

Um modelo matemático para o problema de localização das estações rádio base

Autor: Leonardo Mendes de Souza

Orientador: Gustavo Menezes

Banca: Luis Augusto Mattos Mendes e Wender Magno Cota

Departamento de Ciência da Computação (DCC) - Universidade Presidente Antônio Carlos (Unipac) – Barbacena – MG - Brasil

leomendesbj@gmail.com

Resumo. Este artigo apresenta um estudo sobre comunicação móvel utilizando a tecnologia celular e um modelo matemático para que se possa descobrir a melhor maneira de se distribuir as estações rádio base de modo que pelo menos uma estação atenda a um ponto da região com um sinal, ao nível mínimo estipulado pelo usuário, que permita uma comunicação de qualidade.

1. Introdução

A revolução da computação começa com os grandes centros de processamento da década de 60, o surgimento dos terminais na década de 70, as redes de computadores na década de 80 e a computação móvel no século XXI.

A computação móvel pode ser vista como uma área da comunicação sem fio. A comunicação sem fio tem sido usada muito antes das redes celulares, com emissões via rádio AM e FM, comunicações navais, televisão, sistema de comunicação bidirecionais entre veículos (1930) e o *paging* que existe desde a segunda guerra mundial.

O primeiro sistema de comunicação foi o telégrafo (código morse), em meados do século XIX. Já no final do século XIX surge a radiotelegrafia e em 1901 o oceano Atlântico era atravessado por ondas de rádio.

Um segundo sistema foi o telefone e no início do século XX os setores comerciais dos E.U.A. eram conectados através de fios de cobre.

Os computadores surgem como uma terceira geração dos sistemas de comunicação usando uma tecnologia digital, assim como a comutação telefônica.

Os serviços móveis classificam-se de acordo com [1] como:

- Serviços de Rádio-Móvel Comercial (Serviços Tel-Rádio Celular)
- Serviços de Rádio Fixo Público e Doméstico
- Serviços Móveis Públicos
- Serviços de Comunicação Pessoal (PCS)

- Serviços de Rádio Móvel Terrestre e Privado (PMR)
- Serviços de Microondas Fixo Operacional e Privado
- Serviços de Rádio Pessoal

Os serviços de Rádio Móvel Comercial cobrem os atuais serviços de telefonia celular. Consiste em dividir uma área em sub-áreas chamadas de células e alocação de frequências para cada célula, considerando aspectos de interferências como o relevo, por exemplo.

Sistema de Comunicação Pessoal (PCS) é similar aos atuais serviços celulares, porém utilizam células menores (microcélulas) para acomodar uma unidade móvel que se movimenta lentamente e tem um custo mais baixo.

A área de Comunicação Móvel pode ser considerada uma especialização de serviços celulares, entre elas a Computação Móvel, explorando principalmente a tecnologia digital.

Os sistemas móveis apresentam algumas vantagens como mobilidade do usuário, acesso direto à informação ou serviços e independência de cabeamento, reduzindo os custos e o tempo de instalação e maximizando a disponibilização dos serviços. Eles também apresentam desvantagens como o espectro de frequência limitado, segurança e privacidade muito delicadas e energia disponível em cada unidade móvel limitada.

Este artigo visa um estudo sobre comunicação móvel utilizando a tecnologia celular e um modelo matemático para que se possa descobrir a melhor maneira de distribuir as estações rádio base de modo que elas cubram toda uma área de transmissão com o menor número de estações possível que permita uma comunicação de qualidade.

No restante do artigo encontra-se na sessão 2 Conceitos básicos, na sessão 3 Sistemas Celulares, na sessão 4 Problemas do Sistema Móvel, a sessão 5 apresenta o Problema de Localização de Estações Rádio Base e um Modelo Matemático para resolver este problema, a sessão 6 a Complexidade do Modelo apresentado, na sessão 7 temos a conclusão e na sessão 8 as referências bibliográficas.

2. Conceitos básicos

Os sistemas móveis de comunicação se baseiam, em sua maioria, na transmissão via rádio, ou na emissão de ondas de rádio ou sinais. Essa onda no sistema telefônico corresponde à fala ou aos níveis de pressão de ar produzidos, que são transformados em ondas elétricas. Matematicamente, trata-se de uma onda senoidal (sinal analógico) ou com sinais discretos, 0 ou 1, no caso digital.

Uma onda tem três características básicas que são a amplitude, a frequência e a fase. Um sinal de voz vem a ser uma onda elétrica com diversas frequências. A seqüência de frequências geram os sons relativos a voz que são transmitidos via rádio ou sistemas com fio.

O comprimento da onda é maior em baixas frequências. O intervalo entre duas frequências define uma banda e a diferença entre a maior e a menor frequência caracteriza a largura da banda. A capacidade de um canal (*bit/s*) depende, em parte, da largura da banda.

Cada provedor pode variar a frequência, amplitude ou fase, sendo a modulação o processo de variação de um desses atributos. A modulação em amplitude (AM) e a modulação em frequência (FM) são as mais conhecidas. AM é mais sensível ao ruído e requer 8 KHz de banda, já a FM 10 KHz é bem menos sensível aos ruídos.

Segundo [1] existem técnicas de multiplexação (agregação de várias informações para acelerar a transmissão) para a comunicação com e sem fio. Entre elas a FDM (Multiplexação por divisão de frequência) e TDM (Multiplexação por divisão de tempo). As técnicas FDM e TDM dividem a largura de banda em canais disponibilizados aos usuários do sistema. Elas são básicas para os métodos FDMA (Acesso a FDM), TDMA (Acesso a TDM) e CDMA (Acesso a CDM (Multiplexação por Divisão de Código)).

A primeira geração de sistemas celulares analógicos se baseia no FDMA, onde cada canal ocupa uma banda de 30 KHz. A largura de banda total é de 25 Mhz para a faixa A (Banda A – 824 a 849) e 25 Mhz para a faixa B (Banda B – 869 A 894).

A segunda geração de sistemas celulares se baseia no TDMA, onde o sinal de voz é digitalizado, armazenado em um *buffer* na estação e, então, transmitido pela alocação aos *slots* de tempo, com intervalos distintos para transmissão e recepção.

A arquitetura CDMA disponibiliza toda largura de banda para todos os usuários e cada conexão estação-usuário recebe um código específico e o mais aleatório ou ortogonal aos demais.

Célula é uma área geográfica coberta por um transmissor de baixa potência, uma ERB (Estação Rádio Base) e por conveniência é representada por um hexágono. Alguns pontos podem ser cobertos por mais de uma célula (*overlapping* de células).

ERB é uma ou mais antenas fixas, instaladas em torres, que têm como objetivo atender a demanda originada pelas estações ou unidades móveis, ou usuários, dentro de sua área de cobertura.

A unidade móvel é o equipamento utilizado pelo usuário do sistema móvel celular (SMC).

Com o reduzido espectro de frequência e o aumento de usuários as células tendem a diminuir de tamanho. A conexão entre a ERB e uma unidade móvel é feita através de um canal disponível. Cada ERB está conectada por uma linha física dedicada a CCC (Central de Comutação e Controle)[1], que por sua vez, também está conectada à rede pública de telefonia (RPT).

A CCC é responsável pela interligação e controle de várias ERBs, pela monitoração de chamadas e *handoff* (processo de migração de uma ERB para outra à medida que o usuário se desloca). O deslocamento de longa distância, com mudança de área metropolitana, exige também o redirecionamento de chamadas de via *roaming*.

As ERBs sofrem dois tipos importantes de interferências:

- Co-canal – devido ao uso da mesma frequência por células diferentes. O nível da interferência é a razão entre a potência do canal transmitido pela soma das potências dos canais de mesma frequência de células vizinhas.
- Adjacente – interferência de canais adjacentes em uma mesma ERB ou célula.

Para tentar solucionar a escassez de banda de frequência existe um mecanismo de reuso, onde o fator de reuso multiplica o número de canais e também indica a quantas células de distância de uma determinada estação os canais desta poderão ser reutilizados. O reuso da frequência depende da potência do sinal, frequências usadas, relevo, ambiente, tipo e altura das antenas e considerando a topologia hexagonal esse fator é sete (a célula e suas seis vizinhas), podendo ser repetida nas vizinhas de suas vizinhas, conforme as fórmulas abaixo[1]:

$$D = R\sqrt{3N} \quad q = D/R \quad , \text{ onde}$$

D = distância de reuso entre duas ERBs que transmitem em canais de mesma frequência

R = raio da célula

N = fator de reuso

q = fator de redução da interferência co-canal

Os sinais transmitidos pelas ERBs sofrem interferências de obstáculos e também outras interferências como o sinal se espalhar por vários caminhos e na forma de vários sinais, gerando atrasos na recepção. A soma desses sinais podem causar atenuação ou elevação do sinal e por isso o sinal do destino é um valor médio da potência, e as possíveis variações caracterizam o desvanecimento, que pode ser lento, de longo prazo ou rápido, de curto prazo.

Para tentar manter a qualidade do serviço torna-se necessário controlar o desvanecimento com métodos de diversidade espacial, de frequência, de tempo, de polarização e de ângulo.

3. Sistemas Celulares

Surgiram no final da década de 70 e o primeiro grupo que representa a primeira geração é o AMPS (*Advanced Mobile Phone System*), que predomina no mercado americano e no Brasil, entre outros. No final da década de 80 surgem aparelhos celulares portáteis com bateria de maior duração e aplicações diversas.

A segunda geração se baseia no TDMA que pode ser usado para sistemas móveis e sem fio e de acordo com [1] e [2] o GSM (*Global System For Mobile Communications*) é tido como sendo de segunda geração e outros como [6] classificam o GSM como sendo de terceira geração.

Os sistemas celulares têm evoluído rapidamente sempre buscando o atendimento de um maior número de usuários e melhor capacidade de transmissão e com isso surge a terceira geração de sistemas, com grandes investimentos em pesquisas, projeto e instalação. Essa geração terá que se preocupar com a transmissão de dados e voz simultaneamente.

Os principais sistemas celulares do mercado são o AMPS, D-AMPS, GSM e CDMA. São vários os parâmetros que servem para compará-los, tais como, número máximo de canais, fator de reuso, número de usuários por canal, eficiência espectral (medida pelo número máximo de canais por célula por Mhz), interferência, segurança e processamento de *handoff*. Mais informações sobre os principais sistemas do mercado podem ser encontradas em [2].

4. Problemas do Sistema Móvel

Os principais problemas relacionados com a infra-estrutura são a localização de Estações e de Unidades Móveis, a Propagação de Sinais e a Alocação de Freqüências.

Já dentre fatores relacionados com o projeto de *software* e *hardware* para computação móvel pode-se citar a mobilidade, variações nas condições de comunicação e gerenciamento de energia.

Como a localização de um elemento móvel muda constantemente problemas podem surgir, tais como: a carga na estação base (muitas unidades na mesma célula), a largura de banda disponível, interceptação de mensagens e além o rastreamento das unidades móveis.

5. Localização de ERB

O problema de localização de ERB consiste em selecionar, dentro de um conjunto de locais candidatos à instalação de uma ERB, o subconjunto de mínimo custo e sujeito a cobertura na área de estudo, atendimento da demanda e uma exploração eficiente do espectro de freqüências. Quanto menos ERBs instaladas menos será o custo, mas o atendimento da demanda e a qualidade do serviço podem ser comprometidos. Ainda há o problema de *network design*, caracterizado pelo fato de que cada ERB deve ser concentrada em uma Central de Comutação e Controle (CCC) [1].

A concentração da demanda em grandes centros urbanos e o reduzido espectro de freqüência disponível provocam o uso de ERBs de menor abrangência, mais simples e em maior número.

A cobertura total é quando se tem pelo menos uma ERB em condições de permitir a conservação ou transmissão de dados. Esta opção reduz o número de estações, aumenta a área de cobertura de cada ERB, reduz o aproveitamento espectral e disponibiliza um menor número de canais por usuário.

O máximo aproveitamento espectral visa solucionar as deficiências do problema anterior, limitando a área de cobertura de cada ERB.

Para maximizar o número de canais disponíveis por usuário ou o máximo aproveitamento espectral busca-se selecionar os locais e determinar a potência de transmissão e canais alocados à cada ERB.

5.1. Modelo de Localização de ERB

Seja uma região representada por um conjunto de M pequenas quadrículas, com dimensões de 50x50 metros até 500x500 metros. Seja N, o conjunto de ERBs candidatas distribuídas

nessa região. Assume-se conhecida alguma medida de sinal percebido em cada ponto (quadrícula) e originários de cada ERB. Esta medida pode ser a perda do sinal ou a potência em cada ponto, por exemplo:

Segundo [1] para formular o problema de localização como um problema de programação inteira são definidos os seguintes conjunto de variáveis:

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{se a ERB } i \in N \text{ é localizada;} \\ 0, & \text{caso contrário;} \end{cases}$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o ponto } j \in M \text{ da região é coberto pela ERB } i \in N; \\ 0, & \text{caso contrário;} \end{cases}$$

Um modelo M1 é dado por:

$$\min \sum_{i \in N} c_i y_i \quad (5.1)$$

sujeito a:

$$\sum_{i \in N} a_{ij} x_{ij} \geq T \quad \forall j \in M \quad (5.2)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in M \quad (5.3)$$

$$x_{ij} \leq y_i \quad \forall i \in N, \forall j \in M \quad (5.4)$$

$$y_i, x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N, \forall j \in M \quad (5.5)$$

onde:

c_i custo fixo de instalação de uma ERB

T valor limite para a medida do sinal capaz de viabilizar a comunicação

a_{ij} estimativa do sinal da ERB i no ponto j ;

A função objetiva minimiza o custo fixo de instalação das ERBs. A restrição (5.2) garante que pelo menos uma ERB atenda a qualidade do sinal ao nível mínimo estipulado. As restrições (5.3) associam a cada ponto da área em estudo uma ERB, mas isso só é viável se a ERB correspondente for instalada, conforme equações (5.4). A integridade das variáveis é imposta pelas restrições (5.5).

O valor de T deve ser especificado pelo usuário (- 105dB no caso de perda do sinal, por exemplo).

O modelo M1 é NP-Completo e com um elevado número de variáveis inteiras ($n+n*m$), onde m é o número de quadrículas.

O modelo M1 pode sofrer algumas modificações para procurar reduzir a complexidade e torná-lo mais simples. Entretanto, mesmo com as modificações o problema permanece NP-Completo, como pode ser visto em [1].

No modelo apresentado e também em suas variações não se pode garantir que a ERB que deveria servir a um determinado ponto, em uma situação real, e a ERB que atende a um ponto na solução do modelo são iguais porque uma vez que o modelo simula os sinais das ERBs a um mesmo valor de limite pode haver uma situação onde um ponto atribuído a uma ERB é mais bem atendido (no sentido de haver um sinal de melhor qualidade) por outra.

Em [1] e [3] encontram-se outros modelos matemáticos que resolvem o problema de localização.

6. Complexidade

O modelo acima é NP-Completo, pois pode ser reduzido ao problema de localização de facilidades. Além disso, em [1] foi feito um estudo de caso com variações do modelo M1 em um pacote de otimização chamado CPLEX. Este apresenta algumas limitações quanto ao número de restrições (32000), que é diretamente proporcional aos números de pontos da região.

Para se determinar a qualidade do sinal de cada ERB candidata em cada ponto da área de trabalho foi usado um sistema gráfico de predição de propagação de sinal Arcomov/X. Este sistema, de propriedade da Telemig e desenvolvido entre o DCC/UFMG e a Telemig, cria uma matriz de perdas dos sinais em cada ponto da área de trabalho (quadrículas de 250m x 250m) e a partir dessas matrizes foram selecionados os pontos que satisfaziam o valor limite T para a qualidade de comunicação, nesse caso aqueles com uma perda menor que -105 dB. Esses dados foram usados para gerar o arquivo de entrada do CPLEX. Mais informações sobre o Arcomov/X podem ser encontradas em [4].

Os testes foram feitos com os dados de duas cidades de Minas Gerais: Juiz de Fora (JF) que na época tinha aproximadamente 1 milhão de habitantes e Belo Horizonte (BH) com aproximadamente 2,5 milhões de habitantes, na época.

Na prática o método de escolha de localização de ERBs envolve três passos:

Primeiro as ERBs candidatas são criadas no Arcomov/X. Parâmetros como altura, potência de transmissão e localização física das estações candidatas são definidas nesta etapa.

No passo dois é feita uma composição dos sinais das diversas ERBs candidatas ainda no Arcomov/X. Esta composição atribui a cada ponto da área de trabalho a ERB de melhor sinal. Nessa etapa foi utilizado o modelo apresentado e também suas variações.

No terceiro passo as ERBs selecionadas na etapa de composição são submetidas a um algoritmo de alocação de canais, porém para os testes relatados considera-se apenas à fase inicial do processo, ou seja, à massa de dados gerado pelo Arcomov/X.

Para JF foram usadas 10 ERBs candidatas para 15584 pontos (tal número de pontos corresponde a área total) e os resultados obtidos correspondem a solução implementada na prática, que é de 2 ERBs para a área urbana de JF.

Para BH foram utilizadas 71 ERBs candidatas para 8556 pontos e a solução encontrada gastou 5 ERBs a menos que a solução existente, ou seja, 21 ERBs dadas pelo modelo enquanto são usadas 26 ERBs. No entanto, deve ser considerado a não aplicação da terceira parte do processo de decisão, alocação de canais as ERBs selecionadas, que garantiria a viabilidade da solução encontrada.

7. Conclusão

Devido às vantagens oferecidas pela comunicação móvel, tais como mobilidade do usuário, independência de cabeamento e redução de custos e tempo de instalação, esta área tende a crescer bastante e com grandes investimentos em pesquisas.

Sendo a maioria dos sistemas móveis baseados na emissão de ondas de rádio, sendo para isto, necessário a utilização de estação rádio base, é de grande utilidade conhecer modelos matemáticos para melhor localizar as estações de modo a reduzir os custos com os serviços prestados e também melhorar a qualidade dos serviços.

Com a tecnologia de *hardware* e *software* crescendo cada vez mais, com *hardwares* mais potentes e *softwares* melhores fica mais fácil a implementação desses modelos em pacotes de otimização como o GLPK (*Gnu Linear Programming Kit*) e como o problema é de difícil solução podem ser explorados métodos heurísticos tais como: Algoritmos Genéticos[5], Busca Tabu, entre outros.

8. Referências

- [1] Mateus, Geraldo Robson; Loureiro, Antônio A.F, Introdução à Computação Móvel, Ed. 11ª Escola de Computação; 1998.
- [2] Filho, André Luiz P.C.; Pinto, Márcio Belmonte C., "A Telefonía Celular" (2005) <http://www.cientefico.frb.br/Imprensa/Info/I.6.Filho,ALPC.TELEFONIACELULAR.pdf>, novembro.
- [3] Goldbarg, Marco C.; Luna, Henrique P. L., Otimização Combinatória e Programação Linear Modelos e Algoritmos, Ed. Campus; 1999.
- [4] V.M. Menezes, W.P. Paula Filho, and A.A. Oliveira. A CAD system for telecommunications engennering in a GIS environment. *Computers & Graphics*, 20(3):405-411, 1996.
- [5] Miranda, Márcio Nunes de, "Algoritmos Genéticos: Fundamentos e Aplicações" (2005) <http://www.gta.ufrj.br/~marcio/genetic.html>, novembro.
- [6] Taurion, Cezar. Internet Móvel: Tecnologias, Aplicações e Modelos.Rio de Janeiro, Ed.Campus; 2002.