

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

ANDERSON VINÍCIUS CANELOSSI VALÉRIO

**AUMENTO DA DENSIDADE DE INFORMAÇÃO NO PROTOCOLO ADS-B DE
FORMA RETROCOMPATÍVEL**

Porto Alegre

2019

CIP - Catalogação na Publicação

Canelossi Valério, Anderson Vinicius
Aumento da densidade de informação no protocolo
ADS-B de forma retrocompatível / Anderson Vinicius
Canelossi Valério. -- 2019.
58 f.
Orientador: Hamilton Duarte Klimach.

Coorientadora: Carolina Nogueira.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Elétrica, Porto
Alegre, BR-RS, 2019.

1. software-defined radio. 2. MATLAB. 3. ADS-B. 4.
PSK. 5. PAM. I. Duarte Klimach, Hamilton, orient. II.
Nogueira, Carolina, coorient. III. Título.

ANDERSON VINÍCIUS CANELOSSI VALÉRIO

**AUMENTO DA DENSIDADE DE INFORMAÇÃO NO PROTOCOLO ADS-B DE
FORMA RETROCOMPATÍVEL**

Monografia submetida ao Programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Hamilton Duarte Klimach

Coorientadora: MSc. Carolina Nogueira

Porto Alegre

2019

ANDERSON VINÍCIUS CANELOSSI VALÉRIO

**AUMENTO DA DENSIDADE DE INFORMAÇÃO NO PROTOCOLO ADS-B DE
FORMA RETROCOMPATÍVEL**

Este trabalho de graduação foi analisado e julgado adequado para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Pro. Dr. Hamilton Duarte Klimach

Aprovado em: 8 de Julho de 2019

BANCA EXAMINADORA

Pro. Dr. Ivan Müller

Dr. Arthur Liraneto Torres Costa

MSc. Renê Moreno Timbó

RESUMO

Desenvolvimento de um sistema para aumentar a densidade de informação contida no protocolo ADS-B (*Automatic Dependent Surveillance Broadcast*) de forma a manter a retrocompatibilidade com os equipamentos já presentes no mercado. Utilizando o *software* MATLAB 2016a, foram elaborados moduladores e demoduladores para inserção de modulação PAM (*Pulse Amplitude Modulation*) e DQPSK (*Differential Quadrature Phase-Shift Keying*) em mensagens geradas também pelo software e que respeitam o protocolo ADS-B. O espectro de frequência foi analisado para verificar se a nova mensagem gerada se encontra dentro da máscara de frequência fornecida pela regulamentação do protocolo ADS-B. Por fim testes utilizando um cabo ou utilizando antenas para conectar dois SDRs (*Software Defined Radio*) foram feitos. Os testes foram feitos com dois SDRs, sendo Ettus B200 o transmissor e um RTL-SDR o receptor. Sendo o transmissor um SDR de 1200 euros e o receptor um SDR de 30 euros. Os testes provaram que o RTL-SDR não é um instrumento de recepção viável.

Palavras-chaves: *software-defined radio*, MATLAB, ADS-B, PSK, PAM.

ABSTRACT

Development of a system to increase the density of information contained in the ADS-B (Automatic Dependent Surveillance Broadcast) protocol in order to maintain backward compatibility with equipment already on the market. Using MATLAB 2016a software, modulators and demodulators for PAM (Pulse Amplitude Modulation) and DQPSK (Differential Quadrature Phase-Shift Keying) modulation were developed in messages generated by the software and also in compliance with the ADS-B protocol. The frequency spectrum was analyzed to see if new generated message is within the frequency mask provided by ADS-B protocol regulation. Finally closed-loop tests (using cables) and open loop (using antennas) were made. The tests were done with two SDRs (Software Defined Radio), Ettus B200 being the transmitter and one RTL-SDR receiver. Being the transmitter an SDR of 1200 euros and the receiver an SDR of 30 euros. Tests have proven that RTL-SDR is not a viable receiving instrument.

Keywords: *software-defined radio*, MATLAB, ADS-B, PSK, PAM.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Radar primário e Secundário atuado em conjunto	15
Figura 2 - Sinal interrogador emitido pelo Radar Secundário	17
Figura 3 - Pulsos emitidos pelo radar secundário	18
Figura 4 - Compatibilidade entre Modo A/C e Modo S	20
Figura 5 - Mensagem interrogadora Modo S	20
Figura 6 - Medição de rumo por antena monopulse	21
Figura 7 – Mensagem de reposta Modo S.....	22
Figura 8 - Detecção errônea devido a reflexão do lóbulo central	24
Figura 9 - TIS-B em um avião com ADS-B	25
Figura 10 - FIS-B a bordo do avião	25
Figura 11 - Equipamento ADS-B In portátil.....	26
Figura 12 - Conteúdo de uma mensagem ADS-B.....	27
Figura 13 - Opensky-Network website	28
Figura 14 - Informações de voo no site Open Sky Network.....	29
Figura 15 - Cobertura ADS-B na Austrália	30
Figura 16 - Cobertura ADS-B no Canada.....	30
Figura 17 - Cobertura ADS-B nos EUA	31
Figura 18 - Prospecto mundial de implementação ADS-B.....	31
Figura 19 - ADS-B com recepção por satélite	32
Figura 20 - RTL-SDR	34
Figura 21 - SDR Ettus B200	34
Figura 22 - Gerando amostras IQ.....	36
Figura 23 - PPM no protocolo ADS-B.....	36
Figura 24 - Modulação PAM	37
Figura 25 - Diagrama de constelação para PAM	37
Figura 26 - Diagrama de constelação para DQPSK.....	38
Figura 27 - Sinal DQPSK.....	39
Figura 28 – Limites do espectro de frequência de transmissão ADS-B	40
Figura 29 - Encodando PAM em PPM	41
Figura 30 - Encodando DQPSK em PPM.....	42
Figura 31 - Sistema ADS-B Out proposto	43
Figura 32 - Sistema ADS-B In proposto	43

Figura 33 - Representação da mensagem ADS-B.....	44
Figura 34 – Exemplo de captura utilizando o software dump1090	44
Figura 35 - Geração de mensagem PPM.....	45
Figura 36 – Localização do pulso para modulação PPM no plano IQ.....	45
Figura 37 - Mudança de amplitude com fase constante no plano IQ.....	46
Figura 38 - Mudança de fase com amplitude constante no plano IQ.....	47
Figura 39 - Mudança de fase e amplitude	47
Figura 40 - Teste no MATLAB - Moduladores	48
Figura 41 - Teste no MATLAB - Demoduladores.....	49
Figura 42 - ADS-B PPM.....	49
Figura 43 - PPM+PAM	50
Figura 44 - PPM+PAM+DQPSK.....	51
Figura 45 - Espectro de frequência da mensagem ADS-B	52
Figura 46 - Espectro da mensagem ADS-B modificada pelo protocolo proposto.....	53
Figura 47 - Espectro de frequência de mensagem ADS-B modificada pelo protocolo proposto.....	54
Figura 48 - Teste modulação PAM com cabo.....	55
Figura 49 - Processamento do arquivo recebido no teste.....	55
Figura 50 - Sinal PPM+PAM transmitido.....	56
Figura 51 - Sinal PPM+PAM recebido	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Modos de operação Radar Secundário.....	17
Tabela 2 - Tipos de interrogações Modo S	21
Tabela 3 - Tipos de respostas Modo S	22
Tabela 4 - Diferença de fase e valor lógico associado na modulação DQPSK.....	38

LISTA DE SIGLAS

1090ES	<i>Mode S Extended Squitter</i>
ADS-B	<i>Automatic Dependent Surveillance Broadcast</i>
ATC	<i>Air Traffic Control</i>
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
DQPSK	<i>Differential Quadrature Phase-Shift Keying</i>
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
FIS	<i>Flight Information Services</i>
FIS-B	<i>Flight Information Services-Broadcast</i>
FRUIT	<i>False Replies Unsynchronized</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GWS	<i>Graphical Weather Service</i>
IRF	<i>Instrument Flight Rules</i>
PAM	<i>Pulse Amplitude Modulation</i>
PPM	<i>Pulse Position Modulation</i>
RF	Radiofrequência
SDR	<i>Software-Defined Radio</i>
SESAR	<i>Single European Sky ATM Research</i>
TCAS	<i>Traffic Collision Avoidance System</i>
TIS	<i>Traffic Information Service</i>
TIS-B	<i>Traffic Information Service-Broadcast</i>
UAT	<i>Universal Transceiver</i>

SUMÁRIO

RESUMO	16
ABSTRACT	17
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	18
LISTA DE TABELAS	20
LISTA DE SIGLAS	21
SUMÁRIO	22
1 Introdução.....	13
2 Revisão Histórica da Evolução da Vigilância Aérea	15
2.1 O Radar Primário	15
2.1.1 Desvantagens.....	16
2.2 O Radar Secundário	16
2.2.1 Modos A e C	17
2.2.2 Modo S e sua compatibilidade com o Modo A e C	18
2.2.3 Desvantagens.....	23
2.3 ADS-B.....	24
2.3.1 Regulamentação e Uso no Brasil e no Mundo	29
2.3.2 Space-Based ADS-B	32
2.3.3 Desvantagens.....	32
3 Fundamentação Teórica	34
3.1 Rádio Definido por Software (<i>SDR: Software-Defined-Radio</i>).....	34
3.2 Amostragem IQ.....	35
3.3 Modulação por Posição de Pulso (PPM).....	36
3.4 Modulação por Amplitude de Pulso (PAM)	37
3.5 Modulação por Deslocamento de Fase Diferencial em Quadratura(DQPSK)	37
4 Desenvolvimento do Protocolo Proposto.....	40
4.1 Análise do Protocolo ADS-B	40
4.2 Possibilidades de Inserção de Dados Extras Exploradas neste Trabalho.....	41
4.3 Visão geral do Sistema	42
4.4 Desenvolvimento.....	43
5 Resultados e Discussões	48
5.1 Testes no MATLAB.....	48
5.2 Testes Realizados com SDR	54

6	Conclusões.....	57
7	Propostas Para Trabalhos Futuros.....	58
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	59

1 Introdução

Com o avanço da tecnologia, a invenção do avião e o inevitável aumento da densidade de veículos aéreos dos tempos modernos, o problema de controle aéreo surgiu e aumentou em complexidade. Por ser uma área com soluções que foram evoluindo com o tempo e implementadas pelas necessidades e com as tecnologias disponíveis nas épocas, existem soluções utilizadas atualmente que concorrem com a tecnologia ADS-B (*Automatic Dependent Surveillance Broadcast*, ou em português Vigilância Aérea Automática Dependente por Radiodifusão), entretanto, sendo ADS-B a tecnologia mais recente, e tanto pelo aumento de informação transmitida, quanto pelo uso de tecnologia mais moderna (satélites), esta tecnologia torna-se a mais promissora. A motivação deste estudo é a de aumentar a densidade de informação contida numa transmissão ADS-B de forma retrocompatível e sem aumentar a quantidade de mensagens radiodifundidas, possibilitando, assim, um espaço para implementação de segurança ao protocolo, que atualmente é desprovido. A segurança garantiria a veracidade da informação transmitida, assim como a autenticidade do emissor, reduzindo a possibilidade de ataques ao sistema.

Nesse contexto, é realizado um estudo do protocolo de comunicação utilizado em transmissões ADS-B, que utiliza modulação PPM (*Pulse Position Modulation*, em português: modulação por posição de pulso). Analisando o documento DO-260B (*Minimum Operational Performance Standards for 1090 MHz Extended Squitter Automatic Dependent Surveillance – Broadcast*) que regulamenta a performance mínima exigida para o protocolo ADS-B, foi observado que é possível adicionar informações em amplitude e na fase do sinal ADS-B através de modulação PAM (*Pulse Amplitude Modulation*, em português: modulação por amplitude de pulso) e DQPSK (*Differential Quadrature Phase-Shift Keying*, em português: Modulação por mudança de fase diferencial em quadratura). Esta abordagem de aumentar a densidade de informação da mensagem ADS-B sem a utilização de mensagens extras é preferível pois evita um aumento da poluição do espectro.

O estudo continua com o desenvolvimento de um algoritmo modulador e demodulador para as modulações PAM e DQPSK em cima da modulação PPM típica do protocolo ADS-B.

Os testes são realizados com o uso de mensagens ADS-B padrão seguindo o documento DO-260B e de mensagens existentes coletadas utilizando-se um RTL-SDR (*Software Defined Radio*).

Espera-se que a mensagem ADS-B padrão com a adição da modulação PAM e DQPSK seja compatível com as especificações para o protocolo ADS-B definidas pelo documento DO-260B, de forma que os equipamentos atuais possam identificar a mensagem ADS-B modulada em PPM com sucesso, mantendo-se retrocompatível. Para a emissão e obtenção das informações adicionadas por este trabalho seriam necessárias modificações nos equipamentos receptores e transmissores atuais.

2 Revisão Histórica da Evolução da Vigilância Aérea

A necessidade de um sistema de vigilância tornou-se proeminente em tempos de guerra, com a necessidade de localizar aeronaves, principalmente as inimigas, antes de seu ataque. A primeira tecnologia desenvolvida que realizava tal façanha foi o Radar Primário.

2.1 O Radar Primário

O Radar Primário, inventado em 1935, é constituído por uma antena que rotaciona 360° graus em torno de seu eixo com um período de 12 segundos emitindo ondas de rádio. Estas ondas de rádio se propagam pelo espaço e ao encontrar um obstáculo (avião, por exemplo), é refletida retornando a antena emissora, agora receptora. Esta técnica é conhecida como *time of flight* ou tempo de voo, em português. Desta forma, um avião é localizado no espaço de forma passiva, não havendo nenhum envolvimento da aeronave na detecção de sua localização. Esta possibilidade de constante monitoramento da atividade aérea, juntamente com o trabalho de controladores de tráfego aéreo (*ATC: Air Traffic Control*) em terra, tipicamente através de canal de voz, acarretou na diminuição das distâncias padrões de voo entre aviões, aumentando a quantidade de aviões que trafegavam determinada região e assim promovendo um aumento na eficiência do espaço aéreo da época. O Radar Primário também foi utilizado para monitoramento de possíveis aeronaves invasoras. Na Figura 1 encontra-se o Radar Primário, parte curva da antena, e o Radar Secundário, parte retangular plana posicionada em cima do Radar Primário.

Figura 1 - Radar primário e Secundário atuado em conjunto



Fonte: Wikipédia. Acessado em 8 de junho de 2019.

https://en.wikipedia.org/wiki/Secondary_surveillance_radar#/media/File:ASR-9_Radar_Antenna.jpg

2.1.1 Desvantagens

O Radar Primário, entretanto, não tem como identificar a aeronave localizada, nem sua posição vertical ou a verdadeira velocidade de uma aeronave (somente a velocidade radial utilizando-se do efeito Doppler), para realizar tais medidas é necessário um conjunto de Radares Primários para realizar uma triangulação. Outras desvantagens são que este tipo de radar depende de emissões de ondas eletromagnéticas de alta potência, limitando assim o seu uso, e que as ondas emitidas podem refletir em pássaros, árvores, prédios, montanhas, reportando suas posições e poluindo a tela do controlador de tráfego.

A necessidade de identificação de aeronaves como amigas ou inimigas, principalmente durante tempos de guerra, acarretaram no desenvolvimento do Radar Secundário.

O Radar Primário é utilizado até hoje como sistema auxiliar ao Radar secundário, entretanto sua cobertura é bem mais limitada.

2.2 O Radar Secundário

O Radar Secundário consiste de um par de transponders localizados um em base terrestre e outro no avião alvo da interrogação. A presença do equipamento a bordo torna o avião um elemento ativo da comunicação, formando um enlace. O transponder interrogador emite na frequência de 1030 MHz e a aeronave alvo, dentro da linha de visão (*line of sight*: distância até o horizonte), responde na frequência de 1090 MHz. Em contraste com o Radar Primário que depende de ondas refletidas, o sinal interrogador do Radar Secundário possui uma potência muito menor e o sinal de resposta enviado pelo transponder a bordo do avião possui uma potência maior que a onda refletida do Radar Primário, assim, é possível o monitoramento de aviões em uma distância maior que o Radar Primário com um consumo de potência muito menor.

Existem diversos modos de operação para o radar secundário, eles são descritos na Tabela 1. Os modos B e D não são utilizados. A Tabela 1 não mostra modos utilizados somente pelo Exército. Os Modos A, C e S serão aprofundados nas próximas seções, assim como a utilidade dos espaçamentos entre os pulsos P1 e P3.

Tabela 1- Modos de operação Radar Secundário

Modo	Espaçamento de P1 e P3	Propósito
A	8 μ s	Identidade
B	17 μ s	Identidade
C	21 μ s	Altitude
D	25 μ s	Não utilizado
S	3,5 μ s	Multipropósito

Fonte: ICAO Annex 10 Volume IV

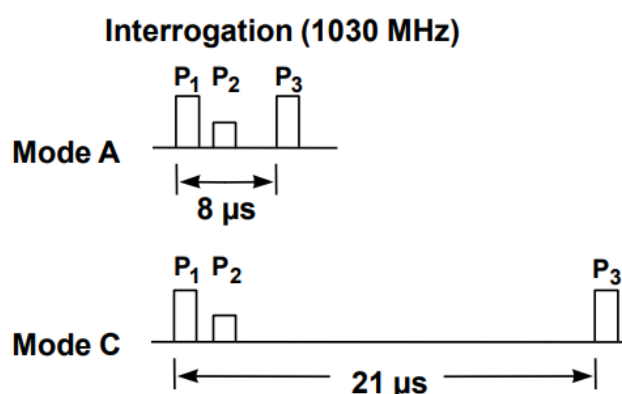
2.2.1 Modos A e C

A altitude é medida por um sensor barométrico a bordo do avião e é independente do altímetro utilizado pelo piloto na cabine de pilotagem, sua resolução de 100 pés. A identidade é composta por um código de 4 dígitos que o piloto recebe do controle de tráfego aéreo. A resposta do avião é processada automaticamente pelo sistema dos controladores de tráfego aéreo e mostrada na tela de forma gráfica para consulta e planejamento.

O sinal interrogador para os modos A e C consiste de três pulsos consecutivos distintos P1, P2 e P3 com espaçamentos temporais entre P1 e P2 constante igual a 2 μ s, o espaçamento entre os pulsos P1 e P3 são dependentes da informação requisitada à aeronave alvo (Modo A ou Modo C), como descrito na Tabela 1.

Na Figura 2 encontra-se representado o sinal interrogador Modo A ou Modo C gerado por um radar secundário.

Figura 2 - Sinal interrogador emitido pelo Radar Secundário

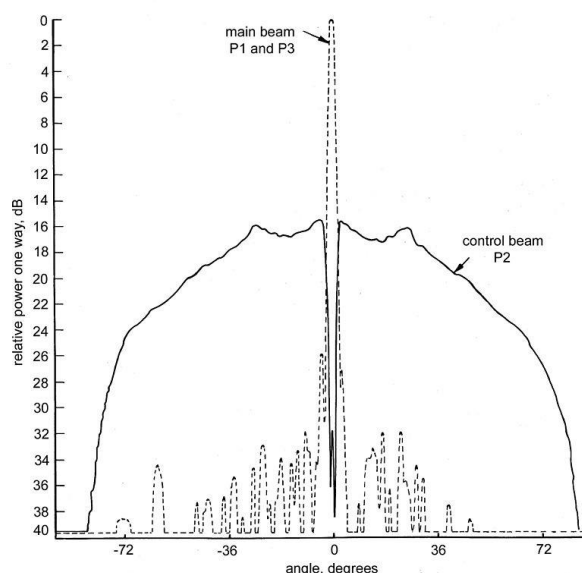


Fonte: Apresentação da ICAO: SSR Mode S Coordination Issues. Acessado em 8 de junho de 2019.
https://www.icao.int/WACAF/Documents/Meetings/2011/asi_ws/pp1_ssr_modes_coordination.pdf

O pulso P2 tem o objetivo de direcionar melhor a mensagem utilizando uma técnica chamada de supressão de lóbulo lateral (*Side Lobe Suppression*). A Figura 3 representa a

distribuição de potência dos pulsos interrogadores em relação ao ângulo da antena. Os pulsos P1 e P3 representados pela linha tracejada são emitidos de forma direcionada pela antena do Radar Secundário, entretanto, ainda há lóbulos laterais que um avião pode detectar e responder. Esta resposta emitida por um avião no lóbulo lateral não pode ser diferenciada de uma resposta vinda de um avião no lóbulo central e pode causar uma identificação ou posicionamento falso da aeronave posicionada no lóbulo central que é o alvo correto da interrogação. Para corrigir este problema o pulso P2 é emitido de forma omnidirecional com potência superior aos lóbulos laterais, mas inferior ao lóbulo central. Um avião que detectar a amplitude de P2 igual ou superior a P1 não deve responder e deve suprimir o seu transponder por um período de 35 μ s, como descrito no documento regulamentador ICAO Annex 10, Volume IV 3.1.1.7.4.1.

Figura 3 - Pulsos emitidos pelo radar secundário



Fonte: Wikipédia. Acessado em 8 de junho de 2019.

https://en.wikipedia.org/wiki/Secondary_surveillance_radar#/media/File:Sum_&_control.jpg

2.2.2 Modo S e sua compatibilidade com o Modo A e C

O documento *Manual on the Secondary Surveillance Radar (SSR) Systems* relata “O princípio fundamental seguido no desenvolvimento o Modo S foi o de manter total compatibilidade com os Modos A e C.”. O documento ainda diz “O Radar Secundário provê vigilância superior comparado ao Radar Primário. Modo A e C provê, além de posição, um canal de dados rudimentar para reportar identidade e altitude. O Modo S provê um canal de dados mais completo”. O documento *The Story of Mode S* também relata que o sistema de controle aéreo opera 24 horas por dia e 7 dias por semana e que neste sistema não existe um

religamento instantâneo. Assim, o Modo S deveria ser desenvolvido de forma que mantivesse compatibilidade com a tecnologia já vigente.

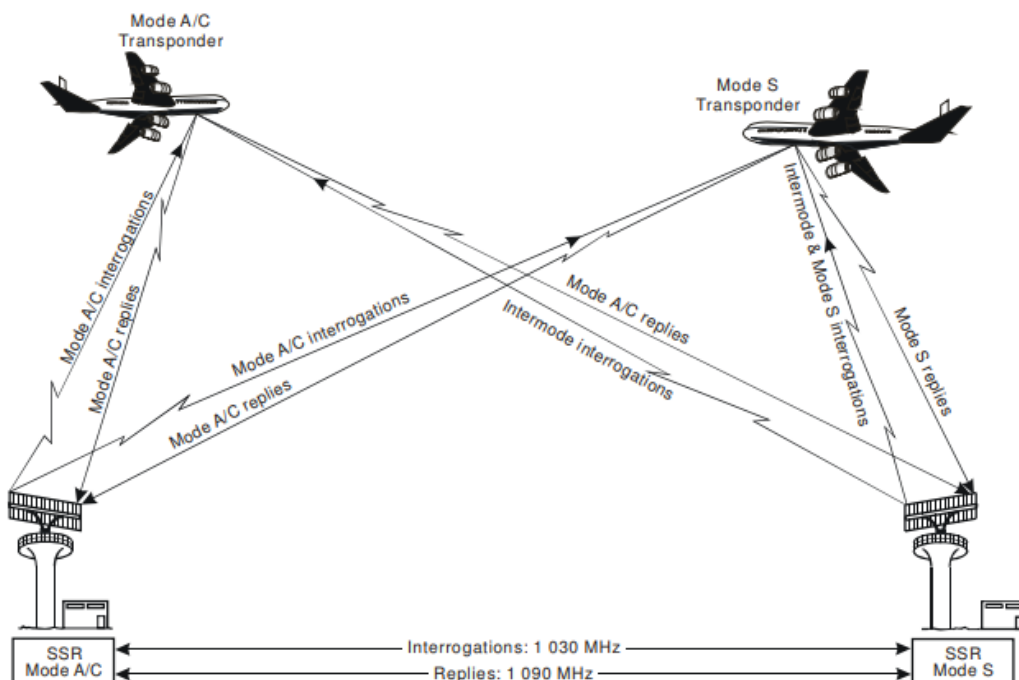
Para manter a compatibilidade com os modos A e C o Modo S utiliza as mesmas frequências de 1030 MHz para interrogações e 1090 MHz para respostas. Devido à grande variedade de equipamentos e a problemas de regulamentação da época que relatavam o que o equipamento deveria fazer, mas não o que não deveria fazer, muitas tentativas de tornar o sinal interrogador Modo S invisível para transponders Modo A e C falharam. A solução encontrada foi a de utilizar uma tecnologia já presente nos Modos A e C, a supressão de lóbulo lateral.

Existem duas classes de transponders, como relatado no documento *Manual on the Secondary Surveillance Radar (SSR) Systems*, transponder modo A/C que podem responder Modo A e Modo C e interrogações *intermode* e transponders Modo S que podem responder a interrogações de todos os modos. Estações terrestres são ou Modo A/C e somente podem interrogar e receber em Modo A e Modo C, ou Modo S, podendo interrogar em todos os modos. O Modo S diminui a quantidade de mensagens necessárias para obter informações da aeronave, agilizando o processo e poluindo menos o espectro.

A operação do Modo S ocorre primeiramente com uma estação terrestre interrogando com uma mensagem geral (*all-call*), assim todas as aeronaves no alcance devem responder com a sua identificação. Quando uma aeronave Modo S responde a uma interrogação de modo geral ela pode entrar no modo travado ou “*lock out*” em que esta aeronave não irá mais responder a chamadas gerais dessa mesma estação terrestre, somente a interrogações seletivas. Entretanto ela responderá a chamadas de uma nova estação terrestre. Isso reduz o número de respostas e, assim, o número de interferências.

A Figura 4 demonstra a compatibilidade entre os modos A/C e Modo S.

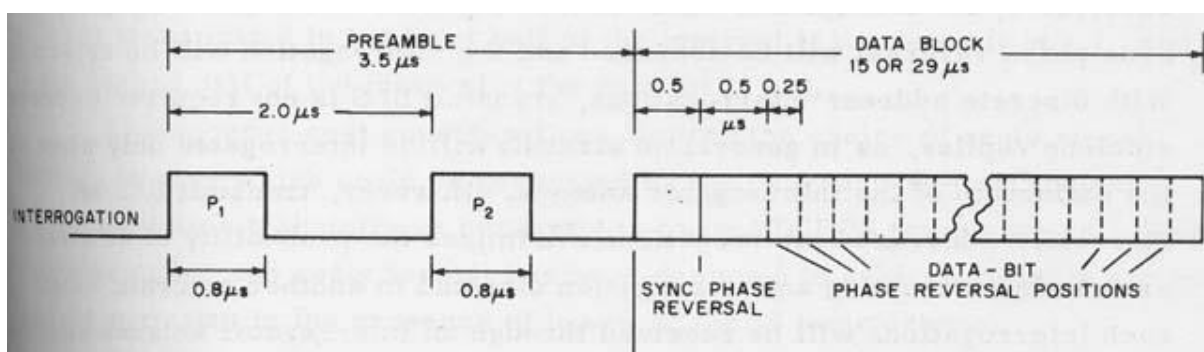
Figura 4 - Compatibilidade entre Modo A/C e Modo S



Fonte: Doc 9684 - Manual on the Secondary Surveillance Radar (SSR) Systems

Para o Modo S o sinal interrogador consiste de dois pulsos, P1 e P2, seguido de um bloco de dados. As amplitudes dos pulsos P1 e P2 são tal que P1 possui amplitude igual a P2 ou menor, desta forma, os transponders de Modo A e C entram em estado de supressão (supressão de lóbulo lateral) e não respondem por um período de 35 μ s permitindo somente os transponders Modo S responderem. A Figura 5 contém a mensagem interrogadora de Modo S.

Figura 5 - Mensagem interrogadora Modo S



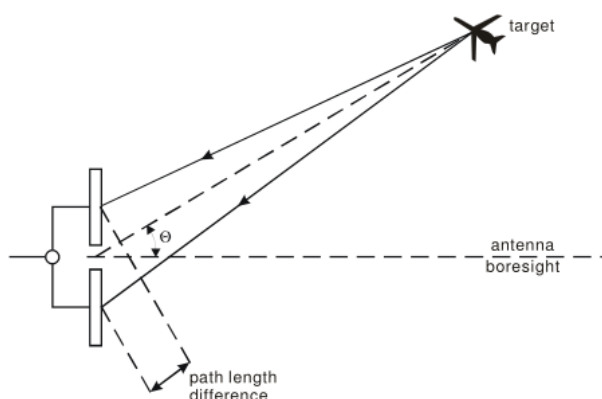
Fonte: DABS: A Functional Description

Durante a supressão dos aviões Modo A e C de 35 μ s a mensagem Modo S é enviada. Ela contém 56 ou 112 bits dependendo das informações enviadas. O bloco de dados da mensagem utiliza modulação diferencial por deslocamento de fase (DPSK: *Differential Phase Shift Keying*). Uma mudança de fase de 180° indica valor lógico 1 e a não mudança indica valor lógico 0.

A aeronave ao receber uma mensagem interrogadora irá decodificar os últimos 24 bits que contêm a paridade e o seu endereço: se o endereço decodificado não for o seu endereço, o avião não irá responder, seja porque a mensagem foi corrompida ou porque a interrogação não era para esta aeronave. O interrogador não recebendo uma resposta, irá interrogar novamente. Por possuir 24 bits para identidade é assegurado mais de 16 milhões de endereços e com isso cada aeronave do mundo pode ter o seu endereço único e fixo. O documento ICAO Annex 10 Volume III Chapter 9 Aircraft Addressing System possui uma tabela com todos os endereços separados por países. Cabe a entidades locais gerirem a distribuição de identidades.

A distância e o rumo (angulação entre aeronave e antena) são obtidos utilizando um radar do tipo monopulso (*monopulse*) que permite o cálculo, até 3 vezes mais preciso que utilizando as técnicas até então mencionadas, utilizando somente um pulso de uma mensagem. Maior precisão acarreta que menos interrogações são necessárias, reduzindo a interferência no sistema todo. A Figura 6 demonstra como ocorre a medição do rumo utilizando uma antena monopulso.

Figura 6 - Medição de rumo por antena monopulso



Fonte: Doc 9684 - Manual on the Secondary Surveillance Radar (SSR) Systems

Uma interrogação Modo S pode possuir três formas, como mostrada na Tabela 2.

Tabela 2 - Tipos de interrogações Modo S

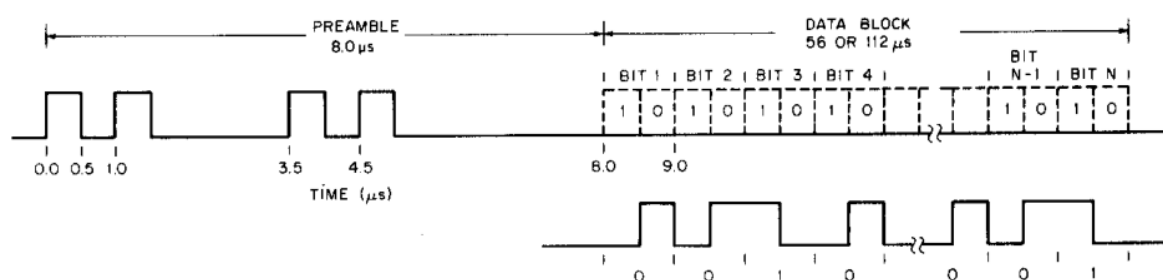
Nome	Forma	Uso
Surveillance	Short	Atualização de posição
Comm-A	Long	Contém 56 bits de dados
Comm-C	Long	Até 1280 bits de dados somados em 16 interrogações concatenadas

Fonte: Doc 9688 - Manual on Mode S Specific Services

A resposta da aeronave para uma interrogação Modo S é mostrada na Figura 7. O preâmbulo da mensagem consiste de 4 pulsos e possui uma duração total de 8 μs. O preâmbulo

define a mensagem como uma mensagem Modo S. O bloco de dados é composto por 56 ou 112 bits e é modulado utilizando modulação PPM (*Pulse Position Modulation*, ou em português: Modulação por Posição de Pulso). Na modulação PPM a mensagem é dividida em períodos de 1 μ s em que sempre existira um pulso e um vale de durações iguais a 0,5 μ s. Se no primeiro meio microssegundo houver um pulso o valor lógico 1 é associado a este bloco de 1 μ s, caso o pulso esteja no segundo meio microssegundo o valor lógico 0 é associado a este bloco de 1 μ s.

Figura 7 – Mensagem de resposta Modo S



Fonte: DABS: A Functional Description

De forma similar a Tabela 2 para tipo de interrogações Modo S, há três diferentes tipos de respostas Modo S, eles são indicados na Tabela 3.

Tabela 3 - Tipos de respostas Modo S

Nome	Forma	Uso
Surveillance	Short	Atualização de posição
Comm-B	Long	Contem 56 bits de dados
Comm-D	Long	Até 1280 bits de dados somados em 16 interrogações concatenadas

Fonte: Doc 9688 - Manual on Mode S Specific Services

Como informado no documento *Manual on the Secondary Surveillance Radar (SSR)* “A proteção e validação da informação no Modo A e C depende da repetição das respostas. No Modo S interrogações e respostas possuem CRC (*Cyclic Redundancy Check*) que garantem menos de 1 erro não detectado em 10^7 mensagens de 112 bits”.

Algumas tecnologias que utilizam Modo S são: TCAS (*Traffic Collision Avoidance System* ou em português: Sistema Anticolisão de Tráfego) e TIS (*Traffic Information Service* ou em português: Serviço de Informação de Tráfego) e GWS (*Graphical Weather Service* ou em português: Serviço Gráfico de Clima). TCAS é um instrumento que é adicionado ao cockpit da aeronave com o objetivo de visualizar outras aeronaves voando ao redor da aeronave com o equipamento. O sistema não depende do Controle de Tráfego Aéreo e obtém dados comunicando diretamente com outras aeronaves. A comunicação é feita utilizando-se de Modo

S (rumo, distância) e Modo C (altitude). As informações são mostradas ao piloto em um display com alertas de proximidade entre as aeronaves. TIS é um serviço provido pelo Controle de Tráfego Aéreo que tem funções muito parecidas com a do TCAS, mas por obter as informações de base terrestre, o equipamento é mais barato. TIS é disponibilizado para todas as aeronaves que possuem transponder Modo S. GWS pode ser utilizado por todos os transponder com capacidade Modo S. GWS mostra para o piloto uma representação gráfica do clima perto da aeronave.

2.2.3 Desvantagens

O Modo A possui somente 4096 possibilidades de identidade. A identidade idealmente deve ser única para aeronaves em voo e mantida durante todo o voo, inclusive para voos internacionais, o que torna esse número pequeno e dificulta o trabalho do Controle de Tráfego Aéreo.

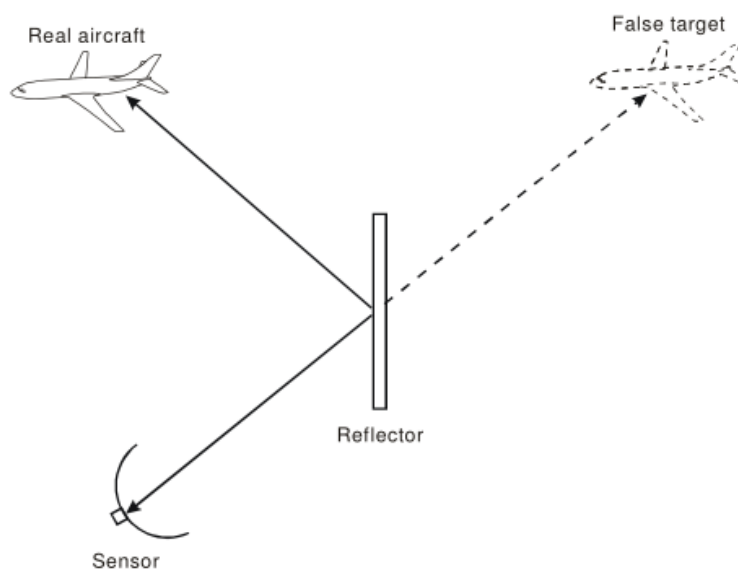
Modo C provê altitude com resolução de 100 pés. Uma aeronave que se encontra no limiar entre duas medidas pode acabar ocupando o próximo incremento de 100 pés.

Modo A e C - FRUIT (*False Replies Unsynchronized to Interrogator* ou em português: Respostas falsas dessincronizadas com o interrogador) ocorrem quando um interrogador recebe resposta de um avião interrogado por outro interrogador.

Garble ocorre quando duas respostas de dois aviões que estão fisicamente perto um do outro se sobrepõem.

A Figura 8 mostra um problema de reflexão do lóbulo central na medição que aumenta o número de interrogações a mesma aeronave e acarreta numa medição errada do rumo. O objeto refletidor pode ser, por exemplo, algum objeto com alto índice de reflexão localizado em uma montanha. Neste caso o avião seria erroneamente localizado atrás da montanha e não na frente da montanha.

Figura 8 - Detecção errônea devido a reflexão do lóbulo central



Fonte: Doc 9684 - Manual on the Secondary Surveillance Radar (SSR) Systems

2.3 ADS-B

Vigilância Aérea Automática Dependente por Radiodifusão é um sistema de vigilância que radiodifunde de forma omnidirecional uma ou duas vezes por segundo o vetor de estado da aeronave contendo sua posição, altitude, velocidade, identidade e podendo conter destino, origem, razão de subida ou descida e outras informações úteis. Assim, esse novo sistema provê mais informações que o Radar Secundário. A posição e velocidade da aeronave são obtidas por satélite (GPS). ADS-B também serve para manter vigilância sobre veículos terrestres nas pistas de pouso e decolagem.

A Administração Federal de Aviação (FAA: *Federal Aviation Administration*), entidade governamental que regula a aviação civil dos Estados Unidos da América afirma em nota “ADS-B é uma das mais importantes tecnologias no plano da FAA para transformar o controle de tráfego aéreo atual baseado em radar em um baseado em satélite.”.

ADS-B é caracterizado por ser automático, pois não necessita de entradas do piloto. Dependente, pois necessita de dados GNSS. Vigilância, pois transmite o vetor de estado do avião. Radiodifusão, pois transmite entre uma e duas vezes por segundo o vetor de estado da aeronave.

O sistema ADS-B é dividido em duas funcionalidades: “ADS-B In” e “ADS-B Out”. ADS-B Out é o equipamento que transmite mensagens ADS-B. ADS-B In é o equipamento com a capacidade de receber mensagens ADS-B e potencialmente TIS-B e FIS-B.

O serviço TIS-B (*Traffic Information Service-Broadcast*) é um serviço fornecido pelo Controle de Tráfego Aéreo que suplementa o sistema ADS-B enviando a situação de todo o tráfego aéreo próximo conhecido pela ATC, aeronaves próximas de antenas do Controle de tráfego Aéreo. O TIS-B contribui para a integração de aeronaves que não possuem sistema ADS-B instalado e fornece informação visual num display no *cockpit* para o piloto.

Figura 9 - TIS-B em um avião com ADS-B



Fonte: FAA. Acessado em 8 de junho de 2019. www.faa.gov

O serviço FIS-B (*Flight Information Services-Broadcast*) é fornecido por estações terrestres, as quais a aeronave deve estar sobrevoando para usufruir. FIS-B fornece de forma gráfica no *cockpit* dados meteorológicos da região.

Figura 10 - FIS-B a bordo do avião



Fonte: FAA. Acessado em 8 de junho de 2019. www.faa.gov

Ao contrário de todos os sistemas anteriormente comentados, o sistema ADS-B não possui interrogações, a aeronave radiodifunde um sinal de forma omnidirecional sem encriptação para todos receberem (ADS-B Out). Outras aeronaves que possuem ADS-B In podem receber o sinal, fornecendo ao piloto as mesmas informações que o Controle de Tráfego Aéreo possui, aumentando a consciência situacional do piloto, permitindo a auto separação entre as aeronaves e também provendo vigilância em áreas que os radares não possuem cobertura. A implementação do sistema ADS-B também acarreta numa diminuição da quantidade de trabalho do Controle de Tráfego Aéreo. Aeronaves que somente possuírem ADS-B Out usufruem do benefício do Controle de Tráfego Aéreo possuir maior visibilidade e monitoramento sobre a aeronave.

Enquanto o Radar Secundário utiliza grandes antenas giratórias com amplificadores de RF de alta potência, o sistema ADS-B utiliza equipamentos muito menores, como ilustrado na Figura 11. O custo deste sistema também é o de uma fração do custo de um Radar Secundário. A precisão, comparando com o Radar Primário e Secundário não é degradada com o alcance, condições climáticas ou a altitude da aeronave.

Figura 11 - Equipamento ADS-B In portátil



Fonte: Stratus 3. Acessado 8 de junho de 2016. <https://foreflight.com/products/stratus/>

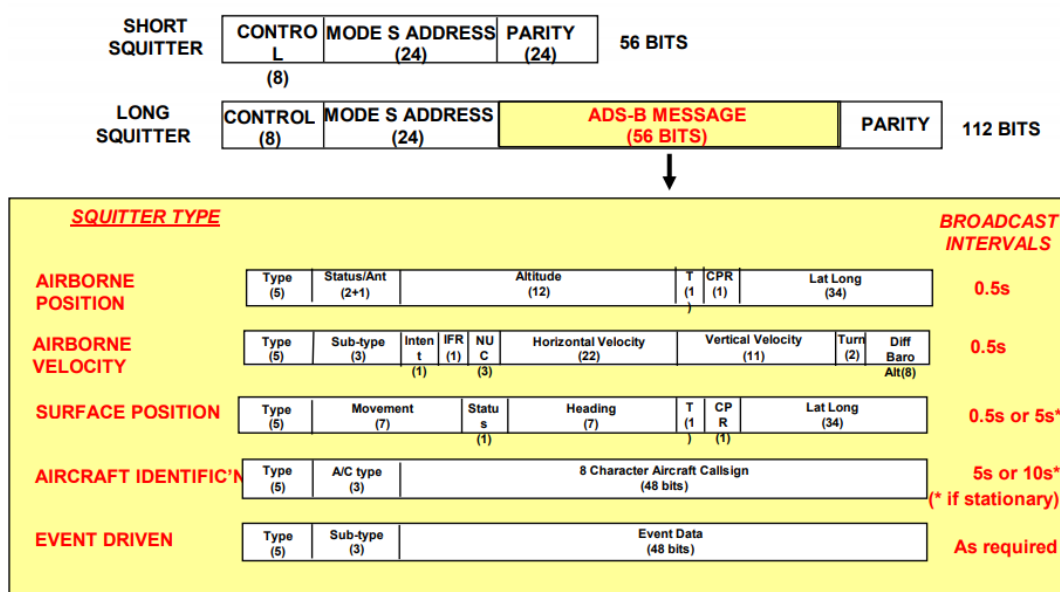
O sistema ADS-B oferece maior cobertura que os sistemas de radar, uma vez que as estações terrestres ADS-B são muito mais fáceis de posicionar. A FAA informa em seu site “Os radares também são estruturas grandes que ocupam muito espaço, são custosas de implantar e manter e exigem que a FAA alugue o terreno em que se encontram. As estações terrestres ADS-

B ocupam apenas 6 metros quadrados”. Outra vantagem oferecida pela implementação do sistema ADS-B relatada pela FAA é que “A maior precisão, integridade e confiabilidade dos sinais de satélite sobre os de radar significa que os controladores poderão reduzir com segurança a separação mínima entre aeronaves” e isso não só aumentará a quantidade de aeronaves voando no mesmo espaço aéreo como também significa que as aeronaves voem trajetórias mais contínuas, possibilitando uma economia de tempo, combustível, dinheiro e menor emissão de gás carbônico.

A tecnologia ADS-B pode ser implementada através de dois tipos de equipamentos, o *Universal Transceiver (UAT)* ou o *Mode S Extended Squitter (1090ES)*. O equipamento UAT é regulamentado somente nos Estados Unidos da América e possui restrições, o 1090ES é regulamentado em diversos países e pode ser utilizado em todas as regiões que o UAT pode ser utilizado. Sendo assim, este trabalho foca no equipamento 1090ES. 1090ES é uma extensão da tecnologia Modo S. O transponder Modo S não envia informações de forma tão frequente quanto a regulamentação ADS-B exige, assim, há modificações do transponder Modo S para 1090ES para radiodifundir com maior frequência, sem a necessidade de interrogações e nos padrões ADS-B.

A Figura 12 exemplifica o conteúdo de uma mensagem ADS-B, analisar o conteúdo da mensagem em si foge do escopo do trabalho e portanto não será aprofundado.

Figura 12 - Conteúdo de uma mensagem ADS-B

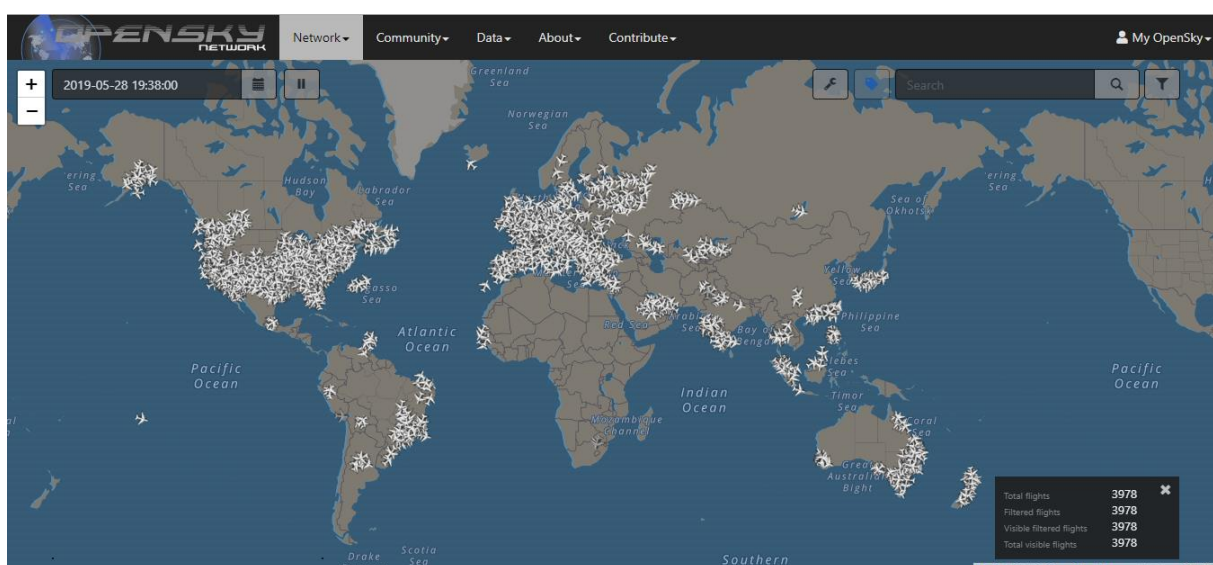


Fonte: Apresentação da ICAO. Acessado 8 de Junho de 2019.

https://www.icao.int/APAC/Meetings/2012_SEA_BOB_ADSB_WG8/SP01_AUS%20-%20ADS-B%20Basics.pdf

ADSExchange¹, ADSBhub², FlightAware³, OpenSky Network⁴, PlaneFinder⁵, RadarBox24⁶, VariFlight⁷ são exemplos de websites que fornecem um conjunto de dados coletados por SDRs registrados em suas plataformas. A Figura 13 mostra a cobertura ao redor do mundo da plataforma Open Sky Network.

Figura 13 - Opensky-Network website



Fonte: Captura de tela. Acessado em 8 de junho de 2019. <https://opensky-network.org/>

A Figura 14 mostra algumas das informações disponíveis para o usuário em tempo real. Mais informações são disponibilizadas para pesquisadores ou pessoas que registram um SDR na plataforma.

¹ Disponível em: <https://www.adsbexchange.com/>

² Disponível em: <http://www.adsbhub.org/>

³ Disponível em: <https://flightaware.com/>

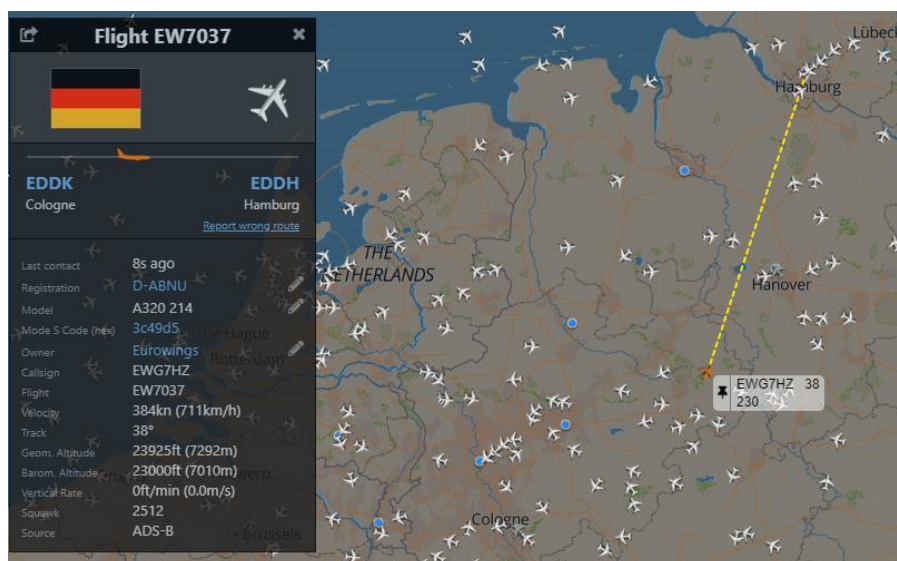
⁴ Disponível em: <https://opensky-network.org/>

⁵ Disponível em: <https://planefinder.net/>

⁶ Disponível em: <https://www.radarbox24.com/>

⁷ Disponível em: <http://www.variflight.com/en/>

Figura 14 - Informações de voo no site Open Sky Network



Fonte: Captura de tela. Acessado em 8 de junho de 2019. <https://opensky-network.org/>

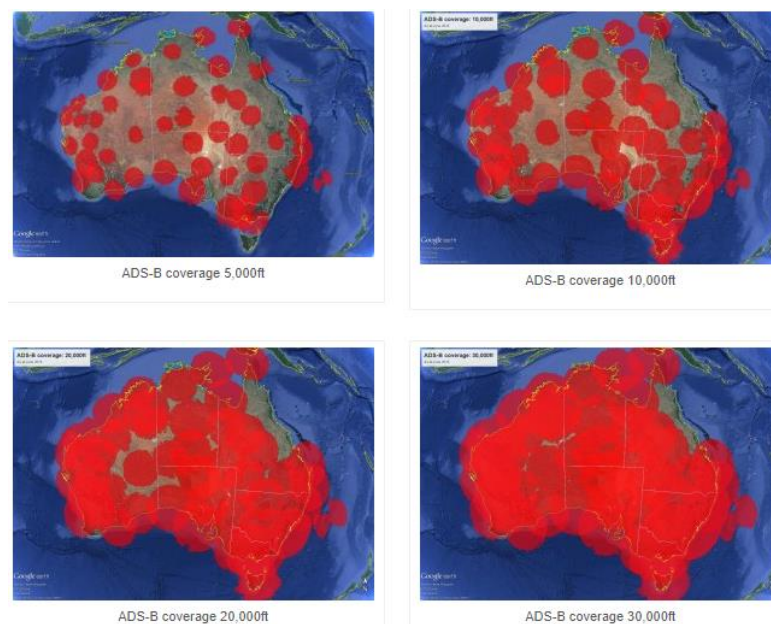
2.3.1 Regulamentação e Uso no Brasil e no Mundo

A regulamentação do uso de ADS-B é motivada no fato de que para obter total benefício da tecnologia todos os aviões devem estar equipados com pelo menos ADS-B Out. Aviões que não radiodifundem seu vetor de estado são invisíveis para outras aeronaves que possuem somente transponders ADS-B. Assim, O Radar Secundário deve continuar operando e gerando custo até que todas as aeronaves possuam transponders ADS-B.

A seguir será exemplificada a cobertura e regulamentação da Austrália, Canadá, Estados Unidos, Brasil e um prospecto, Figura 18, para implementação em diversos países.

A Figura 15 mostra a cobertura ADS-B no continente Australiano por altitude. A partir de 2020 todos os voos que estão sujeitos a ficar com a visão obstruída pelo clima (voos *IRF: Instrument Flight Rules*) serão obrigados a utilizar ADS-B Out na Austrália.

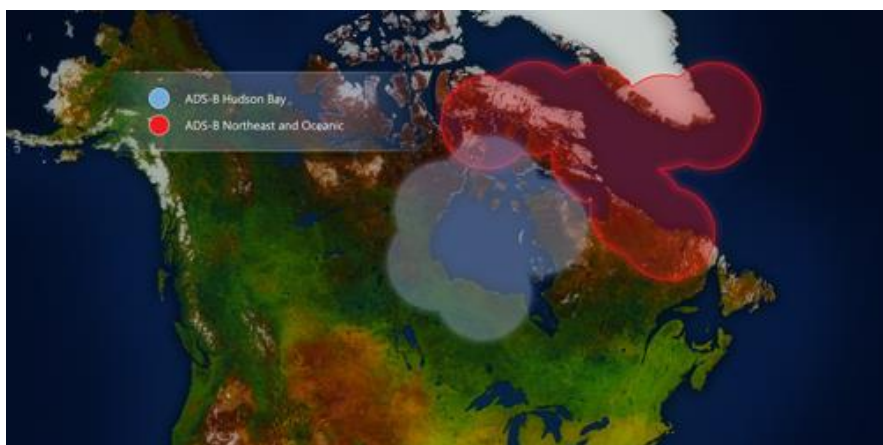
Figura 15 - Cobertura ADS-B na Austrália



Fonte: Acessado em 8 de junho de 2019. <http://www.airservicesaustralia.com/projects/ads-b/ads-b-coverage/>

A Figura 16 mostra a cobertura ADS-B no Canadá. A regulamentação ainda será feita, mas o planejamento já está pronto. A implementação, se aprovada, será feita em duas etapas, sendo até 2021 a obrigatoriedade da instalação de ADS-B Out para todos os voos acima de 5,5 km de altura (classe A e E canadense). A segunda parte irá requerer o mesmo equipamento a partir de 2024 para voos entre 3,8 e 5,5 km de altura (classe B canadense).

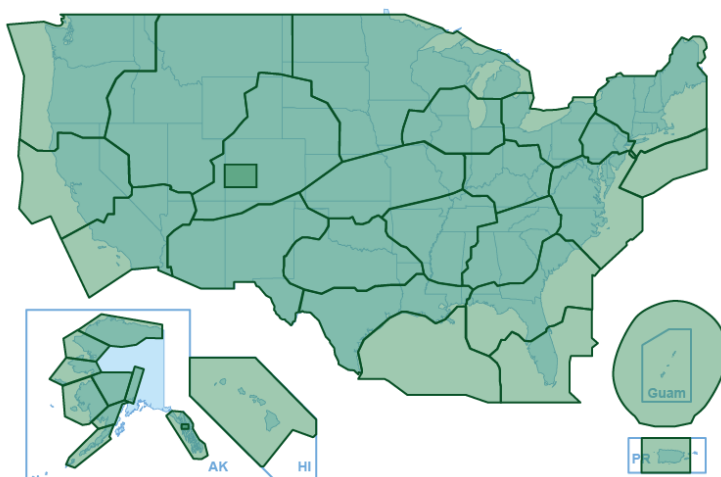
Figura 16 - Cobertura ADS-B no Canadá



Fonte: Acessado em 8 de junho de 2019. <http://www.navcanada.ca/EN/products-and-services/Pages/on-board-operational-initiatives-ads-b.aspx>

Nos Estados Unidos há a obrigatoriedade de ADS-B Out a partir de 2020 para voos acima de 5,5 km de altura e voos até 3 km de altura perto de aeroportos e outras pequenas áreas. A Figura 17 representa a cobertura ADS-B dos EUA.

Figura 17 - Cobertura ADS-B nos EUA

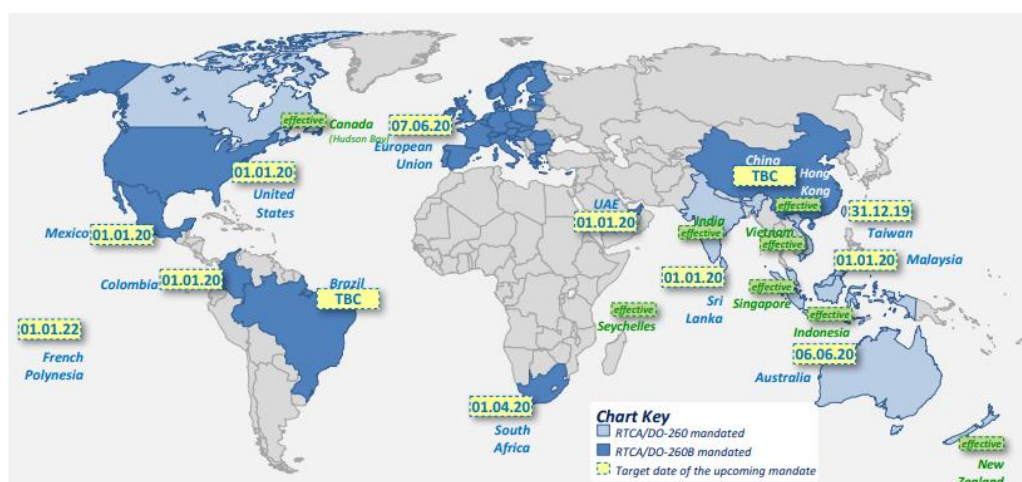


Fonte: Acessado em 8 de junho de 2019. <https://www.faa.gov/nextgen/programs/adsb/coverageMap/>

No Brasil, segundo o DECEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo) somente aeronaves com ADS-B Out podem sobrevoar a Bacia Petrolífera de Campos (Rio de Janeiro) a partir de 1 de janeiro de 2018. Para o restante do Brasil ainda não há regulamentação.

A Figura 18 mostra um prospecto para implementação em diversos países fornecido pelo site do SESAR (*Single European Sky ATM Research*) que regulamenta o tráfego aéreo da União Europeia.

Figura 18 - Prospecto mundial de implementação ADS-B



Fonte: Acessado em 8 de junho de 2019. https://www.sesardeploymentmanager.eu/wp-content/uploads/2019/03/EuropeForAviation-ADS_B_final.pdf

2.3.2 Space-Based ADS-B

Aireon é um empreendimento conjunto entre Canadá, EUA, Itália, Dinamarca e Irlanda para a criação de uma constelação de 66 satélites com receptores ADS-B In capazes de receber e retransmitir para bases terrestres sinais ADS-B de todas as aeronaves em todo o globo.

A Figura 19 demonstra como o sistema funcionará.

Figura 19 - ADS-B com recepção por satélite



Fonte: Acessado em 8 de junho de 2019. <http://www.navcanada.ca/EN/products-and-services/Pages/Space-based-ADS-B.aspx>

Este sistema supera a limitação de linha de visão, obstrução de visão causada por obstáculos terrestres e a impossibilidade de instalações de antenas em lugares remotos ou impossíveis (oceanos), possibilitando uma cobertura global.

Os últimos 8 satélites entraram em órbita em janeiro de 2019. O sistema já está operando, provendo vigilância em tempo real e sem a necessidade de estações terrestres através de contratos de serviço com a empresa Aireon. Em 2019 a empresa Azul Linhas Aéreas se tornou a primeira empresa das Américas a utilizar o serviço (fonte: aireon.com)

2.3.3 Desvantagens

O protocolo ADS-B não possui criptação, tornando aeronaves com este transponder indefesas contra *Eavesdropping*. Esta técnica que consiste em “ouvir” as mensagens ADS-B,

toma proveito do protocolo não possuir, intencionalmente, encriptação para que tenha uma quantidade maior de usuários possam utilizar sem aumentar a complexidade do sistema e manter-se retrocompatível com os equipamentos anteriores.

Jamming é uma técnica em que o espectro é poluído com sinais na mesma frequência do sinal alvo, causando interferências e perda de comunicação. Como o protocolo ADS-B funciona em uma frequência única de 1090 MHz, não há o que fazer contra este tipo de ataque.

Como o protocolo ADS-B não possui autenticação, ele fica exposto a *spoofing attacks*, ataques que um veículo utiliza a identidade de outro veículo para ganhar algum tipo de vantagem ou privilégio.

O Sistema ADS-B também está vulnerável a um *Replay Attack*. Este ataque consiste em gravar as transmissões de um avião e retransmitir posteriormente. Isto pode confundir o Controle de Tráfego Aéreo. Entretanto, existem outros sistemas auxiliares, como *multilateration*, que podem triangular a posição do transmissor através de um conjunto de antenas operando juntas.

3 Fundamentação Teórica

3.1 Rádio Definido por Software (SDR: *Software-Defined-Radio*)

Software-Defined Radio é um equipamento de comunicação de rádio utilizado para substituir componentes eletrônicos por implementações em software, tradicionalmente misturadores, multiplexadores, moduladores/demoduladores, etc.

Um SDR consiste de um conversor analógico-digital e um *front end* de radiofrequência. A substituição dos componentes analógicos é feita utilizando um microprocessador e técnicas de processamento digital de sinais.

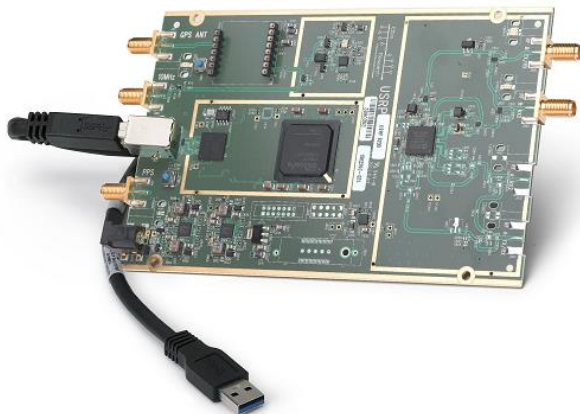
Existem SDRs de diferentes valores no mercado. Como exemplo, os dois utilizados neste trabalho são: RTL-SDR V3, Figura 20, e o Ettus B200, Figura 21, o primeiro custando em torno de R\$ 117 e o segundo R\$ 4.125.

Figura 20 - RTL-SDR



Fonte: Acessado em 8 de junho de 2019. <https://www.rtl-sdr.com/buy-rtl-sdr-dvb-t-dongles/>

Figura 21 - SDR Ettus B200



Fonte: Acessado em 8 de junho de 2019. <https://www.ettus.com/all-products/ub200-kit/>

3.2 Amostragem IQ

Amostras IQ é a representação matemática do sinal numa forma complexa para que as modulações de amplitude e fase se tornem mais intuitivas. I e Q são amplitudes cartesianas que representam, por um vetor no plano complexo, o sinal para cada instante de tempo. Sendo assim, para um sinal $y(t)$ existe um sinal $I(t)$ e um sinal $Q(t)$.

Sendo um sinal genérico descrito pela seguinte equação:

$$y(t) = A \cos(2\pi f_c t + \theta) \quad (1)$$

e pela expressão expandida:

$$y(t) = A \cos(2\pi f_c t) \cos(\theta) - A \sin(2\pi f_c t) \sin(\theta)$$

É possível separar as componentes em fase e em quadratura. A amplitude da componente em fase é dada pela expressão

$$I = A \cos(\theta) \quad (2)$$

e a amplitude da componente em quadratura é

$$Q = A \sin(\theta) \quad (3)$$

Isolando a amplitude A obtemos

$$A = \sqrt{I^2 + Q^2} \quad (4)$$

e isolando a fase θ obtemos

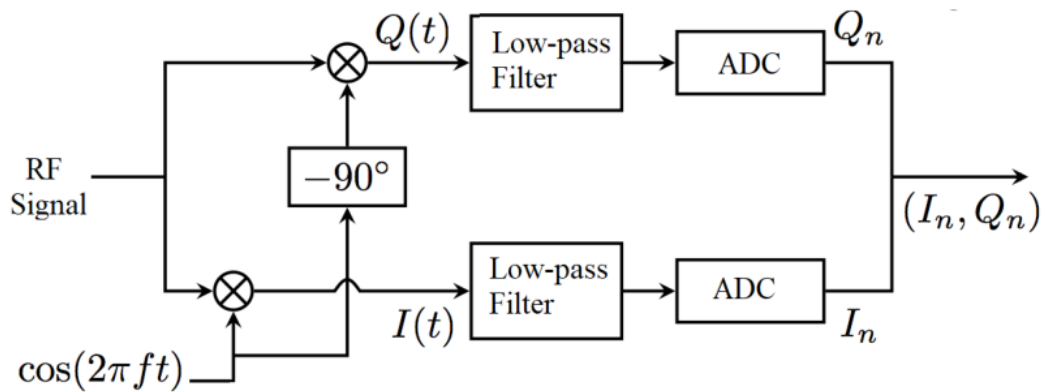
$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{Q}{I}\right) \quad (5)$$

Agrupando os termos obtemos:

$$y(t) = I \cos(2\pi f_c t) - Q \sin(2\pi f_c t) \quad (6)$$

A saída típica de um SDR é composta de amostras IQ, a Figura 22 representa como as amostras IQ são geradas. O sinal de radiofrequência retorna para a banda base, no receptor, multiplicando o sinal de RF por $\sin(2\pi f_c)$ e $\cos(2\pi f_c)$, sendo f_c a frequência da portadora, e, assim, gerando os sinais I e Q. A seguir uma filtragem dos sinais I e Q gerados é feita utilizando-se de filtros passa-baixas, retirando as componentes de frequência da portadora destes sinais.

Figura 22 - Gerando amostras IQ



Fonte: O Autor

3.3 Modulação por Posição de Pulso (PPM)

PPM é uma modulação em que a informação é armazenada na posição temporal de um pulso em um determinado período. A amplitude do pulso é fixa. No protocolo ADS-B a largura do pulso é fixada em $0,5 \pm 0,05 \mu s$ e se houver dois pulsos consecutivos a largura total dos dois pulsos somadas deve ser de $1,0 \pm 0,05 \mu s$.

No protocolo, um pulso na metade final do período representa um valor lógico 0 e um pulso na primeira metade do período representa um valor lógico 1. A Figura 23 mostra essa codificação.

Figura 23 - PPM no protocolo ADS-B



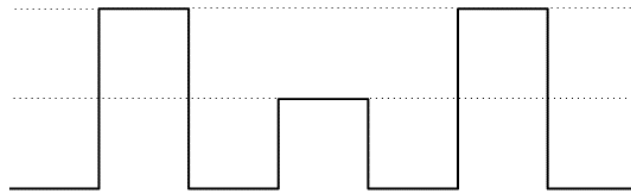
Fonte: RTCA DO-260B

PPM tem a vantagem de ser uma modulação com bastante imunidade a interferência, pois o sinal modulado em PPM possui naturalmente redundância. Em um período a informação é transmitida duas vezes, a informação e o seu inverso, facilitando a correção de erros causados por interferência.

3.4 Modulação por Amplitude de Pulso (PAM)

PAM é uma modulação em que a informação é armazenada na amplitude do pulso. A Figura 24 ilustra uma possibilidade de utilização da modulação. Cada nível de amplitude pode ser associado com um valor lógico e assim a informação é codificada no sinal. A fase do sinal não é alterada.

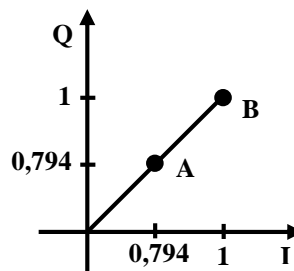
Figura 24 - Modulação PAM



Fonte: O Autor

A Figura 25 representa o diagrama de constelação para modulação PAM com fase de 45° .

Figura 25 - Diagrama de constelação para PAM



Fonte: O Autor

A modulação PAM possui a desvantagem de ser pouco imune a ruídos.

3.5 Modulação por Deslocamento de Fase Diferencial em Quadratura (DQPSK)

DQPSK é uma modulação em que a informação é armazenada na diferença de fase do sinal. A diferença de fase é medida em relação ao símbolo anterior. A frequência e amplitude do sinal permanecem inalterados. A modulação utiliza-se de um número definido de fases, no caso quatro, e cada diferença de fase é relacionada com um valor binário.

A variação de fase utilizada em DQPSK e o valor lógico associado a variação é mostrado na Tabela 4. As amostras são então posicionadas no diagrama de constelação e a diferença entre as fases é computada. Com a informação estando na diferença de fase, se por algum motivo ocorrer algum giro no diagrama de constelação, a informação não será comprometida. Uma fonte comum de giro na constelação é o fato de que os circuitos transmissores e receptores possuindo osciladores diferentes, podem ter diferenças de fase entre eles.

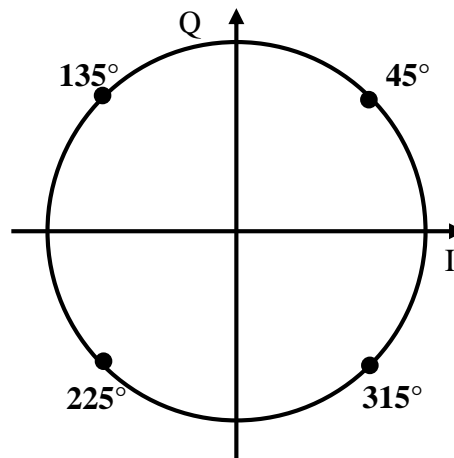
Tabela 4 - Diferença de fase e valor lógico associado na modulação DQPSK

Diferença de Fase	Valor Lógico
0°	00
90°	01
180°	11
-90°	10

Fonte: O Autor

A Figura 26 representa o diagrama de constelação com quatro fases da modulação DQPSK utilizando-se também de códigos de Gray (*Gray Coding*). A utilização codificação de Gray permite a diminuição da taxa de erros de bit (BER: *bit error rate*). A codificação de Gray é feita de forma que de um número para outro somente 1 bit é variado; Mudanças de dois bits podem ocorrer, mas são menos prováveis.

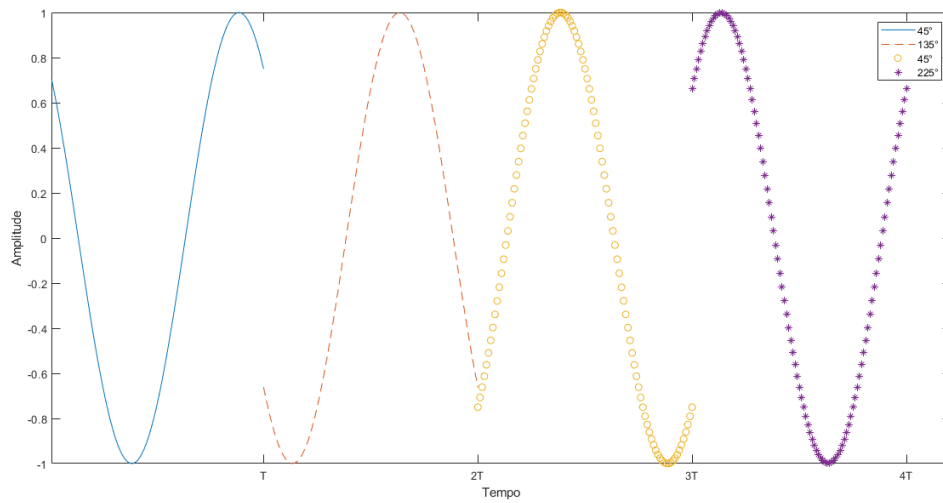
Figura 26 - Diagrama de constelação para DQPSK



Fonte: O Autor

A Figura 27 representa um sinal utilizando modulação DQPSK, os valores lógicos relacionados a cada diferença de fase deste sinal pode ser computado utilizando a Tabela 4 para: 01, 10, 11.

Figura 27 - Sinal DQPSK



Fonte: O Autor

A modulação DQPSK possui a desvantagem em relação a modulação PSK (informação é armazenada no valor absoluto da fase) de que um símbolo com ruído é comparado com outro símbolo com ruído, e se um símbolo for recebido erroneamente, este símbolo irá também comprometer o próximo símbolo.

4 Desenvolvimento do Protocolo Proposto

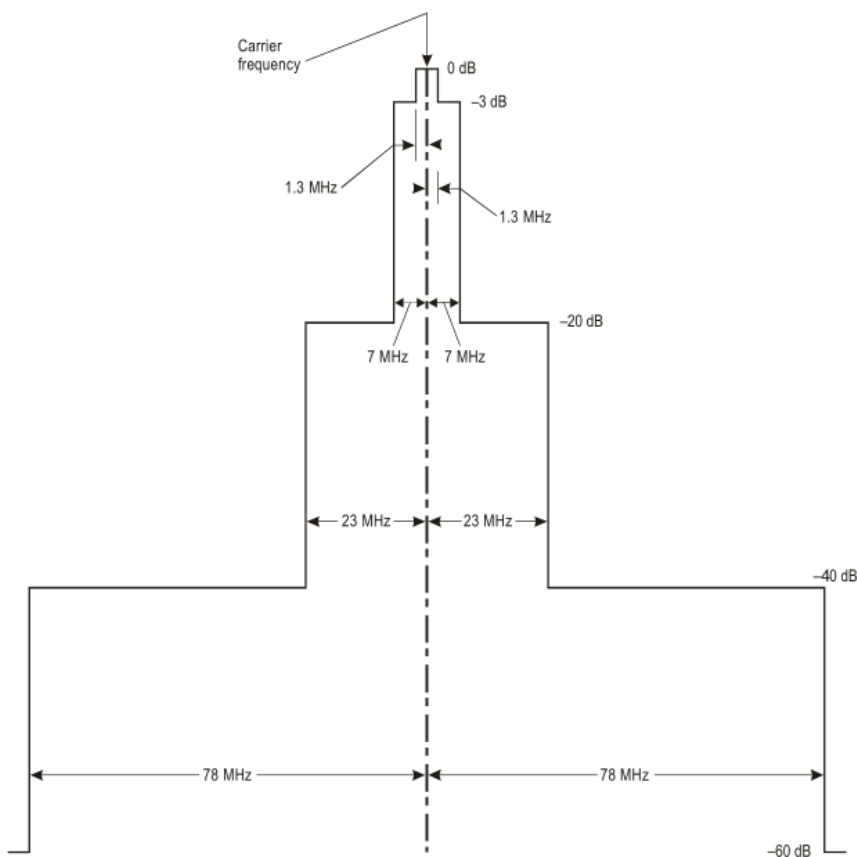
Para a análise do protocolo ADS-B e procura de formas viáveis de aumentar a densidade de informação no protocolo, sem a perda de retrocompatibilidade, foi analisado o documento *Annex 10 Volume IV to the convention on International Civil Aviation* e o documento *RTCA DO-260B*. Estes documentos regulamentam os padrões internacionais de vigilância e sistemas anticollisão e os padrões mínimos de performance do protocolo ADS-B, respectivamente.

4.1 Análise do Protocolo ADS-B

Após uma leitura detalhada alguns aspectos foram notados:

- A Frequência da portadora é de 1900 ± 1 MHz (DO-260B 2.2.2.2.1).
- O espectro de frequência do sinal de transmissão deve estar dentro da máscara da Figura 28 (DO-260B 2.2.2.2.2).

Figura 28 – Limites do espectro de frequência de transmissão ADS-B



Fonte: RTCA DO-260B

- O formato do pulso no protocolo ADS-B é tal que o pulso deve iniciar em múltiplos de $0,5 \mu\text{s}$ definido pelo primeiro pulso da mensagem, e possui uma

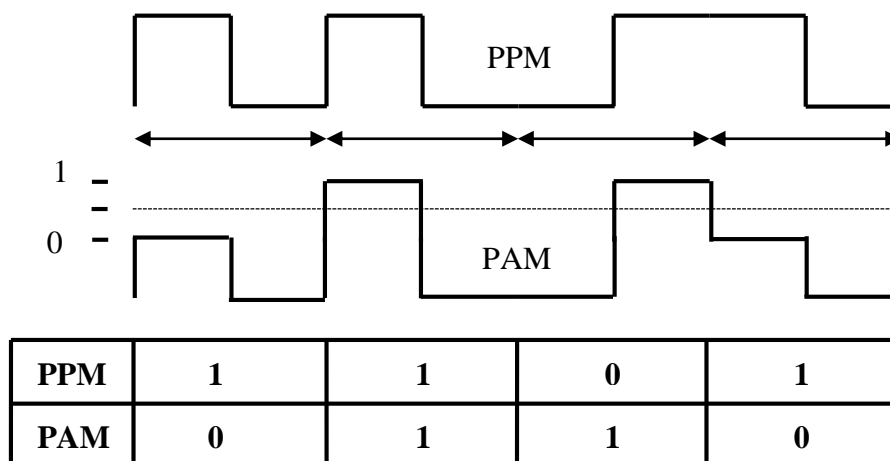
tolerância de $\pm 0,05 \mu\text{s}$ medido do primeiro pulso A amplitude de um pulso e qualquer outro pulso na mensagem não pode exceder 2 dB (DO-260B 2.2.3.1.3).

- A mensagem ADS-B consistem de um preâmbulo e de um bloco de dados. O preâmbulo contem 4 pulsos, como mostrado na Figura 7 (DO-260B 2.2.3.1.1). O bloco de dados começa 8 μs depois do primeiro pulso e tem duração de 112 μs (DO-260B 2.2.3.1.2).

4.2 Possibilidades de Inserção de Dados Extras Exploradas neste Trabalho

A primeira possibilidade consiste na mudança de amplitude do sinal PPM utilizando-se da modulação PAM. O intervalo de 2 dB pode ser separado em três níveis, sendo o central utilizado pelo preâmbulo como referência. A Figura 29 demonstra como esta técnica pode ser implementada. Para pulsos maiores que o nível do preâmbulo são atribuídos valor lógico 1 e para pulsos menores que o nível do preâmbulo são atribuídos valor lógico 0. A motivação de utilizar somente dois níveis lógicos para a modulação PAM é a de manter uma postura conservadora perante um ambiente com bastante poluição do espectro e propagações de longa distância.

Figura 29 - Encodando PAM em PPM

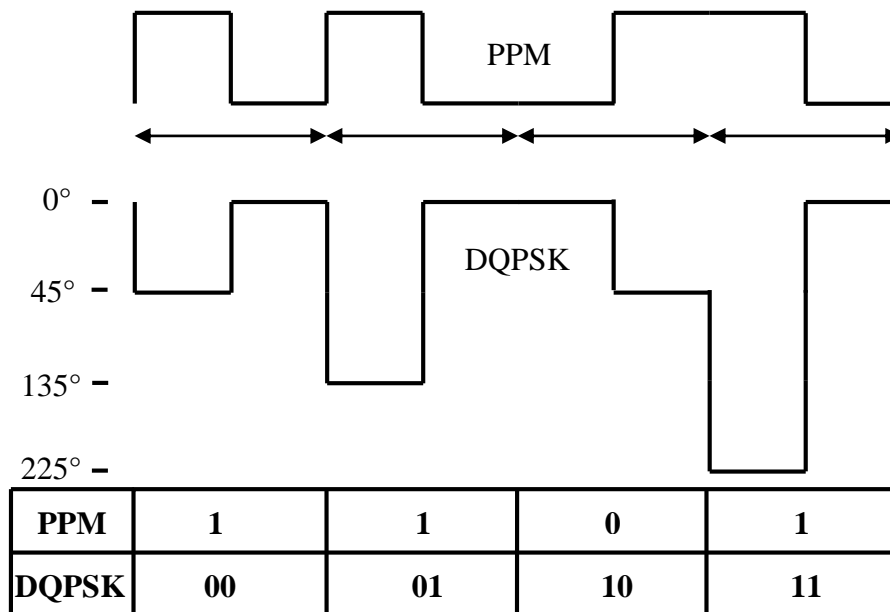


Fonte: O Autor

A segunda possibilidade é a utilização da fase do sinal ADS-B que é aleatória. Adicionando variações de fase no sinal é possível adicionar informações extra ao protocolo. Neste trabalho é optado por utilizar a modulação PSK de 4 níveis. Esta escolha foi feita com base nas mesmas justificativas que a da modulação PAM, exceto que, com o objetivo de aumentar ao máximo possível a quantidade de informação transmitida a modulação PSK com 2 níveis não foi implementada.

Utilizando-se da modulação DQPSK a Figura 30 representa uma forma de inserir informações extras no protocolo. Através da variação de fase e utilizando o preâmbulo como referencial fixo em 45° é possível decodificar a informação armazenada no sinal DQPSK. A Tabela 4 é utilizada para decodificar a informação. Supondo que o sinal representado na Figura 30 esteja localizado logo após o preâmbulo de um sinal ADS-B, a decodificação é feita analisando a diferença de fase pulso a pulso. O primeiro pulso possui fase igual à do preâmbulo, que o precede (não ilustrado), sendo assim, uma variação de fase de 0° entre os dois pulsos e, portanto, a informação armazenada é 00. O segundo pulso possui uma variação de 90° e, portanto, valor lógico 01. Da mesma forma o terceiro e quarto pulso possuem variações de -90° e 180° , possuindo valores lógicos de 10 e 11 respectivamente.

Figura 30 - Encodando DQPSK em PPM



Fonte: O Autor

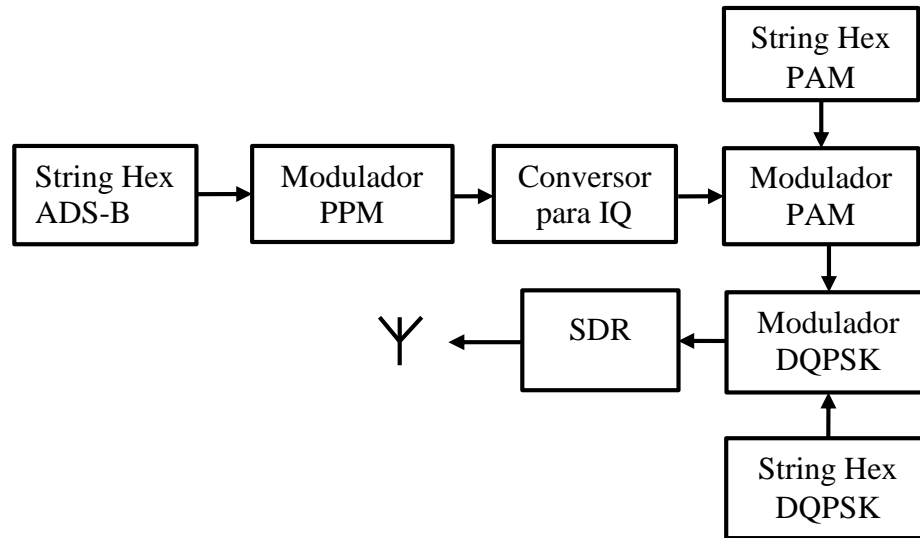
A mensagem modificada com essas duas técnicas devem possuir espectro de frequência dentro da mascarada (Figura 28) do protocolo.

4.3 Visão geral do Sistema

O sistema proposto para o equipamento ADS-B Out é representado na Figura 31. Uma string hexadecimal é passada para o modulador PPM que gera uma mensagem de acordo com o protocolo ADS-B. Este sinal é então convertido para sinais I e Q que são passados para o modulador PAM que, com uma string hexadecimal contendo informações para serem codificadas na forma de modulação PAM, insere a mudança de amplitude nos pulsos da modulação PPM. Os sinais com modulação PAM sobre a modulação PPM alimentam o

modulador DQPSK, que, da mesma forma que o modulador PAM, utiliza de uma string hexadecimal inserindo informações na fase dos sinais. Os sinais então são transmitidos pelo SDR.

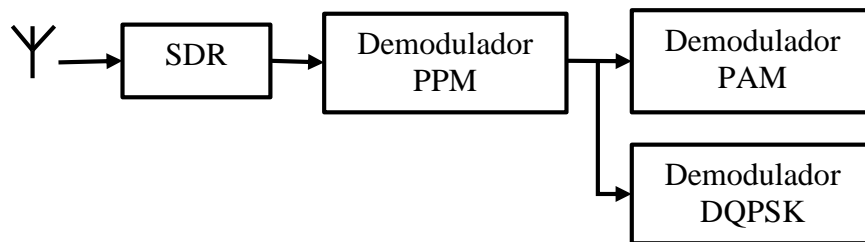
Figura 31 - Sistema ADS-B Out proposto



Fonte: o Autor

O sistema proposto para o equipamento ADS-B In é representado na Figura 32. O SDR recebe a mensagem ADS-B modificada pelo sistema proposto na Figura 31 e a demodula. As demodulações PAM e DQPSK ocorrem em paralelo. Um equipamento comercial atual que não possui a capacidade de demodulação PAM e DQPSK conseguiria demodular a mensagem ADS-B normalmente.

Figura 32 - Sistema ADS-B In proposto



Fonte: o Autor

4.4 Desenvolvimento

Seguindo o diagrama de blocos da Figura 31, as mensagens ADS-B podem ser representadas em forma hexadecimal como mostrado na Figura 33. A forma hexadecimal não inclui o preâmbulo.

Figura 33 - Representação da mensagem ADS-B

HEX	8D	4840D6	202CC371C32CE0	576098
BIN	10001 101	010010000100	[00100]0000010110011	010101110110
		000011010110	00001101110001110000	000010011000
			110010110011100000	

Fonte: Acessado em 8 de junho de 2019. <https://mode-s.org/decode/adsb/introduction.html>

As strings hexadecimais ADS-B foram extraídas de um conjunto de sinais gravados utilizando um RTL-SDR na frequência de 1090 MHz. Para demodular a informação contida na modulação PPM da mensagem ADS-B foi utilizado o software livre dump1090. O software dump1090 é um software que se utiliza de um RTL-SDR para capturar e decodificar mensagens ADS-B em tempo real ou processar mensagens gravadas com taxa de amostragem de 2,4 MHz. Sua interface é mostrada na Figura 34. Para a obtenção das strings hexadecimais e a localização do sinal no arquivo gravado foram necessárias realizar algumas mudanças no código C++ do software de forma que a posição absoluta das mensagens decodificadas fossem computadas e impressas num arquivo de texto juntamente com as strings hexadecimais decodificadas pelo software.

Assim, juntamente com o arquivo que possui o sinal gravado diretamente da saída do SDR, possuímos a localização das mensagens ADS-B dentro deste sinal e a mensagem ADS-B PPM decodificada numa string hexadecimal.

As strings utilizadas para modulação PAM e DQPSK serão escolhidas durante os testes.

Os moduladores, demoduladores e códigos auxiliares foram feitos utilizando o software MATLAB.

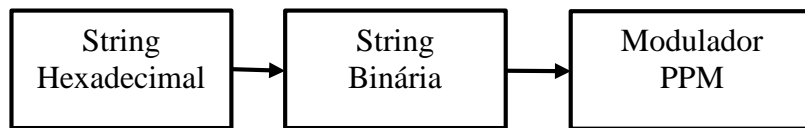
Figura 34 – Exemplo de captura utilizando o software dump1090

Hex	Flight	Altitude	Speed	Lat	Lon	Track	Messages Seen	.
ad57bb		11800	0	0.000	0.000	0	34	1 sec
ada521		9825	283	0.000	0.000	265	6	9 sec
a77a4f	HAL15	36000	379	34.199	-119.240	275	81	14 sec
a9bb70		28625	0	0.000	0.000	0	37	3 sec
a8bcf0		0	0	0.000	0.000	0	43	2 sec
a8c45e		0	0	0.000	0.000	0	3	24 sec
a70b4d		6825	0	0.000	0.000	0	22	27 sec
a8b939		0	0	0.000	0.000	0	295	1 sec
aa4199		19525	0	0.000	0.000	0	14	23 sec
a4ce21	456	7300	254	34.012	-118.444	83	923	0 sec
71bc18	AAR202	9825	273	34.030	-118.647	95	395	0 sec
a8da40		0	0	0.000	0.000	0	71	34 sec
a3dbe7		5425	0	0.000	0.000	0	41	1 sec
a379af		0	0	0.000	0.000	0	61	0 sec
a89216		36000	0	0.000	0.000	0	64	3 sec

Fonte: Captura de tela do software dump1090.

As mensagens em formato hexadecimal foram passadas por um modulador PPM, como representado na Figura 35, para o formato ADS-B. Primeiramente a string hexadecimal é convertida para uma string binária e serve de entrada para o modulador PPM. O modulador PPM converte cada bit da string binária em um pulso de $0,5 \mu\text{s}$ contido num período de $1 \mu\text{s}$, sendo o pulso na primeira parte do período o valor lógico 1 e na segunda parte o valor lógico 0. Posteriormente as mensagens são convertidas em amostras IQ.

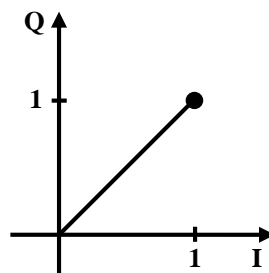
Figura 35 - Geração de mensagem PPM



Fonte: O Autor

A conversão do sinal PPM para o formato IQ é realizada de forma a posicionar o vetor com amplitude unitária e com 45° de fase no diagrama de constelação, como é mostrado na Figura 36.

Figura 36 – Localização do pulso para modulação PPM no plano IQ



Fonte: O Autor

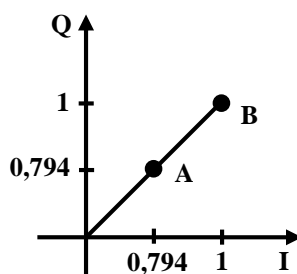
A string hexadecimal contendo a informação a ser modulada em PAM é primeiramente convertida para um vetor binário e depois seus elementos são repetidos lado a lado, assim se o valor lógico for 1, o pulso terá bits com valor lógico 11 durante $1 \mu\text{s}$ e se o valor lógico for 0 o pulso terá bits de valor lógico 00 durante $1 \mu\text{s}$. Este processo facilitará a modulação PAM.

A modulação PAM é realizada multiplicando o sinal convertido em binário e repetido elemento a elemento pelo sinal ADS-B modulado em PPM. A multiplicação é feita elemento a elemento. Como o sinal PPM possui um pulso de amplitude unitária e um vale de amplitude nula, na multiplicação somente os pulsos serão afetados. A multiplicação elemento a elemento é feita de forma ponderada para que o preâmbulo possua uma amplitude intermediária entre o nível alto e o nível baixo da modulação PAM, e que um valor lógico 1 represente uma amplitude maior que o nível do preâmbulo, e um valor lógico 0 represente uma amplitude menor que o

nível do preâmbulo. A diferença entre o valor lógico alto e o valor lógico baixo da modulação PAM é de 2 dB.

A execução da modulação PAM é simplificada pela utilização de amostras IQ. O objetivo da modulação PAM é alterar a amplitude do sinal sem alterar a sua fase, e analisando a Equação 4 e a Equação 5, devemos alterar I e Q de forma proporcional de forma que o quociente entre I e Q permaneça constante. A Figura 37 retrata este processo no plano IQ onde é possível mudar do ponto A de amplitude menor para o ponto B com amplitude maior mantendo a fase constante. Os valores de I e Q mudam de (1,1) para (0,794,0,794).

Figura 37 - Mudança de amplitude com fase constante no plano IQ

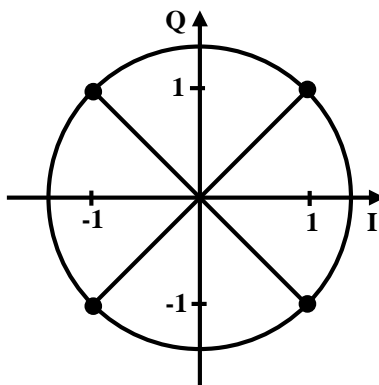


Fonte: O Autor

A Figura 29 retrata o sinal PAM com PPM.

A inserção de informação na fase do sinal ADS-B sem modificação da amplitude do sinal, é feita através de um círculo no plano IQ. Ao rotacionar o vetor, a amplitude se mantém constante e a fase é alterada. Essa técnica é chamada de modulação por deslocamento de fase (PSK: *Phase-Shift Keying*). A modulação utilizada neste trabalho será DQPSK que é uma variação da modulação PSK. Escolhendo 4 pontos no plano IQ, separados pela mesma angulação e realizando a mudança de fase a cada pulso, é possível armazenar 2 bits/pulso, isso somente levando em consideração a fase. Uma string hexadecimal contendo a informação a ser inserida na fase do sinal é escolhida e convertida para formato binário. A string no formato binário é então tratada, a cada dois bits da string um valor de mudança de fase é atribuído conforme a Tabela 4. O preâmbulo é inicializado com fase igual a 45° . O sinal modulado tem 4 fases diferentes, 45° , 135° , 225° e 315° graus. Figura 38 mostra no diagrama de constelação o funcionamento da modulação.

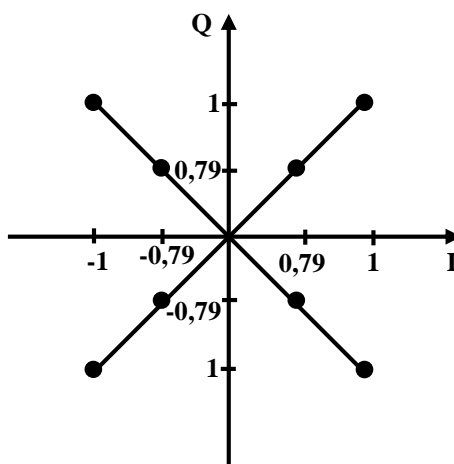
Figura 38 - Mudança de fase com amplitude constante no plano IQ



Fonte: O Autor

O resultado da implementação das duas modulações juntas é o equivalente representado na Figura 39, contendo a variação de fase e de amplitude.

Figura 39 - Mudança de fase e amplitude



Fonte: O Autor

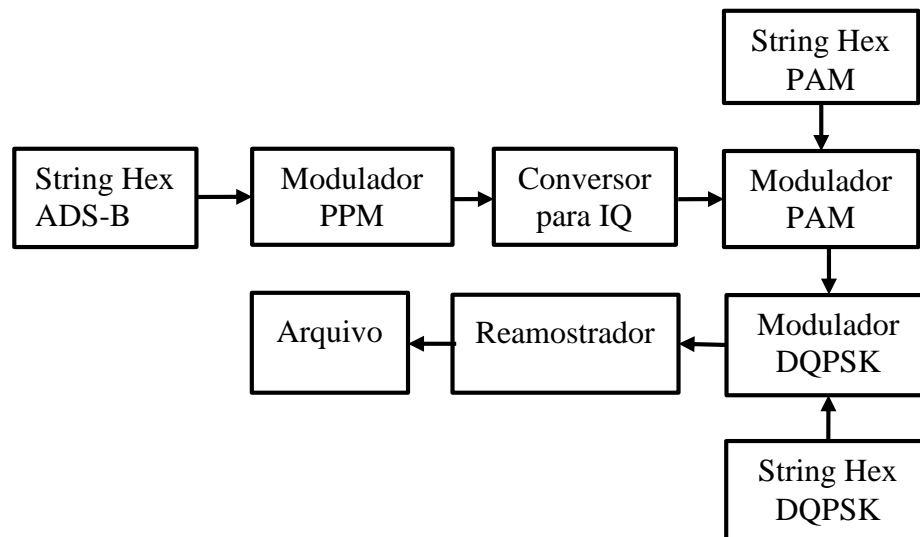
5 Resultados e Discussões

Os testes foram feitos com os equipamentos disponíveis conforme o trabalho foi desenvolvido. Os testes utilizando SDRs, assim, se limitou a modulação PAM. Esses testes são descritos na seção 5.2.

5.1 Testes no MATLAB

Para verificar o software desenvolvido, testes utilizando o software MATLAB e o software dump1090 foram feitos. O processo de modulação feito no software MATLAB foi realizado conforme a Figura 40.

Figura 40 - Teste no MATLAB - Moduladores

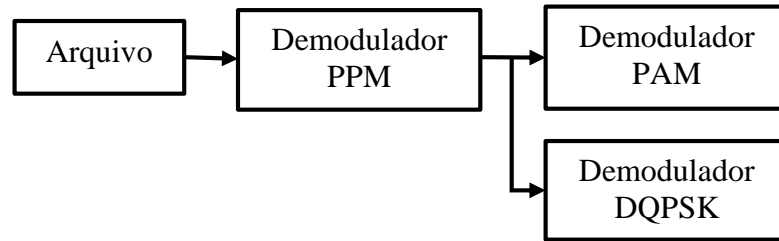


Fonte: O Autor

Strings hexadecimais ADS-B, PAM e DQPSK foram utilizadas como entrada e a saída gerada do programa é um arquivo com sinais ADS-B no protocolo proposto, ou seja, com modulações PPM+PAM+DQPSK em 2,4MHz. A frequência de 2,4 MHz é utilizada, pois o software dump1090 demodula somente nesta frequência. As strings ADS-B utilizadas foram retiradas sequencialmente de um arquivo gravado utilizando um RTL-SDR, ou seja, o arquivo é uma emulação de uma situação real.

A Figura 41 representa o diagrama de blocos dos softwares demoduladores desenvolvido no MATLAB e o demodulador PPM do software dump1090. O arquivo de entrada, que é a saída gerada pelo processo da Figura 40, é processado pelo software dump1090 modificando gerando um arquivo com as localizações das mensagens ADS-B modificadas (PPM+PAM+DQPSK). Essas localizações são utilizadas pelos demoduladores PAM e DQPSK para localizar as mensagens no arquivo e as demodular.

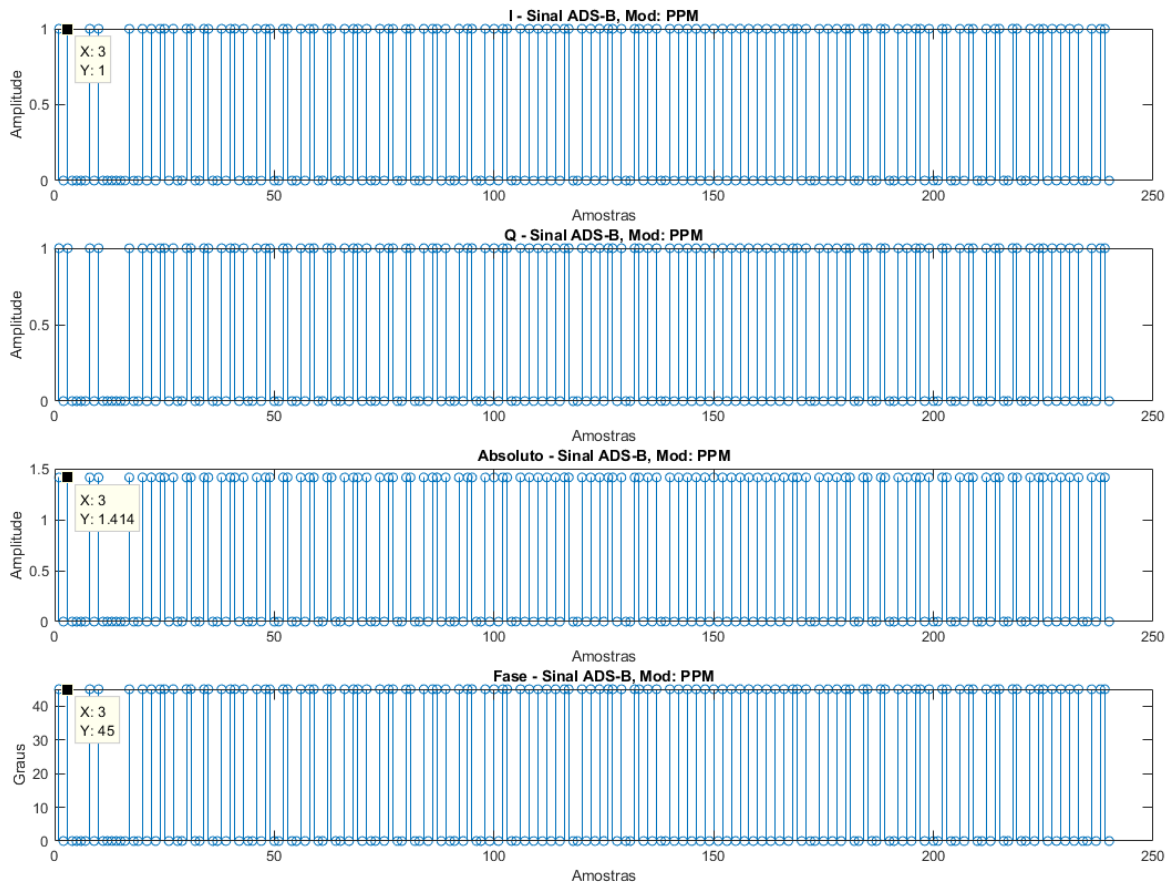
Figura 41 - Teste no MATLAB - Demoduladores



Fonte: O Autor

A Figura 42 é um sinal ADS-B com modulação PPM formado a partir da string hexadecimal 8D4CA532991021B8000C2A3494F9. É possível facilmente identificar os quatro primeiros pulsos do preâmbulo do protocolo. O primeiro e o segundo gráfico representam os sinais I e Q. Os dois últimos gráficos representam o absoluto (magnitude) do sinal e a sua fase. A amplitude e a fase do sinal são constantes como esperado. A amplitude é normalizada, no final do processo de modulação um ganho deve ser aplicado para a transmissão ou salvar no arquivo.

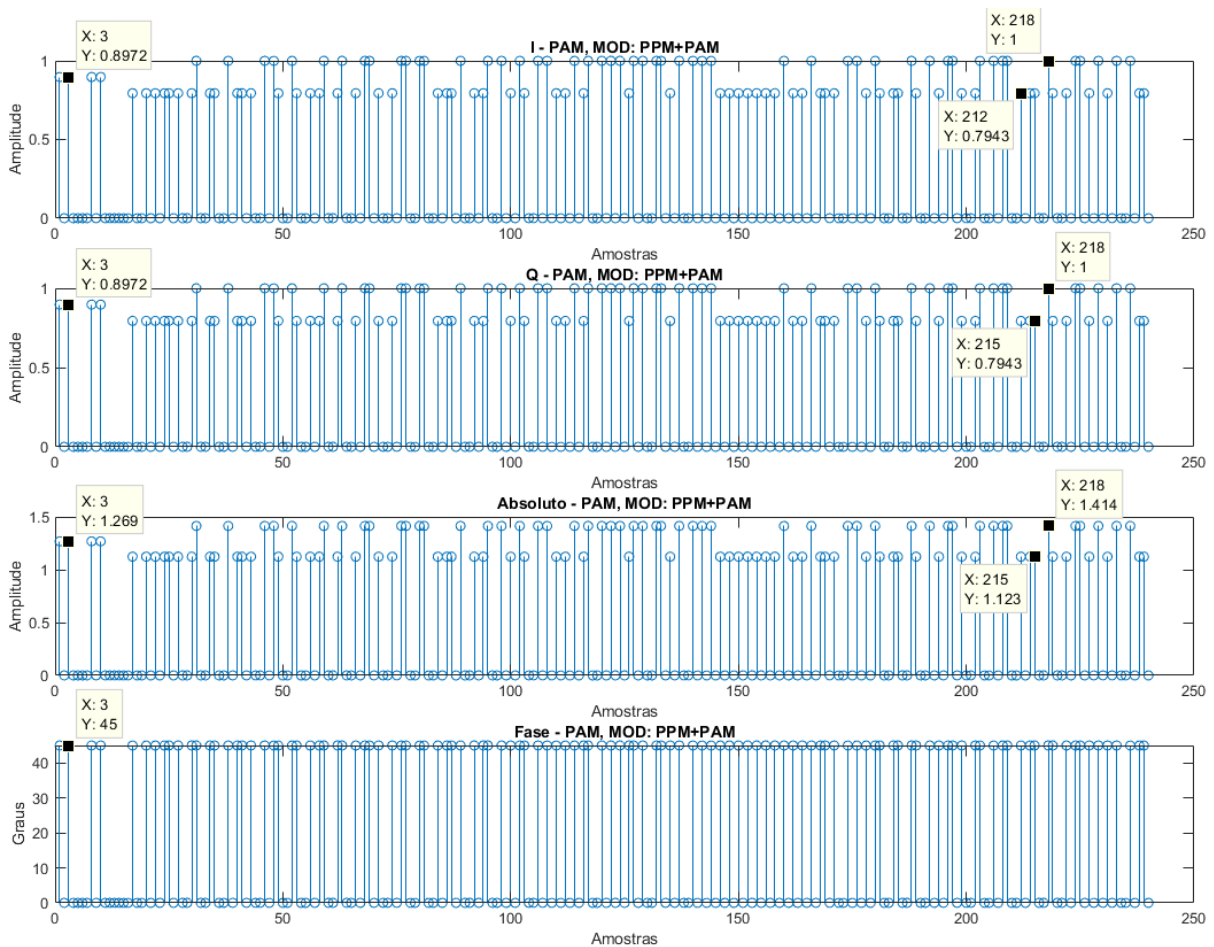
Figura 42 - ADS-B PPM



Fonte: O Autor

A Figura 43 representa o resultado da modulação PAM sobre a modulação PPM original do protocolo ADS-B. A modulação PAM da Figura 43 foi gerada sobre o sinal representado pela Figura 42. A string utilizada pela modulação PAM foi 0123456789ACBDEF0123456789AC. A diferença de amplitude entre o nível alto e o nível baixo da modulação PAM encontra-se limitada em 2 dB, como é requisito de transmissão do protocolo. A fase do sinal não é alterada pela modulação.

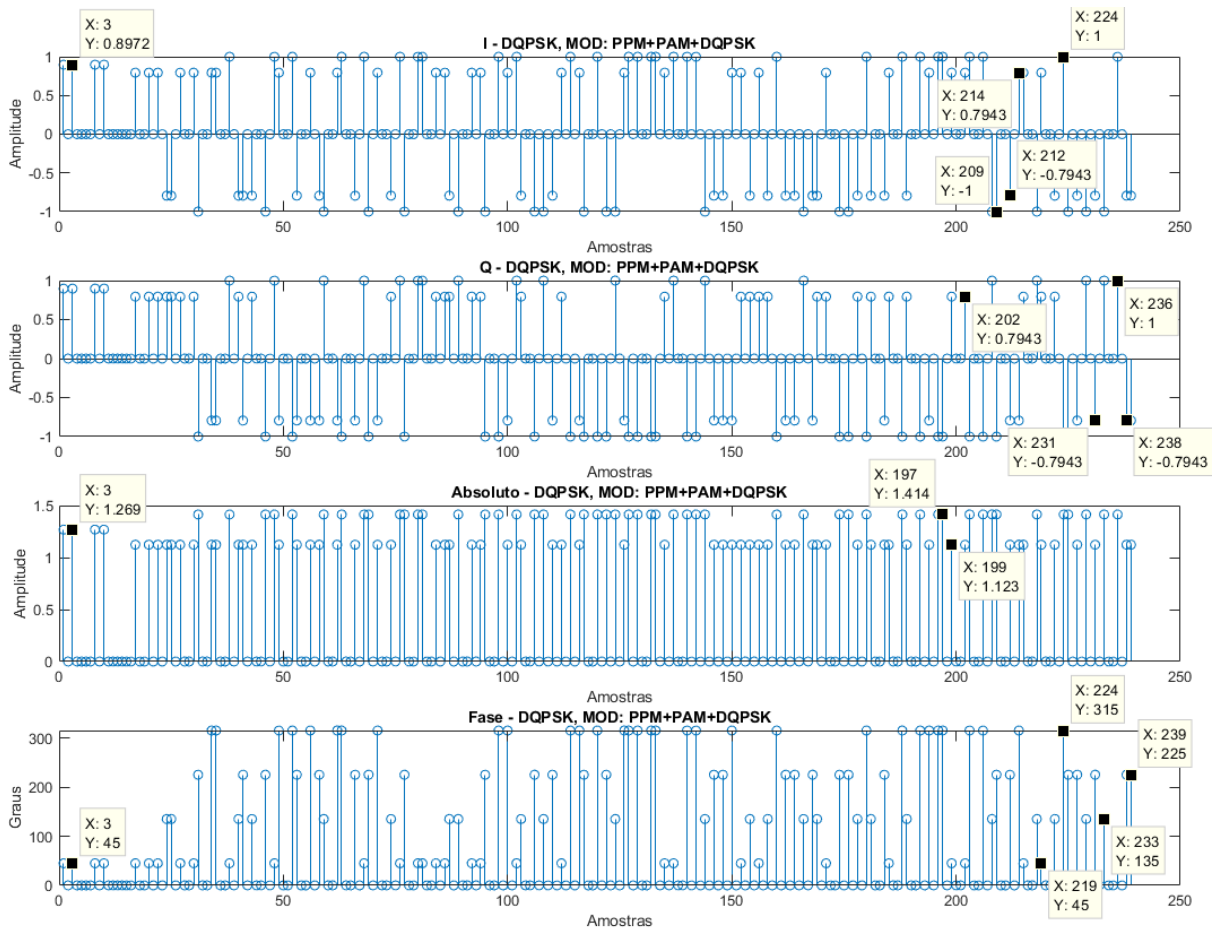
Figura 43 - PPM+PAM



Fonte: O Autor

A Figura 44 representa a modulação DQPSK sobre a modulação PPM e PAM da Figura 43 e da Figura 42. A modulação DQPSK foi gerada utilizando a string hexadecimal 0123456789ACBDEF0123456789AC0123456789ACBDEF0123456789AC. Como esperado a modulação DQPSK não alterou a amplitude do sinal, somente a fase entre os valores de 45°, 135°, 225° e 315°.

Figura 44 - PPM+PAM+DQPSK



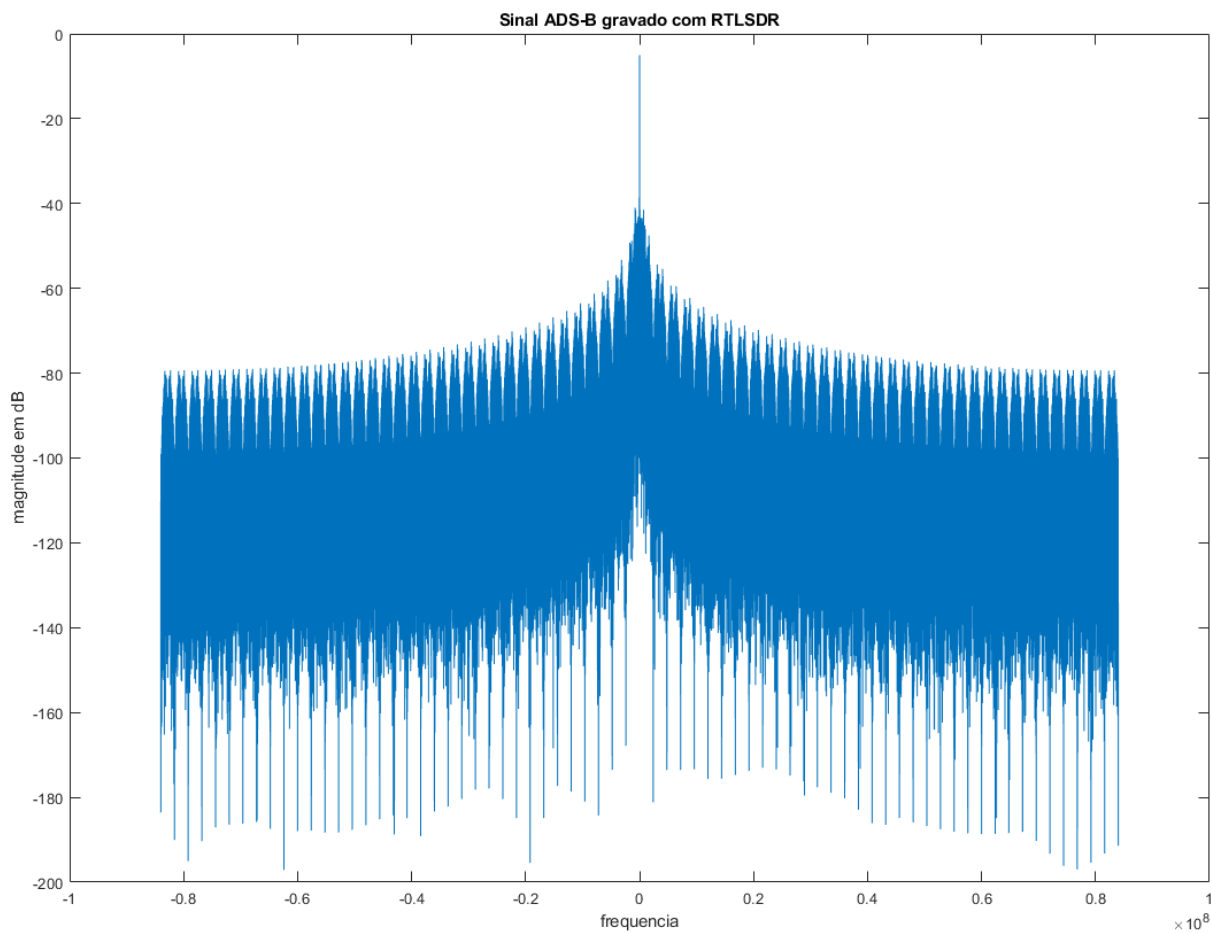
Fonte: O Autor

Como a estrutura da mensagem Modo S é semelhante a mensagem ADS-B os moduladores e demoduladores acima foram estendidos para mensagens Modo S também.

O arquivo modulado possuía 4634 mensagens totais somando as mensagens ADS-B e Modo S, sendo 487 mensagens ADS-B e 4147 mensagens Modo S. No processo de demodulação PPM do protocolo alterado foi perdido uma mensagem ADS-B e 7 mensagens Modo S, ou seja, 4627 mensagens Modo S e ADS-B foram demoduladas. Tirando a mensagem ADS-B perdida pelo demodulador PPM do software dump1090, todas as mensagens tiveram sucesso na demodulação PAM e DQPSK.

O espectro de frequência da mensagem ADS-B sem modificações é gerado na Figura 45. Comparando com a Figura 28, como esperado, o espectro se encontra dentro dos limites da máscara do protocolo ADS-B.

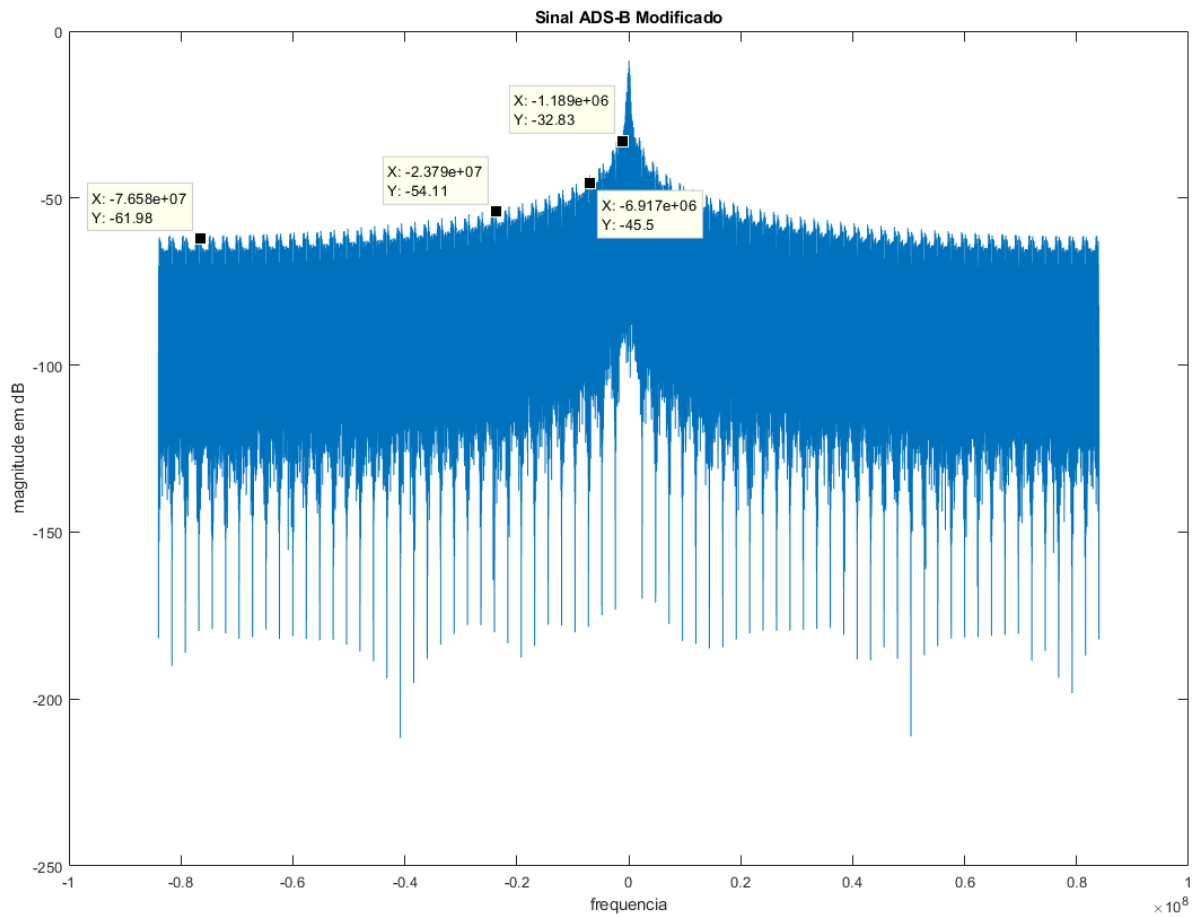
Figura 45 - Espectro de frequência da mensagem ADS-B



Fonte: O Autor

O espectro gerado pela mensagem ADS-B modificada pelo protocolo proposto utilizando as mesmas strings das Figuras 42 a 44 foi gerado na Figura 46 utilizando o arquivo gerado pelo processo da Figura 40.

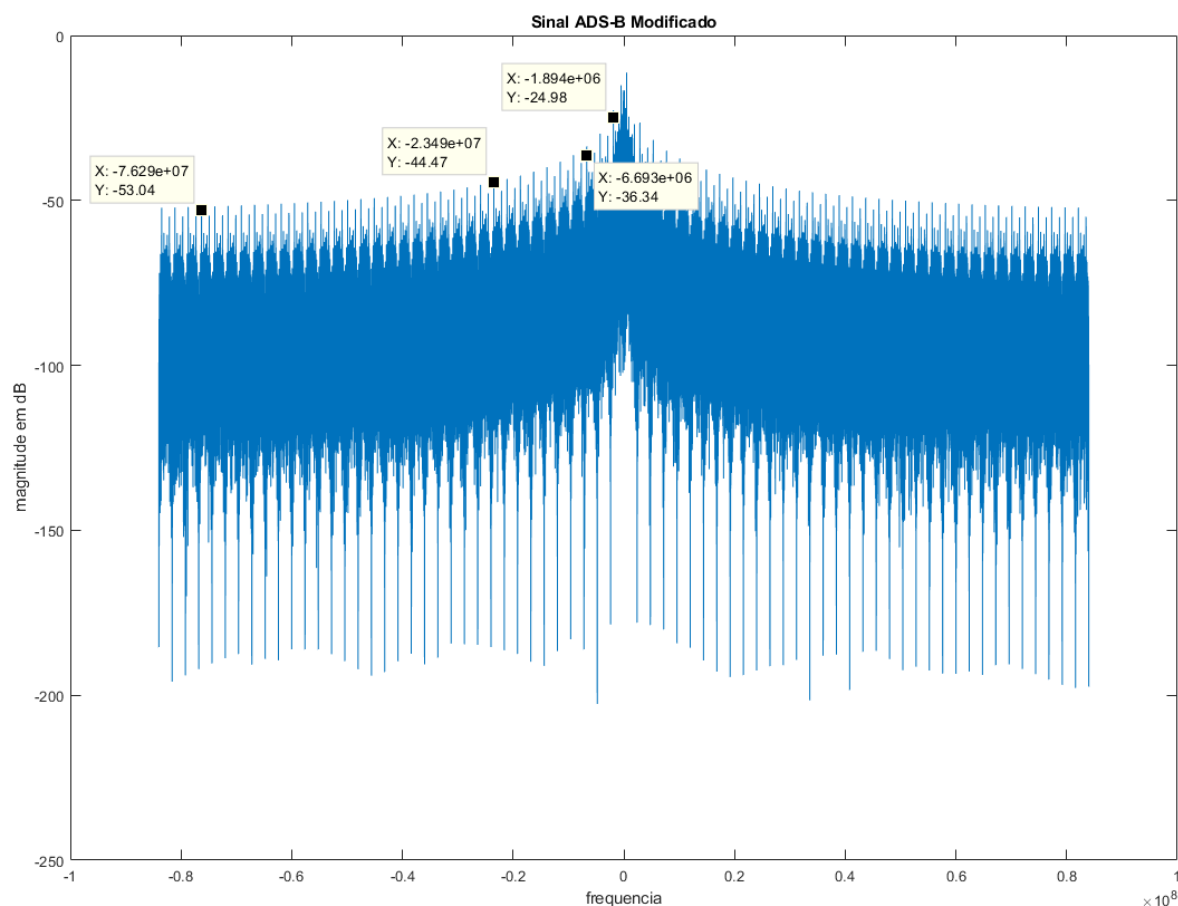
Figura 46 - Espectro da mensagem ADS-B modificada pelo protocolo proposto



Fonte: O Autor

Outro espectro para uma mensagem utilizando a mesma string ADS-B e modificando as strings PAM e DQPSK para EFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFE e EFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFEFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFE foi gerado na Figura 47.

Figura 47 - Espectro de frequência de mensagem ADS-B modificada pelo protocolo proposto



Fonte: O Autor

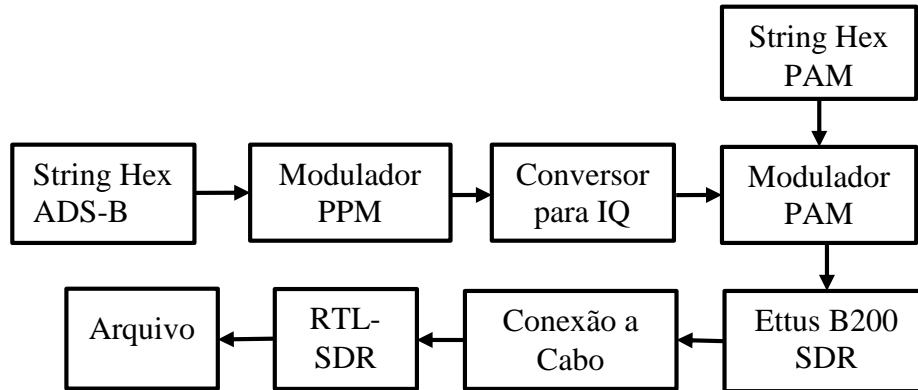
Os espectros de frequência das Figuras 45 a 47 foram gerados utilizando interpolação do tipo vizinho mais próximo e a função `fft()` do MATLAB. Pode-se notar que, como esperado, o espectro varia conforme a informação modulada. A informação modulada no protocolo proposto na Figura 46 atende aos requisitos do protocolo ADS-B, entretanto, como ilustrado na Figura 47, outras informações moduladas no protocolo proposto não satisfazem estes mesmos requisitos. Portanto uma análise mais robusta deve ser feita levando-se em conta a mensagem extra que o protocolo proposto neste trabalho potencialmente permite. Caso as mensagens extras desejadas não satisfaçam o requisito da máscara de frequência uma reanálise do processo de modulação deve ser feita. Como foge do escopo deste trabalho a decisão da mensagem extra a ser enviada esta análise não foi feita.

5.2 Testes Realizados com SDR

Foram realizados dois testes com a modulação PAM. Para a realização do primeiro teste foi utilizado o SDR B200 da Ettus como transmissor e o RTL-SDR como receptor, ambos

ligados através de um cabo (ruído baixo). A Figura 48 representa o diagrama de blocos de como o teste foi executado.

Figura 48 - Teste modulação PAM com cabo

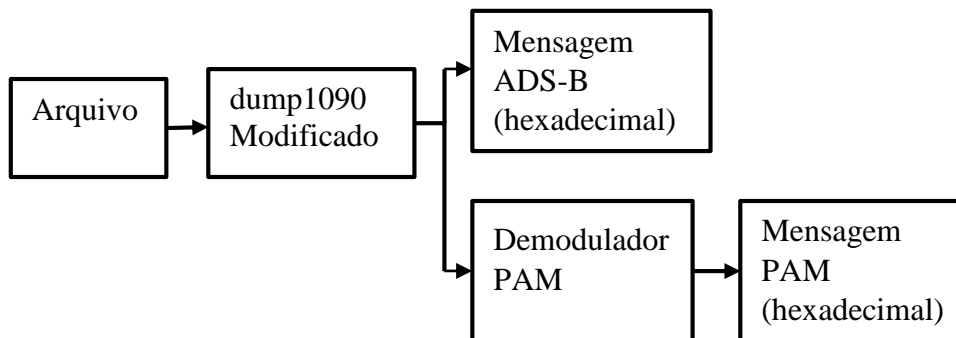


Fonte: O Autor

O segundo teste foi feito utilizando também o SDR Ettus B200 como transmissor e o RTL-SDR como receptor, mas a transmissão foi feita pelo ar. A Figura 48 representa o diagrama de blocos do transmissor e receptor, somente o meio “Cabo” que deve ser alterado para Ar (sem fio).

A Figura 49 representa como o sinal recebido pelo RTL-SDR foi processado.

Figura 49 - Processamento do arquivo recebido no teste

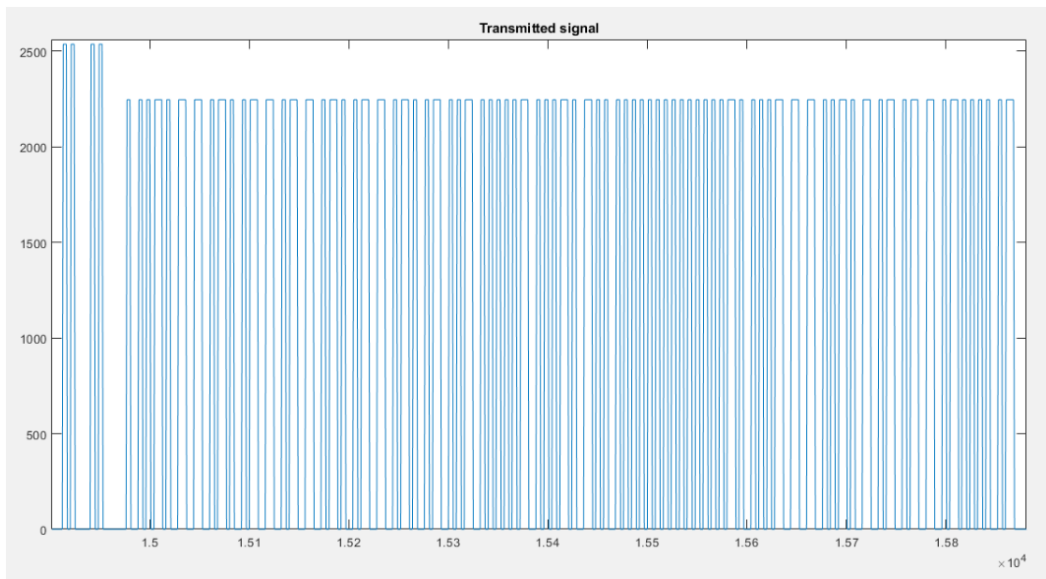


Fonte: O Autor

Para um sinal com modulação PAM como o da Figura 50, extremo onde todos os bits da modulação PAM possuem valor lógico 0, a recepção foi como mostrado na Figura 51. Ambos os testes tiveram uma recepção parecida. A falha na recepção do sinal pode ter ocorrido devido a diversos fatores, como, por exemplo: o RTL-SDR não possuir correção de desbalancamento de amostragem IQ, uma deriva na frequência do oscilador local do RTL-SDR, filtros anti-alias, etc. A falta de correção de amostragem IQ torna os eixos I e Q dependentes um do outro,

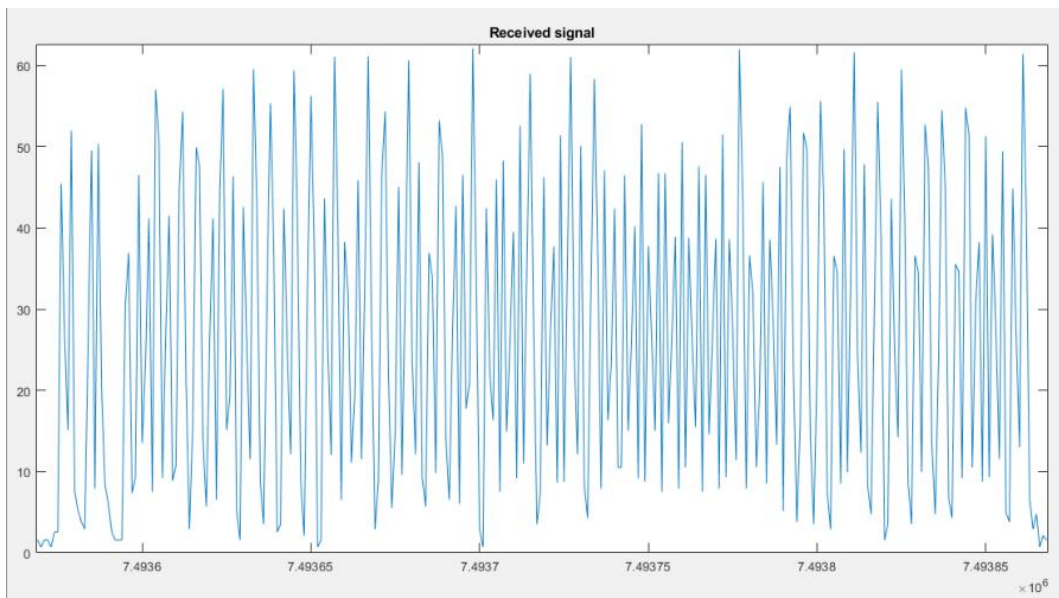
causando oscilações no tempo nos valores de IQ, alterando a amplitude e a fase do sinal e impossibilitando a recepção da modulação extra com sensibilidade a variação dessas grandezas. O conversor analógico digital de 8 bits do RTL-SDR também pode potencialmente gerar problemas de detecção no protocolo proposto, pois se dois sinais com uma grande diferença de amplitude forem recebidos próximos, temporalmente, a resolução pode não ser suficiente para discernir entre os níveis da modulação PAM.

Figura 50 - Sinal PPM+PAM transmitido



Fonte: O Autor

Figura 51 - Sinal PPM+PAM recebido



Fonte: O Autor

Sendo assim, não foi possível a obtenção de um resultado favorável nesse teste.

6 Conclusões

Realizando os procedimentos propostos e fazendo uma análise das mensagens moduladas e demoduladas, foi possível verificar que o sinal modulado permanece dentro das especificações do protocolo para algumas strings de informação extra e não cumpre as especificações do protocolo para outras. Uma análise mais robusta da utilização do método proposto neste trabalho deve ser realizada levando-se em conta a informação extra, desta forma, determinando se este trabalho pode ser utilizado ou se necessita de modificações.

A solução obtida neste trabalho mostra-se enxuta, não necessitando de muito processamento extra.

Utilizando-se o modulador desenvolvido é possível pelo menos quadruplicar a quantidade de informação codificada numa mensagem ADS-B, sendo na mensagem ADS-B em PPM 112 bits, em PAM 112 bits e em DQPSK 224 bits, totalizando um total de 448 bits.

Devido ao uso de um RTL-SDR como receptor neste trabalho, não foi possível obter uma recepção com sucesso e realizar a decodificação da mensagem extra codificada.

O trabalho teve conclusão realizando o que tinha proposto parcialmente. O aumento de densidade de informação encodada no protocolo ADS-B sem a perda de retrocompatibilidade com equipamentos existentes no mercado.

7 Propostas Para Trabalhos Futuros

Realizar uma análise robusta levando em conta possíveis mensagens que seriam utilizadas na modulação PAM e DQPSK de forma a definir se a máscara de frequência do protocolo ADS-B será violada.

Realizar testes em MATLAB inserindo ruído e utilizando pulsos com maior número de amostras.

Com outro SDR receptor e equipamentos receptores ADS-B In, seria viável testar a viabilidade de mais níveis na modulação PAM, assim como na modulação DQPSK.

Outra possível técnica para aumentar a densidade de informação no protocolo seria utilizando a duração do pulso. Entretanto, esta técnica parece possuir complicações devido a tolerância de somente 0,05 μ s, a qual iria envolver frequências de amostragem maiores que 20 MHz.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

AIREON. AZUL BECOMES 1ST IN AMERICAS FOR MINUTE-BY-MINUTE FLIGHT TRACKING BY ADOPTING AIREON SPACE-BASED ADS-B. Disponível em: <<https://aireon.com/2019/03/26/azul-becomes-1st-america-minute-minute-flight-tracking-adopting-aireon-space-based-ads-b/>>. Acesso em: 13 jun. 2019.

AIRSERVICES AUSTRALIA. ADS-B coverage. Disponível em: <<http://www.airservicesaustralia.com/projects/ads-b/ads-b-coverage/>>. Acesso em: 29 maio 2019.

AIRSERVICES AUSTRALIA. Automatic Dependent Surveillance Broadcast. Disponível em: <<http://www.airservicesaustralia.com/projects/ads-b/>>. Acesso em: 29 maio 2019.

DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO. Entenda os benefícios do ADS-B, sistema de vigilância aérea a ser utilizado em breve no País. Disponível em: <<https://www.decea.gov.br/blog/?p=418>>. Acesso em: 29 maio 2019.

EMILY CHANG, R. H. D. L. R. L. Q. S. T. T. **The Story of Mode S**. [S.l.], p. 40. 2000.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. Fact Sheet – Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B). Disponível em: <https://www.faa.gov/news/fact_sheets/news_story.cfm?newsid=7131>. Acesso em: 29 maio 2019.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. **Doc 9684: Manual on the Secondary Surveillance Radar (SSR) Systems**. [S.l.], p. 251. 2004.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. **Doc 9688: Manual on Mode S Specific Services**. [S.l.], p. 41. 2004.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. **Annex 10 Volume III: Communication Systems**. [S.l.], p. 260. 2007.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. **Annex 10 Volume IV: Surveillance and Collision Avoidance Systems**. [S.l.], p. 288. 2007.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. SSR Mode S Coordination Issues, 2010. Disponível em: <https://www.icao.int/WACAF/Documents/Meetings/2011/asi_ws/pp1_ssr_modes_coordinati on.pdf>.

LINCOLN LABORATORY. **DABS: A System Description**. [S.l.], p. 99. 1974.

NAV CANADA. Automatic Dependent Surveillance-Broadcast. Disponível em: <<http://www.navcanada.ca/EN/products-and-services/Pages/on-board-operational-initiatives-ads-b.aspx>>. Acesso em: 29 maio 2019.

NAV CANADA. Space-based Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B). Disponível em: <<http://www.navcanada.ca/EN/products-and-services/Pages/Space-based-ADS-B.aspx>>. Acesso em: 29 maio 2019.

PROAKIS, J. G. . M. S. **Digital Communications**. 5°. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2008.

RADIO TECHNICAL COMMISSION FOR AERONAUTICS. **RTCA DO-260: Minimum Operational Performance Standards (MOPS) for 1090 MHz Automatic Dependent Surveillance - Broadcast (ADS-B) and Traffic Information Services-Broadcas (TIS-B)**. RTCA. [S.l.], p. 1446. 2009.

SESAAR DEPLOYMENT MANAGER. Disponível em: <https://www.sesardeploymentmanager.eu/wp-content/uploads/2019/03/EuropeForAviation-ADS_B_final.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2019.

SKLAR, B. **Digital Communications Fundamentals and Applications**. 2°. ed. [S.l.]: Prentice-Hall Inc.

THE OPENSKY NETWORK. Disponível em: <<https://opensky-network.org/>>. Acesso em: 24 jun. 2019.