

PERSPEKTIVNÍ KOMUNIKACE 21. STOLETÍ

Václav Žalud

Katedra radioelektroniky FEL ČVUT, Technická 2, 160 00 Praha

zalud@fel.cvut.cz

Abstract:

Tento příspěvek se zabývá hlavními systémovými a technologickými problémy rádiové komunikace příštích let. Pozornost je zaměřena na stanovení klasických limitů spektrální a energetické účinnosti radiokomunikačních systémů. Dále jsou podrobněji probírány nejnovější metody vedoucí k jejich zvýšení, především pak nové formáty modulací a mnohonásobného přístupu, progresivní anténní techniky MIMO, metody kooperativní radiokomunikace a nové technologie softwarového a kognitivního rádia. V závěru je uveden stručný popis systému pozemní mobilní komunikace 4. generace LTE/LTE-A, který uvedené techniky aplikuje.

1. Limity spektrální a energetické účinnosti radiokomunikačních systémů

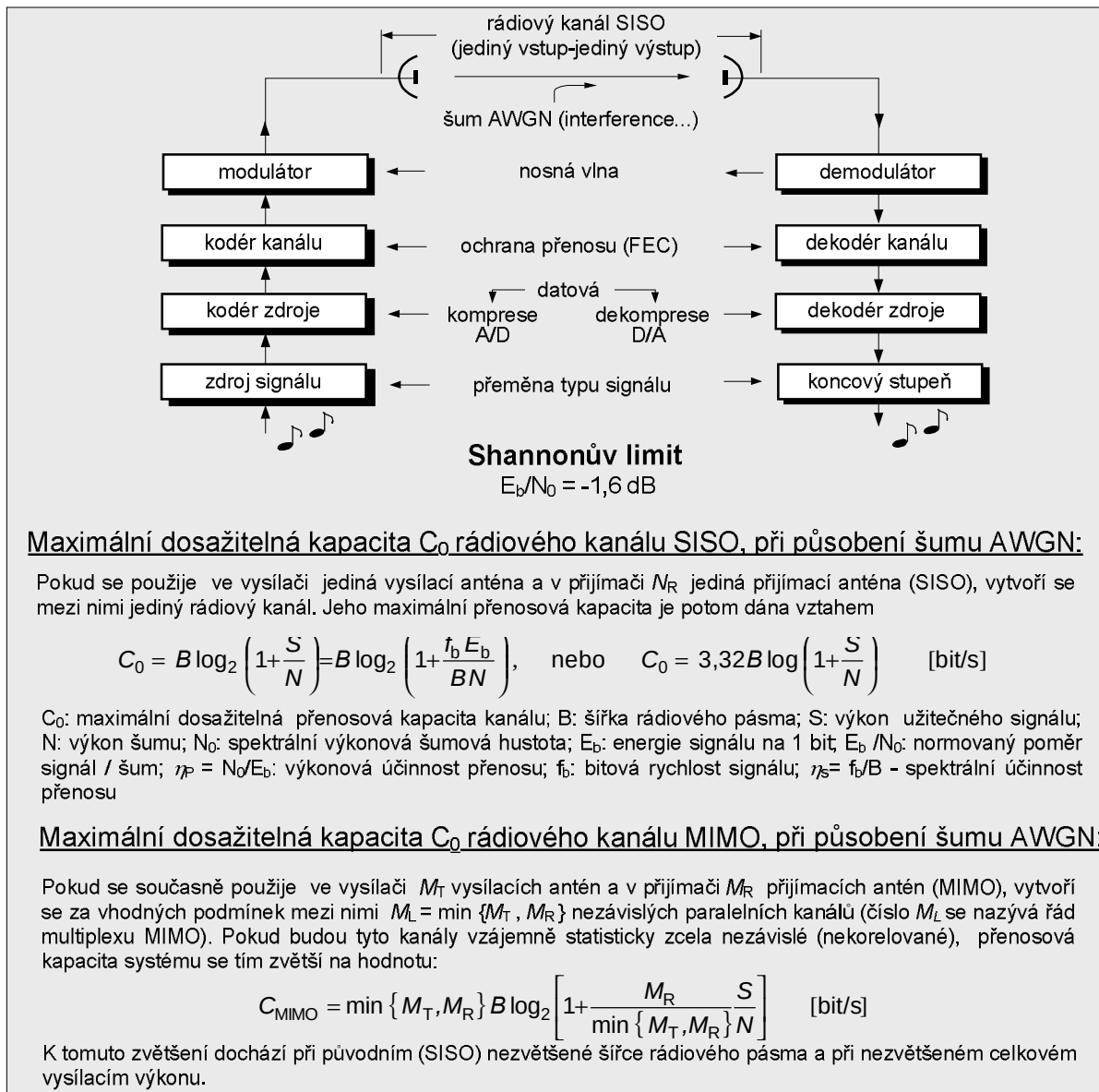
V rozvoji rádiové komunikace se v posledních letech stále důsledněji sledují dvě linie:

- Neustálé zvyšování spektrální účinnosti h_s rádiových systémů, definované jako poměr hrubé bitové rychlosti přenášeného signálu f_b , ku potřebné rádiové šířce pásma B , tedy $h_s = f_b/B$.
- Neustálé zvyšování energetické (výkonové) účinnosti h_e rádiových systémů, definované jako poměr spektrální výkonové hustoty šumu N_0 , ku energii užitečného signálu E_b , připadající na jeden přenášený bit; tato veličina je tedy dána vztahem $h_e = N_0/E_b$, její reciproká hodnota $1/h_e = E_b/N_0$, se někdy označuje jako “normovaný poměr signál/šum”.

Ideální jsou radiokomunikační systémy, které by pokud možno současně dosahovaly maxima obo uvažovaných veličin h_s a h_e . Tento požadavek je však většinou rozporný. Tak například v oblasti digitálních modulací přechod od variant s malými počty modulačních stavů (2PSK, QAM, ...) k modulacím s vyššími počty stavů (...16QAM, 64QAM, ...) je sice doprovázen zvyšováním spektrální účinnosti h_s , avšak při současném nutném snižování energetické účinnosti h_e . K řešení tohoto dilematu však v posledních letech napomáhají zcela nové metody, jako je například použití nikoliv jediné - nýbrž více antén ve vysílači i více antén v přijímači. Tato technika, označovaná jako mnoho vstupů a současně mnoho výstupů rádiového kanálu MIMO (*multiple input multiple output*), může například vůči klasické technice s jedinou vysílací a s jedinou přijímací anténou SISO (*single input single output*), velmi výrazně zvýšit spektrální účinnosti h_s , aniž by se tím zhoršovala energetická účinnost h_e . Proto systémy MIMO představují jednu z nejperspektivnějších metod radiokomunikační techniky v příštím desetiletí, zejména u pozemních systémů fixní i mobilní digitální televize, u buňkových systémů pozemní mobilní komunikace apod.

Základní koncepci digitálních radiokomunikačních systémů SISO názorně ukazuje Shanonnovo schéma podle obr. 1. Zde na vysílací straně je přenášená datová informace v kodéru zdroje zbavena redundancí (nadbytečné) a irelevantní (nepodstatné) složky, což výrazně redukuje rychlost bitového toku a tím zvyšuje celkovou spektrální účinnost h_s .

V následujícím kodéru kanálu se přidáním vhodných paritních bitů a jejich vyhodnocením v přijímači zvyšuje odolnost přenosu, který je zejména v rádiovém kanálu ohrožen mnoha rušivými vlivy (šumem, interferencemi a pod). V modulátoru je takto upravený digitální modulační signál namodulován na vf. nebo mikrovlnnou vlnu a po případné transpozici kmitočtu a výkonovém zesílení již vysílán. V přijímači potom probíhají procesy opačné. Přestože bylo Shannonovo schéma zformulováno před více jak polovinou století, stále se jím řídí i koncepce nejmodernějších radiokomunikačních systémů. V těch se však již navíc uplatňují např. nové metody ochrany přenosu apod., které původní schéma neuvažuje.



Obr. 1 Shannonovo obecné schéma klasického radiokomunikačního systému (SISO) a jeho přenosová kapacita; v obrázku je uveden též vztah pro kapacitu systému s více anténami MIMO

V obr. 1 je také uveden Shannonův-Hartleyův vztah pro maximální dosažitelnou přenosovou kapacitu C_0 radiokomunikačního kanálu s jedinou vstupní a výstupní anténou (SISO), působí-li v něm pouze aditivní bílý gaussianový šum AWGN a bitová chybovost přenosu BER se blíží k nule. K zajištění tohoto bezchybného přenosu potom teoreticky

dostačuje na vstupu demodulátoru přijímače poměr $E_b/N_0 = -1,6$ dB. Skutečná kapacita C moderních systémů je však ještě hluboko pod uvedeným maximem. Tak např. standard mobilní komunikace GSM má v pásmu $B = 200$ kHz specifikovanou přenosovou kapacitu tj. rychlost přenosu 270 kbit/s, kdežto dosažitelné maximum je při typickém poměru signálu k šumu 20 dB (tj. 100:1) přibližně $C_0 = 200 \cdot 10^5 \log_2(1 + 100) \cong 1\,328$ kbit/s, tedy zhruba čtyřikrát vyšší. V posledních letech se však díky novým typům modulací, kódování a dalším progresivním technikám, skutečná kapacita C nejnovějších systémů již blíží Shannonovu limitu.

V obr. 1 je dále uvedena relace pro maximální dosažitelnou přenosovou kapacitu C_{MIMO} moderního systému s více anténami MIMO. Jestliže se například ve vysílači i v přijímači použijí čtyři dílčí antény ($M_T = M_R = 4$), může se zvýšit kapacita, v porovnání s ekvivalentním systémem SISO (se stejnými parametry B a S/N), teoreticky až čtyřikrát. Toto - donedávna ještě těžko představitelné zvýšení, je hlavním důvodem mimořádného zájmu o technologii MIMO.

2. Nástup a důsledky digitalizace radiokomunikačních systémů

Digitalizace radiokomunikačních prostředků započala už v šedesátých letech min. století, avšak v některých aplikacích se dostávala do praxe mnohem později (např. digitální mobilní síť GSM aj. nastupují po roce 1990, digitální televize DVB potom dokonce až po roce 2 000 ap). Přejít od analogových radiokomunikačních systémů k systémům digitálním se uskutečňuje především z následujících důvodů:

a) Digitální systémy mají podstatně vyšší spektrální i energetickou účinnost, než systémy analogové, takže s jejich nástupem v různých komunikačních službách se uvolní značná část frekvenčního spektra (digitální dividenda) a dojde i ke značným energetickým úsporám.

b) Digitální komunikační systémy mohou zajistit přenos informace s podstatně vyšší a neměnnou jakostí. Z kvalitativních parametrů se cení hlavně možnost dosažení mnohem menšího frekvenčního a nelineárního zkreslení - nebo obecněji nižší bitové chybovosti BER a také dosažení většího dynamického rozsahu. Zlepšování těchto parametrů dokonce není u digitálních systémů nijak principiálně omezeno, i když vyžaduje větší šířku rádiového pásma.

c) Digitální modulace jsou již ze své podstaty více odolné vůči nejrůznějším interferencím a šumu. Imunitu vůči rušivým faktorům lze dále posílit použitím ochranného kanálového kódování FEC (*forward error correction*), ale i dalšími moderními metodami zpracování digitálních signálů, jako je opakování chybného přenosu, ekvalizace, prokládání apod.

d) Digitální komunikační systémy umožňují aplikovat efektivní principy nejen frekvenčního, ale i efektivního časového, kódového a prostorového multiplexování různorodých modulačních signálů, což dále podporuje zvýšení spektrální i energetické účinnosti.

e) Digitální přenos je možné zabezpečit mnohem dokonaleji než přenos analogový vůči odposlechu, úmyslnému rušení, nebo jiným formám zneužití, což je v prostředí moderní informační společnosti neobyčejně cenné.

f) Moderní víceúčelové programovatelné digitální signálové procesory dovolují provádět implementaci různých digitálních modulačních formátů a dalších technik kompletně v softwarové oblasti, technikou tzv. softwarového a kognitivního rádia. To potom umožňuje realizovat postupnou flexibilní modernizaci přenosu bez zásadních hardwarových změn.

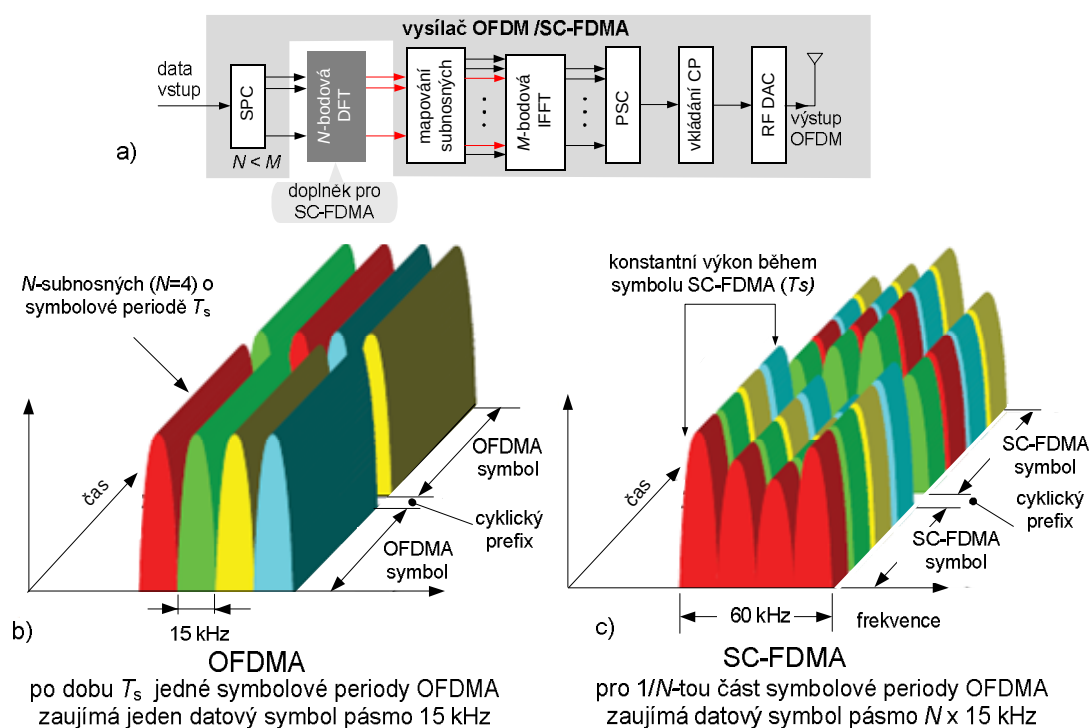
Výše uvedené přednosti digitálních komunikačních systémů jsou však doprovázeny jejich podstatně větší složitostí. Koncepční a obvodové řešení a realizace digitálních systémů je mnohem komplikovanější, než systémů analogových. Tento problém však odstraňuje trvale probíhající prudký rozvoj monolitických integrovaných obvodů, které jsou při sériové výrobě velmi levné a tedy snadno dostupné i v široké spotřebitelské oblasti.

3. Pokroky v technice digitálních modulací a mnohonásobného přístupu

V oblasti digitálních modulací a mnohonásobného přístupu probíhá poměrně pomalý vývoj, určité pokroky zde lze však zaznamenat. Všimněme si několika nových přenosových formátů, uplatňujících se např. v digitální televizi DVB-T a v digitálním rozhlasu DAB, v systémech pozemní mobilní komunikace i jinde.

Mnohonásobný přístup OFDMA a SC-FDMA

Většina systémů pro fixní i mobilní pozemní komunikaci přešla během minulého desetiletí na stejný perspektivní přenosový formát, jímž je ortogonální frekvenční multiplex OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) resp. mnohonásobný přístup OFDMA (OFDM Access) a jejich modifikace. Ty vynikají nad dosavadními technikami modulací a přístupu (QAM, FDMA, TDMA a CDMA) vysokou přirozenou imunitou vůči mnohocestnému šíření (časové disperzi), vyššími dosažitelnými datovými rychlostmi při lepší spektrální účinnosti a nižší latenci přenosu, a to vše bez potřeby náročné ekvalizace na přijímací straně.



Obr.

2 a) Vysílač OFDM s procesorem IFFT; jeho doplněním o zdůrazněný blok (N -bodová DFT) vzniká vysílač SC-FDMA; b) ortogonální frekvenční multiplex OFDM, kde každá subnosná vlna přenáší vždy jen jediný modulační symbol; c) multiplex SC-FDMA, u něhož vlivem rozprostírání modulačních symbolů v procesoru DFT je každý modulační symbol rozložen na všechny subnosné, avšak vždy jen po $1/N$ - část symbolové periody T_s

U OFDM jsou na vysílači vstupní krátké sériové datové symboly přeměněny v převodníku SPC na větší počet (několik desítek až tisíc) mnohem delších symbolů paralelních, které jsou po mapování namodulovány na dílčí, vzájemně ortogonální subnosné vlny a po sumaci a přidání „izolačního“ cyklického prefixu CP (*cyclic prefix*) již vysílány (obr. 2b). Paralelní přenos velmi dlouhých symbolů je pak hlavním atributem formátu OFDM, přinášejícím mu uvedené unikátní přednosti.

Nedostatkem multiplexu OFDM je velký poměr špičkového ku střednímu výkonu PAPR (*peak to average power ratio*) ve vysílaném signálu. K jeho zpracování je potom zapotřebí výkonově předimenzovaný koncový zesilovač vysílače, což vede k jeho nízké energetické

účinnosti - a tedy i k velké spotřebě. V některých aplikacích zvýšená spotřeba není na závadu (např. u stacionárních základnových stanic buňkových systémů apod), v jiných případech (u mobilních stanic buňkových systémů apod) je však z ekonomických důvodů velký odběr nepřijatelný. Situaci zde potom řeší úspornější modifikace techniky OFDM, označovaná DFT-S-OFDM (*discrete Fourier transform spread OFDM*) tj. multiplex OFDM s rozprostíráním realizovaným diskretní Fourierovou transformací DFT; tento formát se také nazývá multiplex SC-FDMA. U této techniky jsou paralelní datové symboly nejprve v procesoru pro transformaci DFT předkódovány a teprve poté mapovány a dále namodulovány rovněž na více subnosných vln, které jsou však vysílány v časové oblasti sériově (obr. 2c).

U principiálního zapojení vysílače OFDM by měla být za vstupním převodníkem SPC a blokem pro mapování subnosných vln zařazena soustava (banka) dílčích konvenčních modulátorů subnosných vln, což je ovšem při jejich velkém počtu technicky neúnosné. Tuto soustavu je však možné v praxi elegantně nahradit jediným monolitickým procesorem pro inverzní rychlou Fourierovu transformaci IFFT (*inverse fast Fourier transform*), tak jak ukazuje obr. 2a, čímž se technika OFDM již stává běžně dostupnou pro spotřební elektroniku. Je - li vysílač OFDM doplněn procesorem DFT, potom se vytvoří vysílač SC-FDMA. Přístup SC-FDMA si zachovává většinu předností typických pro OFDM, avšak vykazuje o 4 až 8 dB menší poměr PAPR, a proto byl vybrán např. pro vzestupnou trasu buňkového standardu LTE.

Hierarchické modulace QAM

Hierarchické modulace M-QAM, náležející do třídy adaptivních modulací, vysílají datové bity současně ve dvou modulačních formátech, a to například 4PSK (QPSK) a dále 64-QAM. Modulace 4PSK je odolná vůči šumu a interferencím, má však malou spektrální účinnost 2 bity/s/Hz, naproti tomu modulace 64-QAM je naopak málo robustní, ale vykazuje velkou spektrální účinnost 6 bitů/s/Hz. Jestliže se uvažovaný systém použije např. v pozemní televizi DVB-T, potom při dobrém poměru SINR je přijímač schopen rozpoznávat všechny body konstelace 64-QAM, což umožňuje reprodukovat obraz s vysokou rozlišovací schopností; této možnosti mohou využít především moderní velké stacionární přijímače (HDTV) s kvalitní anténou ap. Naopak při horších poměrech SINR má systém DVB-T k dispozici pouze čtyřstavovou konstelaci QAM, poskytující obraz s menším rozlišením; tu však mohou úspěšně využívat zejména perspektivní mobilní přijímače, často se nacházející v horších příjmových podmínkách (příjem v zastíněných oblastech se všesměrovými anténami s malým ziskem ap), dále starší přijímače nepřizpůsobené na funkci s modulacemi vyšších řádů apod. Systém DVB-T s hierarchickou modulací též nabízí různý stupeň ochrany přenosu videa, audia a dat.

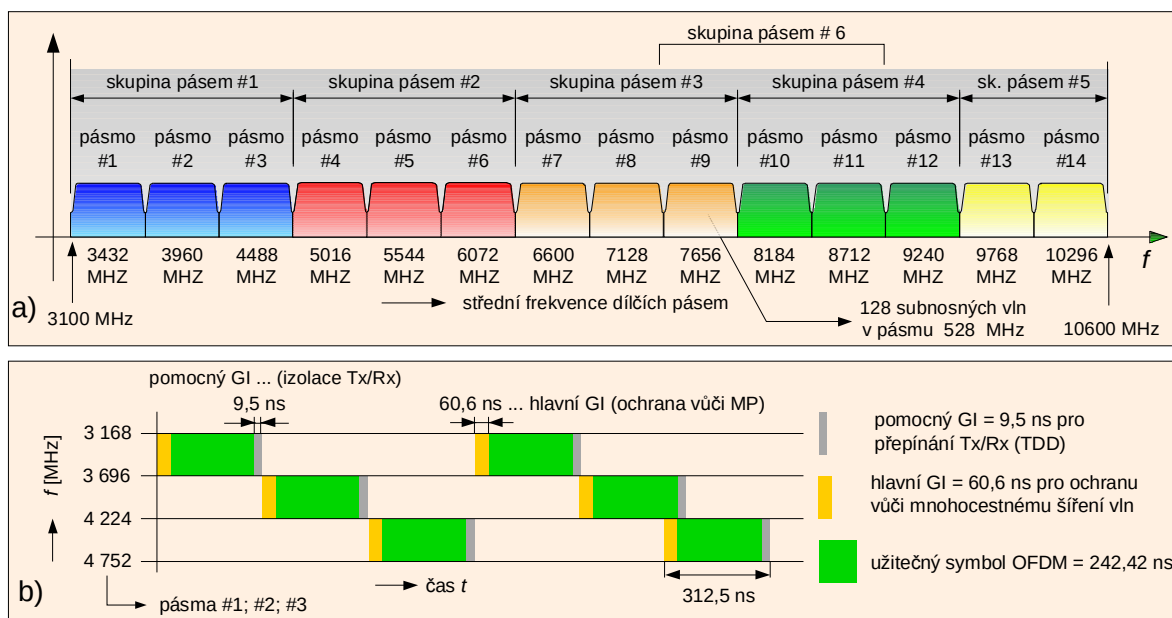
Vícepásmový modulační systém MB OFDM

Důležitou kategorií pozemní mobilní komunikace jsou rádiové personální sítě W-PAN (wireless personal area networks), které mají sice jen malý dosah řádu nejvýše desítek metrů, avšak poskytují uživatelům velmi vysoké přenosové rychlosti řádu až stovek Mbit/s. Do kategorie sítí W-PAN patří např. známá technologie Bluetooth, která však disponuje malými přenosovými rychlostmi, nižšími než asi 2 Mbit/s.

Nové sítě W-PAN využívají k realizaci extrémně rychlého a tedy širokopásmového přístupu osvědčenou - i když poněkud modifikovanou techniku ortogonálního frekvenčního multiplexu OFDM. Nejdůležitějším zástupcem této kategorie je vícepásmový systém MB OFDM (multi band OFDM), aplikovaný v systémech W-PAN pod komerčním označením WiMedia UWB (ultra wide band). U použitého multiplexu MB OFDM je celé aktuální UWB bezlicenční pásmo 3 100 až 10 600 MHz rozděleno do 14 dílčích pásem (bands) s šířkami po

528 MHz, tak jak ukazuje obr. 3a. Tato dílčí pásma jsou sdružena do pěti základních skupin (band groups), z nichž skupiny č. 1 až 4 mají po třech dílčích pásmech a skupina č. 5 má dvě pásma. Standard definuje ještě šestou skupinu, která se částečně překrývá se skupinami č. 3 a č. 4. V každém dílčím pásmu je situováno 128 subnosných vln, se vzájemným odstupem 4,125 MHz. Z nich 100 je určeno pro přenos dat, 12 subnosných je pilotních (využívaných při koherentní detekci), 10 subnosných slouží k ochraně přenosu a 6 nulových subnosných zajišťuje izolaci mezi dílčími pásmy. Subnosné aplikují při špatné kvalitě kanálu robustní čtyřstavovou modulaci QPSK, při kvalitním kanálu pak speciální šestnáctistavovou modulaci DCM (dual carrier modulation), která je sice méně odolná vůči rušivým vlivům, avšak poskytuje vyšší přenosové bitové rychlosti. K ochraně přenosu se používá běžné kódování FEC, realizované konvolučními a LDPC (low density parity check) kódy, s proměnnými kódovými rychlostmi 1/3; 1/2; 2/3; 3/4 a 5/8. V případě aplikace modulace QPSK může být ochrana přenosu ještě posílena dvěma typy rozprostírání, dále zvětšujícími redundanci přenosu. Prvním je rozprostírání v časové oblasti TDS (time domain spreading), spočívající v přenosu stejných dat ve dvou různých časových burstech (bitových skupinách). U druhého typu, jímž je rozprostírání ve frekvenční oblasti FDS (frequency domain spreading), se přenáší stejná data na dvou skupinách subnosných vln téhož symbolu OFDM.

Specifickou technikou multiplexu MB OFDM je prokládání dílčích pásem uvnitř jejich každé skupiny, znázorněné na obr. 3b. To se uskutečňuje pomocí časově-frekvenčních kódů TFC (time-frequency codes), nazývaných také sekvence skákání (hop sequences). Během každé kompletní symbolové periody OFDM je vysíláno v rámci určité skupiny pásem vždy jen jedno dílčí pásmo o šířce 528 MHz a poté se postupně vysílají pásma další. Díky tomuto mechanismu se v libovolném okamžiku vysílají pouze subnosné příslušející jen jedinému pásmu. To vede k výraznému snížení poměru PAPR oproti konvenčnímu formátu OFDM, u něhož se totiž vždy vysílají všechny subnosné, které má systém k dispozici.



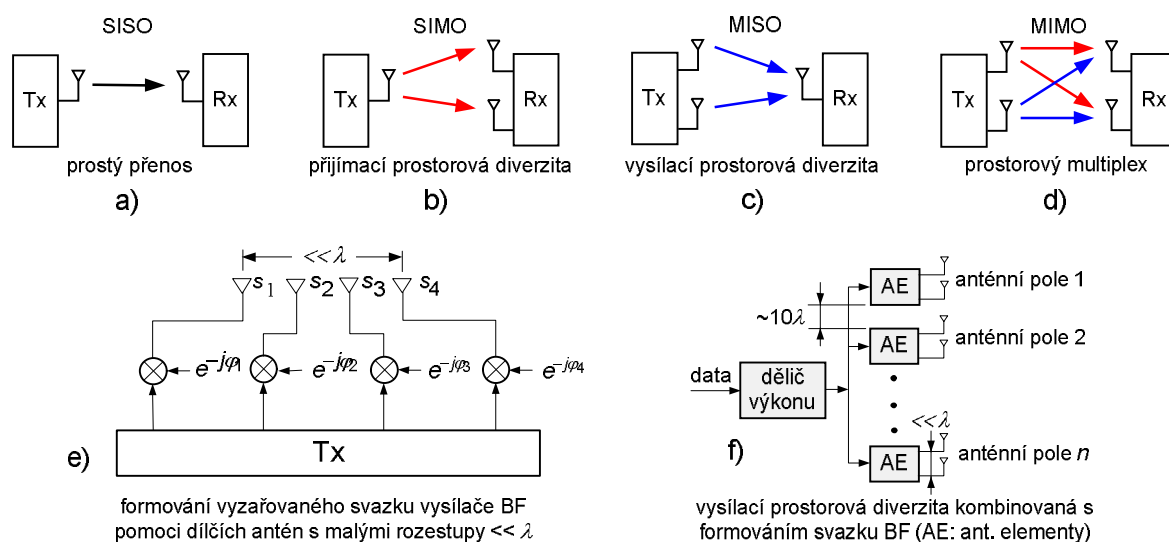
Celkové UWB pásmo 3,1 až 10,6 GHz se dělí do 6 dílčích skupin pásem, se šířkami 528 MHz; každé z nich obsahuje 128 subnosných vln s odstupem 4,125 MHz; b) příklad časově-frekvenčního kódu TFC (TFI) v MB OFDM. V závislosti na typu modulace subnosných vln (QPSK = Quadrature PSK, resp DCM = Dual Carrier Modulation), a v závislosti na typu kódování FEC (o proměnných rychlostech $r_c = 1/3; 1/2; 2/3; 3/4$ a $5/8$) se potom může měnit přenosová rychlost mezi 53,3 Mbit/s až 480 Mbit/s.

Obr. 3 a) Rozdělení celkového pásma UWB v systému MB-OFDM; dílčí pásma se šířkou 528 MHz obsahují 122 subnosných vln s odstupem 4,125 MHz; b) příklad časově-frekvenčního kódování TFC (TFI) v systému MB OFDM

4. Systémy MIMO

V klasické radiokomunikaci se používá technika s jedinou vysílací a jedinou přijímací anténou SISO (*single input single output*), dle obr. 4a. V nových systémech je však již široce aplikována technika více antén, a to buď jen ve vysílači (*multiple input single output* ~ MISO), nebo jen v přijímači (*single input multiple output* ~ SIMO), případně v obou těchto blocích (*multiple input multiple output* ~ MIMO). Mezi vysílačem a přijímačem pak vzniká více přenosových rádiových cest, které mohou mít při dostatečné vzájemné vzdálenosti dílčích antén - a v prostředí bohatém na mnohocestné šíření (*multipath rich, fading rich*) - slabě korelované úniky. Toho lze potom využít buď ve formě prostorové diversity SD (*space diversity*), nebo ve formě prostorového multiplexu SM (*space multiplexing*). Uvedené techniky více antén znázorňuje obr. 4 b, c, d.

V případě vysílací diversity MISO, nebo přijímací diversity SIMO jsou přenášeny ve stejných frekvenčních pásmech shodné, avšak odlišně kódované kopie téhož datového signálu, které se potom v přijímači kombinují. Tím se vnáší do přenosu určitá redundance, jež poskytuje systémům MISO/SIMO zvýšenou odolnost vůči únikům a interferencím. Proto se využívají v rádiových kanálech se špatnými podmínkami šíření, vedoucími k malému poměru signálu k interferencím a šumu SINR (*signal interference and noise ratio*). Technika MIMO kromě diversity umožňuje také realizaci prostorového multiplexu SDMA (*space division multiple access*), kde soustava vysílacích antén simultánně vysílá též na nosných vlnách se stejnou frekvencí a v nezvětšeném pásmu, avšak jejich modulační signály jsou vzájemně odlišné. Tím se zvyšuje přenosová kapacita systému, resp. jeho celková přenosová rychlost, což lze využít buď k rychlejšímu přenosu dat jediného zdroje signálu, nebo k realizaci prostorově časového multiplexu STM (*spatial-time multiplexing*) s přenosem signálů více uživatelů. Multiplexní systémy však jsou účinné pouze v prostředí s velkým poměrem SINR.



Obr. 4 a) Klasický systém SISO; b), c), d) systémy s více anténami; e) systém BF s formováním směřového vyzařovacího diagramu; f) kombinovaný systém, kde vysílací diverzitu zajišťují vzdálená anténní pole a formování svazku BF realizují bloky AE s blízkými anténní elementy

Třetí kategorii systémů s více anténami představují systémy s řízenými anténními svazky BF (*beam forming*), které se však často uvažují jen jako podskupina prostorové diversity SD (obr. 4e). Tyto systémy využívají ve vysílači Tx, nebo v přijímači Rx více antén, které prostřednictvím řízení fází vysílaných resp. přijímaných signálů slouží k formování kompozitního anténního svazku TxBF/RxBF (*transmitter/receiver-side beam forming*). Jsou-li použity ve vysílači, koncentrují vyzařovanou energii do úzkého svazku zaměřeného na

cílový přijímač. Řízení fází je zde odvozeno z měření intenzity přijímaného signálu v přijímači a následujícího přenosu výsledků měření zpětným kanálem k vysílači. Tím se zvětšuje poměr SINR přijímaného signálu, což zmenšuje chybovost přenosu, nebo alternativně zvyšuje přenosovou rychlost resp. propustnost. Systémy BF lze také využívat k potlačení určitých dominantních zdrojů rušení IRC (*interference rejection combining*). Tato technika se uplatňuje opět při špatných podmínkách šíření, kde zvyšuje malý poměr SINR.

Výše uvedené metody je možné aplikovat nejen samostatně, nýbrž lze je také výhodně kombinovat. Tak například formování svazků lze kombinovat s prostorovým multiplexem resp. diverzitou a tak zvětšit dosah spojení a současně zvýšit multiplexováním datovou rychlost, nebo aplikací diverzity dále zvětšit spolehlivost spojení. Tuto progresivní koncepci realizuje technika pokročilého předkódování (*advanced precoding*). Vytváření uvažovaných kombinovaných koncepcí však naráží na problémy při realizaci vhodných anténních systémů. Technika formování svazků totiž vyžaduje dílčí antény s malou vzájemnou vzdáleností - pod l , které vytvářejí silně korelované dílčí rádiové kanály. Naproti tomu diverzita a multiplex naopak potřebují antény se vzdáleností několika l , jimž pak odpovídají slabě korelované kanály. V současné době však již existuje několik metod řešení daného problému. Jednou z nich jsou inteligentní anténní řady SAA (*smart antenna arrays*), jejichž princip ilustruje obr. 4f. Anténní systém se skládá z několika anténních polí, s velkou vzájemnou vzdáleností cca $10 l$. Ty vyzařují vzájemně nekorelované svazky, zajišťující systému diverzitní, nebo multiplexní zisk. Každé pole je složeno ze dvou nebo více elementárních antén AE, s malou vzájemnou vzdáleností pod hodnotou l a tedy s výrazně korelovanými vyzařovanými svazky, které potom umožňují formování výsledných anténních směrových diagramů.

Činnost systémů MIMO je možné někdy výrazně vylepšit tak, že se v přijímači nepřetržitě měří kvalita rádiového kanálu (poměr SINR) a případně i další jeho parametry, která se potom zpětnovazebním kanálem ve formě informace o stavu kanálu CSI (*channel state information*) předávají na vysílač. Ten na základě toho může pomoci vhodného předkódování dynamicky přizpůsobovat vysílaný signál k okamžitým parametrům rádiového kanálu, což zlepšuje kvalitu přenosu. Systémy MIMO se zpětným kanálem přijímač-vysílač se označují jako systémy s uzavřenou smyčkou CL MIMO (*closed loop MIMO*), systémy bez tohoto kanálu jsou systémy s otevřenou smyčkou OL-MIMO (*open loop MIMO*). U systémů MIMO s časovým duplexem TDD, využívajících stejný frekvenční kanál na obou trasách DL/UL, není však zpětnovazební kanál nutný, neboť informaci CSI lze přímo odvodit z parametrů trasy UL, měřených na základnové stanici (ovšem za předpokladu dostatečně pomalých úniků).

5. Kooperativní rádiová komunikace

Nejrůznější moderní radiokomunikační systémy budou koncipovány tak, aby zaručovaly nejen bezkonfliktní koexistenci, ale aby navíc umožňovaly také vzájemnou kooperaci. Principy kooperativních systémů jsou aktuální v pozemní radiokomunikaci, zejména u buňkových sítí, ale také u systémů digitální televize DVB a rozhlasu DAB apod., kde totiž mohou výrazně zlepšit kvalitu a spolehlivost spojení a zvýšit datové rychlosti. Jejich zavádění do života se proto považuje za významný krok vpřed, následující po systémech MIMO. Konkrétní formy kooperativních systémů jsou velice různorodé. Zde si uvedeme nejprve jako příklad kooperativní systémy s fixními a také mobilními radioreléovými stanicemi RS (*relay stations*). Za nimi potom následuje zmínka o systémech s koordinovaným mnohabodovým vysíláním resp. příjmem COMP (*coordinated multipoint trasmission/reception*) a o kooperativních (distribuovaných) systémech MIMO. Všechny tyto varianty jsou uvažovány v jejich konkrétní aplikaci na buňkové mobilní síti.

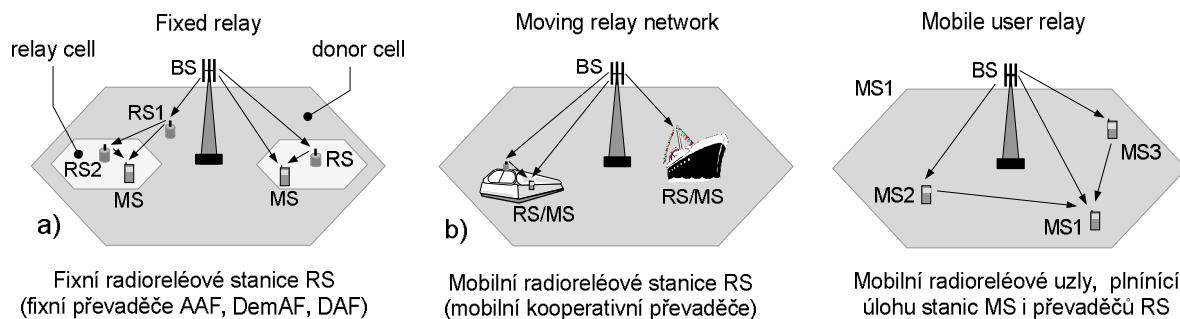
Kooperativní systémy s radioreléovými stanicemi RS

U systémů s radioreléovými stanicemi RS se signály vysílané jejich zdrojem (vysílač DVB, základnová stanice BS apod) dostávají ke své destinaci (přijímač DVB, mobilní stanice MS apod) jednak přímo (single hop), jednak přes jedinou - nebo i více stanic RS (multi hop). Stanice RS mohou být trojího druhu. Nejjednodušší stanice jsou typu AAF (amplify and forward), které vstupní signál pouze nízkošumově zesilují, dále frekvenčně konvertují a po výkonovém zesílení posílají dále. Zpracování signálů se zde realizuje vždy jen ve vysokofrekvenční, nebo v mezifrekvenční oblasti, tedy jen v nejnižší vrstvě L1 modelu OSI RM (L1 relays). Opakovače AAF jsou transparentní pro různé typy modulací, mají malé procesní zpoždění, avšak kromě užitečného signálu zesilují i šum. Dokonalejší radioreléové stanice DMF (demodulate and forward) zpracovávají signál po zesílení demodulují a regenerují, čímž ho zbavují šumu. Nejdokonalejší stanice DCF (decode and forward) signál po demodulaci navíc dekódují, takže jejich činnost zasahuje do vrstev L2 resp. L3 modelu OSI RM (L2/L3 relays). Přijímaný signál mohou pak nejen oprostit od šumu, ale navíc v něm mohou potlačit i vliv úniků.

Radioreléové stanice RS mohou být buď fixní, nebo mobilní. Na obr. 5a je znázorněna aplikace fixních stanic RS v buňkových sítích, kde mohou zlepšit spojení mezi základnovou stanicí BS a mobilními stanicemi MS v oblasti svého omezeného dosahu kdekoli uvnitř celé velké buňky a zejména pak v jejich zastíněných zónách, dále v jejich okrajových oblastech a případně také v izolovaných lokalitách těsně za jejími hranicemi. Stanice MS má při příjmu i případně i při vysílání se stanicí BS spojení vytvářené formou dvou nebo více skoků, po více alespoň částečně nezávislých trasách, takže se do přenosu zavádí prostorová diverzita, zvyšující jeho spolehlivost resp. přenosovou kapacitu.

U kooperativního systému podle obr. 5b jsou reléové stanicemi RS mobilní. Mohou být umístěny např. ve vlaku, kde potom zlepšují spojení v něm se nacházejících uživatelských mobilních stanic MS se stacionárními základnovými stanicemi BS. Mobilní stanice však mohou být také vybaveny rozšířenou „radioreléovou“ funkcí a plnit nejen úlohu mobilního terminálu pro svého uživatele, ale také úlohu reléové stanice pro sousední uživatele (stanice MS1 a MS2), tak jak ukazuje obr. 5c. Tímto způsobem se doplňuje fixní infrastruktura daného systému o pohyblivou „ad hoc“ složku, disponující schopností samoorganizace, s možností přenosu s mnoha skoky („multihop“ režim).

Činnost kooperativních systémů lze zlepšit aplikací distribuovaného kanálového kódování. Na rozdíl od konvenčních kódovacích schémat se zde celé kódové slovo sestavuje tak, že jeho různé segmenty jsou vysílány různými uzly systému po různých nezávislých rádiových trasách. Tím se může dosáhnout výrazného posílení prostorové diverzity a podstatného zvýšení kódového zisku a tedy i celkové přenosové kapacity systému.



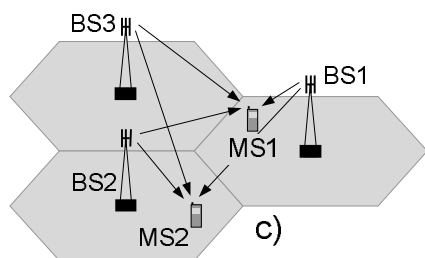
Obr. 5 Kooperativní technika na bázi radioreléových stanic v buňkových sítích: a) fixní radioreléové stanice RS (s reléovými uzly typu AAF/DMF/DCF); b) mobilní radioreléové stanice RS; c) mobilní stanice RS, v nichž funkci reléových uzlů plní mobilní stanice MS

Koordinovaný mnohabodový systém COMP

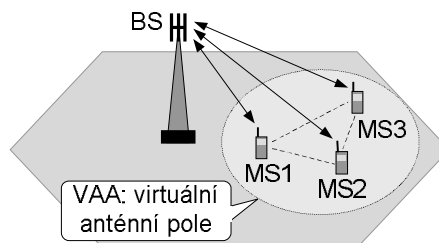
Na obr. 6a je znázorněn příklad systému COMP, se dvěma mobilními stanicemi MS a třemi základnovými stanicemi BS, rozmístěnými ve třech sousedních buňkách. Základem jeho funkce je vzájemné sdílení uživatelských dat a informací o stavu kanálu CSI (channel state information) všech stanic MS, mezi zobrazené sousedící základnové stanice BS, což umožňuje koordinovat jejich vysílání na sestupné trase DL a společně zpracovávat přijímané signály na vzestupné trase UL. Základnové stanice ovšem musí být také vzájemně propojeny pomocnými rychlými rádiovými resp. linkovými spoji. V této koncepci každá stanice MS může přijímat svůj datový signál nikoliv jen od „své“ servisní stanice BS, nýbrž navíc od dalších blízkých stanic BS, což zvyšuje celkovou úroveň S jejího vstupního užitečného signálu. Koordinace funkce uvažovaných tří stanic BS navíc může vést k potlačení přijímaných interferencí I. To tedy zvětšuje výsledný poměr SINR v BS i MS, čímž se zlepšuje celková funkce na okraji buněk, umožňující aplikaci modulací vyšších řádů se zvýšenou spektrální účinností přenosu apod.

Kooperativní virtuální systémy MIMO

Konvenční systémy MIMO, nazývané také soustředěné systémy MIMO, vyžadují, aby vysílače i přijímače byly vybaveny dvěma či více dostatečně vzájemně vzdálenými anténami. Tomuto požadavku mohou snadno vyhovět stacionární rádiové stanice BS s velkými rozměry, avšak u mobilních miniaturních stanic MS je jeho naplnění v praxi často obtížné, a to nejen z důvodů potřebných rozměrů příslušných anténních systémů MIMO, ale i komplikovanější a tedy i dražší implementace apod. Uvedený problém odstraňují kooperativní systémy MIMO, označované také jako virtuální nebo distribuované systémy MIMO, jejichž princip je znázorněn na obr. 6b. Zde jediná základnová stanice BS obsluhuje tři vzájemně si blízké mobilní stanice. Každá z nich má sice jen jedinou svoji anténu, avšak tyto antény resp. stanice jsou vzájemně rostřednictvím stanice BS propojeny, takže mohou pracovat v koordinovaném režimu a vytvářet tak virtuální anténní pole VAA (virtual antenna array). Jelikož dílčí mobilní stanice MS mají obvykle dostatečné vzájemné vzdálenosti ($\text{cca} \geq 10 \lambda$), vytvářejí jejich antény s anténami základnové stanice nekorelované kanály, takže komunikace mezi základnovou stanicí a všemi mobilními stanicemi si v souhrnu zachovává všechny kladné atributy systémů MIMO. V multiplexním režimu všechny mobilní stanice daného pole mohou tedy své individuální uživatelské signály přenášet ve společném nerozšířeném pásmu (stejném jako ekvivalentní systém SISO). To potom vytváří velký multiplexní zisk resp. velké zvýšení kapacity celého systému oproti jednouzivatelskému systému SU-MIMO (single-user MIMO).



Koordinovaný mnohabodový přenos COMP
(koordinované vysílání z více BS k jediné MS)



Virtuální distribuovaný systém MIMO, kde každá
mobilní stanice vystačí s jedinou anténou

Obr. 6 Další varianty kooperativních systémů v buňkových sítích: a) koordinovaný mnohabodový přenos COMP, kde stanice MS1 komunikuje jak se svou servisní stanicí BS1, tak také se stanicemi BS2/BS3; b) virtuální systém MIMO, kterému vystačí k individuální komunikaci tří mobilních stanic nezvětšené pásmo, vyžadované jediným systémem SISO

6. Nové technologie: softwarové a kognitivní rádio

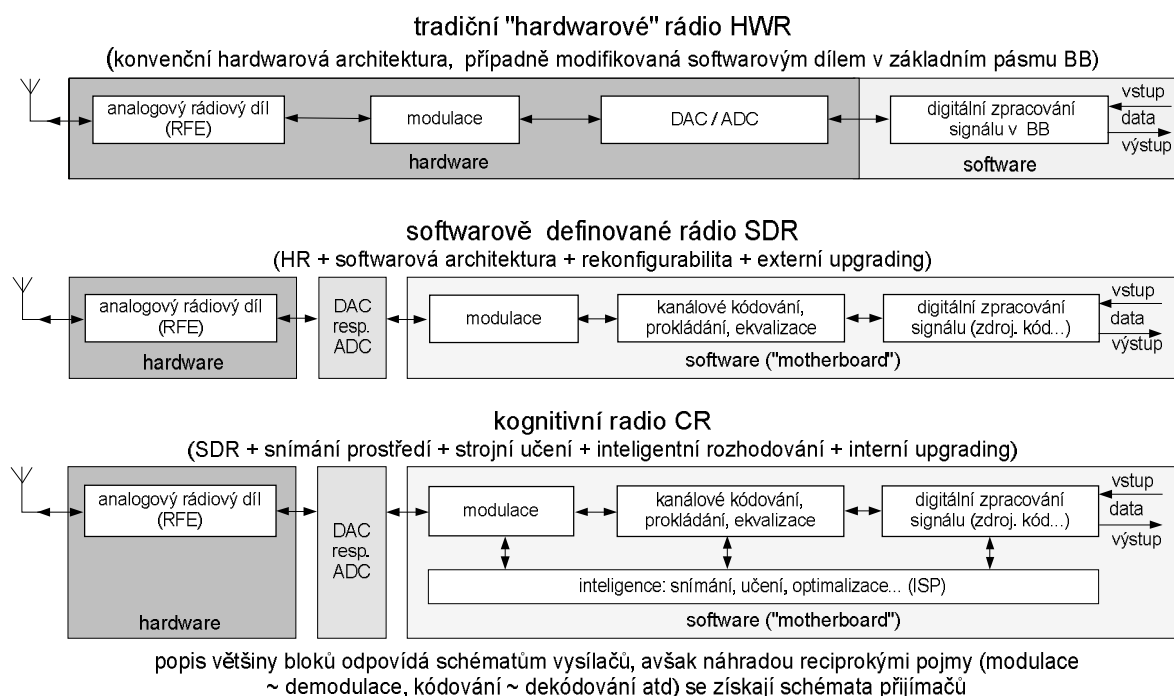
Od svých počátků až do současnosti prochází technika a systémové koncepte rádiových zařízení čtyřmi etapami své historie, které byly určovány vývojem technologie a také pokroky v oblasti teoretického výzkumu i zkušenostmi z praxe. Tyto etapy jsou shrnuty v následujících čtyřech bodech. K jejich podrobnější ilustraci je určen obr. 7, který platí jak pro vysílací, tak pro přijímací stranu.

1. Hardwarové rádio (HWR): technologie rádiového přístupu (pracovní frekvence, typ modulace a kódování,...) jsou určeny hardwarem, nastaveným obvykle již při kompletaci daného zařízení při výrobě a nelze je dodatečně měnit bez hardwarových změn. Zařízení HWR jsou typická hlavně pro éru vakuových elektronek.

2. Digitální rádio (DR): rádiový přenos a případně část zpracování signálu ve vysílači nebo v přijímači (obvykle v základním pásmu) se realizují v digitální podobě, tyto operace však není možné během provozu programovat. Tato koncepce se objevuje s nástupem monolitických integrovaných obvodů, od sedmdesátých let min. st.

3. Softwarově definované rádio (SDR): většina funkcí, pracovní módy a aplikace jsou definovány softwarově, přičemž mohou být konfigurovány a rekonfigurovány za provozu (*on the fly*), technikou OTA (*over the air*). Je zde určitá možnost externího upgradu (přechod na nové typy modulací ap). Principy rádia SDR se začínají formulovat po roce 1995, jeho systematický rozvoj začíná ustavením Fóra SDRF v roce 1996.

4. Kognitivní rádio (CR): je v podstatě softwarové rádio SDR doplněné o umělou inteligenci, které je schopné snímat parametry okolního rádiového prostředí (signály jiných vysílačů, interference apod), tyto parametry vyhodnocovat a na základě toho adaptivně měnit pracovní frekvence i techniku svého rádiového přenosu tak, aby bylo dosaženo všestranně optimální činnosti (požadované kvality služeb QoS, maxima přenosové kapacity, náležité robustnosti přenosu ap). Radio CR je určeno hlavně sekundárním uživatelům rádiového spektra, kteří nemají přidělena žádná licencovaná pásma a svou komunikaci musí proto realizovat v nelicencovaných pásmech ISM (industrial, scientific and medical) a dalších.

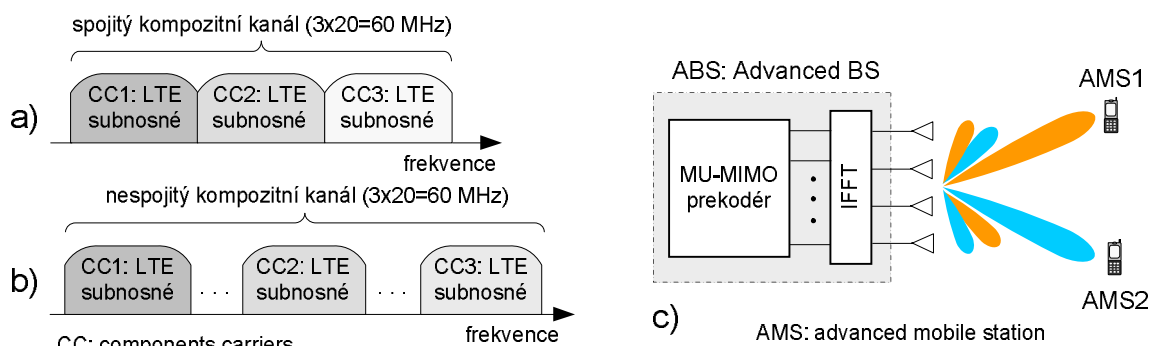


Obr. 7 Tři základní koncepty radiokomunikačních systémů: a) hardwarové rádio HWR, do něhož po nástupu integrovaných obvodů pronikají metody digitálního softwarového procesingu; b) softwarově definované rádio SDR; c) kognitivní rádio CR, vybudované na bázi softwarově definovaného rádia SDR

Softwarové rádio a na ně navazující kognitivní rádio jsou nové perspektivní metody rádiového přenosu, které během příštích let zcela změní techniku celé řady odvětví rádiové komunikace. Jejich aplikace umožní především výrazné zvýšení efektivity ve využívání nedostatkových rádiových pásem, dále přispěje k podstatnému rozšíření sortimentu a ke zlepšení kvality poskytovaných služeb a takélepší interoperabilitu rozdílných radiokomunikačních systémů. Jejich nasazení do praxe přinese užitek výrobcům příslušných technologií, provozovatelům služeb, ale i koncovým uživatelům. Regulačním orgánům značně zjednoduší dnes již zastaralou metodiku složitého a nepružného frekvenčního plánování.

7. Buňkový systém mobilní komunikace LTE/LTE-A

V předchozím desetiletí probíhaly v rámci evropského projektu 3GPP (*third generation partnership project*) výzkumné práce na buňkovém systému pozemní mobilní komunikace LTE/SAE (*long term evolution/system architecture evolution*). V současné době se intenzivně vyvíjí jeho poslední verze LTE-Advanced/SAE, která se řadí do nejnovější. 4. generace (4G) veřejných mobilních sítí. Tento systém využívá řadu výše uvedených poznatků.



Obr. 8 a) Sdružování sousedících dílčích pásem subnosných vln CA (*carrier aggregation*); b) sdružování oddělených pásem subnosných vln; c) systém MU-MIMO, selektivně směřující vyzařování základnové stanice na dvě mobilní stanice AMS1 a AMS2

Základním atributem standardů LTE/LTE-A je použití přístupu OFDMA. Dalším jejich závažným přínosem je možnost sdružování několika dosavadních maximálních šířek pásma 20 MHz specifikovaných u LTE, do jediného kompozitního širšího pásma, a to až do maxima $5 \times 20 \text{ MHz} = 100 \text{ MHz}$ (obr. 8a). Podstatně se zde zdokonaluje také technika více antén MIMO, kde se plánuje na trase DL konfigurace až 8×8 MIMO a na trase UL až 4×4 MIMO. To poskytuje např. při výsledné šířce pásma 40 MHz a technice 8×8 MIMO na trase DL špičkové datové rychlosti až 1 Gbit/s a na trase UL 0,5 Gbit/s, které již odpovídají požadavkům na standardy 4G (připomeňme, že uvedené hodnoty jsou o více než dva řády větší, než u standardu UMTS (3G) v jeho první fázi těsně po roce 2000, kde totiž na trase DL byla špičková rychlost pouhé 2 Mbit/s). Technika MIMO je aplikována i v řadě dalších progresivních variant, značených E-MIMO (*enhanced MIMO*). Jako příklad je na obr. 8b znázorněn mnohoživatelský systém MU-MIMO (*multiuser MIMO*), využívající formování vyzařovacích svazků BF k jejich zaměření na dvě mobilní cílové stanice AMS1 a AMS2. Jeho funkce vyžaduje zpětnou vazbu mezi stanicemi AMS a stanicí ABS, jež je ovšem u buňkových sítí automaticky k dispozici.

Zlepšení parametrů systému LTE-A podporuje rovněž koncepce rozšiřování stávající fixní infrastruktury o nové radioreléové stanice (uzly) RS, působící mezi mobilními stanicemi a základnovými stanicemi. Tímto opatřením (*relaying*) se zvětšuje hustota infrastruktury celého

systému, což vede ke zvyšování poměrů SINR. To se dále projeví ve vykrytí zastíněných resp. hluchých zón a v možnosti případného rozšíření pokrytí do dosud nepokrytých venkovských oblastí. Technika radioreléových stanic může být ovšem úspěšně využita i u jiných systémů pozemní radiokomunikace, včetně televizních soustav DVB-T apod.

Literatura

- [1] Žalud, V.: Digitální televize a digitální rozhlas - současnost a perspektivy. In Perspektivy elektroniky. SŠIEŘ, Rožnov p. R., 2009.
- [2] Li, Q. a kol.: MIMO Technique in WiMAX and LTE: A Feature Overview. In IEEE Com. Mag., May 2010, str. 86 – 92.
- [3] Irmer, R. a kol.: Coordinated Multipoint: Concepts, Performance, and Field Trial Results. In IEEE Comm. Magazine, Febr. 2011, str. 102 – 110.
- [4] Introduction LTE Advanced. Application Note. In Agilent Technologies, Inc. 2010.