

2

Tecnologia IEEE 802.16

2.1. Introdução

O padrão IEEE 802.16-2004 especifica a interface rádio aérea de sistemas fixos de acesso sem fio em banda larga (*Broadband Wireless Access* – BWA) para serviços de dados, voz e vídeo com segurança e especificação de qualidade de serviço (QoS) [12].

O padrão inclui a especificação da camada de controle de acesso ao meio (*Medium Access Control* – MAC) e da camada física (*Physical Layer* – PHY).

A camada MAC é estruturada para suportar múltiplas especificações de camada física, cada qual apropriada para um tipo particular de ambiente operacional conforme a faixa de frequências da aplicação.

2.2. Faixas de frequências de operação

As faixas do espectro de frequências consideradas no padrão do IEEE são :
- 10 a 66 GHz

Nesta faixa é imprescindível a existência de visada direta (*Line of Sight* – LOS) entre os transceptores mas os efeitos de multipercursos podem ser desprezados em função do uso de antenas muito diretivas na estação assinante [12].

Canais com larguras de faixa de 25 ou 28 MHz são típicos e possibilitam taxas brutas de dados superiores a 120 Mbps, fazendo com que a operação nesta faixa seja apropriada para aplicações com acesso ponto-multiponto (PMP) tanto para residências e escritórios de pequeno porte como para médias e grandes empresas [12].

Esta faixa de frequência depende de licença para operação e é a faixa considerada neste estudo.

- Abaixo de 11 GHz

Esta faixa inclui frequências que dependem de licença para operação e frequências que não dependem de licença para operação.

Nesta faixa de frequências é possível a operação sem visada direta (*Non-Line-of-Sight* – NLOS) ou em visada quase direta (*Near-Line-of-Sight*) embora os efeitos de multipercursos deixem de ser desprezíveis [12].

A habilidade para operar neste cenário requer funcionalidades adicionais na camada física incluindo técnicas avançadas de gerenciamento de potência, mitigação de interferência e utilização de antenas múltiplas.

2.3. Topologias de rede

Uma rede que utiliza um meio compartilhado deve fornecer um mecanismo de compartilhamento eficiente. Neste caso o meio é o espaço livre, através do qual as ondas de rádio se propagam.

O padrão considera 2 tipos de topologias: ponto-multiponto (PMP) e malha completa, conhecida como *mesh*.

- Topologia ponto-multiponto (PMP)

Na topologia ponto-multiponto (PMP) um sistema no padrão 802.16 opera com uma estação central chamada estação base (BS) provida de antenas setorizadas de forma que possam tratar simultaneamente a comunicação com as estações dos usuários (denominadas estações assinantes (SS)) de setores múltiplos e independentes.

No enlace de descida (*downlink*) todas as estações assinantes que estão em um determinado setor e utilizam um dado canal de frequência recebem a mesma transmissão, ou parte dela. A estação base é o único transmissor operando nesta direção e, portanto, não necessita de coordenação com outras estações exceto no caso de duplexação por divisão de tempo (TDD) onde o tempo é dividido em períodos para transmissão do enlace de subida (*uplink*) e períodos para transmissão do enlace de descida.

A estação base realiza uma difusão para todas as estações assinantes de um setor e estas estações verificam o endereço de destino nas mensagens recebidas e processam somente as mensagens destinadas a elas.

As mensagens podem ser enviadas para todos os assinantes por difusão (*broadcast*) mas também podem ser enviadas individualmente ou para grupos de estações assinantes (*multicast*).

Na outra direção, as estações de assinantes compartilham o enlace de subida conforme a demanda. Dependendo da classe de serviço utilizada, a estação assinante pode receber o direito de transmitir continuamente ou o seu direito para transmitir pode ser dado pela estação base após receber uma requisição do usuário.

Dentro de cada setor, os usuários aderem a um protocolo de transmissão que controla a contenção entre usuários e habilita o serviço a ser transmitido adaptado aos requisitos de atraso e largura de faixa de cada aplicação do usuário.

- Topologia *mesh*

A principal diferença entre os sistemas ponto-multiponto e o modo *mesh* é que para o primeiro o tráfego ocorre somente entre estação base e estações assinantes enquanto no modo *mesh* o tráfego pode ser encaminhado através de outras estações assinantes e também pode ocorrer diretamente entre elas. Dependendo do algoritmo do protocolo de transmissão usado, isto pode ser feito de três modos: de forma igualitária usando planejamento distribuído, com base na superioridade da estação base *mesh* que efetivamente resulta em planejamento centralizado ou através da combinação de ambos.

Dentro de uma rede *mesh*, um sistema que tem uma conexão direta para interligar serviços para fora da rede *mesh* é denominado estação base *mesh*. Todos os outros sistemas são denominados estações assinantes *mesh*. Em geral, os sistemas de uma rede *mesh* são denominados nós. Neste mesmo contexto, o enlace de subida e o enlace de descida são definidos como o tráfego na direção da estação base *mesh* e tráfego a partir da estação base *mesh*, respectivamente.

Outros três importantes termos de um sistema *mesh* são os vizinhos, a vizinhança e a vizinhança estendida. As estações com as quais o nó possui enlaces diretos recebem a denominação de “vizinhos”. Vizinhos de um nó formam a “vizinhança”. Os vizinhos de um nó são aqueles distantes de um salto (um enlace) do nó. A “vizinhança estendida” contém, adicionalmente, todos os vizinhos da vizinhança.

Em um sistema *mesh* nem mesmo a estação base *mesh* pode transmitir sem coordenação com os outros nós. Usando planejamento distribuído, todos os nós, incluindo a estação base *mesh*, coordenarão suas transmissões com nós até dois saltos na vizinhança (vizinhos dos vizinhos) e realizarão a difusão do seu planejamento (recursos disponíveis, solicitações e concessões) para todos os vizinhos. Opcionalmente, o planejamento pode ser estabelecido por requisições e por concessões diretas, não-coordenadas entre dois nós. Os nós irão se certificar de que a transmissão resultante não causará colisões com o tráfego programado de dados e de controle de nenhum outro nó até dois saltos na vizinhança. Não há diferença no mecanismo usado para determinação do planejamento no enlace de descida e de subida.

Usando planejamento centralizado, recursos são concedidos de uma maneira centralizada. Uma estação base *mesh* reunirá solicitações de recursos de todas as estações assinantes *mesh* dentro de um certo alcance, determinará a quantidade de recursos concedidos para cada enlace na rede, tanto na descida quanto na subida, e comunicará às estações assinantes *mesh* em sua área de alcance. As mensagens de concessão não contêm o planejamento real mas cada nó deve calculá-lo utilizando o algoritmo pré-determinado com os parâmetros dados.

Os sistemas *mesh* usam tipicamente antenas omnidirecionais, mas podem também usar antenas setorizadas. No limite da área de cobertura de uma rede *mesh*, onde somente é necessária uma conexão para um único ponto, até mesmo antenas altamente diretivas podem ser usadas.

2.4.

Camada de controle de acesso ao meio (MAC)

A camada MAC é dividida em três subcamadas que são descritas de maneira resumida a seguir.

- Subcamada CS (Service Specific Convergence Sublayer)

Esta é a subcamada mais acima dentro da camada MAC fazendo a interface com a rede externa. São necessárias múltiplas especificações desta subcamada para prover interface com protocolos diferentes.

O padrão 802.16 apresenta duas especificações para esta subcamada. Uma especificação é para convergência ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) que é

definida para serviços ATM. A outra especificação é para convergência de pacotes definida para serviços de pacotes tais como IPv4, IPv6, Ethernet e redes locais virtuais (VLAN) [14].

- Subcamada CPS (Common Part Sublayer)

Esta subcamada recebe dados de diversas subcamadas CS e provê as funções principais de acesso do sistema garantindo mecanismos eficientes de compartilhamento de recursos e alocação de largura de faixa.

Em redes com topologia PMP a camada MAC é orientada a conexão. Com propósitos de mapeamento para serviços nas estações assinantes e associação de níveis variáveis de qualidade a estes serviços, todas as comunicações de dados são realizadas no contexto de uma conexão. A subcamada CPS é responsável pelo estabelecimento e manutenção das conexões.

Cada estação assinante tem um endereço MAC universal de 48 bits. Este endereço é único e define a estação assinante dentro de um conjunto de todos os tipos de equipamentos e fabricantes possíveis. O endereço é usado durante o processo inicial de definição da largura de faixa para estabelecer as conexões apropriadas para uma estação assinante. Também é utilizado como parte do processo de autenticação através do qual a estação base e a estação assinante verificam suas identidades reciprocamente.

As conexões são endereçadas através de identificadores de conexão (CID) com 16 bits e podem necessitar de largura de faixa concedida continuamente ou largura de faixa sob demanda. O uso do identificador de conexão (CID) de 16 bits permite um total de 64.000 conexões dentro de cada canal de subida e descida.

Conexões, uma vez estabelecidas, podem requerer manutenção ativa. Os requisitos de manutenção variam conforme o tipo de serviço conectado. Por exemplo, serviços IP podem requerer uma quantidade substancial de manutenção contínua devido à sua natureza por rajadas e também à alta possibilidade de fragmentação. Da mesma forma que o estabelecimento de conexão, conexões modificáveis podem requerer manutenção e também podem ser encerradas por iniciativa da estação assinante ou da estação base. Novas conexões podem ser estabelecidas quando um serviço necessita de alteração.

No caso de redes com topologia Mesh todas as comunicações são no contexto de um enlace que é estabelecido entre dois nós. A qualidade de serviço é provida nos enlaces e pode ser configurada a cada mensagem.

Os parâmetros de serviço associados com cada mensagem devem ser comunicados junto com o conteúdo da mensagem.

Cada nó tem um endereço MAC universal de 48 bits como ocorre no caso PMP. Este endereço é usado no processo de entrada na rede. Após ser autorizado a operar na rede, o nó recebe um identificador de nó (Node ID) de 16 bits. Este identificador é a base de identificação do nó durante as operações.

Para endereçar os nós na vizinhança local, identificadores de enlace (*Link IDs*) de 8 bits são usados. Cada nó atribuirá um identificador para cada enlace que ele estabeleça com seus vizinhos. Os identificadores de enlaces são comunicados durante o processo de estabelecimento do enlace assim que os nós vizinhos estabelecem novos enlaces. O identificador de enlace é atribuído pelo nó transmissor ao enlace para o nó receptor.

- Subcamada SS (Security Sublayer)

Esta subcamada provê autenticação, troca de chave de segurança e criptografia proporcionando privacidade aos assinantes ao longo da rede e proteção aos operadores contra roubo de serviços através de acessos não autorizados.

A privacidade e a proteção são proporcionadas através da criptografia das conexões entre estação base e estação assinante.

A subcamada SS emprega ainda um protocolo de gerenciamento de chave cliente/servidor autenticada na qual a estação base (servidora) controla a distribuição de chaves às estações assinantes (clientes).

Adicionalmente, os mecanismos básicos de privacidade são reforçados através da inclusão de autenticação das estações assinantes. Esta autenticação é baseada em certificados digitais adicionados ao seu protocolo de gerenciamento de chave (*Privacy Key Management – PKM*). Um certificado digital contém a chave pública da estação assinante e seu endereço MAC.

2.5.

Camada física para a faixa de 10 a 66 GHz

A especificação de camada física destinada à operação na faixa entre 10 e 66 GHz apresenta um alto grau de flexibilidade para permitir aos provedores de serviços a capacidade de otimizar o desenvolvimento de sistemas nos aspectos de planejamento, custos, características de rádio, serviços e capacidade. Nesta faixa de frequências do padrão a interface aérea é baseada em modulação em portadora única (*Single-Carrier*) e é chamada de interface *WirelessMAN-SC*.

Para permitir flexibilidade no uso do espectro durante a operação são possíveis configurações com duplexação por divisão de frequência (FDD) e duplexação por divisão de tempo (TDD) que são descritas a seguir.

Ambos os casos de duplexação usam formato de transmissão em rajadas cujo mecanismo de formação dos quadros possibilita um perfil adaptativo. Neste perfil adaptativo os parâmetros da transmissão, incluindo os esquemas de modulação e codificação, podem ser ajustados individualmente para cada estação assinante a cada quadro.

No modo FDD os canais dos enlaces de subida e descida ocupam frequências distintas. Os quadros têm duração fixa em ambos enlaces o que facilita o uso de diferentes tipos de modulação e simplifica os algoritmos de alocação de largura de faixa. É possível o uso simultâneo de estações assinantes *full-duplex* e *half-duplex*. Nos casos de estações *half-duplex*, o controlador de largura de faixa não alocará largura de faixa no enlace de subida ao mesmo tempo em que é esperada a recepção de dados no canal do enlace de descida.

No modo TDD as transmissões dos enlaces de subida e descida ocorrem em tempos diferentes e geralmente compartilham a mesma frequência. Um quadro TDD também tem duração fixa e contém um sub-quadro do enlace de subida e um sub-quadro do enlace de descida. Um quadro é dividido em um número inteiro de *slots* físicos que ajudam a partilhar a largura de faixa facilmente. A divisão do quadro é adaptativa, ou seja, a parte do quadro ocupada pelo enlace de subida pode variar em relação à parte ocupada pelo enlace de descida.

2.5.1. Enlace de descida

Os tipos de modulação utilizados no enlace de descida são QPSK, 16-QAM e 64-QAM (opcional). O esquema de modulação multi-nível é usado para maximizar a utilização do enlace aéreo. A constelação da modulação pode ser selecionada para cada assinante com base na qualidade do canal de RF. Se as condições do enlace permitirem, um esquema de modulação mais complexo pode ser utilizado para maximizar a vazão mantendo confiável a transferência de dados. Caso as condições do enlace rádio sofram alguma degradação durante a operação, o sistema pode retornar a um esquema menos complexo de modo a manter a confiabilidade dos dados.

O canal do enlace de descida é TDM. A informação para cada estação assinante é multiplexada em um fluxo único de dados e é recebida por todas as estações assinantes dentro da mesma área. Cada estação assinante processa somente as mensagens destinadas a elas após verificar o endereço de destino nas mensagens recebidas.

As transmissões são feitas em níveis decrescentes de robustez até que se estabeleça a melhor configuração para cada enlace. Por exemplo, com o uso de um tipo de código corretor de erro (*Forward Error Correction – FEC*) simples com parâmetros fixos, os dados começam com modulação QPSK, seguida por modulação 16-QAM, seguida por modulação 64-QAM.

No enlace de descida os bits de dados na camada física da estação base são randomizados, recebem código corretor de erros e são mapeados para uma constelação de sinais QPSK, 16-QAM ou, opcionalmente, 64-QAM.

A randomização é empregada para minimizar a possibilidade de transmissão de uma portadora não modulada e assegurar um número adequado de transições de bits para possibilitar recuperação de relógio.

O esquema empregado para correção de erro (*Forward Error Correction – FEC*) varia conforme a taxa de dados, o tamanho dos blocos de dados e relação sinal-ruído no enlace.

Na camada física da estação assinante ocorre o processo inverso.

2.5.2. Enlace de subida

Os tipos de modulação utilizados no enlace de subida são QPSK, 16-QAM (opcional) e 64-QAM (opcional).

A camada física do enlace de subida é baseada numa combinação de acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA) e acesso múltiplo atribuído por demanda (DAMA). O canal é dividido em um número de *slots* de tempo. O número de *slots* designados para as diversas funções (registro, disputas, faixa de guarda ou tráfego do usuário) é controlado pela camada de controle de acesso ao meio (MAC) na estação base e pode variar para otimizar o desempenho.

A largura de faixa disponível na direção do enlace de subida é definida em *minislots*. A extensão dos *minislots* é definida como sendo 2^m vezes a quantidade de *slots* físicos, com m variando de 0 a 7.

Uma vez que as estações assinantes não transmitem no canal do enlace de subida enquanto não recebem informações mínimas de configuração enviadas pela estação base, várias configurações diferentes são possíveis e podem ser definidas para cada canal de enlace de subida ou para cada rajada.

No enlace de subida os bits de dados na camada física da estação assinante passam por processo análogo ao que ocorre no enlace de descida na estação base. Os bits de dados são randomizados, recebem código corretor de erros e são mapeados para uma constelação de sinais (QPSK, ou opcionalmente, 16-QAM ou 64-QAM). Na camada física da estação base ocorre o processo inverso.

2.5.3. Taxas de comunicação e larguras de canais

Uma grande quantidade de espectro é disponível na faixa entre 10 e 66 GHz para sistemas ponto-multiponto. Embora os requisitos regulatórios variem nas diferentes regiões do mundo, existem atributos comuns suficientes para uma definição de larguras de canais de RF que atendam a maioria das regiões assegurando a interoperabilidade na *interface* aérea. A Tabela 2.1 apresenta os arranjos de canais de RF especificados pelo IEEE [12].

Tabela 2.1 – Arranjos de canais de RF [12]

Largura do canal (MHz)	Taxa de símbolos (MBaud)	Taxa de bits (Mbps) QPSK	Taxa de bits (Mbps) 16-QAM	Taxa de bits (Mbps) 64-QAM	Duração recomendada do quadro (ms)	Número de <i>slots</i> físicos por quadro
20	16	32	64	96	1	4000
25	20	40	80	120	1	5000
28	22,4	44,8	89,6	134,4	1	5600

Obs.: devido às diferenças nas regulamentações dos diferentes locais, nenhum plano de frequência é apresentado no padrão.

2.5.4. Subsistema de rádio

Algumas funções de controle importantes desempenhadas pelo subsistema de rádio são :

- Sincronização

A camada física necessita prover estimativas precisas de temporização na estação base e flexibilidade para ajustes da temporização na estação assinante. Uma sincronização precisa dos *slots* de tempo no enlace de subida é necessária para assegurar que as transmissões de múltiplos usuários não causem interferência entre si. Esta sincronização é possível através de um procedimento de calibração definido pela camada de controle de acesso ao meio (MAC).

- Controle de frequência

A frequência central das portadoras de RF das estações base e assinante necessita ter uma precisão especificada dentro de certos limites e que seja garantida durante todo o tempo de operação, considerando as variações de temperatura a que o sistema está submetido. A variação da frequência central da portadora da estação base deve estar dentro da faixa de $\pm 8 \times 10^{-6}$ enquanto, no caso da estação assinante, a variação também tem como referência a portadora da estação base e deve estar dentro da faixa de $\pm 1 \times 10^{-6}$ da frequência central.

- Controle de potência

Um algoritmo de controle de potência deve existir no canal do enlace de subida para ajustes de potência iniciais e ajustes periódicos durante a comunicação sem ocorrência de perda de dados. A estação base deve ser capaz de realizar medições precisas da potência do sinal recebido. Este valor é comparado com níveis de referência e eventuais diferenças podem ser informadas às estações assinantes através do envio de mensagens de calibração. O algoritmo de controle de potência deve ser projetado para administrar atenuação da potência causada por distância ou por flutuações de potência em taxas de no máximo 20 dB por segundo com profundidade de pelo menos 40 dB.

2.5.5.

Requisitos de desempenho

O padrão define alguns requisitos de desempenho mínimo para sistemas operando na faixa de 24 a 32 GHz com o objetivo de garantir a interoperabilidade das estações assinantes. Para a estação base são apresentadas algumas especificações de desempenho mínimo do seu transmissor. Para a estação assinante são apresentadas especificações de desempenho mínimo de seu transmissor e do seu receptor.

Além destas especificações, o padrão estabelece alguns limites para operação dos transmissores como no caso da potência de saída em que uma estação base não deve produzir uma densidade espectral de potência efetiva irradiada isotropicamente superior a +28,5 dBm/MHz (ou conforme regulamentação local). No caso da estação assinante este valor limite é +39,5 dBm/MHz [12].

Ainda para garantir um desempenho mínimo dos sistemas, o padrão aborda as condições de propagação enfatizando que para a obtenção de serviços de alta qualidade e alta disponibilidade é necessária a existência de visada direta entre estação base e estação assinante. Além disto, as estações assinantes necessitam ter antenas altamente diretivas para minimizar o efeito de multipercursos e a interferência de outras fontes.

2.5.6. Medidas de qualidade do canal

Para avaliação da qualidade do canal são consideradas duas características: o indicador da intensidade do sinal recebido (RSSI) e a relação entre os níveis do sinal e da soma de ruído e interferência ($S/(N+I)$). Estas características facilitam o processo de seleção/atribuição de uma estação base e na seleção do perfil das rajadas. O processo de medição do RSSI não requer a demodulação do sinal possibilitando, desta forma, uma avaliação confiável mesmo em condições de sinais muito fracos. As medições da relação $S/(N+I)$, por outro lado, requerem a demodulação do sinal fornecendo informações sobre as condições reais de operação do receptor referentes a sinal, interferência e ruído.

Como o canal é variante no tempo, as medidas para avaliação da qualidade do canal consideram valor médio e desvio padrão.

Uma estação assinante realiza as medições do RSSI a partir de solicitação feita pela estação base. A medição é realizada durante a transmissão dos preâmbulos no enlace de descida. Os valores da média e do desvio padrão são informados à estação base em unidades de dBm quantizadas com incrementos de 1 dBm e podem estar na faixa entre -40 dBm e -123 dBm. Se o valor medido estiver fora da faixa, o valor informado à estação base será o valor limite da faixa que estiver mais próximo do valor medido.

A medição da relação $S/(N+I)$ também é realizada pela estação assinante a partir de solicitação feita pela estação base e também é realizada durante a transmissão dos preâmbulos no enlace de descida. Os valores da média e do desvio padrão são informados à estação base em unidades de dB quantizadas com incrementos de 1 dB e podem estar na faixa entre o mínimo de -20 dB e o máximo de 40 dB. Da mesma forma que no caso da RSSI, se o valor medido estiver fora da faixa, o valor informado à estação base será o valor limite da faixa que estiver mais próximo do valor medido.