

Systemy mobilní komunikace 5G před nástupem do praxe

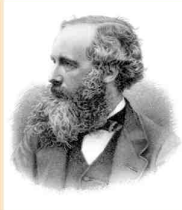
Doc. Ing. Václav Žalud, CSc

*Katedra radioelektroniky FEL, ČVUT v Praze
vaclavzalud@email.cz; <http://radio.feld.cvut.cz/>*

© Doc. Ing. Václav Žalud, CSc

Vývoj mobilní komunikace využití a parametry sítí 5G

Významné osobnosti počátků radiokomunikace



J. Clark Maxwell

Maxwell's Equations

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{q_{enc}}{\epsilon_0}$$

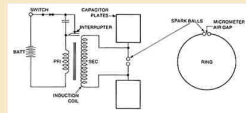
$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$$

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} + \mu_0 i_{enc}$$



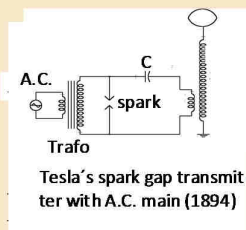
Heinrich Hertz



Hertz's tuned spark gap transmitter: 1886-89

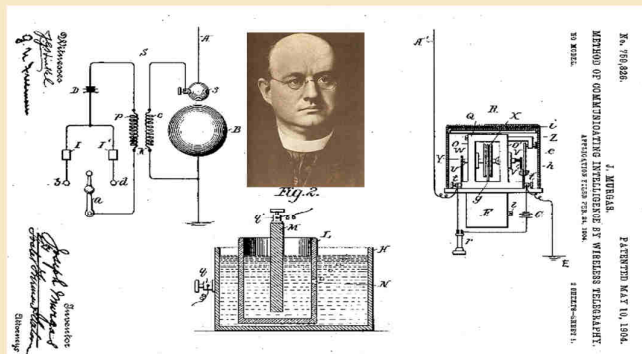


Nikola Tesla



Trafo
Tesla's spark gap transmitter with A.C. main (1894)

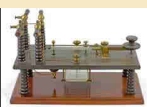
Slovenský vynálezce Josef Murgaš, žijící v USA (1864 – 1929) Patentová přihláška na systém bezdrátové telegrafie z roku 1904



Josef Murgaš, slovenský kněz žijící v USA, vylepšil v r. 1905 Marconiho vysílač pomocí tzv. "ton systému" tak, že mohl přenášet nejen značky Morseovky, ale poprvé v historii rádiové komunikace také lidský hlas, a to konkrétně slova „počujetej ma? počujetej ma? počujetej ma?“



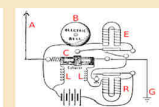
G. Marconi



G.M. demonstrated wireless telegraphy over a distance of 300 metres (1896)



Alexandr S. Popov



Popov's wireless coherer with acoustic signaller for lightning strikes detection: 1895

Významné osobnosti ze světa 5G

Na obrázku je zobrazeno devět špičkových odborníků, působících při vývoji progresivních radiokomunikačních systémů, zejména systémů 5G

IEEE Com. Magazine, Febr. 2014



John Thompson: University of Edinburgh, UK
h-factor: 63



Xiaohu Ge: Huazong University, China



Hsio-Chun Wu: Kun University, Taiwan



Dr. Takehiro Nakamura
NTT DOCOMO Japan



Hong Jiang: Jiatong Univ. China, Alcatel



Theodor Rappaport: Professor of Electr. and Computer Eng. NY
h-factor: 65



Gerhart Fettweis: TU Dresden, Vodafone Dept.
h-factor: 48



Siavash Alamouti: Univ. British Columbia...
h-factor: 22



Wonil Roh: vice president Adv. Com., Samsung Electr., Korea

Je zajímavé, že šest uvedených odborníků pochází z regionů Asie

Ještě významnější osobnosti ze světa 5G



Lu Lu (S'09) received her B.S.E degree and M.S.E degree from the University of Electronic Science and Technology of China (UESTC), Chengdu, China, in 2007 and 2010, respectively. She then got her licentiate degree from Royal Institute of Technology (KTH) in 2011. She is currently working toward the Ph.D. degree with the School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, USA. Her research interests include MIMO, cooperative communications, and cognitive radio networks. She is a co-recipient of the Best 2011, Maui, Hawaii.



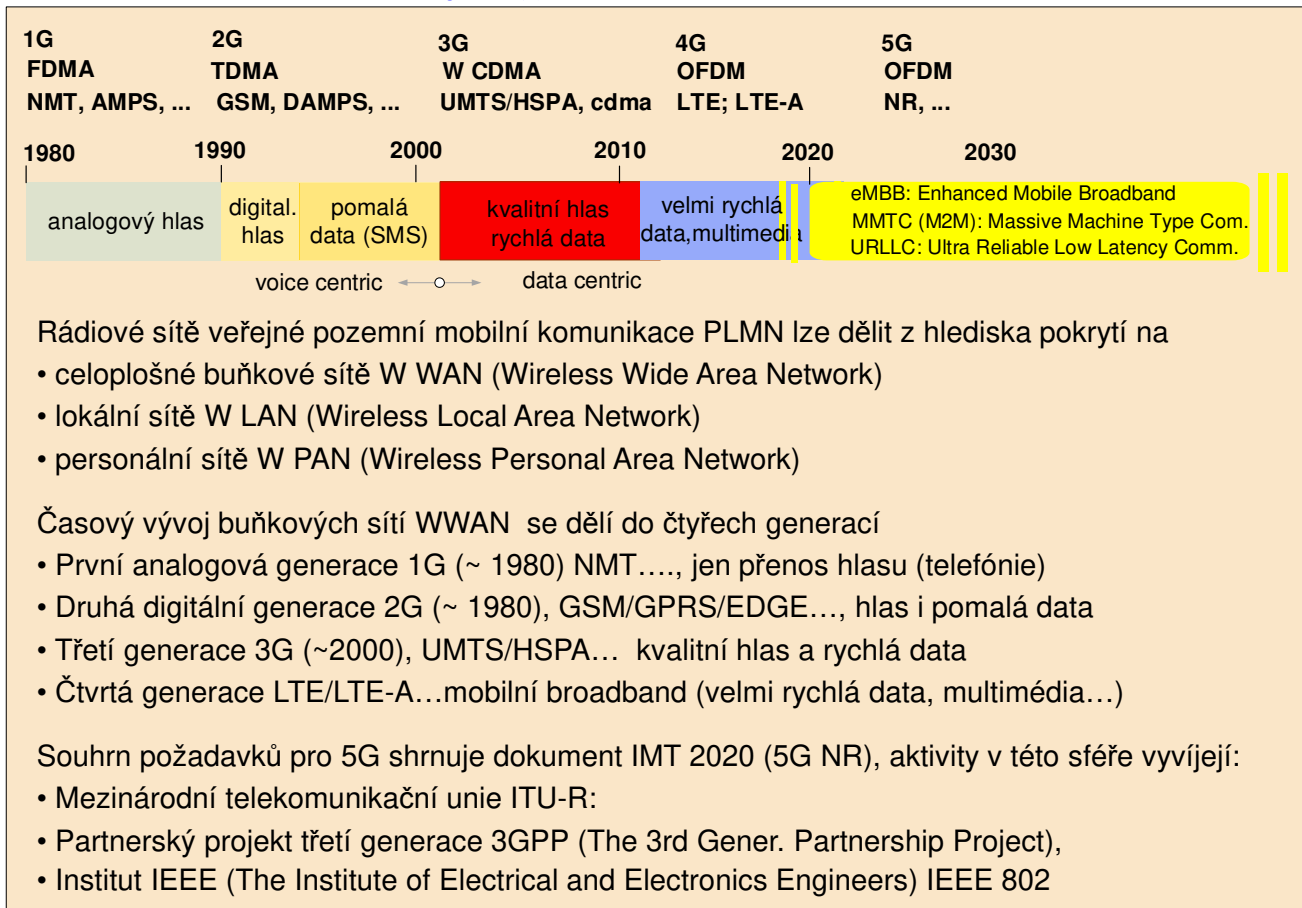
Mari Kobayashi (M'06) received the B.E. degree in electrical engineering from Keio University, Yokohama, Japan, in 1999, the M.S. degree in mobile radio, and the Ph.D. from Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris, France, in 2000 and in 2005, respectively. From November 2005 to March 2007, she was a post-doc researcher at Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya, Barcelona, Spain. Since May 2007, she is an assistant professor at Supélec, Gif-sur-Yvette, France. Her current research interests security, MIMO communication systems, and multiuser

IEEE Communications Magazine, April 2018

IEEE COMMUNICATIONS MAGAZINE APRIL 2018, vol. 56, no. 4 www.comsoc.org/commag	
3	THE PRESIDENT'S PAGE
6	CONFERENCE CALENDAR
7	BOOK REVIEWS
8	SOCIETY NEWS
11	GLOBAL COMMUNICATIONS NEWSLETTER
ADVANCES IN NEXT-GENERATION NETWORKING TECHNOLOGIES FOR SMART HEALTHCARE GUEST EDITORS: M. SHAMIM HOSSAIN, CHANGSHENG XU, YING LI, JOSU BILBAO, AND ABDULMOTALEB EL SAADY	
14	GUEST EDITORIAL
16	5G-SMART DIABETES: TOWARD PERSONALIZED DIABETES DIAGNOSIS WITH HEALTHCARE BIG DATA CLOUDS Min Chen, Jun Yang, Jiehan Zhou, Youe Hao, Jing Zhang, and Chan-Hyun Youn
24	LSCSH: LATTICE-BASED SECURE CRYPTOSYSTEM FOR SMART HEALTHCARE IN SMART CITIES ENVIRONMENT Rajat Chaudhary, Anish Jindal, Gagangeet Singh Aujla, Neeraj Kumar, Ashok Kumar Das, and Neetesh Saxena
33	MEDICAL IMAGE FORGERY DETECTION FOR SMART HEALTHCARE Ahmed Ghoneim, Ghulam Muhammad, Syed Umar Amin, and Brij Gupta
38	PRIVACY IN THE INTERNET OF THINGS FOR SMART HEALTHCARE Daojing He, Ran Ye, Sammy Chan, Mohsen Guizani, and Yanping Xu
46	LARGE-SCALE MOBILE FITNESS APP USAGE ANALYSIS FOR SMART HEALTH Xirlei Chen, Zheqi Zhu, Min Chen, and Yong Li
53	INDOOR ANTI-COLLISION ALARM SYSTEM BASED ON WEARABLE INTERNET OF THINGS FOR SMART HEALTHCARE Fu Xiao, Qianwen Miao, Xiaohui Xie, Lijuan Sun, and Ruchuan Wang
60	EDGE COMPUTING WITH CLOUD FOR VOICE DISORDER ASSESSMENT AND TREATMENT Ghulam Muhammad, Mohammed F. Alhamid, Mansour Alsulaiman, and Brij Gupta
AMATEUR DRONE SURVEILLANCE: APPLICATIONS, ARCHITECTURES, ENABLING TECHNOLOGIES, AND PUBLIC SAFETY ISSUES: PART 2 GUEST EDITORS: ZEESHAN KALEEM, MUKESH HUSAIN REHMANI, EHAZ AHMED, ABBAS JAMNUPUR, JOEL J. P. C. RODRIGUES, HASSNA MOUSTAFA, AND WAEL GUIBINE	
66	GUEST EDITORIAL
68	ANTI-DRONE SYSTEM WITH MULTIPLE SURVEILLANCE TECHNOLOGIES: ARCHITECTURE, IMPLEMENTATION, AND CHALLENGES Xiufang Shi, Chaoqun Yang, Weiguo Xie, Chao Liang, Zhiguo Shi, and Jiming Chen
75	DETECTION, TRACKING, AND INTERDICTION FOR AMATEUR DRONES Ismail Güvenc, Farshad Koohfar, Simran Singh, Mihail L. Sichitiu, and David Malobik
82	MULTIPLE MOVING TARGETS SURVEILLANCE BASED ON A COOPERATIVE NETWORK FOR MULTI-UAV Jingjing Gu, Tao Su, Qihong Wang, Xiaojiang Du, and Mohsen Guizani
90	SOFTWARE DEFINED RADIO AND WIRELESS ACOUSTIC NETWORKING FOR AMATEUR DRONE SURVEILLANCE Xuejun Yue, Yongxin Liu, Jian Wang, Houbing Song, and Huiru Cao

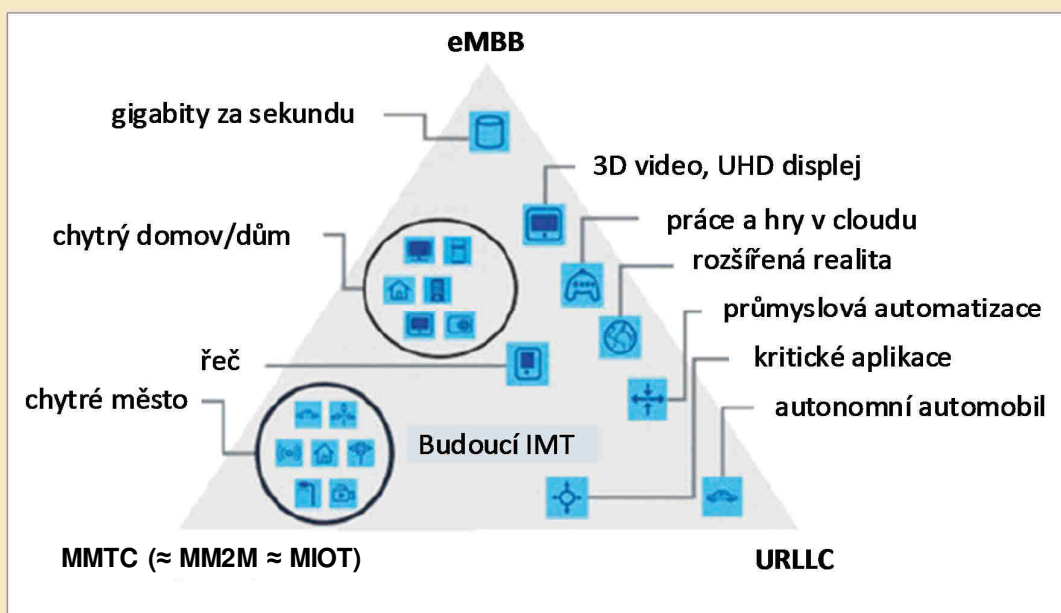
98	DESIGNING UAV SURVEILLANCE FRAMEWORKS FOR SMART CITY AND EXTENSIVE OCEAN WITH DIFFERENTIAL PERSPECTIVES Hyunbum Kim, Lyndie Mokdad, and Jalel Ben-Othman	
106	UNAUTHORIZED AMATEUR UAV DETECTION BASED ON WIFI STATISTICAL FINGERPRINT ANALYSIS Igor Baki, Chiara Caribotta, Fabio Lasagotto, Andrea Scaroni, and Sandro Zappatore	I
112	LOW-COMPLEXITY PORTABLE PASSIVE DRONE SURVEILLANCE VIA SDR-BASED SIGNAL PROCESSING Hui Fu, Samith Abeywickrama, Lihao Zhang, and Chao Yuan	
120	SECURE AND EFFICIENT CONTEXT-AWARE LOCALIZATION OF DRONES IN URBAN SCENARIOS Vishal Sharma, Dushantha Nalin K. Jayakody, Jian You, Reinhard Kamek, and Jun Li	
129	LOCALIZATION AND ENERGY-EFFICIENT DATA ROUTING FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES: FUZZY-LOGIC-BASED APPROACH Fekher Kholif, Abbas Ibrahim, Kamel Singh, and Mohamed Atti	
MULTI-CHANNEL COGNITIVE RADIO AD HOC NETWORKS GUEST EDITORS: HIKARU ZHANG, NUREI I. SAKUR, JESSI BEN-OTMAN, OLIVER HOLLAND, JAMME MAAREF, AND WEI TAN		
134	GUEST EDITORIAL	
136	COMPRESSED WIDEBAND SPECTRUM SENSING: CONCEPT, CHALLENGES, AND ENABLERS Bechir Hamrouk, Bassem Khalil, and Mohsen Guizani	
142	COOPERATIVE SPECTRUM SENSING AS IMAGE SEGMENTATION: A NEW DATA FUSION SCHEME Kunyu Wu, Min Yang, Chintia Tellenbaum, and Dongzhang Ma	
149	CONTENTION RESOLUTION MECHANISMS FOR MULTI-CHANNEL COGNITIVE RADIO AD HOC NETWORKS Yi-Tang Wang, Guo-Chang Yang, Min-Kuan Cheng, and Wing C. Kwong	
156	CLUSTERING IN MULTI-CHANNEL COGNITIVE RADIO AD HOC AND SENSOR NETWORKS Mustafa Özgür, Fatih Ağaç, and Oguz B. Akan	
164	CHANNEL CLUSTERING AND QoS LEVEL IDENTIFICATION SCHEME FOR MULTI-CHANNEL COGNITIVE RADIO NETWORKS Angeel Ali, Israr Yaseen, Ejaz Ahmad, Muhammad Imran, Kyung-Sup Kwak, Adnan Ahmad, Syed Azeed Hussain, and Zulfinger Ali	
172	CONSTRUCTING A ROBUST TOPOLOGY FOR RELIABLE COMMUNICATIONS IN MULTI-CHANNEL COGNITIVE RADIO AD HOC NETWORKS Yan Shi, Hongguang Sun, Min Sheng, Jiansong Li, and Xian Li	
180	EMOTION-AWARE COGNITIVE SYSTEM IN MULTI-CHANNEL COGNITIVE RADIO AD HOC NETWORKS Xiping Hu, Jun Chang, Mengzhu Zhou, Bin Hu, Xin Jiang, Yi Guo, Kun Bai, and Fei Wang	
ACCEPTED FROM OPEN CALL		
188	COGNITIVE NON-ORTHOGONAL MULTIPLE ACCESS WITH COOPERATIVE RELAYING: A NEW WIRELESS FRONTIER FOR 5G SPECTRUM SHARING Liu Lu, Jian Chen, Qiang Ni, Zhiguo Ding, and Hai Jiang	
196	OUT-OF-BAND RADIATION FROM LARGE ANTENNA ARRAYS Christopher Mallin, Erik C. Larson, Ulf Gustavsson, Thomas Eriksson, and Robert W. Heath, Jr.	S
204	THE SKY IS NOT THE LIMIT: LTE FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES Xingjin Lin, Vijaya Jayaraman, Sae D. Munirathin, Shao Gao, Horek Aplund, Holke-Lina Møllerhøj, Mette Bergström, Sebastian Euler, and Y.-P. Eric Wang	
211	LOW RF-COMPLEXITY TECHNOLOGIES TO ENABLE MILLIMETER-WAVE MIMO WITH LARGE ANTENNA ARRAY FOR 5G WIRELESS COMMUNICATIONS Wenyan Cao, Jingdong Dai, and Albar M. Sayeed	
218	TRAFFIC REMAPPING ATTACKS IN AD HOC NETWORKS Seymen Sevil and Jerry Kozmicki	PL

Evoluce veřejné pozemní mobilní komunikace



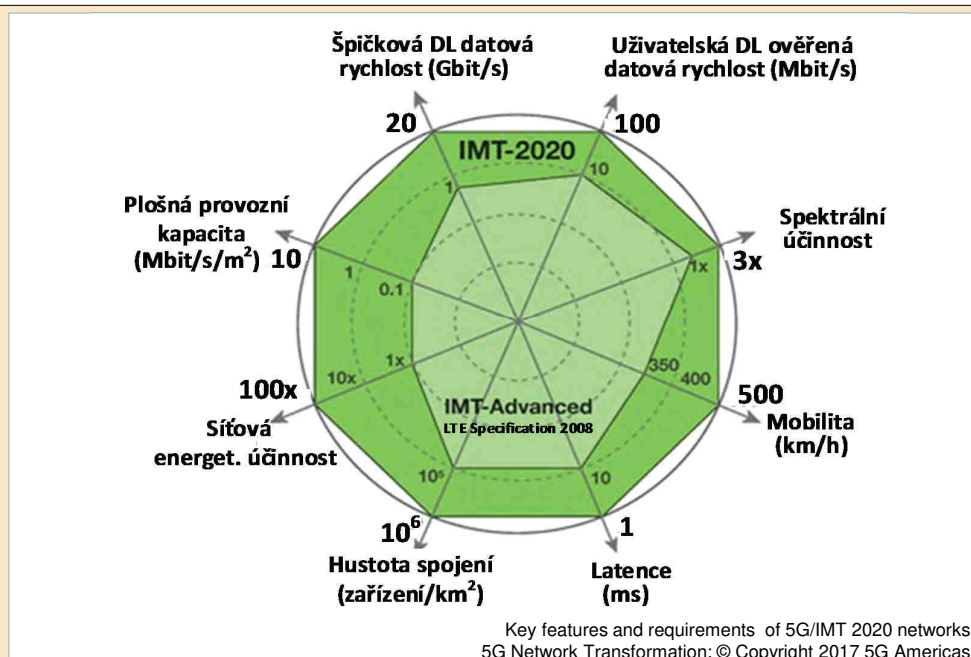
Tři vývojové směry využití sítí 5G

Pátá generace mobilních komunikačních sítí (5G) bude splňovat stále rostoucí nároky na vyšší uživatelskou datovou rychlost i systémovou propustnost, nižší síťovou latenci, větší energetickou a spektrální účinnost a spolehlivou všudypřítomnou konektivitu



eMBB: enhance Mobile Broadband
MMTC Massive Machine Type Communication
URLLC: Ultra-Reliable Low Latency Communication

Klíčové parametry sítí 4G a 5G podle dokumentů ITU-R



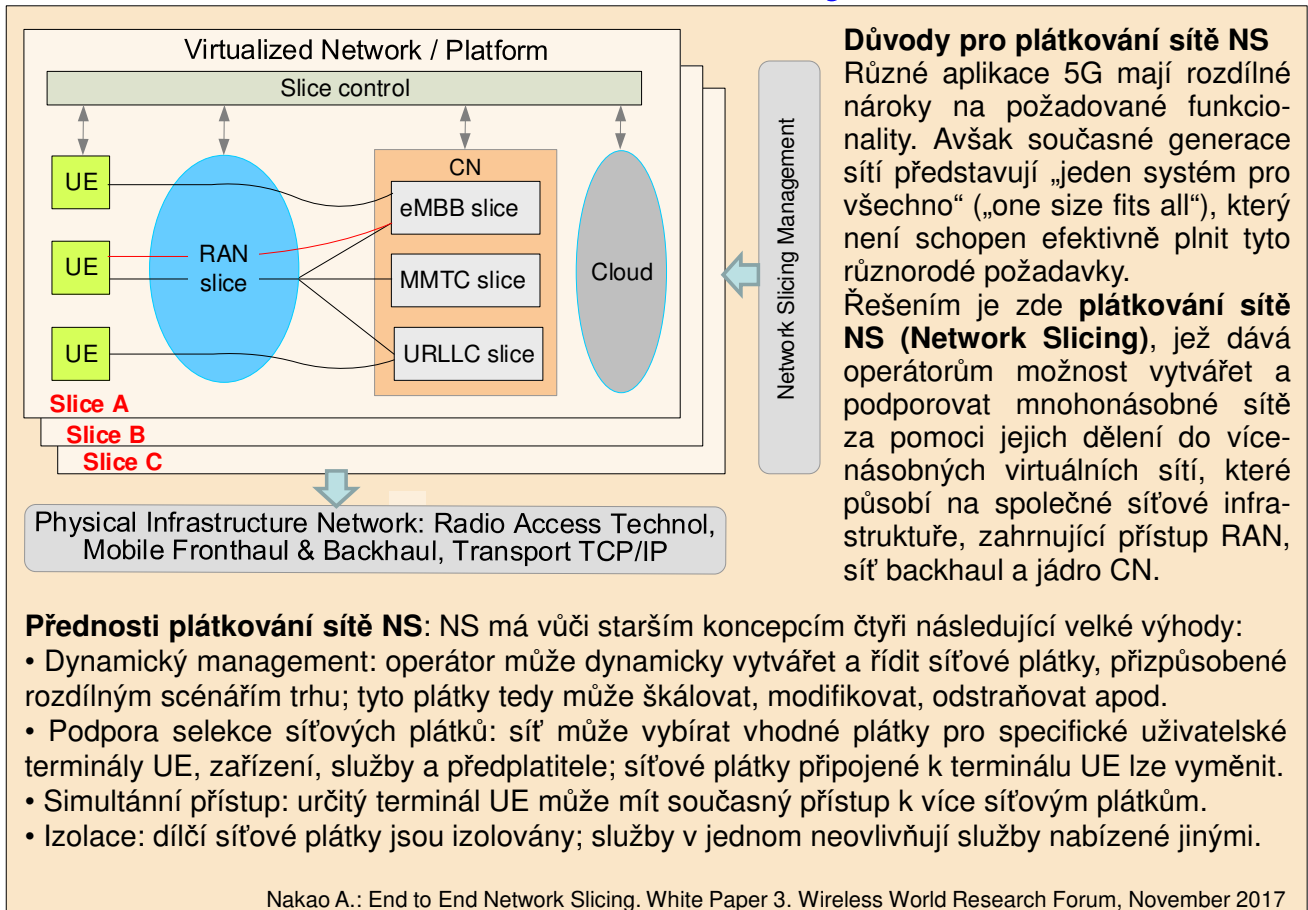
- Dokumenty IMT-Advanced definují soubor požadavků, vytyčených unií ITU-R (rok 2008), které odpovídají 4. generaci mobilních sítí (4G), reprezentované globálním standardem LTE.
- Dokumenty IMT-2020 specifikují soubor požadavků, vytyčených unií ITU-R (rok 2018), jež odpovídají 5. generaci mobilních sítí (5G); ta je představovaná především novým standardem 5G NR
- Uvedených různorodých parametrů však lze dosáhnout jen za pomoci dalších technik přístupu, (evolved LTE, WLAN, Fixed Access) se společným jádrem CN, čímž vzniká **heterogenní síť 5G**.

Tři základní oblasti využití sítí 5G

- **Obohacené mobilní širokopásmové aplikace eMBB** jsou určeny pro personalizované případy využití HTC (human type communication). Mezi ně náleží mobilní rozhlasové a multikastové služby, širokopásmové multimediální aplikace apod, které však budou vůči dosavadním mobilním širokopásmovým službám MBB výrazně vylepšené, nebo budou zcela nové. Prudce bude narůstat okruh aplikací z oblastí virtuální reality (VR) a rozšířené reality (AR). Ultraširokopásmovosti se zde dosahuje aplikací progresivních technologií M-MIMO (massive MIMO), modulací HOM (high order modulation), technologií Network Slicing, aplikací Cloud a Fog Computingu, osvojováním nových milimetrových frekvenčních pásem apod.
- **Masívní komunikace strojového typu MMTC**, označované též jako MM2M (massive machine to machine), ale i mIoT (massive internet of things), nalezne uplatnění v aplikacích s velmi velkým počtem připojených terminálů, přenášejících zpravidla malé objemy dat necitlivých na zpoždění. Tyto terminály musí mít co nejnižší energetickou spotřebu, která jim zajistí funkčnost 5 až 10 roků bez výměny baterií a musí být co nejlevnější.
- **Ultraspolehlivá a nízkolatenční komunikace URLLC** se uplatní v aplikacích vyžadujících vysokou provozní spolehlivost, doprovázenou často i nízkou latencí. Typické případy využití se vyskytují např. v bezdrátové robotické chirurgii WRS (wireless robotic surgery), chytrých energetických mřížkách SG (smart grids), v inteligentních dopravních systémech ITS (intelligent *transport systems*) a v řadě dalších.

V těchto nových oblastech využití se objeví i zcela nové služby realizované v rámci Internetu věcí IoT (internet of things), kde budou nepostradatelným podpurným prostředkem automatizovaného průmyslu Industry 4.0, součástí technologií virtuální a rozšířené reality (AR a VR), autonomního řízení různých dopravních prostředků apod. Doslova masívní uplatnění naleznou ve zdravotnictví, v prostředí chytrých domů i měst apod.

Plátkování sítě 5G



Nové technologie v sítích 5G

Přehled nových technologií sítí 5G

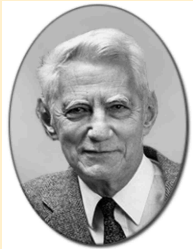
Pokud mají systémy 5. generace plnit vytyčené náročné úkoly, je nutné v nich uplatnit zcela nové, nebo výrazně inovované technologie a také zcela nové metody zpracování signálů. Hlavní z nich jsou shrnuty dále:

- Technologie milimetrových vln s extrémní šířkou pásma (30 až 300 GHz)
- Densifikace tj. zvyšování hustoty buňkových struktur
- Statické a dynamické formování anténních svazků
- Systémy s více anténami MAS: SISO/SIMO/MISO/MIMO
- Mnohouživatelské systémy Mu-MIMO a systémy masívní MIMO (M-MIMO)
- Nové formáty modulací a mnohonásobného přístupu v sítích 5G
- Plný duplex v jediném pásmu pro současné vysílání a příjem IBFD
- Technika přímé komunikace mezi uživatelskými terminály D-2-D

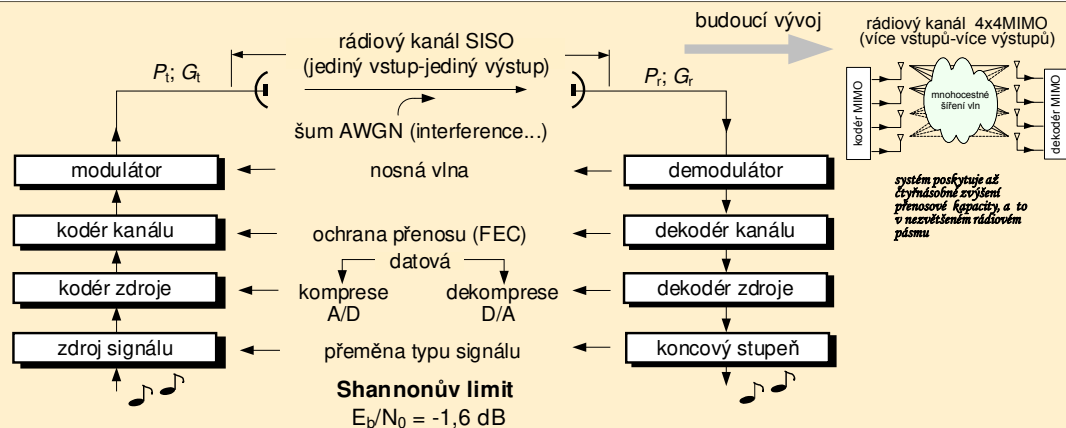


Milimetrové vlny

Obecné Shannonovo schéma radiokomunikačního systému v klasické koncepci SISO (Shannon 1948)



C. E. Shannon
1916 - 2001



Maximální dosažitelná kapacita C_0 rádiového kanálu SISO, při působení šumu AWGN (Shannonův vztah):

Pokud se použije ve vysílači jediná vysílací anténa a v přijímači N_R jediná přijímací anténa (SISO), vytvoří se mezi nimi jediný rádiový kanál (event množecenný). Jeho maximální přenosová kapacita je potom dána vztahem

$$C_0 = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) = B \log_2 \left(1 + \frac{f_b E_b}{BN_0} \right), \text{ nebo } C_0 = 3,32B \log \left(1 + \frac{S}{N_0} \right) \quad [\text{bit/s}]$$

C_0 : maximální dosažitelná přenosová kapacita kanálu; B : šířka rádiového pásma; S : výkon užitečného signálu; N : výkon šumu; N_0 : výkon šumu na jednotku pásma; E_b : vý

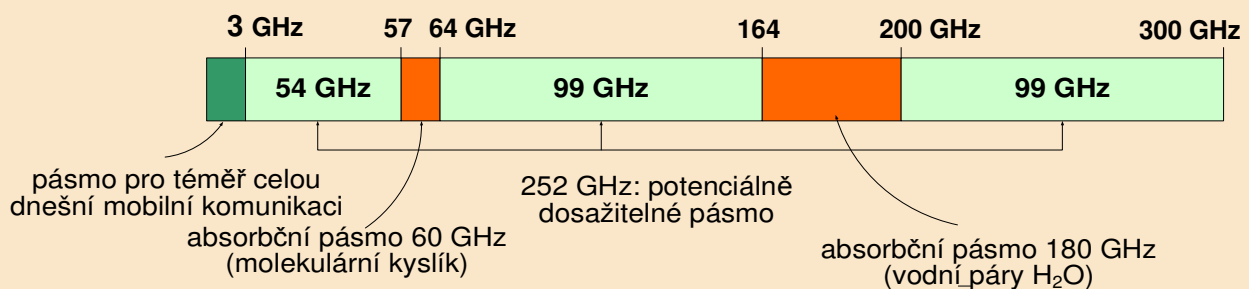
Radiok
dále zis

Ztráty šířením v pozemských kanálech: $PL \approx \text{konst. } f^2 \cdot d^\gamma$,
přičemž koeficient šíření $\gamma = 2 \dots 6$ (dle místních podmínek)

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 = P_t G_t G_r \left(\frac{c}{4\pi d f} \right)^2 \quad c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Vlastnosti rádiových kanálů v oblasti milimetrových vln (I)

Pásmo centimetrových a milimetrových vln 3–300 GHz, nabízí ≈ 100 GHz dosažitelnou šířku pásma, velice žádoucí pro ultraširokopásmové aplikace mobilních systémů 5G



- V ideálním rádiovém kanálu LOS ztráty PL rostou se čtvercem frekvence f a čtvercem – či s vyšší mocninou γ vzdálenosti d , tj. $PL \approx \text{konst. } f^2 \cdot d^\gamma$, přičemž $\gamma = 2 \dots 6$.
- Tento nárůst PL je tak velký, že mm vlny bude možné efektivně používat jen u malých buněk: mikro (stovky metrů), piko (desítky metrů) a femto (metry).
- Zvětšený útlum lze kompenzovat užitím antén s velkou směrovostí a tedy i ziskem.
- V milimetrové oblasti se fixní antény s velkým ziskem resp. směrovostí - ať již v diskrétní formě, či ve formě anténních polí - snadno realizují, neboť při neměnných rozměrech se u většiny typů antén (parabolických ap) s růstem frekvence zvětšuje zisk.
- V reálném pozemském kanálu vlivem ztrát šířením PL (path loss) a zastínění (shadowing) roste útlum s mocninou vzdálenosti d^γ ; koeficient ztrát šířením γ je na frekvenci jen málo závislý, přičemž má v závislosti na prostředí hodnoty $\gamma = 2 \dots 6$.

Vlastnosti rádiových kanálů v oblasti milimetrových vln (II)

Problémy milimetrových vln a jejich řešení

- Útlum rádiového kanálu roste - v ideálních i reálných podmínkách - s kvadrátem frekvence!!!
- Trasy NLOS vykazují silný odraz a rozptyl, ohyb je slabý; zastínění pevnými překážkami (cihlové zdi,...) je velké; problém pomáhá řešit technika systémů s více anténami MAS.
- Pokrytí uvnitř budov (indoor) je nutné zajistit pomocí malých buněk, distribuovaných antén DAS, reléových uzlů (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 právě využívat nová milimetrová pásma.
- Makrobuňky jsou určeny k celoplošnému pokrytí, se spolehlivým předáváním (HO tj. handover) - i když s nižší dosažitelnou síťovou propustností a uživatelskou rychlostí.
- Mikrobuňky potom zajišťují vysokou lokální propustnost i uživatelskou rychlost.

[1] T. S. Rappaport et al., "Overview of Millimeter Wave Communications for Fifth-Generation (5G)...," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Special Issue on 5G, Nov. 2017.

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 $G_t = G_r = 1$): $\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 = \left(\frac{c_0}{4\pi d f} \right)^2$

Zisk kanálu šíření $G_{ch} \propto \frac{1}{f^2}$, avšak zisk antény $G_a \propto f^2 \Rightarrow G = \frac{4\pi A_{eff}}{\lambda^2} = 4\pi \left(\frac{f}{c_0} \right)^2$

Zisk rádiového kanálu klesá s kvadrátem frekvence, avšak zisk vysílací a také přijímací antény (aperturového typu) roste s kvadrátem frekvence a tím tedy může kompenzovat rostoucí útlum kanálu. Této možnosti je ale možné využít jen v určitých konkrétních případech, jako jsou např. fixní kanály PtP (bod bod) apod.

Šíření v rádiových kanálech NLOS podporuje odraz (reflection) a rozptyl rádiových vln, velmi slabé je působení ohybu. Přídavné ztráty vznikají také vlivem deště a různých forem atmosférické absorpce.

Vliv prostředí (ztráty šířením, zastínění ..) udává koeficient ztrát šířením γ , závislý na charakteru terénu, vegetaci apod., přičemž v praxi $\gamma = 2 \dots 7$.

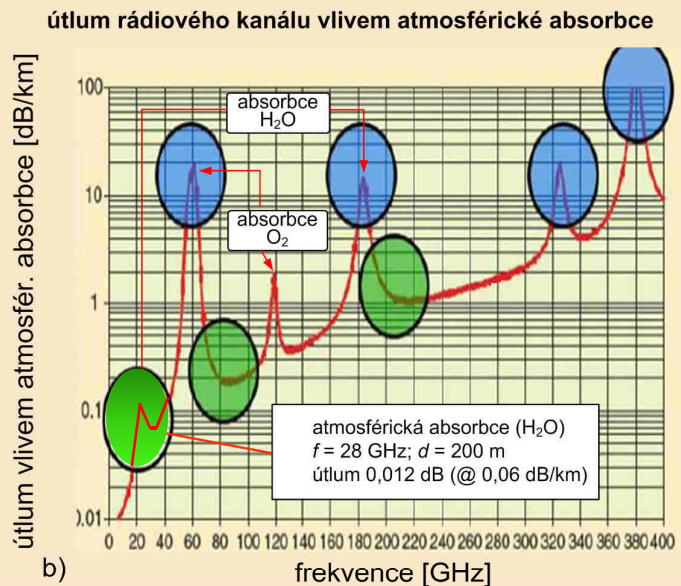
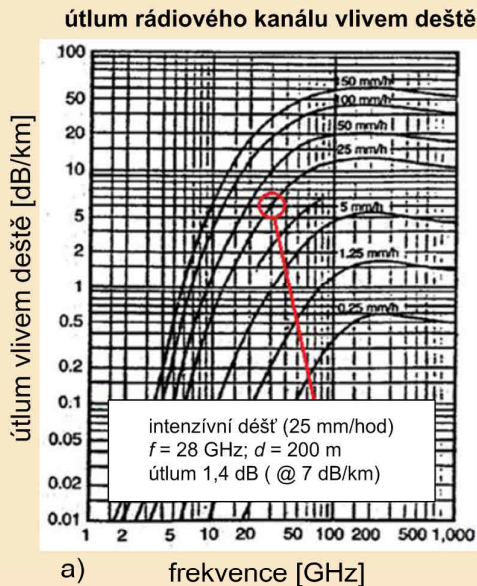
Neprostupné překážky vykazují velký útlum (cihlová zeď > 35 dB ...)

Závěry:

Theodor Rappaport: 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 absorpce na útlum není sice zanedbatelný, avšak většinou je při krátkých trasách Tx – Rx nepodstatný.

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

Útlum rádiových kanálů vlivem deště a atmosférické absorpce



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 $L_{prop}=(4\pi d/\lambda)^2$)

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

Porovnání buňkové propustnosti standardu LTE-4G a 5G

- Initial results show significant gain over LTE
- Further gains with spatial mux, subband scheduling and wider

System antenna	Duplex BW	fc (GHz)	Antenna	Cell throughput (Mbps/cell)		Cell edge rate (Mbps/user, 5%)	
				DL	UL	DL	UL
mmW	1 GHz TDD	28	4x4 UE 8x8 eNB	1514	1468	28.5	19.9
		73	8x8 UE 8x8 eNB	1435	1465	24.8	19.8
Current LTE	20+20 MHz FDD	2.5	(2x2 DL, 2x4 UL)	53.8	47.2	1.80	1.94

10 UEs per cell, ISD=200m,
 hex cell layout
 LTE capacity estimates from 36.814

~ 25x gain

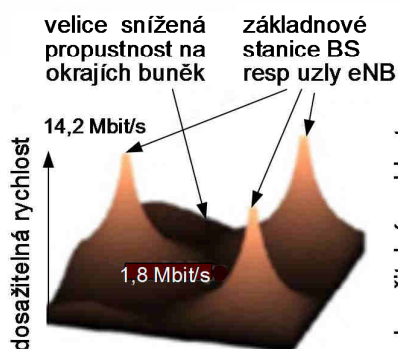
~ 10x gain

M. R. Akdeniz, Y. Liu, M. K. Samimi, S. Sun, S. Rangan, T. S. Rappaport, E. Erkip, "Millimeter Wave Channel Modeling and Cellular Capacity Evaluation," IEEE J. Sel. Areas on Comm., Aug. 2014

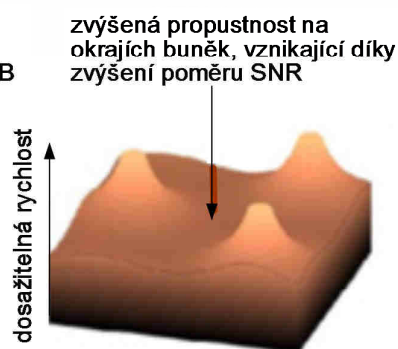
Densifikace v buňkových sítích 5G

Různé metody zlepšení pokrytí v sítích LTE

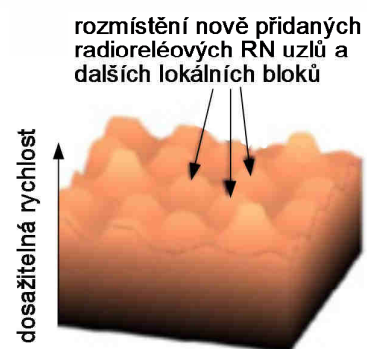
Okraje buněk a zastíněné oblasti (různé terénní překážky, vysoká výstavba, tunely ...) pracují se signály s malým poměrem SNR, což má za následek sníženou přenosovou rychlost, zvětšenou chybovost apod. Tomu lze odpomoci při stávajícím počtu základnových stanic např. aplikací systémů s více anténami SIMO, MISO s prostorovou diverzitou resp. s formováním svazků atd. Další zlepšení může přinést doplnění dosavadní sítě základnových stanic (eNB) novými radioreléovými uily RN, domovskými uzly HeNB a dalšími lokálními bloky.



běžný systém LTE s makrobuňkami, na jejichž okrajích se v důsledku nízkého poměru SNR zhoršuje funkce



sdrůžování nosných vln, koordinovaný mnohabodový přenos, výrazné rozšíření techniky více antén,



heterogenní sítě, dvojrvtvá konektivita: deštníkové makrovrstvy (signalizace), pod nimiž jsou dolní datové, RR uzly apod.

Přechod od tradičních velkých buněk k malým buňkám

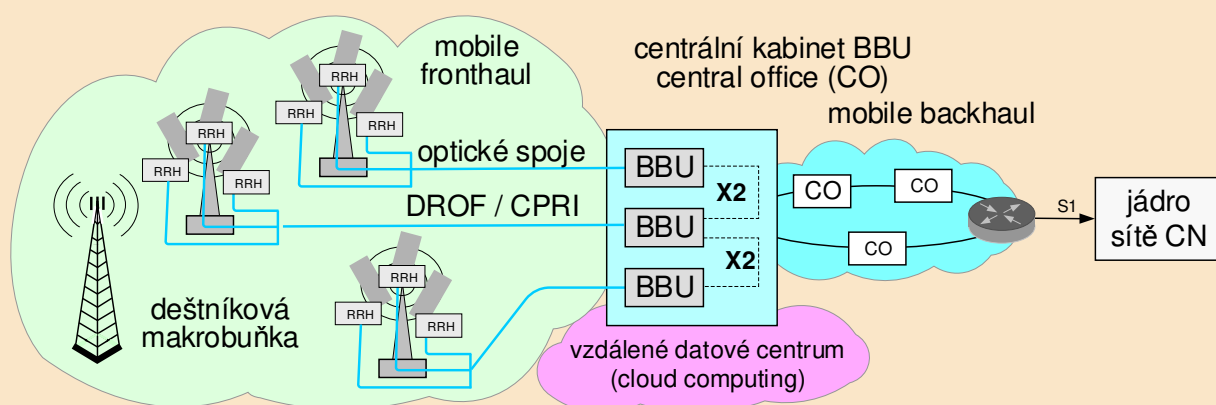
Parameters	traditional net 2009-2014	denser net 2015-2017	very dense net 2017-2020	ultra dense net after 2020
base stations/km ²	7 BS	21 BS	26 BS	93 BS
base stations distance	395 m	217 m	209 m	112 m
traffic density	1 Gb/s/km ²	5 Gb/s/km ²	10 Gb/s/km ²	40 Gb/s/km ²
active users	250	625	1 000	2 500

- Densifikace buňkových struktur spočívá v postupném doplňování makrobuněk malými buňkami mikro (< 200 m), piko (desítky m) a femto (metry) buňkami. Takto vzniká heterogenní síť HetNet (Heterogeneous Network), typická pro sítě 4,5G a 5G..
- Malé buňky mají své základnové stanice BS s menším vysílacím výkonem. Umisťují se do center měst, na nádraží, do univerzitní kampusů ap) a často i uvnitř různých objektů. V nových koncepcích BS obsahují jen rádiovou hlavici RRH
- Pro zlepšení pokrytí v zastíněných lokalitách, na hranicích buněk ap, lze uvedenou fixní strukturu doplňovat ještě radioreléovými uzly RN (Relay Node). Ty jsou nejprve fixní (FRN), v dalším vývoji se pak objevují uzly mobilní (MRN).
- V HetNet prostředí se provozují i uživatelské terminály s přímou komunikací D2D (Device-to-Device), které jsou nezávislé na koopeeraci s mateřskou sítí.
- Slabinou sítí HetNet s malými buňkami je vysoké riziko mezibuňkových interferencí.
- Velký počet malých buněk také zvětšuje nebezpečí přetížení rádiových sítí backhaul, a to jak z hlediska jejich kapacity, tak energetické účinnosti.
- Toto přetížení redukuje koncepce rádiového víceskokového backhaulingu, s využitím progresivních anténních technik, jako je formování svazků, M-MIMO apod.

Vývoj buňkových koncepcí od homogenních k heterogenním

Původní homogenní buňková síť: jen zhruba stejné velké buňky

Heterogenní buňková síť: velké i malé buňky, reléové uzly, D2D...



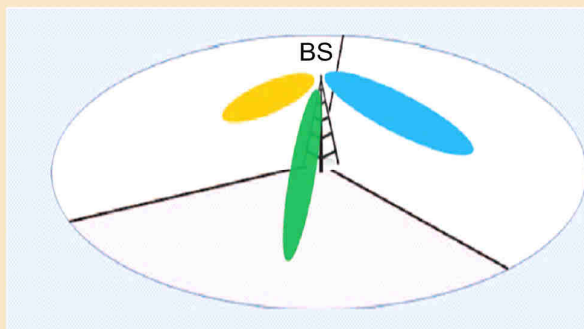
RRH: Remote Radio Head; BBU: Base Band Unit; CO: Central Office (Pool); CN: Core Network; DROF: Digital Radio over Fiber; CPRI: Common Public Radio Interface; WDMA: Wave Div. MA

- V základnových stanicích BS malých buněk jsou jejich rádiové jednotky RFU umístěny těsně u antén na vrcholech stožárů, ve formě vzdálených rádiových hlavic RRH. Ty vytvářejí distribuovaný anténní systém DAS. Tak se odstraní velké ztráty v anténních napáječích.
- Jednotky základního pásma BBU více základnových stanic jsou soustředěny do jediné velké procesní jednotky CO, která je potom ovšem od hlavic RRH značně vzdálena. Vzájemné spojení bloků RRH a CO BBU zprostředkuje síť „mobile fronthaul“. Tu realizují klasické mikrovlnné reléové nebo optické spoje, Optické spoje aplikují vlnový multiplex WDMA a přenášejí digitalizované rádiové signály buď ve formátu DROF, nebo CPRI. Jednotky BBU koncentrované do jediné lokality (CO), propojuje širokopásmovými spoji (rozhraní X2).

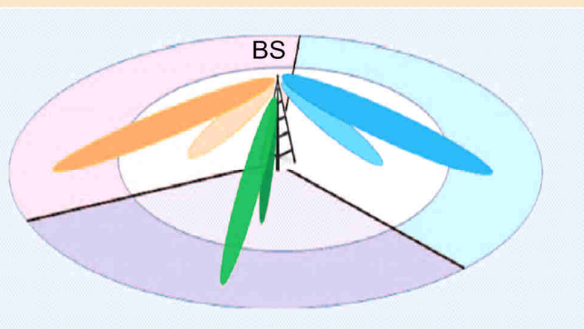
2D a 3D formování anténních svazků v buňkových sítích

Statické formování anténních vysílaných a přijímaných svazků

Statické dvojdimenzionální formování
svazků 2DBF: sektorizace $3 \times 120^\circ$



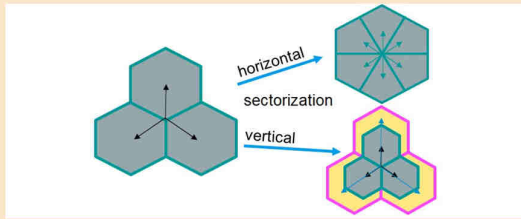
Statické trojdimenzionální formování
svazků 3DBF: sektorizace $3 \times 2 \times 120^\circ$



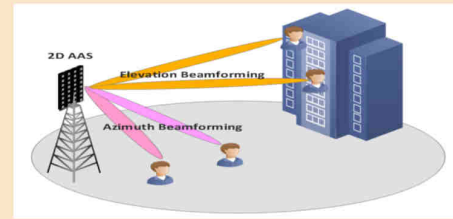
- Formování svazků BF (Beamforming) provádí tvarování anténních diagramů.
- V mobilní komunikaci se uplatnila technika BF nejprve u statických sektorizovaných anténních systémů na základnových stanicích BS, kde byla jediná všesměrová anténa nahrazena například se třemi fixními směrovými anténami. Jejich vyzařování bylo zformováno do tří svazků s šířkami diagramů 120° v horizontální rovině; tak vzniká BF systém $3 \times 120^\circ$.
- Dokonalejší varianta může vytvářet např. pomocí šesti fixních směrových antén třídimenzionální statický systém 3DBF typu $3 \times 2 \times 120^\circ$, který adaptuje dílčí směrové diagramy jak v horizontální, tak i ve vertikální rovině.
- Techniky 2DBF a zvláště 3DBF zmenšují mezibuňkové a mezisektorové interference a zvyšují energetickou účinnost systému i jeho uživatelskou kapacitu.

Statické formování anténních vysílaných a přijímaných svazků

2D and 3D Beamforming



FD – MIMO Beamforming

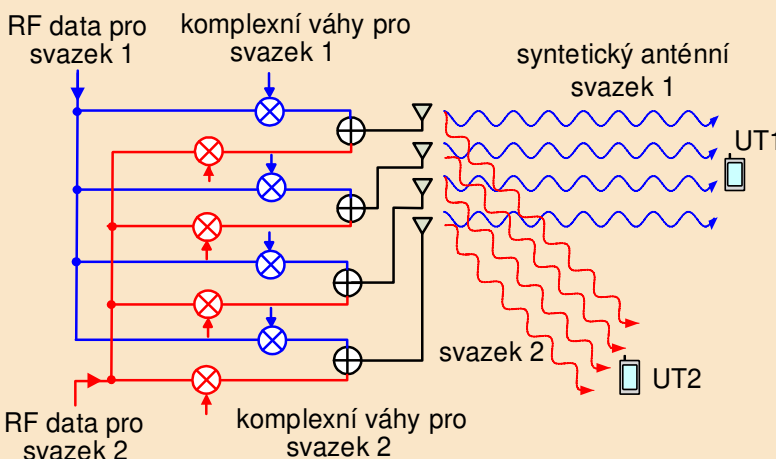


- **Formování BF (Beamforming), nazývané také sektorizace**, slouží k vytváření směrových anténních svazků. Ve svých důsledcích výrazně zvyšuje kapacitu (SE) celého systému a též EE
- **Dvojdímní BF (2DBF)**: Původní technika BF se užívala u statických sektorizovaných 2D anténních systémů na stanicích BS, u nichž je jediná všesměrová (omni) anténa nahrazena třemi fixními směrovými anténami. Jejich vyzařování v azimutu (HP) je tvarováno do tří svazků s šířkami diagramů 120° , čímž vzniká 2DBF systém $3 \times 120^\circ$. (a podobně verze $6 \times 60^\circ$ a $12 \times 30^\circ$).
- **Třídímní BF (3DBF)**: nové varianty formování vytvářejí např. pomocí šesti fixních směrových antén třídímní statický systém 3DBF typu $3 \times 2 \times 120^\circ$, s adaptací v HP i ve VP
- **Sektorizace zvyšuje propustnost**: ve 2D systému $3 \times 120^\circ$ každý svazek užívá jednu třetinu původních kanálů buňky, čímž se redukuje počet interferencí na stejných frekvencích a způsobených buňkami v sousedních svazcích, a to ze 6 na 2. To vede k výraznému zvýšení poměru SIR a v důsledku toho i k trojnásobnému zvýšení střední propustnosti buňky (obecně je zvýšení propustnosti úměrné počtu sektorů S v buňce).
V systémech 2DBF mají v elevaci (VP) směrové diagramy vždy velkou směrovost, se svazkem cca 10 až 20° ; mírným náklonem diagramu k zemi (antenna downtilting) se může SIR dále zlepšit
- **Sektorizace BS zvyšuje „single user“ SU energet. účinnost EE**, vůči BS s omni anténou
- Všechna uvedená zdokonalení ale komplikují implementaci i management celého systému (je nutné zavést intrabuňkové přepínání apod).

arXiv:1805.00225v2 [cs.IT] 16 Aug 2018

U5

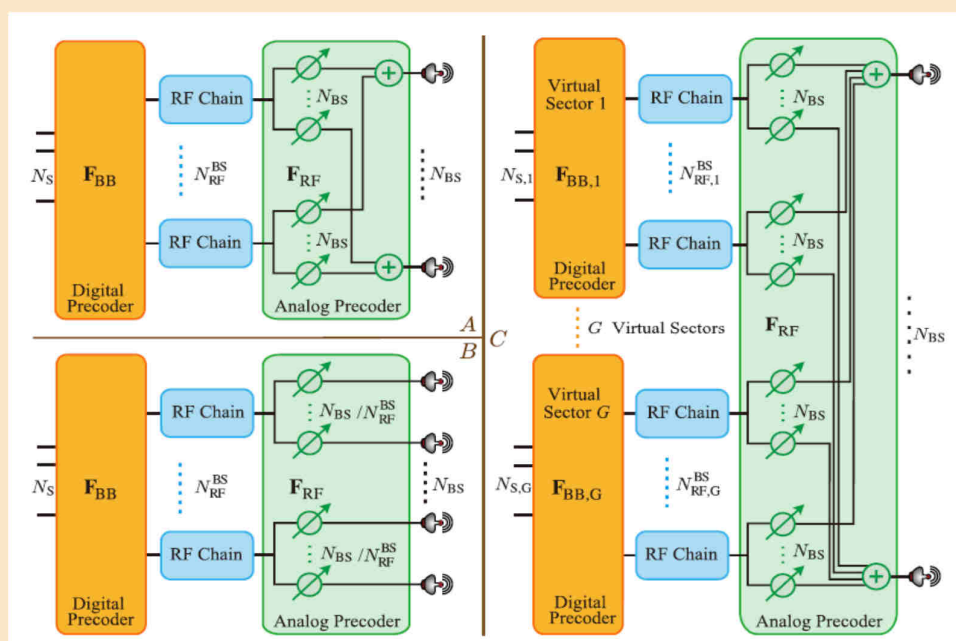
Dynamické formování vysílaných anténních svazků



Formování svazků vyžaduje malou separaci dílčích antén, srovnatelnou s délkou vlny λ . Tím je zaručeno, že vysílané dílčí signály jsou v cílové stanici UT silně korelovány. Naproti tomu systémy pro prostorovou diverzitu nebo multiplex pracují nejlépe při velké vzdálenosti antén $\gg \lambda$, kdy jsou dílčí signály přijímané jistým terminálem velmi slabě korelovány.

- V systémech s dynamickým formováním svazků se využívá **technika fázovaných anténních řad**. Jejich příkladem je dynamický dvojdímní systém dle obr, určený pro vysílač základnové stanice BS (dual layer beamforming).
- Ten pomocí vhodných váhových signálů **nastavuje amplitudy a fáze RF signálů** napájecích dílčí antény jeho anténního pole a tak směruje vyzařované svazky na dva uživatelské terminály UT1 a UT2. Tuto koncepci lze rozšířit i na více terminálů UT.
- Tyto dva separované svazky mohou sdílet **stejně subnosné**, přenášející odlišné datové signály. Vlivem toho stanice BS může zdvojit kapacitu buňky.
- Je-li systém doplněn uzavřenou zpětnovazební smyčkou, může vysílané svazky automaticky zaměřovat i na pohybující se terminály UT.

Technologie hybridního formování svazků na trase DL

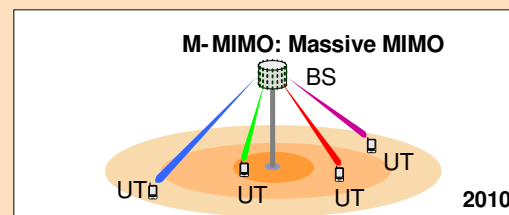
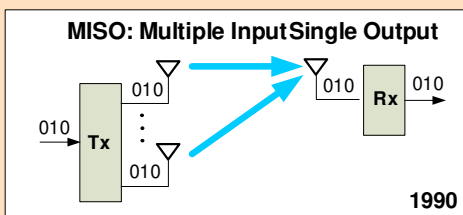
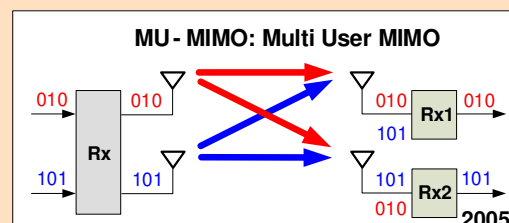
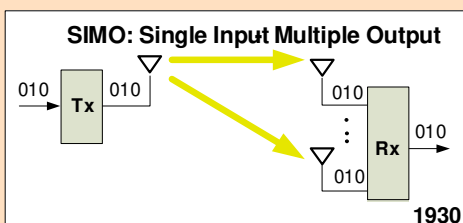
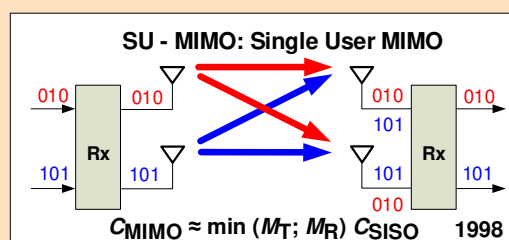
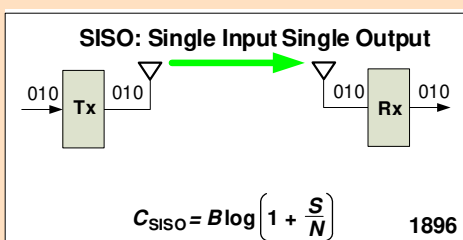


Různé verze hybridních struktur pro formování svazků BF na trase DL (vysílač BS):

- A: výstup každého analogového RF prekódéru je lineární kombinací všech RF signálů;
- B: jednodušší koncepce, kde každý RF trakt může být připojen jen k subsetu anténních elementů;
- C: analogový prekódér vytváří mnohonásobné virtuální sektory, jež umožňují separátní procesing signálů v BB a také aplikaci separátních tréninkových sekvencí i signalizace na UL, čímž se sníží přetížení signalizací i výpočetní výkon.

Anténní systémy SIMO, MISO a MIMO v buňkových sítích 5G

Různé formáty systémů MAS: SISO, SIMO, MISO a MIMO



- Systémy SIMO či MISO při malých odstupech dílčích antén slouží k formování anténních svazků BF, při velkých odstupech antén realizují prostorovou diverzitu SDD
- Systémy MIMO s velkými odstupy antén realizují prostorový multiplex a diverzitu SDM/SDD

Anténní systémy masívní MIMO (M-MIMO)

Systém Masívní MIMO (M-MIMO)

- V systému 5G přechod do milimetrových pásem umožní zmenšovat rozměry antén a tím zvyšovat jejich počty, v základnových stanicích BS běžně na několik stovek až tisíců. Takový systém se nazývá masívní MIMO (M-MIMO), nebo full-dimension MIMO apod.
- Velký počet antén na BS umožní vysílat data ke každému terminálu UT tj. na sestupné trase DL v podobě velmi úzkého „jehlového“ svazku. Díky tomu lze pro jednotlivé terminály užívat stejné frekvence a nezvětšený celkový vysílací výkon.
- Technika masívního formování svazků (Massive BF) může realizovat prostorový multiplex (SDM) (Space Division Multiplexing), s prostorovým dělením uživatelských kanálů.
- Ostré směřování vysílaných svazků na DL napomáhá k velmi účinné kompenzaci ztrát kanálu šíření a také k výraznému zmenšení interferencí, a to jak v rámci jediné buňky (intracell interference), tak v rámci více sousedních buněk (intercell interference).
- Mnohonásobný přístup se uskutečňuje formou časového multiplexu TDMA (Time Division Multiple Access), jež značně usnadňuje získávání informace o stavu kanálu CSI (Channel State Information), nutné k realizaci technik MIMO a BF. Přístup s frekvenčním dělením FDMA je v těchto aplikacích technicky mnohem náročnější.
- Miniaturní mobilní uživatelské terminály UT obsahují většinou jen jedinou anténu, takže na vstoupné trase UL nemohou aplikovat formování svých vysílaných svazků. Avšak mnohaprvkové anténní pole na BS je schopné v režimu přijímání vytvářet mnohasměrový přijímací diagram, jehož dílčí ostré přijímací laloky jsou stále zaměřeny na příslušné uživatelské terminály UT, ať jsou v klidu nebo v pohybu. Proto i přenos signálů na trase UL může mít vysokou energetickou i spektrální účinnost.

Vynálezce anténní technologie masívní MIMO (rok 2010)

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.

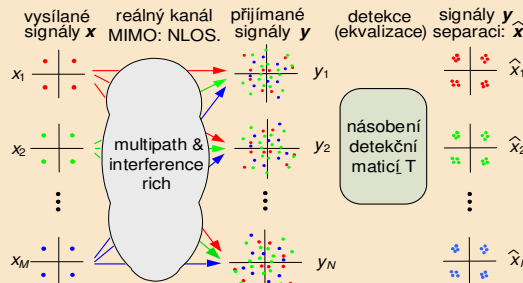
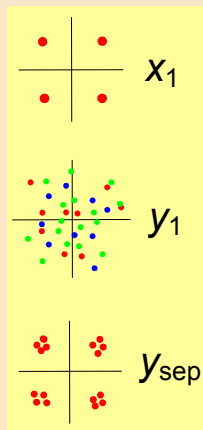
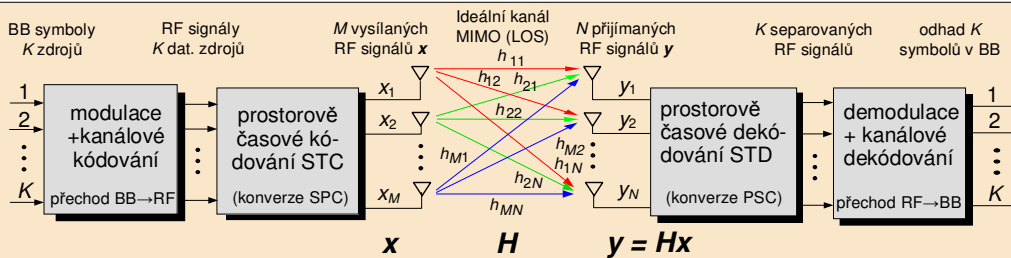


Massive MIMO: 50x Improvements!
Will FCC give him 10 MHz?

Bjornson E., et al.: Massive MIMO: Ten myths and one critical question...
IEEE Communications Magazine, February 2016

- Myth 1: Massive MIMO is only suitable for millimeter wave bands**
 - Myth 2: Massive MIMO only works in rich-scattering environments**
 - Myth 3: Massive MIMO performance can be achieved by open-loop beamforming**
 - Myth 4: The case for Massive MIMO relies on asymptotic results**
 - Myth 5: Too much performance is lost by linear processing**
 - Myth 6: Massive MIMO needs an order of magnitude more antennas than users**
 - Myth 7: A new terminal cannot join the system since there is no initial array gain**
 - Myth 8: Massive MIMO requires high precision hardware**
 - Myth 9: Many antennas: resource allocation and power ctrl is complicated**
 - Myth 10: Many antennas, the signal processing complexity will be overwhelming**
- The authors affirm: the statements above are completely false.**

System SU-MIMO: zpracování signálu bez šumu a šíření LOS

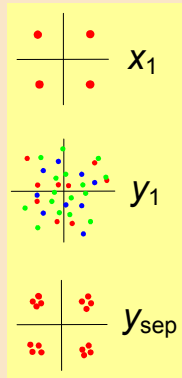
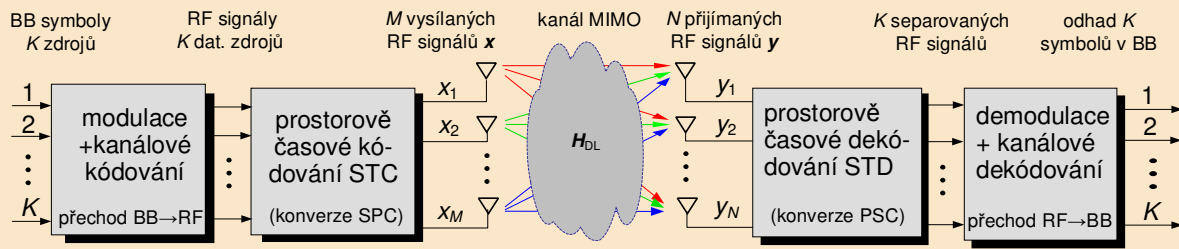


$$\begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ h_{N1} & h_{N2} & \dots & h_{NM} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_M \end{pmatrix}$$

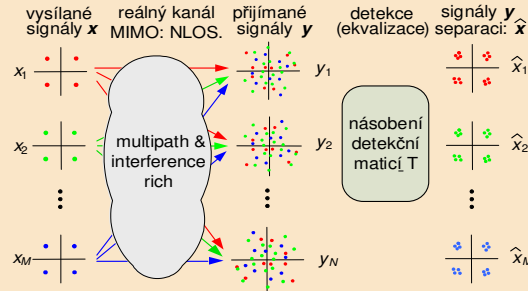
Dekódování v případě nulového šumu: přijímaný signál $y = Hx$, tedy dekódovaný signál $x = y H^{-1}$

Dekódování se zřejmě realizuje prostým násobením přijímaného signálu y inverzí H^{-1} kanálové matice H (pokud ovšem tato inverze, tj. inverzní matice k matici H existuje)

SU-MIMO: zpracování signálu s šumem a šířením NLOS

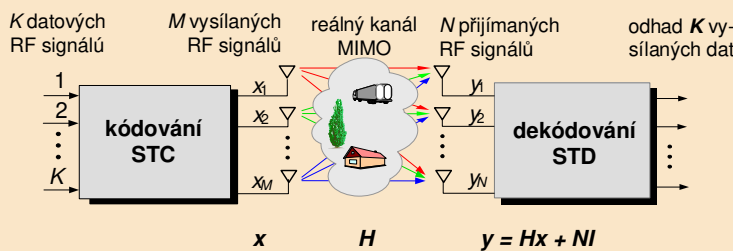


$$\mathbf{x} \quad \mathbf{H} \quad \mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n}$$



Dekódování v případě nenulového šumu a případně i interferencí je komplikované; realzuje se násobením přijímaných signálů vhodnou detekční maticí, jejíž vhodný tvar může systému zajistit buď maximální poměru SNR, nebo maximalizaci poměru SIR anebo minimalizaci středně kvadratické chyby (což ale zhruba odpovídá maximu poměru SINR)

SU-MIMO: dekodování MRC, ZF a MMSE



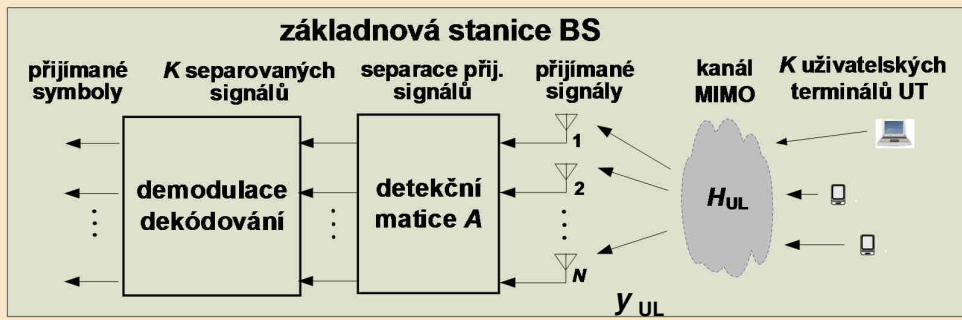
$$\begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1M} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ h_{N1} & h_{N2} & \dots & h_{NM} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_M \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_N \end{pmatrix}$$

Přijímaný signál \mathbf{y} doprovázený šumem \mathbf{N} a interferencemi \mathbf{I} : $\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + (\mathbf{N}\mathbf{I})$
 Jeho dekodování se realizuje násobením inverzí \mathbf{T}^{-1} dekodovací matice \mathbf{T}
 $\mathbf{x} = [\mathbf{H}\mathbf{x} + (\mathbf{N}\mathbf{I})] \mathbf{T}^{-1}$

V obecném případě nenulového šumu a interferencí lze volit typ STD dekodování tj. typ dekodovací matice \mathbf{T} jedním z následujících tří způsobů:

- **Dekódování s kombinováním na maximální poměr MRC** (Maximum Ratio Combining), jež sleduje dosažení maxima SNR , při zanedbávání mnohoživatelských interferencí; realizuje se prostým násobením přijímaného signálu konjugovanou transpozicí dekodovací matice \mathbf{T} .
- **Dekódování ZF** (Zero Forcing) sleduje co největší potlačení mnohoživatelských interferencí tj. maximum poměru SIR , bez ohledu na šum; realizuje se násobením přijímaného signálu tzv. pseudoinverzí dekodovací matice \mathbf{T} .
- **Dekódování s minimem střední kvadratické chyby MMSE** (Minimum Mean Square Error), směřuje k minimalizaci střední kvadratické chyby mezi odhadem vysílaného signálu v přijímači a skutečně vysílaným signálem. Tato technika vykazuje nejlepší poměr SINR a je tedy ze všech tří variant nejlepší.

System MU-MIMO: příjem uživatelských signálů v BS

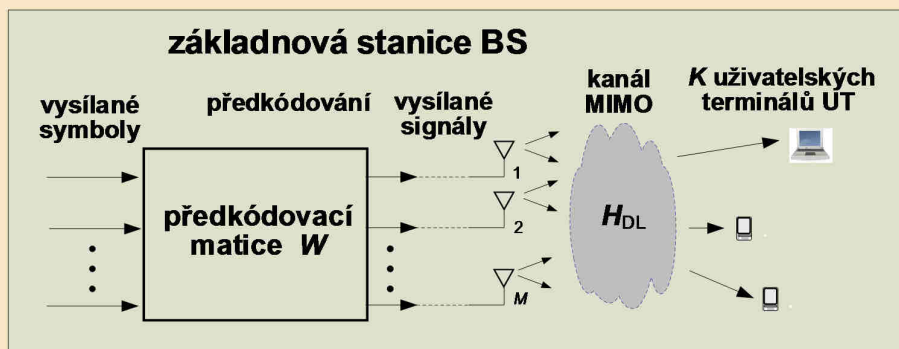


Přijímač na základnové stanici BS přijímá každou svojí anténou signály všech uživatelů, které v souhrnu vytvářejí signálový sloupcový vektor \mathbf{y}_{UL} . Jejich separace se realizuje násobením tohoto vektoru konjugovanou (Hermitovskou) transpozicí \mathbf{A}^H lineární detekční (transformační) matice \mathbf{A} . Tato matice se navrhuje tak, aby optimalizovala některý ze tří zvolených parametrů přijímaných signálů, a to poměr SNR , nebo poměr $SINR$ anebo středně-kvadratickou chybu. Na výstupu detekční matice se pak objevuje odhad kompletního přijímaného signálu. Separované uživatelské složky se dále již individuálně demodulují a dekodují. Detekční matice \mathbf{A} je určena pro tři výše uvedené typy přijímačů, v závislosti na kanálové matici \mathbf{H} mezi anténami K uživatelů a anténním polem stanice BS, vztahy

$$\mathbf{A} = \begin{cases} \mathbf{H} & \text{pro kombinování MRC: max SNR} \\ \mathbf{H}(\mathbf{H}^H\mathbf{H})^{-1} & \text{pro kombinování ZF: max SIR} \\ \mathbf{H}(\mathbf{H}^H\mathbf{H} + \frac{1}{P_{UL}} \mathbf{I}_K)^{-1} & \text{pro kombinování MRC: max SINR} \end{cases}$$

Žalud, V.: Mnohouslužebné systémy MU-MIMO a Masivní MIMO. Slaboproudý obzor, č. |1/2, 2016.

System MU-MIMO: vysílání BS k uživatelským terminálům



Podobně jako v případě lineárních přijímačů, používají se na základnové stanici BS, při jejím vysílání k uživatelským terminálům UT, tři konkrétní varianty lineárních předkódovacích matic (předkódérů). Ty potom optimalizují v přijímačích terminálů UT zvolený parametr, jímž může být poměr signál šum SNR , nebo poměr signál interference SIR , nebo současně oba poměry tj. $SINR$ (poslední požadavek je blízký požadavku na minimální středně kvadratickou chybu MMSE).

Podobně jako v případě lineárních přijímačů, používají se na základnové stanici BS tři konkrétní varianty lineárních předkódovacích matic (předkódérů), které potom optimalizují zvolený parametr

$$\mathbf{W} = \begin{cases} \mathbf{H}^* & \text{pro předkódování MRT: max SNR} \\ \mathbf{H}^*(\mathbf{H}^T \mathbf{H}^*)^{-1} & \text{pro předkódování ZF: max SIR} \\ \mathbf{H}^*(\mathbf{H}^T \mathbf{H}^* + \frac{K}{P_t} \mathbf{I}_K)^{-1} & \text{pro předkódování MMSE: max SINR} \end{cases}$$

Matice H kanálu MIMO a určení jejich prvků

Komplexní kanálové matice (Channel Transfer Matrix), označovaná také jako informace o stavu kanálu CSI (Channel State Information) H , vyjadřuje u systému MIMO s M vysílacími a N přijímacími anténami, vztahy mezi přijímaným signálem a vysílaným signálem v maticové formě.

Matice H má N řádků, které reprezentují N přijímaných signálů. Každý řádek má M složek, přicházejících od každé vysílací antény. Každý sloupec matice obsahuje N složek vysílaných určitou vysílací anténou směrem ke všem anténám přijímače. Taková matice má celkem $M \times N$ prvků, vyjadřujících komplexní přenosy mezi všemi páry vysílacích a přijímacích antén. V kanálu MIMO má matice H obecný tvar.

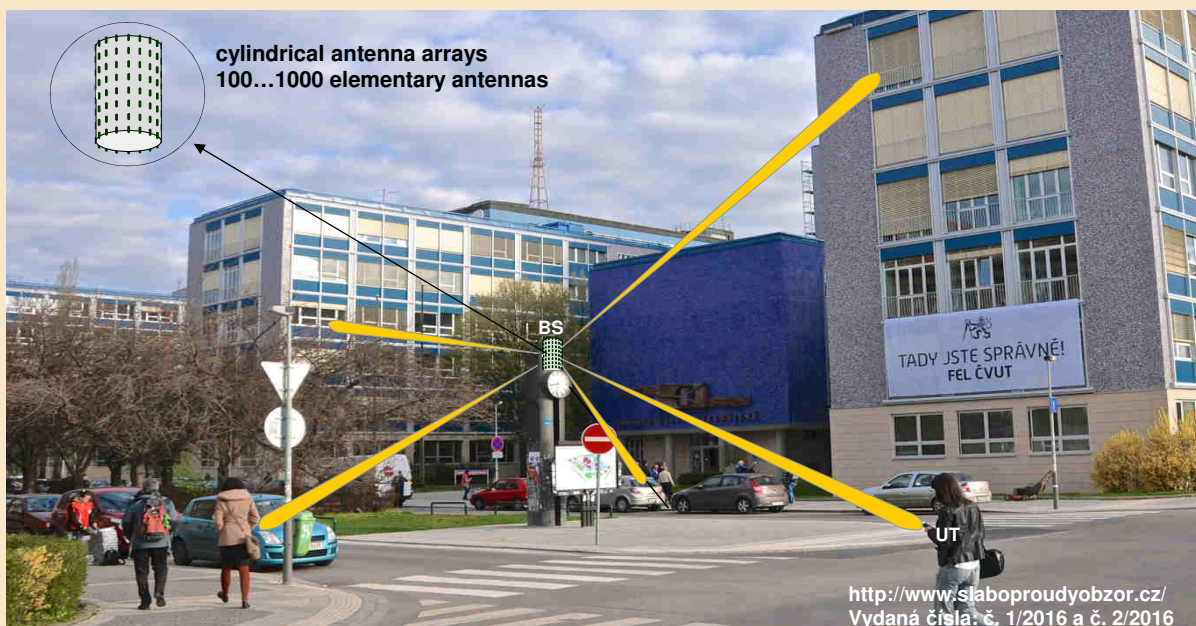
$$\begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ h_{N1} & h_{N2} & \dots & h_{NM} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_M \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_N \end{pmatrix}$$

Určení prvků matice 3x3 H : během tréninkového cyklu se při pasívních vysílacích anténách 2 a 3 z vysílací antény 1 vysílá referenční symbol 1, čímž se v přijímacích anténách získají přijímané odezvy [0,8; 0,7; 0,9]. Tento postup se následně opakuje pro vysílací antény 2 a 3, takže se získá všech 9 prvků kompletní matice H .



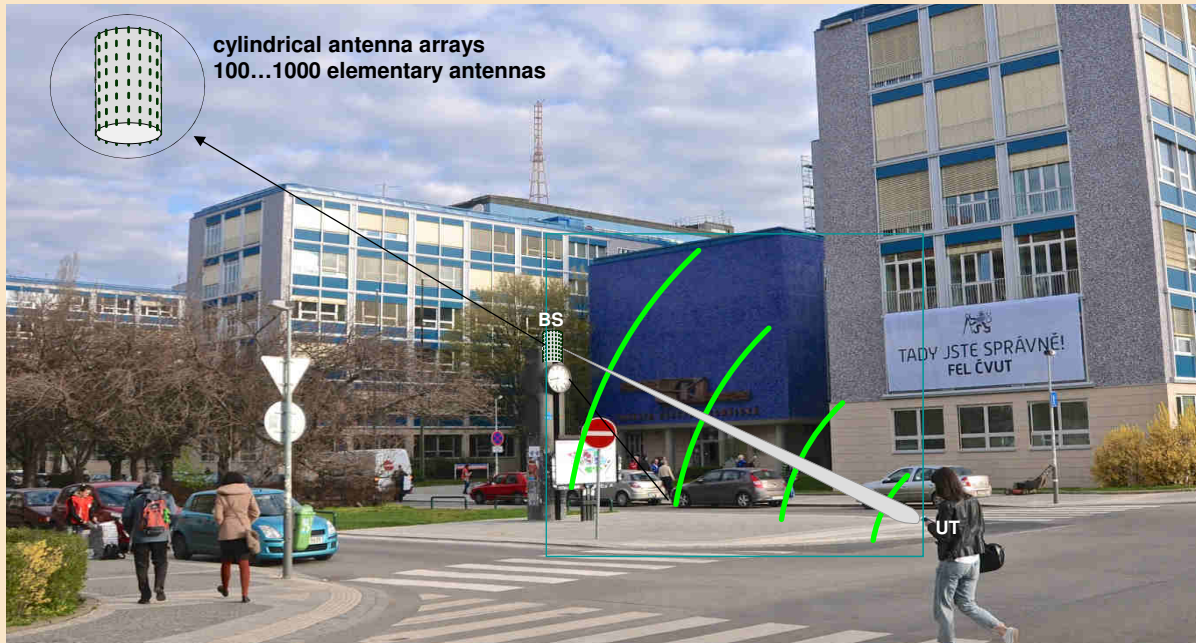
Tréninkové cykly se musí v náležitě krátkých intervalech opakovat, tak aby zjištěné prvky matice H co nejlépe odpovídaly při dalším přenosu dat skutečnému stavu kanálu

System masivní MIMO na trase DL



Základnová stanice BS, obsahující M elementárních antén, vysílá k N uživatelským terminálům UT (UE) na trase DL signály ve formě velmi úzkých směrových svazků. Všechny tyto signály potom mohou aplikovat techniku prostorového multiplexu SDMA (Space Division Multiple Access), tj. využívat stejné pásmo. Díky tomu se na DL mohutně zvýší spektrální i energetická účinnost systému. Navíc se sníží úroveň určitých typů interferencí. Ke sledování pohyblivých stanic UT je ale nutná stále aktivovaná znalost matice kanálu H (CSI-Channel State Information). Ta se určuje odhadem, založeným na periodickém vysílání pilotních sekvencí, vkládaných mezi vysílaná data.

System masivní MIMO na trase DL

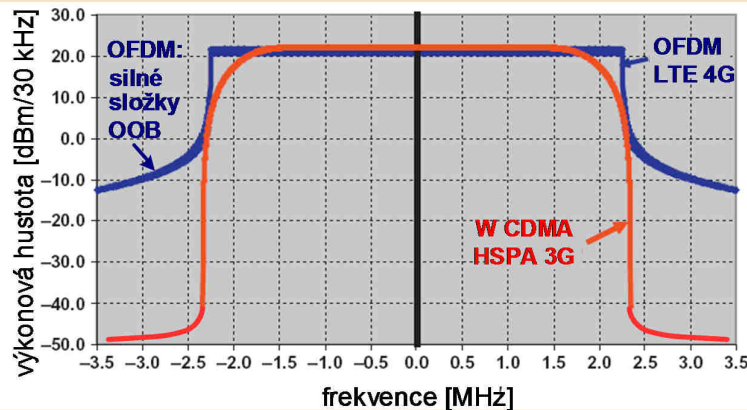


Na trase UL vysílá uživatelský terminál UT, vybavený většinou jedinou anténou s velmi malou směrovostí, signál směrem k anténnímu poli základní stanice BS. Toto pole však může díky velkému počtu elementárních antén, při znalosti matice \mathbf{H} , formovat přijímací diagram s ostrými maximy zaměřenými na jednotlivé uživatelské terminály UT. Proto i na trase UL lze využít prostorový multiplex SDMA a vysílání všech terminálů UT realizovat v jediném společném frekvenčním pásmu. Tím se též na trase UL výrazně zvýší jak spektrální, tak energetická účinnost systému..

*Nové formáty modulací a vícenásobného přístupu
v sítích 5G*

Nástup nových technik mnohonásobného přístupu v sítích 5G

Minulé generace mobilních sítí užívají k mnohonásobnému přístupu **ortogonální techniky OMA (orthogonally multiple access)**, u nichž uživatelé mají přidělené ortogonální rádiové zdroje, a to v doméně frekvenční (1G/FDMA), časové (2G/TDMA), kódové (3G/CDMA) anebo ortogonální frekvenční (4G/OFDMA). Díky ortogonalitě se pak jejich signály neovlivňují. Avšak vzhledem k limitovanému počtu ortogonálních zdrojů jsou techniky OMA vhodné jen pro omezené počty uživatelů se službou MBB. Masívní konektivitu eMBB žádanou v sítích 5G (až 10^6 terminálů na 1 km² v MMTC aj.), systémy OMA nezvládají. Obtížné je u nich též dosažení nízké latence přenosu v aplikacích URLLC. Formát OFDMA (resp. CP OFDMA tj. Cyclic Prefix OFDMA) vlivem silných složek spektra vyzařovaných mimo propustné pásmo OOB (out-off-band) je těžko sluchitelný s jinými systémy (LTE vs. DVB-T). Avšak vyzařování OOB a další slabiny OMA potlačují jejich verze s tvarováním modulačních pulsů (FBMC..), nebo se subpásmovou filtrací (UFMC..) Velké zlepšení přináší **neortogonální NOMA (Non OMA)**, s neortogonální alokací zdrojů, a to verze NOMA-PDM (power domain multiplexing) a NOMA-CDM (code domain multiplexing).

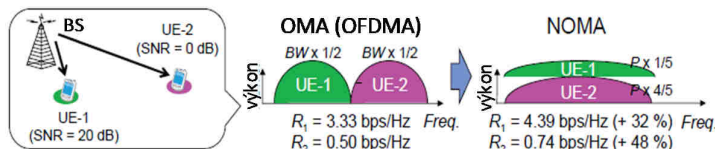


Porovnání spektra formátu W CDMA (HSPA/3G) a formátu OFDM (LTE 4G); spektrum OFDM má silné postranní složky OOB (out - off band radiation), které ruší sousední služby. Kritická je zejména situace, kdy se do sousedství stávajícího tv signálu DVB-T nově umístí mobilní signál LTE OFDM. Nebezpečí vzájemných interferencí lze potom zmenšit například frekvenční filtrací v tv přijímáči, realizovanou dodatečně vloženými elektrickými filtry.

Cai, Y, et al.: Modul. and Multiple Access for 5G Networks. IEEE Com. Surveys and Tutorial, 1Q 2018

Klasifikace přístupových technik OMA a NOMA pro 5G

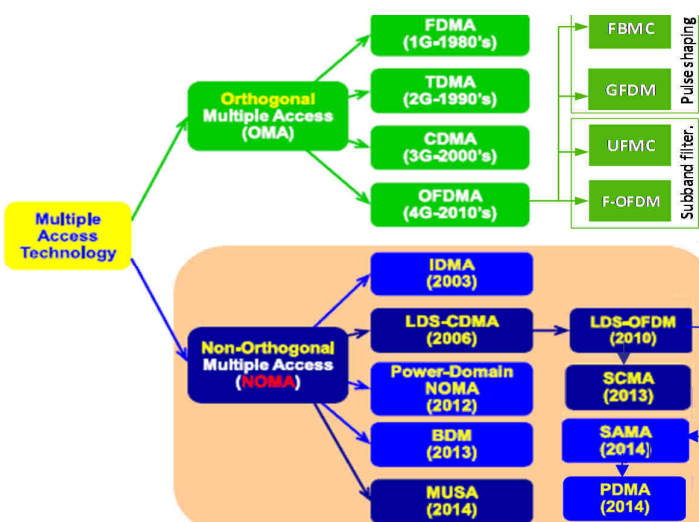
Porovnání přístupových technik OMA (OFDMA) a NOMA



Benjebbour A. et al: NOMA: From Concept to Standard. IEEE CSCN 2015.

Propustnosti R_1 , R_2 pro terminály UE-1 a UE-2, pro mód OMA a NOMA. Vysílač má stejné šířky pásma BW a celkový výkon P. Pro OMA se dělí i P napůl. Pro NOMA užívají oba UE celé pásmo BW, avšak UE-1 blízký k BS má výkon P/5 a vzdálený UE-2 výkon P/4. Pro UE1 resp. UE-2 je u NOMA zisk propustnosti 32% resp 48%

Podrobná klasifikace přístupových technik OMA a NOMA

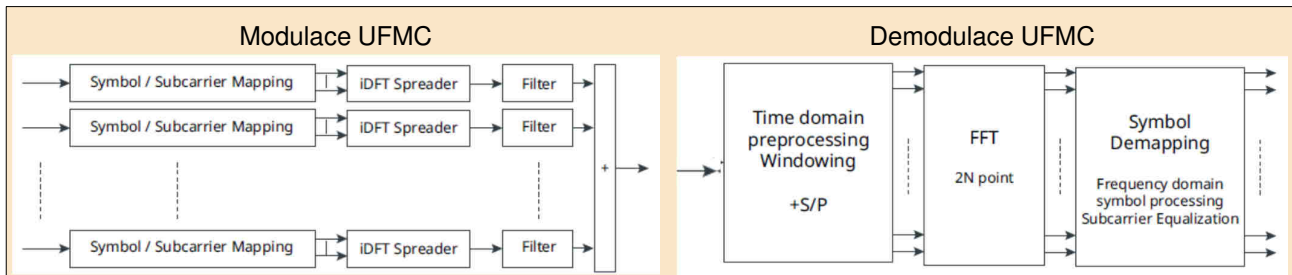


Dai L., et al.: A Survey of Non-Orthogonal MA Techniques. IEEE Com. Surveys and Tutorial, 1Q 2018

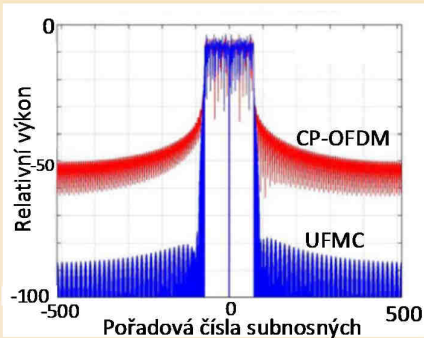
Z ortogonálních přístupů OMA je velice progresivní OFDMA. Jeho silné vyzařování OOB lze ve vysílači potlačit tvarováním modulačních pulsů (FBMC resp GFDM), nebo subpásmovou filtrací (UFMC resp. F-OFDM). Problémem zde ale zůstává nízká spektrální účinnost. Kromě toho rádiový kanál může svými nedokonalostmi narušit ortogonalitu přenášených signálů, což zhoršuje výsledné vlastnosti celého systému.

Z kandidátských technik NOMA jsou pro 5G aktuální zejména NOMA v kódové doméně (LDS-CDMA, LDS-OFDM...PDMA) a také ve výkonové doméně (Power Domain NOMA...). NOMA podporuje vyšší počet uživatelů, než je počet ortogonálních zdrojových slotů, a to díky využití neortogonální alokace zdrojů. To lze realizovat důmyslnou eliminací interferencí (SIC tj. Self Interference Cancellation apod.), která však vyžaduje složitější techniku přijímače.

Kandidátský přístupový formát OMA pro 5G : UFMC (UF-OFDM)



V modulátoru UFMC (Universal Frequency Multicarrier, též UF-OFDM tj. Universal Filtered OFDM) se nejprve mapují vstupní symboly na jednotlivé subnosné. Mapované signály jsou alokovány k předem určenému počtu bloků a počtu subnosných pro každý blok. Data pro každý blok jsou vypočítávána s využitím inverzní diskrétní Fourierovy transformace IDFT a poté po blocích filtrována, čímž se potlačuje vyzařování OOB. V konvertoru PSC jsou paralelní data převáděna na sériovou časovou řadu, odpovídající celkovému počtu subnosných N . V demodulátoru UFMC jsou přijímaná sériová data předzpracováním v časové doméně zbavována interferencí a v konvertoru SPC převáděna do paralelní podoby. Pomocí rychlé 2N bodové Fourierovy transformace FFT se realizuje demodulace paralelního toku dat. Demodulovaný signál je po korekci rádiových kanálů každé subnosné podrobován inverznímu mapování do každé symbolové skupiny.



Porovnání frekvenčního spektra mnohonásobného přístupu CP-OFDMA (Cyclic Prefix OFDMA) a přístupu UFMC:

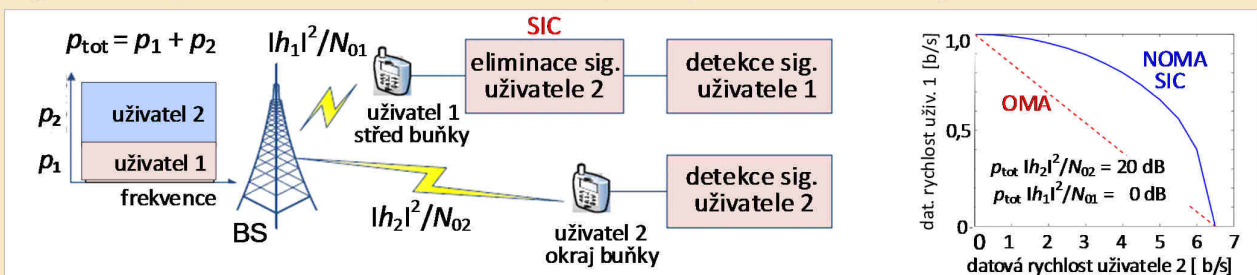
Nežádoucí vyzařování OOB je u formátu UFMC vůči CP-OFDMA potlačeno zhruba o 40 dB. To výrazně odstraňuje nebezpečí interferencí se systémy zaujímající sousední segmenty spektra a také zvyšuje energetickou účinnost EE. Avšak frekvenční filtry v modulátoru způsobují přidavné amplitudové a fázové zkreslení procházejícího signálu.

New Waveforms Signal Analysis. Anritsu Technical Review No.24 September 2018

Kandidátský přístup NOMA PDMA SIC pro síť 5G

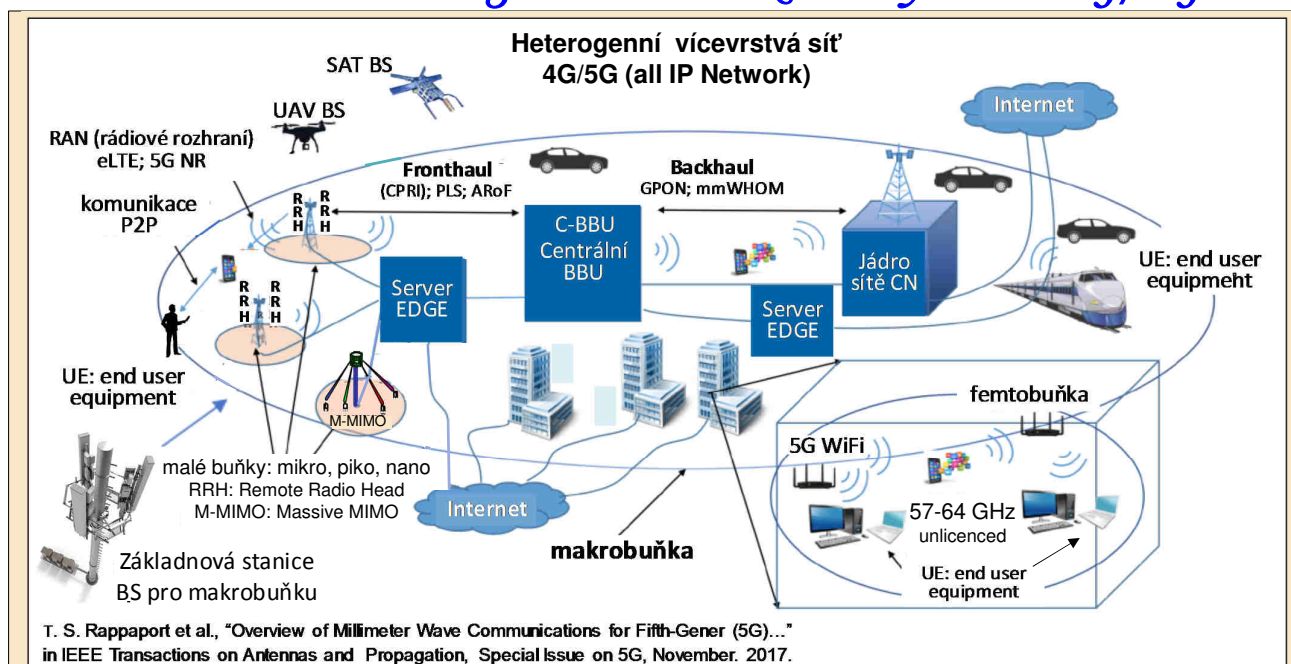
Na obr. je znázorněn systém PDMA SIC se dvěma uživateli. Na trase DL v pásmu 1 Hz vysílá BS signály s_i pro oba uživatele i ($i = 1, 2$), s vysílacími výkony p_i . Jejich součet se rovná výkonu $p_{tot} = p_1 + p_2$, přičemž dle protokolu SIC je stanicí BS větší výkon přidělen uživateli s větším útlumem jeho kanálu. Signály s_1 a s_2 jsou superponovány, takže vysílaný signál $x = s_1\sqrt{p_1} + s_2\sqrt{p_2}$. Signál přijímaný uživatelem i je dán vztahem $y_i = h_i x + w_i$, kde h_i je komplexní kanálový koeficient mezi uživatelem i a BS a w_i je Gaussovský šum plus mezibuňkové interference na vstupu i -tého přijímače, jejichž spektrální hustota je $N_{0,i}$.

Na DL trase PDMA je v uživatelském přijímači 1 prováděn proces SIC. Optimální pořadí dekódování SIC na DL odpovídá pořadí klesajícího normovaného kanálového zisku $|h_i|^2/N_{0,i}$. Tedy uživatel 1 bude dekódovat nejprve s_2 a odstraní meziiuživatelské interference uživatele 2, a to tak že ještě před dekódováním své vlastní zprávy s_1 odečítá s_2 od přijímaného signálu y_1 . Uživatel 2 nemusí provádět proces SIC a naopak přímo dekódovat své vlastní zprávy s_2 s interferencemi od uživatele 1. Naštěstí výkon p_2 přidělený uživateli 2 převyšuje výkon p_1 uživatele 1 ($|h_1|^2/N_{0,1} > |h_2|^2/N_{0,2}$) v agregovaném přijímaném signálu y_2 , takže degradace signálu tím způsobená není velká. Graf níže vpravo porovnává datové rychlosti OMA a NOMA.



Architektura buňkových sítí 5G

Vícevrstvá heterogenní architektura systémů 4G/5G

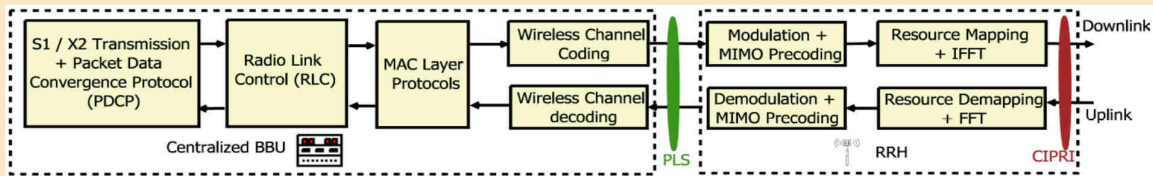


V nejnovější vícevrstvé architektuře 4G/5G jsou prostorově odděleny rádiové hlavice RRH (Remote Radio Head) od jednotek základního pásma BBU (Base Band Unit); přístup do systému zde zprostředkuje několik variant rádiového rozhraní MAIV (Multiple Air Interface Variants), a také fixních sítí. Kooperace mezi různými rádiovými přístupovými technologiemi RAT (Radio Access Tech) je založena na tvrdém handoveru „inter-RAT HO“, který bude implementován na úrovni jádra sítě CN (Core Network). Systém 5G bude integrovat též komunikaci se systémy 5G WiFi a bezpilotními prostředky UAV (Unmanned Aerial Vehicles) i družicemi SAT.

Dvě varianty linky Fronthaul v systémech 4G/5G

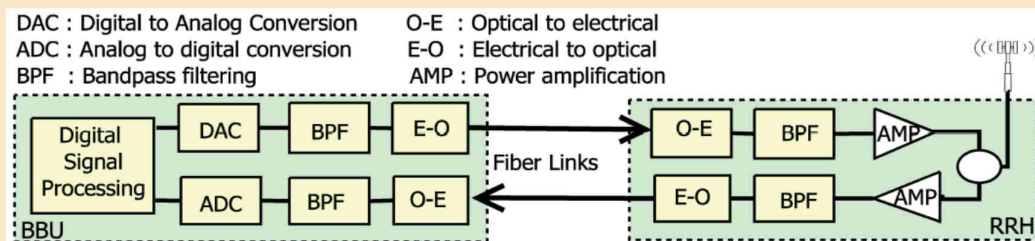
V sítích 4G/5G vysoké nároky kladené na kapacitu, propustnost a latenci linky fronthaul spňují v současnosti dvě koncepce: první z nich PLS je založena dělení fyzické vrstvy sítě, druhá ARoF využívá využívá analogový přenos rádiových signálů optickými spoji.

Physical Layer Split (PLS) Architecture:



U technologie PLS jsou procesy modulace, demodulace a mapování zdrojů realizovány v hlavicích RRH, což značně snižuje požadavky na šířku pásma a tím i cenu fronthaulu. Díky tomu, že kanálové kódování a funkce vrstvy MAC se zde provádějí v centrální jednotce C-BBU, získává se navíc výhoda snazší adaptace progresivních bezdrátových kooperačních metod.

Analog RoF for 5G fronthauling Architecture



Technologie ARoF v sobě spojuje výhody rádiového a optického přenosu. V hlavicích RRH se zde realizuje jenom konverze O-E a E-O a všechny ostatní operace jsou soustředěny do jednotky C-BBU, takže i varianta ARoF je pro síť 5G vhodná.

Ranaweera, Ch. et al.: 5G C RAN Architecture... Internat. Confer. on Optical Network Design and Modeling. Budapest, May 2017

Technologie MEC a EDGE server

V aplikacích eMBB resp. MMTc resp. URLLC sítí 4G a zejména 5G se budou zvětšovat nároky na jejich propustnost resp. počty připojených zařízení resp. vysokou spolehlivost a nízkou latenci přenosu. K zajištění těchto parametrů může výrazně napomoci nová síťová architektura **MEC (Multi access Edge Computing)**, v níž jsou přesunuty kapacity cloud computingu a prostředí IT služeb na konec („na hranu“) buňkové (nebo i jiné komunikační) sítě, tedy blízko koncovým uživatelům. To potom přinese systému ultranízkou latenci, vysokou spolehlivost a škálovatelnost. Současně se také značně redukuje nebezpečí zahlcení dané sítě, a to prostřednictvím odklonění velkých objemů dat ze sítě RAN do velkého hlavního cloudu, což jsou vlastnosti vítané především pro nové aplikace a služby (MMTC; URLLC; IoT). Technologie MEC je navržena tak, aby byla možná její implementace buď přímo v buňkové základnové stanici BS, nebo v jiném koncovém uzlu blízkém ke koncovým uživatelům.

Kombinování elementů informačních technologií s telekomunikačním síťováním (ICT) v technice MEC potom umožní operátorům buňkových sítí otevřít jejich přístupové síť RAN jiným subjektům (third parties), zejména aplikačním developerům a provozovatelům kontentů, čímž jim umožní rychle rozvinutí inovativních aplikací a služeb, určených individuálním zákazníkům, podnikům i vertikálnímu segmentu dalších služeb se specializovaným zaměřením.

Edge server (Server MEC), vložený mezi hlavice RRH a jednotky BBU, je klíčovým elementem sítí 4G/5G. Jeho použití umožňuje, aby aplikace citlivé na zpoždění a také tzv. kontextuální aplikace (context aware app.) byly implementovány co nejbližší ke koncovým uživatelům. Tímto způsobem se odlehčí linka backhaul a také jádro sítě, což je podstatné pro dokonalé zajištění nízkolatenčních širokopásmových agilních mobilních služeb.

Lav Gupta et al.: Mobile Edge Computing – an important ingredient of 5G Networks . IEEE Softwarization Newsletter, March 2016

Cloud computing, virtualizace sítě a slicing

• Cloud computing (CC)

označuje poskytování výpočetních služeb, k nimž náleží ukládání, zálohování a zpracování dat, implementace komplikovaných výpočtů apod., realizované přes internet, tedy „na dálku“. K hlavním přednostem CC patří: 1. eliminace investičních nákladů na nákup potřebného hardwaru i softwaru; 2. eliminace provozních nákladů, spojených s nastavením a údržbou hardwaru a laděním softwaru; 3. velká pohotovost poskytování služeb, často náročných na výpočetní výkon; 4. schopnost dodat na vyžádání vhodný sortiment a nezbytné množství výpočetních prostředků, z libovolné geografické polohy dostupné z internetu; 5. vysoká produktivita v plnění daných funkcí; 6. obrovský výpočetní výkon, zajišťovaný v cloudu nejmodernější technikou, pro jednotlivce i většinu organizací nedostupnou; 7. vysoká spolehlivost a bezpečnost nabízených služeb.

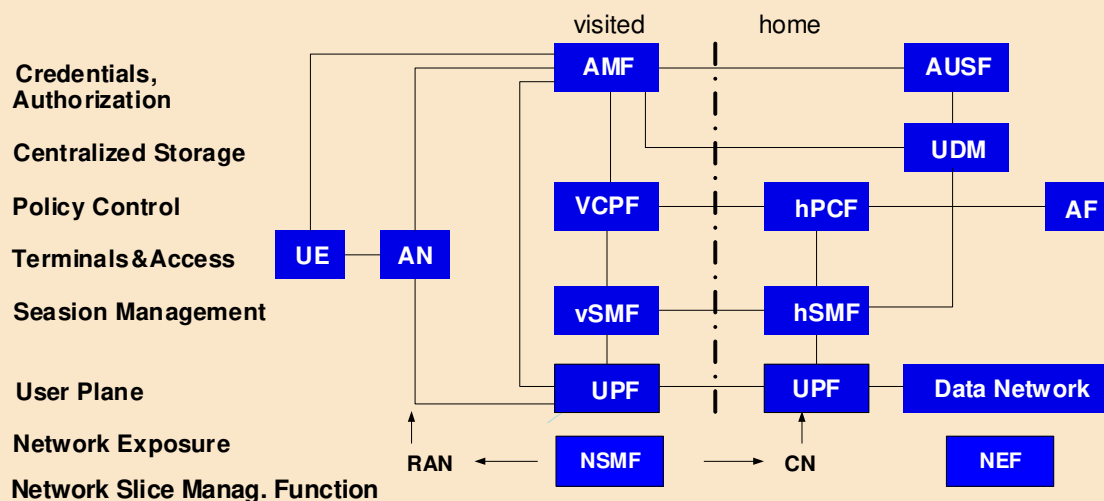
• Virtualizace síťových funkcí NFV (network functions virtualization)

je koncepce síťové architektury, která využívá technologie virtualizace IT k virtualizaci celé třídy funkcí síťových uzlů, čímž se vytvářejí stavební bloky, jejichž kooperací se implementují různé komunikační služby.

• Plátkování sítě NS (network slicing)

je jeden z klíčových mechanismů sítě 5G, sloužící vertikálním průmyslovým aplikacím se široce diferenciovány servisními potřebami, které se týkají latence, spolehlivosti, kapacity a dalších specifických funkcionalit. V této koncepci se programovatelná infrastruktura jediné fyzické sítě rozdělí do několika logických částí (plátků-slices), představujících dílčí virtuální podsítě. Těm se potom dynamicky a velice efektivně přidělují síťové zdroje, a to v souladu s odpovídajícími požadavky systému kvality služeb QoS. Tak například pro videokonferenční přenosy bude určena podsít' zajišťující vysokou datovou rychlost ale i vyšší latenci, kdežto autonomní vozidla vystačí s nižšími rychlostmi, avšak latence přenosu musí být co nejnižší. Tím se podpoří flexibilita celé sítě 5G a zvýší se její kapacita.

Architektura jádra sítě 5GC (5G core) systému 5G



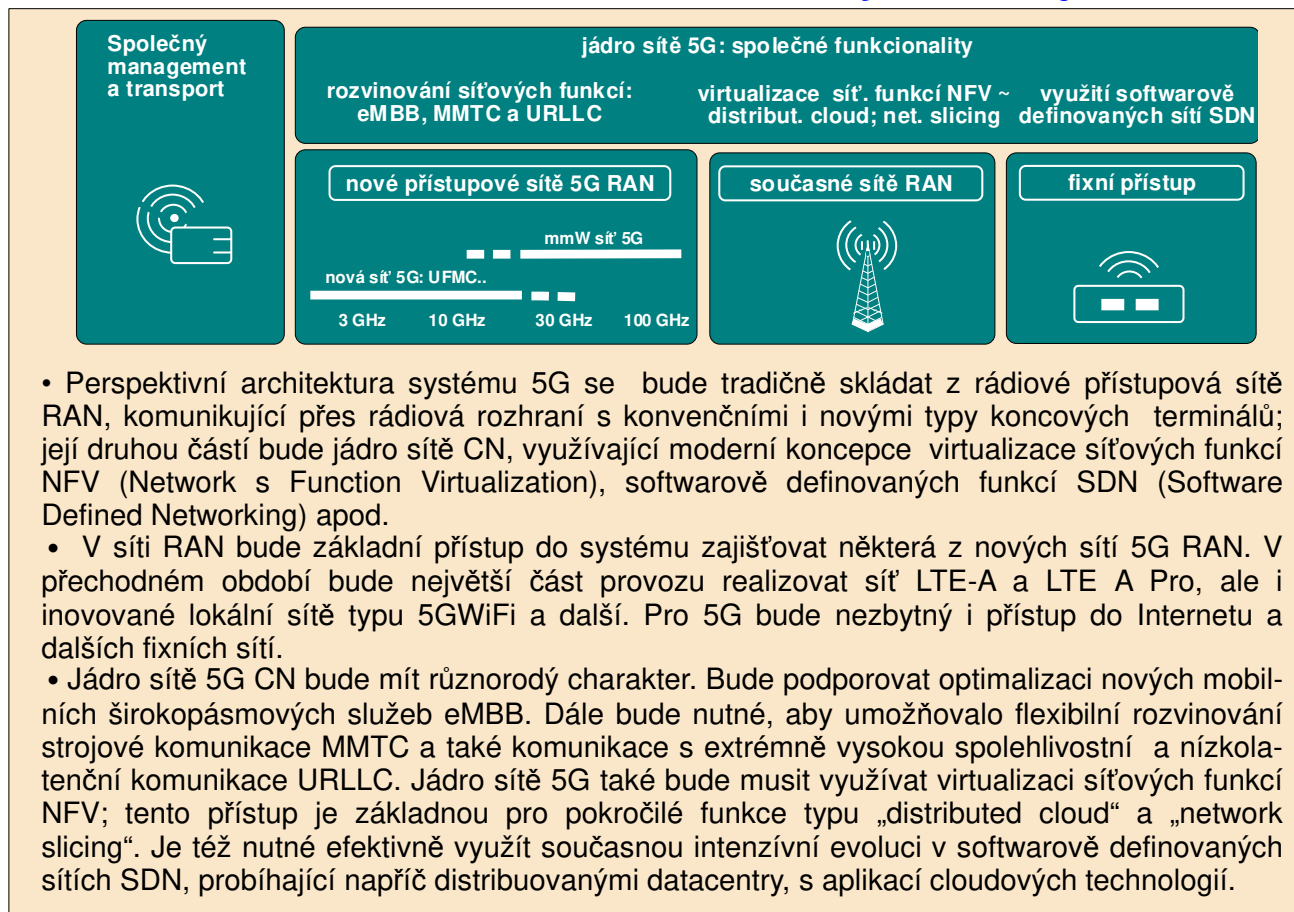
Funkční bloky dosavadní architektury LTE/SAE:

LTE: eNB: evolved NodeB / SAE: MME: Mobility Management Entity; SGW: Serving Gateway PGW: Packet Data Serving Gateway; HSS: Home Subscriber Server PCRF: Policy Control and Charging Rules Function; SGSN: Serving GPRS Support Node

Funkční bloky nové architektury 5GC:

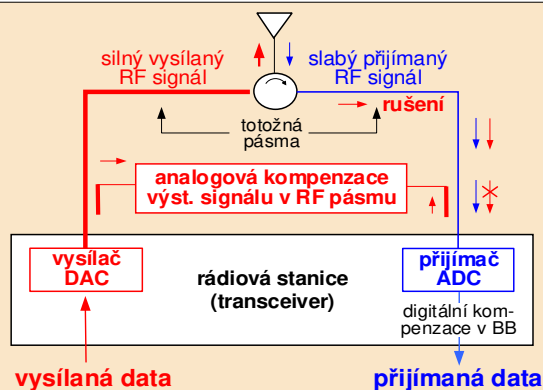
AF: Application Function; AMF: Access and Mobility Management Function; AUSF: Authentication Server Function; DN: Data Network; NEF: Network Exposure Function; NSMF: Network Slice Selection Function; (R)AN: (Radio) Access Network; SMF: Session Management Function; UDM: Unified Data Management; ; UPF: User Plane Function; UDR:

Základní síťová architektura systémů 5G



*Některé další progresivní technologie
připravované pro systémy 5G*

Plný duplex v jediném pásmu (IBFD)

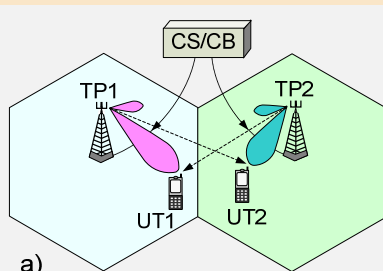


Rádiový duplexní provoz mezi dvěma účastníky značí obousměrné spojení, probíhající v obou směrech současně a spojitě v čase. Realizuje se buď metodou frekvenčního duplexu FDD - ve dvou různých rádiových kanálech, nebo v jediném kanálu formou časového duplexu TDD - tj. v jediném pásmu, avšak s časovým střídáním vysílání a příjmu. Duplex FDD resp. TDD tedy vyžaduje dvojnásobné pásmo v porovnání se simplexem.

Nedávno však byl vyvinut systém plného duplexu IBFD (In Band Full Duplex), umožňující plně duplexní provoz v jediném kanálu s nezvětšeným pásmem, jež je založen na technice potlačení vlastních interferencí SIC (Self Interference Cancelation). Vysílaný signál přichází od koncových stupňů vysílače přes anténní výhybku (duplexer) do antény a je vysílán. Avšak slabá izolace výhybky dovoluje části tohoto signálu vcházet i do přijímače, v němž potom může způsobovat rušení. Proto je zde kompenzačním obvodem, využívajícím vzorek vysílaného signálu, ještě v analogové vysílané podobě těsně před vstupem do přijímače, předběžně potlačován. Zbývající potřebné potlačení je realizováno po demodulaci již v digitálním traktu přijímače.

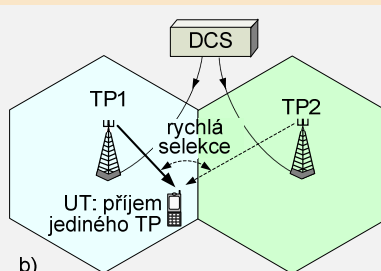
Koordinované mnohabodové vysílání a příjem CoMP (DL)

koordinované rozvrhování a formování svazku CS/CB (coordinat. scheduling and coordinated beamforming)



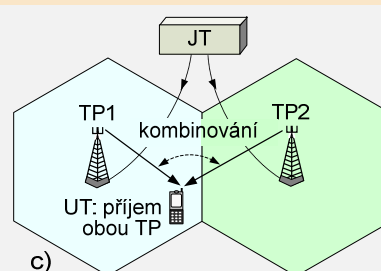
a)

dynamická rychlá selekce buňky DCS (taktéž DPS) (dynamic cell selection / dynamic point selection)



b)

společné vysílání JT ze dvou sousedících buněk (joint transmission either coherent nor noncoher.)



c)

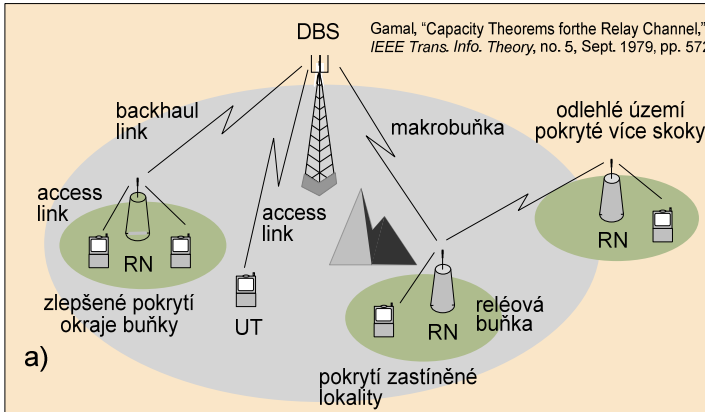
Tao, X.: An Overview of Coop. Com. IEEE Com. Mag., June 2012, s. 65

Díky vhodnému centrálnímu rozvrhování může každý vysílací bod TP tvarovat svůj vyzářovací diagram tak, aby jeho maximum směřovalo pouze k jeho terminálu UT; ve směru druhého terminálu má diagram nulou, takže interference jsou zde potlačeny.

pro daný terminál mají oba body TP jeho data. Tato data však vysílá vždy jen jediný z nich, a to ten jehož rádiový kanál má momentálně lepší parametry. Přepínání mezi body TP probíhá relativně velmi rychle (v intervalech řádu milisekund).

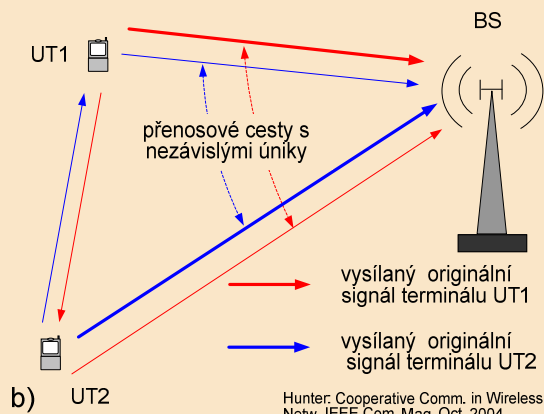
stejná data se vysílají z více bodů TP současně k jedinému uživatelskému terminálu UT, kde se koherentně, nebo nekoherentně kombinují.

Klasická a kooperativní radioreléová technika v mobilních sítích



Reléové uzly RN zlepšují pokrytí v zastíněných a dalších kritických oblastech. Zvětšují hustotu infrastruktury celého systému, což vede ke zkracování průměrných vzdáleností přijímač-vysílač a tedy i ke zvyšování poměrů SINR. To se pak projeví ve zvýšené spolehlivosti spojení, ve značném zvětšení kapacity sítě a také v poklesu energetické spotřeby v UT

DBS: Donor Base Station; RN: Relay Node; UT: User Terminal



Dva partnerské uživatelské terminály UT1 a UT2 vysílají svá vlastní data přímo ke společné základnové stanici BS. Každý z nich je však schopen také přijímat signály druhého terminálu a ty předávat, spolu se svými vlastními daty, ke stanici BS. Jsou-li oba terminály dostatečně od sebe vzdálené, potom oba kanály vytvářené určitým terminálem, tedy kanál přímý i předávaný, jsou statisticky nezávislé. Avšak mají-li být přijímány jedinou přijímací anténou, musí být ortogonální, což lze zajistit vhodným prostorově časovým kódem apod. Takto vytvořená „umělá“ vysílací diverzita zdokonaluje pokrytí, spolehlivost přenosu, imunitu vůči únikům a zvyšuje kapacitu.

Hunter: Cooperative Comm. in Wireless Netw. IEEE Com. Mag, Oct. 2004.

Děkuji za pozornost!

Václav Žalud