

Radiokomunikační technologie pro IoT

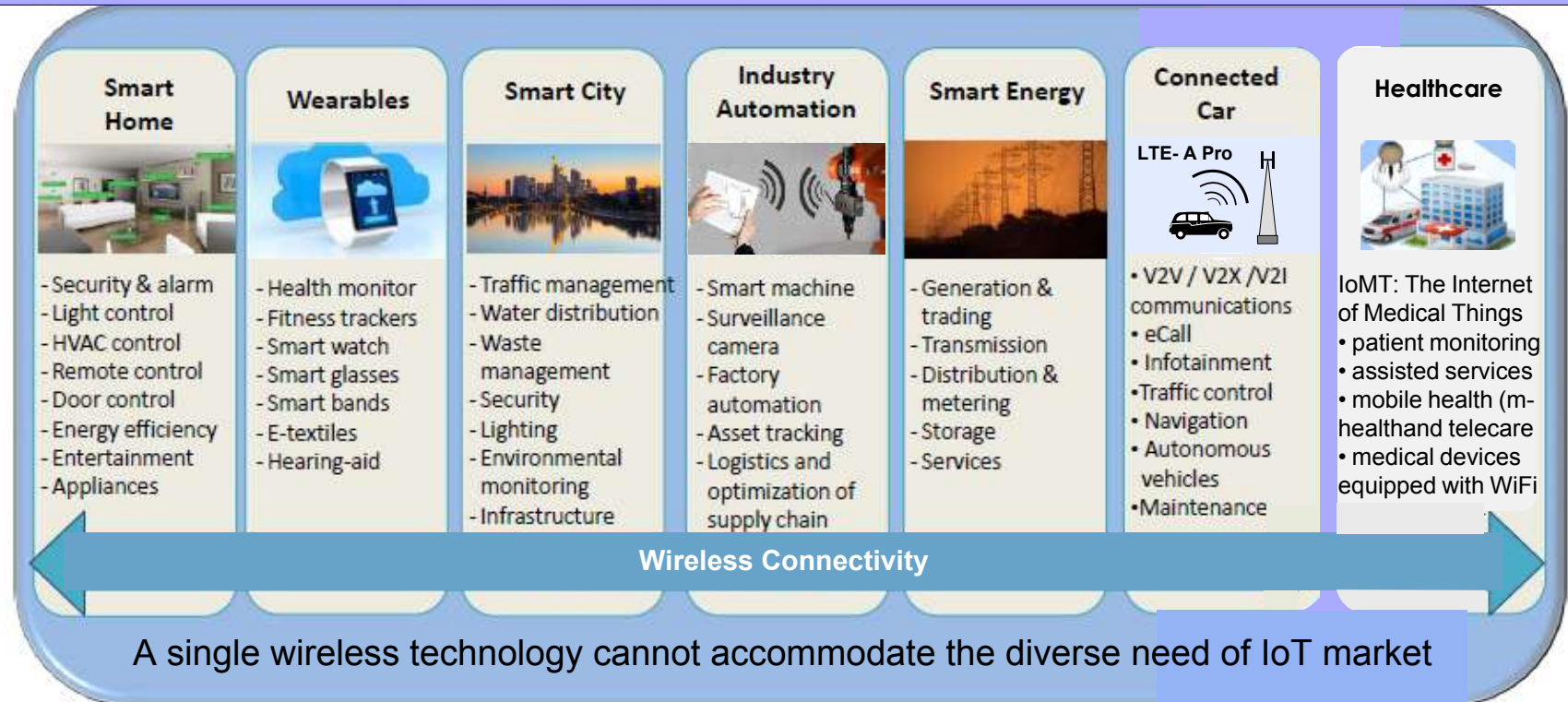
Doc. Ing. Václav Žalud, CSc

*Katedra radioelektroniky FEL, ČVUT v Praze
zalud@fel.cvut.cz; <http://access.feld.cvut.cz>*

Základní poznatky o Internetu věcí

Hlavní aplikace Internetu věcí IoT

Wireless connectivity for the Internet of Things



Nejrůznější oblasti využití IoT se již objevují ve zdravotní péči, 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 předměty osobní potřeby, chytré domy, města a energetické sítě, inteligentní továrny začleněné do kontextu fenoménu „Industry 4.0“, inteligentní mobilní prostředky (automobily, traktory a další) i celé dopravní systémy, „chytrou“ mechanizační techniku pro zemědělství a lesnictví ap. Nezastupitelnou roli bude hrát IoT ve zdravotnictví, a to ve formě IoMT (Internet of Medical Things), nebo Wearables Medical apod.

Internet věcí IoT: funkční bloky a vrstevná architektura

Šest hlavních elementů potřebných k zajištění funkčnosti systému Internetu věcí (IoT)



Pětivrstevná architektura Internetu věcí IoT

byznys

vrstva managementu byznysu (business management layer) realizuje management všech systémových aktivit a služeb IoT; k tomu využívá různé business modely, grafy, flowcharty apod.

aplikace

aplikační vrstva (application layer) realizuje management rozličných aplikací, jako je chytrý dům, chytré město, inteligentní doprava ap.; pracuje tedy s nejrůznějšími heterogenními objekty, aniž by uvažovala jejich specifickou hardwarovou platformu.

middleware

vrstva middleware (middleware/service management layer) shromažďuje data v databázi, realizuje zpracování získaných informací a přiřazuje služby k jejich žadatelům.

přístup

vrstva přístupu (access/transmission layer) užívá různé komunikační technologie, hlavně rádiové (Bluetooth, WiFi, WRAN... GSM/UMTS/LTE ...LoRa/Sigfox...), ale i linkové (s metalickými a optickými spoji), k přenosu snímaných dat k síťové vrstvě.

snímání

vrstva snímání (sensing/perception/object/devices layer) je realizována senzory resp. aktuátory; ty jsou přidruženy k rozličným objektům, u nichž snímají jejich specifické vlastnosti (teplotu, váhu, vlhkost, pohyb...), resp. ovlivňují jejich stav (určitou fyzikální entitu ap) a získaná data posílají k přístupové vrstvě

[1] Ala Fuqaha et al.: Internet of Things: A Survey on Enabling, Technologies, Protocols, and App. IEEE COM.SURVEYS & TUTOR, NO. 4, FOURTH QUARTER 2016

[2] Ara,T et al: Internet of Things: Architecture and Applications... Indian Journal of Science and Technology, December 2016

Různé definice Internetu věcí IoT

The best initial definition for the Internet of Things (Kevin Ashton¹, author of this term):
“IoT is an open and comprehensive network of intelligent objects that have the capacity to autoorganize, share information, data and resources, reacting and acting in face of situations and changes in the environment” (1999).

¹ **Kevin Ashton** (*1968) is a British visionary technologist and expert in digital transformation.

IERC (IoT European Research Cluster) advanced definition of the Internet of Things (IoT)
"A dynamic global network infrastructure with self - configuring capabilities based on standard and interoperable communication protocols where physical and virtual ‘things’ have identities, physical attributes and virtual personalities and use intelligent interfaces, and are seamlessly integrated into the information network." (2015).



hp definition of the IoT: The Internet of Things refers to unique identification and ‘Internetization’ of everyday objects. This allows for human interaction and control of these ‘things’ from anywhere in the world, as well as device-to-device interaction without the need for human involvement (2015)

Internet věcí IoT: specifikace hlavních termínů

Thing: Generally speaking, any physical object. In the term “Internet of Things,” however, it denotes the same concept as a physical entity. Computational or data element representing a physical entity. Virtual entities can be either active or passive digital entities.

Device: A technical, physical component (hardware) with communication capabilities linking it to other IT systems. A device can be either attached to or embedded inside a physical entity or monitor a physical entity in its vicinity.

Physical entity: Any physical object that is relevant from a user or application perspective

Passive digital entity: A digital representation of something stored in an IT-based system.

Virtual entity: Computational or data element representing a physical entity. Virtual entities can be either active or passive digital entities.

Electronic Product Code (EPC): An addressing mechanism designed as a universal identifier that provides a unique identity for every physical object anywhere in the world.

Sensor: A device identifying or recording features of a given physical entity.

Actuator: Mechanical device for moving or controlling a mechanism or system. It takes energy, usually transported by air, electric current or liquid, and converts it into a state change, thus affecting one or more physical entities.

Storage: A special type of resource that stores information coming from other resources and provides information about physical entities. They may also include services to process the information stored by the resource. As storages are resources, they can be deployed either on a device or in the network.

Middleware: Software that resides between RFID interrogators and enterprise software.

Tag: A label or other physical object used to identify the physical entity to which it is attached.

Wireless Sensor Network (WSN): A wireless network consisting of spatially distributed autonomous devices using sensors to monitor physical or environmental conditions.

Machine Type Communication (MTC) resp. Machine to Machine (M2M): A technology that enables networked devices to exchange information and perform actions without the manual assistance of humans.

Radio-frequency identification (RFID): The wireless non-contact use of radio-frequency electromagnetic fields to transfer data, for the purposes of automatically identifying and tracking tags attached to objects.

Pozemní rádiová komunikace

Od Marconiho po současnost

Významné osobnosti počátků radiokomunikace



Maxwell's equations-1866

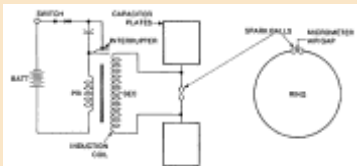
$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{q_{enc}}{\epsilon_0}$$

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

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

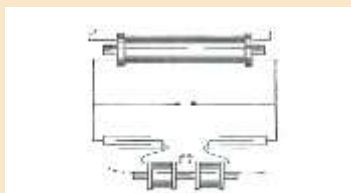
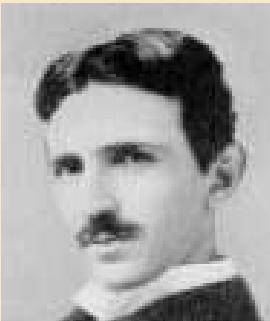
$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} + \mu_0 i_{en}$$

J. Clark Maxwell



spark-gap tuned transmitter with tuned passive receiver

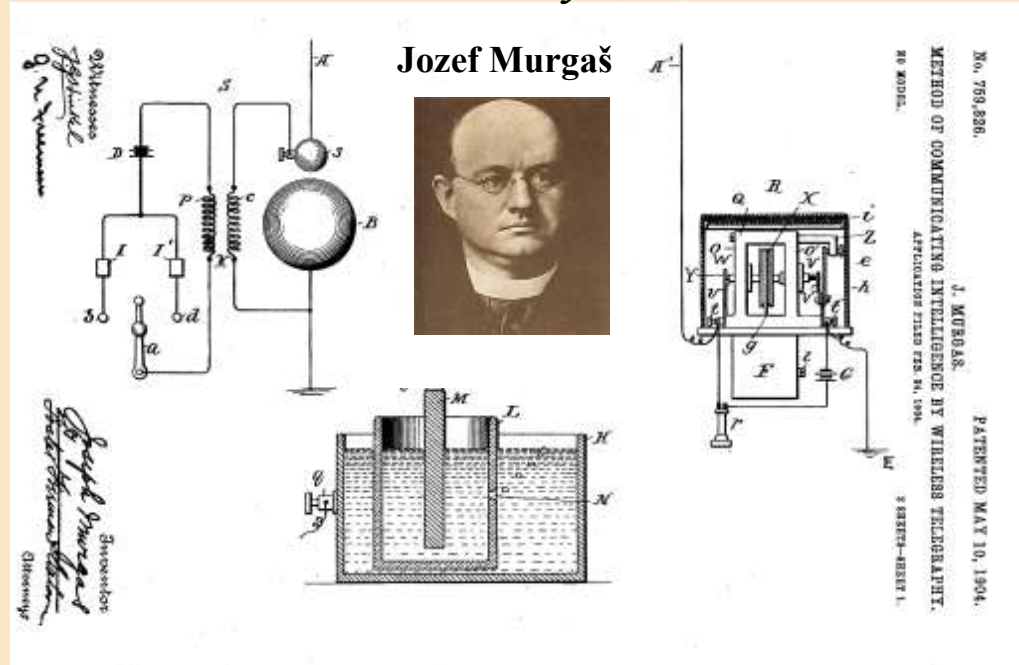
Heinrich Hertz



Spark gap transmitter, with Tesla coil (RF resonant high voltage transformer), inv. 1891

Nikola Tesla

Jeden z patentů slovenského vynálezce Jozefa Murgaše, žijícího v USA
 „Method of Communicating Intelligence by Wireless Telegraphy“
 Patented May 10, 1904

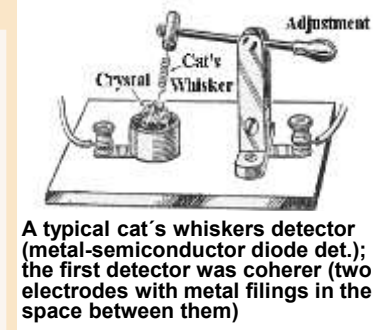
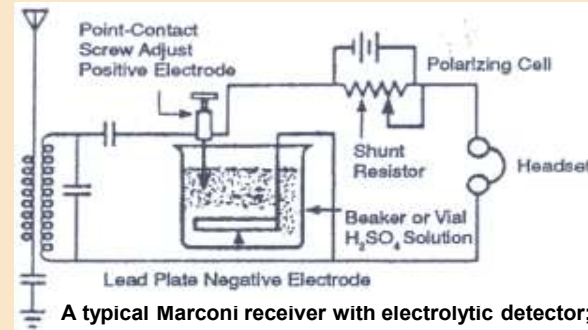
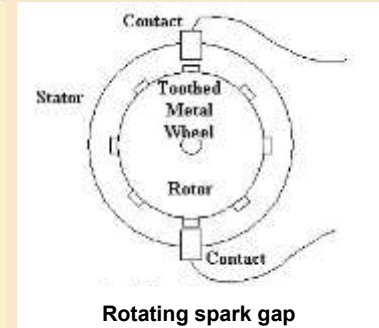
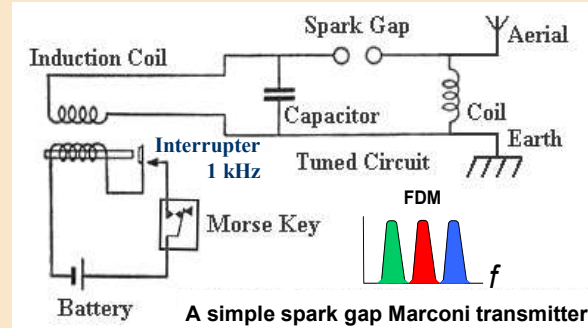


Josef Murgaš (1864 – 1929) byl slovenský kněz, který strávil většinu svého života v USA. Podařilo se mu zdokonalit Marconiho vysílač tak, že pomoci tzv. „ton systému“ byl schopen již v roce 1905 přenášet nejenom značky Morseovy abecedy, ale poprvé v historii radiokomunikace i lidský hlas (konkrétně svá slova: počujete ma, počujete ma, počujete ma ?)

Guglielmo Marconi - vynálezce rádia (1896)

Marconi zavádí do vysílání také principy frekvenčního multiplexu FDM

Guglielmo Marconi (1874 - 1937)



Marconiho jiskrový vysílač připomíná klasické automobilové bateriové zapalování. Přerušovač v primární cívce však pracuje na fixní frekvenci - např. 1 kHz - která je pak dobře slyšitelná v přijímači. Navíc je zde Morseův klíč, při jehož sepnutí se objevují na sekundáru tlumené kmity s velmi širokým spektrem, které se přivádějí k jiskřišti. Z výbojů přeskakujících periodicky v jiskřišti však rezonanční obvod LC propouští jen úzké frekvenční pásmo v okolí nosné frekvence f_c , které se přímo vysílá. V přijímači se vstupním rezonančním obvodem LC, laděným rovněž na frekvenci f_c , vybírá ze všech signálů zachycených anténou signál požadovaný. Ten je potom detekován elektrolytickým detektorem a v následujících sluchátkách se projevuje jako tón 1 kHz, odpovídající frekvenci přerušovače ve vysílači. S rostoucím výkonem jiskrových vysílačů však vzniká problém s rychlým zhašením zažehnuté jiskry. Ten řeší technika „rotujícího jiskřiště“. U nejjednodušších detektorových přijímačů se používal elektrolytický detektor, který je velmi citlivý, avšak nepraktický. Proto byl nahrazován detektorem krystalovým a posléze i detektorem s vakuovou diodou.

Nástup vakuové elektroniky a první elektronkové obvody

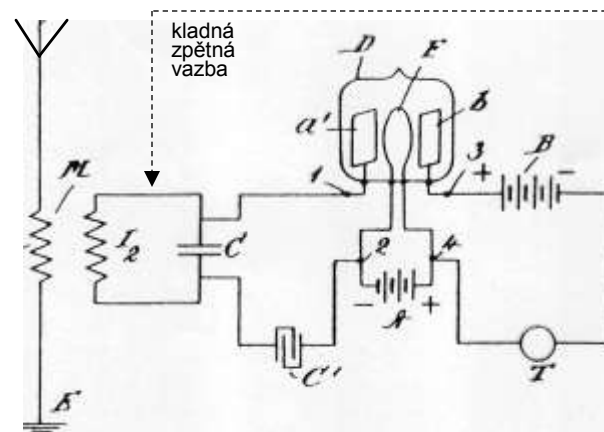
Flemming: vakuová dioda z roku 1902, byla objevena při zlepšování Edisonovy žárovky (kladně polarizovaná destička měla sbírat nečistoty v baňce žárovky)



Lee de Forest: vakuová trioda z roku 1906 vznikla z diody přidáním řídicí mřížky, ovládající vhodným předpětím tok elektronů mezi katodou a anodou



Elektronkový přímozesilující přijímač (1908)-jednolampovka (audion), využívající triodu jako vf. zesilovače a současně jako detektoru zesíleného signálu; kladná zpětná vazba z výstupu na vstup může značně zvýšit citlivost přijímače



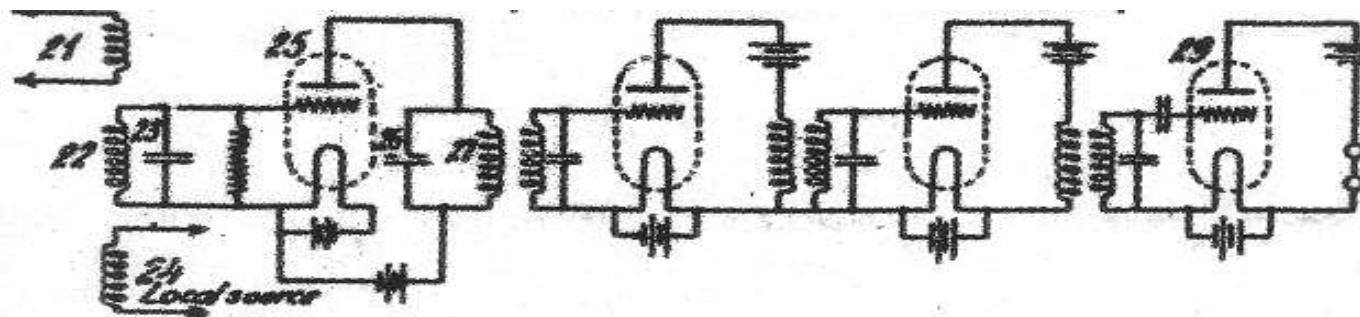
Rádiový přijímač superheterodynní (Armstrong 1918), je charakterizovaný přeměnou vstupních signálů s různými frekvencemi f_{RF} , za pomoci signálu místního oscilátoru s frekvencí f_{LO} , na signál mezifrekvenční, který má konstantní frekvenci $f_{IF} = f_{LO} - f_{RF}$; ten se dále detekuje, tj. převede do základního pásma f_{NF} . Superheterodyny mají větší citlivost i blízkou selektivitu než přímozesilující přijímače, mají však sklon k příjmům na parazitních příjmových kanálech (image f)

vstupní signál f_{RF}

směšovač

mezifrekvenční zesilovač f_{MF}

detektor a nf. zesilovač f_{NF}



lokální oscilátor f_{LO}

Časový vývoj veřejné mobilní komunikace

Systemy veřejné celoplošné pozemní mobilní rádiové komunikace se vyvíjejí v časových etapách o době trvání zhruba 10 let. Každých 10 let dochází rychle do života jejich čtvrtá generace (4G) resp. LTE (Long Term Evolution) resp. LTE-A. Avšak přední svět již prakticky současně s tím již intenzívně připravují novou generaci, která se touto progresivní technikou zabývá. Dále si uvedeme alespoň jeden významný projekt ze světa radiokomunikací, jehož nástup se očekává již

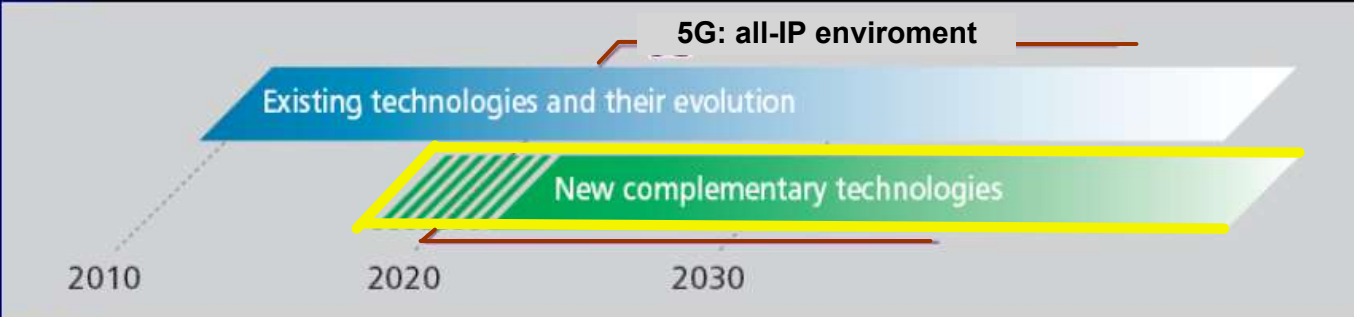
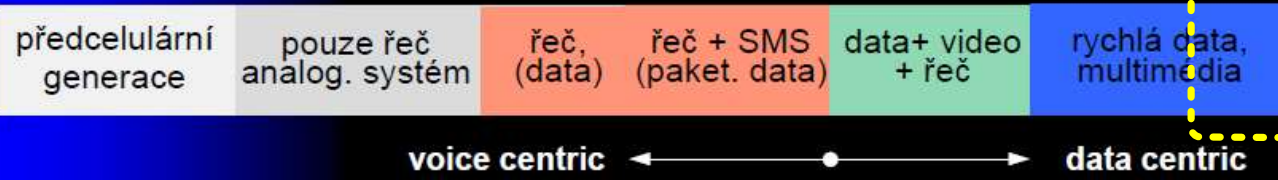
ještě před nástupem páté generace (5G) se vývoj MK již začíná štěpit na HTC a MTC
Ericsson Mobility Report Q2 2017: IoT v roce 2018 předstihne mobilní telefony a stane se v počtu připojených zařízení největší kategorií

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

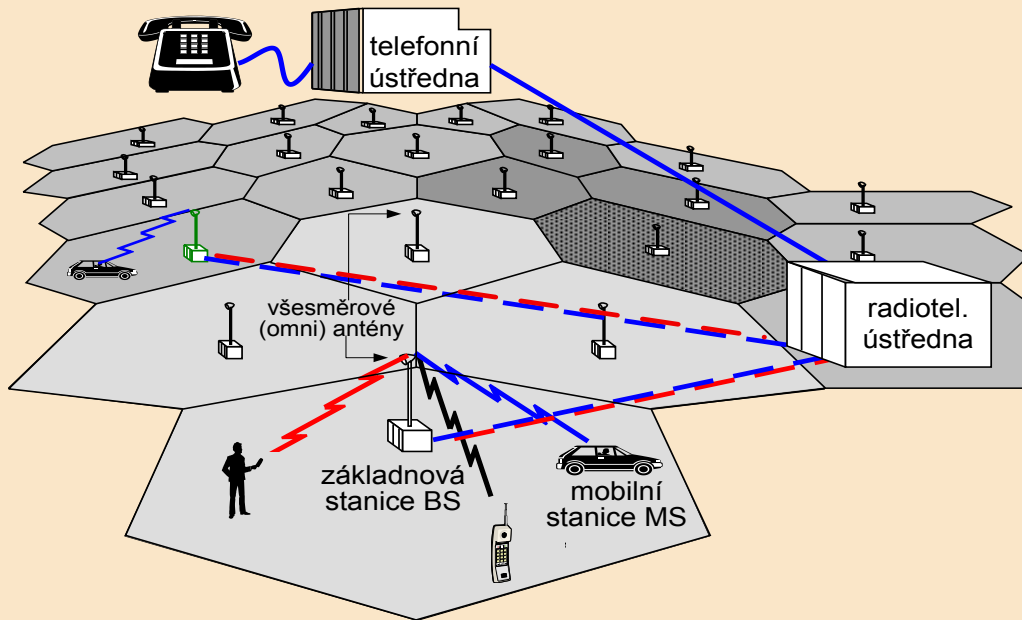
5G (2020)
OFDM/UFMC...
LTE...5G NR

HTC: Human Type Communication
hovor, data, multimedia: 10 Gb/s

MTC: Machine Type Communication
komunikace M2M (IoT, RC..): 1 ms



Buňkové (celulární) struktury pro pozemní mobilní komunikaci



rozměry buněk (ekvivalentní průměr):
piko buňky.....10 až 100 m
mikro buňky.....100 až 1000 m
malé makro buňky.....1 km až 3 km
velké makro buňky.....3 km až 30 km

svazek buněk: čtyři sousední buňky vytvářejí svazek (cluster); každá z nich má přidělen svůj soubor kanálů, takže se vzájemně neruší; kanály určité buňky však lze opakovat již v sousedním svazku, aniž by přitom hrozilo nebezpečí jejich vzájemného rušení

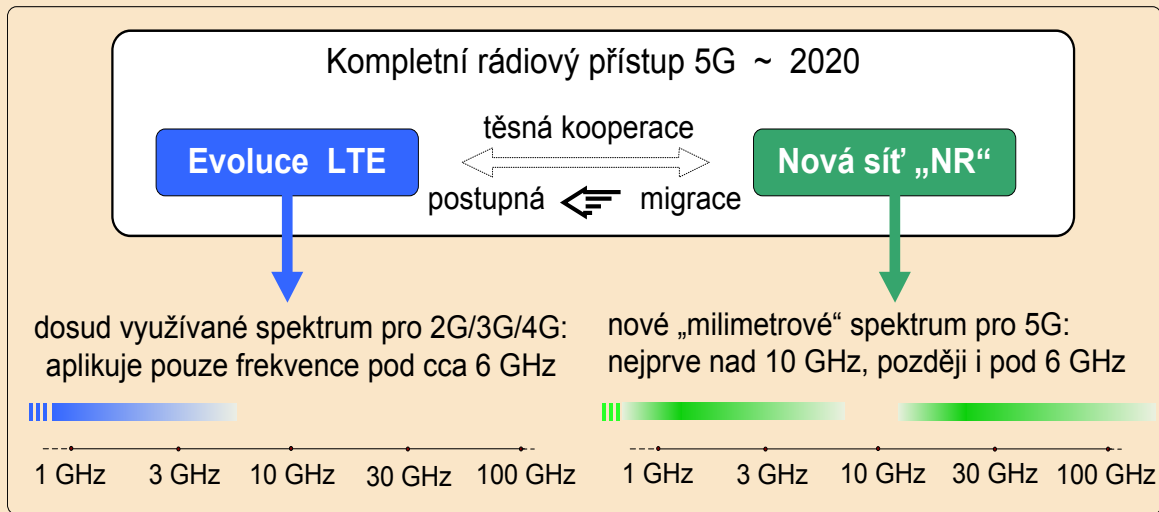
základní přednosti buňkových systémů:

díky velmi malým rozměrům buněk mají vysílače základnových stanic malé výkony a tudíž rádiové kanály přidělené určité buňce se mohou opakovat v jiných, poměrně blízkých buňkách. Díky tomu s relativně malým počtem kanálů lze poskytovat služby prakticky neomezenému počtu uživatelů buňkového systému (velmi vysoká spektrální účinnost systému)

první buňkové systémy využívaly v základnových stanicích BS **všesměrové antény** (v horizontální rovině), neboť neznaly polohu mobilních stanic MS uvnitř buňky. To vedlo k velmi malé energetické účinnosti systému. Bilanci zlepšují směrové antény na BS (např. sektorizace $3 \times 120^\circ$). Definitivním řešením problému jsou však až anténní systémy masivní MIMO, přinášející mohutné navýšení nejen energetické, ale i spektrální účinnosti

Pro výchozí buňkové struktury (start okolo roku 1980) byly typické velké buňky. Vzhledem k rychle rostoucímu útlumu L rádiového kanálu se vzdáleností d mezi vysílačem a přijímačem ($L \approx d^2 \dots d^4$) však v okrajových oblastech kolem hranic buněk je intenzita přijímaného signálu na trase DL (a analogicky na UL) relativně velmi malá a tedy spojení je velice nekvalitní. Zlepšení zde však přináší dokonalejší kódování FEC a opakování přenosu H-ARQ, diverzifikační techniky SIMO/MISO, technika radioreléových uzlů a hlavně densifikace celé buňkové sítě, spočívající v budování nových mikro a pikobuněk, radioreléových uzlů apod.

Frekvenční pásma a postupná densifikace mobilních sítí



tradiční pásma všech veřejných mobilních sítí sahají od cca 400 MHz do 6 GHz. Pátá generace (5G) získá nová velice široká milimetrová pásma ($f = 30 \dots 300$ GHz, tj. $\lambda = 10 \dots 1$ mm), která jí dovolí mohutně navýšit propustnost celé sítě 5G, i individuální přenosovou datovou uživatelskou rychlost

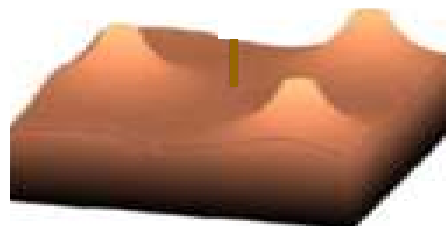
pro většinu mobilních stanic byla v roce 2010 postačující reálná datová rychlost ~ 1 Mbit/s na jednoho uživatele. V roce 2020 to bude datová rychlost ~ 10 Mbit/s a v r. 2030 se předpokládá rychlost nejméně 100 Mbit/s, dosažitelná bez výjimky pro každého uživatele kdykoliv a kdekoliv (na hranicích buněk, v zakrytých oblastech ap)

městské prostředí	postupná densifikace struktur LTE			
	tradiční síť 2009-2014	hustší síť 2015-2017	velmi husté síť 2017-2020	ultra husté síť po roce 2020
z. stanic BS/km ²	7 BS	21 BS	26 BS	93 BS
vzdálenost BS	395m	237m	209m	112m
hustota provozu	~ 1 Gb/s/km ² 4 Mbit/s	~ 5 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

výchozí síť LTE (2009, rel.8...10)



vylepšená síť LTE-A (rel.11...) (diverzita, HARQ, LDPC...)



budování pikobuněk, radioreléových uzlů, kooperativní funkce...

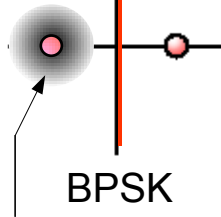


Vicestavové digitální modulace M-QAM

U modulací M-QAM se moduluje amplituda a fáze nosné vlny, avšak její frekvence je konstantní

hranice rozhodování detektoru přijímače

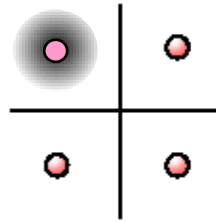
1 bit/s/Hz



BPSK

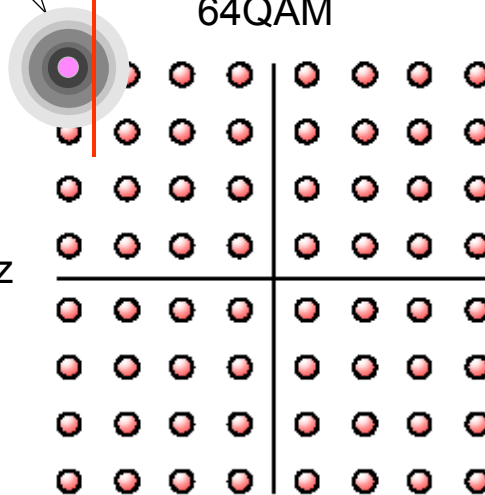
rozptýlení konstelačních bodů v přijímači vlivem šumů, rušení ap.

2 bit/s/Hz



QPSK

velká pravděpodobnost záměny symbolů v přijímači následkem šumů

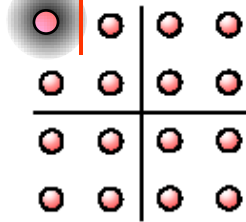


64QAM

6 bit/s/Hz

16QAM

4 bit/s/Hz



Konkrétní případy modulací MQAM symbolová rychlost a tedy i šířka pásma zůstává u všech variant modulací stejná

Systém s rádiovou šířkou pásma $B_{RF} = 1$ MHz může dosahovat v závislosti na formátu použité modulace následujících přenosových datových rychlostí f_b :

modulace BPSK: 1 Mbit/s
modulace QPSK: 2 Mbit/s
modulace 16QAM: 4 Mbit/s
modulace 64QAM: 6 Mbit/s

Při narůstajícím řádu (počtu stavů) dané modulace - a při zachování požadované chybovosti BER, se zvyšuje potřebný poměr E_b/N_0 , tedy se snižuje jejich energetická účinnost:

mod. BPSK: $E_b/N_0 = 10,5$ dB
mod. QPSK: $E_b/N_0 = 10,5$ dB
mod. 16QAM: $E_b/N_0 = 15,0$ dB
mod. 64QAM: $E_b/N_0 = 18,5$ dB

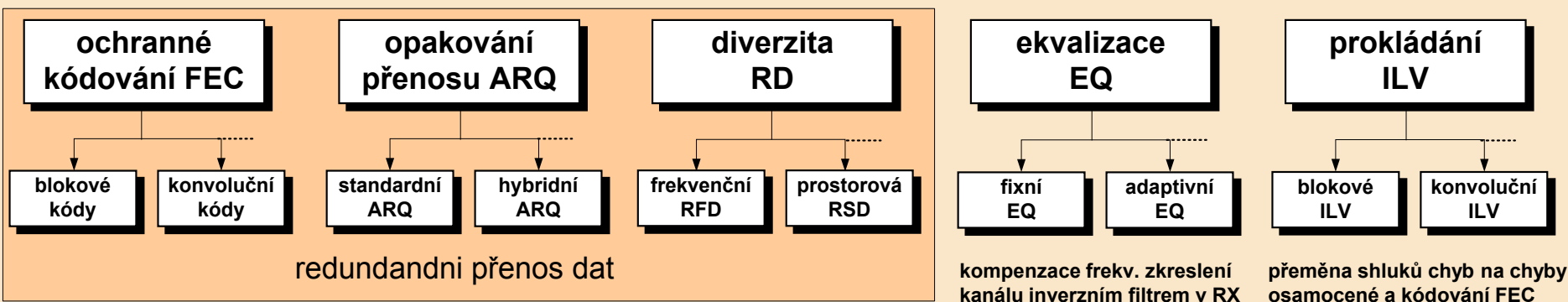
S rostoucím počtem modulačních stavů M se při konstantním pásmu B_{RF} zvětšuje dosažitelná přenosová rychlost R_b a tím se zvětšuje spektrální účinnost $\eta_s = R_b/B_{RF}$. Současně se však také zvětšuje potřebný poměr $E_b/N_0 = P_t \cdot B_{RF} / R_b \cdot N_0$, takže pro zachování stanovené chybovosti BER, je nutné zvyšovat energii E_b připadající na jeden bit; to lze realizovat zvýšením výkonu vysílače P_t , či zisku antén G_t resp G_r ap. Tím se ale současně snižuje energetická účinnost η_e

The trade-off among E_b/N_0 and R_b/B_{RF}

Přímo úměrně zvětšování poměru E_b/N_0 se však musí pro zachování neměnné chybovosti BER zvyšovat výkon vysílače, resp. zisk vysílací nebo přijímací antény; stejný efekt přináší též zmenšování šumového čísla F [dB] přijímače.

Hlavní způsoby ochrany rádiového přenosu proti rušivým efektům působícím v rádiovém kanálu

Klasifikace metod ochrany rádiového přenosu



Kanálové kódování FEC (Forward Error Correction): přidávání redundandních (ochranných) bitů k datovým bitům, které v dekodéru přijímače dovolují detekovat a event. i korigovat chybně přenesené bity. Kódování FEC je efektivní jen u osamocených chyb, u shluků chyb se kombinuje s prokládáním,

Opakované vysílání ARQ (Automatic Repeat Query): chybné úseky přenosu jsou v přijímači detekčními kódy indikovány; vysílač je pak automaticky zpětným kanálem požádán o jejich opakované vysílání.

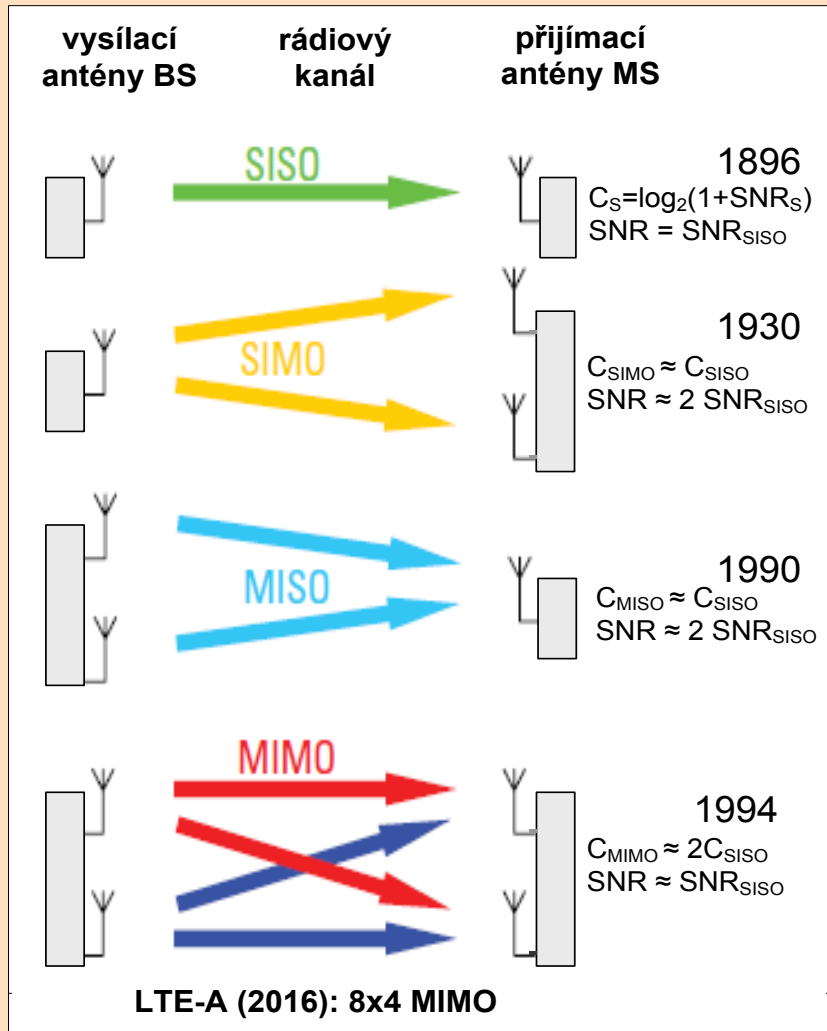
Hybridní ARQ = HARQ: vysílání ARQ doplněné o adaptivní kanálové kódování FEC

Diverzita RD (Radio Diversity): podstatou diverzity je vytvoření více rádiových kanálů mezi vysílačem a přijímačem, které přenášejí stejný informační signál, avšak mají vzájemně co nejslaběji korelované úniky. Kanály mohou být odděleny ve frekvenční, časové, prostorové, polarizační či kódové doméně.

Ekvalizace EQ (Equalization): základem ekvalizéru v přijímači je “inverzní frekvenční filtr”, který kompenzuje amplitudové a fázové zkreslení rádiového kanálu, vznikající např. mnocestným šířením; v mobilní komunikaci musí být ekvalizér adaptivní, neboť parametry kanálu se neustále mění.

Prokládání ILV (Interleaving): záměrné, přesně definované změny přirozeného pořadí bitů, prováděné v prokladači zařazeném před modulátorem a opětovné obnovení původního pořadí, realizované v inverzním prokladači za demodulátorem; tím se shluky chyb vznikající v rádiovém kanálu mění na chyby osamocené, které lze konvenčními kanálovými kódy již korigovat.

Principy základních systémů s více anténami MMS: SISO/SIMO/MISO a MIMO



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

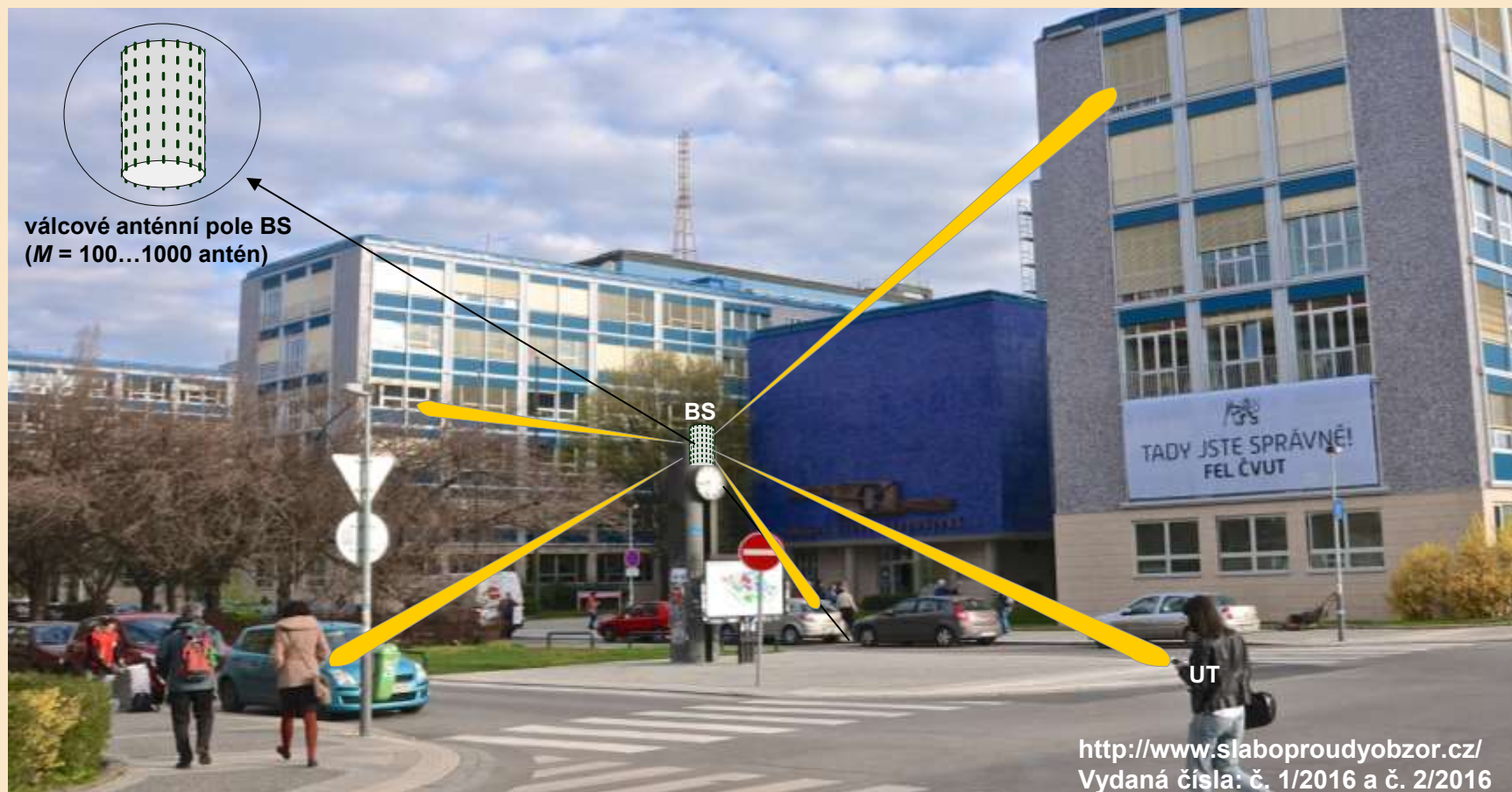
Prostý rádiový přenos SISO (Single Input Single Output): přenáší se jen jeden modulační datový tok, po jediné rádiové cestě, přičemž zde nepůsobí žádná ochrana vůči únikům. Přenosová kapacita C_0 je dána přímo Shannonovým vztahem $C_0 = B \log_2(1 + S/N)$.

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

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

System masivní MIMO (vize z roku 2020)

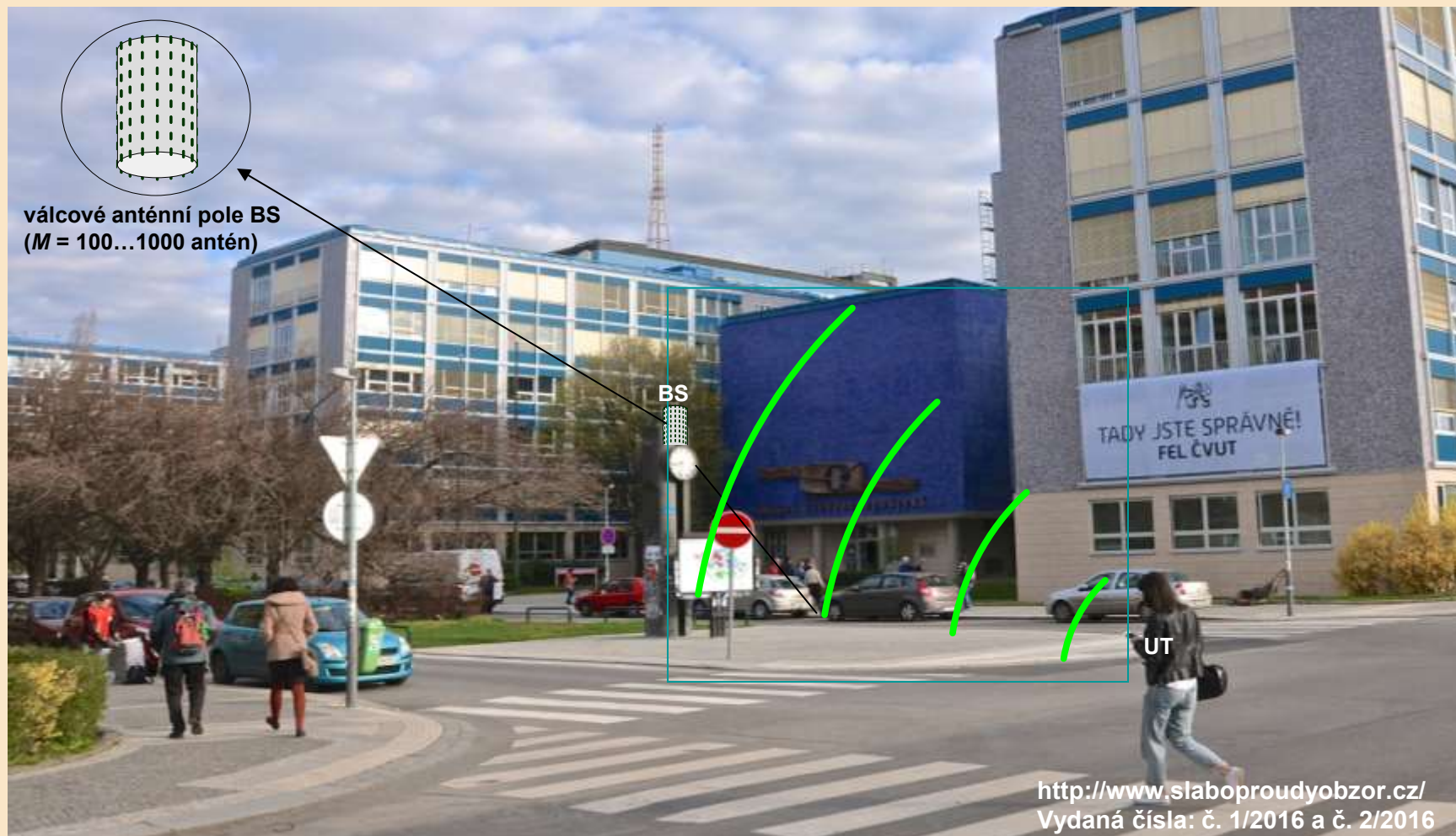
vysílání stanice BS na trase DL ve formě ostrých směrových svazků, formovaných anténním polem na BS



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 proto mohou využívat stejné pásmo, tj. aplikovat techniku prostorového multiplexu SDMA (Space Division Multiple Access). Díky tomu se na DL mohutně zvýší spektrální i energetická účinnost systému (cca M -krát). Navíc se sníží úroveň určitých typů interferencí. Ke sledování pohyblivých stanic UT je ale nutná stále aktivovaná znalost matice kanálu \mathbf{H} (CSI-Channel State Information). Ta se získává odhadem, založeným na periodickém vysílání pilotních sekvencí, vkládaných mezi vysílaná data a jejich následujícím vyhodnocení v přijímači.

System masivní MIMO (vize z roku 2020)

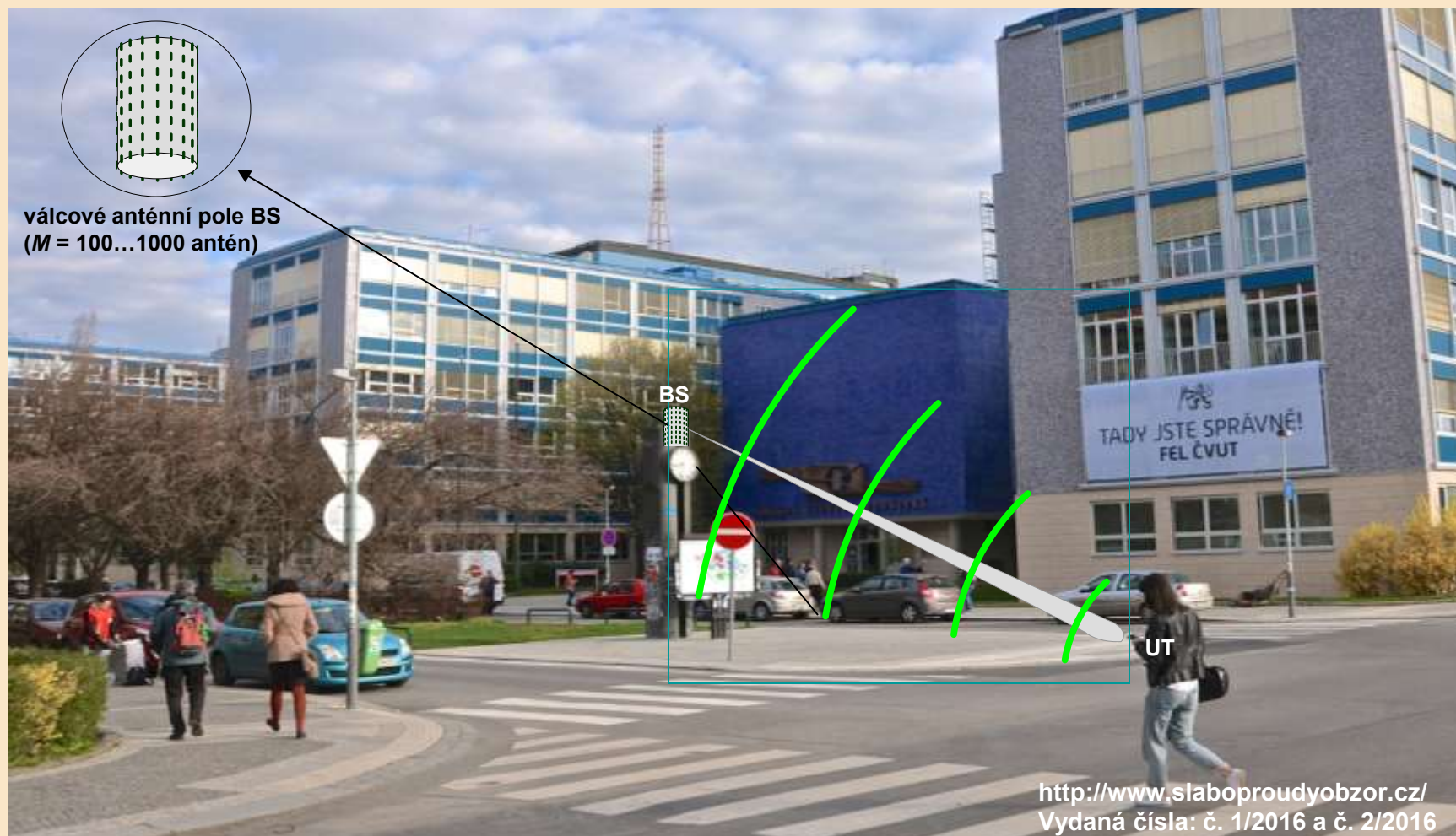
vysílání terminálů UT na trase UL, realizované pomocí antény s nevýraznou směrovostí (omni)



Na trase UL vysílá uživatelský terminál UT, vybavený většinou jednou anténou s velmi malou směrovostí, signál směrem k anténnímu poli zákl. 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.

System masivní MIMO (vize z roku 2020)

anténní pole na BS vytváří přijímací směrový diagram s ostrými maximi zaměřenými na aktivní terminály UT



Na trase UL vysílá uživatelský terminál UT, vybavený většinou jednou anténou s velmi malou směrovostí, signál směrem k anténnímu poli zákl. stanice BS. Toto pole však může díky velkému počtu elementárních antén, při znalosti matice \mathbf{H} , formovat přijímací diagram s ostrými maximi, 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.

Pozemní rádiová komunikace strojového typu MTC

Machine Type Communication

Obecné charakteristiky systémů MTC

Ve srovnání s konvenční komunikací HTC se komunikace MTC vyznačuje:

- velkým počtem koncových terminálů, avšak s velmi nízkou přenosovou rychlostí
- nespojitými přenosy malých objemů dat, střídaných dlouhými pasívními intervaly
- nutností dlouhodobé činnosti nepřístupných terminálů UT, bez výměny baterií (≤ 10 let)
- asymetrickým přenosem na trasách DL/UL, vystačujícím s poloduplexem HDX
- zvýšeným útlumem rádiového kanálu u zastíněných terminálů UT (sklepy, kanály...)

Uvedené body vedou v sítích MTC v porovnání s HTC k těmto úpravám:

- postupné radikální omezování špičkové datové rychlosti na UL i na DL
- z toho vyplývající výrazná redukce potřebné šířky rádiové pásma: $C = B \log_2 (1 + SNR)$
- náhrada plně duplexního režimu (FDX) poloduplexem (HDX), nebo simplexem (SX)
- kompenzace většího útlumu rádiového kanálu (o cca 20 dB) v aplikacích IoT cestou: využití modulací nižších řádů (QPSK; BPSK...), účinnějšího kódování (turbo, HARQ..) zlepšování technologií zesilovačů LNA, aplikací radioreléových uzlů RRN ap.

V terminálech MTC v porovnání s HTC dochází k následujícím změnám:

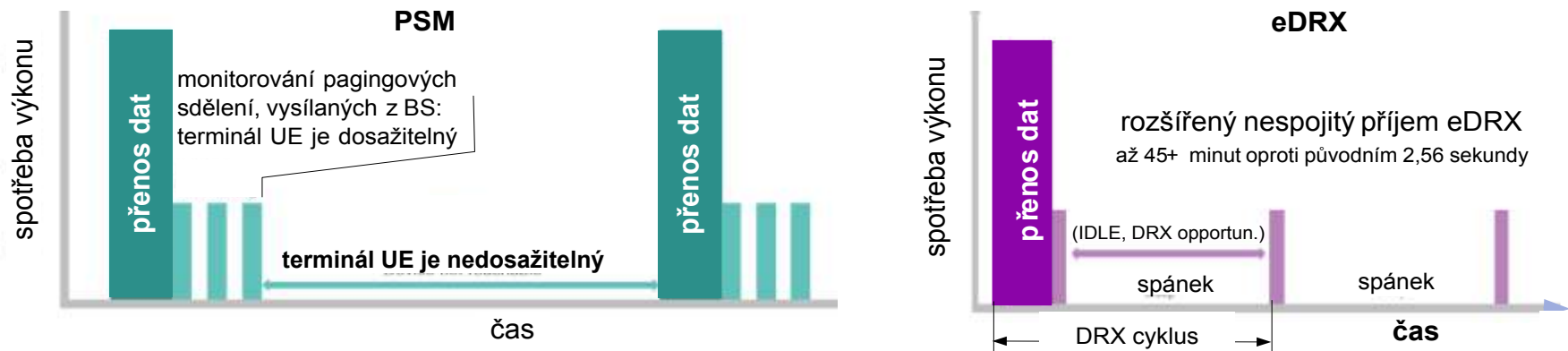
- značné zjednodušení koncepce, vypuštěním displeje, klávesnice a dalších funkcí
- realizace zbývající elektroniky s využitím efektivní technologie SoC (System on Chip)
- integrace terminálů MTC se senzory, aktuátory ap. do levných modulů (cena ≈ 5 USD)
- zavádění metod úspory napájecích výkonů (PSM, eDRX ap) v terminálech UT, prodlužující jejich činnost bez výměny baterií běžně na 5 až 10 let.

Technologie PSM a eDRX pro úsporu výkonu v terminálech IoT

Technologie PSM (Power Save Mode) a eDRX (extended Discontinuous Receiving) v systému NB-IoT, i v jiných sítích, výrazně zmenšují energetickou spotřebu terminálů UT a tím prodlužují životnost jejich baterií až na 10 let. Navíc snižují úroveň elektromagnet. interferencí (smogu) a tím vylepšují přenosovou kapacitu celého systému. Obě techniky definují tři provozní režimy terminálů UT: režim připojení RRC_connected (UT může přenášet data), režim nečinnosti RRC-idle (UT nepřenáší data, ale je dosažitelný), režim spánku sleep (UT nepřenáší data a je nedosažitelný), Obě techniky využívají všechny tři zmíněné režimy, avšak rozdílně. Přitom platí pravidlo: **čím delší je perioda spánku - tím větší jsou úspory energie, ale větší je i latence.**

Mód úspory výkonu PSM: vhodný pro volání iniciované terminálem UT (monitoring životního prostředí, chytrá měření spotřeby energie...)

Mód rozšířeného diskontinuálního příjmu eDRX: vhodný pro volání iniciované sítí RAN (automatické sledování objektů, chytré energetické sítě/mřížky...)



škálování nahoru v parametrech a mobilitě

škálování dolů ve složitosti a výkonu

dnes (2016)

nové úzkopásmové IoT technologie (3GPP Release 13+)

LTE Cat-1 a výše

≥ 10 Mbit/s

n x 20 MHz

LTE Cat-0

≤ 1 Mbit/s

20 MHz

LTE Cat-M1 (eMTC)

≤ 1 Mbit/s

≤ 1,4 Mbit/s

Cat-NB1 (NB-IoT)

10s z kbit/s

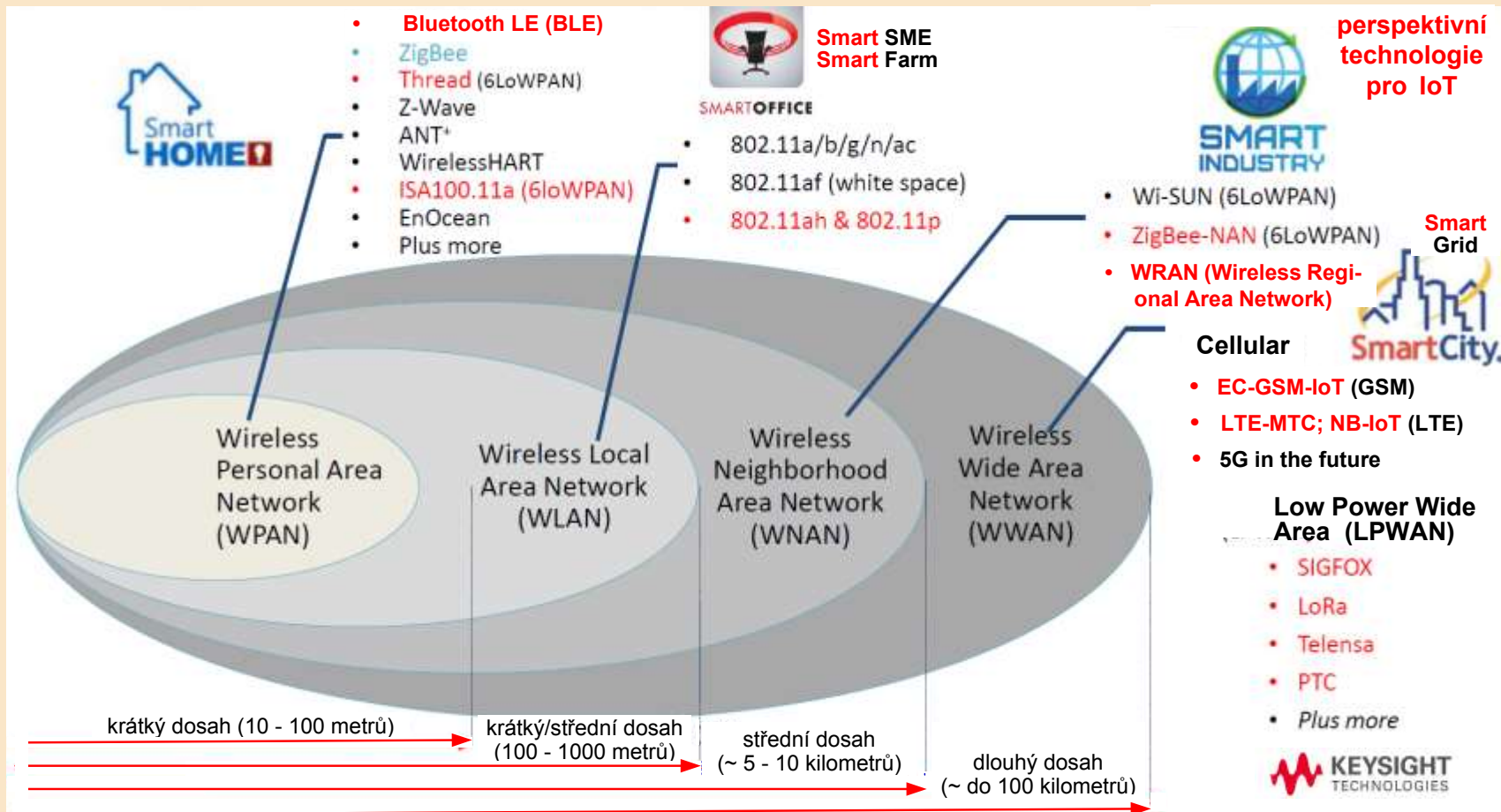
200 kHz úzkopás.

Přehled konkrétních rádiových systémů pro Internet věcí

Dvě základní třídy rádiových systémů určených pro Internet věcí IoT (komunikaci MTC):

• **upravené veřejné rádiové sítě**, ať již lokálního typu (WiFi, Bluetooth, ZigBee apod), nebo metropolitní sítě s větším dosahem (WiMAX, WRAN), případně celoplošné buňkové sítě všech generací, tedy síť GSM/2G a UMTS-HSPA/3G a zejména síť LTE/4G a perspektivně 5G. Tyto sítě jsou ale primárně určené pro komunikaci HTC, takže pro komunikaci MTC (M2M) s odlišnými požadavky je nezbytné je výrazně modifikovat, resp. vytvořit jejich nové „MTC varianty“.

• **speciální jednocelové rádiové sítě**, označované jako proprietární nebo dedikované, které jsou určené právě jen pro aplikace v IoT. Ty často využívají bezlicenční frekvenční pásma (ISM).



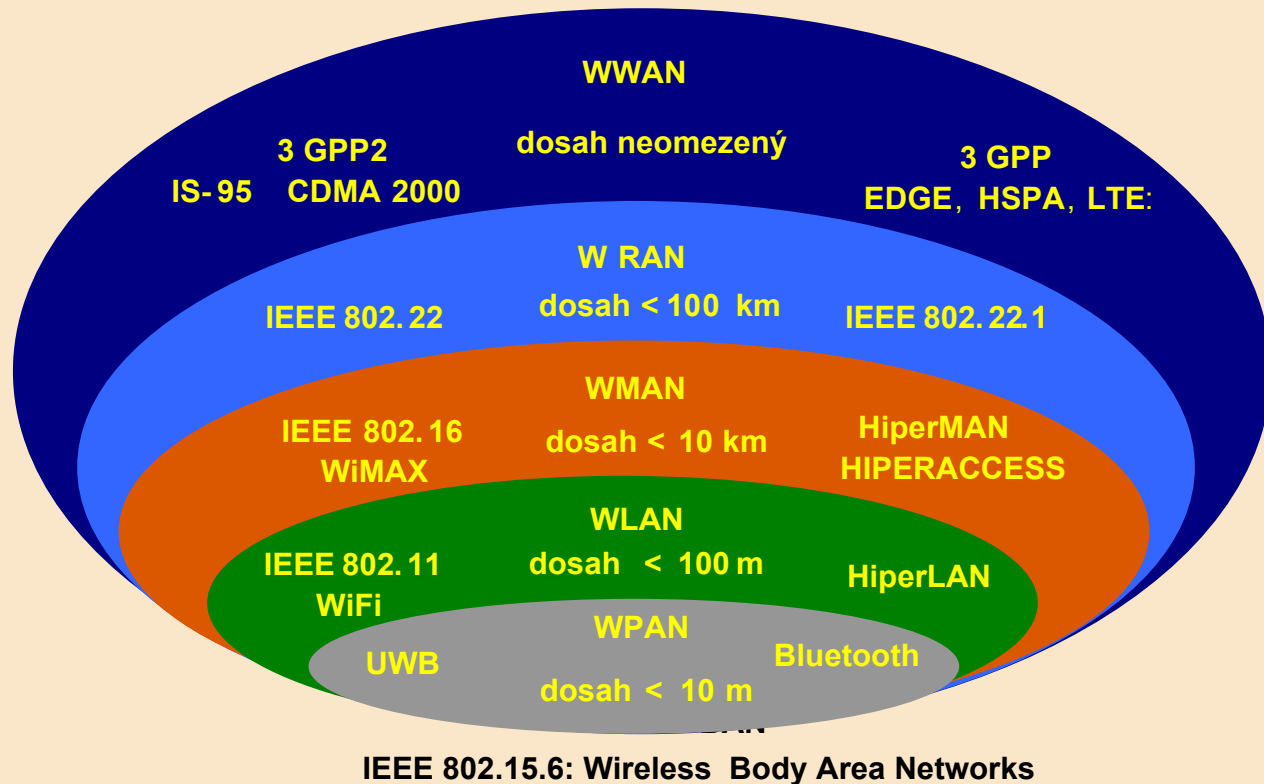
Konkrétní aplikace systému 5G orientované na Internet věcí IoT



Budoucí pátá generace (5G) pozemních mobilních systémů bude sdílet s metalickými resp. optickými spoji stejnou infrastrukturu. Bude zajišťovat všudypřítomnou virtuální konektivitu, s extrémními šířkami pásma a tedy s extrémními přenosovými rychlostmi a v případě potřeby s minimální latencí, a to nejen s individuálními uživateli, ale i s neživými objekty (M2M, IoT ...). Uvedená infrastruktura bude sloužit široké paletě aplikací, jež jsou naznačeny na obrázku. Bude to např. asistence při řízení dopravních prostředků, podpora funkcí v domácnosti i v profesním pracovním procesu, podpora energetického managementu, péče o zdraví (eHealth), aktivní účast v procesu vzdělávání, spoluúčast v ochraně osobní bezpečnosti atd.

*Klasické sítě veřejné pozemní mobilní komunikace
a jejich varianty pro IoT⁹*

Standardy 3GPP a IEEE 802, určené pro aplikace HTC

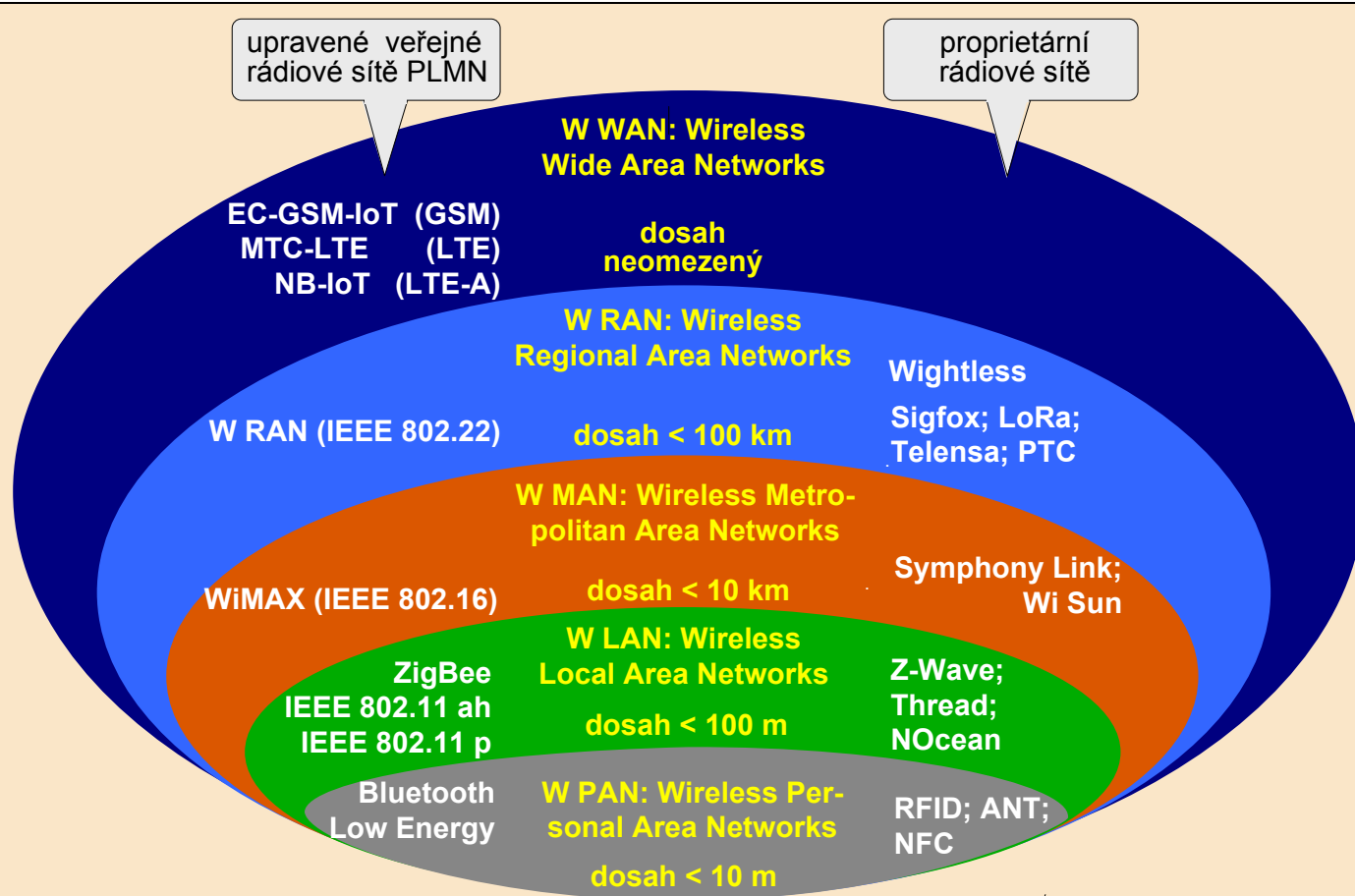


IEEE: Institut elektrických a elektronických inženýrů
The Institute of Electrical and Electronics Engineers

3GPP: Partnerský projekt pro 3. generaci 3GPP
Third Generation Partnership Project)

Sítě pro veřejnou pozemní mobilní komunikaci PLMN (Public Land Mobile Networks), které jsou určeny pro personální komunikaci HTC (Human Type Communications). V obrázku jsou děleny podle základního prostorového dosahu do pěti tříd. Dosah ovšem výrazně závisí na charakteru daného prostředí, na mobilitě koncových terminálů a koncepci použitých antén. Je ale také ovlivňován formátem modulace resp. multiplexního přístupu a způsobem ochrany přenosu, které si tyto systémy často adaptivně mění

Přehled konkrétních rádiových systémů pro Internet věcí - aplikace MTC



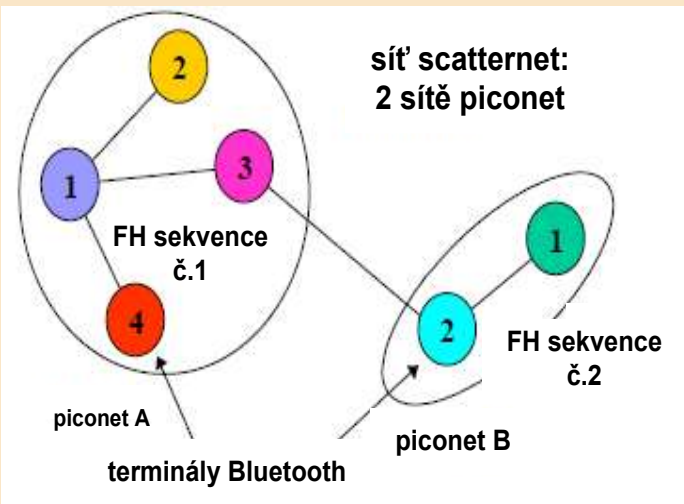
Radiokomunikační prostředky pro různé aplikace v Internetu věcí zde jsou děleny podle základního prostorového dosahu do pěti tříd. Dosah ovšem výrazně závisí na charakteru daného prostředí (typu zástavby, vegetaci ap), na mobilitě koncových terminálů a koncepci použitých antén. Je ale také ovlivňován formátem modulace resp. multiplexního přístupu a způsobem ochrany přenosu, jež si systémy MTC často adaptivně volí dle okamžité kvality rádiového kanálu. V obrázku je naznačeno ještě generické členění sítí pro IoT, rozlišující upravené veřejné rádiové sítě (vpravo) a speciální jednoúčelové proprietární sítě (vlevo).

Bezdrátová personální síť W-PAN „Bluetooth-classic“ a její varianta „BLE“

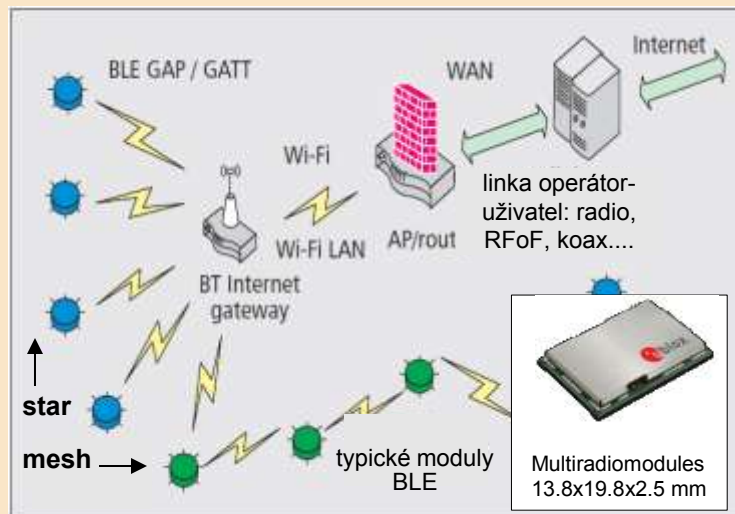
- **Síť Bluetooth-classic** je personální technologie W-PAN, určená pro datové přenosy na krátké vzdálenosti (Ericsson 1994). Skládá se z jedné, nebo více sítí “piconet“, které společně tvoří síť “scatternet“. Každá síť piconet obsahuje jedinou funkční jednotku “master“ a až sedm aktivních jednotek “slaves“, jejichž vysílací výkony jsou ≈ 10 mW. Přenos využívá bezlicenční pásmo ISM 2,4 GHz (2,4000 až 2,4853 GHz), v němž je 79 kanálů s odstupy 1MHz. Systém od počátku aplikuje modulaci GFSK (Gaussian FSK), později $\pi/4$ -DQPSK a 8DPSK. Uvažované pásmo 2,4 GHz mohou sdílet také sítě WLAN i další zařízení pásmem ISM. Nebezpečí interferencí čelí technika frekvenčního hoppingu AFH, kde se frekvence mění 1600 krát za sekundu mezi 79 stavů s odstupy 1 MHz. Duplexní přenos dat má hrubou rychlost cca 1 Mbit/s, později až 3 Mbit/s. Kromě dat může systém přenášet i hovor (64 kbit/s), s možností napojení na síť GSM.

- Síť Bluetooth Classic má pro aplikace v IoT nevhodnou topologii a relativně velkou výkonovou spotřebu koncových terminálů, na závadu je i složitý mechanismus identifikace. Pro IoT je určena nízkoenergetická verze **Bluetooth Low Energy (BLE)**, která má výhodnější topologii, spotřebu terminálů redukuje prodlužováním periody spánku (podobně jako v PSM) a také vhodnou úpravou komunikačního protokolu (attribute protocol ...) atd.

Síť Bluetooth Classic

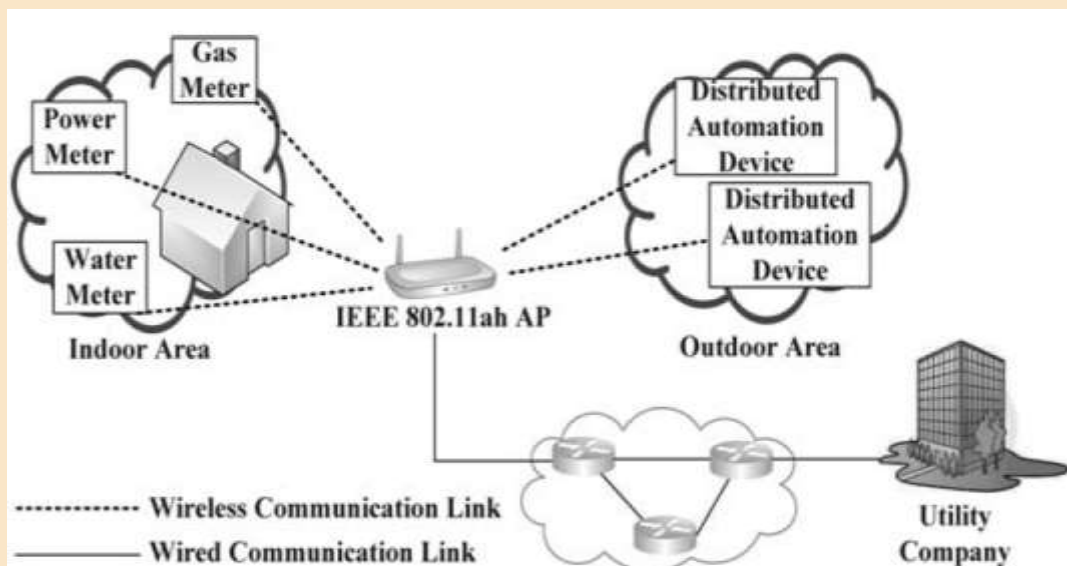


BLE: Bluetooth Low Energy (Smart Bluetooth)



Horní část sleduje běžnou hvězdicovou topologii. Dolní část ukazuje, jak uvedená hvězdicová topologie kooperuje s konfigurací mesh; to potom dovoluje velmi značně prodloužit prostorový dosah systému (do nedostupných či zastíněných zón ap.)

Bezdrátová lokální síť W-LAN v pásmu pod 1 GHz, s prodlouženým dosahem: standard IEEE 802.11 ah (Wi-Fi pro IoT)



příklady aplikací standardu IEEE 802.11 ah

Modulace OFDM	kódový poměr	bit. rychlost/GI	
		8 μ s	4 μ s
BPSK	1/2	0,65	0,72
QPSK	1/2	1,3	1,44
QPSK	3/4	1,95	2,17
16-QAM	1/2	2,6	2,89
16-QAM	3/4	3,9	4,33
64-QAM	2/3	5,2	5,78
64-QAM	3/4	5,85	6,5
64-QAM	5/6	6,5	7,22
256-QAM	3/4	7,8	8,67
256-QAM	5/6		

bitové rychlosti: Mbit/s; GI = Guard Interval

Základní parametry rádiového rozhraní standardu IEEE 802.11 ah, při šířce jeho rádiového kanálu 2 MHz a technice SISO

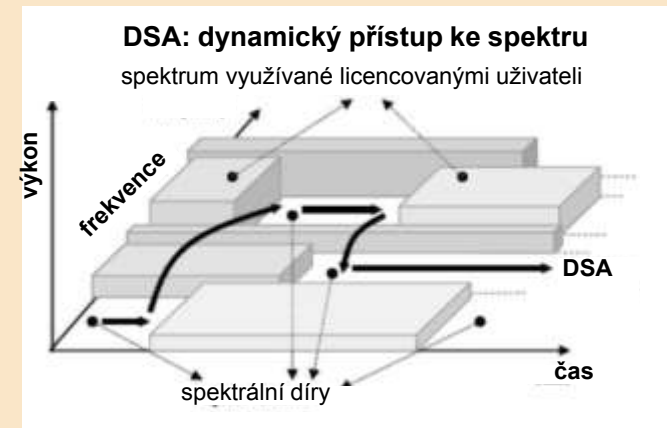
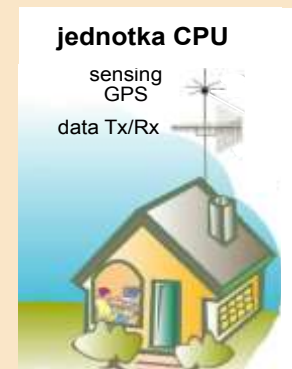
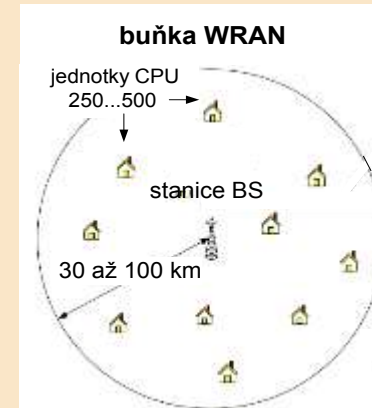
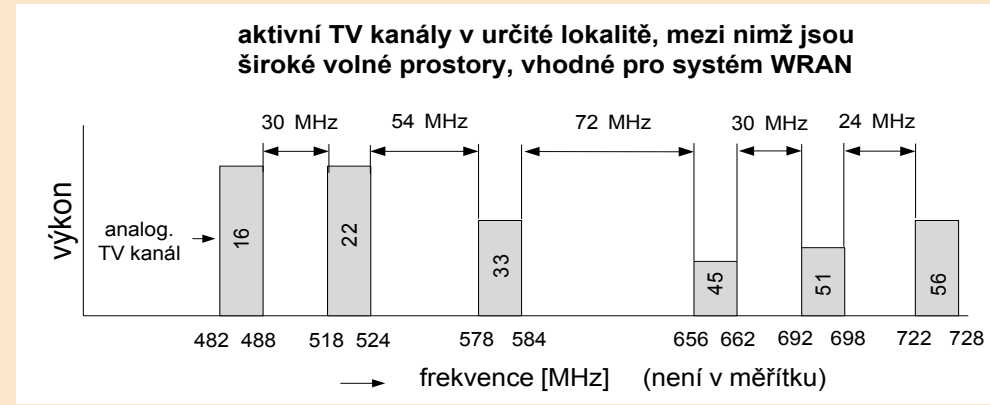
Téměř všechny lokální sítě podle standardů IEEE 802.11 (\approx WiFi) užívají mikrovlnná frekvenční pásma 2,5 a 5 GHz, v nichž provozují širokopásmové kanály o šířkách 20; 40 ... 160 MHz; dosažitelné datové rychlosti jsou pak řádu až několika gigabitů za sekundu. Jediný přístupový bod AP však pokrývá oblast o velikosti nepřesahující znatelně stovku metrů.

Standard 802.11ah používá pásma pod 1 GHz a úzké kanály 1 resp. 2 MHz. Vlivem toho zajišťuje podstatně lepší pokrytí, avšak dosažitelné rychlosti jsou výrazně nižší. Tak např. v pásmu 2 MHz, při modulaci BPSK a kódové rychlosti $\frac{1}{2}$, je dosah spojení cca 1 km a datová rychlost 650 kbit/s. Počet připojených terminálů však může být velmi vysoký. Standard IEEE 802.11 ah je velice vhodný pro velkoplošné senzorové sítě, chytré energetické mřížky, hotspotsy WiFi s prodlouženým dosahem a pod.

Standard IEEE 802.22 (WRAN)

Wireless Regional Area Networks

Standard IEEE 802.22 WRAN nabízí nelicencovaným uživatelům pozemní rychlou rádiovou komunikaci, jež se díky využití principů kognitivního rádia uskutečňuje v licencovaných televizních pásmech, s nízkými frekvencemi řádu stovek MHz. Standard má buňkovou strukturu s centrální základnovou stanicí BS (Base Station), jež obsluhuje až několik stovek provozních jednotek CPU (Customer Premise Unit). To zajišťují uživatelům velmi dobré pokrytí vymezených lokalit. Standard je určen především pro perspektivní aplikace ze sféry Internetu věcí, jako jsou chytrá města, inteligentní rozvodné sítě, doprava apod.



fyzická vrstva standardu IEEE 802.22 WRAN

Parametr	hodnota
frekvenční pásma	54- 862 MHz TV White Spaces
modulace	OFDM: QPSK/16QAM/64QAM
počet subnosných	2048
odstup subnosných	3,34...kHz
ef. vyzař. výkon EIRP	4 W (pro fixní BS i fixní CPU)
šířka pásma RF kanálu	6 resp. 7 resp. 8 MHz
kapacita kanálu	18 Mbit/s
uživatelská kapacita	DL: 1,5 Mbit/s; UL: 384 kbit/s

Buňkový standard GSM v aplikacích Internetu věcí: EC-GSM-IoT

Globální systém pro mobilní komunikaci GSM, ačkoliv vstoupil do praxe již po roce 1990, představuje významnou alternativu pro expanzi moderního Internetu věcí do našeho života. Jeho varianta **EC-GSM-IoT (Extended Coverage GSM IoT)**, založená na konvenční obohacené **paketové technologii eGPRS** (enhanced General Packet Radio Service), totiž v podstatě náleží do kategorie úsporných IoT technologií s velkým dosahem LPWA (Low Power Wide Area). Optimalizace stávající sítě GSM vedoucí k EC-GSM-IoT spočívá jen v **upgradingu softwaru**, takže nasazení této nové varianty do praxe může být v konkrétních případech velice rychlé. Uvažovaná technika zajišťuje již ve své základní verzi **při využívání licencovaných pásem vysokou spolehlivost přenosu, díky dalším opatřením i prodloužený dosah, nízkou energetickou spotřebu a realizační jednoduchost**, což jsou atributy vhodné právě pro komunikaci v rámci IoT.

S pokračující standardizací se technologie EC-GSM-IoT bude dále průběžně zdokonalovat, a to např. podporou techniky obohaceného diskontinuálního příjmu eDRX přinášejícího další výrazné úspory napájecí energie. Významná je také možnost dokonalého multiplexu této nové technologie EC-GSM-IoT s konvenčními paketovými kanály (PS) i okruhovými kanály (CS) sítí GPRS/EGPRS. Do **zkušebního provozu nastoupí EC-GSM-IoT počátkem roku 2018** a lze předpokládat, že hned z počátku nalezne úspěšné uplatnění v chytrých městech (logistika, sběr komunálních dat...), v chytrém zemědělství (měření teploty a vlhkosti v půdě i ovzduší...), ve světě připojených automobilů atd. V souhrnu lze technologii EC-GSM-IoT, vycházející ze stále ještě nejrozšířenějšího standardu GSM, považovat za velké obohacení komunikačních prostředků podporujících masivní nárůst IoT.

K přístupu do sítě EC-GSM-IoT je možné využít např. smartphony, které se tím stávají pro tento systém personální vstupní bránou (gateway), sloužící jako hlavní uzel (hub) pro výše zmíněné – jakož i početné další – aplikace.

Úzkopásmový Internet věcí NB-IoT

- Úzkopásmový internet věcí NB-IoT (Narrow Band IoT) je rádiová technologie, která náleží do projektu 3GPP a **vychází technicky ze standardu LTE**. Poskytuje široký rozsah služeb komunikace strojového typu MTC (Machine Type Communication). K nim patří monitorování neživých i živých objektů, chytrá měření, management dopravních prostředků atd.
- Systém NB-IoT je často určen pro pokrytí velkých prostor, s masívním počtem koncových terminálů (až 40 na rodinný dům a 200 000 na buňku), jež ale generují malé objemy dat a leckdy se nacházejí v odlehlých resp. zastíněných oblastech. Musí proto zvládat větší útlum kanálu a mít co nejnižší spotřebu energie a tedy dlouhou životnost baterií (až 10 let), a to při ceně pod 5 USD za jeden terminál.
- Systém NB-IoT se technicky odvozuje od standardu LTE Rel. 13 (2016). **Na trase DL se užívá ve fyzické vrstvě (PHY) stejný přístup OFDMA**, s odstupy subnosných vln $\Delta f_c = 15$ kHz a dobami trvání slotů/subrámců/rámců $\rightarrow 0,5\text{ms}/1\text{ms}/10\text{ms}$. Podobná je na DL i koncepce kanálového kódování, adaptace přenosových rychlostí, shodné je i prokládání a metoda cyklického prefixu CP.
- **Na trase UL se aplikuje přístup SC-FDMA** při $\Delta f_c = 15$ kHz, nebo přenos ST (single tone) při $\Delta f_c = 15$ kHz resp. 3,75 kHz. Vyšší vrstvy RLC, MAC a RRC jsou podobné vrstvám LTE, ale metody přístupu a kontrolní kanály jsou pro NB-IoT nové.
- **Výkonová bilance rádiového kanálu (link budget) je zde o 20 dB lepší, než u LTE-A**, což zvětší oblast pokrytí ve volné krajině asi sedmkrát, resp. kompenzuje zvýšený útlum v zastíněných lokalitách. Zlepšení 20 dB se získá použitím modulací nižších řádů (BPSK/QPSK), účinnějšími kódy FEC (turbo, LDPC...), opakováním přenosu ARQ / HARQ, anténní prostorovou diverzitou SIMO/MISO, aplikací kooperativních technik apod.
- Úspora napájecí energie v koncových terminálech se dosahuje **aplikací technik PSM (Power Save Mode) a eDRX (extended Discontinuous Receiving)**.

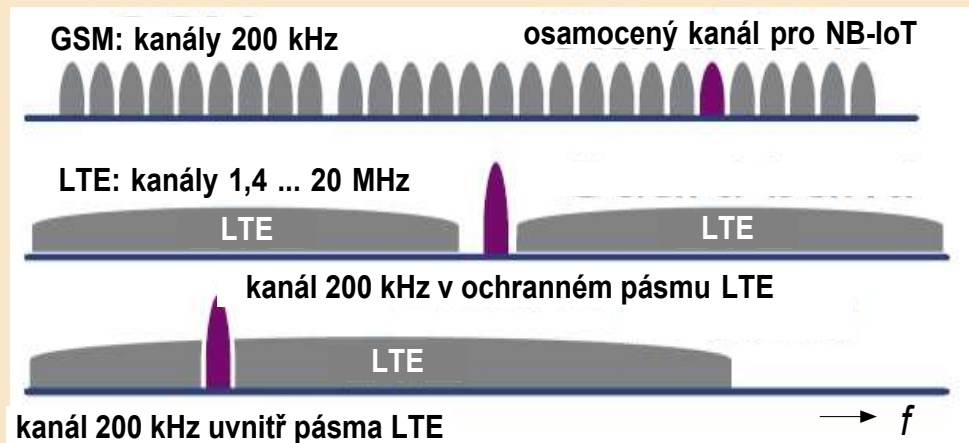
Úzkopásmový Internet věcí NB-IoT (pokračování)

Terminály UT pro NB-IoT mají většinou jen jednu anténu a pracují v poloduplexním provozu, jež dovoluje nahradit složitý duplexní filtr jednoduchým přepínačem.

Základní šířka pásma je redukována na DL i UL na 200 kHz, což snižuje datovou rychlost ve fyzické vrstvě na cca 100 až 200 kbit/s. V tomto pásmu ale na UL může více terminálů s pomalými daty pracovat paralelně. Zjednoduší se také převodníky ADC a DAC a další obvody, což přispívá ke snížení spotřeby i ceny terminálů UT.

System NB-IoT není přímo slučitelný se sítí LTE/4G, ani se sítěmi 2G a 3G, umožňuje však s **těmito staršími formáty koexistenci ve frekvenční oblasti** - viz obrázek. Při aplikaci NB-IoT v pásmech 900 či 1800 MHz standardů GSM/GPRS může přímo využívat jejich dílčí kanály (GSM Carriers) o šířce 200 kHz. V pásmech standardu LTE lze adaptovat pro NB-IoT segmenty o šířce 180 kHz, určené jednomu zdrojovému bloku RB (=12x15 kHz) uvnitř určitého regulárního LTE kanálu; pro NB-IoT je možné využít také ochranné intervaly mezi dvěma sousedními kanály LTE. Standardy LTE a GSM pracují v licencovaných pásmech, což zajišťuje pro NB-IoT spolehlivý provoz bez interferencí.

Využití licenčních pásem GSM a LTE v systému NB-IoT



struktura signálu v systému LTE: mřížka $t \times f$ v časově-frekvenční oblasti (txf) je základní informační jednotkou tzv. zdrojový element RE (Resource Element): 1 symbol x 1 subnosná. Série sedmi elementů RE, řazených v čase na jediné subnosné, vytváří časový slot 0,5 ms. Celkem 12 subnosných se vzájemnými odstupy 15 kHz zabírá frekvenční úsek $12 \times 15 = 180$ kHz. Skupina sedmi elementů RE na 12 subnosných tvoří jeden **zdrojový blok RB** (Resource Block). Granularita 180 kHz v LTE a granularita 200 kHz v GSM, byla využita při specifikaci základní šířky kanálu 200 kHz ve standardu NB-IoT

Nové kategorie terminálů LTE pro potřeby IoT

Nové kategorie terminálů UE (modulů) systému LTE 3GPP pro Internet věcí IoT jsou optimalizovány pro přenosy malých objemů dat v krátkých časových intervalech a s velkými pauzami mezi nimi. Jsou podstatně jednodušší, menší a tím i levnější, než terminály pro MBB. Po počátečním terminálu LTE Cat 1 přichází v Rel. 12 terminál LTE Cat 0, již se sníženými rychlostmi DL/UL, avšak ještě s původními RF šířkami pásma LTE tj. 1,4; 3; 5; 10; 20 MHz. Postupně se však u terminálů UE, směřuje k aplikaci užších RF pásem. Terminály LTE Cat-M1 (též eMTC), aplikují jen RF pásmo 1,4 MHz a LTE Cat NB1 pásmo 200 kHz, využívané již v rámci Internetu věcí NB-IoT. Poslední tři kategorie zavádějí poloduplexní provoz a nejmladší z nich i možnost o 3 dB sníženého vysílacího výkonu. Všechny kategorie disponují technikami úspory výkonu PSM a eDRX.

	LTE Cat 1	LTE Cat 0	LTE Cat M1	LTE Cat NB1
pásma pro rozvinutí	In-band LTE	In-band LTE	In-band LTE	In-band LTE Guard-band LTE Standalone
sestup. trasa DL	OFDMA [15 kHz]	OFDMA [15 kHz]	OFDMA [15 kHz]	OFDMA [15 kHz]
vzest. trasa UL	SC-FDMA [15 kHz]	SC-FDMA [15 kHz]	SC-FDMA [15 kHz]	Single tone
handover	yes	yes	yes	no
špičková datová rychlost	DL: 10 Mbps UL: 5 Mbps	DL: 1 Mbps UL: 1 Mbps	DL: 1 Mbps UL: 1 Mbps	DL: 250 kbps UL: 20 kbps (single tone)
pásmo Rx	20 MHz	20 MHz	1.4 MHz	200 kHz
duplexní mód	Full-duplex FDD/TDD	Full/Half-duplex FDD/TDD	Full/Half-duplex FDD/TDD	Half-duplex FDD
vysílací výkon UE	23 dBm	23 dBm	23 or 20 dBm	23 or 20 dBm
úspora výkonu	PSM, eDRX	PSM, eDRX	PSM, eDRX	PSM, eDRX

typické koncové terminály pro IoT LTE

Narrowband LTE-M (Cat M1) and NB-IoT (CatNB1) Single Chip for the IoT; package **6.5 x 8.5 x 2.5 mm**



LTE CAT M1 modem **29 x 33 x 10.4 mm**



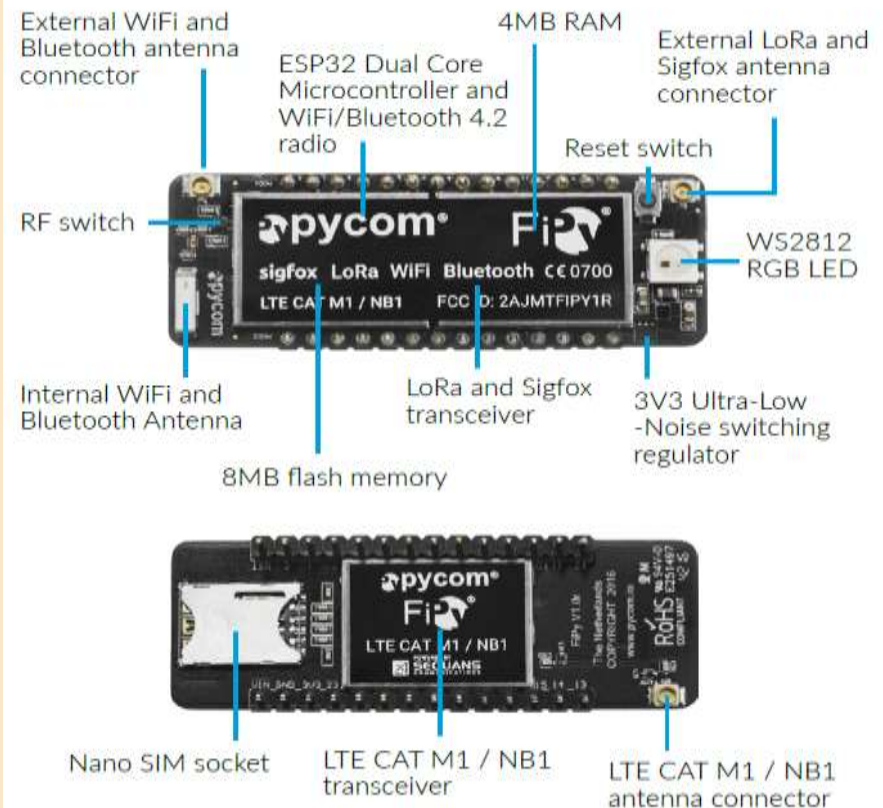
Koncové terminály systému IoT: Sequans Colibri a Pycom

Sequans Colibri



zapouzdřený transceiver systému NB-IOT pro Internet věcí, realizovaný monolitickou technologií SoC (System on Chip); vnější rozměry transceiveru jsou 6,5 x 8,5 x 2,5 mm

Size: 55mm x 20mm x 3.5mm



nejnovější rádiový modul pro koncový terminál IoT, určený pro pět rádiových rozhraní: Sigfox, LoRa, WiFi, Bluetooth a LTE Cat M1/NB1. Jeho rozměry jsou 42 x 20 x 3,5 mm

<https://www.pycom.io/fipy-kickstarter-campaign/>

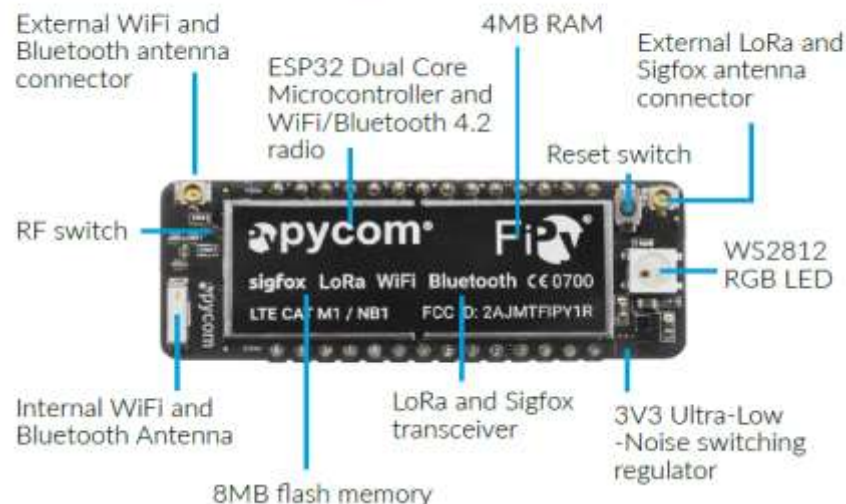
Koncový modul PYCOM systému IoT pro pět rádiových rozhraní



vnější rozměry:
55 x 20 x 3,5 mm

Mechanical

Size: 55mm x 20mm x 3.5mm



Modul „PYCOM FiPi“ operuje ve formátech Sigfox, LoRa, WiFi, Bluetooth a LTE Cat M1/NB1.

LTE Cat M1/NB1 jsou technologie odvozené od standardu LTE. Pracují v licencovaných pásmech, což jim umožňuje splnit požadavky QoS, při vysokém stupni zabezpečení přenosu. LTE Cat M1 (= LTE-M) užívá pásmo 1,4 MHz, má max. dat. rychlost 375 kbit/s, latenci cca 15 ms, nabízí mobilitu s handoverem; je vhodná pro nositelnou „fitness“ elektroniku, bezp. alarmy ap LTE Cat NB1 (=NB-IoT) užívá RF pásmo 200 kHz, má špičkovou datovou rychlost desítky kbit/s, latenci 2 až 10 sekund. nenabízí mobilitu; je vhodná např. pro fixní senzory teploty, vlhkosti atd.

Sigfox a LoRa jsou proprietární technologie, které se svým dosahem cca 40 až 50 km zařazují do kategorie LPWAN (Low Power WAN). Pracují v bezlicenčních pásmech

WiFi (802.11 ah...) je lokální technologie s dosahem až 1km, vhodná pro komunální služby...

Bluetooth LE je personální technologie s dosahem až 100 m, vhodná pro chytré domy...

<https://www.pycom.io/fipy-kickstarter-campaign/>

Proprietární sítě pozemní komunikace

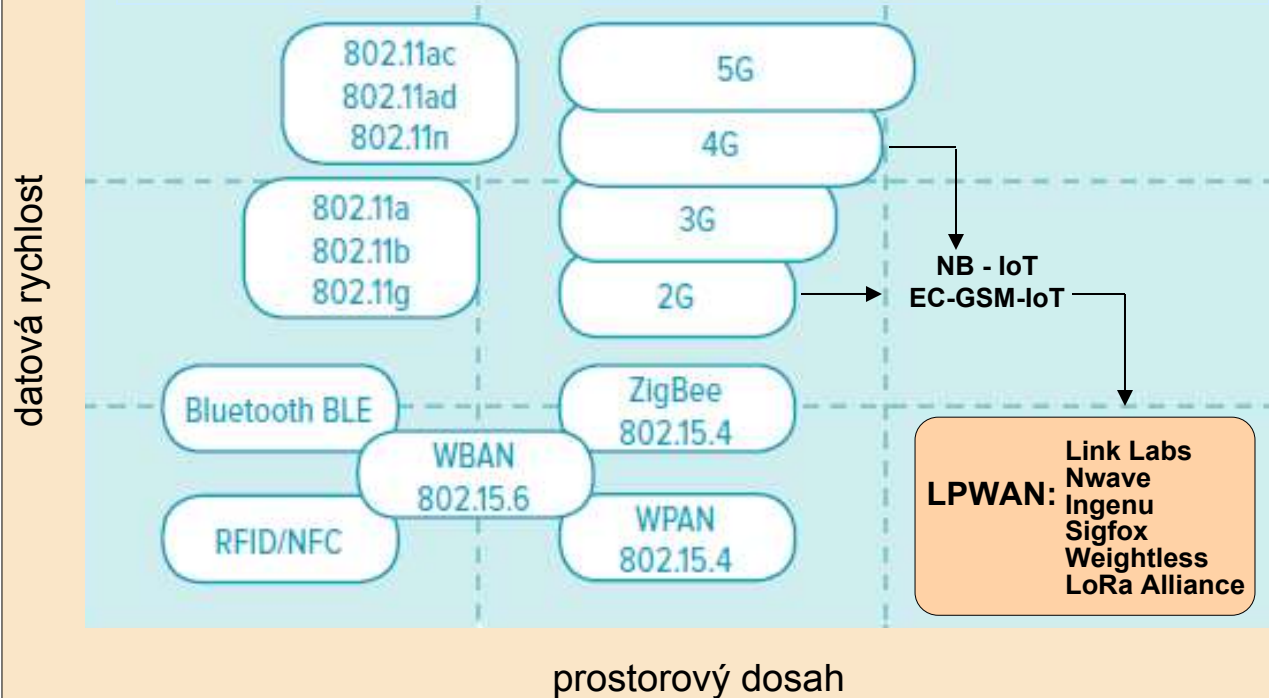
určené pro Internet věci

9

Proprietární systémy LP WAN určené pro Internet věcí IoT

Low Power Wide Area Networks

Začlenění systémů LPWAN mezi radiokomunikační prostředky používané v prostředí Internetu věcí IoT



Nejvíce soudobých standardů LPWAN využívá bezlicenční pásma ISM (Industrial, Scientific, Medical). Systémy Sigfox a Link Labs aplikují v USA ISM pásmo 900 MHz, v Evropě pásmo 868 MHz. Systémy LPWAN v Evropě využívají hlavně pásmo 2,4 GHz. V síti LPWAN se uplatňuje většinou topologie „star“ tj. hvězda (podobně jako např. u WiFi), kde koncové body komunikují přímo s přístupovým bodem.

- Technologie LPWAN se výborně hodí pro koncové terminály UT, které většinou vysílají po dlouhých pasívních intervalech malé objemy dat, často na velké vzdálenosti a při co nejmenší spotřebě napájecí energie.
- Vzdálenost mezi UT a základnovou stanicí LP WAN může být běžně až 10 km i více (chytrá města apod)
- Přenášená sdělení mají v průměru objem cca 20 až 256 bytů a opakují se někdy i několikrát za den, při čemž dostatečná datová rychlost je většinou pod 5 kbit/s.
- V některých aplikacích je požadovaná životnost baterií minimálně 5 až 10 let, k napájení koncových terminálů lze leckdy použít obnovitelné zdroje (solární, větrné, termické, vibrační atd).

Radiofrekvenční identifikace RFID

Radio Frequency Identification (RFID)

Radiofrekvenční identifikace RFID (Radiofrequency Identification) je automatická identifikační metoda založená na snímání a ukládání dat charakterizujících určitý fyzický objekt a jejich následném vyvolávání a případném dalším využití.

Typický RFID systém se skládá z transpondéru (tag), což je mikročip s anténou a z RFID čtečky (reader, interrogator), vybavené rovněž anténou. Mezi oběma bloky je vytvořeno obousměrné rádiové spojení. Mikročip transpondéru je připojen ke sledovanému objektu (výrobku, člověku, zvířeti ap), z něhož snímá identifikační informace, obvykle ve formě datového EPC kódu. Tyto informace jsou vysílány transpondérem na vhodnou frekvenci směrem ke čtečce. Ta konvertuje přijímané signály na původní digitální data a předává je k počítači pro další zpracování. Pasivní RFID transpondér získává napájecí příkon pro svůj mikročip z pole vytvářeného čtečkou (při jejich malých vzájemných vzdálenostech nejvýše desítky cm), aktivní transpondér je vybaven baterií, takže dosah spojení je větší. Svou funkcí je systém RFID s aktivním transpondérem vzdálenou analogií tzv. sekundárního radaru, u něhož je cíl vybaven aktivním odpovídačem. Ten na dopadající signál vysílače radaru reaguje nikoli jen pasivním odraženým signálem, nýbrž aktivně vysílá zpět k radaru zakódovaná data, jež ho identifikují.

Technologie RFID využívá bezlicenční pásma (ISM), avšak také pásma určená regulačními orgány ETSI, FCC atd. Aktuální jsou zejména následující pásma LF, HF, UHF a SHF:

- LF: 125 - 134,2 kHz.....vhodné pro logistiku, sledování objektů...
- HF: 13,56 MHzbezkontaktní platby, elektronické vstupenky...
- UHF: 860 - 960 MHz.....kontrola zavazadel, sledování financí...
- SHF: 2,45 GHz.....automatická identifikace vozidel...

První aplikací principů RFID byl vojenský systém "Friend or Foe", používaný za 2. světové války k rozlišení vlastních a nepřátelských letadel. V současnosti je počet aplikací technologie RFID doslova nepřehledný. Pro ilustraci lze připomenout podporu přepravy nejrůznějšího zboží, jeho kontrolu a oceňování, evidenci osob, identifikaci zvířat, a další.

Technologie LoRa a Sigfox, určené pro Internet věcí IoT

Technologie LoRa

LoRa (Long Range) je určena pro spojení na relativně velké vzdálenosti 15 až 30 km ve volném terénu a až 5 km v městském prostředí, při nízké energetické spotřebě. Používá se technika rozprostřeného spektra (frequency modulated chirp), se šířkami RF pásma 125 kHz nebo 250 kHz. Přenosové rychlosti se mohou měnit mezi 250 bit/s až 50 kbit/s.

Pro systém LoRa je v Evropě vyhrazeno pásmo 863 až 870 MHz (preferenčně 868 MHz). Na jeden přístupový bod může být připojeno až 1 milion koncových zařízení (devices).

LoRa zajišťuje věrné obousměrné spojení (FDD) a proto se uplatňuje např. v chytrých elektrorozvodných sítích, v chytrých domech a městech, nadějně jsou aplikace v zemědělství apod.

Technologie Sigfox

je výrazně úzkopásmová, takže je vhodná pro aplikace, v nichž se občasně vysílají z koncových zařízení (devices) velmi pomalu krátká sdělení (12 bytů) a to v celkovém počtu až 140 sdělení na jeden objekt za jediný den. Dosah systému je 30 až 50 km ve volném terénu a až 10 km ve městech. Komunikace je sice obousměrná, avšak trasa DL má omezenou kapacitu.

Vysílací výkon koncových zařízení je 20 dBm (tj. 100 mW), využívá se modulace DBPSK, zaručující velkou energetickou účinnost. K přenosu jsou určena bezlicenční pásma 868 nebo 915 MHz. Pro zvýšení spolehlivosti přenosu jsou data vysílána třikrát na třech různých frekvencích a přijímána více základnovými stanicemi v okolí, vybavenými účinnými anténními systémy, umístěnými na věžích apod.

K hlavním aplikacím Sigfox náleží poplachové (alarm) systémy, parkovací systémy, měřiče odběru vody, elektřiny, monitoring domácností a životního prostředí a další aplikace z oblasti Industry 4.0, smart city apod.

Některé komplexní aplikace Internetu věcí IoT

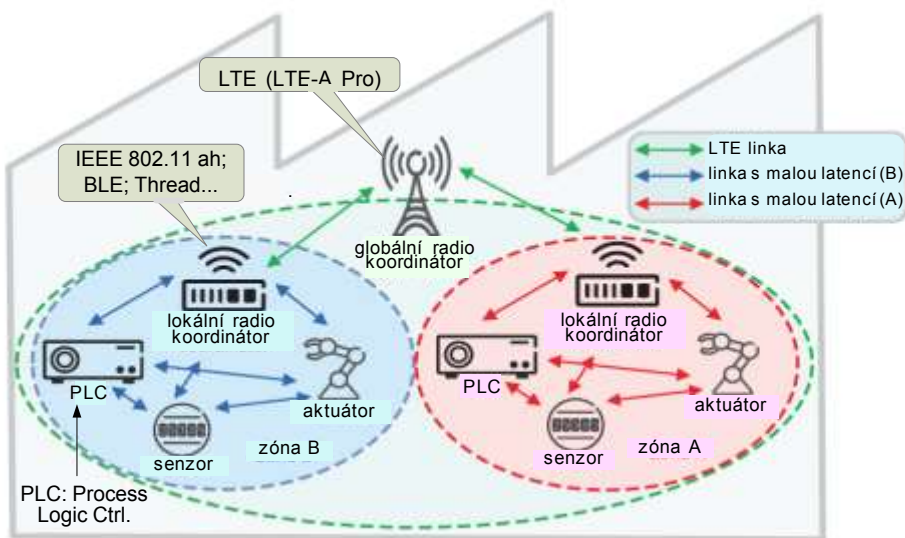
Rádiová komunikace pro průmyslovou automatizaci Industry 4.0

Fenomén Industry 4.0 je specifikován nástupem kolaborativních smart robotů („kobotů“), vyžadujících nový typ koordinované průmyslové komunikace-zvláště komunikace rádiové. Na obrázku je znázorněna bezdrátová komunikační architektura v automatizovaném výrobním podniku (Industry 4.0) podle projektu Kol [1]. K realizaci logického oddělení nových kritických funkcionalit od generických, se využívá dvouvrstvá architektura, v praxi však mohou být tyto funkce základní management rozsáhlé.

[1] Research project Koordinierte Industriekommunikation (Kol) supported by the Federal Ministry of Education and Research of Germany, 01/2015–06/2017

LTE jako řízení manažerské jako jsou měřítka.

V druhé vrstvě lokální radio koordinátory operují v menších oblastech, a proto využívají systémy krátkého dosahu (IEEE 802.11ah, Bluetooth LE a další). Přitom pracují v mnohem granulárnějším časovém měřítku, což podporuje přenos s nízkou latencí a vysokou spolehlivostí (mission critical application). Lokální koordinátory využívají buď centralizovaný mód – se spojenou uživatelskou a kontrolní rovinou, nebo asistovaný mód přímého spojení D2D, kde jsou obě roviny separovány a oba koncové terminály spolu komunikují přímo, bez spoluúčasti sítě.



Höfeld B.: Wireless Com. for Industry Automation...IEEE Com. Mag, June 2016

Robot je stroj pracující s určitou mírou samostatnosti, vykonávající určené úkoly, a to předem určeným způsobem a při různých mírách potřeby interakce s okolním světem. Pro lidi pouze pracuje, bez vzájemného dialogu.

Kobot je kolaborativní robot s vyšší mírou umělé inteligence, která usnadňuje jeho programování a podporuje jeho spolupráci s jinými koboty i lidmi. Programování kobotů lze často nahradit intuitivním napodobováním činnosti lidské obsluhy apod.

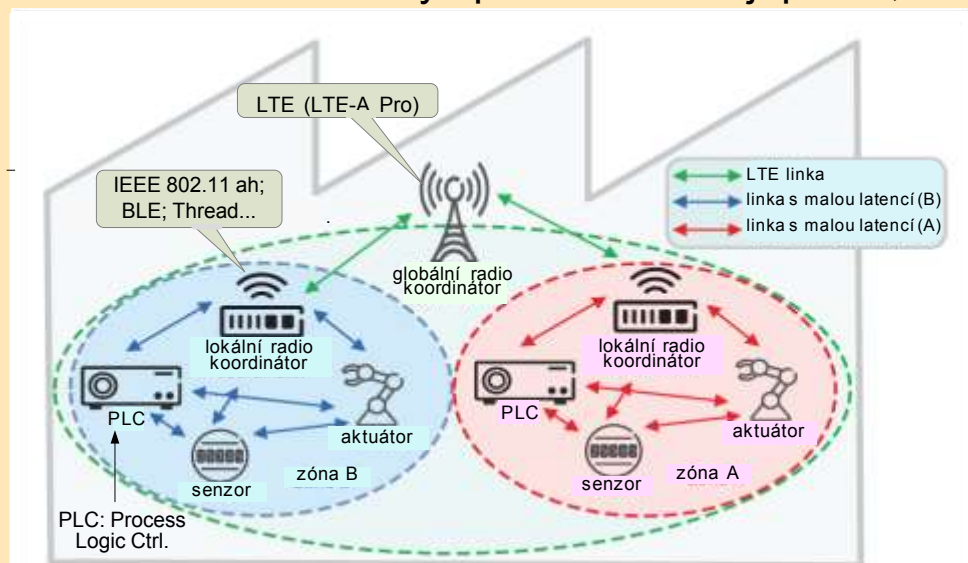
[1] Research project Koordinierte Industriekommunikation (Kol) supported by the Federal Ministry of Education and Research of Germany, (01/2015–06/2017); <http://www.koiprojekt.de>

[2] Höfeld B. et al.: Wireless Communication for Industry Automation...IEEE Com. Magazine, June 2016, pp. 36-43.

[3] Žalud V.: Rádiová komunikace v Internetu věcí pro průmyslovou automatizaci. Automa č. 1, 2017, s. 54 – 55.

Rádiová komunikace pro průmyslovou automatizaci Industry 4.0

Fenomén Industry 4.0 je specifikován nástupem kolaborativních smart robotů („kobotů“), vyžadujících nový typ koordinované průmyslové komunikace-zvláště komunikace rádiové. Na obrázku je znázorněna bezdrátová komunikační architektura v automatizovaném výrobním podniku (Industry 4.0) podle projektu Kol [1]. K realizaci logického oddělení nových kritických funkcionalit od generických, se využívá dvouvrstvá architektura, v praxi však mohou být tyto funkcionality integrovány do jediné entity. V první vrstvě se aplikuje celoplošný systém LTE jako základní komunikační technologie pro řízení přístupu, koordinaci zdrojů a interferenční management mezi různými buňkami. Tento systém operuje v relativně velkých lokalitách jako jsou rozsáhlé průmyslové podniky ap, a realizuje funkcionality spadající do delšího časového měřítka. V druhé vrstvě lokální radio koordinátory operují v menších oblastech, a proto využívají systémy krátkého dosahu (IEEE 802.11ah, Bluetooth LE a další). Přitom pracují v mnohem granulárnějším časovém měřítku, což podporuje přenos s nízkou latencí a vysokou spolehlivostí (mission critical application). Lokální koordinátory využívají buď centralizovaný mód – se spojenou uživatelskou a kontrolní rovinou, nebo asistovaný mód přímého spojení D2D, kde jsou obě roviny separovány a oba koncové terminály spolu komunikují přímo, bez spoluúčasti sítě.



Höfeld B.: Wireless Com. for Industry Automation...IEEE Com. Mag, June 2016

Robot je stroj pracující s určitou mírou samostatnosti, vykonávající určené úkoly, a to předem určeným způsobem a při různých mírách potřeby interakce s okolním světem. Pro lidi pouze pracuje, bez vzájemného dialogu.

Kobot je kolaborativní robot s vyšší mírou umělé inteligence, která usnadňuje jeho programování a podporuje jeho spolupráci s jinými koboty i lidmi. Programování kobotů lze často nahradit intuitivním napodobováním činnosti lidské obsluhy apod.

[1] Research project **Koordinierte Industriekommunikation (Kol)** supported by the Federal Ministry of Education and Research of Germany, (01/2015–06/2017); <http://www.koiprojekt.de>

[2] Höfeld B. et al.: Wireless Communication for Industry Automation...IEEE Com. Magazine, June 2016, pp. 36-43.

[3] Žalud V.: Rádiová komunikace v Internetu věcí pro průmyslovou automatizaci. Automa č. 1, 2017, s. 54 – 55.

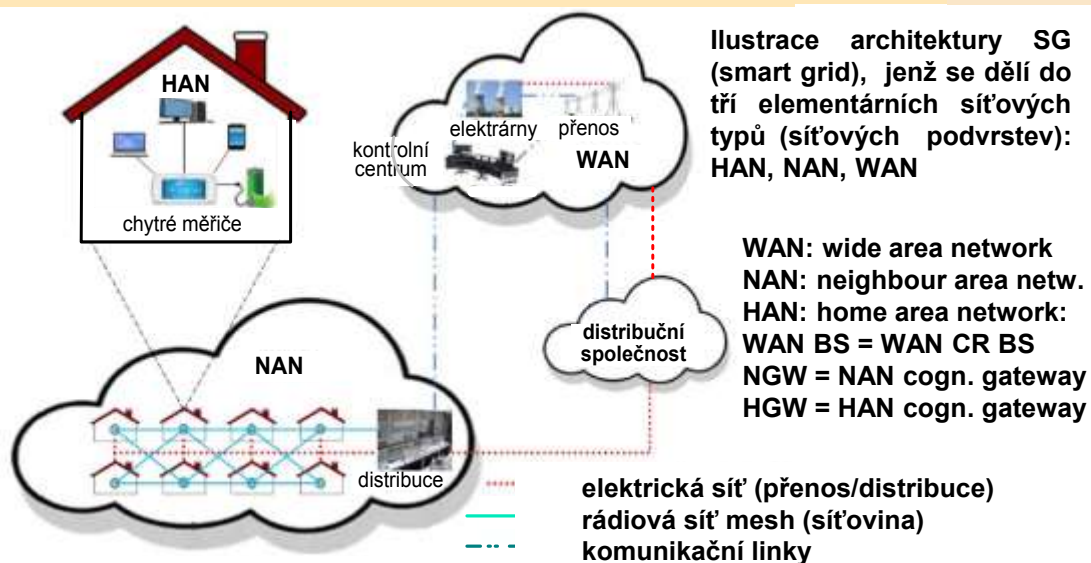
Příklad konkrétní aplikace IoT - V2I: Autonomní řízení automobilu



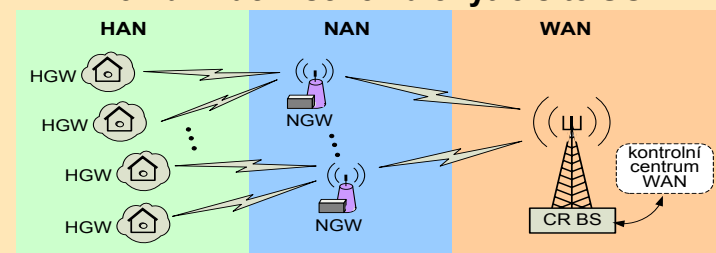
The seat in the autonomous car is in the relax mode on the way home from work.

Internet věcí IoT v chytrých elektrorozvodných sítích SG (smart grid)

Chytrá síť SG (Smart Grid) je elektrická rozvodná soustava, jež inteligentně spojuje funkce všech subjektů k ní připojených - tedy zdrojů elektrické energie, přenosové a distribuční sítě a koncových konzumentů. K tomu užívá pokročilé metody snímání, měření, řízení a nejnovější telekomunikační technologie. To vše zajišťuje udržitelnou, ekonomickou a bezpečnou dodávku elektrické energie.



komunikační schéma chytré sítě SG



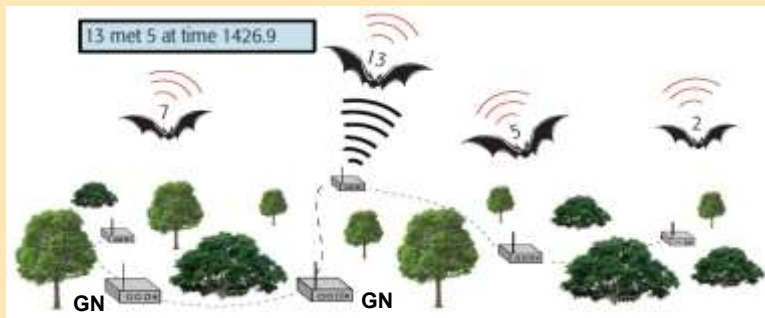
Na rozdíl od klasické rozvodné sítě je funkce SG komplikovaná, neboť se mohutně zvýšil počet zdrojů elektrické energie. Objevily se velké atomové elektrárny a po r. 2000 velké i malé větrné a solární elektrárny, jež se většinou stávají součástí této komplexní – již internacionální rozvodné soustavy. Jejich velice složitý management může výrazně podpořit právě Internet věcí.

Architektura chytrých rozvodných sítí (SG) je složena ze tří vrstev: HAN, NAN, WAN. Jejich konektivitu realizují různé telekomunikační technologie, využívající buď metalické či optické sítě (SDL, PLC, RoF), nebo sítě rádiové - ať již veřejné (Bluetooth, WiFi, LTE,), či proprietární (6LoWPAN...). Rádiové sítě významně podporuje technika kognitivního rádia CR, užívající „bílé místa“ v TV licencovaných pásmech k bezkonfliktnímu sdílení s nelicencovanými uživateli za sféry IoT (viz např. výše standard WRAN)

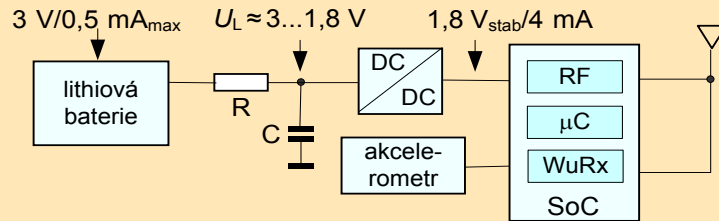
Standard/Protokol	přenosová rychlost r	maximální dosah d	vhodné aplikace	frekvenční pásma
Z-wave	40 kbit/s	do 30 m	HAN	bezlicenční
Bluetooth 802.15.1	720 kbit/s	do 100 m	HAN, NAN	bezlicenční
ZigBee	250 kbit/s	do 100 m	HAN, AMI	bezlicenční
WiFi 802.11x (WiFi)	až 600 Mbit/s	do 100 m	HAN, NAN, AMI	bezlicenční
WiMAX 802.16	až 75 Mbit/s	do 50 km	HAN, AMI	obojí
buňkový 2G	až 14,4 kbit/s	do 50 km*	HAN, NAN, AMI	licencované
buňkový 4G	až 100 Mbit/s	do 30 km*	HAN, NAN, AMI	licencované
satelitní internet	až 1 Mbit/s	až 6000 km	WAN	licencované
IEEE 802.22 WRAN	až 18 Mbit/s	30 až 100 km	HAN;NAN;WAN;AMI	obojí
DSL (digit. telefon)	1,5-100 Mb/s [†]	(závisí na r)	HAN;NAN;WAN;AMI	licencované
PLC (silnopr. síť)	0,02-100 Mbit/s [†]	(závisí na r)	HAN;NAN;AMI	dedikovaná
optické spoje	řádu gigabit/s [†]	(závisí na r)	NAN;WAN	licencované

[1] Khan, A.: Cog Radio for Smart.. IEEE COM. SURV. & TUTOR, 1/2016
 [2] Žalud V.: Kognit rádio pro Smart Grid. Energetika č. 1, 2017, str. 38

Rádiové senzorové sítě (IoT) pro sledování drobných živočichů



System pro sledování více létajících netopýrů s vysokým rozlišením, koncipovaný na bázi rádiových senzorových sítí WSN, které mají extrémně nízkou energetickou spotřebu. Stacionární pozemní uzly GN (Ground Nodes) užívají komerční transceivery. Mobilní stanice MS nesená netopýrem má hmotnost 1g, hmotnost lithiové baterie je též 1g. Celková hmotnost této aparatury je tedy 2g, což je zhruba 10% hmotnosti průměrného netopýra (20g).



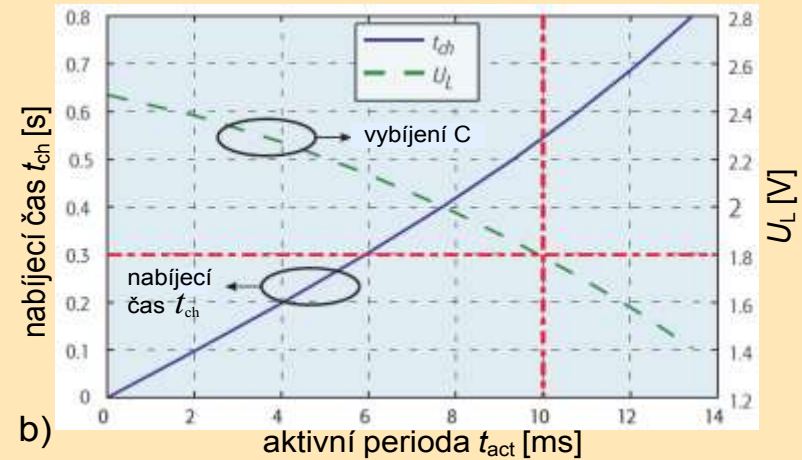
Transceiver nesený netopýrem (váha 1g)

RF: rádiový modul (vysílač Tx - přijímač Rx)

μ C: mikrokontroler

WuRx: Wake – up receiver

a) SoC: System on Chip (transceiver)



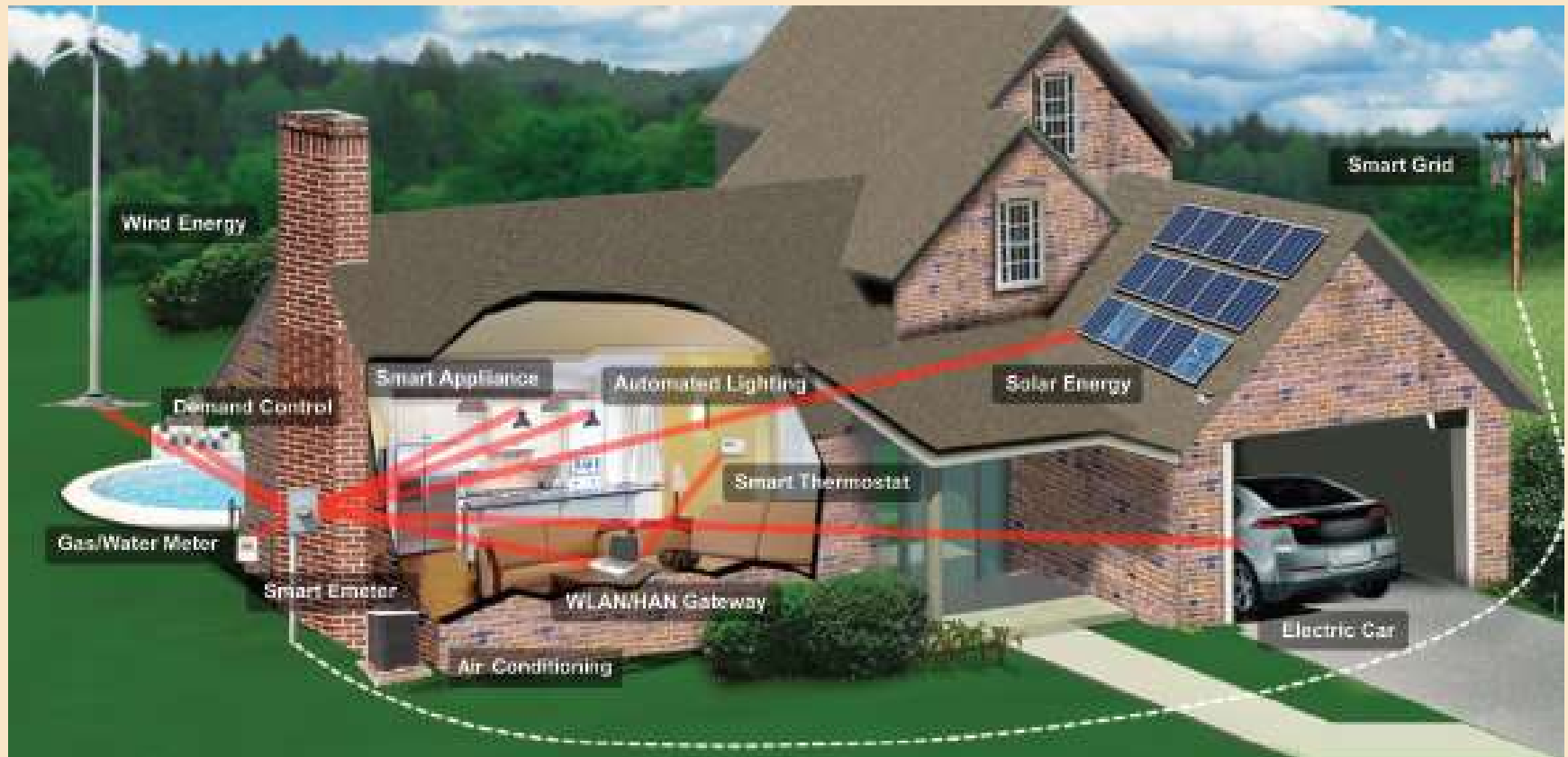
Za účelem snížení výkonové spotřeby systém pracuje s pravidelným střídáním krátkých pracovních period – kdy elektronika provádí požadované funkce a má tedy zvýšený odběr energie – s periodami „spánku“ s velmi malým odběrem. Odběr transceiveru je cca 5 mA, avšak použitá lithiová baterie s napětím cca 3 V je schopná trvale dodávat jen proud cca 0,5 mA. Uvedený problém řeší **cyklický pracovní režim**. Během pasívních period s malým odběrem nabíjí baterie přes odpor R nárazníkový (buffer) kapacitor C. V aktivních periodách kapacitor C napájí blok SoC a tím se vybití. Jeho klesající napětí je transformováno na potřebnou konstantní hodnotu 1,8 V ve spínaném konvertoru DC/DC (se stabilizací výstupního napětí). Mobilní modul obsahuje i akcelerometr k detekci pohybu sledovaných netopýrů.

[1] Žalud, V.: Rádiové senzorové sítě. Časopis Elektro. č. 2/2017, str. 44 - 46

[2] DRESSLER, F.: From Radio Telemetry to Ultra-Low... IEEE Comm. Mag., Jan. 2016.

Aplikace Internetu věcí v chytrém domě

The introduction of electric smart plugs, in-home displays, smart thermostats has given consumers a choice on which household devices they want to monitor. Simply plug the appliance into the smart plug and add it to the home network. Through ZigBee or Wi-Fi the user can then connect to the Internet to get information through a home gateway or allow direct connection via cloud connectivity with a smartphone or tablet. Consumers are adopting smart plugs more quickly than high-end appliances with smart technology, since they are lower cost and allow retrofitting of existing appliances. [Texas Instruments White Paper-IOT]



Závěr: význam Internetu věcí v současné společnosti

Internet věcí IoT začíná hrát již dnes významnou úlohu v našem osobním životě i v životě celé společnosti, především pak v prostředí chytrých měst SC (Smart City) a energetiky SG (Smart Grid), zdravotní péče IoMT (Internet of Medical Things), dopravy (Fleet Management and Connected Car), automatizovaného průmyslu (Industry 4.0), a v řadě dalších důležitých oborů. V jeho architektuře je nutná kooperace nejrůznějších prostředků rádiové komunikace, která tedy s nástupem IoT nabývá značně na svém významu.

Vzhledem k tomu, že v poslední době již i naši nejvyšší státní představitelé považují např. rozvoj průmyslu formou Industry 4.0 za jednu z nejdůležitějších domácích priorit (viz například nedávná návštěva prezidenta republiky a premiéra v Centru informatiky, robotiky a kybernetiky ČVUT, ale i návštěva německé kancléřky v loňském roce tamtéž), je zřejmé, že problematice IoT bude nezbytné také ve sféře vzdělávání – včetně vzdělávání celoživotního – věnovat velkou pozornost. A proto by měl být fenomén IoT výrazně sledován a posílen i na příštích konferencích RK.

Děkuji za pozornost!

Václav Žalud

9