

Framework para Avaliação do Sincronismo em Aplicações de TV Digital Móvel

Roberto Mitsuake Hirayama, Regina Melo Silveira

Laboratório de Arquitetura e Redes de Computadores (LARC)
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP)
Av. Prof. Luciano Gualberto, trav. 3, no. 158
05508-900 – São Paulo – SP – Brasil

mitsuake@uol.com.br, regina@larc.usp.br

***Abstract.** This paper discusses the synchronism of media in the context of digital TV applications with mobile reception. It is presented a framework that can help evaluating the impacts of QoS parameters (delay, jitter, packet loss, etc) for content distribution networks based on packet transmission, in the overall quality of the exhibition of media for end users.*

***Resumo.** Esse artigo discute o sincronismo de mídias no contexto das aplicações de TV digital com recepção móvel. É apresentado um framework que tem o intuito de auxiliar na avaliação dos impactos de parâmetros de QoS (atraso, variação de atraso, perda de pacotes, etc) das redes de distribuição de conteúdo baseadas na transmissão de pacotes, na qualidade de exibição de mídias para usuários finais.*

1 Introdução

As aplicações de TV digital geralmente utilizam redes de distribuição de conteúdo para enviar sinais de vídeo e áudio às antenas transmissoras de uma emissora. Esse transporte é feito através de redes de pacotes que podem adicionar atrasos e variações de atraso às informações prejudicando o sincronismo e conseqüentemente a apresentação das mídias.

Para aplicações móveis de TV digital, devido a sua configuração (discutida na seção 2), essas redes de distribuição são complexas e por isso mecanismos para mitigar os efeitos dessas perturbações no sincronismo devem estar presentes.

Nesse artigo serão analisados os mecanismos de sincronismo para aplicações de TV digital com recepção móvel com o intuito de investigar a influência do sincronismo na qualidade da apresentação de mídias em terminais móveis de TV Digital. Além disso, será proposto um framework para o estudo da influência das perturbações causadas pelas redes de dados no sincronismo de programas MPEG-2 e na apresentação de mídias aos usuários com o intuito de simular as condições reais de uma rede de distribuição de conteúdo empacotados em fluxos de transporte MPEG-2.

O artigo está estruturado da seguinte forma: a seção 2 expõe um panorama das aplicações de TV digital com recepção móvel, a seção 3 analisa os procedimentos para

multiplexação e sincronismo de mídias em fluxos de transporte MPEG-2, a seção 4 apresenta alguns algoritmos de resincronismo, na seção 5 é introduzido o framework para testes e avaliação de sincronismo e na seção 6 concluímos e apontamos os trabalhos futuros.

2 Panorama da Radiodifusão de Sinais de TV Digital para Recepção Móvel

Alguns aspectos da infra-estrutura para a radiodifusão de sinais de TV digital para recepção por terminais móveis são fundamentais. A geração do conteúdo, seu transporte até o modulador / transmissor, a modulação do conteúdo em sinais de TV Digital e sua efetiva transmissão, devem ser levados em consideração quando são projetadas aplicações móveis de TV digital, principalmente em redes que cobrem regiões metropolitanas.

Cada um dos padrões existentes de TV digital terrestre, DVB-T (Digital Vídeo Broadcasting – Terrestrial) [30], ATSC (Advanced Television Systems Committee) [34] e ISDB-T (Integrated Services Digital Broadcasting – Terrestrial) [33] aborda a recepção móvel de uma forma diferente, principalmente na modulação. Uma análise dos principais métodos de modulação para TV Digital, COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing) [1] e 8-VSB (8-Vestigial Side Band) [20, 21], indica que a garantia de uma qualidade satisfatória do vídeo na recepção móvel, depende da modulação utilizada, a qual deve ser robusta, em consequência dos efeitos de ruídos, distorção por múltiplos caminhos, atenuação, etc [2, 6]. Por isso, a eficiência espectral para a transmissão dos sinais de TV Digital Móvel, se comparada à recepção fixa, é menor e consequentemente a banda disponível por canal também será.

Estudos na literatura [3] indicam que a recepção móvel no DVB-T, que utiliza o esquema de modulação COFDM, tem melhor desempenho com a modulação QPSK. Por outro lado, a recepção fixa pode utilizar outras modulações como o 16QAM ou 64QAM, o que determina taxas de bits maiores para a recepção móvel. Na tabela 1, são apresentadas taxas de bits obtidas em testes com o padrão DVB-T com o esquema de modulação COFDM utilizando parâmetros e esquemas de modulação diferentes [3]. Os resultados são apresentados na tabela 1 para ilustrar como a taxa de bits é afetada pela modulação.

Tabela 1 – Taxas de bits para dois esquemas de modulação do COFDM para canal de 8MHz.

Tipo de Modulação	FFT	Taxa	Intervalo de Guarda	Taxa de bits (Mbps)
QPSK	2k	1/2	1/32	6,03
64QAM	8k	2/3	1/32	24,13

Os parâmetros FFT (Fast Fourier Transform), Taxa e Intervalo de Guarda referem-se ao esquema de modulação COFDM e são melhor descritos em [1].

Outro aspecto importante é abordado em [2], onde é mostrado que a máxima separação das antenas de dois transmissores adjacentes para o esquema de modulação

COFDM com FFT de 2k e intervalo de guarda 1/32, ou seja, as características adequadas para a recepção móvel, são de dois quilômetros. Portanto, para a radiodifusão de sinais de TV digital com recepção móvel devem ser instalados vários transmissores para cobrir a área de uma grande região metropolitana.

Torna-se necessário, assim, implementar uma rede de transmissores para cobrir uma cidade de médio ou grande porte. De forma análoga a uma rede celular, as antenas transmissoras devem estar espaçadas de acordo com predições de cobertura, ou seja, considerando-se a potência do sinal, a atenuação, relação sinal-ruído, etc, definindo-se uma região de cobertura para cada célula e assim garantindo que a área desejada será atendida por pelo menos um transmissor.

A rede de transmissores para aplicações de TV digital, ao contrário das redes celulares, pode ter duas configurações: de frequência única (SFN – Single Frequency Network) ou de múltiplas frequências (MFN – Multiple Frequency Network) [2]. As redes MFN utilizam um conjunto de frequências que são reutilizadas de forma a evitar interferências co-canal entre células vizinhas. No caso de uma rede MFN para TV digital, cada antena transmissora utilizaria uma determinada frequência que não seria reutilizada pelos transmissores adjacentes, sendo reutilizada somente por células distantes. Uma rede SFN, por sua vez, utilizaria uma única frequência para todos os transmissores. Apesar da aparente simplificação devido a utilização de uma única frequência, as SFNs apresentam limitações de sincronismo bastante importantes [2], ou seja, todas as antenas transmissoras devem estar sincronizadas em termos de frequência, tempo e bits.

A rede de transmissores deve irradiar o sinal de TV digital para todos os terminais dentro da sua área de cobertura. Entretanto, a geração de conteúdo não é feita, na maioria das implementações, em cada transmissor e sim numa localidade centralizada e portanto faz-se necessário distribuir esse conteúdo para todas as antenas transmissoras espalhadas geograficamente pela região desejada. Denomina-se **rede primária de distribuição**, a infra-estrutura de transporte necessária para levar o conteúdo para as antenas transmissoras e **rede secundária de distribuição** a rede de transmissores propriamente dita, ambas mostradas na figura 1.

A **rede primária de distribuição** transporta geralmente o sinal de TV digital em banda base, onde vídeos e áudio são encapsulados na estrutura do MPEG-2 Transport Stream (MPEG-2 TS), descrito na seção 3. A geração de conteúdo de forma centralizada tem vantagens pois na **rede primária** podem ser incluídos ou retirados programas do MPEG-2 TS e a qualidade do sinal é preservada, pois a relação sinal-ruído se mantém praticamente inalterada na **rede primária**.

A **rede primária** introduz desafios para a implementação da TV digital, tanto para recepção móvel quanto para recepção fixa, pois se trata geralmente de uma rede de pacotes, onde questões como atraso, variação de atraso, sincronismo no receptor, etc, deverão ser examinadas para garantir uma qualidade satisfatória no terminal final.

podem ter tamanhos fixo ou variável, com tamanho variável o fluxo resultante é denominado Fluxo de Programa (PS – Program Stream) e tamanho fixo Fluxo de Transporte (TS – Transport Stream). Na tabela 2 são apresentadas as diferenças básicas entre o TS e o PS, sendo mais utilizado em aplicações de TV digital o fluxo de transporte.

Tabela 2 – Comparação entre os fluxos de transporte (TS) e programa (PS).

	Fluxo de Transporte (TS)	Fluxo de Programa (PS)
Tamanho de Pacotes	Fixo	Variável
Programas MPEG	Vários programas	Um único programa
Base de tempo	Pode ou não ter base de tempo comum	Possui uma única base de tempo
Aplicações	Transporte em meios de transmissão não confiáveis.	Armazenagem e recuperação de mídia de DVDs, CDs, etc.

Os fluxos elementares não podem ser enviados diretamente ao receptor. Eles devem ser encapsulados em pacotes PES (Packetized Elementary Stream), ou diretamente em pacotes TS. O PES é fundamental para que o receptor obtenha informações tais como: dados de sincronismo, indicadores de embaralhamento do campo de dados do pacote, copyright, etc [23, 29].

Uma vez preenchidos, os pacotes PES podem ser inseridos no campo de dados dos pacotes TS para transmissão ao receptor. O encapsulamento do PES no pacote TS pode ser feito de várias formas, por exemplo, a cada pacote TS inserimos um único pacote PES (caso o pacote PES tenha tamanho menor que 184 bytes) ou também dividir um pacote PES em vários pacotes TS.

3.2. Mecanismos de Sincronização do MPEG-2 System

Cada programa na TV digital tem sua base de tempo, comum a todos os fluxos elementares que o constituem. A decodificação e a apresentação das mídias segue uma temporização definida pelo transmissor que, por sua vez, tem como referência o relógio do sistema (STC – System Time Clock) sendo, portanto, muito importante garantir que o receptor reconstrua esse relógio corretamente utilizando as informações contidas nos pacotes dos fluxos multiplexados (PS ou TS) e mantendo o sincronismo em relação ao transmissor.

Por isso, a especificação do MPEG-2 System define um modelo de temporização, onde o atraso fim a fim do sinal de entrada no codificador até o sinal de saída no decodificador é constante para vídeos e áudio. Esse atraso é a soma dos tempos de codificação, buferização no codificador, multiplexação, transmissão ou armazenagem, demultiplexação, buferização no decodificador, decodificação e de apresentação. O modelo baseia-se num atraso fim a fim constante, apesar dos atrasos variáveis nos buffers do emissor e do receptor. O atraso na transmissão ou armazenagem é

considerado constante, entretanto, na prática alguma variação de atraso pode ocorrer e portanto deve ser compensada por algum mecanismo no receptor.

Na codificação dos fluxos multiplexados são incluídas informações de tempo que são utilizadas para implementar sistemas que possuem esse comportamento (atraso fim a fim constante). Todas as informações de temporização são definidas em relação a um relógio de sistema comum ao emissor e ao receptor. Alguns parâmetros utilizados no modelo são: as amostras do relógio do sistema, denominadas PCR (Program Clock Reference); e os tempos de apresentação e decodificação das mídias, PTS (Presentation Time Stamp) e DTS (Decoding Time Stamp), respectivamente.

Para assegurar atrasos fim a fim constantes, o modelo define também um relógio comum denominado STC gerado no emissor. A partir dele são criados os registros de tempo (time stamps) que indicam os instantes corretos para a decodificação e apresentação dos vídeos e áudio. No emissor são geradas amostras do STC em períodos regulares originando valores instantâneos do relógio, os PCRs.

Os PTSs, DTSs, PCRs devem ser devidamente especificados de forma que: vídeo e áudio sejam precisamente sincronizados na apresentação ao usuário, e os buffers no receptor não sofram transbordo (overflow). Para o receptor definir os atrasos corretos nos buffers de decodificação e de apresentação (PTS e DTS) e tornar o atraso do sistema como um todo constante, o relógio no receptor deve ser bastante próximo daquele no emissor. Por isso, o relógio é reconstruído no receptor através de amostras do relógio do emissor, ou seja, por meio dos PCRs.

Os PCRs são calculados através da amostragem do relógio do sistema e são enviados periodicamente dentro do fluxo de transporte. A distância entre dois pacotes contendo PCRs é controlada de forma que essas amostras sejam dispostas em intervalos constantes. Os pacotes com PCRs formam uma linha de tempo para todos os demais. Dessa forma, a partir dos PCRs é determinada a taxa de envio de fluxos elementares para o decodificador, ou em outras palavras, a taxa de leitura do “buffer” de decodificação.

Essa taxa pode ser calculada dividindo o número de bits entre dois pacotes consecutivos com PCR e a diferença de tempo entre o valor de suas amostras. Portanto, caso seja mantido o número de pacotes entre dois PCRs, a diferença dos valores dos PCRs também será constante e conseqüentemente a taxa de leitura no buffer de decodificação também será. Mantendo-se constante o atraso do fluxo de pacotes de transporte com relação ao receptor, ele será capaz de reconstruir o relógio do emissor sem muitas distorções [10].

Entre dois PCRs consecutivos a taxa de decodificação é mantida constante, por isso a taxa do fluxo de transporte é denominada constante em partes (piecewise constant rate). Em outras palavras, pode-se modificar a taxa no decodificador através do deslocamento das amostras do PCR no fluxo de transporte. Esse mecanismo é bastante útil quando são feitas intervenções no fluxo de transporte, por exemplo, em remultiplexações devido a mudança das taxas de alguns fluxos elementares (mudança da codificação de vídeo ou áudio) ou na retirada de algum fluxo elementar do fluxo de transporte em algum nó da rede, por exemplo numa rede de TV à cabo entregando um canal pay-per-view a um assinante específico.

Os processos utilizados para reconstruir o relógio do emissor são implementados, em hardware ou software, para garantir o sincronismo das mídias transportadas pelos fluxos de transporte. Destacam-se as seguintes atividades para a reconstrução da base de tempo: regeneração do relógio do sistema, correção do relógio na presença de variação de atraso nos pacotes do fluxo multiplexado, e a utilização dos tempos de apresentação e decodificação. A unidade receptora e decodificadora (URD) deve implementar essas funções com o objetivo de apresentar os fluxos elementares selecionados pelo usuário. Cada uma delas tem fundamental importância para as aplicações da TV digital, que são executadas acima das camadas de transporte, multiplexação e codificação.

As redes de transporte utilizadas para enviar os pacotes do fluxo multiplexado apresentam atrasos e variação de atraso que podem alterar sobremaneira o instante de chegada de cada PCR. Isso pode causar uma grande variação do relógio no receptor. Para evitar mudanças bruscas no relógio do receptor e mantê-lo estável dentro de certos limites são utilizadas técnicas como o Phase Locked Loop (PLL) [23]. O efeito da variação entre o relógio do emissor e do receptor, caso não se tivesse o PLL, é um gradual e inevitável aumento ou diminuição do preenchimento do buffer do decodificador, de forma que o transbordo ou o esvaziamento total eventualmente ocorreria para buffers de tamanho finito. Alguns mecanismos para suavizar a variação de atraso nos PCRs serão apresentados na seção 4.

4 Resincronização de Mídias

Por resincronização de mídias de TV digital entende-se como o processo através do qual mantém-se a periodicidade e o valor das amostras do relógio do emissor (Program Clock Reference – PCR) o mais constante e fiel possível, utilizando para isso processos que atuam no fluxo de transporte para corrigir variações devido a atrasos na rede, etc. Os algoritmos que têm como objetivo resincronizar as mídias em sinais de TV digital devem, portanto, reposicionar os pacotes que contém essas amostras, i.e., os PCRs, de forma que a distância relativa entre cada amostra e a imediatamente anterior ou posterior seja constante. Além disso, os algoritmos devem adequar os valores de cada amostra para refletir a situação original no emissor.

A resincronização de mídias tenta solucionar alguns problemas inerentes à distribuição de fluxos de transporte (MPEG2 Transport Stream) por redes de pacotes até as estações transmissoras de TV digital, ou seja, utilização de redes primárias de distribuição.

A sincronização das mídias depende, em grande medida, dos atrasos e variações de atraso que apresentarem os pacotes do fluxo de transporte que contém as amostras do relógio do emissor (PCR), pois a distância entre amostras consecutivas pode variar devido à ocorrência dessas perturbações. Sendo que, essa distância determina a taxa de decodificação dos bytes dos fluxos elementares (vídeo e áudio) e variações excessivas podem provocar a perda de sincronismo nos mecanismos de reconstrução do relógio nos receptores, principalmente nos “phased-locked loops” (PLLs).

A influência das variações na distância de amostras consecutivas no receptor devido à mudança nas referências de tempo do relógio reconstruído (clock ticks) pode ser evidenciada na figura 2. Nota-se que uma mudança na distância entre PCRs determina uma taxa menor ou maior de decodificação, pois as referências de tempo do relógio mudam seu espaçamento. A situação ideal, considerada no modelo de

sincronismo do MPEG-2 System, é obtida quando a distância entre os bytes dos PCRs i' e i'' é igual a diferença dos instantes registrados nos PCRs.

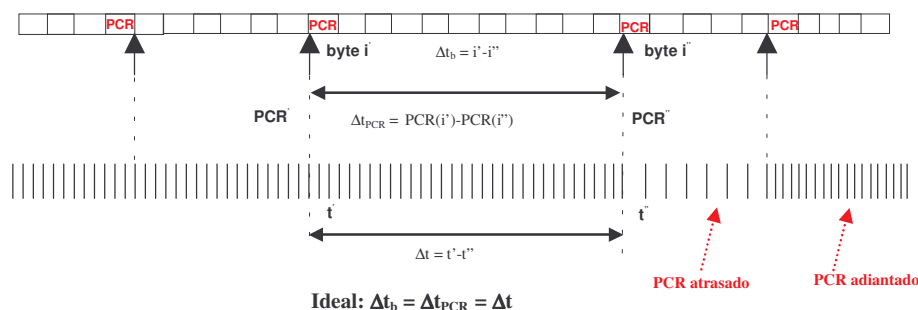


Figura 2 – Influência das variações na distância entre PCRs.

4.1. Algoritmos de Resincronização de Mídias

Vários algoritmos foram propostos na literatura científica para implementar a resincronização de mídias com o intuito de corrigir os efeitos de atrasos e de remultiplexações no fluxo de transporte. Três métodos principais podem ser utilizados: o reordenamento dos pacotes contendo amostras do relógio (PCR), o recálculo e reposicionamento das amostras do relógio (PCR), e a compensação da variação de atraso. Esses métodos serão descritos nessa seção com base nas propostas em [7, 8, 11, 12, 14, 24, 26].

4.1.1. Algoritmos de resincronização baseados no re-cálculo do PCR e na compensação de variações de atraso

Os mecanismos baseados no re-cálculo do PCR [7, 8] efetuam a resincronização através da determinação de novas amostras do relógio do emissor, ou seja, os PCRs. Como são recalculados os valores do PCR, um novo posicionamento dessas amostras dentro do fluxo de transporte torna-se necessário para garantir o novo sincronismo. Os métodos que utilizam essa abordagem são geralmente implementados em hardware, pois precisam gerar novos PCRs o que depende de osciladores e outros dispositivos (PLLs, etc) que são construídos em hardware na grande maioria das implementações.

Os métodos por compensação da variação de atraso, por sua vez, reconstróem o relógio do emissor tentando compensar os atrasos inseridos previamente. Esses algoritmos fazem estimativas da variação de atraso e as utilizam na implementação de filtros para a compensação desses atrasos.

Embora utilizem o mesmo princípio, várias formas de compensar os atrasos são possíveis. Em [16, 26] foi proposto um algoritmo que utiliza uma regressão linear das amostras do relógio e dos tempos de chegada de cada amostra para determinar uma função linear que represente o comportamento do relógio na ausência de atrasos. Ou seja, através da reta de regressão é reconstruído o relógio do emissor sem variações de atraso. Outro método proposto em [11, 14, 24] compensa as variações de atraso através da multiplicação dos PCRs por fatores de escalonamento proporcionais a diferença de fase entre o relógio reconstruído no receptor e o representado pelo PCR. Ou seja, através de um escalonamento adaptativo do valor dos PCRs, o sinal do relógio do receptor é ajustado.

Os métodos descritos nessa seção são bastante eficientes para a reconstrução do relógio do emissor, entretanto, dependem de implementações complexas baseadas em hardware.

4.1.2. Algoritmo de Correção da Periodicidade das Amostras do Relógio do Emissor

Esse algoritmo, proposto por Yu et al [10], baseia-se em procedimentos simples que podem ser implementados puramente em software, ao contrário de outros mecanismos.

O método proposto leva em consideração o fato dos valores de PTS e DTS serem associados apenas ao bit inicial do quadro que o transporta. Portanto, se for assegurado que o início dos quadros contendo o PTSs ou DTSs são mantidos inalterados, o receptor funcionará corretamente mesmo se forem adicionados mais bits a esse quadro no final do pacote. Ou seja, são consideradas somente as posições das amostras no fluxo de pacotes TS.

A solução de Yu utiliza pacotes TS nulos para garantir o sincronismo, sem a necessidade de serem modificados os valores do PCR, mantendo a distância entre pacotes que contenham PCRs preservada. O algoritmo insere bits de enchimento aos pacotes TS ao final dos dados úteis ou inclui pacotes TS nulos, na proporção necessária para compensar reduções no número de bytes de mídias após manipulações, tais como recodificação de vídeos, remultiplexação de programas e operações de filtragem (filtros passa-baixas). Por exemplo, no caso da recodificação de um vídeo para um padrão mais eficiente poderiam ser inseridos bytes em número equivalente aos eliminados por essa operação.

No entanto, esse método só pode ser utilizado quando operações sobre o fluxo de transporte reduzem o número de bytes das mídias ou quando os pacotes que contém PCRs são adiantados, conforme mostrado na figura 3. Ou seja, esse algoritmo pode ser utilizado para compensar a chegada prematura de pacotes que contém PCRs e com uma constante monitoração da distância entre PCRs consecutivos a variação da distância pode ser compensada pela inserção de pacotes TS nulos na proporção de bytes faltantes.

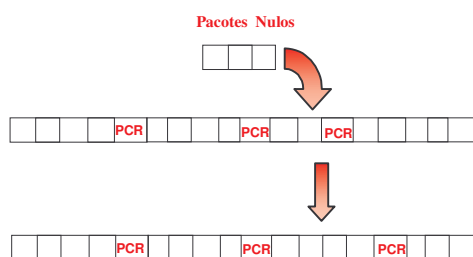


Figura 3 – Padding de pacotes TS nulos.

4.1.3. Algoritmo de Reposicionamento de pacotes com Escalonamento da Taxa de bits

Esse algoritmo [10] foi proposto com o objetivo de modificar a taxa de bits, determinada pela distância entre PCRs, para um novo valor constante. Assim, pode-se resincronizar o fluxo de transporte sem que seja necessária a modificação dos valores dos PCRs. Ou seja, é efetuado um escalonamento da taxa de bits, refletindo a mudança

no número de pacotes entre PCRs consecutivos ou a distância entre eles, determinando assim uma nova taxa constante que preservará, assim, o sincronismo.

O algoritmo calcula a distância (em número de pacotes) de cada pacote TS, exceto os que carregam vídeo, em relação ao último PCR, multiplicando essa distância por um fator de escalonamento s , sendo o resultado utilizado para determinar a distância desse pacote e o PCR no novo fluxo de transporte, ou seja, sua nova posição. A figura 4 mostra um exemplo de como atua esse algoritmo.

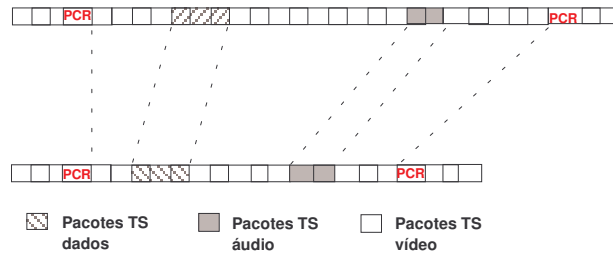


Figura 4 – Exemplo de escalonamento da taxa de bits por um valor s .

O escalonamento da taxa de bits pode ser utilizado nos casos onde um pacote contendo PCR esteja atrasado, ou seja, temos mais pacotes TS entre o PCR atual e o último PCR ou a distância entre PCRs é maior que a esperada. Nesse caso, um escalonamento dos pacotes entre os dois PCRs deve ser feito e assim uma taxa de bits é determinada para o fluxo de transporte. Os PCRs subsequentes indicarão se é necessário escalonar a taxa novamente ou não, sendo a nova taxa mantida até que seja necessária uma nova modificação.

5 Framework para Testes e Avaliação do Sincronismo

O framework proposto nesse artigo tem como objetivo simular as perturbações causadas por redes de pacotes para estudar a influência da qualidade de serviço das redes primárias de distribuição no sincronismo e na qualidade de programas MPEG-2 inseridos em fluxos de transporte.

É proposta a estrutura de uma rede primária de teste apresentada na figura 5, para a transmissão de pacotes de um fluxo de transporte conhecido. As características dessa rede, ou seja, atrasos, variações de atrasos, banda disponível, etc, são controladas. Adicionalmente, a influência dessa rede na apresentação das mídias será avaliada através de medições da qualidade objetiva do vídeo apresentado ao usuário [35].

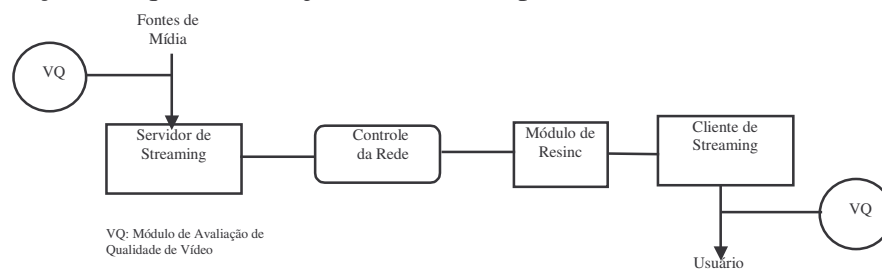


Figura 5 – Rede Primária de Testes.

Cada um dos módulos do framework proposto e apresentado na figura 5 tem uma função na simulação de redes de pacotes para a distribuição de conteúdo. A seguir são detalhadas brevemente as características de cada módulo e apontado seu objetivo para a simulação:

- **Servidor de Streaming:** Ele tem o objetivo de efetivamente gerar os pacotes TS a partir de um arquivo residente no computador onde está sendo executado. Ou seja, a partir de um arquivo formatado previamente com as características desejadas serão obtidos os fluxos de mídia para a transmissão. O fluxo de transporte definido possui características especiais, pois apresenta tanto cenas de movimento intenso quanto cenas estáticas com um apresentador (Rugby na TelePiu da Itália). Com essas duas modalidades de exibição teremos uma variação do nível de atividade do vídeo em consequência será possível comparar o efeito das mudanças nos parâmetros da rede para as duas opções. Qualquer software que implemente a transmissão de pacotes TS utilizando uma interface de rede IP e transmitindo com o protocolo UDP pode ser utilizado;
- **Módulo de Controle da Rede:** Esse módulo tem a função de simular as condições reais de uma rede de pacotes utilizada para a distribuição de conteúdo em banda base – pacotes TS não modulados para transmissão pela interface aérea. A maioria dos problemas encontrados nesse tipo de rede pode ser reproduzida por esse módulo, por exemplo: atrasos fixos para os pacotes simulando o atraso de trânsito na rede, variação de atraso para simular um encaminhamento diferente para cada pacote em nós da rede (buffers mais ou menos congestionados em roteadores, por exemplo), perda de pacotes simulando nós congestionados na rede, duplicação de pacotes para simular problemas de roteamento e controle na largura de banda do canal para simular enlaces com banda bastante reduzida. Esses parâmetros são controlados minuciosamente para que se possa estabelecer uma relação *a posteriori* entre eles e a qualidade do vídeo recebido no cliente de streaming;
- **Módulo de Resincronismo:** Esse módulo tem como principal objetivo atuar no fluxo de transporte para minimizar os efeitos de variações de atraso em pacotes TS. Para isso, serão utilizados programas residentes no computador de destino da transmissão que modificarão o posicionamento de pacotes TS que possuem amostras PCR, de forma a resincronizar o fluxo de transporte quando necessário. Ou seja, serão implementados alguns dos algoritmos descritos na seção 4. Os requisitos principais desse módulo são a simplicidade e a rapidez no processamento, pois a solução utilizada não pode prejudicar a recepção dos pacotes TS pelo cliente de streaming. Foi escolhida uma solução em software devido a sua simplicidade quando comparada a soluções em hardware, entretanto, a eficiência no processamento deve ser um dos requisitos no seu desenvolvimento;
- **Cliente de Streaming:** O cliente, que neste caso simula o set-top box e o aparelho de TV Digital, terá o papel de receber os pacotes TS enviados pelo servidor de streaming e redirecioná-los tanto para a tela do computador onde está sendo executado como para um arquivo. Para implementar essas funções, o software cliente terá que interpretar as tabelas PSI (Program Specific

Information) [23], por exemplo, PAT (Program Allocation Table) e PMT (Program Map Table) do fluxo de transporte; demultiplexar as mídias de cada programa existente; decodificá-las e exibi-las na tela do computador. Ao mesmo tempo, o cliente deverá gravar os pacotes TS recebidos em um arquivo residente no computador para análises futuras. Essas duas tarefas são essenciais para a avaliação da transmissão, pois indicam o comportamento da exibição no momento em que ela está ocorrendo (exibição na tela) e possibilita uma análise posterior pelo módulo de avaliação de qualidade de vídeo (arquivo);

- **Módulo de Avaliação da Qualidade de Vídeo:** Esse módulo tem o papel de analisar a qualidade dos vídeos recebidos pelo cliente de streaming de forma objetiva, ou seja, efetuando algumas medidas de qualidade. Podem ser utilizadas métricas como o PSNR (Peak Signal To Noise Ratio) [41], MSE (Mean Square Error) [39, 40, 41] ou métricas mais sofisticadas como o VQM (Video Quality Metric) [35] que faz análises de referência completa ou de referência reduzida dos vídeos original e recebido. Esse módulo deve extrair os vídeos do arquivo gravado no computador de destino e calcular alguma métrica que indique a qualidade do vídeo recebido. Com essa métrica podemos comparar o desempenho da exibição em diversas condições de transmissão. Por isso, torna-se muito importante relacionar as condições da rede com a métrica calculada. O resultado obtido por meio desse módulo pode ser utilizado para avaliar os algoritmos implementados no módulo de resincronismo, assim como para estudar a influência dos parâmetros de rede na qualidade da exibição.

A rede primária de testes utiliza hosts conectados através de redes locais, podendo ser utilizado o VideoLAN [36] para atuar como servidor e cliente de streaming na transmissão. Para o módulo de controle da rede pode ser utilizado o NISTNet [37], que é um pacote de software de domínio público utilizado para simular diversas condições de uma rede de dados. Ele simula um roteador e controla a perda de pacotes, atraso, variação de atraso e banda máxima disponível da rede. O módulo de resincronização utiliza os algoritmos descritos na seção 4 e atua nos efeitos da variação de atraso em pacotes TS, ou seja, quando o pacote TS chega ao receptor atrasado ou adiantado em relação ao atraso permitido pelo modelo de sincronismo do MPEG-2 System. Finalmente, para o módulo de avaliação da qualidade do vídeo pode ser usado o VQM, Vídeo Quality Measurement Tool [38] que é um pacote de software disponibilizado gratuitamente pelo NTIA (National Telecommunication Industry Association) – órgão do governo americano – a institutos de pesquisa e universidades. O VQM efetua medidas de qualidade objetiva de vídeo através de padrões obtidos do vídeo original e do vídeo recebido no terminal final. Os algoritmos utilizados pelo VQM são descritos pelos autores em [35]. Alternativamente, podem ser implementados algoritmos para medir outras métricas como o PSNR ou a MSE dos vídeos recebidos.

Dentre os módulos desse framework, apenas dois permitem uma atuação direta na rede primária de teste: o módulo de controle da rede e o módulo de resincronização. O primeiro pode ser utilizado para simular as condições reais de uma rede de pacotes e o segundo pode mitigar os efeitos da variação de atraso no sincronismo, como descrito acima.

Com o framework proposto podem ser feitas simulações com o intuito de definir limites toleráveis para as características da rede primária (principalmente variação de atraso e perda de pacotes) de forma a manter a qualidade objetiva do vídeo apresentado ao usuário, mas também avaliar o desempenho de algoritmos de resincronização na presença de variação de atraso na rede. Além disso, algumas questões importantes podem ser esclarecidas por meio de testes utilizando o framework proposto:

- Qual a influência de parâmetros como a variação de atraso e a perda de pacotes na qualidade do vídeo, ou seja, como métricas de qualidade de vídeo como PSNR ou MSE variam à medida que esses parâmetros da rede são variados?
- A duplicação de pacotes produz efeitos negativos para a qualidade do vídeo recebido?
- Qual o valor limite para a variação de atraso de forma que os algoritmos de resincronismo consigam evitar a perda de sincronismo na exibição do vídeo?
- Qual parâmetro da rede determina a maior distorção do vídeo recebido, ou seja, qual das características da rede que mais influencia na exibição do vídeo ao usuário?

As questões acima são muito relevantes para indicar quais são os limites razoáveis de atraso, variação de atraso e perda de pacotes que possibilitam uma exibição das mídias com qualidade. Além disso, as respostas a essas questões tornam possível avaliar em que medida os algoritmos de resincronismo descritos na seção 4 podem ajudar a manter o sincronismo das mídias, contribuindo indiretamente para uma melhor qualidade de exibição.

O framework proposto pode avaliar os efeitos do sincronismo na exibição das mídias independente da compressão utilizada (MPEG1, MPEG2, MPEG4, etc), pois são analisados os fluxos de transporte que carregam os quadros dos vídeos comprimidos e não os vídeos em si. Entretanto, na análise de qualidade objetiva dos vídeos deve ser observada a compressão utilizada. Outro aspecto bastante relevante é a integração entre os módulos do framework, que é fundamental para efetivamente simular uma rede de distribuição de conteúdo baseada em transmissão de pacotes. Deve-se garantir, portanto, que os módulos estejam conectados através de uma rede de pacotes. Nota-se que vários aspectos devem ser observados para viabilizar os estudos desejados através desse framework.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Nesse artigo foram introduzidos conceitos sobre a sincronização de mídias na infraestrutura de TV digital, sendo apontada a necessidade de uma avaliação detalhada das influências do sincronismo para a qualidade de aplicações móveis de TV digital. Foi proposto um framework que possibilita esse estudo, ou seja, que nos fornece ferramentas para simular as condições reais de uma rede primária de distribuição de conteúdo e avaliar a qualidade do vídeo após sua transmissão por uma rede dessa natureza. Análises detalhadas dos algoritmos de resincronização e seu desempenho, assim como a avaliação da influência da rede primária na qualidade da apresentação de mídias aos usuários finais tornam-se possíveis por meio do framework proposto. Simulações e seus resultados no intuito de responder as questões apontadas na seção 5 serão endereçados em trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

- [1] Faria, Gerard, "The Digital Video Broadcasting System". ITIS, France 2000.
- [2] Fernández, et al, "Single Frequency Networks for Digital Video Broadcasting". Retevisión S/A, Engineering R&D, Spain 2000.
- [3] Bertella, et al, "Mobile DVB-T Reception: Quality of Streaming over IP of Audiovisual Services". Radiotelevisione Italiana (RAI), Research and Technology Innovation Centre (CRIT). Italy 2000.
- [4] Faria, Gerard, "DVB-T: New Operative Modes for Digital Terrestrial TV". Harris Broadcast Europe, France 2002.
- [5] Nokes, C. and Mitchell, J., "Potential Benefits of Hierarchical Modes of the DVB-T Specification". IEE Colloquium Digest, 1999.
- [6] Brooks, M. P. and Mattei, A., "DVB-T Reception Issues in a Mobile Environment". NTL Broadcast, United Kingdom 2001.
- [7] Takahashi, et al, "MPEG-2 Multi-Program Transport Stream Transcoder". IEEE International Conference on Multimedia and Expo, IEEE Computer Society, 2001.
- [8] Bungum, O. W., "Transmultiplexing, Transcontrol and Transscrambling of MPEG-2/DVB Signal". International Broadcasting Convention, Conference Publication no. 428, September 1996.
- [9] Mehaoua, A. and Boutaba, R., "The Impacts of Errors and Delays on the Performance of MPEG-2 Video Communications". ICASSP, 1999.
- [10] Yu, B. and Nahrstedt, K., "A Realtime Software Solution for Resynchronizing Filtered MPEG2 Transport Stream". IEEE International Symposium on Multimedia Software Engineering, December 2002.
- [11] Tryfonas, C. and Varma, A., "A Restamping Approach to Clock Recovery in MPEG-2 Systems Layer". ICC, 1999.
- [12] Noro, R. and Husbaux, J. P., "Clock Synchronization of MPEG-2 Services over Packet Networks". J.C. Baltzer AG, Science Publishers, Telecommunication Systems 11, 1999.
- [13] Su, W. and Akyildiz, I. F., "The jitter time-stamp approach for Clock Recovery of Real-time Variable Bit-Rate Traffic". IEEE, 2001.
- [14] Tryfonas, C. and Varma, A., "Timestamping Schemes for MPEG-2 Systems Layer and their Effect on Receiver Clock Recovery". IEEE Transactions on Multimedia, Vol. 1, No. 3, September 1999.
- [15] Zhu, et al, "End-to-End Modeling and Simulation of MPEG-2 Transport Streams over ATM Networks with Jitter". IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, Vol 8, No. 1, February 1998.
- [16] Noro, R. and Husbaux, J. P., "Improving Clock Synchronization for MPEG-2 Services over ATM Networks". Swiss Federal Institute of Technology, 1997.
- [17] Du, et al, "PCR-Assist CBR for Delivering Pre-Recorded MPEG-2 Transport Streams". IEEE 1997.
- [18] Tektronics, "A Layman's Guide to PCR Measurements: Technical Brief". Tektronics.
- [19] Fairhurst, G., "Ultra Lightweight Encapsulation (ULE) for Transmission of IP datagrams over MPEG-2/DVB Networks". Internet Draft, March 2004.
- [20] Sparano, D., "What exactly is 8-VSB anyway?". Harris Broadcast, 1997.
- [21] Citta, R. and Sgrignoli, G., "ATSC Transmission System: VSB Tutorial". Mountreux Symposium, June 12, 1997.

- [22] Haykin, Simon, "Communication Systems". 3rd Edition, John Wiley & Sons, 1994.
- [23]____Recommendation H.222.0 ISO/IEC 13818-1, Information Technology - Generic Coding of Moving Pictures and Associated Audio: Systems. International Organization for Standardization, November 1994.
- [24] Tryfonas, C., "Video Transport over Packet-Switched Networks". Doctorate Dissertation, University of California Santa Cruz, March 1999.
- [25] Benoit, H., "Digital Television. MPEG-1, MPEG-2 and principles of the DVB System". Arnold Publishing, London 1997.
- [26] Noro, R., "Synchronization over Packet-Switching Networks: Theory and Applications". Doctorate Dissertation, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2000.
- [27] Gutiérrez, A. D., "Flujos de Programa y de Transporte - MPEG-2 Aplicación a DVB". Universidad Politécnica de Madrid, Junio, 2001.
- [28] Kaxe, B., "Synchronisation of MPEG-2 based Digital TV Services over IP Networks". Master Dissertation, Telia Research AB, January, 2000.
- [29] Haskell, B. G., Puri, A. and Netravalli, A. N., "Digital Video: An Introduction to MPEG-2". Chapman & Hall, New York 1997.
- [30]____Standard EN 300 744, "Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television". ETSI version 1.5.1, 2004.
- [31]____Standard ETS 300 468, "Digital broadcasting systems for television, sound and data services; Specification for Service Information (SI) in Digital Video Broadcasting (DVB) Systems", ETSI, version 1.6.1, 2004.
- [32]____ARIB Standard STD-10, "Service Information for Digital Broadcasting System". ARIB, version 3.2, November 2001.
- [33]____ARIB Standard STD-B31, "Transmission System For Digital Terrestrial Television Broadcasting". ARIB, version 1.2, January 2002.
- [34]____ATSC Standard A/53C with Amendment No. 1, "ATSC Digital Television Standard". ATSC, May 2004.
- [35] Pinson, M. and Wolf, S., "A New Standardized Method for Objectively Measuring Video Quality". IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 50, no. 3, September 2004.
- [36] VideoLAN website, <http://www.videolan.org>.
- [37] NIST. NISTNet website, <http://snad.ncsl.nist.gov/nistnet/>.
- [38] NTIA. VQM website, <http://www.its.blrdoc.gov/n3/video/vqmssoftware.htm>
- [39] Reibman, A. R., Vaishampayan, V. A. and Sermadevi, Y. "Quality Monitoring of Video over a Packet Network". IEEE Transactions on Multimedia, Vol. 6, No. 2, April 2004.
- [40] Aehuri, P. K., Bojan, V., Richie, S. and Weeks, A. "Objective Quality Analysis of MPEG-1, MPEG-2 and Windows Media Video". IEEE, 2004.
- [41] Heng, B. A. "Multiple Description Video Coding Through Adaptive Segmentation". Doctoral Thesis. MIT, June, 2004.