Diogo Francisco de Oliveira Vieira Duque Emílio

Licenciatura em Ciências de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Detecção de interferências com SDRs para receptores GNSS

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Luís Augusto Bica Gomes de Oliveira, Professor Auxiliar com Agregação,
Universidade Nova de Lisboa

Júri

Presidente: Paulo Montezuma-Carvalho
Arguente: João Pedro Oliveira

FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Fevereiro, 2020

Detecção de interferências com SDRs para receptores GNSS

Este documento foi gerado utilizando o processador (pdf)LaTeX, com base no template "novathesis" [1] desenvolvido no Dep. Informática da FCT-NOVA [2].
[1] https://github.com/joaomlourenco/novathesis [2] http://www.di.fct.unl.pt

Ao meu pai

Agradecimentos

Graças a esta faculdade, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa tive a oportunidade de desenvolver laços que considero vitais para a formação do meu ser, quer em matérias de foro pessoal, quer de foro académico. Agradeço profundamente ao meu orientador, Professor Doutor Luís Oliveira, ao Professor Doutor João Oliveira e ainda ao Professor Doutor Rodolfo Oliveira por todo o suporte e sabedoria que tentaram transmitir no decurso deste projeto. Um agradecimento especial ao Sr. Nuno Duro e ao futuro mestre Afonso Henriques, colaboradores da Bluecover, que contribuíram com recursos e informação vital para o estudo do tema.

Para além dos mencionados, tenho muitos mais agradecimentos para conceder e acabo esta etapa de vida de "coração cheio" sabendo que todos eles deixaram a sua marca na minha vida, nomeadamente neste período que foi deveras desafiante. De muitos, um obrigado ao Duarte Batista, Pedro Monteiro, Francisco Rodrigues, Daniela Rebêlo e Diana Borralho por todo o apoio que deram durante estes seis anos de trabalho árduo.

Não posso deixar de agradecer à Alina Vasilciuc por todo o carinho, amizade e boa vontade para me ensinar a existência de um mundo melhor ao meu redor, assim como o apoio inigualável que ela prestou durante dois anos muito difíceis da minha vida. Este agradecimento nuncá será suficientemente grande para recompensar tudo o que fizeste por mim.

Filipa Martins, um obrigado enorme por todo o suporte que deste e um obrigado por teres escolhido a mesma faculdade que facilitou e permitiu uma reconexão muito antiga e também meios mais fáceis para construir uma amizade tão forte como a nossa.

No final desta etapa de vida tive a oportunidade de conhecer uma amiga que faço questão de manter durante largos anos. Obrigado Carolina Rodrigues pela pessoa que és e pelas contribuições que fizeste para o meu desenvolvimento pessoal.

Por último, muito obrigado pai, Francisco António Duque Emílio de Oliveira Vieira, pelo "coração grande", apoio e fé durante toda esta etapa.

Do. Or do not.
There is no try

Master Yoda - Star Wars

Resumo

Na atualidade é possível encontrar inúmeros dispositivos que permitem informar a sua geo-localização de forma instantânea. A rápida evolução dos dispositivos eletrónicos e a facilidade de acesso à informação disponível potenciam, assim, a variedade de aplicações da tecnologia GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) em várias áreas de negócio.

Adicionalmente, o aumento destas aplicações de sistemas de navegação no dia-a-dia também potenciam a exploração de vulnerabilidades inerentes a estes tipos de sistema, nomeadamente, em termos de segurança. Assim, dado que a aposta neste ecossistema é cada vez maior, e também mais importante, surge a necessidade de mitigar as consequências das suas falhas e, com isto, melhorar a robustez dos sistemas de navegação em operação.

Devido ao interesse crescente em assuntos relacionados com radiofrequência, foram desenvolvidas soluções menos dispendiosas que analisam e manipulam sinais propagados em ambientes sem-fios. Nesta vertente destacam-se as interfaces *Software Defined Radio* (SDR) que, face às especificidades técnicas que a maioria apresenta, apresentam-se como opções para lidar com comunicação GNSS. Uma vez que estas interfaces cumprem os demais requisitos teóricos necessários para manipulação de sinais sem-fios e mitigação de interferências impostas ao sistema, podem-se, portanto, analisar diversas possibilidades de melhoria da robustez através de soluções que permitam descobrir, classificar e, posteriormente, eliminar as interferências existentes nestes sinais.

Com esta problemática em mente será estudada e desenvolvida uma solução de baixo custo, através de interfaces SDR, que analise sinais GNSS e imparidades que possam existir neste sistema, nomeadamente interferências de *jamming*.

Resultados preliminares mostram a existência de interferências, quando introduzidas de forma propositada no sistema, em ambas as interfaces SDR de baixo custo, reforçando assim a capacidade da tecnologia para efetuar análise de sinais no campo das GNSS e ainda a deteção e classificação de interferências.

Palavras-chave: GNSS, Radiofrequência, Interferência, *Jamming*, SDR, Sinais GNSS...

Abstract

Nowadays it's possible to find numerous devices able to pinpoint instantly one's geolocation. The rapid evolution of electronic devices and the easy access to information lead to a wide range of applications of the Global Navigation Satellite Systems (GNSS) technology in a variety of business areas.

Additionally, the increase of the daily use of these navigation system applications reinforces the need to explore their vulnerabilities, namely security-wise susceptibilities. Therefore, given the increasing investment in this subject and its importance, comes the need for minimizing the flaws associated with it and thus improve the currently operating navigation systems' strength.

As a result of the growing interest in subjects related to radiofrequency, a few cheaper methods able to analyse and manipulate signals that propagate through wireless environments were developed. Among these, the Software Defined Radio (SDR) interfaces should be highlighted due to their technical specificities that make them viable candidates to deal with GNSS communications. Since these interfaces follow the theoretical requirements necessary for wireless signal manipulation and imposed interference minimization, it is then possible to research several ways to improve the systems' strength through solutions that allow the detection, classification and elimination of interferences present in the analysed signals.

With this situation in mind, a low-cost solution able to analyse GNSS signals and possible existing interferences, such as jamming, will be studied and developed through SDR interfaces.

Preliminary results show that both low-cost SDR interfaces display interferences when these were purposefully inserted in the system, which supports their ability to analyse GNSS signals and detect and classify interferences in them.

Keywords: GNSS, Radiofrequency, Interference, Jamming, SDR, GNSS signals...

Índice

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Listagens

Siglas

ACLS	Automatic Carrier Landing System.
ADC	Analog-to-Digital Converter.
DAC	Digital-to-Analog Converter.
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service.
FPGA	Field-Programmable Gate Array.
GBAS	Ground-based Augmentation Systems.
GLONASS	GLObal NAvigation Satellite System.
GNSS	Global Navigation Satellite System.
GPS	Global Positioning System.
GUI	Graphic User Interface.
ILS	Instrument Learning System.
MSPS	Million Samples Per Second.
RF	Radio Frequency.
RFI	Radio-frequency Interference.
SBAS	Satellite-based Augmentation Systems.
SDR	Software Defined Radio.
WAAS	Wide-Area Augmentation System.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

O desenvolvimento de sistemas satélite de navegação global (GNSS) permite às empresas integrar a tecnologia de forma a rastrear a localização geográfica dos seus produtos em tempo real. Neste sentido, são necessárias garantias de fiabilidade e robustez na área da comunicação sem-fios, mitigando vulnerabilidades relacionadas com segurança devido ao uso de protocolos de comunicação sem fios e, com isto, mitigando também as soluções maliciosas existentes que visam explorar as vulnerabilidades que possam existir nestes sistemas, [1], [2].

Atualmente, sistemas de auxílio como o *Automatic Carrier Landind System* (ACLS), baseado em tecnologia de radar e *Instrument Landing Systems* (ILS) permitem a aterragem automática de aviões, sendo esta a mais consistente e segura no mercado, [3]. A aterragem de um veículo aéreo de forma segura será sempre um ponto que merece uma atualização e aperfeiçoamento constante. Quando surgem condições atmosféricas adversas no momento do avião aterrar, este permanece no ar até existirem condições favoráveis e receber autorização para posterior aterragem ou, no pior cenário, o mesmo é reencaminhado para um aeroporto próximo. Este pormenor foi, desde sempre, uma desvantagem associada aos sistemas de transporte, nomeadamente aos aéreos. Esta nuance tem implicações imediatas na economia local e global. Para contextualizar um pouco a afirmação anterior, dependendo do ano e mês, estas são causa direta de até 50% dos atrasos de tráfego dentro do espaço comercial aéreo dos Estados Unidos da América, [4].

De forma a mitigar estes inconvenientes, o desempenho de um sistema GNSS consegue ser melhorada através de *Satellite-based Augmentation System* (SBAS) regionais, melhorando assim a precisão e fiabilidade da informação vinda do GNSS pela correção de erros

nas medições através de informação de precisão, integridade, continuidade e disponibilidade dos sinais, [5], [6]. Como exemplo tem-se o *Wide-Area Augmentation System* (WAAS), um SBAS regional que é agora usado na América do Norte, em especial no Canadá. A integração deste sistema na companhia aérea *Canadian North* permitiu, agora, trabalhar com os seus aviões em condições deveras adversas, condições essas que outrora obrigavam a companhia a suspender os seus serviços de transporte, [7], e, consequentemente beneficiaram as comunidades inseridas no norte que se apoiavam maioritariamente em serviços de transporte aéreo. No espaço europeu, o *European Geostationary Navigation Overlay Service* (EGNOS) é o que está atualmente a ser usado e integrado para correção de precisão e fiabilidade da informação de posição geográfica cedida pelo sistema GNSS, [8].

Atualmente, ameaças aos sistemas de navegação GNSS são uma realidade. Eventos como anomalias de sinais, disrupções regionais, perda de posição e referência temporal na presença de determinados *jammmers* já ocorreram em inúmeras situações e afetaram aplicações críticas em todo o globo, [9]. É assim, fulcral o desenvolvimento de técnicas para a deteção de *jamming* de forma a proteger os vários serviços que usam sistemas GNSS das demais interferências, sejam elas de foro natural, sejam elas de foro intencional e malicioso, [2], [10].

Abordagens feitas com uso de *software defined radio* (SDR) para recetores GPS (GPS-SDR) ganharam atenção na comunidade cientifica, uma vez que o dispositivo, graças à sua flexibilidade, consegue ser usado em operações multimodais e em diversos ambientes. Estes têm sido aposta de vários colaborados, aperfeiçoando os sistemas com soluções de pararelismo de algoritmos e aceleração em *hardware*, vastamente utilizadas em *Field-Programmable Gate Arrays* (FPGA), [11]. À medida que estas interfaces ficam mais baratas, flexíveis e acessíveis e a informação online que sobre estas aumenta, um comum mortal que esteja interessado em engenharia de rádio-frequência consegue agora, mais do que nunca, aprender e explorar conceitos desta engenharia e de processamento digital de sinais que eram outrora exclusivos de engenheiros de rádio-frequência. Presentemente, uma pessoa que adquira uma interface SDR de custo baixo e uma antena consegue, através de tutoriais, ouvir a sua estação FM favorita no seu computador pessoal. Por um lado, a forte aposta no desenvolvimento e melhoria de componentes eletrónicos leva a dispositivos SDR mais potentes e acessíveis e, por outro lado, a quantidade de conteúdo que vai sendo disponibilizada pela comunidade encoraja a descoberta de novas aplicações passíveis de serem manipuladas por dispositivos SDR e a melhoria das aplicações já existentes. Um caso que corrobora o que foi dito é o aumento do espetro de frequência da interface SDR ADALM-PLUTO (figura 1.1) através de uma alteração de *software* simples e rápida. Através do *software* instalado nestas interfaces, são impostas limitações de fábrica quanto às capacidades de cobertura de espetro assim como largura de banda disponível. Este dispositivo vem de fábrica limitado para cobrir um espetro de frequências RF que varia entre os 325 MHz e 3.8 GHz com 20 MHz de largura de banda. Com a alteração de

software referida, as definições de fábrica são suprimidas e a interface passa a conseguir lidar com um espetro de frequências mais extensa, partindo dos 70.0 MHz até aos 6.0 GHz com 56.0 MHz de largura de banda, [12].

Figura 1.1: Interface SDR ADALM-PLUTO da *Analog Devices*

Com a aposta no desenvolvimento de tecnologia associada a interfaces SDR, estes dispositivos poderão ser uma solução aliciante para a mitigação de interferências naturais e/ou maliciosas. A disponibilização de recursos para lidar com SDRs pode levar a soluções mais económicas e comparáveis a soluções atuais existentes no mercado para contornar as demais barreiras já referidas.

1.2 Requisitos

O projeto em estudo requer a programação de uma interface *Software Defined Radio* de forma a analisar sinais GNSS e a classificação de interferências em sinais GNSS, quando existentes. Atualmente existem várias soluções no mercado que permitem a análise de sinais GNSS, mas não oferecem possibilidade de informar os engenheiros no momento em que a interferência está a ocorrer. Para estas soluções é necessária a intervenção para analisar o sinal, nomeadamente nos momentos em que este está a ser atenuado. Dito isto, outro requisito inerente a este projeto é a localização de interferências intermitentes e persistentes e a sua identificação e caracterização durante os testes.

Visto que este projeto, tem parceria com a Bluecover, uma empresa portuguesa especializada em serviços de geo-localização baseadas em tecnologia de rastreamento a tempo real, tem objetivos práticos com foco na integração destes em serviços na indústria de aviação. De acordo com a informação disponibilizada pela empresa, a motivação prática deste projeto passa pela aplicação de tecnologia que lide com sistemas regionais SBAS nos aviões comerciais para estes aterrarem de forma segura e com o uso do sistema EGNOS, atendendo ao facto de o estudo querer ser aplicado em espaço aéreo europeu e, especialmente, se não existir sistemas de instrumentação ILS a bordo, [13].

1.3 Estrutura

Esta tese, constituída por cinco capítulos, aborda no primeiro uma breve introdução ao tópico que se pretende discutir.

O segundo capítulo escrutina conceitos técnicos relevantes para a compreensão dos sistemas GNSS, a técnica de interferência *jamming*, interfaces *Software Defined Radio* e os seus componentes principais. São ainda apresentadas duas interfaces SDR, HackRF One e ADALM-PLUTO, com potencial para resolver os problemas colocados por este projeto, bem como a compatibilidade teórica de cada um no projeto.

No terceiro capítulo são apresentados o estudo, desenvolvimento e procedimentos usados para análise e processamento de resultados.

O quarto capítulo acompanha o anterior, sendo que este aflora de uma forma mais técnica os resultados obtidos.

Por fim é feita uma conclusão no quinto capítulo e considerações futuras possíveis para a continuação do projeto, focando principalmente as possíveis nuances e dificuldades a encontrar e a apresentação de soluções que permitam colmatar as mesmas, motivando assim a continuidade desta investigação.

Adicionalmente, no apêndice A, está disponível um tutorial de configuração disponível adotado para operar com as interfaces SDR escolhidas. É de notar que, devido ao vasto número de interfaces, poderão ser necessárias configurações adicionais de *software* de forma a operar com qualquer interface que não é discutida aqui. A escolha de sistema operativo, bem como a distribuição a usar, no caso de sistema Linux é também um ponto fundamental na configuração das interfaces pois a mesma poderá não ter os pacotes funcionais necessários por defeito. Existe ainda o apêndice B onde são apresentados resultados preliminares adicionais provenientes da alteração de parâmetros disponíveis no programa de gestão e análise de sinais de radiofrequência. Por fim, estão disponíveis dois anexos com informação técnica respetivos ao recetor e antena GNSS, usados ao longo das sessões de teste.

1.4 Contribuições principais

A principal contribuição, presente neste documento, está relacionada com a pesquisa da tecnologia de *Software Defined Radio* por forma a possibilitar a integração em aplicações práticas, tais como monitorização de largura de banda de sinal em sistemas GNSS. O estudo é então suportado por uma interface SDR de baixo curso, *software* de código-fonte aberta que permita o controlo da interface e posteriormente o processamento de sinal auxiliado por *software* de computação numérica. De forma sintetizada, as contribuições para a tese são:

- Uso do ADALM-PLUTO, uma interface SDR portátil com ADC de 12-bit, DAC, cobertura RF entre os 325 MHz e 3.8 GHz e até 20 MHz de largura de banda [14]. A partir desta é possível a monitorização de sinais GNSS e recolha de dados para posterior processamento digital de sinais;
- Análise global do desempenho e caracterização de sinais GNSS. É necessária a análise do comportamento padrão para definir a operação *standard* e a caracterização correta de sinais GNSS;
- Avaliação do desempenho dos sinais inerentes aos sistemas GNSS sempre que ocorre alguma interferência de *jamming*. Com uma caracterização prática dos sinais padrão existe pesquisa a ser feita de forma a caracterizar a performance aproximadamente em tempo real do sistema GNSS sempre que é aplicada tecnologia de *jamming* para interferir com o sistema global;
- Análise global do desempenho de sinais *jamming*. Existindo vários tipos e técnicas de interferência *jamming*, este documento focar-se-á na aplicação da interferência do tipo *barrage*, [15], [16].

Capítulo 2

Análise do sistema GNSS e proposta de SDR

A constante aposta na pesquisa e integração de sistemas GNSS em várias áreas de interesse traduz-se, em prática, na aplicação de dispositivos mais eficientes a operar no ecossistema GNSS. Os mesmos, ao encontrarem-se em operação, podem sofrer interferências de foro intencional e malicioso, ou mesmo natural e/ou não intencional.

De forma a garantir a fiabilidade, robustez e eficiência deste tipo de tecnologias e serviços é necessária a aposta no desenvolvimento de soluções que classifiquem e mitiguem quaisquer formas de interferência que possam surgir. Assim, atendendo ao facto de a tecnologia SDR se encontrar no mercado e, atendendo às suas propriedades principais é teoricamente possível caracterizar padrões no comportamento de sinais GNSS e caracterizar qualquer interferência imposta no sinal dentro da largura de banda GNSS em análise e caracterizar também o seu modelo de acordo com a sua topologia.

Ao longo deste capítulo analisar-se-á então a tecnologia de SDRs, assim como as propriedades que, *à priori*, permitirão a recolha de informação relacionada com padrões comportamentais de sinais GNSS e possíveis topologias de interferência que ponham em causa o funcionamento normal das comunicações no seio do ecossistema GNSS, [1], [9], [10].

2.1 Teoria de GNSS

Os GNSS são sistemas de cálculo de tempo e posição que recorrem a uma ou mais constelações de satélites artificiais existentes na atmosfera do planeta, recetores GNSS e também sistemas que monitorizam a integridade do conjunto. A combinação dos três suporta a performance que é necessária para operações de navegação [17]. Atualmente, existem quatro sistemas GNSS que se encontram em operação e/ou desenvolvimento.

Global Navigation System foi o sistema de navegação global pioneiro e é explorado pelo Departamento de Defesa e Força Aérea dos Estados Unidos da América, [18], [19]. Este é baseado numa constelação de até 32 satélites, [18], [20], [21]. O projeto foi motivado pela necessidade de determinar a geo-localização num determinado ponto e tolerante a condições meteorológicas. A tecnologia encontra-se integrada em várias aplicações nos dias de hoje, nomeadamente aviação e topografia, entre outros, [21].

GLObal NAvigation Satellite System (GLONASS) é outro exemplo de sistema de navegação, desta vez sobre a exploração e desenvolvimento da *Commonwealth of Independent States* (CIS) [18], organização composta pela Rússia e governos outrora integrantes da antiga União Soviética, [22]. A constelação encontra-se aglomerada com 23 satélites em operação, [23].

O espaço aéreo europeu apoia-se no Galileo, constelação de 22 satélites operacionais [24] explorada pela *European Commission's Galileo Signal Task Force*.

Por fim, a República Popular da China encontra-se a explorar a sua própria constelação de 35 satélites de navegação operacionais [25] denominada BeiDou/Compass, [26], [17], [19].

Os sistemas mencionados são auxiliados por sistemas de correção diferenciais, integridade de parâmetros e dados da ionosfera de uma dada região, [17]. As principais em operação são as *Space-Based Augmentation Systems* ou *Ground-Based Augmentation Systems* (GBAS), [17]. Do primeiro sistema encontram-se em funcionamento a *Wide-area augmentation system* (WAAS), mantido pelo governo dos Estados Unidos da América e a EGNOS, [8], [5], [17], [19]. Existem ainda outros sistemas de correção em desenvolvimento, [17], mas, uma vez que o estudo rege-se no espaço aéreo europeu, os sistemas a serem analisados serão o GPS e Galileo, assim como os sistemas que os auxiliam.

2.1.1 Segmento espacial GNSS

A cobertura global para cálculo de posição e tempo é conseguida através do número satisfatório de satélites GNSS de forma a que quatro (ou mais) se encontrem simultaneamente visíveis em qualquer zona, [18], [19]. Os satélites são compostos por relógios atómicos, *radio transceivers*, computadores e equipamento auxiliar. Cada sinal proveniente de um satélite permite ao utilizador o cálculo da pseudodistância, caracterizada pela distância referente ao relógio local, R e o satélite. Cada mensagem *broadcast* ajuda também os recetores a calcular a sua geo-localização acima ou abaixo da linha de horizonte do planeta, [19].

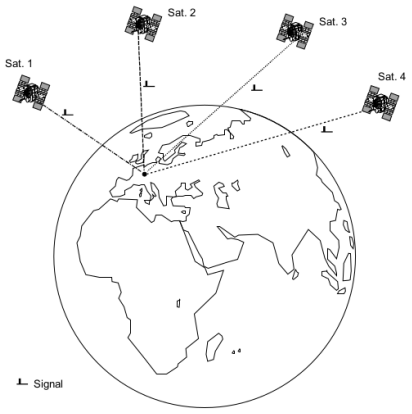


Figura 2.1: Quatro satélites necessários para determinar a posição do utilizador [18]

A constelação de satélites pertencente ao sistema GPS oferece uma cobertura global com pelo menos quatro satélites em simultâneo, numa dada área e com uma dada máscara de elevação, em graus, observáveis a qualquer altura do dia. Caso se diminua a máscara de elevação consegue-se aumentar o número de satélites visíveis e disponíveis na mesma área, [19].

Em comparação, o sistema europeu Galileo garante a mesma cobertura em condições semelhantes com 6 satélites visíveis e funcionais a qualquer utilizador, [19].

2.1.2 Segmento controlo GNSS

O segmento de controlo é responsável por tarefas como integração e manutenção do sistema, rastreamento de satélites, monitorização dos relógios dos satélites, tratamento de dados orbitais, sincronização do tempo *on board*, entre outros, [18], [19].

O segmento terrestre do sistema GPS consiste na estação de controlo principal, estações de monitorização e antenas terrestres. As principais funções do segmento são o rastreamento dos satélites para determinação da órbita e de tempo, sincronização temporal dos satélites e *upload* de dados de navegação para os satélites, [19]

O segmento terrestre europeu, em análise direta é mais complexo, mas pode-se resumir a dois grandes elementos: segmento de controlo terrestre encarregue de controlar e

manter a constelação de satélites e o segmento de missão terrestre que opera o controlo do sistema de navegação, determinação de integridade e serviços de disseminação, [19].

2.1.3 Segmento utilizador GNSS

Este segmento pode ser separado em categorias como utilizadores e tipos de recetor. Uma vez que a maioria dos sistemas de navegação são mantidos pelos departamentos militares, dispõem de várias bandas onde podem ser feitas as transmissões de dados sensível, separando assim o uso militar do uso civil. Esta divisão impede civis e utilizadores não autorizados de aceder a todos os sinais, bandas e/ou serviços oferecidos no ecossistema GNSS, [2], [19], [27].

2.1.3.1 Recetor GNSS

De acordo com [18], um recetor GNSS aglomera vários componentes que, no seu conjunto tornam a receção e processamento de sinais GNSS possíveis:

- Antena: Encarregue de receber sinais fracos provenientes dos satélites de navegação;
- LNA: Um amplificador de baixo ruído que amplifica o sinal captado pela antena, tentando manter a relação de sinal-ruído constante;
- Filtro RF: Este filtro atenua interferências existentes ao sinal original;
- RF *stage*: O sinal é mixado com a frequência do oscilador local. O sinal IF filtrado é depois maontido a um nível constante no que toca a amplitude e é digitalizado a partir de um *Amplitude Gain Control* (AGC);
- Filtro IF: O sinal é filtrado com o uso de uma largura de banda superior (MHz);
- Processador Sinal: Correlação e descodificação de diferentes sinais de satélite;
- Controlador: A informação reunida do processador de sinal é usada para determinação de posição, tempo, velocidade e outros parâmetros.

2.1.4 Sinais GNSS

A subsecção que se segue analisa em pormenor dois dos sistemas de navegação global existentes em inter-operação no espaço económico europeu: o sistema GPS e o Galileo.

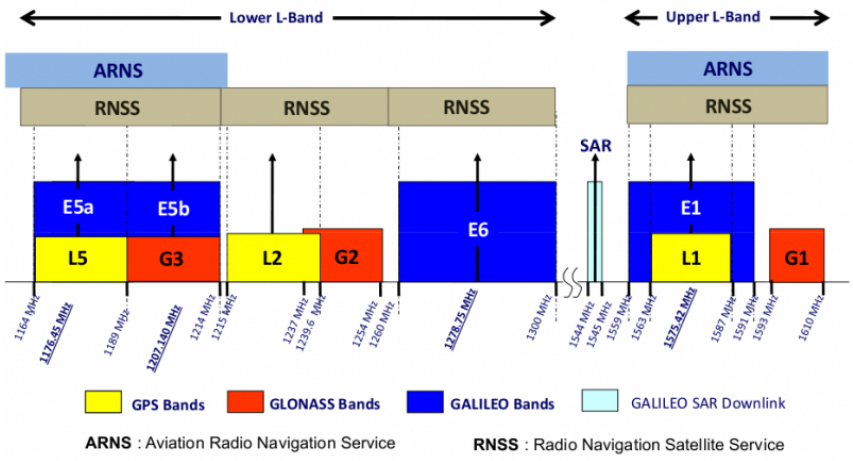


Figura 2.2: Comparação entre bandas de três sistemas de navegação existentes, [0]

2.1.4.1 *Global Positioning System*

O sistema GPS opera dentro de três bandas: bandas L1, L2 e L5. Na primeira estão disponíveis 30 MHz de largura de banda e a frequência da portadora são 1572.42 MHz. A segunda também dispõe de 30 MHz de largura de banda e a portadora opera nos 1227.60 MHz. A última dispõe de menos largura de banda para operação (aproximadamente 26 MHz) e a portadora opera nos 1176.45 MHz. Presentemente, o sistema fornece dois tipos de serviço: civil, conhecido como *Standard Positioning Service* (SPS) e outro disponível apenas a utilizadores autorizados, nomeadamente unidades militares norte-americanas, designado *Precise Positioning Service* (PPS), [2], [19], [27].

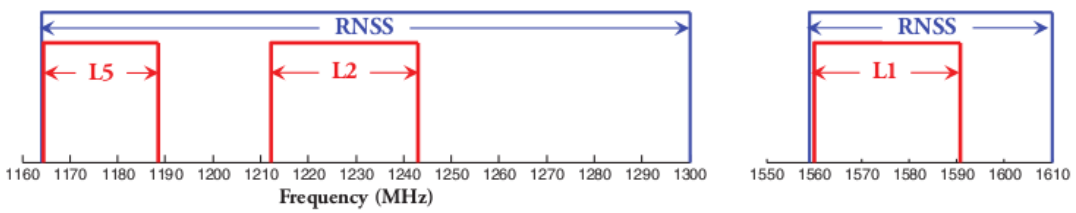


Figura 2.3: Bandas de frequência operacionais do sistema GPS, [27]

2.1.4.2 Galileo

A operação do sistema de navegação Galileo assenta também em 3 bandas de frequência operacionais. Elas são as bandas E1, E6 e E5. A primeira banda conta com 30 MHz de largura de banda e a portadora opera nos 1575.42 MHz. A segunda banda dispõe de 40 MHz de largura de banda e a sua portadora opera nos 1278.75 MHz. Por último, a banda E5 conta com 50 MHz de largura de banda, com a portadora a operar nos 1191.795 MHz. Esta banda, em particular, encontra-se dividida em duas sub-bandas: E5a e E5b. Estas operam com 25 MHz de largura de banda e têm portadoras com frequências 1207.12 MHZ e 1176.45 MHz, respetivamente.

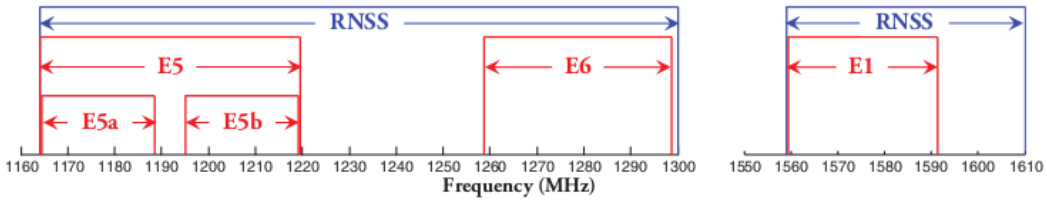


Figura 2.4: Bandas de frequência operacionais do sistema Galileo, [27]

2.2 Imparidades nos sistemas GNSS

De acordo com [2], existem três classes de imparidades na banda de radiofrequência que comprometem o desempenho de um sistema de navegação. A primeira classe, interferências, é caracterizada por qualquer sinal de radiofrequência recebido por um recetor GNSS que não é desejável. Nesta, as interferências intencionais são vulgarmente conhecidas por *jamming* e são o foco desta dissertação, uma vez que se pretende saber com mais detalhe as influências deste tipo de perturbação nos sinais GNSS recebidos pela interface *software defined radio* usada para o estudo.

Os fenómenos de *multipath* e cintilação ionosférica, segunda e terceira classe de imparidade serão discutidos, respetivamente, de uma forma breve nas secções seguintes, sendo que estas poderão também incidir diretamente nos testes e resultados obtidos e discutidos mais adiante.

2.2.1 *Multipath*

O fenómeno de *multipath* é caracterizado pela receção de várias réplicas do sinal original, [2]. Este ocorre principalmente em ambientes urbanos, uma vez que o sinal pode ser captado diretamente pelo recetor, ou por reflexões vindas de edifícios, transportes ou outros objetos. Estas cópias do sinal transmitido viajam em trajetórias distintas pelo que é provável que tenham potências de sinal também distintas, [28].

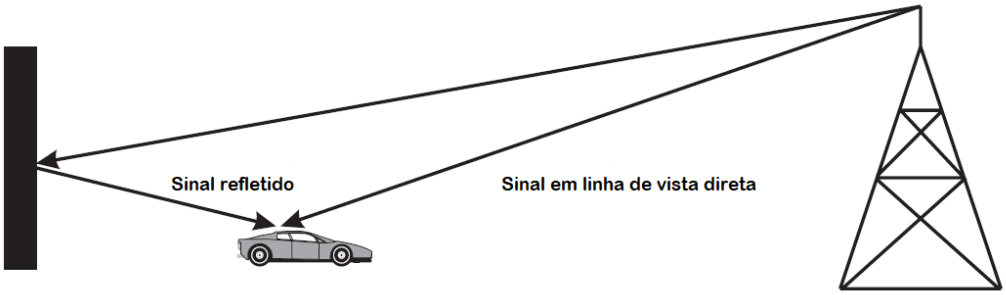


Figura 2.5: Fenómeno de *multipath*, [28]

A influência deste fenómeno depende do atraso de tempo entre a receção do sinal direto e do sinal refletido, assim como a potência e a fase do sinal refletido relativo ao sinal direto. O recetor, usando 4 ou mais satélites para a determinação da sua posição e velocidade irá enfrentar vários canais de *multipath* visto que são réplicas de cada um dos sinais transmitidos. Isto constitui erros no cálculo da sua posição, velocidade e tempo.

No sentido prático, este estudo será tolerante a este fenómeno porque analisa-se o espetro de amplitude de sinais GNSS recebidos numa dada largura de banda e não o conteúdo destes, não sendo assim sensível ao fenómeno de *multipath*.

2.2.2 Cintilação ionosférica

A atmosfera é composta por inúmeras camadas que contribuem para a sobrevivência e manutenção da vida no planeta. Algumas delas conseguem sofrer ionização através da radiação solar. A ionização na camada resulta em radicais livres e eletrões livres e estes consequentemente atrasam os sinais atravessados. Irregularidades causadas pela densidade de eletrões livres presentes nestas camadas interferem também nos sinais transmitidos, causando interferências construtivas ou destrutivas em cada sinal. Este fenómeno é frequente e severo na região equatorial, após o pôr-do-sol, [2], [29], [30].

2.2.3 Interferências

Os sistemas GNSS realizam a intra comunicação através de protocolos de comunicação sem-fios. Posto isto, esta estrutura fica vulnerável a interferências que possam existir na banda, sejam elas intencioais, ou não. A vulnerabilidade afeta diretamente questões relacionadas com a precisão do sistema de navegação e, no pior caso, pode levar à perda completa de sinal pelo recetor GNSS. Assim, pode ser pretendido degradar o sinal de forma maliciosa através de técnicas que visam implementar ruído dentro de uma dada largura de banda, de um dado espetro, ou mesmo através de modulação de sinais. A estas técnicas são chamadas *jamming*.

Um *jammer* é um dispositivo capaz de interferir com inúmeros sinais, nomeadamente sinais usados em sistemas GNSS, uma vez que a natureza de comunicação nestes sistemas são sem-fios, o que torna estas estruturas vulneráveis a interferências maliciosas, [15]. Dependendo do que for necessário, este consegue reproduzir várias técnicas de *jamming*. Uma delas, *barrage jamming*, é a técnica mais simples de reproduzir. Esta caracteriza-se pela transmissão de energia em forma de ruído na porção de largura de banda alvo. De uma forma essencial e básica, esta técnica consiste em aumentar o nível de ruído no recetor GNSS, degradando toda a operação de receção de sinais GNSS efetuada pelo recetor, [15].

2.3 Software Defined Radio

2.3.1 Aspetos principais do *Software Defined Radio*

O rápido desenvolvimento da tecnologia moderna permite a configuração, ou combinação de vários componentes de *hardware* numa interface SDR. Dispõe, assim, de uma série de *hardware* de radiofrequência que permite lidar com a maioria dos sistemas RF presentes na atualidade, [31]. É também capaz de gerir inúmeras funções de natureza complexa e ainda assim efetuar transmissão e receção de dados ao mesmo tempo, [31]. A componente de *software* e/ou lógica é alcançada através de processadores de sinal digital (DSP), processadores multifunções (GPP) e também a partir de *Field Programmable Gate Arrays* (FPGAs), [32], [33]. Quando se fala de processamento de sinal digital, componentes como conversores de analógico-digital (ADC) e digital-analógico (DAC) são importantes para as várias aplicações práticas, especialmente em tecnologia sem-fios. Graças a esta flexibilidade, [34], estas interfaces conseguem "moldar-se" e adaptarem-se para responder de forma dinâmica a vários desafios onde sejam compatíveis. De acordo com [35], os SDRs são capazes de atingir várias características dinâmicas, entre as quais:

- Largura de banda do canal: O *software* presente nas interfaces permite ter filtros digitais que, atendendo ao *standard* que se pretende analisar (AM, CDMA, etc), conseguem ser reprogramados e adaptados, indo ao encontro das necessidades do *end-user*. Adicionalmente, esta particularidade permite ainda aplicar filtros que não existem no domínio analógico, [35];

- Ritmo de dados: As interfaces SDR tem um rádio com ritmo variável que consegue recolher, analisar e processar vários *standards* existentes com ritmos de dados também variáveis;

- Modulação: A compatibilidade da tecnologia SDR com os vários *standards* permite processar e reproduzir diferentes formas de modulação. Além disso, muitos deles têm componentes físicos e digitais para transmissão/receção de dados e conseguem realizar o processamento dos vários parâmetros distintos ao mesmo tempo;

- Conversão de ganho.

Por fim é também necessário adicionar um *transceiver* para melhorar uma ou mais das características supra mencionadas, [35].

2.3.2 Hardware SDR

Uma vez que é pretendida a análise de sinais no espetro da radiofrequência, bem como a largura de banda em torno da mesma, é também importante a escolha de componentes físicos que, no seu conjunto, tornem a função de análise pretendida alcançada. Ao longo deste documento foi sugerido o uso de *Software Defined Radios*, quer pela sua flexibilidade em realizar múltiplas tarefas, quer pelo seu custo de venda que os torna mais atrativos para alcançar o que é pretendido. Mesmo que uma só interface não consiga gerir toda a operação, é possível interligar vários para fazer análise de sinais e alcançar o desafio pretendido, [36]. Torna-se então crucial a escolha de componentes que sejam capazes de lidar com as tarefas pretendidas. Algumas delas conseguem ser substituídas à medida que o projeto em mão necessite de requisitos diferentes, como é o caso de uma antena que é montada normalmente fora da interface. No entanto, existem muitos outros componentes que se encontram incorporados no interior da interface e a substituição de um destes, do ponto de vista de um entusiasta na área, não é possível. Há que ter em atenção o seu conjunto de forma a perceber se tudo irá trabalhar de forma a alcançar a análise e processamento de sinais GNSS.

A seleção da antena constitui um aspeto crucial no manuseamento de tecnologia de *software defined radio*. Boa parte do ganho consegue ser perdido assim que o sinal captado atravessa a antena e chega ao conversor ADC, [36]. Quando é requerido, pode-se adicionar um amplificador de baixo ruído para atingir ganhos mais significativos. A seleção requer também que a antena seja capaz de operar no espetro de frequências desejado, [35].

O *mixer* RF é usado para converter o sinal RF numa frequência intermédia IF que seja processada, [35], [36]. Este processo não deve de forma alguma comprometer o espetro-alvo. *Mixers* RF ativos podem adicionar ao ruído captado, sendo este caracterizado pelo seu comportamento em gráfico, denominado *noise figure*, [36].

O oscilador local está presente para recolher o sinal IF próprio depois de exposto ao *mixer*, [35], por forma a ter estabilidade para atenuar ruído de fase quando combinado com o *noise floor*. A primeira forma de ruído, a de fase, pode ser vista como perturbações aleatórias na fase do oscilador, [36]. Finalmente, o oscilador deverá ser variável na frequência e programável através de *software*.

O controlo de ganho automático (AGC) é necessário para assegurar o máximo de ganho sem introduzir distorção e garante o mínimo de ruído introduzido no sistema, [36]. Embora seja comum incluir este componente no conjunto do amplificador IF, não só desempenha o seu trabalho de forma pretendida como ainda atenua ruído que venha do amplificador, mantendo o *noise figure* constante, [35], [36].

O conversor analógico-digital deve ser dimensionado para amostrar o sinal ao dobro, ou superior, face à sua largura de banda, atendendo ao teorema de Nyquist. A existência de vários *standards* obrigam a um espetro dinâmico. Isto significa que, na prática é preferencial a possibilidade de mudar a quantidade de sinal a amostrar de forma dinâmica. Visto que se trata de conversão analógica para digital, a resolução do conversor é um fator importante a considerar. Quanto maior for o número de bits no conversor ADC, maior será a resolução deste. Torna-se, assim, aconselhável a escolha de uma interface que inclua o conversor com melhor resolução.

A FPGA é uma mais valia no conjunto, dado que consegue lidar bem com amostragens altas e ritmos binários. Consegue também ser programada para inúmeras funções que sejam necessárias ao utilizador, [35]. O processador de sinal digital (DSP) é necessário para pormenores como equalização e deteção do sinal, entre outros.

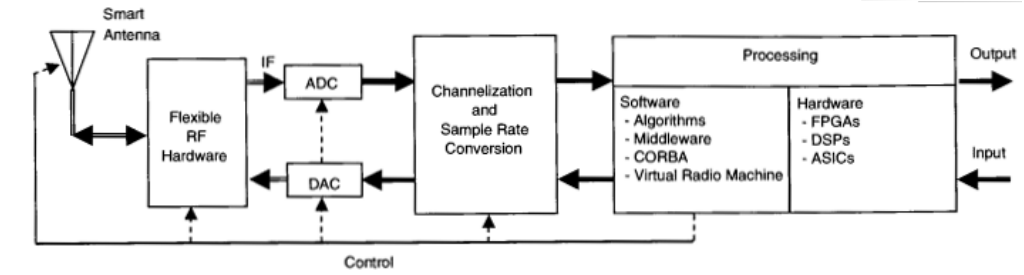


Figura 2.6: Diagrama de blocos de um rádio *software*, [36]

2.3.2.1 Great Scott Gadgets HackRF One

HackRF One (figura 2.7) é uma interface SDR produzida e vendida pela *Great Scott Gadgets* capaz de transmitir ou receber sinais sem-fios. De acordo com [37], encontram-se abaixo discriminadas as principais características de interesse para o projeto desta interface:

- Frequências de operação desde 1 MHz a 6 GHz de frequência;
- Até 20 MHz de largura de banda;
- Conversor ADC de 8 bits;
- Interface compatível com inúmeros softwares disponíveis para lidar com SDRs, nomeadamente o GNU Radio, SDR#, entre outros;
- Ligação SMA fêmea para antena;
- Porta de ligação USB 2.0 de alta velocidade.

(a) HackRF One [37]

(b) Diagrama de blocos simplificado [37]

Figura 2.7: Interface HackRF e diagrama de blocos correspondentes

Esta interface foi uma das escolhidas para teste devido à sua aquisição por parte da Bluecover, que se encontrava em colaboração ativa com este projeto à data de escrita do documento. Segundo o que foi discutido, esta interface cumpria os requisitos necessários para deteção de sinais GNSS, bem como para deteção de interferências ao longo da banda L1, banda pertencente ao sistema de navegação GPS. Por fim, a popularidade da interface entre a comunidade influenciou positivamente a aquisição do HackRF One.

2.3.2.2 Analog Devices ADALM-PLUTO

O ADALM-PLUTO (figura 2.8) é uma interface SDR produzida e vendida pela *Analog Devices* e que tem foco na comunidade científica e educacional, nomeamente no ensino universitário. A empresa afirma que o objetivo principal na produção e venda deste produto passa pela disponibilidade de uma plataforma de baixo custo direcionada para a comunidade *Science, Technology, Engineering, and Mathematics* (STEM) e que proporcionará a aquisição de conhecimentos e experiência prática com interfaces SDR, [31].

A interface encontra-se equipada também com várias características também interessantes e com potencial para o projeto. São elas:

- Frequências de operação desde 325 MHz a 3.8 GHz de frequência;
- Até 20 MHz de largura de banda;
- Conversor ADC de 12 bits;
- Interface compatível com inúmeros softwares disponíveis para lidar com SDRs, nomeadamente o GNU Radio, Matlab, SDR#, entre outros;
- Ligação SMA fêmea para antena;
- Portas de ligação USB 2.0 de alta velocidade.

A interface foi disponibilizada pela secção de eletrónica do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores e o objetivo passava por analisar no terreno ambos os dispositivos de forma a entender se o conjunto de dados recolhidos eram similares e qual a interface mais acertada para a investigação.

(a) ADALM-PLUTO [14]

(b) Diagrama de blocos simplificado [14]

Figura 2.8: Interface ADALM-PLUTO e diagrama de blocos correspondente

2.3.3 Estado de Arte de dispositivos SDR

No âmbito de *Software Defined Radio* existem alguns estudos para englobar estes em vários projetos. Face a soluções existentes no mercado, o facto de um dispositivo SDR dispor de vários componentes que podem ser controlados por *software* torna a tecnologia deveras apelativa. Para além disso, uma boa parte das interfaces conhecidas na comunidade de radiofrequência têm preços de aquisição consideravelmente baixos quando comparados às soluções que, neste caso, se encontram exclusivamente desenhados para análise e processamento de sinais GNSS. Outro fator determinante é a disponibilização do código-fonte que permite manusear as interfaces. As entidades responsáveis pela produção e distribuição das interfaces SDR mais populares disponibilizam o código-fonte de forma a permitir que os utilizadores alterem as características-padrão das interfaces. Novamente, o caso da extensão das capacidades do ADALM-PLUTO, [12] é uma evidência forte das potencialidades que estes dispositivos poderão oferecer no futuro, bastando apenas o investimento correto nos recursos necessários para aprender a lidar com os mesmos.

No caso deste projeto, depois de recolhidos vários elementos teóricos bem como testemunhos do uso de ambos as interfaces decidiu-se focar a atenção num só dispositivo. A tabela 2.1 escrutina, de forma resumida, as principais características das duas interfaces em estudo.

Tabela 2.1: Comparação das interfaces SDR propostas para o projeto

Características/Interface	HackRF One	ADALM-PLUTO
Frequência operação [MHz]	1 - 6000	325 - 3800
Largura de banda [MHz]	Até 20	Até 20
Máxima amostragem possível[MSPS]	Até 20	Até 61
Bits ADC [Adimensional]	8	12
Existência FPGA	Não	Sim
Caixa	Plástico	Plástico
Integração GNU Radio	Sim	Sim
Integração MATLAB	Não	Sim
Custo aquisição [€]	Aprox. 285	Aprox. 135

Analisando a tabela ponto a ponto, verifica-se ambas as interfaces oferecem frequências de operação teóricas que permitem a análise da banda L1 do sistema de navegação GPS. Embora a segunda tenha um intervalo de frequências menor, segundo [12] é possível estender a banda de operação. *À priori*, tal não deverá ser necessário, mas uma vez que a alteração não afeta negativamente a eficiência do dispositivo SDR, é algo que contribui para a escolha do ADALM-PLUTO. De qualquer forma é necessário ter em atenção a antena a ligar à interface. Esta deverá conseguir receber sinais alocados na frequência usada para os sistemas GNSS.

A largura de banda de operação é, em ambos, 20 MHz. Este valor é satisfatório para a investigação, uma vez que cobre 66% da largura de banda disponível para operação do sistema GPS na banda L1.

A conversão analógico-digital é algo favorável no caso da segunda interface visto que o maior número de bits neste aumenta a resolução na conversão de sinais analógicos captados pelo dispositivo SDR.

A existência da FPGA é uma característica crucial na escolha da interface. A partir desta é possível efetuar programação de tarefas para processar os sinais GNSS, suprimindo o uso de um computador para receber e processar os dados recolhidos.

A caixa onde as interfaces se encontram alojadas é de plástico e não tem qualquer revestimento que promova *shielding*, o que pode implicar alguma interferência no sistema e menor precisão nos resultados obtidos.

Entre as interfaces comparadas, o ADALM-PLUTO é o único que dispõe de integração com o software matemático MATLAB. A recolha e processamento de dados torna este aspeto fundamental pois a ferramenta é fiável, conhecida e usada na comunidade científica. Mesmo que ela não seja necessária, o facto de existir integração de *software* para manusear o dispositivo poderá ser necessário no futuro.

Por fim, graças a um pequeno estudo de mercado efetuado, notou-se que o ADALM-PLUTO encontra-se com preço de venda ao público consideravelmente mais baixo que o HackRF One. Não foi encontrado, em momento algum, o primeiro dispositivo novo a ser vendido num preço tão competitivo. A falta de informação técnica do HackRF foi outro fator diferenciador na escolha do dispositivo.

Existe ainda outra opção presente no mercado das interfaces SDR cuja suporte pela comunidade é forte e famosa. Fala-se, assim, do bladeRF, produzido e comercializado pela Nuand. Esta interface encontra-se em constante atualização e apresenta várias soluções num intervalo de preços também ele variado. Apresenta também inúmeras características aliciantes para um espetro de projetos grande, tais como *modems* RF, um *picocell* GSM e/ou LTE e ainda recetores GPS, [38]. Das várias características apresentadas enunciam-se as seguintes:

- Frequências de operação desde 300 MHz a 3.8 GHz de frequência;
- Até 120 MHz de largura de banda;
- Conversor ADC de 12 bits;
- Interface compatível com inúmeros softwares disponíveis para lidar com SDRs, nomeadamente o GNU Radio, Matlab, SDR#, entre outros;
- Ligação SMA fêmea para antena;
- Portas de ligação USB 3.0 de alta velocidade;
- Até 40 MSPS;
- FPGA totalmente programável

Uma vez que esta família de interfaces encontra-se num intervalo de preço de aquisição superior (superior a 450 euros), a mesma servirá apenas de comparação direta com as características teóricas do ADALM-PLUTO, assim como resultados obtidos entre ambos. A secção de Telecomunicações dispensou o bladeRF x40 para uma sessão, de forma a comparar os resultados obtidos com o PLUTO, nas mesmas condições de teste. Conclusões desta bateria serão apresentadas mais adiante, no capítulo de análise de resultados.

Capítulo 3

Procedimentos com os SDR propostos

O presente projeto tem como objetivo o estudo e implementação de interfaces SDR de baixo custo, existentes no mercado, para análise e processamento de sinais GNSS e posterior mitigação de anomalias existentes durante o tempo de operação. Indo um pouco mais longe, passa pela análise de interferências maliciosas no sistema GNSS e, assim, entender comportamentos padrão quando estas existem e a sua duração. De forma prática, isto permite a aeroportos procurarem a fonte de problema e mitigar a anomalia o mais depressa possível para não comprometer a segurança no aeroporto. Em suma, a investigação foca-se na análise de interferências de *jamming*, ao longo da banda L1 do sistema de navegação GPS.

A investigação foi realizada com a colaboração da Bluecover, empresa portuguesa que forneceu a antena e recetor GNSS, assim como o local e condições para os várias baterias de teste.

3.1 *Software* utilizado

Atendendo à coordenação que teve de ser feita para integrar as duas interfaces SDR propostas para teste e comparação direta, o facto das interfaces serem controladas por *software* em todo o momento operacional, foram tidas algumas considerações que influenciaram diretamente toda a operação de análise de sinais GNSS. Algumas passaram pela escolha do sistema operativo do computador, programa que permite a interação direta com a interface, bibliotecas a instalar e usar, entre outros. Ao longo deste capítulo serão descritas os fatores principais ponderados para a investigação, bem como uma explicação breve da decisão tomada tendo em conta a influência de cada componente.

3.1.1 Sistema operativo

No que concerne à escolha do sistema operativo a usar, o interesse principal passava apenas pela estabilidade e possível suporte ao programa que realizava a comunicação com a interface SDR.

O sistema operativo escolhido foi o Linux, baseado em Unix. A escolha passou simplesmente por todo o suporte disponível, quer para a instalação de *drivers* disponibilizadas pela Analog Devices, quer para o programa GNU Radio. Além disso, o software matemático de computação MATLAB encontrava-se disponível para ambos os sistemas operativos. Depois de uma pesquisa exaustiva concluiu-se que a formação e uso de um sistema operativo Linux seria a escolha mais acertada. Atendendo ao facto de existirem inúmeras distribuições disponíveis, o fator diferenciador para a escolha passou pelo suporte existente para distribuições baseadas em Debian e também devido a conhecimentos prévios em distribuições baseadas no sistema mencionado. Assim, a distribuição escolhida e usada para operação foi o Linux Mint.

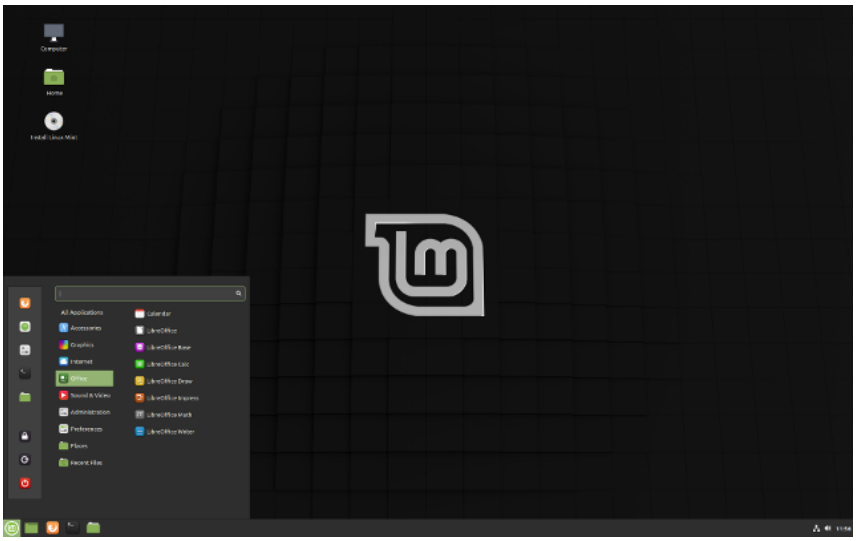


Figura 3.1: Distribuição Linux Mint versão 19.3

3.1.2 Programas disponíveis

A escolha do programa a usar para análise de sinais GNSS foi influenciada em parte pelo investimento feito pela empresa no HackRF One. A inexistência de suporte e impossibilidade de operação oferecida pelo de *software* da MathWorks para operar com o MATLAB condicionou parte da investigação. O impacto positivo deste software na comunidade científica é conhecido e a falta de possibilidade de correlacionar dados retirados diretamente a partir do MATLAB obriga uma abordagem diferente na forma como a investigação seria conduzida. Além disso, o preço de uma licença para trabalhar com o MATLAB apresenta um custo acrescido para uma empresa que podia revelar-se irrelevante para a fase inicial.

3.1.2.1 GNU Radio

GNU Radio é uma ferramenta gratuita de código-fonte aberta disponível à comunidade ligada a *software radio* e gerida pela GNU Radio project. Esta ferramenta permite a aplicação e desenvolvimento de blocos de processamento de sinal, posteriormente implementados em rádios geridos por *software* para investigação de protocolos de comunicação sem-fios e sistemas globais existentes e em operação, [39].

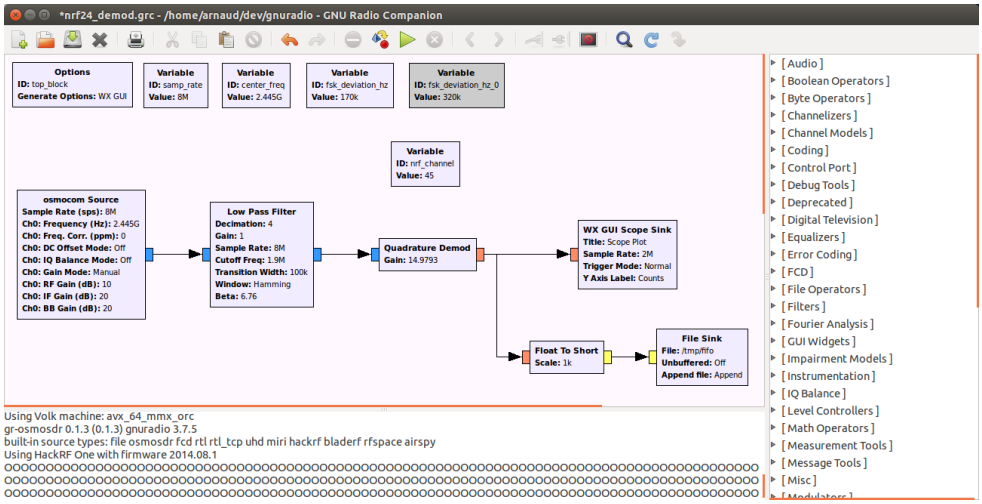
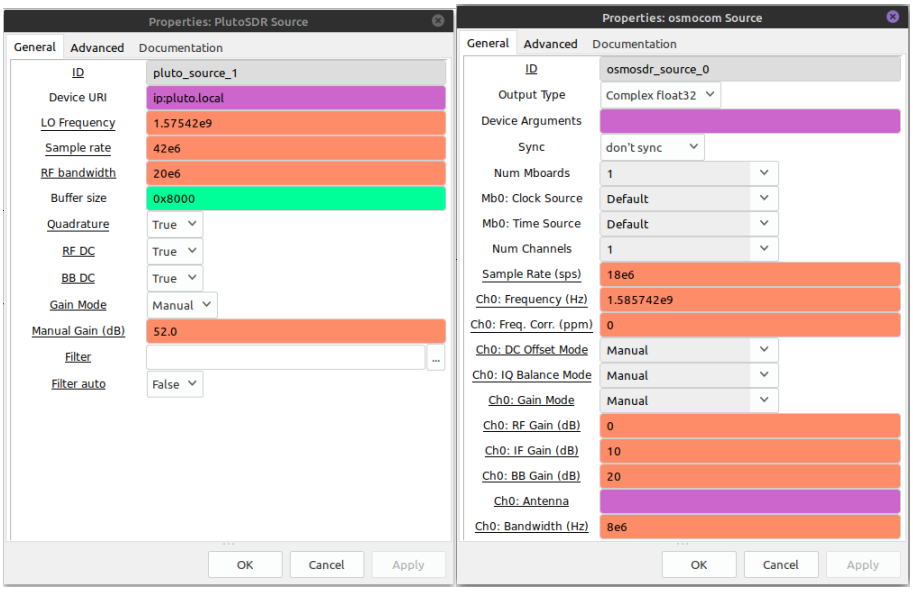


Figura 3.2: GNU Radio

Através da integração de pacotes no sistema operativo Linux foi possível integrar e operar com sucesso ambas as interfaces propostas. No entanto, assim que existe contato com os blocos que controlam cada interface revela-se a falta de standardização no desenvolvimento dos blocos. A forma como o bloco se encontra desenvolvido e aprimorado é apenas influenciado pelas contribuições prestadas pela comunidade, visto que é um código-fonte aberto passível de ser alterado conforme entendido num decurso de um ciclo de desenvolvimento. A inexistência de suporte técnico para as propriedades existentes no bloco tornou-se outro inconveniente durante a investigação porque não existia forma de confirmar se a propriedade a alterar está relacionada com o nome da mesma.



(a) Propriedades do ADALM-PLUTO (b) Propriedades do HackRF

Figura 3.3: Propriedades disponíveis para operação com interfaces SDR propostas

3.1.2.2 IIO Oscilloscope

Esta foi mais uma ferramenta usada no decurso da investigação e é exclusiva à *Analog Devices* e, por sua vez, ao ADALM-PLUTO. Esta vem incluída dentro da própria interface e é uma aplicação GUI que permite interagir com a interface. A aplicação suporta o desenho de gráficos e captura de dados em tempo real e com quatro variantes diferentes: domínio em tempo, domínio em frequência, constelação e correlação cruzada. Por fim é possível alterar configurações, desde que estas sejam suportadas pelas interfaces, [40].

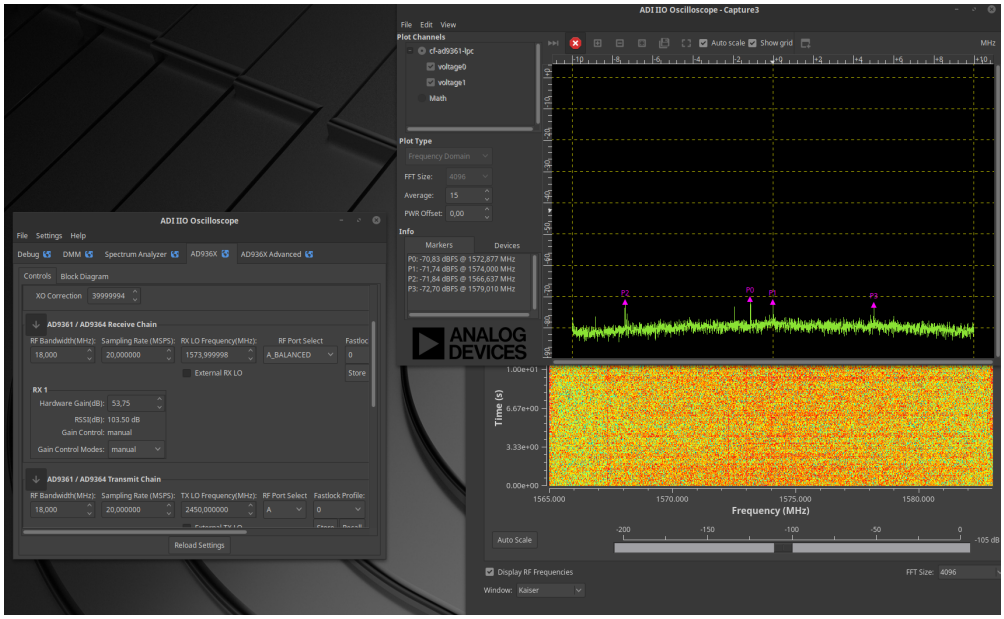


Figura 3.4: GNU Radio

3.2 Cenário para a sessão de testes

Foram realizadas quatro reuniões com os colaboradores da Bluecover e com os professores orientadores deste projeto. As duas primeiras focaram-se principalmente na introdução da empresa, presença e serviços disponibilizados no mercado de trabalho. Foi também feita a introdução e contextualização do problema prático que gerou o interesse para a investigação e desenvolvimento desta dissertação. As restantes serviram para atualizações e discussão de problemas que foram existindo ao longo das várias sessões de teste.

No que toca a testes realizados foram contabilizados oito no total, dado que o primeiro momento foi apenas para conhecer as condições de teste e familiarização com o problema proposto.

De acordo com informação fornecida pelos colaboradores da Bluecover, sessões de teste desta magnitude em área de aeroporto envolvia burocracia e tempo, fatores considerados desnecessários nesta fase inicial da investigação. Assim, foram estudados alguns locais e foi decidida uma área de teste no concelho de Odivelas, no distrito de Lisboa, favorável à realização de testes de comportamento e desempenho do recetor GNSS e das interfaces SDR quando confrontados com um dispositivo que realizava uma técnica básica de *jamming*. Tais condições eram:

- Espaço suficientemente aberto, pouco sensível a fenómenos de *multipath* e com linha de vista para o céu desimpedida;
- Altitude superior comparada com a zona de sede da empresa (Campo Grande, distrito de Lisboa);
- Zona suficientemente longe do aeroporto General Humberto Delgado.

A antena, PolaNt Choke Ring B3/E6 encontrava-se no espaço aberto e com linha de vista para o céu desimpedida. Era depois ligada ao recetor GNSS PolaRx5S, apoiado no interior de um veículo automóvel que fornecia a corrente de alimentação a estes. As interfaces SDR eram ligadas ao recetor através de extensões de cabo SMA e, no fim, um computador conectado a estas através das interfaces e cabos USB 2.0 de alta velocidade que realizava a recolha e pós-processamento de dados.

Todas as sessões de teste foram feitas em dia de sol com céu desimpedido. Foi proposto o estudo e sessões de teste em dias cuja meteorologia apresentasse condições adversas, mas visto que as interfaces SDR analisavam apenas a influência direta, em termos de domínio de frequência, de *jamming* num recetor GNSS, tais condições não revelavam interesse para o estudo porque não influenciavam os resultados. No entanto, caso fosse analisado o conteúdo de sinais GNSS recebidos era esperada uma influência direta na performance das interfaces.

O intervalo de tempo entre sessões foi curto porque a empresa não era proprietária do recetor e antena GNSS usados e o período acordado para utilização destes encontrava-se expirado no momento em que a primeira reunião para proposta de dissertação foi feita. Estes pertencem à ANA, Aeroportos de Portugal e mediante acordo foram dispensados à empresa para fins de investigação. Assim, para colmatar esta falha foi feito o maior número de testes possível no intervalo de quatro meses.

Figura 3.5: Veículo que alimentava os dispositivos usados para as sessões de teste

3.2.1 Dispositivos utilizados para as sessões de teste

A antena e o recetor usados nas sessões são produzidos e vendidos pela Septentrio, empresa em operação no mercado de sistemas de navegação com especialização em recetores de navegação GNSS, precisos, com erros na ordem de decímetros e/ou centímetros.

3.2.1.1 Antena PolaNt Choke Ring B3/E6

A antena suporta frequências para todos os sistemas de navegação em operação e/ou em estado de desenvolvimento, ganho alto, baixa *noise figure* e tem integrados amplificadores de baixo ruído. A informação técnica encontra-se no anexo I.1.

(a) Antena usada para teste

(b) Antena PolaNt Choke Ring B3/E6

Figura 3.6: Antena disponível durante as sessões de teste

3.2.1.2 Recetor PolaRx5S

O recetor PolaRX5S apresenta inúmeras características relevantes para o estudo de sinais GNSS. Desde a capacidade de leitura de sinais de qualquer sistema de navegação existente, tem acesso a informação a tempo real de nuances que poderão afetar a performance de um sistema GNSS. Descrito no capítulo 2, uma das imparidades do sistema GNSS é o efeito da cintilação ionosférica na degradação do sinal GNSS. Este recetor faz o estudo dos índices em todas as bandas de frequência pertencentes ao ecossistema GNSS. Outra nuance interessante deste recetor é dispor de inteligência que permite mitigar interferências como *jamming* no sistema. Entre outras características, é importante mencionar que este sistema tem incorporado a sua própria interface GUI e esta pode ser acedida a partir de um *browser* de internet, suprimindo a necessidade de se usar um sistema operativo próprio para operação. A informação técnica deste encontra-se no anexo I.2.

(a) Recetor (à esquerda, coberto) a ser utilizado durante a sessão de teste

(b) Recetor

Figura 3.7: Recetor PolaRx5S

A este eram ligados as interfaces SDR a partir de uma ligação SMA. Note-se que, para as duas interfaces SDR serem ligadas ao mesmo tempo, foram usadas várias extensões de cabo assim como associações "T". Estas eram passivas e afetavam de forma direta o ganho do sinal ao chegar às interfaces SDR com atenuação de sinal.

3.2.2 Procedimentos

Cada conjunto de testes tinha uma duração útil de nove minutos, separados em três intervalos de três minutos. Cada intervalo respeitava uma condição específica e era distinto dos outros dois, com o intuito de recriar vários cenários naturais e/ou intencionais onde a interferência pudesse ocorrer. É importante notar que em qualquer e/ou fase de testes, as condições do meio não eram alteradas, a não ser a localização relativa do dispositivo de interferência que mudava apenas na terceira fase de testes. Quer-se com isto dizer que a antena bem como o recetor GNSS e os dispositivos SDR estavam no mesmo sítio em todos os testes. O dispositivo de interferência, em qualque fase de teste, embora em movimento

na terceira fase, era mantido à mesma altura do chão e à mesma altura que a antena de receção de sinais GNSS. No final, numa sessão de testes equivalia a 3 conjuntos de testes, totalizando nove testes com três comportamentos diferentes de *jamming*.

Posto isto, os testes seguiam a seguinte estrutura:

- A primeira fase era composta por intervalos intercalados de *jamming* de trinta segundos. A esta fase era designada *jamming* persistente;
- A segunda fase era composta por intervalos intermitentes de *jamming* (aproximadamente três segundos). A esta foi designada a fase de *jamming* intermitente;
- A terceira e última fase tinha em conta a distância e não o fator temporal da interferência a ser imposta no sistema geral.

Na primeira fase de testes, o colaborador da Bluecover encontrava-se a interferir com o sistema, com o seu dispositivo de *jamming* a uma distância próxima da antena (aproximadamente entre cinco a sete metros de raio da antena), isto quando comparado com a última fase de uma bateria de testes.

A segunda fase era realizada com o colaborador exatamente no mesmo sítio onde estava na primeira fase e, nesta, o colaborar interferia com o sistema de forma intermitente.

Na terceira e última fase, o início do teste era feito a uma distância consideravelmente longe do sistema, por forma a não interferir com o sistema GNSS quando era ligado. Dado o início do teste, um colaborador da Bluecover caminhava em direção à antena e em linha reta, atingia a mínima distância, no teste, à antena a meio da fase aproximadamente um minuto e meio após início de teste e, no mesmo sentido, continuava a caminhada de forma a afastar-se da antena, acabando o teste de forma similar à condição de ínicio. A distância mínima era atingida na tangente a uma circunferência imaginária de raio de aproximadamente três metros, centrada na antena de receção de sinal.

3.3 Configuração de propriedades no GNU Radio

De forma a consolidar os testes e resultados teóricos das experiências, uma vez que a investigação foca-se na interação com dispositivos rádio configurados por *software*, através da ferramenta GNU Radio foi feita uma configuração que permitisse a captação de sinais GNSS, nomeadamente GPS na banda L1. De acordo com [2], [19] e [27] foram alteradas os parâmetros da componente de radiofrequência para atender os requisitos necessários e através de [37] e [42] foram configurados os acessos ao ADALM-PLUTO e ao HackRF One. Assim, foi feita a configuração com os seguintes parâmetros gerais:

Tabela 3.1: Configuração propriedades gerais interfaces SDR no GNU Radio

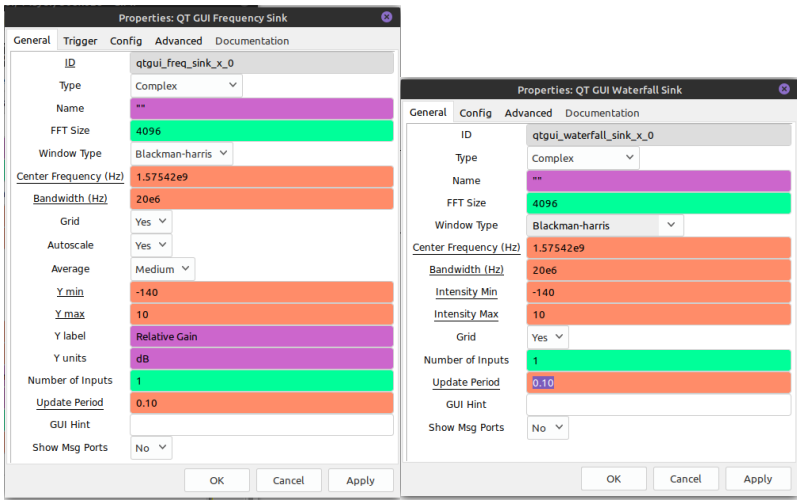
Parâmetro	Valor
Frequência [Hz]	1.585742e9
Modo Ganho	Manual
Ganho Manual [dB]	51.0

Os restantes blocos que permitiam a análise em tempo real dos dados recolhidos durante as baterias de teste atendiam os valores de propriedade enunciadas na tabela abaixo.

Tabela 3.2: Configuração propriedades gerais dos blocos de análise e gravação de dados

Parâmetro	Valor
FFT size	4096
Center frequency [Hz]	1.585742e9
Bandwidth [Hz]	20e6

Depois destes valores inseridos, excetuando algumas propriedades que se queira alterar, os blocos deverão ter os valores apresentados como a figura 3.8.



(a) Bloco *QT GUI Frequency Sink* (b) Bloco *QT GUI Waterfall Sink*

Figura 3.8: Configuração para blocos de análise de dados

Caso fosse pretendida a gravação dos dados em ficheiro para posterior pós-processamento, deve-se acrescentar um bloco *file sink*, disponível na interface. Aqui terá de configurar o caminho de destino para o ficheiro, bem como outros parâmetros que seja necessário alterar.

É importante notar que as figuras supra mencionadas servem apenas para apoio visual e que não dispensa a consulta do apêndice A.1.3 que contém um tutorial para configuração e familiarização da ferramenta GNU Radio. Este tutorial permite escalabilidade e

alguma simplificação no momento da configuração de parâmetros entre os vários blocos utilizados que tenham parâmetros comuns entre si.

3.3.1 Configuração de propriedades exclusivas do ADALM-PLUTO

Uma vez que as configurações gerais para interfaces SDR não são padronizadas, como tinha sido referido anteriormente, a configuração realizada para o ADALM-PLUTO teve em conta os valores enunciados, de forma resumida, na tabela 3.3, ou apresentados de forma gráfica na figura 3.3a. O resultado final da configuração deverá ser semelhante ao que se encontra representado na figura A.4.

Tabela 3.3: Configuração propriedades exclusivas do ADALM-PLUTO

Parâmetro	Valor
Device URI	ip:pluto.local
RF bandwidth [Hz]	20e6
Sample Rate [sps]	42e6
Filter auto	False

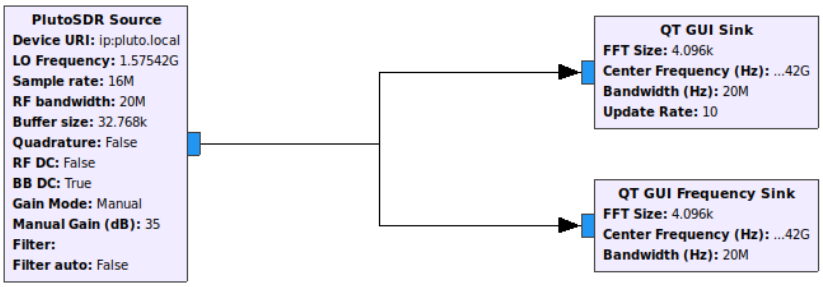


Figura 3.9: Aspeto gráfico configuração final do ADALM-PLUTO

3.3.2 Configuração de propriedades exclusivas do HackRF One

Da mesma forma tem de ser feita uma configuração específica para o HackRF, embora ambas as interfaces tenham parâmetros cujo nome é semelhante. Por uma questão de simplicidade, resumem-se os valores necessários para testar o desempenho da interface na tabela 3.4 e o resultado final da interface gráfica nas figuras 3.3b e 3.10.

Tabela 3.4: Configuração propriedades exclusivas do HackRF

Parâmetro	Valor
Device URI	ip:pluto.local
RF bandwidth [Hz]	8e6
Sample Rate [sps]	18e6
RF Gain [dB]	0
IF Gain [dB]	10
BB Gain [dB]	20

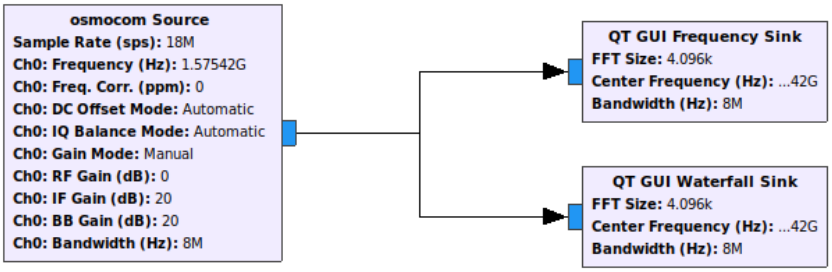


Figura 3.10: Aspeto gráfico configuração final do HackRF One

Capítulo 4

Análise de Resultados

Neste capítulo serão apresentadas as análises aos resultados decorrentes das sessões de teste efetuadas com o conjunto de configurações explicadas nos capítulos anteriores. Note-se que, em algumas sessões de testes foram feitas alterações de forma a entender o impacto da mudança de parâmetros no desempenho das interfaces GNSS, bem como o impacto nos dados retidos aquando das várias baterias de teste. A falta de recursos para testes prévios fez com que se atingisse resultados diferentes em algumas sessões, fruto de alterações, aprimoramento e exploração dos parâmetros presentes na ferramenta GNU Radio. Nesta altura era também explorada a capacidade de resposta e desempenho das interfaces quando eram configuradas para operar no limite da saturação.

Ao longo desta análise são discutidas comparações de resultados entre as interfaces propostas nesta dissertação, bem como a semelhança, ou disparidade, nos resultados observáveis no recetor GNSS comercial especializado em captação, análise e processamento de sinais originados por sistemas GNSS que foi usado como dispositivo de intermédio de acesso à antena GNSS por parte das interfaces SDR em todas as baterias de teste.

Por fim, pode-se ainda explorar os resultados obtidos em ambos os *softwares* usados para as sessões de teste, embora o GNU Radio tenha sido o foco da dissertação, atendendo ao facto de a ferramenta ser compatível com ambos os dispositivos e pretender-se a comparação direta de resultados para concluir a melhor aposta, caso haja continuação desta investigação. Pretende-se apenas mostrar as capacidades promissoras de uma aplicação simples que se encontra embutida no próprio sistema da interface, o que revela a consistência no armazenamento de dados da interface e ainda revela a potencialidade, que pode não ser evidente, do uso de uma FPGA integrada neste tipo de interfaces.

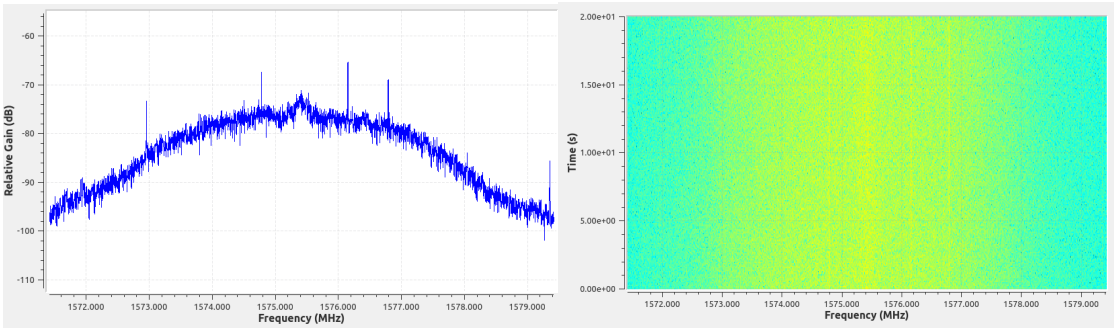
O IIO Oscilloscope, [40], é um caso prático da afirmação anterior pois através de conhecimentos de python e uma posterior exploração da linguagem de programação revela a potencialidade deveras promissora na aposta em dispositivos SDR de baixo custo de aquisição.

4.1 Testes experimentais com a interface ADALM-PLUTO

A primeira sessão de testes com a interface SDR ADALM-PLUTO foi realizada no final da manhã, com dia claro e sem nuvens e com linha de vista para o céu totalmente desimpedida. Por forma a testar as configurações padrão do dispositivo e testar o desempenho do mesmo, o filtro disponível no bloco e o controlo de ganho automático foram ativos.

4.1.1 Fase de controlo - Vaga sem interferência

A partir da figura 4.1 afere-se a existência de um sinal estável, com um ganho ligeiramente superior a partir do centro e vai atenuando à medida que se vai afastando dele. Neste momento, no início de teste, denota-se a inexistência de *barrage jamming*.

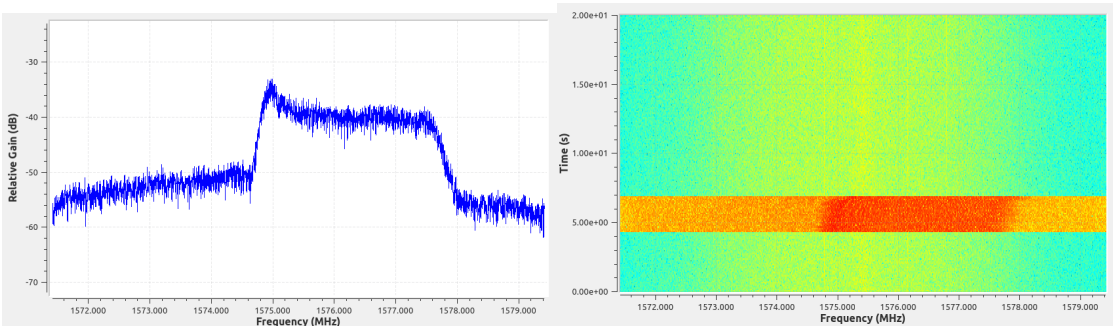


(a) Gráfico domínio frequência ADALM-PLUTO (b) Espetrograma do ADALM-PLUTO

Figura 4.1: Resultados primeiro teste numa vaga limpa de interferências

4.1.2 Fase 1 - Vaga de interferência persistente

A partir do momento em que o dispositivo de *jamming* é ligado verifica-se imediatamente a variação gráfica, quer no domínio de frequência, quer no espetrograma. Partindo da 4.2, analisando em primeira instância a variação no domínio da frequência há uma clara subida do ganho relativo face à fase de controlo sem interferências. Em toda a largura de banda, matematicamente, existe aumento +40 dB de relação sinal-ruído. Além disso, o espetrograma do sinal confere a emissão forte de interferência (zona a vermelho), num período de tempo apreciável.

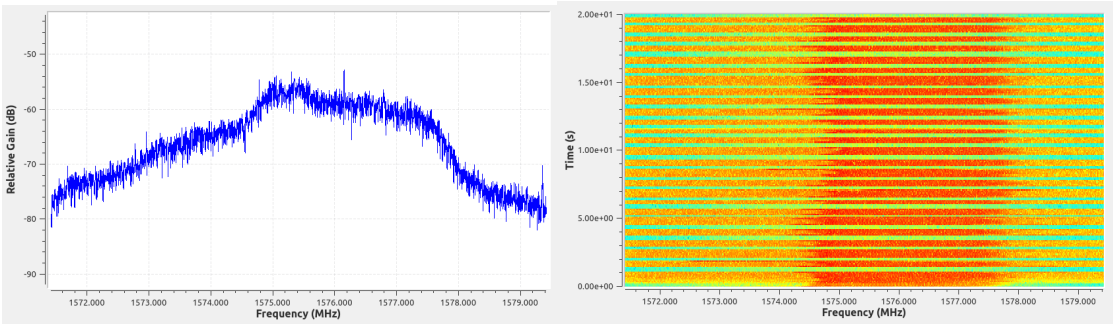


(a) Gráfico domínio frequência ADALM-PLUTO (b) Espetrograma do ADALM-PLUTO

Figura 4.2: Resultados numa vaga persistente de interferência, aproximadamente durante um minuto

4.1.3 Fase 2 - Vaga de interferência intermitente

A vaga de interferências intermitentes é também detetada nos testes. Durante o período de atuação, este tipo de interferência aumentava relativo do sinal entre +20 a +35 dB, aproximadamente. A partir do espetrograma desta fase afere-se que a degradação do sinal é proporcional a duração do pulso de *barrage jamming*. De qualquer forma, uma vez ligado o recetor GNSS recebe imediatamente a seguir todo o ruído e o sinal tem um aumento de ganho relativo imediato de +20 dB.



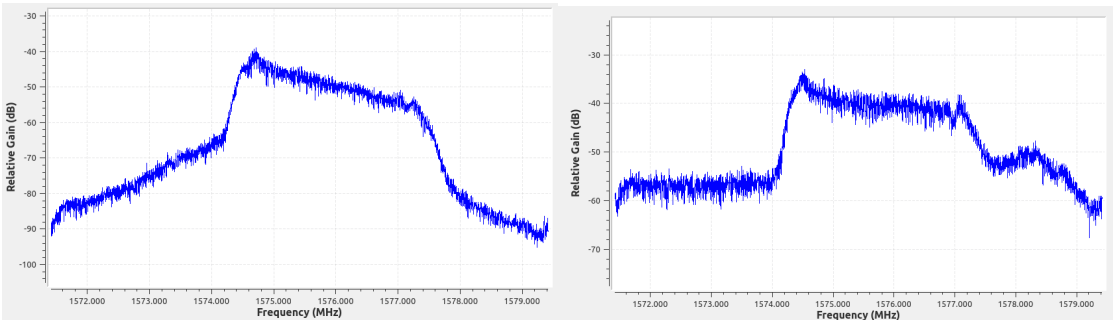
(a) Gráfico domínio frequência ADALM-PLUTO (b) Espetrograma do ADALM-PLUTO

Figura 4.3: Resultados numa vaga intermitente de interferências

4.1.4 Fase 3 - Vaga de interferência em movimento

Em movimento, o dispositivo de *jamming* faz sentir o seu efeito a longa distância com um aumento de ganho apreciável no intervalo de largura de banda pequeno e próximo à frequência da portadora da banda L1. Analisando o espetrograma desta vaga, verifica-se o aumento gradual do ruído inserido na interface GNSS, consequência direta da aproximação do dispositivo à antena. A partir de um raio ligeiramente maior à distância mais curta a que o emissor de interferência passou, os gráficos de domínio de frequência e do espetrograma apresentam comportamento muito semelhante a uma vaga de *jamming* persistente. Relembrando as condições de teste explícitas no capítulo anterior, este resultado

é lógico dado que o teste de emissão de ruído persistente foi realizado a uma distância consideravelmente próxima da antena de receção de sinais GNSS.



(a) Gráfico domínio frequência ADALM-PLUTO *jamming* a longa distância da antena

(b) Gráfico domínio frequência ADALM-PLUTO *jamming* a curta distância da antena

Figura 4.4: Gráficos de domínio de frequência aquando do emissor de *jamming* em movimento

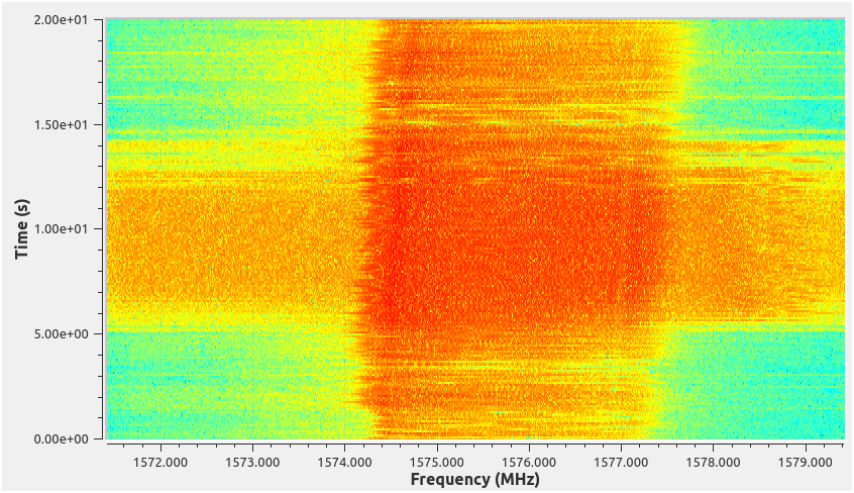


Figura 4.5: Espetrograma do ADALM-PLUTO numa vaga de interferência em movimento

4.1.5 Considerações finais relativamente ao ADALM-PLUTO

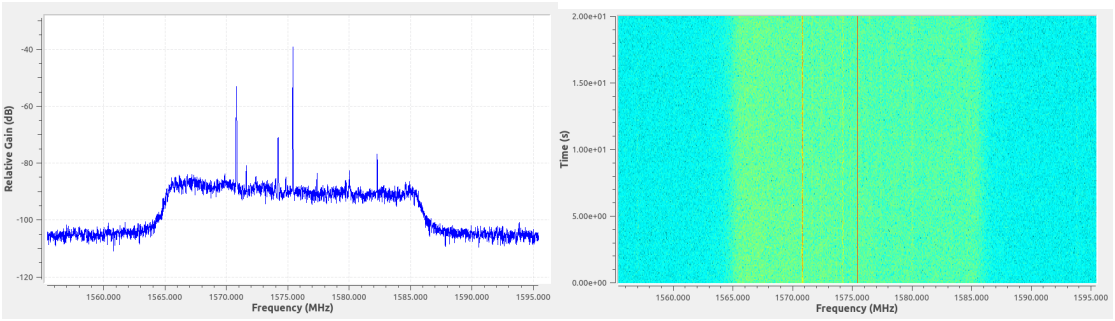
A primeira fase de testes revela sucesso imediato na configuração e no teste da receção e alteração do comportamento do sinal, no domínio da frequência, assim que uma fonte emissora de interferência surge no raio de receção de sinal da antena. A interface tem um comportamento satisfatório no controlo de ganho automático quando recebe uma fonte de ruído com potência apreciavelmente superior. Os gráficos obtidos do estudo do sinal no domínio da frequência foram calculados com um número de médias médio, permitindo um sinal mais limpo, estável e constante ao longo de toda a largura de banda.

4.2 Testes experimentais com a interface bladeRF

Mencionado anteriormente no segundo capítulo, por forma a obter uma segunda fonte de resultados, o bladeRF foi outra interface usada numa sessão de testes, por forma a recolher dados que permitissem confirmar, ou não, a aposta no ADALM-PLUTO. Dado que esta interface tem uma base técnica sólida, poderosa, e por isto, aliciante, repetiram-se as mesmas condições de teste, com meteorologia favorável e com céu limpo.

4.2.1 Fase de controlo - Vaga sem interferência

A partir da figura 4.6a afere-se a existência de um sinal estável sem existência de *barrage jamming*.

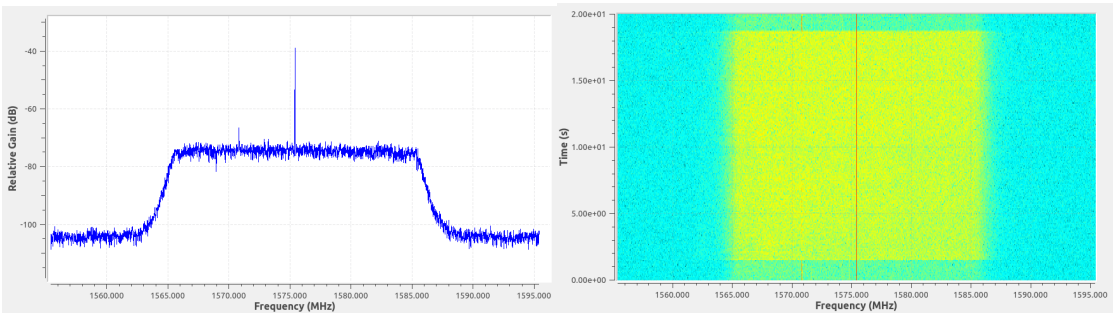


(a) Gráfico domínio frequência (b) Espetrograma

Figura 4.6: Resultados primeiro teste numa vaga limpa de interferências c/bladeRF

4.2.2 Fase 1 - Vaga de interferência persistente

No momento em que o emissor de *jamming* é ligado verifica-se imediatamente também a variação gráfica, quer no domínio de frequência, quer no espetrograma. Da figura 4.7 conclui-se que a interferência existe de facto no sistema e, em particular no dominío de frequência denota-se o aumento de área de gráfico na banda de operação do bladeRF. O espetrograma confere o aumento de ganho relativo no sistema, na largura de banda específica.



(a) Gráfico domínio frequência (b) Espetrograma

Figura 4.7: Resultados numa vaga persistente de interferência c/bladeRF

4.2.3 Fase 2 - Vaga de interferência intermitente

O período de interferência detetado pelo bladeRF é de facto detetado e inconfundível ao olhar para o espetrograma da figura 4.8.

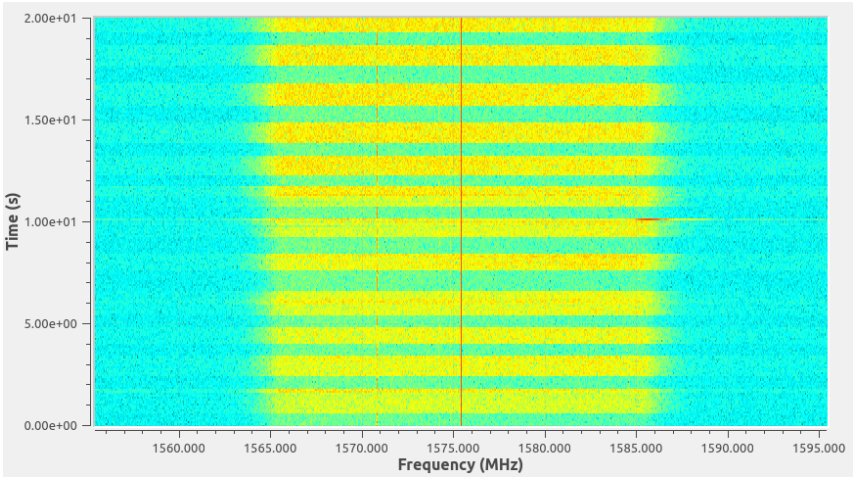


Figura 4.8: Espetrograma do bladeRF numa vaga de interferência intermitente

4.2.4 Fase 3 - Vaga de interferência em movimento

Por análise direta do espetrograma desta vaga, denota-se também o aumento gradual de ruído a ser detetado no sistema.

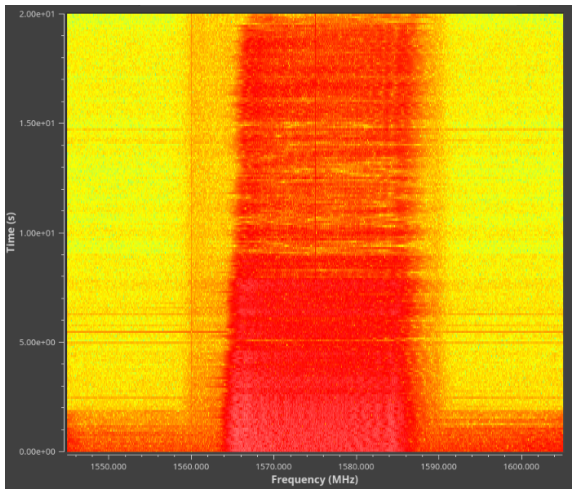


Figura 4.9: Espetrograma do bladeRF numa vaga de interferência em movimento

4.3 Considerações finais sobre os resultados preliminares obtidos

Analisando os resultados obtidos, denotam-se resultados semelhantes em ambas as interfaces usadas para a investigação. A primeira fase de testes foi feita para existir um conjunto de resultados referentes a um ambiente sem a influência do dispositivo de interferência, para ambos as interfaces SDR. A segunda fase de testes evidencia a existência da interferência de forma clara, quer pelo aumento generalizado da relação sinal-ruído ao longo de toda a banda, quer pelo comportamento gráfico da interferência, este sendo previsto pelo estudo *à priori* do tipo de *jamming* em questão. Por fim, na terceira fase de testes, encontra-se também a receção de interferência no sistema. No entanto, pelo facto de ser introduzido de forma intermitente e com intervalos de tempo pequenos, a relação de sinal-ruído ao longo da banda estudada era afetada, mas nunca de forma igual à relação de sinal-ruído aquando de uma interferência persistente. Isto deve-se, nomeadamente, ao atraso do sistema na deteção da interferência.

A interface bladeRF, pelos resultados preliminares na secção anterior, tornou-se mais um caso prático evidente da flexibilidade e eficiência que este tipo de dispositivos consegue oferecer para esta investigação. Para além de se autenticar como uma interface capaz e aliciante para ser explorada na continuação deste projeto, enaltece-se o ADALM-PLUTO que, ao comparar resultados, apresenta resultados semelhantes aos do bladeRF. Quer-se, assim, demonstrar que a interface proposta para análise nesta investigação é uma boa aposta, numa primeira fase, para análise de sinais GNSS, com custo de aquisição significativamente mais baixo quando comparado ao bladeRF.

As sessões de teste revelaram-se um sucesso quanto aos resultados preliminares discutidos ao longo do capítulo, reforçando a aposta em interfaces SDR de baixo custo para desempenharem funções de identificação de interferências no ecossistema GNSS, uma vez que ambas as interfaces apresentaram resultados promissores para a deteção das interferências, segundos após elas serem introduzidas no sistema. Para além disso, estes resultados que permitiram a caracterização e observação do tipo de interferência estudado ao longo deste projeto corroboram toda a investigação teórica feita *à priori* em livros e artigos e, consequentemente, a eficácia destas interfaces SDR para este tipo de funções. O facto de ambas as interfaces serem constituídas por FPGAs e serem unidades programáveis poderão permitir durante o desenvolvimento futuro a gestão de tarefas mais complexas e a adição de serviços que melhoram a fiabilidade da interface quando se encontra em operação no terreno, nomeadamente a relação da perda de sinal recebido pelos satélites e o nível de ruído encontrado no sistema quando se encontra perto de uma fonte emissora de interferência.

É necessário fazer uma nota quanto ao *software* que controla as interfaces. No que toca ao ADALM-PLUTO, nas sessões de teste finais foi descoberto um problema que condicionou os resultados de duas sessões e que são discutidos no segundo apêndice deste documento.

Capítulo 5

Conclusão e considerações futuras

5.1 Conclusão

A investigação feita nesta dissertação concerne-se à análise e implementação de interfaces *Software Defined Radio* num sistema que seja autonomamente capaz de analisar e classificar interferências de *jamming* num sistema de receção de dados GNSS constituído primariamente pela interface. Inserido num estudo prático de mercado apresentado, em parceria com a empresa Bluecover, existe uma vontade clara em explorar as potencialidades que um dispositivo flexível como este apresenta para o problema proposto, uma vez que alguns apresentam unidades de programação passíveis de tornar o dispositivo "inteligente", assim como o preço de aquisição destas ser consideravelmente mais baixo quando comparados às unidades especializadas para análise de sinais GNSS existentes no mercado.

Depois de ter sido feito um levantamento e análise de dados existentes sobre as duas interfaces disponíveis para teste, entendeu-se que o dispositivo adquirido pela empresa não cumpria os requisitos necessários para conseguir classificar situações de interferência possíveis de forma autónoma dado que este não tem incorporado nenhuma unidade de programação, sendo assim necessário uma ou mais unidades que permitissem, quer armazenamento de dados, quer processamento posterior de dados. A falta de informação técnica disponível pelo fornecedor foi outro ponto menos favorável desta interface, visto que não existia *datasheets* de alguns componentes nucleares da interface. Por fim, fontes fidedignas existentes no seio da comunidade da engenharia de radiofrequência desaconselhavam a compra e uso da interface, nomeadamente pelas falhas constantes que este apresenta na sessão exaustiva de testes que foi efetuada, aclamando, com evidências práticas, a existência de outras interfaces com melhor relação qualidade/preço. A disponibilidade da secção de eletrónica em ceder para fins de investigação uma outra interface

SDR, ADALM-PLUTO, também proposta nesta dissertação e analisada exaustivamente ajudou a comprovar, na prática, que a escolha acertada para a investigação seria então esta, ou alguma na ótica desta.

O segundo capítulo apresentou uma visão geral de um sistema GNSS assim como as especificações que devem ser ponderadas caso seja pretendida a criação de um recetor GNSS, ou o uso de um dispositivo que fosse, atendendo ao conjunto de componentes, passível de ser incorporado num sistema de receção de sinais GNSS. Considerando os componentes gerais e físicos de um *Software Defined Radio* bem como a flexibilidade que este tem através de *software* que programa os vários parâmetros e assim, os componentes físicos, com estes verificou-se que tudo isto torna um projeto de um recetor GNSS com componentes de baixo custo de aquisição aliciante.

O terceiro capítulo visa a explicar os procedimentos e configurações feitas com as interfaces SDR disponíveis nos momentos de teste, assim como todas as configurações necessárias para integrar as mesmas com o computador, uma vez que era aconselhável o uso do sistema operativo Linux para operação correta das interfaces. Para além disso, a escolha da aplicação para operar as interfaces é também levada em conta dado que a heterogeneidade de aplicações disponíveis obrigou uma ponderação mais exaustiva, principalmente por não se encontrar disponível entre todas as interfaces, assim como existir aplicações onde é necessária uma subscrição paga.

O quarto parágrafo apresenta os resultados preliminares recolhidos das várias sessões de teste práticas realizadas no terreno. Mais uma vez, atendendo aos dados recolhidos, reitera-se a aposta viável nas interfaces SDR de baixo custo para identificação de interferências no ecossistema GNSS e, graças a componentes incorporados como uma FPGA, constituem assim uma aposta viável para trabalho futuro que é sugerido na secção abaixo.

Posteriormente, partindo de uma componente rígida e estruturada de pós-processamento de dados recolhidos, será pretendida a programação de fundamentos de *machine learning* nas interfaces por forma a treinar as mesmas e, posteriormente, operarem de forma autónoma, sem supervisão humana, para informarem eventos de *jamming* a ocorrer aproximadamente em tempo real, localizar geograficamente a fonte e mitigar os efeitos severos de emissores de ruído em tecnologias que estão fortemente dependentes do funcionamento correto e preciso dos sistemas GNSS em operação.

5.2 Desenvolvimento futuro

Por forma a conseguir progredir com esta investigação, dada o impacto que esta pode ter no setor dos sistemas de navegação GNSS, será necessária a aquisição de uma antena ativa para poder captar sinais GNSS, não só no domínio na frequência, mas também no que toca ao conteúdo destes sinais. Um ponto fraco desta dissertação era não ser possível comprovar de forma prática a operação da interface SDR como recetor GNSS por não conseguir receber sinais e descodificá-los devido ao facto de não ter uma antena ativa.

É encorajado o investimento na formação dirigida ao aprofundamento de conceitos fundamentais em matérias de *software defined radio*, por forma a permitir um progresso mais gradual e contínuo na investigação

A presença do chamado código-aberto gratuito é notória e, segundo inúmeras empresas com impacto global no mercado de aplicações e *software*, tenderá a crescer e uma pequena minoria acredita que será fulcral apostar neste nicho. Quer-se com isto dizer que a formação em python deve ser encorajada de forma a poder programar aplicações ricas em informação, no ponto de vista científico-académico. No caso específico do ADALM-PLUTO, a quantidade de informação existente para atingir este objetivo deverá ser acrescentada e atualizada por forma a permitir uma curva de aprendizagem menor, dispensado recursos como tempo que pode ser canalizado na criação e manutenção de aplicações e/ou programas.

Por fim, é fundamental ter bases para operar com sistemas Linux. De forma a mitigar ao máximo este inconveniente, o apêndice A está disponível para dispender o mínimo de tempo possível a procurar, configurar e instalar bibliotecas e/ou funcionalidades opcionais que poderão ser necessárias com a ferramenta GNU Radio. Este não dispensa a necessidade de perceber conceitos fundamentais e inerentes ao sistema Linux, mas tem como objetivo ajudar a reduzir o atrito causado pela falta de conhecimentos e/ou simplesmente permitir ao investigador focar-se no estudo de forma mais rápida e eficiente possível. Neste são apresentados todos os passos, atualizados à data de escrita deste documento, necessários para permitir o acesso ao ADALM-PLUTO, quer ao sistema operativo Linux, já que este dispõe de bibliotecas de python por defeito embutidos no seu sistema, quer à ferramenta GNU Radio, caso seja decidida usar a ferramenta. Caso esta última seja a escolhida e seja investido tempo na criação e/ou alteração de blocos necessários para a investigação, é fortemente recomendado a aposta na escrita de informação explicativa na documentação, reduzindo o atrito a outros membros da comunidade que possam vir a necessitar de elementos da investigação.

Bibliografia

[1] S. Bartl, P. Berglez e B. Hofmann-Wellenhof. "GNSS Interference Detection, Classification and Localization using Software-Defined Radio". Em: (2017). DOI: 10.1109/EURONAV.2017.7954205.

[2] E. Kaplan e C. Hegarty. *Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications*. 2nd edition. Artech House, Inc., 2006. ISBN: 1-58053-894-0.

[3] D. Tang, Y. Jiao e J. Chen. "On Automatic Landing System for Carrier Plane Based on Integration of INS, GPS and Vision". Em: (2016). DOI: 10.1109/CGNCC.2016.7829144.

[4] S. Borsky e C. Unterberger. "Bad weather and flight delays: The impact of sudden and slow onset weather events". Em: *Economics of Transportation* (2019). DOI: 10.1016/j.ecotra.2019.02.002.

[5] E. G.N.S. S. Agency. *What is GNSS?* 2019. URL: https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/what-gnss (acedido em 30/08/2019).

[6] E. G.N.S. S. Agency. *What is SBAS?* 2019. URL: https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/what-gnss/what-sbas (acedido em 30/08/2019).

[7] T. Murfin. *Landing Airplanes with GPS?* 2011. URL: https://www.gpsworld.com/professional-oemlanding-airplanes-with-gps-11540/ (acedido em 29/08/2019).

[8] E. G.N.S. S. Agency. *What is EGNOS?* 2018. URL: https://www.gsa.europa.eu/egnos/what-egnos (acedido em 30/08/2019).

[9] N. Goldovsky e O. Sharar. "Measuring the mitigation of a jamming attack on a GPS server at the national physical laboratory of Israel". Em: (2018). DOI: 10.1109/EFTF.2018.8409015.

[10] Y. Ying, T. Whitworth e K. Sheridan. "GNSS interference detection with software defined radio". Em: (2012). DOI: 10.1109/ESTEL.2012.6400121.

[11] A. Soghoyan, A. Suleiman e D. Akopian. "A Development and Testing Instrumentation for GPS Software Defined Radio With Fast FPGA Prototyping Support". Em: (2014). DOI: 10.1109/TIM.2014.2304352.

[12] R.-S. admin. *ADALM-PLUTO SDR Hack: Tune 70 MHz to 6 GHz and GQRX Install*. 2017. URL: https://www.rtl-sdr.com/adalm-pluto-sdr-hack-tune-70-mhz-to-6-ghz-and-gqrx-install/ (acedido em 26/08/2019).

[13] E. S. Agency. *EGNOS: O sistema que corrige o GPS*. URL: https://www.esa.int/por/ESA_in_your_country/Portugal/EGNOS_O_sistema_que_corrige_o_GPS (acedido em 30/08/2019).

[14] A. Devices. *ADALM-PLUTO Overview*. URL: https://www.analog.com/en/design-center/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/ADALM-PLUTO.html#eb-overview (acedido em 30/08/2019).

[15] R. Ferreira, N. Souto, J. Gaspar e P. Sebastião. "Effective GPS Jamming Techniques for UAVs using low-cost SDR platforms". Em: *2018 Global Wireless Summit (GWS)* (2018), pp. 27–32. DOI: 10.1109/GWS.2018.8686672.

[16] K. Grover, A. Lin e Q. Yang. "Jamming and Anti-jamming Techniques in Wireless Networks: A Survey". Em: *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing* 17 (4 2014), pp. 197–215. DOI: 10.1504/IJAHUC.2014.066419.

[17] C. Hegarty e E. Chatre. "Evolution of the Global Navigation Satellite System (GNSS)". Em: *Proceedings of the IEEE* 96 (12 2008), pp. 1902–1917. DOI: 10.1109/JPROC.2008.20060909.

[18] *GPS. Essentials of Satellite Navigation*. GPS-X-02007-D.

[19] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger e E. Wasle. *GNSS - Global Navigation Satellite Systems*. Wien: SpringerWienNewYork, 2008. ISBN: 978-3-211-73012-6.

[20] Information, N. Analysis Center for Positioning e Timing. *GPS Constellation Status*. URL: https://glonass-iac.ru/en/GPS/index.php (acedido em 30/08/2019).

[21] I. P. Sousa. "GPS system implementation using software defined radio platform". Universidad Carlos III de Madrid, set. de 2016.

[22] T. E. of Encyclopaedia Britannica. *Commonwealth of Independent States*. URL: https://www.britannica.com/topic/Commonwealth-of-Independent-States (acedido em 30/08/2019).

[23] Information, N. Analysis Center for Positioning e Timing. *GLONASS Constellation Status*. URL: https://glonass-iac.ru/en/GLONASS/index.php (acedido em 30/08/2019).

[24] E. G.N.S. S. Agency. *SAR/Galileo Satellites Information*. URL: https://www.gsc-europa.eu/system-service-status/sar-information/sargalileo-satellites-information (acedido em 30/08/2019).

[25] Information, N. Analysis Center for Positioning e Timing. *BeiDou Constellation Status*. URL: https://glonass-iac.ru/en/BEIDOU/index.php (acedido em 30/08/2019).

[26] M. S. Grewal, A. P. Andrews e C. G. Bartone. *Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation and Integration*. 3rd edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley e Sons, Inc., 2013. ISBN: 978-1-118-44700-0.

[27] J. Betz. *Engineering Satellite-Based Navigation and Timing*. John Wiley e Sons, Inc., 2016. ISBN: 978-1-118-61597-3.

[0] E. S. Agency. *GNSS Signal*. URL: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS_signal (acedido em 30/08/2019).

[28] W. Webb. *The Complete Wireless Communications Professional: A Guide for Engineers and Managers*. Artech House, Inc., 1999. ISBN: 0-89006-338-9.

[29] Y. Jiao e Y. Morton. "Comparison of the effect of high-latitude and equatorial ionospheric scintillation on GPS signals during the maximum of solar cycle 24". Em: *Radio Science* 50 (set. de 2015), pp. 886–903. DOI: 10.1002/2015RS005719.

[30] Y. Jiao, C. Rino e Y. T. Morton. "Ionospheric Scintillation Simulation on Equatorial GPS Signals for Dynamic PLatforms". Em: (2018). DOI: 10.1002/navi.231.

[31] T. Collins, R. Getz, D. Pu e A. Wyglinski. *Software-Defined Radio for Engineers*. Artech House, 2018. ISBN: 978-1-63081-457-1.

[32] J. Bard e V. K. Jr. *Software Defined Radio: The Software Communications Architecture*. John Wiley e Sons, Inc., 2007. ISBN: 978-0-470-86518-7.

[33] A. Tribble. "The software defined Radio: Fact and fiction". Em: (2008). DOI: 10.1109/RWS.2008.4463414.

[34] R. Keim. *Introduction to Software-Defined Radio*. All About Circuits. 1 de fev. de 2017. URL: https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/introduction-to-software-defined-radio/ (acedido em 30/08/2019).

[35] B. Fette, R. Aiello, P. Chandra, D. Bodkin, A. Bensky, D. Miron, D. Lide, F. Dowla e R. Olexa. *RF and Wireless Technologies*. Elsevier, Inc, 2008. ISBN: 978-0-7506-8581-8.

[36] J. Reed. *Software Radio: A modern approach to Radio Engineering*. Prentice Hall, 2002. ISBN: 0-13-081158-0.

[37] G. S. Gadgets. *HackRF ONE*. All About Circuits. URL: https://greatscottgadgets.com/hackrf/one (acedido em 30/08/2019).

[38] nuand. *bladeRF*. URL: https://www.nuand.com/product/bladerf-x40/ (acedido em 30/08/2019).

[39] G. R. Project. *What is GNU Radio?* URL: https://www.gnuradio.org/about/ (acedido em 30/08/2019).

[40] A. Devices. *IIO OScilloscope*. URL: https://wiki.analog.com/resources/tools-software/linux-software/iio_oscilloscope (acedido em 30/08/2019).

[41] Septentrio. *About Us*. URL: https://www.septentrio.com/en/company/about-us (acedido em 30/08/2019).

[42] A. Devices. *GNU Radio*. URL: https://wiki.analog.com/resources/tools-software/linux-software/gnuradio (acedido em 30/08/2019).

[43] J.-P. Lang. *osmocom Gnu Radio Blocks*. URL: https://osmocom.org/projects/gr-osmosdr/wiki (acedido em 30/08/2019).

Apêndice A

Tutorial para operação com uma interface SDR

A.1 Instalação e configuração do GNU Radio em sistema operativo Linux

O presente apêndice foi atualizado no dia 14 de fevereiro de 2020 e foi testado exclusivamente com a interface SDR ADALM-PLUTO. Por questões de otimização de tempo, recomenda-se a instalação da distribuição mencionada na subsecção 3.1.1 do quarto capítulo, Linux Mint. À data de escrita deste documento, a distribuição disponível é a 19.3, com código de nome "Tricia".

Após a configuração inicial do sistema operativo, deve-se lançar uma linha de comandos e executar as linhas de código[1] abaixo na ordem apresentada. É de notar que o comando "*sudo*" concede privilégios de administrador temporário até fechar a janela de comandos.

A.1.1 Instalação da ferramenta GNU Radio

Começa-se pela atualização da disponibilidade de versões existentes dos pacotes instalados no sistema e posterior atualização destes caso se verifique alguma atualização.

Listagem A.1: Atualização pacotes instalados no sistema operativo Linux

```
1  sudo apt-get update && sudo apt-get upgrade
```

[1] É de notar que a função copiar do sistema irá, muito provavelmente, desformatar as linhas de código que decidir copiar. Recomenda-se, ou a transcrição completa para a linha de comandos, ou a consulta das referências mencionadas ao longo do documento, uma vez que o apêndice baseia-se nelas, **mas não é cópia integral das mesmas.** À data de consulta verificou-se a falta de pacotes essenciais a instalar e esses mesmos foram adicionados a este apêndice.

Em seguida procede-se à instalação da ferramenta de código aberto GNU Radio e de dependências inerentes ao normal funcionamento deste.

Listagem A.2: Instalação do GNU Radio e dependências

```
1  sudo apt-get -y install gnuradio-dev libxml2 libxml2-dev bison flex cmake git
2  libaio-dev libboost-all-dev swig libusb-1.0-* build-essential doxygen*
```

Nesta fase deverá ter a aplicação instalada no sistema e conseguir lançar uma instância da mesma.

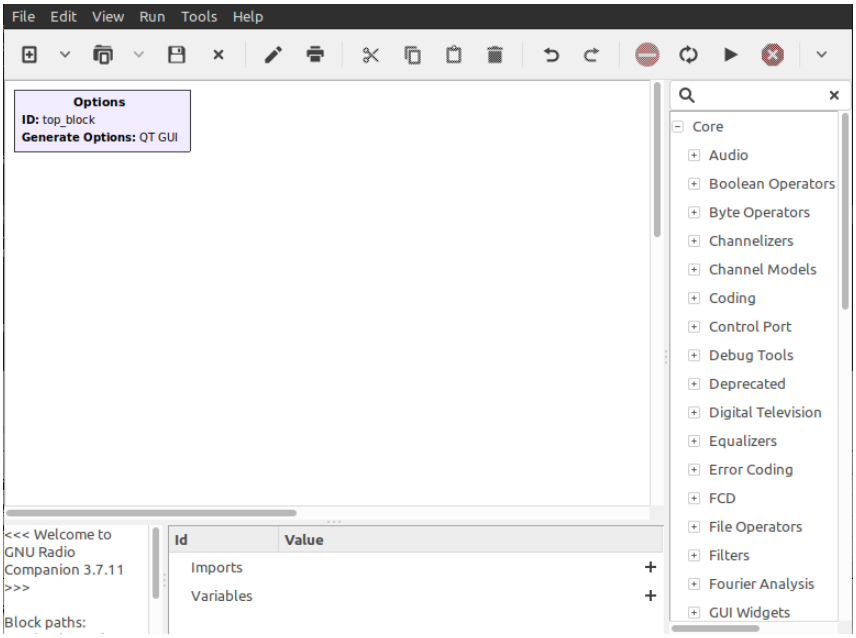


Figura A.1: Lançamento da aplicação GNU Radio

A.1.2 Instalação dos pacotes para operação com interfaces SDR

Esta fase permite auxiliar na instalação de alguns pacotes não se encontram integrados por defeito no GNU Radio e permitirão o funcionamento com interfaces SDR. Serão também disponibilizadas bibliotecas que permitem a operação de outros dispositivos SDR, nomeadamente o HackRF e o BladeRF, mas estes últimos não dispensam posterior consulta de recursos caso enfrente algum tipo de erro. À data de escrita deste documento não houve acesso às interfaces de forma a testar e procurar saber o que faltava para prometer o funcionamento adequado destes.

Assumindo que pretende transferir todos os pacotes para a diretoria principal (*home*), serão criadas diretorias para guardar as bibliotecas necessárias para operação com os dispositivos SDR

Listagem A.3: Criação da diretoria GNU_Radio

```
1 mkdir GNU_Radio && cd GNU_Radio
```

Depois da última linha de comando, deverá estar na diretoria GNU_Radio. Cria-se outra diretoria para organizar os pacotes pertencentes ao dispositivo ADALM-PLUTO confinados ao mesmo sítio. Os próximos três passos serão para integrar bibliotecas e pacotes para o funcionamento com o ADALM-PLUTO. Em caso de dúvida, recomenda-se a leitura de [42].

Listagem A.4: Criação da diretoria pluto

```
1 mkdir pluto && cd pluto
```

Procede-se à transferência do pacote libiio e *build* do pacote no sistema

Listagem A.5: Transferência e instalação do pacote libiio (PLUTO)

```
1 git clone https://github.com/analogdevicesinc/libiio.git && cd libiio &&
2 cmake . && make && sudo make install && cd ..
```

Transfere-se agora o segundo pacote, libad9361-iio, e faz-se *build* no sistema

Listagem A.6: Transferência e instalação do segundo pacote libad9361-iio (PLUTO)

```
1 git clone https://github.com/analogdevicesinc/libad9361-iio.git &&
2 cd libad9361-iio && cmake . && make && sudo make install && cd ..
```

Para finalizar a integração do ADALM-PLUTO é preciso transferir e construir o pacote gr-iio.

Listagem A.7: Transferência e instalação do último pacote gr-iio (PLUTO)

```
1 git clone https://github.com/analogdevicesinc/gr-iio.git &&
2 cd gr-iio && cmake -DCMAKE_INSTALL_PREFIX=/usr . && make &&
3 sudo make install && cd .. && sudo ldconfig
```

No final, ao lançar a aplicação GNU Radio, ao usar o atalho CTRL+F com a palavra-chave "pluto" deverá conseguir encontrar os blocos que interagem com o ADALM-PLUTO.

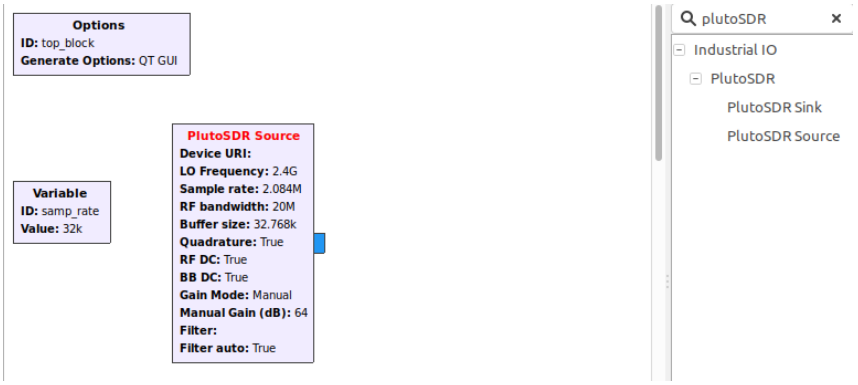


Figura A.2: Confirmação da existência do bloco plutoSDR no GNU Radio

De forma a integrar agora o HackRF, deve-se transferir e construir o pacote para interagir com o GNU Radio

Listagem A.8: Transferência e instalação do pacote para manusear o HackRF

```
1 git clone https://github.com/mossmann/hackrf.git && cd hackrf/host &&
2 mkdir build && cd build && cmake .. && cd .. && cmake . && make &&
3 sudo make install && cd .. && cd ..
```

De igual forma, procede-se à transferência e contrução do pacote para trabalhar com o Nuand BladeRF.

Listagem A.9: Transferência e instalação do pacote para integrar o BladeRF

```
1 git clone https://github.com/Nuand/bladeRF.git && cd bladeRF &&
2 mkdir build && cd build && cmake .. && cd .. && cmake . &&
3 make && sudo make install && cd ..
```

A finalização da integração das duas últimas interfaces passa pela instalação de um bloco primariamente desenhado para um outro dispositivo SDR, mas que permite integra com sucesso, quer o HackRF, quer o BladeRF.

Listagem A.10: Transferência e instalação do bloco gr-osmosdr

```
1 git clone git://git.osmocom.org/gr-osmosdr && gr-osmosdr &&
2 mkdir build && cd build && cmake ..
```

Nesta fase, ambas as interfaces deverão constar nos dispositivos ativos para funcionar com o bloco osmocon. Em caso de dúvida, deve ser consultada a referência [43].

Listagem A.11: Verificação dos dispositivos SDR ativos

```
-- ############################################################
-- # Gnuradio enabled components
-- ############################################################
--   * Python support
--   * FUNcube Dongle
--   * IQ File Source & Sink
--   * RTLSDR TCP Client
--   * HackRF & rad1o Badge
--   * nuand bladeRF
--   * RFSPACE Receivers
--   * Red Pitaya SDR
--
-- ############################################################
-- # Gnuradio disabled components
-- ############################################################
--   * Osmocom IQ Imbalance Correction
--   * sysmocom OsmoSDR
--   * FUNcube Dongle Pro+
--   * Osmocom RTLSDR
--   * Ettus USRP Devices
--   * Osmocom MiriSDR
--   * AIRSPY Receiver
--   * SoapySDR support
--   * FreeSRP support
```

Os restantes passos permitem a construção do bloco no sistema assim como a documentação necessária e a integração no programa

Listagem A.12: Transferência e instalação do bloco gr-osmosdr

```
  cmake ../ -DENABLE_DOXYGEN=1 && make -C docs && make &&
  sudo make install && cd .. && sudo ldconfig && cd ..
```

Depois do processo acima, ao lançar a aplicação GNU Radio, ao usar o atalho CTRL+F com a palavra-chave "osmocom" deverá conseguir encontrar os blocos que interagem, quer com o HackRF, quer com o BladeRF.

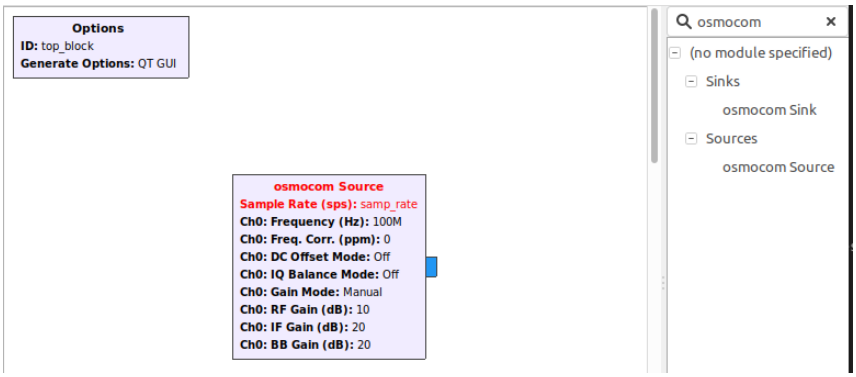


Figura A.3: Confirmação da existência do bloco osmocom no GNU Radio

A.1.3 Configuração parâmetros GNU Radio

A flexibilidade, quer da interface SDR, quer do programa, permite a reutilização do dispositivos para inúmeros projetos, principalmente quando estão relacionados com radiofrequência. A complexidade de um projeto poderá obrigar a integração de mais blocos no diagrama e poderão partilhar parâmetros comuns entre si. Assim, de forma a evitar a configuração individual desses mesmos parâmetros no GNU Radio, esta subsecção explica uma forma simples e escalável para configurar os ditos parâmetros.

Voltemos, por exemplo, à configuração que permite a leitura de sinais com o ADALM-PLUTO.

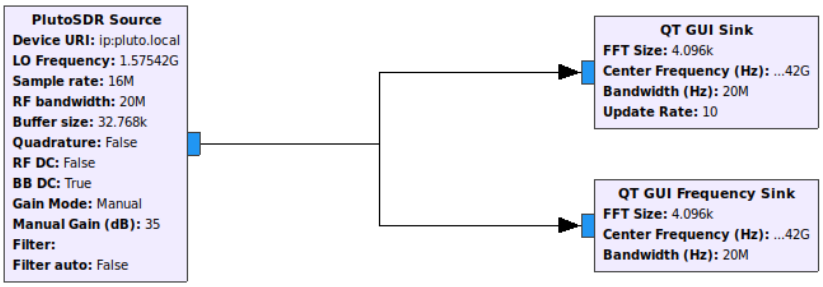
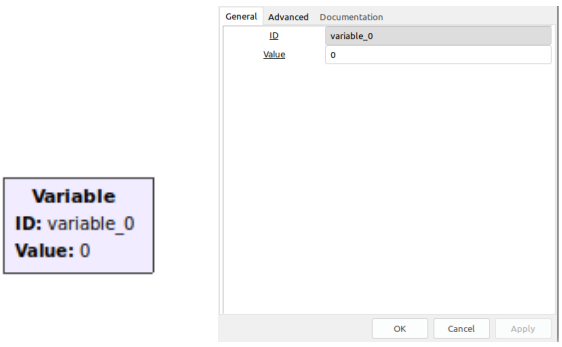


Figura A.4: Aspeto gráfico configuração final do ADALM-PLUTO

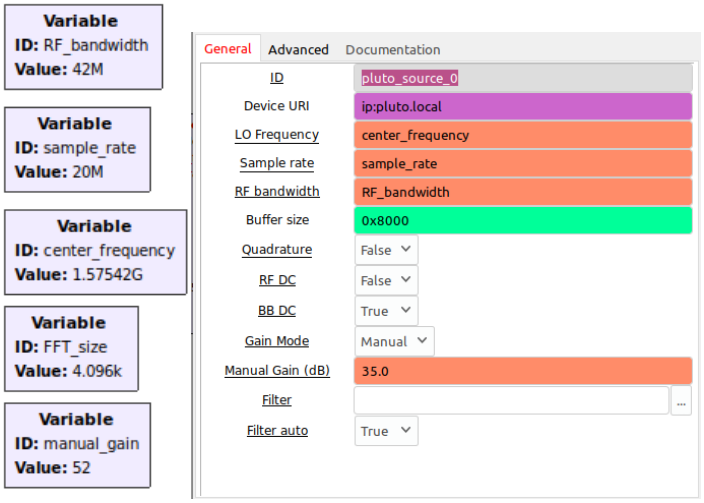
Por análise direta dos blocos, verificam-se parâmetros comuns entre si: *Center frequency* e *LO Frequency*, *FFT size*, *RF bandwidth* e *Bandwidth*. É possível alterar estes dados uma só vez com o uso de um bloco *variable*.



(a) Bloco *Variable* disponível no GNU Radio (b) Janela configuração parâmetros

Figura A.5: Varíavel global presente no GNU Radio

Partindo deste é possível configurar um sistema global de forma simples e que permita escalabilidade no projeto. Basta atribuir um nome à variável no campo de identificação e o valor pretendido no campo "valor". Depois é apensa necessário escrver o ID da variável nos parâmetros pretendidos e o programa assume automaticamente o valor do bloco. No exemplo da configuração do diagrama de blocos para operar com o ADALM-PLUTO, ao escrever os IDs das variáveis e aplicar, o diagrama assume os valores automaticamente.



(a) Variáveis de configuração global ADALM-PLUTO (b) Janela configuração ADALM-PLUTO

Figura A.6: Conjunto configurações globais ADALM-PLUTO

A.2 Instalação do IIO Oscilloscope (exclusivo para o ADALM-PLUTO)

O ADALM-PLUTO tem um programa incorporado no seu próprio sistema, IIO Oscilloscope, que passa por uma interface gráfica com possibilidade de análise de sinais e configuração de parâmetros. Este tornou-se uma opção aliciante para resolver algumas questões relacionadas com as configurações impostas na interface. Ao contrário do GNU Radio onde as configurações, ao serem alteradas, não têm efeito imediato, aqui o ajuste reflete diretamente nos resultados. É de notar que, quando ambos os programas estão em operação, a influência da configuração de parâmetros no IIO Oscilloscope irá incidir imediatamente nos resultados do GNU Radio também. Quer-se com isto afirmar que os resultados vísiveis num serão igualmente visíveis no segundo.

Uma vez que também este tem de ser instalado no sistema, procede-se então aos passos necessários para operação correta com esta aplicação. Para eventuais dúvidas que possam surgir neste campo, reforça-se a leitura da referência [40].

Para começar, tem de se instalar os pacotes apresentados abaixo.

Listagem A.13: Instalação pacotes necessários para funcionamento com o IIO Oscilloscope

```
1 sudo apt-get -y install libglib2.0-dev libgtk2.0-dev libgtkdatabox-dev
2 libmatio-dev libfftw3-dev libxml2 libxml2-dev bison flex cmake libaio-dev
3 libavahi-common-dev libavahi-client-dev libcurl4-openssl-dev libjansson-dev
```

De acordo com a referência supra mencionada, pede-se agora a construção e instalação sequencial das bibliotecas libiio e libad9361-iio. Nesta fase as mesmas deveriam estar instaladas assumindo que o ADALM-PLUTO está a ser usado para estes fins. Caso não esteja, consulte a secção acima (A.1.2).

É feita agora a transferência, construção e instalação do iio-oscilloscope. Recomenda-se, assim, a estar na diretoria usada para instalar as bibliotecas para operação com o ADALM-PLUTO. Ao seguir o tutorial acima, para apontar diretamente à diretoria, execute a seguinte linha de código:

Listagem A.14: Diretoria recomendade para transferência da biblioteca IIO Oscilloscope

```
1 cd ~/GNU_Radio/pluto
```

Caso tenha seguido o tutorial acima e deseja confirmar se se encontra na diretoria correta, ao executar o comando "ls" deverá encontrar as três bibliotecas (gr-iio, libad9361-iio e libiio) na mesma.

Procedendo agora à transferência, construção e instalação da ferramenta:

Listagem A.15: Transferência construção e instalação do IIO Oscilloscope

```
1 git clone https://github.com/analogdevicesinc/iio-oscilloscope.git &&
2 cd iio-oscilloscope && mkdir build && cd build && cmake ../ &&
3 make -j $(nproc) && sudo make install && cd .. && cmake . &&
4 make && sudo make install && cd .. && sudo ldconfig
```

A configuração do programa deverá ter sido completada com sucesso. Daqui existem duas formas de executar o programa: procurando "ADI IIO Oscilloscope" no sistema, ou através da seguinte linha de comando:

Listagem A.16: Executar a ferramenta IIO Oscilloscope

```
1 cd ~/GNU_Radio/pluto/iio-oscilloscope && ./osc
```

É de notar que caso o dispositivo não seja reconhecido debaixo da opção "USB Device" deve terminar todas as instâncias do programa, instalar o pacote abaixo, desconectar a interface do computador e voltar a ligá-la e, por fim, lançar uma nova instância do IIO Oscilloscope.

Listagem A.17: Instalação pacote libiio (2)

```
1 https://github.com/analogdevicesinc/libiio/releases/download/v0.19/
2 libiio-0.19.g5f5af2e-ubuntu-18.04-amd64.deb
```

Apêndice B

Resultados adicionais

O presente apêndice apresenta resultados adicionais adquiridos com a interface SDR ADALM-PLUTO. No entendimento do autor, estes resultados foram mantidas nesta secção pois foram obtidos com configurações diferentes. Nestas, quer o controlo automático de ganho, quer o filtro foram desligados e, consequentemente, influenciaram drasticamente o comportamento gráfico da interface quando se encontra em operação e, assim, os resultados dos mesmos.

Aqui foi usada a aplicação disponível pela interface ADALM-PLUTO, dado que no momento de teste não existia disponibilidade de acesso, quer ao recetor GNSS, quer à antena que eram cedidos pela empresa que estava a colaborar. Adicionalmente, esta sessão de testes foi necessária pois a bateria realizada anteriormente a esta, com configurações feitas previamente apresentou resultados distintos e que não estavam previstos, quando comparados com sessões de teste anteriores. Com isto foi descoberto um problema de *software* na interface.

Ao selecionar a opção filtro em qualquer uma das aplicações (GNU Radio e/ou IIO Osciolloscope), esta mantém-se ativa e em operação mesmo que seja desativada e/ou se a aplicação for fechada. Apenas consegue-se alcançar este objetivo atráves do corte total da alimentação à interface. Esta nuance veio corroborar os resultados não previstos na sessão de testes em terreno. Na configuração prévia à sessão, qualquer parâmetro que fosse alterado parecia surtir efeito e estar certo porque, na prática, o filtro encontrava-se ativo, mesmo quando não se encontrava selecionado. Ao montar todo o sistema no terreno foi efetuado o reinício do sistema da interface e, com isto, o filtro ficou desativado como era pretendido.

B.1 Resultados de testes do ADALM-PLUTO sem funcionalidades ativas

Na figura B.1 é possível notar que, devido ao controlo automático de ganho se encontrar desativado, o gráfico apresenta uma depressão ao longo da largura de banda definida na aplicação, 18 MHz.

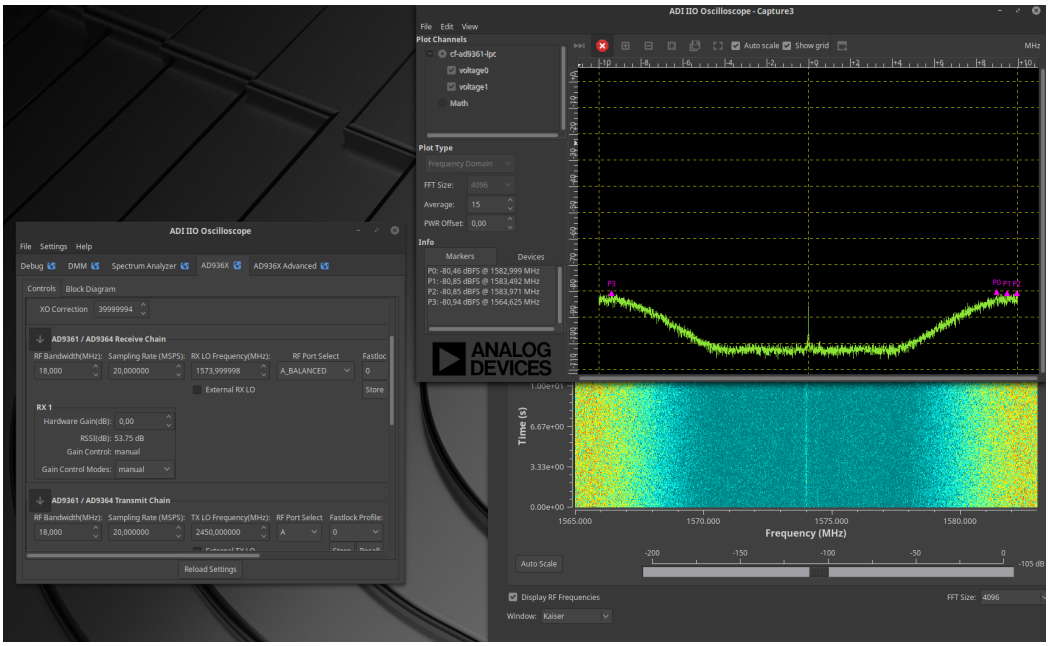


Figura B.1: Gráfico em domínio de frequência do ADALM-PLUTO a 20 MSPS

A figura seguinte mostra imediatamente o efeito do ganho no comportamento gráfico dos dados captados pela interface, é possível notar que, devido ao controlo do ganho, é possível estabilizar a curva do gráfico apresentada. Este pormenor é importante para a análise de interferências nos sinais, nomeadamente quando se trata da interferência analisada ao longo deste documento. Em casos como a classificação da interferência através da variação da área do gráfico após a introdução do ruído no sistema denota-se a importância, por uma questão de simplicidade, de manter o gráfico do ruído, anterior à introdução da interferência, constante e "liso".

O valor utilizado para a componente de ganho foi calculado através da variação em várias tentativas, mas após um número significativo destas concluiu-se que o valor correto para o ganho deverá ser aproximadamente semelhante ao valor apresentado na componente RSSI quando o ganho manual se encontra com valor nulo.

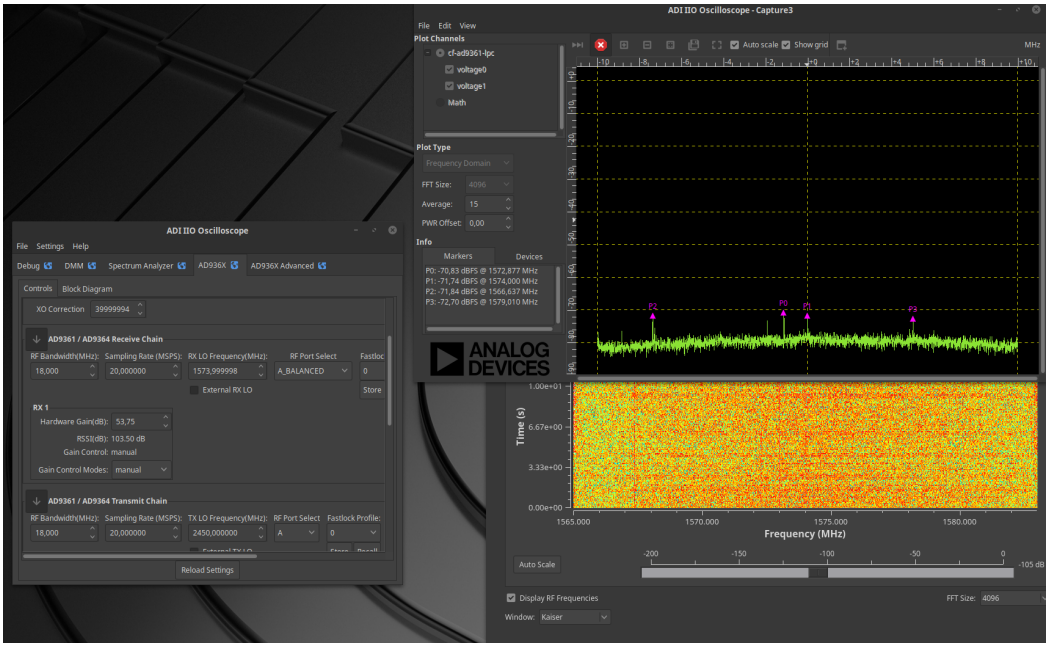


Figura B.2: Gráfico em domínio de frequência do ADALM-PLUTO a 20 MSPS e com 53.75 dB de ganho

A figura B.3 mostra o efeito ao aumentar a taxa de amostragem da interface, nas mesmas condições de valor de ganho, bem como na mesma larura de banda, 18 MHz. Verifica-se, aqui, uma sobreamplificação do sinal na zona da largura de banda, e ainda duas curvas ligeiramente semelhantes às curvas aprsentadas na figura B.1, no extremo da largura de banda de valor configurado na aplicação.

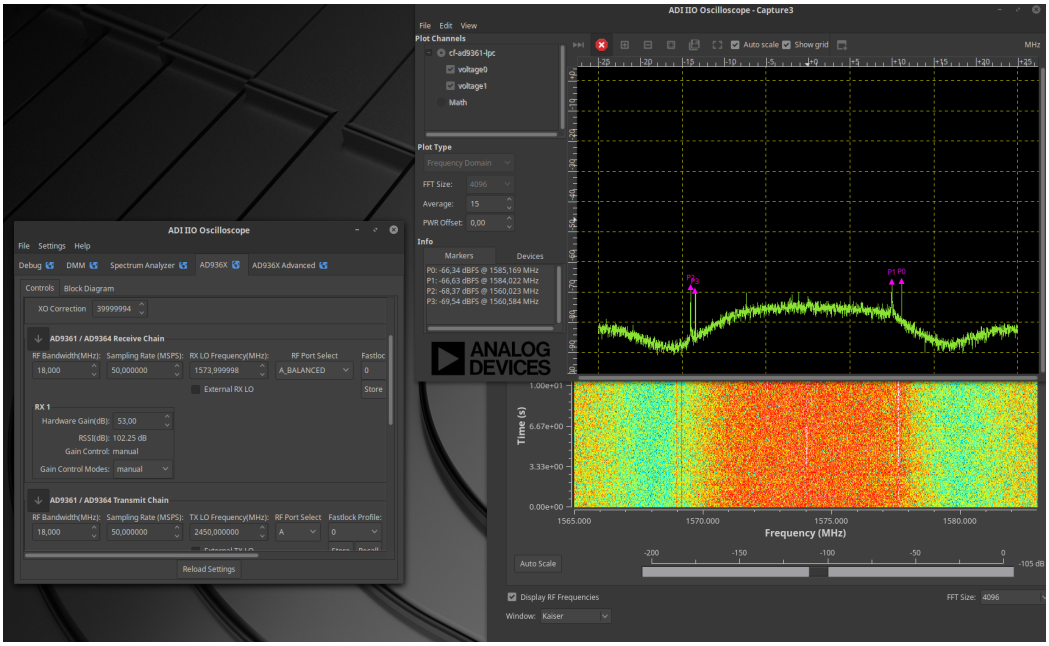


Figura B.3: Gráfico em domínio de frequência do ADALM-PLUTO a 50 MSPS e com 53 dB de ganho

Por fim, a última figura mostra que ao alterar a largura de banda RF da interface volta a estabilizar o gráfico do sinal no domínio da frequência.

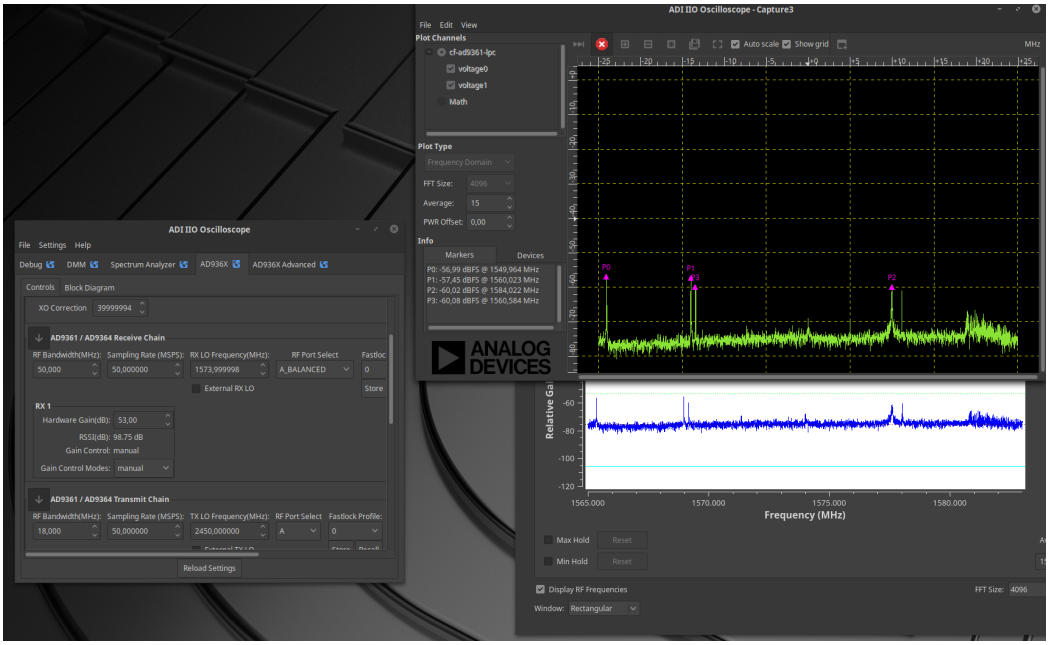


Figura B.4: Gráfico em domínio de frequência do ADALM-PLUTO a 50 MSPS, com 53 dB de ganho e 50 dB de largura de banda

B.2 Considerações finais sobre os resultados preliminares

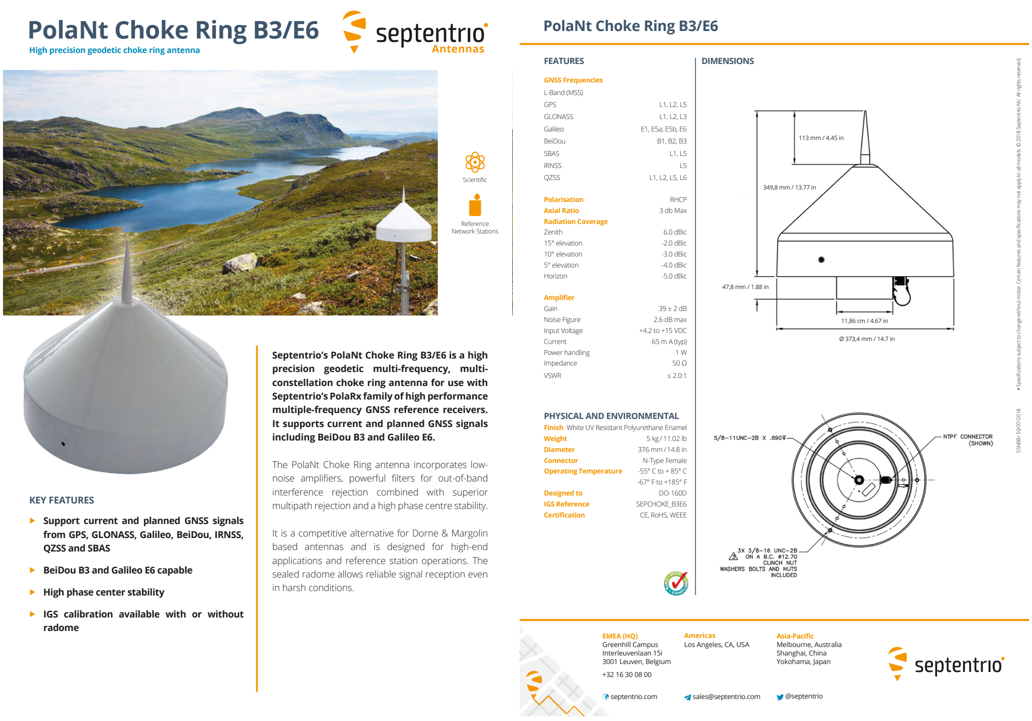
Através da análise destes resultados preliminares conclui-se que é necessário um acerto na configuração de parâmetros quando se pretende usar a interface sem os auxílios que a interface tem ao seu dispor através do *software* de fábrica, nomeadamente o controlo automático de ganho e o filtro. Achou-se necessário explorar estas funcionalidades, ou neste caso a supressão destas, pois pretendia-se testar o desempenho das várias interfaces SDR sem qualquer tipo de funcionalidade de auxílio que tivesse o objetivo de melhorar a eficiência de operação destas, assumindo-se que estivessem todas nas suas configurações padrão.

É necessário relembrar que foi graças ao facto de explorar as funcionalidades que foi encontrado um erro no próprio *software* que controla a interface. Ao concluir isto, problemas relacionados serão facilmente mitigados em situações de desenvolvimento futuro quando a interface ADALM-PLUTO for utilizada.

Anexo I

Datasheets

I.1 PolaNt Choke Ring B3/E6 antenna



PolaNt Choke Ring B3/E6

High precision geodetic choke ring antenna

septentrio Antennas

Scientific

Reference Network Stations

Septentrio's PolaNt Choke Ring B3/E6 is a high precision geodetic multi-frequency, multi-constellation choke ring antenna for use with Septentrio's PolaRx family of high performance multiple-frequency GNSS reference receivers. It supports current and planned GNSS signals including BeiDou B3 and Galileo E6.

The PolaNt Choke Ring antenna incorporates low-noise amplifiers, powerful filters for out-of-band interference rejection combined with superior multipath rejection and a high phase centre stability.

It is a competitive alternative for Dorne & Margolin based antennas and is designed for high-end applications and reference station operations. The sealed radome allows reliable signal reception even in harsh conditions.

KEY FEATURES

- **Support current and planned GNSS signals from GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, IRNSS, QZSS and SBAS**
- **BeiDou B3 and Galileo E6 capable**
- **High phase center stability**
- **IGS calibration available with or without radome**

PolaNt Choke Ring B3/E6

FEATURES

GNSS Frequencies	
L-Band (MSS)	
GPS	L1, L2, L5
GLONASS	L1, L2, L3
Galileo	E1, E5a, E5b, E6
BeiDou	B1, B2, B3
SBAS	L1, L5
IRNSS	L5
QZSS	L1, L2, L5, L6
Polarisation	RHCP
Axial Ratio	3 db Max
Radiation Coverage	
Zenith	6.0 dBic
15° elevation	-2.0 dBic
10° elevation	-3.0 dBic
5° elevation	-4.0 dBic
Horizon	-5.0 dBic
Amplifier	
Gain	39 ± 2 dB
Noise Figure	2.6 dB max
Input Voltage	+4.2 to +15 VDC
Current	65 m A (typ)
Power handling	1 W
Impedance	50 Ω
VSWR	≤ 2.0:1

PHYSICAL AND ENVIRONMENTAL

Finish	White UV Resistant Polyurethane Enamel
Weight	5 kg / 11.02 lb
Diameter	376 mm / 14.8 in
Connector	N-Type Female
Operating Temperature	-55° C to + 85° C
	-67° F to +185° F
Designed to	DO-160D
IGS Reference	SEPCHOKE_B3E6
Certification	CE, RoHS, WEEE

DIMENSIONS

113 mm / 4.45 in

349,8 mm / 13.77 in

47,8 mm / 1.88 in

11,86 cm / 4.67 in

Ø 373,4 mm / 14.7 in

5/8−11UNC−2B X .690

NTPF CONNECTOR (SHOWN)

3X 3/8−16 UNC−2B ON A B.C. ø12.70 CLINCH NUT WASHERS BOLTS AND NUTS INCLUDED

• Specifications subject to change without notice. Certain features and specifications may not apply to all models. © 2018 Septentrio NV. All rights reserved.

SSNBBr 50/07/2018

EMEA (HQ)
Greenhill Campus
Interleuvenlaan 15i
3001 Leuven, Belgium
+32 16 30 08 00

Americas
Los Angeles, CA, USA

Asia-Pacific
Melbourne, Australia
Shanghai, China
Yokohama, Japan

septentrio.com

sales@septentrio.com

@septentrio

septentrio

I.2 PolaRx5S receiver

PolaRx5S

Ionospheric Monitoring GNSS Receiver

septentrio

Key Features

- **Real time output of TEC and iono scintillation indices on all GNSS L-band frequencies**
- **100 Hz unfiltered correlation output for in-depth scintillation analysis**
- **Full compatibility with common scintillation and TEC monitoring file formats**
- **100 Hz code, phase and intensity output with user controlled noise bandwidth**
- **Unique interference monitoring and mitigation (AIM+)**
- **Powerful Web UI and logging tools**
- **Rugged housing and multiple interfaces**

The PolaRx5S is the world's leading ionospheric GNSS receiver. With 544 channels, it provides I&Q correlations, phase, code and carrier-to-noise at up to 100 Hz for all GNSS L-band frequencies.

Space Weather Applications

The PolaRx5S outputs an extensive set of GNSS measurements and iono-indices, including I&Q correlation, phase and intensity, up to 100 Hz. Featuring an ultra-low noise oscillator, it enables precise phase scintillation monitoring with a phase noise standard deviation (Phi60) as low as 0.03 rad.

GNSS+™ Technology

The A Posteriori Multipath Estimator (APME+), unique in its ability to tackle short-delay multipath, enhances the measurement quality while LOCK+ tracking guarantees robust tracking of rapid signal dynamics during scintillation events.

Radio interferences events, more and more present, are difficult to differentiate from scintillation events. The PolaRx5S incorporates advanced interference mitigation techniques to suppress interference before it can affect the iono indices.

Networking, remote operation, and data logging

Communication and (remote) management of the PolaRx5S is made easy with a powerful built-in Web UI accessible over WiFi, network or USB connection. The Web UI features secured access to all receiver settings and status information, data storage, and fast and robust firmware upgrading.

SBF, RINEX and BINEX data logging is possible on both a built-in 16 GB memory and on an externally connected device. Up to 24 independent data archives can be defined. Logged data can be accessed via the web UI server or automatically pushed to a FTP server.

PolaRx5S

FEATURES

GNSS Technology

544 hardware channels for simultaneous tracking of all visible satellite signals

Supported signals: GPS (L1P, L1 C/A, L2, L5) GLONASS (L1, L2, L3) GALILEO (E1, E5ab, AltBoc, E6), BEIDOU (B1, B2, B3), SBAS (L1, L5), IRNSS (L5), QZSS (L1, L2, L5) (Galileo, BeiDou and IRNSS are optional features)

P-code tracking on GPS and GLONASS L1 and L2 to avoid CA-P biases

Up to 100 Hz raw data output (code, carrier, CN0, navigation data)

Unfiltered correlation output

A Posteriori Multipath Estimator (APME+) including code and phase multipath mitigation

AIM+ interference mitigates against wide and narrow band interference

Spectrum analyser

All multipath mitigation and smoothing algorithms can be enabled/disabled

Formats

ISMR (Ionospheric Scintillation Monitoring Record)

Septentrio Binary Format (SBF), fully documented with sample parsing tools

RINEX (obs, nav, meteo) v2.x, 3.x

BINEX

NMEA v2.30 and v4.10 output format

RTCM output (all MSM messages supported)

Connectivity

x PPS output (max 100 Hz)

10 MHz reference output

4 hi-speed serial ports

1 Ethernet port (100 MBps)

Integrated WiFi (802.11 b/g/n)

Power Over Ethernet

1 full speed USB port

1 USB host for external disk

16 GB standard on-board logging

Up to 24 parallel data records

Advanced Web UI providing all receiver controls and status monitoring

FTP server, FTP push, SFTP

Ntrip (server, caster)

RxTools, intuitive GUI tools for receiver monitoring, data conversion and analysis

PERFORMANCE

Measurement precision

Phase noise bandwidth	1 - 50 Hz (configurable)
Phi60 noise floor	0.03 rad

Iono-indices[1]

- S4
- PhiD1, PhiD3, PhiT0, PhiT30, Phi60
- Code-Carrier divergence (CCD)
- Scintillation Intensity (SI)
- Phase spectrum slope and strength at 1 Hz (pSTr)

TEC

- Connected for satellite biases[2]
- Calibration tool for receiver+antenna biases
- User-selectable signal combination
- No need for CA-P calibration table

Update

Code, phase, intensity, correlations	100 Hz
Iono indices and TEC	60 s

Tracking performance (C/N0 threshold)[3]

Tracking	20 dB-Hz
Acquisition	33 dB-Hz

PHYSICAL AND ENVIRONMENTAL

Size	284 x 140 x 37 mm (11.18 x 5.51 x 1.45 in)
Weight	1.06 kg (2.33 lb)
Input voltage	9 - 30 VDC
Antenna LNA Power Output	
Output voltage	+5 VDC
Maximum current	200 mA
Power Consumption	3.5 - 5.7 W
Operating temperature	-40 °C to +65 °C (-40 °F to +149 °F)
Storage temperature	-40 °C to +85 °C (-40 °F to +185 °F)
Humidity	5 % to 95 % (non-condensing)

Connectors

Antenna	TNC female
REF OUT	BNC female
PPS OUT	BNC female
Power	ODU 3 pins female
COM1	ODU 7 pins female
COM2	ODU 7 pins female
COM3/4/USB	ODU 7 pins female
USB Host	ODU 5 pins female
IN	ODU 7 pins female
OUT	ODU 5 pins female
Ethernet	ODU 4 pins
WiFi Antenna	SMA female

Cerification IP65, RoHS, CE FCC Class B Part 15

[1] 3 carriers per satellite

[2] If transmitted by the satellite

[3] Depends on user settings of tracking loops parameters

SSNDS 54/11/2016 - v. 5.1

Europe
Greenhill Campus
Interleuvenlaan 15i
3001 Leuven, Belgium
+32 16 30 08 00

Americas
Suite 200,
23848 Hawthorne Blvd
Torrance, CA 90505, USA
+1 310 541 8139

Asia-Pacific
Level 901, The Lee Gardens
33 Hysan Avenue
Causeway Bay, Hong Kong
+852 3959 8680

www.septentrio.com sales@septentrio.com @septentrio

septentrio