Estudo da possibilidade de explorar o modo AFH do padrão Bluetooth para sensoriamento espectral

Pedro H. C. Piantino e Dayan A. Guimarães
Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel
pedro.h@get.inatel.br, dayan@inatel.br

***Abstract*—In the adaptive frequency hopping (AFH) technique used in the Bluetooth standard, channels under interference are excluded from the hopping list, as an attempt to avoid a drop in the system's quality of service. This article presents the studies and tests made about the possibility of using the Bluetooth AFH for spectrum sensing. It is verified that the proposed subject has potential to be explored, in order to this happens there are some challenging conditions that make the process harder to be implemented. Some of those conditions were mapped in this study and described intending to make easier to understand the current boundaries of this technique and in which conditions it can be used for spectrum sensing.**

***Index Terms*—Adaptive frequency hopping, Bluetooth, channel map, cognitive radio, spectrum sensing.**

***Resumo*—Na técnica de saltos em frequência adaptativa (adaptive frequency hopping, AFH) utilizada no padrão Bluetooth, os canais sob interferência são excluídos da lista de saltos, na tentativa de evitar a queda da qualidade de serviço do sistema. Este artigo apresenta os estudos e testes realizados sobre a possibilidade de utilização do Bluetooth AFH para sensoriamento espectral. Verifica-se que a técnica proposta tem potencial de ser explorada, porém para que isso aconteça existem algumas condições desafiadoras que dificultam a implementação do processo. Algumas dessas condições foram mapeadas neste estudo e descritas com o intuito de facilitar o entendimento dos atuais limites desta técnica e em quais condições ela pode ser utilizada para sensoriamento espectral.**

***Palavras chave*—AFH, Bluetooth, mapa de canais, rádio cognitivo, saltos em frequência, sensoreamento espectral.**

I. Introdução

A quinta geração (*fifth generation*, 5G) das redes de telecomunicações está sendo implementada em vários países, mas a escassez de bandas de radiofrequência (*radio-frequency*, RF) livres é um notável empecilho à sua expansão. Isto se deve ao fato de que a política de alocação fixa de espectro adotada pelos órgãos reguladores tem levado à utilização ineficiente do espectro de RF pelos sistemas de comunicação sem fio. Nesta forma de alocação, apenas o usuário detentor da licença de uso do espectro, chamado de usuário primário (*primary user* , PU), tem direito de ocupação de determinada banda. Entretanto, sabe-se que os terminais de comunicação dificilmente transmitem de forma ininterrupta ou em toda a extensão territorial, o que leva à existência de bandas desocupadas, denominadas de buracos espectrais (*spectral holes*) ou espaços em branco (*whitespaces*). Com isso cria-se a oportunidade de implantação de uma política de alocação dinâmica de espectro, na qual se permite que usuários secundários (*secondary users*, SUs) utilizem bandas de RF de forma oportunista, quando as mesmas se encontrarem ociosas, melhorando assim a eficiência do uso do espectro [1, 2, 3]. O conceito de rádio cognitivo (*cognitive radio*, CR) surgiu como uma possibilidade de implementação da política de alocação dinâmica de espectro [4]. Um CR é um dispositivo transceptor inteligente que pode ter seus parâmetros de comunicação reconfigurados via software [5]. Dentre os atributos de um CR encontra-se o sensoriamento espectral, que é capaz de permitir que um CR monitore o espectro de RF, decida sobre o estado de ocupação dos canais sensoreados e transmita nas lacunas espectrais sem causar interferência na rede primária. Para que um CR, na condição de SU, realize o sensoriamento espectral ele deve ter parte de seu hardware e de sua capacidade de processamento destinadas a este fim, o que eleva a sua complexidade, seu custo e seu consumo de energia, podendo até impactar na sua portabilidade devido ao aumento de dimensões físicas ou a necessidade de ser equipado com antenas próprias. É agregado ao sensoriamento espectral todas a demais funcionalidades cognitivas previstas para um CR, o que permite conjecturar que tal tecnologia não terá adoção comercial em larga escala, em curto prazo, talvez podendo ser viabilizada por completo apenas em sistemas além da quinta geração [3].

Neste artigo, é dada a continuação do estudo o qual busca-se desenvolver um sistema de hardware viável que fará parte de uma rede de dispositivos de Internet das coisas (*Internet of things*, IoT), rede a qual daria suporte para sensoriamento espectral eliminando a necessidade de implementação de tal funcionalidade nos CRs, reduzindo, assim, sua complexidade e viabilizando antecipar a expansão da política de acesso dinâmico ao espectro (*dynamic spectrum access*, DSA) [3]. Para isso será apresentado o desenvolvimento de uma segunda prova de conceito de um sistema de sensoriamento espectral de baixa complexidade que torna possível uma adaptação para um produto de baixo custo, implementado a partir do modo de saltos em frequência adaptativo (*adaptive frequency hopping*, AFH) do padrão Bluetooth, fazendo uso de uma Raspberry Pi, um computador com o sistema operacional Linux e um par de adaptadores Bluetooth específicos. Com um aprofundamento no estudo já realizado em [3], é demonstrado que a ideia tem potencial para ser explorada na implementação de sensores de espectro que podem ser conectados a dispositivos IoT, visando um massivo monitoramento de lacunas espectrais de forma a dar suporte a operação de rádios cognitivos por meio do DSA, porém tendo em vista que existem algumas barreiras ainda para serem superadas para que essa técnica seja utilizada com eficiência.

O restante do artigo está assim organizado: a Seção II resume alguns conceitos relacionados ao sensoriamento espectral. Na

seção III é descrita a proposta de uso do modo AFH como forma de um possível sensoriamento. A Seção IV apresenta os novos testes realizados com a prova de conceito da técnica e a seção V conclui o trabalho.

II. Sensoriamento Espectral

Tipicamente, a operação do acesso dinâmico ao espectro prevê que a rede secundária possua um intervalo para a realização do sensoriamento espectral e outro para a comunicação, de forma não simultânea. O sensoriamento espectral pode ser realizado basicamente de duas formas: independente (ou individual), ou cooperativo. No sensoriamento independente, como o termo sugere, cada CR realiza o monitoramento do espectro de forma independente dos demais CRs. No sensoriamento cooperativo há a participação de vários CR no processo, valendo-se da diversidade espacial existente entre os rádios almejando reduzir a probabilidade de erros de detecção do sinal primário, assim aumentando a vazão da rede secundária e minimizando as chances de ocorrência de interferência na rede primária [3].

O sensoriamento cooperativo pode ser distribuído, caso em que os CRs trocam informações sobre o estado de ocupação da banda sensoreada e em seguida decidem por meio de um consenso, ou centralizado, caso em que as informações de sensoriamento são transmitidas para um centro de fusão (*fusion center*, FC) onde a decisão final é tomada. O FC pode receber diretamente as amostras de sinal colhidas pelos CRs, método chamado fusão de dados, ou, alternativamente, pode receber decisões locais tomadas em cada CR, método chamado fusão de decisões.

Quando se trata da fusão de decisões, parte da complexidade computacional é removida do FC, uma vez que as amostras do sinal primário são pré-processados localmente em cada CR, onde é formada a estatística de teste que será comparada com um limiar para que se decida sobre a presença ou a ausência de sinal na banda sensoreada. Dentre as estatísticas de teste mais conhecidas citam-se aquelas baseadas em detecção de energia, em filtragem casada, em detecção por propriedades ciclo-estacionárias do sinal primário, ou em autovalores [5, 6]. A decisão global é tomada a partir da aplicação da regra K-em-M, na qual decide-se pela presença do sinal primário na banda sensoreada se ao menos K dentre os M CRs em cooperação assim decidirem.

No cenário de fusão de dados, as amostras do sinal primário recebidas pelos M dispositivos secundários são encaminhadas ao FC, onde é formada uma única estatística de teste, por exemplo dentre aquelas supramencionadas, para posterior decisão global.

Uma vez tomada a decisão global, ela é transmitida a todos os CRs, subsequentemente realizando-se o acesso à banda declarada desocupada por meio de alguma técnica de acesso múltiplo [6].

III. Aplicação do AFH do padrão Bluetooth como forma de Sensoriamento Espectral

O Bluetooth é um padrão de comunicação sem fio desenvolvido pelo Bluetooth SIG (*Special Interest Group*) para redes WPAN (*wireless personal area network*) operando na banda não licenciada de 2.4 GHz. Sua versão mais recente é a 5.2, apresentada em 6 de janeiro de 2020 [7]. No Bluetooth 5.0 houve a combinação de tecnologias de versões anteriores que caracterizavam dois modos distintos de operação do padrão, o Bluetooth 1.0/2.0 (*basic rate / enhanced data rate*, BR/EDR) e o Bluetooth 4.0 (Bluetooth *low energy*, BLE). As próximas subseções descrevem de forma resumida os aspectos do padrão Bluetooth de maior interesse à proposta do artigo que será o Bluetoorh BR/EDR.

A. Modos BR/EDR do padrão Bluetooth

O Bluetooth BR operava utilizando 79 canais de 1 MHz de largura de banda, transmitindo com modulação do tipo GFSK (*Gaussian frequency-shift keying*) e atingia taxas de transmissão da ordem de 1 Mbit/s. Na sua segunda versão, o Bluetooth EDR, o protocolo continuou a utilizar da mesma divisão de canais, porém passou a adotar os esquemas de modulação QDPSK (*quaternary differential phase-shift keying*) e 8DPSK (*differential 8-level phase-shift keying*), o que elevou a taxa de transmissão para a casa dos 3 Mbit/s [8, 9].

B. A tecnologia AFH do padrão Bluetooth

Para combater a interferência oriunda de outros sistemas de comunicação, muito comum na banda de 2,4 GHz, o Bluetooth SIG incorporou à especificação 1.2 do padrão a tecnologia AFH, a qual utiliza um mapa reconfigurável dos canais alocados ao processo de espalhamento espectral por saltos em frequência (*frequency hopping spread spectrum*, FHSS) adotado na interface aérea do padrão. No FHSS altera-se de forma pseudo-aleatória a frequência central do canal de comunicação entre o dispositivo mestre e o dispositivo escravo. A sequência de saltos em frequência contém 2^{27} saltos que ocorrem 1600 vezes por segundo, resultando em um período de 23,3 horas até que a sequência se repita. Durante a conexão Bluetooth, tanto o transmissor quanto o receptor conhecem o padrão pseudo-aleatório, que é calculado baseado na temporização (clock) do dispositivo mestre na *piconet*. [10, 9].

Através de uma equação definida na *firmware* do *chipset* é definido a sequência de saltos pseudo aleatórios. Esta equação define primeiramente alguns canais de saltos em frequência dentro da faixa de 0 a 64 MHz. Os saltos ocorrem dentro de uma faixa de canais abrangendo 32 possibilidades de saltos. Essa faixa desloca-se de forma a abranger 16 novas possibilidade de saltos a diante e desconsidera os 16 primeiros escolhidos anteriormente, e assim varia até chegar ao final dos 79 canais, conforme pode ser observado na figura [9].

Durante a comunicação entre os dispositivos mestre e escravo, o mapa de canais é criado para ambos os dispositivos. Caso um canal esteja livre de interferência, ele é classificado como disponível, ou seja, é um canal que fará parte da sequência de saltos em frequência, neste caso atribuindo-se o bit 1 ao canal no mapa. Caso seja detectada uma interferência suficientemente alta no canal, ele será classificado como desabilitado, ou seja, o mesmo não fará parte da sequência de saltos, neste caso atribuindo-se a ele o bit 0.

A classificação da qualidade de um canal é normalmente realizada por meio do indicador da potência do sinal recebido

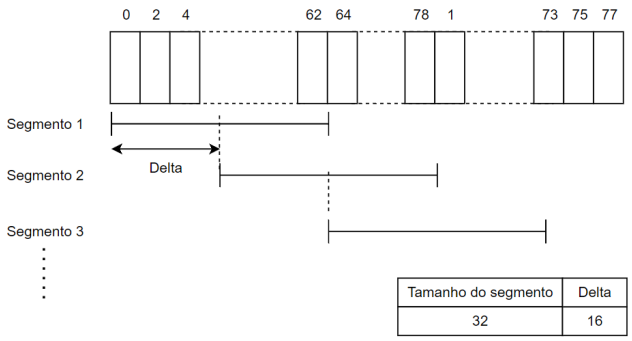

Fig. 1. Esquema de seleção de saltos em estado de conexão

(*received signal strength indicator*, RSSI), da taxa de erro de pacote ou de bit (*packet / bit error rate*, PER / BER), da razão sinal-ruído (*signal-to-noise ratio*, SNR), ou de alguma combinação destas métricas [10, 9].

C. Aplicação do AFH do padrão Bluetooth para sensoriamento espectral

Basicamente, o sensoriamento espectral através do modo AFH do padrão Bluetooth consiste em realizar, em um ambiente controlado, a leitura do mapa de canais dos saltos em frequência. Como ilustra a Figura 2, dois dispositivos Bluetooth são mantidos conectados por cabo de forma a manter a conexão livre de interferência externa. Ao enlace é adicionado um combinador ligado à uma antena responsável por receber o sinal que se deseja detectar, utilizando-o como fonte de interferência na comunicação Bluetooth.

O sinal sensoreado recebido pela antena é amplificado por um amplificador de baixo ruído (*low noise amplifier*, LNA) e tem sua frequência transladada para a faixa de frequências de operação dos transceptores Bluetooth (2.4 GHz), caso tal sinal esteja fora desta faixa. A translação é realizada pela multiplicação do sinal de saída do LNA pela portadora senoidal gerada pelo oscilador local (*local oscillator*,LO). O sinal resultante da multiplicação é acoplado ao enlace Bluetooth por meio do combinador (*splitter ou combiner*). Atenuadores estão presentes no sistema para que o nível de potência da comunicação dos dispositivos Bluetooth (BT mestre e BT escravo) seja colocado em um limiar próximo ao de classificação do canal como desabilitado, de forma que o menor sinal interferente recebido pela antena de sensoriamento seja capaz de alterar a classificação de um ou mais canais no mapa do AFH. A leitura do mapa é então feita através de uma função específica, permitindo interpretar os canais desabilitados como a porção do espectro em uso pela rede primária, e os canais habilitados como faixas de frequências ociosas.

Como a proposta trata-se de um sistema de baixo custo comparado aos hardwares atualmente utilizados para sensoriamento espectral, almeja-se atingir as métricas de desempenho por meio da alta densidade e abrangente distribuição dos dispositivos, em vez de alta qualidade individual no sensoriamento, o que se pode conseguir com o acoplamento de módulos de sensoriamento a dispositivos IoT. Esta medida visa prover um amplo sistema de sensoriamento espectral, com elevada resolução espacial e abrangência territorial. Os resultados do sensoriamento podem então alimentar bases de dados de ocupação espectral, as quais podem ser consultadas pela rede secundária, eliminando a necessidade de se ter terminais secundários equipados com a funcionalidade de sensoriamento espectral [3].

IV. Testes utilizando o AFH Map para sensoriamento espectral

Foram realizadas experiências com o objetivo de verificar o comportamento responsivo do AFH *Channel Map*. Com esse intuito os testes se constituíram em inserir sinais interferentes de forma controlada dentro de cada canal disponível na comunicação Bluetooth entre dois dispositivos.

O critério buscado nos teste foi garantir a confiabilidade da extração da sinalização dos canais contidos no AFH da comunicação Bluetooth, evitando também um custo elevado do sistema. Para isso concluiu-se que a melhor das opções era utilizar uma Raspberry Pi como um dos dispositivos. Essa escolha foi devido ao fato do microcomputador utilizar o sistema operacional Linux que tem como interface da comunicação BLuetooth, a Pilha BlueZ, que é uma pilha já bem estabelecida como software.

Contribuindo com quesito confiabilidade também foram utilizados adaptadores Bluetooth os quais possuíam conectores SMA. Isso garantia que a comunicação Bluetooth pudesse ser realizada de forma cabeada evitando ao máximo interferências externas.

Ao realizar os primeiros testes descobriu-se que além da interface SMA era importante que a conexão do adaptador com o computador e com o microcomputador ocorresse via USB. Somente desse modo o dispositivo poderia ser reconhecido como um novo hardware Bluetooth para o Sistema Operacional, o que permite que os comandos sejam enviados para o *host controller interface* (HCI) do protocolo Bluetooth, possibilitando também a leitura e chamada do AFH Channel Map no próprio terminal do sistema Linux.

Desse modo, para o experimento foi utilizado um adaptador FSC-BP119. Este possui os seguintes parâmetros:

Introdução I
Principais parâmetros do adaptador utilizado

Chipset	CSR8510A
Modelo	FSC-BP119
Versão do bluetooth	V4.0 dual mode
Taxa de transferência	Até 3.0Mbps
Potência Tx	18.5dBm

A montagem do sistema constituiu-se na conexão entre dois adaptadores FSC-BP119, de modo que um estava plugado em uma Raspberry Pi e o outro em um computador com o sistema operacional Linux, Ubunto versão 18.04, instalada. Foi também utilizado um equipamento de rádio definido por software Ettus USRP B210 como gerador de sinal interferente na comunicação entre os adaptadores. É demonstrada a conexão completa do sistema no diagrama da Figura 2.

A partir da instalação e configuração da pilha Blue Z nos dois sistemas operacionais, foi possível estabelecer a comunicação Bluetooth entre os dois dispositivo sem que a conexão fosse encerrada. Com essa Pilha, a leitura do

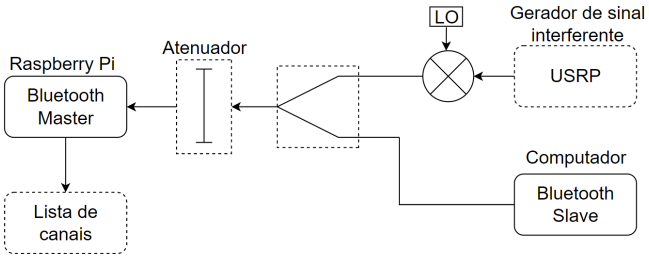

Fig. 2. Diagrama do sistema utilizado para testes

AFH Channel Map foi possível apenas utilizando o comando no terminal do Linux ”watch –interval 1 ’hcitool afh xx:xx:xx:xx:xx:xx:xx’”. Sendo os caracteres ”x”a representação do código hexadecimal do dispositivo Bluetooth a se conectar. Este comando retorna o estado do mapa de canais de 1 em 1 segundo caso a conexão Bluetooth estiver estabelecida.

Inicialmente os testes demonstraram dois comportamentos inesperados, os quais o *Channel Map* apresentava variações que não correspondiam ao sinal inserido pela USRP. O primeiro deles a ser percebido foi que o AFH map demonstrava que bandas próximas ao sinal que foi inserido também eram desativadas, e o segundo, que variações aparentemente aleatórias ocorriam de forma recorrente no mapa de canais.

O resultado teórico esperado baseado nas informações do protocolo Bluetooth em [9], seria que que cada um dos 80 bits representados pelos 20 caracteres em hexadecimal iriam variar entre 1 e 0, conforme houvesse ou não uma interferência significativa na conexão. O valor 1 para um canal livre e 0 para o ocupado, de modo que essa interferência é verificada através de um valor de RSSI ou de BER ou a combinação de ambos, como comentado anteriormente.

Para mitigar qualquer razão de falha externa a fim de compreender a origem dos efeitos indesejados foi utilizado um FielFox modelo A12 para verificar o comportamentos dos sinais interferentes gerados pela USRP. A partir disso notou-se que a largura de faixa abrangente do sinal interferente era muito mais larga do que se esperava no ponto de sensibilidade da conexão BLuetooth que teoricamente de acordo com os datasheets encontraria-se em -70dBm, o que demonstrou ser um dos motivos de tais variações ocorrerem no Channel Map em grande intensidade.

Diferentemente do *datasheet* do fabricante, os testes demonstraram que a sensibilidade do dispositivo é muito maior. Mesmo quando um sinal interferente de potência máxima de -85dBm é inserido entre a frequência de operação da conexão Bluetooth existe uma resposta do AFH Map em torno das posições que seriam correspondentes a frequência afetada, considerando os canais impróprios para uso.

Foram realizados novos testes para verificar a sensibilidade de resposta do *channel map* a diferentes sinais. Com este fim foi inserido pulsos na faixa de frequências dentro do espectro operante que também foram gerados e medidos pelo Field Fox. Sinais estes de largura de banda de apenas 50 Hz, com uma potência por volta de 0 dBm chamados de pulso CW. Vale ressaltar, que a largura de banda desse pulso é muito estreita comparado a largura de cada um dos 80 canais Bluetooth os

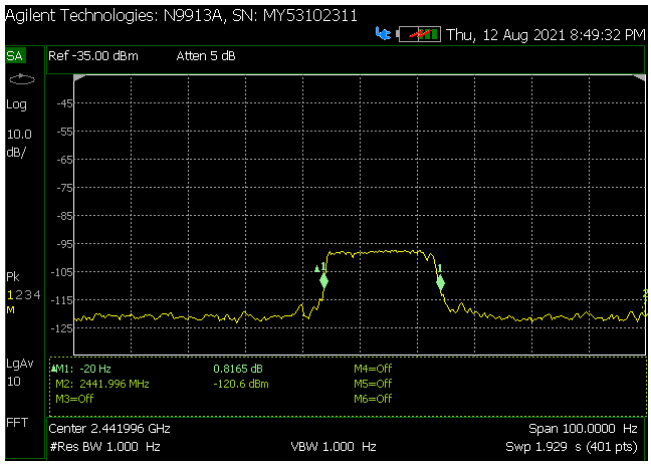

Fig. 3. Sinal de banda estreita e baixa potência que é capaz de ser detectado no AFH Map

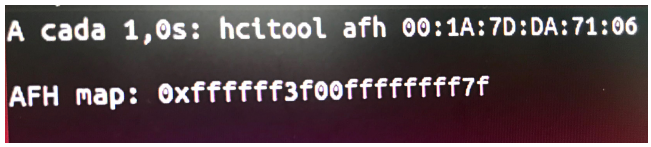

Fig. 4. AFH map em resposta ao sinal de menor potência e banda possível de detectar

quais possuem 1 MHz de BW. Porém esse valor ínfimo de BW já é suficiente para o AFH map reconhecer que houve alteração em algum canal da banda de operação do Bluetooth.

Tratando-se do segundo efeito indesejado, suspeitou-se que poderia haver interferências causando variações em vários canais do Channel map, como conexões WiFi e outros dispositivos Bluetooth próximos ao local do experimento que operam na mesma faixa de frequência. Assim foi realizado um teste na câmara anecoica, local o qual aniquila suficientemente qualquer sinal que poderia causar alguma interferência externa no Channel Map. Esse experimento pode ser observado na Figura 5.

Porém mesmo testando dentro de um ambiente quase que idealmente controlado as variações do AFH Map ainda se mantiveram, o que levou a concluir que o problema estaria no próprio sistema em si. Um dos artifícios que tornou o sistema um pouco mais estável foi utilizar de atenuadores de 30dB em cada um dos adaptadores.

Através de uma sequência de testes e análises mais detalhada, foi possível reconhecer dois tipos de padrões de variações diferentes no Channel Map. A primeira dessas variações duram em média 35 segundos após o momento que o sistema reconhece o sinal interferente, e é demonstrada na Tabela II.

INTRODUÇÃO II
RESPOSTAS DO AFH MAP MEDIANTE SINAIS INTERFERENTES - DURANTE OS 35 SEGUNDOS

Frequência do sinal	Canais esperados	Canais do AFH map
2480 MHz	80	74, 75, 76.
2479 MHz	79	74, 75, 76, 77, 78.
2478 MHz	78	74, 75, 76, 77, 78.
2477 MHz	77	76, 77, 78, 79.
2476 MHz	76	76, 77, 78, 79, 80.
2475 MHz	75	77, 78, 79, 80.

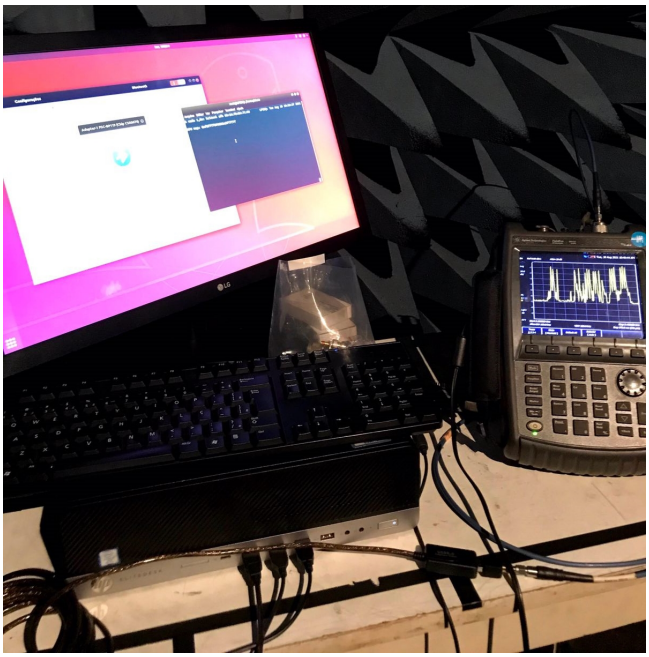

Fig. 5. Teste realizado na Câmara Anecoica, identificando AFH *Channel Map* sem interferências externas

Já na outra variação ocorre que para um mesmo sinal interferente podem haver mais de uma combinação binária para ser representada no mapa. Na grande maioria das vezes essa variação ocorre em média após 35 segundos em que o novo sinal interferente fora reconhecido no mapa de canais, de modo que após esse tempo, o AFH map entra em um estado permanente, com valores de bits organizados em um padrão completamente diferente. É possível também perceber que para alguns sinais interferentes, os quais são a minoria, o AFH map se mantém sem alteração.

Pôde-se observar uma certa padronização característica entre o modelo transitório e o permanente. O permanente sempre varia mais caracteres que o de regime transitório, porém normalmente os dois últimos caracteres da representação do AFH map, doe regime permanente se iguala aos dois últimos caracteres dos bits do regime transitório. O que conclui-se que há um certo padrão nas variações do Channel Map.

Percebeu-se também que para reconhecer algum novo sinal interferente no AFH map, leva-se em média 13s de permanência ativa do sinal. Já para reconhecer a ausência de sinal, leva-se em média 60s, que é quando o AFH map começa a sofrer alteração mediante a ausência do sinal interferente, levando um total de 75s para voltar ao estado inicial completamente. Ou seja, reconhecer um sinal novo é 6 vezes mais rápido que reconhecer a ausência de sinal. Foi verificado que a faixa de tempo seguro para reconhecer um sinal interferente no sistema é apenas se ele se mantém no canal por 7 segundos.

Houve algumas frequências que chegaram a apresentar 4 modelos de variações no mapa. Normalmente essas variações ocorrem com alguns padrões os quais se repetem para várias frequências de maneira aparentemente aleatória. E como está registrado na própria documentação oficial do Bluetooth [9], o algorítimo que combina todas as informações para gerar o AFH Channel Map não é definido nas especificações.

V. Conclusão

Pode-se concluir que através desses resultados obtidos é provável que haja uma codificação específica que mascara o resultado do AFH Channel Map do protocolo Bluetooth. Porém sem acesso ao algoritmo do *firmware* do Chip Bluetooth da Qualcomm, não é possível chegar-se em afirmativas concretas, o que limita a aplicabilidade do projeto. Porém isso não o torna inviável como um todo, pois ainda sim é possível reconhecer que haja qualquer sinal interferente que esteja dentro da banda de operação do Bluetooth, apenas com a ressalva de que não estará indicado precisamente em qual dos 80 canais estará a variação. Sabendo-se que a identificação de interferência ocorre em média apenas 13s após o primeiro sinal interferente no espectro e que o AFH levará 75s para atualizar, caso haja a ausência completa de sinais, pode-se fazer a uma verificação de em média 13 em 13 segundos re-setando o sistema logo após cada medida. Sendo assim, conclui-se que, para fins de sensoriamento espectral que tolera uma faixa de erro em frequência de de 80MHz e que tolera uma variação de 13 segundos de tempo de resposta e que capta apenas sinais que se mantém ativos em mais 7 segundos, esse sistema pode ser viável.

Referências

[1] ”R. Engelman, K. Abrokwah, G. Dillon, G. Foster, G. Godfrey e T. Hanbury”. *Report of the Spectrum Efficiency Working Group*. URL: https://transition.fcc.gov/sptf/files/SEWGFinalReport_1.pdf.

[2] M. A. McHenry, P. A. Tenhula, D. McCloskey, D. A. Roberson e C. S. Hood. “Chicago spectrum occupancy measurements analysis and a long-term studies proposal”. Em: *TAPAS’06* 2 (2006), p. 1. DOI: https://doi.org/10.1145/1234388.1234389. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016412121730273X.

[3] D. A. Guimarães e E. J. T. Pereira. “Sensoriamento Espectral via Modo Adaptativo de Saltos em Frequência do Padrão Bluetooth”. Em: *SBrT* 1 (2020), pp. 1–2. DOI: https://doi.org/10.14209/SBRT.2020.1570654337. URL: https://biblioteca.sbrt.org.br/articles/2233.

[4] J. Mitola e G.Q. Maguire. “Cognitive radio: making software radios more personal”. Em: *IEEE* 6 (1999), pp. 13–18. ISSN: 1070-9916. DOI: https://doi.org/10.1109/98.788210. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/788210/keywords#keywords.

[5] Y. Arjoune e N. Kaabouch. “A Comprehensive Survey on Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks: Recent Advances, New Challenges, and Future Research Directions”. Em: *Sensors* 2 (2019), pp. 40–62. ISSN: 1424-8220. DOI: https://doi.org/10.3390/s19010126. URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/19/1/126#cite.

[6] I. F. Akyildiz, B. F. Lo e R. Balakrishnan. “Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks: A survey”. Em: *Elsevier* 4 (2011), pp. 40–62. DOI: https://doi.org/10.1016/j.phycom.2010.12.003. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S187449071000039X.

[7] Bluetooth SIG. *Bluetooth Core Specification*. URL: https://www.bluetooth.org/docman/handlers/downloaddoc.ashx?doc_id=478726 (acesso em 21/11/2021).

[8] National instruments. *Introduction to Bluetooth Device Testing*. URL: https://download.ni.com/evaluation/rf/intro_to_bluetooth_test (acesso em 12/10/2021).

[9] Bluetooth SIG. *Specification of the Bluetooth System Version 4.0*. URL: https://www.bluetooth.org/docman/handlers/downloaddoc.ashx?doc_id=456433 (acesso em 20/08/2021).

[10] Rohde schwarz. *Bluetooth Adaptive Frequency Hopping on a RS CMW*. URL: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1c108/1C108_0e_Bluetooth_BR_EDR_AFH.pdf (acesso em 17/11/2021).

AUTORES

Pedro Henrique Carmo Piantino É Graduando do décimo período de Engenharia de Telecomunicações no Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL). Durante a graduação atuou como monitor de cálculo numérico (2018), realizou outras duas pesquisas de Iniciação Científica (2018, 2019), a primeira relacionada ao desenvolvimento teórico de uma técnica de processamento de sinais digitais e analógicos e a outra relacionada ao desenvolvimento de uma Smart Bike. Atualmente atua como estagiário na empresa LACE, desenvolvendo projetos na área da eletrônica aplicada a Telecomunicações com enfoque a produtos voltados para a Defesa Nacional.

Dayan Adionel Guimarães Natural de Carrancas, MG. Técnico em Eletrônica (ETE FMC, 1987), Engenheiro Eletricista (Inatel, 1994), Pós-graduado, lato sensu, em Engenharia de Comunicação de Dados (Inatel, 2003), Pós-graduado, lato sensu, em Administração com ênfase em Gerência de RH (FAI, 1996), Mestre em Engenharia Elétrica (Unicamp, 1998), Doutor em Engenharia Elétrica (Unicamp, 2003), Pós-Doutorado (UFSC, 2010). Desenvolveu equipamentos para Instrumentação Industrial e Controle e foi Supervisor de Produção e Supervisor de Engenharia de Produtos na SENSE Sensores e Instrumentos, de 1988 a 1993. Desde janeiro de 1995 é professor do Inatel (hoje Professor Titular), onde foi responsável pela estrutura de apoio às atividades de ensino prático nas áreas de Telecomunicações, Eletrônica e Eletrotécnica, de 1995 a 2002.