

Pokroky ve vývoji mobilních systémů 5G

From electrons via waves to clouds

*Doc. Ing. Václav Žalud, CSc.
Katedra radioelektroniky
FEL, ČVUT v Praze*

Prolog: časový vývoj mobilní komunikace

Systémy veřejné celoplošné pozemní mobilní rádiové komunikace, založené na buňkových strukturách, se vyvíjejí v časových etapách o době trvání zhruba 10 let, jež se označují jako generace. V současné době vchází rychle do života jejich čtvrtá generace (4G), a to v podobě celosvětového standardu LTE (Long Term Evolution) resp. LTE-A. Avšak přední světové průmyslové, akademické i další výzkumné instituce prakticky současně s tím již intenzivně připravují následující generaci pátou (5G), a proto je nutné se touto progresivní technikou zabývat. Dále si uvedeme alespoň některé základní informace o tomto významném projektu ze světa radiokomunikací, jehož nástup se očekává okolo let 2018 až 2020.

generace:	1G (1980)	2G (1990)	3G (2000)	4G (2010)	5G (2020)
přístup:	FDMA	TDMA	CDMA	OFDM	NX
standardy:	NMT, AMPS...	GSM, IS 54...	HSPA...	LTE	(5GNOW...)

1980

1990

2000

2010

2020

content communications

předcelulární
éra

pouze řeč
(analog. systém)

řeč
(data)

řeč + SMS
(paket. data)

řeč, data,
video

řeč, multimedia
rychlá data:
1 Gb/s; Δt : 10 ms

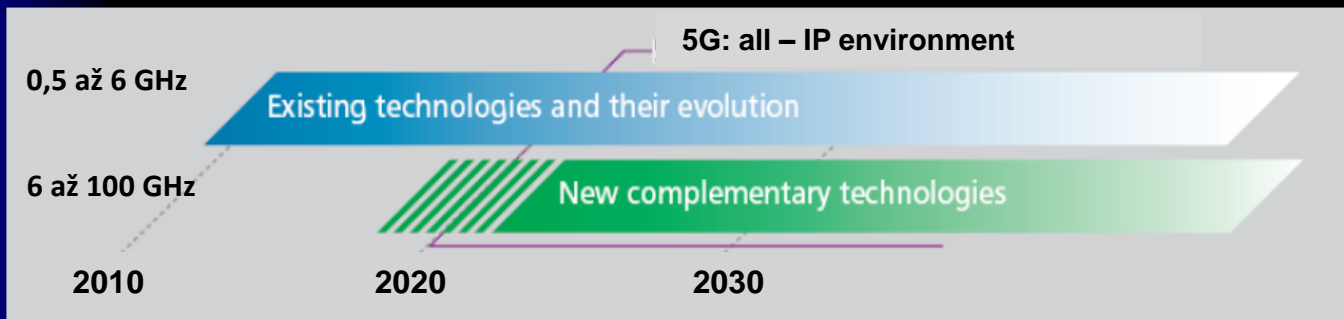
řeč; multimedia; rychlá data (HSI): 10 Gb/s

komunikace M2M (IoT; WSN..): $\Delta t \leq 1$ ms

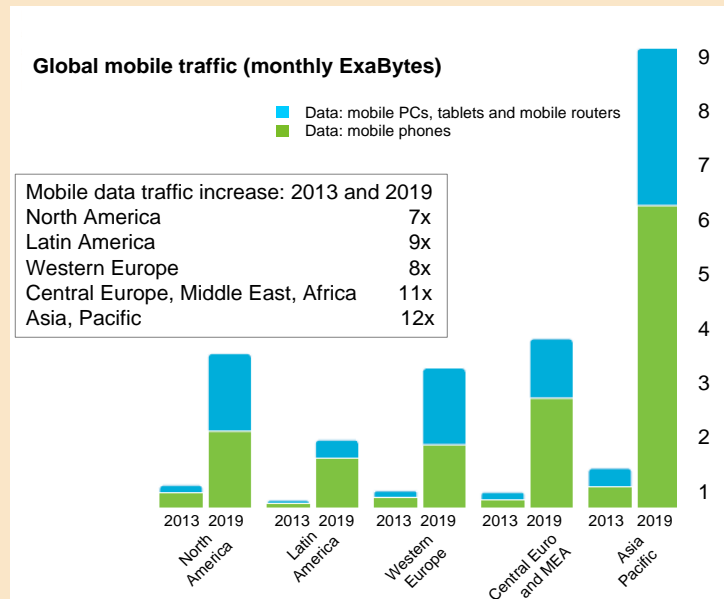
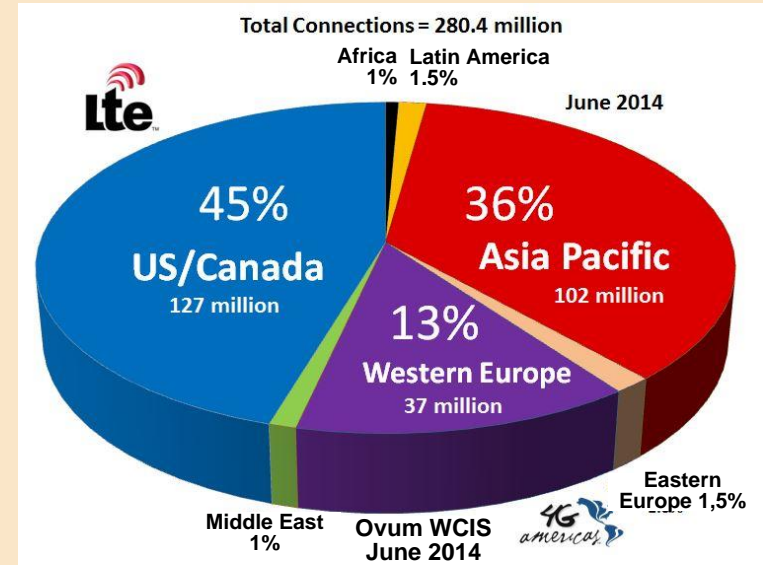
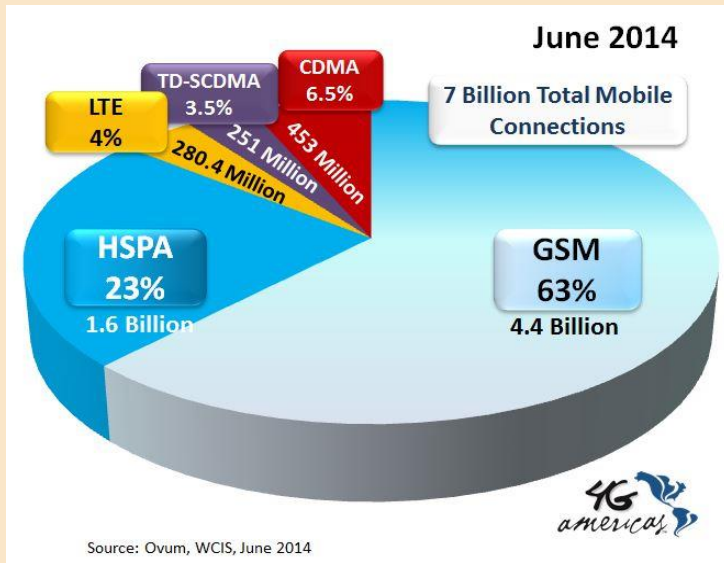
voice centric

data centric

steering&control: M2M-IoT



Penetrace systému LTE v letech 2013 až 2019



By the end of last year, LTE penetration had already reached over 30 percent in Japan and over 50 percent in South Korea - the highest in the all world. By 2019, number of LTE subscriptions will be 2.6 billion. By that time population coverage in Europe will only see an LTE subscription penetration of 30 percent compared to 85 percent in North America. One of the main reasons for the difference is the availability of faster 3G networks across Europe, which offers speeds that simply are and will continue to be good enough for many users.

Huawei and NTT conduct 5G radio access field trials (Info: October 2015)

Chinese networking hardware and services supplier Huawei and Japan's largest mobile services provider, NTT Docomo, have successfully conducted an outdoor field trial of 5G radio access technology in Chengdu, China.

During the trial, the partners used multi-user **multiple input multiple output (MU-MIMO)** technology, with a concurrent connectivity of 24 devices in the macro-cell environment on the sub-6GHz frequency band. The cell average downlink throughput of MU-MIMO is over 10 times as fast as single-layer single-user MIMO technology.

It also validated the performance of two 5G **new air interface technologies**: Sparse code multiple access (**SCMA**) – previously demonstrated in controlled conditions at the University of Surrey's 5G Centre in Guildford; and filtered orthogonal frequency-division multiplex (**F-OFDM**).

As part of the trial, Huawei also live-streamed video of the activity to its booth at the Combined Exhibition of Advanced Technologies (Ceatec) Japan 2015 trade show in Chiba, Japan, where it showed off a 5G SU-MIMO prototype operating on 200MHz bandwidth of sub-6GHz spectrum with a peak rate reaching 10Gbps.

MU-MIMO, F-OFDM and SCMA are expected to be very important to enabling the higher-spectrum efficiency that will be needed to enhance **mobile broadband, and enabling machine-to-machine (M2M) and mission-critical communications** across 5G networks when they are finally deployed between five and 10 years from now.

Huawei said the trial was a key step towards accelerating the standardisation and commercialisation of 5G mobile networks.

Některé aplikace buňkových sítí budoucí páté generace

What 5G is about



Domotics is the new electronic technologies intended to assist in organising domestic life

Entertainment
Apps beyond imagination

H2H: Human applications (H2H):

1. Mobile telephony
2. Mobile multimedia (mobile TV...)
3. Mobile data (High speed Internet...)

M2M (MTC) applications:

1. Massive MTC: wireless sensor networks, ...
2. Critical MTC: very short transmission time, ...

The next generation of communication systems, as pursued in 5G, will be the first instance of a truly converged network environment where wired and wireless communications will use the same infrastructure, driving the future networked society. It will provide virtually ubiquitous, ultra-high bandwidth, "connectivity" not only to individual users but also to connected objects. Therefore, it is expected that the future 5G infrastructure will serve a wide range of applications and sectors including professional uses (assisted driving, eHealth, energy management, possibly safety applications, etc).

Internet věcí (IoT: Internet of Things)

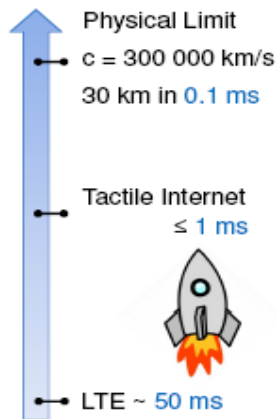
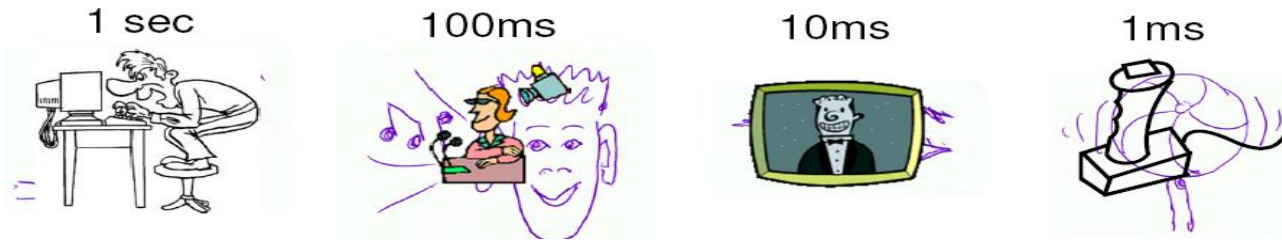
The Internet of Things (IoT) is the network of physical objects or "things" embedded with electronics, software, sensors, and network connectivity, which enables these objects to collect and exchange data. The Internet of Things allows objects to be sensed and controlled remotely across existing network infrastructure, creating opportunities for more direct integration between the physical world and computer-based systems, and resulting in improved efficiency, accuracy and economic benefit. Each thing is uniquely identifiable through its embedded computing system but is able to interoperate within the existing The term "Internet of Things" was coined by British entrepreneur Kevin Ashton in 1999. Typically, IoT is expected to offer advanced connectivity of devices, systems, and services that goes beyond machine-to-machine communications (M2M) and covers a variety of protocols, domains, and applications. The interconnection of these embedded devices (including smart objects), is expected to usher in automation in nearly all fields, while also enabling advanced applications like a Smart Grid,¹ and expanding to the areas such as smart cities.

"Things," in the IoT sense, can refer to a wide variety of devices such as heart monitoring implants, biochip transponders on farm animals, electric clams in coastal waters, automobiles with built-in sensors, or field operation devices that assist firefighters in search and rescue operations. These devices collect useful data with the help of various existing technologies and then autonomously flow the data between other devices.¹ Current market examples include smart thermostat systems and washer/dryers that use Wi-Fi for remote monitoring.

Besides the plethora of new application areas for Internet connected automation to expand into, IoT is also expected to generate large amounts of data from diverse locations that is aggregated very quickly, thereby increasing the need to better index, store and process such data.

Pohotový Internet (Tactile Internet)

Dané možnosti lidských smyslů vyžadují pohotový (tactile) Internet, s latencí menší než 1 milisekunda, kterou poskytují až systémy 5G



How to get there

- Small frames /TTIs
- Fast hardware (22nm)
- Realtime protocols & RRM
- Realtime operating systems
- Optimized routing

i-Flight



Crash to impact:
10-15ms

- Crash sensor
- Trigger
- Air bag

Wireless Airbags

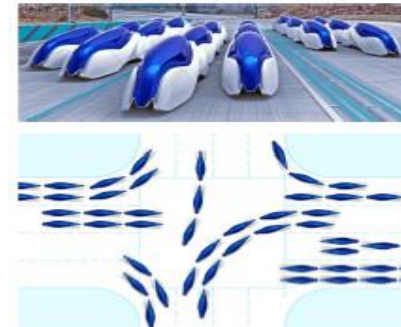


Today's urban Traffic



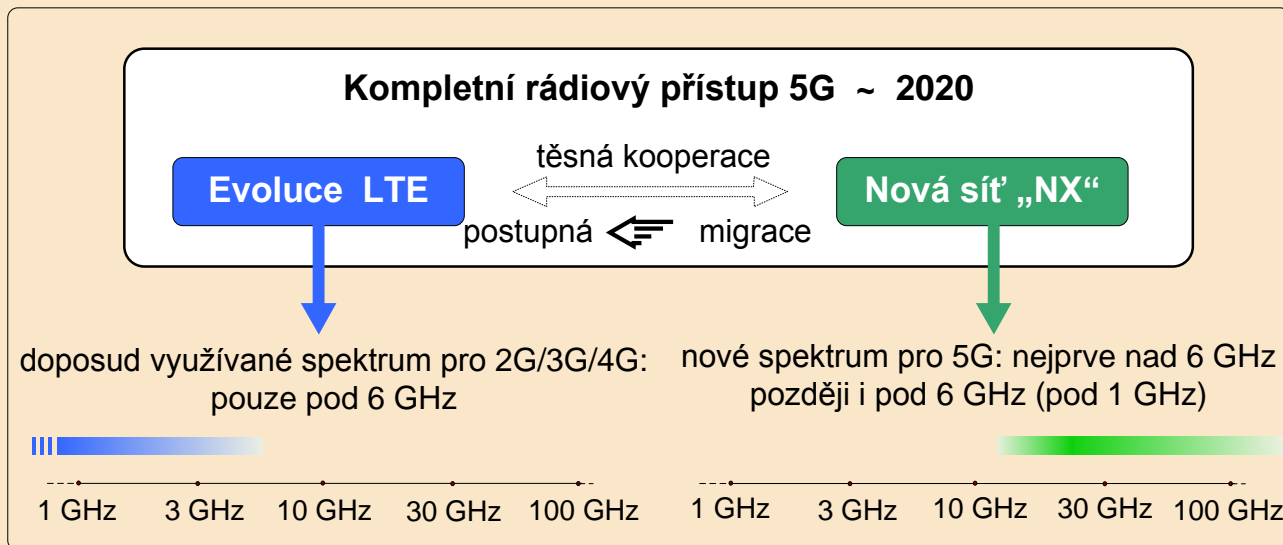
Example: Urban Traffic at Arc de Triomphe

Future Vision



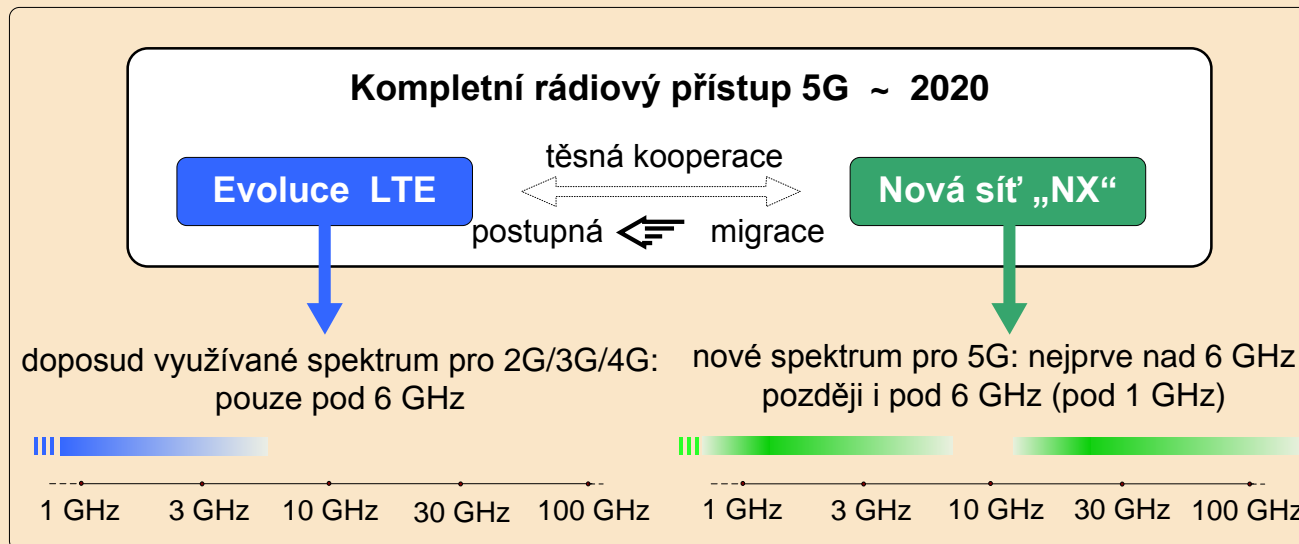
Traffic / Sports / Education / Health&Care / Manufacturing / Games / Smart Grid..

Frekvenční management současné čtvrté a budoucí páté generace



- Rádiový přístup v systému 5G bude realizován jednak pomocí neustále se zdokonalující sítě LTE v konvenčních pásmech do cca 6 GHz, jednak zcela novou sítí „NX“, využívající spíše vyšší pásma, včetně milimetrové oblasti ($f = 30$ až 300 GHz, tj. $\lambda = 1$ cm až 1 mm).
- Pásma do 6 GHz budou oproti nynějšímu stavu významně obohacena o další značně široké úseky; aktuální je zejména pásmo v okolí 700 MHz, které se uvolní v důsledku digitalizace tv vysílání. V těchto pásmech budou nabízeny především dosavadní personální služby H2H (Human to Human) tj. přenos hovoru, videa, tv programů a multimédií a rychlých dat.
- Nový přístup NX se zaměří na nové segmenty spektra, které systém LTE zatím nevyužíval. Velký důraz však bude kladen hlavně na perspektivní milimetrová pásma, a to nejprve zhruba do 100 GHz a později až do 300 GHz. V nich se bude provozovat nejen konvenční mobilní komunikace (content communication), ale i celá řada nových aplikací, zejména ze sféry masivní komunikace M2M (control communication, steering).

Frekvenční management současné čtvrté a budoucí páté generace



- Rádiový přístup v systému 5G bude realizován jednak pomocí neustále se zdokonalující sítě LTE v konvenčních pásmech do cca 6 GHz, jednak zcela novou sítí „NX“, využívající spíše vyšší pásma, včetně milimetrové oblasti ($f = 30$ až 300 GHz, tj. $\lambda = 1$ cm až 1 mm).
- Pásma do 6 GHz budou oproti nynějšímu stavu významně obohacena o další značně široké úseky; aktuální je zejména pásmo v okolí 700 MHz, které se uvolní v důsledku digitalizace tv vysílání. V těchto pásmech budou nabízeny především dosavadní personální služby H2H (Human to Human) tj. přenos hovoru, videa, tv programů a multimédií a rychlých dat.
- Nový přístup NX se zaměří na nové segmenty spektra, které systém LTE zatím nevyužíval. Velký důraz však bude kladen hlavně na perspektivní milimetrová pásma, a to nejprve zhruba do 100 GHz a později až do 300 GHz. V nich se bude provozovat nejen konvenční mobilní komunikace (content communication), ale i celá řada nových aplikací, zejména ze sféry masivní komunikace M2M (control communication, steering).

Nové úseky spektra v pásmech mobilní komunikace 4G (do 5 GHz)

Jednou z cest vedoucích ke zvyšování datové rychlosti mobilních sítí je získání nových segmentů spektra, dosud přidělených jiným službám, které je však mohou bez větších problémů postrádat. Podle přípravných materiálů ke konferenci WRC'15 začne mobilní komunikace v rámci požadavků IMT nejspíše využívat – alespoň částečně - s blížícím se rokem 2020, následující čtyři nová pásma (new IMT-bands):

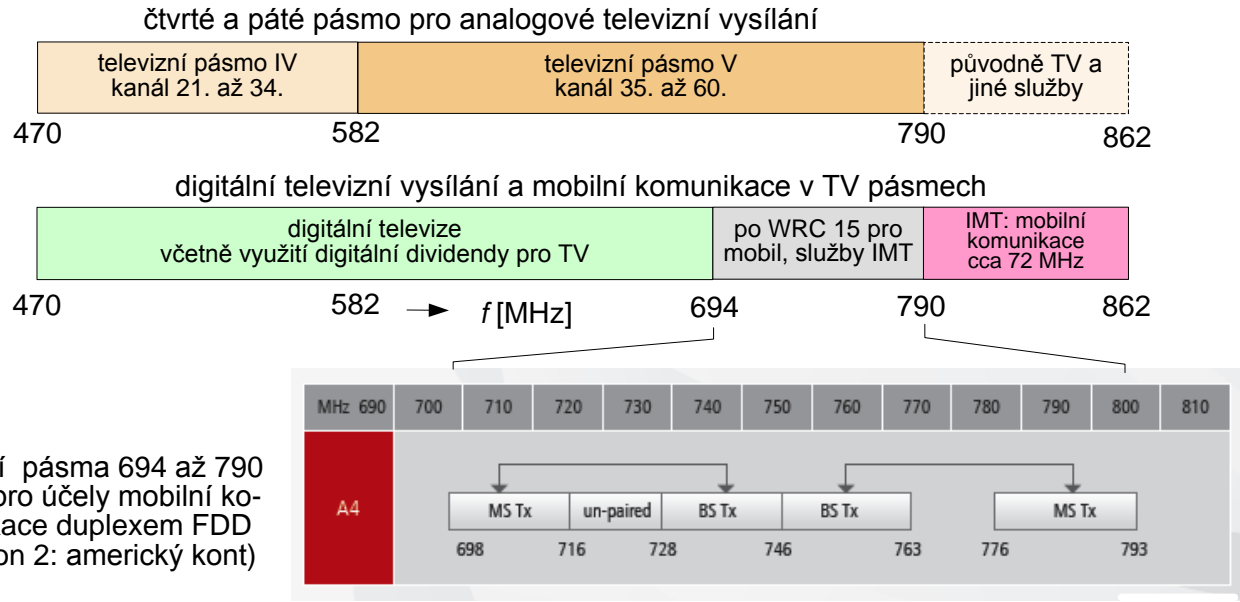
- **700 MHz** (694 až 790) (subpásma UHF): je uvolňováno televizí v důsledku jejího přechodu na digitální vysílání; díky kvalitnímu celoplošnému pokrytí je pro mobilní komunikaci zvláště užitečné. Podle názoru četných televizních odborníků by však mělo být pásmo 700 MHz pro televizi zachováno, neboť bude nutné při budoucím zdokonalování televizních standardů, od nichž se bude neustále vyžadovat zvyšování kvality televizního obrazu i zvuku.
- **1 350 až 1 525 MHz** (pásmo L): bylo dosud přidělené fixním spojům, rozhlasu DRM, vědecké instrumentaci apod., u nichž je ale málo využíváno.
- **2,7 až 2,9 GHz** (pásmo S): dosud slouží hlavně radarovým systémům (pro řízení letového provozu apod), jež ho ale v důsledku technického pokroku mohou uvolnit.
- **3,6 až 4,9 GHz** (pásmo C) slouží hlavně družicovým službám, pro něž však bude technicky možný přesun do jiných frekvenčních oblastí.

Uvedená pásma poskytnou mobilní komunikaci cca 600 až 800 MHz nového frekvenčního prostoru. To je hodnota srovnatelná s dosavadními pásmy systémů veřejné mobilní komunikace, což svědčí o velkém významu, který mobilní komunikaci mezinárodní standardizační orgány přisuzují.

Koexistence digitální televize (DVB-T) a mobilní komunikace v TV pásmech

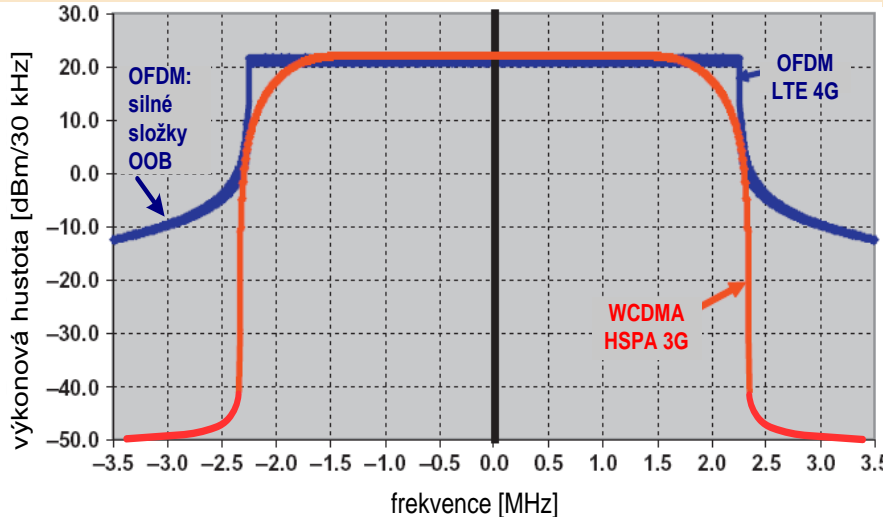
Jednou z hlavních výhod nových služeb je bez většího začne m následující

- 700 MHz přechodu komunikace mělo být zdokonaleno zvyšování kvality televizního obrazu i zvuku.

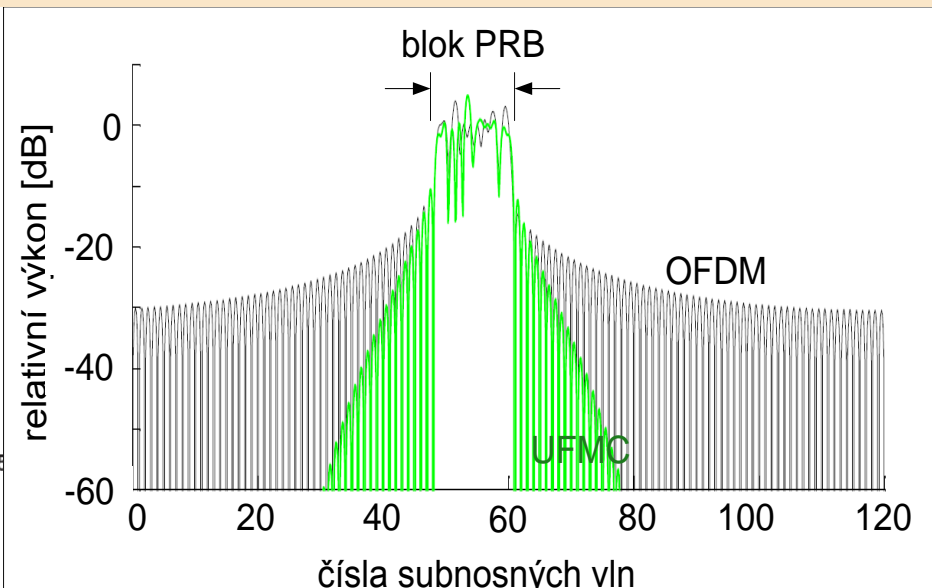


je získání však mohou WRC'15 okem 2020

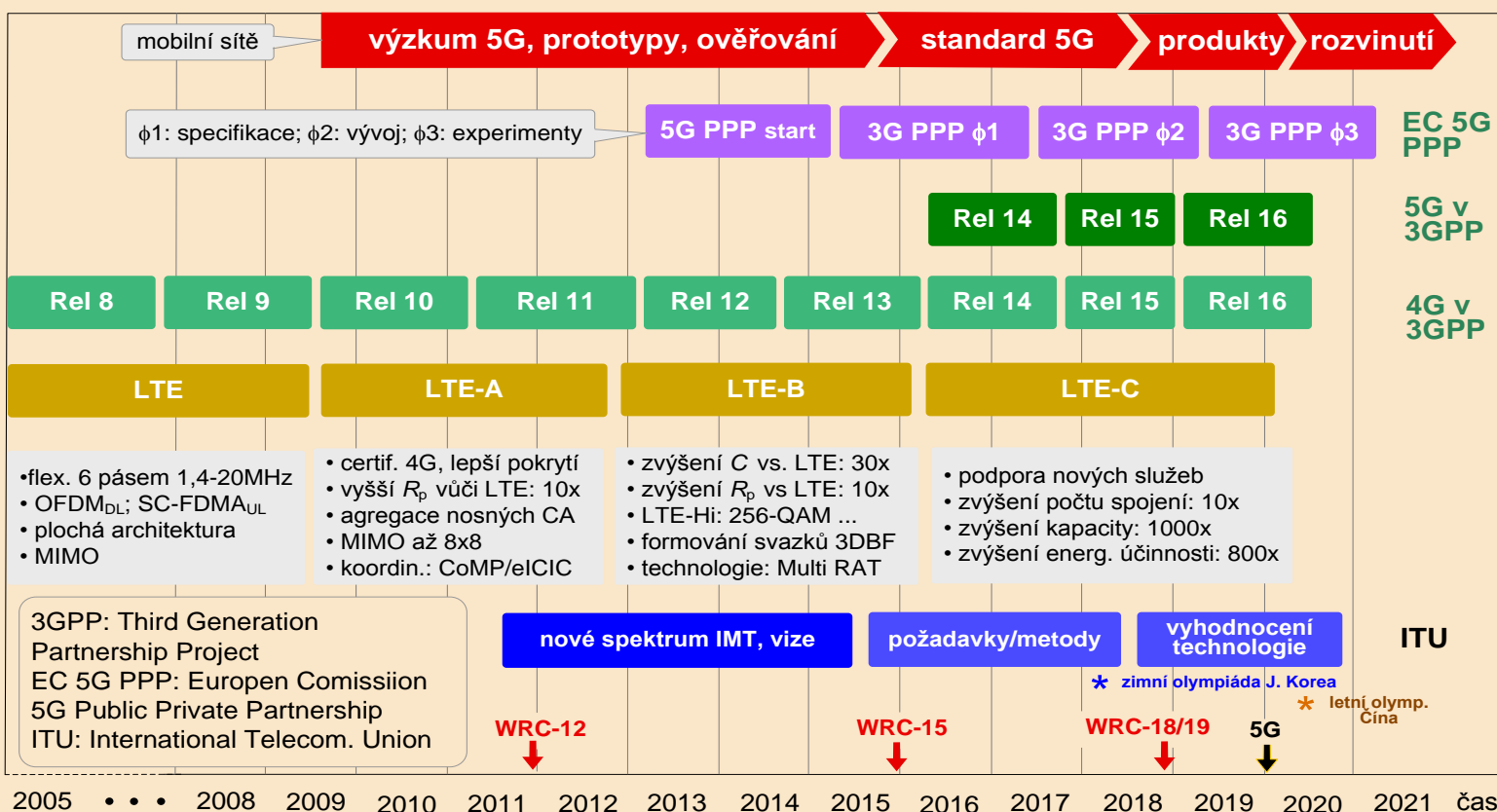
ledku jejího pro mobilní ků by však i budoucím vyžadovat



Porovnání spektra formátu W CDMA (HSPA/3G) a formátu OFDM (LTE/4G); spektrum OFDM má silné postranní složky (out-off band radiation), které mohou rušit jiné služby



Etapy vývoje buňkových sítí současné čtvrté a budoucí páté generace



Vývoj veřejné pozemní mobilní komunika (PLMN) koordinují tři hlavní hlavní mezinárodní instituce:

- Od r. 1998 je to v oblasti přístupové sítě LTE/4G a nyní i sítě NX/5G Partnerský projekt pro třetí generaci 3GPP (Third Generation Partnership Project). Ten člení vývoj do Release (Vydání), resp. do vývojových etap LTE, LTE-A, LTE-B a LTE-C.
- Druhým orgánem je evropské Společenství 5G PPP (5G Public Private Partnership), vzniklé až v r. 2013 a zaměřené už jen na síť NX/5G. V něm je aktuální vývoj rozvržen do tzv. fází ($\phi 1$, $\phi 2$, $\phi 3$).
- Celkový vývoj ve světě mobilních komunikací potom řídí Mezinárodní telekomunikační únie ITU-R
- IMT (Internation. Mobile Telecommunications) je společný název pro systémy 3G (IMT-2000) a 4G (IMT-A); IMT-2000 definuje soustavu požadavků pro systémy 3G; podobně IMT-A stanoví požadavky pro systémy 4G (např. špičkovou datovou rychlost 600 Mbit/s na DL a 270 Mbit/s na UL, v agregovaném pásmu 40 MHz ap,)

System 4G: současný vývoj v rámci Rel 13: HSPA+ a LTE-A/B

V prosinci r. 2014 bylo v rámci 3GPP finalizováno Rel 12. Na získané výsledky navazuje v současnosti Rel 13, které bude uzavřeno v březnu r. 2016. Pro síť LTE přináší následující inovace:

Zdokonalení anténního procesingu: bude spočívat v rozvoji aktivních anténních systémů AAA, v elevačním formování svazků EBF a v plně dimenzionální technice MIMO (FD MIMO)

Další rozvoj koordinačních technik (COMP): rozvoj koordinačních mechanismů, jež snižují interference mezi zákl. stanicemi eNB (inter-eNB CoMP) a tím zlepšují pokrytí a propustnost sítě

Veřejná bezpečnost: zlepšení přímé komunikace terminálů D2D a techniky PTT (push-to-talk)...

Komunikace strojového typu (MTC/M2M): nástup nových MTC terminálů a technik (DECOR...)

Licencovaný asistovaný přístup (LAA) a agregace nosných (CA): LAA umožní funkci LTE v bezlicenčních pásmech, agregace CA (LTE Wi-Fi Aggregation) ulehčí kooperaci sítí WiFi a LTE.

Určování vnitřní polohy: nárůst podílu vnitřní komunikace podněcuje techniku IL: indoor location

Kontrola zahlcení a management: rostoucí provoz zvyšuje v mobilních sítích nebezpečí jejich zahlcení, jemuž lze čelit zavedením principů prioritizace resp. restrikce některých aplikací apod.

Služby: v rámci Rel 13 se zdokonaluje služba eMBMS (TV přes mobil) a zavádí se řada nových služeb; významné jsou zejména obohacené hlasové služby (EVS) pro síť UMTS s přepojováním okruhů (CS), využívající nový audio kodek, zajišťující při rychlosti 9,6 kbit/s „superširokopásmové audio“ a také kompatibilitu se sítěmi VoIP. V rámci Rel 13 se dále vylepšuje též síť HSPA+ (3G). Urychluje se v ní rozvoj komunikace MTC, podporují se techniky úspornější signalizace aj.

Závěry

V rámci Rel 13/3GPP se v současné době intenzívně zdokonaluje systém LTE-A/B, který je a bude vedoucí širokopásmovou mobilní technologií až do nástupu 5. generace mobilních sítí po roce 2020. Stále se ale vyvíjí i systém předchozí 3. generace UMTS/HSPA+, který v současné době kulminuje a stále prokazuje, že je pro podstatnou část světové populace stále atraktivní.

System 5G: obecné charakteristiky a nové technologie

Hlavní rysy rádiových komunikačních systémů 5G ve srovnání se systémy 4G

Charakteristické provozní vlastnosti:

- Výrazné zdokonalení dosavadních služeb: přenosu hlasu, videa a dat ($DL_{max} \approx 10$ Gbit/s)
- Nová pervasivní 3D multimédia, televize HDTV/UHDV, řeč VoIP, služby e-Health,
- Nové služby s extrémně nízkou latencí ($UP... \leq 1$ ms) : Internet věcí IoT a Tactile Internet
- Nové služby s extrémní spolehlivostí: bezpečnost dopravy, rychlé zdravotní služby...
- Podstatně prodloužená životnost napájecích akumulátorů (u terminálů M2M až 10 roků)
- Nižší pořizovací cena i nižší provozní náklady fixní infrastruktury i mobilních terminálů
- Vyšší buňková kapacita pro mnoho simultánních uživatelů, a to v licencovaných i v nelicencovaných úsecích spektra (vyplývající z konvergence buňkových systémů a WiFi)

Nové technologie

- Přejít k heterogenním buňkovým sítím, s podporou mobile cloud computingu
- Densifikace sítě: nové body TP: mikro...femto buňky, antény DAS, relé FRN/MRN, M2M/D2D...
- Virtualizace sítí: „všechno jako služba EaaS (Everything as a Service)“
- Nástup nových typů modulací a technik rádiového přístupu (beyond OFDM)
- Technika plného duplexu FDX (s potlačením vlastních interferencí SIC)
- Osvojení pásma milimetrových vln (3 až 100...300 GHz)
- Energeticky velmi úsporný návrh
- Systémy mnoha antén: diverzita, formování svazků a „masívní MIMO“...
- Vícenásobná konektivita uživatelských stanic
- Komunikace strojového typu MTC/M2M: Internet věcí (IoT), pohotový Internet (tactile Internet)

Vybrané aktuální nové technologie systému 5G

Osvojení pásem milimetrových vln: k dosažení extrémně vysoké individuální datové rychlosti a kapacity systému 5G, si musí síť NX osvojit milimetrová pásma. Kvadratický nárůst útlumu rádiového kanálu s frekvencí lze kompenzovat pomocí vysílacích antén s velkým ziskem. U většiny typů mikrovlnných antén zisk při jejich neměnných rozměrech totiž naopak s kvadrátem frekvence roste, čímž se vyrovnává zvětšující se útlum kanálu na frekvenci. Rapidnímu zvětšování útlumu kanálu s jeho rostoucí délkou lze čelit využitím mm pásem jen při malých vzdálenostech vysílač přijímač, tedy u velmi malých buněk, o průměru pod cca 100 m.

Energeticky velmi úsporný návrh (ultralean design): spočívá v tom, že se minimalizuje vysílání všech signálů, které nejsou přímo spojeny s přenosem uživatelských dat. To jsou např. signály sloužící k synchronizaci, vstupu do sítě, odhadu kanálu ap, které není často nutné vysílat trvale, nýbrž jen na vyžádání. Omezení rádiového provozu nejen redukuje interference, ale nabízí i významnou možnost nastavení síťových vysílacích uzlů do režimu nízké spotřeby („sleep“).

Systémy mnoha antén MAS (multiple antenna systems): antény se syntetickou aperturou, složené z více dílčích antén s fázově řízeným napájením, mají velký zisk a tedy i směrovost, přičemž jejich úzké vyzařované svazky lze elektronicky směřovat. Systémy masívní MIMO užívají v základnových stanicích BS antény tohoto typu s několika stovkami dílčích antén, což jim dovoluje vyčlenit cca 10 i více antén na jednu mobilní stanici MS a tu potom automaticky sledovat i při jejím pohybu. Tím se značně zvětší energetická i spektrální účinnost celého systému.

Vícenásobná konektivita MPC (multipoint/multisite connectivity): je současná komunikace MS s více stanicemi BS, reléovými uzly ap., zajišťující vysokou jakost spojení při pohybu MS mezi buňkami; ve spojení s technikou distribuované MIMO dovoluje též přenos více datových signálů.

Komunikace strojového typu MTC (M2M): komunikace MTC je typická velkým celkovým množstvím terminálů MTC, které často přenášejí jen velmi malé objemy dat, avšak musí být v činnosti po řadu let bez výměny napájecích zdrojů. Systémy MTC se dělí na systémy masového charakteru (rádiové senzorové sítě WSN ap) a na systémy kritické na latenci přenosu (sport...)

Vybrané aktuální nové technologie systému 5G: souhrn

Millimeter Wave Cellular Networks (?)
mmW are convenient at very small cells only
and in alliance with high gain antennas only

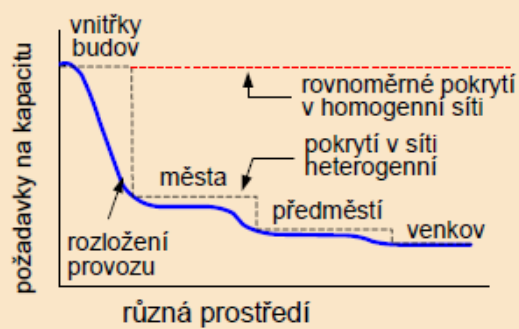
Ultra – lean Design
to only be active and transmit when needed
to only be active and transmit where needed

Multiple Antenna Systems (MAS)
Rx/Tx diversity increases the received SNR
Rx/Tx diversity reduces amounts of fading
spatial multiplexing increases the data rate
beamsteering increase coverage of the cell

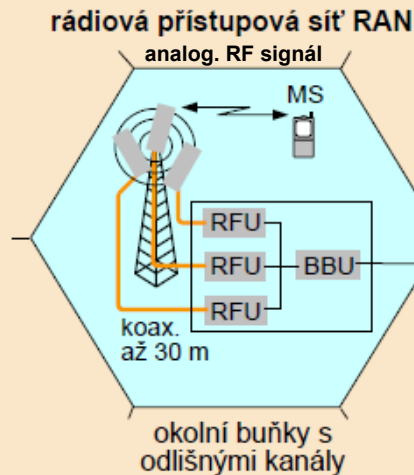
Multipoint Connectivity (MPC)
MPC improve quality and reliability connection
as mobile devices moves between some cells

Machine Type Communication (MTC/M2M)
MTC is comm. between different devices and
CN, that include little (no) humans interaction
security and health systems, navigation, educ.

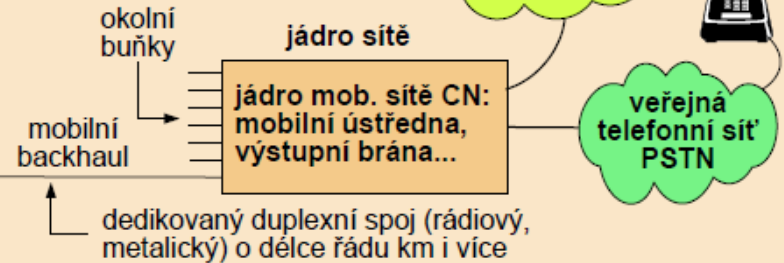
Vývoj buňkových koncepcí od homogenních k heterogenním



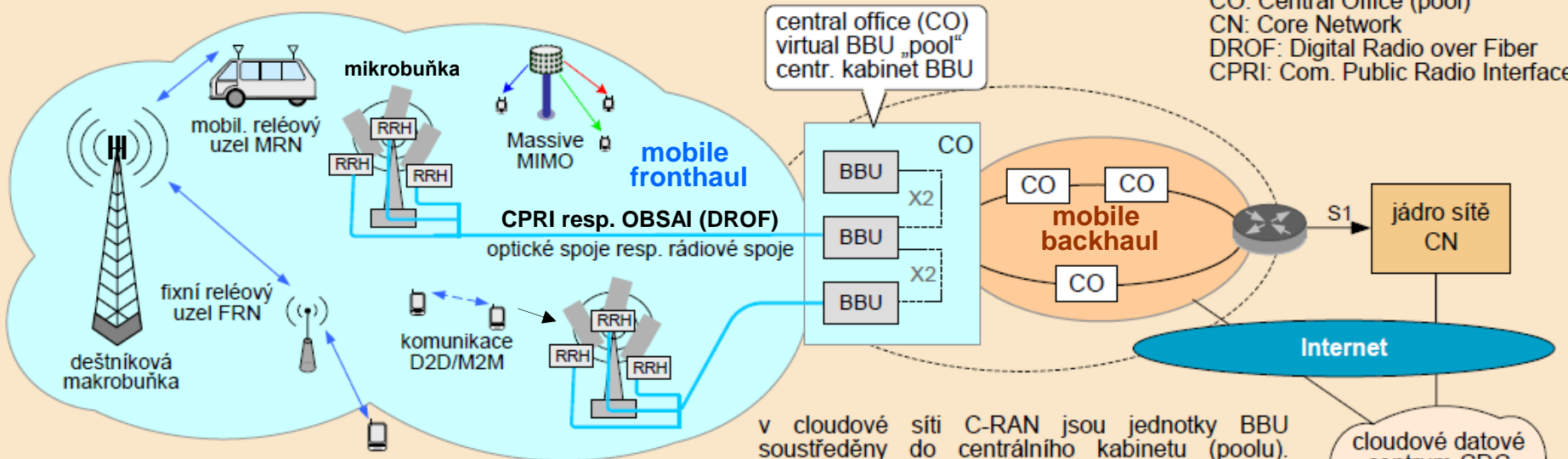
k usnadnění koordinace mezi makrobuňkami a mikrobuňkami se v systému 5G zavede flexibilní separace a koordinace uživatelské roviny UP (user plane) a kontrolní roviny CP (control plane), označovaná jako softwarově definované síťování



Homogenní buňková síť jen zhruba stejné velké buňky



- RFU: Radio Frequency Unit
- BBU: Base Band Unit
- MS: Mobile Station
- RRH: Remote Radio Head
- BBU: Base Band Unit
- CO: Central Office (pool)
- CN: Core Network
- DROF: Digital Radio over Fiber
- CPRI: Com. Public Radio Interface

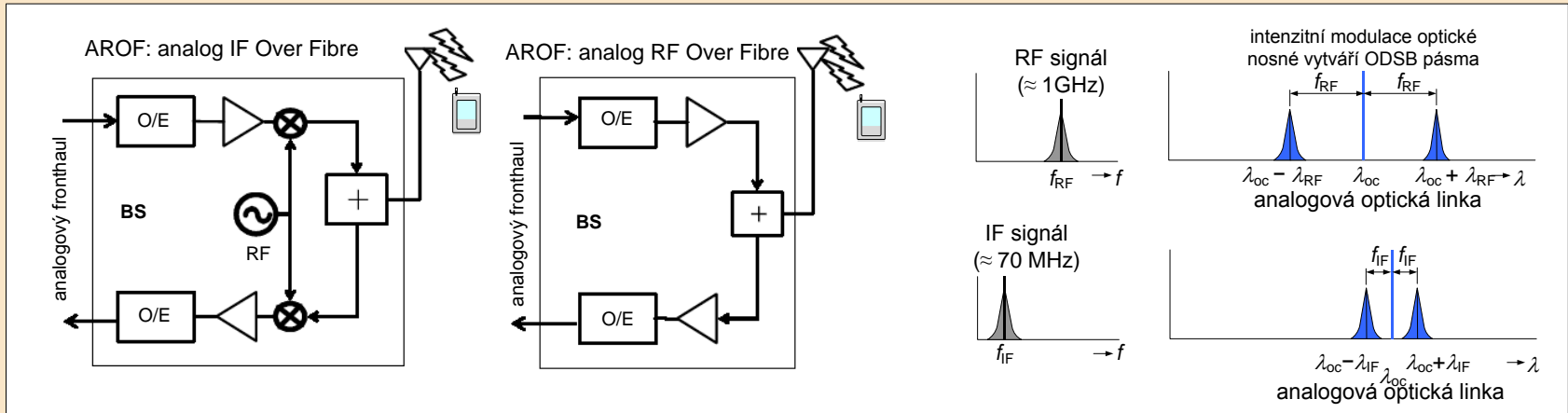


v cloudové síti C-RAN jsou jednotky BBU soustředěny do centrálního kabinetu (poolu). Náročné početní operace se realizují ve vzdáleném cloudovém datovém centru CDC; HW platforma je oddělena od softwaru SF

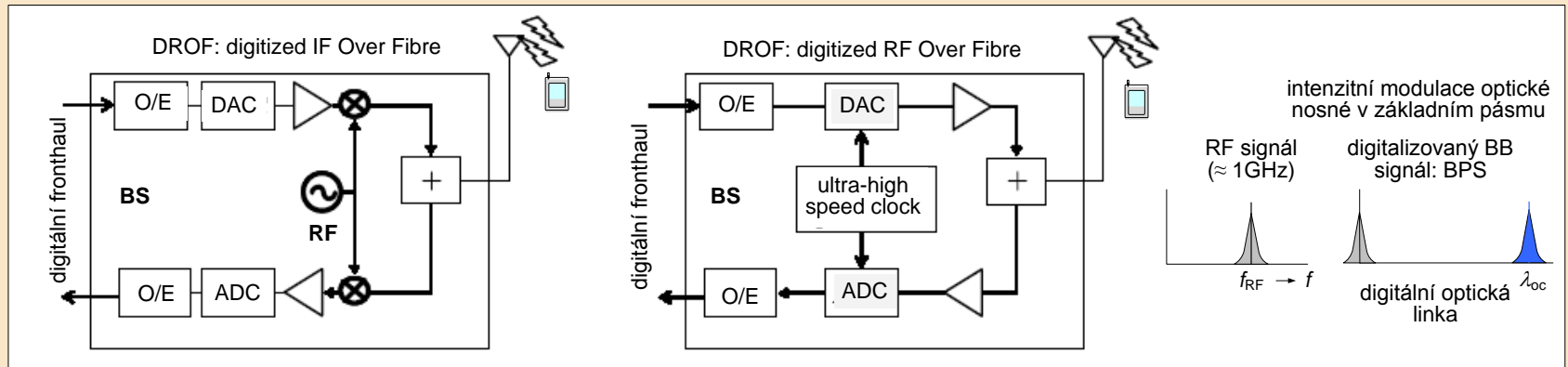
Technologie MCC zajišťuje bezešvou komunikaci s podporou velmi výkonného mobilního cloud computingu MCC, a to mezi mobilními uživateli (cloud-mobile users) a koncovými uživateli (cl. providers), bez ohledu na heterogenitu moderních mobilních sítí (multi RAT)

Přehled analogových a digitálních koncepcí AROF a DROF

Rádiově-optický přenos ROF využívá extrémní šířky pásma optických spojů a velké nevyužité segmenty rádiového spektra v mikrovlnné a v milimetrové oblasti, k přenosu rádiových signálů v síti fronthaul. Tato technika nabízí vysokou datovou rychlost a propustnost, při minimálním časovém zpoždění přenosu. Přenos rádiových (RF) signálů s podporou optických spojů ROF (Radio Over Fiber) řeší dvě různé koncepce:

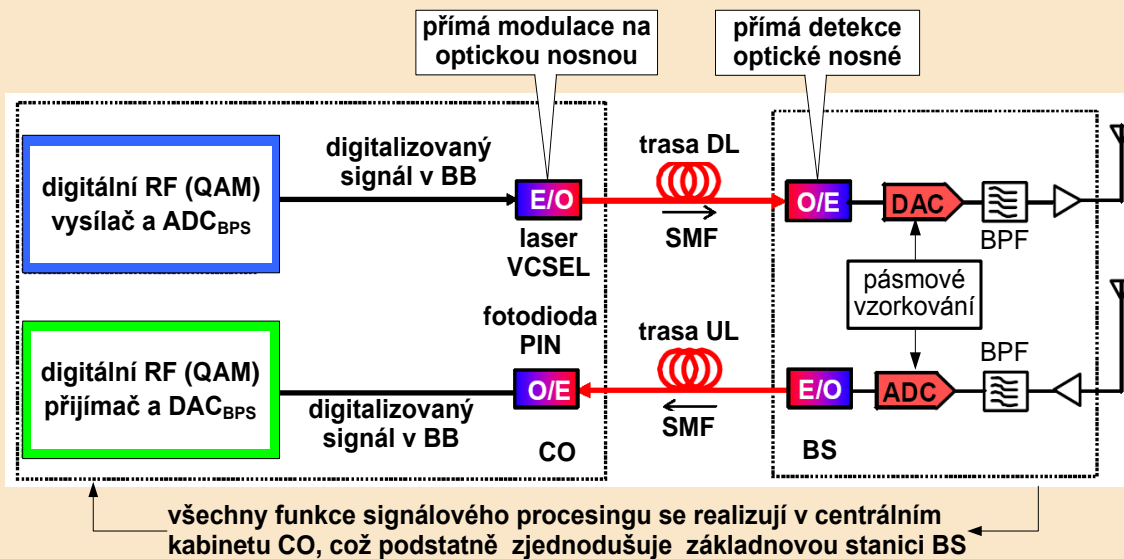


- **Analogová technika AROF** (Analogue ROF), tj. přímý přenos analogových signálů ve vysokofrekvenčním (RF), nebo v mezifrekvenčním (IF) pásmu, intenzitně modulovaných na optickou nosnou vlnu (formát IM-DD)

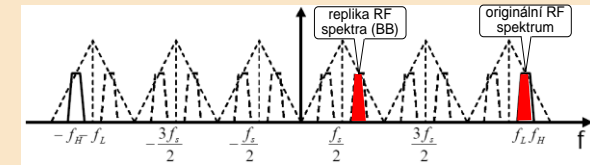


- **Digitální technika v základním pásmu BDRF** (Baseband DROF), tj. přenos RF signálů digitalizovaných a převedených při použití pásmového vzorkování do základního pásma BB a jejich přenos robustním digitálním optickým spojem (BPS / IM-DD).

Digitalizovaný hybridní opticko-elektrický přenos DROF



pásmové vzorkování RF signálů



oboustranné frekvenční spektrum RF signálu ležícího v pásmu f_L až f_H , po pásmovém vzorkování BPS frekvencí f_s . Spektrum má více shodných replik (Nyquist zone), rozložených souměrně kolem lichých násobků frekvence $f_s/2$, které se při vhodné volbě f_s nepřekrývají. Repliky leží pod RF pásmem, tudíž BPS lze užít ke konverzi frekvence dolů (prakticky do BB)

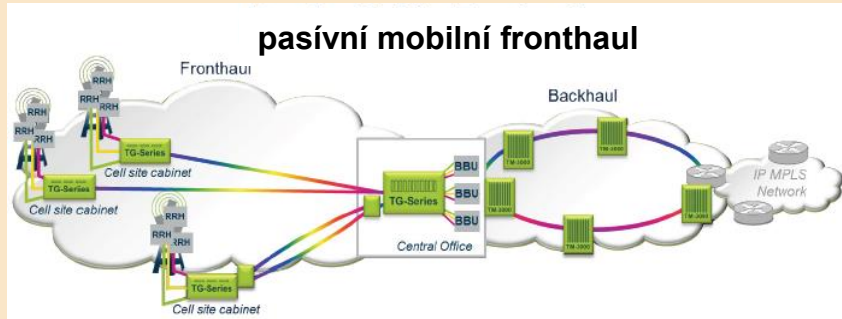
Analogové koncepce AROF vyžadují náročnou elektroniku na straně CO, nebo BS a vyžadují vysokou linearitu RF i optických elementů a velký dynamický rozsah optické linky, přenášející analogový signál.

Zdokonalená koncepce přenosu DROF (Digitized Radio-Over-Fiber) uvedené slabiny potlačuje. Ve vysílači je datový signál v BB nejprve namodulován např. formátem M-QAM na RF nosnou, s frekvencí f_{RF} , rovnající se frekvenci nosné signálu vysílaného ze základnové stanice BS. Tento analogový signál je v převodníku ADC digitalizován. Při velmi vysoké frekvenci nosné, v porovnání s modulací, je aplikováno **pásmové vzorkování BPS**, vystačující s nízkou vzorkovací frekvencí f_s . Digitalizovaný signál v BB je v E/O konvertoru modulován na optickou nosnou a poté přenášen optickou linkou. Tato koncepce má následující přednosti:

- Náročný digitální procesing (digitální funkce vysílače a přijímače apod.) lze soustředit do robustního CO
- Digitální optickou linku lze realizovat intenzitní modulací ve vysílači a přímou detekcí v přijímači (IM-DD)
- Digitální přenos je imunní vůči nelinearitám optické linky a dynamický rozsah systému nezávisí na její délce
- Použití pásmového vzorkování BPS v převodníku ADC vysílače transformuje RF signál do nízkých pásem (viz obr. vpravo) a v převodníku DAC přijímače se naopak signál překládá do vysílaného RF pásma. Tím se eliminuje přídatná frekvenční konverze (potřeba směšovačů, náročných LO atd), čímž se zjednodušuje architektura BS.

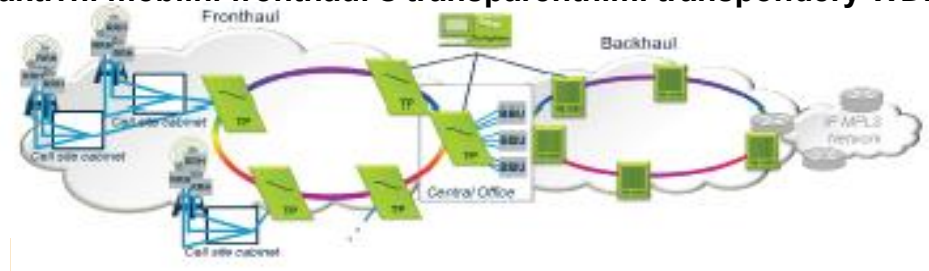
Pasívní a aktivní optické sítě fronthaul v rozhraní CPRI, kombinovaná síť fronthaul/backhaul

pasívní mobilní fronthaul



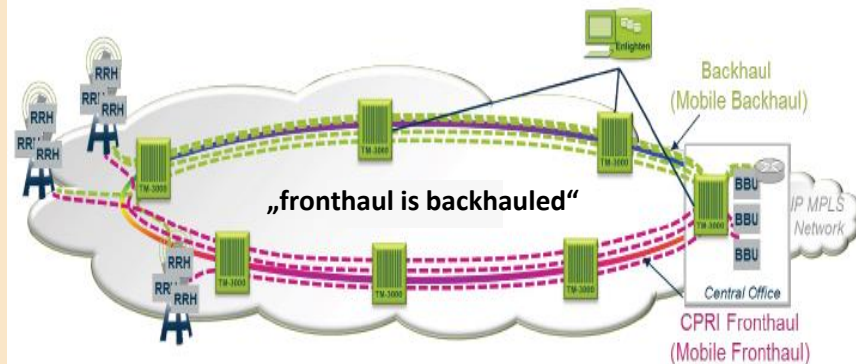
Pasívní mobilní fronthaul: aplikuje pasívní optické sítě PON s vlnovým multiplexem WDM (resp. CWDM nebo DWDM), se vyznačuje jednoduchostí a nízkou, nebo dokonce nulovou spotřebou elektrické energie. Je vhodný zejména pro lokality s malými buňkami a intenzivním provozem

aktivní mobilní fronthaul s transparentními transpondéry WDM



Aktivní mobilní fronthaul: využívá aktivní vlnový multiplex WDM, což umožňuje překlenutí větších vzdáleností mezi uzly fronthaulu; aktivní WDM také přináší výrazné zdokonalení dalších parametrů, zejména nízkou latenci přenosu, zdokonalenou synchronizaci, možnost ochranného kódování FEC atd.

Integrovaná síť použitá pro mobilní fronthaul a současně pro mobilní backhaul



U buňkových sítí aplikujících optické spoje je možné spojit mobilní fronthaul a mobilní backhaul do jediné integrované optické sítě. To pak přináší synergetické zlepšení celkové funkce buňkového systému, které se navíc projeví v redukci investičních i provozních nákladů (CAPEX/OPEX) .

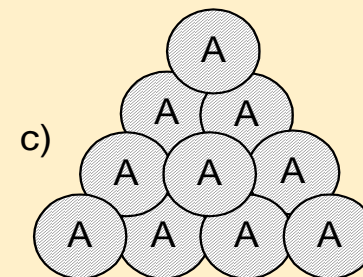
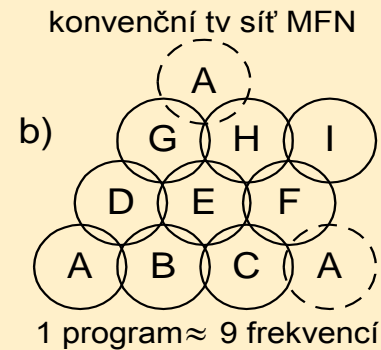
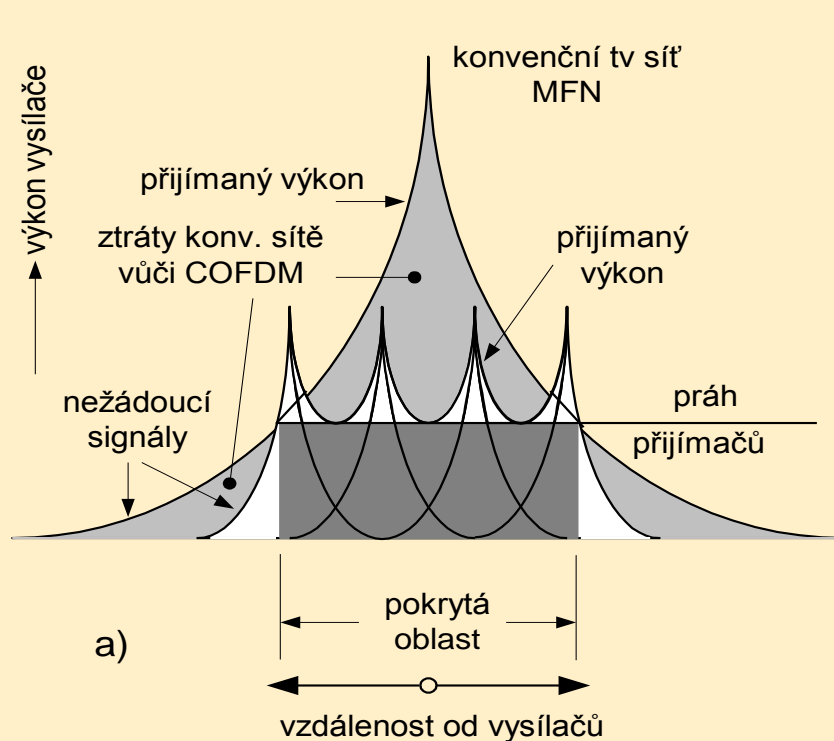
U klasických buňkových sítí s rádiovou přístupovou sítí RAN a s jejím propojením pomocí rádiového backhaultu s jádrem sítě CN, je možné integraci obou komunikačních složek rovněž realizovat. V obou sítích lze potom aplikovat stejná pásma, což vede k mnohem efektivnějšímu využití frekvenčního spektra. V milimetrových pásmech je však nutné u sítě backhaul využívat - podobně jako u sítě fronthaul - nejen obvyklé mm linky LOS, ale i linky NLOS.

Přenos televizních signálů v mobilních sítích (eMBMS)

Televize provozovaná v mobilních sítích využívá tzv. obohacenou multimediální rozhlasovou a multikastovou službu eMBMS (enhanced Multimedia Broadcast Multicast Service). Ta zajišťuje především distribuci televizních programů, která má oproti klasické televizi závažné přednosti:

- 1. Dokonalá mobilita:** služba eMBMS v síti LTE poskytuje uživatelským terminálům UT dokonalou mobilitu, která je výsledkem dlouhého vývoje tohoto mechanismu v mobilních sítích
- 2. Zpětný kanál:** mobilní sítě disponují díky plně duplexnímu provozu dokonalým zpětným kanálem, který je spolehlivý, rychlý a vykazuje malou latenci.
- 3. Různorodé terminály:** signál LTE lze přijímat různými typy uživatelských terminálů (UT) (smartphony, tablety apod.), jež se mohou lépe přizpůsobit konkrétním příjmovým scénářům, než klasický tv přijímač, většinou vyžadující venkovní anténu, nebo kabelový rozvod.
- 4. Multicast, broadcast:** kromě obvyklého „rozhlasového“ vysílání (broadcast) určeného bez zvláštních poplatků komukoliv, může služba eMBMS realizovat vysílání multikastové pro určité okruhy uživatelů, nebo i vysílání simulcastové pro jediného uživatele, a to v dokonalém interaktivním režimu. Uvedené funkce může systém dle potřeby dynamicky přepínat.
- 5. Monofrekvenční síť SFN:** technika eMBMS může s výhodou využívat koncepci monofrekvenčních sítí SFN (Single Frequency Network), v nichž tentýž televizní program je vysílán z mnoha základnových stanic BS s malými výkony. Uživatelský terminál potom obvykle přijímá a konstruktivně skládá signál přicházející z několika nejbližších sousedních stanic BS, což výrazně zvýší kvalitu příjmu v zastíněných lokalitách, uvnitř budov a na okrajích buněk. Sítě SFN v souhrnu navíc vykazují, oproti klasické koncepci výkonných TV vysílačů, mnohem vyšší celkovou spektrální i energetickou účinnost. Sítě SFN jsou velmi dobře slučitelné s eMBMS, neboť mobilní sítě mají propracovanou heterogenní strukturu, techniku přepínání ap.
- 6. Masívní působení:** počet mobilních terminálů s vlastní anténou je podstatně vyšší, než počet běžných TV přijímačů s klasickou fixní nástřešní anténou, takže působnost televizního vysílání na populaci se zavedením služby eMBMS podstatně rozšíří.

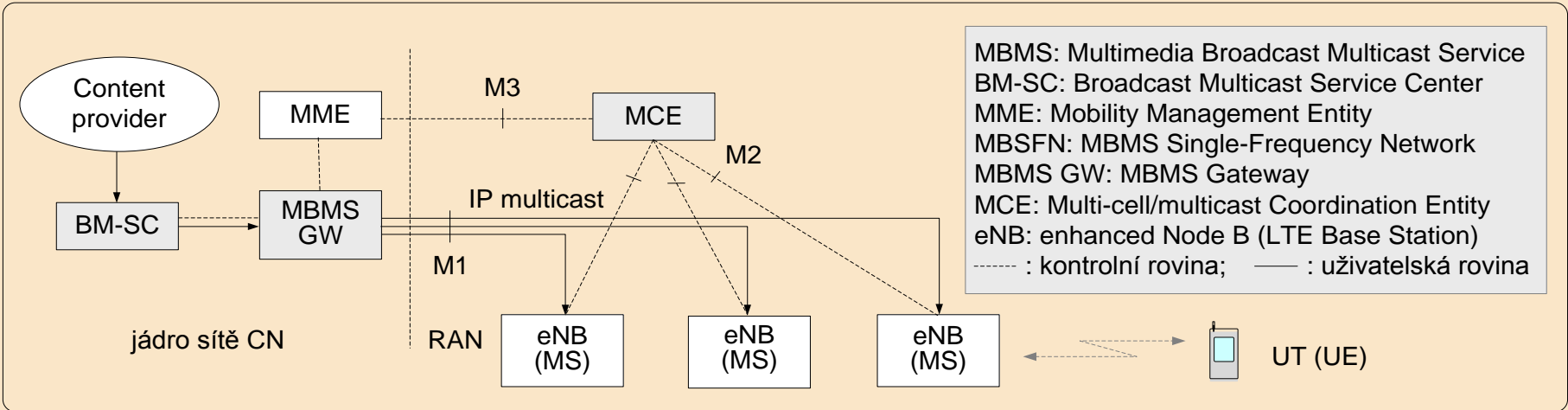
Monofrekvenční síť televize DVB-T



1 multiplex COFDM = 1 frekvence
(4...8... TV programů, více rozhlas.
programů, data...)

a) Využití vysílacího výkonu u konvenčních vysílačů a v sítích SFN; b) frekvenční plánování pro konvenční analogové nebo digitální vysílací sítě; c) monofrekvenční síť COFDM/SFN s vysokou spektrální účinností

Realizace přenosu televizních signálů v mobilních sítích



Na obrázku je znázorněno technické řešení služby MBMS na principech SFN v síti LTE. Jádru sítě CN je zde doplněno o dva bloky. Centrum BM-SC zodpovídá za autorizaci a autentizaci kontentů dodávaných poskytovatelem služeb, dále za tarifování a za celkovou konfiguraci datového toku, procházejícího jádrem sítě CN. Brána MBMS GW je logický uzel, zpracovávající IP pakety přicházející z BM-SC ke všem základnovým stanicím eNB (eNodeB), zahrnutým do přenosu v určité oblasti MBSFN. Zajišťuje také přenos signalizace přes uzel managementu mobility MME. Aplikace služby MBMS na principech SFN v síti LTE vyžaduje, aby v každé participující buňce byly pro určitou službu k dispozici stejné soubory rádiových zdrojů. Potřebnou koordinaci zde řídí entita MCE. To je logický uzel v síti RAN, zajišťující alokaci rádiových zdrojů a dalších přenosových parametrů napříč všemi buňkami v dané oblasti MBSFN.

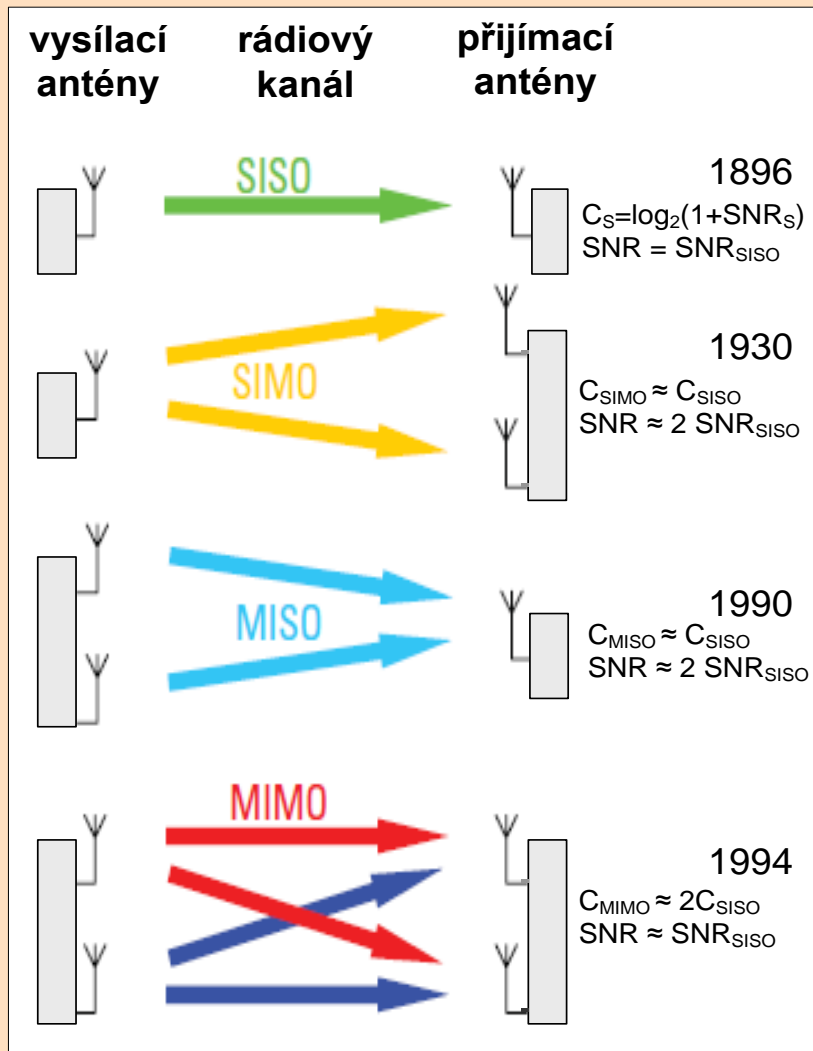
Souprava R&S pro kompletní testování služby eMBMS v síti LTE

The R&S®CMW500 is the first test instrument in the world to boast an integrated BM-SC service layer, with the result that it can be used to completely **test all LTE eMBMS features** on both the signaling and IP layer without the need for additional test instruments.



eMBMS application tests with the R&S®CMW500 and R&S®CMWcards

Principy základních systémů s více anténami M.A.S.: SISO/SIMO/MISO a MIMO



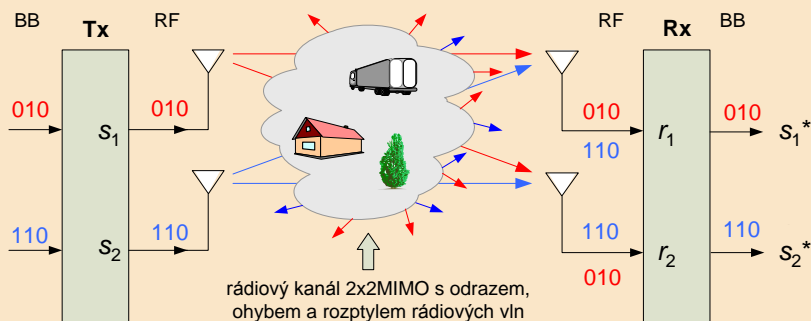
dílčí antény vysílačů resp. přijímačů musí být od sebe dostatečně vzdáleny: min. $\lambda/2$ u MS, až 10λ u BS, resp. různě polarizovány (horizontálně/vertikálně apod)

Prostý rádiový přenos SISO: přenáší se jen jeden modulační datový tok, po jediné rádiové cestě, přičemž zde nepůsobí žádná ochrana vůči únikům. Přenosová kapacita C_0 je dána přímo Shannonovým vztahem $C_0 = B \log_2(1 + S/N)$.

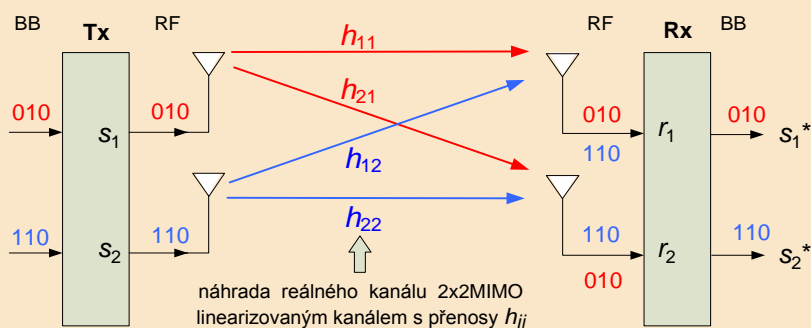
Přijímací resp. vysílací prostorová diverzita SIMO / MISO: přenáší se jediný modulační datový tok po více rozdílných, pokud možno co nejméně vzájemně korelovaných cestách; tím se zvyšuje imunita proti únikům, šumu i interferencím (oproti SISO), a to přímo úměrně počtu přijímacích resp. vysílacích antén; přenosová kapacita se však téměř nemění. Přitom není nutné zvětšovat původní vysílací výkon ani šířku rádiového pásma (vůči ekvivalentnímu systému SISO).

Prostorový multiplex MIMO: přenáší se více různých datových toků-vrstev (layers, streams) po více rozdílných slabě korelovaných cestách, vytvářených více anténami ve vysílači i v přijímači; tím se vytváří prostorový multiplex, zvyšující přenosovou kapacitu celého systému to při původním nezvětšeném výkonu vysílače a při původní nezvětšené šířce rádiového (RF) pásma (vůči ekvivalentnímu systému SISO). Počet nezávislých vrstev se nazývá rank systému MIMO

Rádiový kanál MIMO s výrazným mnohacestným šířením (multipath rich, scattering rich)



$$C_{\text{MIMO}} \propto \min(M_T; M_R)$$



Přijímané symboly r_1, r_2 lze vyjádřit jako lineární kombinaci vysílaných symbolů s_1, s_2 , a to formě dvou lineárních rovnic:

$$r_1 = s_1 h_{11} + s_2 h_{12}$$

$$r_2 = s_1 h_{21} + s_2 h_{22}$$

Jsou-li obě rovnice vzájemně nezávislé, a jsou-li známé přenosové koeficienty kanálu h_{ij} ($i, j = 1, 2$), je potom možné při známých přijímaných symbolech r_1, r_2 z těchto rovnic určit odhady s_1^*, s_2^* neznámých vysílaných symbolů s_1, s_2 :

$$\hat{s}_1 = \frac{\hat{h}_{22} r_1 - \hat{h}_{12} r_2}{\hat{h}_{11} \hat{h}_{22} - \hat{h}_{21} \hat{h}_{12}}$$

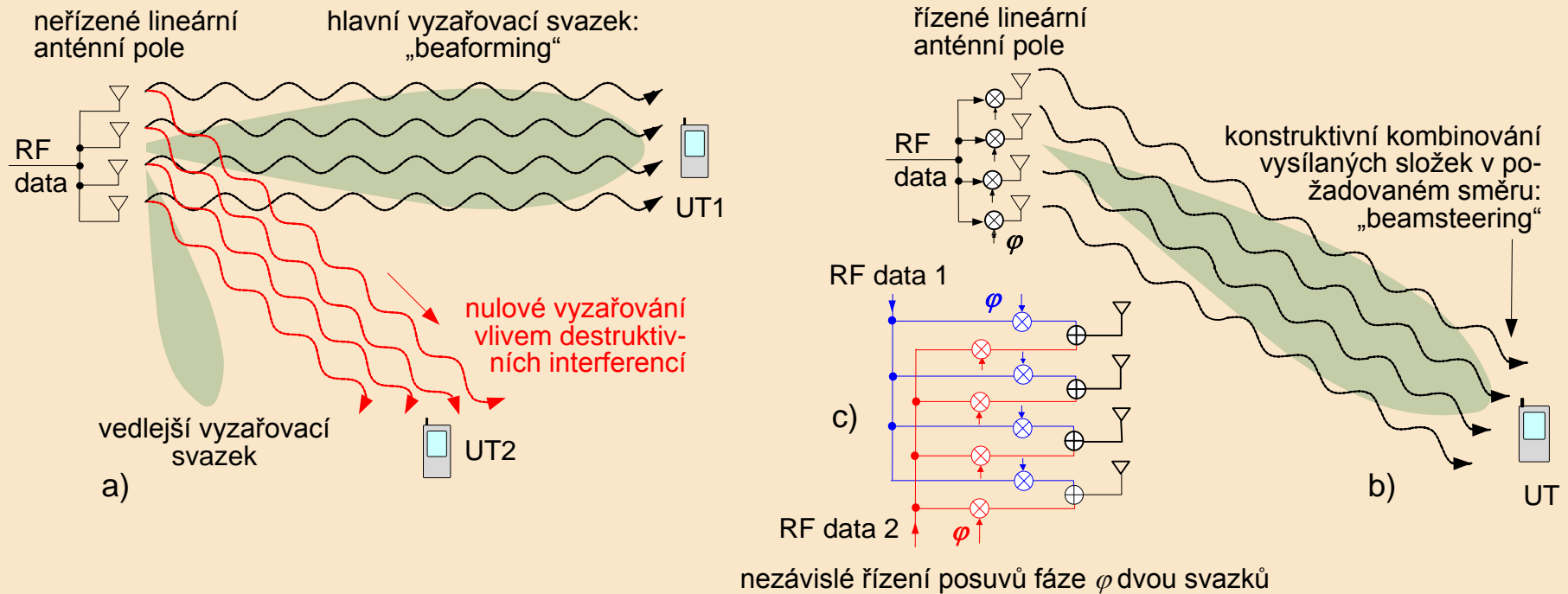
$$\hat{s}_2 = \frac{\hat{h}_{11} r_2 - \hat{h}_{21} r_1}{\hat{h}_{11} \hat{h}_{22} - \hat{h}_{21} \hat{h}_{12}}$$

Předchozí úvahy se snadno zobecní pro systém s N vysílacími a M přijímacími anténami. Při M přijímacích anténách lze zapsat přijímané signály ve tvaru M rovnic, z nichž je možné nalézt nejvýše právě M neznámých vysílaných signálů (a to i tehdy, kdy $N > M$). V maticovém zápisu lze psát

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M1} & \cdots & h_{MN} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_M \end{bmatrix}$$

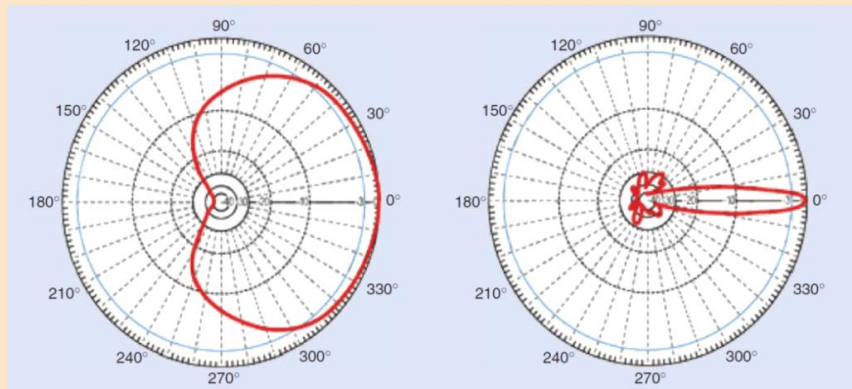
Vlivem výrazného mnohacestného šíření, vznikajícího následkem odrazu, ohybu a rozptylu, může signál vysílaný z libovolné vysílací antény přicházet na libovolnou přijímací anténu. V dekodéru přijímače se potom z těchto mixovaných složek získávají původní „čisté“ datové signály vysílané dílčími vysílacími anténami. Podmínkou úspěšného dekódování je co nejslabší korelace mezi dílčími kanály mezi každou vysílací a každou přijímací anténou. K dekódování však musí dekodér znát kanálové koeficienty (přenosy) h_{ij} všech uvedených dílčích cest; ty se získávají s využitím pomocných referenčních (tréninových) sekvencí, specifických pro každou vysílací anténu a vkládaných periodicky - a dostatečně často (v intervalech kratších, než je doba koherence T_{coh} daného kanálu) - mezi vysílaná uživatelská data.

Principy elektronického formování a řízení anténních svazků

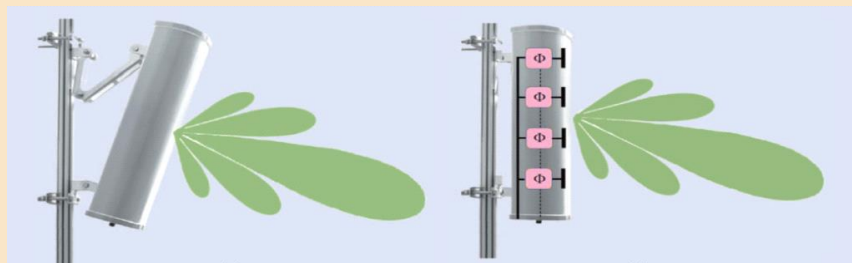


- a) Lineární anténní řada s blízkými anténními elementy vytváří fixní směrový vyzařovací svazek BF (beamforming); v jeho maximu, kde jsou dílčí vyzařované složky synfázní, se nachází terminál UT1, v nule kde se fáze kompenzují, leží terminál UT2
- b) systém 2DBF (two dimensional BF), u něhož se může vhodným náfázováním signálů dílčích antén zaměřit hlavní svazek na cílový terminál UT (beamsteering); při zavedení a využití smyčky zpětné vazby se však mohou posuvy φ signálů napájejících dílčí antény měnit automaticky tak, aby hlavní svazek stále sledoval cílový terminál UT, a to i při jeho pohybu.
- c) složitější obvod vytvářející dva nezávislé směrové svazky, s nezávislým přenosem dat a s nezávislým směrovým řízením.

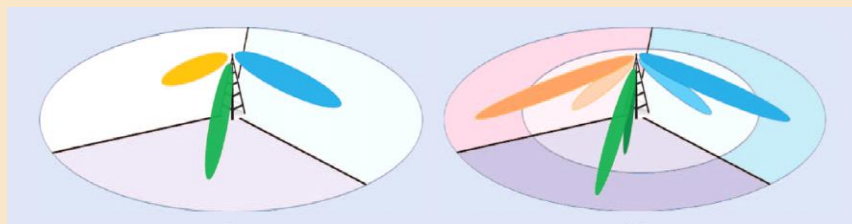
Dvoj a trojdimenzionální techniky formování svazků: 2DBF a 3DBF



Vyzařovací diagram syntetické anténní řady v rovině
a) vodorovné (svazek 120°); b) svislé (svazek 10°)



Vyzařovací diagram anténní řady v rovině svislé s nakláněním: a) mechanickým; b) elektronickým



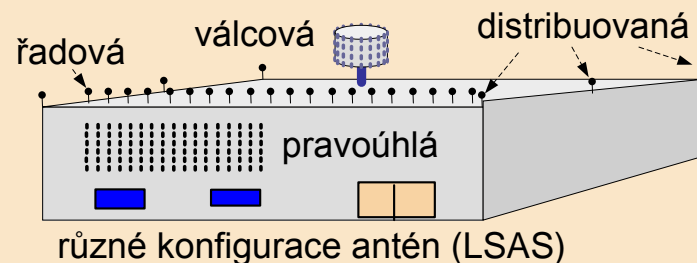
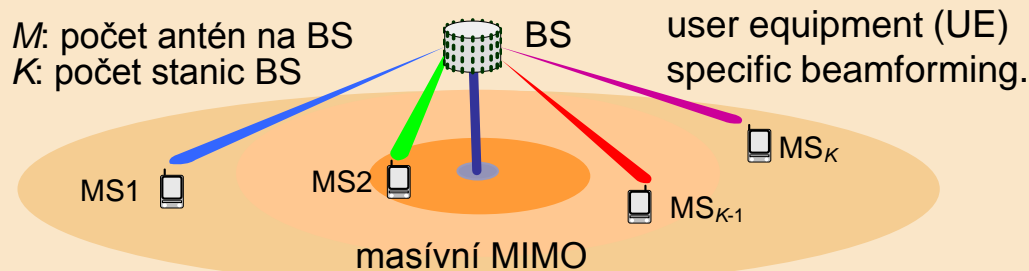
Sektorizace antén BS v rovině: a) vodorovné: 2DBF;
b) vodorovné i svislé: 3DBF

V síti LTE-A/B se využívá na trase DL dynamické formování vyzařovaného svazku (BF) ve vodorovné (azimutální) rovině, prováděné jednodimenzionální (přímkovou) pasívní anténní řadou, s fixním náklonem svazku k povrchu terénu.

Do techniky BF pronikají stále více dvojdimenzionální aktivní anténní pole AAA (Active Antenna Systems). V nich je každý anténní element integrován se separátním RF transceiverem, takže se eliminují ztráty v napájecích kabelech. Tato koncepce umožňuje dynamické dálkové elektronické řízení fáze a případně i amplitudy napájecího signálu, čímž je možné ovládat vyzařovaný svazek jak v azimutu tak v elevaci. Tak vzniká trojdimenzionální formování svazků 3DBF (3D Beam-forming), přinášející jemnější prostorové rozlišení, jež zdokonaluje činnost multiplexních systémů SU-MIMO a MU-MIMO. Trojrozměrné formování svazků 3DBF překonává techniku 2DBF svoji vyšší kapacitou, menšími mezibuňkovými a mezisektorovými interferencemi, a proto bude hrát v systémech 5G klíčovou roli.

Perspektivy anténních systémů 5G: masívní MIMO

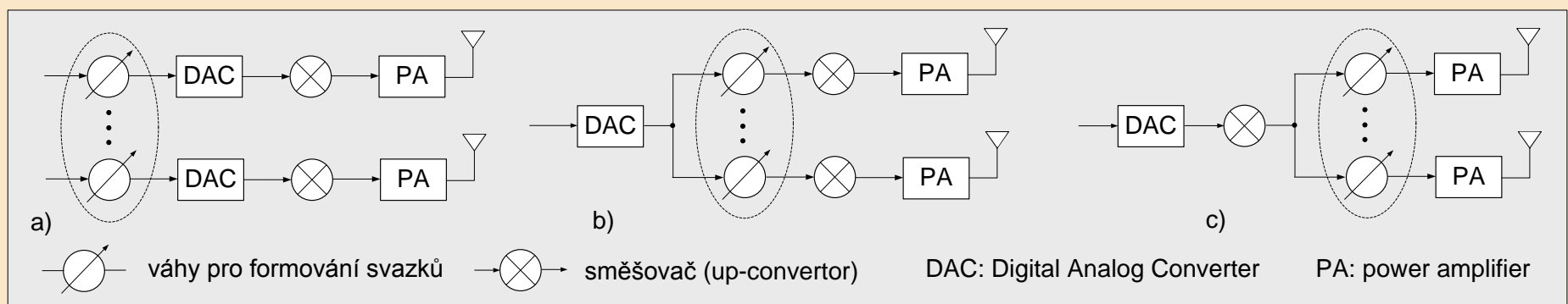
V systému masívní MIMO resp. LSAS (Large-Scale Antenna System) je počet M antén na BS nejméně o jeden řád větší, než je počet K mobilních stanic MS ($M \gg K$). Díky tomu může BS vysílat nezávislý datový tok ke každé stanici MS ve stejném společném zdrojovém bloku, tedy na stejném frekvenčním kanálu, resp. ve stejném časovém slotu resp. se stejnou kódovou sekvencí. Ke vzájemné izolaci těchto toků se potom využívá prostorový multiplex SM, spočívající v jejich vysílání v podobě ostře směřovaných vyzařovacích svazků, z nichž každý je zaměřen na „svoji“ stanici MS, kterou sleduje i při jejím pohybu. Tato technika, nazývaná mnohoživatelské formování směrových svazků MUBF, se uplatňuje již u standardních systémů MU-MIMO, avšak u koncepce masívní MIMO se právě díky nadměrnému počtu antén v BS objevuje „masívní“ efekt, umožňující aplikaci jednoduchých optimálních lineárních procesních technik (kombinování na max. poměr MRC...). K duplexnímu spojení se zde užívá časový duplex TDD, neboť se u něho snáze získává informace o stavu kanálu CSI, než u duplexu FDD. V praxi má základnová stanice BS v systému LSAS stovky až tisíce dílčích antén; ty mají v milimetrové oblasti ($f \geq 30$ GHz, $\lambda \leq 1$ cm) velmi malé rozměry, přijatelné pro vnější i vnitřní prostory (outdoor/indoor) malých buněk (pod 200m).



Přednosti systému masívní MIMO, resp. LSAS (Large-Scale Antenna System) vůči systému SISO:

1. Systém masívní MIMO podstatně zvyšuje spektrální kapacitu, a to v poměru faktoru $\min(M, K)$
 2. Celkový vysílací výkon stanice BS se snižuje úměrně počtu antén M , takže každé zdvojení M snižuje P_{tot} na polovinu (pro $M \rightarrow \infty$ se pak blíží P_{tot} k nule, a to vlivem nekonečného zisku pole)
 3. Mobilní stanice (MS) vystačí rovněž s menším vysílacím výkonem (vlivem diverzitního zisku)
 4. Masívní MIMO odstraňuje mnohoživatelské interference a bílý šum a působení rychlého úniku
- Hlavní slabinou masívního MIMO je tzv. kontaminace pilotních signálů, nutných v duplexu TDD

Implementace formování svazku IBFD ve vysílačích milimetrových mobilních systémů MMB (Millimeter Wave Mobile Broadband)



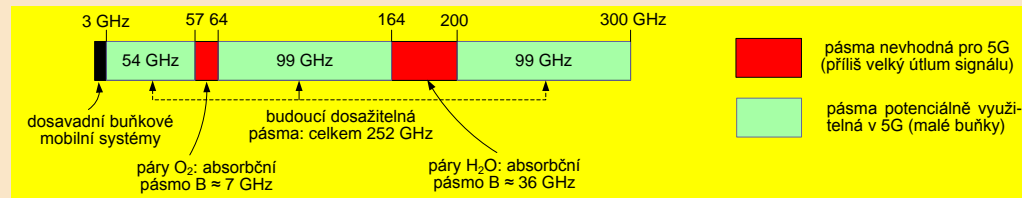
Tři techniky formování svazků ve vysílačích BF: a) digitální formování (DBF) v základním pásmu BB (base band); b) analogové formování (ABF) v základním pásmu BB; c) analogové formování v rádiovém pásmu RF (radio frequency).

Digitální formování dle obr. a používá separátní váhy pro formování svazků, převodníky DAC a další bloky pro každou RF kaskádu. To poskytuje této koncepci velkou flexibilitu, avšak za cenu dražší implementace. Verze DBF navíc podporuje díky použití vícenásobného RF řetězce simultánní vysílání více datových toků a tak umožňuje implementaci mnohonásobného přístupu s prostorovým dělením kanálů SDMA (Space Division Multiple Access) na bázi systémů MIMO. Analogové formování svazku dle obr. b, nebo obr. c je jednodušší. Ve vysílači se vystačí s jediným převodem DAC, čímž se cena systému sníží, avšak omezuje se i jeho flexibilita.

Rozpor mezi flexibilitou a jednoduchostí obou variant řeší hybridní architektura BF. Ta je vhodná zejména pro mnohoživatelské systémy MU-MIMO pracující v milimetrové oblasti, v níž jsou rozměry elementárních antén již velmi malé. U nejnovější varianty MU-MIMO, zvané masívní MIMO, je možné díky těmto miniaturním rozměrům přiřadit v základnové stanici BS každému mobilnímu terminálu např. 8 nebo i více dílčích antén. Ty vytvářejí velmi úzký vyzařovací svazek, který kompenzuje velké ztráty šířením (PL tj. Path Loss), k nimž na mm vlnách dochází. Digitální segment BF potom poskytuje systému flexibilitu, potřebnou v systémech MU-MIMO.

Vlastnosti rádiových kanálů v oblasti milimetrových vln

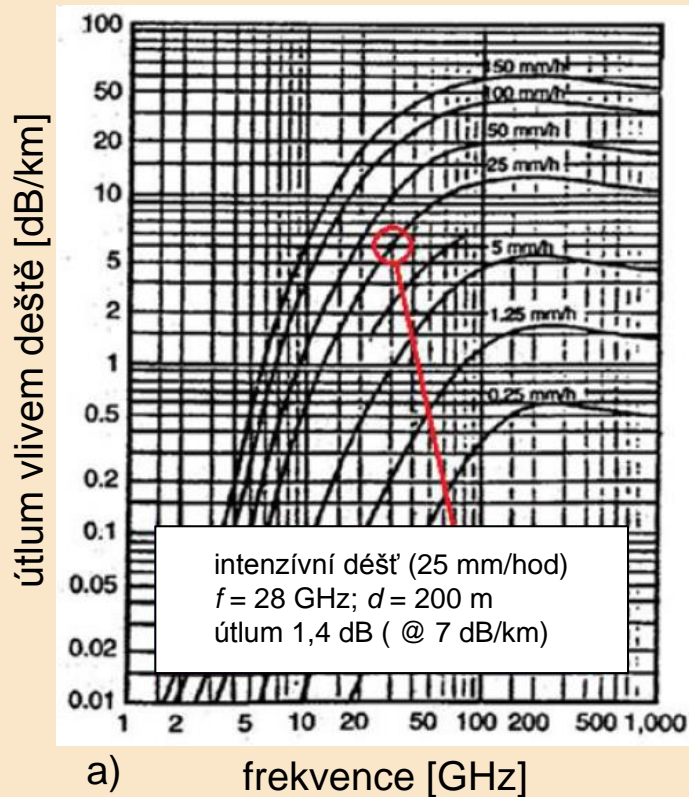
Theodor. S. Rappaport: „Millimetre wave are very appropriate for next generation 5G“



- V ideálním kanálu šíření LOS (kanálu mezi anténami) útlum milimetrových vln roste s kvadrátem frekvence f , což je pro aplikace v mobilní komunikaci nevýhodné.
- Tento nárůst lze ale kompenzovat užitím antén s velkou směrovností a tedy i ziskem.
- V milimetrové oblasti lze antény s velkým ziskem/směrovností - ať již v diskretní formě, nebo ve formě anténních polí - snadno realizovat, neboť při neměnných rozměrech se u většiny typů antén (parabolických ap) s růstem frekvence zisk zvětšuje.
- V reálném pozemském kanálu vlivem ztrát šířením (path loss) a zastínění útlum roste s mocninou vzdálenosti d^γ , přičemž $\gamma = 2 \dots 6$, typická hodnota $\gamma \approx 3$; přitom koeficient ztrát šířením γ je na frekvenci jen málo závislý.
- Trasy NLOS vykazují silný odraz a rozptyl, ohyb je slabý; zastínění pevnými překážkami (cihlové zdi,...) je velké, problém řeší užití více antén v jediné stanici UT.
- Pokrytí uvnitř budov (indoor) je nutné zajistit pomocí mikrobuněk, distribuovaných antén DAS, reléových spojů (uzly RN) ap. Přesto zde nelze odstranit výpadky spojení.
- Milimetrové vlny neumožňují spolehlivé, robustní celoplošné pokrytí velkých lokalit; kompletní systém 5G proto musí být heterogenní, tj. musí obsahovat jednak velké zastřešující makrobuňky - využívající konvenční pásma (< 5 GHz), jednak malé mikro/piko/femto buňky, které budou využívat nová milimetrová pásma.
- Makrobuňky budou zajišťovat celoplošné pokrytí, se spolehlivým předáváním (HO) - i když s nižší dosažitelnou síťovou propustností a uživatelskou rychlostí.
- Mikrobuňky potom zajišťují vysokou lokální propustnost i uživatelskou rychlost.

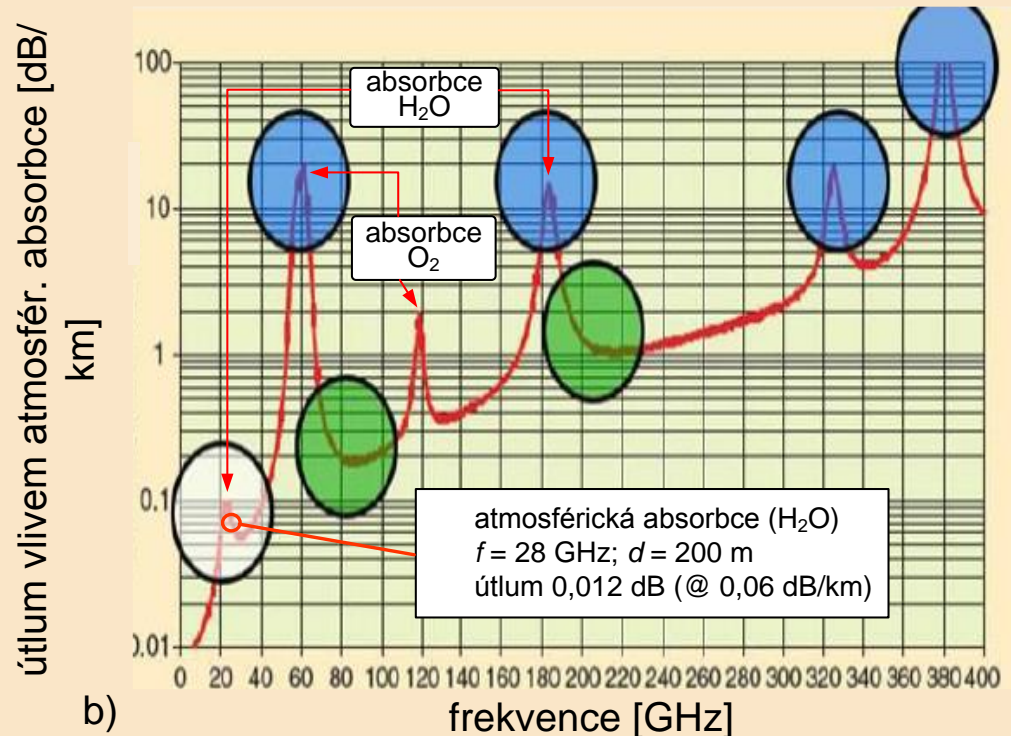
Útlum rádiových kanálů vlivem deště a atmosférické absorpce

útlum rádiového kanálu vlivem deště



Útlum i při silném dešti (25 mm/hod) má v celém pásmu mm vln 30-300 GHz při vzdálenostech do 200 m hodnoty pod cca 3 dB (tj. 15 dB/km), které jsou poměrně malé oproti jiným faktorům, ovlivňujícími útlum rádiového kanálu (hlavně vůči útlumu šíření $L_{prop}=(4\pi d/\lambda)^2$)

útlum rádiového kanálu následkem atmosférické absorpce perspektivní milimetrová pásma: 28 GHz, 60 GHz, 73 GHz



Uvnitř celé milimetrové oblasti 30-300 GHz je pro komunikaci s ohledem na atmosférickou absorpci vhodné pásmo v okolí 28 GHz, které vykazuje na vzdálenost 200 metrů útlum pouze 0,012 dB (0,06 dB/km), v pásmu 38 GHz je útlum nepatrně větší. Další vhodné pásmo je 70 až 100 GHz a též pásmo 125 až 160 GHz

Útlum rádiových kanálů v oblasti milimetrových vln

Útlum ideálního rádiového kanálu na milimetrových vlnách: $f \geq 30\text{GHz}$

Friisův vzorec pro zisk rádiového kanálu (při ziskách antén G_t, G_r): $\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$

Friisův vzorec pro zisk kanálu šíření (při ziskách antén $G_t = G_r = 1$): $\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 = \left(\frac{c_0}{4\pi df} \right)^2$

zisk kanálu šíření: $\propto \frac{1}{f^2}$, avšak zisk antény: $\propto f^2$ ←

$$G = \frac{4\pi A_{\text{eff}}}{\lambda^2} = 4\pi \left(\frac{f}{c_0} \right)^2$$

A_{eff} : efektivní apertura

závěr:

při fixních rozměrech antén ve volném prostředí frekvence nemá na zisk rádiového kanálu vliv.

Přídavné ztráty v pozemském rádiovém kanálu (zastínění, dešť...):

vliv prostředí (ztráty šířením, zastínění ...) vyjadřuje koeficient ztrát šířením γ , závislý na charakteru terénu, vegetaci ap, přičemž v praxi $\gamma = 2 \dots 7$.
Neprostupné překážky mají velký útlum (cihlová zeď > 35 dB ...

Prostředí	rozsah γ
městské makrobuňky	3,7 ...6,5
městské mikrobuňky	2,7 ...3,5
úřady (různá patra)	2,0 ...6,0
obchodní domy	1,8 ...2,2
průmyslové podniky	1,6 ...3,3
byty	2,5 ...3,5
otevřená krajina s LOS	2,0 ...2,5

Šíření v rádiových kanálech NLOS:

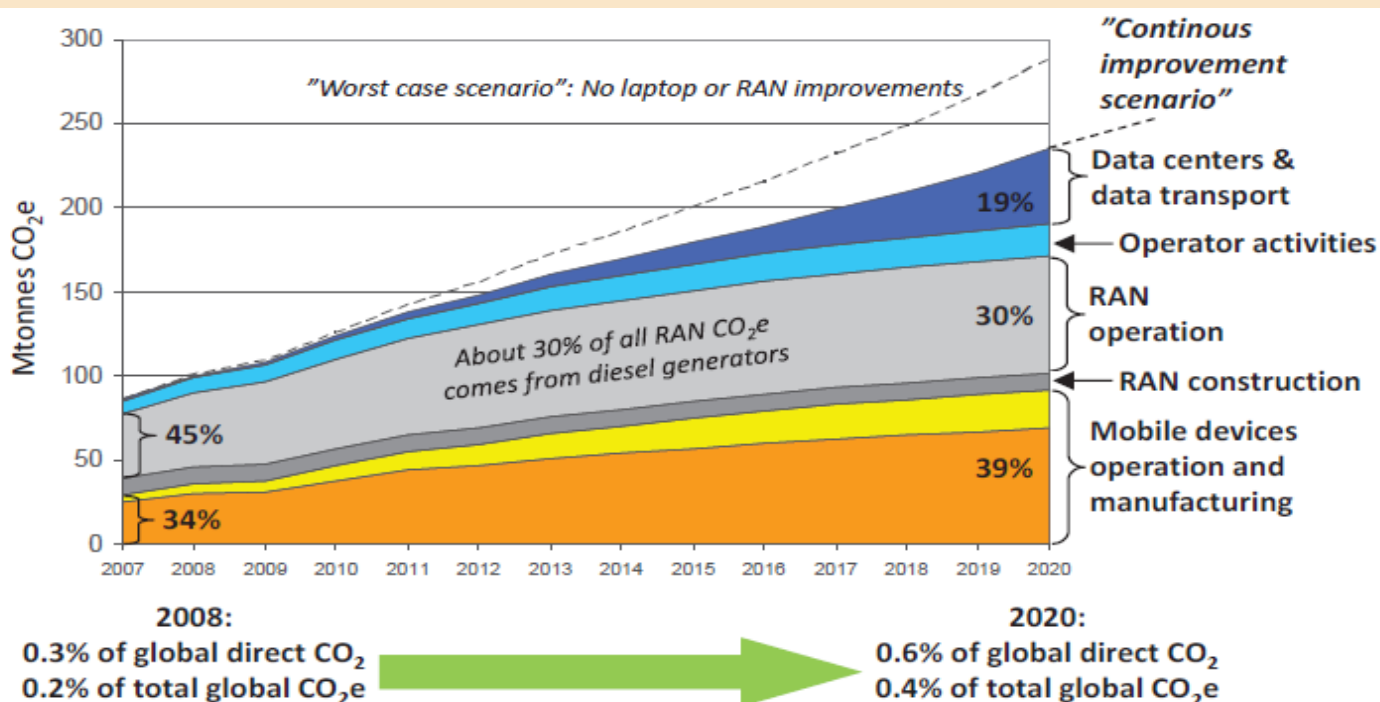
Šíření v rádiových kanálech NLOS podporuje odraz (reflection) a rozptyl rádiových vln, velmi slabé je působení ohybu.

Závěry:

Při komunikaci na krátké vzdálenosti cca do 200 metrů, při použití antén, nebo anténních polí s velkým ziskem, při jejich fixních rozměrech nezávislých na frekvenci a při využití odrazu a rozptylu rádiových vln, je pozemní komunikace v pásmu milimetrových vln možná! Případný vliv deště a atmosférické absorbce na útlum není sice zanedbatelný, avšak většinou je - při malých vzdálenostech mezi vysílačem a přijímačem - nepodstatný.

Globální produkce emisí CO₂ v letech 2007 až 2020

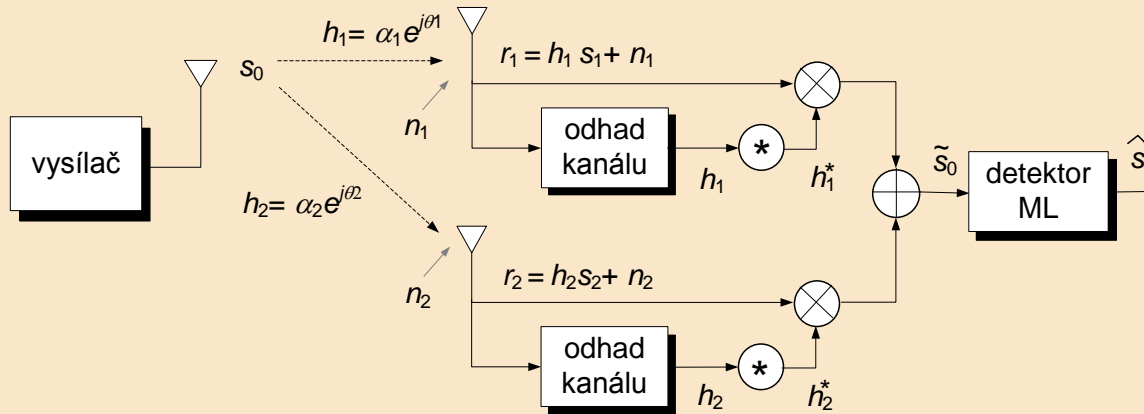
- V období let 2007 až 2020 se zvětší datový provoz mobilních sítí o cca 3 řády tj. 1000 krát, a to z 0,8 MilT bytů v roce 2007 na cca 500 MilTbytů v roce 2020.
- Přitom počet laptopů, netbooků apod. naroste z 23 Mil na cca 500 Mil., avšak počet základnových stanic se jen ztrojnásobí; kapacita těchto zařízení však enormně vzroste.
- Počet terminálů pro komunikaci M2M (MTC) bude v roce 2020 nejméně o jeden řád větší, než počet konvenčních terminálů pro klasickou komunikaci H2H.
- Spotřeba elektrické energie díky razantnímu prosazování „zelených technologií“ se zvětší podstatně mírněji. Nejvýraznější úspory se objeví u přístupových sítí RAN.



Shrnutí: v letech 2007 až 2020 dojde v mobilních sítích k explosivnímu nárůstu jejich kapacity (intenzity provozu), k řádovému zvětšení uživatelské datové rychlosti a ke stejnému snížení

Přijímací diverzita SIMO s kombinováním MRC

Maximum Ratio Combining



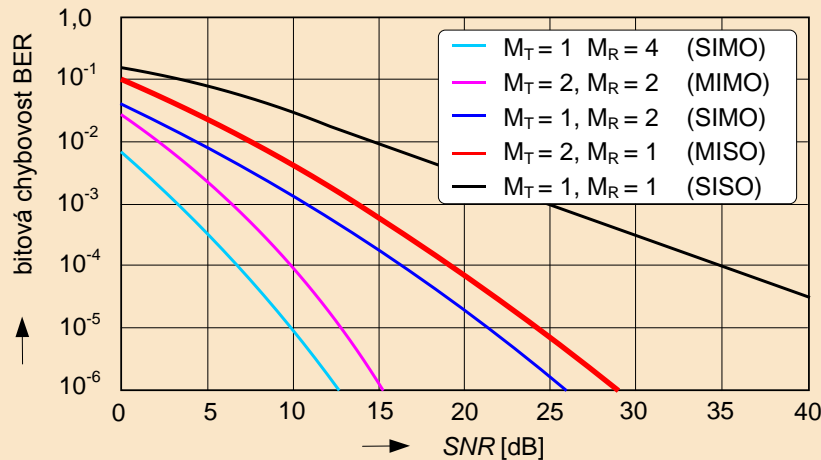
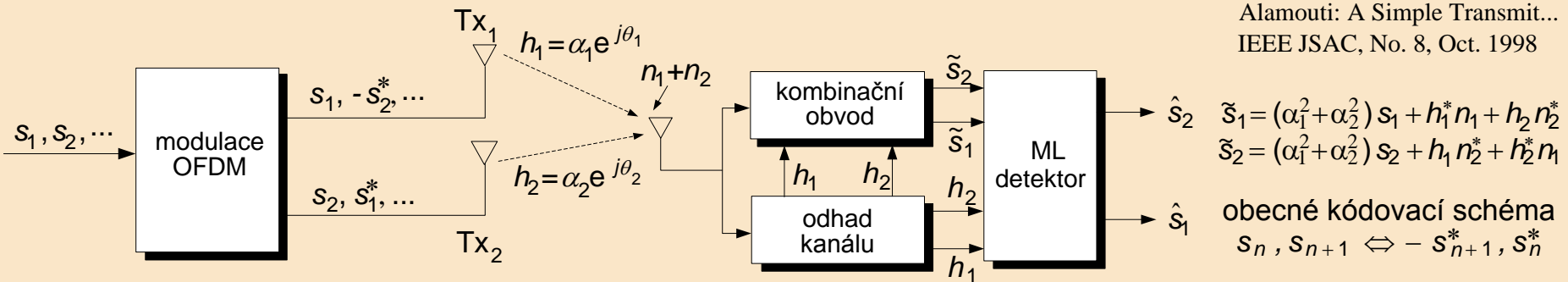
Odhad kanálu:

V přijímači MRC je nezbytné plynule realizovat odhad rádiového kanálu. To umožňuje technika periodického vkládání pomocných referenčních symbolů mezi vysílaná data. Přijímač strukturu těchto symbolů zná a jejich porovnáváním s odpovídajícími přijímanými symboly, vytváří odhad kanálu.

Přijímací diverzita s kombinováním na maximální poměr MRC (Maximum Ratio Combining), znázorněná pro dvě diverzitních větve na obrázku, vede k maximálnímu poměru signálu ku šumu SNR na výstupu přijímače. Je vhodná pro úzkopásmové rádiové kanály, v nichž jsou přenášeny signály pouze doprovázeny bílým šumem AWGN a postihovány frekvenčně plochými úniky. Signály přijímané z obou větví se individuálně váží a poté se sčítají. Všechny váhované užitečné složky potom mají shodné fáze a dochází tedy k jejich koherentnímu kombinování, kdežto šumy dílčích antén se sčítají nekoherentně tj. s náhodnou fází. Proto při kombinování dochází ke zlepšení celkového výstupního poměru SNR.

Alamoutiho prostorově časová vysílací diverzita STTD

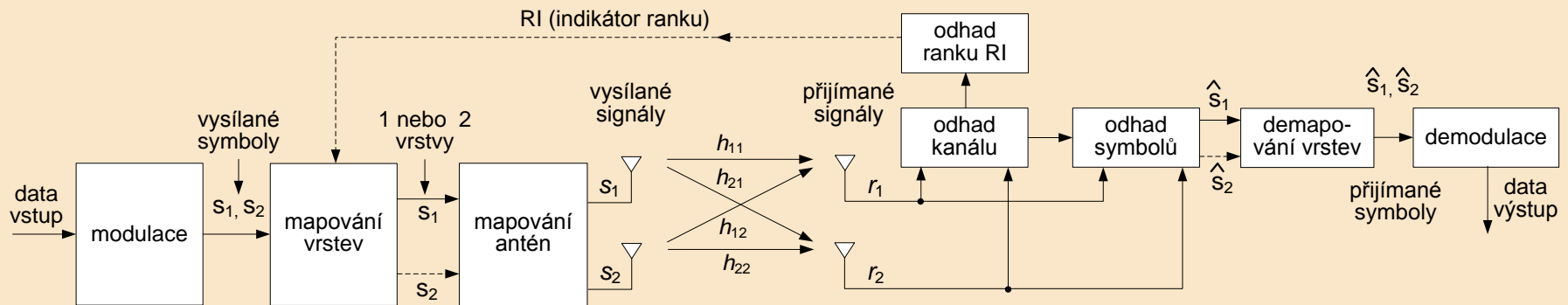
Alamouti: A Simple Transmit...
IEEE JSAC, No. 8, Oct. 1998



The first code that defined the space-time block category was discovered by **Siavash Alamouti** and is known famously as the Alamouti Code. This seemingly simple idea is considered one of the most significant advances in MIMO. In fact it was this code that basically set the whole block and trellis coding for MIMO in motion

U Alamoutiho schématu prostorově časové vysílací diversity STTD (Space-Time Transmit Diversity), jsou modulační symboly mapovány v prostorové a navíc v časové doméně. Z jedné antény se vysílají vstupní datové symboly $s_1 - s_2^*, \dots$. U druhé antény se vysílají zakódované symboly s_2, s_1^*, \dots . V kombinačním obvodu přijímače se za pomoci odhadnutých odezev obou diverzitních cest h_1, h_2 získávají odhady vysílaných signálů \tilde{s}_1, \tilde{s}_2 , které se v ML detektoru převedou na odhady \hat{s}_1, \hat{s}_2 maximálně pravděpodobné vysílaným signálům s_1, s_2 .

System 2x2 MIMO prostorového multiplexu s otevřenou smyčkou OL



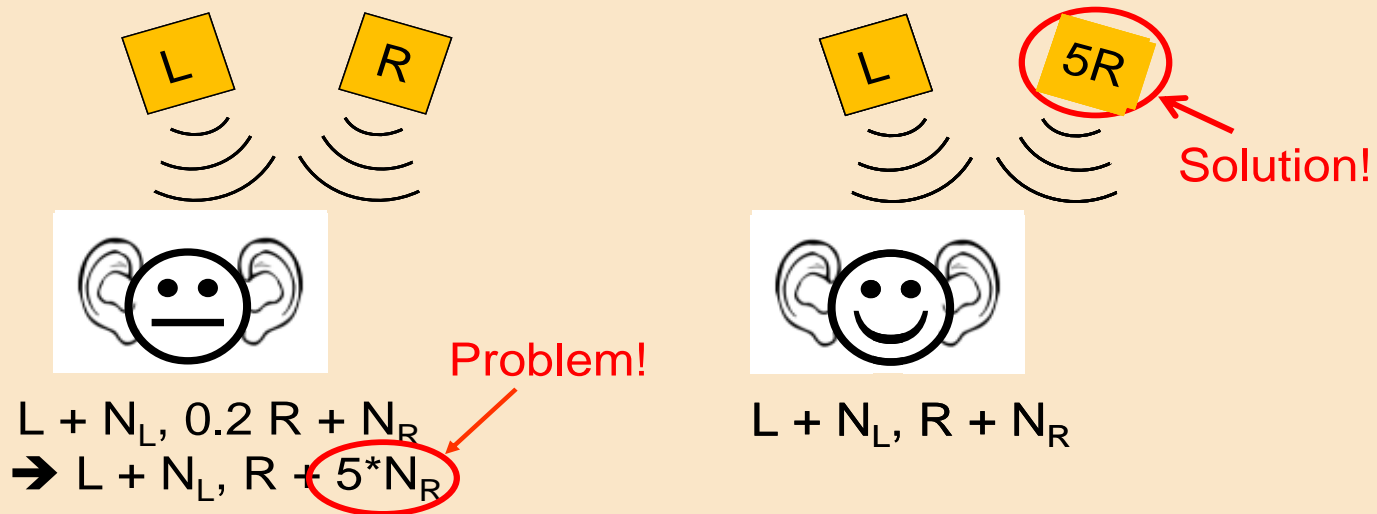
Uvedený základní systém je jednoduchý, avšak občas u něho vznikají určité problémy. Tak např. při určitých konkrétních hodnotách kanálových koeficientů h_{ij} se může jmenovatel relací (2) rovnat nule, takže z nich nelze stanovit hledané odhady vysílaných symbolů s_1, s_2 . Podobné potíže se objevují také při malých poměrech SINR přijímaných signálů a rovněž při znatelněji korelovaných dílčích trasách šíření. Aby se předešlo těmto problémům, může se místo principiálního zapojení použít jeho zdokonalená adaptivní verze zobrazená výše a označovaná jako systém 2x2 MIMO prostorového multiplexu s otevřenou smyčkou (2x2 MIMO open loop spatial multiplexing system), která je např. implementována v systému LTE. Zde jsou v bloku odhadu ranku MIMO nepřetržitě analyzovány odhady kanálových koeficientů h_{ij} a z nich je odvozován indikátor ranku RI (Rank Indication), indikující počet symbolů, které lze úspěšně přijímat. Ten má při spolehlivém odhadu koeficientů h_{ij} hodnotu RI = 2, která se předá pomocným zpětným kanálem do bloku mapování vrstev vysílače. Tato hodnota dává uvedenému bloku povel, aby odeslal během doby $2T_s$ dva různé symboly s_1, s_2 , což odpovídá výše popsanému regulárnímu multiplexnímu režimu. Při nespolehlivém odhadu koeficientů h_{ij} má indikátor ranku hodnotu RI = 1, která dává bloku mapování vrstev v přijímači povel, aby odeslal během doby $2T_s$ dva stejné symboly s_1, s_1 , což odpovídá klasickému diverzifikačnímu režimu. V tomto případě se kapacita systému (vůči SISO) nezvětší, avšak přenosem dvou stejných symbolů po různých trasách se zvýší robustnost přenosu.

Systemy MIMO s předkódováním

Intuitive understanding MIMO precoding

- The receiver could just amplify the right channel but in presence of noise the corrected signal would degrade:
- Precoding the transmission as L, 5R optimizes signal recovery

Rumney (nový): str.
73 If the
matrix...allow HOM...
or preequalization...



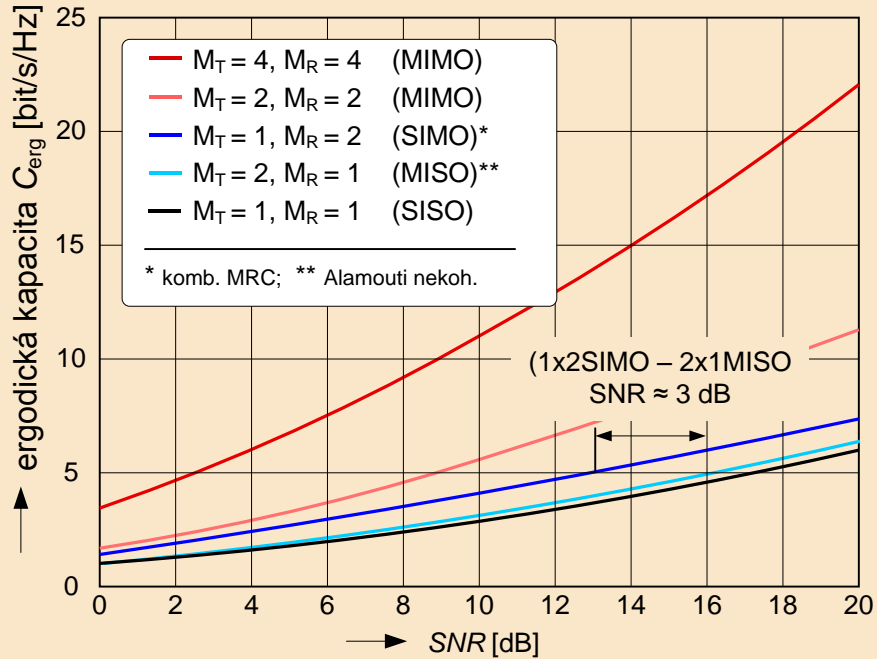
Jestliže má vysílač k dispozici informace o stavu kanálu CSIT (znalost kanálové matice H), potom je možné v něm realizovat předkódování vysílaných signálů, a to jedním ze dvou následujících způsobů:

- využít případné asymetrie v přenosech obou kanálů k aplikaci modulace vyššího řádu (HOM) v lepším kanálu
- posílit vysílací výkon v horším kanálu, tj. výkonově vyrovnat (ekvalizovat) přenos v obou kanálech (viz obr.)

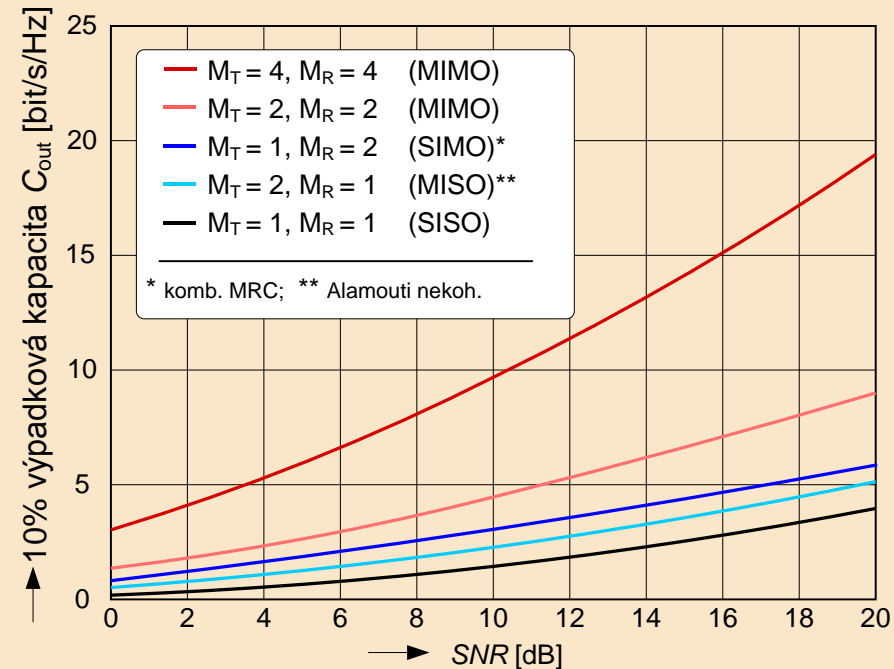
[1] Rumney, M.: LTE and the Evol. to 4G. J. Wiley&Sons, 2013, Agilent Technology

[1] MIMO MIA! ...or the different faces of MIMO! Agilent Tech, 2005

Kapacita systémů s více anténami SIMO, MISO a MIMO souhrnný pohled



a) závislost ergodické kapacity C_{erg} na poměru SNR na vstupu přijímače (BPSK; Rayleighův únik)



b) závislost výpadkové kapacity C_{out} na poměru SNR na vstupu přijímače (BPSK; Rayleighův únik)

Ergodická (ergodic) kapacita C_{erg} : U kanálů s blokovým únikem BF je možné na každý blok, při němž je přenos konstantní, resp. téměř konstantní, aplikovat Shannonův vztah a tím získat kapacitu odpovídající tomuto bloku. Zprůměrováním všech takto určených hodnot se získá ergodická (Shannonova) kapacita C_{erg} . Výpadková (outage) kapacita je kapacita zajištěná pro určitou úroveň spolehlivosti přenosu; je definována jako informační rychlost garantovaná pro $(100 - p)\%$ realizací daného kanálu, kde p je pravděpodobnost výpadků (např. při pravděpodobnosti $p = 1\%$ je kanál po 99% času nad prahovou hodnotou SNR a může přenášet data, kdežto po 1% času spolehlivý přenos není možný a systém je mimo provoz).

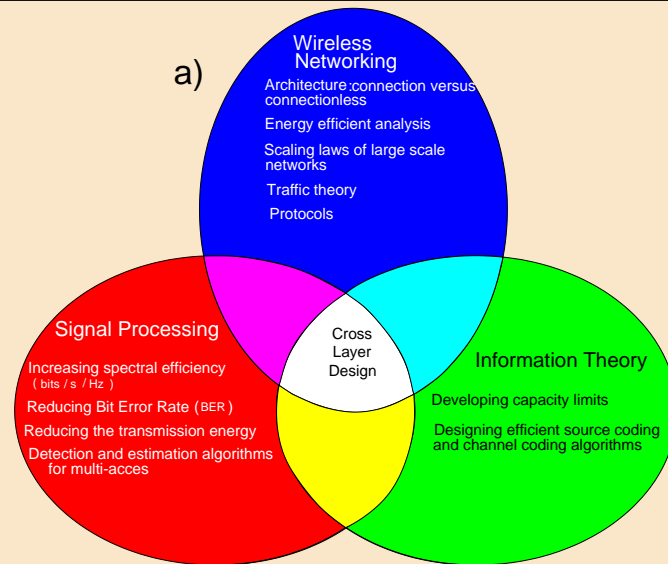
Změny kanálu probíhají vlivem úniku obvykle spojitě, avšak pro zjednodušení se reálné kanály často aproximují kanály s blokovým únikem BF (Block fading). U nich je tok signálu dělen na vhodné bloky, přičemž uvnitř každého bloku se únik považuje za konstantní, avšak blok po bloku se náhodně mění. Tyto změny sledují např. Rayleighovu či Riceho distribuci.

Possible candidate band for IMT under WRC-15 Agenda Item 1.1

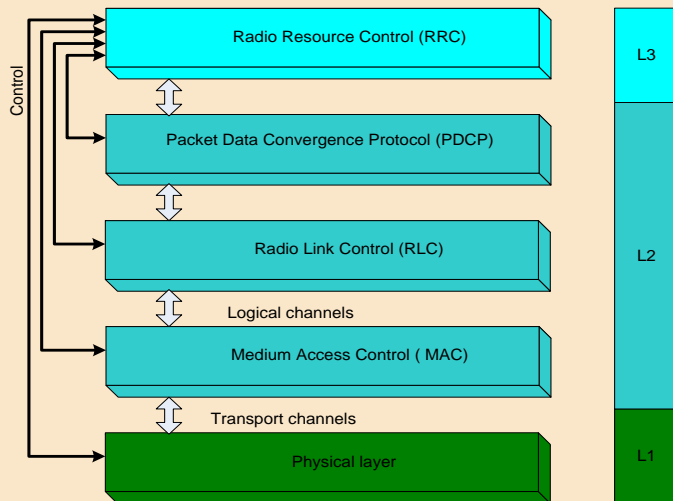
Description	Spectrum	Incumbent user	WRC-15 target
Low candidate bands (<1GHz)	Parts of 500-600MHz [470-around 694MHz]	TV PMSE	WRC-15 regional identification for IMT usage Need cooperation with Broadcasting industry
	700MHz [694-790MHz]	TV PMSE	WRC-15 Regional IMT identification: Region 1 (AI 1.2)
Low-to-mid candidate bands (1GHz-3GHz)	Parts of 1.4 GHz [1350-1525MHz]	D-Radio Fixed Link Scientific	WRC-15 global identification for IMT usage Scientific use, only in a part of frequencies and some parts of regions
	2700-2900 MHz	Radar	WRC-15 global identification for IMT usage
Mid-to-high candidate bands (3GHz-6GHz)	3.4-3.6 GHz	IMT (In some countries) Sat.	WRC-15 global identification for IMT usage
	3.6-3.8 GHz	IMT Sat.	WRC-15 global identification for IMT usage
	Parts of 3.8-4.2GHz	Sat.	WRC-15 global identification for IMT usage
	Parts of 4.4-4.99 GHz	Sat.	WRC-15 global identification for IMT usage

Návrh komunikačních systémů napříč vrstvami CLD (Cross Layer Design)

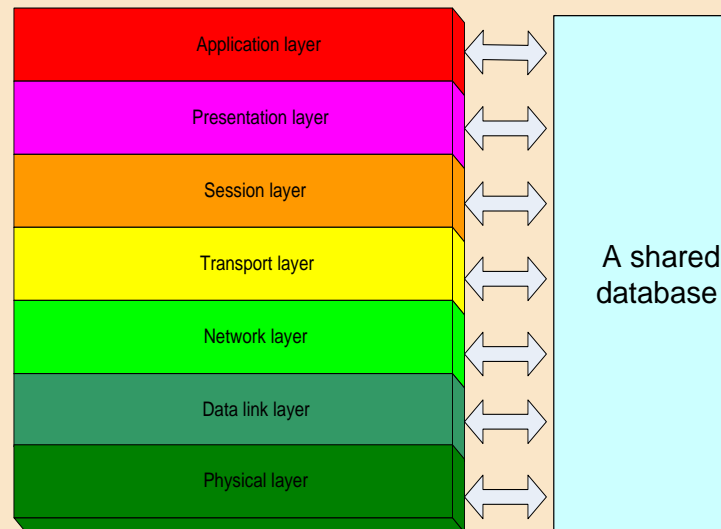
Obrázek 4: a) Návrh systému napříč vrstvami CLD je výslednicí těsné kooperace tří vědecko - technických disciplín, a to teorie a praxe rádiových sítí, teorie informace a zpracování signálů; b) přímá výměna informací mezi dílčími vrstvami modelu OSI RM; c) výměna informací mezi dílčími vrstvami OSI RM realizovaná prostřednictvím jediné sdílené databáze



CLD as an intersection of different disciplines

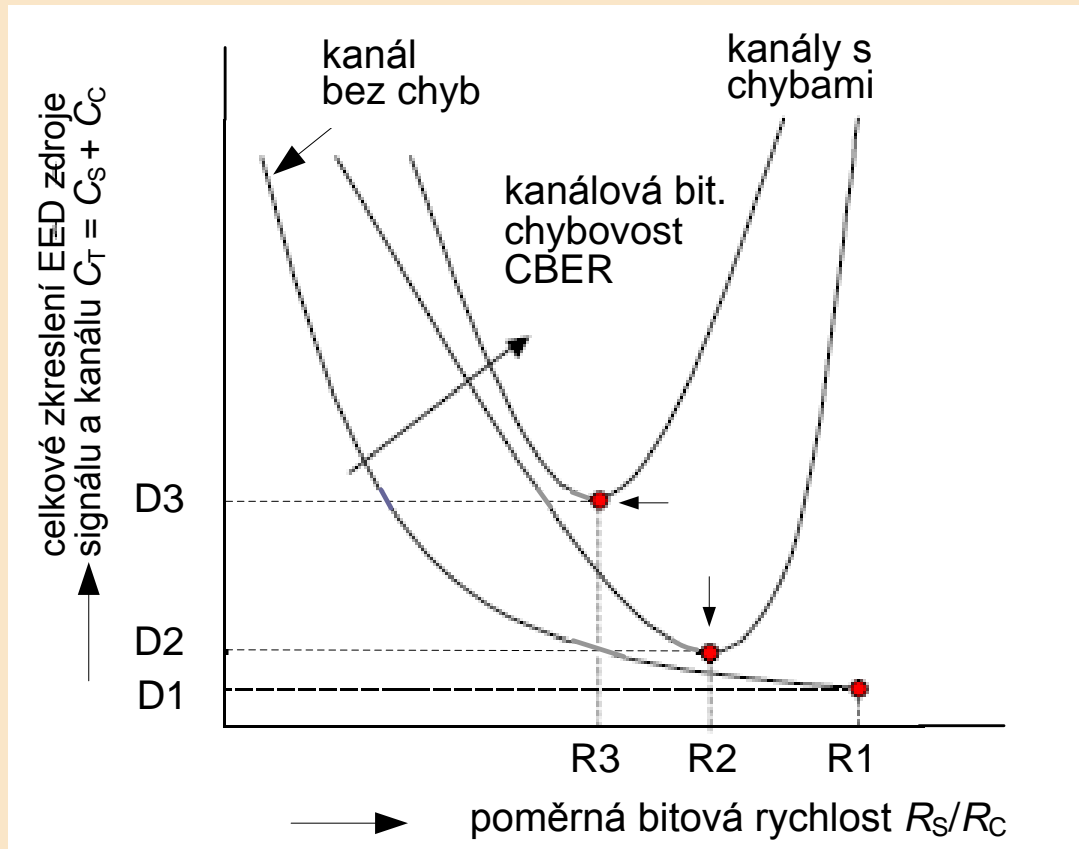


b) Direct communication between different layers



c) A shared database

Společné zdrojové a kanálové kódování JSCC (Joint Source-Channel Coding)



Funkční závislosti celkového zkreslení EED rádiového systému pro přenos videa, na poměru bitových rychlostí zdroje signálu R_S a kanálu R_C . Parametrem jednotlivých křivek je stav kanálu, vyjadřovaný obvykle veličinou CSI (Channel State Information). Při určité optimální alokaci (poměrném rozdělení) redundantních bitů mezi kódér zdroje signálu a kódér kanálu je dosaženo u každé zobrazené závislosti výrazného minima celkového zkreslení systému EED.