

Técnicas de Extracção Óptica de Relógio

Pedro Tavares, J. Ferreira da Rocha, L. Botelho Ribeiro

Resumo - Com o esperado aumento do tráfego e a consequente procura de maiores ritmos de transmissão, as redes de telecomunicações baseadas em fibra óptica integram progressivamente novos sistemas operando exclusivamente no domínio óptico, evitando, assim, a conversão para o domínio eléctrico. Os módulos para extracção totalmente óptica de relógio são de especial importância, porque o sinal por eles gerado contém a informação de sincronismo necessária ao correcto funcionamento de procedimentos fundamentais, tais como a demultiplexagem e a regeneração 3R. Neste artigo identificam-se várias propostas que visam a recuperação óptica de relógio, dando um ênfase particular às que recorrem ao comportamento pulsado dos lasers semicondutores. Analisam-se, também, os mais recentes resultados relativos a experiências de transmissão recorrendo à técnica OTDM.

Abstract - With the increasing traffic and consequent demand for higher bitrates, optical telecommunications networks include new systems operating exclusively in the optical domain, thus avoiding the optical to electrical conversion. Modules implementing the procedure of all-optical clock recovery are of extreme importance because the produced signal has all the synchronisation information needed for the correct operation of fundamental procedures like demultiplexing and 3R regeneration. In this paper several techniques that implement the all-optical clock recovery procedure are identified. Main attention is given to those that use self-pulsation lasers. Most recent results concerning to transmission in OTDM networks are also reported.

I. INTRODUÇÃO

Os anos recentes têm testemunhado a necessidade de aumentar a capacidade de transmissão das redes em geral e das de suporte muito em especial. Tal facto deriva do constante aparecimento de novos serviços de telecomunicações, do crescimento exponencial dos serviços de dados, nomeadamente o acesso à Internet e da necessidade que os seres humanos têm de cada vez mais comunicarem uns com os outros, num mundo cada vez mais global. Neste contexto é possível, de forma imediata, identificar as técnicas de multiplexagem por divisão no tempo (TDM) ou no comprimento de onda (WDM), como elegíveis para aumentar a largura de banda disponível. O WDM consiste na transmissão de informação em

comprimentos de onda não sobrepostos. No entanto, as redes WDM com um grande número de comprimentos de onda, propagando-se com potências elevadas através de fibras de dispersão deslocada (DSF), podem levar a uma degradação significativa do sistema devido às não linearidades da fibra. O TDM é uma técnica que tem provas dadas, desde há muito tempo, nos sistemas que operam no domínio eléctrico (ETDM). No entanto, o seu equivalente para redes ópticas (OTDM) é normalmente preferido face ao WDM, uma vez que existem sistemas comerciais WDM "chave na mão". O OTDM continua a motivar várias equipas de investigação, uma vez que existe a consciência de que para atingir ritmos acima dos Tbit/s será necessário conjugar as duas tecnologias.

Um sistema ETDM difere de um sistema OTDM no que diz respeito ao domínio em que se efectua o processamento do sinal. No primeiro caso o emissor é constituído por uma única fonte óptica e um modulador óptico rápido que é electricamente excitado pelo sinal multiplexado. Depois da transmissão o sinal é detectado por um fotodetector rápido e a operação de demultiplexagem é feita no domínio eléctrico. Numa rede em anel, cada nó tem que estar apto a processar os seus próprios sinais e os pertencentes aos outros nós. A velocidade de operação necessária para o processamento eléctrico do sinal num sistema ETDM é, consequentemente, proporcional ao produto do número de nós pelo ritmo de transmissão de cada um. Num sistema OTDM tal como o WDM, cada nó processa sinais no domínio eléctrico apenas numa largura de banda restrita. Apesar de não ser um capítulo exclusivamente dedicado ao estado da arte, frequentemente aparecerão referências aos últimos avanços tecnológicos alcançados na transmissão OTDM e WDM, bem como as novidades mais recentes em sincronismo óptico e recuperação de relógio.

II. RELATOS DE TRANSMISSÃO OTDM

Apesar de actualmente muito esforço de investigação estar concentrado na técnica WDM, vários grupos continuam a reportar experiências laboratoriais que demonstram a capacidade da técnica OTDM. Mais recentemente é notória a convergência entre as duas técnicas para alcançar os elevados ritmos de transmissão previstos para as redes do futuro.

Em finais de 1987 surge o primeiro relato de um sistema OTDM em que o ritmo de transmissão envolvido não tinha ainda sido alcançado em sistemas eléctricos semelhantes. O sistema OTDM proposto garantia a transmissão de quatro canais de 4Gbit/s cada em 8km de fibra óptica com uma taxa de erros (BER) inferior a 10^{-9} [1].

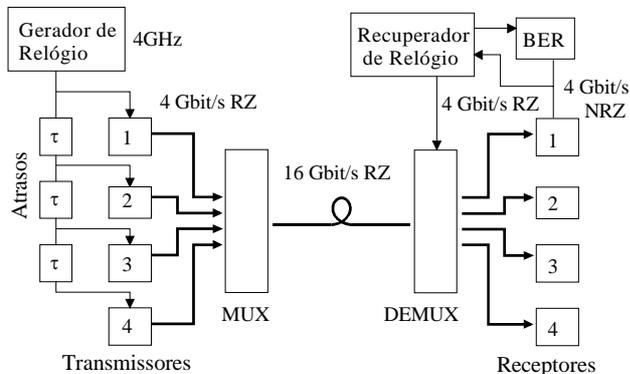


Fig. 1 - Sistema OTDM de 16Gbit/s [1].

Neste sistema, esquematicamente ilustrado na Fig. 1, cada emissor incluía um laser de $1.3\mu\text{m}$ operando em ML activo que gerava pulsos ópticos de 15ps e um modulador de intensidade Ti:LiNbO_3 para codificação dos dados progressivamente atrasados. As quatro seqüências de sinais RZ a 4Gbit/s eram de seguida multiplexadas de forma passiva recorrendo a uma estrutura em árvore de acopladores de potência de 3dB. No receptor, o sinal óptico de 16Gbit/s é separado nos quatro canais originais com a ajuda de um desmultiplexer passivo, sendo cada canal convertido para o domínio eléctrico através de um fotodíodo. O sinal de relógio é extraído da seqüência eléctrica recuperada através de uma PLL eléctrica e injectado no desmultiplexer para controlar o processo de desmultiplexagem [1].

Num outro relato, usou-se uma configuração diferente para gerar a seqüência de dados multiplexada. O sistema era constituído por um único laser de $1.55\mu\text{m}$ operando em ML activo com cavidade externa que gerava pulsos ópticos com 14ps a 5Gbit/s, de seguida amplificados num EDFA. Cada seqüência de pulsos foi codificada individualmente com dados pseudo-aleatórios a 5Gbit/s usando um modulador *Mach-Zender*. Os quatro sinais RZ gerados, depois de devidamente atrasados, foram injectados num multiplexer passivo. A seqüência de 20Gbit/s, após transmissão em 205km de fibra com dispersão deslocada (DSF) foi desmultiplexada com o auxílio de dois moduladores *Mach-Zender* numa configuração apropriada e um circuito de relógio baseado numa PLL eléctrica [2].

Nos dois trabalhos anteriormente descritos, o procedimento de recuperação do sinal de relógio era efectuado no domínio eléctrico, após a seqüência

individual ter sido desmultiplexada e detectada com o auxílio de um fotodíodo. Este procedimento foi possível enquanto os ritmos envolvidos eram compatíveis com a largura dos componentes electrónicos utilizados. Com o aumento do ritmo de transmissão, este procedimento passou a ser realizado exclusivamente no domínio óptico, existindo diversas propostas para a sua implementação, cujo conteúdo será descrito nas próximas secções.

As contribuições produzidas por grupos de investigação no seio do operador japonês NTT são uma referência importante nesta área, não só pela qualidade e inovação, mas também pelo ritmo de produção de novos resultados. Como corolário desta ideia refira-se que o estado da arte em transmissão OTDM e OTDM/WDM são pertença daqueles grupos e serão referidos mais adiante com algum pormenor.

Em Fevereiro de 1996 o grupo liderado por *S. Kawanishi* demonstra a transmissão de um sinal OTDM de 100Gbit/s em 560km de fibra com dispersão controlada. Este é um trabalho de referência obrigatória, porque incorpora vários sub-sistemas inovadores que foram investigados individualmente e porque serviu de base a sucessivos melhoramentos. O emissor opera no modo ML activo, sendo constituído por um troço de fibra dopada com érbio em anel, um modulador LiNbO_3 externo que induz o bloqueio dos modos, uma linha óptica de atraso variável e um filtro óptico passa-banda sintonizável. A largura dos pulsos varia entre 3 e 3.5ps e o seu comprimento de onda entre 1550 e 1557nm, dependendo do ajuste do comprimento de onda central do filtro óptico [3].

A codificação dos dados é realizada, como habitualmente, recorrendo a um modulador de intensidade. Nesta experiência ajustou-se a taxa de geração de pulsos a 6.3GHz e o comprimento de onda a $1.553\mu\text{m}$. A seqüência de dados multiplexada era constituída por 16 canais de 6.3Gbit/s resultando no ritmo de transmissão de 100Gbit/s já referido. Os 560km de fibra estavam divididos em sete troços tendo, cada um, 80km de fibra monomodo DSF, existindo ainda entre cada troço um EDFA e um filtro passa-banda. Para suprimir o alargamento espectral dos pulsos, cada troço de 80km era constituído por uma secção de fibra com dispersão normal seguida de uma secção de fibra com dispersão anormal.

Depois de viajar na fibra o sinal de 100Gbit/s foi dividido e seguidamente introduzido numa malha óptica de sincronismo de fase (PLL óptica) para recuperar o sinal de relógio a ser distribuído ao desmultiplexer. A PLL óptica faz uso do conceito de FWM num SLA, enquanto o desmultiplexer opera baseado no mesmo conceito, mas num anel de fibra com polarização controlada. Os autores referem ainda que, para estender a distância para valores acima de 1000km, é necessário considerar a influência da dispersão de ordem superior da fibra que provoca uma

distorção no formato do pulso e leva ao aparecimento de interferência entre símbolos (IES) [3].

Pouco tempo depois, a mesma equipa anuncia a transmissão de um sinal OTDM de 400Gbit/s em 40km de fibra usando pulsos ópticos de 980fs, em que o sinal de 400Gbit/s resulta da multiplexagem de 40 canais de 10Gbit/s cada. A configuração base do sistema não difere muito da descrita anteriormente, no entanto, foi necessário ajustar o emissor laser, a PLL óptica e o demultiplexer óptico para este novo cenário. O declive da dispersão foi compensado para suprimir a distorção dos sinais usando um troço de fibra apropriada (DSCF) [4].

O estado da arte em transmissão OTDM foi apresentado em Abril de 1998 por *M.Nakazawa et al.* também da NTT. O sistema apresentado transmite um sinal OTDM de 640Gbit/s numa distância de 60km usando pulsos ópticos de 400fs. A fonte de pulsos ópticos de 3ps a 10GHz era um laser de fibra operado em ML activo a 1.552 μ m. Os pulsos foram seguidamente modulados por intensidade a 10Gbit/s com uma PRBS de $2^{15}-1$ e comprimidos para 250fs. O sinal OTDM foi gerado por multiplexagem passiva de 64 canais de 10Gbit/s, mas devido à limitação de largura de banda do EDFA de saída do emissor, os pulsos desta sequência sofreram um alargamento para 400fs [5].

Nesta experiência, os 60km de fibra foram divididos em dois troços, o primeiro com 34.7km e o segundo com 28.6km, ambos constituídos por diferentes tipos de fibras: monomodo normais (SMF), fibra com compensação do declive da dispersão (DSCF) e fibra de dispersão deslocada (DSF). A distância máxima de transmissão está limitada pela dispersão da polarização do modo óptico bem como pela dispersão de terceira ordem. A desmultiplexagem do sinal de 640Gbit/s para 10Gbit/s foi efectuada usando um NOLM (*Non Linear Optical Loop Mirror*) com 450m de fibra controlado por um sinal de relógio gerado por uma PLL óptica [5].

No relato anterior verificou-se que a dispersão da polarização do modo (PMD) foi o factor mais limitativo no que se refere à distância de transmissão. De facto, quando o ritmo de transmissão excede os 300Gbit/s é difícil alcançar distâncias maiores que 100km. Optimizando o sistema previamente demonstrado, *M.Nakazawa et al.* reportam a transmissão de um sinal de dados a 320Gbit/s em 120km de fibra com dispersão controlada. As dispersões de segunda e terceira ordem da fibra de transmissão foram completamente compensadas com uma combinação de fibra monomodo de 1.3 μ m e fibra com compensação do declive da dispersão [6].

Um passo importante com vista à disponibilização comercial dos sistemas passa pelo seu teste em cenários reais, abandonando assim as condições laboratoriais. Uma experiência interessante foi reportada em 1997 e refere-se

a uma rede de acesso local OTDM com comutação de pacotes a funcionar a 100Gbit/s instalada na Universidade de *Princeton* [7]. Outro relato importante é um protótipo de um sistema OTDM a 120Gbit/s em que quatro canais de 20Gbit/s e um de 40Gbit/s, modulados independentemente, foram transmitidos em 160km de fibra DSF [8].

A convergência gradual entre o WDM e o OTDM proporciona o aumento do ritmo de transmissão para valores acima dos Tbit/s. Para estas velocidades, no entanto, o problema da dispersão limita a distância em que os sistemas podem operar com BER aceitáveis.

A taxa de transmissão mais elevada até hoje reportada num sistema de OTDM/WDM é de 1.4Tbit/s em 50km de fibra, num sistema de sete canais WDM espaçados de 600GHz, cada um transportando um sinal OTDM de 200Gbit/s. O sinal de relógio necessário para controlar a desmultiplexagem dos sinais OTDM de 200Gbit/s foi efectuada usando uma PLL óptica [9].

A distância máxima reportada num sistema OTDM/WDM foi de 89km com uma taxa de transmissão de 1.04Tbit/s. O sistema possuía treze canais WDM, cada um com 80Gbit/s de sinal OTDM com polarização alternada [10]. A título de curiosidade refira-se que o estado da arte em transmissão WDM encontra-se em 700Gbit/s numa distância de 2212km [11].

III. ESTRATÉGIAS DE RECUPERAÇÃO TOTALMENTE ÓPTICA DE RELÓGIO

Em sistemas de transmissão OTDM de elevada velocidade é necessário extrair um sinal de relógio da sequência de dados óptica recebida. As formas de implementar este procedimento dividem-se tipicamente em três categorias: malha óptica de sincronismo de fase (OPLL), circuitos ópticos tanque e sincronismo por injeção em lasers autopulsantes. Esta secção trata, de forma breve, as duas primeiras categorias, enquanto que a terceira, pela sua importância, será abordada numa única secção.

A. Malha óptica de sincronismo de fase (OPLL)

No sistemas eléctricos que implementam o procedimento de recuperação de relógio é comum a utilização de uma PLL, mas para o domínio óptico, o mesmo conceito só é anunciado em 1988. Foi proposta uma PLL óptica em que o ganho de um SLA é modulado por um sinal de relógio eléctrico, para detectar a diferença de fase entre o sinal e o relógio [12].

Posteriormente foi proposta uma nova configuração em que se utiliza o efeito da modulação óptica do ganho num SLA para detectar a diferença de fase entre a sequência

óptica de entrada e os pulsos ópticos de relógio [13]. Esta configuração foi usada com sucesso na recuperação de um sinal relógio de 6.3GHz de um sinal OTDM a 50Gbit/s [14].

A Fig. 2 mostra a configuração da PLL proposta. A correlação cruzada entre o sinal óptico de entrada e o sinal de óptico de relógio é obtida num SLA através da modulação óptica do ganho. O sinal de erro resultante da correlação cruzada é devolvido ao VCO para fechar a PLL.

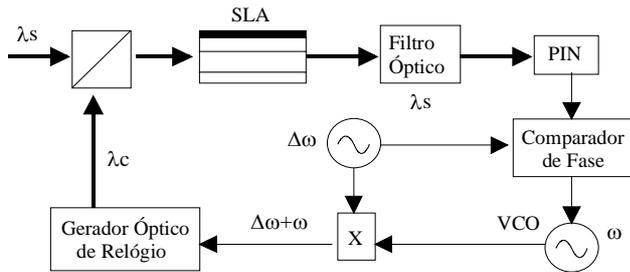


Fig. 2 - PLL óptica usando um SLA como detector de fase.

Recentemente foi demonstrada uma nova configuração da PLL em que um SLA é usado como detector de fase e a componente de correlação cruzada entre o sinal óptico e o relógio óptico é detectada como um sinal FWM gerado no SLA. A figura seguinte ilustra a configuração esquemática de uma PLL baseada no FWM de SLA. Os impulsos do sinal óptico e do relógio óptico são combinados e injectados num SLA para gerar uma componente de FWM em λ_{FWM} que contém a correlação cruzada entre o sinal óptico e o sinal de relógio óptico. O sinal FWM gerado é filtrado e detectado num fotodíodo e o sinal de diferença de fase é depois devolvido ao VCO. Uma vez que o processo de FWM oferece tempos de resposta abaixo dos picosegundos é fácil de extrair o relógio de sinais com taxa de transmissão, B_c , próximo de 100Gbit/s. Nesta configuração não é necessário que o relógio opere à frequência da taxa de transmissão do sinal, podendo usar-se sub-harmónicos da frequência (B_c/n). Neste caso, um relógio com frequência B_c/n é directamente recuperado do sinal multiplexado [15].

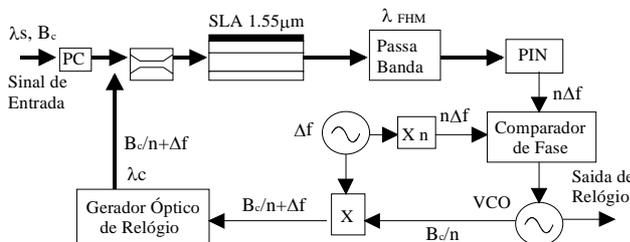


Fig. 3 - Configuração esquemática de uma PLL óptica baseada em FWM.

Este tipo de PLL foi usada com sucesso na recuperação de um sinal de relógio de 6.3GHz de um sinal TDM a 100Gb/s [16].

B. Circuitos ópticos tanque

A extracção totalmente óptica do sinal de relógio de uma sequência de dados RZ pode ser efectuada usando um circuito óptico tanque com uma configuração simples e que pode operar a elevadas velocidades. Na Fig. 4a) o sinal óptico criado por modulação de intensidade RZ contém numa componente espectral contínua e componentes espectrais discretas, ou seja, a frequência óptica da portadora f_0 e as componentes laterais, $f_0 \pm B_c$, $f_0 \pm 2B_c$, onde B_c é a taxa de transmissão.

A extracção totalmente óptica de relógio é conseguida extraindo a frequência da portadora e as componentes de relógio $f_0 \pm B_c$ com um filtro óptico periódico realizado usando uma cavidade óptica que tem picos de transmissão de potência, como mostrado na Fig. 4b). O intervalo entre picos é denominado por *Free Spectral Range* (FSR) e é dado pelo inverso do tempo de ida e volta da cavidade. Quando um sinal óptico RZ é injectado na cavidade, as componentes espectrais discretas, f_0 e $f_0 \pm B_c$ são transmitidas se forem satisfeitas seguintes condições: 1) um dos picos de ressonância da cavidade estar ajustado para a frequência central da sequência de dados óptica injectada e 2) o FSR da cavidade ser igual à taxa de transmissão dos dados. Nestas condições obtém-se o espectro da Fig. 4c), que no tempo corresponde a uma sequência de impulsos ópticos separados pelo período de bit, isto é, o sinal de relógio.

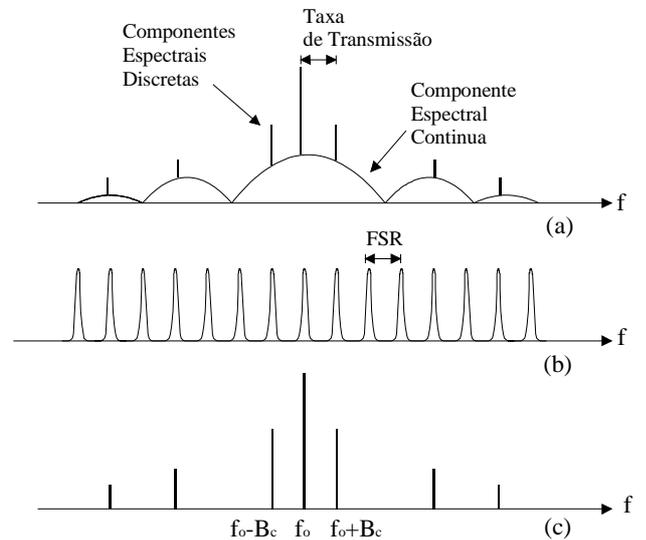


Fig. 4 - Recuperação óptica de relógio com circuito tanque.

Esta técnica foi demonstrada para ritmos de 2GHz mas o princípio de operação pode ser estendido a frequências de relógio maiores [17].

IV. SINCRONISMO POR INJEÇÃO EM LASERS MULTICONTACTO

Os trabalhos de *M.Jinno et. al.* são normalmente referenciados como sendo os primeiros que demonstram a recuperação totalmente óptica do sinal de relógio recorrendo a lasers autopulsantes. Em 1989 reportam a demonstração experimental de um sistema regenerador temporal óptico de 200Mbit/s no comprimento de onda dos 1.55 μ m. O sistema consiste em dois lasers DFB de 3 secções, polarizados de forma a apresentarem auto-pulsação e biestabilidade. Estas duas propriedades não lineares dos lasers DFB multicontacto são criadas pela introdução de um absorvedor saturável na cavidade [18].

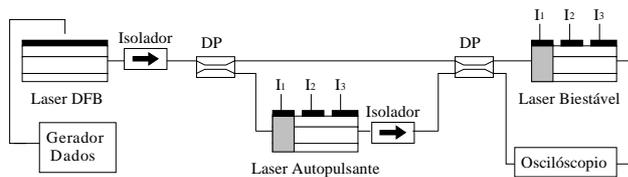


Fig. 5 - Montagem experimental simplificada do circuito regenerador temporal [18].

Na Fig. 5 a região a cinzento actua como um absorvedor saturável quando polarizada com uma pequena corrente de injeção, I_1 e as duas outras secções actuam como meio de ganho para valores suficientes das correntes de injeção I_2 e I_3 . Controlando a corrente I_1 o laser pode exibir um comportamento autopulsante ou biestável e controlando a corrente I_3 a frequência de auto-pulsação varia de 190 a 201MHz. Quando uma sequência óptica de dados, com frequência de relógio está perto da frequência de auto-pulsação livre do laser, é injectada no dispositivo, verifica-se que a frequência de auto-pulsação é sincronizada com a frequência do relógio do sinal óptico injectado e a saída é um sinal óptico de relógio sincronizado com a sequência de dados de entrada.

As medidas efectuadas indicaram que, para um padrão fixo de sinais ópticos de entrada, os intervalos de sincronismo aumentavam com a potência de entrada e a fase relativa dos pulsos de relógio de saída para o sinal de entrada variavam de $\pm 90^\circ$ centrados na frequência de auto-pulsação livre de 200MHz. Também foi relatado que se o nível de potência e a frequência dos dados de entrada fossem constantes, a fase relativa dos pulsos de relógio de saída variava dependendo do tipo de sinal injectado [18].

Para evitar a geração deste *jitter* temporal associado aos diferentes tipos de sinais, a frequência de auto-pulsação livre deve estar o mais próximo possível da frequência de relógio dos dados de entrada.

Na montagem experimental a sequência óptica RZ de 200Mbit/s, produzida por um laser DFB convencional a

1.551 μ m, é dividida pelo primeiro acoplador. Uma parte do sinal, estimada em 230 μ W, é injectada no laser autopulsante através de um *taper* e a frequência de auto-pulsação livre foi ajustada para 200MHz controlando as correntes de entrada. Foram gerados pulsos ópticos, com 2.4mW de potência de pico, sincronizados com a frequência do relógio dos dados injectados. Os pulsos de relógio foram combinados com o restante sinal no acoplador seguinte e o sinal resultante, foi injectado no dispositivo biestável, regenerando o sinal óptico de entrada com um espaçamento correcto entre pulsos [18].

Os trabalhos de *Barnsley et al.* em extracção de relógio de sinais RZ [19] e em particular de sinais NRZ são também de enorme importância. Em Junho de 1992 demonstrou pela primeira vez a recuperação de relógio de sequências NRZ binárias 3.2Gbit/s usando um amplificador óptico não linear (NLOA) para gerar a componente de relógio em falta, a ser sincronizada com o laser autopulsante [20]. A técnica proposta utiliza dispositivos semicondutores não lineares de duas secções para primeiro gerar a componente de relógio no espectro de modulação e para, depois, gerar pulsos ópticos de relógio sincronizados com os dados de entrada.

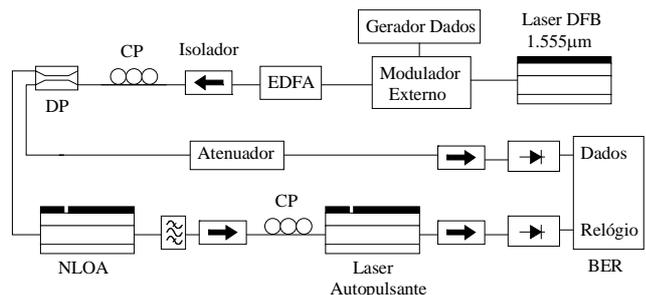


Fig. 6 - Extracção óptica de relógio de sinais NRZ [20].

Na montagem experimental ilustrada esquematicamente na Fig. 6, os dados ópticos foram obtidos por modulação externa da onda contínua de um laser DFB de 1.555 μ m com um sinal eléctrico binário NRZ a 3.2Gbit/s e, posteriormente, amplificado num EDFA antes de ser dividido num acoplador de 3dB. Metade deste sinal incidiu num receptor de 10Gbit/s através de um atenuador variável para observar a variação do BER com a potência óptica recebida e, a outra metade foi injectada num laser MQW, actuando como NLOA. Este dispositivo tem duas secções com contactos eléctricos independentes, em que a mais pequena ($\sim 35\mu$ m) está polarizada para se comportar como absorvedor ($I=500\mu$ A) e a maior (435 μ m) é uma região de ganho polarizada com cerca de 95% da corrente de limiar. O laser autopulsante, à semelhança do NLOA, também tem duas secções com contactos eléctricos distintos, mas, neste dispositivo a pequena secção absorvedor está fortemente dopada com zinco. A corrente de polarização foi 110.2mA o que produziu uma auto-

pulsção livre de 3.075GHz. A potência de entrada no laser autopulsante foi -12.2dBm [20].

A descoberta de auto-pulsção em laser DFB multicontactos em que ambas as secções apresentam ganho, permitiu testar esta técnica para frequências mais elevadas. Em Janeiro de 1993 *D.J.As et al.* demonstram a sincronização óptica de sinais RZ $2^{23}-1$ PRBS a 0.7Gbit/s com uma gama de bloqueio de 50MHz [21]. A montagem utiliza um laser DFB de duas secções de $300\mu\text{m}$ e $70\mu\text{m}$ com ambas as faces sem revestimento. A frequência de auto-pulsção varia entre 400 e 800MHz e o seu controlo é realizado variando ambas as correntes ou diminuindo a temperatura do dispositivo.

A Fig. 7 ilustra a montagem experimental em que os dados foram gerados por um laser DFB modulado externamente por um gerador de sequências $2^{23}-1$ PRBS RZ até 700Mbit/s. Foi possível acoplar cerca de $100\mu\text{W}$ de potência óptica à secção mais pequena do laser autopulsante usando um *taper*. O espectro de RF do sinal autopulsante para correntes $I_1=137\text{mA}$ e $I_2=48\text{mA}$ apresentava uma frequência fundamental de 506MHz com um FWHM de 31MHz devido às flutuações estocásticas do sinal autopulsante. Na presença de sinal óptico de entrada modulado a 520Mbit/s o espectro desloca-se para a frequência de injeção de 520MHz. A componente fundamental aumentou cerca de 15dB e passou a apresentar um FWHM de 10Hz. Nesta situação a taxa de repetição do sinal óptico de saída é igual ao ritmo de transmissão com uma relação de fase fixa entre os pulsos de entrada e saída [21].

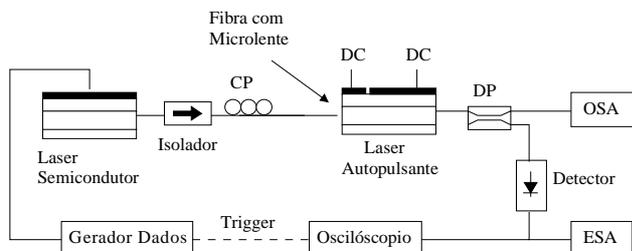


Fig. 7 - Extração óptica a 700Mbit/s com DFB de 2 secções.

Passado um ano, a mesma equipa publicou um trabalho onde foi demonstrada a sincronização da auto-pulsção de um laser DFB de 2 secções com um sinal óptico modulado sinusoidalmente a 17.6GHz, com uma diferença máxima de 110MHz entre a entrada e a frequência da auto-pulsção livre. Demonstrou ainda a recuperação totalmente óptica do relógio a 17.6Gbit/s para diferentes palavras de 6 bits, com uma potência média menor que $100\mu\text{W}$ [22].

A montagem experimental simplificada está ilustrada na Fig. 8. A fonte de luz produz radiação modulada sinusoidalmente ou uma sequência de dados com palavras

de 6 bits e é composta por um laser de cavidade externa e um modulador LiNbO_3 Mach-Zehnder.

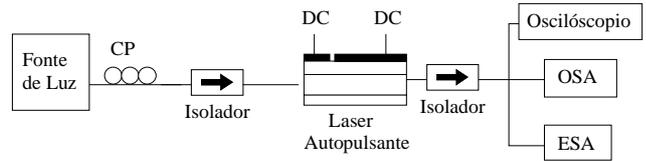


Fig. 8 - Extração de relógio a 18GHz.

A potência óptica $P(t)$ é modulada de acordo com $P(t)=P_{\text{avg}}+P_{\text{mod}}\sin(2\pi ft)$ onde P_{avg} e P_{mod} são a potência média e potência modulada, respectivamente, tendo a investigação sido realizada com $P_{\text{avg}}=80\mu\text{W}$ e $P_{\text{mod}}=7\mu\text{W}$. Para o estudo da recuperação de relógio foi usada uma sequência de palavras de 6 bits obtida com um laser ML de cavidade externa, um multiplexer passivo e um laser semiconductor amplificador. O laser ML emitia pulsos ópticos de 20ps a uma taxa de 2.9GHz e o multiplexer transformava a taxa em 17.6GHz por divisão, atraso e recominações apropriadas.

O sinal gerado foi injectado com um *taper*, na secção mais pequena do laser InGaAsP DFB de duas secções com 400 e $200\mu\text{m}$ sem revestimento. Inicialmente foi investigado o comportamento livre do dispositivo, tendo-se verificado que a variação da corrente da secção menor, entre 115mA e 165mA, mantendo constante a outra corrente a 88mA, produzia uma variação na frequência de 22 para 13GHz.

A investigação da gama de bloqueamento foi efectuada usando modulação sinusoidal, verificando-se que quando sincronizado, o espectro da auto-pulsção estreitava de 20MHz para 10Hz. Mediu-se uma gama de sincronismo igual a 220MHz. Para uma sincronização com sucesso o ajuste correcto do comprimento de onda é muito importante. O desvio de comprimento de onda do sinal óptico injectado do comprimento de onda do laser deve ser inferior a 0.3nm para a sincronização ocorrer. Posteriormente foi investigada a sincronização com as palavras 111111, 110110, 101000, 100100, 101010, 100000, em que a potência óptica injectada foi $150\mu\text{W}$. Verificou-se que a saída era independente da palavra injectada e sincronizava com o relógio de entrada, demonstrando recuperação de relógio a 17.6Gbit/s [22].

O domínio cada vez maior desta técnica deu origem a novos resultados como a sincronização totalmente óptica com divisão na frequência [23]. A montagem experimental mostrada na Fig. 9 consiste numa fonte laser InGaAsP com revestimento AR numa cavidade externa com uma rede de difracção (GEC) e um laser InGaAsP com duas secções com $500\mu\text{m}$ em que a secção de ganho é quatro vezes mais comprida do que a secção absorvente.

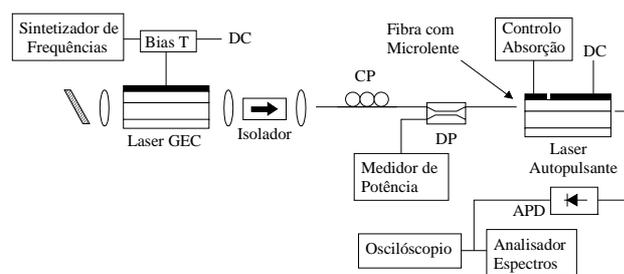


Fig. 9 - Extração de relógio com divisão na frequência [23].

A luz do laser GEC foi acoplada ao laser autopulsante usando uma fibra monomodo terminada em lente com $8\mu\text{m}$ de raio. O comprimento de onda do laser GEC foi ajustado de forma a coincidir com um dos modos de FP do autopulsante tendo sido investigados três tipos de sincronização. Em todos os casos avaliados a frequência de auto-pulsação sincronizada foi 450MHz, para entradas do laser GEC a 450MHz, 900MHz e 1350MHz, coincidindo com os harmónicos do sinal autopulsante e correspondendo a divisões na frequência de 1:1, 1:2, 1:3, respectivamente. A potência óptica injectada foi constante e estimada em $30.5\mu\text{W}$. Quando não sincronizado o laser autopulsante pulsava a $\sim 440\text{MHz}$. Estimaram intervalos de sincronização de 30, 13 e 6.3 MHz para as taxas de 1:1, 1:2, 1:3, respectivamente, mostrando que o intervalo de sincronização decresce à medida que a taxa de divisão aumenta.

O trabalho anterior tratava apenas de sinais de relógio puramente sinusoidais. Mais tarde foi abordado o mesmo problema mas tendo como entrada pulsos ópticos gerados por um laser operado em ML activo.

Demonstrou-se que a potência mínima necessária para obter sincronização é bastante menor no caso de pulsos ML do que no caso de uma entrada sinusoidal [24]. A extensão óbvia deste trabalho era a multiplicação sincronizada da frequência de um sinal de entrada ML por um laser de duas secções. Foi também demonstrada a multiplicação por inteiros e por fracções racionais [25]. Com base na mesma montagem experimental demonstram, pela primeira vez, a distribuição totalmente óptica de relógio com divisão e multiplicação totalmente óptica do relógio distribuído [26]. Os mesmos autores mostraram ainda a possibilidade de extrair o sinal de relógio de uma sequência de dados aleatória, quer à frequência da taxa de transmissão quer a metade dela, usando o mesmo laser autopulsante alterando apenas a polarização. Propõem ainda que o bloqueamento por injeção não é uma condição necessária para a recuperação de relógio [27].

A utilização de um laser autopulsante foi demonstrada recentemente na desmultiplexagem de um sinal OTDM de 40Gbit/s para quatro canais de 10Gbit/s [28]. Neste sistema a tarefa de recuperação do relógio foi

desempenhada por um laser autopulsante com uma secção DFB ($300\mu\text{m}$), um reflector dispersivo ($130\mu\text{m}$) e uma secção passiva de fase ($300\mu\text{m}$) localizada entre as anteriores. A combinação apropriada das três correntes de polarização permite variar a frequência de auto-pulsação entre 5 e 22GHz. A sincronização óptica da frequência de auto-pulsação com a frequência do sinal de dados ocorre quando a frequência da auto-pulsação é em 20MHz maior do que a frequência dos dados [28].

V. CONCLUSÕES

No artigo estudou-se a recuperação totalmente óptica do sinal de relógio, tendo-se identificado três técnicas diferentes. Os módulos ópticos de recuperação baseados na PLL óptica são sem dúvida os mais adequados para ritmos muito elevados ($>100\text{Gbit/s}$), no entanto, continuam a aparecer relatos do uso de lasers DFB autopulsantes para concretizar esta tarefa. Os circuitos ópticos tanque, apesar da enorme flexibilidade que apresentam, não mereceram grande atenção por parte dos investigadores.

REFERÊNCIAS

- [1] R.S.Tucker, G.Eisenstein, S.K.Korotky, L.L.Bulh, J.J.Veselka, G.Raybon, B.L.Kasper, R.C.Alferness, "16-Gbit/s fiber transmission experiment using optical time-division multiplexing", *Electronics Letters*, Vol.23, Nº24, 1987, pg.1270-1271.
- [2] G.E.Wickens, D.M.Spirit, L.C.Blank, "20Gbit/s, 205 km optical time division multiplexed system", *Electronics Letters*, Vol.27, Nº11, 1991, pg.973-974.
- [3] S.Kawanishi, H.Takara, O.Kamatani, T.Morioka, M.Saruwatari, "100Gbit/s, 560km optical transmission experiment with 80km amplifier spacing employing dispersion management", *Electronics Letters*, Vol.32, Nº5, 1996, pg.470-471.
- [4] S.Kawanishi, H.Takara, T.Morioka, O.Kamatani, K.Takiguchi, T.Kitoh, M.Saruwatari, "Single channel 400Gbit/s time division multiplexed transmission of 0.98ps pulses over 40km employing dispersion slope compensation", *Electronics Letters*, Vol.32, Nº10, 1996, pg.916-918.
- [5] M.Nakazawa, E.Yoshida, T.Yamamoto, E.Yamada, A.Sahara, "TDM single channel 640Gbit/s transmission experiment over 60km using 400fs pulse train and walk-off free, dispersion flattened nonlinear optical loop mirror", *Electronics Letters*, Vol.34, Nº9, 1998, pg.907-908.
- [6] E.Yoshida, T.Yamamoto, A.Sahara, M.Nakazawa, "320Gbit/s TDM transmission over 120km using 400fs pulse train", *Electronics Letters*, Vol.34, Nº10, 1998, pg.1004-1005.
- [7] Ben Y.Yu, Paul Toliver, Robert J.Runser, Kunli Deng, Ivan Glesk, Paul R.Pruncnal, "TDM 100Gb/s packet switching in an optical shuffle network", *Actas da conferência LEOS'97*, pg.338.

- [8] S.Kawanishi, Y.Miyamoto, H.Takara, M.Yoneyama, K.Uchiyama, I.Shake, Y.Yamabayashi, "120Gbit/s OTDM system prototype", Actas da conferência ECOC'98, Espanha, 20-24 Setembro de 1998, pg. 43-45.
- [9] S.Kawanishi, H.Takara, K.Uchiyama, I.Shake, O.Kamatani, H.Takahashi, "1.4Tbit/s (200Gbit/s x 7ch) 50km optical transmission experiment", Electronic Letters, Vol.22, Nº20, pg.1716-1717.
- [10] Y.Miyamoto, K.Yonenaga, A.Hirano, N.Shimizu, M.Yoneyama, H.Takara, K.Noguchi, K.Tsuzuki, "1.04Tbit/s DWDM transmission experiment based on alternate-polarization 80Gbit/s OTDM signals", Actas da conferência ECOC'98, Espanha, 20-24 Setembro de 1998, pg. 55-57.
- [11] T.Terahara, T.Naito, N.Shimajoh, T.Tanaka, T.Chikama, M.Suyama, "0.7Tbit/s (66 x 10.66Gbit/s) WDM transmission over 2212km using broadband, high-power EDFAs with pump reflector", Electronic Letter, Vol.34, Nº10, 1998, pg.1001-1002.
- [12] S.Kawanishi, M.Saruwatari, "New-type phase-locked loop using traveling-wave laser diode optical amplifier for very high-speed optical transmission", Electronics Letters, Vol.24, 1988, pg.1452-1453.
- [13] S.Kawanishi, M.Saruwatari, "Ultrahigh-speed PLL-type clock recovery circuit based on all-optical gain modulation in traveling-wave laser diode amplifier", IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol.11, Nº12, Dezembro 1993, pg. 2123-2129.
- [14] S.Kawanishi, H.Takara, M.Saruwatari, H.Kitoh, "Ultrahigh-speed phaselocked-loop-type clock recovery circuit using a traveling-wave laser diode amplifier as a 50GHz phase detector", Electronics Letters, Vol.29, Nº 19, 1993, pg.1714-1715.
- [15] Satoki Kawanishi, "Ultrahigh-speed optical time-division multiplexed transmission technology based on optical signal processing", IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol.34, Nº11, 1998, pg.2064-2079.
- [16] Osamu Kamatani, Satoki Kawanishi, "Ultrahigh-speed clock recovery with phase lock loop based on four-wave mixing in a traveling wave laser diode amplifier", IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol.14, Nº8, Agosto 1996, pg. 1757-1767.
- [17] Masahiko Jinno, Takao Matsumoto, "Optical tank circuits used for all-optical timing recovery", IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol.28, Nº4, Abril 1992, pg. 895-900.
- [18] M.Jinno, T.Matsumoto, "Optical retiming regenerator using 1.5 μ m multi-electrode DFB LDs", Electronics Letters, Vol.25, Nº20, Setembro 1989, pg. 1332-1333.
- [19] P.E.Barnsley, "All-optical clock extraction using two-contact devices", IEEE Proceedings-J, Vol.40, Nº5, 1993, pg.325-336.
- [20] P.E.Barnley, "NRZ format all-optical clock extraction at 3.2 Gbit/s using two-contact semiconductor devices", Electronics Letters, Vol.28, Nº13, Junho 1992, pg. 1253-1255.
- [21] D.J.As, R.Eggemann, U.Feiste, M.Mohrle, E.Patzak, K.Weich, "Clock recovery based on a new type of selfpulsation in a 1.5 μ m two-section InGaAsP-InP DFB laser", Electronics Letters, Vol.29, Nº2, Janeiro 1993, pg. 141-142.
- [22] U.Feiste, D.J.As, A.Ehrhardt, "18 GHz all-optical frequency locking and clock recovery using a self-pulsating two-section DFB laser" IEEE Photonics Technology Letters, Vol.6, Nº1, Janeiro 1994, pg. 106-108.
- [23] G.Farrell, P.Phelan, J.Hegarty, "All-optical synchronisation with frequency division using selfpulsating laser diode", Electronics Letters, Vol.28, Nº8, Abril 1992, pg.738-739.
- [24] Paul Phelan, Gerald Farrell, John Hegarty, "All-optical clock synchronization and frequency division of mode-locked pulses", IEEE Photonics Technology Letters, Vol.4, Nº8, Agosto 1992, pg.930-932.
- [25] Paul Phelan, Gerald Farrell, John Hegarty, "All-optical clock synchronization and multiplication of the frequency of mode-locked signals", IEEE Photonics Technology Letters, Vol.4, Nº12, Dezembro 1992, pg.1332-1335.
- [26] G.Farrell, P.Phelan, J.Hegarty, "All-optical clock distribution with synchronous frequency division and multiplication", Electronics Letters, Vol.28, Nº15, Julho 1992, pg.1387-1388.
- [27] Gerald Farrell, Paul Phelan, John Hegarty, J.A.Shields, "All-optical timing extraction with frequency division using a twin-section laser diode", IEEE Photonics Technology Letters, Vol.5, Nº6, Junho 1993, pg.718-721.
- [28] A.Buxen, A.T.Clausen, H.N.Poulsen, K.S.Jepsen, K.E.Stubkjaer, C.Bornholdt, O.Brox, M.Möhrle, B.Sartorius, "40 to 10 Gbit/s demultiplexing using a self-pulsating DFB laser for clock recovery", Actas da conferência ECOC'98, Espanha, 20-24 Setembro de 1998, pg. 507-508.