

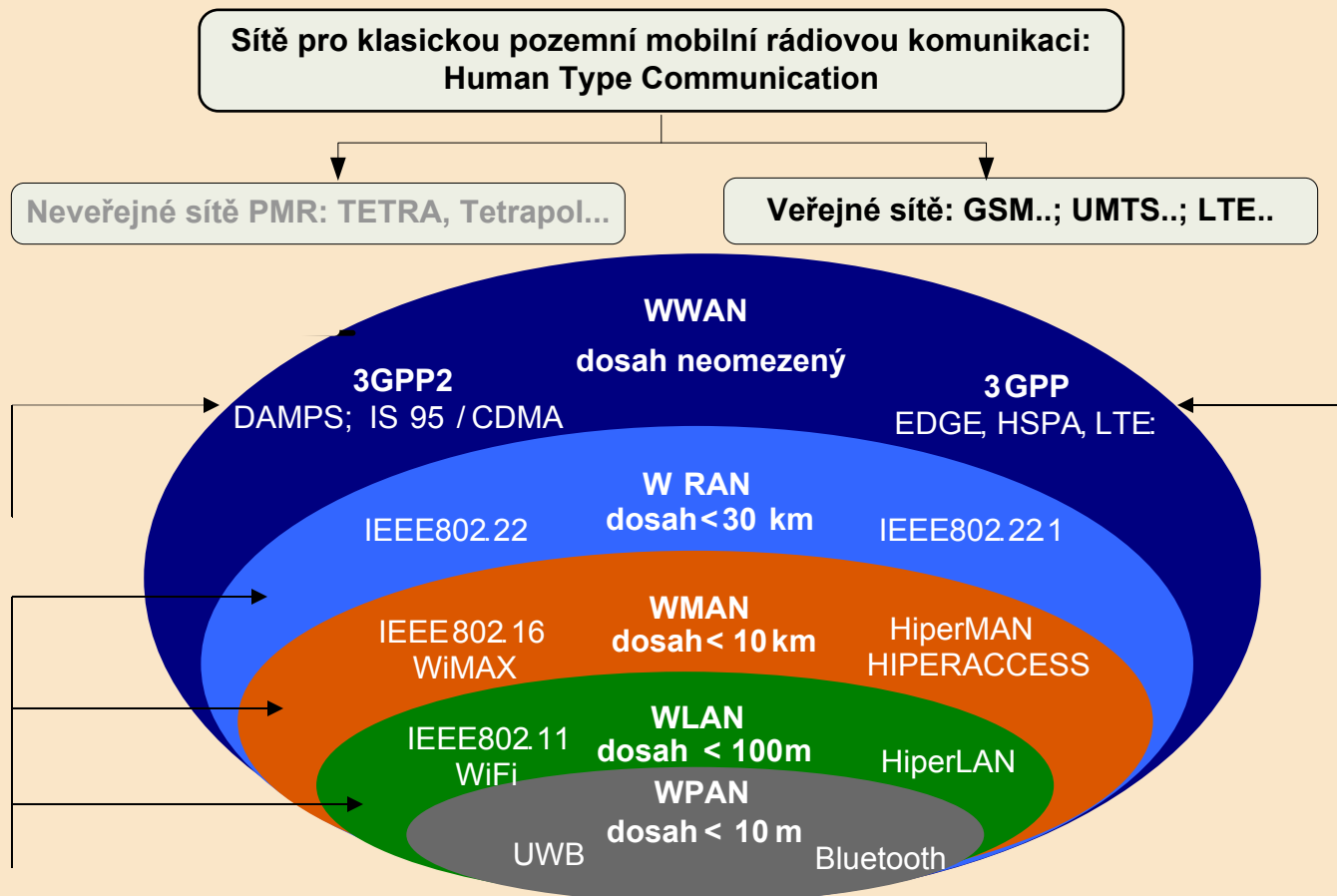
Rádiový regionální standard WRAN

IEEE 802.22

Doc. Ing. Václav Žalud, CSc

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

Klasické varianty standardů 3GPP a IEEE 802, určené pro aplikace HTC (MBB: Mobile Broadband)



IEEE: The Institute of Electric. and Electronics Engineers

3GPP: Third Generation Partnership Project

Zkratka	úplný název	standard	dosah	pásma	rychlosti
W-WAN	Wireless Wide Area Networks	GSM/HSPA/LTE	neomezený	0,5-5,5 GHz	9,6 kbit/s-1Gbit/s
W-RAN	Wireless Regional Area Networks	IEEE 802.22	až 100 km	54-862 MHz	1-10 Mbit/s
W-MAN	Wireless Metropolitan Area Networks	IEEE 802.16	až 10 km	2,5-3,5 GHz	1-70 Mbit/s
W-LAN	Wireless Local Area Networks	IEEE 802.11	až 1 km	2,4-5,8 GHz	11-7000 Mbit/s
W-PAN	Wireless Personal Area Networks	IEEE 802.15	až 100 m	2,4-GHz	1-Mbit/s
W-BAN	Wireless Body Area Networks	IEEE 802.15.6	až 1 m	402-405 MHz	50-500 kbit/s

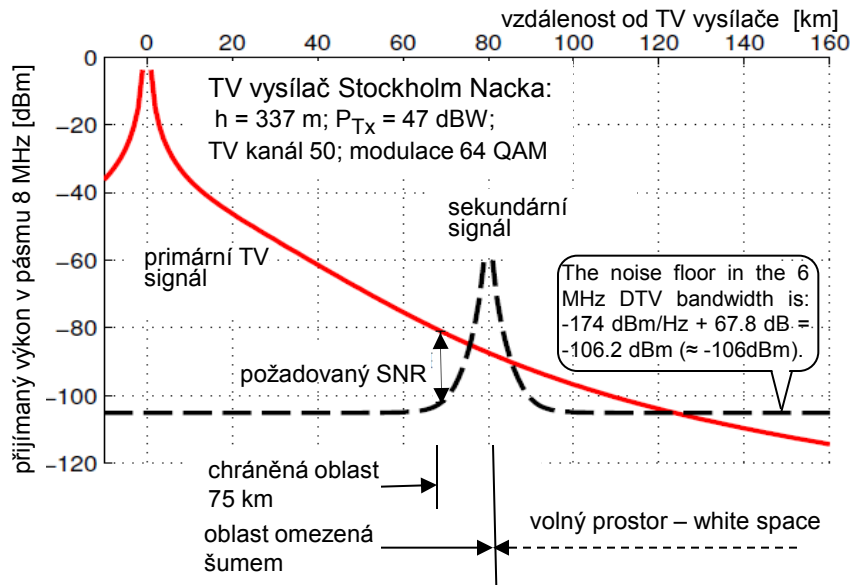
Standard IEEE 802.22 (WRAN): stručný přehled

- Standard IEEE 802.22, známý též jako WRAN (Wireless Regional Area Networks), je určen k pokrytí velkých venkovských oblastí s řídkým osídlením a rozvojových zemí, s využitím TV bílých prostor (WSTV = White Space TV, WSDB = White Space Digital Broadc.)
- Sdílení pásem WRAN s licenčními TV pásmy s nízkými frekvencemi řádu stovek MHz (47-910 MHz), se realizuje s využitím principů kognitivního rádia CSCR (Carrier Sense CR)
- Relativně nízké frekvence zaručují systému velmi dobré pokrytí určených lokalit, s minimem zastíněných prostor (útlum rádiové trasy roste s kvadrátem frekvence!)
- Standard má buňkovou strukturu, přičemž více buněk (zón) WRAN může koexistovat vedle sebe a využívat tytéž kanály (self-coexistence method), čímž se rozšiřuje pokrytí
- V každé buňce je centrální základnová stanice BS (Base Station), jež obsluhuje několik desítek až stovek provozních jednotek CPU (Customer Premise Unit), v konfiguraci PMP
- V prvních vydáních WRAN jsou jednotky CPU stacionární nebo přenosné, postupně zdokonalovaná vrstva PHY však umožní jejich mobilitu až asi do rychlosti 100 km/h.
- Na BS se pro Tx/Rx užívá všesměrová, nebo sektorizovaná anténa; na CPU lze pro Tx/Rx použít směrovou anténu, s předozadním poměrem 14 dB (kromě pohyblivých CPU)
- Kanály WRAN s šířkou pásma 6/7/8 MHz se shodují s TV kanály (47 k. v pásmu 280 MHz)
- Technikou mnohonásobného přístupu je ortogonální frekvenční multiplex OFDMA, s 2048 subnosnými vlnami, se vzájemnými odstupy 3,34... kHz a s různými modulacemi
- Modulace subnosných jsou QPSK, resp. 16 QAM resp. 64 QAM; jejich volba určuje maximální dosah sítě (BS→CPU): QPSK-30 km, 16QAM-23 km, 64QAM-15 km.
- Vrstvy PHY a MAC jsou navrženy tak, aby standard WRAN zvládal velké vzdálenosti (řádu desítek kilometrů), při velkém rozptylu zpoždění a výrazném frekvenčně sel. úniku
- Standard WRAN se uplatní v chytrých farmách (smart farm), ale i v chytrých městech (Smart City), inteligentních elektrických rozvodných sítích SG (Smart Grid), apod
- Ve standardu WRAN je povinná navigace GPS, podporována je i navigace „triangulární“.

Standard IEEE 802.22 (WRAN): stručný přehled

- Standard IEEE 802.22, známý též jako WRAN (Wireless Regional Area Networks), je určen k pokrytí velkých venkovských oblastí s řídkým osídlením a rozvojových zemí, s využitím TV bílých prostor (WSTV = White Space TV, WSDB = White Space Digital Broadcasting)
- Sdílení bezlicenčních pásem WRAN s licenčními TV pásmy s nízkými frekvencemi řádu stovek MHz (47- 910 MHz), se realizuje s využitím principů kognitivního rádia CSCR (Carrier Sense Cognitive Radio)
- Relativně nízké frekvence zaručují systému velmi dobré pokrytí určených lokalit, s minimem zastíněných prostor; útlum rádiové trasy totiž roste s kvadrátem frekvence a současně se zhoršuje ohyb rádiových vln.

Dosažitelnost TV bílých prostorů v Evropě

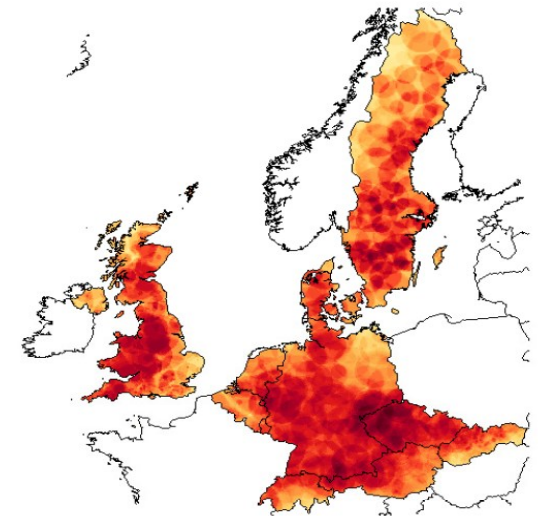


Závislost přijímaného výkonu TV signálu vysílače Stockholm Naka na vzdálenosti přijímače od vysílače (er. margin $\gamma = 1$ dB)

	analog QPSK 16QAM 64QAM		
SNR_{req} [dB]	6.9	13.1	18.7
E_{req} , Ch.21 [dB($\mu V/m$)]	62.0	31.3	37.5
E_{req} , Ch.60 [dB($\mu V/m$)]	66.4	35.7	41.9

Minimální požadovaný poměr SNR_{req} a intenzita pole E_{req} pro tři typy digitálních modulací v DVBT; tyto parametry určují chráněnou oblast TV vysílačů, do níž nesmějí zasahovat signály jiných zdrojů

Pokud se využívají pro systém IEEE 802.22 i kanály ležící v těsném sousedství obsazených televizních kanálů, je průměrný procentuální objem nevyužívaného spektra v evropských TV sítích okolo 56 %; naproti tomu v USA je podíl volného spektra asi 79 % (rok 2011). V případě že se uvažované sousední kanály pro účely aplikací v systému IEEE 802.22 vyloučí, sníží se objem nevyužívaného spektra v evropských TV sítích na cca 25%. V každém případě je zvýšení efektivity využívání bílých prostorů v TV pásmech pozoruhodné a vítané



počet dosažitelných volných TV kanálů

0 4 8 12 16 20 24 28 32 36 40

Mapa některých evropských států s vyznačením bílých prostorů v TV pásmech (TV kanál č. 50)

	Analogová TV	digitální TV	bezdrát. mikrofony
Citlivost	-94 dBm	-116 dBm	-107 dBm
SNR	1 dB	-21 dB	-12 dB

Požadavky na citlivost a SNR snímacích přijímačů; měření záporných hodnot SNR umožňují např. speciální statistické techniky detekce typu „blind“ (energy detection...), a nebo „signal specific“ (ATSC Signature Sensing...)

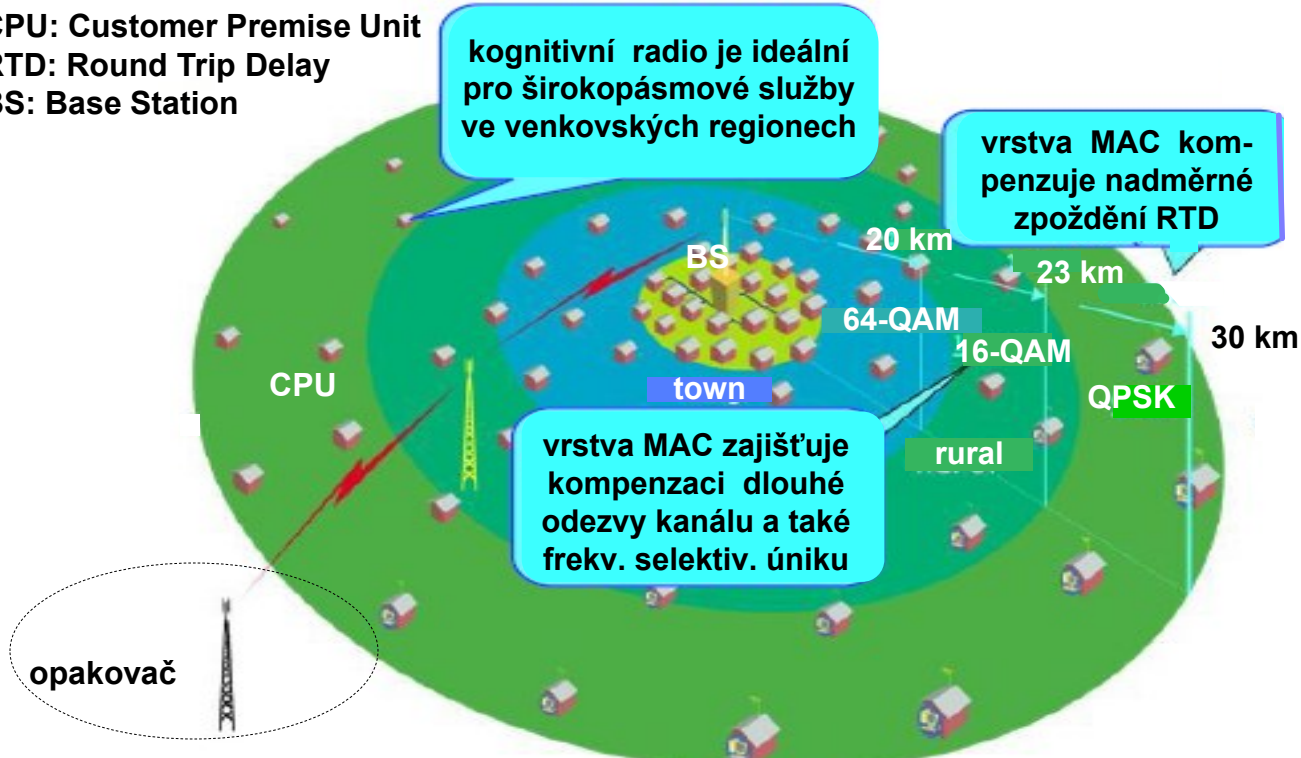
[1] Jaap van der Beek, et al.: TV white space in Europe. IEEE Transaction on Mobile Computing, January 2011

[2] Stephen J. Shellhammer: Spectrum Sensing in IEEE 802.22. Qualcomm Inc. 2009.

[3] Baumgratz F. et al: Teoretical Calculation of Spectrum Sensing Receiver. fbaumgratz@inf.ufrgs.br

Architektura systému WRAN

CPU: Customer Premise Unit
RTD: Round Trip Delay
BS: Base Station



mnohonásob. přístup: OFDMA; modulace subnosných : 64QAM/16QAM/QPSK
RF pásma 6/7/8 MHz: neobsazené TV kanály (WSTV) č. 2 až 69 (54 až 806 MHz), které se opakovaně zjišťují technikou kognitivního rádia (CR)

CPU
sensing TV&GPS
Tx/Rx data WRAN



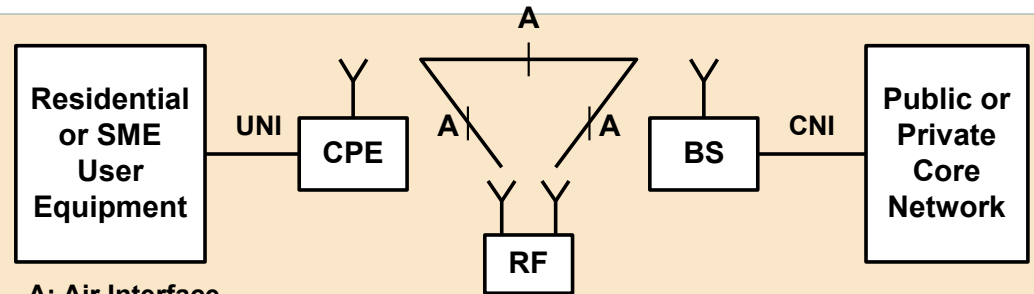
všesměrová anténa na základnové stanici BS
Tx/Rx data WRAN



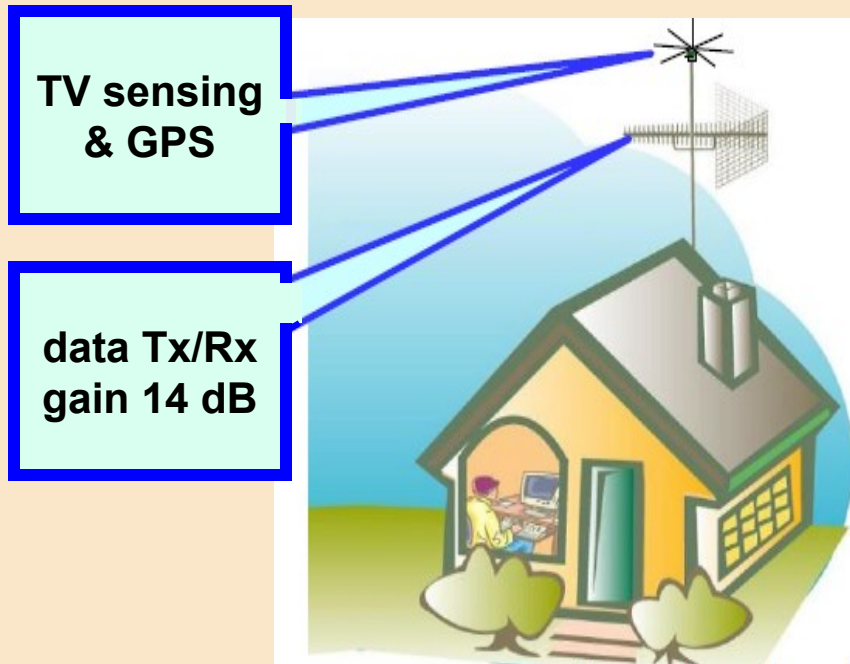
- Standard IEEE 802.22 WRAN nabízí nelicencovaným uživatelům rychlou rádiovou komunikaci, jež se díky využití principů kognitivního rádia realizuje v licencovaných televizních pásmech, s nízkými frekvencemi řádu stovek MHz, které zaručují výborné pokrytí.
- Základem standardu WRAN je jediná buňka s centrální základnovou stanicí BS (Base Station), jež obsluhuje až několik stovek zákaznických domovských jednotek CPU (Customer Premise Unit).
- To umožňuje především širokopásmové pokrytí odlehlých venkovských lokalit se zemědělskými farmami, menšími a středními podniky (SME) apod. Velice vhodný je standard WRAN pro nové aplikace ze sféry Internetu věcí, jako jsou inteligentní rozvodné sítě SG, systémy managementu dopravy apod

Antény jednotky CPU ve standardu WRAN

Obecný referenční model systému IEEE 802.22 s rádiovým (bezdrátovým) přístupem: model zobrazuje všechny relevantní uzly mezi uživatelskou doménou včetně aplikací a jádrem veřejné či privátní sítě IEEE 802.22 WRAN



A: Air Interface
BS: Base Station
CPE: Customer Premise Equipment
UNI: User Network Interface
CNI: Core Network Interface
RF: Repeater Function (optional)



P802.22b Amendment: Enhancements for Broadband Services and Monitoring Applications

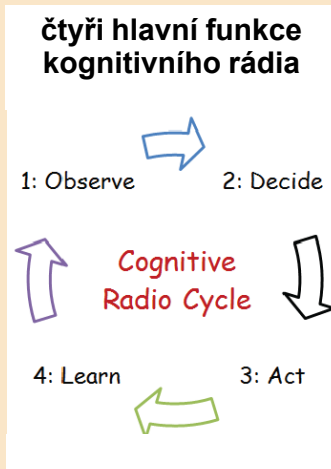
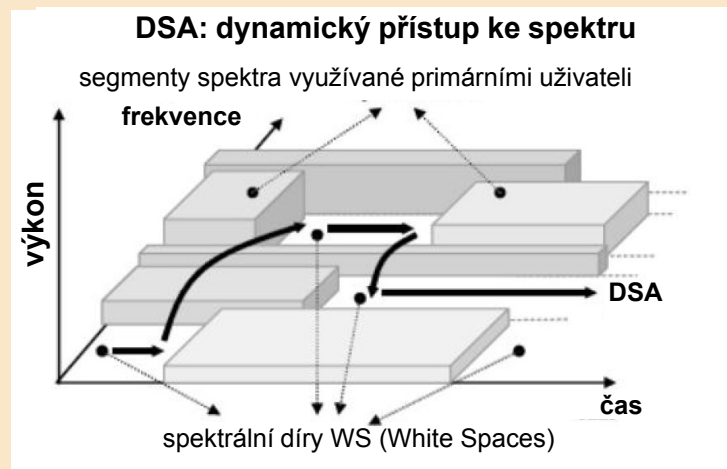
Scope: This standard specifies alternate Physical Layer (PHY) and necessary Medium Access Control Layer (MAC) enhancements to IEEE std. 802.22-2011 for operation in Very High Frequency (VHF)/ Ultra High Frequency (UHF) TV broadcast bands between 54 MHz and 862 MHz to support enhanced broadband services and monitoring applications. The standard supports aggregate data rates greater than the maximum data rate supported by the IEEE Std. 802.22-2011. This standard defines new classes of 802.22 devices to address these applications and supports more than 512 devices in a network. This standard also specifies techniques to enhance communications among the devices and makes necessary amendments to the cognitive, security & parameters and connection management clauses. This amendment supports mechanisms to enable coexistence with other 802 systems in the same band.

Rádiové rozhraní standardu IEEE P802.226 (WRAN)

Vrstva PHY		
PHY Modes	PHY Operation Mode 1	PHY Operation Mode 2
Channel bandwidth	6, 7, or 8 MHz	frequency: 54...806 MHz
Payload Modulation	QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM, MD-TCM (Multi Dimens. Trellis Coded Modulation)	
Multiple Access	OFDMA	
FFT Size	2048	1024
Data Rate	Up to 513 Mbps	Up to 404.39Mbps
MIMO	2 x 2 and 4 x 4	
Vrstva MAC		
Communications	Direct connection and Relay connection	
Supported devices	Up to 8192 CPEs	
Device categories	Advanced BS (A-BS), Advance CPE (A-CPE), Subscribe CPE (S-CPE)	
Multi-channel operations	Select unused TV bands from WSDB	

Principy kognitivního rádia

Klasické statické frekvenční plánování využití rádiového spektra, vede k tomu, že spektrum přidělené jeho primárními (licencovaným, incumbent) uživateli (PUs), je v aktivním provozu v pásmu 0 až 6 GHz v průměru nejvýše asi deset procent času. Situaci částečně zlepšuje zavedení tzv. bezlicenčních pásem (unlicensed bands), do nichž náleží např. pásma pro průmyslové, vědecké a lékařské účely ISM (industrial, scientific and medical) v okolí 960 MHz, 2,4 GHz ap. Ta ale nechrání jeho uživatele před interferencemi. Druhou možností je kognitivní rádio CR (cognitive radio). To je definováno jako rádiový systém (Tx/Rx) využívaný sekundárními uživateli (SUs), jež automaticky spojitě skanuje rádiové spektrum primárních uživatelů. Zjistí-li, že jeho určitý konkrétní segment je právě volný, velmi rychle do něho přeskočí a realizuje v něm svou radiokomunikaci. Pokud však tento segment chce znovu využívat některý primární uživatel, musí ho sekundární uživatel ihned opustit, neboť primární uživatelé mají za všech okolností přednost. Tento "oportunistický" management spektra obecně přispívá především k jeho lepšímu využití. V případě standardu WRAN se jedná o efektivnější využívání uvažovaných nízkých tv pásem, což mu přináší zlepšené pokrytí obsluhovaných prostor, a to při vyšší kvalitě služeb QoS. Tato původní varianta se označuje jako kognitivní rádio se snímáním spektra SS CR (Spectrum Sensing CR).



a) Ilustrace principů kognitivního rádia (SS CR): tlustá černá čára (DSA) ukazuje přeskočky určitého sekundárního uživatele na právě volné frekvence mezi obsazenými segmenty primárních uživatelů.

b) Funkce kognitivního rádia SS CR probíhá v periodických cyklech. Jejich délka se může v různých aplikacích měnit v širokých mezích, od zlomků sekundy až po hodiny.

Kognitivní rádio ve standardu WRAN

Standard IEEE 802.22 WRAN nabízí nelicencovaným uživatelům pozemní rychlou rádiovou komunikaci, jež se díky využití principů kognitivního rádia CR uskutečňuje v licencovaných televizních pásmech, s nízkými frekvencemi řádu stovek MHz. Volné prostory v těchto pásmech se hledají pomocí techniky snímání spektra, které kontinuálně provádí jak stanice BS, tak jednotky CPU. Tato technika se přitom opírá o aktuální databázi primárních (incumbent) uživatelů.

V kognitivním systému WRAN uživatelské jednotky musí být schopné detekce signálů, jež jsou nad detekčním prahem -116 dBm, a to nejméně s 90% pravděpodobností detekce a s 10% pravděpodobností falešných alarmů. Proces snímání by neměl překročit několik desítek milisekund na určitý kanál. Při nezbytném snímání aktuálního i obou sousedních kanálů potom může celková doba snímání přesáhnout až 100 milisekund. Navíc se vyžaduje, aby licencovaný (incumbent) signál byl detekován jednotkou CPU/WRAN - od okamžiku kdy překročí práh detekce na určitém TV kanálu - se zpožděním nejvýše 2 sekundy. Jinak řečeno, systém WRAN musí provádět snímání na pracovní kanálu nejméně každé dvě sekundy. Přitom však dochází ke krátkodobému přerušení datového přenosu ve WRAN, což snižuje datovou propustnost systému a zdatelně redukuje jeho kvalitu služeb QoS.

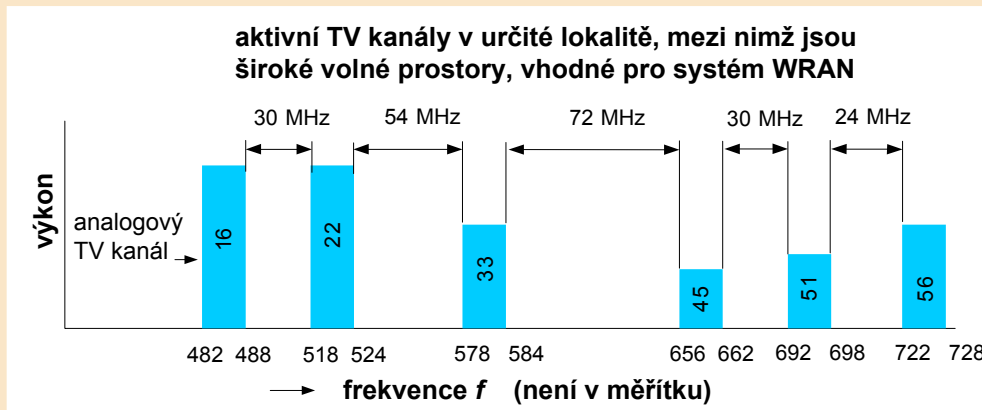
Uvedené slabiny lze potlačit metodou dynamického frekvenčního hopingu DFH (Dynamic Frequency Hopping). V tomto případě se během využívání licencovaného segmentu spektra určitým sekundárním uživatelem paralelně provádí snímání spektra na jiném pracovním kanálu. Díky tomu nedochází k žádnému přerušení datového přenosu v jednotce CPU/WRAN.

Využití bílých prostor v analogové televizi standardem WRAN

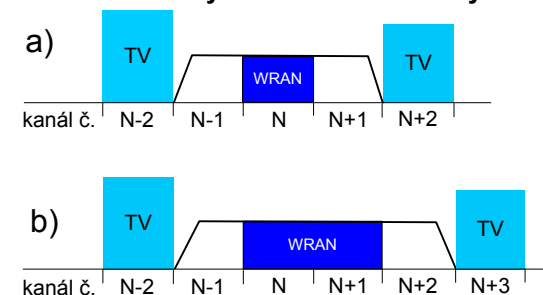
Na obrázku (dole vlevo) jsou zobrazeny aktivní kanály analogové televize, v určité lokalitě (Phoenix, USA) a v určitém časovém okamžiku; uvedený scénář se ale s časem může neustále měnit, v důsledku změn vysílacích časů TV stanic apod. Mezi nimi jsou velké bílé prostory (TVWS), užívané sítí WRAN, případně i bezdrátovými mikrofony a privátními pozemními a komerčními mobilními rádiovými službami PLMRS/CMRS.

Podle standardů analogové televize však musí být mezi dvěma sousedními TV kanály vždy minimálně mezera o jejich dvojnásobné šířce, která zajistí potlačení jejich vzájemných interferencí, vznikajících vyzařováním vysílaných kanálů mimo jejich nominální pásmo a také vlivem malé blízké selektivity TV přijímačů. Jeden kanál WRAN potom vyžaduje mezeru mezi sousedními TV kanály 3BTW, dva kanály mezeru 5BTW atd. Tyto dva případy jsou znázorněny na obr. vpravo.

Podle specifikací WRAN je nutné zajistit i pro okrajové oblasti buňky tj. pro vzdálenost Tx-Rx = 30 km, přenos o rychlosti 19 Mbit/s. V této vzdálenosti je však nutné použít modulaci QPSK ve spojení s neúčinnějším kódováním FEC, které nedovolují v jediném TV kanálu o šířce $B_{TV} = 6$ MHz uvedené rychlosti 19 Mbit/s dosáhnout. Situaci však může zlepšit sdružování více kanálů (channel bonding), neboť např. při dvou kanálech se získá výsledná šířka pásma 12 MHz, při třech kanálech 18 MHz atd., což je obvykle dostačující pro dosažení uvedené rychlosti 19 Mbit/s.



- a) mezi dva TV kanály lze vložit jeden kanál WRAN
b) mezi dva TV kanály lze vložit dva kanály WRAN



Využití bílých prostor v digitální televizi standardem WRAN

U současných systémů digitální televize DVB-T, provozovaných ve většině evropských států, se vysílání uskutečňuje ve IV a V televizním pásmu, ležícím mezi frekvencemi 470 až 790 MHz, které je však v důsledku digitální dividendy průběžně zmenšováno. Používá se šířka pásma 8 MHz na jeden kanál. Na rozdíl od analogové televize však **u DVB lze v určité lokalitě přijímat i dva sousední kanály**, aniž by docházelo k interferencím. Separaci zajišťuje především výhodnější průběh spektra signálů digitální televize DVB-T (OFDM) a také neustálé zdokonalování frekvenčních filtrů v TV vysílačích i v přijímačích. Oddělení sousedních TV kanálů může napomáhat rovněž prostorové vzdálení obou příslušných vysílačů a odlišná polarizace (V/H) vyzařovaných.

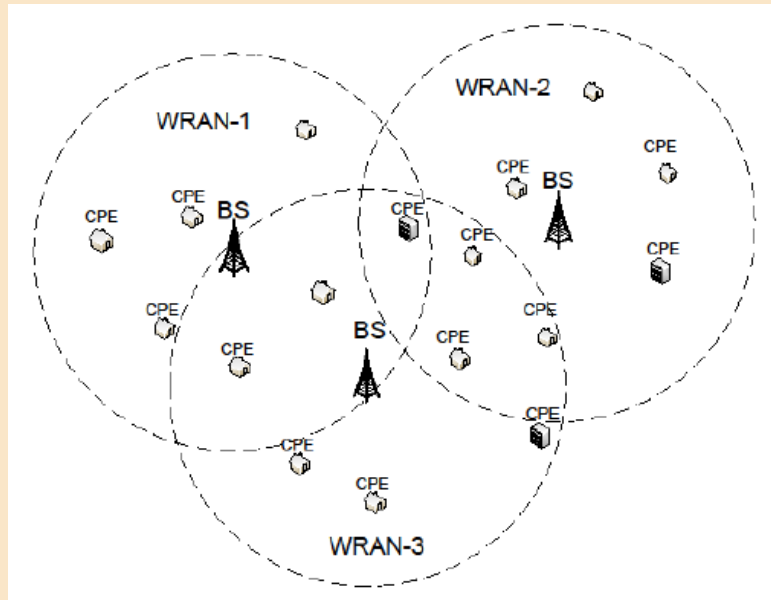
Zjištění možnosti vložení jednoho nebo více kanálů IEEE 802.22 WRAN mezi dva sousední kanály digitální televize je však komplikované, neboť souvisí s obecnějším problémem koexistence tohoto standardu se všemi jinými službami provozovanými v TV pásmech. Ve standardu IEEE 802.22 založeno na **technice jeho snímání** (spectrum sensing). Ta je podporována **přístupem ke geolokační databázi** jeho „bílých“ (volných) úseků WSDB (White Space Data Base). K těmto účelům lze případně využívat také pomocnou informaci získávanou **speciálním majákovým protokolem** (beacon protocol). Tyto tři techniky se obvykle vhodně kombinují a podporují tak bezkonfliktní sdílení spektra licencovanými a bezlicenčními uživateli. Hodnoty citlivosti snímacího přijímače pro analogovou televizi (NTSC), digitální televizi (ATSC) a bezdrátové mikrofony jsou shrnuty v tabulce 1. Zde jsou uvedeny i příslušné poměry signálu k šumu SNR, odpovídající typickému šumovému číslu přijímače $F = 11$ dB.

	Analogová TV	digitální TV	bezdrát. mikrofony
Citlivost	-94 dBm	-116 dBm	-107 dBm
SNR	1 dB	-21 dB	-12 dB

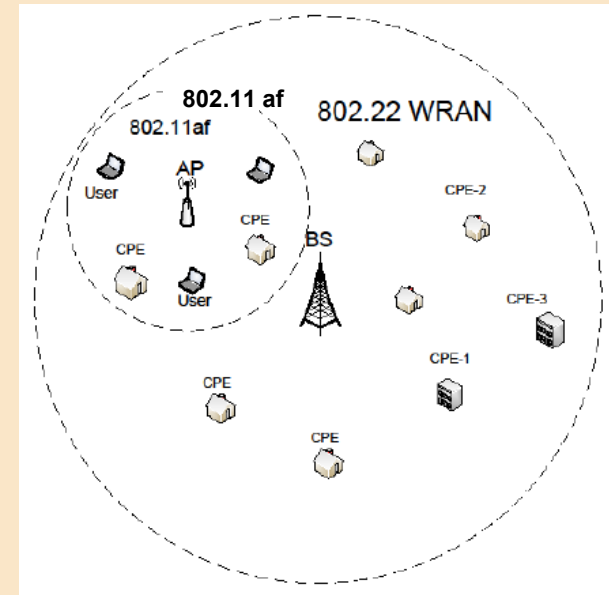
Požadavky na citlivost snímacího přijímače a příslušný poměr signálu k šumu SNR; citlivost je zde určena jako výkonová úroveň, při níž je pravděpodobnost detekce signálu v daném pásmu 90%

Vlastní a heterogenní koexistence ve standardu WRAN

Vlastní koexistence několika buněk WRAN



Heterogenní koexistence různých sekundár sítí



Vlastní koexistence: překrývání několika buněk WRAN, pracujících na stejném kanálu. Pokud mají jejich základnové stanice BS a uživatelské jednotky CPE (CPU) řádně plnit své funkce, musí mezi buňkami WRAN docházet k výměně kontrolních informací. Tuto výměnu řídí koexistenční majákový protokol (coexistence beacon protocol)

Heterogenní koexistence: možnost získat sekundární přístup k TV bílým prostorám TVWS. Se snaží nejen systém WRAN, ale také například standardy IEEE 802.11 af a 802.19.1. Na obrázku je znázorněn scénář vzájemné koexistence heterogenních sekundárních systémů IEEE 802.22 a IEEE 802.11 af. V tomto případě se oba systémy neruší, při zachování priority TV vysílání

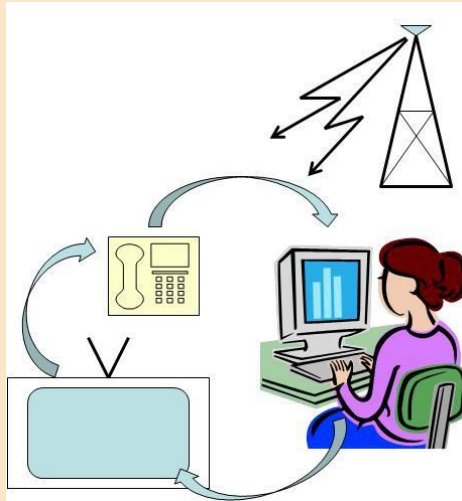
Aplikace standardu IEEE 802.22 (WRAN)

Category	Usage Cases	Properties
A) Smart Grid & Monitoring	A1) Regional Area Smart Grid/Metering	<ul style="list-style-type: none"> • Low capacity/complexity CPEs • Very large number of monitoring CPEs • Fixed and Potable CPEs • Real time monitoring • Low duty cycle • High reliability and security • Large coverage area • Infrastructure connection
	A2) Agriculture/Farm House Monitoring	
	A3) Critical Infrastructure/Hazard Monitoring	
	A4) Environment Monitoring	
	A5) Homeland Security/Monitoring	
	A6) Smart Traffic Management and Communication	
B) Broadband Service Extension	B1) Temporary Broadband Infrastructure (e.g., emergency broadband infrastructure)	<ul style="list-style-type: none"> • Fixed and Portable CPEs • Higher capacity CPEs than Category A) • High QoS, reliability and security • Higher data rate than Category A) • Easy network setup • Infrastructure and Ad hoc connection
	B2) Remote Medical Service	
	B3) Archipelago/Marine Broadband Service	
C) Combined Service	C1) Combined Smart Grid, Monitoring and Broadband Service	<ul style="list-style-type: none"> • Category A) and B)

Aplikace standardu IEEE 802.22 (WRAN)



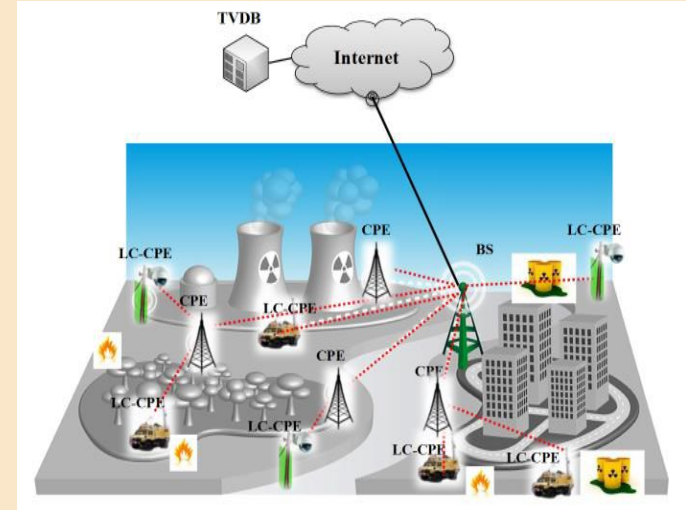
Triple play



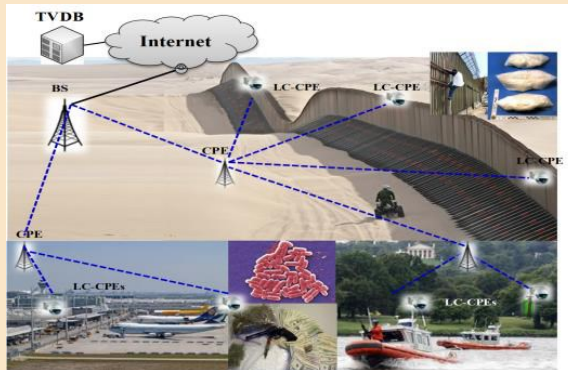
Cellular offload



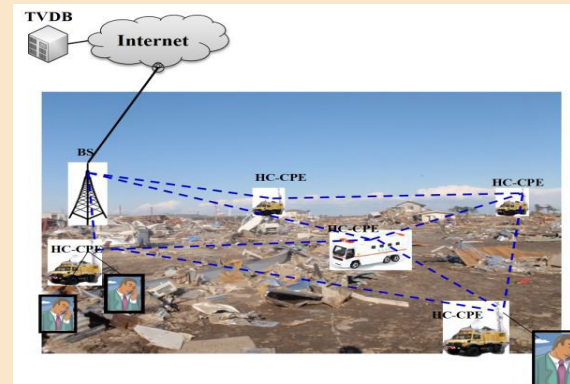
Critical infrastructure monitoring



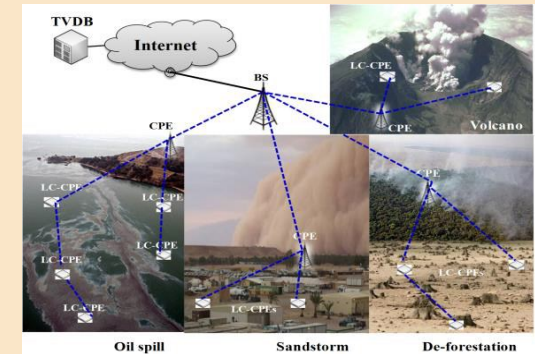
Border protection



Emergency broadband infrastructure



Environment monitoring



Standard IEEE 802.22 (WRAN)

IEEE 802.22: parametry fyzické vrstvy

parametr	hodnota				symbol
šířka kanálu	6 MHz				
základní vzorkovací frekvence	6.856 MHz				F_s
FFT rozměr	2048				N_{FFT}
odstup subnosných	3.347656 KHz				Δf
cyklický prefix	298.76 us				T_{FFT}
FFT perioda $1/\Delta f$	1/32	1/16	1/8	1/4	CP
doba trvání CP T_{FFT}/CP (μs)	9.34	18.68	37.35	74.69	T_{CP}
doba trvání symbolu $T_{FFT}+T_{CP}$ (μs)	308.1	317.4	336.1	373.4	T_{Sym}
EIRP	4W				
ochrana subnosných	184 L+1 DC+183 R=368				N_{LG}, N_{DC}, N_{RG}
piloty	240				N_P
datové subnosné	1440				N_D
pásmo signálu $(N_D+N_P+N_{DC})\Delta f$	5.627 MHz				
modulace	QPSK, 16-QAM, 64-QAM				
rychlost kódu	1/2, 2/3, 3/4, 5/6				
datová rychlost	4.54 to 22.69 Mbps				