

Uporaba tehnologije MIMO v satelitskih komunikacijah

Jure Janez Markovič, Peter Miklavčič, Boštjan Batagelj

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Laboratorij za sevanje in optiko, Tržaška c. 25, 1000 Ljubljana
E-pošta: jm2134@student.uni-lj.si

Use of MIMO Technology in Satellite Communications

As the demand for satellite services is increasing, the idea of introducing advancing multiple-input multiple-output (MIMO) technology emerged. In various land-based communication applications, MIMO is providing signal gains while maintaining resources such as bandwidth, power, etc. While both theoretical and practical experiments have shown promising results, there are several setbacks in the implementation of MIMO in satellite communications, mainly due to the radio channel specifics not in favour of spatial multiplexing beyond polarization MIMO.

1 Uvod

Tehnologija več vhodov in več izhodov (angl. multiple input multiple output – MIMO) se raziskuje že od 70. let prejšnjega stoletja [1], a je pravi razcvet doživela šele v zadnjih 20 letih, ko se je izkazala za izvrstno v sistemih brezžične komunikacije. V klasičnem komunikacijskem modelu z eno oddajno in eno sprejemno anteno (angl. single input single output – SISO) je maksimalna zmogljivost kanala odvisna od omejene frekvenčne pasovne širine ter razmerja med močjo signala in šuma (angl. signal to noise ratio – SNR), zato se je pokazala potreba po sistemu, ki bi brez dodatne pasovne širine in energije omogočal višje zmogljivosti.

V komunikacijah MIMO se uporablja več anten na sprejemni in oddajni strani in s tem omogoči prenos več podatkovnih signalov preko istega brezžičnega komunikacijskega kanala, pri čemer se izrabi pojav razširjanja po več poteh. V teoriji se z dodajanjem anten doseže linearno rast zmogljivosti, večjo spektralno učinkovitost, izboljšano pokritost in doseg, s tem pa boljše kakovost storitve (angl. quality of service – QoS) z nižjo pogostostjo napak (angl. bit error rate – BER) oziroma nižjo porabo energije na oddajni strani. MIMO posledično omogoča večje število uporabnikov in tudi zmanjšanje stroškov za licenciranje frekvenčnih pasov.

Prva večja uporaba MIMO se je zgodila leta 1994 [2], ko je bilo oddajanje velikega podatkovnega toka razdeljeno na manjše, ki so bili oddajani preko prostorsko ločenih oddajnikov. Ta ideja je danes osnova za delovanje visoko zmogljivih omrežij Wi-Fi ter mobilnih sistemov 4G in 5G. Teorijo so kasneje razširili (G. Raleigh, 1996), da je mogoče učinkovito izrabit razširjanje signala po več poteh.

Ta prispevek opisuje težnjo in možnosti po uporabi tehnologije MIMO v satelitskih komunikacijah. V nadaljevanju najprej sledi opis lastnosti komunikacije MIMO, nato pa je predstavljen satelitski model MIMO.

2 Lastnosti komunikacije MIMO

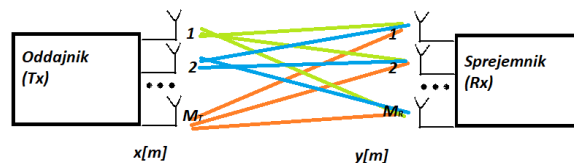
2.1 Osnovni model MIMO

V sistemu MIMO je več fizično ločenih anten na oddajni in sprejemni strani, pri čemer je med njimi nezanimljiva razdalja, kot prikazuje slika 1.

Vsaka izmed oddajnih anten M_T v radijski kanal pošlje signal $x[m]$, ki prispe na več sprejemnih anten M_R . Na posamezni anteni sprejet signal $y[m]$ je posledica vplivov kanala in šuma

$$y[m] = Hx[m] + w[m], \quad (1)$$

kjer predstavlja H matriko kanala dimenzije $M_T \times M_R$, $w[m]$ pa sprejet šum na posamezni anteni. Ugodnejši pogoji za prenos preko medija so v teoriji ustvarjeni zgolj z dodajanjem anten.



Slika 1. Osnovni model sistema MIMO

Realen časovno spreminjajoč kanal še poveča računsko zahtevnost. Dekodiranje pri sprejemu vsebuje poleg procesa detekcije tudi ocenjevanje kanala. Če je koherentni čas kanala večji od časa prenesenega bloka, lahko obravnavamo kanal kot konstanten. Podobno storimo tudi s pasovno širino signala, ki jo privzamemo kot precej manjšo, kot je koherentna pasovna širina kanala.

Kljub matematični kompleksnosti nam tehnika analize kanala omogoči dobitke, ki se kaže v višjem SNR. Tega se doseže s koherentnim kombiniranjem signalov na več sprejemnih (Rx) ali oddajnih (Tx) antenah. SNR se poveča za faktor števila oddajnih anten M_T . Do dobitka lahko pridemo z metodo kombiniranja maksimalnega razmerja (ang. maximum ratio combining) ali pa z metodo oblikovanja oziroma tvorjenja snopov. Zavedati pa se moramo, da je za uspešen prenos potrebno zadostno poznavanje lastnosti kanala.

Glavna prednost oblikovanja snopov je zmanjšanje oziroma izogibanje motnjam. Usmerjanje snopa se doseže z uporabo več medsebojno razmaknjenih anten, ki oddajajo enak, a fazno zamaknjen in amplitudno utežen signal. Končni efekt je konstruktivna interferenca v želenih in destruktivna v neželenih smereh.

Če privzamemo, da v sistemu kanalna matrika ni znana na oddajni strani, lahko na sprejemni za blokovno konstanten presihajoč kanal zapišemo zmogljivost [3]:

$$C(H) = \sum_{i=1}^r \log_2 \left(1 + \frac{1}{\sigma_w^2} \lambda_i \right), \quad (2)$$

kjer upoštevamo rang matrike $H(r)$, lastne vrednosti matrike HH^H ter Gaussovo porazdelitev šuma (σ_w^2).

2.2 Zmogljivost MIMO sistemov

Radijski vmesnik z MIMO ima določene omejitve zmogljivosti, ki jih moramo poznati za nadaljnje načrtovanje sistemov. Upoštevati moramo, da je naš model najpogosteje podvržen Gaussovemu kanalu, ki je naključen, a ima znano verjetnostno porazdelitev. Vprašati se moramo o zmogljivosti določenega kanala pri določenem energijskem vložku. Če osnovni model razpišemo z dekompozicijo vrednosti, dobimo ekvivalenten kanal, ki pa je sestavljen iz več paralelnih Gaussovih kanalov sestavljenih iz belega aditivnega šuma [3]

$$\tilde{y}_i = \sigma_i \tilde{x}_i + \tilde{w}_i; \quad i = 1, 2, \dots, r. \quad (3)$$

Ta način razmišljanja najbolj koristi, ko izbiramo optimalno porazdelitev moči na antenah kanalov. Med te Gaussove kanale lahko razporejamo moč in na podlagi SNR določamo posamezno in skupno zmogljivost.

Pri tem je potrebno upoštevati, da je tudi MIMO kanal presihajoč. S tem se pojavi ergodična in izpadna prenosna zmogljivost. Prva predstavlja zgornji limit zmogljivosti povprečenih čez vse intervale, medtem ko druga maksimalno konstantno podatkovno hitrost, ki jo lahko ohranjamo skozi več intervalov. Slednja je primernejša v bolj ekstremnih razmerah, kot na primer v okoljih z Rayleighovim sipanjem (tudi v satelitskih komunikacijah). Z ergodično zmogljivostjo lahko potrdimo, da ima dodajanje anten kjerkoli v sistemu pozitiven vpliv na zmogljivost kanala. Vendar je pomembno, na kateri strani se antena doda. Sprejemne antene povzročijo večji doprinos, medtem ko se dodajanje oddajnih anten slabše obestuje. Po drugi strani izpadna zmogljivost vpliva na to, kakšen bo dobiček raznolikosti oziroma multipleksa.

2.3 Ocena kanala in kanali modela

Pri sistemu MIMO je še bolj kot v sistemu SISO pomembno poznati kanal in medij preko katerega se prenaša signal. Skozenj se pošilja signale, ki se širijo po različnih poteh in odbijajo od različnih predmetov, kar povzroči zakasnitve ter Dopplerjev premik in razpršitev. Odziv kanala zaznanega na sprejemniku je torej vsota vseh poslanih signalov, ki so poleg vnesenega šuma še pod vplivom že naštetih pojavov.

V tehnologiji MIMO se večpotje izrabi za povečanje raznolikosti, ki pomeni prejem več različno zakasnenih in uteženih kopij oddanega signala, če je v kanalu prisotno neodvisno presihanje v časovni, frekvenčni oziroma prostorsko-polarizacijski dimenziji. Z namenom izrabljanja stanja kanala je potrebno ustvariti model, ki je postavljen na osnovi razširjanja signala (deterministični ali geometrijski pristop) ali analitično (propagacijski ali korelacijski pristop).

Področje ocene kanala je zelo kompleksno, pomembno pa je, da se vse metode med seboj razlikujejo po okoljih, v katerih optimalno delujejo. Satelitski kanal je za MIMO zelo neprijazno okolje, saj je na poti večinoma prazen prostor razen odbojev od vertikalnih površin blizu sprejemnika na Zemlji. Sprejeti signal je razpršen v času, frekvenci in prostoru, kar primarno povzroči kotno razpršitev moduliranih simbolov. Za prostorski opis presihajočega MIMO kanala se zato izbere stohastičen princip. Korelacijo med posameznimi sprejemnimi antenami povzročata premajhna medsebojna razdalja in pomanjkanje razpršilnih predmetov. Z večjo korelacijo anten se zmanjšuje prostorska raznolikost. Najbolj natančen izračun prostorske korelacijske matrike je preveč kompleksen, zato se običajno uporabi Gaussov ali Kroneckerjev model (analitična metoda).

Ocena stanja kanala, ki se naredi s prenosom pilotnih simbolov, je pomembna na sprejemni (izravnavna, detekcija) in oddajni strani (predkodiranje, predizravnavna, logika MIMO).

2.4 Časovno-prostorske kode in detektorji

Pri snovanju sistema MIMO smo v že omenjeni dilemi med raznolikostjo in multipleksnim dobitkom, ki se med seboj izključujeta. Kljub temu pa lahko z uspešnim prostorsko-časovnim kodiranjem (PČK) še dodatno izboljšamo raznolikost, s tem da v prostorsko in časovno dimenzijo vnesemo redundantne informacije. PČK vsebujejo modulacijo, ki omogoča raznolik sprejem in tudi kodo za odpravljanje napak. Njihova glavna naloga je načrtovanje podatkovnih bitov v oddajni vektor $x[m]$. Vsak nosi M_T simbolov po M bitov.

Velik premik je povzročila Alamoutijeva shema (S.M. Alamouti (October 1998)), kjer se z dodajanjem konjugiranih parov signala poveča redundanco, ki pa je bolj odporna na spreminjajoče se razmere v kanalu. Upoštevajoč, da so sprejemne antene bolj koristne, je enačba pogostosti napak [3]

$$\log(BER) \propto M_T M_R \log(SNR). \quad (4)$$

Vsaka antena predstavlja podtok, saj demultipleksiramo vsak tok podatkov v M_T . V primeru, da na sprejemni strani poznamo kanal, lahko povsem obnovimo podatke. V tem primeru smo izkoristili dobiček iz naslova raznolikosti [3]

$$C \propto \min(M_T, M_R). \quad (5)$$

V komunikacijah MIMO igrajo pomembno vlogo detektorji, ki izvajajo dodatno obdelavo in dekodiranje.

Na logičnem nivoju se v grobem loči linearno detekcijo, odločevalno detekcijo s povratnimi informacijami, detekcijo z največjo verjetnostjo (angl. maximum likelihood – ML) ter sferično dekodiranje. Detekcija z največjo verjetnostjo ima najvišjo učinkovitost in tudi kompleksnost, medtem ko odločevalna detekcija s povratnimi informacijami predstavlja nekakšen kompromis. Glavni nalogi vseh vrst

detektorjev sta vrednotenje prenesenih podatkov in oceniti vpliv MIMO kanala na sprejemni strani.

V primeru satelitskih komunikacij je treba računati na znižano stopnjo raznolikosti ter v določenih pogojih tudi na nizek SNR. V tem pogledu je detekcija največje verjetnosti najboljša, saj izrabi vso razpoložljivo raznolikost. Ker ji kompleksnost raste z M_T , se išče tudi druge rešitve, kot je sferično dekodiranje, ki izrabi dvo- (ali več)-dimenzionalno naravo informacij zakodiranih v MIMO prenos. Na podlagi radija, ki ga določimo sami, iščemo najustreznejše vrednosti pri dekodiranju sprejetih informacij. Kljub temu, da se kompleksnost ponovno povečuje eksponentno z M_T , je ta v povprečju precej bolj učinkovita. Po drugi strani je kompleksnost te metode zelo nepredvidljiva in je v nasprotju z deterministično naravo metod, kot so »Zero Forcing«, »Minimum mean square error«, itd. Tu je zelo pomembna izločitev elementov matrike H in njihovih vplivov na signal ter model kanala. Že omenjene linearne metode so manj kompleksne a tudi manj natančne, žrtvuje pa se tudi red raznolikosti, ki je v satelitskih komunikacijah že po naravi kanala nizek.

2.5 Tvorjenje snopov in predhodno kodiranje

Metoda formiranja snopov, ki je ena glavnih prednosti MIMO, je pogojena s poznavanjem kanala. V grobem jo lahko uvrščamo med vrste predhodnega kodiranja in je odvisna od kvalitete oddajne strani. Za uspešno delovanje so potrebne povratne informacije, kar poveča podatkovno režijo kanala. S tem se doseže stopnjo raznolikosti $M_T M_R$, kar je še posebej dobrodošlo v satelitskih komunikacijah. Formiranje snopov je učinkovitejše od Alamoutijeve časovno prostorske kode zaradi večjega dobitka ustvarjene zbirke. Zato ga izkorišča linearno predkodiranje, ki izrablja že omenjene linearne kode (MF, ZF, MMSE). Te imajo različno kompleksnost in so na splošno dobre za večuporabniške sisteme.

3 Satelitski komunikacijski kanal

Ker je velik del uspešnosti MIMO odvisen od poznavanja kanala, je uporabnost MIMO v satelitskih komunikacijah na prvi pogled sorazmerno neučinkovita. V več tisoč kilometrov obsegajočem kanalu je lahko zelo različno stanje, ker se satelitski komunikacijski sistemi med seboj razlikujejo po hitrosti premikanja, lokaciji na tirnici in uporabljenem frekvenčnem spektru. Pri tem je potrebno upoštevati, da signal potuje skozi različne medije (vakuum, zrak, para,..) in med potjo naleti na ovire (naravni in umetni predmeti, vremenski pojavi,..). Te ovire ustvarijo v kanalu neobičajne razmere, ki so drugačne od tipičnih prizemeljskih. Večino fiksnih satelitskih zvez deluje v frekvenčnih pasovih nad 10 GHz, medtem ko mobilne zveze, kjer je bilo do sedaj opravljenih največ izboljšav s pomočjo MIMO, delujejo pod 10 GHz. Slednje zadevajo tudi najrazličnejše ovire, ki so posledica urbanih, predmestnih in ruralnih okolij. Pri satelitskih zvezah je precej manj razpršilnih predmetov kot v urbanem ali ruralnem okolju na Zemlji.

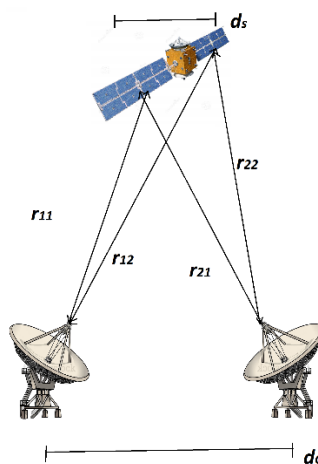
Pri fiksnih satelitskih zvezah je potrebna direktna pot signala (angl. line of sight – LOS) med satelitom in zemeljskim terminalom. Če je poleg te na poti prisotnih malo razpršilnih predmetov, MIMO ne bo prinesla velikih dobitkov iz naslova raznolikosti zaradi večpotja. Je pa dokazano, da se kljub temu doseže povišanje prenosne zmogljivosti zaradi optimizacije geometrije.

3.1 Primeri uporabe MIMO

Najbolj raziskan je primer zemeljsko mobilnega satelita (angl. Land Mobile Satellite – LMS) [4], kjer je v režimu neposredne vidljivosti (LOS) že kanalska matrika 2×2 pokazala izboljšanje. Navzkrižno polarna izolacija je pogojena zgolj s polarizacijskimi lastnostmi antene. Je pa zato boljše oviran LOS in pride do pojava večpotja, ki ga povzročijo razpršilni predmeti. Če primerjamo SISO in MIMO kanal pri istih pogojih, zaznamo dvakratno povečanje prenosne zmogljivosti pri visokem SNR. To je zahvaljujoč medsebojni izolaciji dveh med seboj neskladnih polarizacij.

Projekt MIMOSA (angl. Characterisation of the MIMO channel for mobile satellite systems) je drugi primer, ki je že bil praktično izveden. Glavni pobudnik je bila Evropska vesoljska agencija. Raziskava je bila usmerjena na opazovanje presihanja v satelitskem kanalu. Ugotovili so, da je to odvisno od uporabljenega frekvenčnega pasu in polarizacije [5, 6].

Raziskave so pokazale, da sistem LOS-MIMO lahko pridobi dodatno prostorsko stopnjo svobode (angl. degree of freedom) z uporabo pravilno razmaknjenih anten na oddajni ali sprejemni strani [7, 8]. Komunikacija proti zemeljski postaji lahko doseže maksimalno spektralno učinkovitost kljub razširjanju z neposredno vidljivostjo. Prostorski multipleks je prisoten, nanj vpliva razdalja med satelitom in zemeljskim sprejemnikom. Težava pa se pojavi pri iskanju optimalne postavitve sprejemnih in oddajnih anten. Premikanje in sukanje satelitskega ter zemeljskega modula je lahko zelo zapleteno, pogosto nemogoče. Zaradi tega pogojem za idealen LOS-MIMO razmik v satelitskih komunikacijah praviloma ni zadoščeno.



Slika 2. Razdalje pri satelitski komunikaciji. Posledica razlik v razdaljah so raznoliki elementi matrike H (h_{xx}).

V LOS okolju mora biti razmak med antenami na eni ali drugi strani reda nekaj sto kilometrov. Ker je lahko razmak med antenami na enem satelitu največ nekaj metrov, je potreben velik geografski razmik na Zemlji.

Zadnja velika skupina aplikativni primerov MIMO v satelitskih komunikacijah so MU-MIMO, kjer »MU« označuje več uporabnikov (angl. multiple-user). V tem primeru govorimo o satelitih, ki oddajajo več snopov (angl. multi-beam satellites). V primerjavi s tradicionalnim enouporabniškim »point-to-point« sistemom MIMO, ti ugodno delujejo tudi v režimu neposredne vidljivosti. Za uspešno izvedbo sistema MU-MIMO je potrebno predhodno kodiranje in detekcija več hkratnih signalov. To je potrebno za omilitve vpliva motenj, ki omejujejo učinkovitost sistema.

4 Zaključek

Gibanje satelitov in Zemlje vpliva na ortogonalnost kanala, ki je najbolj odvisna od geometrije. MIMO v satelitskih komunikacijah v praksi lahko pomeni precejšnje finančno in logistično breme, saj se z vpeljevanjem tehnologije MIMO poveča kompleksnost sistema in prostorski pogoji. Na satelitih potrebujemo zmogljivo enoto za procesiranje digitalnih signalov, poleg tega pa vsaka antena oziroma MIMO kanal potrebuje svojo radio-frekvenčno enoto. Višja je tudi kompleksnost na programskem nivoju, poleg dodatne logike so algoritmi za procesiranje signalov dokaj računsko zahtevni.

V satelitskih sistemih z MIMO je pomembno predvsem pozicioniranje anten. Največ težav povzroča okolje, ki je za razliko od običajnega (pri)zemeljskega večinoma prazno, kar onemogoča razširjanje signala po več poteh, kar je eden izmed predpogojev za uvedbo MIMO. Zato se na prvi pogled zdi, da MIMO ni primeren za uporabo v satelitskih komunikacijah. Vendar število novih aktivnih satelitov narašča, potreba po optimizaciji obstoječih sistemov pa se povečuje in morda katera izmed izvedenk MIMO (kot na primer LOS-MIMO) prispeva k omilitvi potrebe po velikih količinah umetnih satelitov za moderne širokopasovne storitve, kot je na primer satelitski internet v nizki zemeljski orbiti.

Literatura

- [1] Wikipedia, the free encyclopedia [Online], članek MIMO. Dosegljivo: <https://en.wikipedia.org/wiki/MIMO>. [Dostopano: 25. 5. 2021].
- [2] A. Paulraj in T. Kailath, »Increasing capacity in wireless broadcast systems using distributed transmission/directional reception«, US patent No. 5.345.5999, 6. 9. 1994.
- [3] Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn Gerald Matz, Univ.Prof. Ing. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Christoph Mecklenbräuer: Predavanja z naslovom 'MIMO communications', 2020.
- [4] P. R. King, "Modelling and measurement of the land mobile satellite MIMO radio propagation channel," Ph.D. dissertation, Apr 2007.

- [5] "MIMOSA: Characterisation of the MIMO channel for mobile satellite systems." European Space Agency, <https://artes.esa.int/projects/mimosa-characterisation-mimo-channel-mobile-satellite-systems>
- [6] F. Burkhardt, E. Eberlein, S. Jaeckel, G. Sommerkorn, and R. Prieto-Cerdeira, "MIMOSA-a dual approach to detailed land mobile satellite channel modeling," International Journal of Satellite Communications and Networking, vol. 32, no. 4, pp. 309–328, 2014. <http://dx.doi.org/10.1002/sat.1045>
- [7] B. Ramamurthy, »MIMO for Satellite Communication Systems,« University of South Australia, 22. avgust 2018.
- [8] J. Kyröläinen, et al., »Applicability of MIMO to satellite communications,« Int. J. Satell. Commun. Network. 2014; 32:343–357.