

# Bezdrátové a mobilní sítě

# 6

Posledních 15 let v telefonním světě znamenalo pravděpodobně zlatý věk mobilních telefonů. Počet uživatelů mobilních telefonů na celém světě se zvýšil ze 34 milionů v roce 1993 na téměř 5,5 miliardy uživatelů v roce 2011. Počet uživatelů mobilní telefonie dnes převyšuje počet drátových telefonních linek. Výhody mobilních telefonů zná každý – snadný přístup ke globální telefonní síti prostřednictvím snadno přenosného lehkého zařízení, a to kdekoli a kdykoli. Dnes, s příchodem notebooků, kapesních počítačů a chytrých telefonů a díky jejich schopnosti poskytovat kdekoliv a kdykoliv snadný přístup ke globálnímu Internetu, je možné, že je za dveřmi podobná exploze. Tentokrát se bude týkat používání bezdrátových internetových zařízení.

## 6.1 Úvod

## 6.2 Charakteristiky bezdrátových linek a sítí

### 6.2.1 Protokol CDMA

## 6.3 WiFi: Bezdrátové sítě LAN 802.11

### 6.3.1 Architektura 802.11

### 6.3.2 Protokol MAC 802.11

### 6.3.3 Rámec IEEE 802.11

### 6.3.4 Mobilita v rámci stejné IP podsítě

### 6.3.5 Pokročilé funkce 802.11

### 6.3.6 Osobní sítě (Personal Area Networks): Bluetooth a ZigBee

## 6.4 Mobilní přístup k Internetu

### 6.4.1 Přehled architektury mobilních sítí

### 6.4.2 Mobilní datové sítě 3G: Rozšíření Internetu na mobilní předplatitele

### 6.4.3 K sítím 4G: LTE

## 6.5 Správa mobility: Principy

### 6.5.1 Adresování

### 6.5.2 Směrování do mobilního uzlu

## 6.6 Mobilní IP

## 6.7 Správa mobility v mobilních sítích

### 6.7.1 Směrování hovorů na mobilní uživatele

### 6.7.2 Předávání řízení v sítích GSM

## 6.8 Bezdrátové sítě a mobilita: Dopad na protokoly vyšší vrstvy

## 6.9 Shrnutí

Bez ohledu na budoucí rozvoj bezdrátových internetových zařízení je již nyní jasné, že bezdrátové sítě a jejich služby související s mobilitou jsou zde. Z hlediska počítačových sítí jsou výzvy, kterým čelí tyto sítě, zejména v linkové a síťové vrstvě, natolik odlišné od tradičních pevných počítačových sítí, že jsme se rozhodli věnovat studiu bezdrátových a mobilních sítí samostatnou kapitolu (tedy *tuto* kapitolu).

Tuto kapitolu zahájíme pojednáním o mobilních uživateli, bezdrátových spojení a sítích a jejich vztahu k větším (obvykle kabelovým) sítím, ke kterým se připojují. Rozdělíme problémy na ty, které vyplývají z *bezdrátové* povahy komunikačních linek v těchto sítích, a na ty, které vyplývají z *mobility*, kterou tyto bezdrátové linky umožňují. Zdůrazněním tohoto důležitého rozdílu mezi bezdrátovostí a mobilitou získáme možnost lépe izolovat, identifikovat a zvládnout klíčové pojmy v jednotlivých oblastech. Mějte na paměti, že existuje mnoho síťových prostředí s bezdrátovými síťovými uzly, nejen mobily (např. bezdrátové domácí nebo kancelářské sítě se stacionárními stanicemi a velkými displeji). Dále existují omezené formy mobility, které nevyžadují bezdrátové spojení (např. pracovník, který používá domácí připojení notebooku, vypne notebook, jede do práce a připojí notebook k firemní kabelové síti). Velkou část vzrušujících síťových prostředí tvoří samozřejmě ta, ve kterých uživatelé využívají jak bezdrátový, *tak* mobilní scénář. Například když se uživatel mobilního telefonu (třeba na zadním sedadle auta) baví rozhovorem Voice-over-IP a přitom udržuje vícenásobné TCP spojení, zatímco se auto řítí po dálnici rychlostí 160 kilometrů za hodinu. Právě zde, v průsečíku bezdrátovosti a mobility, najdeme nejzajímavější technické problémy!

Začneme znázorněním uspořádání, ve kterém budeme uvažovat o bezdrátové komunikaci a mobilitě. Je to síť, ve které jsou bezdrátoví (a případně mobilní) uživatelé připojeni k větší síťové infrastruktuře pomocí bezdrátového spojení na hranici sítě. Potom v oddílu 6.2 pojednáme o vlastnostech tohoto bezdrátového spojení. V oddíle 6.2 také poskytneme krátký úvod do protokolu Code Division Multiple Access (CDMA), což je protokol pro přístup ke sdílenému médiu, který se v bezdrátových sítích často používá. V oddílu 6.3 probereme do určité hloubky aspekty standardu bezdrátových sítí LAN IEEE 802.11 (WiFi) na úrovni linkové vrstvy. Řekneme také pár slov o Bluetooth a dalších bezdrátových osobních sítích. V oddílu 6.4 uvedeme přehled o přístupu mobilních telefonů k Internetu, včetně mobilních technologií 3G a 4G, které poskytují hlasové a vysokorychlostní připojení k Internetu. V oddílu 6.5 obrátíme pozornost k mobilitě. Zaměříme se na problematiku umístění mobilního uživatele, směřování k mobilnímu uživateli a na „předávání“ mobilního uživatele, který se dynamicky pohybuje od jednoho připojovacího bodu k jinému. V oddílech 6.6 a 6.7 budeme zkoumat, jak se tyto mobilní služby realizují v mobilním IP standardu a v sítích GSM. Nakonec v oddíle 6.8 vezmeme v úvahu dopad bezdrátového spojení a mobility na protokoly transportní vrstvy a síťových aplikací.

## 6.1 Úvod

Obrázek 6.1 znázorňuje prostředí, ve kterém budeme uvažovat o tématech bezdrátové datové komunikace a mobility. Na začátku bude naše pojednání dostatečně obecné, abychom pokryli širokou škálu sítí, včetně bezdrátových sítí LAN, jako jsou IEEE 802.11, a sítí mobilních telefonů, například sítě 3G. Podrobnější výklad o konkrétních bezdrátových architekturách uvedeme v pozdějších oddílech. V bezdrátové síti můžeme identifikovat následující prvky:

- *Bezdrátoví hostitelé.* Stejně jako v případě kabelových sítí jsou hostitelé zařízení koncových systémů, na kterých běží aplikace. **Bezdrátovým hostitelem** může být notebook, tablet, chytrý telefon nebo stolní počítač. Hostitelé mohou být a nemusí být mobilní.
- *Bezdrátové linky.* Hostitel se připojuje k základnové stanici (definováno níže) nebo k jinému bezdrátovému hostiteli prostřednictvím **bezdrátové komunikační linky**. Různé technologie bezdrátového spojení mají různé přenosové rychlosti a umožňují přenášet data

na různé vzdálenosti. Obrázek 6.2 znázorňuje dvě klíčové charakteristiky (oblast pokrytí a rychlost linky) několika populárních standardů bezdrátových sítí. (Účelem obrázku je pouze poskytnout představu o těchto vlastnostech. Některé rychlosti linek mohou být nižší nebo vyšší než uvedené hodnoty, v závislosti na vzdálenosti, stavu kanálu a počtu uživatelů v bezdrátové síti.) Tyto standardy probereme později v první polovině této kapitoly. Dalším charakteristikám bezdrátových linek (např. jejich bitové chybovosti a příčinám bitových chyb) se budeme věnovat v bodu 6.2.

## PŘÍKLAD Z HISTORIE

### VEŘEJNÝ PŘÍSTUP K WIFI: BUDE BRZO VE VAŠÍ LAMPĚ?

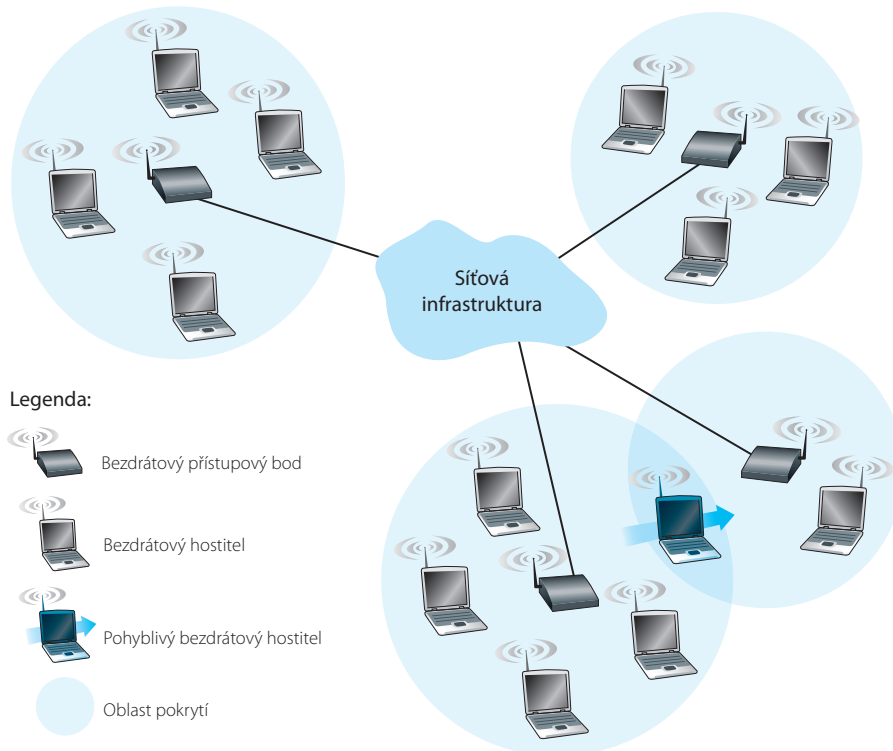
Hotspotů WiFi – veřejných míst, kde mohou uživatelé najít bezdrátový přístup standardu 802.11 – je stále více. Jsou v hotelech, na letištích a kavárnách po celém světě. Většina vysokoškolských areálů nabízí všudypřítomný bezdrátový přístup a je těžké najít hotel, který by neposkytoval Wi-Fi připojení k Internetu.

Během posledních deseti let mnoho měst navrhlo, nasadilo a provozuje obecní WiFi síť. Víze poskytování všudypřítomného WiFi přístupu jako veřejné služby (podobně jako pouliční osvětlení) je přesvědčivá. Pomáhá překlenout digitální propast tím, že poskytuje přístup k Internetu všem občanům a podporuje hospodářský rozvoj. Mnoho měst po celém světě, například Filadelfie, Toronto, Hongkong, Minneapolis, Londýn a Auckland, má v plánu poskytovat nebo již do jisté míry poskytuje všudypřítomný bezdrátový přístup v rámci města. Město Filadelfie si vytklo za cíl „změnit se na největší národní WiFi hotspot a přispět ke zlepšení vzdělávání. Překonat digitální propast, posílit rozvoj sousedství a snížit náklady na správu.“ Ambiciózní program – dohoda mezi městem, neziskovým subjektem Wireless Philadelphia a poskytovatelem internetových služeb Earthlink – umožnil vybudovat operační síť hotspotů 802.11b na ramenech sloupů pouličních lamp a na zařízeních pro řízení dopravy. Síť pokrývá 80 procent města. Z finančních a provozních důvodů v roce 2008 prodalo město síť skupině soukromých investorů, která ji později v roce 2010 opět prodala městu. Další města, jako Minneapolis, Toronto, Hongkong a Auckland, dosáhla také menších úspěchů.

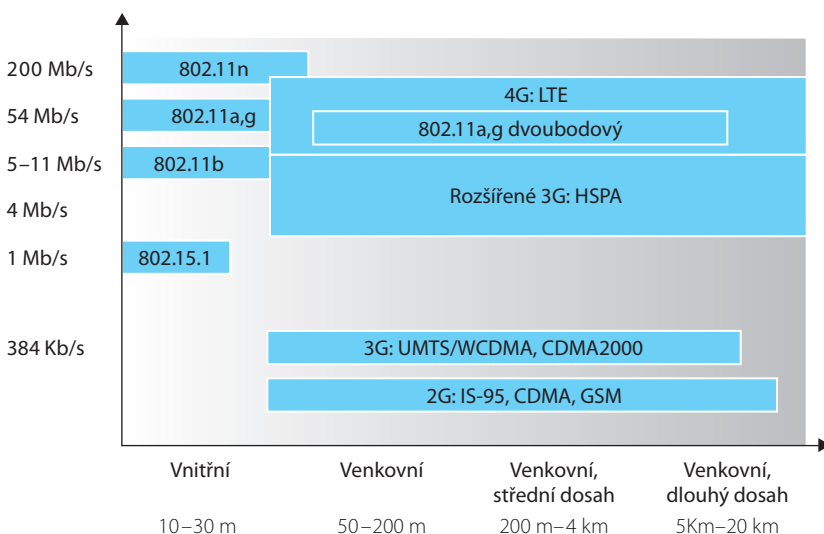
Skutečnost, že síť 802.11 pracují v bezlicenčním spektru (a tudíž je lze nasadit bez nákupu drahých práv na používání spektra), se zdá být finančně atraktivní. Přístupové body 802.11 (viz oddíl 6.3) však mají mnohem kratší rozsahy než základnové stanice mobilní sítě 3G (viz oddíl 6.4). Proto vyžadují na pokrytí stejné geografické oblasti větší počet nasazených koncových bodů. Na druhou stranu, mobilní datové sítě poskytující přístup k Internetu pracují v licencovaném spektru. Mobilní poskytovatelé platí miliardy dolarů za přístupová práva ke spektru svých sítí, takže mobilní datové sítě se stávají spíše byznysem než obecním podnikem.

Bezdrátové linky na obrázku 6.1 propojují bezdrátové hostitele umístěné na okraji sítě do větší síťové infrastruktury. Je třeba dodat, že bezdrátové linky se někdy *v rámci* sítě používají také k propojení směrovačů, prepínačů a dalších síťových zařízení. My se však v této kapitole zaměříme na používání bezdrátové komunikace na okraji sítě. Právě zde nás čekají nejzajímavější technické problémy a zde také probíhá hlavní část rozvoje.

- **Základnová stanice.** **Základnová stanice** je klíčovou součástí infrastruktury bezdrátové sítě. Na rozdíl od bezdrátového hostitele a bezdrátové linky nemá základnová stanice v kabelové síti žádný zřejmý protějšek. Základnová stanice je zodpovědná za odesílání a přijímání dat (např. paketů) od bezdrátového hostitele, který je asociován s touto základnovou stanicí. Základnová stanice je často odpovědná za koordinaci přenosů více bezdrátových hostitelů, s nimiž je asociována. Když říkáme, že bezdrátový hostitel je „asociován“ se základnovou stanicí, znamená to, že (1) počítač je ve vzdálenosti pro bezdrátovou komunikaci od základnové stanice a (2) hostitel tuto základnovou stanicí používá k přenosu dat mezi sebou (hostitelem) a větší sítí. **Základnovými stanicemi jsou například mobilní věže** v mobilních sítích a **přístupové body** v bezdrátových sítích LAN 802.11.



Obrázek 6.1: Prvky bezdrátové sítě



Obrázek 6.2: Charakteristiky linek vybraných bezdrátových síťových norem

Na obrázku 6.1 je základnová stanice připojena k větší síti (např. k Internetu, firemní nebo domácí síti nebo telefonní síti). To znamená, že funguje jako přepínač linkové vrstvy mezi bezdrátovým hostitelem a zbytkem světa, se kterým hostitel komunikuje.

O hostitelích asociovaných se základnovou stanicí se často říká, že pracují v režimu **infrastruktury**, protože všechny tradiční síťové služby (např. přiřazování adres a směrování) poskytuje síť, ke které je hostitel připojen prostřednictvím základnové stanice. V **sítích ad hoc** nemají bezdrátoví hostitelé takovou infrastrukturu, jejímž prostřednictvím by se připojovali. Vzhledem k tomu, že zde taková infrastruktura neexistuje, musí služby, jako například směrování, přiřazování adres, překládání názvů DNS a další, poskytovat hostitelé sami.

Když se mobilní hostitel přesune mimo dosah jedné základnové stanice a do rozsahu jiné, pak se jeho bod připojení k větší síti změní (tj. změní se základnová stanice, se kterou je asociován); tento postup se označuje jako **přepnutí** (handoff). Tato mobilita vyvolává řadu složitých otázek. Jestliže se mobilní hostitel může pohybovat, jak lze najít jeho aktuální umístění v síti, aby bylo možno tomuto hostiteli předávat data? Vzhledem k tomu, že hostitel se může nacházet v jednom z mnoha možných umístění, jak se provádí adresování? Jestliže se hostitel *v průběhu* TCP spojení nebo telefonního hovoru pohybuje, jak se musí provádět směrování dat, aby spojení probíhalo bez přerušení? Díky těmto a mnoha (mnoha!) dalším otázkám představují bezdrátové a mobilní sítě vzrušující oblast výzkumu počítačových sítí.

- **Síťová infrastruktura.** Jedná se o větší síť, se kterou by si bezdrátový hostitel přál komunikovat.  
Nyní, když jsme uvedli různé „části“ bezdrátových sítí, je třeba říci, že tyto části lze mnoha různými způsoby kombinovat a tak vytvářet různé typy bezdrátových sítí. Systematické třídění typů bezdrátových sítí vám bude k užítku nejen při čtení této kapitoly, ale také v případě, že si budete chtít přečíst nebo prostudovat další knihy o bezdrátových sítích. Na nejvyšší úrovni můžeme bezdrátové sítě dělit podle dvou kritérií: (i) *zda* paket v bezdrátové síti prochází přesně *jedním bezdrátovým přenosem nebo více bezdrátovými přenosy* a (ii) *zda síť obsahuje infrastrukturu*, jako například základnovou stanici.
- **Jednopřenosové sítě (single-hop), založené na infrastruktuře.** Tyto sítě mají základnovou stanici, která je připojena k větší pevné síti (např. k Internetu). Kromě toho veškerá komunikace probíhá mezi touto základnovou stanicí a bezdrátovým hostitelem prostřednictvím jednoho bezdrátového přenosu. Do této kategorie patří sítě 802.11, které se používají ve třídách, kavárnách nebo knihovnách, a 3G mobilní datové sítě, které také krátce probereme.
- **Jednopřenosové sítě (single-hop) bez infrastruktury.** V těchto sítích neexistuje základnová stanice, která by byla připojena k bezdrátové síti. Jak ale uvidíme, jeden z uzlů v této jednopřenosové (single-hop) síti může koordinovat přenosy ostatních uzlů. Příkladem jednopřenosových (single-hop) sítí bez infrastruktury jsou sítě bluetooth (které budeme studovat v kapitole 6.3.6) a sítě 802.11 v režimu ad hoc.
- **Vícepřenosové (multi-hop) sítě založené na infrastruktuře.** V těchto sítích je k dispozici základnová stanice, která je připojena k větší síti. Některé bezdrátové uzly však, aby mohly komunikovat prostřednictvím základnové stanice, přenášejí svou komunikaci prostřednictvím jiných bezdrátových uzlů. Do této kategorie spadají některé bezdrátové senzorové sítě a tzv. **bezdrátové sítě typu mesh**.
- **Vícepřenosové (multi-hop) sítě bez infrastruktury.** V těchto sítích se nevyskytuje základnová stanice, a aby uzly dosáhly svého cíle, mohou přenášet zprávy prostřednictvím několika dalších uzlů. Uzly mohou být mobilní a připojení uzlů se může měnit – tato třída sítí se označuje jako **mobilní síť ad hoc (mobile ad hoc networks, MANET)**. Pokud jsou mobilními uzly vozidla, síť se nazývá **automobilová síť ad hoc (vehicular ad hoc network, VANET)**. Jak si možná umíte představit, vývoj protokolů pro tyto sítě je náročný a představuje předmět rozsáhlého probíhajícího výzkumu.

V této kapitole se omezíme především na jednopřenosové (single-hop) sítě, tedy většinou na sítě na bázi infrastruktury.

Pojďme se nyní ponořit hlouběji do technických problémů v bezdrátových a mobilních sítích. Začneme nejprve s jednotlivou bezdrátovou linkou. Informace o mobilitě odložíme až na pozdější část této kapitoly.

## 6.2 Charakteristiky bezdrátových linek a sítí

Uvažujme o jednoduché kabelové síti, řekněme o domácí síti, jejíž hostitelé jsou propojeni ethernetovým přepínačem (viz oddíl 5.4). Pokud bychom nahradili kabelovou síť Ethernet bezdrátovou sítí 802.11, pak by bezdrátové síťové rozhraní nahradilo kabelové ethernetové rozhraní hostitele a přístupový bod by nahradil ethernetový přepínač. V síťové vrstvě nebo výše by však nebyly nutné prakticky žádné další změny. Při pohledu na významné rozdíly mezi drátovými a bezdrátovými sítěmi se tedy zaměříme na linkovou vrstvu. Mezi drátovými a bezdrátovými sítěmi můžeme skutečně najít řadu významných rozdílů:

- *Slábnutí signálu.* Elektromagnetické záření se při průchodu hmotou zeslabuje (např. když rádiový signál prochází zdí). Dokonce i ve volném prostoru se zvyšující se vzdáleností mezi odesílatelem a příjemcem se signál rozptyluje. To má za následek slábnutí signálu, které se někdy označuje jako **útlum**.
- *Rušení z jiných zdrojů.* Rádiové zdroje vysílající ve stejném frekvenčním pásmu se navzájem ruší. Například bezdrátové telefony 2,4 GHz a bezdrátové síť LAN 802.11b vysílají ve stejném frekvenčním pásmu. Takže například uživatel bezdrátové sítě LAN 802.11b, který mluví do bezdrátového telefonu 2,4 GHz, nemůže očekávat, že síť i telefon budou fungovat bezvadně. Kromě přenosových zdrojů může být zdrojem elektromagnetického rušení také samotné prostředí (např. v blízkosti motoru nebo mikrovlnné trouby).
- *Mnohacestné šíření.* **Mnohacestné šíření** nastává tehdy, když se části elektromagnetických vln odráží od objektů nebo země. Díky tomu mají cesty mezi odesílatelem a příjemcem různou délku. To způsobí defekt přijímaného signálu u příjemce. Přesouvání objektů mezi odesílatelem a příjemcem může rovněž způsobit mnohacestné šíření, které se v průběhu času mění.

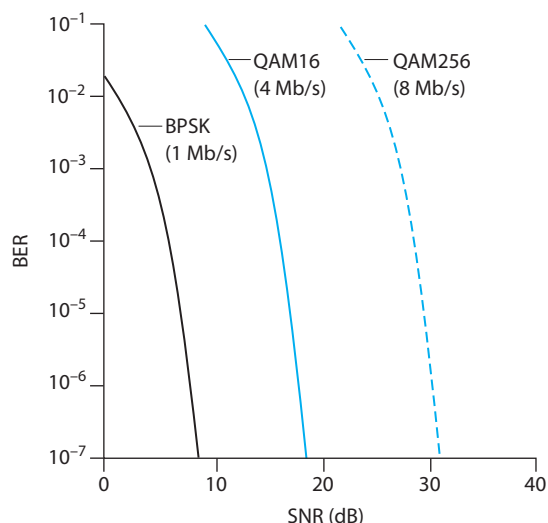
Podrobné pojednání o charakteristikách, modelech a měření bezdrátových kanálů najdete v [Anderson 1995].

Z výše uvedeného vyplývá, že u bezdrátového spojení dochází častěji k bitovým chybám než u kabelových spojů. Proto asi čtenáře nepřekvapí, že protokoly pro bezdrátové spojení (například protokol 802.11, který budeme zkoumat v následujícím oddílu) využívají pro detekci chyb nejen silné kódy CRC, ale také protokoly pro spolehlivý přenos dat na linkové úrovni, které opakují přenos poškozených rámců.

Známe tedy problémy, které mohou nastat na bezdrátovém kanálu. Pojdme obrátit pozornost k hostiteli, který přijímá bezdrátový signál. Elektromagnetický signál, který tento hostitel přijímá, je kombinací degradovaného tvaru původního signálu vysílaného odesílatelem (a který se zhoršuje v důsledku mnohacestného šíření, jak jsme uvedli výše, a v důsledku dalších příčin) a šumu na pozadí. **Poměr signálu a šumu (signal-to-noise ratio, SNR)**, je relativní poměr síly přijímaného signálu (tj. přenášených informací) a tohoto šumu. SNR se obvykle měří v decibelech (dB). O této jednotce si někteří myslí, že se používá hlavně proto, aby elektrotechnici zmátli informatiky. Poměr SNR, měřený v dB, je dvacetinásobkem poměru desítkového logaritmu amplitudy přijímaného signálu k amplitudě šumu. Pro naše účely potřebujeme vědět jen tolik, že vyšší hodnota SNR usnadňuje příjemci extrakci vysílaného signálu od šumu na pozadí.

Obrázek 6.3 (převzali jsme z [Holland 2001]) znázorňuje bitovou chybovost (BER) – což je přibližně řečeno pravděpodobnost, že přenesený bit bude u příjemce přijat chybně – a hodnoty SNR pro tři různé modulační techniky kódování přenášených informací v idealizovaném bezdrátovém kanálu. Teorie modulace a kódování, stejně jako BER a extrakce signálu, značně přesahuje rámec této knihy (pojednání o těchto tématech uvádí [Schwartz 1980]). Obrázek 6.3 znázorňuje několik vlastností fyzické vrstvy, které jsou důležité pro pochopení bezdrátových komunikačních protokolů vyšších vrstev:

- Pro dané modulační schéma platí, že čím vyšší je SNR, tím nižší je BER. Zatímco odesílatel může zvýšením svého vysílacího výkonu zvýšit SNR, odesílatel může zvýšením svého vysílacího výkonu snížit pravděpodobnost chybného přenosu rámce. Všimněte si však, že zvyšování výkonu nad určitou mezní hodnotu má malý praktický význam, řekněme snížení hodnoty BER z 10<sup>-12</sup> na 10<sup>-13</sup>. S rostoucím vysílacím výkonem jsou spojeny také nevýhody: odesílatel spotřebuje více energie (to je důležité pro mobilní uživatele s bateriovým napájením) a roste pravděpodobnost, že vysílání odesílatele bude mít vliv na přenos jiného odesílatele (viz obrázek 6.4 (b)).

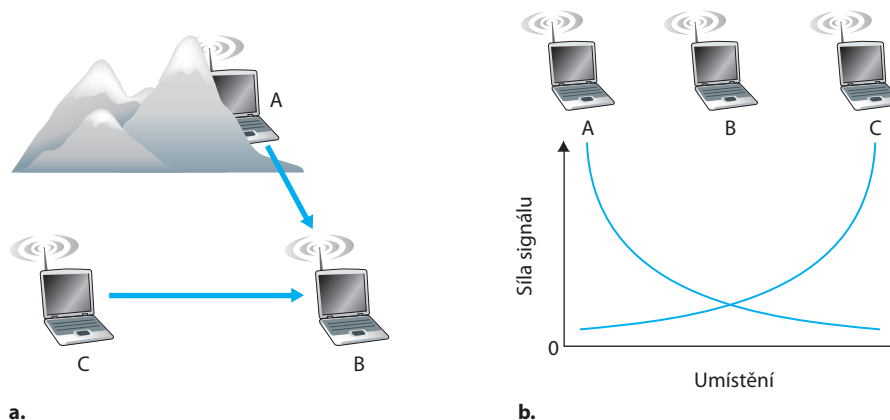


**Obrázek 6.3:** Bitová chybovost, přenosová rychlost a poměr SNR

- Pro danou hodnotu SNR mají modulační techniky s vyšší bitovou přenosovou rychlostí (ať již při chybě nebo ne) vyšší hodnoty BER. Například na obrázku 6.3, při hodnotě SNR 10 dB, má modulace BPSK s přenosovou rychlostí 1 Mb/s hodnotu BER menší než 10<sup>-7</sup>. Naproti tomu modulace QAM16 s přenosovou rychlostí 4 Mb/s má hodnotu BER 10<sup>-1</sup>, což je pro praktické použití příliš vysoká hodnota. Nicméně při hodnotě SNR 20 dB má modulace QAM16 přenosovou rychlost 4 Mb/s a hodnotu BER 10<sup>-7</sup>, zatímco modulace BPSK má přenosovou rychlost pouze 1 Mb/s a hodnotu BER příliš nízkou, než aby se „vešla do grafu“. Pokud by někomu vyhovovala hodnota BER 10<sup>-7</sup>, modulace QAM16 by díky vyšší přenosové rychlosti v této situaci byla vhodnou modulační technikou. Z těchto úvah vyplývá konečná charakteristika, kterou popíšeme dále.
- Modulaci lze přizpůsobit stavu kanálu, a to pomocí dynamického výběru modulační techniky fyzické vrstvy. Hodnota SNR (a tedy i BER) se může měnit v důsledku pohybu nebo změn v prostředí. V mobilních datových systémech a v mobilních datových sítích 802.11 WiFi a 3G se používá adaptivní modulace a kódování, které probereme v oddílech 6.3 a 6.4. To umožňuje vybrat pro danou charakteristiku kanálu takovou modulaci, která poskytuje nejvyšší možnou přenosovou rychlost při omezení hodnoty BER.

Vyšší a časově proměnná bitová chybovost však není jediným rozdílem mezi kabelovou a bezdrátovou linkou. Připomeňme si, že u kabelových broadcastových linek přijímají všechny uzly všechny přenosy od ostatních uzlů. Jak je znázorněno na obrázku 6.4, v případě bezdrátové linky není situace tak jednoduchá. Předpokládejme, že stanice A vysílá do stanice B. Předpokládejme dále, že stanice C také vysílá do stanice B. V důsledku tzv. **problému skrytého terminálu** mohou fyzické překážky v prostředí (např. hory nebo budovy) způsobit, že stanice A a C navzájem neuslyší své vysílání, a to i v případě, že přenosy stanic A a C se v cíli B navzájem ruší. Tento problém je znázorněn na obrázku

6.4 (a). Druhý scénář, při kterém dochází k nedetekovatelným kolizím u příjemce, vyplývá z **útlumu** signálu při šíření bezdrátovým médiem. Obrázek 6.4 (b) znázorňuje případ, kdy jsou stanice A a C umístěny tak, že jejich signály nejsou dostatečně silné na to, aby mohly navzájem detekovat své vysílání. Přitom *jsou* však signály stanic dostatečně silné na to, aby se mohly na stanici B vzájemně rušit. Jak uvidíme v oddílu 6.3, problém skrytého terminálu a útlum signálu mají za následek, že vícenásobný přístup do bezdrátové sítě je podstatně složitější než u kabelové sítě.



**Obrázek 6.4:** Problém skrytého terminálu způsobený překážkou (a) a útlumem (b)

### 6.2.1 Protokol CDMA

Připomeňme si z kapitoly 5, že když hostitelé komunikují přes sdílené médium, musí mít protokol, který zajistí, aby se signály od více odesílatelů na straně příjemce navzájem nerušily. V kapitole 5 jsme popsali tři třídy přístupových protokolů: protokoly s dělením kanálu, s náhodným přístupem a střídavým přístupem. Protokol Code Division Multiple Access (CDMA) patří do rodiny protokolů s dělením kanálu. V oblasti technologií bezdrátových sítí LAN a mobilních sítí je převládajícím protokolem. Vzhledem k tomu, že protokol CDMA je v bezdrátovém světě tak důležitý, musíme jej znát dříve, než se v následujících kapitolách začneme zabývat bezdrátovými přístupovými technologiemi.

V protokolu CDMA se každý odeslaný bit kóduje vynásobením signálem (kódem). Tento kód (známý jako rychlost pulzů (**chipping rate**)) se mění mnohem vyšší rychlostí než původní sekvence datových bitů. Obrázek 6.5 znázorňuje jednoduchý scénář idealizovaného kódování a dekódování protokolu CDMA. Předpokládejme, že rychlost, kterou originální datové bity přicházejí do kodéru CDMA, určuje jednotku času. To znamená, že každý původní datový bit určený k předání vyžaduje časový slot o délce jednoho bitu. Nechť  $d_i$  označuje hodnotu datového bitu pro  $i$ -tý bitový slot. Z matematických důvodů určíme, že  $-1$  reprezentuje datový bit s hodnotou 0. Každý bitový slot je dále rozdělen do  $M$  minislottů podle obrázku 6.5.  $M = 8$ , ačkoli v praxi je  $M$  mnohem větší. Kód CDMA použitý odesílatelem se skládá z řetězce  $M$  hodnot  $c_m$ , kde  $m = 1, \dots, M$ , přičemž každá z hodnot je 1 nebo  $-1$ .  $M$ -bitový kód protokolu CDMA používaný odesílatelem v příkladu na obrázku 6.5 je  $(1, 1, 1, -1, 1, -1, -1, -1)$ . Pro lepší ilustraci fungování protokolu CDMA se podívejme na  $i$ -tý datový bit,  $d_i$ . Pro  $m$ -tý minislott bitového přenosového času  $d_i$  je výstupem kodéru CDMA  $Z_{i,m}$ , což je hodnota  $d_i$  vynásobená  $m$ -tým bitem v přiděleném kódu CDMA,  $c_m$ :

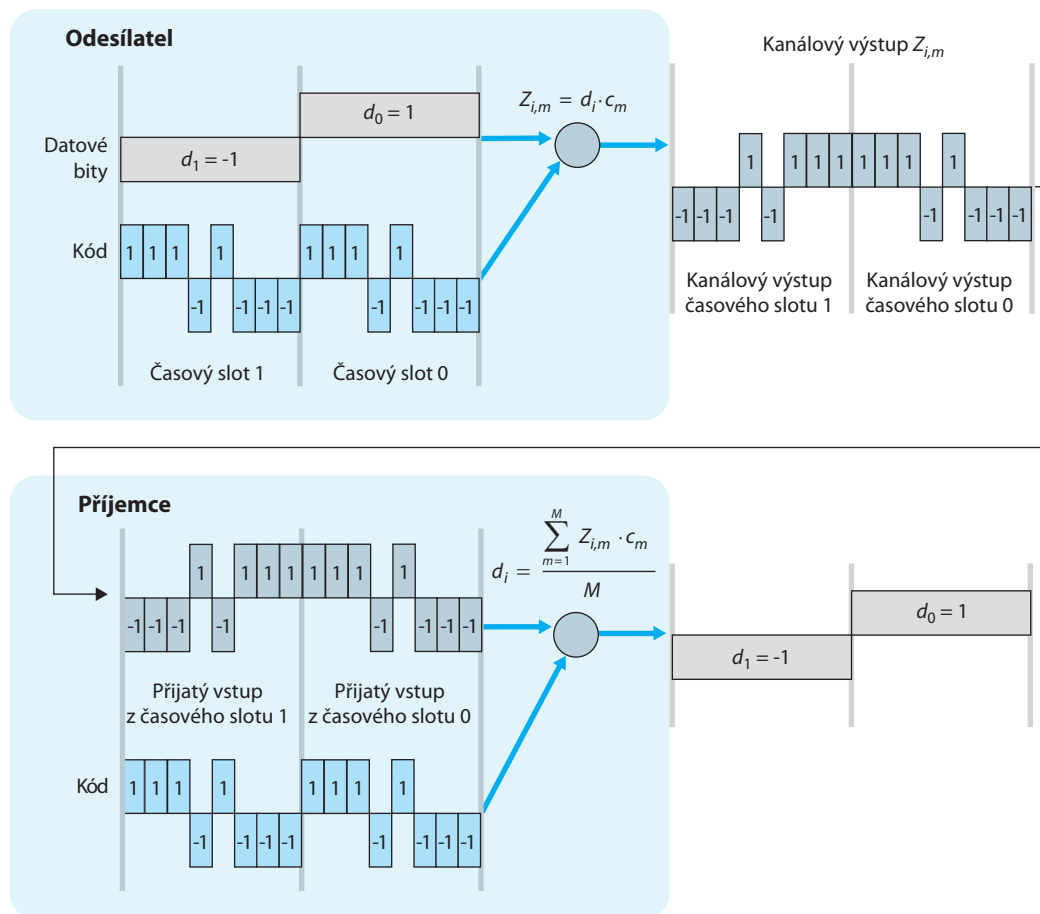
$$Z_{i,m} = d_i \cdot c_m \quad (6.1)$$

V jednoduchém světě bez vzájemně se rušících odesílatelů by příjemce přijal kódované bity  $Z_{i,m}$  a pomocí následujícího výpočtu by obnovil původní datový bit,  $d_i$ :



$$d_i = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M Z_{i,m} \cdot c_m \quad (6.2)$$

Čtenář, který podrobně prostuduje příklad na obrázku 6.5, uvidí, že původní datové bity se pomocí rovnice 6.2 u příjemce opravdu správně obnoví.



**Obrázek 6.5:** Jednoduchý příklad CDMA: kódování u odesílatele, dekódování u příjemce

Svět však zdaleka není ideální, a jak jsme uvedli výše, protokol CDMA pracuje v přítomnosti vzájemného rušení odesílatelů, kteří kódují a přenášejí svá data pomocí jiného přiřazeného kódu. Jak ale může příjemce protokolu CDMA obnovit původní datové bity odesílatele, když jsou tyto datové bity propletené s bity od jiných odesílatelů? Protokol CDMA funguje za předpokladu, že rušivé signály přenášených bitů jsou aditivní. To například znamená, že pokud ve stejném minislottu tři odesílatelé odešlou hodnotu 1 a čtvrtý odesílatel odešle hodnotu -1, pak všichni příjemci v tomto minislottu přijmou hodnotu 2 (protože  $1 + 1 + 1 - 1 = 2$ ). V přítomnosti více odesílatelů vypočítá odesílatel  $s$  své kódované vysílání  $Z_{i,m}^s$  stejným způsobem, jako v rovnici 6.1. Přijátá hodnota u příjemce v  $m$ -tém minislottu  $i$ -tého bitového slotu je dána *součtem* přenesených bitů ode všech  $N$  odesílatelů během tohoto minislottu:

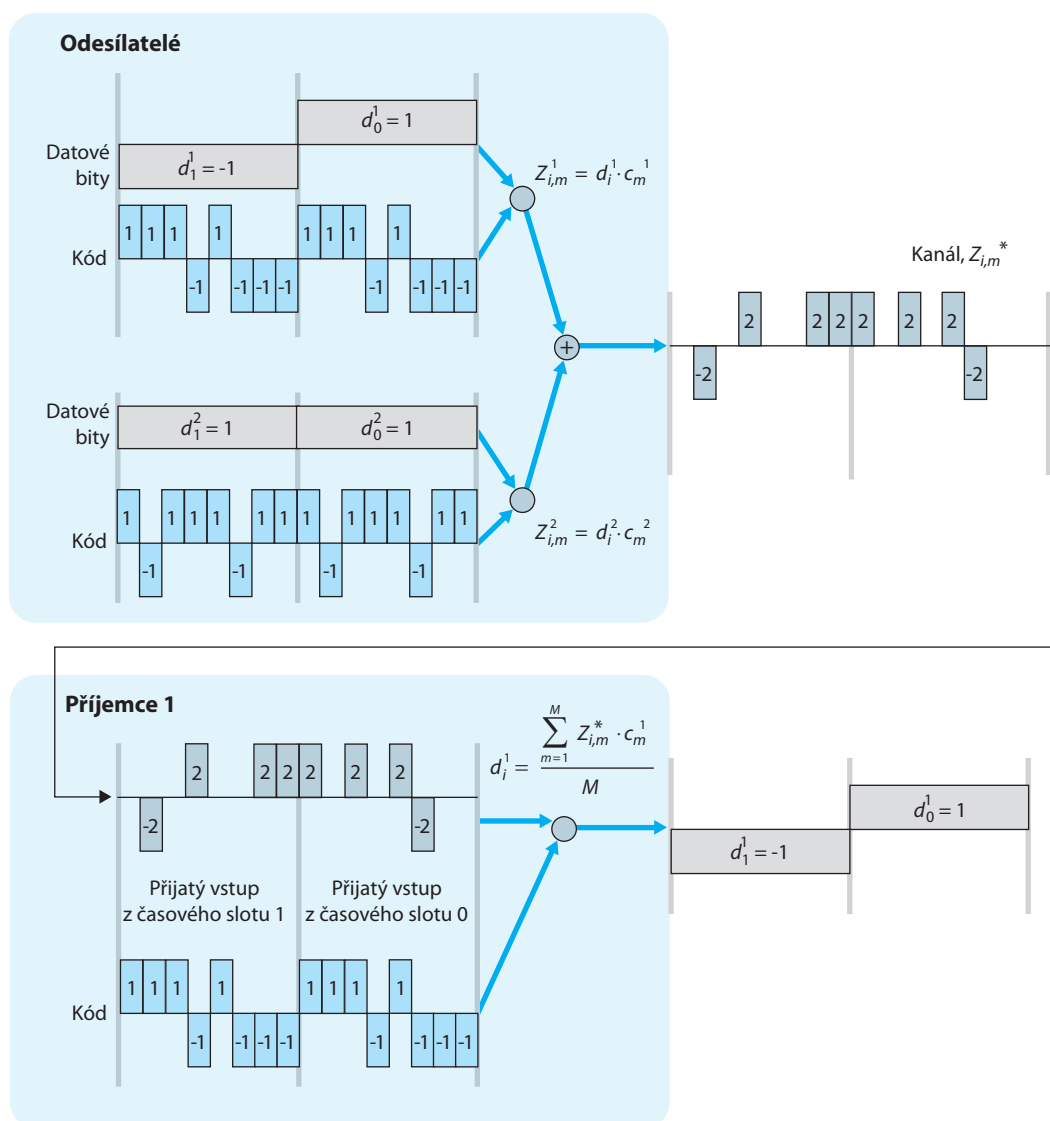
$$Z_{i,m}^r = \sum_{s=1}^N Z_{i,m}^s$$

Pokud se kódy odesílatelů vyberou pečlivě, každý příjemce může snadno obnovit data odeslaná daným odesílatel z agregovaného signálu pomocí kódu odesílatele, a to stejným způsobem jako v rovnici 6.2:

$$d_i = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M Z_{i,m}^* \cdot c_m \tag{6.3}$$

jak je znázorněno na obr. 6.6 pro příklad dvou odesílatelů protokolu CDMA. Horní odesílatel používá  $M$ -bitový kód CDMA (1, 1, 1, -1, 1, -1, -1, -1), zatímco kód CDMA dolního odesílatele je (1, -1, 1, 1, -1, 1, 1). Obrázek 6.6 ilustruje příjemce, který obnovuje původní datové bity od horního odesílatele. Všimněte si, že příjemce dokáže získat data od odesílatele 1 i přes rušení přenosu odesílatelem 2.

Připomeňme si naši analogii s koktejlovým večírkem v 5. kapitole. Protokol CDMA pracuje podobně, jako když účastníci večírku mluví mnoha jazyky. Za takových okolností lidé docela dobře slyší konverzaci v jazyce, kterému rozumí, zatímco ostatní rozhovory ignorují. Zde tedy vidíme, že protokol CDMA provádí rozdělení kódového prostoru (a ne rozdělení času nebo frekvence) a přiřazuje každému uzlu speciální část kódového prostoru.



**Obrázek 6.6:** Příklad dvou odesílatelů protokolu CDMA

Naše pojednání o protokolu CDMA musí být stručné, ale v praxi vzniká řada složitých otázek, které je třeba řešit. Za prvé, aby příjemci protokolu CDMA mohli extrahovat signál konkrétního odesílatele, kódy CDMA se musí pečlivě vybírat. Za druhé, zde předpokládáme, že síla přijatého

signálu od různých odesílatelů je stejná. Ve skutečnosti může být dosažení takového stavu obtížné. Řešením těchto a dalších otázek souvisejících s CDMA se zabývá značné množství literatury, podrobnosti uvádí například [Pickholtz 1982; Viterbi 1995].

## 6.3 WiFi: Bezdrátové sítě LAN 802.11

Bezdrátové sítě LAN jsou všudypřítomné. Používají se na pracovištích, v domácnostech, ve vzdělávacích institucích, kavárnách, na letištích i na rozích ulic. V dnešním Internetu představují jednu z nejdůležitějších technologií pro přístupové sítě. Mnoho technologií a standardů pro bezdrátové sítě LAN bylo vyvinuto v roce 1990, avšak jedna konkrétní třída norem se stala jasným vítězem: **bezdrátové sítě LAN IEEE 802.11**, známé jako **WiFi**. V této části se podíváme na bezdrátové sítě LAN 802.11. Prostudujeme strukturu jejich rámců, přístupový protokol a připojení sítí LAN 802.11 k Internetu pomocí ethernetových sítí LAN.

Pro technologie bezdrátových sítí LAN existuje několik standardů 802.11, například 802.11b, 802.11a a 802.11g. Shrnutí hlavních charakteristik těchto norem uvádí tabulka 6.1. Zdaleka nejpoužávanější technologií je 802.11g. K dispozici je také množství dvourežimových zařízení (802.11a/g) a třírežimových zařízení (802.11a/b/g).

Tyto tři standardy 802.11 mají mnoho společných vlastností. Všechny používají pro přístup k médiu stejný protokol CSMA/CA, který stručně probereme. Všechny tyto tři standardy také používají stejnou strukturu pro své rámce linkové vrstvy. Všechny tři normy mají schopnost snižovat rychlost přenosu s cílem dosáhnout větší vzdálenosti. Jak také stručně vysvětlíme, všechny tři standardy umožňují „režim infrastruktury“ i „režim ad hoc“. Jak je však vidět v tabulce 6.1, mezi těmito třemi standardy je několik významných rozdílů také ve fyzické vrstvě.

Bezdrátová síť LAN 802.11b má přenosovou rychlost 11 Mb/s, pracuje v bezlicenčním frekvenčním pásmu 2,4 až 2,485 GHz a soupeří o frekvenční spektrum 2,4 GHz s telefony a mikrovlnnými troubami. Bezdrátové sítě LAN 802.11a umožňují výrazně vyšší přenosové rychlosti, ale potřebují k tomu vyšší frekvence. Při práci s vyšší frekvencí mají sítě LAN 802.11a pro danou úroveň výkonu kratší přenosovou vzdálenost a jsou náchylnější k vícecestnému šíření. Síť LAN 802.11g pracují ve stejném nízkofrekvenčním pásmu jako 802.11b a jsou zpětně kompatibilní se standardem 802.11b (takže klienty 802.11b lze upgradovat postupně), ale mají vyšší přenosovou rychlost sítí 802.11a. Tím umožňují uživatelům svůj koláč současně mít i jíst.

Standard	Frekvenční rozsah (Spojené státy)	Rychlost přenosu dat
802.11b	2,4 – 2,485 GHz	až 11 Mb/s
802.11a	5,1 – 5,8 GHz	až 54 Mb/s
802.11g	2,4 – 2,485 GHz	až 54 Mb/s

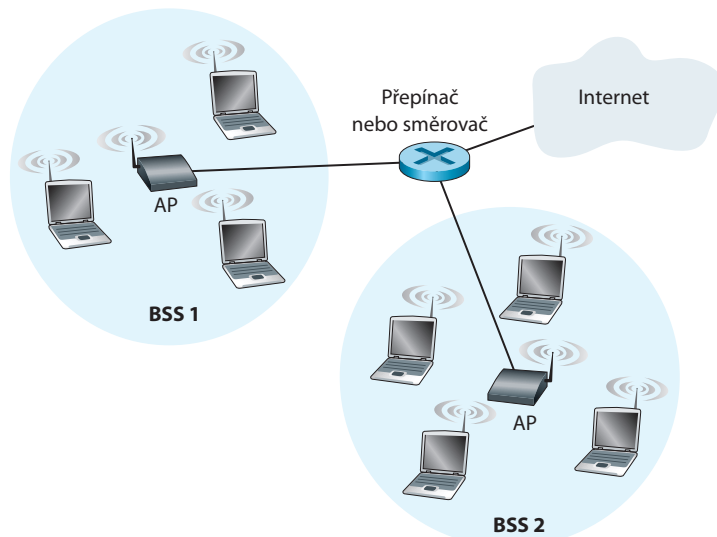
Tabulka 6.1: Přehled standardů IEEE 802.11

Relativně nový standard Wi-Fi, 802.11n [IEEE 802.11n 2012], používá antény s více vstupy a více výstupy (MIMO), tj. dvě nebo více antén na vysílající straně a dvě nebo více antén na přijímající straně, které vysílají a přijímají různé signály [Diggavi 2004]. V závislosti na použitém modulačním schématu umožňuje standard 802.11n přenosové rychlosti až několika stovek megabitů za sekundu.

### 6.3.1 Architektura 802.11

Obrázek 6.7 znázorňuje hlavní součásti architektury sítí LAN 802.11. Hlavním stavebním kamenem architektury 802.11 je **základní sada služeb (basic service set, BSS)**. BSS obsahuje jednu nebo více bezdrátových stanic a centrální **základnovou stanicí**, známou v jazyce 802.11 jako **přístupový**

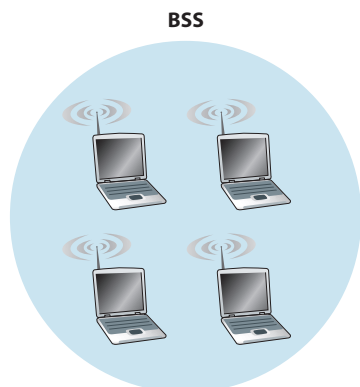
**bod (access point, AP).** Obrázek 6.7 znázorňuje AP v každé ze dvou sad BSS, který se připojuje k propojovacímu zařízení (jako například přepínač nebo router), který vede do Internetu. V běžné domácí síti se vyskytuje jeden AP a jeden router (obvykle jsou integrovány ve stejné jednotce), který připojuje BSS k Internetu.



**Obrázek 6.7:** Architektura sítě LAN IEEE 802.11

Stejně jako u ethernetových zařízení, každá bezdrátová stanice 802.11 má 6bajtovou adresu MAC, která je uložena ve firmwaru adaptéru příslušné stanice (to znamená v síťové kartě 802.11). Každý AP má také adresu MAC svého bezdrátového rozhraní. Stejně jako u Ethernetu, tyto adresy MAC spravuje IEEE a jsou (teoreticky) globálně jedinečné.

Jak jsme uvedli v oddílu 6.1, bezdrátové sítě LAN, které používají přístupové body (AP), se často označují jako **bezdrátové sítě LAN na bázi infrastruktury**. „Infrastrukturu“ tvoří přístupové body společně s drátovými sítěmi Ethernet. Infrastruktura propojuje přístupový bod s routerem. Obrázek 6.8 znázorňuje skutečnost, že stanice IEEE 802.11 se mohou také seskupovat a společně vytvářet sítě ad hoc bez centrálního řízení a bez spojení s „vnějším světem“. Zde se síť vytváří „za chodu“, pomocí mobilních zařízení, která jsou ve vzájemné blízkosti, která potřebují komunikovat a která ve svém umístění nemají žádnou dříve existující síťovou infrastrukturu. Síť ad hoc lze vytvářet například tehdy, když se sejdou lidé s notebooky (například v konferenční místnosti, ve vlaku nebo v autě) a chtějí si vyměňovat data bez přítomnosti centralizovaného AP. Komunikující přenosná zařízení se stále rozšiřují, což vyvolává velký zájem o sítě ad hoc. V této části však soustředíme svou pozornost na bezdrátové sítě LAN s infrastrukturou.



**Obrázek 6.8:** Síť IEEE 802.11 ad hoc