

## SISTEMAS DE COMUNICAÇÕES ÓPTICAS COERENTES (TUTORIAL)

Mônica de Lacerda Rocha  
Fabiano Roberto Carneiro

CPqD/TELEBRÁS  
DTR/TR-1/SISCOp  
Caixa Postal 1579  
CEP 13085 - Campinas - SP

### RESUMO

Este trabalho aborda aspectos básicos dos sistemas ópticos coerentes, incluindo as opções de transmissão digital que estes oferecem. Apresenta também uma revisão que vem sendo realizada, além de apontar algumas perspectivas e tendências no desenvolvimento de tais sistemas, no Brasil e no mundo.

### 1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de transmissão por fibra óptica em geral empregam a modulação direta da intensidade do sinal óptico, normalmente gerado por lasers semicondutores, e a detecção através de fotodiodos PIN ou a avalanche.

Entretanto, a partir de 1.980, verifica-se um esforço crescente na pesquisa de sistemas que utilizam as propriedades coerentes das portadoras de ondas ópticas. A luz é uma vibração eletromagnética senoidal, de alta frequência, que pode ser modulada - esta é a base das comunicações coerentes em fibras ópticas. Através do seu batimento com uma segunda fonte coerentemente relacionada ao final de um enlace, a fase, frequência ou amplitude do sinal de luz pode ser demodulada, com um aumento na sensibilidade do receptor da ordem de 10 a 20 db, em relação aos sistemas convencionais. Disso resultam maiores espaçamentos entre repetidores e um melhor aproveitamento da capacidade de transmissão de uma fibra monomodo.

Num sistema coerente típico, (Fig.1) o transmissor consiste de uma fonte laser com largura espectral estreita que, em geral, incorpora um isolador óptico. O laser pode ser modulado diretamente ou, então, usa-se um modulador externo. No receptor, o sinal óptico recebido é combinado com o sinal proveniente de um laser na função de oscilador local. Um controle do estado de polarização (óptica) também é necessário para assegurar que os dois sinais estejam polarizados identicamente ao atingirem o detector e sejam, assim, eficientemente misturados.

Em sistemas homodinos (Fig.1), as frequências destes sinais ópticos devem ser as mesmas, enquanto que em sistemas heterodinos (Fig. 1b) devem diferenciar-se de um valor pré-fixado (Frequência Intermediária, FI), o que leva à necessidade de um elo para controle automático da frequência ("Automatic Frequency Control", AFC). Além deste, os sistemas homodino incorporam controladores de fase.

O batimento entre os campos ópticos recebido e local é o elemento chave dos receptores homodinos e heterodinos. Nos primeiros, a diferença de frequência é o zero e o sinal óptico local deve estar o mais próximo possível em fase com o sinal recebido. Assim, a informação transmitida pode ser diretamente recuperada na banda-base. Nos segundos, a FI deve ser, no mínimo, duas vezes superior à largura da faixa do sinal modulado. Em seguida, recupera-se a informação da FI no domínio elétrico, como no caso de demodulação de sinais de microondas.

A Fig.2 apresenta uma comparação gráfica entre um receptor com detecção direta e outro com detecção heterodina. Em princípio, o segundo pode alcançar o limite quântico através do aumento da potência do oscilador local, enquanto que o primeiro requer um APD com baixo ruído e alto ganho. O estado da arte atual para receptores operando nas janelas de 1,3 - 1,5  $\mu\text{m}$  é visto na Tabela 1 [1].

A detecção homodina/heterodina requer um grau de coerência temporal entre a portadora do sinal recebido gerado localmente muito alto.

Com isso é facilitada a tarefa do oscilador local, ou seja, rastrear a frequência, em

detecção heterodina, e a frequência e a fase, no caso de detecção homodina. Atingir esta alta coerência temporal, ou em outras palavras, uma estreita largura espectral, das fontes ópticas (lasers semicondutores, em geral) é a maior dificuldade a ser enfrentada antes que estes sistemas possam ser implementados em bases comerciais [2], [3].

Cabe ainda esclarecer que a notação aqui adotada é a mesma definida por T. Okoshi, no que se refere ao termo "coerente". Assim, os casos em que a portadora é modulada em intensidade, como uma portadora de ruído, não são incluídos na lista de esquemas com demodulação coerente, já que a coerência temporal da portadora não é utilizada. Como exemplo, um sistema heterodino "on-off-Keying" (PCM-OOK) é classificado como um sistema "não coerente", enquanto que sistemas heterodinos "frequency-shift-Keying" (PCM-FSK) e "phase-shift-Keying" (PCM-PSK) são classificados como sistemas coerentes. A tabela 2 sumariza as quatro classes de sistemas de comunicação óptica, segundo Okoshi [4].

## 2. TÉCNICAS DE TRANSMISSÃO DIGITAL

Num sistema coerente o campo elétrico é modulado no transmissor e, devido ao processo de mixagem no fotodiodo, a corrente na saída deste é diretamente proporcional à modulação do campo elétrico. Da teoria eletromagnética, como as equações de Maxwell são lineares em termos de campo elétrico, segue-se que o sistema é linear. Minimizando-se qualquer variação temporal nos parâmetros das fontes ópticas e do fotodiodo, é razoável supor que o sistema é invariante no tempo.

As opções de transmissão digital consideradas para receptores homodinos e heterodinos estão listadas na Fig. 3. A Tabela 3 apresenta os sistemas, em ordem decrescente de desempenho, baseando-se na potência média recebida necessária para uma taxa de erro de  $10E-9$ , além da degradação de desempenho relativa ao sistema binário ótimo, que é o PSK homodino.

O esquema de modulação FSK tem a vantagem de apresentar uma configuração de transmissor simples. O esquema binário PSK é mais eficiente que o anterior, embora seu transmissor seja mais complexo [2], [3].

## 3. ESTUDOS REALIZADOS

A pesquisa em comunicações por fibras ópticas de sistemas heterodinos (ou homodinos) pode ser classificada em três categorias:

- (1). Análises teóricas do sistema, incluindo o transmissor, a fibra e o receptor.
- (2). P&D de dispositivos especiais requeridos em sistemas coerentes, tais como lasers de frequência estabilizada e lasers com espectros purificados, fibras com polarização mantida, controladores do estado de polarização, isoladores ópticos, moduladores coerentes, detectores heterodinos ou homodinos e demoduladores.
- (3). Experimentos de sistemas basicamente quanto ao desempenho (sensitividade x taxa de erro).

Os avanços das pesquisas em sistemas ópticos coerentes têm sido apresentados em artigos e seminários recentes, sendo notável o grande número de publicações nesta área. Na Fig. 4 vê-se uma representação destes sistemas que associa, a cada bloco, as tecnologias mais comumente empregadas por seus elementos. Em todos os casos, é necessário que a largura espectral do laser varie, apenas, de dezenas de Khz a dezenas de MHz, dependendo do formato da modulação e do tipo de receptor. Uma maneira de se obter este valor é através de um laser acoplado a uma cavidade externa, tanto na fonte transmissora quanto no oscilador local.

As Fig. 5 e 6 [1] apresentam circuitos típicos de modulação e demodulação, respectivamente. A uniformidade da resposta em frequência tem sido o maior obstáculo enfrentado em experimentos com modulação direta do diodo laser, DL (FSK). Por outro lado, para moduladores externos, em adição à resposta em frequência, a redução das perdas por inserção é um importante objetivo a ser alcançado.

Quanto ao desempenho dos receptores, observou-se que várias imperfeições degradam sua sensibilidade. Estas incluem efeitos do transmissor tais como largura de feixe excessiva, modulação de amplitude residual e dependência do tipo de modulação; efeitos do receptor tais como perdas por acoplamento,

eficiência do fotodetector, ruído do oscilador local e ruído térmico, efeitos eletrônicos tais como saturação do pré-amplificador, largura de faixa da FI excessiva e demodulação da FI imperfeita. Verificou-se que alguns desses efeitos podem ser reduzidos pelo uso de fotodetecção dual balanceada, o que permite um melhor aproveitamento da potência do oscilador local, reduz a intensidade de ruído deste e previne a saturação no pré-amplificador.

Apesar das técnicas usadas na recepção, para taxas de bits superiores a 100Mb/s os melhores resultados ainda não se aproximaram do limite teórico. Presume-se que isso se deva, em grande parte, à limitação da potência disponível no oscilador local, sendo que, em receptores do tipo PIN FET, a potência do ruído térmico na saída do estágio da FI aumenta, aproximadamente, com o cubo da largura de faixa do receptor.

O problema do ruído térmico tornou-se um incentivo à P&D de receptores homodinos, onde a largura de faixa pode ser inferior à requerida nos receptores heterodinos. Contudo, o sincronismo dos formatos de modulação exige que a fase do oscilador local seja amarrada à fase do sinal recebido, o que demanda sinais ópticos ainda mais estreitos e aumenta dificuldade de implementação desse sistema.

Com relação ao efeito das fibras, medidas recentes indicaram que na saída de fibras de longas distâncias a polarização varia com o tempo e as condições da fonte. Vários esquemas têm sido propostos, sendo que alguns são capazes de ajustar a polarização continuamente ao longo de defasagens múltiplas de  $2\pi$ . Em sistemas ópticos coerentes, o controle do estado de polarização é essencial para que as frentes de onda dos sinais recebido e local cheguem perfeitamente casadas nas entradas do acoplador óptico monomodo.

Sob o ponto de vista prático, existem duas maneiras de se compensar uma mudança no estado de polarização. Ópticamente, a combinação de uma lâmina de um quarto de onda com outra de meia onda em uma fibra de retardo, ou em algum dispositivo eletro-óptico pode, potencialmente, realizar a compensação. Eletricamente, a diversidade de polarização realiza a compensação de polarização necessária. Um exame preciso da aplicabilidade dos métodos existentes é um item que requer, ainda, muita atenção dos pesquisadores.

Outro aspecto relacionado ao meio transmissor é a distorção na forma de onda devida à dispersão cromática na fibra. Esta provoca uma variação na velocidade de grupo das frequências ópticas, o que faz com que sinais ópticos modulados sejam distorcidos, mesmo quando o diodo laser possui uma coerência considerável suficiente. Em detecção heterodina, a diferença no atraso da propagação cromática pode ser compensada por um circuito elétrico na faixa da FI [1], [2], [3].

#### 4. CONCLUSÕES

O desenvolvimento de sistemas de transmissão altamente velozes tem resultado no progresso recente de lasers semicondutores com grande coerência (Fig.7). Em consequência, a detecção óptica heterodina/homodina, multiplexações por divisão em frequência ("frequency-division-multiplexing", FDM) óptica de altas densidades e outras tecnologias avançadas têm sido desenvolvidas para uso em futuras redes de telecomunicações.

Como mostra a Fig. 8, a capacidade (em bits/s \* Km) dos experimentos ópticos heterodinos aproxima-se rapidamente dos dados obtidos previamente em detecção direta.

As metas da pesquisa mundial focalizam as três áreas indicadas na Fig. 9: longos espaçamentos entre repetidores, transmissão em alta velocidade e multiplexação óptica densa. A área hachurada mostra o estado da arte atual e o cubo representa a meta da pesquisa futura. A tecnologia "chave" para longos espaçamentos e transmissão em altas taxas de bits é a detecção óptica heterodina/homodina, e para a multiplexação óptica densa é o FDM óptico.

Atualmente os trabalhos sobre sistemas coerentes apresentam linhas de atuação razoavelmente definidas. De um modo genérico, nota-se uma tendência dos pesquisadores norte-americanos em concentrar esforços no desenvolvimento de sistemas heterodinos PSK e DPSK. Por outro lado, os pesquisadores japoneses tendem a desenvolver sistemas heterodinos FSK. Na Europa, em especial na Alemanha Ocidental e Inglaterra, tenta-se resolver os problemas associados a redes e sistemas coerentes de multicanal.

No Brasil, professores e estudantes da FEE/UNICAMP realizam estudos na área e, no início de 1.987, o CPqD/TELEBRÁS, também dando início à pesquisa de sistemas ópticos coerentes, apresentou um relatório contendo uma revisão de trabalhos publicados. A seguir, formou-se dentro do Grupamento de Sistemas de Comunicações Ópticas, SISCOp, uma equipe encarregada de realizar protótipos exploratórios visando o desenvolvimento de um sistema óptico coerente com capacidade de transmissão de 1,4 Gb/s. No início de 1.988 foi publicado um segundo relatório contendo os objetivos e especificações da experiência piloto, um sistema heterodino FSK, com taxa de transmissão de 140 Mb/s, lasers DFB e detecção monofiltro, dentre outras características (Fig.10). A realização desse experimento demanda o cumprimento de várias etapas, o que não permite que se estabeleça, a priori, um prazo exato para sua conclusão [5].

#### REFERÊNCIAS

- [1] K. Nosu, "Advanced Coherent Lightwave Technologies", IEEE Communications Magazine, Vol.26, No. 2, pp. 15-21, Feb. 1988.
- [2] M. L. Rocha, "Sistemas Ópticos Coerentes - Relatório Preliminar" CPqD/TELEBRÁS/DTR/CATD, Abril de 1987.
- [3] Vários autores, SPECIAL ISSUE ON COHERENT OPTICAL COMMUNICATION, Journal of Lightwave Technology, vol. LT-5. No. 4, Apr. 1987.
- [4] T. Okoshi, "Recent Progress in Heterodyne/Coherent Optical-Fiber Communications", Journal of Lightwave Technology, Vol. LT-2, No. 4, pp. 341-346, Apr. 1984.
- [5] D. Meira, F. R. Carneiro, H. M. B. Carvalho, H. J. M. Alcântara, M. M. Iramina e M. L. Rocha, "Objetivos, Requisitos e Características da Primeira Experiência Piloto em Modulação Coerente" , CPqD/TELEBRÁS/DTR/CATD, Abril de 1988.

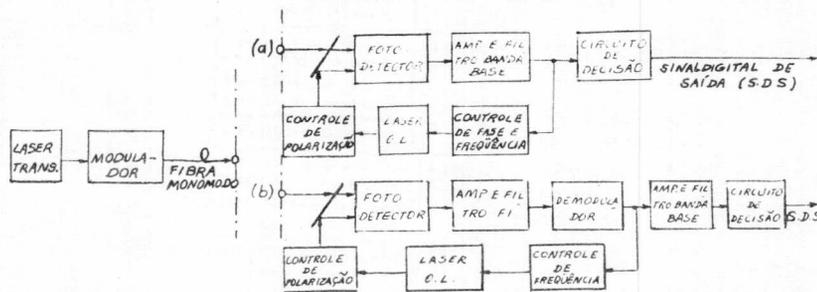


Fig.1 - Diagrama em blocos de um sistema óptico de transmissão coerente com: (a) Receptor do tipo Homodino e (b) Receptor do tipo Heterodino.

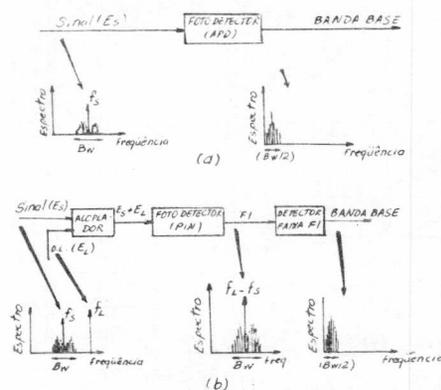


Fig.2 - Diagrama em blocos de um receptor óptico : (a) com detecção direta e (b) com detecção heterodina.

COMPARAÇÃO DA SENSITIVIDADE DO RECEPTOR (1,3 - 1,5 μm)		
MODULAÇÃO/DEMODULAÇÃO	LIMITE TEÓRICO	ESTADO DA ARTE ATUAL
HOMODINO PSK	9 fótons/bit	34 fótons/bit
HETERODINO PSK	18 fótons/bit	45 fótons/bit
INTENSIDADE MODULADA (IM) E DETECÇÃO DIRETA (DD)	10 fótons/bit	1000 fótons/bit

Tabela 1 - Estado da arte atual e limite dos receptores ópticos.

	COERENTE	NÃO - COERENTE
HETERODINO	POSSÍVEL (PCM - FSK) (PCM - PSK)	POSSÍVEL (PCM - OOK) (PCM - IM)
NÃO - HETERODINO	IMAGINÁVEL, MAS NÃO PRÁTICO	IMPRÁTICO

Tabela 2 - Classificação dos vários esquemas de comunicações ópticas com Demodulação Heterodina (incluindo a Homodina) e/ou Coerente.

SISTEMA	SENSITIVIDADE DO RECEPTOR RELATIVA AO SIST. HOM. PSK COM BER=10 <sup>-9</sup> [dB]
HOMODINO PSK	0,0 (REF.)
HOMODINO ASK	3,0
HETERODINO PSK COER.	3,0
HETERODINO DPSK	3,5
HETERODINO FSK COER.	5,2
HETERODINO ASK COER.	6,0
HETERODINO FSK NÃO-COERENTE	6,5
HETERODINO ASK NÃO COERENTE	6,5

Tabela 3 - Desempenho dos sistemas baseado na potência média recebida

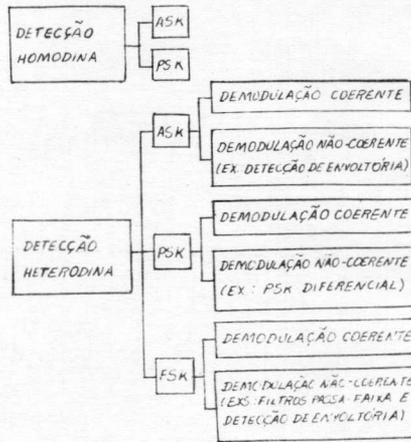


Fig.3 - Opções de Transmissão Digital.

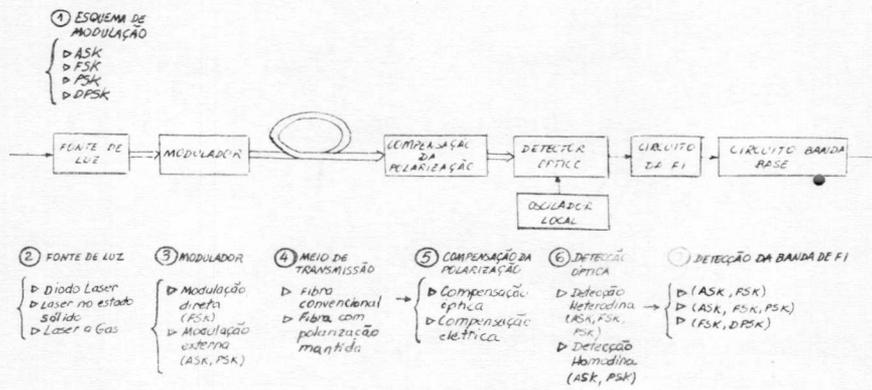
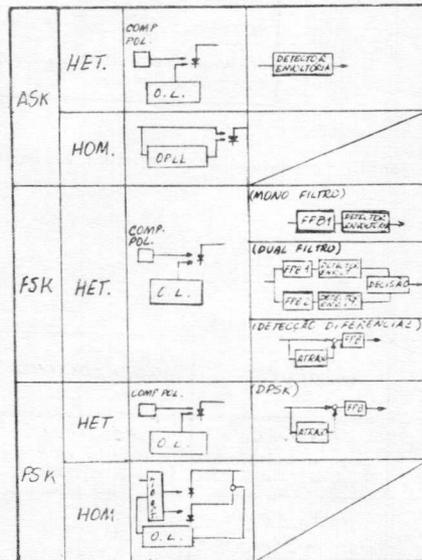


Fig.4 - Diagrama em blocos dos sistemas de transmissão coerente.

ESQUEMA DE MODULAÇÃO	DISPOSITIVO DE MODULAÇÃO	CIRCUITO DE MODULAÇÃO
ASK (OOK)	MODULADOR ELETRO-ÓPTICO (E-O)	
	DL COM INJEÇÃO AMARRADA	
	MODULAÇÃO DIRETA	
FSK	MODULAÇÃO DIRETA	
	MODULADOR E-O	
PSK	MODULADOR E-O	
	DL COM INJEÇÃO AMARRADA	

Fig.5-Transmissores ópticos para transmissão óptica coerente.



EBB: FFB = FILTRO PASSA BAIXA  
OPLL = "OPTICAL PHASE LOCKED LOOP"

Fig.6-Receptores ópticos para transmissão óptica coerente.

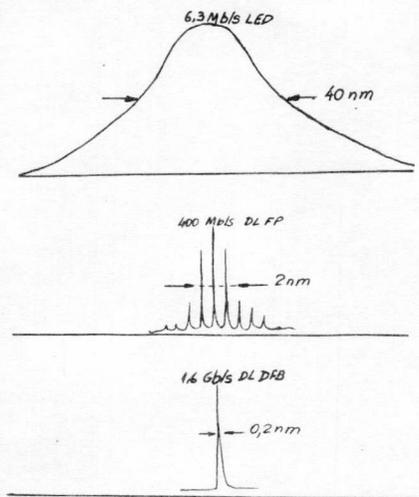


Fig. 7 - Espectro de fontes de luz semi condutoras.

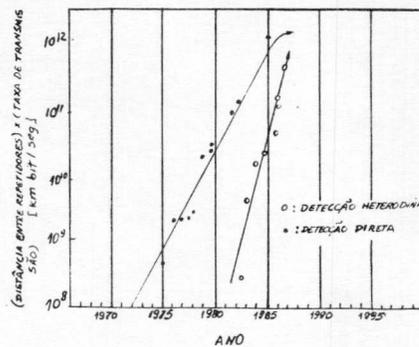


Fig. 8 - Progressos recentes na tecnologia de transmissão óptica em altas velocidades.

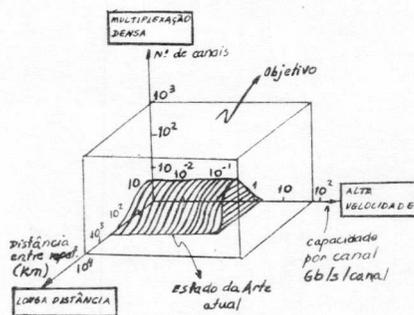


Fig. 9 - Metas da pesquisa em comunicações ópticas coerentes.

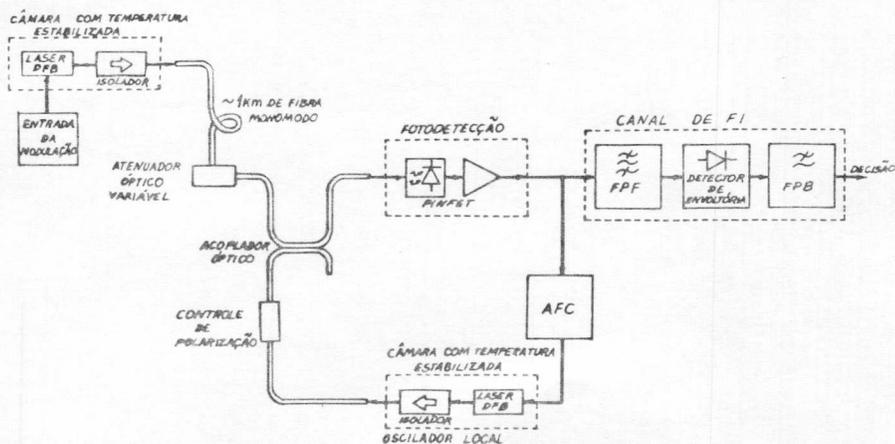


Fig. 10 - Sistema Heterodino FSK : Experiência Piloto.