

DESENVOLVIMENTO DE UM MEDIDOR DE DISTÂNCIA A LASER PARA USO INDUSTRIAL

Antonio Valerio Netto
Alexandre Lourenço Soares
Moisés Sátilio da Silva
José Antonio Otoboni
Mario Antonio Stefani

Opto Eletrônica S.A. - Departamento de Pesquisa & Desenvolvimento
Rua Joaquim A. R. de Souza, 1071 – Jardim Sta. Felícia – São Carlos – SP Cep: 13563-330
E-mail: {valerio, alexandre, moises, otoboni, stefani}@opto.com.br

Resumo

O artigo discorre sobre o desenvolvimento de um medidor de distância a laser para uso industrial que utiliza o método de comparação de fase para proferir a medição. Inicialmente é dado uma noção do equipamento e de onde ele pode ser empregado. Posteriormente, é apresentado uma introdução a esta metodologia e os motivos que a levaram a ser empregada na confecção do protótipo final. Por último, são expostas conclusões adquiridas no decorrer da confecção do equipamento. É importante salientar que o equipamento se encontra no estágio de aprimoração, visando as aplicações industriais.

Palavras-chave: Medição a distância, Laser e Aplicações industriais

1. INTRODUÇÃO

A maioria dos medidores encontrados no mercado atualmente são desenhados para utilização em topografia e na construção civil, isto é, são utilizados para distâncias grandes, de até 10 Km utilizando para isto alvos cooperativos como prismas retro-refletores.

A escolha da arquitetura do medidor foi resultado de uma série de opções, ditadas principalmente pelas condições de uso que o equipamento estará submetido. Algumas das aplicações vislumbradas já possuem equipamentos similares em operação por companhias Alemãs, Suíças e Japonesas. Porém o preço alto, a pouca robustez às condições típicas nacionais e a falta de assistência técnica no país possibilitam o desenvolvimento de uma versão com custo conveniente.

No caso, o medidor de distância a laser usa o método de comparação de fase para estimar a distância. Devido as normas internacionais de equipamentos laser, a potência útil do laser deve permanecer abaixo de 1mW (IEC 825-1). É importante salientar que o feixe laser é visível para permitir que o operador saiba onde está incidindo.

O campo de medição é de 20m, porém em algumas aplicações pode chegar até 100m, desde que o alvo seja cooperativo. Este requisito implica que as frequências utilizadas sejam

suficientes para resolver as ambigüidades presentes. A resolução desejada é de $\pm 20\text{mm}$, porém em algumas aplicações industriais necessita ser de $\pm 1\text{mm}$. O projeto também exige estabilidade eletrônica contra variações térmicas para não produzir efeitos degradantes no valor medido.

O equipamento possui um microprocessador interno capaz de calcular a distância e ainda efetuar funções auxiliares como medição de áreas e volumes, filtrar os resultados contra resultados espúrios, armazenar constantes de calibração e efetuar auto-teste para indicação de algum erro de funcionamento.

O medidor pode ser utilizados em várias aplicações industriais como por exemplo: medição de nível de enchimento de silos de grãos, líquidos, sistemas de enchimento automático; monitoração remota e nível de enchimento de carga em porões de navios graneleiros; medição de largura e comprimento de lingotes e chapas laminadas em siderurgia; medição de extrudados de borracha e plástico; medição de posicionamento para robôs, guindastes, talhas, empilhadeiras automáticas e vagões ferroviários. Também pode ser utilizado para sensoriamento de curso e posição em linhas automáticas de montagem de automóveis e como sensor de presença para limitação de acesso em regiões de segurança.

2. MÉTODOS PARA MEDIÇÃO DE DISTÂNCIA A LASER

Existem diversos métodos para a estimativa de distância por meio de processos ópticos. Alguns destes, tais como o método de triangulação, são originários daqueles utilizados, há muitos séculos, por navegantes e cartógrafos. Outros métodos surgiram com o advento do Radar e do Laser, sendo que alguns destes apareceram a partir da tentativa de aproveitamento das características notáveis da luz laser, tais como os métodos interferométricos (Luxon e Parker, 1985 e Kingslake, 1983).

A escolha do método de funcionamento do medidor é baseada principalmente na finalidade que o medidor se destina. Alguns tipos como o medidor por triangulação são simples e eficientes para distâncias pequenas. Já o medidor de distância por telemetria de pulso é muito utilizado em topografia e usos militares, onde as distâncias são grandes (Maillet, 1987). Para distâncias de até 100m a escolha é mais difícil pois alguns métodos perdem eficiência ou exigem complexidade eletrônica considerável.

Neste projeto foi utilizado o método de medição de distância por comparação de fase. A seguir são expostos os principais pontos que levaram a esta decisão:

- Por exigência de utilização, o laser a ser adotado deve ser visível, para indicar precisamente o ponto onde a medição está sendo feita. Tal exigência impõe que pela Norma a potência não exceda o limite de 1mW a 670nm.
- O método de triangulação não é aplicável pois para distâncias de até 20m o braço do triângulo requerido para a resolução desejado faz com que o aparelho possua dimensões pouco práticas (Stefani, 1995);
- Método interferométrico é por natureza incremental, não medindo distâncias absolutas, o que penaliza a viabilidade na aplicação.
- Ao contrário do que se imagina o sol não pode ser comparado a uma fonte luminosa “DC” no que se diz respeito a geração de ruído óptico. No caso, o sol gera ruído em todas as faixas de frequência. Este ruído limita e interfere no sinal retornante do alvo. Para se ter uma idéia da ordem de grandeza deste ruído, supondo uma potência emitida normalizada em 1 unidade, para uma lente de captação de 5cm, alvo a 20m com refletância lambertiana ~ 0.4 o sinal retornante possuirá potência de $\sim 4.6 \times 10^{-6}$ unidades. Limitando a emissão em 1mW no visível 670nm o sinal cairá na faixa de $\sim 5\text{nW}$. Supondo um medidor por

comparação de fase usando a mesma lente de captação, com um filtro óptico de 70nm de largura de passagem, transmitância de 0.9 com banda de passagem de amplificação de 3KHz, o ruído solar fica na ordem de 20nW a 670nm. O mesmo medidor operando por telemetria de pulso, com resolução de 1ns (~30cm), o ruído solar ficaria na ordem de 12μW.

Pelos resultados observa-se que no método de comparação de fase é exigido um módulo amplificador bem seletivo e capaz de discriminar o sinal dentro de ruídos cerca de 4 vezes maiores. Técnicas como o da retificação síncrona permitem tal amplificação em até 100dB. Já para o método de telemetria de pulsos, o ruído solar é cerca de 600 vezes maior, exigindo potências laser muito mais elevadas.

Neste método é difícil aplicar técnicas de extração de sinais mais sofisticadas, fazendo com que a única solução seja a de aumentar ainda mais a potência do laser iluminador. A grosso modo um laser de 10W pulsado de maneira que a potência média ficasse dentro da Classe II, exigiria pulsos da ordem de 100ns repetidos a 10KHz no máximo. Infelizmente não existem lasers comerciais nesta faixa a não ser no infravermelho.

Para operar lasers de 10W com pulsos de 100ns, correntes de 20 a 50A são necessárias. Para se ter resolução de 1ns o pulso laser deve subir com esta velocidade. Tal exigência impõe circuitos sofisticados de chaveamento, usando transistores de avalanche ou diodos especiais chamados de “*Step Recovery Diodes*” usados em microondas. Além disto, seria possível utilizar lasers infravermelhos na faixa de 1550nm simultaneamente a um laser de 670nm visível para indicar a posição da medida sendo efetuada. Infelizmente um sensor PIN de InGaAl (Índio-Gálio-Alumínio) para operar nesta faixa custa cerca de 10 vezes o preço de um sensor PIN de Silício para a faixa de 400~1000nm.

Para amplificar pulsos de 1ns os amplificadores devem ser muito rápidos. O sensor fotoelétrico também deve ter esta resposta. Os sensores PIN de silício ou InGaAl possuem resposta típica de 3ns para área sensível de 0.1mm². Para respostas melhores sensores de avalanche devem ser utilizados. O inconveniente é que exigem polarização com alta-tensão, entre 150 e 240V, variando bruscamente com a temperatura. Tal fato exige um cuidadoso projeto de um fonte de alta voltagem de maneira a não danificar o sensor.

Como o medidor deve operar com distâncias maiores de que 20m em uso externo, o uso de laser visível de 1mW passa a ser inútil devido ao ofuscamento solar. Nestes casos a alternativa é munir o medidor com uma mira óptica e usar lasers infravermelhos mais potentes na faixa de 1550nm. Se a resolução for baixa, 10ns por exemplo, as exigências eletrônicas começam a diminuir, tornando o medidor mais viável.

Devido a tudo o que foi exposto anteriormente e tendo em vista o objetivo de desenvolver um medidor de distâncias até 20m com laser visível e resolução de 2cm, o método de comparação de fase foi o mais indicado por possuir inúmeras vantagens.

Porém, para distâncias maiores de 20m, uso externo, onde um feixe visível não tem mais finalidade, poderiam ser utilizados lasers infravermelhos pulsados e quando a resolução exigida não for estreita, o método de telemetria de pulsos pode ser viável. Em aplicações especiais como na Siderurgia, onde o ambiente é agressivo e portanto sem o risco de pessoal presente na área, os lasers infravermelhos modulados de 100mW poderiam ser utilizados.

3. MEDIDOR DE DISTÂNCIA POR COMPARAÇÃO DE FASE

Este método consiste em enviar um feixe laser contínuo, modulado de forma senoidal, e comparar a fase da onda emitida, com a fase da correspondente onda de retorno, proveniente do alvo. Um diagrama de blocos típico é mostrado na Figura 1.

O feixe de um emissor laser é modulado senoidalmente por meio de um modulador externo, ou mesmo na alimentação do laser, caso dos lasers semicondutores. O feixe é então colimado e enviado na direção do alvo. Uma pequena parcela do feixe transmitido é desviado para um sensor de referência, fase 0°. A luz refletida pelo alvo é captada através do telescópio coletor e dirigido ao sensor principal, onde o sinal é então amplificado, filtrado, e a sua fase é comparada com a referência.

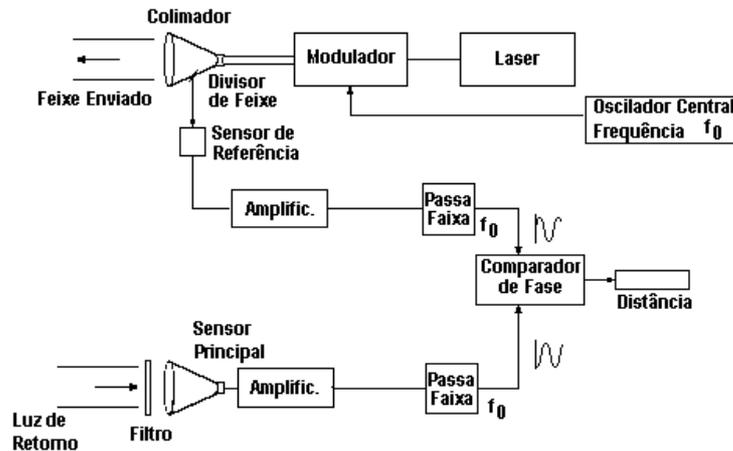


Figura 1. Medidor de distância por comparação de fase (Stefani, 1995).

Se a modulação for efetuada na frequência f , pode-se associar um comprimento de onda de modulação L :

$$L = \frac{c}{f} \quad (1)$$

Onde c é a velocidade da luz no meio. Desta forma, se a distância percorrida for um múltiplo de L , as ondas terão a mesma fase, $\Delta\phi = 0$. No entanto, caso a distância não seja múltiplo, existirá uma diferença de fase $\Delta\phi$, correspondente a uma distância percorrida excedente d . Assim, pode-se estimar que a distância total é:

$$D = \frac{c}{f} \left(\frac{n}{2} - \frac{\Delta\phi}{4\pi} \right) \quad (2)$$

Unicamente pela comparação de fase $\Delta\phi$ não é possível determinar n e conseqüentemente D . Por esta razão, nos medidores comerciais a frequência de modulação f é alterada periodicamente em 2 ou 3 valores distintos de maneira que, através de processamento matemático se encontre uma solução única de $(n, \Delta\phi)$

Algumas peculiaridades deste método, são:

- Devido a modulação do laser ser em uma frequência fixa, não é necessário que a banda de passagem do circuito amplificador seja muito grande, permitindo o uso de filtros sintonizados estreitos. Assim, o nível de ruído captado é menor, viabilizando a utilização de Laser de pequena potência (Stefani, 1995). Para distâncias de até 20m, é comum uso de Lasers com potências ao redor de 10 mW (Chappel, 1978).
- Devido à indeterminação de n , os sistemas mais simples podem ser “enganados”, dependendo da refletância do alvo e da sua distância. Nestes casos, normalmente, são usados 2 ou 3 frequências básicas de modulação, de forma a determinar n . Por exemplo

no sistema laser HP 3850, as frequências usadas são de 15MHz, 375KHz e 3,75KHz permitindo medidas na ordem de 20m, 800m e 80Km respectivamente (Maillet, 1987).

- A velocidade de medida é proporcional a f , e a precisão é proporcional a capacidade de se determinar a diferença de fase $\Delta\phi$ existente. Para isto, tanto o amplificador do sensor de referência, quanto o amplificador do sensor principal, devem ter comportamento em fase muito parecido para evitar erros. Normalmente, são circuitos idênticos mantidos a uma mesma temperatura (Chappel, 1978).
- Para distâncias pequenas o valor de n é zero. Para distâncias ainda menores, o Δ é reduzido, o que dificulta sua detecção. Nestes casos se recorre ao esquema mostrado na figura 2.

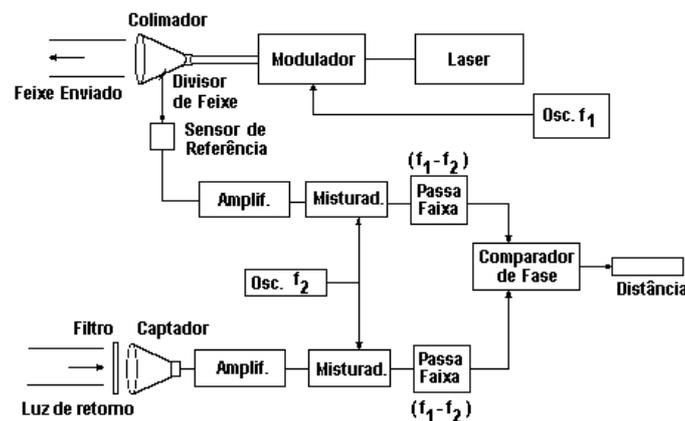


Figura 2. Medidor de distância por comparação de fase transportada (Stefani, 1995).

No esquema mostrado na figura anterior o laser é modulado numa frequência f_1 e enviado ao alvo. Uma fração do feixe refletido no alvo é captado pelo detetor 2. O sinal de cada detetor é misturado (modulado) por um outro oscilador f_2 . Neste ponto, devido a modulação, o sinal resultante possui frequência que é produto da diferença $f_1 - f_2$, ou seja, a frequência de batimento. As frequências f_1, f_2 são escolhidas de forma que a diferença $f_1 - f_2$ permita uma velocidade razoável de processamento. É importante notar que a frequência de batimento $f_1 - f_2$ contém a diferença de fase $\Delta\phi$.

Ao se “misturar” os sinais provenientes dos sensores, mantém-se a informação da defasagem $\Delta\phi$, porém numa frequência $f_1 - f_2$ muito menor, sendo mais fácil e precisa a medida resultante. Em alguns medidores comerciais, a frequência f_1 está em torno de 5 MHz e $f_1 - f_2$ em torno de 80 Hz, resultando num erro aproximado de 2 cm em uma distância de 16 metros (Chappel, 1978).

Como a velocidade de comparação de fase foi do valor correspondente à modulação f_1 para o valor da transportada $f_1 - f_2$, o circuito de detecção de fase é simplificado. Normalmente $f_1 - f_2$ fica na faixa de 60Hz a 4KHz, permitindo o uso de componentes de baixa frequência. A velocidade de medida, no entanto, é diminuída, o que limita o seu emprego em algumas áreas.

4. PRINCIPAIS RESULTADOS

Na montagem do projeto houve a necessidade de separar o *hardware* em módulos para minimizar a contaminação entre os geradores e os canais de amplificação, e o chaveamento da fonte. Tal procedimento também contribuiu para redução de ruídos, pois devido a alta

amplificação necessária para captar o sinal de retorno do alvo é necessário que a parte responsável pela captação do sinal fique blindada e isolada.

O equipamento é constituído por oito módulos:

- Módulo de emissão do laser - é responsável por gerar o sinal modulador, faz a modulação do laser e o controle de potência do mesmo.
- Módulo de captação do sinal - nesse bloco o sinal de retorno do alvo é captado e pré-amplificado.
- Módulo de amplificação - consiste em dois canais, um canal de referência e outro de medição, onde os sinais são modulados para baixa frequência e posteriormente amplificados e digitalizados. Os canais são implementados de forma idêntica para evitar desvio de fase e distorções na medida.
- Módulo digital - faz o processamento da diferença de fase retornando como resultado a medida corrente da distância. Este módulo possui filtros matemáticos e operações de compensação de erros.
- Módulo de saída - recebe o sinal correspondente a medida do módulo digital e aciona saídas externas (*loop* de corrente e relês). Este módulo é necessário para poder-se efetuar a comunicação com outras máquinas industriais.
- Módulo da fonte - responsável pela alimentação de todo o equipamento, com entrada de tensão da rede (AC 220/110 V).
- Módulo óptico de captação - responsável pela captação dos sinais ópticos. Utiliza-se um conjunto de lentes para fazer com que este sinal de entrada concentra no sensor, aumentando assim, a potência luminosa sobre a área detectável do mesmo.
- Módulo óptico de emissão - composto pelo diodo laser e seu conjunto de lentes colimadoras. Foi desenhado para produzir um feixe laser com baixa divergência, suficiente para produzir um ponto luminoso a 20 metros menor que 5 mm.

Após a montagem do equipamento, foi necessário a realização de uma calibração onde por meio do *software* são definidos parâmetros para correção de *offset* na diferença de fase, no índice de propagação da luz, e na eliminação de erros introduzidos por ruídos. Este *offset* se faz necessário para ajustar o ponto origem de início da medição.

Além da calibração, o *software* tem como principais funções: controle dos sinais de saída, armazenamento de medidas, cálculo da área e volume de medidas armazenadas e filtro de medição, este último, para eliminação de medidas não coerentes.

A seguir é mostrado o gráfico do erro médio obtido por meio de 4 aquisições em cada distância. O Alvo foi deslocado entre 0.5m e 13m da bancada onde o medidor estava preso. A distância era levantada por intermédio de um interferômetro. A acurácia obtida foi de $2\sigma = \pm 142\text{mm}$, ainda superior ao desejado. Foi feito uma análise das causas e o resultado demonstrou que a interferência de ruído de fase ainda é elevado produzindo uma distância de calibração. Novamente os módulos eletrônicos estão sendo revistos com o intuito de diminuir estas influências. Numa segunda calibração a acurácia melhorou, foi obtido o valor de $2\sigma = \pm 60\text{mm}$.

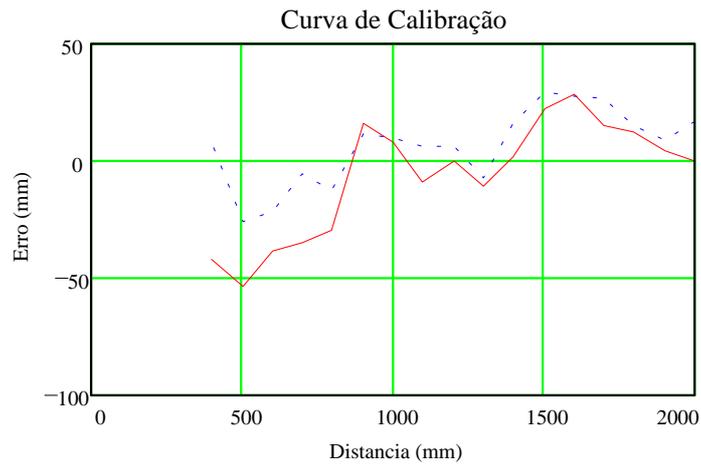


Figura 3 - Curva de Erro Versus Distância do Alvo, obtido pelo medidor de distância.

Na figura a seguir é exibido o formato final do medidor de distância por comparação de fase.



Figura 4 - Vista do medidor de distância por comparação de fase.

4.1 Dificuldades encontradas

Na implementação e calibração do medidor de distância a laser, algumas dificuldades foram encontradas. A seguir são citadas as mais relevantes:

- Por se trabalhar em alta frequência, os amplificadores e misturadores são extremamente sensíveis a problemas de terra e captação de ruídos espúrios. Por isto, todas as montagens foram previamente estudadas com o objetivo adequar as impedâncias nas linhas de alimentação e ao mesmo tempo isolar os circuitos com filtros.
- Os fios de envio de sinais inter-módulos devem ser sempre blindados e trançados para evitar acoplamentos.
- As impedâncias de entradas dos módulos amplificadores e misturadores devem ser sempre baixas e o acoplamento o mais próximo do ideal. Transformadores isoladores e casadores de impedância devem sempre ser utilizados.

- Os componentes típicos como resistores e capacitores devem ser especialmente especificados para possuírem a correta impedância em altas frequências. Capacitores eletrolíticos por exemplo, são inúteis para frequências acima de 100kHz
- Desenho do circuito impresso não foi trivial, demandando uma série de tentativas observando o melhor comportamento com relação a isolação de sinais e ruídos.
- Os osciladores se mostraram muito instáveis, fazendo com que a frequência central variasse o suficiente para causar séria dispersão dos resultados.
- Na parte óptica, houve problemas em ajustar a mesma com relação a mecânica. O posicionamento do sensor no ponto de foco do conjunto de lentes deve ser bem preciso para que não haja perdas de rendimento no acoplamento óptico-eletrônico.

5. CONCLUSÕES

Com a experiência obtida até o momento pode-se notar que existem certos cuidados que devem ser tomados. Constatou-se ainda a necessidade de certos instrumentos e ferramentas para que fosse possível determinar as causas de determinados problemas observados. Esta experiência motivou a programação de compra de certos instrumentos na fase de Engenharia de Produto.

As maiores dificuldades encontradas até o momento se relacionam com o uso de alta frequência, onde a equipe está adquirindo experiência bem como equipamentos e componentes mais adequados.

Por fim, os resultados técnicos obtidos com o projeto mostraram que o medidor é viável, funcionando razoavelmente mesmo com componentes e arquiteturas simplificadas. Acredita-se que com a aquisição de componentes mais adequados e com a experiência de “chão de fábrica” a ser adquirida em breve permitirá supor que futuramente o medidor terá um grande campo de aplicações no mercado industrial.

6. AGRADECIMENTOS

Este projeto tem o apoio da Fapesp dentro do programa de Inovação Tecnológica para Pequenas Empresas.

7. REFÊRENCIA BIBLIOGRÁFICA

Chappel, A.; Härtel, V., 1978, “Optoelectronics Theory and Practice”. McGraw-Hill Book Company.

Kingslake, R., 1983, “Optical System Design”. Orlando. Academic Press, Inc.

IEC 825-1, 1993, “Safety of laser products”. The European Standard EN 60825-1, BSI.

Luxon, J.T.; Parker, D.E. , 1985, “Industrial Lasers and their applications”. New Jersey, Prentice-Hall Inc.

Maillet, H. , 1987, “O Laser, Princípios e Técnicas de Aplicação”. São Paulo, Editora Manole Ltda.

Stefani, M.A., 1995, Medidores de Distância por Triangulação Laser. Tese de Doutorado, Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, outubro.