



Guerra Eletrônica e Sensoriamento Remoto: Tecnologia Fotônica em Sistemas de RF

## Operação remota do sistema gerador de cenários de guerra eletrônica DRS-Excalibur associada à transmissão de sinais radar em fibra óptica

### Remote operation of the DRS-Excalibur electronic warfare scenario generator system associated with fiber optic radar signal transmission

Felipe Streitenberger Ivo, Pedro Carlos da Silva Euphrásio, André Paim Gonçalves, Rodrigo Janowski Zandoná, Lester de Abreu Faria, Olympio Luchini Coutinho  
Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil

#### Article Info

##### Article History:

Received	30 April	2021
Revised	28 June	2021
Accepted	15 August	2021
Available online	30 September	2021

##### Palavras Chave:

Guerra Eletrônica  
Avaliação Operacional  
Simulador de Guerra Eletrônica  
RF em Fibra Óptica  
Instrumentação Remoto

##### Keywords:

Electronic Warfare  
Operational Evaluation  
EW Simulator  
RF over Fiber  
Remote Instrumentation

##### E-mail addresses:

[fivo@ita.br](mailto:fivo@ita.br) (Ivo, F.S.),  
[pedrocse@gmail.com](mailto:pedrocse@gmail.com) (Euphrásio,  
P.C.),  
[lester@ita.br](mailto:lester@ita.br) (Faria, L.A.),  
[zandon@ita.br](mailto:zandon@ita.br) (Zandoná, R.J.),  
[olympio@ita.br](mailto:olympio@ita.br) (Coutinho, L.C.)

#### Resumo

A Força Aérea Brasileira (FAB) emprega sistemas simuladores de sinais radar em campanhas de avaliação operacional (AVAOP), com o objetivo de avaliar e certificar o desempenho de receptores embarcados de guerra eletrônica embarcados em suas plataformas aéreas. Um fator crítico nesse tipo de campanha é a necessidade de montagem de todo o arranjo experimental de Rádio Frequência (RF) próximo à aeronave, que, em geral, está posicionada na área operacional, em locais abertos, sujeitas a condições climáticas adversas, tais como grandes variações de temperatura e umidade. Visando superar tais limitações, este artigo apresenta uma nova abordagem experimental de geração e transmissão remota de sinais radar, baseada em transmissão de sinais de RF em fibra óptica e operação remota de instrumentação eletrônica. Nesse conceito proposto, o simulador de guerra eletrônica usado para geração sinais radar é mantido em laboratório climatizado, sendo a sua operação e o acesso aos sinais de RF feitas em uma posição remota e próxima à aeronave sob avaliação. Um experimento de demonstração de deste conceito é apresentado em ambiente de laboratório, usado um enlace analógico a fibra óptica para transmitir os sinais radar programados no gerador de ameaça Excalibur DRS até uma posição remota situada a 1 km de distância, de onde também é feita toda a operação remota do equipamento via internet. O experimento foi também demonstrado em ambiente operacional, com o DRS-Excalibur posicionado no hangar X-30 do Instituto de Pesquisas em Ensaios em Voo (IPEV), transmitindo os sinais por meio de 1 km de fibra óptica em direção à aeronave SH-16 Seahawk, da Marinha do Brasil. Para demonstrar o controle remoto, um operador com um laptop controlava Excalibur-DRS de dentro da própria aeronave e próximo ao sistema MAGE em avaliação.

#### Abstract

The Brazilian Air Force uses radar threat simulator systems on test and evaluation campaign (*Avaliação Operacional - AVAOP*) to evaluate and certify the performance of its airborne electronic warfare systems. A critical factor on that kind of operation is the need to assemble all the Radio Frequency (RF) instrumentation close to the aircraft, which, in general, is parked on the air base operational area, under adverse and uncertain weather condition, such as high temperatures and humidity, sun and rain. Aiming to overcome such limitations it is proposed on this article a new experimental approach to remote generate and transmit the radar signals, based on fiber optic RF transmission and on electronic instrumentation remote control. On this approach, the radar threat simulator is placed inside a controlled environment laboratory. The RF signals are accessed from a remote place where the aircraft is parked, as well as from where all the instrumentation are controlled. A proof of concept demonstration experiment was first carried out in a laboratory environment using a 1 km long analog fiber optic link to transmit the radar signals generated by the radar threat builder simulator DRS-Excalibur to a remote position, from where the instrumentation was remotely controlled as well, by internet connection. The same experiment was demonstrated in an operational environment, with the DRS-Excalibur system placed inside an acclimatized room at the X-30 hangar of the Brazilian Air Force Flight Test Institute (*Instituto de Pesquisa e Ensaios em Voo - IPEV*), transmitting the radar signals using 1 km long fiber optic link to irradiate to a Brazilian Navy SH-16 Seahawk aircraft parked inside the hangar. To demonstrate the remote control concept, a operator was placed inside the aircraft controlling the DRS-Excalibur by a laptop, close to the MAGE system under evaluation.

#### I. INTRODUÇÃO

A Força Aérea Brasileira utiliza simuladores de sinais radar para testar e avaliar receptores de guerra eletrônica, embarcados em suas plataformas aéreas, através da realização de campanhas de Avaliação Operacional (AVAOP) [1-3].

Um dos principais objetivos desse tipo de AVAOP é validar o comportamento dos receptores guerra eletrônica (GE) e certificar quanto a coerência entre desempenhos especificados e os obtidos operacionalmente durante os testes [2-3].

Adicionalmente, a AVAOP permite mensurar e avaliar a resposta dos equipamentos GE quando submetidos a condições eletromagnéticas adversas, a partir de testes conduzidos de forma controlada [1-3]. Além disso, estas campanhas têm favorecido o treinamento das equipes de mantenedores e programadores destes sistemas [1], bem como tem possibilitado à FAB a economia de horas de voo das plataformas, considerando a realização dos testes com a aeronave em solo [3].

Os geradores de sinais radar e a instrumentação eletrônica de medição de RF, em especial na área de guerra eletrônica, possuem um alto valor agregado [4], principalmente quando projetados para desempenhar funções de avaliação de receptores embarcados de sinais radar de aeronaves ou navios [4]. Estes sistemas empregam geradores de sinais de complexos RF, capazes de reproduzir cenários eletromagnéticos de guerra eletrônica com alta fidelidade e confiabilidade [1-5]. Os sinais gerados podem ser acoplados diretamente ao receptor de GE por meio de teste conduzido, onde os sinais são injetados diretamente nas entradas de RF receptor. Pode-se ainda realizar testes irradiados, onde os sinais são transmitidos por uma antena em direção à plataforma sob teste. Em geral, estes equipamentos operam na faixa de 0,5 a 40 GHz e precisam ser acondicionados em locais controlados e climatizados, em função da garantia da estabilidade e do alto custo envolvido [6].

Um equipamento atualmente utilizado pela FAB para geração cenários de GE em campanhas de AVAOP em solo é o sistema Excalibur-DRS, instalado no Laboratório de Guerra Eletrônica (LAB-GE), do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) [8]. É um gerador arbitrário de sinais radar programável de alto custo, capaz de gerar sinais radar complexos na faixa de 0,5 a 18 GHz [3-4]. Possui saídas de RF podem ser conectadas aos sistemas de GE sob teste por meio cabo coaxial com até 3 metros de comprimento [4]. O Excalibur-DRS pode ser empregado tanto para testes irradiados quanto para testes conduzidos. No caso de teste irradiado, acrescenta-se ao sistema um conjunto de amplificadores e antenas [3]. A restrição de comprimento dos cabos coaxiais, além da baixa potência irradiada, limita a distância entre o gerado e a aeronave sob avaliação operacional, que, em geral, está estacionada em local aberto e sujeito a intempérie durante os testes de AVAOP em solo [5-6].

Visando transpor algumas limitações de sistemas de RF convencionais, tais como a apresentada acima, uma tecnológica emergente tem como princípio a interação entre sinais ópticos e de RF. No Brasil, está sendo referenciada como RF em Fotônica, traduzida do termo em idioma inglês *Microwave Photonics* [8]. Atualmente esta área tem se consolidado como uma alternativa para transmissão de sinais de RF a longas distâncias, principalmente devido às baixas perdas de potência das fibras ópticas, da ordem 0,2 dB/km e ampla largura de banda de RF dos dispositivos de modulação e detecção ópticos [8]. Isto tem viabilizado soluções tecnológicas duais, aplicadas aos setores militar e civil [8-9]. No setor militar, foco deste trabalho, destacam-se o emprego desta tecnologia em modernização de sistemas de defesa do espaço aéreo, sistema radar, antenas remotas e antenas “*phasedarray*” [6,8,9].

Outra tecnologia que encontra aderência neste contexto é diz respeito a laboratórios remotos e controle instrumentação eletrônica a distância. Definições sobre laboratórios remotos, laboratórios virtuais e laboratórios on-line são encontradas na literatura [10]. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta a características que diferem os experimentos laboratoriais locais e os experimentos com tecnologias para o acesso e controle remoto. Um laboratório remoto pode ser definido como um recurso tecnológico, em que o usuário e o equipamento e o dispositivo sob teste estão fisicamente separados [11-13].

		Tipo de Localização	
		Mesmo Local para experimento e usuário	Local diferente para experimento e usuário
Tipo do Experimento	Dispositivos Físicos	Experimento "Hands-on"	<b>Experimento Remoto</b>
	Modelo dos dispositivos	Simulação Local	Simulação Remota

Fig. 01 – Caracterização de Experimentos - Adaptado [13].

A condução de experimentos automatizados e controlados via web é uma tendência atual na área de engenharia, referenciados neste trabalho pela terminologia de laboratório remoto [10-12]. O laboratório remotos constituem soluções viáveis para o compartilhamento de recursos entre centros de pesquisa, geralmente envolvendo instrumentação de alto custo [10]. Estes laboratórios remotos são concebidos a partir de uma infraestrutura de instrumentação e de software de controle, interligados entre si através de rede de computadores, em geral via internet [11-12].

Este artigo propõe uma solução concebida para aplicações em campanhas de AVAOP, que emprega enlaces a fibra óptica para transmissão remota dos sinais radar, que, em conjunto com o conceito de laboratório remoto, torna possível a operação a distância do sistema Excalibur-RDS. No conceito proposto, apenas amplificadores e antenas necessitam estar posicionados próximos à aeronave sob avaliação operacional, podendo o estágio de geração de RF estar localizado em laboratório distante, em ambiente controlado. Ainda, possibilita a equipe de operação e coordenação da AVAOP controlar remotamente a programação do gerador de sinais, permitindo alterar seus parâmetros de emissores radar a partir do próprio local do ensaio. Este conceito é demonstrado em ambiente de laboratório, usado um enlace analógico a fibra óptica para transmitir os sinais radar programados no gerador de ameaça Excalibur DRS até uma posição remota situada a 1 km de distância, de onde também é feita toda a operação remota do equipamento via internet. O experimento é também demonstrado em ambiente operacional, com o DRS-Excalibur posicionado no hangar X-30 do Instituto de Pesquisas em Ensaios em Voo (IPEV), de onde transmite sinais por meio de 1 km de fibra óptica em direção à aeronave SH-16 Seahawk, da Marinha do Brasil. Para demonstrar o controle remoto, um operador com um laptop controlava Excalibur-DRS de dentro da própria aeronave e próximo ao sistema MAGE em avaliação.

Este artigo está organizado da seguinte forma: na Seção II é apresentado o equipamento Excalibur-DRS; na Seção III é apresentada uma breve explicação de enlace analógico a fibra óptica para transmissão de sinais de RF; na Seção IV é apresentada o conceito de laboratório remoto; na Seção V são apresentados alguns resultados experimentais; finalizando, na Seção VI algumas considerações e conclusões são apresentadas.

## II. SIMULADOR DE CENÁRIOS DE GUERRA ELETRÔNICA DRS-EXCALIBUR

O sistema de geração de ameaças radar DRS-Excalibur, apresentado na Fig. 02, é um gerador de sinais de radiofrequência programável na faixa de 0,5 até 18 GHz, capaz de simular cenários de Guerra Eletrônica estáticos e dinâmicos de forma a emular múltiplas emissões radar, as quais são tratadas como ameaças aos receptores de alerta radar – *Radar Warning Receiver* (RWR). A geração dos sinais de RF é realizada em tempo real, à medida que as ameaças radar são ativadas no cenário eletromagnético simulado no próprio equipamento [5].

O sistema DRS-Excalibur é constituído por uma diversidade de tecnologias complexas, tanto na área de geração de sinal (*hardware*) como na área de controle (*software*) [5]. O software utilizado para controle e programação do equipamento é denominado de *Threat Builder* e possui 08 diferentes aplicativos. Estes aplicativos possibilitam o operador gerenciar e programar bibliotecas de sinais, bem como realizar a calibração e controle da geração de das ameaças radar. O hardware consiste em dois conjuntos de geradores de micro-ondas programáveis, composto de um total de até 8 portas de saída de RF cobrindo a faixa de frequência de operação de 0,5 a 18 GHz.

Quanto aos testes, o sistema DRS-Excalibur pode ser utilizado basicamente em duas configurações, os quais são denominados de modos irradiado e conduzido. No modo irradiado, uma das 8 portas de saída de RF é conectada diretamente a um amplificador e uma antena de forma a prover a transmissão de sinais radar. Esta antena colocada em visada direta com a antena de recepção do sistema sob teste da aeronave, e os níveis de sinais são ajustados de forma que a antena de recepção do sistema da aeronave seja capaz de ser sensibilizado. Este modo de teste permite avaliar o desempenho de processamento de sinais do receptor sob diversas condições, com a aeronave em solo. Este tipo de teste é comumente denominado na literatura como *Ground Test*. O modo conduzido é caracterizado pelo acoplamento direto dos sinais de RF entre as portas de RF do gerador com o *front-end* de RF do receptor sob teste. Neste tipo de teste, o sistema DRS-Excalibur provê de forma dinâmica o controle de amplitude dos sinais nas 8 saídas de RF, de acordo com a posição relativa entre o emissor e o receptor dentro do cenário de guerra eletrônica simulado no equipamento. Desta forma, o sistema DRS-Excalibur é capaz de prover testes de ângulo de chegada baseado em DOA (*Direction of Arrival*) de amplitude, utilizando a técnica de múltiplas antenas de recepção. Este modo de teste é apropriado para a avaliação do receptor de GE em laboratório, geralmente em RIG. Por isso, este tipo de teste é comumente denominado na literatura como *Rig Test* [1-4].

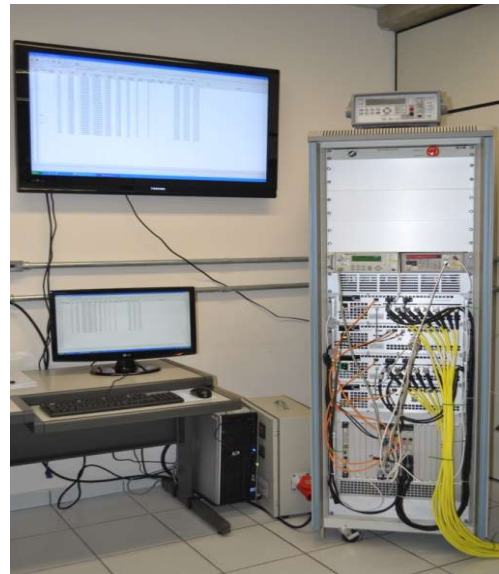


Fig. 02 – Sistema de Geração de Ameaças Radar DRS-Excalibur.

## III. TRANSMISSÃO EM FIBRA ÓPTICA DE SINAIS RADAR

Devido à elevada atenuação, em frequências de RF na faixa de 0,5 a 18 GHz, a transmissão de sinais radar em médias e longas distâncias utilizando cabos coaxiais torna-se impraticável [5]. Uma das tecnologias de vanguarda pesquisadas no LAB-GE do ITA é a transmissão de sinais de radar por meio de enlaces analógicos a fibra óptica (EAFO), e tem sido abordada em temas de diversos trabalhos de pesquisas publicados [1-7; 9]. Dentro do contexto de AVAOP, ela apresenta-se como uma alternativa promissora capaz de superar as limitações de transmissão de RF em cabos coaxiais.

Em um EAFO, o pulso radar na frequência de RF modula a intensidade de uma portadora óptica proveniente de um laser. O sinal óptico modulado é então acoplado a uma fibra óptica monomodo de baixa perda, da ordem de 0,2 dB/km. O comprimento de onda padrão nos atuais sistemas de comunicações ópticas de 1550 nm é o mais usado. Nestas condições, transmissões de pulsos de RF a longas distâncias, na ordem de dezenas de quilômetros, tornam-se viáveis. O pulso de RF é novamente ser recuperado no final do enlace óptico, a partir da corrente elétrica gerada na saída do foto detector [6].

O diagrama esquemático da solução proposta é apresentado na Fig. 03. A modulação de intensidade é realizada por meio de um modulador externo baseado no interferômetro de Mach-Zehnder (MZM). São esboçados ainda nesta figura, os seguintes espectros de frequência: do sinal óptico associado a portadora do laser na frequência  $\omega_o$ ; o sinal radar de uma ameaça de onda contínua (CW – *Continuous Wave*) proveniente do sistema DRS-Excalibur na frequência  $\omega_r$ ; do sinal óptico de saída do modulador MZM; e do sinal radar remotamente detectado obtido na saída do fotodetector.



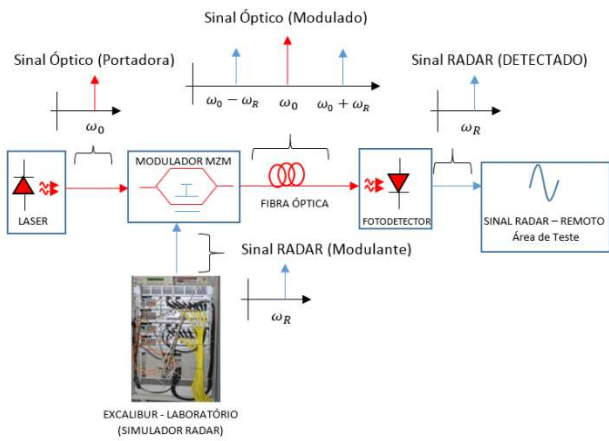


Fig. 03 – Transmissão remota em fibra óptica de sinais radar do Sistema de Geração de Ameaças Radar DRS-Excalibur

A formulação matemática do modelo do enlace óptico apresentado neste artigo é demonstrada de forma sistemática em [9]. Este artigo se restringe apenas a abordar o conceito de transmissão de sinais radar por fibra óptica e demonstrar a viabilidade por meio de resultados experimentais.

#### IV. OPERAÇÃO REMOTA DO SISTEMA DRS-EXCALIBUR

Experimentos automatizados controlados via web é uma tendência atual de pesquisa na área de engenharia [11-15]. Os laboratórios remotos se apresentam como soluções confiáveis para o compartilhamento de recursos à distância entre centros de pesquisa, geralmente considerando equipamentos de alto custo [15-16]. Estes laboratórios são concebidos a partir de uma arquitetura de software de controle do experimento, feita através de um computador conectado via internet em uma topologia do tipo cliente-servidor [15-16]. Seguindo esta topologia, o computador servidor atua diretamente sobre as variáveis do experimento, de forma modificar parâmetros, adquirir dados ou comandar atuadores/sensores [11,16]. Uma vez que o servidor está conectado à internet, os terminais clientes podem acessar o servidor de forma a interagir diretamente sobre o experimento [11,16]. Isto permite manipular as variáveis do experimento e coletar dados à distância [11, 17, 18]. Desta forma, o experimento é controlado pelo servidor localmente, que é acessado remotamente por um computador cliente [17-18].

O conceito de laboratório remoto é demonstrado neste trabalho configurando o computador de controle do sistema DRS-Excalibur como um servidor. Esta configuração possibilita que o usuário cliente, o qual está localizado a quilômetros de distância do laboratório, se conecte remotamente via rede internet e controle a operação e programação do gerador de sinais, de acordo com as necessidades dos testes de avaliação operacional em andamento e em tempo real [17-18]. O conceito de acesso remoto via rede internet ao sistema DRS-Excalibur é apresentado na Fig. 04. O *software* utilizado neste artigo para demonstrar esse conceito de controle e gerenciamento remoto do DRS-EXCALIBUR é o aplicativo *Team Viewer*. O *Team Viewer* é uma solução para acesso remoto através de uma ligação virtual entre o computador servidor e o cliente via rede internet [19].

Esta conexão é realizada através de um *login* e uma senha, específicos para cada máquina na rede, sendo estes renovados a cada nova inicialização dos computadores [19]. O *Team Viewer* possibilita ainda o controle de todas as funções do computador servidor por meio do compartilhamento remoto da sua área de trabalho.

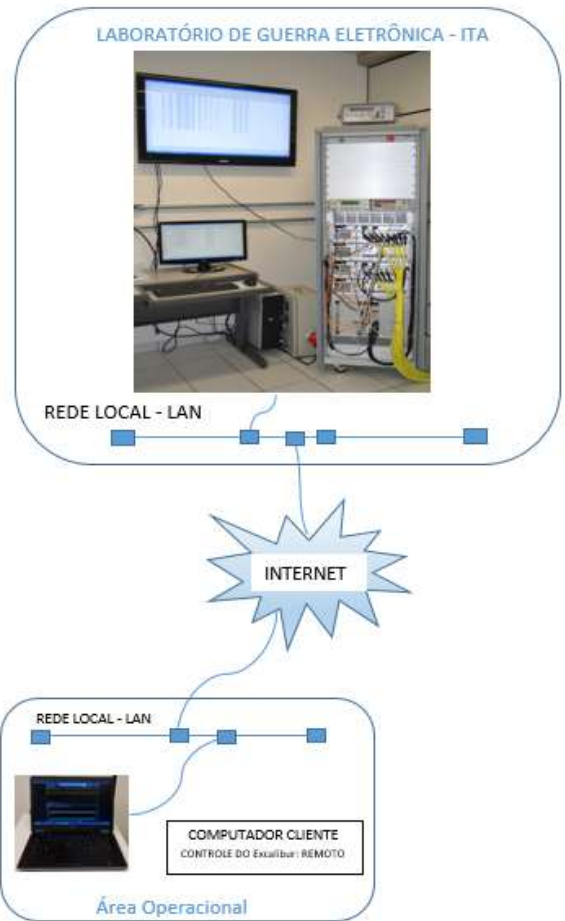


Fig. 04 – Operação remota do Sistema de Geração de Ameaças Radar DRS-Excalibur.

#### V. DEMONSTRAÇÃO EXPERIMENTAL

A demonstração de conceito de operação remota do sistema de geração de ameaças radar DRS-Excalibur associada à transmissão de sinais radar em fibra óptica foi realizada a partir da geração remota de 03 ameaças radar pulsadas, ativadas de forma simultânea sistema DRS-Excalibur conforme características apresentadas na Fig. 05.

#	ON OFF	Priority	Output Group	PW us	PRI ms	PRF kHz	Frequency GHz
1	OFF			10.000	1.000000	1.0000000000	3.0000000000
2	OFF			5.000	0.142857	7.0000000000	9.6000000000
3	OFF			1.000	0.090909	11.0000000000	17.5000000000

Fig. 05 – Parâmetros dos 03 radares pulsados gerados pelo sistema DRS-Excalibur para a demonstração de conceito.

A demonstração de conceito foi avaliada a partir da medição dos sinais de radar gerados no domínio da frequência e no domínio do tempo. Os sinais foram primeiramente medidos diretamente na saída de RF do gerador DRS-Excalibur. Em seguida, a saída de RF do DRS-Excalibur foi acoplada ao enlace analógico à fibra óptica. Foram medidos os sinais de radar na saída de um amplificador de RF colocado após o fotodetector na saída do enlace analógico a fibra óptica. O gerador de ameaças radar foi configurado na condição de controle remoto. A seguir, serão detalhados os resultados experimentais obtidos.

A) MEDIÇÃO DE SINAIS RADAR GERADOS DIRETAMENTE NO SIMULADOR DE CENÁRIOS DE GUERRA ELETRÔNICA DRS-EXCALIBUR

O arranjo experimental usado para a realização das medidas diretamente na saída de RF do gerador de sinais DRS-Excalibur é mostrado na Fig. 06. São destacados na figura: o simulador DRS-Excalibur; o computador local com o software *Threat Builder*; o osciloscópio para caracterização dos sinais no domínio do tempo; e o analisador de espectro para caracterização dos sinais no domínio da frequência. Os resultados obtidos são apresentados na Fig. 07 para o domínio da frequência, e nas Fig 08, Fig. 09 e Fig. 10 para o domínio do tempo. Foi realizado um ajuste na amplitude dos 3 sinais de radar de forma a garantir uma saída de 0 dBm de potência na saída do gerador DRS-Excalibur para todas as emissões.



Fig. 06 – Caracterização dos sinais radar diretamente na saída de RF do Sistema de Geração de Ameaças Radar DRS-Excalibur.

O espectro de frequência com os 3 sinais de radar medidos diretamente na saída de RF do simulador DRS-Excalibur é apresentado na Fig. 07. A medida foi realizada por meio de um analisador de espectro modelo Agilent E4407B.

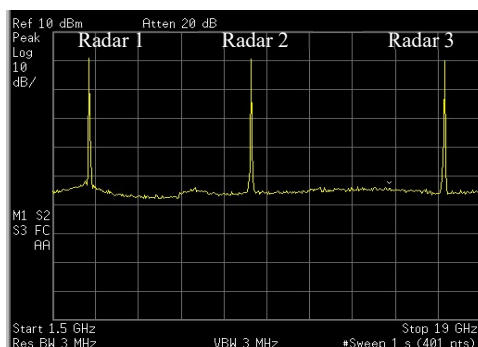


Fig. 07 –Espectro de frequência medido diretamente na saída do Sistema DRS-Excalibur contendo os 03 emissores radar.

A medida no domínio do tempo foi obtida a partir da detecção da envoltória de RF dos pulsos radar por meio de um detector modelo Herotek 53807, o qual foi acoplado a entrada de um osciloscópio, modelo Agilent MSO7054B. Os resultados dos pulsos detectados no domínio do tempo são apresentados nas Fig. 08, Fig. 09 e Fig. 10.

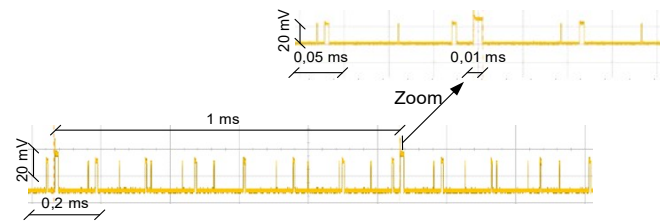


Fig. 08 – Caracterização no domínio do tempo do radar 01. É mostrado na parte inferior da figura a caracterização do intervalo de repetição de pulso (IRP) de 1 milissegundo. Ainda é mostrada na parte superior da figura a caracterização da largura de pulso (LP) de 10 microssegundos.

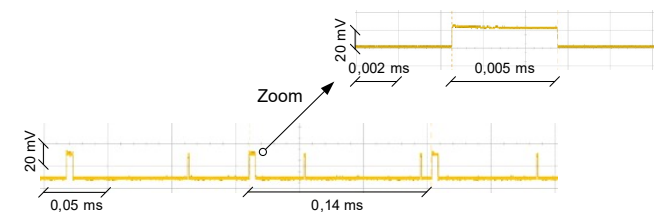


Fig. 09 – Caracterização no domínio do tempo do radar 02. É mostrada na parte inferior da figura a caracterização do intervalo de repetição de pulso (IRP) de 0,14 milissegundos. Ainda é mostrada na parte superior da figura a caracterização da largura de pulso (LP) de 5 microssegundos.

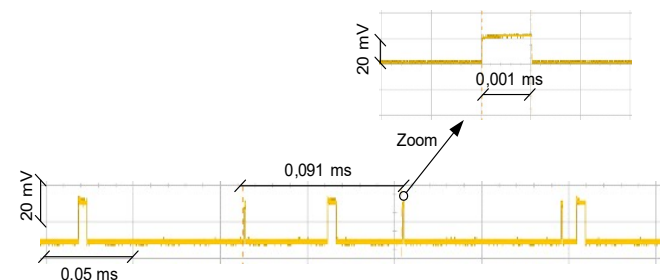


Fig. 10 – Caracterização no domínio do tempo do radar 03. É mostrada na parte inferior da figura a caracterização do intervalo de repetição de pulso (IRP) de 0,09 milissegundos. Ainda é mostrada na parte superior da figura a caracterização da largura de pulso (LP) de 1 microssegundo.

B) MEDIÇÃO DE SINAIS RADAR RECEBIDOS NA POSIÇÃO REMOTA

O arranjo experimental usado para a realização das medidas com transmissão remota dos sinais do sistema DRS-Excalibur na saída do enlace à fibra óptica é mostrado na Fig. 11. São destacados nesta Fig. 03 partes principais: uma primeira parte contendo o centro de geração de sinais para controle local contendo o computador de operação com o *Threat Builder*, computador servidor, o equipamento simulador DRS-Excalibur, o laser e o modulador MZM; uma segunda parte contendo a fibra óptica para transmissão dos sinais de RF e a conexão de internet para a operação remota do servidor; e uma terceira parte contendo o acesso remoto com o fotodetector, o amplificador de RF, os equipamentos de caracterização (analisador de espectro e osciloscópio) e o computador cliente para acesso remoto ao servidor.

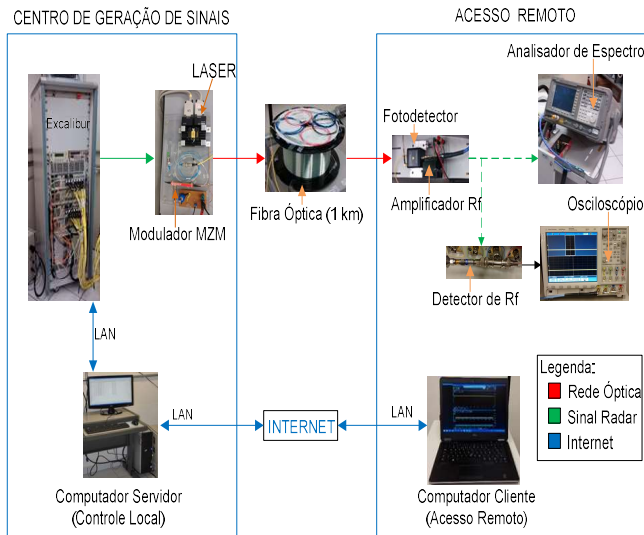


Fig. 11 – Caracterização dos sinais radar do Sistema de Geração de Ameaças Radar DRS-Excalibur na saída de RF do enlace analógico à fibra óptica com demonstração de conceito de operação remota.

Conforme ainda pode ser observado na Fig. 11, o sistema Excalibur-DRS, assim como seu computador de controle, foi mantido em operação em um ambiente controlado dentro do LAB-GE. A saída de RF do gerador foi acoplada na entrada de modulação do modulador MZM. A saída óptica do modulador MZM foi conectada a uma das extremidades de um carretel de fibra óptica com 1 km de extensão. A outra extremidade foi posicionada em outra sala do LAB-GE, de onde foram realizadas as medidas dos sinais radar de forma remota. Nesta demonstração de conceito, todo o controle do simulador DRS-Excalibur foi realizado a partir de um computador cliente, conectado à rede internet disponível na sala remota. A Fig. 12 mostra a disposição dos equipamentos de teste e do computador cliente na sala remota.



Fig. 12 – Foto do arranjo experimental remoto para avaliação dos sinais radar. A fibra óptica do enlace é de 1 km e conecta o simulador DRS-Excalibur aos equipamentos de medida na sala remota.

A demonstração experimental foi realizada utilizando um laser DFB com comprimento de onda de 1551,72 nm, ruído de intensidade relativa igual a -159,01 dB/Hz. O modulador MZM utilizado possui tensão de meia onda  $V\pi = 3,7$  V na frequência de 1 GHz, tem perdas ópticas de inserção de 2,4 dB e opera em uma faixa de frequência de 0 a 20 GHz. A impedância da linha de alimentação do modulador é casada em 50  $\Omega$ . Foi usado ainda um carretel de fibra óptica monomodo com 1 km de extensão, com perdas 0,3 dB/km.

O fotodetector empregado tem responsividade de 0,6 A/W, com capacidade de operar na faixa de frequência de 0 a 20 GHz, e impedância paralela casada com a carga de saída em 50  $\Omega$ . As medições foram realizadas com o diodo laser ajustado para uma potência óptica de 32 Mw, com o modulador MZM operando no ponto de quadratura. Além dos componentes básicos do enlace analógico a fibra óptica, foi inserido um estágio de pós-amplificação de RF após o fotodetector, com ganho de 38 dB e largura de faixa de 0,5 a 18 GHz. A potência de pico na saída de RF do simulador DRS-Excalibur foi ajustada para 0 dBm.

O espectro de frequência com os 3 sinais de radar medidos na posição remota, realizadas na saída estágio de pós-amplificação de RF é apresentado na Fig. 13. A medida foi realizada novamente por meio do analisador de espectro modelo Agilent E4407B.

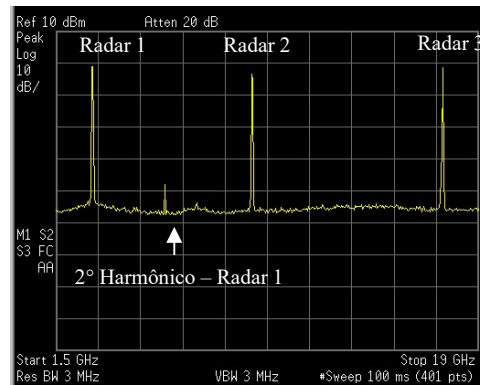


Fig. 13 – Espectro de frequência contendo os 03 emissores radar gerados pelo Sistema DRS-Excalibur e medidos remotamente a 1 km de distância na saída do enlace analógico à fibra óptica com operação e controle remoto do gerador de ameaças realizado via internet.

A medida no domínio do tempo foi obtida a partir da detecção da envoltória de RF dos pulsos radar na posição remota, realizadas na saída estágio de pós-amplificação de RF, por meio de um detector modelo Herotek 53807, o qual foi acoplado a entrada de um osciloscópio, modelo Agilent MSO7054B. Os resultados dos pulsos detectados no domínio do tempo são apresentados nas Fig. 14, Fig. 15 e Fig. 16.

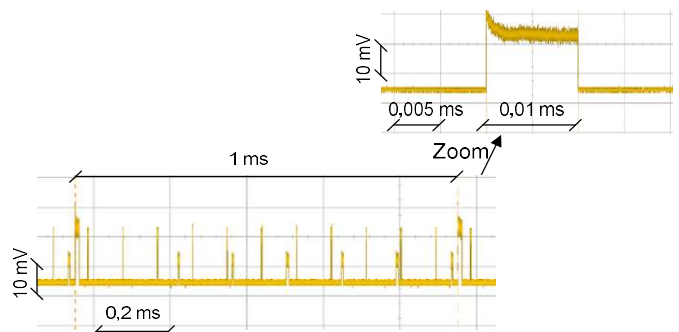


Fig. 14 – Caracterização remota a 1 km de distância no domínio do tempo do radar 01. É apresentado na parte inferior da figura o intervalo de repetição de pulso (IRP) de 1 milissegundo, e na parte superior da figura a largura de pulso (LP) de 10 microssegundos medidos.



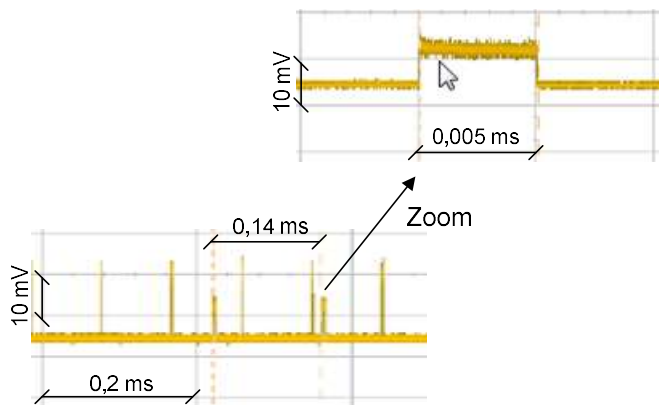


Fig. 15 – Caracterização remota a 1 km de distância no domínio do tempo do radar 02. É apresentado na parte inferior da figura o intervalo de repetição de pulso (IRP) de 0,14 milissegundos, e na parte superior da figura a largura de pulso (LP) de 5 microssegundos medidos.

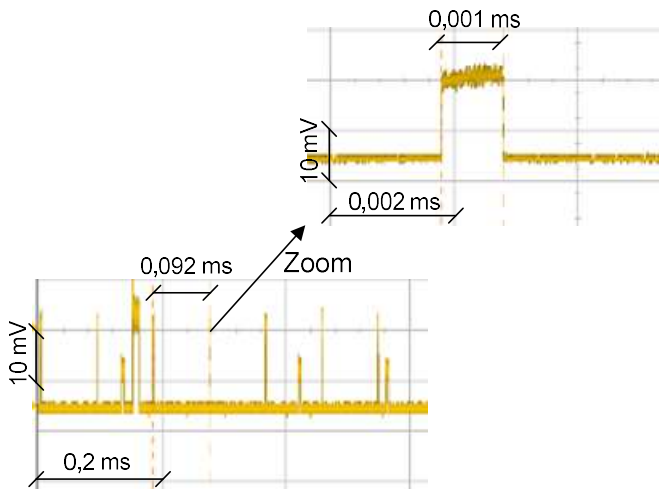


Fig. 16 – Caracterização remota a 1 km de distância no domínio do tempo do radar 03. É apresentado na parte inferior da figura o intervalo de repetição de pulso (IRP) de 0,09 milissegundos, e na parte superior da figura a largura de pulso (LP) de 1 microssegundo medidos.

### C) DEMONSTRAÇÃO EM AMBIENTE OPERACIONAL

A equipe técnica do LAB-GE realizou também a demonstração do conceito em ambiente real e operacional, no aproveitamento de uma missão de avaliação operacional da aeronave SH-16 *Seahawk* (MB-3036) do Comando do 1º Esquadrão de Helicópteros Antissubmarino (EsqdHS-1) de São Pedro da Aldeia, realizada nas dependências do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial da FAB (DCTA). Este teste foi realizado junto com as equipes do Centro de Guerra Eletrônica da Marinha do Brasil e do Comando em Chefe da Esquadra, sendo realizado no hangar do X-30 do Instituto de Pesquisas e Ensaios em Voo (IPEV). O arranjo de teste em solo da aeronave com a transmissão por fibra óptica dos sinais radar e a operação remota são destacados na Fig. 17. Durante os testes, o DRS-Excalibur estava instalado em uma sala climatizada dentro do hangar, transmitindo seus sinais de RF por meio de um carretel de 1 km de fibra óptica até a posição próxima à aeronave. O controle das emissões do gerador de ameaças era realizado por meio de um laptop, possibilitando ao operador de emissões trabalhar próximo à aeronave, até mesmo de dentro dela, ao lado do operador do sistema MAGE em avaliação.

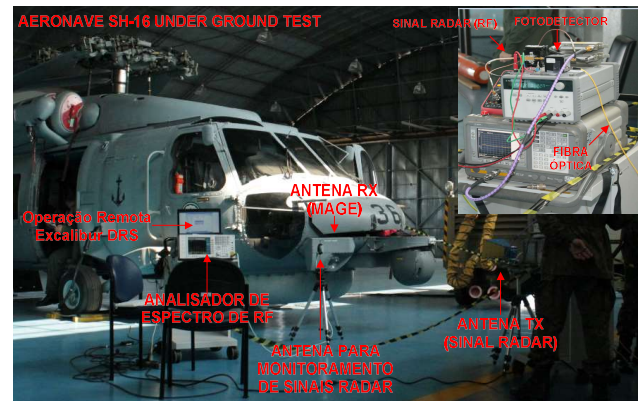


Fig.17 – Demonstração real de operação remota do Sistema de Geração de Ameaças Radar associado à transmissão de sinais radar em fibra óptica durante os testes de avaliação em solo (*Ground Test*) da aeronave SH-16 *Seahawk* no hangar do X-30 realizado em agosto de 2016.

## IV. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou e demonstrou experimentalmente o conceito de operação remota do sistema de geração de ameaças radar DRS-Excalibur associado à transmissão de RF em fibra óptica. Este conceito torna viável a realização de experimentos de avaliação de sistemas de guerra eletrônica embarcados em aeronaves posicionadas a quilômetros de distância dos sistemas de geração de sinais radar, o que seria impossível se considerada apenas a transmissão de sinais por meio de cabos coaxiais. A demonstração experimental é realizada a partir da geração remota de 3 emissores radar simultâneos usando o equipamento DRS-Excalibur, cobrindo a faixa de 2 a 18 GHz. Resultados das medições realizadas diretamente na saída de RF do gerador de sinais são confrontados com as medidas obtidas na posição distante, após a transmissão dos sinais através de 1 km fibra óptica.

Nas medidas obtidas no domínio da frequência, Fig. 06 e Fig. 13, observa-se que os níveis de sinais de RF medidos estão dentro da faixa de tolerância 3 dB de diferença. A Fig. 13 mostra ainda que há um pequeno sinal na frequência de 6 GHz. Este sinal é o 2º harmônico do primeiro radar, o qual possui a frequência de transmissão de 3 GHz, sinal fundamental, sendo este sinal provavelmente gerado pelo enlace a fibra óptica. Uma justificativa plausível para o aparecimento deste harmônico é um provável desvio da polarização do modulador MZM, a partir do ponto de quadratura. Este harmônico está a 40 dB abaixo da potência dos emissores gerados. Tal desvio do ponto de operação do modulador MZM pode ser facilmente corrigido a partir da inserção de um controle automático da tensão de bias do modulador, reduzindo drasticamente a amplitude dos sinais harmônicos espúrios da saída do enlace.

Comparando as medidas no domínio do tempo realizadas diretamente na saída do equipamento, Fig. de 7 a 10, com as realizadas na posição remota localizada a 1 km de distância, Fig. de 13 a 16, pode-se observar que, de acordo com as medidas apresentadas, os pulsos detectados dos 3 emissores radares não sofrem alterações significativas.

Ademais, os resultados apresentados mostram que o controle e gerenciamento remoto de instrumentos via rede internet possibilita comandar à distância o gerador de sinais radar Excalibur DRS. Isto permite que o gerador de sinais radar esteja instalado em condições controladas de laboratório, seguindo suas especificações técnicas, diferente das condições adversas onde estão sendo realizados os testes de avaliação dos sistemas de guerra eletrônica embarcados na aeronave.

Por fim, a realização do experimento em ambiente operacional aponta para a viabilidade do emprego do conceito proposto em situações reais, com vantagens operacionais de flexibilização de posicionamento da aeronave, menor dependência das condições climáticas durante a missão, menor exposição da instrumentação eletrônica ao risco e facilidade de coordenação e controle da operação.

## REFERÊNCIAS

- [1] F. S. Ivo, O. L. Coutinho, P. C. S. Euphrásio, E. Fonseca, A. C. Coelho, “Emprego do gerador de ameaças de sinais radar em pesquisa, desenvolvimento e avaliações operacionais em áreas de guerra eletrônica”, X SIGE, 24-26 de setembro de 2008.
- [2] L. A. Faria, F. S. Ivo, “Especialização e concentração de meios, recursos humanos e equipamentos em prol das aplicações operacionais”, revista Spectrum, n. 14, setembro 2011.
- [3] L. A. Faria, F. S. Ivo, “Excalibur RF Simulator System: incremento nas capacidades de guerra eletrônica e no desenvolvimento de doutrina”, revista Spectrum, n. 18, setembro 2015.
- [4] A. P. Gonçalves, “Estudo do gerador de ameaças TS-100 Excalibur como ferramenta de AVAOP”, 2008. Trabalho de conclusão de curso. (Especialização em Análise Ambiente Eletromagnético)– Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos – SP.
- [5] O. L. Coutinho, C. S. Martins, F. S. Ivo, V. R. Almeida, J. E. B. Oliveira, “Transmissão em fibra óptica de sinais gerados pelo simulador de ameaças TS100+Excalibur”, X SIGE, 24-26 de setembro de 2008.
- [6] O. L. Coutinho, “Aplicação de moduladores eletroópticos em enlaces analógicos a fibra óptica”, 2005.193f. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica e Computação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos – SP.
- [7] L. A. FARIA, “Laboratório de Guerra Eletrônica – pesquisa em prol da soberania nacional”, AOC – Association of Crows – Módulo Brasil, abr. 2015.
- [8] A. J. SEEDS, “Microwave photonics”, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, v. 50, n.3, p. 877 – 877, mar. 2002
- [9] R. H. SOUZA, “Efeitos da não-linearidade de moduladores eletro-ópticos em enlaces fotônicos empregados na geração e na transmissão de sinais radar”, 2015. 195f. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica e Computação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos – SP.
- [10] C. M. Christensen; M. B. Horn; H. Staker. Is K-12 Blended learning disruptive? an introduction to the theory of hybrids. Redwood City, CA: Clayton Christensen Institute for Disruptive Innovation, 2013. (ED566878). Disponível em: <https://eric.ed.gov/?id=ED566878>. Acesso em: 22 Dec. 2017.
- [11] P. C. S. Euphrásio; L. A. Faria; J. S. E. Germano. “Desenvolvimento de Ferramentas Computacionais para Laboratórios Controladas à Distância (Weblab) como Elementos Potencializadores do Processo Ensino-Aprendizagem”. 2020.161f. Tese (Doutorado em Engenharia Eletrônica e Computação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos – SP
- [12] P. C. S. Euphrásio; L. A. Faria; J. S. E. Germano; D. Hirata. “Improving teaching-learning process in MIL-STD-1553B bus classes using a new hybrid web-lab methodology”. IEEE Transactions on Education, 2020. (On publish). DOI: 10.1109/TE.2020.2984882.
- [13] L. GOMES; S. BOGOSYAN, “Current Trends in Remote Laboratories”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 56, n. 12, Dez. 2009.
- [14] O. L. COUTINHO, C. S. MARTINS, V. R. ALMEIDA, J. E. B. OLIVEIRA. Aplicação de enlace a fibra óptica em transmissão de sinais radar”, Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica, MOMAG 2008, Florianópolis, SC, SET. 08.
- [15] P. HERNANDEZ-RAMOS, D. ALEXANDER, A. BELOUS, J. BHERENS, “Changing the way to learn: How Cisco Systems is doing it”, Proceedings Int. Workshop Advanced Learning Technologies, Palmerston North, New Zealand, 2000, p. 177-179.
- [16] D. GILLET, A. V. NGOE, Y. REKIK, “Collaborative web-based experimentation in flexible engineering education”, IEEE SEEDS, A. J. Microwave photonics. IEEE Transactions on Education, v. 48, n.4, p. 619-631, nov. 2005.
- [17] ABURDENE, M. F.; MASTASCUSA, E. J.; MASSENGALE, R.; “A proposal for a remotely shared control systems laboratory”, Proceedings of 1991 Frontiers in Education Conference IEEE, set. 1991.
- [18] WAGNER, B. “From computer-based teaching to virtual laboratories in automatic control”, Frontiers in Education Conference IEEE, nov. 1999.
- [19] TeamViewer Enterprise, “TeamViewer 9 Manual – Controle remoto”, julho 2016. Disponível em: < <http://> <https://www.teamviewer.com/pt/res/pdf/TeamViewer9-Manual-RemoteControl-pt.pdf>>. Acesso em: 03/07/2016.