

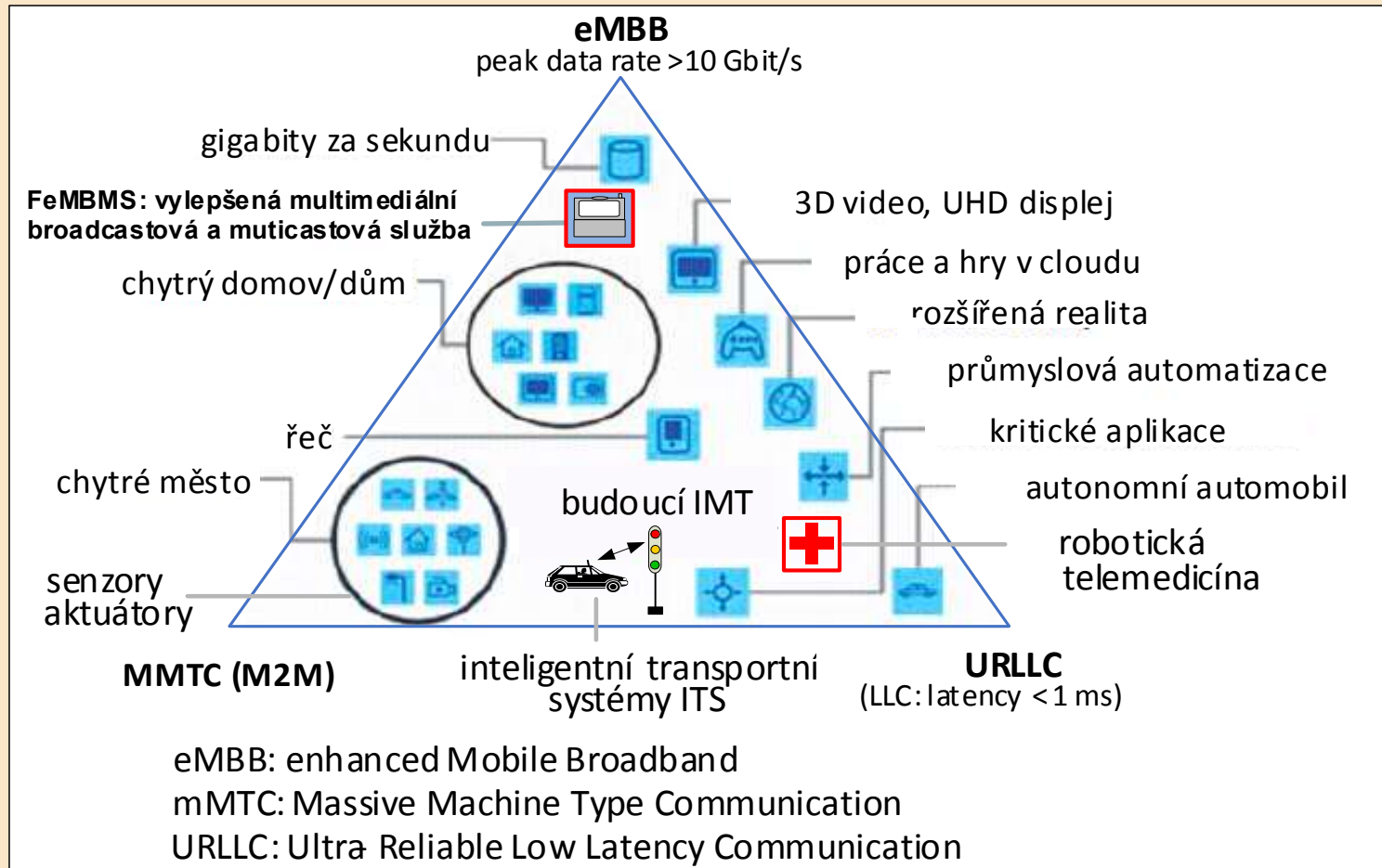


Systemy 5G s vysokou spolehlivostí URC

Doc. Ing. Václav Žalud, CSc

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

Ultraspolehlivá komunikace URRC v sítích 5G

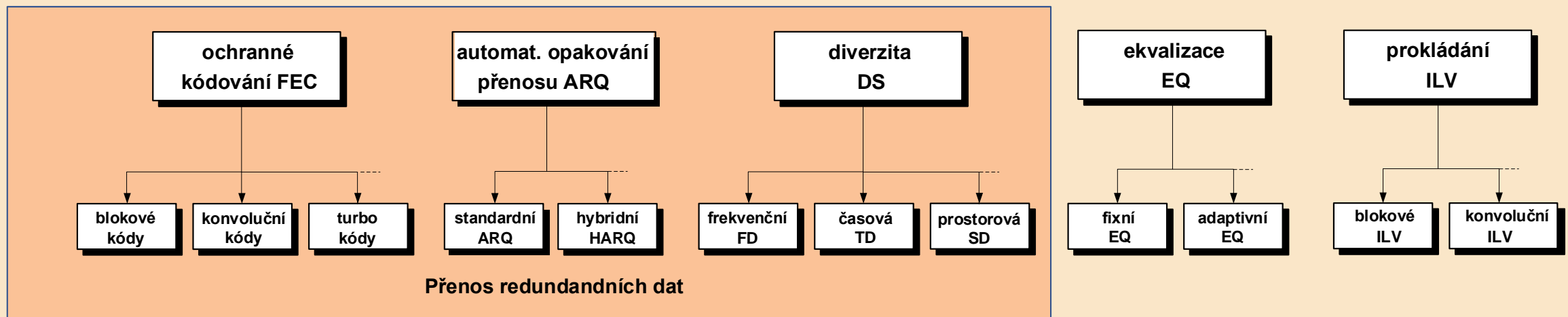


Definition 1: Reliable communication from an end-user perspective can be explained as having perfect connectivity to the network at anywhere and anytime

Definition 2: Reliability is the probability that a certain amount of data from one peer is successfully transmitted to another peer within a given deadline or time frame

Hlavní způsoby ochrany rádiového přenosu proti rušivým efektům v rádiovém kanálu

Klasické způsoby 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.

Pět základních příčin nespolehlivého přenosu v rádiové síti systému 5G URC

Komunikaci s velmi vysokou spolehlivostí URC v systémech 5G ohrožuje pět typů poruch RI (Reliability Impairments):

1. Zmenšený výkon užitečného signálu (Decreased power of the useful signal)

Spolehlivost komunikace URC ohrožují základní rušivé mechanismy šíření vln v pozemských kanálech, jako je únik (fading) a zastínění. Tomu lze čelit hlavně vhodnou volbou typu modulace a kanálového kódování MTC (Modulation Coding Technology), které mohou být odlišné pro vlastní data a pro metadata (tj. pro rámcovou synchronizační sekvenci, preamble). Volba MTC musí být optimalizována pro krátké kódové bloky, jež jsou pro RC typické. V některých scénářích se mohou uplatnit techniky nekoherentní komunikace.

2. Nekontrolovatelné interference (Uncontrollable interference)

Bezlicenční pásma pro 5G jsou sice levná, avšak působí v nich četné interference. Ty se ale mohou objevit i v licencovaných pásmech, zejména v prostředí malých mikro a femto buněk a při přímé komunikaci terminálů D2D.

3. Vyprázdnění zdrojů vlivem konkurence (Resource depletion due to competition)

V některých aplikacích vzniká situace, kdy si více koncových terminálů konkuruje ve snaze získat pro sebe rádiové zdroje z jejich omezené množiny (tato situace nastává např. při komunikaci D2D apod.). Tuto slabinu eliminuje např. technika postupného odstranění interferencí SIC (Self Interference Cancellation apod).

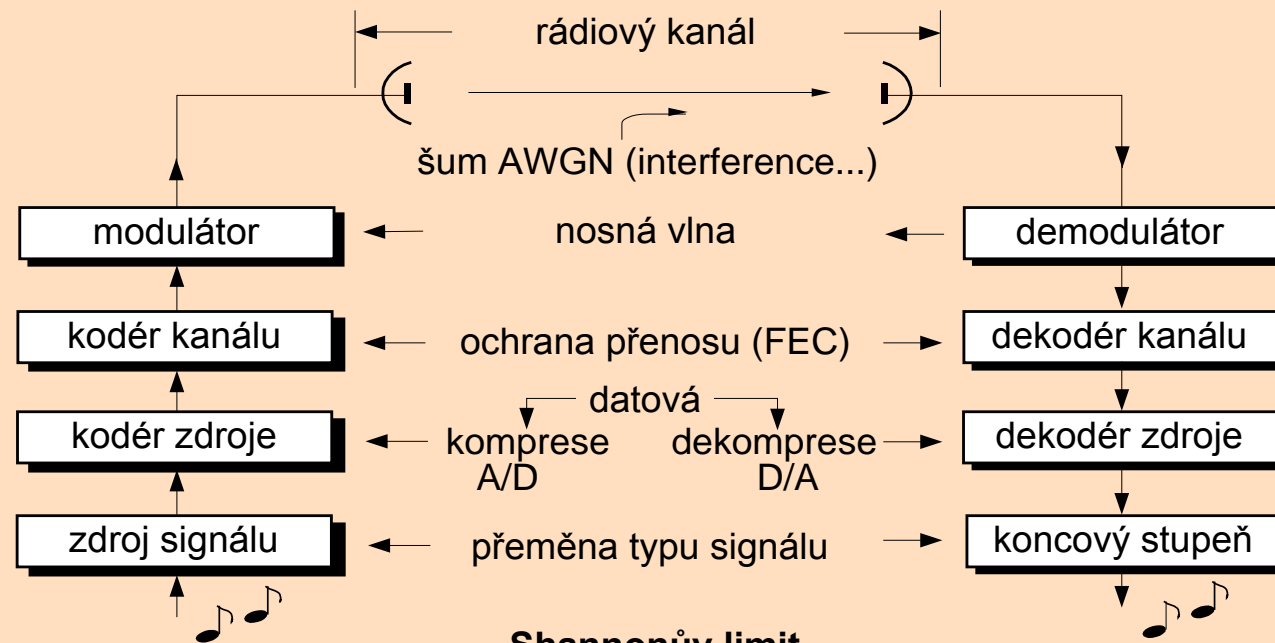
4. Malá adaptabilita komunikačních protokolů ke komunikaci URC (Communication protocol reliability mismatch)

Při vytváření koncepcí komunikačních protokolů sítí 4G, 3G ...se nebraly v úvahu přísné požadavky komunikace 5G URC, takže tyto protokoly se nedokáží na nové úkoly adaptovat; rychlý vývoj v této oblasti však uvedený handicap postupně odstraňuje.

5. Poruchovost infrastruktury systému URC (Equipment failure)

I když je kompletní infrastruktura systému URC realizována ze součástí s velmi vysokou spolehlivostí, její poruchy během provozu nelze nikdy vyloučit, a to hlavně v důsledku nestandardních pracovních podmínek (přírodní katastrofy, sabotáže ap).

Obecné Shannonovo schéma radiokomunikačního systému



Shannonův limit
 $E_b/N_0 = -1,6 \text{ dB}$

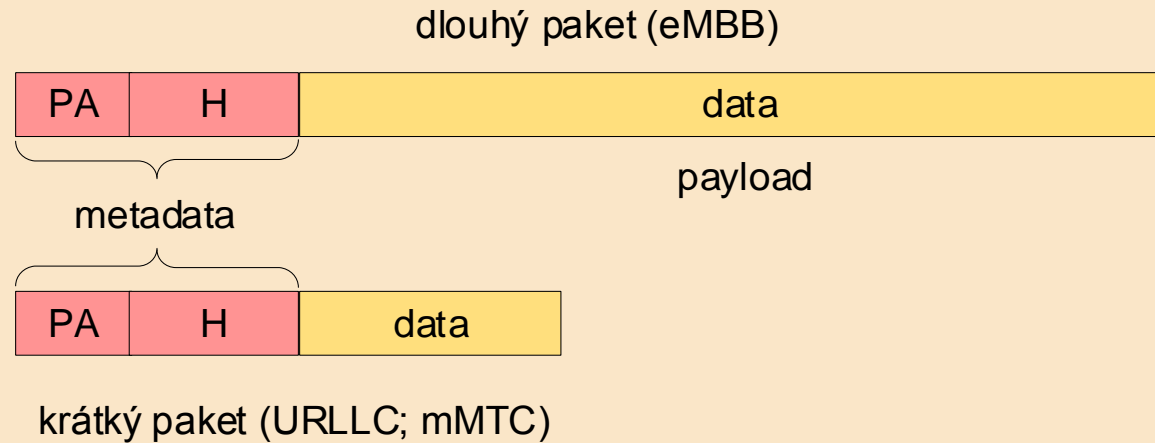
Maximální dosažitelná kapacita C_0 rádiového kanálu, při působení šumu AWGN:

$$C_0 = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) = B \log_2 \left(1 + \frac{f_b E_b}{B N_0} \right) = B \log_2 \left(1 + \eta_s \frac{E_b}{N_0} \right) \text{ [bit/s]}$$

C_0 - kapacita kanálu; B - šířka rádiového pásma; S - výkon signálu (užitečného); N - výkon šumu;
 f_b - bitová rychlost signálu; E_b - energie signálu na 1 bit; N_0 - výkonová spektrální hustota šumu;
 $\eta_s = f_b/B$ - spektrální účinnost přenosu

Pokud je skutečná bitová rychlost přenosu R nižší, než hodnota C_0 , je možné vždy nalézt takový ochranný kód, při němž bitová chybovost BER (Bit Error Rate) limituje k nule. Tento kód musí používat kódové bloky (slova) blížící se svou délkou k nekonečnu.

Problémy kanálového kódování v radiokomunikačních sítích URC s paketovým přenosem



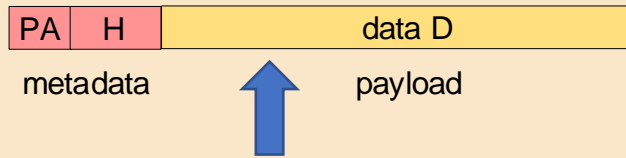
Sítě 4G/5G jsou založeny na technice přenosu s přepojováním paketů PS (Packet Switching). Ta nabízí v porovnání se starším přepojováním okruhů CS (Circuit Switching) podstatně vyšší efektivitu ve využití rádiových kanálů, kompatibilitu s Internetem a další přednosti. U paketových systémů se typický paket skládá z preamble PA (PreAmble) a ze záhlaví H (Header), obsahujících tzv. metadata, za nimiž následuje datový úsek D (payload). U dlouhých paketů je délka tohoto úseku mnohem větší, než délka metadata, tj. $D \gg PA+H$ a díky tomu na ně lze aplikovat klasickou Shannonovu teorii (*Shannon showed that it is possible to send a message reliably by using many unreliable carriers of information, as long as the number of messages is lower than what is dictated by the channel capacity*).

Při komunikaci URLLC a mMTC v sítích 5G NR je účinné kanálové kódování složitější. V tomto módu se většinou přenášejí krátká sdělení s nízkou bitovou rychlostí (< 500 bit/s) a se silnou ochranou přenosu. Pro přenos jsou zde proto vhodné krátké pakety. Avšak u těch platí relace $D \approx PA+H$, takže zátěž metadata je velká a propustnost omezená (výrazně suboptimální). Kromě toho se krátké pakety nemohou přiblížit k Shannonovým požadavkům na bezchybný přenos. V těchto aplikacích jsou potom nevhodné nejen turbo kódy, nýbrž i kódy LDPC.

Slibným řešením zde jsou polární kódy PC, představující novou třídu lineárních blokových kódů, které řeší problematiku ochranného kanálového kódování neortodoxním způsobem.

Problémy kanálového kódování v radiokomunikačních sítích URC s paketovým přenosem

Dlouhé pakety: $D \gg PA+H$ (eMBB)

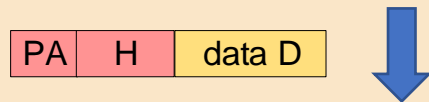


A Mathematical Theory of Communication

By C. E. SHANNON

Reprinted with corrections from *The Bell System Technical Journal*,
Vol. 27, pp. 379–423, 623–656, July, October, 1948.

Krátké pakety: $D \approx PA+H$ (mMTC, URLLC)



July, 2018



Huawei Technologies Co. Ltd., has presented a special award to Turkish professor Dr. Erdal Arıkan, the inventor of polar codes for 5G. "As engineers," Arıkan said in his acceptance speech, "there is no greater reward than seeing our ideas turn into reality."

Základní výsledek Shannonovy teorie: u radiokomunikačního kanálu s omezenou šířkou pásma a při působení šumu AWGN, v případě přenosu velmi dlouhých paketů, kdy $D \gg PA+H$, vždy existuje takový ochranný kanálový kód, dovolující s velmi vysokou pravděpodobností dokonalou rekonstrukci uživatelských dat D .

V praxi mají používané kódy omezenou délku, avšak i ty se neustále zdokonalují, takže již existují jejich varianty schopné snížit chybovost přenosu na úroveň, jež je přijatelná pro danou konkrétní aplikaci.

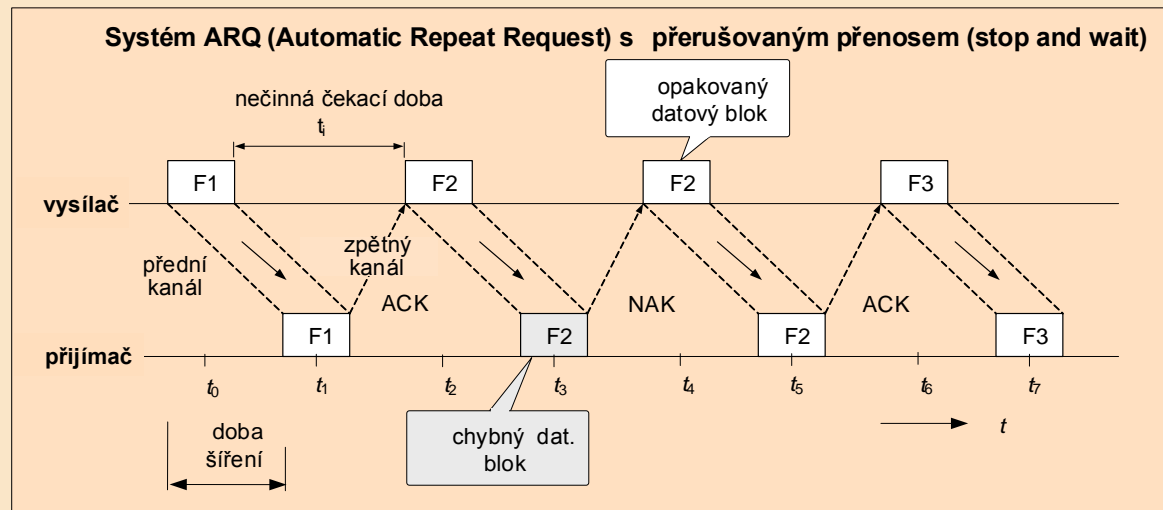
Notice: In long packets communication both the thermal noise and the distortions introduced by the propagation channel are averaged out due to the law of large numbers; however, when n is small (short packets) such averaging cannot occur.

V rádiovém kanálu při přenosu krátkých paketů Shannonovu teorii není možné použít (*v tomto případě nelze aplikovat zákon velkých čísel*). V nedávných letech však bylo dosaženo v problematice kanálového kódování velkého pokroku. Klíčový je zejména objev polárních kódů (PC) které jsou schopné zajistit velmi spolehlivý přenos krátkých paketů, a to cestou nových velice efektivních komunikačních protokolů. Tak např. při mnohoživatelské komunikaci na trase DL (P2MP), je možné optimální volbou délky paketů a kódové rychlosti dosáhnout vysoké spolehlivosti přenosu krátkých paketů, i když za cenu mírného zvětšení objemu přenášených dat.

Prof. Arıkan published a basic paper on polar codes in 2008. Huawei invested in his research and built on his original findings to help bring polar codes from the lab to industrial application. Polar codes are now a part of 5G standards

Bioglio V, et al.: Design of Polar Codes in 5G New Radio. arXiv:1804.04389v2 [cs.IT] 9 Jan 2019

Systemy automatického opakování přenosu ARQ a HARQ v sítích 5G

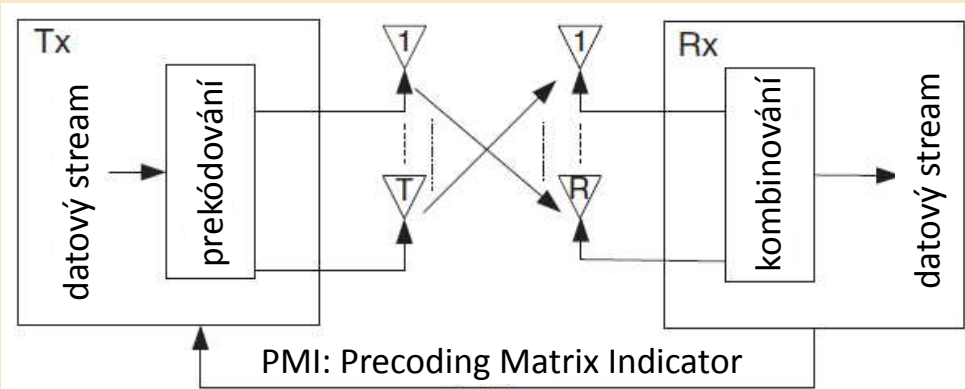


System ARQ: V systému ARQ vysílač vysílá data v blocích, doplněných detekčním kódem (CRC). Nepřesáhne-li při prvním vysílání daného bloku v přijatém bloku bitová chybovost BER stanovený horní limit, přijímač to sdělí zpětným kanálem formou potvrzení ACK (Acknowledgement) vysílači a tento blok postupuje k dalšímu zpracování. V opačném případě přijímač požádá negativním potvrzením NACK vysílače o opakovaný přenos (retransmission) uvedeného chybného bloku. Tento proces se může opakovat až do té doby, než chybovost přijatého bloku klesne pod daný limit. Poté vysílač začne vysílat další blok.

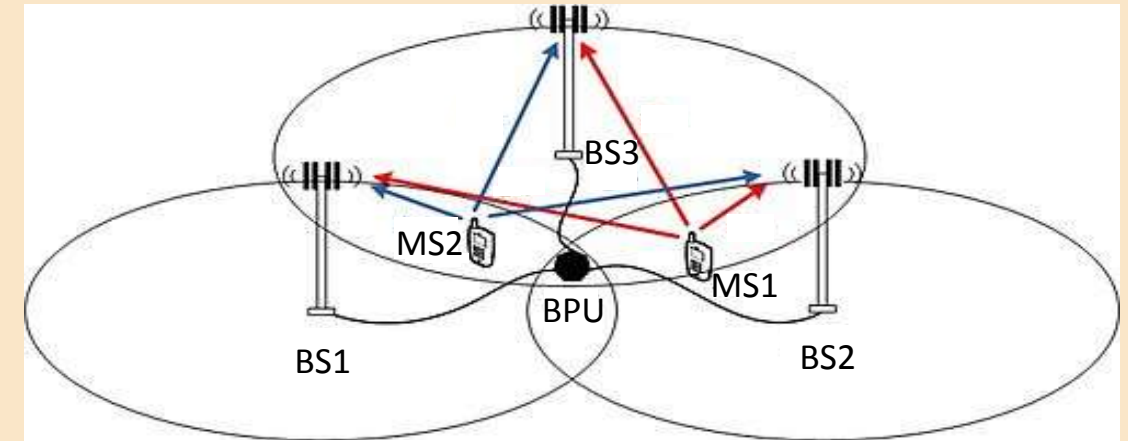
System HARQ: Zdokonalená varianta zvaná hybridní HARQ, kombinuje techniku ARQ s kódováním FEC s měkkým rozhodováním, jež se při dalších opakováních přitvrzuje. Díky tomu se počet opakování v porovnání s ARQ zmenšuje a tím je celý proces urychlován.

Původní technika HARQ se neustále zdokonaluje a směřuje k větší flexibilitě. Zavádějí se do ní např. perspektivní koncepce agregovaného nebo slepého opakovaného vysílání (aggregated retransmission or blind retransmission) a další progresivní algoritmy. Díky tomu je již vhodná i pro náročnou komunikaci 5G URLLC. Opakované přenosy však zvětšují latenci, takže se HARQ pro aplikace LLC nehodí.

Prostorová mikrodiverzita a makrodiverzita v systémech 5G



Mikrodiverzita typu TxR: za předpokladu nezávislých únikových kanálů mezi různými anténami Tx/Rx lze dosáhnout vysokého diverzitního zisku, a tedy velkého zvýšení spolehlivosti



Typická mnohousatel'ská makrodiverzita na trase UL, se třemi BS a dvěma MS; všechny stanice BS jsou napojeny např. optickými spoji na backhaulovou procesní jednotku BPU (Backhaul Process Unit)

Prostorová mikrodiverzita (přijímací resp. vysílací resp. kombinovaná diverzita) spočívá v rádiovém přenosu téhož datového signálu, při němž buď vysílač, nebo přijímač, nebo obě strany mají dvě nebo více elementárních antén (MIMO), jejichž vzájemná vzdálenost odpovídá, nebo je poněkud větší, než délka vlny λ . Pro služby URLLC se preferuje diverzita typu 1x2 (přijímací), resp. 2x1 (vysílací), kde systém přenáší jediný anténní svazek (stream). Postupně se však přechází k diverzitním koncepcím vyšších řádů (2x2, 4x2, 4x4 atd).

Prostorová makrodiverzita využívá pro přenos jediného signálu rovněž několik vysílacích antén, jejichž vzdálenost je však mnohem větší, než délka vlny λ . U sítí buňkových nebo W LAN, se toho dosáhne umístěním vysílacích antén na různých základnových stanicích resp. přístupových bodech. Přijímací anténní systém určitého terminálu potom musí vhodně kombinovat signály přicházející od různých vysílačů (na maximum poměru SNR apod.).

Obě uvedené diverzitní techniky potlačují vliv úniků, interferencí a šumu a tím zvětšují spolehlivost rádiového přenosu, avšak na jeho kapacitu nemají prakticky přímý vliv.

Některé další technologie pro zvýšení spolehlivosti komunikace 5G URC

Automatické opakované vysílání

K nejstarším způsobům ochrany rádiového přenosu patří prosté opakované vysílání jednotlivých datových či kontrolních bitů, nebo jejich skupin, bez vyžádání příjemce. Na přijímací straně se přijatý signál vyhodnocuje na principech majoritní logiky (výskytu většiny). Tato koncepce je jednoduchá, neboť nevyžaduje zpětný kanál Rx – Tx ani další pomocné operace. Nevýhodou je znatelné - a někdy i zbytečné - prodlužování doby přenosu. V komunikaci URC však často nachází úspěšné uplatnění [2].

Kontrolní kanály s vysokou spolehlivostí (Enhanced control channel reliability)

Většina aplikací URLLC vyžaduje současně vysokou spolehlivost i nízkou latenci kontrolních kanálů, přenášejících informace ACK/NACK a další, která je vyšší než u datových kanálů. Tu lze zajistit několika moderními technikami, jako je asymetrická detekce ACK a NACK, opakování rozvrhovacích informací aj [2], [3].

Potlačení interferencí (Interference Mitigation)

Zvýšení spolehlivosti komunikace URC lze dosáhnout nejen zvýšením poměru SNR v přijímači, ale také potlačením interferencí. To lze realizovat např. formováním anténních svazků (Beam Forming). Interference od sousedních buněk výrazně snižuje metoda jejich koordinace ICIC (Inter-Cell Interference Coordination), účinná je i technika MMSE-IRC (Minimum Mean Square Error-Interference Rejection Combining) [2], [3].

Děkuji za pozornost!

Václav Žalud