

Análise do Desempenho de Sistemas Rádio-Fibra Usando Sinais OFDM e SC-FDMA

Rúben Martins Neto* Henrique Faria Salgado† Luís Manuel Pessoa‡

Resumo—O presente trabalho apresenta um estudo experimental e de simulação, da transmissão de sinais *Orthogonal Frequency Division Multiplex* (OFDM) e *Single Carrier - Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA) ao longo de uma ligação *Radio over fiber* (RoF). A geração e desmodulação dos sinais OFDM e SC-FDMA foi implementada em Matlab, enquanto que a ligação ótica, baseada na modulação direta de um *Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser* (VCSEL), foi avaliada por simulação e os resultados validados experimentalmente. O desempenho do sistema para os dois tipos de sinais foi avaliado usando parâmetros como o *Peak to Average Power Ratio* (PAPR) e o *Sinal-to-Noise Ratio* (SNR).

Palavras-chave—OFDM, SC-FDMA, Rádio-Fibra, Distorção de intermodulação do laser, PAPR, SNR.

I. INTRODUÇÃO

O crescimento do número de utilizadores da tecnologia *Long Term Evolution* (LTE) nos últimos anos tem sido visível devido a vantagens como: a capacidade de atingir débitos de pico até 300 Mbits/s no *downlink* e até 75 Mbits/s no *uplink* [1]. A aposta do standard LTE na técnica SC-FDMA para o *uplink* veio reduzir o PAPR muito elevado da modulação OFDM, que requeria amplificadores de elevado custo, ineficientes e com elevadas exigências de linearidade. Por isso, o estudo desta técnica revela-se fundamental.

Aliada a estas duas modulações, a tecnologia Rádio-Fibra é uma alternativa aos sistemas atuais das redes de acesso já limitadas em largura de banda porque permite combinar as vantagens dos sistemas óticos como a sua elevada largura de banda e o baixo consumo de potência, às vantagens dos sistemas *wireless* como a flexibilidade de utilização de vários standards como é caso do LTE.

II. METODOLOGIA

A geração e desmodulação dos sinais OFDM e SC-FDMA em *Radio Frequency* (RF) foi realizada em ambiente de programação *Matrix Laboratory* (MATLAB). O sistema Rádio-Fibra experimental compreende a programação do *Vector Signal Generator*, que modula diretamente um laser VCSEL, a fibra mais atenuador ótico e o detetor. O sinal recebido é posteriormente amostrado com o osciloscópio digital a 20 GS/s e processamento *offline* que inclui a desmodulação do sinal. A desmodulação em particular não foi implementada em *hardware* (tempo real) por falta de recursos disponíveis no laboratório. A validação dos transmissores e recetores foi

realizada por comparação com os resultados teóricos presentes na literatura. Os sinais resultantes da propagação na ligação RoF experimental foram comparados com a simulação que incorporou o modelo do laser e os ganhos referentes aos restantes elementos da ligação ótica.

III. PROCEDIMENTO

Inicialmente para os dois sinais, é modulada uma sequência de bits segundo três possíveis formatos de modulação QPSK, 16-QAM e 64-QAM. Aos símbolos resultantes são adicionados subportadoras piloto para estimar o efeito da propagação do canal.

No caso do OFDM, é adicionada uma sequência *Pseudorandom noise* (PN) proposta no método de Park [2] que constituirá o primeiro símbolo OFDM, para facilitar a sincronização temporal (determinação do início do sinal OFDM) no recetor. Depois é aplicado um *zero padding* (adição de zeros antes e depois do espectro do sinal) para facilitar posteriores filtrações e é também aplicada um *Inverse Fast Fourier Transform* (IDFT) de N pontos, de modo a transportar o sinal para o domínio temporal. Por último, é adicionado o *Cyclic Prefix* (CP) (cópia da última porção do sinal) para prevenir o atraso relativo ao multipercurso.

No caso do SC-FDMA, é adicionada uma sequência Zadoff-Chu (ZC) utilizada no standard LTE que também funcionará como primeiro símbolo SC-FDMA para a sincronização ser possível do lado do recetor. Em seguida é aplicado uma *Fast Fourier Transform* (FFT) de N pontos e as N subportadoras resultantes são mapeadas em M subportadoras segundo dois tipos de mapeamento: entrelaçado, também designado por *Interleaved Frequency Division Multiple Access* (IFDMA), onde as subportadoras são distribuídas pelo espectro total de uma forma equidistante ou localizado, também designado por *Localized Frequency Division Multiple Access* (LFDMA), onde as subportadoras são confinadas a uma fração do espectro total. Neste artigo apenas é considerado apenas um utilizador ($Q = 1$), de modo a ser possível a comparação entre os dois sinais. Posteriormente, é aplicado um *zero padding* e uma IDFT de M pontos. Por último, tal como no OFDM, é adicionado o CP.

Estes dois sinais são carregados para o gerador de sinal através das suas componentes em fase (I) e em quadratura (Q), onde são especificadas a frequência da portadora rádio e a potência RF do sinal enviado. O sinal resultante atravessa o *link* ótico constituído pelo VCSEL com um comprimento de onda de 1550 nm, um atenuador ótico (simula a atenuação inerente à propagação na fibra ótica) e um recetor ótico

* (+351) 917 326 924, ruben14neto@gmail.com

† Professor Associado, DEEC, FEUP (+351) 225 081 473, hsalgado@fe.up.pt

‡ Investigador do INESC TEC, (+351) 222 094 016, lpessoa@inescporto.pt

constituído por um fotodíodo e um amplificador de transimpedância. No final do percurso, os sinais são adquiridos através do osciloscópio com uma taxa de 20 Gsamples/s para posterior desmodulação em ambiente MATLAB.

Na desmodulação OFDM em MATLAB, é inicialmente efetuado um *downconvert* à mesma frequência especificada no gerador, de modo a obter os sinais em banda-base. Em seguida, é realizada a sincronização temporal do sinal recebido segundo o método de Park e são realizadas as operações inversas às efetuadas no transmissor OFDM, às quais se adiciona uma igualização no domínio das frequências depois da aplicação da FFT e da remoção do *zero padding*.

Na desmodulação SC-FDMA em MATLAB, é inicialmente realizada a sincronização temporal do sinal recebido através da correlação cruzada entre o este e o sinal de referência, e em seguida é efetuado um *downconvert*. Para recuperar os símbolos enviados, são realizadas as operações inversas às efetuadas no transmissor SC-FDMA, às quais se adiciona uma igualização no domínio das frequências depois da aplicação da FFT e do desmapeamento das subportadoras.

IV. RESULTADOS

A. Parâmetros dos sinais

Os sinais gerados em MATLAB apresentam as seguintes principais características: modulação 16-*Quadrature Amplitude Modulation* (QAM), 128 subportadoras, 8 subportadoras piloto, *zero padding* de $4\times$, um CP com um tamanho $4\times$ menor que o tamanho das FFT/IDFT, 10 símbolos enviados, igualização *Zero Forcing* (ZF) e uma portadora rádio localizada a 2.4 GHz.

B. Análise dos resultados

Para analisar o comportamento do PAPR foi utilizada a função *Complementary Cumulative Distribution Function* (CCDF), que determina a probabilidade de uma dada amostra ultrapassar valores específicos de PAPR em dB.

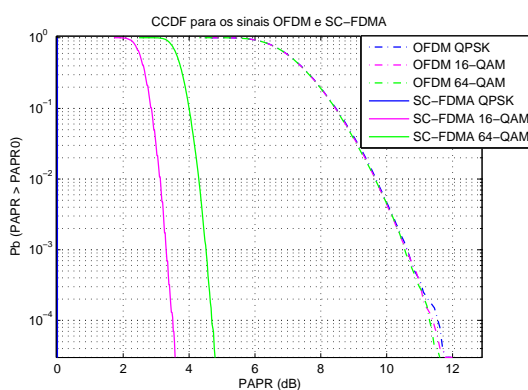


Figura 1: Comparação do PAPR dos dois sinais.

Segundo a Figura 1, para $M = N = 128$ subportadoras (sem mapeamento de subportadoras), o OFDM apresenta um PAPR maior em cerca de 8 dB que o SC-FDMA para um CCDF igual a 10^{-4} e quando é utilizada a modulação 16-QAM, tal como referido em [3].

Os resultados do SNR para as transmissões OFDM e SC-FDMA simuladas e experimentais em função da potência RF dos sinais enviados e para diferentes correntes de polarização do laser (I_o), encontram-se representados na Figura 2. Onde é possível verificar a boa aproximação entre a simulação e a realidade experimental, porque foi adicionado ao *link* óptico simulado o ruído medido devido ao VCSEL e ao recetor óptico.

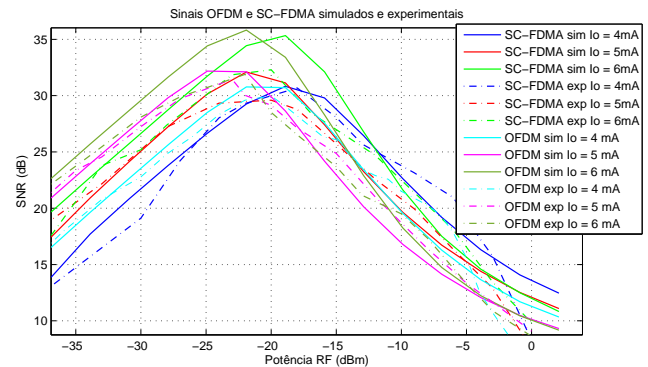


Figura 2: Comparação do SNR dos sinais em função da P_{RF} .

É notório na Figura 2 que para as potências RF mais baixas, o ruído é dominante e para as potências RF mais elevadas, a distorção de intermodulação inerente ao VCSEL passa a ser dominante, tal como foi constatado em [4]. O sinal SC-FDMA é mais sensível ao ruído do que o sinal OFDM para potências RF mais baixas, mas para potências RF mais elevadas, o sinal SC-FDMA é mais resistente à distorção de intermodulação inerente ao VCSEL. Apesar deste facto, os SNRs máximos obtidos são idênticos, não existindo uma melhoria no desempenho de um sinal relativamente ao outro.

V. CONCLUSÃO

Concluiu-se que o SC-FDMA apresenta um PAPR menor que o OFDM para vários cenários de simulação, tal como esperado. Foi também possível constatar que o SC-FDMA é mais sensível ao ruído e é mais imune à distorção de intermodulação do que o OFDM.

Um desenvolvimento futuro poderia passar por estudar a técnica de acesso utilizada no *downlink* LTE, *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA), que deriva da modulação OFDM, comparando-a com o SC-FDMA, num cenário experimental de uma rede de transporte Rádio-Fibra utilizando dados reais.

REFERÊNCIAS

- [1] Wikipédia. Long Term Evolution. [Online]. Available: http://pt.wikipedia.org/wiki/Long_Term_Evolution [Accessed: 03-02-2014]
- [2] B. Park, H. Cheon, C. Kang, and D. Hng, "A Novel Timing Estimation Method for OFDM Systems," *IEEE Communication Letters*, vol. 7, no. 15, pp. 239–241, May 2003.
- [3] H. G. Myung, J. Lim, and D. J. Goodman, "Single Carrier FDMA for Uplink Wireless Transmission," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2006.
- [4] D. Coelho, J. M. B. Oliveira, L. M. Pessoa, H. M. Salgado, and J. C. S. Castro, "Performance Analysis of WDM-PON Architecture for UWB Distribution in Aircraft Networks," *Proceedings of CETEC 2011*, 2011.