1]$ tal que $P_d(N_d, g - 1) \leq P_{d0}$ utilizando a parte C.

- Esta foi a etapa do teste do evento: $P_b(N, g) > P_{b0}$ em $\{D_2 \cup D_3\}$ e a violação da restrição $P_b(N, g) \leq P_{b0}$.

Caso de:

$$N_b = N_d : N^* = N_b, g^* = g \text{ ou } g - 1$$

$$N_b \prec N_d : N^* = N_b, g^* = g$$

$$N_b \prec N_d : N^* = N_d, g^* = g$$

$$(N, g) \in D_4 : N_{max} = N_{mid}$$

vai para a fase 1.

- Esta foi a etapa do teste do evento: achar a região factível D_4 .

Parte **B**:

$$min = N_{min}$$

$$max = N_{max}$$

while($max - min \succ 1$)

$$mid = (min + max) / 2$$

$$n = mid$$

for $g' \in [1, g]$

$$n = n + 1$$

Calcular $P_d(n, g')$ e $P_b(n, g')$ utilizando as fórmulas (3.5) e (3.6).

fim **for**

if($P_b(n, g) \prec P_{b0}$)

$$max = mid$$

else $min = mid$

fim **while**

$$N_b = max + g$$

A Part **C** basicamente tem a mesma estrutura da Parte **B** exceto que:

1. O loop **for** corre até $g - 1$ e não g ;
2. O cálculo dentro do loop **for** é substituído pelos cálculos de $P_d(n, g - 1)$;

3. A condição if é $(P_d(n, g - 1) \prec P_{d0})$;
4. A última declaração é $N_d = \max + g - 1$.

Para este caso, as simulações numéricas foram feitas para $A = 22.827$ Erlangs, $\mu_1 + \mu_2 = 1$ e $\alpha = 0.5$.

A tabela 5.2 apresenta os resultados do atual problema de otimização para vários pares de valores de P_{d0} e de P_{b0}

Tabela 5.2: Valores ótimos de N^* para diferentes pares de valores de P_{d0} e de P_{b0}

P_{d0}	P_{b0}	N^*	g^*	$P_d(N^*, g^*)$	$P_b(N^*, g^*)$
10^{-3}	10^{-2}	32	2	0.00067144	0.0065879
10^{-4}	10^{-3}	36	2	0.00007511	0.0009321
10^{-5}	10^{-4}	42	2	0.000006553	0.0000921

5.4 Análise dos Resultados

Observa-se para os resultados dos cálculos do número ótimo de canais de guarda para as chamadas de *handoff* g^* (Tabela 5.1), uma clara interpretação da propriedade de monotonia das expressões 5.4 e 5.5. Com o crescimento do número de canais de guarda, a probabilidade de queda de chamadas de *handoff* cai, e a probabilidade de bloqueio de novas chamadas cresce.

É interessante notar que $\alpha \times A = A_1$, onde A_1 é o tráfego de *handoff* na célula, A é o tráfego total na célula e α é a característica da célula. Isto quer dizer que se pode determinar o número de canais de guarda para chamadas de *handoff*, ou o número de canais para as novas chamadas, conforme o período do dia, uma vez que o parâmetro α depende do tempo.

5.5 Conclusões

Nesse capítulo, apresentou-se o uso de modelos estocásticos para o processo de *handoff* (Haring et al., 2001).

Foram apresentadas fórmulas recursivas rápidas para cálculo da probabilidade de bloqueio de novas chamadas e para o cálculo da probabilidade de queda de chamadas do *handoff* (Haring et al., 2001).

Foram apresentados os algoritmos para a resolução dos problemas de otimização com os quais foram determinados o número ótimo de canais de guarda para chamadas de *handoff* e o número ótimo de canais para as novas chamadas.

Foram feitas análises dos resultados obtidos da otimização desses cálculos. Com essa análise concluiu-se que os resultados obtidos satisfazem os objetivos dos algoritmos de otimização.

Capítulo 6

Conclusões

O modelo comercial do GSM está em mudança. A competição por busca de mais usuários é mais intensa. Os usuários têm atualmente mais opções de escolha de rede de prestação de serviços.

Para atrair, manter e conduzir o usuário para serviços mais valorizados tais como serviços de dados, os operadores das redes devem oferecer serviços de alta qualidade. A alta qualidade só pode ser alcançada através de uma otimização rápida e precisa. Para tal, os operadores devem ter:

- Uma utilização eficiente do espectro para atender a demanda por capacidade;
- Uma alocação ótima de frequências para garantir boa qualidade de chamadas;
- Uma topologia de vizinhança precisa para garantir fácil *handoff* e boa distribuição de chamadas.

Essas premissas são a grande motivação para a atenção que se dedica aos estudos da otimização da operação de redes celulares GSM.

Neste trabalho buscou-se enfocar os seguintes aspectos da otimização da rede:

- Uso de salto de frequências para minimização da interferência cumulativa;
- Determinação do número ótimo de canais de guarda e do número total ótimo de canais para atender os requisitos de probabilidade de queda de chamadas.

6.1 Otimização do Salto de Frequências

Dados que muitos métodos aplicados ao problema de uso eficiente do espectro têm se revelado ineficientes em redes congestionadas, torna-se muito interessante a busca de novas alternativas de otimização do salto de frequências.

No capítulo 4 foi apresentado um algoritmo heurístico que tenta otimizar o salto de frequências.

Um melhor teste para este algoritmo seria possível com dados de uma rede real, ao invés de se usar uma matriz gaussiana normal.

Na minimização da interferência cumulativa máxima nota-se a redução do nível de interferência no TRXs da rede. Esta redução é observada quando se compara o FH cíclico com FH aleatório.

Os autores (Bourjolly and Touhami, 2000) projetaram este algoritmo com a perspectiva de uma sincronização permanente, tal que os TRXs de rede entrariam em saltos de frequências ao mesmo tempo e continuariam em saltos mesmo sem estarem envolvidos em alguma comunicação. Acredita-se que isto será possível na terceira geração de telefonia celular.

O momento mais interessante desse algoritmo é a planificação de canais com o menor nível de interferências para cada MS. Na figura 4.3 são mostrados os índices de todos os canais da rede que apresentam os maiores níveis de interferências em um certo horizonte de tempo.

Partindo de princípio que as interferências podem ser o fator limitador para o desenvolvimento da rede, pode-se afirmar que, com este algoritmo, além de melhorar a qualidade, também se pode aprimorar a capacidade do sistema.

6.2 Otimização do Cálculo de Canais

Para um bom dimensionamento da rede de forma a garantir com sucesso o *handoff*, é muito importante a otimização dos cálculos das seguintes medidas de desempenho da rede:

- Probabilidade de bloqueio de novas chamadas;
- Probabilidade de queda de chamadas de *handoff*.

Com esse objetivo, (Haring et al., 2001) introduziram as expressões de perda a partir do Erlang B. Com essas expressões recursivas é realmente possível o cálculo dos números ótimos tanto de canais de guarda para as chamadas de *handoff*, como de canais para as novas chamadas.

α é um parâmetro da célula que depende do tempo. Isto quer dizer que se pode determinar o número de canais a serem alocados à célula para um dado período do dia, ou seja, se pode determinar a qualidade de serviço na célula em conformidade com certo invento num certo período do dia.

Embora essas vantagens oferecidas por esta estratégia de priorização, segundo os autores (Zeng and Chlontac, 1999) a questão de se considerar uma célula e o processo de Poisson nos estudos de novas chamadas e chamadas de *handoff*, é questionável. O tempo de residência da chamada na célula influencia no tráfego de chamadas de *handoff* e este tempo não segue a da distribuição de Poisson. Por outro lado, dado que o fenômeno de bloqueio em células vizinhas, faz o *handoff* não Poisson. Por isso, os mesmo autores fazem a observação de não ser possível o uso deste modelo de otimização nas futuras redes da terceira geração.

6.3 Sugestões para Trabalhos Futuros

Por insuficiência de tempo, algumas questões levantadas ao longo deste trabalho ficaram por ser estudadas:

- Tornar possível que o número N-pass do algoritmo (fase I) da otimização do salto de frequências varie entre as células.

Pensando no desenvolvimento desse algoritmo, é proposto como trabalho futuro o estudo desse caso com o uso de um algoritmo genético que, é uma ferramenta natural para a resolução de problemas cuja(s) função (funções) tem uma estrutura não conhecida.

Por outro lado, a adequabilidade do algoritmo genético para a resolução deste problema é fato de o algoritmo trabalhar com populações de soluções candidatas, no lugar de trabalhar com uma única solução candidata (como seria o caso dos outros algoritmos usuais de otimização), eles são capazes de explorarem as propriedades de grupo das estimativas do conjunto Pareto-ótimo (conjunto de soluções ótimas).

- O estudo de outro método de cálculo da qualidade de serviço na te-

lefoneia celular que tome em consideração a distribuição do tempo de residência da chamada na célula.

Bibliography

- Actix (2004). Newsactix'provides spacetel yemen with 90% increase in gsm optimization efficiency. <http://www.actix.com/news/179005.htm>.
- Allen, S.M.Smith, D. (2002). Generation of lower bounds for minimum span frequency assignment. *Discrete Applied Mathematics*.
- Avenali, A.Mannino, C. (2002). Minimizing the span of walks to compute optimum frequency assignments. *Mathematical Programming*.
- Bourjolly, J.-M. and Touhami, S. (2000). Optimizing frequency hopping in gsm cellular pfone network. *INFORMS Telecommunications Conference*.
- D.Hong, S. (1986). Traffic model and performance analysis for celular mobile radio telephone with prioritized and non-prioritized handoff process. *IEEE Trans. on Vehi. Tech.*, 35:77–92.
- Ericsson (1998). *GSM System Survey*. Ericsson Radio Systems AB.
- Fischetti, M.Lepschy, C. G.-J. G. (2000). Frequency assignment in mobile radio systems using branch-and-cut techniques. *European Journal of Operational Research*.
- Gerke, S. (2002). Channel assignment with large demands. *Annals of Operations Research*.
- GSM (1999). *Multiplexing and multiple access on the radio path*. ETSI.
- G.W.Tunncliffe, A. and A.R.Murch (2000). Performance improvement in gsm networks due to slow frequency hopping. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*.
- Haring, G., Marie, R., and Puigjaner, R. (2001). Loss formulas and their application to optimization for cellular networks. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 50(3):100–124.

- Heuvel, J. (2002). Using laplacian eigenvalues and eigenvectors in the analysis of frequency assignment problems. *Annals of Operations Research*.
- H.R.Sun, Y. C. and Trivedi, K. (1999). Availability and performance evaluation for automatic protecting in tdma wireless system. *Pacific Rm International Symposium on Dependable Computing. Hong Kong (PRDC99)*, pages 15–22.
- Hurley, S. Whitaker, R. M. (2002). Channel loading in private mobile radio networks. *Annals of Operations Research*.
- Imensis (2005). Censo de população 1999. *www.imensis.co.mz*.
- James j.Han, Y. M. and K.S.Trivedi (2000). Channel allocation with recovery strategy in wireless networks. *European Transaction on Telecommunications (ETT)*, pages 26–30.
- Jaumard, B.Marcotte, O. C. (2002). Comparison of column generation models for channel assignment in cellular networks. *Discrete Applied Mathematics*.
- Katzela, I. and Naghshineh, M. (1996). Channel assignment schemes for cellular mobile telecommunication system. *IEEE Personal communications*, 3:10–31.
- K.Ivanov, N.Matzener, G. H.-P. (1996). Frequency hopping-spectral capacity enhancement of cellular networks. *IEEE Fourth international Symposium on Spread Spectrum Techniques and applications (ISSSTA '96)*, pages 1267–1272.
- Kostic, Z. and Maric, I. (1999). Dynamic frequency hopping in wireless cellular systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*.
- Lee, C. and Steele, R. (1995). Signal-to-interference calculations for modern tdma cellular communication systems. *IEEE Proc.- Commun.*, 142.
- Leon-Garcia, A. (1989). *Probability and Random Processes for Electrical Engineering*. Addison-Wesley Publishing Company.
- Mann, P. (2004). Timing synchronization for 3g wireless. *EE Times*.
- Mathar R., S. M. (2000). Optimal base stations positioning and channel assignment for 3g mobile networks by integer programming. *Tech rep., RWTH, Aachen Germany*.

- Matsui, S. (2000). A new genetic algorithm for minimum span frequency assignment using permutation and clique. *In Proc. of GECCO-2000 (Genetic and Evolutionary Computation Conference)*.
- Motorola (2004). Motorola optimizes bpl india multi-vendor gsm network providing increased capacity and coverage. <http://www.motorola.com/content/1,3306,2385,00.html>.
- Rappaport, T. S. (2002). *Wireless Communications – Principles and Practice*. Prentice-Hall.
- Schema (2004). Schema introduces innovative gsm network optimization solution. <http://www.nettest.com/GSM-GPRS-UMTS,Network,Troubleshooting,Optimization>.
- Scourias, J. (2002). Overview of the global system for mobile communications. jscouria@www.shoshin.uwaterloo.ca.
- Sidi, M. and Starobinski, D. (1997). New call blocking vs handoff blocking in cellular networks. *ACM Journal of Wireless Networks*, 3:17–21.
- Smith, D.H.Taplin, R. (2002). Frequency assignment with complex co-site constraints. *IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility*.
- Smith, Hurley, S. (2000). A new lower bound for the channel assignment problem. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*.
- S.V.Maric (1995). construction of optimal frequency hopping sequences for minimising bit errors in selective fading channels characteristic to digital cellular systems. *IEEE Proc.- Commun.*, 142.
- Tekinay, S. and Jabbari, B. (1992). A measurement-based prioritization for handovers in mobile cellular networks. *IEE Journal on Selected Areas in communications*, 8:1343–1350.
- Y.B.Lin, S.Mohan, A. (1994). Queueing priority assignment strategies for pcs handoff. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 43:704–712.
- Yeu Ma, J. J. H. and Trivedi, K. (1999). A channel recovery method in tdma wireless systems. *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC'99-Fall), Amsterdam, Netherlands The Netherlands*, pages 1750–1754.
- Zeng, H. and Chlantac, I. (1999). Handoff traffic distribution in cellular

networks. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 1:413–417.