

Demonstrador de um Sistema MAGE com a Antena do P-95 e Processamento em Tablet

Rafael G. Licursi de Mello^{1,2}, Fernando R. de Sousa², Cynthia Junqueira^{3,4} e Adilson Chinatto^{3,4}

^{1,2}2º/7º GAV - Esquadrão Phoenix, Canoas/RS – Brasil

²Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC – Brasil

³Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP – Brasil

⁴Espectro Ltda., Campinas/SP – Brasil

Resumo – Um demonstrador de Sistema de Medidas de Apoio à Guerra Eletrônica (MAGE) baseado em Rádio Definido por Software (RDS) com processamento em tablet e aplicação da antena do MAGE da aeronave P-95 é apresentado. Experimentos apontaram que o sistema, quando confrontado com emissões características de sinais de radar, foi capaz de detectar pulsos e seus parâmetros com uma taxa de erro em torno de 0,05 % quando apenas um sinal era recebido ou quando um ambiente eletromagnético complexo era simulado. O sistema também foi capaz de detectar pulsos sobrepostos, além de identificar emissores simulados segundo dados pré-cadastrados. Os resultados deste trabalho sugerem que a capacidade de processamento dos tablets e a abordagem da tecnologia RDS já permitem, atualmente, que Sistemas MAGE operem embarcados nestes dispositivos portáteis e convenientes.

Palavras-Chave – MAGE, RDS, P-95.

I. INTRODUÇÃO

Um Sistema de Medidas de Apoio à Guerra Eletrônica (MAGE) com tecnologia de Rádio Definido por Software (RDS) e processamento em tablet foi proposto em [1].

Tal concepção, baseada em Rádio Definido por Software (RDS), permite que um *front-end* de RF (radiofrequência) seja controlado através de interface USB e um processamento digital de sinais seja programado em dispositivos do tipo *tablet*. As características dos *tablets* são citadas em [2] por proporcionarem vantagens de portabilidade, furtividade, baixo custo e consumo de energia para o MAGE proposto.

O caráter comercial dos componentes envolvidos em um sistema como este torna-o menos suscetível a embargos de outras nações, o que é conveniente para situações de resistência em guerras assimétricas, exceto pela exigência de antenas de banda ultralarga (UWB – *ultra-wideband*). A Fig. 1 ilustra seu emprego em um Teatro de Operações genérico.

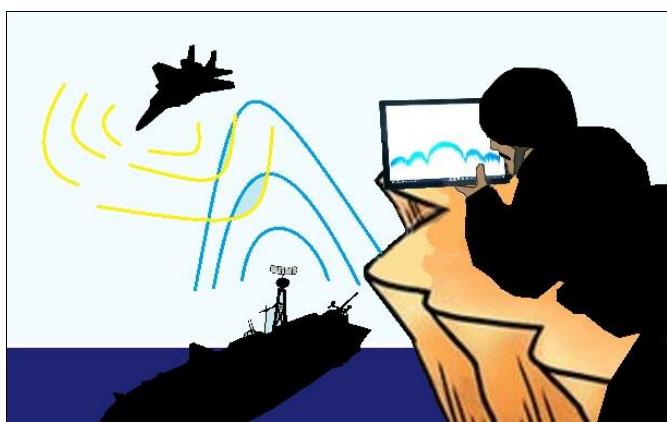


Fig. 1. Sistema MAGE portátil, furtivo e de baixo consumo [2].

Este artigo apresenta a implementação de um demonstrador de Sistema MAGE na concepção supracitada

com o emprego da antena UWB do MAGE da aeronave P-95. Também foram empregados um RDS modelo NooElec RTL-SDR™ [3] e um tablet Microsoft Surface Pro 4™ [4].

O processamento *deinterleaving*, responsável por detectar parâmetros básicos dos pulsos e, através deles, organizá-los, foi programado em Matlab® [5]. O algoritmo foi baseado na convolução de um pulso com as derivadas dos sinais recebidos, e não através de um histograma de amostras como ocorreu em [2], o que permitiu a detecção de pulsos sobrepostos, sendo esta uma contribuição deste trabalho.

Experimentos mostraram que o demonstrador pôde, em um ambiente eletromagnético denso, detectar pulsos com taxa aproximada de erro de 0,05 % e indicar emissores coerentes cadastrados em uma Biblioteca de Missão (BIM).

Muitos radares operam fora da faixa de operação do RTL-SDR, qual seja de 24 a 1766 MHz; além disso, este RDS possui apenas um canal de recepção – e é impossível a medição do ângulo de chegada (AOA – *angle of arrival*) com apenas uma antena do P-95, que não é diretiva o suficiente e exige a aplicação de arranjos [6]; todavia, o objetivo deste estudo, inicialmente, foi de processar diversos sinais com características típicas de radar, isolados ou simultâneos, a partir de parâmetros como frequência da portadora (Fc – *frequency of carrier*), largura de pulso (PW – *pulse width*) e intervalo de repetição de pulsos (PRI – *pulse repetition interval*), de forma a provar que a capacidade de processamento dos *tablets* já permite a concepção de um MAGE embarcado; o objetivo final é implementar, no futuro, um *front-end* de RF com vários canais de recepção para medição do AOA e operação na faixa de frequências de 2 a 40 GHz.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

A Fig. 2 demonstra a arquitetura idealizada de um Sistema MAGE genérico [6].

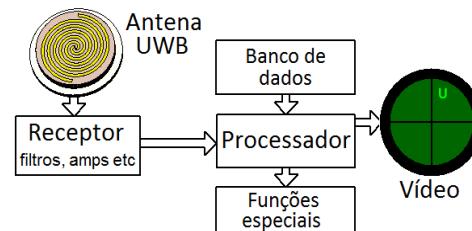


Fig. 2. Arquitetura de um Sistema MAGE genérico [6].

As características dos *tablets* possibilitam que eles desempenhem as funções de processador, banco de dados e tela de vídeo, podendo, inclusive, acionar funções especiais através de sua interface USB. A Fig. 3 ilustra como foi consolidada a arquitetura da Fig. 2 no demonstrador de MAGE.

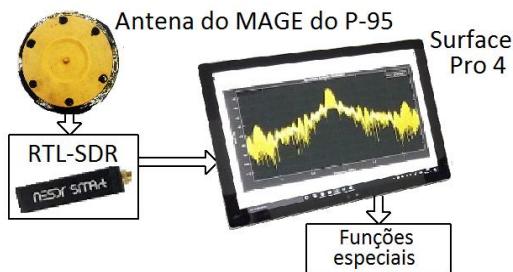


Fig. 3. Arquitetura do demonstrador de MAGE implementado.

Após a recepção dos sinais pela antena do MAGE do P-95, o RTL-SDR efetua um tratamento inicial nos sinais recebidos, amostra-os e envia-os para o Surface Pro 4. O tablet realiza, em Matlab, o processamento *deinterleaving*, a comparação dos parâmetros extraídos com parâmetros pré-registrados na BIM e a programação da projeção dos dados para sua tela.

A. Antena do MAGE do P-95

Para utilização da antena UWB do MAGE do P-95, recuperou-se, nas reservas da Força Aérea Brasileira, uma unidade outrora considerada inutilizável. A Fig. 4 mostra a adaptação e a soldagem de um conector SMA após o *balun* da antena para extração do sinal de RF.

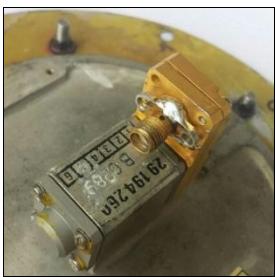


Fig. 4. Adaptação de conector SMA em antena do MAGE do P-95.

B. RDS Modelo NooElec RTL-SDR

A versão do RTL-SDR utilizada foi a NESDR, baseada no sintonizador R820T2 e no demodulador RTL2832U. Como em receptores do tipo super-heteródino, ocorre um batimento dos sinais recebidos com o sinal de um oscilador controlado por tensão no R820T2, transladando-os para uma frequência intermediária (FI). Logo após, o RTL2832U digitaliza o sinal em FI com taxa de conversão analógico-digital, em operação estável, de 28,8 MHz e realiza uma demodulação complexa. Uma decimação de fator 12 converte a taxa de amostragem para 2,40 MHz, que proporciona uma faixa de passagem de -1,2 a +1,2 MHz. Os dados são enviados para o Surface Pro 4 através do USB 3.0 [7].

C. Tablet Microsoft Surface Pro 4

Este dispositivo está equipado com um processador Intel Core i7-6650U™ de 6ª geração e 4 MB de memória cache, além de 16 GB de memória RAM e interface USB 3.0 [4].

D. Processamento Deinterleaving

Este processamento consiste em discriminar pulsos e seus parâmetros, organizar os e atribuir-lhes a diferentes emissores [8]. O sistema, entretanto, precisa lidar com a questão do que

exatamente seria um pulso. A solução deste desafio começa com a aplicação de um limiar de amplitudes, que garante que apenas sinais que excedam sejam processados, evitando que, por exemplo, oscilações devidas ao ruído térmico sejam levadas em consideração.

O horário de início de cada pulso (TOA – *time of arrival*) pode ser identificado pelo horário no qual ocorre uma derivada positiva. O horário de término, pelo horário da primeira derivada negativa com módulo semelhante à derivada positiva inicial. Um limiar de derivadas garante que oscilações leves em cada pulso não sejam interpretadas como outros pulsos. Em função do tempo de subida e de descida do pulso, seu início ou término pode estar dividido em duas ou mais amostras; portanto, antes de todo esse processo, o vetor de derivadas é convoluído com um pulso para que resulte em um vetor de médias no qual as operações são efetuadas. Os procedimentos acima identificam, inclusive, pulsos sobrepostos, diferente do que ocorria em [2].

Como o RTL-SDR possui apenas um canal de recepção e o demonstrador do MAGE não é capaz de medir o AOA, a organização dos pulsos não ocorreu a partir desse parâmetro, e, sim, de uma varredura de Fc, seguida de PW (que seria o horário de término do pulso subtraído de seu TOA) e PRI (subtração do TOA de um pulso e o TOA do pulso anterior que tenha mesma Fc e PW).

E. Geradores de Sinais de Radar

Para emissão dos sinais, no experimento de validação, foram empregados um gerador de sinais R&S®SMA 100A da Rohde & Schwarz [9] e um RDS de modelo USRP® B200 da Ettus Research [10]. A operação básica do sistema frente a pulsos gerados em um dispositivo confiável foi verificada com o R&S®SMA 100A. Contudo, ele não pode emitir mais de um sinal ao mesmo tempo e para testar a recepção de um cenário eletromagnético mais complexo, o USRP foi empregado. Os sinais gerados pelo R&S®SMA 100A foram radiados por uma antena *patch array* em microfita, desenvolvida domesticamente, enquanto os gerados pelo USRP o foram por uma antena log de marca WA5VJB [11].

F. Montagens

Na Montagem 1, o demonstrador de MAGE foi posicionado frente ao R&S®SMA 100A, como exibe a Fig. 5. A antena emissora e o R&S®SMA 100A estão à direita. A antena do P-95 está instalada no suporte à esquerda, enviando, através de um cabo coaxial, os sinais recebidos para o RTL-SDR, que se situa ao fundo conectado no tablet.



Fig. 5. Antena do P-95 à esquerda alimentando RTL-SDR; antena emissora à direita em frente ao R&S®SMA 100A.

A Montagem 2 apresentou uma disposição semelhante à da Montagem 1, porém com o USRP e a antena log emitindo no lugar do R&S®SMA 100A e da antena *patch array*, como demonstra a Fig. 6.

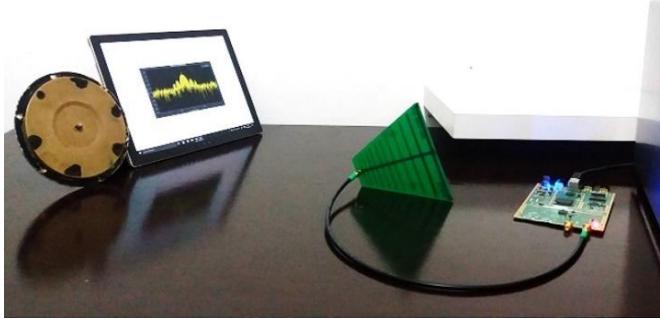


Fig. 6. Antena do P-95, RTL-SDR e *tablet* à esquerda; antena log emissora e USRP à direita.

A Fig. 7 deixa conexões entre a antena do MAGE do P-95, o RTL-SDR e o *tablet* Microsoft Surface Pro 4 explícitas na Montagem 2.

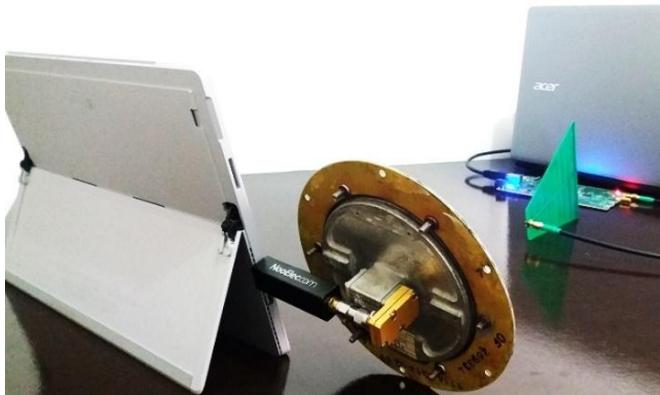


Fig. 7. Conexões entre a antena do P-95, o RTL-SDR e o *tablet*.

G. Medidas

Para diminuir os efeitos das reflexões no recinto e a resposta não-linear dos componentes, sinais de baixa potência foram empregados. No R&S®SMA 100A, foi gerado um emissor de cada vez e o MAGE tinha que os receber e identificar com facilidade. Já no experimento com o USRP, o caso foi mais complexo: diversos sinais foram emitidos simultaneamente e o sistema necessitou agrupar pulsos com parâmetros semelhantes. O desafio, contudo, consiste no fato de o demonstrador possuir apenas um canal de recepção e não poder iniciar a discriminação de cada sinal através do AOA. Além disso, nesse segundo caso, o emissor, USRP, possui apenas um oscilador e os sinais emitidos simultaneamente estavam sempre na mesma Fc – outro parâmetro importante que não pôde ser empregado pelo processamento *deinterleaving*. Em resumo, o sistema receptor teve que discriminar sinais apenas pela PW e pelo PRI.

III. RESULTADOS

Na Montagem 1, para a configuração do emissor em $F_c = 1,5 \text{ GHz}$, $PW = 5 \mu\text{s}$ e $PRI = 100 \mu\text{s}$ e taxa de amostragem de 2,8 MHz no MAGE (acima da faixa de

operação estável do RTL-SDR), ocorreu detecção e organização de pulsos e parâmetros conforme Tabela I, ordenada pelo 1º TOA. Nela, F_c está em gigahertz, *Amplitude* em miliwatts, *PW* em microsegundos, *PRI*, 1º TOA e Último TOA em segundos; a coluna #*Detec* indica quantas vezes um pulso com características semelhantes foi detectado.

TABELA I. PULSOS E PARÂMETROS DETECTADOS (MONTAGEM 1)

| <i>FC</i> (GHz) | <i>PW</i> (μs) | <i>PRI</i> (s) | <i>Ampl</i> (mW) | # <i>Detec</i> (unid.) | 1º TOA (s) | UltTOA (s) |
|--------------------|-------------------|-------------------|---------------------|---------------------------|---------------|---------------|
| 1,5 | 5,00 | 0,0001 | 0,25 | 72.345 | 19,56 | 41,14 |
| 1,5 | 2,50 | 0,8018 | 0,27 | 4 | 19,57 | 40,84 |
| 1,5 | 1,78 | 2,1926 | 0,23 | 5 | 19,61 | 39,25 |
| 1,5 | 3,93 | 2,7243 | 0,26 | 7 | 19,62 | 39,94 |
| 1,5 | 0,71 | 1,0268 | 0,25 | 8 | 20,78 | 38,92 |
| 1,5 | 2,86 | 4,8974 | 0,26 | 7 | 20,82 | 38,88 |
| 1,5 | 1,43 | 3,8381 | 0,26 | 8 | 20,84 | 37,79 |
| 1,5 | 1,07 | 2,2547 | 0,26 | 5 | 21,18 | 37,52 |
| 1,5 | 3,21 | 4,2837 | 0,24 | 7 | 22,82 | 38,31 |
| 1,5 | 2,14 | - | 0,25 | 1 | 39,56 | 39,56 |

A Tabela 1 mostra que o limiar de amplitudes foi superado quando a varredura de Fc passou por 1,5 GHz. O primeiro sinal listado apresenta $PW = 5 \mu\text{s}$ e $PRI = 100 \mu\text{s}$, características coerentes com aquelas do sinal configurado no R&S SMA 100A. Ele foi detectado 72.345 vezes. Os outros sinais medidos, incoerentes com o que foi configurado no emissor, totalizaram 45 detecções, o que representa 0,06 % do total.

As características do sinal configurado no R&S SMA 100A estavam descritas na BIM do demonstrador de MAGE como sendo de um emissor hipotético denominado *Radar Fragata*. O sistema identificou-o corretamente como ilustra a Fig. 8. Ela também mostra a Transformada Rápida de Fourier (FFT – *Fast Fourier Transform*) do sinal medido em determinado instante. É possível observar o primeiro nulo da função *sinc* em 200 kHz, o que é coerente com a PW configurada no gerador.

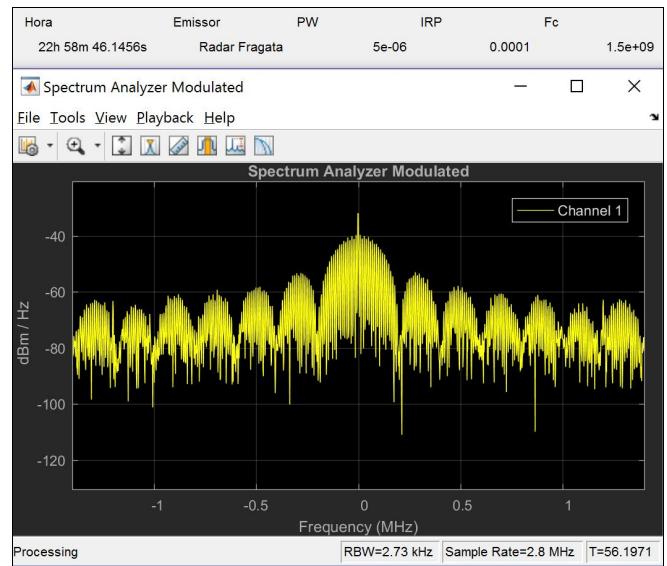


Fig. 8. Identificação de um emissor e FFT do sinal.

Na Montagem 2, inicialmente foram programados dois sinais com sobreposição de seus pulsos. Ambos possuíam $F_c = 1,2 \text{ GHz}$ e $PRI = 1 \text{ ms}$. Todavia, um deles apresentava $PW = 100 \mu\text{s}$ e o outro $PW = 20 \mu\text{s}$. A Fig. 9 ilustra, no domínio do tempo, em banda-base, com amplitude em miliwatts e tempo em milissegundos, como esses pulsos sobrepostos foram recebidos no MAGE.

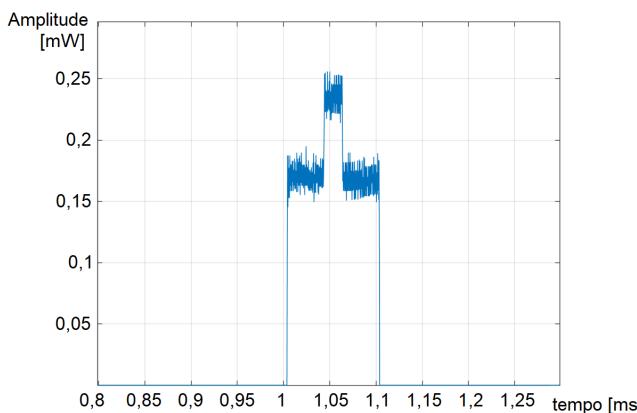


Fig. 9. Pulsos sobrepostos recebidos no MAGE.

A Tabela II, com parâmetros de mesmas unidades que os da Tabela I, sumariza como os pulsos sobrepostos, agora ordenados pelo *#Detec*, foram interpretados pelo demonstrador de MAGE. Os dez sinais detectados mais vezes são mostrados.

TABELA II. PULSOS SOBREPOSTOS (MONTAGEM 2)

| <i>FC (GHz)</i> | <i>PW (μs)</i> | <i>PRI (s)</i> | <i>Ampl (mW)</i> | <i>#Detec (unid.)</i> | <i>Iº TOA (s)</i> | <i>UltTOA (s)</i> |
|-----------------|----------------|----------------|------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|
| 1,2 | 100 | 0,001 | 0,17 | 18.432 | 33,72 | 52,73 |
| 1,2 | 20,7 | 0,001 | 0,08 | 10.223 | 33,72 | 52,73 |
| 1,2 | 18,2 | 0,001 | 0,08 | 6.404 | 33,9 | 52,73 |
| 1,2 | 59,6 | 0,012 | 0,18 | 1.926 | 33,94 | 52,73 |
| 1,2 | 53,2 | 3,6e-7 | 0,18 | 762 | 33,88 | 52,71 |
| 1,2 | 66,4 | 0,0080 | 0,19 | 134 | 33,95 | 52,7 |
| 1,2 | 48,2 | 0,0080 | 0,18 | 114 | 33,92 | 52,71 |
| 1,2 | 41,1 | 0,3352 | 0,18 | 97 | 33,95 | 52,7 |
| 1,2 | 87,9 | 0,3701 | 0,24 | 87 | 33,78 | 52,59 |
| 1,2 | 35,7 | 0,0179 | 0,22 | 59 | 33,83 | 52,46 |

O sinal detectado mais vezes (18.432 ocasiões) é coerente com o sinal configurado com $PW = 100 \mu s$. O segundo e o terceiro sinais detectados mais vezes são coerentes com o sinal configurado no USRP com $PW = 20 \mu s$ (o segundo sinal apresenta um erro na acurácia da medição de PW de 3,5 % e o terceiro sinal de 9 %). Eles foram detectados 16.627 vezes no período da medição, o que significa que 1.805 pulsos sobrepostos não foram detectados (9,79 % do total).

Ainda na Fig. 9, o pico de amplitude dos dois sinais sobrepostos corresponde a aproximadamente 0,25 mW; entretanto, como demonstrado pela Tabela II, a técnica de detecção de pulsos baseada em derivadas foi bem-sucedida em discriminar a amplitude correspondente a cada um dos pulsos separadamente (0,17 mW do pulso com $PW = 100 \mu s$ e 0,8 mW do pulso com $PW = 20 \mu s$).

Os demais pulsos totalizaram 3.881 detecções (contando não apenas os mostrados na Tabela II, mas todos os sinais registrados). Eles eram incoerentes com as emissões do USRP e representam 9,97 % do total.

Posteriormente, na Montagem 2, foram emitidos diversos sinais pulsados simultaneamente, sem que nenhuma sobreposição de pulsos fosse imposta. Conforme os sinais eram configurados e emitidos pelo USRP, o demonstrador de MAGE varria F_c , detectando pulsos e identificando emissores caso sinais fossem coerentes com a BIM.

A Tabela III, também ordenada pelo *#Detec*, sumariza a detecção para uma taxa de amostragem de 2,6 MHz na recepção, quando os seguintes sinais foram emitidos, todos com $F_c = 800 \text{ MHz}$ e $PRI = 400 \mu s$: $PW = 3 \mu s$, $PW = 5 \mu s$, $PW = 10 \mu s$ e $PW = 40 \mu s$.

TABELA III. SINAIS SIMULTÂNEOS (MONTAGEM 2)

| <i>FC (GHz)</i> | <i>PW (μs)</i> | <i>PRI (s)</i> | <i>Ampl (mW)</i> | <i>#Detec (unid.)</i> | <i>Iº TOA (s)</i> | <i>UltTOA (s)</i> |
|-----------------|----------------|----------------|------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|
| 0,8 | 10 | 0,0004 | 1,01 | 7.024 | 67,05 | 81,29 |
| 0,8 | 40 | 0,0004 | 0,96 | 7.003 | 67,05 | 81,29 |
| 0,8 | 2,69 | 0,0004 | 0,61 | 6.677 | 67,05 | 81,16 |
| 0,8 | 5 | 0,0004 | 1,08 | 3.681 | 67,05 | 81,29 |
| 0,8 | 4,62 | 0,0004 | 0,60 | 3.341 | 67,18 | 81,23 |
| 0,8 | 3,08 | 0,0004 | 0,97 | 2.990 | 67,05 | 81,28 |
| 0,8 | 25,4 | 7,4557 | 0,68 | 2 | 70,46 | 77,92 |
| 0,8 | 23,8 | 0,4433 | 0,61 | 2 | 78,38 | 78,83 |
| 0,8 | 4,23 | - | 0,69 | 1 | 67,81 | 67,81 |
| 0,8 | 11,2 | - | 0,72 | 1 | 72,73 | 72,73 |

O primeiro sinal da tabela é coerente com aquele de $PW = 10 \mu s$. O segundo, com o de $PW = 40 \mu s$. O quarto e o quinto sinais são coerentes com o sinal de $PW = 5 \mu s$ (sendo que o quinto sinal apresenta 7,60 % de erro de acurácia na medição). O terceiro e o sexto sinais com o de $PW = 3 \mu s$ (sendo que o terceiro apresenta erro de acurácia na medição de 10,33 % e o sexto de 2,67 %). A soma de *#Detec* da terceira e da sexta linhas superou o *#Detec* dos demais sinais – isso ocorreu devido a redundâncias intencionais na contagem dos pulsos considerando parâmetros de tolerância de comparação no algoritmo. Os demais pulsos medidos somam 13 detecções e representam 0,04 % do total. A identificação dos emissores segundo a BIM ocorreu de acordo com o esperado novamente.

IV. DISCUSSÃO

Na Montagem 1, o demonstrador de MAGE detectou as emissões do R&S SMA 100A em sua grande maioria com acurácia. O equipamento também identificou o sinal como sendo de um emissor pré-cadastrado em sua BIM. Os 0,06 % de sinais espúrios que apareceram podem ter sido originados, dentre outros, por:

- distorção devido a não-linearidade dos componentes do sintonizador R820T2 do RTL-SDR;
- baixa acurácia do conversor analógico-digital no demodulador RTL2832U do RTL-SDR;
- reflexões no recinto; e
- características de desempenho do algoritmo de detecção de pulsos baseado na convolução de um pulso com as derivadas dos sinais recebidos.

Ao deparar-se com pulsos sobrepostos, o MAGE apresentou a capacidade de detectá-los, perdendo 9,79 % dos mesmos. Caso o algoritmo baseado em derivadas tenha contribuído de alguma forma para diminuir a acurácia na medição dos sinais pulsados, este resultado mostra que ocorreu uma boa relação entre a capacidade de detectar pulsos sobrepostos e o prejuízo da acurácia.

Ao confrontar um ambiente eletromagnético um pouco mais complexo, simulado pelo USRP, o MAGE também conseguiu identificar os pulsos e seus diversos parâmetros, com apenas 0,04 % de sinais espúrios medidos, identificando os diversos emissores cadastrados na BIM quando sinais coerentes eram emitidos.

Os resultados sugerem que a capacidade de processamento dos tablets e a abordagem de recepção e processamento de sinais proporcionada pela tecnologia RDS já permitem, nos dias de hoje, que Sistemas MAGE possam operar embarcados nestes dispositivos portáteis e convenientes.

Em trabalhos futuros, para o equipamento se tornar operacional, os seguintes passos devem ser implementados:

- aplicar um RDS com no mínimo dois canais de recepção para possibilitar a medição do AOA azimutal e fazer com que o processamento *deinterleaving* inicie a organização dos pulsos a partir desse parâmetro – para eliminação de ambiguidades, são necessários, no mínimo, três canais; e
- aplicar um RDS com faixa de frequências condizente com a faixa dos radares de interesse – entretanto, nos dias atuais, não existem RDS capazes de operar em frequência de 40 GHz, sendo necessário o desenvolvimento de um *front-end* de RF adequado para estender a faixa de frequências de operação.

V. CONCLUSÃO

A proposta de [1] era desenvolver um Sistema MAGE com tecnologia RDS embarcado em dispositivos do tipo *tablet*.

A partir daquele conceito, um demonstrador desse tipo de sistema foi implementado utilizando a antena do Sistema MAGE do P-95, o RDS modelo NooElec RTL-SDR e o *tablet* Microsoft Surface Pro 4.

O algoritmo do processamento *deinterleaving* foi implementado em Matlab com base na convolução de um pulso com as derivadas dos sinais recebidos, o que conferiu ao equipamento a capacidade de detectar pulsos sobrepostos, diferente do que ocorria em [2].

Experimentos demonstraram que pulsos emitidos, primeiramente, por um gerador Rohde & Schwarz R&S SMA 100A e, posteriormente, por um RDS modelo USRP B200 foram recebidos, detectados e identificados pelo demonstrador de MAGE, com taxa de erro de 0,05 %

aproximadamente. Ademais, emissores pré-cadastrados em uma BIM foram indicados quando as características dos sinais detectados foram coerentes.

Por fim, foram estabelecidos os próximos passos necessários para tornar este demonstrador um equipamento operacional.

REFERÊNCIAS

- [1] R. G. L Mello, N. A. Roso, F. R. Sousa, C. C. M. Junqueira, A. Chinatto. “Proposta de um MAGE RDS com Processamento em Tablet”: desafios de hoje e perspectivas do amanhã. Spectrum (Brasília, 2000), v. 1, p. 17-22, 2016.
- [2] R. G. L Mello, F. R. Sousa, C. C. M. Junqueira. “SDR-Based radar-detectors embedded on tablet devices”. International Microwave and Optoelectronics Conference 2017 (no prelo).
- [3] NooElec Inc. “About RTL-SDR”. Disponível em: <www rtl-sdr.com/about-rtl-sdr>. Acesso em: 16/07/2017.
- [4] Microsoft. “Surface”. Disponível em: <<https://www.microsoft.com/surface/pt-pt>>. Acesso em: 16/07/2017.
- [5] The Mathworks Inc. “Matlab R2017a”. Disponível em: <www.mathworks.com/products/matlab>. Acesso em: 16/07/2017.
- [6] R. G. L. Mello, C. C. M. Junqueira. “Polarization Diversity on ESM Systems”. Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, v. 16, p. 273-283, Março 2017.
- [7] B. Stewart, K. Barlee, D. Atkinson, L. Crockett. “Software defined radio using Matlab & Simulink and the RTL-SDR”. Glasgow: Strathclyde Academic Media, 2015.
- [8] D. Adamy. “EW 101”: a first course in Electronic Warfare. Boston: Artech House Inc., 2001.
- [9] Rohde & Schwarz. “R&S®SMA 100A signal generator”. Disponível em: <https://www.rohde-schwarz.com/us/product/sma100a-product-startpage_63493-7566.html>. Acesso em: 16/07/2017.
- [10] Ettus Research. “USRP B200”. Disponível em: <<https://www.ettus.com/product/details/UB200-KIT>>. Acesso em: 16/07/2017.
- [11] WA5VJB. “Printed circuit board antennas” – log periodic. Disponível em: <<http://www.wa5vjb.com/products1.html>>. Acesso em: 16/07/2017.