



A Detecção Passiva no contexto de um Sistema de Defesa Antiaérea: possibilidades e limitações

Cel QEM Marcelo NOGUEIRA de Sousa¹

João Roberto Moreira Neto²

Resumo

Este artigo tem por objetivo apresentar os sistemas de detecção passiva dentro do contexto da Defesa Antiaérea. A expressão “Sistema de Detecção Passiva” indica uma classe de radares biestáticos que não enviam um determinado sinal eletromagnético dedicado, mas que, em vez disso, exploram as emissões de outras fontes, chamadas de “Iluminadores de Oportunidade” (IOs), para iluminar o alvo, como sinais de FM, TV e telefonia celular. A tecnologia em si não é nova, pois já estava presente no início do desenvolvimento dos radares; entretanto, nos últimos anos, a capacidade de detecção passiva tem se constituído em uma das

ferramentas capazes de fazer frente às tecnologias furtivas presentes nas aeronaves *stealth*. Por fim, o artigo aborda as origens e o panorama internacional dos sistemas passivos existentes, apresentando possíveis estratégias que, se forem adotadas, podem viabilizar a obtenção de um sistema de detecção passiva nacional com o uso de equipamentos existentes e *spin-offs* de projetos de radares em andamento na Força Terrestre.

Palavras-chave: Radar Passivo; Localização Coerente Passiva; Sistemas de Defesa Antiaérea; Medidas de Suporte Eletrônico; Rádio Definido por Software; Efeito Doppler.

1. Introdução

A Defesa Antiaérea inclui sistemas de armas integrados com sistemas de aquisição de alvos nos quais o radar é um item-chave fundamental para possibilitar o correto engajamento dos diferentes armamentos disponíveis para fazer

frente à ameaça aérea. Os sistemas de radar têm sido usados há muito tempo para a detecção e o rastreamento de alvos aéreos. No entanto, muitos desses radares são propensos a serem detectados, pois eles têm, inerentemente, que transmitir sinais para detectar o alvo. Assim,

¹ Curso de Formação de Oficiais de Comunicações – AMAN, 1993; Engenheiro Militar de Telecomunicações – Instituto Militar de Engenharia (IME), 1999; Escola de Comando e Estado-Maior do Exército (ECEME), 2010; Mestrado em Engenharia Elétrica (UnB) e em Micro-ondas (Universidade de Munique, Alemanha); Doutorado em Fusão de Sensores (Universidade Técnica de Ilmenau, Alemanha). Atua nas áreas de Guerra Eletrônica, Antenas e Propagação.

² Engenharia Eletrônica – ITA, 1982; *Diplom-Ingenieur* e *Doktor-Ingenieur* – Universidade Técnica de Munique (Alemanha) em 1985 e 1992, respectivamente. Atualmente, atua como Engenheiro Desenvolvedor de Produto na Embraer Defesa e Segurança, unidade de Campinas.

a grande vulnerabilidade de tais sistemas é a possibilidade de serem detectados e localizados via triangulação através da recepção dos sinais que transmitem.

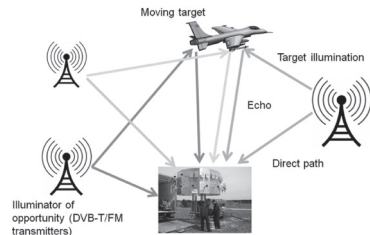
As aeronaves de ataque atuais são otimizadas para reduzir a Seção Reta Radar na direção de deslocamento, de modo que, quando são “iluminadas” por um radar, a radiação incidente não seja refletida de volta e sim dispersada em outras direções. Tal técnica somente é eficaz contra os radares monoestáticos, nos quais a mesma antena é usada para transmissão e recepção. Os radares passivos possuem característica multiestática: as antenas transmissoras e receptoras são posicionadas em lugares diferentes, o que favorece a detecção do alvo (TAN et al., 2005).

Outro aspecto relevante dos sistemas passivos é a utilização de frequências mais baixas do espectro eletromagnético, fazendo com que os comprimentos de onda correspondentes sejam comparáveis às partes estruturais da aeronave-alvo, o que aumenta o eco do alvo. Essa faixa ainda tem a vantagem de poder detectar alvos mesmo que eles usem revestimentos de Material Absorvente de Radar (RAM – *Radiation-Absorbent Material*), que são menos eficientes nas faixas de frequência mais baixas. Consequentemente, esconder uma aeronave de um radar passivo torna-se muito mais difícil, pois eles podem localizar até mesmo alvos difíceis de serem detectados, como aviões furtivos.

Ao contrário do radar convencional, o radar passivo não emite qualquer radiação, pois o sistema usa as reflexões de radiação de outros emissores, como estações de rádio e televisão, para detectar os objetos (BASAVARAJAPPA, 2012). Conforme demonstrado na Figura 1, a seguir, os radares passivos exploram transmissões existentes, como iluminadores (por

exemplo: FM, Digital Audio Broadcasting – DAB, TV, HDTV, GSM, 3G).

Figura 1: Esquema de funcionamento de um Radar Passivo com os Iluminadores de Oportunidade (IO).



Fonte: Basavarajappa (2012)

Em recente entrevista, o Diretor Comercial e Chefe do Departamento de Produção da Empresa de Radares Passivos ERA³ afirmou que, nos combates modernos, o tempo de “sobrevivência” de um radar ativo tradicional é de aproximadamente 20 ou 30 minutos. Isso ocorre porque os mísseis antirradiação e os ataques com munição inteligente praticamente colocam as estações de radares como os primeiros alvos em um conflito; ou seja, tais radares são destruídos tão logo sejam localizados (PALMER, 2012).

O princípio de detecção passiva é conhecido há muito tempo. Contudo, nos últimos anos, diversos fabricantes têm apresentado soluções inovadoras, integrando novas técnicas de processamento digital de sinais e equipamentos receptores digitais definidos por *software*, o que vem melhorando significativamente o alcance e a precisão da detecção dos radares passivos (GRIFFITHS e BAKER, 2017).

³Is passive radar the future of air defense? [ERA Interview] (<https://www.defenceiq.com/defence-technology/articles/passive-radar-technology-and-next-generation-air-defence-technology-interview-with-era>)



Os radares passivos também podem ser empregados no controle do espaço aéreo civil e militar, principalmente recobrendo pontos cegos que não possam ser atendidos pelos radares ativos. No caso do controle de tráfego aéreo civil, a implantação apresenta menor custo, pois os sistemas passivos não exigem licenciamento das frequências de operação. Em aplicações militares, o sistema permite a vigilância em grandes áreas utilizando receptores ligados em rede ao mesmo tempo em que oferece a vantagem operacional de esses receptores serem de difícil localização por forças hostis.

Além de contar com tecnologias furtivas, as novas aeronaves usam sistemas modernos de contramedidas e autoproteção capazes de detectar ameaças em uma ampla faixa de frequência, alertando o piloto para uma possível iluminação por radares hostis e propondo a aplicação de técnicas adequadas de engajamento. Nesse cenário, mais uma vez o radar passivo se destaca, pois ele não pode ser detectado nem bloqueado.

A importância de um sistema de radar passivo é evidente, tendo em vista a maior proteção contra mísseis antirradiação e armas de energia dirigida. Além disso, os radares passivos oferecem baixos custos de aquisição e funcionamento e não exigem qualquer tipo de licença para a sua utilização. Portanto, esse tipo de radar é ideal para uso em ambientes com alta densidade eletromagnética, como aeroportos civis, pois eles normalmente exigem maior poder de processamento.

Como aspectos negativos, pode-se afirmar que a eficácia dos sistemas passivos depende da geometria da detecção em si e da otimização do processamento dos sinais de oportunidade

que iluminam o alvo. Existe, ainda, outro aspecto limitador que é a incapacidade de revelar alvos em altitudes elevadas (acima de 3-5 km). Apesar dessas dificuldades, a adoção de radares passivos como complemento aos sistemas ativos, configurando uma malha de detectores, pode funcionar para preencher as lacunas de um Sistema de Defesa Antiaéreo, possibilitando, inclusive, a detecção de voos rasantes. Tal combinação pode fornecer uma elevada capacidade de vigilância, cobrindo eficientemente o espaço aéreo contra todos os tipos de ameaças furtivas (aeronaves, mísseis balísticos/ de cruzeiro, UAVs, etc.), conforme discutido em Griffiths e Baker (2017).

Atualmente, os radares passivos estão sendo estudados e adotados por muitos países, tendo se tornado um tópico de pesquisa e desenvolvimento relevante, de acordo com Edrich, Kloeck e Stroth (2017). O desenvolvimento de Rádios Definidos por Softwares (RDS) tem viabilizado a rápida prototipação e encurtado o ciclo de desenvolvimento de sistemas de radares, uma vez que o RDS é de baixo custo e se vale do aumento da capacidade dos processadores, permitindo a implementação de sistemas passivos não apenas por fabricantes de radares, mas também por amadores e entusiastas (PETRI et al., 2010).

Este artigo aborda as origens dos radares passivos e apresenta um panorama internacional dos principais sistemas disponíveis no mercado. Também discute, resumidamente, as principais pesquisas e os desenvolvimentos atingidos na área de detecção passiva no cenário nacional. Na conclusão, são ressaltados os aspectos relevantes para a indústria nacional, a área operacional e a comunidade acadêmica de forma a aproveitar a janela de oportunidade em detecção passiva,

indicando resultados proeminentes e sugestões para trabalhos futuros.

2. Histórico da Detecção Passiva

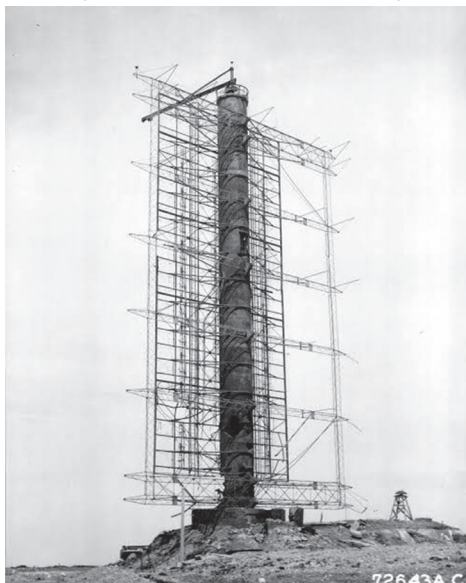
Uma das primeiras tentativas de usar o conceito de detecção passiva foi realizada em 1924 por Appleton e Barnett, que exploraram uma Estação de Radiodifusão da BBC em Bournemouth (na costa sul do Reino Unido) e um receptor em Oxford a fim de determinar a altura da ionosfera (PETRI et al., 2010).

Alguns anos mais tarde, em 26 de fevereiro de 1935, na cidade de Daventry, na Inglaterra, Watson-Watt e Wilkins utilizaram uma estação da BBC (6,1 MHz) e detectaram um bombardeiro Heyford a oito milhas de distância. A experiência foi considerada bem-sucedida e levou ao desenvolvimento do sistema de alerta antecipado chamado *Chain Home*, que cobria o lado oriental do Reino Unido, conforme apresentado em Lythall et al. (1995).

Já durante a Segunda Guerra Mundial, engenheiros alemães desenvolveram o radar biestático passivo *Klein Heidelberg*, que utilizava o *Chain Home* britânico como uma fonte não cooperativa de radiação (KUSCHEL, 2013). Ou seja, surgia o conceito de usar as próprias emissões inimigas como fontes iluminadoras de oportunidade, ficando a detecção completamente passiva durante todo o desdobramento das ações táticas de bombardeio e proteção antiaérea.

Na década de 1960, os Estados Unidos testaram o radar passivo *Sugar Tree*, um sistema *Over-the-Horizon* (OTH) que usava iluminadores de onda curta para detectar um possível lançamento de foguetes soviéticos. Esse sistema parecia ter sido inspirado pelo modelo alemão

Figura 2: Radar Passivo *Klein Heidelberg*.



Fonte: Kuschel (2013).

Klein Heidelberg, pois explorava os sinais do adversário, ou seja, os sinais HF soviéticos.

No início de 1980, na Universidade de Londres, foram realizados os primeiros experimentos utilizando a transmissão de televisão analógica para detectar alvos aéreos (KUSCHEL e O'HAGAN, 2010). Desde então, e especialmente após o surgimento de aeronaves de baixa tecnologia observável e *stealth*, o interesse pela abordagem *Passive Coherent Location* (PCL – em português: localização coerente passiva) aumentou consideravelmente.

Tendo em vista a análise histórica das diversas tentativas de construção de radares passivos, pode-se afirmar que a tecnologia em si não é nova e estava nos primórdios do desenvolvimento dos radares. Em que pesem as limitações tecnológicas da época, o conceito foi testado e validado em diferentes períodos e encontra



atualmente um novo *boom* tecnológico, fruto da existência de tecnologias furtivas que colocam o conceito de detecção passiva novamente em tela.

3. Panorama Internacional de Sistemas Passivos

Após a Segunda Guerra Mundial, em especial mais recentemente, foram realizados muitos estudos sobre radares passivos.

Em 1999, foi apresentado o radar passivo *Silent Sentry 2*, da empresa *Lockheed Martin*, que usava as transmissões de FM e TV (analógica e digital) como iluminadores de oportunidade. Esse radar tinha capacidade de rastreamento de 200 alvos a uma distância de até 220-280 km e conseguia acompanhar aeronaves, mísseis, navios e alvos de superfície com uma precisão de 250 m na horizontal, 1000 m na vertical e aproximadamente 2 m/seg de velocidade, com custos de aquisição e operação inferiores aos de um radar convencional, conforme destacam Baniak et al. (1999).

Figura 3: Radar Passivo *Silent Sentry* (U.S. Air National Guard).



Fonte: Millet e Klein (2011).

Há vários sistemas no mercado internacional e a maior parte deles está voltada para a recepção

de radiodifusão de FM. Além disso, os sistemas são experimentais ou necessitam de um longo trabalho de adaptação e otimização por parte do cliente. Mesmo assim, não há garantia de cumprimento de requisitos por parte do operador.

A solução técnica mais usada é o emprego de um receptor móvel ou fixo com uma antena V/UHF-DF, ou seja, uma rede de cinco antenas operando na faixa de 20 MHz a 3 GHz, na forma de candelabro ou equivalente, para medida da diferença do tempo de chegada (*Time Difference of Arrival – TDOA*), e o uso da rede de antenas como radiogoniômetro ou *Direction Finder (DF)*.

Não há um sistema operacional ou *plug and play* no mercado mundial que esteja baseado em uma rede de múltiplos receptores e iluminadores e apoie qualquer cenário de monitoramento do tráfego aéreo. Há várias frentes de desenvolvimento de tais soluções para complementar o monitoramento do tráfego aéreo na área fronteira. O equipamento mais utilizado como plataforma para tal missão é o receptor *Communications Intelligence (COMINT – em português: Inteligência de Comunicações)* de V/UHF-DF, disponível no mercado mundial.

Os iluminadores de oportunidade podem ser: iluminadores próprios em V/UHF; transmissores de televisão de sinal analógico e digital; transmissores FM e de áudio digital; estações base de celular Wi-Fi; além de satélites de televisão, de comunicação, de Busca e Salvamento (SAR – *Search and Rescue*), de Controle de Tráfego Aéreo (ATC – *Air Traffic Control*) e do Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS – *Global Navigation Satellite System*).

Considerando os sistemas atuais operando em condições ótimas de posicionamento do

receptor e do iluminador, pode-se detectar uma pequena aeronave do tipo Cessna 172, conforme demonstra o Quadro 1, a seguir.

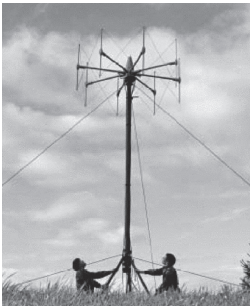
Quadro 1: Alcance e resolução do radar passivo para diferentes iluminadores.

	ALVO	ALCANCE	RESOLUÇÃO
Rádio FM	Cessna 172	100 km	2-3 km
TV Digital	Cessna 172	80 km	50 km
GSM	Cessna 172	5 km	3 km

Fonte: Millet e Klein (2011)

O maior alcance é obtido pela radiodifusão FM; porém, a melhor resolução é proporcionada pela TV digital. Já as estações GSM têm um alcance muito limitado.

Figura 4: *Homeland Alerter 100* (HA 100).



Fonte: Millet e Klein (2011).

O grupo francês *Thales* desenvolveu uma solução de detecção passiva denominada *Homeland Alerter 100* (HA 100). O sistema, que tem um alcance de 200 km, foi introduzido em 2005 e apresentado pela

primeira vez na Feira de *Le Bourget* de 2007 (MILLET e KLEIN, 2011). Em 2007, a Noruega adquiriu um HA 100 atualizado (GRIFFITHS e BAKER, 2017) e, em 2010, o HA 100 foi utilizado pela Força Aérea Francesa para monitorar o espaço aéreo sobre Paris no feriado nacional francês de 14 de julho.

Em seu portfólio de soluções, a *Thales* ainda dispõe do sistema *Ground Alerter 10* (GA 10), um radar antiartilharia baseado no mesmo princípio

de detecção passiva que permite localizar projéteis num raio de 10 km (PALMER, 2012).

Na Universidade de Londres (*University College London – UCL*), um grupo de pesquisa vem, há muito tempo, investigando o uso da transmissão de TV analógica para detecção de aeronaves. Recentemente, esse grupo desenvolveu um sistema de radar passivo que pode detectar alvos através de paredes usando os sinais Wi-Fi gerados por roteadores sem fio e pontos de acesso (ADIB e KATABI, 2013). O sistema, concebido por Karl Woodbridge e Kevin Chetty, requer duas antenas e um computador e não é maior do que uma mala. Usando as frequências de 2,4 GHz e 5 GHz, esse radar passivo analisa o Desvio Doppler e é capaz de reconstruir a imagem de um ser humano que esteja se movendo do outro lado de uma parede.

Figura 5: Radar Passivo Wi-Fi.



Fonte: Extreme Tech (2012).

Na Alemanha, o instituto *Fraunhofer FHR* desenvolveu o sensor passivo PCR CORA para a exploração de sinais de TV DAB e DVB-T (KUSCHEL e O'HAGAN, 2010). Esse foi o primeiro sistema passivo a demonstrar a detecção de alvos aéreos e marítimos em ensaios usando formas de ondas digitais com modulação COFDM de amplitude



espectral quase constante, semelhante ao ruído, dentro dos limites de banda de 1,5 MHz (DAB) e 7,5 MHz (DVB-T). Com isso, alcançou uma resolução de aproximadamente 100 metros e 20 metros, respectivamente; ou seja, como principal vantagem, esse sistema possui a resolução espacial bem maior do que a alcançada com os iluminadores de oportunidade baseados em emissão de rádio FM.

A empresa *BAE Systems* em conjunto com o laboratório *Roke Manor Research* desenvolveram o sistema *CELLDAR*, um radar passivo que explora especificamente as transmissões das torres de celular (*Estações Rádio Base – ERB*) como iluminadores de oportunidade.

A empresa italiana *SELEX Sistemi* (atualmente Leonardo) desenvolveu o sistema *AULOS*, que pode ser fixo ou móvel e é configurado para operar com emissões de rádio FM, DAB e DVBT, além de possuir um alcance de 360 km.

Figura 6: Radar Passivo do Grupo Cassidian.



Fonte: Kuschel (2013).

A empresa *Cassidian*, do Grupo *EADS*, hoje parte do conglomerado *Airbus Defence and Space* (Alemanha), também possui em seu portfólio um sistema de radar passivo, sem denominação específica (KUSCHEL, 2013).

A empresa americana *Syracuse Research Corporation* (SRC) também possui amplo *know-how* em detecção passiva, com mais de 40 anos de experiência na concepção de radares passivos, incluindo operações bi e multiestáticas. A empresa, além de possuir soluções específicas para localização fixa, vigilância terrestre

e configurações de navios e aeronaves, recentemente lançou o Sistema de Vigilância Passiva em Banda Larga (*Wideband Enhanced Passive Surveillance System – WEPSS*⁴).

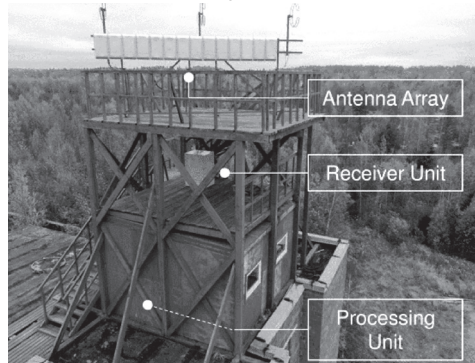
Figura 7: Sistema de Vigilância Passiva Aprimorada de Banda Larga (WEPSS).



Fonte: Griffiths e Baker (2017).

É possível construir sistemas passivos que demonstrem a tecnologia de forma conceitual e acadêmica, permitindo a muitos entusiastas e estudantes de Engenharia Elétrica, além das empresas tradicionais, construir radares passivos de baixo custo (VOROBEV et al., 2018). Isso ocorre devido à disseminação de receptores eletrônicos

Figura 8: Radar Passivo da Universidade de São Petersburgo – Rússia Wi-Fi.



Fonte: Vorobev et al. (2018).

⁴<https://www.srcinc.com/what-we-do/radar-and-sensors/passive-bistatic-multistatic-radar.html>.



baratos e ao uso generalizado da tecnologia de rádio controlada por *software* (SDR).

Portanto, podem ser enumeradas as seguintes vantagens dos sistemas de detecção passiva:

- apresentam baixo custo e consumo por não precisarem de transmissores;
- exploram as faixas de V/UHF;
- são praticamente insensíveis a interferidores ou ações de guerra eletrônica;
- detectam aeronaves pequenas, voando em baixa altitude e *stealth*;
- a central de processamento e operação pode estar distante dos receptores, inclusive usando as próprias emissões do inimigo como iluminadores de oportunidade.

Dentre as limitações dos sistemas passivos, podem ser listadas as seguintes:

- dependem de um iluminador não cooperativo;
- o sinal de transmissão não é típico de radar;
- sofrem limitações geométricas;
- o eco do alvo compete com o sinal direto do iluminador;
- os receptores precisam estar conectados em rede.

O processamento de sinais passivos tem as seguintes características:

- o sinal de referência provém diretamente da fonte de iluminação;
- há correlação cruzada entre o sinal direto e o refletido pelo alvo (*Passive Coherent Location – PCL*) – distância elíptica e velocidade do alvo;

- pode ser usada a medida da diferença do tempo de chegada (TDOA) para a localização do alvo;
- múltiplos receptores e iluminadores podem ser usados para o posicionamento 3D;
- reduz os efeitos da reflexão multiestática;
- apresenta melhor precisão e resolução, com rastreamento semelhante ao dos radares ativos.

Em síntese, o panorama internacional aponta para um ressurgimento generalizado de projetos e de sistemas de detecção passiva, seja no ambiente acadêmico ou na forma de produtos e protótipos demonstradores de tecnologia. Tanto as empresas como os agentes governamentais têm focado no uso de iluminadores de oportunidade baseados em sistemas de TV, de telefonia celular ou, ainda, de rádios transmissoras de FM.

4. Detecção Passiva usando *Multipath Exploitation Radar* (MER)

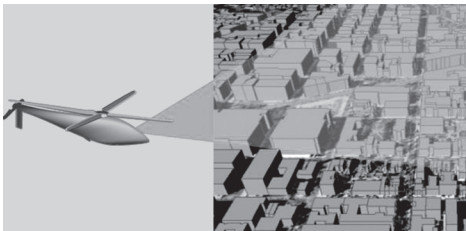
Os radares passivos apresentam limitações no ambiente urbano devido às características de propagação. Os edifícios urbanos bloqueiam os raios de visada direta (*Line of sight – LOS*), fazendo com que os sistemas de radar aerotransportados existentes não funcionem adequadamente em uma área urbana em virtude do complicado ambiente multipercurso.

Além do uso puro e simples da recepção passiva, algumas iniciativas têm sido feitas no sentido de explorar as características multipercurso das ondas refletidas nos obstáculos para aprimorar e auxiliar os sistemas de localização (KUMBUL e HAYVACI, 2019).



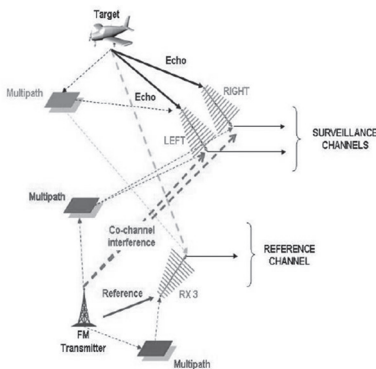
Essas técnicas, denominadas de *Multipath Exploitation Radar* (MER), têm sido fomentadas pela Agência de Projetos de Pesquisas Avançadas em Defesa dos Estados Unidos (*Defense Advanced Research Projects Agency – DARPA*). A ideia é usar as ondas refletidas nos prédios como sensores virtuais, empregando uma estrutura de geoinformação no processamento de sinais de forma a agregar o conhecimento do traçado dos raios eletromagnéticos aos obstáculos do terreno. Com o MER, é possível, ainda, agregar a informação multipercurso aos radares *Ground Moving Target Indication* (GMTI), extraindo as informações do ambiente e fazendo um mapeamento tridimensional da posição do alvo.

Figura 9: Exemplo do MER.



Fonte: Fertig et al. (2012).

Figura 10: *Multipath Exploitation Radar*.



Fonte: Kumbul e Hayvacı (2019).

Os conceitos de MER e detecção passiva foram ampliados, juntamente com técnicas de *Machine Learning* e *Fingerprints*, a fim de aprimorar a performance em ambientes externos (DE SOUSA e THOMÄ, 2018a e 2018b).

Portanto, as pesquisas fomentadas pela DARPA, aliadas às técnicas de *Machine Learning* e ao conceito de MER, têm conferido uma nova dimensão ao desenvolvimento de radares passivos, aprimorando a malha de sensores que podem ser usados em proveito de um Sistema de Defesa Antiaérea.

5. Panorama nacional de pesquisa e desenvolvimento em Detecção Passiva

No cenário nacional, temos os Centros de Pesquisa e a Base Industrial de Defesa Brasileira, que se dedicam à pesquisa, ao desenvolvimento e à produção de tecnologias relacionadas à área de Defesa. Um exemplo é a Família SENTIR M20 (Sentinela Radar M20), que possui receptores COMINT de V/UHF-DF de alto desempenho e é utilizada no projeto Sistema Integrado de Monitoramento de Fronteiras (SISFRON) do Exército Brasileiro.

A Indústria de Defesa Nacional já desenvolveu, com sucesso, sistemas complexos nas áreas de:

- Comando e Controle de Sistemas de Inteligência Eletrônica (*Electronic Intelligence – ELINT*);
- radares dedicados à Defesa e ao Tráfego Aéreo civil e militar;
- rastreamento de alta complexidade para aplicações militares e tráfego aéreo civil;
- Inteligência de Comunicações analógicas e digitais;



- *hardware* de COMINT nas bandas de HF e V/UHF;
- Sistema de Apoio à Decisão.

O desenvolvimento de uma rede nacional de detecção passiva poderia aproveitar o conhecimento já adquirido na detecção ativa, criar uma rede de novos produtos na área de detecção passiva e ampliar o portfólio de exportação dos Produtos de Defesa.

Além dessas capacidades, as empresas nacionais têm domínio tecnológico, autonomia e competência para desenvolver:

- *firmware* e *software* de COMINT nas bandas de HF e V/UHF;
- algoritmos de PCL, TDOA, PET e SIGINT;
- fusão e rastreamento de alvos provenientes dos receptores dos radares passivos;
- fusão da posição e da pista dos alvos aéreos do radar passivo com outros sistemas, como radares de tráfego aéreo e outros sensores de alerta antecipado.

6. Utilização dos sistemas nacionais existentes para Detecção Passiva: sugestões viáveis

A Indústria de Defesa tem total domínio tecnológico para fornecer a ampla rede de radares passivos visando à cobertura total da área de fronteira do território nacional. O SENTIR poderia ser transformado em radar passivo através de uma atualização de *firmware* e *software*. Esse sistema foi desenvolvido no Brasil e pode ser atualizado para acumular a função de radar passivo.

Os postos de operação de COMINT V/UHF-DF do Projeto SISFRON poderiam ser atualizados e acumular a função de radar passivo. O SISFRON conta com mais de 20 postos de V/UHF-DF distribuídos em um segmento da fronteira seca.

A pesquisa e o desenvolvimento poderiam ser realizados integralmente no Brasil pelas empresas de defesa e de tecnologia. Já há legado tecnológico na área de COMINT nas bandas de HF e V/UHF, além de um vasto conhecimento operacional das três Forças Armadas.

O sistema poderia dispor de uma rede de quatro ou mais receptores usando uma antena V/UHF-DF acompanhada da respectiva rede de iluminadores de oportunidade. Os mais adequados seriam as radiodifusoras de FM que, se fossem usadas, poderiam dispor de algoritmos de fusão e de rastreamento das emissões, sendo capaz de:

- posicionamento de três dimensões do alvo;
- redução dos efeitos da reflexão multiestática;
- melhor precisão e resolução;
- qualidade da informação dos alvos rastreados compatíveis com a requerida ao monitoramento do tráfego aéreo.

Dentro desse cenário, sugere-se a seguinte estratégia de desenvolvimento:

- fomentar a formação de uma constelação organizacional de “tripla hélice”, conectando o usuário via EsACosAAE, centros de pesquisas acadêmicas e empresas do segmento de radares;
- dentro de um projeto de inovação, poderia ser buscada a criação de um demonstrador de tecnologia baseado na

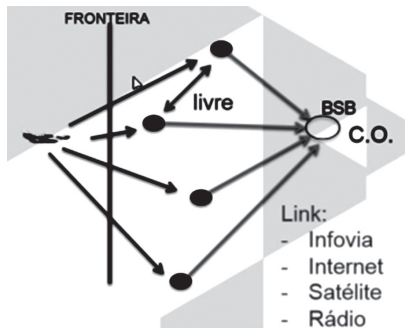


Família de Radares SENTIR, que possui receptores COMINT de V/UHF-DF de alto desempenho e é utilizada no Projeto SISFRON do Exército Brasileiro;

- atualização de *firmware* e *software* da Família SENTIR, com o possível aproveitamento de até 23 sistemas do SISFRON;
- sincronismo de fase por GNSS e relógio atômico;
- o protótipo poderia disponibilizar as informações de detecção passiva em um Centro de Operações, por exemplo, em Brasília.

A Figura 11 apresenta um exemplo da implantação do Sistema de Radar Passivo na Fronteira Seca, conforme sugerido.

Figura 11: Exemplo de implantação do Sistema de Radar Passivo na Fronteira Seca.



Fonte: O autor.

Os pontos principais de pesquisa e desenvolvimento poderiam ser:

- *Passive Coherent Location* (PCL) – localização coerente passiva aplicada à medida da distância elíptica e da velocidade do alvo;

- *Time Difference of Arrival* (TDOA) – medida da diferença do tempo de chegada aplicada à localização tridimensional do alvo;
- *Passive Electronic Support Measures (ESM) Tracking* (PET) – medidas de suporte eletrônico aplicadas à localização tridimensional do alvo através de sua própria emissão;
- *Signals Intelligence* (SIGINT) – inteligência de sinais provenientes das comunicações, dos radares e dos sistemas de *downlink* dos alvos aéreos;
- fusão e rastreamento dos alvos provenientes da rede de receptores, provendo a posição e as pistas dos alvos aéreos;
- fusão da posição e da pista dos alvos aéreos do radar passivo com outros sistemas, como radares de tráfego aéreo e outros sensores de alerta antecipado.

Portanto, percebe-se que o cenário nacional é favorável ao desenvolvimento de um sistema de detecção passiva, desde que seja possível estabelecer uma constelação organizacional que conecte os centros de pesquisas, as indústrias do segmento de radar e os possíveis usuários.

Apesar de não ser uma tarefa trivial, uma estratégia focada no desenvolvimento de um protótipo demonstrador de tecnologia apresenta-se adequada para gerar maior massa crítica sobre o tema.

7. Conclusão

A capacidade de detecção passiva pode potencializar os projetos de Defesa Antiaérea



em andamento na Força Terrestre. Apesar de ser uma tecnologia antiga, os radares passivos têm entrado no foco de desenvolvimento de diversas Empresas de Defesa, valendo-se do avanço tecnológico principalmente de processamento de sinais e de Rádios Definidos por *Software*.

As competências existentes na Base Industrial de Defesa Brasileira, principalmente no desenvolvimento e na integração de sistemas e em projetos legados de radares ativos e de soluções de COMINT, apontam para uma rápida obtenção de um demonstrador de tecnologia de detecção passiva.

A Indústria de Defesa já atua no desenvolvimento de famílias de radares e de COMINT nacionais, produtos que são tecnológica e comercialmente reconhecidos pelo mercado e pela indústria

mundiais, uma vez que há exportação de radares de diferentes aplicações para a África. Uma possível estratégia de desenvolvimento é agregar um módulo de detecção passiva aos Radares SENTIR em operação no escopo do Projeto SISFRON, otimizando recursos e viabilizando uma rápida prototipação de uma solução para detectar aeronaves voando em baixa altitude na região de fronteira seca.

Por fim, conforme discutido no decorrer do texto, a detecção passiva é viável e útil para um Sistema de Defesa Antiaéreo Nacional, sendo imprescindível a participação do usuário para realizar a gestão de requisitos e formular o arcabouço doutrinário de emprego da detecção passiva em prol das operações do Exército Brasileiro.



Referências

ADIB, F.; KATABI, D. **See through walls with Wi-Fi!** ACM, 2013. Disponível em: <<https://people.csail.mit.edu/fadel/papers/wivi-paper.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2020.

BANIAK, J.; BAKER, G.; CUNNINGHAM, A. M.; MARTIN, L. Silent Sentry Passive Surveillance. Lockheed Martin Mission Systems. **Aviation Week and Space Technology**. 1999, 7: 134-139. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.475.8561&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 15 set. 2020.

BASAVARAJAPPA, V. **Design of a wideband conformal array antenna system with beamforming and null steering, for application in a DVB-T based passive**

radar. M.S. Thesis. Department of Telecommunications, Delft University of Technology. Fraunhofer FHR, 2012. Disponível em: <<https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A9c164c35-6d26-4269-b392-468b24d2c0ce>>. Acesso em: 15 set. 2020.

DE SOUSA, M. N.; THOMÄ, R. S. Mobile Station Localization Emitter in Urban NLoS using Multipath Ray Tracing Fingerprints and Machine Learning. **8th International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS)**. IEEE, 2018a. p. 1-6. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8440898>>. Acesso em: 15 set. 2020.

_____; _____. Enhancement of localization systems in NLOS urban scenario with multipath ray



- tracing fingerprints and machine learning. **Sensors**, 18(11),4073. MDPI, 2018b. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/18/11/4073>>. Acesso em: 15 set. 2020.
- EDRICH, M.; KLOECK, C.; STROTH, S. A passive radar system for long range air surveillance. In: Set-241 **9th NATO Military Sensing Symposium**. Quebec, 2017.
- EXTREME TECH. **Using Wi-Fi to see through walls**. Texto de Sebastian Anthony em 03 ago. 2012. Disponível em: <<https://www.extremetech.com/extreme/133936-using-wifi-to-see-through-walls>>. Acesso em: 14 set. 2020.
- FERTIG, L.; BADEN, M.; KERCE, J.; SOBOTA, D. (2012). Localization and tracking with Multipath Exploitation Radar. **2012 IEEE Radar Conference**, 1014-1018. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/Localization-and-tracking-with-Multipath-Radar-Fertig-Baden/974adb531f6e788640ac8a312f0f976ed8f0e600>>. Acesso em: 06 out. 2020.
- GRIFFITHS, H. D.; BAKER, C. J. **An introduction to Passive Radar**. Artech House, 2017.
- KUMBUL, U.; HAYVACI, H. T. Multipath exploitation for knowledge-aided adaptive target detection. **IET Radar, Sonar & Navigation**, 2019, vol. 13, n. 6, p. 863-870. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8732752>>. Acesso em: 15 set. 2020.
- KUSCHEL, H. Approaching 80 years of passive radar. **2013 International Conference on Radar**. Australia. IEEE, 2013, p. 213-217. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6651987>>. Acesso em: 15 set. 2020.
- _____; O'HAGAN, D. Passive radar from history to future. In: **11th International Radar Symposium**. IEEE, 2010. p.1-4. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5547434>>. Acesso em: 15 set. 2020.
- LOCKHEED MARTIN CORPORATION. **Silent Sentry**. 2005. Disponível em: <http://www.mobileradar.org/Documents/Silent_Sentry.pdf>. Acesso em: 14 set. 2020.
- LYTHALL, B. W. et al. Basic Science and Research for Naval Radar, 1935-45. **The Development of Radar Equipment for the Royal Navy, 1935-45**. Palgrave Macmillan UK. p. 67-93. London, 1995. p. 67-93. ISBN 978-1-349-13457-1.
- MILLET, N; KLEIN, M. Passive radar air surveillance: last results with multi-receiver systems. In: **12th International Radar Symposium (IRS)**. IEEE, 2011. p. 281-285. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6042129>>. Acesso em: 15 set. 2020.
- PALMER, J. **Podcast Interview in Defence**, 2012. Disponível em: <<https://www.defenceconnect.com.au/key-enablers/4361-passive-radar-systems-space-and-defence-james-palmer-silentium-defence>>. Acesso em: 21 nov. 2019.
- _____; et al. An overview of an illuminator of opportunity passive radar research project and its signal processing research directions. **Digital Signal Processing**, 2011, 21.5: 593-599. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1051200411000030>>. Acesso em: 15 set. 2020.
- PETRI, D. et al. A software defined UMTS passive radar demonstrator. In: **11th International Radar Symposium**. IEEE, 2010. p. 1-4. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5547415>>. Acesso em: 15 set. 2020.
- TAN, D. K. P., et al. Passive radar using Global System for mobile communication signal: theory, implementation and measurements. **IEE Proceedings – Radar, Sonar and Navigation**. 2005, 152.3: 116-123. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1459146>>. Acesso em: 15 set. 2020.
- TOBIAS, M.; LANTERMAN, A. D. Probability hypothesis density-based multitarget tracking with bistatic range and Doppler observations. **IEE Proceedings – Radar, Sonar and Navigation**. 2005, 152.3: 195-205. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1459156>>. Acesso em: 15 set. 2020.
- VOROBEV E.; BARKHATOV A.; VEREMYEV V.; KUTUZOV V. DVB-T2 passive radar developed at Saint Petersburg Electrotechnical University. **22nd International Microwave and Radar Conference (MIKON)**. Poznan, 2018, p. 204-207. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8405178>>. Acesso em: 15 set. 2020.