

Prenosové systémy využívajúce princípy diverzity

Gladišová Iveta · Elektrotechnika, Informačné technológie

11.03.2013



Článok sa zaoberá prenosovými systémami využívajúcimi princípy diverzity a problematikou bezdrôtového systému MIMO, ktorý je v dnešnej dobe už súčasťou niekoľkých medzinárodných štandardov. Poskytuje pohľad na MIMO kanál ako taký, jeho kapacitu v porovnaní s tradičnými komunikačnými kanálmi, a popisuje rôzne typy diverzít.

Vysvetlená je aj dôležitosť informácie o stave kanála pre prijímače či vysielače.

Úvod

Za účelom poskytovania stabilnej kvality služby je v Rayleigho a Ricanovom prostredí s únikmi potrebné veľké množstvo vysielačieho výkonu, aby sme zabezpečili, že nezávisle od úrovne úniku bude stále k dispozícii adekvátny výkon na dekódovanie signálu. Nikdy nemôžeme dosiahnuť dokonalý prenos, ale s využitím rôznych riešení je možné realizovať také prenosové systémy, ktoré dostatočne vyhovujú vopred stanoveným požiadavkám na parametre prenosu.

Jedným z týchto riešení je využitie princípu diverzity. Existuje niekoľko technológií, ktoré diverzitu využívajú a v tomto článku je priblížená problematika MIMO technológie, ktorá vykazuje mimoriadne výhodné prenosové vlastnosti z hľadiska kapacity kanála a spektrálnej efektivity.

Diverzita a MIMO systémy

Techniky diverzity, ktoré zmiernujú úniky pri viaccestnom šírení sa signálov, pomalé aj rýchle, sa nazývajú mikro-diverzitné, pričom tie, ktoré sú výsledkom straty prenosovej cesty, tienenia kvôli budovám a podobne, sú rádovo pomalšie ako viaccestné, sa nazývajú makro-diverzitné techniky. Problémy pri MIMO návrhoch (Multiple Input/Multiple Output) sa vzťahujú len na mikro-diverzitu. Makro-diverzita je obvykle riešená poskytovaním prekrývajúceho sa pokrytia základňovými stanicami a algoritmiami handoveru, a ide o samostatný nezávislý prevádzkový problém [1].

Najjednoduchším príkladom zvýšenia diverzity v časovej doméne je opakovanie symbolu N krát. Interleaving je ďalším príkladom časovej diverzity, kde symboly sú umelo oddelené v čase, teda vytvárajú časovo oddelené a teda nezávislé kanály s únikmi pre susedné symboly. Kódovanie s opravou chýb taktiež dosahuje diverzitu časových domén oddelovaním symbolov v čase. Takéto metódy diverzity časových domén sa nazývajú časová diverzita.

Frekvenčná diverzita môže byť zabezpečená šírením dát na frekvencii, ako je to realizované na systémoch s rozprestretým spektrom. Pri OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) je frekvenčná diverzita zabezpečená vysielením každého symbolu na inej frekvencii. Vo všetkých systémoch s frekvenčnou diverzitou musí byť separácia frekvencií väčšia, ako je koherenčná šírka pásma kanála, aby mohla byť zachovaná nezávislosť. Typ diverzity, ktorý sa využíva v MIMO, sa nazýva priestorová diverzita.

Diverzita na prijímacej strane je použitie viac ako jednej prijímacej antény. Zisk SNR (Signal to Noise Ratio) je realizovaný z viacerých prijatých kópií. Rôzne druhy lineárnych kombinačných techník môžu zobrať prijaté signály a použiť priestorové kombinačné techniky ako sú kombinovanie/skladanie maximálnych pomerov (maximal ratio combining), kombinovanie prahových hodnôt, atď. Dôsledkom zvýšenia SNR pomocou kombinovania je výkonový zisk. SNR zisk sa nazýva pole zisku (array gain) [2].

Diverzita na vysielačej strane podobne znamená, že máme viacero vysielačích antén na vysielačej strane, čo vytvorí viaceré prenosové cesty a potenciál pre uhlovú diverzitu. Pod uhlovou diverzitou môžeme rozumieť vytváranie lúčov/zväzkov. Ak má vysielač informáciu o stave kanála, teda vie kde sú úniky a ktorá prenosová cesta (teda smer) má najlepšie prenosové vlastnosti, môže sústrediť výkon do príslušného smeru. Toto je ďalšia forma dosiahnutia možného zisku s MIMO.

Ďalšia forma diverzity je polarizačná diverzita, ako sa používa v satelitných komunikáciách, kde sú nezávislé signály vysielené na každej polarizácii (horizontálnej a vertikálnej). Kanály, hoci na rovnakej frekvencii, obsahujú nezávislé dáta na dvoch polarizovaných, teda ortogonálnych prenosových cestách. Toto je taktiež forma MIMO, kde dva nezávislé kanály vytvárajú zvýšenie prenosovej rýchlosti namiesto diverzity.

MIMO

V čase, keď systémy s viacerými vstupmi a viacerými výstupmi tzv. MIMO boli opísané v strede deväťdesiatych rokov Gerardom Foschinim [4] a inými, prekvapujúca efektivita šírky pásma takýchto technológií sa zdala byť v rozpore so Shannonovým limitom. Žiaden rozpor však v skutočnosti neexistoval, pretože diverzita a spracovanie signálu použité v MIMO transformujú jednoduchý kanál typu bod-bod do viacerých paralelných alebo maticových kanálov, čo spôsobuje násobenie kapacity. MIMO ponúka vyššie prenosové rýchlosti a spektrálnu efektivitu. Táto výhoda je tak jasná, že mnoho štandardov už inkorporovalo MIMO technológiu.

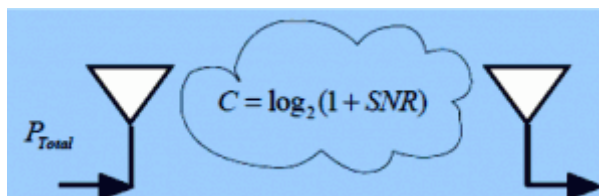
ITU (International Telecommunication Union) používa MIMO vo vysoko rýchlostnom paketovom prístupe HSPDA (High Speed Downlink Packet Access), časti UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) štandardu. MIMO je taktiež časťou štandardu 802.11n, používanom bezdrôtovými smerovačmi, a taktiež 802.16 pre mobilný WiMax, ktorý je využívaný mobilnými sieťami. LTE (Long Term Evolution) štandard takisto inkorporuje MIMO.

Tradičná komunikačná linka, ktorú nazývame kanál s jednoduchým vstupom a jednoduchým výstupom tzv. SISO (Single-In-Single-Out) má jeden vysielač a jeden

prijímač. Ale namiesto jedného vysielača a jedného prijímača ich môžeme použiť niekoľko. SISO kanál sa potom stane kanálom s viacerými vstupmi a viacerými výstupmi, alebo MIMO kanálom, teda kanálom s viacerými vysielačmi a viacerými prijímačmi.

Porovnanie MIMO a SISO kanála

V prvom rade sa pozrieme na kapacitu SISO linky, označenú ako C , ktorá je špecifikovaná počtom bitov, ktoré môžu byť prenesené cez kanál a sú merané metrikou (b/s/Hz).



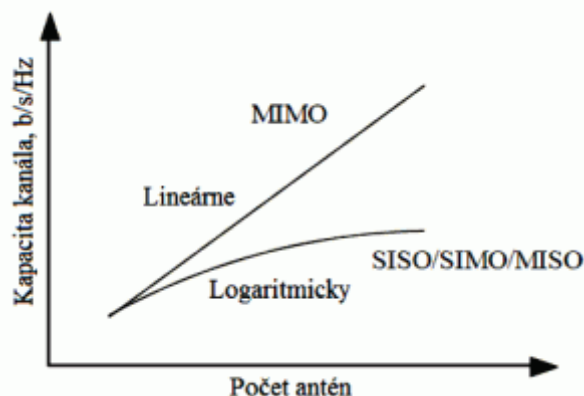
Obr.1: Claude Shannonova kapacita SISO kanála [1]

Kapacita SISO linky je iba funkciou SNR kanála, ako je dané rovnicou v Obr. 1. Tento kapacitný vzťah bol stanovený Claudom Shannonom a je taktiež nazývaný informačno-teoretická kapacita. SNR v tejto rovnici je definované ako celkový výkon vydelený výkonom šumu. Ak je výkon kanála , t.j. SNR rovný 10 dB, jeho kapacita bude:

$$C = \log_2(1 + 10) = 3.46 \text{ b/s/Hz} \quad (1)$$

Z tohto vzťahu vyplýva, že desať násobné zvýšenie výkonu, teda SNR na 20 dB, zvýši kapacitu kanála na 6,65 b/s/Hz, čo je menej ako dvojnásobok pôvodnej kapacity. Sto násobné zvýšenie výkonu zvýši kapacitu kanála iba na 9,96 b/s/Hz, čo je približne trojnásobok pôvodnej kapacity. Kapacita sa zvyšuje ako logaritmická funkcia SNR, čo je pomalé zvyšovanie. Zjavne zvyšovanie kapacity akýmkoľvek výrazným faktorom si žiada enormné množstvo výkonu v SISO kanáli.

S MIMO sa presunieme do odlišnej paradigmy kapacity kanála. Aby sme si vytvorili predstavu o tom, čo je možné s MIMO, keď pridáme šesť antén na vysielačnej aj prijímacej strane, môžeme dosiahnuť rovnakú kapacitu, ako pri stonásobnom zvýšení výkonu v SISO kanáli. Jediné čo sme v tomto prípade urobili je, že sme urobili vysielač a prijímač viac komplexný, bez akéhokolvek zvýšenia výkonu. Dosiahli sme rovnaké vlastnosti ako pri stonásobnom zvýšení výkonu. Toto zistenie je pomerne zaujímavé a stojí za to preskúmať ho bližšie. Na Obr. 2 vidíme porovnanie SISO a MIMO systémov za použitia rovnakého výkonu. Kapacita MIMO systému sa zvyšuje lineárne s počtom antén, pričom SISO/SIMO/MISO systémy sa zvyšujú iba logaritmicky.

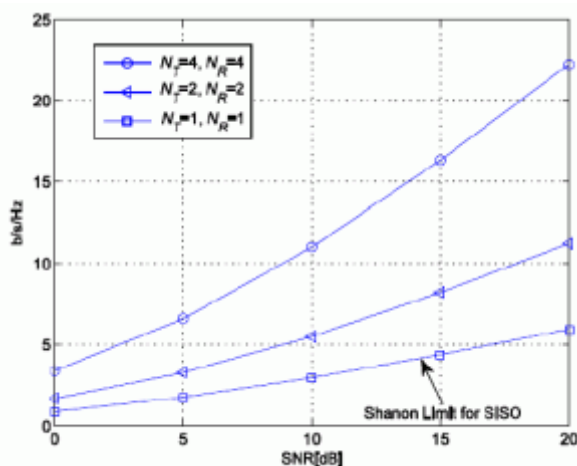


Obr.2: Porovnanie kapacity kanála v závislosti od počtu antén

Na koncepcnej úrovni by sa dal MIMO systém považovať za spôsob rozšírenia dimenzií komunikácie. Avšak pri MIMO nejde o viacnásobný prístup. Nie je ako FDMA (Frequency Division Multiple Access), pretože všetky kanály používajú rovnakú frekvenciu, a nie je ani ako TDMA (Time Division Multiple Access), keďže všetky kanály pracujú simultánne. Nie je spôsob ako separovať kanály v MIMO použitím kódu, ako je to pri CDMA (Code Division Multiple Access) a nie sú tu ani „steerable“ (koronárne) alebo smart antény ako v SDMA (Space Division Multiple Access). MIMO otvára celkom odlišnú dimenziu.

To, čo tu máme, nie je jeden kanál, ale viacero, $N_R \times N_T$ antén, kde N_T je počet antén na vysielačnej strane a N_R na prijímacej strane. Podobne ako pri myšlienke OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), signál sa šíri viacerými cestami a potom je rekombinovaný, aby sa nadobudli dané zisky.

Na Obr. 3 je porovnanie SISO kanála s dvomi MIMO kanálmi s počtom antén (2×2) a (4×4). Pri SNR s 10 dB ponúka 2×2 MIMO systém 5,5 b/s/Hz, pričom 4×4 MIMO systém ponúka cez 10 b/s/Hz. Je to obdivuhodné zvýšenie kapacity bez akéhokolvek zvyšovania vysielačného výkonu. Iba pomocou zvýšenia počtu vysielačov. Dokonca tieto prenosové vlastnosti získavame na kanáloch, ktoré boli vždy považované za nekvalitné, s únikmi a Dopplerovým javom.



Obr.3: Porovnanie teoretickej kapacity MIMO systémov s limitnou kapacitou pre SISO systém [1]

Rozšírenie vzoru SISO linky je zjavné, na zvýšenie kapacity jednoducho replikujeme

linku N krát. Použitím N liniek zvýšime kapacitu o faktor N . Avšak tento návrh taktiež používa N -násobok výkonu. Keďže linky sú často výkonovo obmedzené, myšlienka N liniek na zvýšenie kapacity N násobne nie je taký veľký trik. Môžeme zvýšiť počet liniek bez toho, aby sme potrebovali vyšší výkon? A čo keby sme použili dve antény, pričom každá by dostala polovicu výkonu? MIMO robí práve to, že na viacerých vysielacích anténach je rozložený pôvodný celkový výkon. Otázka ostáva, aké to spôsobí zvýšenie kapacity. Zvýšenie informačno-teoretickej kapacity v MIMO je pomerne veľké (viď rovnicu v Obr. 4) [3] [4] a ľahko ospravedľňuje zvýšenie zložitosti.

$$C = \max_{P(x_n) \geq 0} \log \det \left\{ I_N + \frac{1}{\sigma^2} H R_{xx} H^H \right\}$$

Obr. 4.: Teoretická kapacita kanála MIMO systému [1]

Jednoducho povedané, MIMO je ktorákoľvek linka, ktorá ma viacero vysielacích a prijímacích antén. Vysielacie antény sú umiestnené od seba vo vzdialenosti o niečo menšej ako polovica vlnovej dĺžky. To je približne 1 cm pri 14 GHz a 7,5 cm pri 2 GHz. Tento obrázok separácie antén je určený vzájomnou korelačnou funkciou antén použitím Jakovho modelu [5]. Prijímacie antény sú taktiež časťou jednej jednotky. Tak ako pri SISO linkách, uvažuje sa, že komunikácia prebieha medzi jedným vysielateľom a jedným prijímačom, hoci MIMO systém je taktiež používaný vo variante viacerých užívateľov, podobným spôsobom ako OFDM môže byť použité pre jedného, alebo aj viacerých užívateľov. Vzťah medzi vstupom a výstupom SISO kanála môžeme zapísať ako:

$$r = hs + n \quad (2)$$

kde r je prijatý signál, s je vyslaný signál, h je impulzová odpoveď kanála a n je šum. Výraz h , impulzová odpoveď kanála, si môžeme predstavovať buď ako zisk, alebo stratu, zmenu fázy, alebo časové oneskorenie, alebo všetky tieto prvky dohromady. Hodnota h môže byť považovaná za zlepšujúci alebo rušivý činiteľ SNR signálu. Použitím rovnakého modelu ako SISO, MIMO kanál môže byť opísaný ako:

$$R = HS + N \quad (3)$$

V tejto formulácii sú vyslané S aj prijaté R signály vektormi, ako aj N je šumový vektor. Impulzná odpoveď kanála h je teraz matica H . Táto kanálová matica H je v MIMO literatúre nazývaná „Channel Information“.

Klasifikácia návrhu komunikačných liniek MIMO

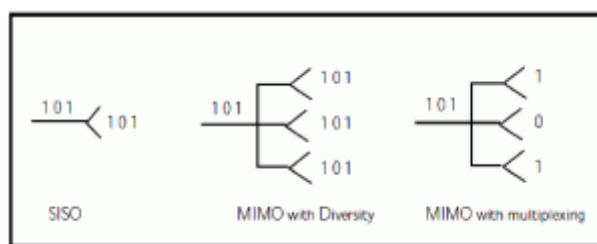
Návrh MIMO komunikačných liniek môže byť klasifikovaný dvomi spôsobmi:

- MIMO použitím diverzitných techník
- MIMO použitím priestorovo-multiplexných techník

Obe z týchto techník sa v MIMO systémoch používajú spoločne. V prvom prípade,

diverzitej technike, sú rovnaké dáta prenášané na viacerých vysielačích anténach, čo spôsobuje zvýšenie diverzity systému. Diverzita v MIMO znamená, že rovnaké dáta boli prenášané rôznymi cestami, aby sa dostali k prijímaču. Diverzita zvyšuje spoľahlivosť komunikácií. Ak je niektorá z ciest slabá, tak kópia dát prijatých cez inú cestu môže byť postačujúca.

Na Obr. 5 vidíme, že zdroj vysiela sekvenciu dát 101 cez MIMO systém s tromi vysielačmi. V diverzite MIMO sú rovnaké dáta (101) vyslané cez tri rôzne vysielače. Ak každá z týchto ciest je charakterizovaná rôznymi únikmi, tak je vysoká pravdepodobnosť, že jedna z nich zabezpečí úspešný príjem. Teda toto je myslené pod pojmom diverzita, alebo diverzité systémy. Tento systém má diverzitný zisk s hodnotou 3.



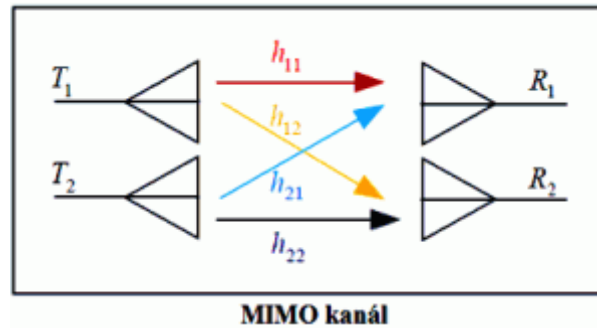
Obr. 5: Ekvivalenty MIMO systémov; a) SISO systém, b) MIMO diverzitný systém, c) MIMO systém s multiplexovaním

Druhá forma využíva priestorovo-multiplexné techniky. V diverzítom systéme posielame rovnaké dáta cez každú z prenosových ciest. V tomto prípade však multiplexujeme dáta 1, 0, 1 na troch kanáloch. Každý kanál nesie odlišné dáta, podobne ako pri myšlienke OFDM signálu. Multiplexovaním dát sme zjavne zvýšili dátovú priepustnosť alebo kapacitu kanála, ale stratili sme diverzitný zisk. Multiplexovaním sme strojnásobili dátovú rýchlosť, teda multiplexný zisk je 3, ale diverzitný zisk je teraz 0. Kým v diverzítom systéme je zisk vo forme zvýšenej spoľahlivosti, tu predstavuje zisk zvýšenú dátovú rýchlosť.

Charakteristika MIMO kanála

Keď kanál používa viacero prijímacích antén NR a viacero vysielačích antén NT, nazýva sa systém s viacerými vstupmi a viacerými výstupmi (MIMO). V typickom SISO kanáli jednoducho vysiela dáta a dúfame, že sa dostanú k prijímaču. Pokiaľ vieme, že SNR sa nijako dramaticky nemení, nie je nutné skúmať kanál na úrovni bitov. Takýto kanál nazývame stabilným kanálom. Znalosť o kanáli SISO kanála je charakterizovaná iba jeho ustáleným SNR.

Predpokladajme, že máme linku s dvomi vysielačmi a dvomi prijímačmi. Vysielať rovnaké symboly z každej antény na rovnakej frekvencii, ktoré sú prijímané na dvoch prijímačoch (Obr. 6). Každá prenosová cesta od vysielača k prijímaču má určitú stratu/zisk a daný kanál môžeme touto stratou charakterizovať. (Prenosová cesta môže v skutočnosti pozostávať z veľa komponentov, ale je charakterizovaná len začiatočnými a koncovými bodmi). Keďže všetky štyri kanály v tomto prípade nesú rovnaký symbol, zabezpečuje to diverzitu tým, že silnejšie kanály „nahrádzajú“ slabšie.



Obr. 6: Zobrazenie MIMO kanála s 2 vysielacími a 2 prijímačmi

S počtom antén, teda zvýšením prenosových ciest MIMO systému, súvisí zvýšenie diverzity. So zvyšovaním počtu vysieláčov môžeme kompenzovať všetky úniky. So zvyšovaním diverzity začína kanál s únikmi vyzeráť ako Gaussov kanál, čo je veľmi vítaný výsledok.

Vzťah medzi vyslaným a prijatým signálom v MIMO môže byť reprezentovaný v maticovej forme s maticou H reprezentujúcu dolnopriepustovú kanálovú odpoveď h_{ij} , ktorá je kanálovou odpoveďou prenosovej cesty z i -tej vysielacej antény na j -ty prijímač. (slová prijímač a prijímacia anténa sú často používané ako synonymá. Niektoré sa vzťahujú na vysieláč, iné na vysielaciu anténu). Matica H o veľkosti (N_R, N_T) má N_R riadkov reprezentujúcich N_R prijatých signálov, pričom každý z nich pozostáva z N_T komponentov z N_T vysieláčov. Každý stĺpec matice H reprezentuje komponenty prichádzajúce z jedného vysieláča na N_R prijímačov.

Matica H sa nazýva „kanálová informácia“. Každý z jej prvkov je koeficient skreslenia prejavujúci sa na amplitúde alebo fáze vyslaného signálu v časovej doméne. Ako sa k tejto informácii dostaneme? Vyšleme symbol len cez prvú anténu, pričom odpoveď je zachytená všetkými tromi prijímačmi (3×3 MIMO systém). Následne zvyšné dve antény urobia to isté a postupne pribúdajú stĺpce s tromi novými odpoveďami.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} 0.2 & -0.6 & 0.8 \\ -0.1 & 0.8 & 0.6 \\ 0.1 & 0.4 & 0.2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

V tomto príklade, keď je vyslaný symbol 1 prvým vysieláčom, každý z troch prijímačov vidí hodnoty amplitúd $[0,2, -0,1, 0,1]$. Tento proces sa opakuje ešte dvakrát a matica H je skompletizovaná. Všimnime si, že matica H je vytvorená len prijímačmi, teda vysieláče nevedia, ako vyzerá prenosový kanál. Vysielajú naslepo. Keď potom prijímač vyšle túto maticu späť k vysieláču, tak vysieláč bude schopný vidieť ako vyzerajú signály na prijímači a na základe toho by mohol prispôbiť rozloženie výkonu do vysielacích antén. Možno sa počítač na vysieláči rozhodne nevysielať cez anténu 1, keďže prijatý signál z tejto antény je v porovnaní s ostatnými dvomi príliš malý (v amplitúde). Výkon by mohol byť rozložený medzi anténu 2 a 3 a anténa 1 by mala ostať vypnutá, až kým by sa prenosové vlastnosti tohto kanála nezlepšili. Práve týmto spôsobom to aj funguje.

Dôležitosť informácie o stave kanála

Matica H predstavuje jadro fungovania MIMO. Odkazuje sa na ňu ako na stav kanála,

informáciu o stave kanála, atď. Vo všeobecnosti budeme predpokladať, že prijímač je schopný získať informáciu o kanáli jednoducho a nepretržite. Nie je rovnako možné pre prijímač získať „čerstvú“ verziu informácie o stave kanála, pretože táto informácia cestou k vysielaču „zostarla“. Pokiaľ však oneskorenie prenesenia signálu je menšie ako koherenčný čas kanála, informácia poslaná späť od prijímača k vysielaču si zachová svoju aktuálnosť a použiteľnosť pre vysielač na pracovanie s jeho výkonmi.

Na prijímači nazývame kanálovú informáciu ako informácia o stave kanála na prijímači (Channel State Information at the Receiver, CSIR). Podobne, ak je kanálová informácia prístupná na vysielači, nazývame ju informácia o stave kanála na vysielači (CSIT). Informácia o stave kanála, teda kanálová matica môže byť známa okamžite na prijímači alebo na vysielači, alebo na oboch. Hoci kanál môže mať na krátkom časovom úseku nenulovú strednú hodnotu, predpokladá sa že má nulovú strednú hodnotu a je nekorelovaný v oboch smeroch. Ak sú smery korelované, tak máme zjavne menej informácií na získanie. Ale stále môžeme kanál sprevádzkovať.

Kanálová informácia môže byť extrahovaná monitorovaním prijatých ziskov známej sekvencie. V komunikácii s časovo deleným duplexom (Time Division Duplex, TDD), kde vysielač aj prijímač pracujú na rovnakej frekvencii, stav kanála je ľahko prístupný vysielaču. Pri komunikáciách s frekvenčne deleným duplexom (Frequency Division Duplex, FDD), keďže priame a spätné linky pracujú na rôznych frekvenciách, je vyžadovaná špeciálna linka odozvy z prijímača k vysielaču. V skutočnosti diverzita na prijímacej strane sama o sebe je veľmi efektívna, ale ukladá väčšie bremeno na menšie prijímače, tým že si vyžadujú vyššiu hmotnosť, rozmery a zložité spracovanie signálu, teda zvyšuje sa aj cena.

Vysielacia diverzita je jednoduchšia na implementáciu zo systémového hľadiska, pretože veže základňových staníc v bunkovom systéme nie sú limitované výkonom alebo hmotnosťou. Dokonca na pridanie viacerých vysielacích antén na základňových staniách je taktiež použité priestorovo-časové kódovanie na vysielačoch. To spôsobí, že spracovanie signálu na prijímačoch je jednoduchšie.

Záver

Témou článku bolo vo všeobecnosti popísať využitie princípu diverzity v prenosových systémoch. Na demonštráciu bola vybraná technológia MIMO, ktorá využíva priestorovú diverzitu. Bol popísaný MIMO komunikačný kanál v porovnaní so SISO kanálom a charakteristika tohto kanála. Priblížená bola kapacita MIMO kanála a dôležitosť informácie o stave kanála. Dá sa konštatovať, že kapacita MIMO systému sa zvyšuje lineárne s počtom antén, pričom pri SISO systémoch ide o logaritmické zvyšovanie. MIMO teda ponúka vyššie prenosové rýchlosti a spektrálnu efektívnosť.

Podakovanie



Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku / Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ. Tento článok bol vypracovaný v rámci projektu "Centrum excelentnosti integrovaného výskumu a využitia progresívnych materiálov a technológií v oblasti automobilovej

elektroniky”, ITMS 26220120055.

Literatúra

1. LANGTON, Charan - SKLAR, Bernard: Finding MIMO [online]. 2011 [cit. 2012-12-25].
Dostupné na internete:
<http://www.complextoreal.com/chapters/mimo.pdf>
2. TSE, David - VISWANATH, Pramod: Fundamentals of Wireless Communication, 2005,
ISBN-13: 9780511123849
3. FOSCHINI, G. - GANNS, M.: On limits of wireless communications in a fading
environment when using multiple antennas. In: Wireless Personal Communications, vol.
6, 1998, pp. 311-335.
4. TELATAR, E.: Capacity of Multiantenna Gaussian Channels. In: European Transactions
on Telecommunications, vol. 10, no. 6 (1999), pp. 585-595.
5. EBRAHIMI-TOFIGHI, N. - ARDEBILIPOUR, M. - SHAHABADI, M.: Receive and
Transmit Array Antenna Spacing and Their Effect on the Performance of SIMO and
MIMO Systems by using an RCS Channel. In: World Academy of Science, Engineering
and Technology, 2007, pp. 1 - 5.

Spoluautorom článku je Virág Ladislav, Katedra elektroniky a multimediálnych
telekomunikácií, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita Košice
