

## Modem de transferência de tempo e frequência de duas vias baseado em rádio definido por software

### Two way time and frequency transmission modem based on software defined radio

César Augusto Medina Sotomayor<sup>1</sup>, Guilherme de Andrade Garcia<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Divisão de Metrologia em Tecnologias da Informação e Telecomunicações -Inmetro;

E-mail: gagarcia@inmetro.gov.br

**Resumo:** Descreve-se neste trabalho a implementação de um sistema de transferência de tempo e frequência bidirecional baseado em conceitos de rádio definido por software e utilização de hardware de custo reduzido. É mostrado experimentalmente que a implementação deste tipo fornece estabilidade e rastreabilidade na medição do tempo satisfatórios, na ordem de grandeza similar aos sistemas implementados em hardware de propósito específico.

**Palavras-chave:** Transferência de tempo e frequência, GPS, transferência de tempo e frequência bidirecional baseada em satélites geostacionários.

**Abstract:** This work describes the implementation of a two way time and frequency transfer system based on software defined radio concepts and using hardware with reduced cost. It is experimentally shown that this kind of implementation achieves good stability and tracking performance, comparable to those obtained by systems implemented by hardware of specific purposes.

**Keywords:** Time and frequency transfer, GPS, *Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer*.

## 1. INTRODUÇÃO

Medir o tempo com altíssima exatidão é vital para muitos aspectos da vida moderna, por exemplo em telecomunicações, em sistemas de transmissão de potência, em *smart grids*, em estudos de mudança climática global, em interferometria e em geoposicionamento.

No contexto da metrologia, dentro de algumas aplicações como padronização do Volt pelo

efeito Josephson, a padronização do Metro através de um pente de femtosegundos, padronização em vibrações e acústica, e em metrologia legal, os procedimentos tradicionais para prover estabilidade e rastreabilidade na medição do tempo não são mais satisfatórios. Assim faz-se necessário o uso de técnicas modernas de transferência dos sinais de frequência e da informação de tempo (TFT, do inglês *Time and Frequency Transfer*), com o mínimo de degradação possível.

Esta transferência é materializada em sistemas localizados nos laboratórios primários (caracterizado pela existência de um relógio padrão), para os usuários finais (caracterizada pela existência de um relógio local que deve se ajustar ao relógio padrão) às vezes localizados a grandes distâncias. Esta transferência pode ser feita por técnicas de rádio, onde se inclui o sistema GPS, e também fisicamente por cabos de fibra óptica passivos ou estabilizados ativamente.

Desde o ano 1999, a técnica mais difundida na literatura científica e mais amplamente utilizada nos laboratórios de medição de tempo no mundo é a denominada “transferência de tempo e frequência bidirecional baseada em satélites geostacionários” (TWSTFT, *Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer*) [1].

O sistema em desenvolvimento foi projetado para trabalhar com enlaces terrestres, e, portanto, adaptações à técnica de TWSTFT foram realizadas, conforme indicado nas seguintes seções.

## 2. METODOLOGIA

Sistemas tradicionais, implementados em hardware específico, tem o problema do alto custo devido à necessidade de utilização de processadores de alto desempenho capazes de executar as técnicas avançadas de processamento digital de sinais. Soluções modernas, implementadas em rádio definido por software (SDR) e plataformas de custo reduzido tem sido reportadas na literatura científica [2-5].

Seguindo esses esquemas, o sistema experimental de transferência de tempo e frequência descrito neste trabalho e ilustrado na Figura 1 está formado por um padrão de frequência, duas estação de transmissão e recepção de sinais, e um processador digital de sinais.

Como estação de transmissão/recepção de sinais foram utilizadas duas USRP N210 fabricadas

pela Ettus Research. Cada USRP foi acoplada com uma placa de transmissão e recepção WBX com capacidade de operação em full duplex, a forma de onda e processamento digital de sinais foi implementado em um computador com processador Intel Core i7 com 64 GB de memória RAM.

Os transceptores foram desenvolvidos em C++ e Python, seguindo os padrões de desenvolvimento do GNU Radio. Estes transceptores são descritos como estações de transmissão e recepção de sinais de múltiplo acesso por divisão de código (CDMA). No lado do transmissor, um sinal de 1 pulso por segundo (1PPS) é gerado e espalhado em frequência (*SS-Spread Spectrum*) utilizando uma sequência de pseudo-ruído (*PN-sequence*) de 1000 chips por milissegundo. Este sinal é modulado em rádio frequência (RF) e amplificado para ser transmitido até a estação receptora. No receptor, o sinal de RF é amplificado, demodulado, filtrado e digitalizado a  $10^6$  amostras por segundo ou uma amostra por chip.

A transferência de tempo consiste na medição simultânea de intervalos de tempo ocorridos entre a transmissão e recepção do sinal de 1PPS.

Esta medição dos intervalos de tempo ocorridos entre a transmissão e recepção do sinal de 1PPS é realizada utilizando algoritmos de estimação de atraso de chegada de sinais (*delay estimation*). O atraso total é dado pelos atrasos em cada um dos componentes do sistema, assim, a diferença de tempo entre os relógios em ambos os laboratórios é dado por:

$$T_1 - T_2 = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{2} + \frac{\tau_1^L - \tau_2^L}{2} + \frac{\tau_1^{TX} - \tau_1^{RX} - \tau_2^{TX} - \tau_2^{RX}}{2}$$

O primeiro termo do lado direito é dado pela estimativa do atraso de chegada dos sinais nas estações 1 e 2, que devem ser intercambiados

para fazer os cálculos das diferenças dos relógios. O segundo termo contém a diferença dos atrasos da propagação do sinal entre estações e o terceiro termo representa a diferença das diferenças dos retardos introduzidos no caminho de transmissão e recepção dos modems das estações 1 e 2 (retardos das estações).

Em caso de existir completa reciprocidade de sistemas, todos os termos exceto o primeiro, são cancelados. Em caso de não existir reciprocidade devem ser inseridas compensações para mitigar esses efeitos.

As compensações podem ser inseridas após medições acuradas dos sistemas envolvidos, e após identificadas as causas que podem ser por exemplo, cabos de diferente comprimento, hardware com diferenças internas, principalmente no que tange a sistemas de sincronismo processamento.

### 3. ALGORITMOS DE ESTIMAÇÃO DE RETARDO DE SINAL

Estimar o atraso de um sinal de chegada significa estimar o atraso relativo entre um sinal padrão (armazenado no receptor) e o sinal recebido. Na literatura científica podem ser encontradas várias formas de estimar o retardo de um sinal de chegada, sendo que o mais conhecido é o método de correlação cruzada, onde a estimativa do atraso é obtida como o deslocamento que maximiza a correlação cruzada entre o sinal de chegada e o sinal padrão. Outro método muito empregado é conhecido como método de correlação cruzada generalizado, também conhecido como detecção de fase do espectro cruzado ou PHAT.

O método de correlação cruzada generalizado é mais utilizado nos casos onde existe presença de ruído ou canais de transmissão com múltiplos percursos e apresenta melhor desempenho se comparada com as outras técnicas.

Esta técnica consiste basicamente em ponderar com alguma função a transformada de Fourier do sinal de correlação cruzada e verificar, seja no domínio da frequência ou do tempo, o retardo inserido. Quando a função de ponderação é o valor absoluto da transformada de Fourier do sinal de correlação cruzada, esta técnica também é conhecida como *Phase Transform* (PHAT). Matematicamente se expressa como:

$$\tau = \arg \max \Phi_{x,y}(\tau)$$

onde  $\tau$  é o retardo de grupo,

$$\Phi_{x,y} \tau = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} X(f) Y^*(f) e^{j2\pi f \tau} df}{\sqrt{|X(f)|^2 |Y(f)|^2}}$$

$y(t)$  é o sinal de chegada,  $x(t)$  é o sinal padrão e  $X(f)$  e  $Y(f)$  são a transformada de Fourier de  $x(t)$  e  $y(t)$ , respectivamente.

Observe-se que na prática, o que se dispõe para computar o retardo do sinal de chegada é um número limitado de amostras. Assim, a função central do receptor passa a ser estimar o espectro do sinal recebido, ou seja, dado um número limitado de amostras, determinar uma estimativa da densidade espectral de potência. Por meio desta estimativa é possível obter o retardo do sinal de chegada.

Na prática o método mais utilizado para estimar a densidade espectral de potência ou o espectro cruzado é o periodograma de Welch [6].

### 4. MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS

O sistema apresentado na Figura 1 foi montado na bancada para testar os algoritmos e realizar medições em um ambiente real.

O ambiente de teste é um ambiente do tipo *indoor* e a distância entre os dois USRP é de aproximadamente 10 cm. A frequência de transmissão foi configurada para 700 MHz e não foram utilizados equipamentos de RF externos como LNA, etc.

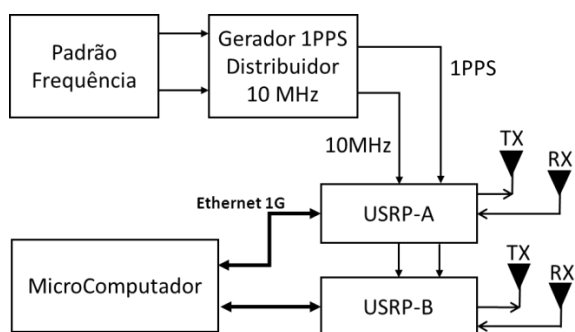


Figura 1 – Protótipo de modem de transferência de tempo e frequência bidirecional.

As medições foram realizadas ao longo de 20 segundos e obteve-se a medida do atraso de relógio com média de 500 pico segundos e desvio padrão de 200 pico segundos.

## 5. CONCLUSÕES

A transferência de sinais de frequência e informação de tempo com o mínimo de degradação possível é uma importante atividade não apenas dentro da área de metrologia, mas também se mostra importante dentro das mais diversas áreas da ciência e tecnologia atuais.

O sistema de transmissão de tempo e frequência apresentado neste trabalho, apresenta uma incerteza de medição comparável com as apresentadas nos mais modernos sistemas de transferência de tempo e frequência.

Deve-se ressaltar o baixo custo do sistema desde que foi implementado segundo a metodologia de rádio definido por software, utilizando no hardware componentes de uso cada vez mais comum no mercado, e, portanto, cada vez mais baratos. Porém este sistema apresenta alguns desafios envolvendo latência na transmissão e recepção de dados, assim como problemas nos subsistemas de sincronização interna das placas.

Atualmente estamos trabalhando no tratamento desses problemas e na implementações de técnicas mais avançadas de transferência de tempo e frequência.

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] D. Kirchner, “Two-way time transfer via communication satellites,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 79, pp. 983–990, 1991.
- [2] J. Amagai and T. Gotoh, “Development of two-way time and frequency transfer system with dual pseudo random noises,” *Journal of the National Institute of Information and Communications Technology*, vol. 57, pp. 197–207, 2010.
- [3] Y.-J. Huang, W.-H. Tseng, S.-Y. Lin, H.-T. Lin, F.-D. Chu, and C.-S. Liao, “The multiple access interference simulation on PRN-based two-way satellite time transfer,” *43th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting, Long Beach, California, USA*, 2011.
- [4] T. Gotoh, J. Amagai, M. Fujieda, and M. Aida, “Progress on two-way satellite time transfer using DPN signals,” *44th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting, Reston, Virginia, USA*, 2012.
- [5] T. Gotoh, J. Amagai, T. Hobiger, M. Fujieda, and M. Aida, “Development of a GPU-based two-way time transfer modem,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 60, pp. 2495–2499, 2011.
- [6] P. Stoica and R. Moses, “Spectral Analysis of Signals,” Prentice Hall, 2005.