



Guerra Eletrônica e Sensoriamento Remoto: Integração de Sistemas Embarcados

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

Demonstration of an ESM System with the P-95 Antenna and Tablet Processing

Rafael Gonçalves Licursi de Mello¹, Fernando Rangel de Sousa², Cynthia Junqueira^{3,4} e Adilson Chinatto^{3,4}¹Institut Polytechnique de Paris, Palaiseau – França²Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis/SC – Brasil³Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas/ SP – Brasil⁴Espectro Ltda., Campinas/SP – Brasil

Article Info

Article History:

Received	30 April	2022
Revised	25 July	2022
Accepted	10 August	2022
Available online	31 August	2022

Palavras Chave:

Sistema de Medidas de Apoio
Eletrônico
Rádio definido por software
P-95 Bandeirulha

Keywords:

Electronic Support Measures System
Software-Defined Radio
P-95 Bandeirulha

E-mail addresses:

rafael.licursi@ieee.org (R. G. L. Mello)

fernando.rangel@eel.ufsc.br (F. R. Souza)

Souza

cjunqueira@uol.com.br (C. Junqueira)

chinatto@gmail.com (A. Chinatto)

Resumo

Este artigo apresenta um demonstrativo 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. Experimentos apontaram que o dispositivo proposto, quando confrontado com emissões características de sinais-radar, detectou pulsos recebidos 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 foi capaz de indicar o nome dos emissores simulados segundo uma Biblioteca de Missão (BIM). Por último, este trabalho evidencia que ele poderia operar até 40 GHz com a integração de detectores de envoltória e amplificadores adequados para tal.

Abstract

This article presents a demonstration of an Electronic Support Measures (ESM) System based on Software-Defined Radio (SDR), with processing in a tablet device and the use of the antenna of the P-95 aircraft. Experiments showed that the proposed device, when confronted with characteristic emissions of radar signals, detected received pulses and their parameters with an error rate around 0.05%, when only one signal was received or when a complex electromagnetic environment was simulated. The system was able to indicate the name of the simulated emitters according to a Mission Data Library (MDL). Finally, this work shows that it could operate up to 40 GHz with the integration of envelope detectors and amplifiers suitable for this purpose.

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 por [1].

A concepção de tal sistema, baseada na tecnologia de 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] como capazes de proporcionar vantagens de portabilidade, furtividade, baixo custo e consumo de energia para um MAGE como o proposto.

O caráter civil e comercial dos componentes envolvidos em um sistema como este o tornaria invulnerável a embargos de outras nações, o que seria muito conveniente para situações de resistência em guerras assimétricas, não fosse a exigência de antenas de banda ultralarga. A Fig. 1 ilustra seu emprego em um Teatro de Operações genérico.

Este artigo apresenta a implementação de um demonstrativo de Sistema MAGE na concepção supracitada com o emprego da antena de banda ultralarga (UWB – *ultra-wideband*) do sistema MAGE da aeronave P-95. Além dessa antena, foram empregados um RDS modelo NooElec RTL-SDR™ [3] e um *tablet* Microsoft Surface Pro 4™ [4].



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

A função *deinterleaving*, responsável por detectar parâmetros básicos dos pulsos e, através deles, os organizar, foi programada 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 demonstrativo pôde, mesmo 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).

É bem verdade que 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-radar, isolados ou simultâneos, a partir de parâmetros como frequência da portadora (F_c – *frequency 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 do *tablet* 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 de 2 a 40 GHz.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

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

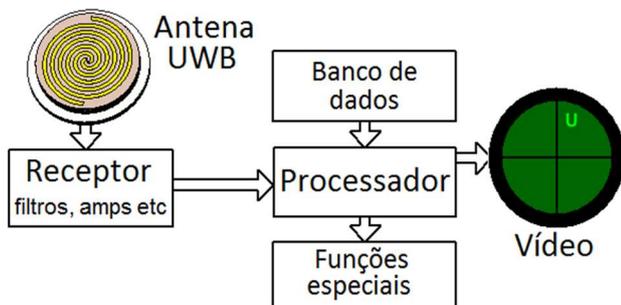


Fig. 2. Arquitetura de um Sistema MAGE genérico [6].

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 demonstrativo de MAGE.



Fig. 3. Arquitetura do demonstrativo de MAGE implementado.

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

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 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 via USB 3.0 [7].

C. 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. Função Deinterleaving

Esta função consiste em discriminar pulsos e seus parâmetros, organizá-los e atribuí-los a diferentes emissores [8]. O sistema, contudo, precisa lidar com a questão do que exatamente seria um pulso.

A resolução 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 do início de cada pulso pode ser identificado pelo horário no qual ocorre (TOA – *time of arrival*) uma derivada positiva. O horário do término, pelo TOA 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 demonstrativo 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 F_c , seguida de PW (que seria o TOA do término do pulso menos o TOA do início do pulso) e PRI (módulo da subtração do TOA de início de um pulso e o TOA do próximo pulso de mesma F_c e PW).

E. Geradores de Sinais-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 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 foram por uma antena log de marca WA5VJB [11].

F. Montagens

Na Montagem 1, o demonstrativo 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.

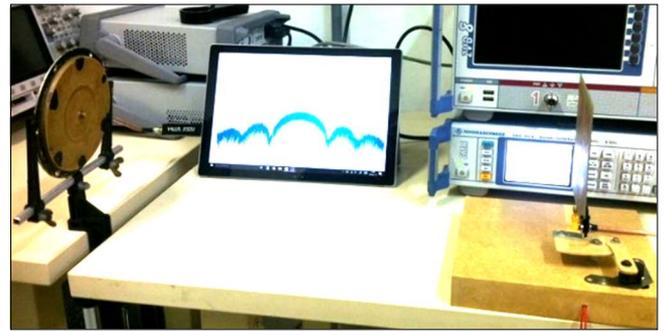


Fig. 5. Antena do P-95 à esquerda alimentando RTL-SDR; antena emissora à direita em frente ao R&S®SMA 100A.

Na Montagem 2, a disposição foi semelhante, 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.

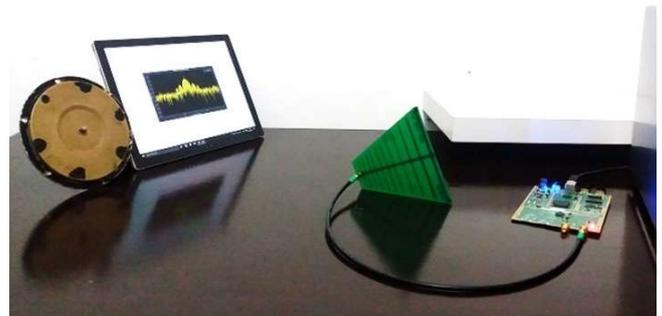


Fig. 6. Antena do P-95, RTL-SDR e tablet à esquerda; antena log emissora e USRP à direita.

A Fig. 7 deixa conexões entre a antena do P-95, o RTL-SDR e o tablet explícitas na Montagem 2.

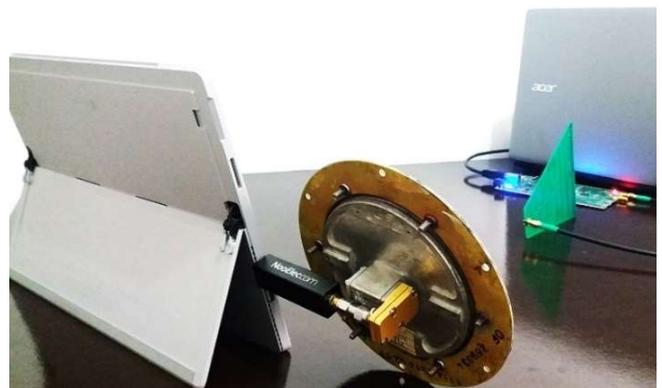


Fig. 7. Conexões entre antena, RDS e tablet explícitas.

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, sinais foram configurados de um a um, e o MAGE tinha que os receber e identificar com facilidade.

Já no experimento com o USRP, o caso foi mais difícil: diversos sinais foram instantaneamente emitidos e o sistema requereu agrupar pulsos com parâmetros semelhantes.

O desafio, contudo, consiste no fato de o demonstrativo 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 inutilizável pela função de interleaving. 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, ocorreu detecção e organização de pulsos e parâmetros conforme Tabela I: F_c em gigahertz, *Amplitude* em miliwatts, PW em microssegundos, PRI , 1° TOA e Último TOA em segundos; $\#Incid$ indica quantas vezes um pulso com características semelhantes foi identificado.

TABELA I. PULSOS E PARÂMETROS DETECTADOS (MONTAGEM 1)

FC	PW	PRI	Ampl	#Incid	1° TOA	ÚltTOA
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 rompido 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 as do sinal configurado no R&S SMA 100A. Ele foi incidente 72.345 vezes. Os outros sinais medidos, incoerentes com o que foi configurado no emissor, totalizaram 45 incidências, o que representa 0,06 % do total.

As características do sinal configurado no R&S SMA 100A estavam descritas na BIM como sendo do emissor hipotético *Radar Fragata*. O sistema identificou-o corretamente como ilustra a Fig. 8. Ela também esboça 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, coerente com a PW configurada no gerador.

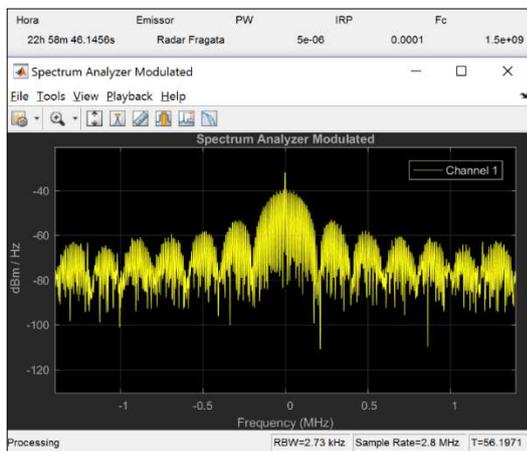


Fig. 8. Identificação de um emissor e FFT do sinal.

Na Montagem 2, inicialmente foram programados dois sinais com sobreposição dos pulsos.

Ambos possuíam $F_c = 1,2 \text{ GHz}$ e $PRI = 1 \text{ ms}$, porém um apresentava $PW = 100 \mu\text{s}$ e outro $PW = 20 \mu\text{s}$. A Fig. 9 ilustra, no domínio do tempo, com amplitude em miliwatts e tempo em segundos, como esses pulsos sobrepostos foram recebidos, em banda-base.

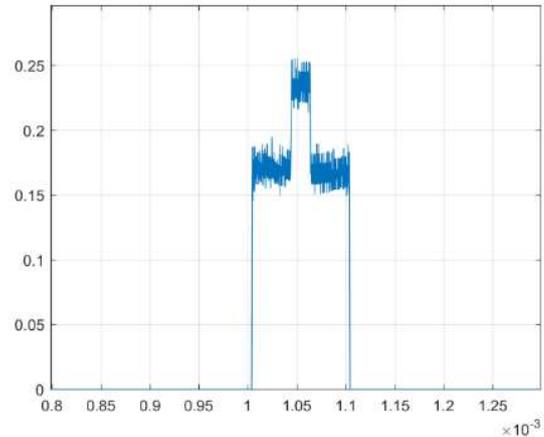


Fig. 9. Pulsos sobrepostos recebidos.

A Tabela II, com parâmetros de mesmas unidades que os da Tabela I, sumariza como os pulsos sobrepostos, agora ordenados pelo $\#Incid$, foram interpretados pelo demonstrativo de MAGE. Os dez sinais mais incidentes são mostrados.

TABELA II. PULSOS SOBREPOSTOS (MONTAGEM 2)

FC	PW	PRI	Ampl	#Incid	1° TOA	ÚltTOA
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 primeiro sinal mais incidente (18.432 vezes) é coerente com o sinal configurado com $PW = 100 \mu\text{s}$. O segundo e o terceiro sinais mais incidentes na Tabela II são coerentes com o sinal configurado no USRP com $PW = 20 \mu\text{s}$ (o segundo sinal da tabela apresenta um erro na acurácia da medição 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). Os demais pulsos totalizaram 3.881 incidências (contando não apenas os mostrados na Tabela II, mas todos os sinais registrados). Eles são 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 demonstrativo de MAGE varria F_c , detectando pulsos e identificando emissores caso sinais fossem coerentes com a BIM.

A Tabela III sumariza a detecção num momento quando a recepção estava configurada com taxa de amostragem de 2,6 MHz e os seguintes sinais foram emitidos, todos com $F_c = 800 \text{ MHz}$ e $PRI = 400 \mu\text{s}$: $PW = 3 \mu\text{s}$, $PW = 5 \mu\text{s}$, $PW = 10 \mu\text{s}$ e $PW = 40 \mu\text{s}$.

TABELA III. SINAIS SIMULTÂNEOS (MONTAGEM 2)

FC	PW	PRI	Ampl	#Incid	I° TOA	UltOA
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 $PW = 10 \mu\text{s}$. O segundo, com o de $PW = 40 \mu\text{s}$. O terceiro e o sexto com o de $PW = 3 \mu\text{s}$ (sendo que o terceiro apresenta erro de acurácia na medição de 10,33 % e o sexto de 2,67 %). O quarto e o quinto são coerentes com o sinal de $PW = 5 \mu\text{s}$ (sendo que o quinto sinal apresenta 7,60 % de erro de acurácia na medição). Os demais pulsos medidos somam 13 incidências 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 demonstrativo 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 devidamente, também em sua grande maioria, perdendo menos de 10 % dos mesmos. Caso o algoritmo baseado em derivadas tenha contribuído de alguma forma para a baixa acurácia na medição dos sinais pulsados, este resultado mostra que ocorreu uma excelente negociação envolvendo a capacidade de detectar pulsos sobrepostos e o prejuízo da acurácia.

Ao confrontar um ambiente eletromagnético denso 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 apontam que a capacidade de processamento dos *tablets*, aliada à abordagem de recepção e processamento de sinais proporcionada pela tecnologia RDS, já permite, 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 a função *deinterleaving* inicie a organização dos pulsos a partir desse parâmetro, permitindo a detecção de sinais com agilidade de PW, inclusive – para eliminação da ambiguidade, são necessários, no mínimo, três canais;
- aplicar um RDS com faixa de frequências condizente com a faixa dos radares de interesse – entretanto, atualmente, não existem RDS capazes de operar até 40 GHz;
- para o equipamento operar até 40 GHz, implementar um *front-end* de RF, compostos por um detector de envoltória seguido de um *upconverter*, entre a antena UWB e o RDS, de forma a enviar para o RDS apenas a envoltória dos sinais transladada para uma frequência conveniente para recepção pelo RDS.

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 demonstrativo 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 da função *deinterleaving* foi implementado 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 devidamente recebidos, detectados e identificados pelo demonstrativo de MAGE, com 0,05 % de erro, aproximadamente. Ademais, emissores pré-cadastrados em uma BIM foram indicados quando as características dos sinais incidentes foram coerentes.

Por fim, foram estabelecidos os próximos passos necessários para tornar este demonstrativo em um equipamento realmente operacional, tais como a aquisição e integração de amplificadores e detectores de envoltória que operem de 2 a 40 GHz e um RDS de dois ou mais canais.

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”. IMOC 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 antenas” – log periodic. Disponível em: <<http://www.wa5vjb.com/products1.html>>. Acesso em: 16/07/2017.