



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO E AUTOMAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

ANÁLISE DA VIABILIDADE DO USO DE XBEE PARA A IMPLEMENTAÇÃO DE UMA REDE MULTI VANTS

Filipe Viana Monteiro

Orientador: Prof. Dr. Pablo Javier Alsina

Natal/RN
Dezembro de 2016

Análise da Viabilidade do Uso de Xbee para a Implementação de um Rede Multi VANTs

Filipe Viana Monteiro

Orientador: Prof. Dr. Pablo Javier Alsina

Monografia apresentada à Banca Examinadora do Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia de Computação, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro de Computação.

Natal/RN
Dezembro de 2016

*Aos meus pais, Américo Monteiro
Filho e Rosalba Viana Monteiro, que
com todos os esforços, puderam me
proporcionar a melhor educação
possível.*

Agradecimentos

Primeiramente tenho que agradecer ao meus pais, Américo Monteiro Filho e Rosalba Viana Monteiro, que sempre me possibilitaram o melhor ensino que nos era acessível. Nunca esquecerei o esforço que fizeram, e ainda fazem, para educar a mim e a minha irmã Andreza. Espero um dia poder me torna um pai tão bom quanto vocês.

Também devo agradecer aos amigos que sempre me apoiaram durante minha trajetória acadêmica, seja ajudando a entender os conteúdos de sala de aula ou me ajudando a esquecer um pouco desses conteúdos e aliviar um pouco minha cabeça de toda a pressão que é a vida universitária.

Por fim tenho que agradecer, em especial, a excepcional turma de Engenharia da Computação formada em 2013, a qual faço parte. Acho que a nossa união foi um ponto que ajudou bastante na nossa formação. Nunca esquecerei das noites de estudos e projetos no DCA. E que venham muitas terças da pizza naquele mesmo lugar para comemorar nossas conquistas daqui pra frente.

Muito Obrigado a todos vocês.

Resumo

Esse trabalho é complementar ao desenvolvimento de uma arquitetura de rede e estratégia de busca a ser implementada no projeto SPACEVANT realizado pelo Centro de Lançamento da Barreira do Inferno (CLBI) em parceria com a Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Aqui serão discutidos os requisitos que uma rede multi VANTs deve prover, em especial no contexto do projeto, e a viabilidade de implementar essa rede utilizando tecnologia XBee.

Palavras-chave: Rede de Comunicação; VANT; Rede Multi VANTs; Estratégia de Busca; Xbee.

Abstract

This work is complementary to the development of a network architecture and a search strategy to be implemented on the project SPACEVANT realized by the Barreira do Inferno Launch Center (CLBI) in partnership with Rio Grande do Norte Federal University (UFRN). Here will be discussed the requirements of a Multi UAVs network, specially on the context of the project, and the viability to implement such network using Xbee technology.

Keywords: Communication Network; UAV; Multi UAVs Network; Search Strategy; Xbee.

Sumário

Lista de Figuras	iii
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Estrutura do Trabalho	2
2 Projeto SpaceVANT	3
2.1 Solução Atual	3
2.2 Objetivo do Projeto	3
3 Características de um Rede Multi VANTs	5
3.1 Escalabilidade	5
3.2 Capacidade de Sobrevivência	6
3.3 Velocidade da Missão	6
3.4 Complexidade do Controle	7
3.5 Economia de Energia	7
4 Estratégia de Varredura	8
4.1 Varredura sem Divisão em Subáreas	9
4.2 Varredura com Divisão em Subáreas	10
5 XBee PRO S3B 900HP	11
5.1 Especificações Técnicas	11
5.2 Método de Configuração	12
5.2.1 AT Command Mode	12
5.2.2 XCTU Software	12
5.3 Modos de Operação	13
5.3.1 Transparent Mode	13
5.3.2 API Mode	14

6	Procedimento Experimental	16
6.1	Tecnologias Utilizadas	16
6.1.1	XBee Explorer	16
6.1.2	Phantom 3 Standard	17
6.1.3	XCTU	18
6.2	Local dos Experimentos	19
6.3	Experimentos Realizados	19
7	Resultados Experimentais	21
8	Conclusão	22
	Referências bibliográficas	23

Lista de Figuras

2.1	Aeronave modelo Penguin.	4
3.1	Esquema rede multi VANTs com 4 nós.	6
4.1	Método de Busca em Espiral.	8
4.2	Método de Busca Vai e Volta.	9
4.3	Varredura Vai e Volta sem Subdivisão de Área.	9
4.4	Varredura Vai e Volta com Subdivisão de Área.	10
5.1	Pagina inicial do software XCTU.	15
5.2	Estrutura do <i>frame</i> no modo API.	15
6.1	Módulo XBee PRO S3B 900HP.	17
6.2	XBee Explorer.	17
6.3	Aeronave Phantom 3 <i>Standard</i>	18
6.4	Tela do teste de força de sinal.	19
6.5	Tela do teste de taxa de transmissão (<i>throughput</i>).	20

Capítulo 1

Introdução

A utilização de veículos não tripulados já é bastante evidente em aplicações tanto civis quanto militares. Podem-se encontrar veículos dessa categoria substituindo a presença humana em situações onde há risco a integridade física ou quando o acesso é simplesmente impossível [Whitehead e Hugenholtz 2014]. Dentre os veículos não tripulados, temos a categoria de veículos aéreos não tripulados (VANTs) que são usados largamente para realização de filmagens aérea a baixo custo. Com o investimento de algumas centenas de dólares, qualquer pessoa pode começar a produzir imagens aéreas utilizando VANTs comerciais. O mercado está repleto de modelos comerciais disponíveis para o público em geral, como por exemplo os quadricópteros fabricados pela DJITM, o recém anunciado *Karma* fabricado pela GoProTM, entre outros.

As aplicações para veículos aéreos não tripulados não se restringe ao uso civil ou para gravação de imagens aéreas, esta plataforma já vem sendo utilizada também em aplicações militares. Ao aliar o poder da plataforma em questão com outras tecnologias, como por exemplo o processamento digital de imagens, problemas mais complexos podem ser resolvidos.

Um problema que pode ser solucionado com a utilização de VANTs dotados de ferramentas para processamento digital de imagem seria a identificação de embarcações não autorizadas em área de impacto de foguetes, problema esse relevante ao Centro de Lançamento Barreira do Inferno (CLBI) localizada em Natal no Rio Grande do Norte.

Em parceria com a Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), através do projeto de pesquisa SPACEVANT coordenado pelo professor Dr. Pablo Javier Alsina, o CLBI vem desenvolvendo uma solução, incluindo software e hardware, para a realização da verificação da área de impacto de foguetes de forma autônoma utilizando VANTs.

1.1 Objetivos

Como parte do desenvolvimento dessa solução, esse trabalho tem por objetivo validar as especificações técnicas do transmissor XBEE PRO S3 900HP adquirido para a implementação da rede de comunicação e a viabilidade da utilização desse tipo de equipamento no contexto de uma rede multi VANT.

A fim de realizar essa validação, foram realizados teste de força de sinal e taxa de transferência de pacotes em uma rede *mesh/ad hoc*, implementada por módulos XBee PRO S3 900HP, usando quadrrrotores *Phantom 3* do modelo Standard fabricados pela DJITM para variar a distância entre os pontos da rede e, posteriormente, verificar os efeitos do distanciamento nos parâmetros estudados.

1.2 Estrutura do Trabalho

Após este capítulo introdutório, é apresentada uma breve descrição do projeto SpaceVANT a fim de familiarizar o leitor com o contexto desse trabalho. Em seguida, no capítulo 3, são discutidas as características das redes multi VANTs.

A estratégia de varredura de área desenvolvida pelo mestrando Maurício Rabello para o projeto é apresentada no capítulo 4.

No capítulo 5, são apresentados o módulo XBee adquirido pelo projeto para a implementação da rede, descrevendo suas especificações técnicas e os modos de operação disponíveis.

Em seguida, o procedimento experimental desenvolvido, bem como os equipamentos utilizados para a sua realização, são apresentados no capítulo 6.

Por fim temos a discussão dos resultados experimentais e a conclusão do trabalho nos capítulos 7 e 8, respectivamente.

Capítulo 2

Projeto SpaceVANT

O projeto SpaceVANT é um projeto pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), alocado no Departamento de Engenharia da Computação e Automação, em parceria com o Centro de Lançamento Barreira do Inferno (CLBI). O projeto tem por objetivo tornar o processo de verificação da área de impacto de foguetes lançados pelo CLBI mais eficiente tanto em relação ao tempo gasto quanto ao custo financeiro [Everaerts e others 2008].

2.1 Solução Atual

Atualmente, a área de impacto de um foguete a ser lançado é vistoriada com o auxílio de um avião tripulado que sobrevoa a área em busca de embarcações não autorizadas. Somente quando o avião sobrevoa toda a região e certifica que nenhuma embarcação se encontra no local, só então o lançamento poderá ser autorizado.

A solução empregada no momento possui alguns pontos negativos, primeiramente, o custo com os aviões que realizarão a operação de varredura, bem como o custo de manutenção dos mesmo, é bastante elevado quando comparado com o custo de aquisição e manutenção de VANTs. Além disso, a depender do tamanho da área a ser vistoriada, o emprego de mais de um avião pode ser necessário para garantir que não haverá nenhuma embarcação não autorizada no período de tempo determinado pela missão, dessa forma, aumentando ainda mais o custo da operação.

2.2 Objetivo do Projeto

Visando, então, solucionar o problema apresentado de forma mais eficaz, o projeto SpaceVANT visa desenvolver sistema de VANTs autônomos que irão realizar a varredura da área de impacto que será entrada do sistema supervisorio da solução.



Figura 2.1: Aeronave modelo Penguin.

O produto final do projeto incluirá: um sistema supervisorio ou estação base, aeronaves autônomas do modelo *Penguin* (Fig 2.1) dotadas de computador e câmera fotográfica embarcados, sistema de processamento de imagens e, por fim, uma rede de comunicação que conectará todas as aeronaves e a estação base.

Para a realização da missão de varredura serão necessários algumas entradas a estação base, sendo elas, a quantidade de aeronaves a serem empregadas na missão, tempo de duração da missão, área a ser varrida e estratégia de varredura a ser utilizada, estratégias essas que serão apresentadas no Cap. 4.

Quando fornecidas todas as entradas corretamente, as rotas de voo serão definidas e carregadas nos VANTs e a missão terá início. O progresso da missão poderá ser acompanhada através da estação base e caso alguma embarcação seja identificada um alerta será lançado pela rede até chegar a estação base visível ao operador da missão. Esse alerta será composto pela imagem da possível embarcação identificada pelo sistema, a localização geográfica do objeto e a hora na qual ele foi identificado.

Dado o contexto em que esse trabalho se encontra e objetivo do projeto SpaceVANT, as características de uma rede multi VANTs para a aplicação serão discutidas a seguir.

Capítulo 3

Características de um Rede Multi VANTs

As redes multi VANTs são uma evolução das redes formadas por apenas um VANT e a base de controle, onde toda a troca de informações é realizada através de um *link* entre as duas partes do sistema e caso esse *link* fosse quebrado por algum motivo toda a rede era desfeita. A rede multi VANTs, então, com intuito de aumentar o alcance e a confiabilidade da rede através da adição de novos nós.

[Gupta et al. 2015] apresenta algumas das características de uma rede multi VANTs comparando-as a solução de um único VANT, sendo elas:

- Escalabilidade
- Capacidade de Sobrevivência
- Velocidade da Missão
- Complexidade do Controle
- Economia de Energia

3.1 Escalabilidade

Por definição uma rede multi VANTs é uma versão escalada da solução composta por VANT mais base de controle. Dessa forma, a adição de nós se torna uma operação comum a uma rede multi VANTs tornando-o uma solução escalável que pode variar o tamanho e, consequentemente, o alcance da rede dada as necessidades específicas da missão.

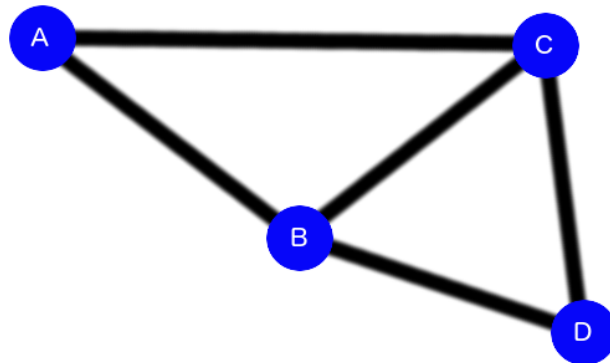


Figura 3.1: Esquema rede multi VANTS com 4 nós.

3.2 Capacidade de Sobrevivência

Como mencionado anteriormente, na solução formada por VANT mais base de controle, a rede é composta por apenas um *link* e caso esse seja quebrado a comunicação entre os nós dessa rede será perdida. No entanto, dado que uma rede multi VANTS será formada múltiplos nós e *links*, em caso da perda de um nó a rede pode se reorganizar e garantir a sobrevivência da rede como um todo.

Por exemplo, em uma rede composta por quatro nós em topologia *mesh* como mostra a fig. 3.1, no caso de falha do nó B, a comunicação entre os nós entre os nós A e D poderá ser feita através do nó C, garantindo assim a sobrevivência da rede.

3.3 Velocidade da Missão

A velocidade de realização de uma determinada missão será proporcional ao tamanho da rede multi VANT, quanto maior a quantidade de VANTS em uma determinada rede a ser utilizada para executar uma missão de varredura de área, menor será o tempo da missão. Por outro lado, a adição de um nó a uma rede resultará no aumento do custo da missão. Dessa forma, é importante analisar os benefícios do aumento de uma rede multi VANTS do ponto de vista financeiro.

3.4 Complexidade do Controle

A complexidade do controle de uma rede composta por apenas um VANT e uma base de controle é baixa quando comparado ao cenário de uma rede multi VANTS. Quanto maior a quantidade de nós em uma rede maior será o custo computacional para controlar os nós e determinar os caminhos para realização da comunicação entre eles.

Outro ponto que aumente ainda mais essa complexidade é a frequente mudança de topologia da rede, seja causada pela movimentação rápida dos nós, que se dá nas três dimensões, ou pela perda de nós devido a problemas de funcionamento ou fim da carga da bateria de alimenta o VANT.

3.5 Economia de Energia

Como VANTS possuem fonte de alimentação limitada, é importante garantir que rede funcione da forma mais eficiente possível quanto ao consumo de energia, de tal forma que os nós possam permanecer ativos na rede pelo máximo de tempo possível. Caso a rede de comunicação consuma muita energia dos VANTS, será necessário a substituição de nós durante a execução de uma missão o que, conseqüentemente, aumentará o tempo necessário para a realização da mesma.

As características discutidas nessa sessão servirão de base para produção do protocolo de testes e, por fim, desenvolvimento da arquitetura de rede a ser implementada futuramente.

Capítulo 4

Estratégia de Varredura

Quando se utiliza apenas uma aeronave para realizar a varredura de uma área de impacto em busca de possíveis embarcações não autorizadas, pode-se utilizar de diferentes estratégias de voo, por exemplo, o método de varredura em espiral ou o método de varredura vai e volta [Öst 2012].

Nesse primeiro método, a trajetória de voo é iniciada na extremidade da região e a aeronave percorrerá a área em espiral até o centro como mostra a figura 4.1.

O segundo método realiza a varredura em linhas realizando curvas de 180 graus ao atingir a extremidade da área como mostra a figura 4.2.

Em um cenário onde mais de um VANT será utilizado para a varredura de um área, há duas maneiras de acelerar a realização da missão, sendo elas realizar a inspeção com ou sem divisão em subárea.

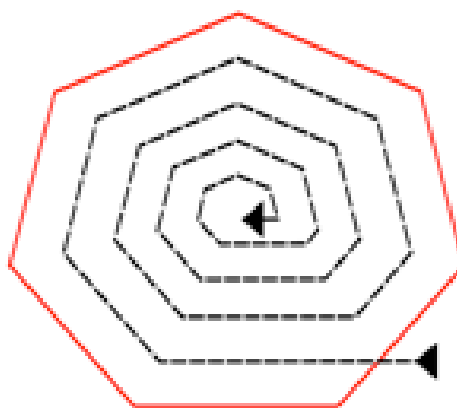


Figura 4.1: Método de Busca em Espiral.

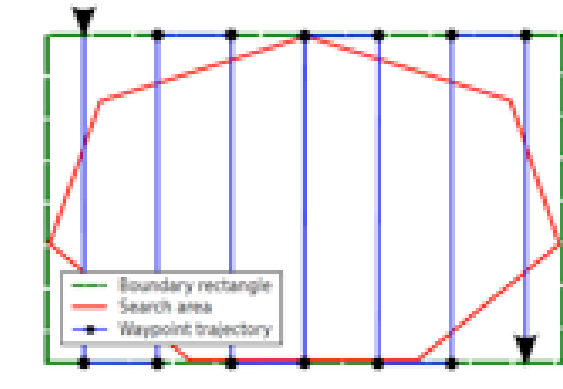


Figura 4.2: Método de Busca Vai e Volta.

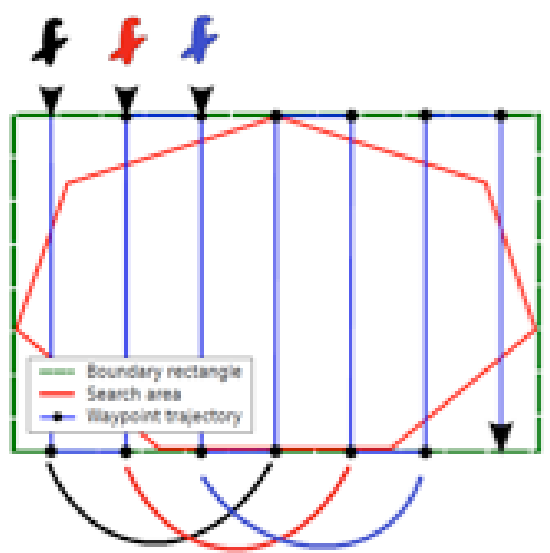


Figura 4.3: Varredura Vai e Volta sem Subdivisão de Área.

4.1 Varredura sem Divisão em Subáreas

Uma maneira de tomar proveito de uma rede multi VANTs para a varredura da área de impacto de foguetes seria realizar a missão na área por completo mantendo os VANTs voando a uma mesma velocidade e espaçados igualmente realizando o mesmo percurso, como mostra a figura 4.3. Ambos velocidade e distância entre VANTs será relacionada ao ângulo de abertura da lente da câmera utilizada, a velocidade do processamento de imagem, altura e velocidade de voo.

A utilização da estratégia sem divisão em subárea de varredura não há um considerável aumento de alcance da rede, pois os nós estarão sempre próximos. Por outro lado, em caso de perda de um nós o processo de reorganização é simples, bastando apenas aproximar os

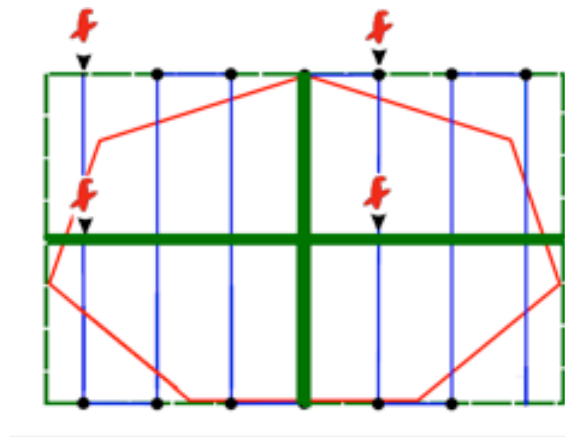


Figura 4.4: Varredura Vai e Volta com Subdivisão de Área.

nós restantes.

Uma decisão que pode ser tomada para aumentar o alcance da rede seria utilizar um nó de longo alcance e múltiplos nós de pequeno alcance, deixando a comunicação com a estação base a cargo do nó de maior alcance que funcionaria como *hub* para os demais nós. Um ponto negativo dessa solução seria que caso o nó *hub* perca conexão, os demais nós da rede também perderiam a conexão com a estação base.

4.2 Varredura com Divisão em Subáreas

Uma outra estratégia que poderia ser tomada seria dividir a área de varredura em subáreas de mesmo tamanho e utilizar os VANTs disponíveis para realizar a varredura de uma dessas subáreas como mostra a figura 4.4. Nessa solução teríamos um aumento significativo de alcance da rede, de modo que os pacotes serão transportados de nó em nó ate chegar a estação base ou nó de destino.

Em caso de perda de um dos nós da rede, a decisão a ser tomada para continuar a missão e garantir a varredura da área por completa não é tão trivial quando na estratégia de varredura sem divisão em subáreas, sendo necessário dividir novamente a área levando em consideração a área já varrida, como sugere [Marro e Gonçalves 2013].

Ambas as estratégias de varredura apresentadas nessa sessão possuem seus pontos negativos e positivos e a decisão de qual deles deve ser utilizada será função do operador do sistema de varredura. Na sessão a seguir serão discutidas as especificações técnicas do módulo Xbee adquirido pelo projeto.

Capítulo 5

XBee PRO S3B 900HP

O módulo XBee adquirido pelo projeto SpaceVANT para a implementação da rede multi VANTs foi o modelo XBee PRO S3B 900HP fabricado pela Digi InternationalTM. Esse capítulo descreve as especificações técnicas, método de configuração dos módulos e modos de operação como apresentado no guia de usuário do dispositivo. [Dig 2015]

5.1 Especificações Técnicas

O guia do usuário do módulo XBee PRO S3B 900HP indica que o mesmo possui um alcance de comunicação de até 610 metros quando em ambiente interno ou urbano e transmitindo a 10 Kb/s. Quando o taxa de transmissão aumenta para 200 Kb/s, o alcance do módulo deve cair pela metade, ou seja, 305 metros. Para ambiente externo e com visada direta, o alcance será de 15.5 quilômetros transmitindo a uma taxa 10 Kb/s e 65 quilômetros quando transmitindo a uma taxa de 200 Kb/s.

O módulo, que ocupa uma volume de aproximadamente 3.66 cm³ e pesa entre 5 e 8 gramas, deve ser alimentado com uma fonte de 2.1 até 3.6 volts de corrente contínua, mas para fontes inferiores a 3.0 VDC a performance do módulo pode ser reduzida. A Banda de frequência de operação é selecionável via software e varia entre 902 e 927 MHz. Quanto a *Interface* de dados, UART e SPI estão disponíveis para envio ou requisição de dados do módulo. O XBee PRO S3B 900HP também possui 15 pinos de I/O digital e 4 conversores analógico-digital de 10-bits distribuídos em 20 pinos físicos.

A respeito de rede e segurança, o módulo suporta redes de topologia *mesh*, ponto-a-ponto, estrela ou *peer-to-peer* utilizando Ids de 64 bits para endereçamento. Além disso, estão disponíveis 64 canais de comunicação que podem ser selecionados pelo usuário e opção de criptografia avançada padrão de 128 bits.

5.2 Método de Configuração

A respeito do processo de configuração dos módulos XBee, os parâmetros podem ser consultados e alterados de duas maneiras diferentes: forçando o aparelho a entrar em *AT Command Mode*, solicitando ou enviando os valores dos parâmetros do XBee através da *interface* de dados, ou fazendo uso de do software XCTU disponibilizado pela Digi InternationalTM.

5.2.1 AT Command Mode

A primeira maneira de configurar um módulo XBee seria fazer uso do modo *AT Command Mode* enviando mensagens, de forma serial, requisitando valores de parâmetros ou solicitando alteração de algum parâmetro. É importante alertar que esse modo de configuração só é acessível através do uso da *interface* UART.

Para forçar um módulo XBee a entrar em modo de configuração é necessário enviar uma sequência específica de caracteres, sendo essa sequência composta por três caracteres de adição (+++). Após receber essa sequência, o módulo retornará 'OK' indicando que o mesmo se encontra em *AT Command Mode* aguardando algum comando, caso nenhum comando seja enviado em até um segundo, o módulo sai automaticamente do modo de configuração.

Uma vez que o módulo já se encontra em *AT Command Mode*, para solicitar o valor de um determinado parâmetro deve-se enviar a mensagem 'AT' acompanhada da sigla do parâmetro que deseja-se obter o valor. Por exemplo, para verificar o valor do parâmetro *Preamble ID* (HP), deve-se enviar o comando 'ATHP' e aguardar o retorno do valor atual do parâmetro.

Para alterar o valor de um parâmetro em *AT Command Mode*, deve-se enviar a mensagem 'AT' acompanhada da sigla do parâmetro a ser modificado e o novo valor do parâmetro em hexadecimal, o uso de um espaço para separar a sigla do parâmetro do valor a ser atribuído é opcional. Caso deseja-se modificar o valor do *Preamble ID* para 7FFF, envia-se 'ATHP7FFF' ou 'ATHP 7FFF'.

5.2.2 XCTU Software

Uma forma mais simples de visualizar e alterar os parâmetros de um módulo XBee é fazer uso do software fornecido pela fabricante do módulo, no caso do XBee PRO S3B 900HP, o XCTU (figura 5.1) distribuído pela Digi InternationalTM.

Através do XCTU, pode-se procurar por módulos XBee conectados fisicamente ao computador onde a aplicação está rodando, visualizar e alterar os parâmetros do módulo conectado e até mesmo procurar os outros nós pertencentes a rede a qual o módulo está conectado, bem como visualizar e alterar os parâmetros dos outros nós da rede.

Além de visualizar e editar parâmetros, o XCTU também possui um modo de console, onde pode-se enviar mensagens ao módulo conectado e visualizar o conteúdo das mensagens que estão entrando e saindo do módulo, e um modo de visualização de rede, disponível apenas para módulos operando em *API Mode*, onde são mostrados os nós que pertencem a rede do módulo conectado, bem como a topologia da rede.

O XCTU também possui algumas ferramentas para análise da qualidade da rede a qual o módulo XBee está conectada, por exemplo testes de força de sinal e *throughput*, os quais foram utilizados para aferir a qualidade dos *links* formados pelos XBee nesse trabalho.

5.3 Modos de Operação

O módulo XBee PRO S3B 900HP possui três possíveis modos de operação, sendo eles: *Transparent Mode*, *API Mode* e *AT Command Mode*, utilizado exclusivamente para configuração do módulo e previamente explicado.

5.3.1 Transparent Mode

O *Transparent Mode* é o modo de operação padrão do XBee e é obrigatório o uso da interface UART ao utilizar desse modo. Quando funcionando em modo transparente, o módulo receberá dados, continuamente, através da porta UART e quando a quantidade de dados atingir o limite de *bytes*, determinado na configuração do parâmetro *Maximum RF Payload Bytes* (NP), os dados serão organizados em um *frame* pelo próprio XBee e esse pacote é então enviado para o destinatário definido pelos parâmetros *Destination Address High* (DH) e *Destination Address Low* (DL).

Apesar da facilidade de uso, esse modo de operação é indicado apenas para uso em redes com topologia ponto-a-ponto, onde o destinatário dos pacotes não varia com frequência, pois para mudar o destinatário de um pacote nesse modo de operação será necessário entrar em modo de configuração e alterar múltiplos parâmetros para cada envio. Sendo assim, esse modo não é adequado para a implementação de uma rede multi VANTs onde um mesmo pacote poderia ser enviado para múltiplos nós na rede, por exemplo.

5.3.2 API Mode

Diferentemente do *Transparente Mode*, onde o XBee realiza a operação de criação do *frame* que será transmitido, no *API Mode* o módulo já recebe o *frame* contendo todas informações como destinatário e tipo de dado, por exemplo, e apenas transmite o *frame* recebido de acordo com as informações do mesmo. Esse modo é compatível com ambas as interfaces UART e SPI.

A estrutura do *frame* a ser recebido pelo XBee está ilustrada na figura 5.2 e contém quatro campos principais. O primeiro *byte* do *frame* indica apenas o início do mesmo, seguido por dois *bytes* que irão indicar o tamanho do *frame*, sem contar o *byte* que é utilizado para garantir a integridade do *frame* através de uma operação *checksum* e, por fim, a maior porção do *frame* contém o dado que está sendo transmitido e o identificador daquele tipo de dado.

Esse modo de operação é indicado para redes com topologia *mesh*, pois o destinatário no *frame* está indicado dentro do mesmo, sem a necessidade de configurar o módulo a cada novo envio. Sendo assim, o *API Mode* se apresenta como um modo de operação compatível com o contexto de uma rede multi VANTs.

Apresentadas as especificações técnicas do módulo XBee PRO S3B 900HP, os modos de operação disponíveis e o ambiente de configuração e testes XCTU, o próximo capítulo descreve o procedimento dos testes realizados para avaliar a viabilidade desse módulo na implementação de uma rede multi VANTs, bem como os componentes utilizados nos testes.

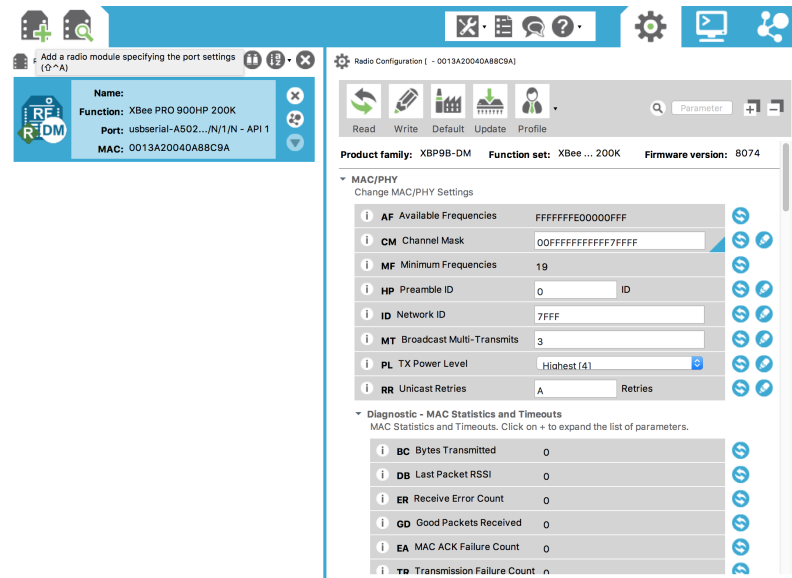
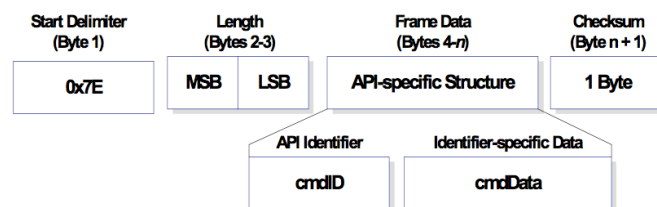


Figura 5.1: Página inicial do software XCTU.

Figura 5.2: Estrutura do *frame* no modo API.

Capítulo 6

Procedimento Experimental

Esse capítulo descreve os dispositivos e a metodologia utilizada na execução dos experimentos, o cenário onde esses experimentos foram realizados e, por fim, os experimentos realizados para aferir parâmetros de funcionamento dos módulos XBee PRO S3B 900HP.

6.1 Tecnologias Utilizadas

Além do módulo XBee PRO S3B 900HP (fig 6.1), foram utilizados na execução dos experimentos: módulos *XBee Explorer*, aeronaves *Phantom 3 Standard*, o *software* XCTU utilizado para a realização dos testes e uma fonte de alimentação externa para alimentar o conjunto módulo XBee + *XBee Explorer*.

As especificações técnicas, bem como o modo de funcionamento, dos módulos XBee já foram discutidos no capítulo 5. Os demais materiais utilizados serão descritos a seguir.

6.1.1 XBee Explorer

O *XBee Explorer* é a *interface de hardware* utilizada para conectar um módulo XBee a outros dispositivos, como por exemplo um computador. O módulo adquirido pelo projeto, como mostra a figura 6.2, possui duas formas de acesso ao módulo XBee acoplado a ele, sendo essas uma porta micro usb, utilizada para alimentação e comunicação, ou um conjunto de pinos contendo Rx, Tx, *reset* e os pinos a serem utilizados para alimentação.

Apesar de a voltagem de alimentação dos módulos XBee ser de +3.3 volts, o *XBee Explorer* deve ser alimentado com uma fonte que forneça +5 volts, que é reduzida para a voltagem de alimentação requerida pelo módulo XBee através da circuitaria do *Explorer*.

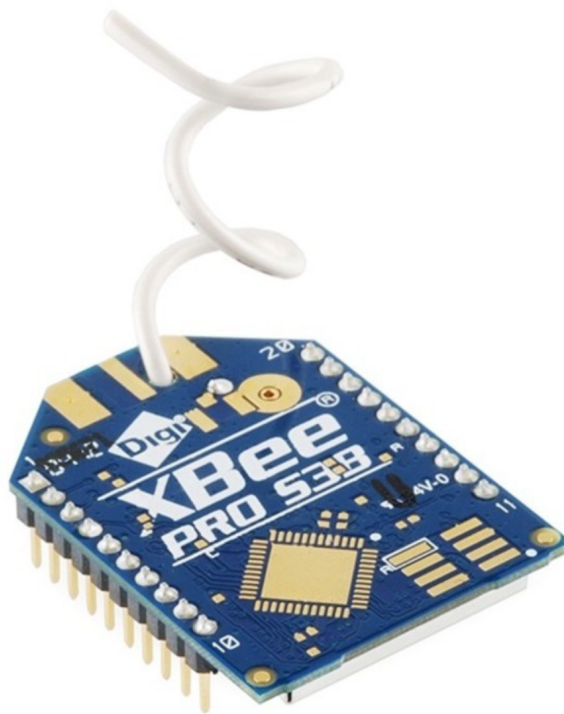


Figura 6.1: Módulo XBee PRO S3B 900HP.

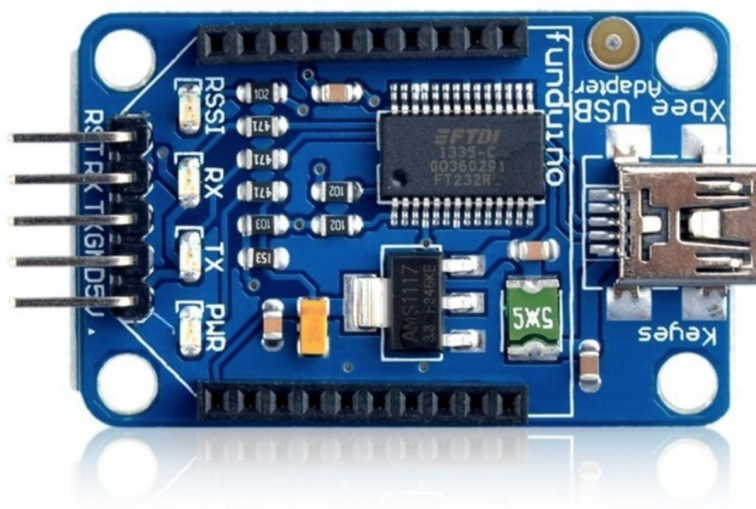


Figura 6.2: XBee Explorer.

6.1.2 Phantom 3 Standard

Outro dispositivo de grande importância para a realização dos experimentos foram os quadricópteros do modelo *Phantom 3 Standard* (figura 6.3) adquiridos pelo projeto e

utilizados para variação e medição da distância entre os nós da rede *mesh* formada para a realização dos teste de performance.

A escolha desse modelo de quadrirrotor se deu pela facilidade de voo e manutenção das aeronaves e os modos de voo personalizados, em especial a função de voo em trajetória circular em torno de um ponto fixo com velocidade controlada. Nesse modo de voo o operador da aeronave define o centro da trajetória circular, o raio e a velocidade a qual a aeronave vai voar. Como discutido nas próximas sessões, esse modo de voo foi utilizado nos experimentos realizados para medir o efeito da movimentação dos nós da rede na qualidade do *link*, consequentemente, da rede multi VANT.



Figura 6.3: Aeronave Phantom 3 *Standard*.

6.1.3 XCTU

O XCTU, brevemente apresentado no capítulo 5, é o *software*, disponibilizado pela fabricante dos módulos XBee, utilizado para configuração dos dispositivos e que também possui algumas ferramentas para análise da qualidade da rede formada. Ferramentas essas que foram utilizadas nesse trabalho para aferir a qualidade da rede, em especial o teste de força de sinal e o de taxa de transmissão (*throughput*).

As figuras 6.4 e 6.5 apresentam, respectivamente, as telas dos testes de força de sinal e taxa de transmissão disponíveis no *software* XCTU.

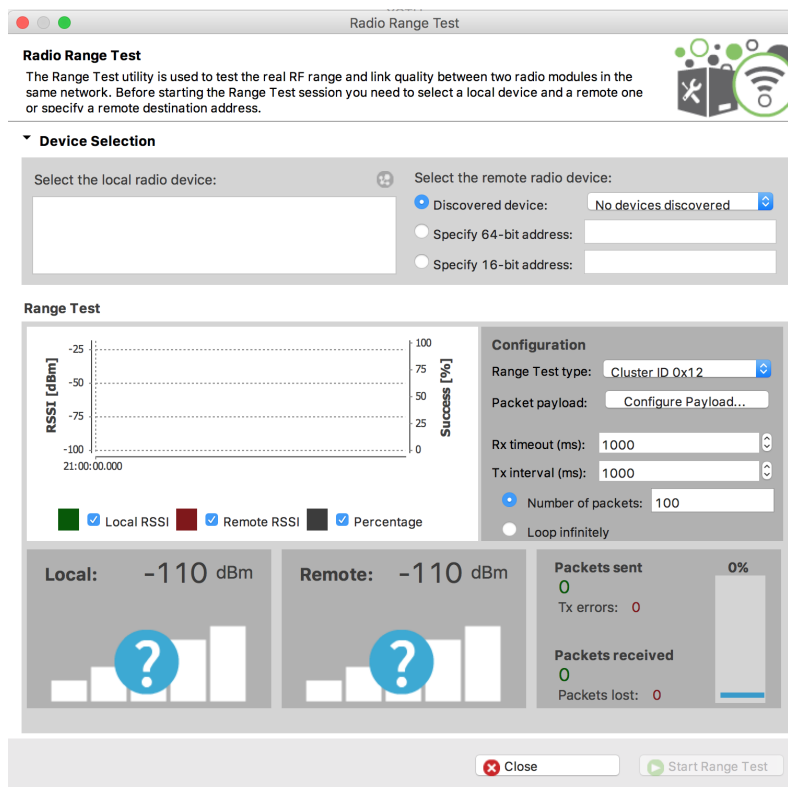


Figura 6.4: Tela do teste de força de sinal.

6.2 Local dos Experimentos

O local ideal para a realização dos experimentos seria o local onde o sistema final seria utilizado, ou seja, o próprio Centro de Lançamento Barreira do Inferno (CLBI), pois os testes refletiriam as condições específicas de interferência e meio de comunicação onde a rede multi VANTs será operada.

Infelizmente, devido a indisponibilidade de tempo e acesso, os testes de campo aqui apresentados foram realizados em sua maioria no campo central da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), o que pode ser considerado um ambiente urbano e pode apresentar níveis de interferência de sinal maiores que o ambiente onde a rede será de fato operacionalizada. Já os testes de bancada foram realizados no laboratório de robótica localizado no Departamento de Computação e Automação (DCA).

6.3 Experimentos Realizados

No intuito de aferir a qualidade dos *links* e, conseqüentemente, a rede a qual eles fazem parte, no contexto de um rede multi VANTs, foram realizados múltiplos testes de

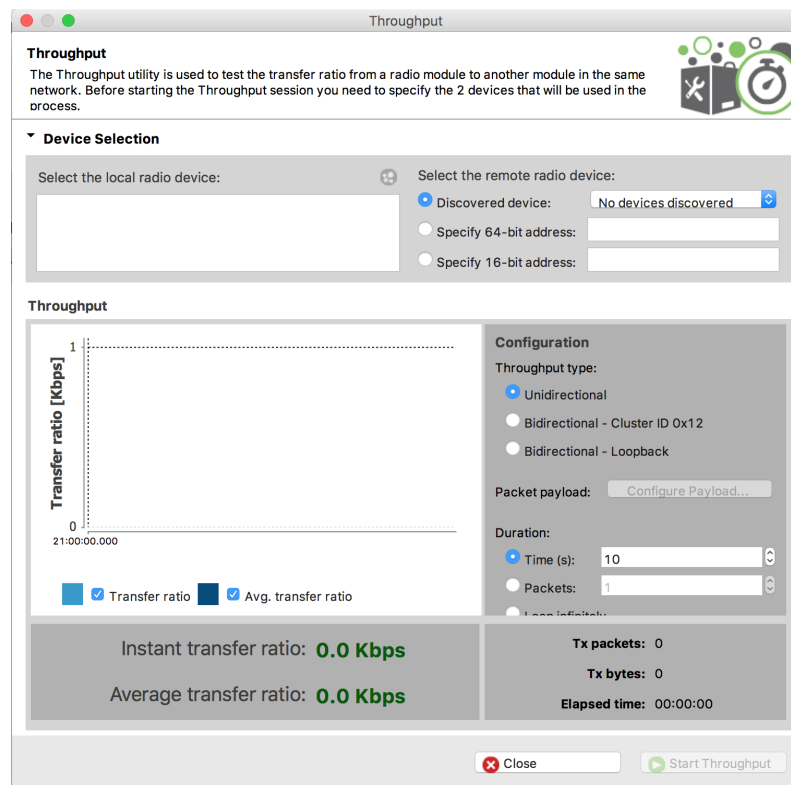


Figura 6.5: Tela do teste de taxa de transmissão (*throughput*).

força de sinal e taxa de transmissão para diferente cenários, sendo eles:

- Teste de bancada
- Teste em ar com posição fixa
- Teste em ar em trajetória circular

6.3.1 Teste de Bancada

6.3.2 Teste em Ar com Posição Fixa

6.3.3 Teste em Ar em Trajetória Circular

Capítulo 7

Resultados Experimentais

Capítulo 8

Conclusão

Referências Bibliográficas

Dig [2015], *XBee-PRO 900HP and XSC RF Modules S3 and S3B*. Revision R.

Everaerts, Jurgen et al. [2008], ‘The use of unmanned aerial vehicles (uavs) for remote sensing and mapping’, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **37**, 1187–1192.

Gupta, Lav, Raj Jain e Gabor Vaszkun [2015], ‘Survey of important issues in uav communication networks’, *IEEE Communications Surveys & Tutorials* **18**(2), 1123–1152.

Marro, Alessandro Assi e Luiz Marcos Garcia Gonçalves [2013], A path planning method for multi-uav system, *em* ‘Robotics Symposium and Competition (LARS/LARC), 2013 Latin American’, IEEE, pp. 129–135.

Öst, Gustav [2012], ‘Search path generation with uav applications using approximate convex decomposition’.

Whitehead, Ken e Chris H Hugenholtz [2014], ‘Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (uass), part 1: A review of progress and challenges 1’, *Journal of Unmanned Vehicle Systems* **2**(3), 69–85.