

Sistema de Programação e Análise de Guerra Eletrônica

Autores: Maj Esp Com Luís Carlos Leppa, Cap Esp Com Wellington Guilherme da Silva e 1º Ten Eng Thiago de Souza Mansur Pereira.

Resumo — Este trabalho apresenta as funcionalidades do Sistema de Programação e Análise de Guerra Eletrônica (SPA-GE) em uso pela Força Aérea Brasileira (FAB). O SPA-GE é um Banco de Dados (BD) concebido pelo Comando-Geral de Operações Aéreas (COMGAR), órgão central do Sistema de Guerra Eletrônica da Aeronáutica (SIGEA), e desenvolvido pela Empresa Atech. Os algoritmos utilizados no SPA-GE para Radiolocalização de Emissores e Radiopropagação Atmosférica foram frutos de estudos desenvolvidos no âmbito Comando da Aeronáutica (COMAER). O SPA-GE divide-se em dois modos de operação: Análise e Planejamento. Em Modo de Operação Análise o sistema possui ferramentas computacionais que possibilitam analisar sinais coletados por sensores aeromarcados e correlacioná-los com emissores cadastrados no BD. Ambiente de Análise Estatística (A2E), Ambiente Análise Gráfica (A2G) e “Geographic Information System” (GIS) são exemplos destas ferramentas computacionais. Em Modo de Planejamento o sistema possibilita a criação de Plano de Missão para, posteriormente, gerar a Biblioteca de Missão (BIM) específica para cada equipamento a ser programado.

Palavras-Chave — Análise de Sinais, Guerra Eletrônica, Banco de Dados, Biblioteca de Missão.

I. INTRODUÇÃO

Desde a criação do radar iniciou-se um novo ramo das ciências militares que Churchill chamou de “*The Wizard War*” e hoje se conhece por Guerra Eletrônica (GE) [1] sendo um fator multiplicador da capacidade operacional de uma Força [2]. As ações da GE podem ser divididas em três áreas:

- Medidas de Apoio de Guerra Eletrônica (MAGE) que objetivam extrair informações do Espectro Eletromagnético e assim obter vantagem sobre o inimigo;
- Medidas de Ataque Eletrônico (MAE) que objetivam destruir, neutralizar ou reduzir a capacidade de combate inimiga pelo uso do Espectro Eletromagnético; e
- Medidas de Proteção Eletrônica (MPE) que visam assegurar o emprego eficiente das emissões eletromagnéticas pelas forças amigas.

Para o adequado desenvolvimento das ações das MAGE, MAE e MPE é necessário um BD continuamente atualizado e ferramentas computacionais com funcionalidades que permitam coletar, analisar e difundir as informações dos emissores que compõem o cenário da GE. Esta necessidade ficou mais clara com a entrada em operação das aeronaves E/R-99. Com este propósito a FAB desenvolveu o conceito de uma ferramenta de auxílio à decisão que permitisse de maneira sistêmica armazenar e trabalhar os dados de interesse da GE.

Este sistema foi inicialmente concebido para realizar o “*up load*” e “*down load*” dos dados oriundos do sensor

aeromarcado nas plataformas E/R-99, na época denominado de Sistema de Planejamento de Operações do Sistema de Exploração de Comunicações e Não-Comunicações (SPO/CNCES). Posteriormente, esta ferramenta computacional recebeu o nome de SPA-GE e, com a incorporação de outros sensores MAGE a aeronaves da FAB tornou-se necessário adaptar o sistema a estas novas incorporações.

Dessa forma, o contrato 039/CISCEA/2008, designou a empresa Atech para realizar a evolução e expansão do sistema SPA-GE. O contrato prevê a entrega da implementação de novas funcionalidades, ferramentas computacionais e interfaces com novos sensores em cinco “*Builds*”. Em Outubro de 2011 será entregue a “*Build*” quatro e o contrato tem previsão de encerramento em Março de 2012.

II. VISÃO GERAL

O SPA-GE tem como missão auxiliar a geração de conhecimento sobre o Espectro Eletromagnético, sendo uma ferramenta de Inteligência de Sinais (SIGINT), com o intuito de prover informações para as MAGE, MAE e equipamentos relacionados à GE.

Possui três grandes objetivos:

- Recebimento de informações coletadas pelos equipamentos embarcados para análise em solo, gerando conteúdo para o planejamento de missões;
- Programação dos sensores embarcados, de acordo com a experiência obtida ao longo das missões executadas e particularidades da missão em andamento;
- Apoio à tomada de decisão devido à contínua manutenção de um BD estratégico, incrementado a cada missão e refinado por analistas através de ferramentas computacionais disponibilizadas pelo sistema.

II. ARQUITETURA

O SPA-GE consiste de um conjunto ilimitado de instâncias “*slaves*” que se interligam por meio de uma instância “*master*”, conforme Fig. 1. Os dados coletados pelos sensores embarcados são introduzidos nas instâncias *slaves* e enviados para a instância “*master*” onde os dados são analisados, comparados com dados já existentes no BD e difundidos para as demais instâncias “*slaves*” por meio de processos automáticos de sincronismo. Além das instâncias “*master*” e “*slaves*” o SPA-GE possui duas instâncias transportáveis para serem utilizadas remotamente e com capacidade de realizar “*data-link*” com as aeronaves E/R-99.

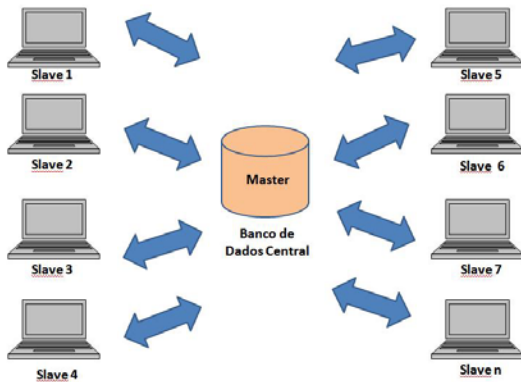


Fig. 1: Representação Gráfica da Visão Geral do SPA-GE

Este sistema incorpora toda a inteligência necessária para integração de diversificados sistemas e sensores, associada à implementação de processos de análise e fusão dos dados coletados, gerando informações essenciais para as ações da GE. Algumas das funções desempenhadas envolvem o planejamento de missões de monitoração de faixas específicas do Espectro Eletromagnético, a análise dos dados coletados correlacionando parâmetros eletrônicos e geográficos, além da confecção de mapas com cenários e programação de equipamentos de GE para as diferenciadas plataformas da FAB [4].

As instâncias “slaves” podem ser instaladas nas unidades aéreas dotadas de plataformas sensoras (unidades sensoras) ou unidades aéreas dotadas de plataformas que requerem programação de equipamentos de GE (unidades de emprego), tal como o “Radar Warning Receiver” (RWR) que equipam as aeronaves de ataque, transporte e asas rotativas. A Fig. 2 apresenta uma representação gráfica das instâncias do SPA-GE implantadas até setembro de 2011.

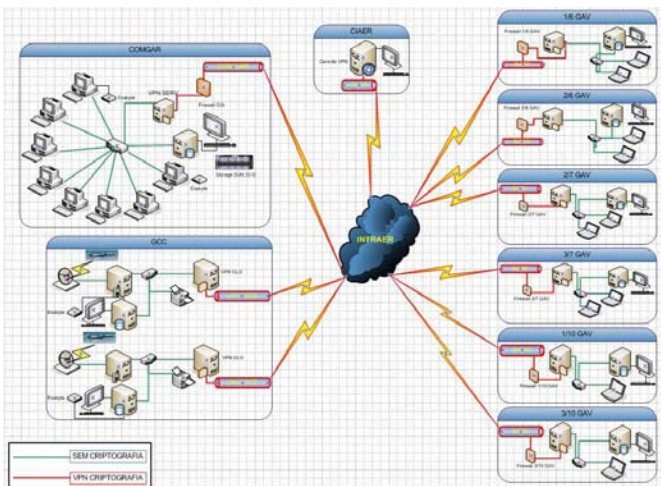


Fig. 2: Instâncias do SPA-GE implantadas até setembro de 2011.

Conforme a necessidade operacional, as instâncias transportáveis podem ser instaladas em Centros de Comando e Controle e Células de Inteligência Operacional provendo dados para o planejamento e execução de missões.

O SPA GE possui uma funcionalidade chamada Seção de Trabalho que possibilita ao analista trabalhar os dados por tipo de entidade. A partir da Seção de Trabalho é possível ordenar, filtrar e exportar os registros, seguindo critérios adequados, para os Ambientes de Análise Gráfica (A2G), Ambiente de Análise Estatística (A2E) ou para o “Geographic Information System” (GIS) para realizar a análise e o correlacionamento dos sinais.

As emissões coletadas nas unidades sensoras são importadas para o SPA GE como uma entidade chamada de “Line of Bearing” (LOB), a qual apresenta os parâmetros eletrônicos coletados das emissões, tais como: Frequência (F), Largura de Pulso (LP), Intervalo de Repetição de Pulso (IRP), azimute de chegada, tempo de chegada e posição da aeronave sensora. Após uma abordagem inicial o analista agrupa os LOBs que aparentemente estão correlacionados e visualizá-los no A2G, o qual permite uma percepção pictorial dos parâmetros eletrônicos deste sinal. A Fig. 3 apresenta a representação gráfica da ferramenta computacional A2G, onde os parâmetros de F, LP e IRP são comparados em quatro gráficos, sendo um em 3D e três em 2D.

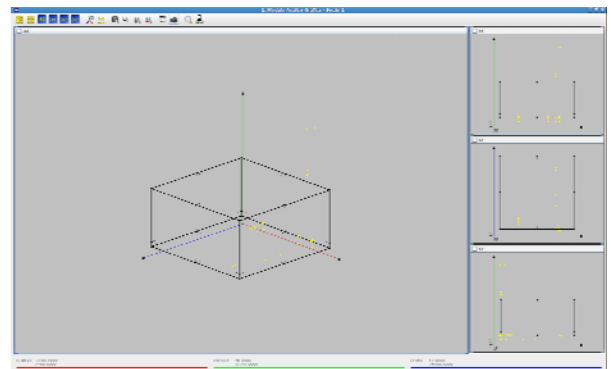


Fig. 3: Representação Gráfica da Ferramenta Computacional A2G.

Os parâmetros previamente selecionados na Seção de Trabalho podem ser analisados estatisticamente através da ferramenta computacional A2E, onde as funções de histograma, BoxPlot, Normal P-Plot e análise de variância (ANOVA) permitem quantificar o correlacionamento entre os LOB’s em análise.

O A2E é composto por um sumário na parte superior da tela, onde são apresentadas informações como: Entidade, Atributo, Número de Amostra, Moda 1 e 2, Média, Desvio Padrão, Variância, Quartis, Z e seus desvios. A Fig. 4 apresenta a representação gráfica da ferramenta computacional A2E, onde está representada uma imagem composta com os quatro gráficos citados anteriormente.

III. ANÁLISE DE SINAIS

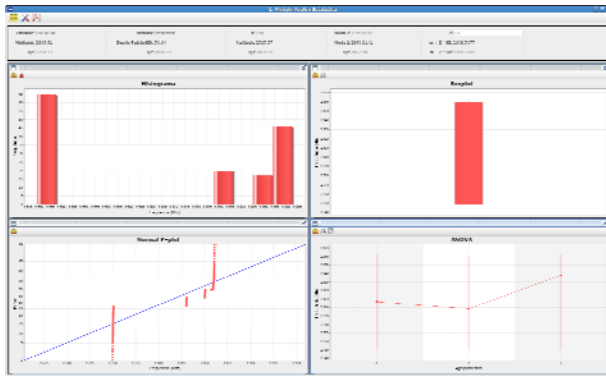


Fig. 4: Representação Gráfica da Ferramenta Computacional A2E.

Antes de utilizar o ambiente A2E, o analista deve observar o padrão dos dados a serem analisados, pois o ambiente em pauta não faz nenhuma inferência em relação aos dados escolhidos pelo mesmo, podendo ocasionar interpretação errônea. Por exemplo, para o gráfico da ANOVA valem as seguintes suposições quando testamos a hipótese de que três ou mais amostras provêm de populações com a mesma média:

- as populações têm distribuições normais;
- as populações têm o mesmo desvio-padrão;
- as amostras são aleatórias e mutuamente independentes; e
- as diferentes amostras provêm de populações classificadas em apenas uma características.

O ambiente A2E, também dispõe de funcionalidades, contidas nos gráficos Histograma, BoxPlot, Normal P-Plot e ANOVA, para ajudar em sua operação como: Recalcular intervalos das barras e seleção de registros no Histograma, Apresentação Proporcional dos Gráficos, Impressão de Gráficos, Salvamento de Imagens de gráficos. Cada gráfico será disposto em sua respectiva janela com suas funcionalidades correspondentes.

IV. AMBIENTE DE PREDIÇÃO DE EFEITOS DE PROPAGAÇÃO

Um importante dado que compõe o cenário tático é a previsão de alcance Radar. O SPA-GE incorpora um algoritmo desenvolvido em três níveis de complexidade que possibilita prever, com razoável confiabilidade, os efeitos na propagação de uma emissão eletromagnética.

Uma estratégia básica para avaliação de um Sistema Eletrônico, dada a impossibilidade de conhecer completamente tal sistema na maioria das vezes, consiste em assumi-lo como um sistema ótimo ou quase-ótimo operando num cenário típico.

O modelo eleito para previsão de desempenho de radares foi um sistema pulsado, a receptor super-heteródino, com detector de envelope e decisor por limiar, utilizando integração coerente dos ecos. Considerou-se também a flutuação de alvos segundo os casos tradicionais de Swerling. Planeja-se inserir modelos mais genéricos de sistemas radar que envolva integração incoerente de pulsos.

O algoritmo do primeiro nível considera a propagação no espaço livre e a obstrução que o terreno impõe a propagação da onda eletromagnética, sem levar em consideração os efeitos de difração, refração e reflexão. Cálculos simplificados como alcance Radar, alcance MAGE, Distância de Segurança MAE, comparação entre alcance Radar e alcance MAGE (Vantagem MAGE), comparação entre alcance Radar e Distância de Segurança MAE (Vantagem JAMMER) e Alcance de Comunicações V/UHF são feitos de modo a exibir mapas contidos num plano definido pela altura da aeronave. Dessa forma, um mapa situacional mais completo pode ser fornecido, se os cálculos forem repetidos para cada radar ou estação de comunicação numa área geográfica de interesse.

O usuário visualiza esses cálculos simplificados organizados segundo modos de apresentação, detalhados na Rotina Principal. Cada cálculo é feito proa a proa até cobrir um setor de interesse centrado num transmissor. A proa inicial PROAINIC deve ser orientada em relação ao Norte magnético, e então o algoritmo processo os dados até cobrir um setor de cálculo SETCALC (0 a 360°) com passo DELANG.

A Fig. 5 apresenta uma representação gráfica deste primeiro nível utilizando a ferramenta computacional GIS para visualizar o diagrama de detecção de um determinado Radar. O efeito da obstrução do terreno é visível em várias radiais do radar. Este algoritmo foi implementado no SPA-GE e entregue por ocasião do recebimento da “Build” três do Sistema.

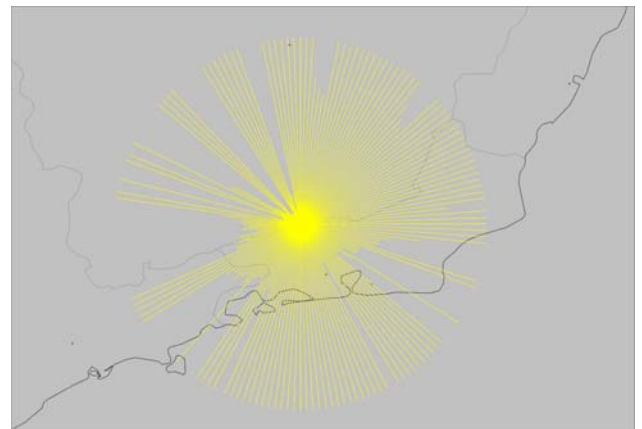


Fig. 5: Representação gráfica do diagrama de detecção de um Radar fictício.

O Algoritmo utiliza o “Digital Terrain Elevation Data” (DTED) como dado digital de elevação de terreno para prever o alcance Radar. A Fig. 6 apresenta a simulação do modelo nível um em uma determinada radial. Esta é uma abordagem simplificada do problema da propagação eletromagnética e foi utilizada como passo intermediário para o desenvolvimento de modelos mais complexos que serão utilizados nos algoritmos dos níveis dois e três.

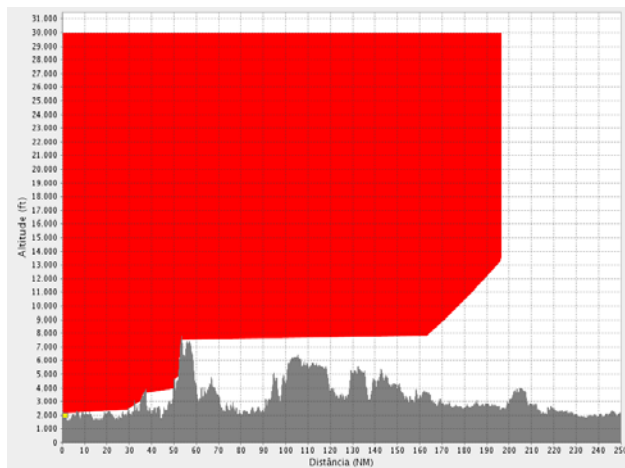


Fig. 6: Representação gráfica do diagrama de detecção Radar em uma determinada radial.

O Algoritmo de nível dois considera, além dos fatores implementados para o nível um, o efeito da refração nos diversos níveis de altitude possibilitando a previsão da formação de dutos. Para este modelo são necessárias as informações meteorológicas que podem ser obtidas do Centro Nacional de Meteorologia Aeronáutica (CNMA), da *World Meteorological Organization* (WMO) ou de outra fonte de dados meteorológicos. Para isto, está previsto a implementação de uma interface automática entre o SPA-GE e o OPEMET a ser disponibilizada no recebimento da “Build” quatro do Sistema.

Com dados atmosféricos (Leitura de mensagem WMO) e de terreno (DTED), este modelo fornece uma visualização, através de Traçado de Raios numa atmosfera horizontalmente estratificada, de dutos troposféricos.

O objetivo é visualizar, para uma proa selecionada, o arranjo de dutos troposféricos ao longo do alcance e altura para mitigação ou exploração de tais efeitos em Missão de Reconhecimento Eletrônico.

A simulação é feita amostrando-se pontos de um raio, entendido como uma curva plana que parte da antena transmissora até atingir os limites de alcance e altura desejados, podendo ocorrer reflexões no solo.

A formulação baseia-se no traçado de raio numa atmosfera linear. Várias camadas, formando um perfil linear por partes, são justapostas para modelar uma atmosfera horizontalmente estratificada.

O raio é uma linha contínua, mas a simulação calcula pontos amostrados. Para organizar o algoritmo associado, os pontos foram classificados como pontos-válidos ou como pontos-teste. Um ponto-válido é aquele contido numa camada ou em seus limites, mas que não impacta numa lateral de terreno. O ponto-teste é o próximo ponto amostrado no raio e originado num ponto-válido anterior.

O “impacto” na lateral do terreno finaliza um raio particular, e inicia-se a simulação de um novo raio. A quantidade de raios traçados pode ser ajustada pelo usuário. Em todo caso, os raios ficam limitados, especialmente, à largura de feixe vertical da antena transmissora e orientam-se de acordo com o *tilt* (ângulo de apontamento em relação à horizontal). As equações utilizadas exigem ainda que não se

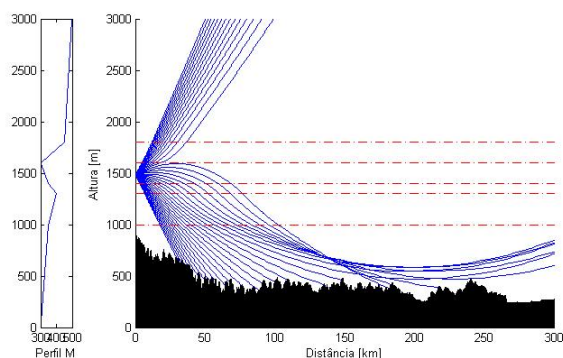
exceda o limite de $\pm 5^\circ$. Esse limite angular é suficiente para contemplar cenários típicos de um radar, em que a distância de detecção (\sim NM) é muito maior que altura de apresentação do alvo (\sim dezenas de kft).

Num plano vertical XZ, com direção X correspondendo à distância do transmissor e Z à altura, a simulação ocorre com um passo do raio a partir de um ponto-válido. Dessa forma, verifica-se se o ponto-teste pode adquirir a condição de válido. Se for inválido, isto é, sair da camada ou impactar numa lateral de terreno, o ponto é corrigido. A Figura-2a mostra impacto na lateral (fim do raio por convenção) e no topo de um elemento de terreno (reflexão).

O perfil vertical de índice de refração modificado (índice-M) pela altura (H) é extraído da mensagem WMO, que fornece dois vetores M e H que modelam uma atmosfera linear por partes. Cada parte linear é limitada por (M_i, H_i) e (M_{i+1}, H_{i+1}) . As camadas são definidas por um par (H_i, H_{i+1}) de modo que se H tem “n” elementos então há “n-1” camadas, começando em H_i e terminando em H_{i+1} , $i \geq 1$.

A partir dos arquivos DTED, uma proa selecionada extrai a informação de terreno necessária para simulação. Deve ser gerado um terreno do tipo “staircase” na forma de dois vetores XTERR e ZTERR conforme Figura-2b. O vetor XTERR deve começar em zero e terminar em XMAX, que é o limite de simulação ao longo do alcance.

Os vetores M e H são entrada para a próxima rotina, que simula os raios gerando vetores X (abscissas) e Z (ordenadas) para cada um, produzindo uma linha poligonal que aproxima a trajetória do raio. Quando vários raios são exibidos num mesmo gráfico, há uma visualização rápida da localização de dutos e interação com terreno. A Fig. 7 ilustra esses efeitos, resultado de simulação via MATLAB, para diferentes alturas, larguras de feixe vertical e *tilt* da antena transmissora. Os usuários serão treinados para fazer a correta leitura dos resultados de simulação, haja vista sua natureza qualitativa.



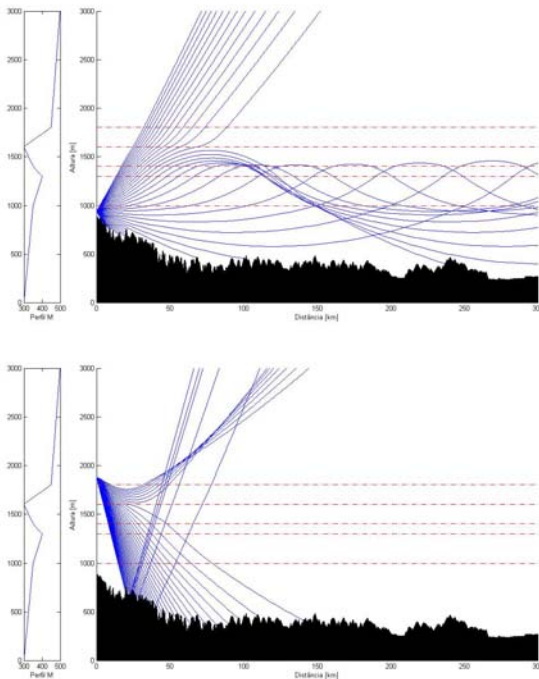


Fig. 7: Simulação de traçado de raios para terreno (DTED) e condição atmosférica (WMO) mantidos fixos para diversas condições da antena transmissora. As regiões “desprovidas” de raios apresentam baixo nível de sinal.

O Algoritmo de nível três apresenta uma maior complexidade nos cálculos e considera a interação entre frentes de onda de multicaminhos devido às reflexões no solo. Neste nível utilizam-se equações parabólicas para o modelamento matemático para a propagação de ondas eletromagnéticas com polarização vertical, horizontal ou circular. Este algoritmo será implementado e entregue na “Build” cinco do Sistema

Este modelo de predição de efeitos de propagação da onda eletromagnética não está limitado ao alcance Radar, também possibilita determinar a vantagem MAGE em missões de detecção passiva, bem como a efetividade de uma MAE contra um receptor e a efetividade de um enlace de comunicações.

Apesar da abordagem matemática, os produtos de previsão de alcance são definidos em função de diversos parâmetros de entrada sendo alguns de difícil determinação. Por exemplo, o comportamento variável da seção reta radar, “Radar Cross Section” (RCS) de uma aeronave.

V. RADIOLOCALIZAÇÃO DE EMISSORES

Os LOBs podem ser visualizados no ambiente GIS e a radiolocalização do emissor poderá ser determinada por meio de algoritmos adequados. Existem diversos estudos propondo algoritmos para a radiolocalização de emissores [5], dentre os quais foram escolhidos dois para a implementação do SPA-GE o GSUMS e o Washburn [6]. Em uma primeira fase o algoritmo do SPA-GE analisa os LOBs e rejeita aqueles que não apresentem convergência adequada para serem utilizados na determinação da localização provável do emissor. Após a

seleção dos LOBs o SPA-GE verifica, conforme a geometria entre os LOBs, qual o algoritmo a ser utilizado no cálculo da posição estimada [6].

Considerando os diversos erros existentes em um sistema de radiolocalização, tais como erro na medição do azimute de chegada e erro da posição informada do sensor, a posição do emissor não é determinística, mas estatística e representada por uma elipse de incerteza associada a uma determinada probabilidade de que o emissor esteja naquela região geográfica. A Fig. 8 apresenta uma representação gráfica da elipse de provável localização do emissor com uma probabilidade de 80% de sucesso.

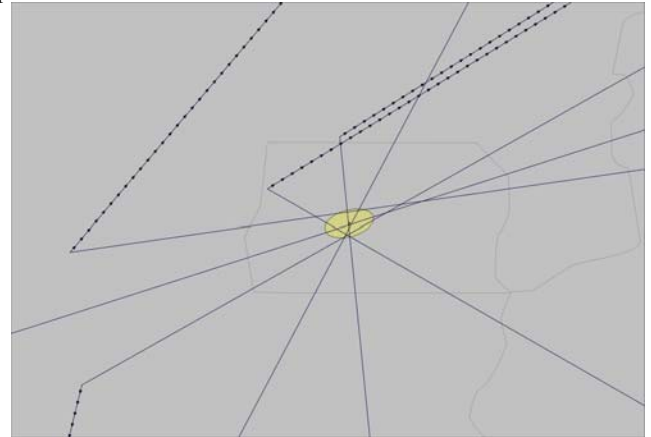


Fig. 8: Representação gráfica da elipse de provável localização do emissor.

O tamanho da elipse é diretamente proporcional aos erros inerentes do sistema sensor e à probabilidade desejada. Entretanto, a escolha adequada dos LOBs determinada por procedimentos operacionais poderá resultar a elipses relativamente pequenas mesmo utilizando sensores com erros elevados Um destes procedimentos operacionais é a escolha de LOBs que façam entre si ângulos próximos de 90°.

VI. CONCLUSÃO

O SPA-GE apresenta características que vão além de um BD, mas disponibiliza a integração de ferramentas computacionais essenciais para análise e planejamento de missões como suporte de GE e como um fator multiplicador da capacidade de combate de uma força, seja aérea, naval ou terrestre. Os algoritmos de previsão de alcance e o de radiolocalização de emissores foram desenvolvidos totalmente no âmbito do Comando da Aeronáutica e apresentam como principal vantagem a independência tecnológica. Os ambientes A2G e A2E possibilitam ao analista realizar seu trabalho com o mínimo de empirismo e alto grau de confiabilidade matemática. O sistema está simultaneamente em fase de desenvolvimento e implantação e um círculo contínuo de melhorias garantirá a qualidade desta ferramenta de apoio à decisão desde a coleta até a difusão de dados relevantes para o cenário tático do conflito travado no Espectro Eletromagnético.

REFERÊNCIAS

- [1] R. E. Fitts, “The Strategy of Electromagnetic Conflict”. Los Altos, California: Peninsula Publishing, 1980.
- [2] Brasil, “Doutrina Básica da Força Aérea Brasileira DCA 1-1”. Brasília, 2005.
- [3] C. Schleher, “Electronic Warfare”. . Norwood: Artech House, 1990.
- [4] Atech, “Manual de Operação do SPA GE – Build 3”. São Paulo, Abril 2011.
- [5] J. H. Kaipper, “Análise de Algoritmos de Localização Passiva de Emissores e Determinação da Área de Probabilidade”. Trabalho de Conclusão do Curso de Especialização em Análise de Ambiente Eletromagnético. ITA: São José dos Campos, 2004.
- [6] J. H. Kaipper, “Algoritmo de Triangulação de Emissores”. Estudo para Implantação do SPA GE. COMGAR: Brasília, 2009.