

ANÁLISE E COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DE SISTEMAS OCDMA COERENTES E INCOERENTES

Fernando Teles da Cruz, Pedro Luiz Lima Bertarini

Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Patos de Minas, Brasil
fernandoteles07@gmail.com, bertarini@ufu.br

Resumo - Este trabalho visa analisar e comparar o desempenho de redes ópticas coerentes baseadas na codificação de fase espectral (SPC) em relação as redes ópticas incoerentes baseadas na codificação de Intensidade espectral (SAC) no cenário em que a fibra óptica é retirada do sistema (sistemas *back-to-back*). Tais sistemas utilizam a sequência de códigos da família Walsh Hadamard (W-H) para fazer a codificação do sinal transmitido, além do *nonlinear optical loop mirror* (NOLM) para rejeitar interferências de múltiplo acesso (MAI) no sistema SPC, e, um sistema de detecção balanceada utilizado com o mesmo intuito descrito acima para o sistema SAC. Os cenários são simulados com o objetivo de verificar a robustez e a escalabilidade dos sistemas em termos de taxa de erro de bit (BER) quando é variada a taxa de transmissão do sistema. Para o sistema SPC, quando considerado o código corretor de erros RS-FEC (255, 223), que corrige taxas de erro abaixo de $1,1 \cdot 10^{-3}$, foi possível a obtenção de taxas de transmissão de 10 Gbps por usuário com a utilização de códigos W-H de tamanho igual a 8 quando 5 usuários estão ativos no sistema.

Palavras-Chave - Comunicações ópticas; Acesso múltiplo por divisão de código; Codificação de fase espectral; Codificação de intensidade espectral.

ANALYSIS AND PERFORMANCE COMPARISON OF COHERENT AND INCOHERENT OCDMA SYSTEMS

Abstract – *This paper analyzes and compares the performance of coherent optical networks based on spectral phase coding (SPC) and incoherent optical networks based on spectral amplitude coding in the setting whose the optical fiber is removed from the system (back-to-back systems). Both systems use the Walsh Hadamard (H-W) code sequence to code transmitted signal as well as the Non-linear Loop Mirror (NOLM) to reject multiple access interference (MAI) in SPC system, and a balanced detection system used with the same purpose described above for the SAC system. The settings are simulated to verify the robustness and scalability of systems in terms of bit error rate (BER) when the system the transmission rate is changed. For the SPC system, when forward error correction FEC RS (255, 223) is used, it was possible to obtain 10 Gbps transmission rate per user using W-H (8) and 5 users in the system.*

Keywords - Optical Communication; Optical code division multiple access; Spectral phase coding; Spectral amplitude coding.

I. INTRODUÇÃO

O OCDMA foi proposto pois combina a grande largura de banda existente no canal óptico com a flexibilidade do CDMA. Tal sistema foi inicialmente investigado no contexto do sistema de comunicação por Rádio Frequência (RF). Somente por volta de 1980 ele foi aplicado no domínio óptico [1], [2]. A largura de faixa disponível no canal óptico serviu de estímulo para a exploração da tecnologia CDMA em domínio óptico com o objetivo de fornecer acessos simultâneos e assíncronos para vários usuários. Comparado ao sistema convencional que disponibiliza acesso múltiplo por divisão de comprimento de onda (WDMA - Wavelength Division Multiple Access), um número maior de usuários pode ser acomodado em consequência do grande número de seqüências de códigos disponíveis, levando em consideração o desempenho de cada usuário [3].

Os sistemas OCDMA podem ser classificar em termos da natureza da sobreposição do sinal óptico, quando eles podem ser divididos em sistemas OCDMA coerentes e incoerentes.

Sistemas OCDMA coerentes utilizam codificação bipolar no sinal óptico, ou seja, o código do usuário é aplicado via codificação de fase óptica. Os deslocamentos de fase oriundos deste processo podem ser 0 ou π ou podem ter níveis intermediários de fase. Sistemas OCDMA coerentes requerem fontes de luz banda-larga capazes de produzir pulsos ultracurtos, como por exemplo, *lasers mode-locked*. Existem dois tipos de codificação em sistemas coerentes: a codificação de fase espectral [4] e a codificação de fase temporal [5]. Em sistemas OCDMA com codificação de fase espectral, ambos os processos de codificação e decodificação ocorrem no domínio espectral [4], [6]. Dessa forma, a codificação é feita utilizando o espectro largo que o pulso ultracurto proporciona e são aplicados deslocamentos de fase “0” ou “ π ” à cada fatia espectral de acordo com o código do usuário. A codificação resulta no espalhamento do pulso ultracurto no domínio do tempo. Durante o processo de decodificação são aplicadas mudanças de fases conjugadas às realizadas no processo de codificação para as diferentes componentes espectrais. Assim, quando o código correto é utilizado no processo de decodificação, o pulso original é reconstruído no domínio do tempo. No entanto, nos demais receptores do sistema que utilizam códigos diferentes do transmitido, o processo de decodificação não reconstrói o pulso original que permanece semelhante a sinais aleatórios, ou ruídos [3].

Já em sistemas OCDMA incoerentes baseado na tecnologia de codificação de intensidade espectral (SAC), o processo de codificação funciona da seguinte forma: o pulso é disperso espacialmente por uma rede de difração, e cada usuário tem um codificador de intensidade espectral para bloquear ou transmitir seletivamente determinadas componentes de frequências de acordo com o código do usuário. Esse processo de modulação resulta em distorção do pulso no domínio do tempo, configurando o espalhamento temporal do pulso de entrada. Neste esquema, quando o bit "1" é transmitido por determinado usuário, seu respectivo código $A(w)$ é usado para modular em intensidade o espectro do pulso. O contrário acontece quando o bit "0" é transmitido quando o pulso é modulado com o código $\bar{A}(w)$. Assim, por meio da detecção balanceada se obtém correlação cruzada nula entre diferentes sequências de códigos, eliminando a MAI [3].

Neste contexto, este trabalho busca analisar o desempenho de redes ópticas coerentes e incoerentes baseadas na tecnologia OCDMA quando submetidas a altas taxas de transmissão. Além disso, será considerado o acesso assíncrono dos usuários à rede. Assim, este trabalho está organizado da seguinte forma: Na seção II é demonstrada toda a metodologia para a implementação em software dos sistemas OCDMA coerente e incoerente. Os resultados das simulações e as discussões sobre desempenho destes sistemas é realizada na seção III. E, finalmente, na seção IV são apresentadas as conclusões e aspectos futuros deste trabalho.

II. METODOLOGIA

De modo a analisar o desempenho e a robustez dos sistemas coerentes e incoerentes, foram realizadas simulações utilizando em conjunto os softwares *Optisystem* [7] e *Matlab* [8]. O primeiro foi utilizado para simular todo o sistema óptico, desde a geração até a recepção do sinal transmitido. O software *Matlab*, por sua vez, foi utilizado para realizar a codificação e a decodificação do sinal de cada usuário, isso foi feito tanto para o sistema coerente quanto para o incoerente, bem como para implementar o dispositivo NOLM. É

importante destacar que todas as simulações foram realizadas visando a aproximação dos cenários simulados aos cenários mais realistas.

A configuração do sistema SPC OCDMA é mostrada na Figura 1, onde podem-se destacar os principais componentes utilizados nas simulações. A fonte de laser é modelada por meio de um gerador de sequência pseudoaleatória (PBRs) operando com o comprimento de onda central igual a 1550,5 nm e um gerador óptico de pulsos gaussianos (OGPG). Os codificadores e decodificadores são modelados por meio de blocos *Matlab*. Os dispositivos *Power Combiner* e *Power Splitter* realizam, respectivamente, a combinação dos sinais transmitidos por todos os usuários e a separação do sinal resultante desta combinação para os respectivos decodificadores localizados na recepção do sistema. Na saída de cada decodificador o sinal decodificado é convertido para o domínio elétrico utilizando o fotodiodo PIN. Posteriormente, o sinal é filtrado por um filtro passa-baixa de Bessel, que é utilizado para rejeitar o ruído e interferência de componentes que estão fora do espectro do sinal de informação. Logo em seguida é utilizado um analisador de BER, responsável pela análise de desempenho do sistema. O processo de transmissão e recepção só é detalhado para o usuário, por questão de clareza.

Já a configuração do sistema SAC OCDMA é apresentada na Figura 2. Utilizou-se para essa configuração um gerador de sequência pseudoaleatória (PBRs), posteriormente o sinal binário é codificado por meio do codificador *non-return to zero* (NRZ). Logo em seguida o sinal é modulado para o domínio óptico por meio do modulador Mach Zehnder em conjunto de um laser de luz branca operando com o comprimento de onda central igual a 1550,5 nm. Os codificadores e decodificadores são modelados por meio de blocos *Matlab*. Os dispositivos *Power Combiner* e *Power Splitter* realizam, respectivamente, a combinação dos sinais transmitidos por todos os usuários e a separação do sinal resultante desta combinação para os respectivos decodificadores localizados na recepção do sistema. As saídas de cada conjunto de decodificadores são convertidas para o domínio elétrico utilizando dois fotodiodos

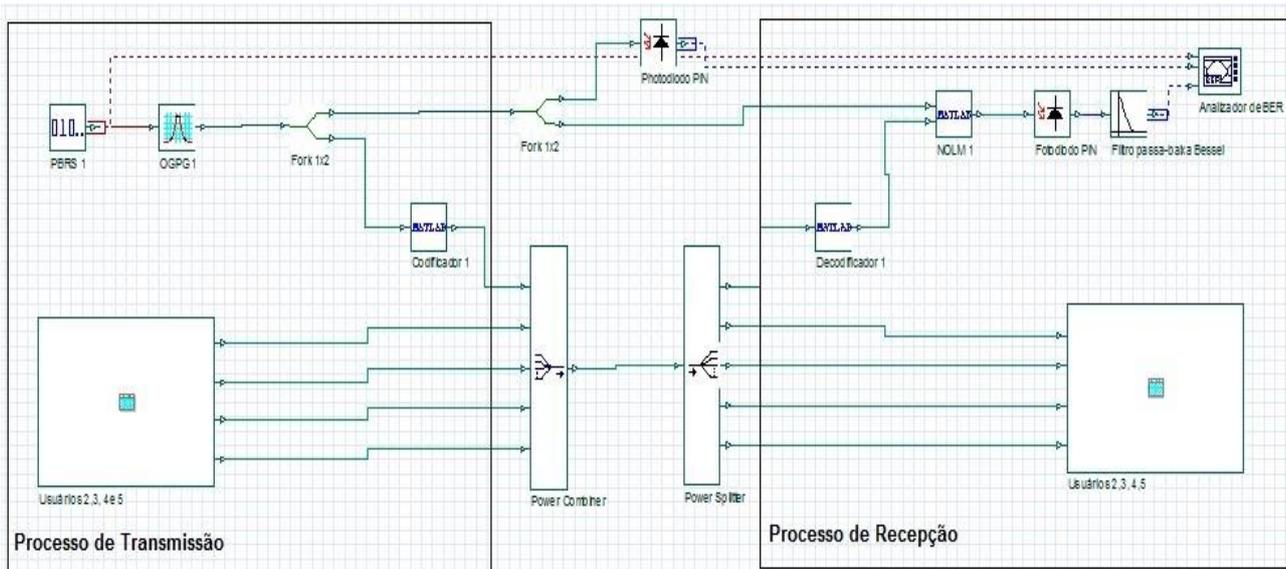


Figura 1 – Sistema OCDMA coerente utilizando a codificação de fase espectral implementado no software *Optisystem*.

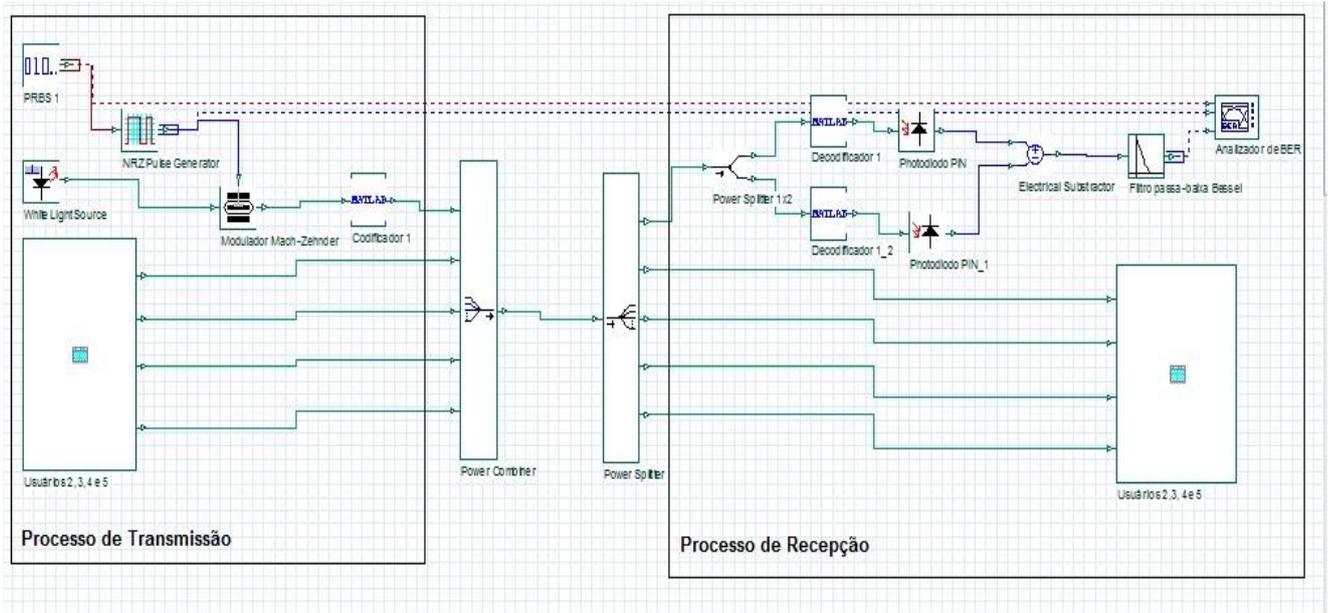


Figura 2 – Sistema OCDMA incoerente utilizando a codificação de intensidade espectral implementado no software *Optisystem*.

PIN conectados à uma estrutura equilibrada visando uma redução significativa da MAI. O sinal resultante a partir destes dois detectores é filtrado por um filtro passa-baixa de Bessel, que é utilizado para rejeitar o ruído e interferência de componentes que estão fora do espectro de sinal de informação.

Os códigos utilizados para codificar os dados do usuário são baseados em algoritmos de codificação conhecidos, que respeitam determinados compromissos de correlação. Estes códigos buscam, principalmente, explorar características de ortogonalidade, que explora ao máximo a diferenciação entre códigos e a cardinalidade, que por sua vez, explora ao máximo a quantidade de códigos. A família de códigos escolhida para a implementação neste trabalho e que atende aos requisitos

citados acima será a matriz de código da família Walsh – Hadamard (W-H), que é um conjunto de códigos ortogonais construídos recursivamente a partir da equação 1.

$$H(k+1) = \begin{bmatrix} H(k) & H(k) \\ H(k) & -H(k) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Onde $k = 0, 1, 2, \dots$ e $H(0) = 1$. Os elementos desta matriz são ± 1 , e cada código de usuário é definido como uma linha dessa matriz, onde, nos sistemas coerentes, “1” e “-1” representam deslocamentos de fase de “0” e “ π ”, respectivamente. Já em sistemas incoerentes os elementos “1” e “-1” representam, respectivamente, “1” e “0”.

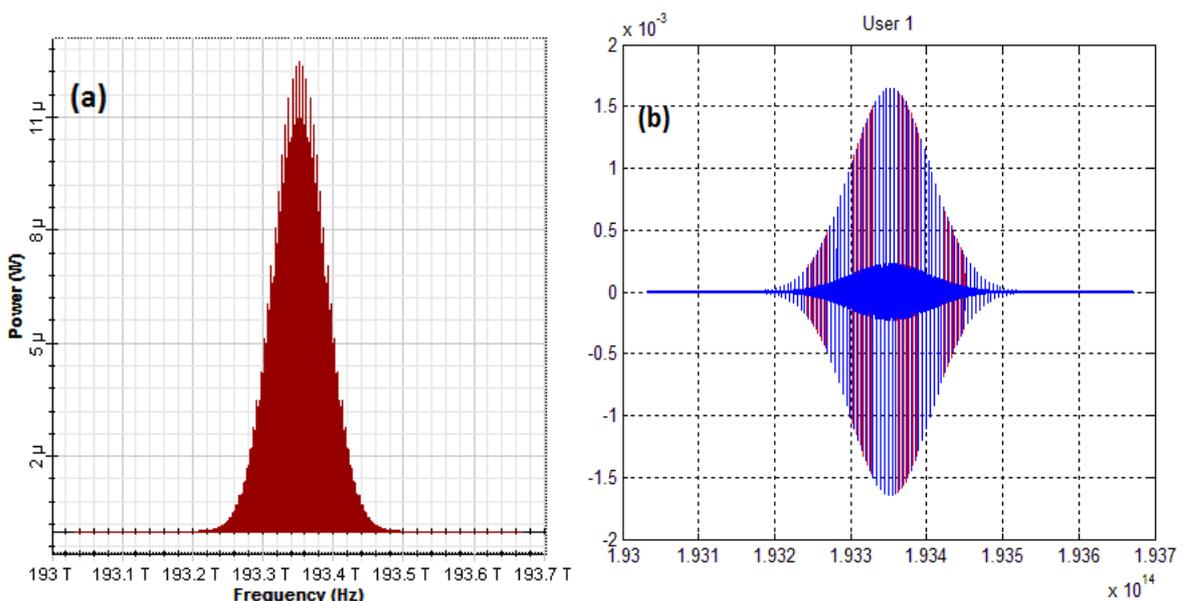


Figura 3 – (a) Espectro do pulso gaussiano a ser codificado; (b) Visualização espectral após a codificação do sinal – Em vermelho, no espectro, verifica-se os deslocamentos de fase.

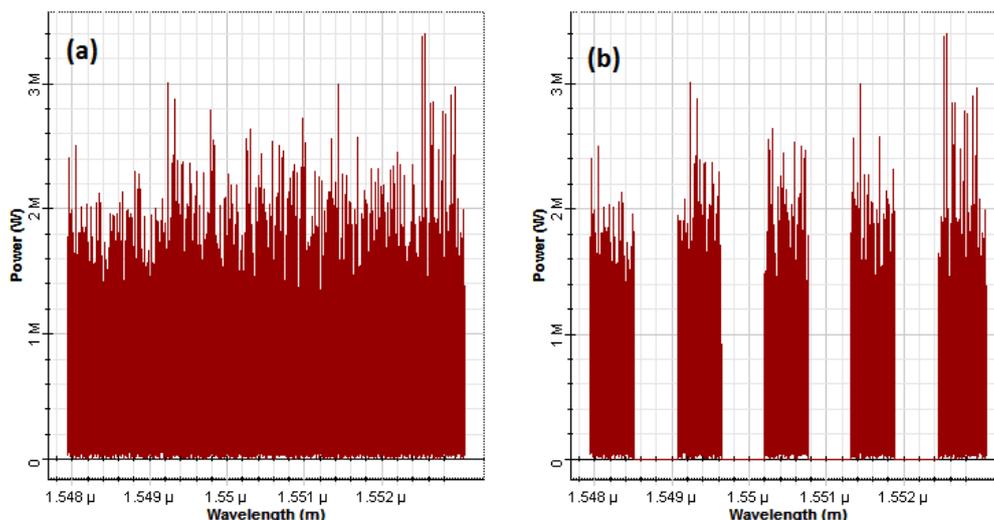


Figura 4 – (a) Range de frequências do espectro a ser codificado; (b) Visualização espectral após a codificação do sinal.

A codificação de dados nos sistemas coerentes consistem na aplicação da mudança de fase associada à determinada frequência de acordo com o código W-H atribuído a cada usuário presente no sistema. A decodificação é feita utilizando um código complementar correspondente ao código utilizado na codificação dos dados, conseqüentemente, o codificador e o decodificador são idênticos. O sinal decodificado, em seguida, pode ser “separado” dos sinais de outros usuários por meio do chaveamento temporal óptico adequado [4]. O dispositivo NOLM, utilizado para maximizar o desempenho do sistema SPC implementado neste trabalho, realiza um “recorte” temporal do sinal óptico, trazendo como benefício adicional a rejeição da maioria da energia vinda usuários interferentes [8]. Na sessão seguinte são apresentados os resultados das implementações em software executadas neste trabalho.

III. RESULTADOS

Os sistemas coerente e incoerente foram simulados utilizando um número de usuários igual a 5, assim como o tamanho da família dos códigos W-H igual a 8. A cada iteração a taxa de transmissão foi incrementada atingindo um valor máximo de 10 Gbps. A análise é realizada primeiramente para o sistema coerente. A Figura 3 (a) ilustra o espectro do pulso gaussiano do qual posteriormente será codificado. A visualização espectral após a codificação do sinal é ilustrada pela Figura 3 (b), onde a parte em vermelho no espectro representa os deslocamentos de fase. Para o sistema incoerente, temos o espectro que será posteriormente codificado ilustrado pela Figura 4 (a). A codificação desse sistema é evidenciada pela Figura 4 (b) onde verificamos o abatimento do range de frequências onde foi atribuído o elemento 0 da matriz W-H. Vale ressaltar que os ruídos dos fotodetectores são considerados nas simulações, o que traz uma componente estocástica para a análise.

A Figura 5 ilustra o desempenho dos sistemas coerente e incoerente conforme a taxa de transmissão é aumentada. Verificamos que o sistema incoerente SAC apresenta melhor desempenho frente ao sistema coerente somente no cenário onde ambos os sistemas são submetidos a taxas de transmissão

abaixo de 1 Gbps. Porém em taxas mais elevadas o sistema coerente apresenta um desempenho bastante superior em relação ao sistema incoerente. Isso demonstra uma maior capacidade do sistema coerente quando submetido a altas taxas de transmissão onde o mesmo apresenta uma robustez mais eficiente.

IV. CONCLUSÃO

Por meio das simulações realizadas para o sistema OCDMA coerente e incoerente foi verificado que o sistema coerente obteve um desempenho satisfatório quando submetido a altas taxas de transmissão. Já o sistema OCDMA incoerente não se mostrou eficiente nas mesmas condições. Isso deve ao fato de que como sistemas incoerentes utilizam o abatimento do sinal para proverem a codificação do sinal transmitido, o sinal corretamente decodificado não apresenta todas as suas componentes espectrais que foram emitidas, degradando ainda mais o sistema, além de serem mais inseguros, pois um eventual espião poderia facilmente detectar

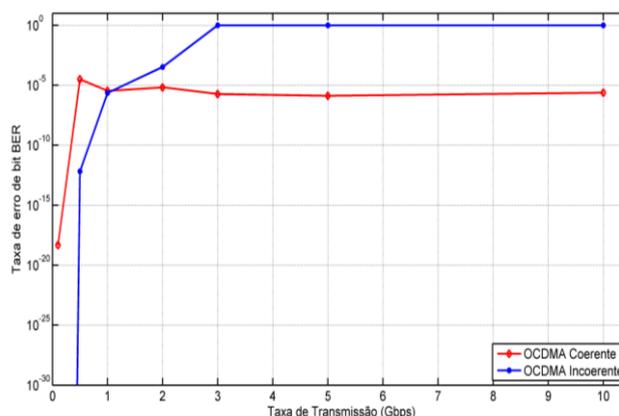


Figura 5 – Desempenho do sistema coerente e incoerente em função da taxa de transmissão com 5 usuários ativos e uma matriz W-H de tamanho igual a 8.

a sequência do código de um determinado usuário observando apenas um padrão de ausência ou presença do sinal transmitido. Já o sistema coerente, por utilizar deslocamento de fases para prover a codificação do sinal, não partilharia do problema de segurança citado acima, além do mesmo conseguir otimizar a recepção do sinal pelo usuário desejado operando em altas taxas, caracterizando-o assim o mais indicado para a utilização em redes ópticas locais.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a CAPES, CNPq e FAPEMIG pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] J. Y. Hui, "Pattern Code Modulation and Optical Decoding — A Novel Code-Division Multiplexing Technique for Multifiber Network," IEEE JSAC, vol. SAC-3, no. 6, Nov. 1985, pp. 916–27.
- [2] J. A. Salehi, "Code Division Multiple-Access Techniques in Optical Fiber Networks — Part I: Fundamental Principles," IEEE Trans. Commun., vol. 37, no. 8, Aug. 1989, pp. 824–33.
- [3] P. L. L. Bertarini, A. L. Sanches and B. H. V. Borges, "Optimal Code Set Selection and Security Issues in Spectral Phase-Encoded Time Spreading (SPECTS) OCDMA Systems," in Journal of Lightwave Technology, vol. 30, no. 12, pp. 1882-1890, June15, 2012.
- [4] S. Etemad, P. Toliver, R. Menendez, J. Young, T. Banwell, S. Galli, J. Jackel, P. Delfyett, C. Price, and T. Turpin, "Spectrally Efficient Optical CDMA Using Coherent Phase-Frequency Coding", IEEE Photonics Technology Letters, April 2005.
- [5] Bo Dai, Zhensen Gao, Xu Wang, Nobuyuki Kataoka and Naoya Wada, "Experimental Investigation on Security of Temporal Phase Coding OCDMA System with Code-Shift Keying and Differential Phase-Shift Keying", School of Engineering and Physical Sciences, Heriot-Watt University, Edinburgh, EH14 4AS, U.K.
- [6] X. Wang, "Novel time domain spectral phase encoding/decoding technique for OCDMA application", IEEE. Joint Research Institute for Integrated Systems, School of Engineering and Physical Sciences, Heriot-Watt University, Riccarton, Edinburgh, EH14 4AS, UK.
- [7] MATLAB 8.5. Natick, Massachusetts, US: The MathWorks Inc., 2015.
- [8] Optisystem 14. Ottawa, ON, Canada: Optiwave Systems Inc., 2016.