

Capítulo 8

Considerações Finais

8.1- Principais conclusões

Durante esta tese foram analisados diversos aspectos relativos à implementação, análise e optimização de sistema de comunicação ópticos baseados em solitões, a operarem a elevados ritmos de transmissão.

No capítulo 2, mostrámos como é possível, com base em ensaios laboratoriais relativamente simples, obter um conjunto de parâmetros capazes de caracterizarem com rigor a fibra óptica. Mostrámos ainda, como é possível descrever a propagação de um campo electromagnético no interior de uma fibra óptica monomodo através da equação da fibra. Particular relevo foi dado à análise e medição da dispersão e ao estudo dos efeitos não lineares em fibras ópticas de sílica.

No capítulo 3, tendo por base a equação da fibra, mostrámos como é possível propagar impulsos do tipo solitão em sistemas práticos. Uma atenção especial foi dedicada

à manutenção de solitões em sistemas com amplificação concentrada. Foram ainda analisadas as propriedades mais relevantes dos impulsos do tipo solitão, com vista à sua utilização em sistemas de comunicação ópticos.

O capítulo 4, foi dedicado ao emissor óptico para sistemas baseados em solitões. Implementámos um emissor de solitões, susceptível de gerar impulsos, suficientemente estreitos, para serem usados em sistemas até aos 10 Gbit/s. A técnica usada para obter impulsos estreitos foi baseada no aproveitamento do primeiro pico das oscilações de relaxação dum laser semiconductor. O trabalho laboratorial foi acompanhado de um intenso trabalho ao nível da simulação numérica, tendo para tal sido necessário proceder a um conjunto de ensaios laboratoriais que permitiram caracterizar o laser semiconductor usado.

Verificámos, no laboratório, que num emissor baseado na modulação directa dum laser semiconductor, se consegue remover grande parte do *chirp*, originado pela modulação da intensidade óptica, recorrendo à filtragem óptica, sem que este procedimento provoque um alargamento substancial dos impulsos no domínio do tempo.

Constatámos que num emissor de solitões, em que o laser é directamente modulado, usando um sinal de relógio eléctrico, a qualidade do circuito que gera o sinal de relógio é um factor importante, pois as oscilações da frequência instantânea do relógio são convertidas em *jitter* no domínio óptico. De igual modo é importante considerar o ruído do laser semiconductor, de modo a obter uma descrição rigorosa do *jitter* temporal à saída do emissor.

No capítulo 5, derivámos um novo modelo analítico para o tempo de chegada dos impulsos, em sistemas baseados em solitões, considerando a interacção entre solitões numa sequência infinita e aleatória de impulsos. Comprovámos numericamente que os desvios relativos ao modelo de Gordon-Haus, observados em diversos ensaios experimentais a operarem a elevados ritmos de transmissão e para longas distâncias, devem-se essencialmente à interacção entre solitões. Tendo por base o modelo, anteriormente desenvolvido, para o tempo de chegada numa sequência aleatória de impulsos e considerando o ruído de emissão espontânea como sendo uma pequena perturbação derivámos um novo modelo para o *jitter* temporal, que inclui o efeito simultâneo do ruído

de emissão espontânea e a interacção entre solitões. Resultados obtidos com o novo modelo não gaussiano para o *jitter*, foram comparados com resultados obtidos a partir da simulação de diversos sistemas práticos, tendo-se obtido uma boa concordância entre ambos os resultados.

No capítulo 6, analisámos o problema da optimização de sistemas baseados em solitões, tendo-se verificado que na optimização relativamente ao ruído, os factores mais relevantes são: a energia do solitão, inversamente proporcional à sua largura, a densidade espectral de ruído à entrada do receptor óptico e os campos dispersivos, ambos grandemente condicionados pelo espaçamento entre amplificadores. Verificámos que é possível melhorar o desempenho dos sistemas relativamente ao ruído, actuando ao nível da transmissão, através da diminuição da largura dos impulsos ou aumentando o número de amplificadores. A diminuição da largura dos impulsos está limitada pelo aumento do *jitter* temporal, e o aumento do número de amplificadores está usualmente condicionada por questões económicas.

Ao nível da detecção derivámos o desempenho óptimo do receptor de solitões. Considerámos diversos filtros práticos, para diversas larguras de banda, e verificámos que o desempenho obtido com estes filtros está ainda consideravelmente distante do desempenho óptimo.

No capítulo 7, utilizando as técnicas de análise de desempenho desenvolvidas no capítulo 6 e o novo modelo desenvolvido para o *jitter* temporal, obtivemos um novo método de análise de desempenho para sistemas baseados em solitões, que inclui simultaneamente o efeito do ruído, do *jitter* e da interferência entre símbolos.

Mostrámos ainda que ao incluirmos o efeito da interacção entre solitões, na análise da degradação devida ao *jitter*, se obtém uma descrição da degradação originada pela distribuição não gaussiana do *jitter*, sem a necessidade de incluir qualquer correcção à posterior e que explica o limiar verificado na prática.

Verificámos que é possível actuar ao nível da detecção de modo a reduzir a perda de desempenho originada pelo *jitter* temporal, sem introduzir uma penalização extra excessiva

ao nível da ISI. Ao aplicarmos esta técnica, na optimização de um sistema a 2.5 Gbit/s, obtivemos ganhos ao nível da probabilidade de erro do sistema de aproximadamente 5 ordens de grandeza.

8.2 - Sugestões para trabalho futuro

No decorrer da preparação deste trabalho deparamo-nos com diversos problemas interessantes, alguns foram abordados por nós outros não, sendo assim deixamos aqui alguns tópicos que são susceptíveis de serem aprofundados, na sequência deste trabalho:

1) Algo que nos parece extremamente útil, para no laboratório, podermos testar um conjunto diversificado de modelos e técnicas desenvolvidas, é dispormos de um *loop* óptico, que nos permita variar a distância total de propagação, a separação entre amplificadores, assim como inserir e retirar componentes do sistema. Um sistema com estas características permite, no laboratório e com recursos reduzidos, fazer uma análise comparativa do desempenho, para diferentes configurações, de sistemas de comunicação ópticos de longa distância e muito elevado ritmo de transmissão. Permite ainda validar, no laboratório, o novo modelo para o *jitter* proposto no capítulo 5, assim como as técnicas de determinação do BER desenvolvidas nos capítulos 6 e 7.

2) Muito embora, grande parte do trabalho realizado nesta tese, se tenha centrado no estudo do *jitter* temporal, em sistemas baseados em solitões, este é um tópico com muitas questões em aberto. Nesta tese medimos o *jitter* à saída de um emissor laboratorial, simulámos o emissor e obtivemos uma boa concordância entre ambos os resultados, no entanto julgamos ser interessante aprofundar este estudo de modo a colocar em evidência os fenómenos físicos que lhe dão origem. Ainda ao nível do *jitter* temporal, e após o trabalho realizado no âmbito desta tese, julgamos ser útil dividir o *jitter* temporal em três grandes famílias, uma em que se incluem todos os fenómenos que originam *jitter* através de uma variação aleatória na posição temporal dos solitões, outra onde estão os fenómenos que originam *jitter* através de desvios aleatórios na frequência central dos solitões e ainda outra onde o *jitter* é causado por variações aleatórias na amplitude dos solitões. A importância de cada uma das famílias depende essencialmente do comprimento dos

sistemas, da largura dos impulsos e do ritmo de transmissão. Julgamos ser interessante fazer um estudo comparativo da importância relativa de cada família para diferentes classes de sistemas. Uma outra área que foi apenas superficialmente analisada nesta tese e que nos parece interessante é o controlo do *jitter* durante a propagação. Esta é uma área onde existem diversos trabalhos publicados, mas onde, tendo por base as ferramentas desenvolvidas nesta tese, se pode dar novas contribuições no sentido de quantificar os ganhos conseguidos com as diversas técnicas de controlo propostas.

3) Uma das áreas menos estudadas na optimização de sistemas de comunicação ópticos baseados em solitões é a recepção óptica. Conforme comprovamos nesta tese, os resultados actualmente obtidos, experimentalmente, estão muito distantes do desempenho óptimo. Julgamos que, aprofundando o conhecimento disponível nesta área, é possível obter ganhos consideráveis em termos de capacidade dos sistemas de comunicação ópticos baseados em solitões.

4) De igual modo o desenvolvimento de técnicas de análise semi analíticas, baseadas em resultados da simulação numérica ou em medições experimentais, com capacidade de aferir com rigor o desempenho dos sistemas de comunicação ópticos baseados em solitões e facilitar a sua optimização, é outra área da investigação interessante e ainda pouco explorada. Em particular, o estudo comparativo entre as diversas técnicas analíticas propostas na literatura especializada, baseadas quer em majorantes quer na determinação aproximada das funções densidade de probabilidades condicionadas, e resultados de ensaios laboratoriais, parece-nos importante para aferir da qualidade das aproximações obtidas. Tendo por base este estudo, acreditamos ser possível desenvolver novos majorantes, aplicáveis a sistemas baseados em solitões, que permitam obter melhores aproximações do desempenho dos sistemas.

5) Uma área de investigação recente, e onde julgamos que os solitões ópticos podem ter um papel relevante, atendendo à sua robustez, é o desenvolvimento de uma camada óptica com capacidades ao nível da rede. Neste domínio pretende-se transferir funcionalidades, actualmente, executadas no domínio eléctrico para o domínio óptico, aumentando a capacidade de transmissão dos sistemas, tornando-os mais simples e menos

onerosos. Questões como a adição e remoção de canais em sistemas WDM, reconversão de comprimentos de onda, reconhecimento de cabeçalhos, encaminhamento de sinais e pacotes irão assumir uma relevância crescente. Embora ainda numa fase embrionária, o autor acredita, que muitos dos ganhos futuros, em termos de capacidades dos sistemas de comunicação ópticos, serão conseguidos com base em resultados oriundos desta área da investigação.