

Současný vývoj systémů mobilní komunikace páté generace (5G)

*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
analogové systémy

řeč
(data)

řeč + SMS
(paket. data)

řeč, data,
video

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

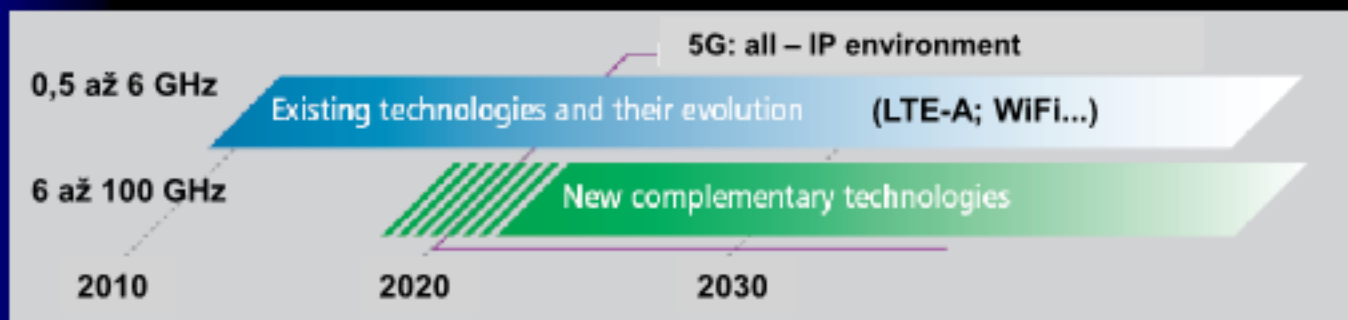
řeč; multimedia; rychlá data (HSI): 10 Gb/s

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

voice centric

data centric

sensing, steering, control



Generační vývoj systémů veřejné pozemní komunikace

generace:	1G (1980)	2G (1990)	3G (2000)	4G (2010)	5G (2020)
přístup:	FDMA	TDMA	CDMA	OFDM	zatím neurčen
standardy:	NMT, AMPS...	GSM, IS 54...	HSPA...	LTE	
	1980	1990	2000	2010	2020
předcelulární generace	pouze řeč analog. systém	řeč, (data)	řeč + SMS (paket. data)	data+ video + řeč	rychlá data, multimedia
					hovor, data, multimedia: 10 Gb/s komunikace M2M (IoT, Tal..): 1 ms

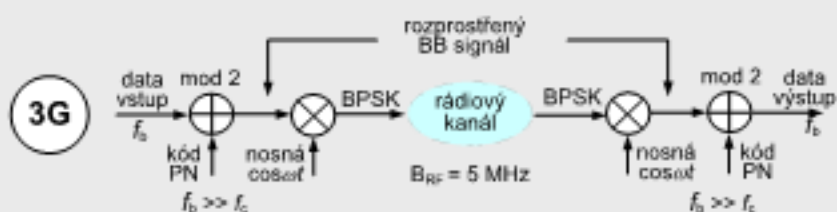
signál W-CDMA

rozprostření spektra ve vysílání

zúžení spektra v přijímání

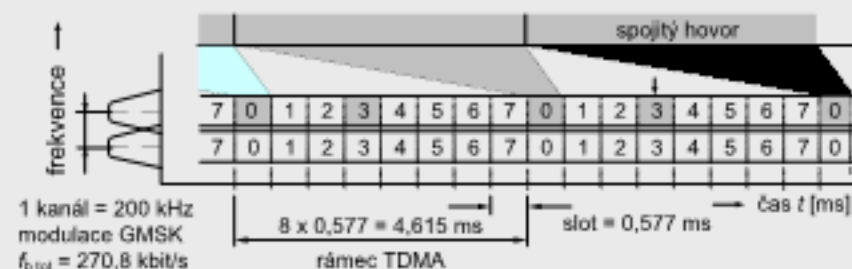


přenos W-CDMA (na bázi DS-SS)



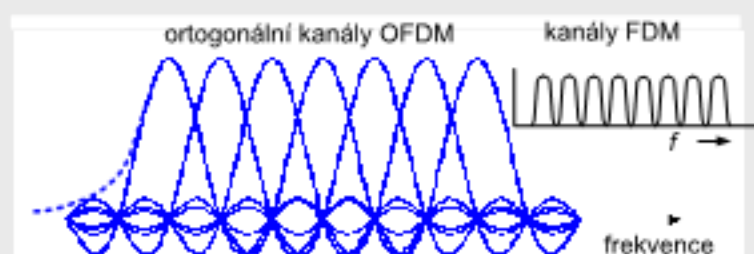
signál GSM

vývoj GSM (GMSK/CS) → GPRS (CS a PS) → EDGE (GMSK a 8PSK); přístup TDMA/FDMA: 8 časových slotů v rámci TDMA (4,615 ms); **2G** na přenosu: kódování FEC/ekvalizace/časové prokládání; GSM využívá pouze frekvenční duplex FDD ($\Delta f = 45 \text{ MHz}$); šířka pásma na 1 rádiový kanál = 200 kHz; další vývoj E EDGE (..32QAM ?)

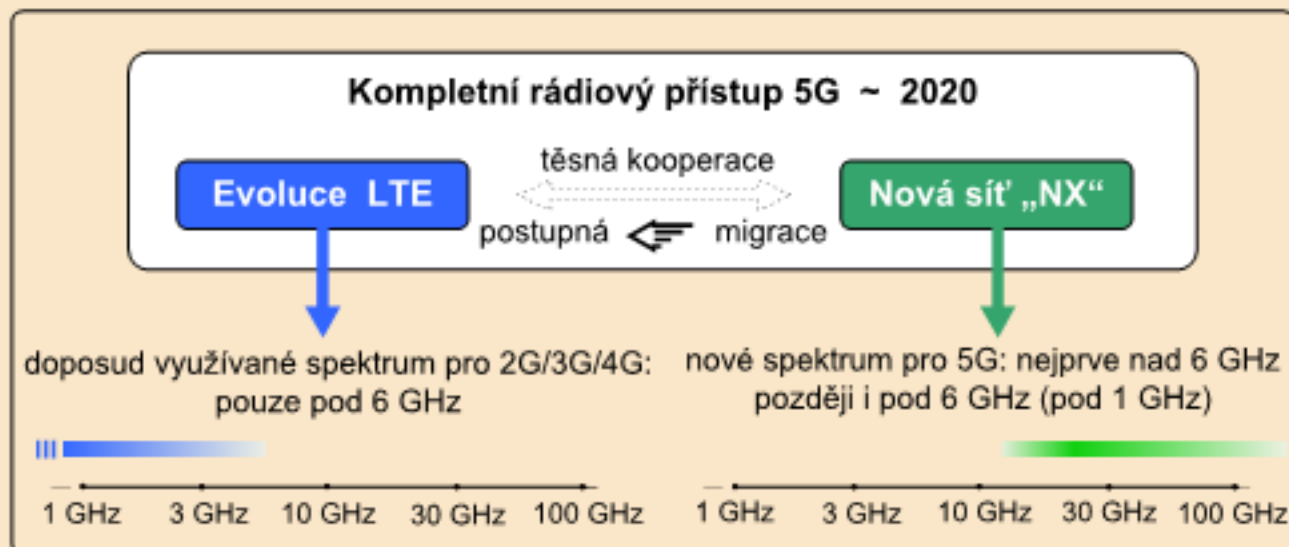


signál LTE

vývoj Rel. 8...12...; přístup OFDM, kde alokované pásmo obsahuje síť ortogonálních nosných vln ($\Delta f = 15 \text{ kHz}$) ve frekvenční oblasti a **4G** tu odpovídající sekvenci OFDM symbolů ($T_u = 1/15 \cdot 10^3 = 66,66 \mu\text{s}$) v časové oblasti; šíře pásma 1,4; 3; 5; 10; 15; 20 MHz, možnost agregace až $5 \times 20 = 100 \text{ MHz}$; rozvinutá technika MIMO;

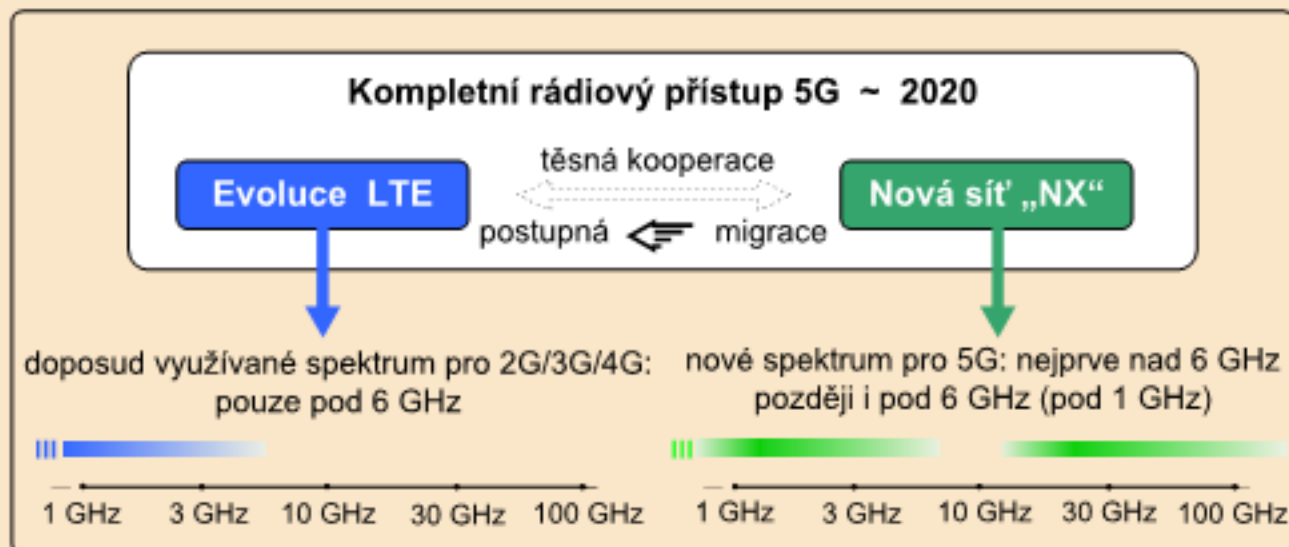


Frekvenční management současné čtvrté a budoucí páté generace



- 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



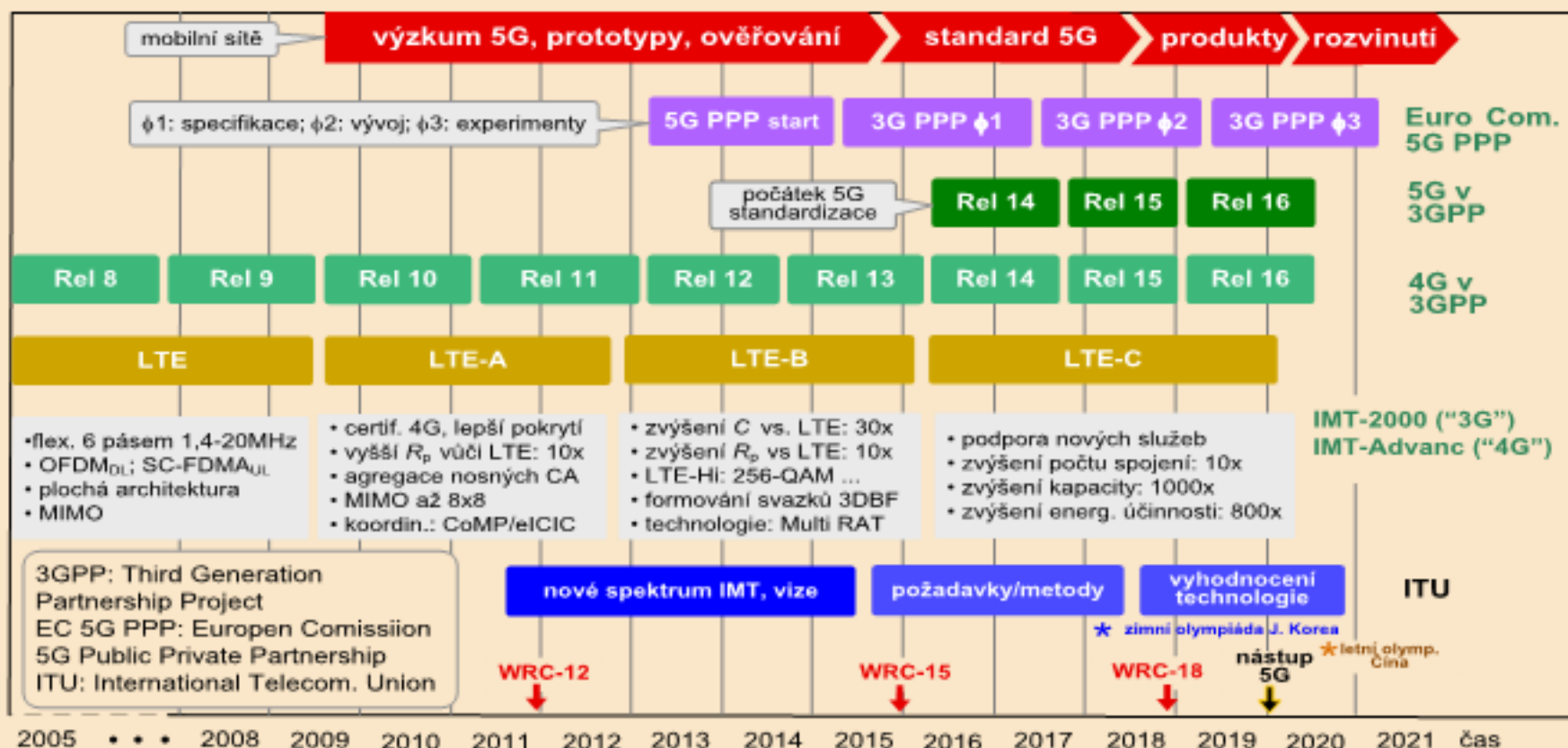
- Rádiový přístup v systému 5G bude realizován jednak pomocí neustále se zdokonalující sítě LTE v konvenčních pásmech do cca 6 GHz, jednak zcela novou sítí „NX“, využívající spíše vyšší pásma, včetně milimetrové oblasti ($f = 30$ až 300 GHz, tj. $\lambda = 1$ cm až 1 mm).
- Pásma do 6 GHz budou oproti 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).

Mobile spectrum requirements and target bands for WRC-15

Table 5 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

Etapy vývoje buňkových sítí současné čtvrté a budoucí páté generace



Vývoj veřejné pozemní mobilní komunikace (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. etap LTE, LTE-A, LTE-B a LTE-C. **V roce 2016 v rámci Rel. 14 začne standardizace systému 5G** (práce na 4G pokračují).
- 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 (φ 1, φ 2, φ 3).
- Strategii celkového vývoj ve světě mobilních komunikací pak 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.)

IMT = IMT-2000 & IMT-A

Mobile broadband systems, especially IMT, contribute to global economic and social development by providing a wide range of multimedia applications, such as mobile telemedicine, teleworking, distance learning and other applications. IMT is the root name, encompassing both IMT-2000 and IMT-Advanced. IMT systems are intended to provide telecommunication services on a worldwide scale, regardless of location, network or terminal used. IMT systems have been the main method of delivering wide area mobile broadband applications. In all countries where IMT systems are deployed there is a continuing significant growth in the number of users of IMT systems and in the quantity and rate of data carried, the latter being driven to a large extent by audiovisual content.

This economic success is built on IMT-2000, but future economic welfare will depend upon the growth of new technologies, such as IMT-Advanced and so on. Any regulatory changes or uncertainty that jeopardizes those needs should be considered very carefully. As the European Commission Communication on radio spectrum policy² notes, "The EU's timely provision of harmonized frequencies "triggered" the development of new pan-European digital cellular system (GSM)".

Evropský projekt 5G PPP (5G Public Private Partnership)

Vedle globálního projektu 3GPP z konce devadesátých let min. st. hraje ve standardizačních aktivitách systémů 5G stále důležitější úlohu také evropský projekt 5G PPP (5G Public Private Partnership) [8], [9]. Jeho výsledky se uplatní v globálním měřítku, avšak přímý zisk z něho by měla mít především Evropa. Projekt byl otevřen Komisí EU koncem r. 2013, a to na základě iniciativy velkých průmyslových výrobců i malých a středních podniků SME (small medium enterprises), telekomunikačních operátorů a poskytovatelů služeb, akademických i jiných výzkumných pracovišť a dalších relevantních institucí. Projekt 5G PPP by měl napomáhat k řešení problémů z oblastí architektury, technologií a standardů komunikačních infrastruktur příštích generací, užívajících fixní i rádiové (bezdrátové) spoje. Speciálně pro systém 5G NX by měla v porovnání s rokem 2010, infrastruktura navrhovaná projektem 5G PPP, přinést po roce 2020 následující výsledky:

- Zajistit 1000-krát vyšší plošnou rádiovou kapacitu, a to především zvýšenou spektrální účinností, ale i získáváním nových pásem.
- Snížit energetický odběr o 90%, hlavně úsporami v rádiových přístupových sítích.
- Redukovat průměrný čas budování IP služeb z nynějších 90 hodin na 90 minut.
- Zajistit bezdrátové připojení na Internet pro 7 triliónů terminálů, které budou sloužit 7 miliardám uživatelů (z toho podstatná část formou IoT).
- Vytvořit spolehlivý Internet s nulovými vnímatelnými výpadky ve službách.

Základní ideou projektu 5G PPP je upevnění pozic Evropy v oblastech, kde je již dnes silná, nebo kde existuje potenciál pro vytváření nových pracovních příležitostí, které by souvisely s podporou chytrých měst, inteligentních transportních systémů, e-zdravotnictví (e-health), nových forem vzdělávání atd.

Iniciativa 5G PPP by měla pozvednout evropský průmysl tak, aby byl schopen silné konkurence v rámci globálního trhu a otevřel nové inovační příležitosti.

Evoluční vývoj systému LTE: Rel. 8 až Rel. 14 (LTE-A Pro) „více zdrojů (densifikace a více spektra) a vyšší účinnost (interfer. management)“

ICIC: inter-cell interference coordination

CoMP: coordinated multipoint

MCA: massive carrier aggregation

LAA: licenced-assisted access

HetNet: heterogeneous network

UDN: ultra dense network

D2D: device-to-device (direct mode connection)

ACA: Advanced Carrier Aggregation

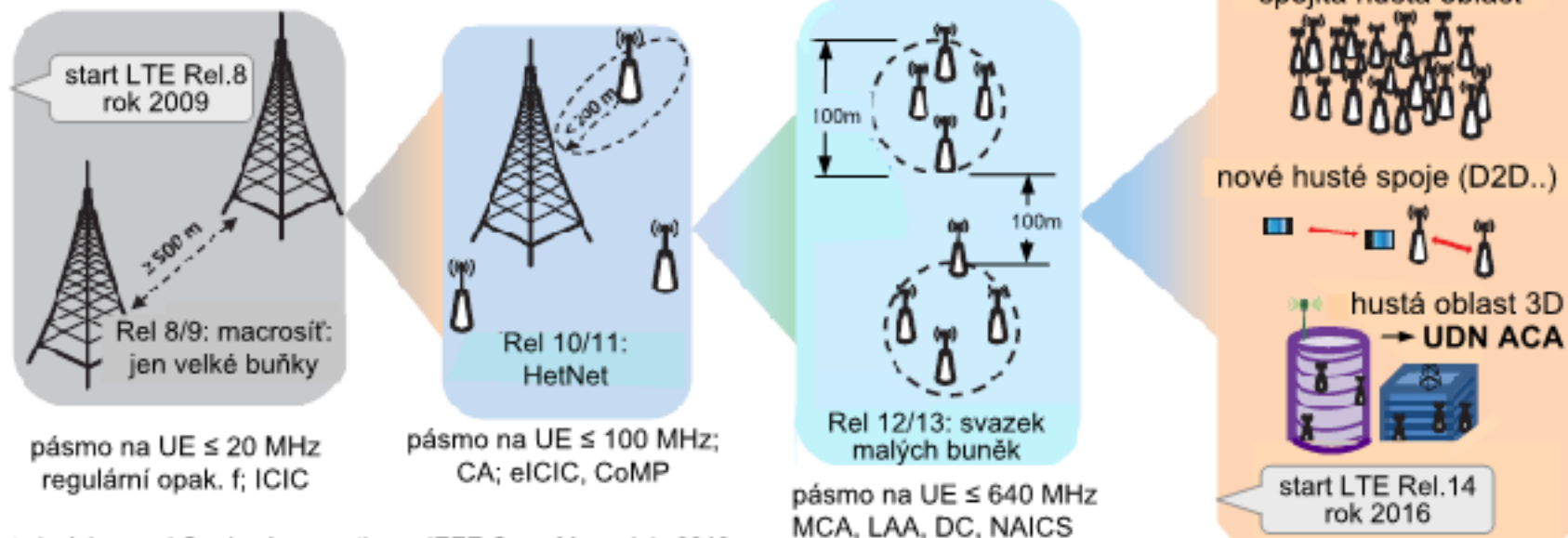
NAIC: Network Assisted

Interference Cancellation

DC: Dual Connectivity

LTE Rel. 10 ≈ LTE-A

LTE Rel. 13 ≈ LTE-A Pro



Liu et al.: Advanced Carrier Aggregation ...IEEE Com. Mag., July 2016

Úvodní Rel. 8/9: typická homogenní pravidelná struktura makrobuněk, s výkonnými vysílači ve stanici BS (eNodeB); RF pásmo nejvýše 20 MHz (bez agregace nosných vln)

Rel. 10/11: podpora heterogenních sítí (HetNet) s makro i piko buňkami a s reléovými uzly RRN v módu FDD/TDD; agregace až 5 nosných po 20 MHz ≈ 100MHz (intra/inter band)

Rel. 12: technika cell-on/cell-off; modulace vyšších řádů (HOM), pokročilé techniky MIMO; dynamický TDD; DC (Dual Connectivity): UE je současně připojena k malé buňce i k velké dešťníkové buňce., což zvyšuje propusnost UE, a to zejména na okraji buněk, dále zlepšuje mobilitu a snižuje zátížení sítě signalizací.

Rel. 13 (LTE-A Pro): masívní resp. obohacená technika MCA resp. eCA, tj. využívání malých buněk s nelicencovanými pásmy v teritoriu velkých licencovaných buněk (přístup s asistovanou licencí LAA); .

Evoluční vývoj systému LTE v Rel. 14

Ultrahusté sítě s mnoha nosnými MC-UDN (Multi-Carrier Ultra-Dense Networks)

jsou sítě, které pracují s mnoha nosnými, náležejícími k diversifikovaným zdrojům spektra. Stanice BS jsou u nich v městském prostředí na každém stožáru veřejného osvětlení, ve vnitřním prostředí se pak stanice BS nacházejí cca 10 m od sebe

Sítě UDN začínají být v současné době velmi aktuální v systému LTE Rel. 14. Zde nabízejí několikanásobné zvětšení propustnosti, a to nejen pro současný standard LTE/4G, ale i pro blížíící se systémy 5G. Sítě MC-UDN využívají efektivně alokované nosné, s ohledem na aktuální provozní zatížení, úroveň interferencí a na kondici kanálu.

	tradiční síť 2014	hustší síť 2015-2017	velmi husté síť 2017-2020	ultra husté síť po roce 2020
BS / km ²	7 BS	21 BS	26 BS	93 BS
vzdálenost BS	305m	237m	209m	112m
hustota provozu	~1 Gb/s/km ² 4 Mbit/s	~3 Gb/s/km ² 8 Mbit/s	~10 Gb/s/km ² 10 Mbit/s	~40 Gb/s/km ² 16 Mbit/s
aktivních uživatelů	250	625	1000	~2500

pro většinu mobilních stanic byla v roce 2010 postačující reálná datová rychlost ~1Mbit/s na jednoho uživatele, v r. 2020 to bude datová rychlost ~10 Mbit/s a v r. 2030 se očekává rychlost až 100 Mbit/s

NOKIA Ultra Dense Networks. White Paper © Nokia 2016

Pokročilá technika sdružování nosných ACA (Advanced Carrier Aggregation)

Nezbytnou podmínkou nasazení sítí MC-UDN je však současné aplikace pokročilé techniky sdružování nosných ACA. Ta zahrnuje rychlou selekci nosných (fast carrier selection), přepínání nosných (carrier switching), použití speciálních úsporných nosných (lightweight carriers), metody oportunistického přenosu (opportunistic transmission), hybridního opakování přenosu HARQ napříč mnoha nosnými a adaptivní optimalizace přidělování zdrojů (adaptive resource optimization scheme). Technika ACA zajišťuje efektivní využívání zdrojů (carriers), přihlížející k aktuálnímu provoznímu zatížení, stavu rádiového kanálu a k úrovni interferencí.

Pokračování vývoje úzkopásmového Internetu věcí NB-IoT

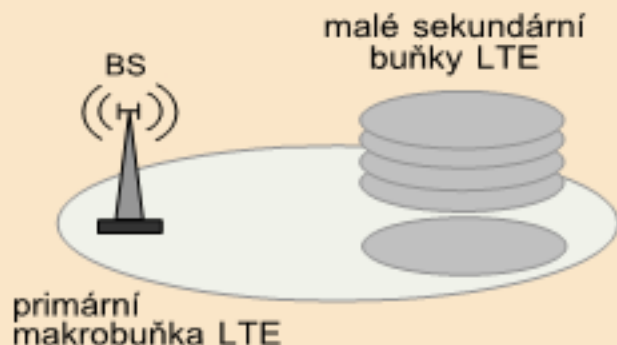
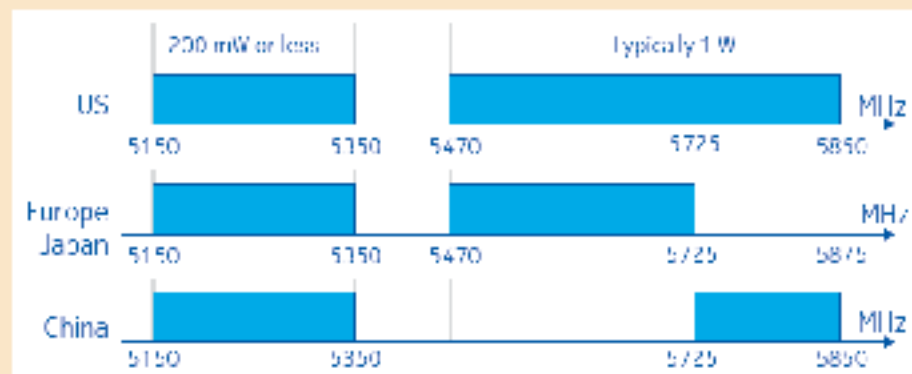
V rámci Rel.14 bude vývoj NB-IoT pokračovat. Tato technologie bude poskytovat metody určování polohy, multikastové služby potřebné např. pro update softwaru, nebo pro sdělení týkající se skupinové mobility ap.

Bezlicenční spektrum a přístup s asistovanou licenci LAA

Bezlicenční spektrum v okolí 5GHz

Současné frekvenční spektrum se dělí na úseky licencované, bezlicenční a úseky s asistovanou licenci. V pásmu 5 GHz jsou úseky bezlicenčního spektra, jež lze využít, při dodržení výkonových limitů, v síti LTE. Tyto úseky je možné sdružovat formou agregace nosných CA (Carrier Aggregation) s licencovanými segmenty. Tento přístup s asistovanou licenci LAA posiluje celkovou kapacitu sítě LTE v přetížených lokalitách. V praxi se uplatňuje od r. 2013, v rámci Rel.12.

široké bezlicenční spektrum v okolí 5GHz v různých regionech (v Evropě 455 MHz)



bezlicenční spektrum

licencované spektrum



sekundární buňka LAA:

- oportunistické navýšení kapacity

primární buňka LTE:

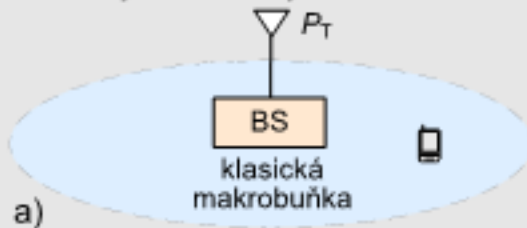
- spolehlivá signalizace
- bezešvé pokrytí a **mobilita**
- uživatelská data s LTE QoS

Přístup s asistovanou licenci LAA (Licence Assisted Access)

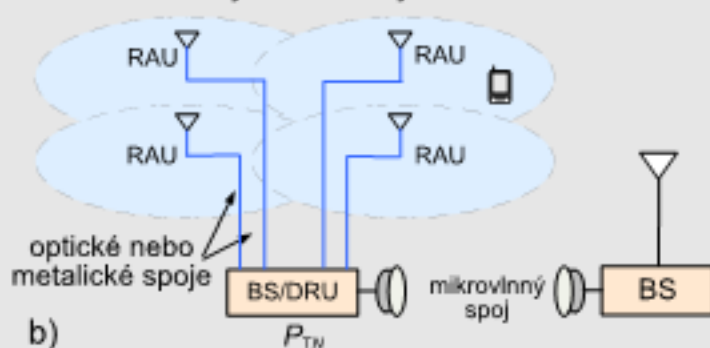
V technice LAA malé sekundární buňky, budované na teritoriu velké primární buňky, využívají příležitostně nelicencované úseky spektra a tím posilují propustnost celé sítě. Provoz je koordinován primární buňkou, pracující v licencovaném spektru. K zajištění koexistence s jinými technologiemi využívajícími stejná pásma (např. IEEE 802.11-WiFi), se zde aplikuje procedura LBT (listen before talk, tj. naslouchání před hovorem) a metoda přerušovaného provozu s omezeným obsazením kanálu.

System s distribuovanými anténami DAS

klasický anténní systém makrobužky



distribuovaný anténní systém DAS



BS: Base Station; RAU: Remote Antenna Unit;
DRU: Distribution Radio Unit

ztráty šířením v makrobužce:

$$\frac{P_T}{P_R} = L_0 \cdot d^\gamma = L_0 \left(\frac{A}{\pi} \right)^{\frac{\gamma}{2}}$$

ztráty šířením v mikrobužce:

$$\frac{P_{TN} / N}{P_R} = L_0 \left(\frac{A/N}{\pi} \right)^{\frac{\gamma}{2}}$$

celkový výkon v mikrobužkách:

$$P_{TN} = P_T \cdot N \cdot N^{-\frac{\gamma}{2}} = P_T \cdot N^{1-\frac{\gamma}{2}}$$

redukce výkonu v DAS (DL):

$$\frac{P_{TN}}{P_T} = N^{1-\frac{\gamma}{2}}$$

redukce výkonu v UT (UL):

$$\frac{P_{TN}}{P_T} = N^{-\frac{\gamma}{2}}$$

P_T : vysílaný výkon v makrobužce; P_{TN} : celkový vysílaný výkon v DAS;
 P_R : přijímaný výkon (stejný v makro i DAS); L_0 : ztráty šířením v referenční vzdálenosti; γ : exponent ztrát šířením ($\gamma = 2 \dots 7$); d : poloměr makrobužky; $A = \pi d^2$: plocha makrobužky; N : počet dílčích buněk v DAS

Na sestupné trase DL i vzestupné trase UL se ztráty šířením v makrobužce zvětšují s rostoucím g a N rychleji, než v mikrobužce, takže aplikace DAS přináší energetické úspory. Konkrétní hodnoty uvedených redukčních faktorů jsou pro různé hodnoty γ a N uvedeny v tabulce níže.

		$\gamma=2$	$\gamma=3$	$\gamma=6$			$\gamma=2$	$\gamma=3$	$\gamma=6$
$N = 4$	DL	1,00	0,50	0,06	$N=7$	DL	1,00	0,38	0,02
	UL	0,25	0,12	0,015		UL	0,14	0,05	0,002

$$\pi d^2 = A; d^2 = A/\pi$$

$$d^\gamma = d^{(\gamma/2) \cdot 2} = (A/\pi)^{\gamma/2}$$

$$P_T/P_R = L_0 (A/\pi)^{\gamma/2}$$

System s distribuovanými anténami DAS

klasický anténní systém makrobuňky

ztráty šířením v makrobuňce:

$$\frac{P_T}{r} = L_0 \cdot d^\gamma = L_0 \left(\frac{A}{\pi} \right)^{\frac{\gamma}{2}}$$



Plocha buňky o poloměru r

$$S = \pi r^2$$

$$= L_0 \left(\frac{A/N}{\pi} \right)^{\frac{\gamma}{2}}$$

a)

Výkon přijímaný na obvodě této buňky.....

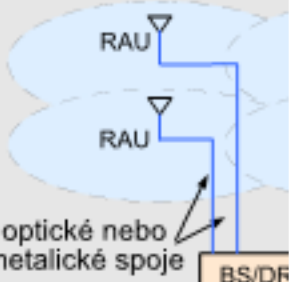
$$P_r \approx \text{konst } r^3$$

Poměr „výkon/plocha“ :.....

$$P_r / S = (\text{konst}/\pi) r$$

$$P_T \cdot N \cdot N^{-\frac{\gamma}{2}} = P_T \cdot N^{1-\frac{\gamma}{2}}$$

distribuovaný antén



Závěr: poměr výkon/plocha se při zmenšování r zmenšuje úměrně $r \rightarrow$

- tedy např. při zmenšení poloměru původní buňky r na polovinu, se zmenší potřebný vysílací výkon terminálu UT právě $(2^3) = 8$ krát (tedy na jednu osminu původní hodnoty).

- celkový potřebný maximální vysílací výkon jediné základnové stanice BS ve zmenšené buňce se zmenší rovněž 8 krát; k pokrytí původní plochy velké buňky jsou potřebné cca 4 menší buňky, takže potřebný celkový vysílací výkon stanic BS v těchto 4 menších buňkách je $4 \cdot (1/8) = 0,5$ původní hodnoty výkonu stanice BS původní velké buňky.

$$r^{1-\frac{\gamma}{2}}$$

$$\sqrt{\frac{\gamma}{2}}$$

vysílaný výkon v DAS;
 L_0 : ztráty šířením v
 ($\gamma = 2 \dots 7$); d : poloměr
 et dílčích buněk v DAS

BS: Base Station; RAU: Remote Antenna; DRU: Distribution Radiator

Na sestupné trase D
 g a N rychleji, než v
 hodnoty uvedených redukčních faktorů jsou pro různé hodnoty γ a N uvedeny v tabulce níže.

ují s rostoucím
 Konkrétní

		$\gamma=2$	$\gamma=3$	$\gamma=6$			$\gamma=2$	$\gamma=3$	$\gamma=6$
$N = 4$	DL	1,00	0,50	0,06	$N=7$	DL	1,00	0,38	0,02
	UL	0,25	0,12	0,015		UL	0,14	0,05	0,002

$$\pi d^2 = A; d^2 = A/\pi$$

$$d^\gamma = d^{(\gamma/2) \cdot 2} = (A/\pi)^{\gamma/2}$$

$$P_T/P_R = L_0 (A/\pi)^{\gamma/2}$$

Přenos televizních signálů v mobilních sítích: eMBMS

V pozemní televizi provozované v mobilních sítích se využívá tzv. **obohacená multimedialní rozhlasová a multikastová služba eMBMS** (enhanced Multimedia Broadcast Multicast Service). Tato služba zajišťuje hlavně distribuci televizních programů, jež má oproti klasické televizi závažné přednosti:

1. Mobilita a interaktivita: služba eMBMS v síti LTE poskytuje uživatelským terminálům UT dokonalou mobilitu a spolehlivý rychlý zpětný kanál s trvalou dostupností a s minimální latencí.

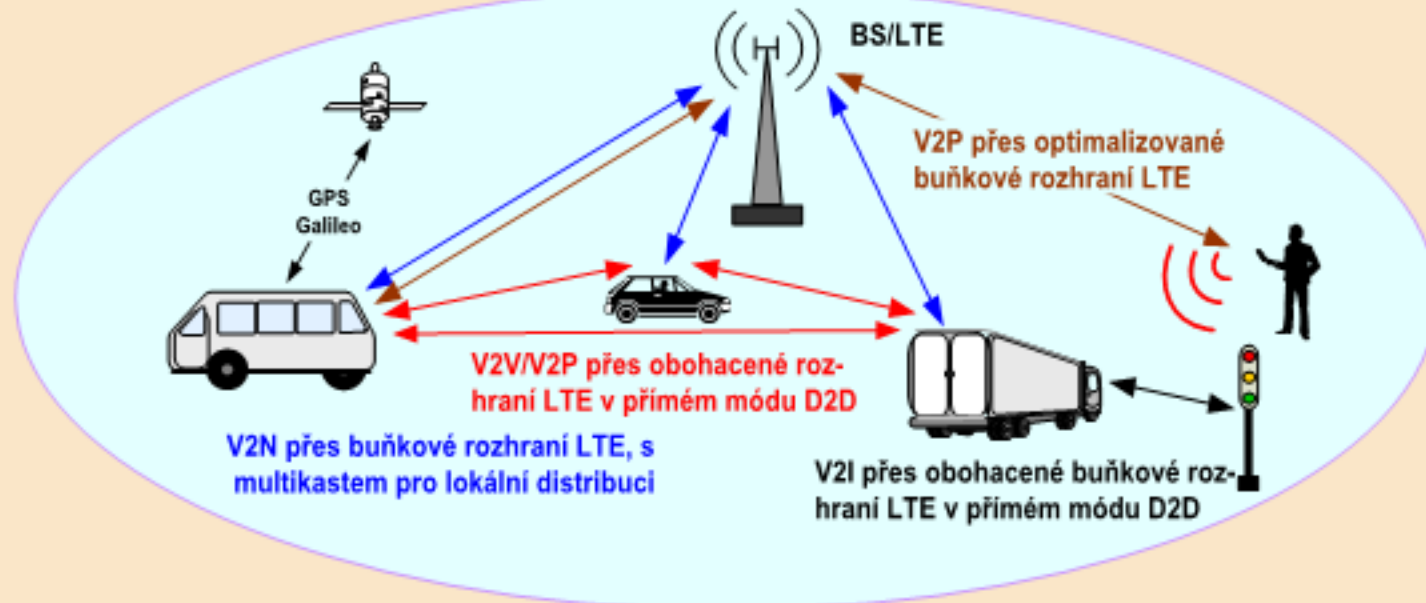
2. Různorodé terminály: signál LTE lze přijímat různými typy uživatelských terminálů UT (smartphony, tablety apod.), jež se mohou lépe přizpůsobit konkrétním příjmovým scénářům, než klasický tv přijímač, většinou vyžadující venkovní anténu, nebo kabelový rozvod.

3. Vysílání multicast a simulcast: kromě obvyklého „rozhlasového“ vysílání (broadcast) určeného bez 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.

4. Monofrekvenční síť SFN: technika eMBMS je velmi dobře slučitelná s koncepcí 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. Síť SFN v souhrnu navíc vykazují, oproti klasické koncepci výkonných TV vysílačů, mnohem vyšší celkovou spektrální i energetickou účinnost.

5. Rozšířený počet diváků: počet mobilních terminálů s vlastní anténou je podstatně vyšší, než počet běžných TV přijímačů s klasickou fixní nástřešní anténou, takže působnost televizního vysílání se zavedením služby eMBMS podstatně rozšíří.

Inteligentní transportní systémy ITS



Velice účinnou cestou ke zvýšení provozní bezpečnosti a efektivity silniční i jiné dopravy jsou inteligentní transportní systémy ITS (intelligent transport systems), využívající technické prostředky rádiové komunikace. Systém LTE čtvrté generace je pro tuto aplikaci velice vhodný, neboť má rozvinutou infrastrukturu, poskytující špičkové technické parametry, při vysoké míře zabezpečení přenosu. K podpoře inteligentní dopravy vyvíjí projekt 3GPP pro systém LTE řešení ITS založená na různých scénářích konektivity mezi vozidlem (V) na straně jedné a různými subjekty (X) na straně druhé [2]. Toto řešení, značené symbolem V2X a načrtnuté na obrázku 4, je zaměřeno na scénáře:

- vozidlo-vozidlo V2V (vehicle-to-vehicle),
- vozidlo-silniční infrastruktura V2I (vehicle-to-roadside infrastruktura),
- vozidlo-chodec V2P (vehicle-to-pedestrian) a
- vozidlo-síť V2N (vehicle-to-network).

Internet věcí IoT a komunikace MTC: základní poznatky

Internet věcí IoT je síť fyzických předmětů, strojů, lidí a jiných subjektů živé i neživé přírody, vybavených senzory, aktuátory, měřiči fyzikálních veličin apod. Ty jim pomoci komunikačních prostředků umožňují vzájemnou výměnu dat, využívanou v inteligentních aplikacích a službách..

Základní charakteristiky IoT: v IoT se většinou přenášejí velmi malé objemy dat, leckdy v přerušovaných časových cyklech; běžné jsou masívní počty levných terminálů IoT s nízkou výkonovou spotřebou, často se vyžaduje nízká latence přenosu a vysoká spolehlivost, se zlepšeným pokrytím určených oblastí.

Konektivita v IoT: základním technickým prostředkem IoT je komunikace strojového typu MTC (Machine-type Communications), resp. M2M (Machine-to-Machine communications). Ta probíhá zcela automaticky, bez jakékoliv spoluúčasti člověka, a je kromě metalických a optických spojů zajištěna hlavně rádiovými prostředky, jež přinášejí výhody terminálové mobility, rychlé, levné a šetrné výstavby. Ty jsou dvojího typu:

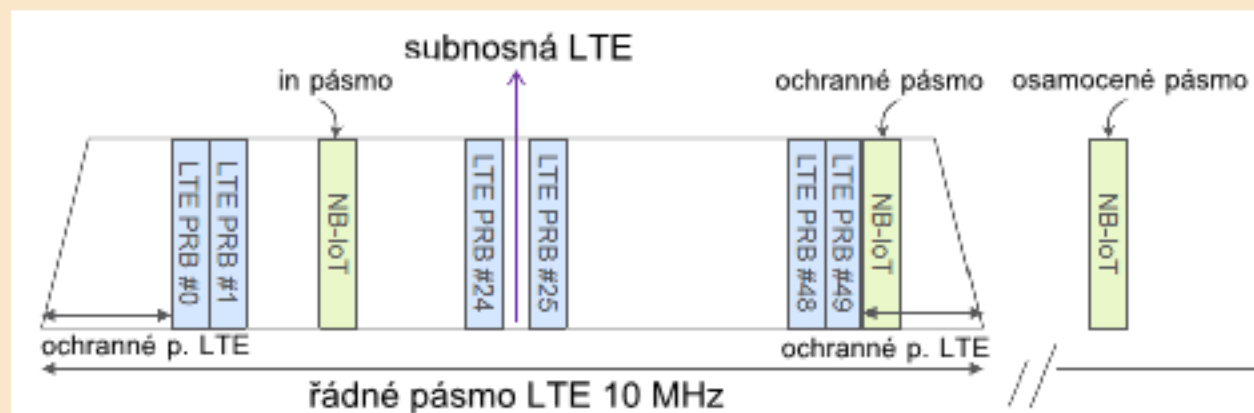
- dedikované (proprietární) rádiové systémy, vyvinuté jen pro potřeby IoT (Sigfox, LoRa,...).
- veřejné rádiové sítě buňkové (3GPP: GSM/2G, HSPA/3G, LTE/4G...), a také sítě lokální a personální (IEEE802.11/15...: WiFi, Bluetooth...).

Veřejné rádiové sítě v systémech IoT nebyly primárně určeny pro IoT, a proto jejich úspěšné nasazení zde vyžaduje určité softwarové úpravy a někdy i hardwarové zásahy. Velký pokrokem ve vývoji IoT budou veřejné mobilní systémy páté generace (5G), očekávané po r. 2020. Ty jsou od počátku navrhovány tak, aby mohly kromě svých klasických funkcí, tj. hovorové a širokopásmové komunikace, optimálně realizovat právě funkcionality typické pro Internet věcí.

Rozsah aplikací a služeb je v IoT obrovský. Nejrůznější oblasti využití se již v současnosti objevují ve sféře zdravotní péče, monitorování životního prostředí, logistice, sběru komunálních i jiných dat, v průmyslové výrobě, dopravě, energetice a v dalších sférách našeho života. Dílčí aplikace IoT budou v synergetickém spojení vytvářet inteligentní osobní doplňky chytré domy, města a energetické sítě, inteligentní automobily i celé dopravní systémy, inteligentní továrny, ap.

Úzkopásmový Internet věcí NB-IoT (Narrowband-IoT)

- Projekt 3GPP umožňuje v rámci Rel. 13 úpravy standardu GSM (EC-GSM-IoT) a standardu LTE (LTE-MTC), které je výrazně přizpůsobují k aplikacím Internetu věcí IoT. Úpravy vedou k rozšíření pokrytí, zjednodušení uživatelských terminálů a prodloužení životnosti akumulátorů - při zachování zpětné kompatibility.
- Projekt 3GPP/Rel. 13 dále zavádí novou technologii úzkopásmového Internetu věcí NB-IoT. Ta vedle zmíněných přínosů podporuje flexibilní nástup IoT tím, že umožňuje využití malých úseků volného spektra. Technologie NB-IoT není úplně zpětně slučitelná s existujícími systémy 3GPP, může ale kooperovat se staršími verzemi GSM (GPRS) i LTE. Přitom si zachovává hlavní atributy LTE (přístup OFDMA/SC-FDMA), kanálové kódování, adaptaci rychlosti atd). Proto její zavedení do praxe bude poměrně snadné (Q1 2017).
- V technologii NB-IoT je základní šířka pásma redukována na 180 kHz na DL i UL, což vede k určitému snížení datové rychlosti. Získá se však větší flexibilita v rozvíjení této varianty, jak ukazuje obr. 3. Pro NB-IoT lze využívat segmenty o šířce 200 kHz získané v pásmech 850/900 MHz standardu GSM/GPRS. U standardu LTE, se mohou adaptovat pro NB-IoT segmenty o šířce 180 kHz, určené jednomu bloku PRB (=12x15 kHz) uvnitř některého regulárního LTE pásma; lze však také využít segmenty v ochranném pásmu (guard band) mezi LTE systémy. Často se ale uplatní kombinace všech tří přístupů.



Wireless Connectivity for the Internet of Things

Smart Home



- Security & alarm
- Light control
- HVAC control
- Remote control
- Door control
- Energy efficiency
- Entertainment
- Appliances

Wearables



- Health monitor
- Fitness trackers
- Smart watch
- Smart glasses
- Smart bands
- E-textiles
- Hearing-aid

Smart City



- Traffic management
- Water distribution
- Waste management
- Security
- Lighting
- Environmental monitoring
- Infrastructure

Industry Automation



- Smart machine
- Surveillance camera
- Factory automation
- Asset tracking
- Logistics and optimization of supply chain

Smart Energy



- Generation & trading
- Transmission
- Distribution & metering
- Storage
- Services

Connected Car

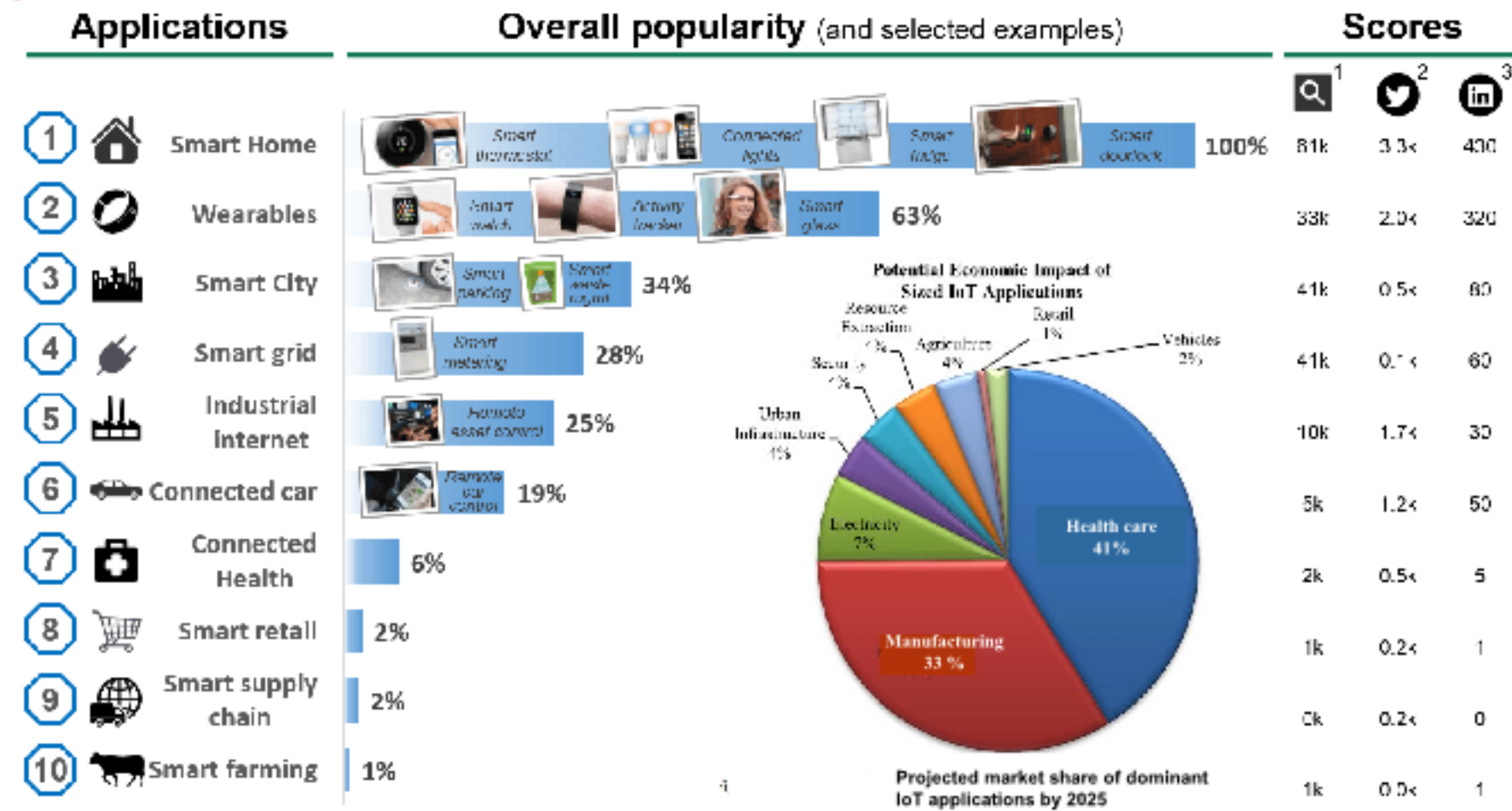


- V2V / V2X / V2I communications
- eCall
- Infotainment
- Traffic control
- Navigation
- Autonomous vehicles
- Maintenance

Wireless Connectivity

A single wireless technology can not accommodate the diverse need of IoT markets

Aplikace Internetu věcí a jejich objem v r. 2025



Internet věcí – fenomén příštích let

Klasický internet se stal, během již desítky let probíhajícího vývoje, jedním z nejdůležitějších prostředků komunikace mezi lidmi – H2H (Human to Human). Jeho přirozeným vývojovým stupněm je Internet věcí IoT (Internet of Things), který umožňuje automatickou vzájemnou komunikaci věcí. Přitom **pod pojmem „věc“ se v IoT rozumí objekt fyzikálního světa – physical things, nebo informačního světa – virtual things.**

KOMUNIKACE MEZI STROJI

Základním technickým prostředkem Internetu věcí je komunikace stejného typu M2M (Machine-to-Machine Communication), naneštěstí také jako komunikace mezi stroji M2M (Machine-to-Machine communication). Ta probíhá bez jakéhokoli spojení člověka, obvykle mezi technickým M2M a serverem, nebo přímo mezi terminály M2M. Pořiče nekompletní (propojení) mezi těmito subjekty zajišťuje přídi užasná telekomunikační infrastruktura, v těsné kooperaci s konvenčním Internetem. Také může využívat fyzikální nebo optické kabele, ve většině případů IoT je mnohem vhodnější, nebo dokonce nutně, spíše rádiově. Rádiové prostředky mají velké výhody v mobilním připojení uživateřů systému, jejich budování a údržba je mnohem sychlejší a nenáročnější než u drátového prostředí.

UPLATNÍ SEI MOBIILNÍ RÁDIOVÉ SÍTĚ

V Internetu věcí se však mohou uplatnit úplně jiná než rádiové prostředky – satelitní, či jiná lokálního typu (Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee apod.), nebo metropolitní sítě s větším dosahem (WiMAX), případně celoplošné bunčkové sítě všech generací, tedy 4G GSM/UMTS a 5G 5G/SA, či a zejména 6G LTE/6G. Tyto sítě jsou díky dlouhodobému vývoji velice propracované. Mohou poskytovat kvalitní obsluhu (úspěšně) spojením, či ve vnitřním (indoor) prostředí, nebo v prostředí venkovním (outdoor), a to v lokálním, regionálním a dnes již globálním měřítku.

Uvedené veřejné sítě však nebyly primárně určeny pro komunikaci M2M, a proto jejich úspěšné nasazení v doméně IoT vyžaduje obvykle určité úpravy jejich komunikačních parametrů. Často jsou nezbytně hardwarově zleštěny. Z toho důvodu je



„Strojkopiových“ funkcí, čímž jsou bohužel a multimediální komunikace, zejména rychlé přenosy dat a další strojkopiové služby, optimálně realizovat právě funkcionalita typická pro Internet věcí. Zde se totiž většinou vyžaduje síce velmi pomalý přenos dat, avšak velice široká šířka pásma. Často je žádoucí minimální latence a vysoká spolehlivost přenosu, včetně několikaaktivní doby napětých zdrojů (až IoT je apod.

čož mu umožní sdílet všechny atributy těchto komunikačních prostředků s jinými prvky IoT, nacházejícími se jak uvnitř, tak vně města. Vývoj v této oblasti směřuje také k automatizaci zranitelným řízením.

- Management dopravních prostředků (fleet management). Klasické způsoby řízení silniční dopravy budou od základů ovlivněny technologií IoT, zejména jejími variantami sdílenými na vysoké úrovni.

- Chytré domy (smart homes). IoT poskytl nejmodernější prostředky pro řízení domů a bytů, řízení jejich energetického hospodaření, ověřování a udržování teploty, monitorování aktivit dětí, vytváření osobních elektronických záznamů.
- Chytrá města a smart cities. IoT bude podporovat řízení dopravy a parkování vozidel, ochrání veřejné prostranství, umožní nová řešení v oblasti bezpečnosti, zejména osobních veřejných bezpečností, managementu odpadového hospodářství a veřejné služby.
- Nová řešení v oblasti IoT (services). Typickým příkladem je aplikace pro sledování mobilní výpočetní techniky, která jsou díky chytré domy IoT vždy bezpečnější (always-on) díky možnosti nastavení bezpečnosti. Příkladem mohou být i služby týkající se řízení chůze, chytré náramkové hodinky, chytré boty, inteligentní oblečení, chytré oblečení, chytré oblečení pro zdravotní sledování apod.
- Chytré sítě (smart grids). Sítě pro přenos, rozvod a distribuci elektrické energie, včetně energie, vody a plynu, a to v lokálním, regionálním a postupně i v globálním měřítku.
- Průmyslová automatizace (Industrial automation). Tato aplikace obklopuje IoT se zaměřením především na chytré výrobní podniky, kde se využívá IoT i u výroby automatizace výroby, zúčastňuje bezpečnost výrobního procesu, zúčastňuje monitoringa, managementu spotřeby energie. Může se kontrolovat skladových zásob apod. Jak je patrné, Internet věcí IoT již dnes sahá do našeho života a jeho působení se má stále prohlubovat. Jeho výsledkem bude

K rádiovému spojení v IoT mohou sloužit speciální jednoúčelové „dedikované“ rádiové systémy, určené právě jen k zamýšlenému použití v Internetu věcí.

K rádiovému spojení v IoT mohou sloužit speciální jednoúčelové „dedikované“ rádiové systémy, určené právě jen k zamýšlenému použití v Internetu věcí. Tyto systémy pracují ve frekvencích pásmech, určených pro národní regulační úřady ve ČR Českým telekomunikačním úřadem (ČTÚ). Často zde využívají i tzv. licenční pásmo. To má charakteristiku například systémů LRRWAN (Long Range Wireless Access System) nebo systémů NB-IOT, které se v současnosti již intenzivně budují také v České republice.

Nové rádiové prostředky veřejných mobilních technologií do světa IoT přinášejí například, avšak bezdůvodně se velmi rychle mění, takže ještě do roku 2020 očekáváme veřejné sítě pro budování čísel aplikací Internetu věcí.

VÍCE JINÉ MOBIILNÍ SYSTÉMY 5. GENERACE

Velkým krokem vpřed v technologii IoT budou veřejné mobilní systémy 5. generace (5G), očekávané v praxi okolo roku 2020. Ty jsou od samého počátku navrhovány tak, aby mohly kromě svých klasických

JŽ JSOU NA SVĚTĚ RŮZNÉ PŘÍKLADY VYUŽITÍ

Internetu věcí M2M v prostředí IoT má ohniskový charakter v široké oblasti aplikací a služeb. Nejčastěji příklady využívají je již v současnosti objevují ve sféře zdravotnictví, v automobilovém průmyslu, bezpečnosti, logistice, silniční komunikaci a jiných oblastech. Perspektivně se IoT uplatní, zejména do podporovat zejména následující oblasti aplikace:

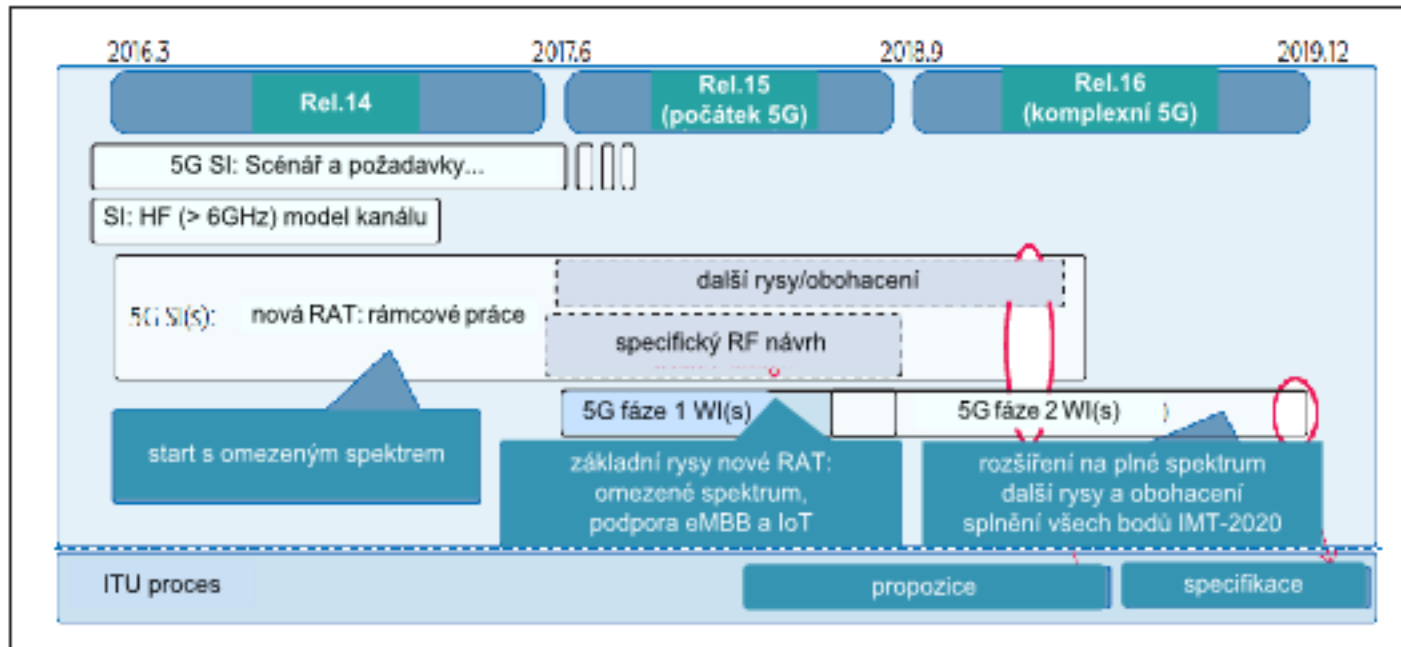
- Automobilové techniky (autonomous). Zásadním prvkem IoT v oblasti komunikace přijetých aut (intelligent commercial car), tedy autonomní, který umožňuje dopravě mobilní přístup na klasický Internet a také na lokální síťové sítě (Wi-Fi apod.)

Velkým krokem vpřed v technologii IoT budou veřejné mobilní systémy 5. generace (5G), očekávané v praxi okolo roku 2020.

nových služeb. Tyto systémy budou řídit dopravu v reálném čase (real-time navigation) výměnou aktuálních informací, dokud není dosaženo pokročilých představitelů moderního komunikace (autonomous).

de vývoje a zvyšování má širší dimenzi, ale přesto nám i další čtenáři čtení. Proto je nutné rozvíjet techniku IoT všemi směry a postupně.

Standardizace systému 4. generace LTE, směřující ke generaci 5G (1)



Proces standardizace rádiové přístupové sítě RAN mobilních buňkových systémů, podle propozic 3GPP 5G PPP, směřující od čtvrté generace 4G (LTE/LTE-A) k páté generaci 5G (NX)

Mezinárodní telekomunikační unie ITU-R určuje celkovou obecnou strategii vývoje mobilní komunikace, směřující k páté generaci 5G. Konkrétní postupy potom řídí Partnerský projekt pro třetí generaci 3GPP a nový projekt 5G PPP. Podle představ obou těchto institucí současný prudký technologický rozvoj systému LTE přinese celkové zdokonalení nejen pro tento systém, ale bude „dláždít cestu“ do života i novému systému 5G NX. Oba tyto fenomény musí využívat progresivní klasické technologie a současně maximálně podporovat technologie nové, jako je cloudová přístupová síť C-RAN a její densifikace, využívání bezlicenčních segmentů spektra (LAA) apod.. Systém 5G NX nově zavede i techniku milimetrových vln a přinese další atributy, které stojí již za hranicemi možností generace 4G.

Standardizace systému 4. generace LTE, směřující ke generaci 5G (2)

Dle projektu 3GPP je architektura pokročilých celulárních systémů (4G) tvořena rádiovou přístupovou sítí RAN (Radio Access Network), jež má u systémů 4G konkrétní podobu E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial RAN) a pokročilého paketového jádra sítě EPC (Evolved Packet Core). Jejich spojením vzniká pokročilý paketový systém 3GPP EPS (Evolved Packet System). Ten se v rámci vývoje směřujícího ke generaci 5G, počínaje Release 14/15, zdokonaluje:

- **Nová přístupová síť RAN:** rádiové přístupové sítě předchozích systémů využívaly ortogonální techniky mnohonásobného přístupu, a to FDMA (1G/NMT, C-450...). TDMA (2G/GSM...), CDMA (3G/UMTS/hspa...) a OFDMA (4G/LTE...). Ortogonální multiplexní přístupy OMA (Orthogonally Multiplex Access) vedou k jednoduchým přijímačům a k jednoduché implementaci rozvrhování. Avšak **neortogonální formáty NOMA** se mohou více přiblížit teoretickým limitům kapacity, avšak za cenu zvýšení interferencí. Nové techniky příjmu a potlačení interferencí (ICIC, NAIC...) se s tímto nedostatkem již dokáží vyrovnat a tím se formátům NOT otevírá cesta do praxe. Přenos NOT se uplatní hlavně v **mobilních širokopásmových službách MBBS** (technika mnohoživatelského superpozičního přenosu MUST). Jeho druhou aplikací bude **masívní strojová komunikace mMTC**, využívající technologie mnohoživatelského sdíleného přístupu MUSA a rozptýleného kódového přístupu SCMA; tyto metody umožňují mnoha uživatelům současné sdílení frekvenčních i časových zdrojů. Třetí aplikací NOT jsou **systémy kritické komunikace CrIC**.

Techniky kanálového kódování se budou přizpůsobovat zamýšleným aplikacím. Tak např. přenosy krátkých sdělení (ze senzorů apod) ovládnou blokové kódy, kdežto ochranu velmi rychlých přenosů MBB zajistí turbo kódy apod.

- **Nové jádro sítě CN:** nové jádro sítě 5G CN bude podporovat nové rádiové přístupové technologie 5G RAT, jakož i starší technologie LTE-A a IEEE 802.11. To umožní terminálům 5G komunikovat volně v síti 5G i v síti LTE-A, a to bez jakýchkoliv mechanismů interworkingu. Tím bude zajištěna spolehlivá migrace terminálů mezi jádry sítí 4G a 5G.

5G

Nástup mobilní komunikace páté generace

System 5G: obecné charakteristiky

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

Charakteristické provozní vlastnosti:

- Výrazné zdokonalení dosavadních služeb: přenosu hlasu, videa a dat ($DL_{max} \approx 10 \text{ Gbit/s}$)
- Nová pervasivní 3D multimédia, televize HDTV/UHDV, řeč VoIP, služby e-Health,
- Nové služby s extrémně nízkou latencí ($UP... \leq 1 \text{ ms}$) : 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)
- Osvojení pásma milimetrových vln (3 až 100...300 GHz)
- Anténní systémy „masívní MIMO“ s velkým počtem antén na BS, umožňujících BF k UT
- Další zdokonalení kooperativních technik: kooperativní reléování, CoMP...
- Technika plného duplexu FDX (s potlačením vlastních interferencí SIC)

špičková datová rychlost na trase DL:	1 Gbit/s (4G)	10 Gbit/s (5G)
latence přenosu v uživatelské rovině:	10 ms (4G)	1,0 ms (5G)
speciální aplikace M2M (aku nebo auto napájení)		(≈ 10 roků)

Systemy mobilní komunikace páté generace (5G): aplikace

Systemy mobilní komunikace páté generace (5G) budou orientovány v počátcích svého rozvoje na několik následujících aplikací, jež přesahují jejich původní zaměření:

- Obohacené mobilní širokopásmové služby, charakterizované špičkovými přenosovými rychlostmi řádu až 10 Gbit/s, rychlostmi 100 Mbit/s v městském prostředí a minimálně 10 Mbit/s kdekoliv, nízkou latencí přenosu (end to end) pod 1 ms a využitím pásem nad 6 GHz.
- Masívní Internet věcí IoT charakterizovaný extrémním počtem levných terminálů s nízkou spotřebou a využíváním nižšíchfrekvenčních pásem, zajišťujících celoplošné pokrytí (vnější i vnitřní).
- Masívní strojová komunikace mMTC, je charakterizována masívním počtem terminálů a jejich nízkou cenou, malým objemem přenášených dat a dlouhou životností baterií (10 let). Šířka pásma a signalizační protokoly jsou škálovatelné a flexibilní, dosah spojení je různý
- Vysoce spolehlivá strojová komunikace MTC, zaručující velkou pravděpodobnost navázání spojení a následující maximálně spolehlivou komunikací se zaručenou kvalitou služeb QoS, zajištěnou mnohostrannými diverzitními technikami; latence je často pod 1 ms. Tato komunikace se uplatní v kritických aplikacích, jako je řízení strategických infrastruktur (průmyslová výroba, elektrárny...), management dopravních sítí ap.; bude využívána jak v celulárním módu, tak v přímém módu D2D.

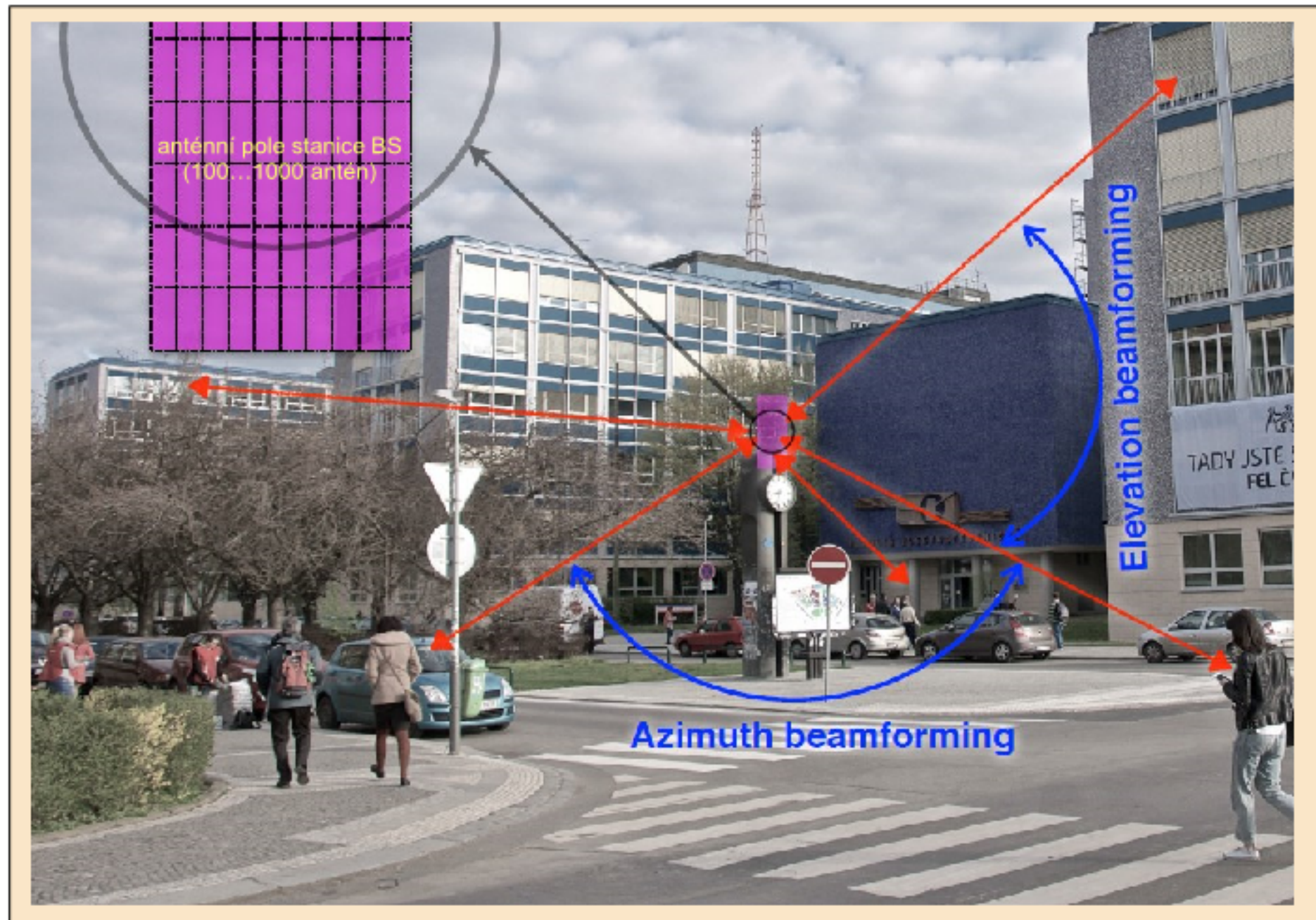
Systemy mobilní komunikace páté generace (5G): technologie RAN

Mobilní sítě 5G budou nabízet uživatelům, v porovnání se sítěmi předchozími, mnohem více funkčních možností, a to: podstatně vyšší datovou rychlost, velmi nízkou latenci, přenosu, extrémně vysokou spolehlivost, vysokou energetickou účinnost a extrémně vysokou hustotu terminálů, zejména pro strojovou komunikaci MTC.

Rádiová přístupová síť 5G bude kombinací progresivních celulárních sítí LTE a lokálních sítí WiFi, ve spojení s novými rádiovými přístupovými technologiemi 5G (NX). Klíčovými technologickými komponentami budou v sítích 5G:

- masivní anténní systémy VLS v milimetrových pásmech: umožní díky směrovosti Tx a Rx antén komunikaci terminálů ve společném pásmu a s výrazně redukovanými výkony
- integrace přístupových sítí RAN a backhaul sítí: obě tyto sítě budou reprezentovat jediný integrovaný rádiový přístup, využívající tytéž technologie a stejná pásma, což zvýší SE
- podpora komunikace D2D: přímá komunikace terminálů D2D bude integrální součástí sítí 5G, kde odlehčí zatížení primárních sítí (NX, LTE) a při blízkých spojeních zvýší rychlost...
- flexibilní využívání spektra: systémy 5G budou pružně kombinovat využívání svých licencovaných pásem- se sdíleným provozem více operátorů, s nelicencovanými pásmy
- extrémně úsporný návrh (ultra lean design): spočívá v minimalizaci všech přenosů, které nejsou přímo spojeny s uživatelskými daty (signalizace, synchronizace, odhad kanálu...)
- separace uživatelské a kontrolní roviny: umožní oddělit kapacitně náročný přenos dat ve škálovatelných uživatelských rovinách, od méně náročného přenosu kontrolních dat
- technika rádiového cachingu: spočívá v uložení populárních kontentů, generovaných obvykle v originálních vzdálených cloudech, v lokálních úložištích. Ta jsou situována do jádra sítě CN, nebo do stanic BS sítě RAN, blízkých uživatelům (rádiový caching). Úložiště jsou implementována mezilehlými servery, odkud si mohou uživatelé tyto kontenty třeba i vícekrát stáhnout. Tím se eliminuje jejich duplikovaný, redundandní přenos na velké vzdálenosti.

Anténní technologie Masivní MIMO (vize roku 2020)



Originator of Massive MIMO Concept

- Thomas Marzetta, Bell Labs
 - Originator of Massive MIMO Concept
- Key paper:

Thomas Marzetta, "Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas," *IEEE Trans. Wireless Communications*, 2010.



Massive MIMO: 50x Improvements!

Will FCC give him 10 MHz?

Massive MIMO (multiple-input multiple-output) : a cellular base station antenna arrays with a few hundred antennas serves a multiplicity of single-antenna terminals, over the same time-frequency interval. Time-division duplex operation TDD combined with reverse-link pilots enables the base station to estimate the reciprocal forward- and reverse-link channels. The conjugate-transpose of the channel estimates are used as a linear precoder and combiner respectively on the forward and reverse links. As the number of base station antennas grows without limit all of the effects of uncorrelated noise and fast fading disappear. What remains is inter-cellular interference ICI that results from pilot contamination. Massive MIMO has been identified as a key technology to handle orders of magnitude more data traffic. Extra antennas help by focusing energy into ever-smaller regions of space to bring huge improvements in throughput (spectrum efficiency SE) and radiated energy efficiency (EE).

Originator of Massive MIMO Concept

- Thomas Marzetta, Bell Labs
 - Originator of Massive MIMO Concept
- Key paper:

Thomas Marzetta, "Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas," *IEEE Trans. Wireless Communications*, 2010.



Massive MIMO: 50x Improvements!

Will FCC give him 10 MHz?

Massive MIMO (multiple-input multiple-output) : a cellular base station antenna arrays with a few hundred antennas serves a multiplicity of single-antenna terminals, over

the same time. In the reverse-link, the base station uses linear precoding to cancel the interference from the other users. The number of base station antennas is large compared to the number of base station antennas, noise and fading. This results from the technology to focus energy into ever smaller regions of space to bring huge improvements in throughput (spectrum efficiency SE) and radiated energy efficiency (EE).

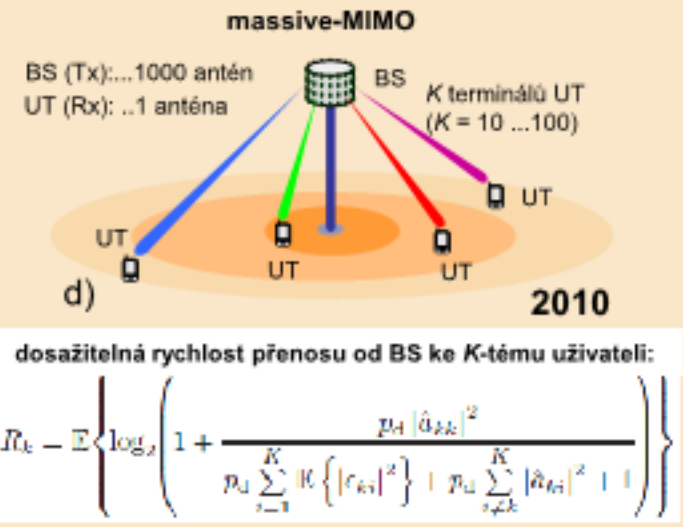
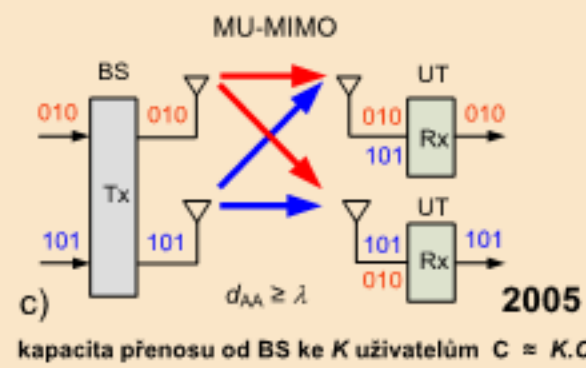
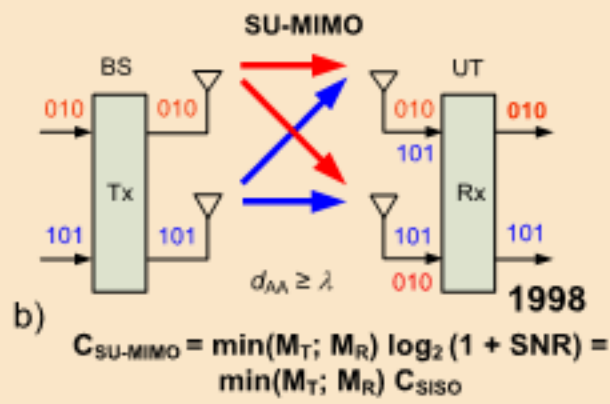
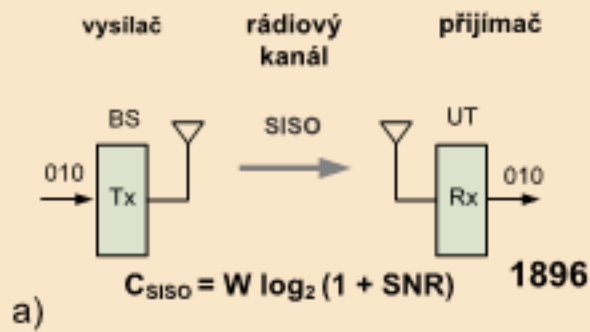
Massive MIMO: Ten Myths and One Critical Question

Emil Björnson, Erik G. Larsson, and Thomas L. Marzetta

- [1] [Björnson](#), E., [Larsson](#), E. G., [Marzetta](#), T. L. Massive MIMO: Ten Myths and One Critical Question. *IEEE Commun. Magazine*, 2015.
- [2] Ngo, H. Q., et al., *Massive MIMO: Fundamentals and Systems Designs*. Dissertations No 1643, Linköping University, 2015.

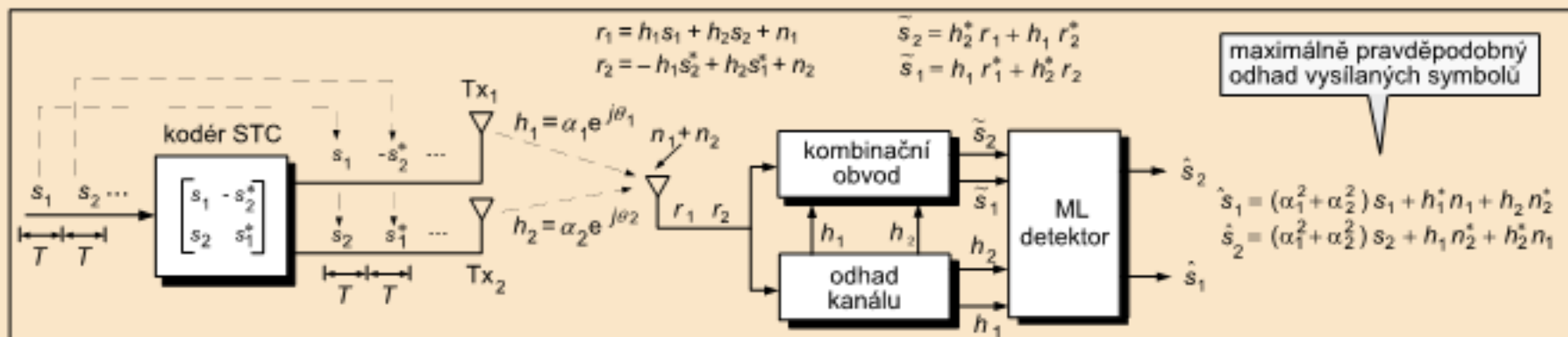
combined with both forward- and reverse-link. As the number of antennas increases, the interference ICI that is cancelled as a key technology. Antennas help by bringing huge improvements in

Základní klasifikace technik MIMO



a) Rádiový systém SISO; b) jednouživatelský systém SU-MIMO, přenášející dva nezávislé informační toky ve stejném pásmu; c) mnohouživatelský systém MU-MIMO s více uživatelskými terminály UT; d) masivní mnohouživatelský systém MU-MIMO, s mohutným navýšením spektrální i energetické účinnosti

Alamoutiho prostorově časová vysílací diverzita

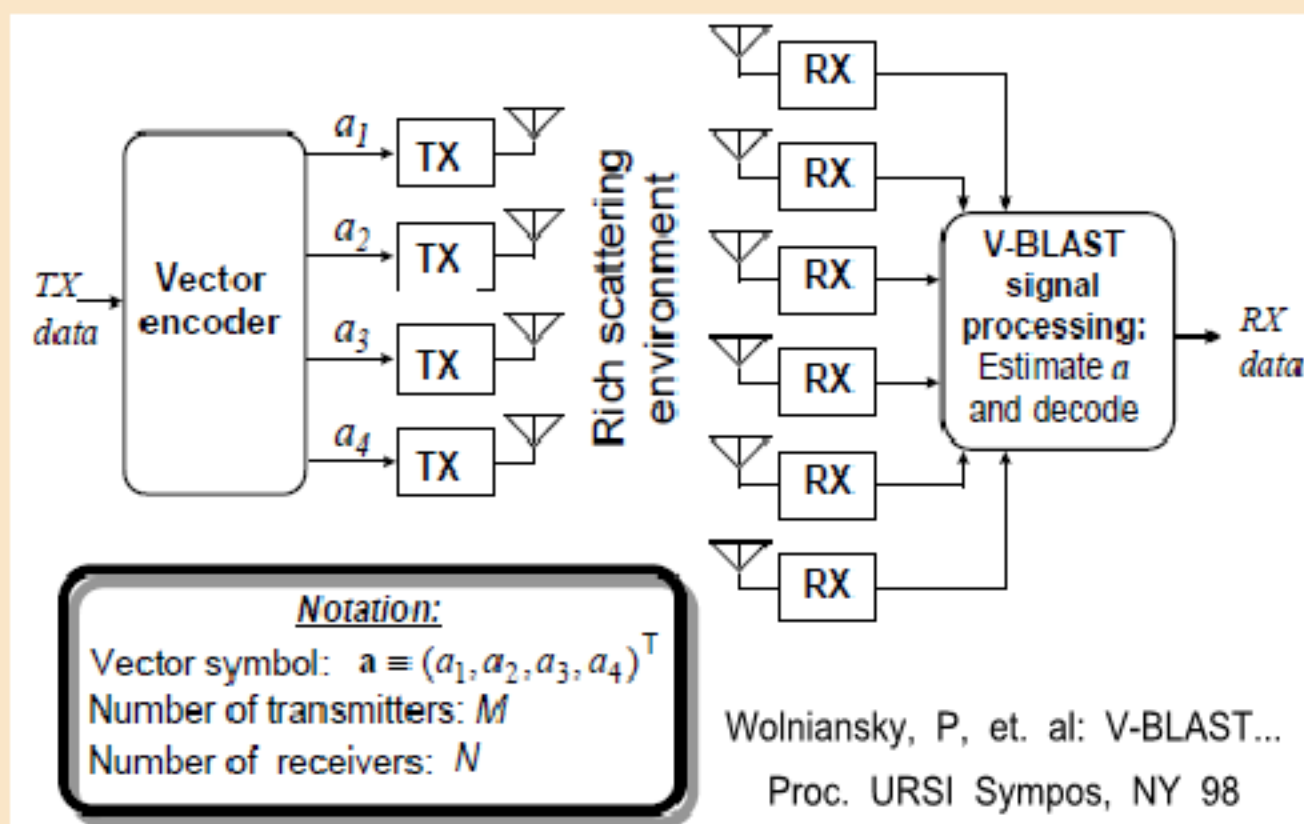


Famously Alamouti Code is considered as one of the most significant advances in MIMO techniques. In fact it was this code that basically set the whole family block and trellis coding for MIMO in motion.

S. M. Alamouti, "A simple transmitter diversity scheme for wireless commun." *IEEE J. Select. Areas Commun.*, pp. 1451–1458, Oct. 1998.

U Alamoutiho prostorově časové vysílací diversity STTD (Space-Time Transmit Diversity), označované též jako prostorově časový blokový kód STBC, jsou ve vysílači modulační symboly mapovány v prostorové a navíc v časové doméně. Dva po sobě jdoucí sériové symboly s_1 , s_2 , o celkové době trvání $2T$, se v kodéru STC přemění na paralelní dvojici s_1 , s_2 a poté na dvojici $-s_2^*$, s_1^* . Ty se vysílají ze dvou paralelních antén rovněž během doby $2T$, takže se výsledná rychlost přenosu tímto kódováním nezmění. V kombinačním obvodu přijímače se za pomoci odhadnutých přenosů obou cest h_1 , h_2 získávají odhady vysílaných signálů, které se v ML (maximum likelihood) detektoru převedou na odhady maximálně pravděpodobné vysílaným signálům s_1 , s_2 . Diverzita STTD (STBC) se používá v systému IEEE 802.16 (WiMAX).

Multiplex MIMO typu V-BLAST (Bell Lab System System)

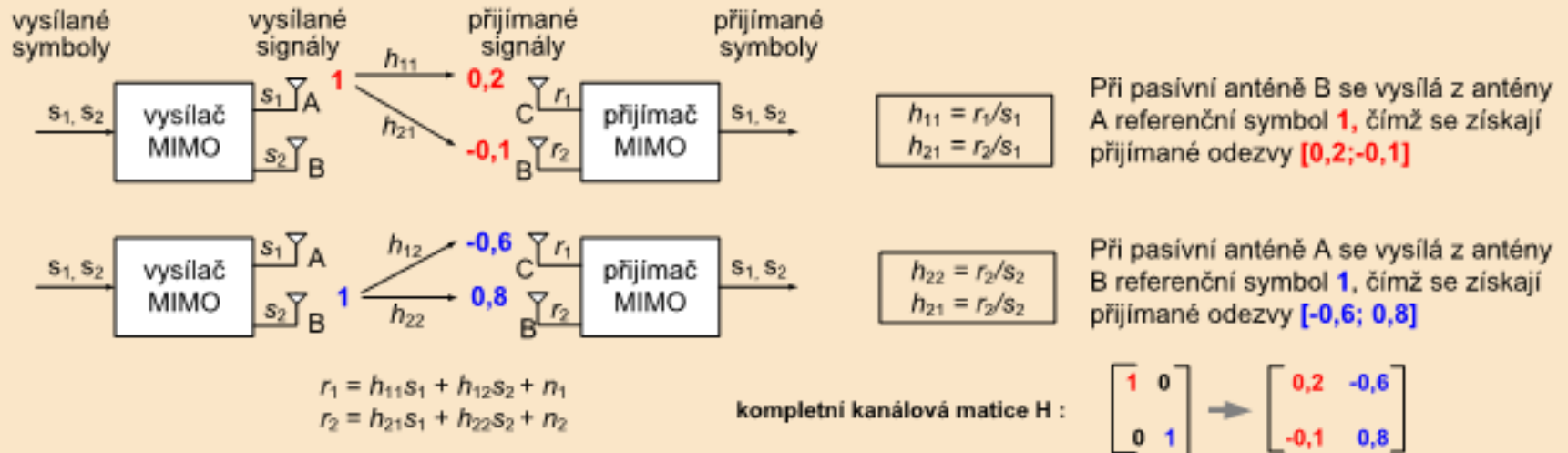


...proces STC kódování se zde redukuje jen na jednoduchou operaci demultiplexování, tedy převodu sériového toku na paralelní složky a_1, a_2, \dots, a_M . Využívá se zde tedy jen prostorová dimenze kódu STC, bez využití dimenze časové. Vektorový kodér zde má podobu sériově-paralelního převodníku SPC, ochranné konvoluční či jiné kódování se zde neaplikuje, i když by bylo možné. Výkon každého vysílače QAM je úměrný výrazu $1/M$, tedy celkový výkon je konstantní při libovolném M .

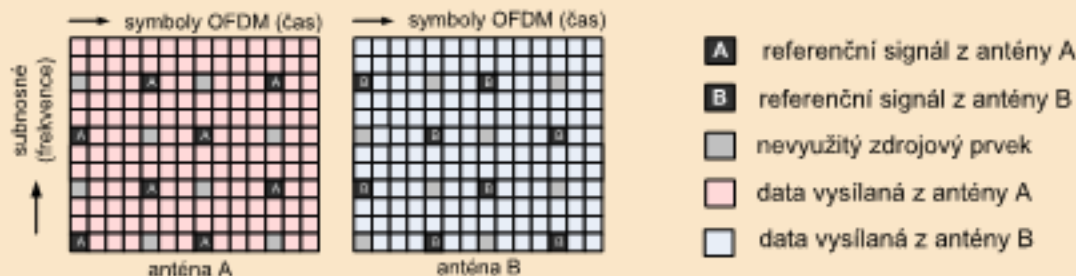
...na přijímací straně se vstupní signály, po zpracování v N dílčích přijímačích (Rx), v signálovém procesoru V-BLAST dekódují, a to s využitím strategie „rozděl a panuj“ (“divide and conquere“).

Získávání aktuálních kanálových koeficientů systému 2x2MIMO

kanálové koeficienty (impulsní odezvy) pro všechny čtyři dílčí kanály mezi oběma vysilacími a přijímacími anténami h_{ij} se získávají pomocí referenčních signálů, vysílaných periodicky mezi daty. Jsou - li tyto odezvy známy, vysílají obě vysilací antény simultánně svá data, až do dalšího určování h_{ij}



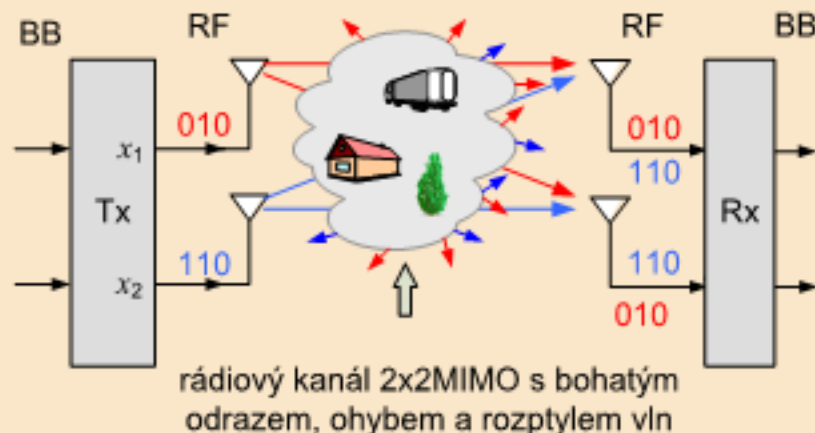
časový plán přenosu dat a referenčních signálů pro určitý systém OFDM v režimu MIMO



V režimu přenosu dat jsou z antény A vysílána pouze jí příslušející data A a z antény B pouze data B. V přijímacích anténách C a D jsou tato data smíchána. Avšak lineární kombinace obou přijímaných datových toků v přijímacích anténách reprezentuje soustavu dvou rovnic o dvou neznámých, jejímž řešením se získají oba dva originální datové toky.

Systemy SU-MIMO: zpracování bezšumového signálu

System prostorového multiplexu 2x2 SU-MIMO



Přijímané symboly y_1, y_2 lze vyjádřit jako lineární kombinaci vysílaných symbolů x_1, x_2 , a šumů n_1, n_2 , tj. jako dvě rovnice:

$$y_1 = h_{11}x_1 + h_{12}x_2 + n_1 \quad (1a)$$

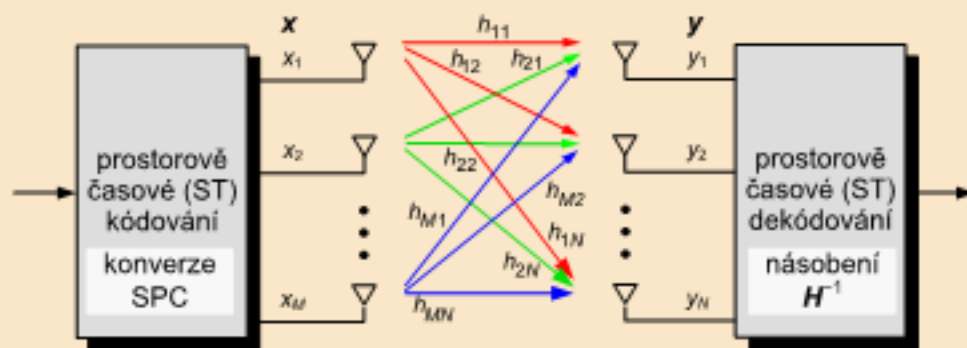
$$y_2 = h_{21}x_1 + h_{22}x_2 + n_2 \quad (1b)$$

Při zanedbání šumů se z těchto dvou rovnic již mohou určit odhady vysílaných symbolů x_1, x_2 , tj. neznámé:

$$\hat{x}_1 = \frac{\hat{h}_{22}y_1 - \hat{h}_{12}y_2}{\hat{h}_{11}\hat{h}_{22} - \hat{h}_{12}\hat{h}_{21}} \quad \hat{x}_2 = \frac{\hat{h}_{11}y_2 - \hat{h}_{21}y_1}{\hat{h}_{11}\hat{h}_{22} - \hat{h}_{12}\hat{h}_{21}} \quad (2a,b)$$

Řešení (2) rovnic (1) však existuje jen u kanálů NLOS, je-li splněna podmínka $\hat{h}_{11}\hat{h}_{22} - \hat{h}_{12}\hat{h}_{21} \neq 0$ ($\det \mathbf{H} \neq 0$).

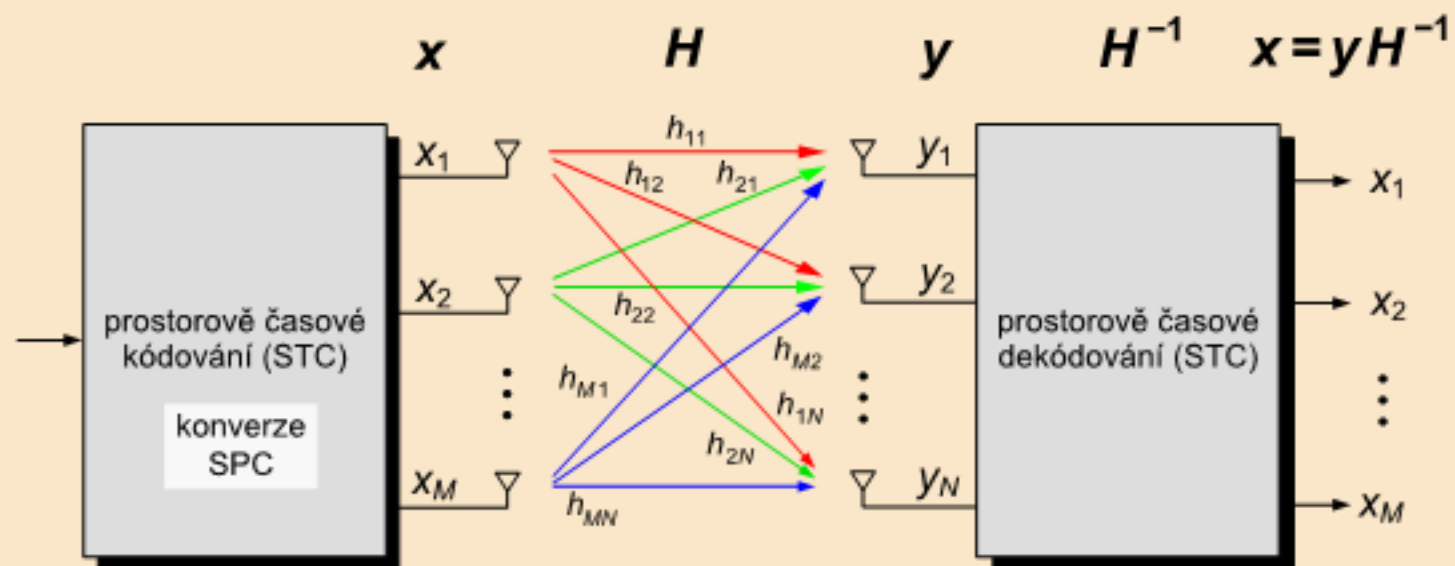
System prostorového multiplexu $M \times N$ SU-MIMO



$$\underbrace{\begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_N \end{pmatrix}}_{\text{přijímaný signál}} = \underbrace{\begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ h_{N1} & h_{N2} & \dots & h_{NM} \end{pmatrix}}_{\text{požadovaný signál}} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_M \end{pmatrix}}_{\text{přijímaný signál}} + \underbrace{\begin{pmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_N \end{pmatrix}}_{\text{šum}}$$

dekódování pro případ nulového šumu: $y = H \cdot x + n \rightarrow x = y \cdot H^{-1}$

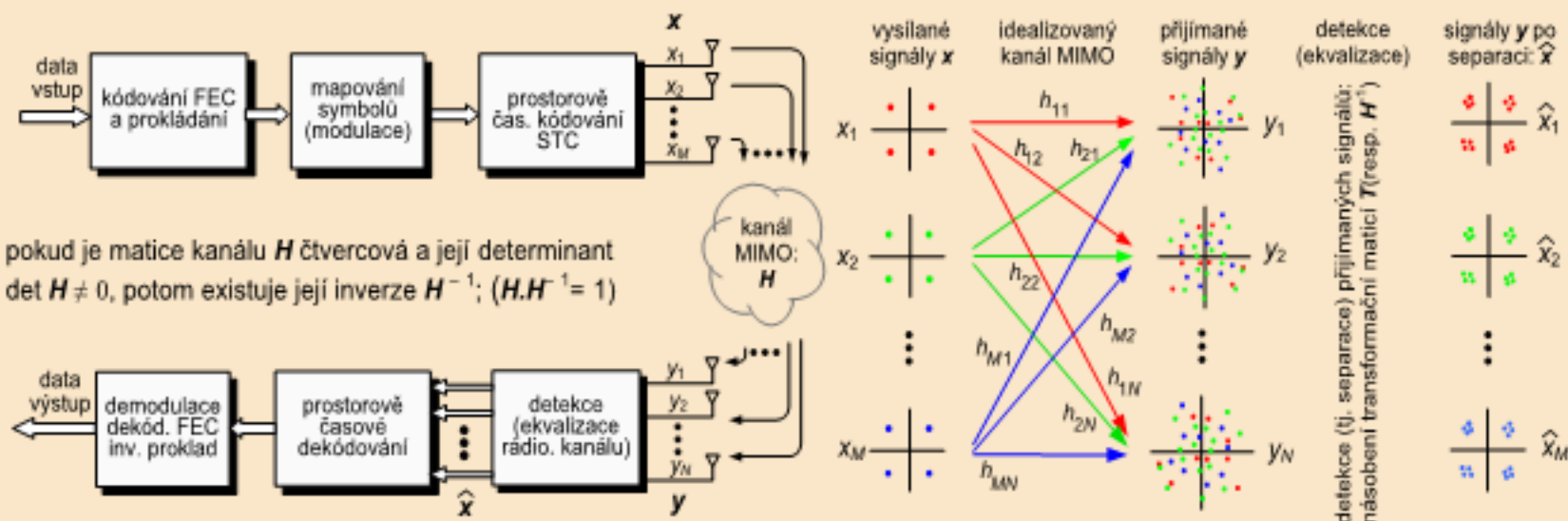
Systemy SU-MIMO: zpracování bezšumového signálu



$$\mathbf{x} = \mathbf{y}\mathbf{H}^{-1} = \mathbf{x}\mathbf{H}\mathbf{H}^{-1} = \mathbf{x}$$

\mathbf{x}sloupcový vektor vysílaných signálů
 \mathbf{y}sloupcový vektor přijímaných signálů
 \mathbf{H}matice kanálu MIMO (CSI)
 \mathbf{T}detekční (transformační) matice ($\mathbf{T}=\mathbf{H}^{-1}$)

System SU-MIMO: zpracování signálu



Vysílač: základním úkolem vysílače SU-MIMO je přeměna vstupního sériového datového toku na paralelní složky, realizovaná v převodníku SPC, což odpovídá kódování v prostorové oblasti. To může být doplněno o kódování v časové oblasti, čímž vzniká STC kódování.

Přijímač: v praxi uplatňují nejčastěji lineární detektory, u nichž se vektor přijímaných signálů y přivádí na vstup násobiče, kde je násoben lineární transformační (detekční resp. filtrační) maticí T , závisící na aktuálních parametrech h_{ij} kanálové matice H . V praxi se užívají tři typy matice T , které poskytují tři odlišné varianty výstupních signálů. Jim potom odpovídají tři typy lineárních detektorů:

MF detektor (Matched Filter Detector): maximalizuje poměru SNR

$$T_{MF} = H^H$$

přičemž H^H je konjugovaná transpozice kanálové matice H .

ZF detektor (Zero Forcing Detector): maximalizuje SIR , tlumí interference

$$T_{ZF} = H^\dagger = (H^H H)^{-1} H^H$$

kde H^\dagger je tzv. Moore-Penroseova pseudoinverze.

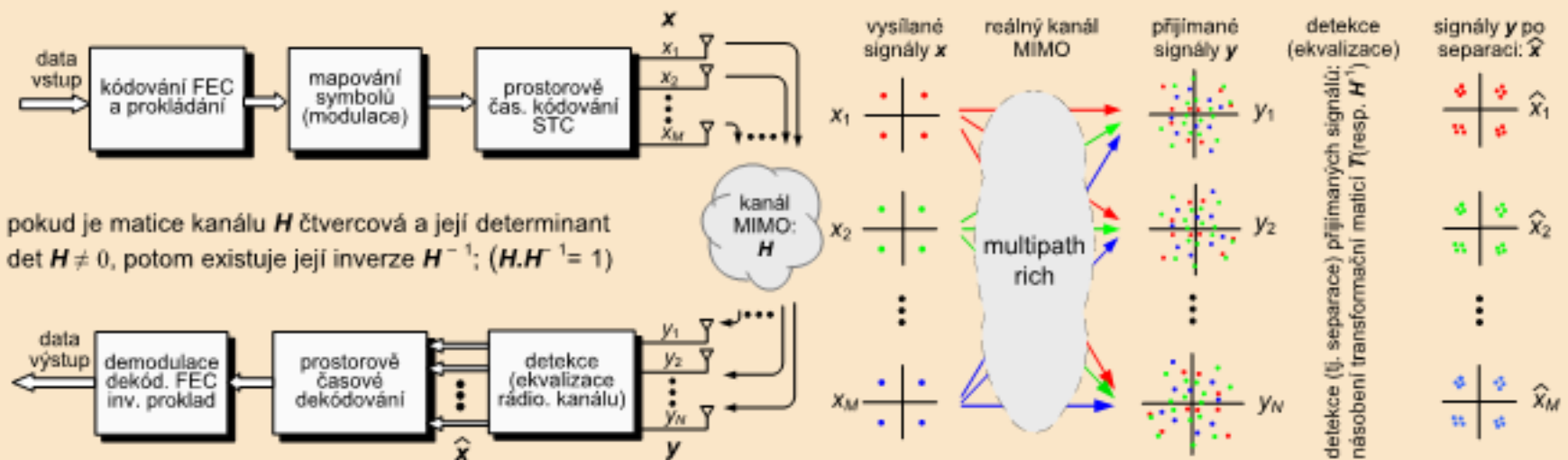
MMSE detektor (Minimum Mean Square Error Detector): minimalizuje BER

$$T_{MMSE} = (H^H H + 2\sigma^2 \mathbf{I})^{-1} H^H$$

kde σ^2 je šumový výkon a \mathbf{I} je jednotková matice.

Každý z uvedených tří typů detektorů signálů SU-MIMO vytváří směrový diagram přijímacích antén, který optimalizuje zvolený parametr přijímaného signálu. Volba vhodného typu závisí na kondici kanálu, poměru SNR a SIR a dalších parametrech, je tedy složitá.

System SU-MIMO: zpracování signálu za přítomnosti šumu



Vysílač: základním úkolem vysílače SU-MIMO je přeměna vstupního sériového datového toku na paralelní složky, realizovaná v převodníku SPC, což odpovídá kódování v prostorové oblasti. To může být doplněno o kódování v časové oblasti, čímž vzniká STC kódování.

Přijímač: v praxi uplatňují nejčastěji lineární detektory, u nichž se vektor přijímaných signálů y přivádí na vstup násobiče, kde je násoben lineární transformační (detekční resp. filtrační) maticí T , závisící na aktuálních parametrech h_{ij} kanálové matice H . V praxi se užívají tři typy matice T , které poskytují tři odlišné varianty výstupních signálů. Jim potom odpovídají tři typy lineárních detektorů:

MF detektor (Matched Filter Detector): maximalizuje poměru SNR

$$T_{MF} = H^H$$

přičemž H^H je konjugovaná transpozice kanálové matice H .

ZF detektor (Zero Forcing Detector): maximalizuje SIR , tlumí interference

$$T_{ZF} = H^\dagger = (H^H H)^{-1} H^H$$

kde H^\dagger je tzv. Moore-Penroseova pseudoinverze.

MMSE detektor (Minimum Mean Square Error Detector): minimalizuje BER

$$T_{MMSE} = (H^H H + 2\sigma^2 I)^{-1} H^H$$

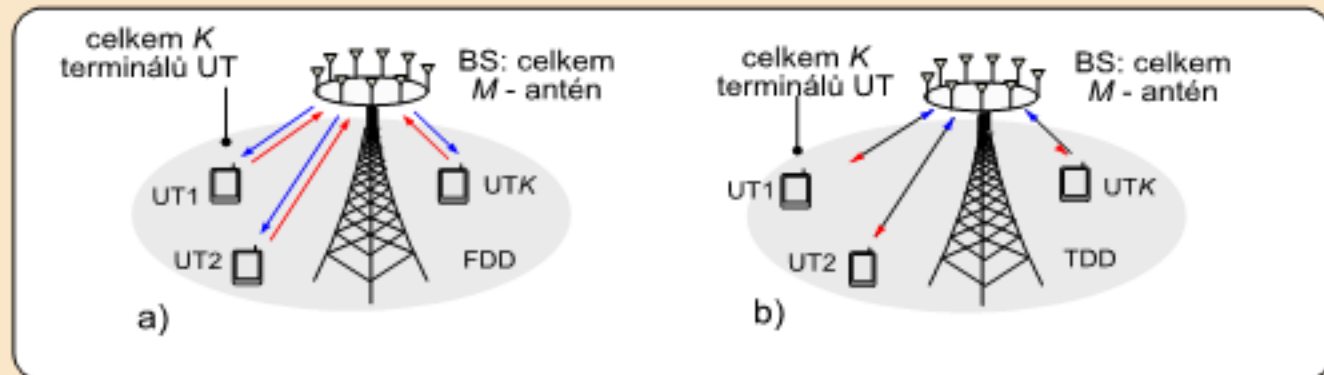
kde σ^2 je šumový výkon a I je jednotková matice.

Každý z uvedených tří typů detektorů signálů SU-MIMO vytváří směrový diagram přijímacích antén, který optimalizuje zvolený parametr přijímaného signálu. Volba vhodného typu závisí na kondici kanálu, poměru SNR a SIR a dalších parametrech, je tedy složitá.

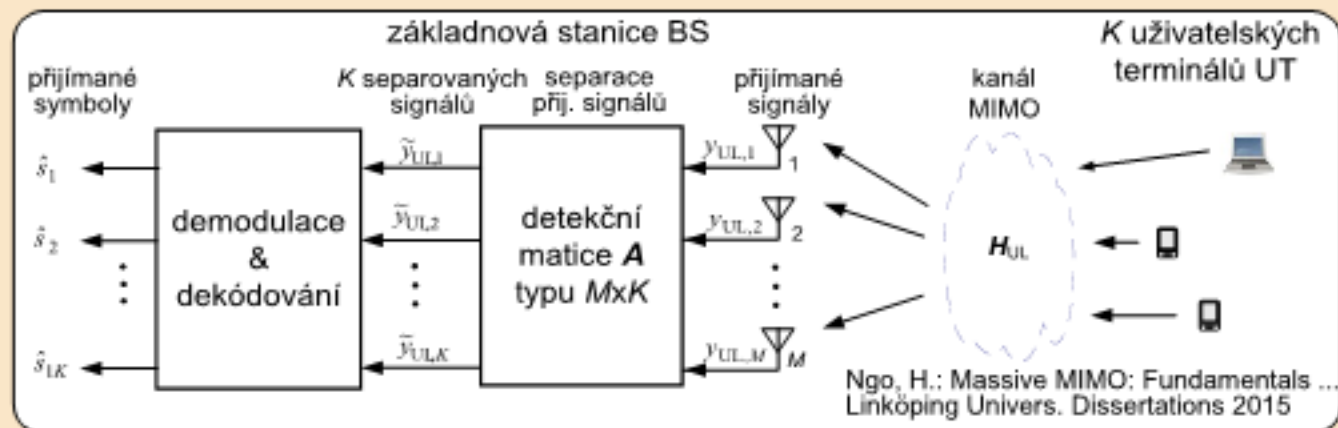
System MU-MIMO: přenos dat na trase UL (od terminálů UT ke stanici BS)

Mnohouživatelské systémy MU - MIMO, se základnovou stanicí BS s M anténami, jež komunikují s K uživatelskými terminály, z nichž každý má jednu anténu:

a) frekvenč. duplex FDD; b) čas. duplex TDD, odolný vůči kontaminaci nosných



Detekce v základnové stanici BS, aplikovaná na signály uživatelských terminálů UT



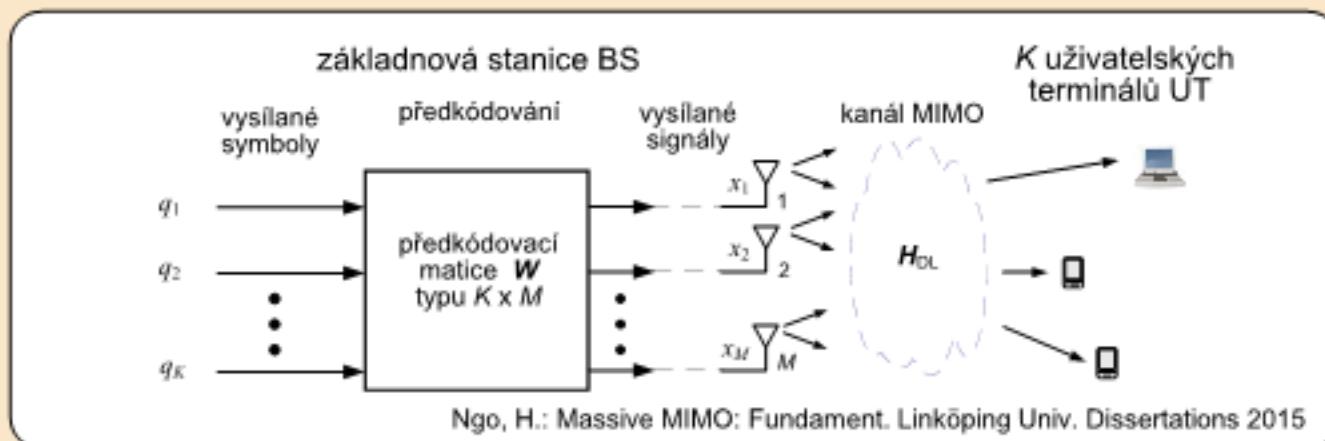
detekční matice A pro tři typy přijímačů MU-MIMO (na UL)

$$A = \begin{cases} H \\ H(H^H H)^{-1} \\ H(H^H H + \frac{1}{P_{UL}} I_K)^{-1} \end{cases}$$

pro kombinování MRC: max SNR
 pro kombinování ZF: max SIR
 pro kombinování MRC: max SINR

System MU-MIMO: přenos dat na trase DL (od stanici BS terminálů UT)

Předkódování signálů vysílaných ze základnové stanice BS k terminálům UT

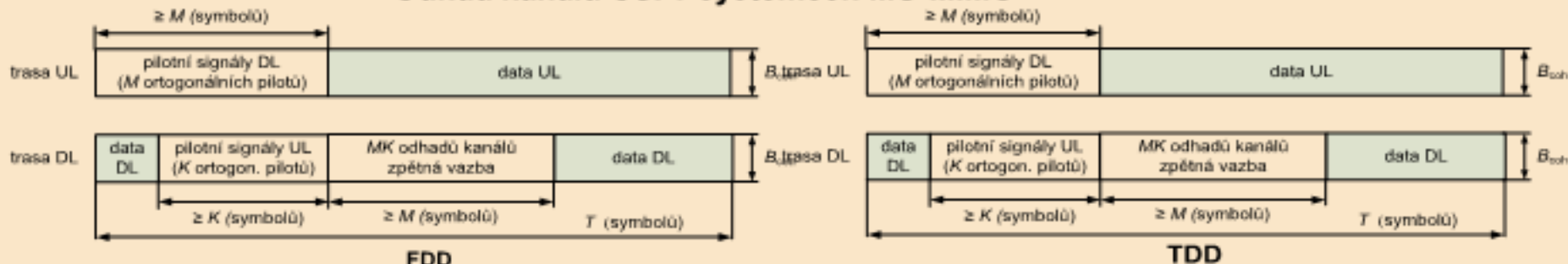


předkódovací matice W pro tři typy přijímačů MU-MIM (na DL)

$$W = \begin{cases} H^* \\ H^* (H^T H^*)^{-1} \\ H^* (H^T H^* + \frac{K}{P_t} I_K)^{-1} \end{cases}$$

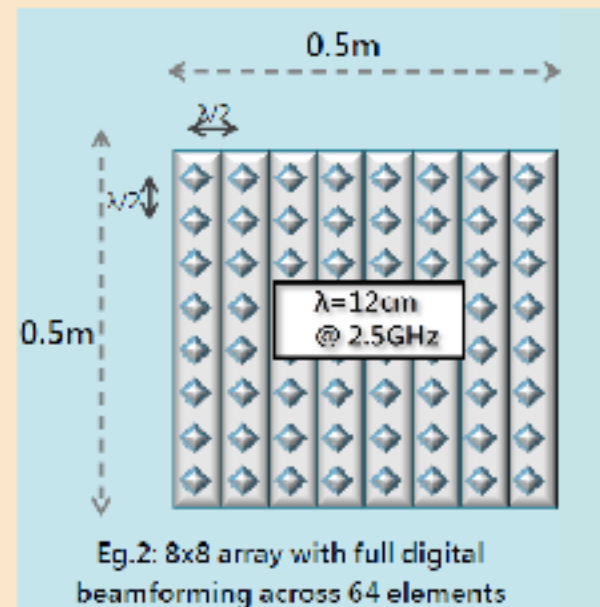
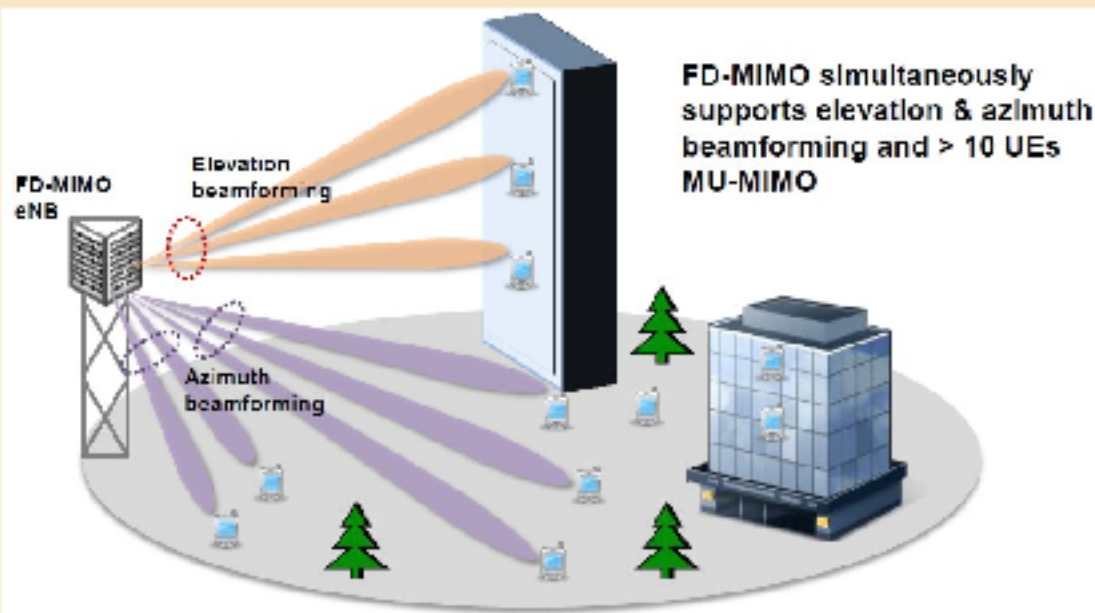
pro předkódování MRT: max SNR
 pro předkódování ZF: max SIR
 pro předkódování MMSE: max SINR

Odhad kanálů CSI v systémech MU-MIMO



U duplexu FDD celý proces odhadu CSI kanálu vyžaduje nejméně $M + K$ kanálů na trase UL a M kanálů na trase DL; při velkých hodnotách M (u systémů masivní MIMO) je ale tato podmínka těžko splnitelná. U duplexu TDD tréninkový proces odhadu vyžaduje v souhrnu pouze $2K$ kanálů, avšak přivelkých K dochází i zde k nebezpečným interferencím, označovaným jako kontaminace, která je zatím hlavním omezujícím faktorem technologie masivní MIMO

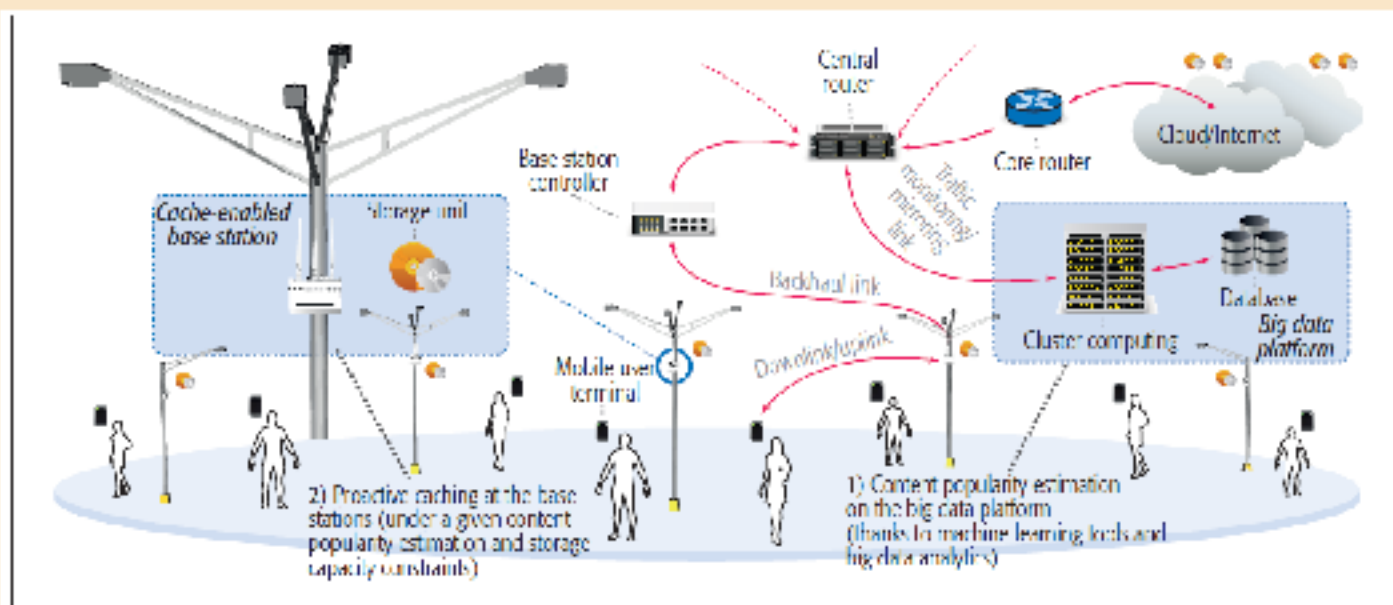
Mnohouživatelské multiplexní systémy masivní MIMO



V soudobých systémech 4G LTE/LTE-A, většinou s duplexem FDD, se úspěšně používá technika MU-8x4MIMO. Systémy s více anténami činnost zlepšují, ale těžko se realizují (vliv přetížení CSI). Účinným řešením je přechod na systémy masivní MIMO (VLS MIMO) s duplexem TDD, který dovolí zvýšit počty antén M na stanici BS nejméně na tisíc, při stovce stanic UT. To přináší tyto přenosti:

- Velký počet antén M ve stanici BS umožní soustředit na trase DL vysílaný výkon do úzkého svazku, zaměřeného na cílový terminál UT. Díky tomu se systému zajistí velký energetický zisk (při přenosu na DL vystačí anténnímu poli na BS se 100 anténami pouze 1% výkonu, který by vyžadoval systém SISO s jedinou anténou na BS)
- V systému masivní MIMO se signál, vysílaný každým uživatelským terminálem UT na trase UL, v M anténách základnové stanice koherentně kombinuje. Tím se vytváří diverzitní zisk a úměrně jeho hodnotě je možné, redukovat vysílací výkon každého uživatelského terminálu UT.
- Díky aplikaci prostorového multiplexu (SM) mohou všichni uživatelé systému využívat stejné časově - frekvenční zdroje. Tím dochází k navýšení multiplexního zisku a tedy i spektrální účinnosti systému (SE), úměrnému číslu $\min(M; K)$.

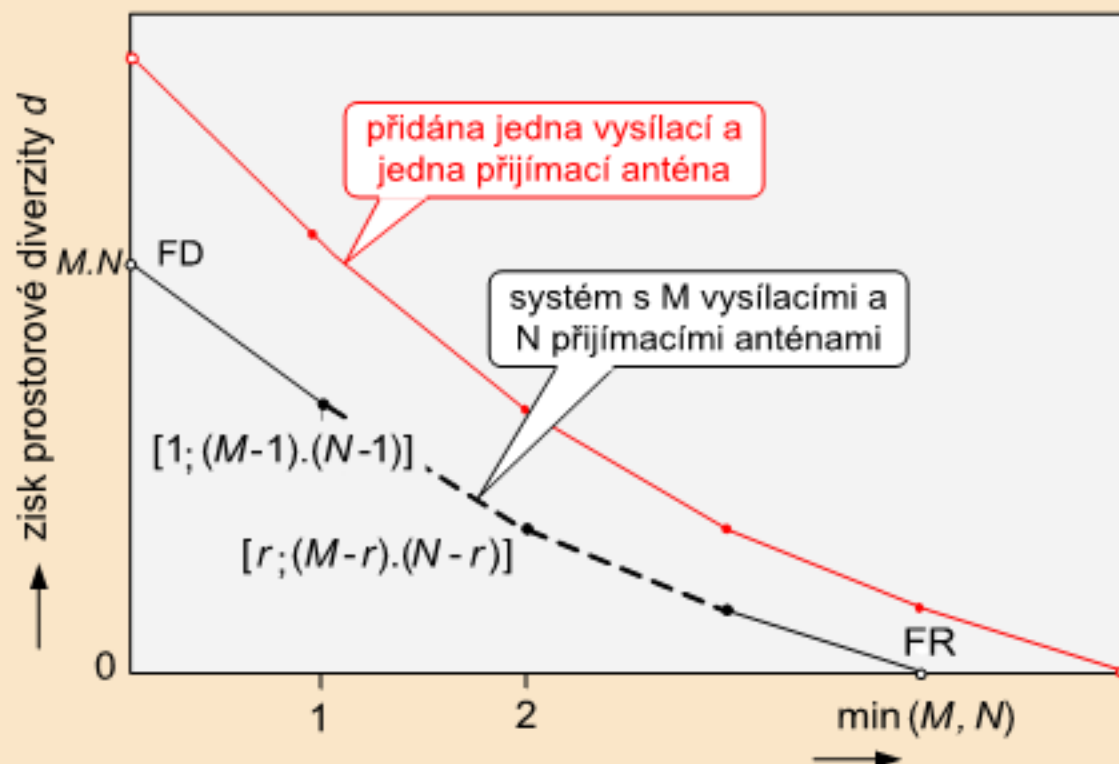
Caching v mobilních sítích: 4G/5G



Soudobé rádiové přístupové sítě RAN, ale i sítě backhaul, spojující RAN s jádrem sítě CN, nezvládají mohutně rostoucí požadavky uživatelů na přenos jejich kapacitně náročných multimediálních kontentů, stahování velkých objemů dat apod. Jednou z možností řešení této situace je tzv. caching (uložení, zachycení). Tato technika spočívá v uložení populárních kontentů, generovaných obvykle v originálních vzdálených cloudech, v lokálních úložištích. Ta mohou být situována do jádra sítě CN, nebo do stanic BS sítě RAN, blízkých uživatelům (rádiový caching). Úložiště jsou implementována mezilehlými servery, odkud si mohou uživatelé tyto kontenty třeba i vícekrát stáhnout. Tím se eliminuje jejich duplikovaný, redundandní přenos na velké vzdálenosti.

Caching může výrazně zvýšit kapacitu i kvalitu služeb, zejména v okrajových lokalitách buněk. Strategie budování rádiového cachingu usiluje o dosažení kompromisu mezi náklady (cenou) přenosové šířky pásma v dlouhých trasách backhaul, která je obvykle vysoká a mezi cenou pamětí, která je naopak nízká.

Kompromis mezi diverzitou a multiplexem



Systémy MIMO s více anténami ve vysílači i v přijímači mohou pracovat v čistě multiplexním režimu, přinášejícím zvýšení jejich kapacity (přenosové rychlosti) vůči SISO, úměrné číslu $m = \min(N, M)$. Toto označované jako prostorový multiplexní zisk r (multiplexing gain).

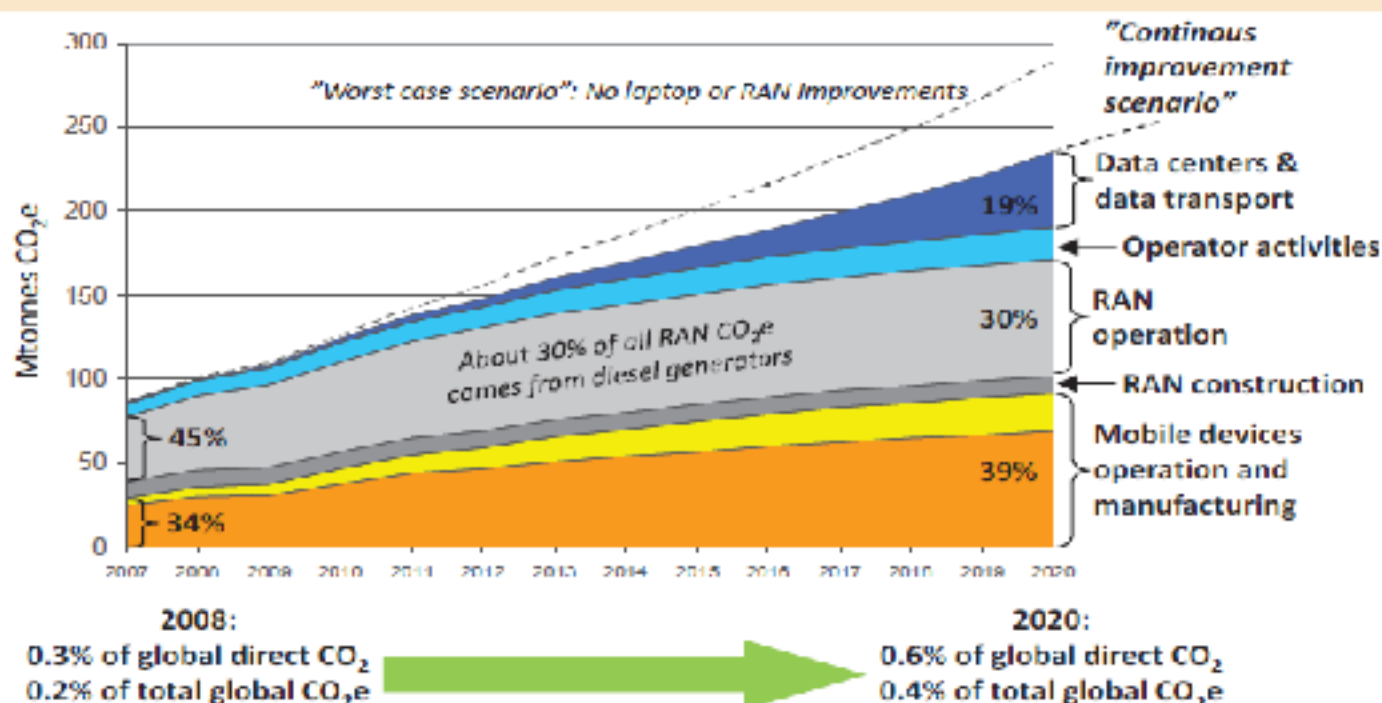
Systémy MIMO lze provozovat také v diverzitním režimu se zvýšenou spolehlivostí, jež je charakterizován diverzitním ziskem d , určeným relací $d_{\text{SNR} \rightarrow \infty} = -\lim_{\text{SNR} \rightarrow \infty} [\log \text{BER} / \log \text{SNR}]$.

Možný je však i kombinovaný režim, který směřuje k současnému dosažení pokud možno co nejvyšších hodnot obou parametrů. V tomto případě však dochází při zvyšování jednoho typu zisku nutně ke snižování zisku druhého typu. Objevuje se zde tedy určitý rozpor mezi diverzitou a multiplexem, označovaný symbolem DMT (diverzity multiplexing trade-off), který lze však řešit kompromisní volbou těchto parametrů.

Problém DMT ilustruje výše uvedený graf,

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