

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}

¹2º/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.

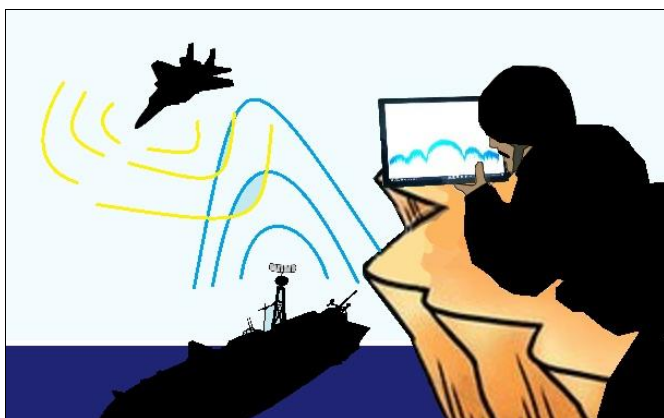


Fig. 1. Sistema MAGE portátil, furtivo e de baixo consumo [2].

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 (F_c – *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].

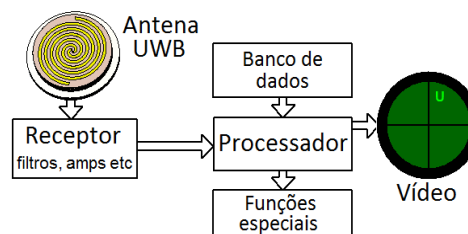


Fig. 2. Arquitetura de um Sistema MAGE genérico [6].

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.

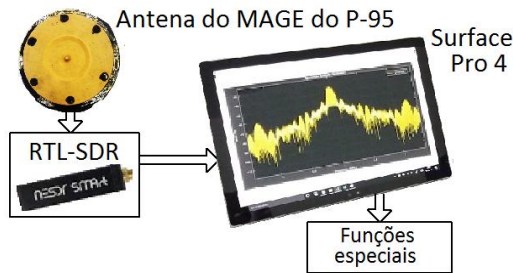


Fig. 3. Arquitetura do demonstrador de MAGE implementado.

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, organizá-los e atribuí-los 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 o 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.

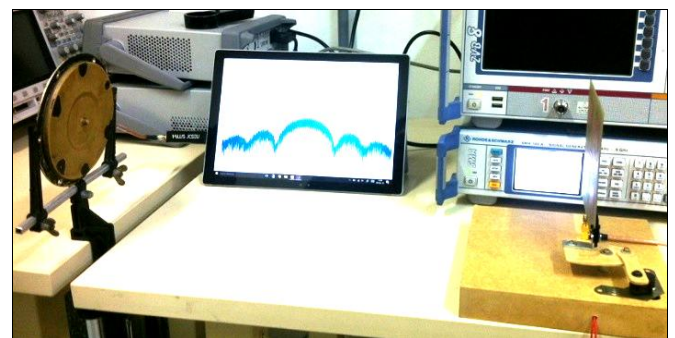


Fig. 5. Antena do P-95 à esquerda alimentando RTL-SDR; antena emissora à direita em frente ao R&S® SMA 100A.

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.

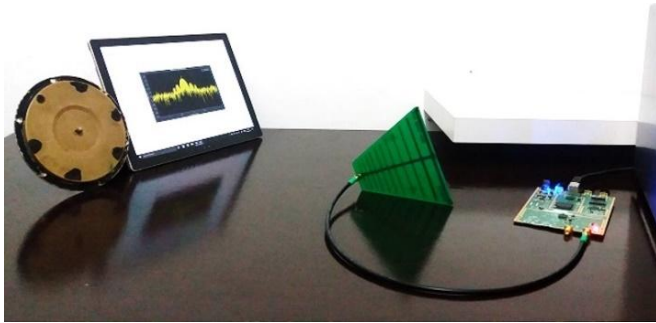


Fig. 6. Antena do P-95, RTL-SDR e tablet à esquerda; antena log emissora e USRP à direita.

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.

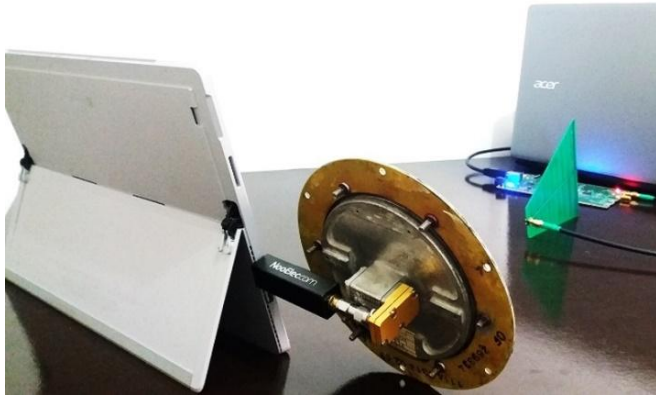


Fig. 7. Conexões entre a antena do P-95, o RTL-SDR e o tablet.

G. Medições

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 F_c – 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 1^o TOA . Nela, F_c está em gigahertz, $Amplitude$ em miliwatts, PW em microssegundos, PRI , 1^o 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)

F_c (GHz)	PW (μs)	PRI (s)	$Ampl$ (mW)	$\#Detec$ (unid.)	1 ^o TOA (s)	Últ TOA (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 F_c 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.

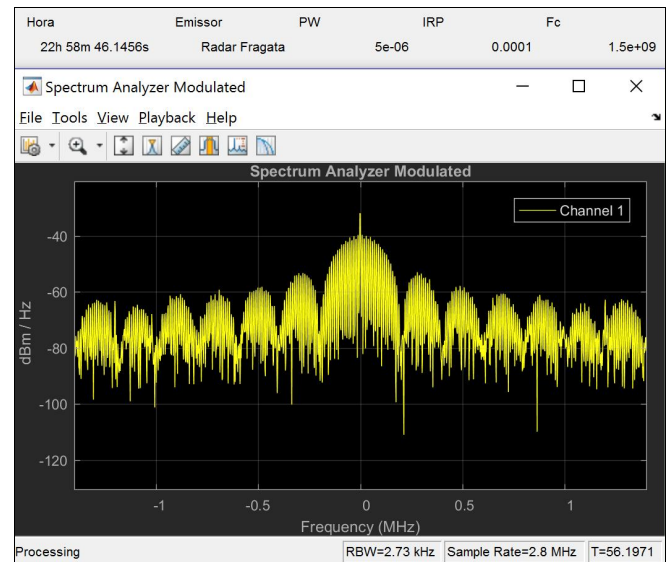


Fig. 8. Identificação de um emissor e FFT do sinal.

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.

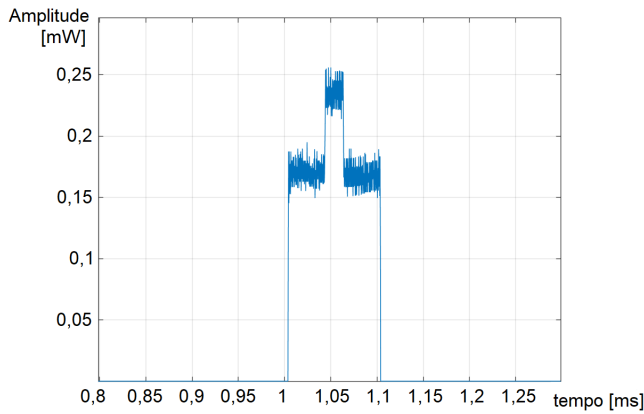


Fig. 9. Pulsos sobrepostos recebidos no MAGE.

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)

FC (GHz)	PW (μ s)	PRI (s)	Ampl (mW)	#Detec (unid.)	1 ^o TOA (s)	UltTOA (s)
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 Fc, 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 $Fc = 800$ 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)

FC (GHz)	PW (μ s)	PRI (s)	Ampl (mW)	#Detec (unid.)	1 ^o TOA (s)	UltTOA (s)
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.