



XVI SNPTEE
Seminário Nacional de Produção e
Transmissão de Energia Elétrica

GRUPO V

PROTEÇÃO, MEDIÇÃO E CONTROLE EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

Técnicas de Sincronização Temporal de Equipamentos Digitais

Policarpo Batista Uliana
Reason Tecnologia S.A.

Sergio Luiz Zimath
Reason Tecnologia S.A.

RESUMO

O presente artigo descreve os principais sistemas e tecnologias de sincronização temporal de equipamentos digitais, dando ênfase ao sistema GPS, solução atualmente mais utilizada.

PALAVRAS-CHAVE: Sincronização, Relógios digitais, Sistema GPS.

1. INTRODUÇÃO

Nos primeiros sistemas de monitoração de grandezas elétricas em usinas e subestações, a simples visualização da ordem de grandeza dos valores de corrente e tensão de uma linha representavam toda a informação disponível. Com o surgimento dos primeiros oscilógrafos analógicos, teve-se a possibilidade de vislumbrar a forma de onda de corrente e tensão de uma linha de transmissão.

Com a evolução dos sistemas computacionais, os oscilógrafos e relés analógicos foram (ou estão sendo) substituídos por sistemas digitais que proporcionaram uma série de vantagens principalmente quanto a parametrização, leitura de dados e análise das perturbações detectadas. Além disso, nos sistemas digitais o tempo de ocorrência de cada evento e de cada ponto de uma determinada forma de onda passa a ser um parâmetro essencial e intrínseco ao conjunto de dados gerados.

Quando se analisa um sistema isolado, (por exemplo, uma linha de transmissão e seu sistema de proteção), os registros de forma de onda e os registros sequenciais de evento não necessariamente precisam de uma sincronização temporal absoluta. Porém quando analisamos dados de diferentes equipamentos e de diferentes instalações surge uma grande necessidade

GPC/029

21 a 26 de Outubro de 2001
Campinas - São Paulo - Brasil

de sincronização temporal dos registros segundo uma fonte de tempo única, que permita a obtenção da exata diferença temporal entre quaisquer eventos. Quando passamos a lidar com um sistema elétrico interligado tão grande como o sistema brasileiro, fica claro que para realizar uma análise dos eventos que afetam uma parte significativa deste sistema (principalmente os “blackouts”), os dados devem estar sincronizados segundo um tempo padrão.

Assim, a sincronização dos equipamentos digitais incluindo remotas, relés, oscilógrafos e medidores, vem sendo um requisito fundamental para qualquer novo sistema a ser instalado no país.

2. INCERTEZAS NA MEDIÇÃO DO TEMPO

Quando se fala em sincronização temporal entre diferentes sistemas de armazenamento e processamento de informações, é necessário considerar que não existe um tempo absoluto, mas sim uma medida de tempo com um erro (ou incerteza de medição) associado. Para o registro manual de ocorrências, um erro da ordem de segundos (ou até mesmo de minutos) é admissível.

Considere-se, agora, dois oscilógrafos monitorando dois pontos de uma mesma linha, onde após uma ocorrência se necessita visualizar o evento registrado por cada um dos oscilógrafos em uma mesma base de tempo. Para analisar os tempos de atuação dos relés de proteção e os tempos de aberturas dos disjuntores, são necessárias incertezas de medição da ordem de um milissegundo. Se o objetivo for analisar o conjunto dos sinais gerados nos dois equipamentos para calcular fluxos de potência ou aplicar algoritmos de localização de defeito mais elaborados, estas incertezas devem ser bem menores.

Considerando um sinal senoidal de 60Hz se observa que um milissegundo de incerteza significaria um erro de 21,6 graus elétricos. Assim, para incertezas

da ordem de um grau elétrico, a incerteza de medição do tempo deve ser no máximo de 0,046 ms.

Neste ponto é importante esclarecer que para uma medição de tempo, o valor de resolução da medida não está diretamente ligado à sua incerteza. Ou seja, mesmo que a resolução de medição do tempo seja baixa (por exemplo, uma medição por segundo) a precisão pode ser muito boa (por exemplo, da ordem de 100ns). Dessa forma, um dado tempo poderia ser expresso como: $T = 12.0 \pm 0.00000001s$.

3. BASES DE TEMPO E RELÓGIOS

Para medições de tempo, dois tipos são possíveis:

- Medição de tempo relativo;
- Medição de tempo universal ou UTC (Coordinated Universal Time).

Uma base de tempo relativo sempre poder ser gerada para relacionar dados de um equipamento ou conjunto de equipamentos. Para tal, uma fonte única de tempo deve ser utilizada para sincronizar os relógios de todos os equipamentos, sendo que esta fonte deve ser suficientemente estável durante curtos intervalos, podendo, porém, admitir atrasos consideráveis (da ordem de segundos) para longos períodos de tempo.

Atualmente o UTC (1) é gerado por um relógio atômico mestre localizado em Colorado Springs e pertence ao departamento de defesa dos Estados Unidos. Este sinal de tempo é transmitido para todos os pontos da terra por meio de uma rede de satélites geoestacionários. Mesmo os sinais sendo transmitidos à velocidade da luz, o seu tempo de propagação pode chegar a 10ms, e, desta forma, uma compensação deve ser efetuada a partir da distância percorrida por cada sinal.

Mesmo considerando uma fonte de tempo relativo, para sincronizar um conjunto de equipamentos existem dois problemas básicos:

- Transferir o tempo da fonte para um relógio interno ao equipamento.
- Evitar que após a transferência o relógio não atrase.

A transferência do tempo será sempre realizada através de um canal de comunicação serial como, por exemplo:

- Interface serial dedicada;
- Canal telefônico;
- Canal de satélite;
- Canal de rádio;
- Rede local;
- Internet;

Toda a transferência de informações sempre terá associado um atraso do canal utilizado, que pode ser compensado por hardware (utilizando pulsos de sincronismos) ou por software (medindo ou estimando o valor do atraso).

O atraso do relógio irá depender do tipo de relógio utilizado e da frequência com que o mesmo é resincronizado. Os principais tipos de relógios atualmente disponíveis são:

3.1 Relógios baseados em cristal

Tipicamente um relógio a cristal tem uma incerteza de 10ppm e pode atrasar (ou adiantar) até 1 segundo por dia. Assim, para obter uma incerteza da ordem de 1ms, este tipo de relógio deverá ser resincronizado a cada minuto.

3.2 Relógios baseados em cristal com câmara térmica.

Como o grande problema dos cristais é a sua variação com a temperatura, utilizando uma câmara térmica e medindo o valor da frequência do cristal para a temperatura de operação da câmara, obtém-se uma variação típica de 2 a 5ms por dia. Para obter, então, uma incerteza da ordem de 1ms, este tipo de relógio deverá ser resincronizado duas vezes por dia.

3.3 Relógios atômicos

Alguns materiais radioativos (como o cézio) emitem naturalmente sinais a frequências muito estáveis, que podem ser utilizados para contagem de tempo com atrasos da ordem de um segundo por século.

4. TRANSMISSÃO DE SINAL DE TEMPO

Dos relógios citados no item anterior, os dois últimos apresentam custos elevados e necessitam de uma série de cuidados especiais, sendo utilizados somente em laboratórios especializados.

Assim, na prática, existem basicamente duas situações:

- Uso de um relógio a cristal resincronizado a um curto intervalo de tempo (no máximo de alguns minutos);
- Uso de relógios com câmaras térmicas resincronizados com o intervalo de algumas horas.

Mesmo a segunda opção só é válida para incertezas de medição de tempo da ordem de um milissegundo.

Para obter incertezas da ordem de microsegundos sem um pesado investimento em relógios mais

sofisticados, a melhor opção disponível é a utilização do sistema GPS.

5. SISTEMA GPS

O sistema de posicionamento global, mais conhecido por GPS (Global Positioning System), foi desenvolvido pelo sistema de defesa americano para uso militar. Após a Guerra do Golfo este sistema tornou-se bastante conhecido e houve uma pressão da sociedade para que os militares permitissem o uso civil do sistema. O sistema GPS permite a obtenção de informações de tempo e de posição, sendo que o principal argumento junto aos militares foi a possibilidade de localização de pessoas e veículos em casos de salvamento e resgates. Os militares acabaram cedendo à pressão e liberaram o uso civil do sistema, mas com a restrição de que os receptores recebessem uma informação que permitisse uma precisão máxima de localização da ordem de 100m, enquanto os sistemas militares têm uma precisão da ordem de um metro. Esta restrição foi posteriormente desfeita.

O sistema GPS é até hoje pouco entendido e motivo de bastante curiosidade. O sistema utiliza princípios básicos bastante simples de trigonometria e medição de atrasos de sinais.

Para entender o princípio do sistema GPS, considere um plano no qual são colocados dois transmissores de rádio, enviando um sinal de tempo a intervalos fixos. Um receptor localizado no mesmo plano capta os dois sinais e com base nas informações de tempo recebidas ajusta um relógio local. O atraso de cada sinal recebido é calculado e, sabendo que os sinais trafegam a velocidade da luz, as distâncias entre os transmissores e o receptor são identificadas.

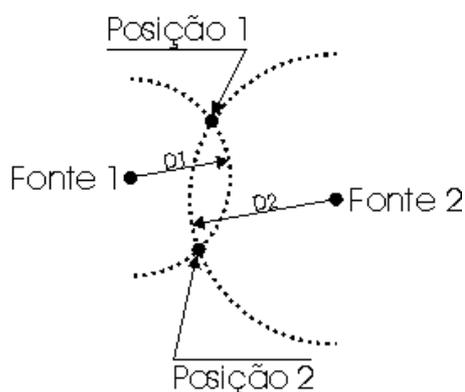


Figura 1 – Representação de dois transmissores e dos dois pontos de recepção possíveis dadas duas distâncias quais quer.

Sabendo as coordenadas dos dois transmissores e as duas distâncias, pode-se identificar dois pontos para o receptor, como mostra figura 1.

Desta forma, para saber a posição do receptor em um plano são necessários 3 pontos com posições conhecidas e a distância entre o receptor e os pontos. Da mesma forma, para o espaço, são necessários 4 pontos e 4 distâncias.

Na figura 2 podemos observar um plano orbital contendo 4 satélites geoestacionários situados a uma altitude de 20187 km. A velocidade angular orbital desses satélites é igual à velocidade angular de rotação da terra. Um observador na Terra, localizado sob este plano orbital, irá visualizar um (ou dois) dos satélites como se ele estivesse parado em um determinado ponto do céu. O sistema GPS possui 6 planos orbitais espaçados de 55 graus, com um total de 24 satélites, de forma que de qualquer ponto na terra se observe ao menos 5 satélites.

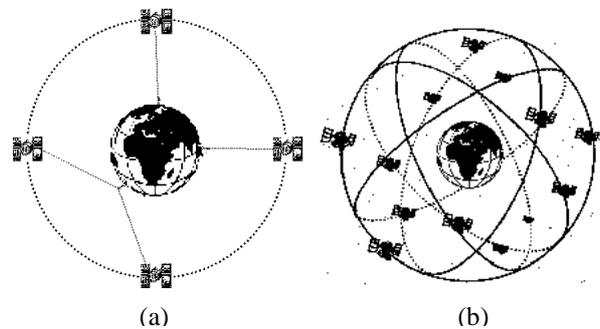


Figura 2 – (a) uma órbita contendo quatro satélites, (b) conjunto de seis órbitas do sistema GPS.

O departamento de defesa dos Estados Unidos possui radares medindo, continuamente, a posição dos satélites do sistema GPS e efetuando correções nas posições de suas órbitas. Cada satélite transmite a sua posição com um erro máximo de 3 centímetros.

Para resolver o problema de medição de tempos de atraso dos sinais, o departamento de defesa utiliza um relógio atômico e cada satélite possui um relógio extremamente estável que é calibrado por este relógio atômico. Assim, cada satélite transmite exatamente o mesmo tempo. A precisão garantida para cada relógio está abaixo de 1ns. Vale ressaltar que para que este tempo chegue na superfície da Terra com esta precisão, o tempo transmitido pelo relógio é atrasado ou adiantado em função de atrasos esperados ao atravessar a atmosfera abaixo do satélite.

Para transmitir a informação de posição e tempo do satélite para a Terra, os satélites usam um sinal de 1,5Ghz para transmitir as informações para o receptor. Os receptores têm, por sua vez, vários canais (usualmente 8 ou 12) que são a quantidade de satélites que podem ser rastreados ao mesmo tempo.

Para determinar a posição, o receptor deve resolver um conjunto de equações nas quais são conhecidas as posições de 4 satélites e as distâncias a cada um deles:

$$(x_1 - u_x)^2 + (y_1 - u_y)^2 + (z_1 - u_z)^2 = (r_1 - c)^2$$

$$(x_2 - u_x)^2 + (y_2 - u_y)^2 + (z_2 - u_z)^2 = (r_2 - c)^2$$

$$(x_3 - u_x)^2 + (y_3 - u_y)^2 + (z_3 - u_z)^2 = (r_3 - c)^2$$

$$(x_4 - u_x)^2 + (y_4 - u_y)^2 + (z_4 - u_z)^2 = (r_4 - c)^2$$

Sendo que x_i , y_i e z_i são as posições dos satélites e r_i são as distâncias obtidas através dos atrasos de propagação dos sinais enviados pelos satélites em relação ao tempo mantido pelo receptor. O fator c compensa o erro do tempo local com relação ao UTC.

Observando as equações, verifica-se que elas representam quatro esferas com origem em cada um dos satélites que se interceptam em um único ponto.

Como resultado destes cálculos, obtém-se uma posição específica na Terra e o desvio de tempo que deve ser aplicado ao relógio do receptor para que o horário interno seja igual ao relógio padrão de Colorado Springs.

Como todo o processo está baseado na precisão do tempo local, este vai sendo ajustado continuamente apenas com base no desvio dado pelo fator c e, assim, após um período de estabilização (da ordem de 10 minutos) o tempo local é atualizado com uma incerteza da ordem de 10 nanossegundos. Considerando a velocidade da luz, este valor representa uma distância de 3 metros.

A incerteza associada à informação de posição do sistema GPS para uso militar é da ordem de um metro. Quanto ao tempo, um receptor permite a uma resolução da ordem de 20 ns com uma incerteza de medição de 100ns.

O governo russo também desenvolveu um sistema equivalente ao sistema GPS, chamado de GLONAS.

6. TRANSMITINDO O TEMPO DO SISTEMA GPS

Após o receptor de GPS decodificar o tempo, o mesmo é transferido para um sistema microprocessado que se encarrega de transferir este tempo para um conjunto de equipamentos, através de uma das seguintes alternativas:

- Transmissão através de interface serial
- Transmissão de interface serial e sinal de PPS
- Transmissão via rede usando o protocolo NTP
- Transmissão de sinal IRIG

6.1 Transmissão de tempo através de interface serial

A utilização de interface serial (normalmente RS232) é a maneira mais simples de transmitir um sinal de tempo, sendo muito utilizada em CLP's e remotas. Neste sistema, uma mensagem de tempo (por

exemplo, uma seqüência do tipo dd/mm/aa hh:mm:ss) é enviada exatamente no início de cada segundo. O problema deste tipo de transmissão é a baixa precisão obtida, pois são usados circuitos dedicados (UARTs) para fazer as transmissões e recepções, que inserem alguns atrasos na identificação de cada sinal recebido. Por exemplo, se enviarmos uma mensagem contendo o horário a cada PPS a 9600 bps, a UART poderá demorar até 6,5 us para receber o primeiro caracter e demorar até 0,1 ms para gerar um interrupção de recepção que pode levar um tempo maior ainda para ser tratada, resultando em uma incerteza de medição da ordem de 1 ms.

6.2 Transmissão de tempo através de interface serial mais um sinal de PPS

Visando diminuir as incertezas de tempo da transmissão serial, alguns equipamentos fazem o uso do sinal de PPS (um pulso por segundo) junto com a mensagem serial para permitir obter a precisão necessária. O PPS é um sinal elétrico com o seu flanco de subida sincronizado à virada do segundo do UTC com uma incerteza da ordem de 100ns.

Neste caso, o equipamento a ser sincronizado deverá ter em duas entradas para leitura tanto do sinal serial como do sinal PPS. Esta forma de transmissão é utilizada pela maioria dos módulos de recepção de sinais GPS utilizados na composição de equipamentos mais complexos, que geram uma série de tipos de sinais de sincronização.

6.3 Transmissão de tempo através do protocolo NTP

Outra maneira de transmitir o tempo para outros equipamentos é através do protocolo NTP que pertence ao pacote TCP/IP e que foi desenvolvido especificamente para sincronizar o tempo entre computadores. Apesar de ainda não ser comum em receptores de GPS, existe uma tendência para seu uso a medida em que os equipamentos disponibilizarem interfaces de comunicação Ethernet, pois esta maneira de sincronizar o tempo permite uma resolução menor que 1 ms e utiliza o mesmo cabeamento da comunicação de dados entre equipamentos.

6.4 Transmissão de tempo através do protocolo IRIG

O protocolo IRIG (Inter-Range Instrumentation Group) é um padrão desenvolvido especificamente para transmissão de tempo, bastante comum no mercado e que permite uma grande precisão temporal (da ordem de 1 microssegundo) desde que seja implementado corretamente.

O IRIG é um protocolo de transmissão serial de tempo baseado em uma portadora com frequência travada no pulso de PPS e que transmite informação

através de pulsos de largura variável, sendo que cada flanco de subida representa um instante exato no tempo.

Tabela 1- Formatos do padrão IRIG:

Formato	Taxa de atualização da informação
IRIG-A	100 milissegundo
IRIG-B	1 segundo
IRIG-D	1 hora
IRIG-E	10 segundos
IRIG-G	10 milissegundos
IRIG-H	1 minuto

Observando a Tabela 1 verificamos que existem vários formatos IRIG, sendo que o mais difundido é o "IRIG-B", pois a sua taxa de atualização é de um segundo, facilmente obtida a partir do sinal PPS gerado pelos receptores de GPS.

O IRIG-B definido pelo Standard 200-95 (2) define um frame de dados com 100 bits, sendo que estes bits podem ter três valores diferentes como mostra a Figura 3.

O valor "P" é utilizado como separação de bytes de dados para definir o início do frame de dados, assim como a posição do pulso PPS dentro do frame.

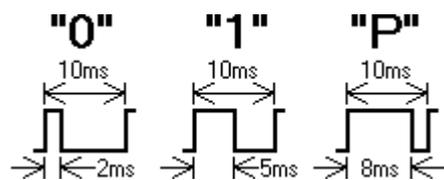


Figura 3 – Sinais que compõem o IRIG

O IRIG-B definido por este Standard transmite informações de dias do ano, hora, minuto e segundo. A informação do ano não estava sendo considerada. Porém como nem todos os bits de informação do frame estavam sendo utilizados, a IEEE redefiniu alguns bits e incluiu a informação do ano e qualidade do sinal sendo transmitido dando o nome a esta norma de IEEE 1344 (3).

Fisicamente o sinal do IRIG pode ser transmitido de duas formas bem diferentes: uma conhecida por DC, onde os pulsos são enviados em pulsos de 0 a 5 volts e outra, mais complexa, onde o sinal é modulado sobre uma frequência maior, e a amplitude da senóide de valor "1" da largura de pulso dos bits transmitidos é 10/3 do valor "0", sendo que a passagem por zero da senóide da portadora representa um instante exato de tempo.

Atualmente o primeiro tipo é mais comum pois é mais fácil de ser gerado e permite uma precisão muito maior quando usada para sincronizar um relógio remoto.

O sinal transmitido sobre uma frequência modulada era interessante, pois permitia que equipamentos pudessem registrar o tempo com uma resolução maior equivalente à frequência da portadora. Isto pode ser útil, por exemplo, em equipamentos como oscilógrafos analógicos, onde o tempo poderia ser gravado junto com o dado registrado, simplesmente fazendo-se o registro das formas de onda do IRIG modulado juntamente com os sinais analógicos.

Até pouco tempo atrás, a transmissão dos sinais de IRIG era sempre realizada com par trançado ou cabo coaxial blindado. Recentemente estão sendo adotadas soluções com fibras ópticas que, se por um lado tem um custo um pouco maior, por outro evitam a interligação elétrica de equipamentos distintos.

Na figura 4 podemos ver uma figura gerada conforme a norma IEEE1344 e com a forma de onda do sinal tipo DC Shift.

7. Cuidados na utilização do protocolo IRIG

Muitos equipamentos são especificados considerando a necessidade de sincronização de tempo através de um sinal IRIG proveniente de um receptor GPS. Neste caso alguns cuidados devem ser tomados para evitar problemas:

- Verificar qual tipo de IRIG será utilizado - A despeito do formato IRIG-B ser o mais largamente utilizado, deve-se considerar que existem os outros formatos IRIG citados, que não são compatíveis entre si.
- Deve-se também tomar cuidado com os formatos IRIG-B DC e IRIG-B modulado que convivem até hoje em alguns tipos de equipamentos.
- Quando se utilizam sinais DC, deve-se também tomar cuidado com a polaridade do sinal (que deve ser a mesma no transmissor e no receptor).
- Por fim, é bom lembrar que alguns equipamentos trabalham com o padrão Standard 200-95, mas em alguns casos são utilizados formatos proprietários para transmissão de outras informações (ano, número de satélites detectados, etc.). Já o padrão IEEE 1344, mais completo, é implementado e utilizado por praticamente todos os novos receptores e equipamentos.

