

MNOHOUŽIVATELSKÉ SYSTÉMY MU-MIMO A SYSTÉMY MASÍVNÍ MIMO

1. DÍL

Václav Žalud

Katedra radioelektroniky; Fakulta elektrotechnická ČVUT, Praha, zalud@fel.cvut.cz

Abstrakt

Tento příspěvek se zabývá anténními systémy s mnohonásobným vstupem a výstupem (MIMO). Po úvodu jsou zde popisovány systémy MIMO s jediným uživatelem (SU-MIMO). Následující hlavní část příspěvku je zaměřena na mnohouživatelské systémy MIMO (MU-MIMO) a na jejich nejperspektivnější alternativu, jíž jsou systémy masivní MIMO. Poslední část příspěvku pojednává o některých dosud ne úplně vyřešených otázkách, jako jsou např. problém kontaminace pilotních signálů, nepříznivých podmínek šíření atd.

Klíčová slova: systémy s více vstupy a výstupy (MIMO), šíření rádiových vln, jednouživatelské systémy MIMO (SU-MIMO), mnohouživatelské systémy MIMO (MU-MIMO), masivní MIMO, lineární detekce signálů, lineární předkódování signálů, formování svazků (BF), kontaminace pilotních signálů

Abstract

The aim of this paper is to investigate the multiple input multiple output (MIMO) antenna systems. After introduction the paper reviews the simple single user MIMO (SU-MIMO) systems. Next main section is dedicated to the multiuser MIMO (MU-MIMO) systems and its most perspective alternative, which are massive MIMO systems. The last section of the paper is aimed to some fully unsolved questions, e.g. problem of pilot contamination, unfavorable propagation condition etc.

Keywords: multiple input multiple output (MIMO) systems, radio wave propagation, single user MIMO (SU-MIMO), multiuser MIMO (MU-MIMO), massive MIMO, linear signal detection, linear signal precoding, beamforming (BF), pilot signals contamination

1 Úvod

Tento příspěvek se zabývá základními principy a nejnovějšími vývojovými variantami rádiových komunikačních systémů s více anténami MAS (Multiple Antenna Systems). Příspěvek je rozdělen do dvou dílů. V prvním z nich, uvedeném v tomto čísle, jsou shrnuty základní poznatky o systémech MAS. Druhý díl, zařazený do následujícího čísla, popisuje hlavní metody zpracování signálů v nich. K pochopení základních principů systémů MAS, které patří mezi nejprogresivnější technologie současné radiokomunikace, může nápomoci následující stručný přehled jejich vývoje.

Od počátků rádiové komunikace až do současnosti se realizuje rádiové spojení převážně pomocí systémů s jednou vysílací anténou a jednou přijímací anténou. Rádiový kanál zde má tedy jediný vstup a jediný výstup, a proto se označuje zkratkou SISO. Systémy s kanály SISO jsou sice relativně jednoduché, avšak mají malou spektrální i energetickou účinnost. S postupným rozvojem pozemní mobilní komunikace v osmdesátých letech minulého století ale začaly narůstat nároky na přenosovou kapacitu C buňkových i jiných mobilních sítí, jakož i na individuální přenosovou rychlost jejich uživatelů. S nástupem smartphonů, tabletů a dalších inteligentních uživatelských terminálů (UT) nabývá tento nárůst exponenciálního charakteru (tzv. Gildersův zákon). Ten však již klasické metody zvyšování spektrální účinnosti, jako jsou vylepšené techniky zdrojového i kanálového kódování, nové formáty vícecestavových modulací, ale i rozšiřování pásem pro mobilní komunikaci podporované národními regulačními orgány, nedokáží zvládnout. Klíčovou technologií, která může současnou kapacitu moderních rádiových sítí zvýšit během několika málo let nejméně asi desetkrát, jsou systémy s mnoha anténami MAS. Do této kategorie patří diversitní systémy SIMO (Single Input Multiple Output), které mají jedinou vysílací a dvě nebo více antén přijímacích a diversitní systémy MISO (Multiple Input Single Output) se dvěma nebo více anténami ve vysílači. S nimi jsou příbuzné systémy pro formování vysílacích nebo přijímacích anténních svazků BF

(Beam Forming). Všechny tyto varianty MAS zvyšují hlavně spolehlivost rádiového přenosu, avšak kapacitu téměř neovlivňují, proto jim dále není věnována pozornost.

Výrazné navýšení přenosové kapacity i spolehlivosti, dosahované v nezvětšeném rádiovém pásmu a při nezvětšených vysílacích výkonech, může poskytovat další technologie MAS, která má dvě nebo více antén ve vysílači (Tx) a současně také dvě nebo více antén v přijímači (Rx), označovaná symbolem MIMO (Multiple Input Multiple Output) [1], [2]. Ta je určena hlavně pro buňkové, metropolitní a lokální rádiové sítě, uplatnění však nachází v menší míře také v jiných aplikacích provozovaných v pozemských rádiových kanálech, jako je například televizní a rozhlasový přenos apod.

V tomto příspěvku se popisují základními varianty systémů MAS, hlavní pozornost je pak věnována jejich nejnovějším variantám MU-MIMO (Multi User MIMO) a masivní MIMO. Kvalitativní popis je doplněn matematickým rozбором, který je však značně zjednodušen. Exaktní studium systémů MAS totiž vyžaduje poměrně důkladné znalosti teorie rádiové komunikace a také znalosti některých partií matematiky (teorie matic apod). Aplikace uvedených disciplín by však značně rozšířily rozsah tohoto spíše encyklopedického příspěvku. Zájemcům o hlubší studium systémů MAS je možné doporučit odborné prameny uvedené v závěru, jejichž autoři vesměs představují špičky daného oboru.

2 Parametry šíření rádiových vln v pozemských rádiových kanálech

Rádiový kanál je tvořen vysílací a přijímací anténou a fyzickým prostředím mezi nimi, označovaném jako kanál šíření. Všechny tyto tři entity představují lineární soustavy, v nichž platí princip superpozice. Kanál šíření lze obecně popsat dvěma modely, a to modelem šíření ve velkém měřítku (large scale propagation model) a modelem šíření v malém měřítku (small scale propagation model) [2].

• Model šíření ve velkém měřítku, zachycuje útlum trasy šíření PL (Path Loss) a vliv zastínění (shadowing). Tyto parametry

jsou zde uvažovány v rozsahu velmi velkých vzdáleností, podstatně větších než délka vlny $\lambda = c_0/f$, kde $c_0 = 3 \times 10^8$ m/s je rychlost světla a f je frekvence. Útlum trasy PL je důsledkem disipativních a dalších ztrát výkonu vyzařovaného vysílačem v kanálu šíření. Zastínění je způsobeno překážkami mezi vysílačem a přijímačem, které jsou rovněž mnohem větší než λ . Tento model predikuje střední hodnotu intenzity rádiového signálu pro libovolnou vzdálenost mezi vysílačem (Tx) a přijímačem (Rx) a umožňuje tedy vytvářet odhady oblasti pokrytí signálem určitého vysílače. Při dalším studiu systémů MIMO však není tento model aktuální.

- Model šíření v malém měřítku charakterizuje rychlé fluktuační intenzity přijímaného signálu v rámci krátkých změn vzdáleností Tx – Rx (řádu λ), nebo krátkých časových intervalů (řádu sekund); při zkoumání těchto fluktuací mohou být efekty vlivem ztrát šířením PL a zastíněním zanedbány. Uvažované fluktuační jsou typické pro mnohocestné šíření rádiových vln v pozemských kanálech, a proto se nazývají mnohocestný únik (multipath fading), nebo jen únik. K jejich vzniku dochází vlivem časové a frekvenční disperze mnohocestného signálu, procházejícího rádiovým kanálem. Složky tohoto signálu potom vcházejí do přijímací antény s rozdílnými amplitudami a zpožděním. Zde se vzájemně kombinují a vytvářejí výsledný signál s výraznými změnami amplitudy a fáze. Pro rozbor systémů MIMO je využíván hlavně druhý model.

- **Časová disperze** přijímaného signálu se projevuje v časové oblasti tak, že jediný vyslaný impuls přichází na vstup přijímače ve více replikách. V důsledku různé délky uvedených tras mají tyto repliky různé amplitudy a jsou také časově rozptýleny v intervalu, zvaném rozptyl zpoždění (delay spread) τ_d . Rozptyl zpoždění τ_d se projevuje rovněž ve frekvenční oblasti, a to frekvenční závislostí jednotlivých složek spektra signálu. Zde je charakterizován koherentní šířkou pásma B_{coh} (coherence resp. correlation bandwidth), což je šířka pásma, v jejímž rozsahu je kolísání amplitudy signálu v různých úsecích spektra téměř konstantní. Parametry B_{coh} a τ_d jsou vzájemně vázány Fourierovu transformací, přičemž platí přibližná relace $B_{coh} \approx 1/\tau_d$.

Je-li pásmo B zaujímané signálem znatelně širší, než pásmo B_{coh} , vzniká frekvenčně selektivní únik (frequency selective fading). Při něm se ve spektru přijímaného signálu objevují hluboká minima, v nichž je signál značně potlačen, nebo se i ztrácí. V časové oblasti přitom vznikají výrazné intersymbolové interference ISI (Inter Symbol Interference). Jestliže je pásmo B signálu menší, než pásmo B_{coh} , objevuje se frekvenčně plochý únik (flat fading), při kterém se téměř stejně oslabují všechny složky spektra v pásmu B . Plochý únik může být velice hluboký, interference ISI však při něm prakticky nevznikají. Lze mu čelit automatickým řízením zisku v přijímači, nebo adaptivním řízením vysílacích výkonů, ale také aplikací diverzifikačních technik SIMO, MISO.

- **Frekvenční disperze** jediného přijímaného signálu vzniká, jsou-li přijímač a vysílač ve vzájemném pohybu. Jestliže vysílač vysílá jediný signál o frekvenci f , potom dochází v důsledku Dopplerova jevu ke změně frekvence přijímaného signálu o Dopplerův posuv (Doppler shift) $f_d = v f/c_0$, kde v je tangenciální rychlost pohybu vysílače vůči přijímači. Tím se rozšiřuje spektrum přijímaného signálu (spectrum broadening). V mnohocestných kanálech jsou postihovány tímto posuvem frekvence všechny mnohocestné složky, které potom

v souhrnu vytvářejí Dopplerův rozptyl frekvence (Doppler spread) f_s . Dopplerův jev v časové oblasti charakterizuje doba koherence T_{coh} (coherence time, correlation time), definovaná jako časový interval, během něhož se vlastnosti kanálu v důsledku Dopplerova jevu téměř nemění. Frekvence f_d a doba koherence T_{coh} jsou vázány Fourierovu transformací, přičemž platí orientační vztah $T_{coh} \approx 1/f_d$.

3 Přehled systémů MIMO: SU-MIMO, MU-MIMO a masivní MIMO

Nejstarší radiokomunikační systémy z počátků rádiové komunikace používaly analogovou modulaci, při níž je sinusová nosná vlna modulována analogovým modulačním signálem. Téměř bez výjimky byly založeny na koncepci SISO, s jedinou vysílací a jedinou přijímací anténou, jak ukazuje **obr. 1a**. Mezi těmito anténami může být přímá optická viditelnost LOS (Line of Sight), spojení je však často možné i při nepřímé viditelnosti NLOS (Non LOS), kdy ho zprostředkují nepřímé cesty šíření rádiových vln, vznikající jejich odrazem, ohybem a rozptylem. Technika SISO však nevyužívá plně potenciální možnosti rádiového kanálu. Obousměrné současně probíhající spojení se realizovalo pomocí frekvenčního duplexu FDD (Frequency Division Duplex). U něho se vysílání a příjem dané rádiové stanice uskutečňují ve dvou různých frekvenčních pásmech, jež mají mezi sebou bezpečnostní duplexní odstup Δf .

Vývojově mladší jsou systémy s digitálními modulacemi, nastupující ve druhé polovině 20. století. U nich je sinusová nosná vlna modulována digitálním modulačním signálem (nejčastěji typu PCM). U digitálních modulací se původně uplatňoval také frekvenční duplex FDD. Digitální koncepce je však zvláště vhodná zejména pro časový duplex TDD (Time Division Duplex), při němž se vysílání i příjem určité rádiové stanice realizují na téže nosné vlně, avšak v samostatných, střídavě proti sobě postupujících a nepřekrývajících se časových slotech („ping pong přenos“). Digitální radiokomunikační systémy vystačily po desítky let rovněž s anténní koncepcí SISO, avšak na konci devadesátých let minulého století se již objevují první digitální systémy MIMO.

3.1 Systémy SU-MIMO

Na **obr. 1b** je znázorněna základní varianta dnes již početné třídy systémů MIMO, určená pro buňkové sítě. Základnová stanice BS s vysílačem Tx zde komunikuje s jediným uživatelským terminálem UT s přijímačem Rx, proto se uvedená varianta označuje jako jednoúživatelský systém MIMO a označuje zkratkou SU-MIMO (Single User MIMO), nebo PTP-MIMO (Point to Point MIMO) [4]. Tato varianta již není aktuální, slouží však jako východisko při zkoumání složitějších technik MIMO. Stanice BS zde má dva nezávislé datové vstupy, jejichž data jsou vysílána ze dvou antén. Přijímač UT má dvě přijímací antény, tj. dva rádiové vstupy a dva nezávislé datové výstupy. Signál vysílaný libovolnou všesměrovou vysílací anténou může přijímat každá všesměrová přijímací anténa, takže v každé z nich je chaotická směs všech vysílaných signálů. Pokud jsou všechny dílčí rádiové kanály, vytvořené mezi vysílacími a přijímacími anténami, zcela nekorelované, což nastává v prostředí bohatém na mnohocestné šíření (multipath rich), mohou oba vysílané signály ležet ve stejném frekvenčním pásmu, aniž by se rušily.

Z přijímaných signálů lze potom vhodným dekodérem vyčlenit oba původní vysílané datové toky. Zobrazený systém SU-MIMO je tedy schopen přenášet dva zcela nezávislé datové toky (streamy), resp. jediný tok, avšak s dvojnásobnou rychlostí, než by poskytoval systém SISO ve stejném pásmu. Toto dvojnásobné navýšení přenosové kapacity sem vnáší právě mnohocestné šíření, jehož přídatné signálové cesty se využívají jako přídatné kanály, pomáhající přenášet užitečná data. Uvedené zvýšení přenosové kapacity je nejcennější předností systémů SU-MIMO vůči SISO. Počet antén ve stanici BS i v terminálu UT je ovšem možné zvětšovat a tím dále kapacitu systému vylepšovat.

Zvýšení kapacity obecného systému SU-MIMO s M vysílacími a N přijímacími anténami udává prostorový multiplexní zisk SMG (Space Multiplexing Gain), definovaný jako poměr jeho kapacity $C_{SU-MIMO}$ ke kapacitě C_{SISO} systému SISO, tedy $SMG = C_{SU-MIMO} / C_{SISO}$. Tento zisk je úměrný výrazu $\min(N, M)$, tj. menšímu z čísel M a N . Jeho dosažení však vyžaduje splnění určitých podmínek:

- V daném rádiovém kanálu musí docházet k výraznému mnohocestnému šíření (multipath rich propagation) a anténní prvky musí vykazovat zanedbatelnou vzájemnou korelaci, tj. musí mít dostatečnou vzájemnou vzdálenost d_{AA} jak ve vysílači, tak i v přijímači (v stanici BS je obvykle $d_{AA} \approx 5..10 \lambda$, v terminálu UT vystačí vzdálenost $d_{AA} \geq 0,5..1 \lambda$). Potom jsou dílčí kanály mezi páry antén Tx-Rx ortogonální (nezávislé) a signály v nich se neovlivňují. Mnohocestné šíření je určeno rádiovým kanálem (charakterem terénu, zástavbou ...) a nelze ho tedy měnit, parametry antén však lze volit, resp. ovlivňovat.

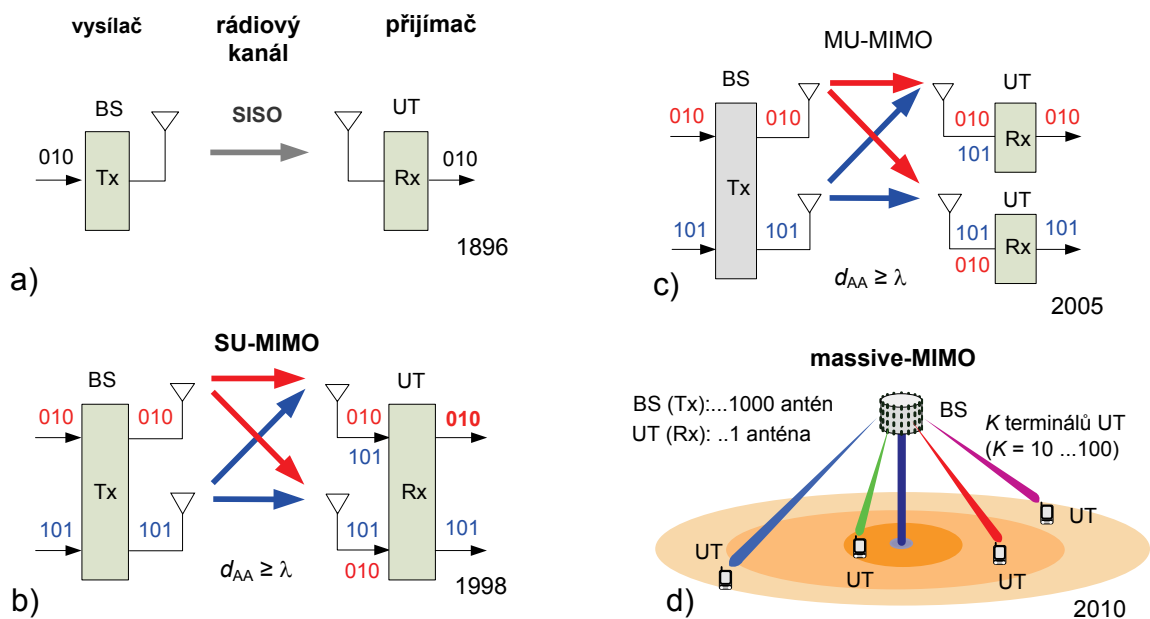
- V přijímači musí být zajištěn velký poměr signálu k interferencím a šumu $SINR$. Při daném útlumu rádiového kanálu, který nelze ovlivnit, toho lze dosáhnout především dostatečným výkonem vysílače a náležitými zisky antén.

- Pro optimální činnost systému MU-MIMO je zapotřebí, aby terminál UT i stanice BS měly stále k dispozici dokonalou informaci o stavu rádiového kanálu CSI (Channel State Information). Tu reprezentuje kanálová komplexní přenosová

matice (matice šíření), značená v mobilní komunikaci u kanálů frekvenčně i časově neměnných symbolem \mathbf{H} , u kanálů měnících se s frekvencí nebo s časem symbolem \mathbf{H} , resp. $\mathbf{H}(f, t)$. V praxi se systémy SU-MIMO provozují rovněž v suboptimálním režimu, tj. bez perfektní znalosti matice \mathbf{H} , ovšem se zhoršenými vlastnostmi.

3.2 Systémy MU-MIMO

Novější, v současné době velmi aktuální vývojovou variantou systémů MIMO jsou mnohouživatelské systémy MU-MIMO (Multi User MIMO), značené také symbolem PTMP-MIMO (Point to Multipoint MIMO) [4]. Na **obr. 1c** je zobrazena jejich nejjednodušší verze, kde základnová stanice obsahuje dvě dílčí antény a dva uživatelské terminály mají po jediné anténě. Základnová stanice BS může obsahovat obecně M antén, pomocí nichž současně komunikuje s K uživatelskými terminály UT, přičemž obvykle $M \approx K$. Každý z terminálů UT má většinou jen jedinou anténu, takže celkový počet antén všech terminálů $N \approx K$. V budoucnu, ve vyšších mikrovlnných a zejména milimetrových pásmech, ale bude možné vybavit každý terminál více anténami. Předností techniky MU-MIMO je jejich podstatně větší tolerance vůči vlastnostem rádiových kanálů BS \rightarrow UT, které zde totiž už nemusí být striktně ortogonální. V případě MU-MIMO lze např. připustit v menší míře přímé šíření LOS, zásadní překážku nepředstavuje ani nenulová korelace mezi anténními prvky na stanici BS apod. Mezi dvěma sousedními terminály musí být pouze dodržen dostatečný úhlový rozestup. Na rozdíl od systémů SU-MIMO je ale u MU-MIMO nutné, aby ve stanici BS byla neustále známa informace o aktuálním stavu rádiového kanálu CSI, tj. kanálová matice \mathbf{H} . V terminálech UT je žádoucí alespoň částečná skalární informace o ziscích jednotlivých uživatelských kanálů. Stanice BS využívá CSI k předkódování vysílaných symbolů pro K uživatelských a také k dekódování jejich signálů. Terminály UT úplnou, nebo částečnou informaci CSI aplikují při příjmu signálů přicházejících od BS.



Obr. 1. a) Rádiový systém SISO; b) Jednoúživatelský systém SU-MIMO přenášející dva nezávislé informační toky ve stejném pásmu; c) Mnohouživatelský systém MU-MIMO s více uživatelskými terminály UT; d) Masivní mnohouživatelský systém MU-MIMO s mohutným navýšením spektrální i energetické účinnosti.

Systémy MU-MIMO přinášejí v porovnání se systémy SU-MIMO řadu dalších výhod. Významná je především zvýšená buňková spektrální účinnost SE, která je dána tím, že tento systém podporuje sdílení stejných časově frekvenčních zdrojů všemi svými uživateli. Tato celková účinnost roste s růstem počtu antén M na BS a také s rostoucím počtem terminálů K . Avšak u terminálu s jedinou anténou se jejich individuální spektrální účinnost nezvyšuje. Zvýšená je i energetická účinnost EE, podstatně se zlepšuje také spolehlivost spojení. V systémech MU-MIMO se duplexní provoz na trase DL i UL u každého účastníka realizuje technikou frekvenčního duplexu FDD. Ten je však technicky přijatelný jen při malých hodnotách čísel M , resp. K . Tak například u nejspolehlivější verze systému 4. generace LTE-B je posledním stupněm varianta 8×4 MIMO. Další škálovatelnost (zvyšování hodnot M a K nad tuto hranici) se potom postupně stává již neúnosně složitou. Potíže zde působí především přenos odhadu kanálu CSI, neboť příslušné bitové zatížení zde roste s počtem M antén v základnové stanici.

3.3 Systémy masivní MIMO

Řešením uvedených problémů je přechod na nejnovější vývojový stupeň technik MIMO, jímž jsou systémy masivní MIMO (Massive MIMO), označované také jako VLS MIMO (Very Large Scale MIMO), FD MIMO (Full-Dimension MIMO), nebo MPTMP MIMO (Multipoint to Multipoint MIMO) [3], [4], [5]. Systémy masivní MIMO (**obr. 1d**) jsou variantou systémů MU-MIMO, avšak počet dílčích antén M v základnové stanici BS je zde několik stovek až tisíc. Tyto antény zajišťují simultánní provoz pro několik desítek až stovek uživatelských stanic UT. Problémy s přenosem informace CSI jsou zde radikálně vyřešeny použitím časového duplexu TDD. Při něm totiž zatížení sítě spojené s přenosem informace CSI vůbec nezávisí na počtu antén M stanice BS, který tedy z tohoto hlediska není nikterak omezen. Technologie masivní MIMO potom přináší, kromě atributů techniky MU-MIMO, další přednosti, které vyplývají právě z extrémně vysokého počtu antén M i terminálů K , při současném splnění podmínky $M/K \approx 10 \dots 20$. Na takovou koncepci lze totiž aplikovat zákon velkých čísel a díky tomu různé efekty, které měly při malých hodnotách M a N náhodný charakter, se stávají deterministickými a lze je proto snáze optimalizovat. Koncepce masivní MIMO vede především k další výrazné úspoře vysílacích výkonů na BS i UT. Při rostoucím počtu antén M na stanici BS se na trase UL zeslabuje efekt nekorelovaných šumů a úniku a slábnou také interference mezi signály vysílanými jednotlivými terminály. Velký počet antén M na stanici BS dovoluje použít jednoduché lineární techniky zpracování signálu, v terminálech UT se zpracování signálu rovněž zjednoduší. Imunita systémů MU-MIMO vůči špatné kondici jejich rádiových kanálů, dané hlavně přítomností šíření LOS, je u systémů masivní MIMO ještě dále posílena. Závažnou slabinou systému masivní MIMO jsou však interference od jiných vysílačů v sousedních buňkách, které způsobují tzv. kontaminaci pilotních signálů.

Vzhledem ke svým unikátním přednostem se stává technika masivní MIMO jedním z nejcennějších nástrojů přicházejících systémů mobilní komunikace páté generace (5G), umožňující radikální zlepšení většiny parametrů jejich rádiové přístupové sítě.

4 Přenosová kapacita klasických kanálů SISO a kanálů MIMO

U ideálního rádiového kanálu s jedinou vysílací a jedinou přijímací anténou, v němž působí jen aditivní bílý gaussovský šum AWGN, není možné přijímat bezchybně binární signál s neomezenou rychlostí. Při jeho vhodném optimálním kódování ve vysílači lze k přijímači přenést v pásmu B s libovolně malou chybovostí BER (lim $BER \rightarrow 0$) nejvýše jen určitý horní limit C , nazývaný kapacitou kanálu (channel capacity) a daný Shannonovým-Hartleyovým vztahem, označovaným také jako kanálový kapacitní teorém [2]

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{P}{N} \right) = B \log_2 (1 + SNR) \quad [\text{bit/s}], \quad (1)$$

přičemž $SNR = P/N$ je poměr užitečného výkonu P k šumu N na výstupu kanálu. Kapacita C je zde vyjádřena v bitech za sekundu, má tedy rozměr [bit/s]; tato veličina se nazývá také propustnost (channel throughput) rádiového kanálu. V praxi se však používá i normovaná kapacita $\log_2(1 + SNR)$, vyjádřená v bitech za sekundu a vztahená k pásmu 1 Hz. Ta se někdy označuje jen symbolem C , ačkoliv přesněji se jedná o poměr C/B , takže její rozměr je [bit/s/Hz]. Normovaná kapacita C/B vlastně vyjadřuje spektrální účinnost SE rádiového kanálu (channel spectrum efficiency).

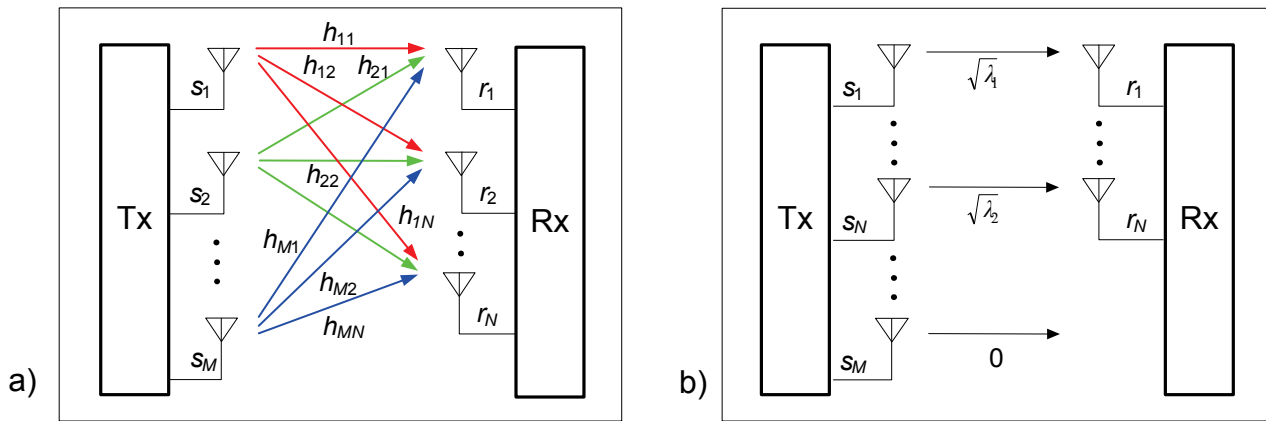
Vztah (1) pro kapacitu kanálu SISO je možné rozšířit na kanál MIMO. Telatar ve své originální práci [1] ukázal, že u rádiového kanálu SU-MIMO, na jehož vstupu je zařazeno M vysílacích antén a na výstupu N přijímacích antén, je při velkém poměru SNR a dalších vhodných podmínkách dosažitelná kapacita určena vztahem

$$C \approx \min(M, N) B \log_2 (1 + SNR) \quad [\text{bit/s}]. \quad (2)$$

Tato kapacita vyjadřuje zisk prostorového multiplexu SMG vůči jednoduchým systémům SISO. Ten tedy roste lineárně s činitelem $\min(M, N)$, tj. s menším z čísel M a N , a to při nezměněném vysílacím výkonu a nezměněné šířce pásma B . U systémů MU-MIMO a zejména u jejich varianty masivní MIMO je číslo M velké a počet uživatelských terminálů K může být rovněž velký. Celková propustnost (kapacita) systému MU-MIMO, vztahená na celou buňku, se tím v porovnání s SU-MIMO, radikálně zvětšuje. Při velkých číslech M a N a velkém počtu terminálů může být tento nárůst buňkové kapacity resp. spektrální účinnosti SE doslova gigantický a navíc se může současně výrazně zvyšovat i energetická účinnost EE daného systému MU-MIMO. Tento poznatek má pro další rozvoj rádiové komunikace fundamentální význam.

5 Přenos signálu a kapacita v úzkopásmových systémech SU-MIMO

Na **obr. 2a** je zobrazen jednoúživatelský systém SU-MIMO s M vysílacími a N přijímacími anténami. Mezi nimi se rozkládá rádiový kanál, který umožňuje každé přijímací anténě přijímat signály ode všech vysílacích antén. Přitom příslušné spoje mezi každou dvojicí antén mohou být tvořeny v mnohočetném prostředí nejen přímými trasami šíření LOS (jak ukazuje obrázek), ale i více dílčími nepřímými rádiovými cestami NLOS, které mají u techniky SU-MIMO dokonce



Obr. 2. a) Kanál SU-MIMO vytváří prostorový multiplex SDM (Space Division Multiplex) zvěšující výrazně přenosovou kapacitu; b) ekvivalentní kanál MIMO, získaný na bázi rozkladu singulárních hodnot SVD, nahrazuje kanál MIMO nezávislými kanály SISO, jejichž kapacity se sčítají; zobrazený případ odpovídá stavu, kdy $M > N$.

zásadní význam. Dále je uveden zjednodušený rozbor hlavních vlastností tohoto systému, obsáhlý exaktní rozbor naleznou zájemci v základních pramenech, uvedených v seznamu literatury.

Rádiový kanál z **obr. 2a** je možné považovat za lineární soustavu a popsat v obecném případě působení frekvenční a časové disperze kanálovou maticí \mathbf{H} , vyjadřující přenos mezi M anténami základnové stanice a N anténami uživatelského terminálu; tato matice má N řádků a M sloupců. Její prvky \mathbf{h}_{mn} o celkovém počtu $M \times N$ vyjadřují komplexní přenosy mezi všemi páry vysílacích a přijímacích antén. V reálných pozemských kanálech s mnohocestným šířením a pohybem různých objektů ležících v trase šíření, jsou tyto prvky do určité míry frekvenčně a časově závislé, což lze zdůraznit jejich zápisem $\mathbf{h}_{mn}(f, t)$. V jistém fixním časovém okamžiku však jsou konstantní a odpovídají tzv. realizaci kanálu.

V idealizovaném, pásmově omezeném rádiovém kanálu, v němž působí jen aditivní bílý gaussovský šum AWGN a nedochází zde k žádné disperzi procházejícího signálu, jsou prvky této matice trvale konstantní (časově a frekvenčně invariantní), takže se označují symbolem \mathbf{h}_{mn} .

Podle stupně závislosti na frekvenci resp. na čase se jednouchyvatelské systémy SU-MIMO dělí na úzkopásmové a širokopásmové. U úzkopásmových systémů je součin rozptylu zpoždění τ_d a šířky pásma B zaujímané signálem velmi malý, tj. platí relace $\tau_d B \ll 1$, resp. $B \ll B_{coh}$. U širokopásmových systémů SU-MIMO platí vztahy opačné, tedy $\tau_d B \gg 1$, resp. $B \gg B_{coh}$, jejich rozbor je však složitý a není dále uveden. Rádiový kanál úzkopásmového systému SU-MIMO lze v jistém časovém okamžiku popsat konkrétní realizací kanálové matice \mathbf{H} :

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_{11} & \mathbf{h}_{12} & \cdots & \mathbf{h}_{1M} \\ \mathbf{h}_{21} & \mathbf{h}_{22} & \cdots & \mathbf{h}_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{h}_{N1} & \mathbf{h}_{N2} & \cdots & \mathbf{h}_{NM} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

kde konstanty \mathbf{h}_{mn} ($n = 1, 2, \dots, N$; $m = 1, 2, \dots, M$) reprezentují komplexní zisky (koeficienty) dílčích kanálů mezi každou n -tou přijímací a m -tou vysílací anténou. Určitý m -tý sloupec

matice \mathbf{H} , značený symbolem \mathbf{h}_m , se nazývá prostorová signatúra m -té vysílací antény napříč přijímacími anténami. Tento sloupec představuje kanálový vektor $M \times 1$ mezi k -tým uživatelem a anténami pole stanice BS.

Úzkopásmový kanál daného systému je určen při každé své realizaci vztahem [4]

$$\mathbf{y} = \sqrt{\rho} \mathbf{H} \mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (4)$$

kde \mathbf{y} je N -složkový vektor přijímaného signálu, \mathbf{x} je M -složkový vektor vysílaného signálu a \mathbf{n} je N -složkový vektor přijímaného šumu. \mathbf{H} je deterministická konstantní matice typu $N \times M$, složená z komplexních koeficientů \mathbf{h}_{mn} . Skalár ρ je určen jako poměr vysílaného výkonu k varianci šumu (SNR), přičemž v sobě zahrnuje různé normující konstanty.

Jestliže je v přijímači k dispozici perfektní informace CSI, tj. úplná kanálová matice \mathbf{H} , a má-li vysílaný signál charakter gaussovského signálu i.i.d. (independent and identically distributed), je okamžitá kapacita, tj. maximálně dosažitelná rychlost, určena známou „logdet“ rovnicí

$$C = \log_2 \det \left(\mathbf{I}_N + \frac{\rho}{M} \mathbf{H} \mathbf{H}^H \right) \quad [\text{bit/s/Hz}]. \quad (5)$$

\mathbf{I}_N je matice identity typu $N \times N$ a výraz \mathbf{H}^H značí konjugovanou transpozici (Hermitianovskou transpozici) matice \mathbf{H} . Skutečná dosažitelná kapacita závisí především na stavu kanálu. Její maximum se objevuje při ideálním mnohocestném šíření bez složky LOS (kdy si jsou singulární hodnoty matice \mathbf{H} rovny) a naopak ve scénáři s šířením LOS je kapacita nejnižší.

Skutečný kompletní „maticový“ kanál MIMO podle **obr. 2a**, charakterizovaný maticí \mathbf{H} , je někdy výhodné převést s pomocí matematické rutiny označované jako rozklad do singulárních hodnot SVD (Singular Value Decomposition), do několika nezávislých paralelních kanálů SISO, tak jak ukazuje **obr. 2b** [2]. Zisky nových kanálů jsou určeny singulárními hodnotami kanálové matice \mathbf{H} a jejich počet odpovídá hodnotě (ranku) dané matice. Jejich určení je však u obecné matice \mathbf{H} poměrně složité a vybočuje z rámce tohoto článku.

Proces rozkladu SVD vyžaduje ve vysílaci speciální předkódování (precoding) a v přijímači inverzní kódování,

resp. tvarování (shaping) přenášeného signálu. Má ale velkou výhodu v tom, že při známé znalosti zisků dílčích kanálů SISO je možné ve vysílači rozdělit celkový vysílací výkon optimálně mezi tyto kanály. Toto rozdělení je založeno na principu teorému zaplnění vodou WFT (Water Filling Theorem) [2]. Podle něho se kanály s vyšším ziskem považují za spolehlivější (mají lepší "kondici"), a proto dostávají větší podíl z celkového vysílacího výkonu, horší kanály potom mají přiděleny nižší, nebo dokonce nulové vysílací výkony. Tím se dosáhne maxima přenosové kapacity.

U širokopásmových kanálů, u nichž jsou splněny relace $\tau_d B \gg 1$, resp. $B \gg B_{coh}$, je rozbor jejich funkce podstatně složitější. Jejich kanálová matice je funkcí frekvence, tedy $\mathbf{H}(f)$. U těchto kanálů dochází k frekvenčně selektivnímu úniku, při němž se objevují ve spektru přijímaného signálu výrazná minima. Takový širokopásmový frekvenčně závislý kanál lze však rozložit do několika paralelních nezávislých úzkopásmových kanálů, z nichž každý je popsán relací (4). Maximální kapacity se zde dosahuje při optimálním nerovnoměrném rozložení celkového vysílacího výkonu v jednotlivých úsecích frekvenčního spektra. Jedno z možných řešení poskytuje již zmíněný teorém zaplnění vodou WFT, uvažovaný však pro frekvenční oblast. Jeho aplikace vyžaduje dokonalou znalost informace CSI nejen v přijímači, ale i ve vysílači.

U pozemních kanálů je matice \mathbf{H} většinou závislá na frekvenci i na čase. K jejímu odhadu v přijímači (tj. ke zjišťování její hodnoty CSIR) slouží pomocné pilotní (referenční, trénigové) sekvence, vysílané opakovaně vysílačem v dostatečně krátkých periodách, jež jsou však známy i v přijímači. Jejich vyhodnocením potom přijímač může odhadovat matici \mathbf{H} . Existují však i metody tzv. slepého odhadu, které pomocné sekvence nevyžadují. Za ideálních podmínek informace o stavu kanálu CSI přesně vyjadřuje jeho vlastnosti, v praxi se však v jejím odhadu mohou vyskytovat chyby.

6 Mnohouživatelské systémy MU-MIMO

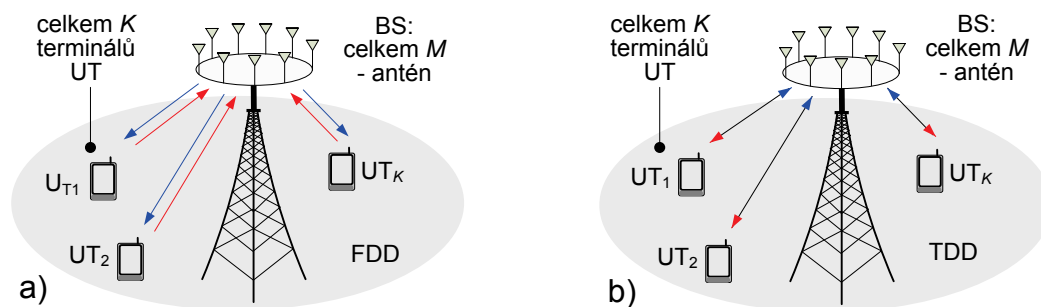
Hlavní předností systému SU-MIMO je jeho multiplexní zisk. Ten se však ztrácí při nepříznivém stavu rádiového kanálu (tj. při korelaci dílčích cest šíření, přítomnosti trasy LOS apod.), anebo u terminálů UT nacházejících se na okrajích buněk s malým poměrem SNR. Tyto nedostatky může odstranit mnohouživatelská koncepce MU-MIMO, aplikovaná v buňkových sítích a znázorněná pro nejjednodušší případ dvou terminálů na **obr. 1c**. Obecná koncepce MU-

MIMO má v základnové stanici BS celkem M antén, pomocí nichž současně komunikuje s K uživatelskými terminály UT, vybavenými obvykle jen jedinou anténou [3], [4]. Tyto terminály jsou většinou od sebe vzdáleny o více než několik délek vlny λ , takže jejich prostorová izolace je výborná. To na jednu stranu zlepšuje funkci prostorového multiplexu SDMA, na druhou stranu ale znemožňuje jejich kooperaci.

Uvažovaný mnohouživatelský kanál je na trase UL popsán obecně komplexní maticí \mathbf{H} mezi K uživateli a anténním polem základnové stanice BS. Přitom k -tý sloupec \mathbf{h}_k matice \mathbf{H} reprezentuje sloupcový kanálový vektor mezi k -tým uživatelem a stanicí BS. V uvažovaném systému MU-MIMO se předpokládá, že jak stanice BS, tak všechny terminály UT mají k dispozici dokonalou informaci CSI, reprezentovanou právě maticí \mathbf{H} . Díky prostorovému oddělení potom může všech K uživatelů sdílet stejné časově-frekvenční zdroje. V systému je uvažován pouze mnohocestný únik, vliv ztrát šířením a zastíněním je zanedbán.

Na **obr. 3a** je znázorněn mnohouživatelský systém MU-MIMO, skládající se z jediné základnové stanice BS s anténním polem s M anténami, která komunikuje s K aktivními uživatelskými terminály UT, přičemž $M \approx K \leq 8 \dots 10$. Současný provoz v obou směrech se zde realizuje technikou frekvenčního duplexu FDD. Všechny K stanic se provozuje na sestupné trase DL ve stejném frekvenčním pásmu, které je odděleno od pásma vzestupné trasy UL bezpečnostním duplexním odstupem Δf . Na **obr. 3b** je znázorněn podobný mnohouživatelský systém MU-MIMO, avšak současný provoz v obou směrech se v tomto případě realizuje technikou časového duplexu TDD na jediné nosné vlně. Všechny K stanic přitom využívá na sestupné trase DL i na vzestupné trase UL stejné frekvenční pásmo, avšak různé časové sloty. Izolace tras UL a DL však není u žádné z obou variant (FDD/TDD) nikdy zcela dokonalá, takže zde vzniká akutní nebezpečí mnohouživatelských interferencí MAI (Multiple Access Interference). Ty představují jeden ze základních omezujících činitelů systémů MU-MIMO.

Pozemní rádiové kanály MIMO jsou postihovány úniky, jež jsou dvojího typu. Prvním jsou úniky ve velkém měřítku, které jsou však dále zanedbány. Anténní pole na BS je totiž dostatečně kompaktní, takže všechny složky šíření od určitého terminálu UT směrem k BS jsou postihovány tímto únikem v podstatě stejně. Pozornost je však nutné věnovat únikům v malém měřítku, způsobeným mnohocestným šířením. Jejich vlivem velikost prvků matice \mathbf{H} fluktuuje, přičemž fluktuační jsou typu IID a sledují gaussovské rozložení s nulovou střední hodnotou a jednotkovou variancí. Pro zjednodušení početního



Obr. 3. Mnohouživatelské systémy MU-MIMO se základnovou stanicí BS s M anténami, které komunikují s K uživatelskými terminály, z nichž každý má jednu anténu: a) frekvenční duplex FDD; b) časový duplex TDD .

rozboru je však možné uvnitř určitých časově frekvenčních bloků považovat prvky \mathbf{H} za téměř konstantní (block fading model). Tyto bloky jsou určeny jako součin koherentní doby (intervalu) kanálu T_{coh} a koherentní šířky pásma B_{coh} , tedy $T = T_{coh}B_{coh}$. Tak např. pro typické hodnoty $T_{coh} = 1,0$ ms a $B_{coh} = 200$ kHz má blok pro daný kanál hodnotu $T = 200$, takže do něho lze umístit např. 200 symbolů o šířce 1 kHz a době trvání 1,0 ms.

6.1 Přenos signálu a kapacita na trase UL v systémech MU-MIMO

Na vzestupné (reverzní) trase UL systému MU-MIMO vysílá K uživatelů své signály k základnové stanici BS (**obr. 3**). Jelikož všichni tito uživatelé sdílejí stejné časově frekvenční zdroje, je signálový vektor \mathbf{y}_{UL} typu $M \times 1$, přijímaný v základnové stanici BS, určen jako kombinace signálů vysílaných všemi K uživateli, tedy [5], [6]

$$\mathbf{y}_{UL} = \sqrt{\gamma_{UL}} \sum_{k=1}^K \mathbf{h}_k s_k + \mathbf{n} \quad (6)$$

$$= \sqrt{\gamma_{UL}} \mathbf{H} \mathbf{s} + \mathbf{n}, \quad (7)$$

přičemž γ_{UL} je průměrný poměr signálu k šumu každého uživatele, \mathbf{h}_k je kanálový vektor mezi k -tým uživatelem a stanicí BS a s_k je normovaný symbol vysílaný k -tým uživatelem. V symbolickém vektorovém zápisu je \mathbf{H} kanálová matice vyjadřující přenos mezi K uživateli a anténním polem základnové stanice s M anténami. Vektor signálových vzorků je určen vztahem $\mathbf{s} \triangleq [s_1 \dots s_K]^T$, přičemž index T značí jeho transpozici. Vektor $\sqrt{\gamma_{UL}} \mathbf{s}$ reprezentuje symboly simultánně vysílané K uživateli. Aditivní šum je popsán svým vektorem \mathbf{n} , jeho elementy jsou Gaussovské náhodné proměnné typu i.i.d., s nulovou střední hodnotou a jednotkovou variancí, nezávislé na kanálové matici \mathbf{H} .

Pomocí přijímaného vektoru \mathbf{y}_{UL} a znalosti kanálu CSI lze ve stanici BS koherentně detekovat signály přicházející od K uživatelů. Relace (4) představuje model kanálu UL (kanál s mnohonásobným přístupem), jehož sumární kapacitu určuje vztah [5], [6]:

$$C_{UL,SUM} = \log_2 \det (\mathbf{I}_K + \gamma_{UL} \mathbf{H}^H \mathbf{H}), \quad (8)$$

přičemž \mathbf{I}_K je jednotková matice řádu K a \mathbf{H}^H je konjugovaná transpozice matice \mathbf{H} . Této kapacity lze dosáhnout např. technikou postupného anulování interferencí SIC (Successive Interference Cancellation) a dalšími, jejichž popis však přesahuje rámec této práce.

6.2 Přenos signálu a kapacita na trase DL v systémech MU-MIMO

Na sestupné trase DL vysílá základnová stanice BS své signály ke všem K uživatelským terminálům UT (**obr. 3**). Nechť \mathbf{x} je normovaný signálový vektor vysílaný z anténního pole základnové stanice BS. Signál přijímaný k -tým uživatelem [5], [6]

$$\mathbf{y}_{DL,k} = \sqrt{\gamma_{UL}} \mathbf{h}_k^T \mathbf{x} + z_k, \quad (9)$$

kde γ_{UL} je průměrný poměr SNR, \mathbf{h}_k^T je transpozice prvků \mathbf{h}_k kanálové matice a z_k je aditivní šum k -tého uživatele. Předpokládá se, že z_k se řídí gaussovským rozložením, s nulovou střední hodnotou a jednotkovou variancí. V souhrnu přijímaný signálový vektor K uživatelů lze psát ve tvaru

$$\mathbf{y}_{DL} = \sqrt{\gamma_{UL}} \mathbf{H}^T \mathbf{x} + \mathbf{z}, \quad (10)$$

přičemž \mathbf{H}^T je transpozice matice \mathbf{H} a signálové vektory \mathbf{y}_{DL} a \mathbf{z} jsou definovány relacemi $\mathbf{y}_{DL} \triangleq [y_{DL,1} \ y_{DL,2} \dots \ y_{DL,K}]^T$ a $\mathbf{z} \triangleq [z_1 \ z_2 \ \dots \ z_K]^T$. Model kanálu dle (10) potom odpovídá kanálu DL (vysílací kanál), jehož výsledná sumární kapacita je

$$C_{SUM} = \max \log_2 \det (\mathbf{I}_M + \gamma_{UL} \mathbf{H}^* \mathbf{D}_q \mathbf{H}^T), \quad (11)$$

$$q_k \geq 0, \sum_{k=1}^K q_k \leq 1$$

přičemž \mathbf{H}^* je konjugovaná matice k matici \mathbf{H} a \mathbf{D}_q je diagonální matice, jejíž k -tý element je q_k . Sumární kapacity (11) je možné v praxi dosáhnout např. aplikací optimální kódovací techniky DPC (Dirty Paper Coding).

Literatura

- [1] Telatar, I. E. Capacity of the multiple antenna Gaussian channel. *European Transactions on Telecommunications*, 1999, vol. 10, no. 6, p. 585–595.
- [2] Tse, C., Wiswanath, P. *Fundamentals of Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005.
- [3] Marzetta, T. L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 2010, vol. 9, no. 11, p. 3590–3600.
- [4] Rusek, F., Persson, D., Lau, B. K., Larsson, E. G., Marzetta, T. L., Edfors, O., Tufvesson, F. Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays. *IEEE Signal Process. Mag.*, Jan. 2013, vol. 30, no. 1, p. 40–46.
- [5] Ngo, H. Q. *Massive MIMO: Fundamentals and Systems Designs*. Dissertations No. 1643, Linköping University, Sweden, 2015.
- [6] Pakdeejit, E., Ngo, H. Q. *Linear Precoding Performance of Massive MU-MIMO Downlink System*. M.S. thesis, Dept. Elect Eng, Linköping university, Sweden, 2013.

Pokračování v příštím čísle.