

1. Smart antény

Priestorové spracovanie ostáva najslubnejšou, ak nie poslednou hranicou vo vývoji systému s viacnásobným prístupom.

Posledné desaťročie zaznamenali bezdrôtové technológie impozantne rýchly nárast, vďaka čomu sa vytvorili nové a vylepšené služby za nižšie ceny. Odrazilo sa to v obrovskom raste počtu hovorov, ako aj predplatiteľov služieb. Najpraktickejším riešením tohto problému je priestorové spracovanie. Ako povedal Andrew Viterbi, zkladateľ Qualcomm Inc. „Priestorové spracovanie ostáva najslubnejšou ak nie poslednou hranicou vo vývoji systému s viacnásobným prístupom“.

Priestorové spracovanie je hlavnou ideou v oblasti adaptívnych antén alebo systému smart antén. Hoci sa môže zdať, že adaptívne antény boli objavené len nedávno, datujú sa už v obranných systémoch počas druhej svetovej vojny. Je to vďaka vývoju výkonných nízko nákladových procesorov digitálneho signálu (DSPs), univerzálnych procesorov (aplikačno-špecifických integrovaných obvodov ASICs), rovnako ako inovačný softvér založený na inovatívnych algoritmoch spracovania signálu, ktorý v smart anténnych systémoch priniesol obrovský celosvetový záujem.

Smart anténa technológia má potenciál výrazne zvýšiť efektívne využívanie frekvenčného spektra v bezdrôtových komunikačných aplikáciách v porovnaní so súčasnými metódami. Prostredníctvom inteligentného riadenia prenosu a príjmu signálov sa kapacita a pokrytie mobilných bezdrôtových sietí výrazne zlepšilo.

Existuje celá rada smart antén využívajúcich rôzne metódy poskytujú zlepšenia v rôznych bezdrôtových aplikáciách. V literatúre existuje viacero definícií smart antén. K trom najpoužívanejším patria:

- Smart anténa je postupné alebo adaptívne pole, ktoré sa prispôsobí prostrediu.
- Smart anténny systém v sebe spája niekoľko prvkov antény so schopnosťou spracovania signálu k optimalizácii jeho žiarenia.
- Smart antény sú polia anténnych prvkov, ktoré menia ich anténnu štruktúru dynamicky sa prispôsobujúcu hluku, rušeniu v kanáli a zmierneniu multipath.

Smart antény (Obr. 12.1) zvyčajne využívajú pole antén spojené s riadiacou jednotkou alebo digitálny signálový procesor. Takéto antény vyvinuté pre mobilné siete sú zamerané na nahradenie štandardných antén mobilných telefónov.



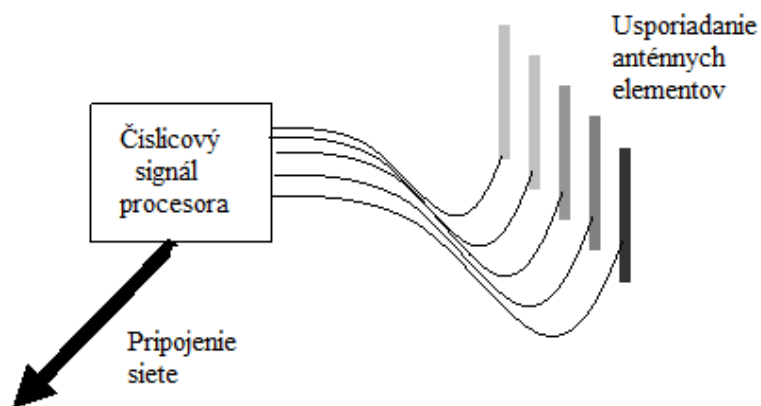
Obr. 1.1: Smart anténa

Smart anténa je viacprvková anténa, kde sú signály prijímané v každom anténnom prvku s cieľom zlepšiť výkon bezdrôtového systému. Na rozdiel od toho, klasické antény sú zložené z vysielача (jedna anténa) a prijímača (druhá anténa).

Fyzické prekážky ako sú kopce, budovy alebo dokonca aj elektrické vedenia, bránia prenosu všetkých elektromagnetických vln, vrátane rádiových vln. Aj keď tieto objekty nie sú schopné zvyčajne úplne blokovať rádiové vlny, vedú prinútiť rádiové vlny k rozptylu, ale tieto zvyčajne trvajú dotedy než dosiahnu svoj cieľ. Tieto objekty môžu dokonca znemožniť časti signálu dosiahnuť prijímač. Smart antény môžu tento problém vyriešiť tým, že vytvoria niekoľko kópií rovnakých dát tak, aby každá časť mala väčšiu šancu na dosiahnutie cieľa (prijímača).

Smart antény je možné použiť prakticky pre ľubovoľnú aplikáciu, ktorá zahŕňa rádiové signály. Sú najviac používané v domácich a komerčných bezdrôtových počítačových sieťach, ale stali sa populárne i v televíznych, rozhlasových a telekomunikačných systémoch, v astronómii či radaroch.

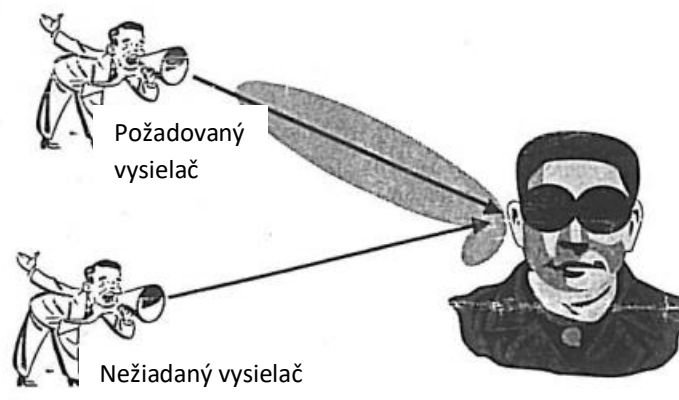
Smart antény systém je možné definovať ako rozšírenie buniek do sektorov. Pokrytie sektora je zložené z viacerých lúčov, pričom počet lúčov je funkciou geometrie polí. Smart anténa je systém zahrňujúci niekoľko anténnych elementov.



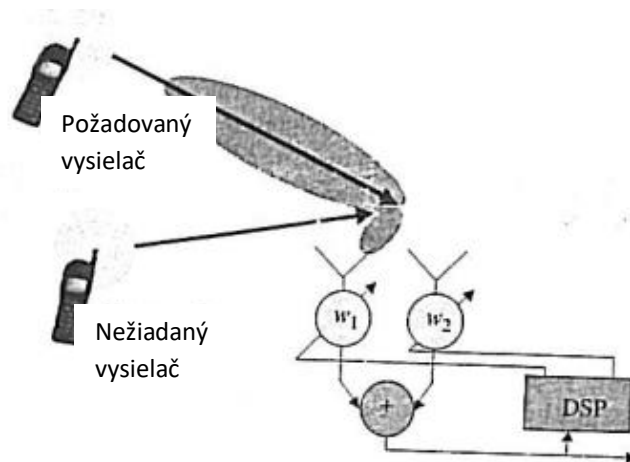
Obr. 1.2: Smart antény systém

1.1. Analógia smart antény

Pre lepšie pochopenie, ako funguje smart antény systém, si predstavme dve osoby, ktoré udržiavajú konverzáciu v tmavej miestnosti (Obr. 12.3a). Poslucháč je schopný určiť polohu hovoriaceho medzi dvoma osobami, ak sa pohybuje po miestnosti, pretože hlas hovoriaceho dorazí do každého sluchového senzora, ucha, v inú dobu. Procesor signálov, mozog, určí smer prichádzajúceho zvuku z časových rozdielov alebo oneskorenia hlasu medzi dvoma senzormi, ušami. Potom mozog pridá silu signálu z oboch uší tak, aby sa zameril na zvuk z určeného smeru. Navyše, ak sa do rozhovoru zapoja ďalší hovoriaci, môže mozog stíšiť nežiaduce rušenia a sústrediť sa na jeden rozhovor v čase. Naopak, poslucháči môžu reagovať späť rovnakým smerom požadovaného reproduktora nasmerovaním vysielateľa (úst) smerom k reproduktoru.



a)



b)

Obr. 1.3: Analógia smart antény: (a) pre človeka a (b) pre elektrický ekvivalent

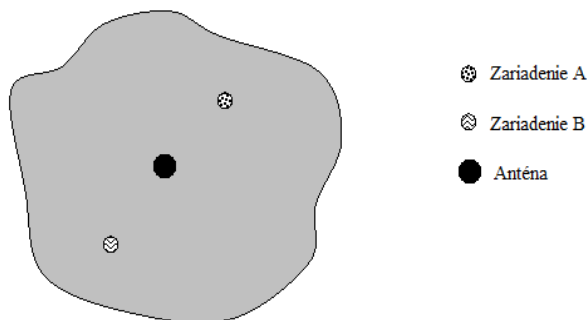
Elektrický systém smart antény pracuje na rovnakom princípe, využívajúc dve antény namiesto dvoch uší a procesor digitálneho signálu (DSP) namiesto mozgu (Obr. 12.3b). Preto potom ako procesor digitálneho signálu odmeria dobu oneskorenia z každej antény, vypočíta smer príchodu (DOA-direction of arrival)

signálu, ktorý nás zaujíma (SOI-signal-of-interest), a potom upraví excitáciu pre vytvorenie vzoru vyžarovania, ktorý sa zameria na SOI alebo stíši akékoľvek signály, ktoré nás nezaujímajú (SNOI-signal-not-of-interest).

1.2. Rozdelenie smart antén

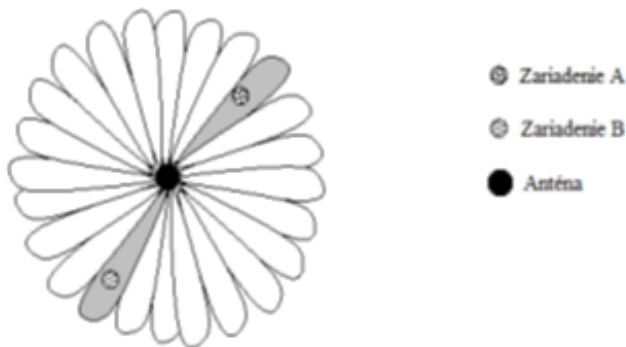
Smart antény môžeme rozdeliť na niekoľko typov:

- *Klasická anténa* (Obr. 12.4): táto anténa nepatrí medzi smart (chytřé) antény. Vyžarovanie signálu je rovnomerne rozprestreté okolo elementu antény (všesmerová – izotropná anténa).



Obr. 1.4: Klasická izotropná anténa

- *Anténa s prepínaním lalokov* (Obr. 12.5): je dokonalejšia ako klasický typ. J podstate menej zložitá a lacnejšia ako ostatné typy smart antén. Komunikácia prebieha lalokom v smere zariadenia (prijímača) a je použitá pre vysielanie a príjem. V prípade presunu cieľa (prijímača) z lúča, prvok antény sa musí prepnúť na vysielanie a na príjem na prvok (lalok) s dosahom na zariadenie (cieľ). Je vhodná na integráciu s existujúcimi klasickými anténami, takže je možné jej použitie v staršej sieti.



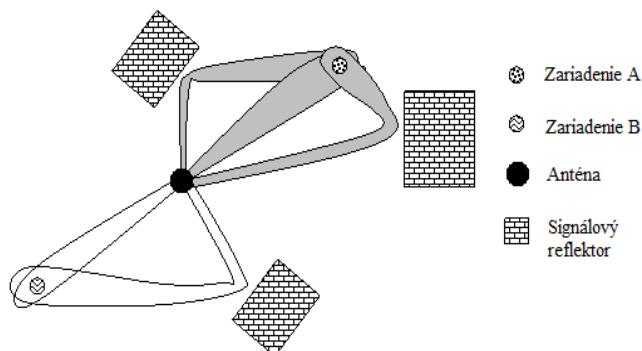
Obr. 1.5: Anténa s prepínaním lalokov

- *Dynamicky fázovaná anténa* (Obr. 12.6): pole tohto typu smart antény tvorí zväzok lúčov aktiváciou niektorých všesmerových prvkov v poli, ktoré majú multiplikačný efekt tvoríť lúč. Tento lúč potom môže byť "riadený", ukáže smer k zariadeniu (cieľu) a nastavuje zisk na každej anténe. Lúče (laloky) sú tvorené digitálne, tzn. že rovnaké pole prvkov môže byť zamerané na lúče viacerých zariadení na viacerých frekvenciách.



Obr. 1.6: Dynamicky fázovaná anténa

- *Adaptívna anténa* (Obr. 12.7): je podobná dynamicky fázovanej anténe. Adaptuje sa na životné prostredie s prihliadnutím k ostatným zariadeniam a rušivým signálom prenosových ciest. Rušivé zariadenia môžu byť "blokované" tým, že sa znižuje signál tvorením anténnych prvkov v tomto smere a jej zvýšenie v iných. Spojený signál môže byť tvorený z viacerých lúčov, čo poskytuje oveľa lepší pomer signálu k šumu a dáva jasnejšiu komunikáciu so zariadením (cieľom).



Obr. 1.7: Adaptívna smart anténa

Smart antény je možné rozdeliť aj na základe počtu vstupov a výstupov:

- *SIMO* (single input, multiple output): ako to z názvu vyplýva jedna sa o smart anténny systém s jedným vstupom a viacerými výstupmi, t.j. existuje jedna vysielačiacia anténa a viacero prijímacích antén. Tento systém zlepšuje výkon a zabezpečenie prenosu signálu.
- *MISO* (multiple input, single output): t.j. jedná sa o smart systém s viacerými vstupmi (vysielačiacimi anténami) a jedným výstupom (prijímacou anténou). Diverzita na strane vysielača umelo vytvára mnohocestné šírenie. Tento systém zvyšuje dátovú prenosovú rýchlosť a znižuje problémy s prenosom signálov (dát).
- *MIMO* (multiple input, multiple output): t.j. jedná sa o smart anténny systém s viacerými vstupmi (vysielačiacimi anténami) a viacerými výstupmi (prijímacími anténami). Tento systém zvyšuje dátovú priepustnosť. V prípade používania viacnásobných vysielačiacich a prijímacích antén je výsledkom nárast dátových prenosových rýchlostí. Systém má väčšiu zložitosť, a teda aj cenu (z dôvodu potreby viacerých hardvérových blokov, keďže každá prijímacia a vysielačiacia

anténa má vlastnú elektroniku). Aplikácie sú: 3G mobilný systém, WLAN, LTE, HSPA+, mobilná ad-hoc sieť, bezdrôtová Mesh sieť.

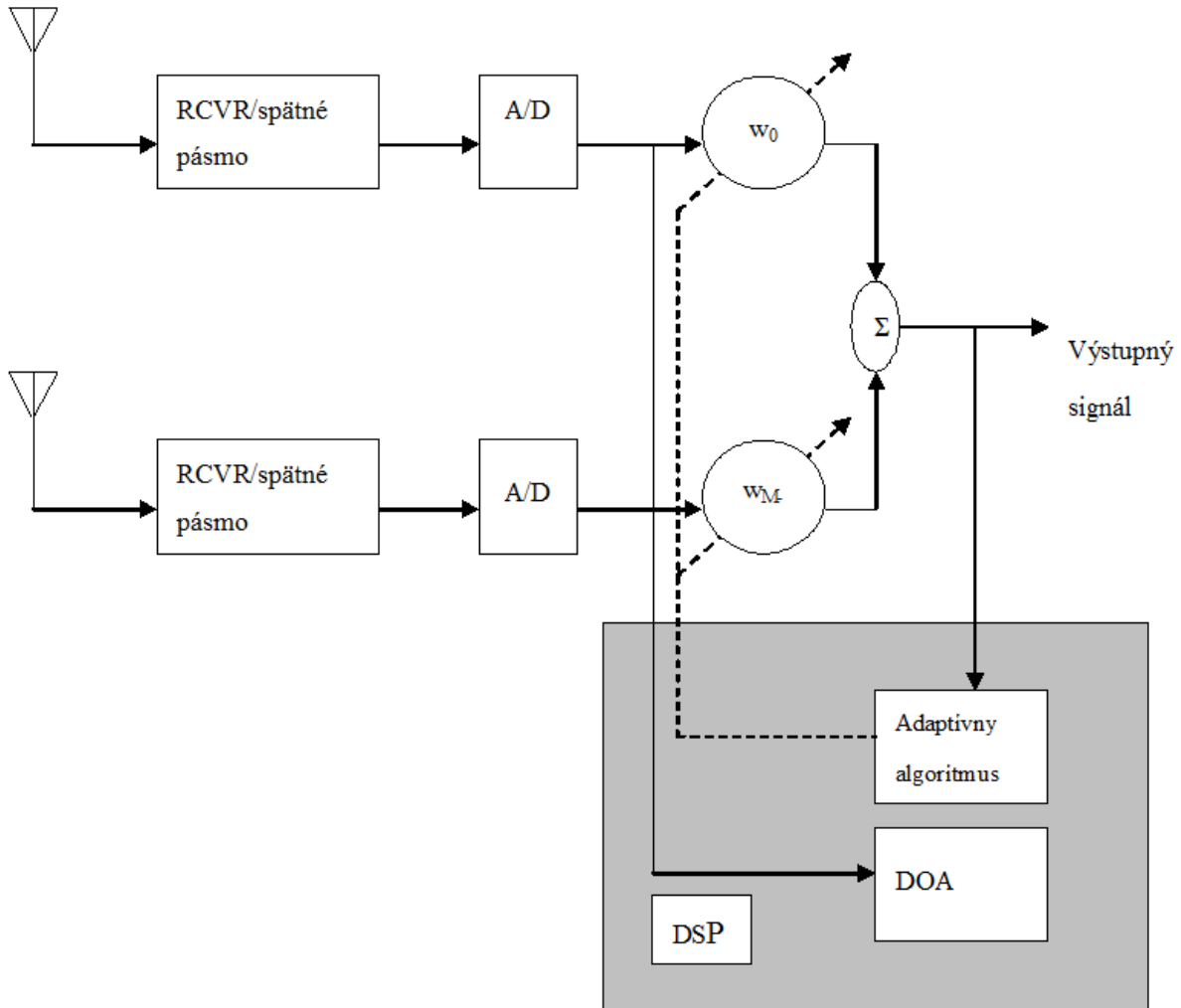
Smart anténne systémy sú klasifikované na základe ich vysielacej stratégie do troch typov („úroveň inteligencie“):

1. Smart antény s prepínaním smerových lalokov, lúčov (Switched Beam Antennas)

Je to systém, ktorý si môže vybrať jeden z mnohých preddefinovaných vzorov, aby sa zvýšil prijímaný signál. Vo všeobecnosti sa jedná o rozšírenie sektorovania buniek, t.j. každý sektor sa ďalej delí na menšie sektory. Tento systém deteguje silu signálu, vyberá vhodný preddefinovaný lúč (lalok) a neustále mení lúče podľa potreby. Celkovým cieľom tohto systému je zvýšiť zisk v závislosti n umiestnení užívateľa. Avšak, odkedy sú lúče stanovené, zamýšľaný používateľ nesmie byť v strede ktoréhokoľvek hlavného lúča. Ak sa nachádza narušiteľ v blízkosti centra aktívneho lúča, môže byť rozšírený viac ako žiadal užívateľ. Z tohto dôvodu systém pravdepodobne nebude vedieť umiestniť požadovaný signál na maximum hlavného laloku, ale tiež sa ukazuje neschopnosť plne blokovať rušiteľov.

Switched-beam systém možno ďalej rozdeliť do dvoch skupín a to na single beam a multi beam smerové smart antény:

- *Jedno lúčové (single beam) smerové antény* - v danom čase tu pôsobí iba jeden lúč. (Súčasný prenos nie je povolený, pretože v tomto systéme je len jeden vysielateľ).
- *Multi lúčový (multi beam) smerový anténny systém* je príkladom SDMA (spatial division multiple acces). Počet lúčov je rovný počtu vysielateľov/prijímačov. SMDA patrí medzi najdômyselnejšie smart anténne technológie. Pokročilý priestorovo-výpočtový výkon umožňuje najst' mnoho užívateľov, prostredníctvom vytvárania rôznych vln pre každého užívateľa. To znamená, že viac ako jeden používateľ môže byť umiestnených do fyzicky rovnakého komunikačného kanála v rovnakej bunke súčasne, len s daným uhlom oddelenia.



Obr. 1.8: Funkčný blokový diagram systému adaptívneho poľa

2. Smart anténa s dynamicky fázovaným poľom (Dynamically-Phased Arrays)

Užívateľ môže byť v určitom čase v rozmedzí jedného lúča, avšak ak sa vzdiali od jeho stredu potom prijatý signál slabne. DoA sleduje užívateľský signál túlajúci sa v dosahu lúča. Aj napriek vnútrobunkovému odovzdaniu, užívateľský signál má optimálny zisk.

3. Smart anténa s adaptívne sa meniacim poľom (Adaptive Antenna Arrays)

Tento systém poskytuje viac stupňov voľnosti, pretože majú schopnosť adaptovať v reálnom čase vyžarovací vzor do prostredia RF signálu (Obr. 12.8). Inými slovami, môžu nasmerovať hlavný lúč (lalok) smerom k pilotnému signálu alebo SOI pri potláčaní anténneho vzoru v smere rušiteľov alebo SNOIs.

Jednoducho povedané, systém Adaptive Array môže prispôbiť príslušný vyžarovací vzor pre každého jednotlivého používateľa.

Tab. 1.1: Porovnanie medzi switch beam a adaptive array systémami

Switch beam systém	Adaptive array systém
používa niekoľko pevných smerových lúčov s úzkymi zväzkami	kompletný adaptívny systém: riadi lúč smerom k záujmovému signálu
mierna interakcia medzi mobilnou jednotkou a základňovou stanicou	vyžaduje zavedenie DSP technológie
požadované fázové posuny sú poskytované jednoduchou pevnou fázou posunu sietí, sluha matice	má lepšia odolnosť proti odmietnutiu
nevyžaduje zložité algoritmy, pre výber lúča sa používajú jednoduché algoritmy	vyžaduje komplikované adaptívne algoritmy riadiace lúče a nuly
ľahká a lacná integrácia do mobilných systémov	nie je ľahká implementácia do existujúcich systémov
nižšie náklady a zložitosť	je nutná vysoká interakcia medzi mobilnou jednotkou a základňovou stanicou
zvýšenie pokrytia a kapacity oproti klasickej anténe	ešte lepšie pokrytie a kapacita
nemožno rozlišovať medzi priamym a rušivým signálom, čo vedie k posilneniu nežiaduceho rušivého signálu viac ako požadovaného signálu	môže odmietnuť multipath komponenty alebo ich pridať opravou oneskoreného navýšenia kvality signálu
ponúkajú obmedzenie kanála potlačujúceho rušenie	

1.3. Základné prvky smart antén

Štruktúra smart antén nie je jednoduchá. Vo všeobecnosti poznáme päť hlavných smart anténnych prvkov:

1. Číslícové spracovanie signálov (DSP - Digital signal processing)

S touto technológiou sa stretávame každodenne a bežne využívame rôzne zariadenia, ktorých je súčasťou, ako napr. mobilný telefón, televízor, modem, atď. DSP, resp. modul číslícového spracovania signálu, znamená spracovanie signálov prostredníctvom digitálnych prostriedkov. Signál predstavuje prúd informácií. Rozoznávame analógové a digitálne signály. Na prevedenie analógového signálu na digitálny slúžia DSP techniky. Samotný digitálny signál sa skladá z prúdu čísel v binárnej forme a jeho spracovaním sa vykonávajú numerické výpočty. Takéto číslícové spracovanie signálu je založené na:

- kompresii signálu.
- dekompresii signálu.

S využitím DSP kompresných technológií sa stretávame napr. v slovnom i očnom kontakte v počítačoch, väčší počet hovorov v každej bunke v prípade mobilných telefónov, atď. Čip DSP má takú štruktúru, aby spracoval milióny vzoriek za sekundu, t.j. aby pracoval rýchlo.

2. Priamy prístup do pamäte (DAM - Direct access memory)

Nepotrebuje procesor, aby mohol ovládať systémovú pamäť. Označuje sa tiež ako modul zberu dát, ukladanie a prenos údajov. Pre prenos DMA rozoznávame tri do značnej miery nezávislé kanály, pričom každý obdrží transfer pre prechod cez multiplexory a vyberie si medzi množstvom signálov. Až aktivácia signálov umožní prenos. Tento signál môže byť v niektorých prípadoch ignorovaný. DMA sa používa spravidla v režime nízkej spotreby.

3. Sekcia zmiešavania nadol

Základným účelom zmiešavača je premena prijímanej frekvencie vstupného signálu na medzifrekvenciu alebo vytvorenie nízkofrekvenčného signálu z nemodulovaného signálu. K jeho hlavným častiam patria: vlastný zmiešavač a miestny oscilátor. Základné parametre každého zmiešavača sú:

- intermodulačné skreslenie,
- dynamický rozsah,
- vzájomná modulácia.

Zmiešavače rozdeľujeme:

- Up-convector - ak medzifrekvenčných signál má súčtovú frekvenciu výstupných signálov.
- Down-convector – ak medzifrekvenčných signál má rozdielovú frekvenciu výstupných signálov.

Spomedzi zmiešavačov sú najlepšie vyvážené zmiešavače, keďže k základným požiadavkám na ne patrí čo najmenší šum, strata i skreslenie.

4. Anténne pole

Okolo antény sa nachádza elektromagnetické anténne pole, ktoré je dané vzdialenosťou od antény a uhlovými súradnicami. Na základe vzdialenosti od antény definujeme tri základné polia antény:

- Vzdialené pole vyžarujúce (najďalej od antény).
- Pole blízke vyžarujúce.
- Pole blízke (najbližšie pri anténe).

Od vysielача k prijímaču sa správa dostane prostredníctvom elektromagnetickej vlny, ktorej šírenie je možné vďaka miestu so zmenou hustoty elektrického prúdu (anténa). Anténa je rovný vodič, čiže siločiar magnetickeho poľa sa šíria od vodiča preč do okolitého prostredia. Taktiež toto usporiadanie vodičov umožňuje premieňať energiu vysokofrekvenčného prúdu na energiu voľného elektromagnetickeho poľa a naopak.

5. RF front end

Resp. to čo sa nachádza medzi anténou a medzifrekvenčnou fázou v prijímači. Vo väčšine prípadov je zložený z Prispôsobovacieho obvodu → BPF – pásmového filtra → Prispôsobovacieho obvodu → LNA - nízkošumového zosilňovača → Prispôsobovacieho obvodu → RX zmiešavača.

1.4. Výhody smart antén

Smart antény ponúkajú významné výhody pre návrh systémov bezdrôtových mobilných komunikácií:

- vyšší zisk antény – pomáha rozšíriť základňovú stanicu, rozsah i pokrytie, čo má za následok predĺženie životnosti batérie, výrobu menších a ľahších mobilných telefónov;
- rôznorodosť;
- potlačenie rušenia;
- bezpečnosť - útočník musí byť umiestnený v rovnakom smere užívateľa, ako je známe zo základňovej stanice;
- geografické informácie – signalizácia smeru, ktorým anténa vysiela a následne komunikuje so zariadením, výsledkom je určenie umiestnenia zariadenia. Vzhľadom na priestorovú detekciu osobnosti, môžu byť šikvné anténne systémy použité na nájdenie človeka za výnimočných okolností alebo z akéhokoľvek iného špecifického miesta služby;
- ľahká integrácia – smart antény nepredstavujú nový protokol a preto môžu byť ľahko implementované s ostatnými anténami;
- zníženie emisií CO – smart antény majú schopnosť priestorovej filtrácie, keďže vyžarovaná energia v podobe úzkych lúčov smeruje len k požadovanému mobilnému užívateľovi;
- zníženie prenášaného výkonu – smart anténa vyžaruje energiu v požadovanom smere, preto je potrebné menšie množstvo energie pre žiarenie na základni;
- kompatibilita – smart anténna technológia môže byť aplikovaná napr. TDMA, FDMA, CDMA.

1.5. Nevýhody smart antén

Aj keď smart antény poskytujú mnoho výhod, trpia tiež niekoľkými nedostatkami. Ich vysieláče sú omnoho zložitejšie ako tradičné vysieláče základňovej stanice, čo má za následok ťažšiu diagnostiku chýb. Anténa potrebuje samostatný reťazec pre každý prvok poľa antény v reálnom čase, a taktiež presnú kalibráciu pre každý z nich. Okrem toho anténne vyžarovanie je výpočtovo náročné, čo znamená, že smart anténne základňové stanice musia byť vybavené veľmi silným signálovým procesorom. Zložitosť (použitie hardvéru a vyššej sily signálu) sa premieta aj do ceny, výsledkom čoho je ich vysoká výsledná cena. Avšak v dlhodobom horizonte je táto položka týkajúca sa finančných nákladov akceptovateľná. Inteligentné anténne systémy používajú viac energie ako bežné antény preto, že existuje viac antén na udržiavanie, hoci toto je všeobecne nepozorovateľné. Samozrejme je dôležitým faktorom aj umiestnenie, takže v konečnom dôsledku je potrebné brať do úvahy lokalizáciu smart antén vzhľadom na ich optimálne fungovanie.

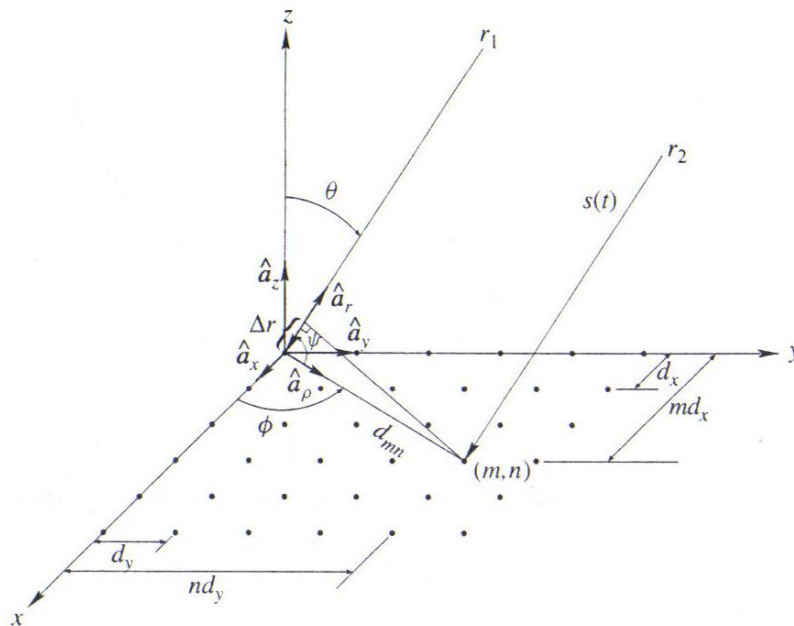
1.6. Vytváranie lúčov smart antény

Inteligencia, založená na definícii Websterovho slovníka, je schopnosť uplatňovať vedomosti a manipulovať s prostredím. V dôsledku toho, množstvo inteligencie závisí na zhromaždených informáciách, t.j. ako sa získavajú poznatky zo spracovávaných informácií a schopnosť tieto poznatky aplikovať. V inteligentnom (chytrom, smart) anténnom systéme sa tieto informácie spracúvajú vďaka algoritmu digitálneho signálového procesora (DSPs). Ciele DSP sú dané:

- smerom príchodu (DOA) všetkých dopadajúcich signálov,
- vhodnosťou váhy ideálne riadiť maximum vyžarovania antény k vzoru SOI a miesto prázdne smerom SNOI.

Z toho dôvodu práce na smart anténach podporuje výskum v adaptívnych signálových algoritmoch spracovania, ako DOA a adaptívne tvarovanie lúča. Odhad DOA zahŕňa porovnávacia analýza poľa signálov, nasleduje vlastná analýza a odstup signál/šum podpriestorovej formácie. Zatiaľ čo v adaptívnom vytváraní lúčov je cieľom prispôbiť lúč úpravou veľkosti a fázy každého prvku antény tak, aby bol vytvorený požadovaný vzor.

Pole antény prijíma prichádzajúce signály zo všetkých smerov. Algoritmus DOA určuje smer všetkých prichádzajúcich signálov, je založený na oneskorení. Ak sa berú do úvahy časové oneskorenia, je potrebné zvážiť $M \times N$ rovinných polí s medziprvkovými vzdialenosťami d_x pozdĺž x -osi a d_y pozdĺž y -osi (Obr. 12.9).



Obr. 1.9: $M \times N$ rovinné pole s grafickým znázornením časového oneskorenia

Keď prichádzajúca vlna nesie základný signál $s(t)$, zasahuje v uhle (θ, φ) na pole antény, čo produkuje časové oneskorenia v porovnaní s ostatnými prvkami antény. Tieto časové oneskorenia závisia od geometrie antény, počte prvkov a na medziprvkových medzerách. Pre obdĺžnikové smerovacie pole, časové oneskorenie signálu $s(t)$ v (m, n) -tom prvku, vzhľadom k referenčnému prvku $(0,0)$ v mieste pôvodu je

$$\tau_{mn} = \frac{\Delta r}{v_0}, \quad (12.1)$$

kde Δr a v_0 predstavujú diferenciálnu vzdialenosť a rýchlosť svetla vo voľnom priestore. Diferenciálna vzdialenosť Δr sa počíta s použitím

$$\Delta r = d_{mn} \cos(\psi) . \quad (12.2)$$

Ak d_{mn} je vzdialenosť (m, n) -tého prvku od počiatku, a ψ je uhol medzi radiálnym jednotkovým vektorom od pôvodného k (m, n) -tému prvku a radiálnemu jednotkovému vektoru v smere prichádzajúceho signálu $s(t)$.

Následne sa d_{mn} a $\cos(\psi)$ určujú pomocou

$$d_{mn} = \sqrt{m^2 d_x^2 + n^2 d_y^2} \quad (12.3)$$

a

$$\cos(\psi) = \frac{\hat{a}_r \cdot \hat{a}_\rho}{|\hat{a}_r| \cdot |\hat{a}_\rho|} . \quad (12.4)$$

Ak \hat{a}_r a \hat{a}_ρ sú jednotkové vektory v smere prichádzajúceho signálu $s(t)$ a pozdĺž vzdialenosti d_{mn} k (m, n) -tému prvku znamená to, že jednotkové vektory sú vyjadrené ako (12.5a) a (12.5b).

$$\hat{a}_r = \hat{a}_x \sin \theta \cos \phi + \hat{a}_y \sin \theta \sin \phi + \hat{a}_z \cos \theta \quad (12.5a)$$

$$\hat{a}_\rho = \frac{\hat{a}_x m d_x + \hat{a}_y n d_y}{\sqrt{m^2 d_x^2 + n^2 d_y^2}} . \quad (12.5b)$$

Ak \hat{a}_x , \hat{a}_y a \hat{a}_z sú jednotkové vektory pozdĺž x , y a z -ovej osi. Nakoniec substitúciou (12.2) - (12.5b) do (12.1), doba oneskorenia (m, n) -tého prvku, so zreteľom na pôvodný prvok [tj (0, 0)], je vyjadrená ako

$$\tau_{mn} = \frac{m d_x \sin \theta \cos \phi + n d_y \sin \theta \sin \phi}{v_0} . \quad (12.6)$$

DOA odborný odhad možno charakterizovať na základe analýzy dát a implementácie do štyroch rôznych oblastí: konvenčné metódy, metódy založené na podpriestore, metóda maximálnej vierohodnosti a integračnej metódy, ktoré kombinujú investične-návratnú techniku s prístupom založenom na podpriestore.

Konvenčné metódy na odhad DOA sú založené na vytváraní lúčov a nulového riadenia, nevyužívajú štatistiky prijímaného signálu. DOA všetkých signálov je určená z vrcholov špičiek výstupného výkonového spektra získaného z riadenia zväzku vo všetkých možných smeroch. Príkladom konvenčných metód sú klasická tvarovacia metóda alebo Fourierova metóda a Capone metóda minimálnej odchýlky.

Na rozdiel od konvenčných metód, podpriestorové metódy využívajú štruktúru prijatých dát, čo vedie k dramatickému zlepšeniu výsledku. Dva hlavné algoritmy, ktoré spadajú do tejto kategórie sú viacnásobná signálová klasifikácia (MUSIC- Multiple signal classification) a odhad parametrov signálu cez spôsob nemeňnej rotácie (ESPRIT). V roku 1979 p. Schmidt navrhol dohodnutý MUSIC algoritmus, ktorý využil vlastnú štruktúru vstupnej kovariačnej matice. Tento algoritmus poskytuje informácie o počte dopadajúcich signálov. Rovnako ako mnoho algoritmov, aj MUSIC má svoje nevýhody. Jedna z nevýhod je, že si vyžaduje veľmi presné a správne pole kalibrácie. Ďalšou nevýhodou je, že ak dopadajúce signály sú vysoko korelované, vzniká chyba, pretože kovariačná matica prijímaných signálov sa stáva singulárnou. V konečnom dôsledku sú aj výpočtovo náročné.

V snahe o zlepšenie konvenčného MUSIC algoritmu viedlo niekoľko pokusov k zvýšeniu výkonu riešenia a zníženiu jej výpočtovej zložitosti. V roku 1983 Barabell objavil MUSIC algoritmus založený na polynomických koreňoch za predpokladu lepšieho riešenia. Nevýhodou je jeho použiteľnosť len pre rovnomerne rozložené lineárne pole. O šesť rokov neskôr Schmidt navrhol kruhový MUSIC, resp. selektívne zameriavaný algoritmus, ktorý využíval vlastnosti spektrálnej súdržnosti prijímaného signálu a umožnil analyzovať signály rozložené bližšie než prahová energia poľa. Avšak, kruhový MUSIC sa vymyká trendu, že celkový počet signálov dopadajúceho na pole musí byť menej, než je počet snímaných prvkov. Neskôr v roku 1994 predstavil Xu techniku rýchleho rozloženia priestoru (FSD) pre zníženie výpočtovej zložitosti algoritmu MUSIC. V prostredí viaccestných signálov, kde sú prijímané signály vysoko korelované sa výkon MUSICu znižuje. Technika nazvaná priestorové vyhladzovanie bola aplikovaná na kovariančnej matici.

Algoritmus ESPRIT je ďalší podpriestorovo založený DOA. ESPRIT má niekoľko výhod oproti MUSIC ako sú :

- menšia výpočtová náročnosť;
- vyžaduje oveľa menej skladovania (pamäte);
- nepredstavuje vyčerpávajúce hľadanie cez všetky možné riadenie vektorov na odhad DOA;
- nevyžaduje kalibráciu poľa.

1.7. Použitie smart antén - Mobilná sieť ad-hoc (MANET)

Potreba výmeny a zdieľania dát v súčasnosti neustále narastá. Zvýšené nároky sa kladú na všadeprítomné rýchle siete, samozrejme ľahko pripojiteľné. Záujem používateľov rastie aj v snahe o prepojenie všetkých ich osobných elektronických zariadení (v skratke PEDs) s využitím ad hoc sietí. Mobilná Ad Hoc sieť (MANET) nie je obmedzená len na civilné využitie. Možnosť využitia je rôzna, ako napr. pri komunikácii:

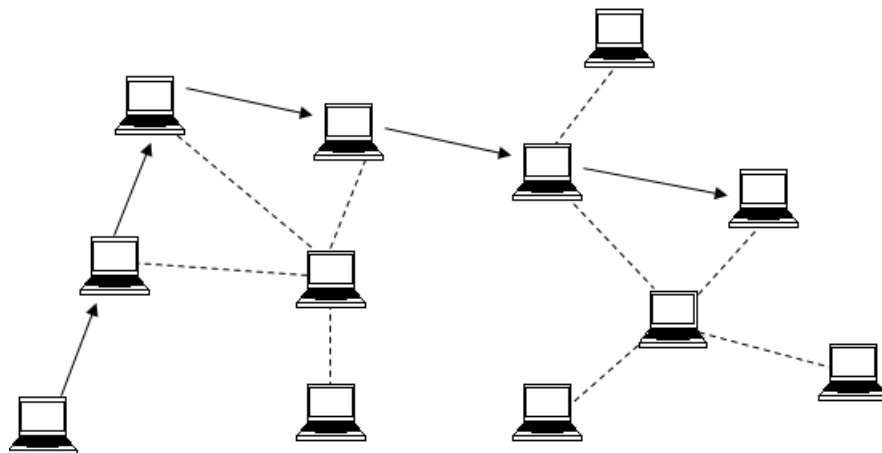
- v pohromou postihnutých oblastiach - požiare, záplavy a zemetrasenia;
- na upevnenie poriadku - pri riadení davu, pri pátracích a záchranných akciách;
- pri taktickom dorozumievaní - vojenské operácie.

Definitívnym cieľom je vytvoriť vysoko kapacitné MANET siete využívajúce moderné smart antény.

MANET vo svojej podstate pozostáva zo súboru bezdrôtových mobilných staníc (uzlov) tvoriacich dynamickú sieť. Topológia tejto siete sa neustále a náhodne mení, pričom jej medziuzlová prepojitelnosť je riadená bez najmenej pomoci centralizovaného zásahu.

Na opačnom princípe fungujú celulárne siete, ktoré sú riadené centrálné alebo správcom zo základového uzla (BSC), pričom je každý uzol spojený s fixnou stanicou.

Okrem iného tieto siete zabezpečujú niekoľkonásobné prepojenia medzi uzlom A (zdrojom) a uzlom B (cieľom), (Obr. 12.10).



Obr. 1.10: Multihop príklad MANETu

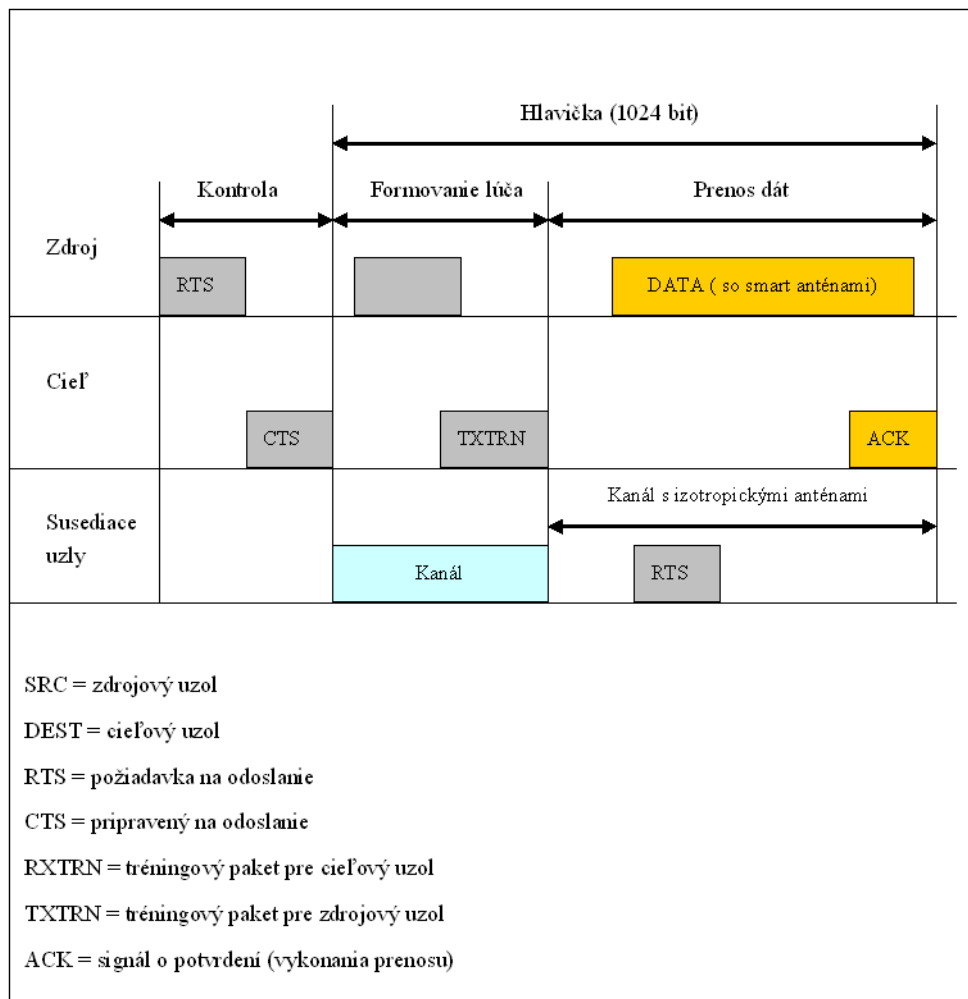
Uzly A a B sú umiestnené od seba v istej vzdialenosti, mimo dosahu rádiového signálu a požadujú výmenu dát. Uzol A využíva susediace alebo medziľahlé uzly pri odosielaní jeho súboru dát prostredníctvom sériového jednorazového prenosu do uzla B. Táto vzájomná súčinnosť medzi uzlami sa nazýva „peer to peer“. Komunikácia medzi uzlami sa odohrá pomocou použitia jednej z mnoho prístupných techník: časovej (TDMA), frekvenčnej (FDMA), kódovej (CDMA) a priestorovej (SDMA).

Významnou výhodou MANET sietí je, že sa nespoliehajú na rozsiahle a nákladné inštalácie fixných staníc v poli použitia. Tieto siete dokážu uskutočniť výber založený na faktoroch ako sú robustnosť a náklady na elektrickú energiu. Dokážu teda optimalizovať kapacitu siete a spotrebu energie jednotlivých uzlov. Z toho vyplýva, že ak pripojenie medzi medziľahlými uzlami od zdroja k cieľu je vzdialenosťou kratšie, tak by to malo mať za následok nízku kapacitu siete, pretože veľa pripojení spôsobí dlhé sieťové omeškanie a zvýšené riziko zlyhania pripojenia (menej robustná sieť). Každý uzol, či bezdrôtové zariadenie si vyžaduje malé množstvo energie na šírenie signálu k susednému uzlu kvôli malým vzdialenostiam, pričom týmto spôsobom ušetrí energiu batérie. Na prepojenie medzi najviac vzdialenými medziľahlými uzlami by mala byť výsledkom vyššia kapacita siete, ale s najvyššou spotrebou energie.

K hlavnej nevýhode MANET sietí patrí značný pokles kapacity siete v súvislosti s rozšírením siete (množstvom uzlov).

Smart antény dokážu riadiť ich radiačnú energiu smerom k určenému uzlu a súčasne potlačiť rušenie, čo má za následok zvýšenie kapacity siete. Naopak siete vybavené všesmerovými anténami dokážu odmietnuť komunikačný kanál. Z toho vyplýva, že uzly so smart anténami sa zamerajú na požadované uzly a umožňujú susediacim uzlom komunikovať. Oproti tomu uzly so všesmerovými anténami držia počas prenosu susedné uzly v pohotovosti.

MANET schéma môže byť použitá na vytvorenie systému smart antén spôsobujúcich vysokú priepustnosť siete. V prípade bezdrôtovej siete: MANET sieť s 55 uzlami rovnomerne rozloženými na ploche 1000x600 m² je zrealizovaná použitím OPNET, ktorý predstavuje simulačný softvérový balík. Uzly bezdrôtovej siete sú vybavené štyrmi plošnými čiastkovými pamäťovými maticami, aby pokryli všetky možné smery. Daná plošná čiastková pamäťová matica v uzli pokrýva sektor od -45° do +45 stupňov, ktorý je úmerný prične vyžarujúcej anténe ($\varphi=0$). Prenos dát cez každý uzlov je formovaný s cieľom nasledovania Poissonovej distribúcie. Každý uzol mení náhodne pozíciu pri každom transfere dvoch za sebou nasledujúcich súborov, pričom jeho snahou je formovať pohyblivosť uzlov. Trvanie zaťaženia každého súboru je 1024 bitov.



Obr. 1.11: Diagram synchronizácie MAC protokolu (založený na IEEE 802.11)

Protokol je súbor pravidiel komunikácie medzi nimi. Protokol použitý pre MANET sieť je založený na MAC protokole IEEE 802.11 na štandarde pre bezdrôtové miestne počítačové siete. Zapája všetky nevyhnutné funkcie, aby uzly umožnili prístup ku kanálu v časovom prostredí (TDMA) (Obr. 12.11). Umožňuje použitie smart antén a zvyšuje priestorové opätovné použitie TDMA, pričom zároveň týmto zvyšuje kapacitu siete.

Popis protokolu:

- Prístup ku kanálu

Zdrojový uzol (SRC) prenáša súbor dát do cieľového uzla (DEST). DEST sa nachádza v rádiovom okruhu v rámci jednorazového spojenia, t.j. najprv vníma stav komunikačného kanálu. SRC čaká, kým nie je komunikačný kanál voľný, pričom následne SRC vyšle signál „Požiadavka na odoslanie“ (RTS) používajúc anténnu sústavu v takmer všesmerovom režime.

Je to možné jedine v prípade jediného aktívneho elementu každej čiastkovej pamäťovej matice.

- Formovanie lúča

Keď všetky susediace uzly prijímajú CTS signál odoslaný z DEST, čakajú alebo sú v pohotovosti, kým je formovanie lúča ukončené pred samotným sprístupnením kanála. Po prijatí CTS signálu SRC prenesie tréningový paket pre DEST (RXTRN) v takmer všesmerovom režime. DEST prijme a určí uhol prijatia RXTRN signálu použitím DOA algoritmu a vypočíta komplexný súčet potrebný na nasmerovanie lúča k SRC. Následne DEST pošle tréningový paket pre SRC (TXTRN) v režime smart antény. Na záver následne potom ako SRC prijme TXTRN signál, taktiež vypočíta uhol dopadu TXTRN signálu použitím DOA algoritmu a komplexného súčtu k nasmerovaniu lúča k DEST.

- Prenos dát

Potom, čo SRC a DEST nasmerovali spektrum žiarenia k sebe navzájom a formovanie lúča bolo ukončené, začína sa fáza prenosu dát (DATA). Kanál je voľný na prenos RTS signálov zo susediacich uzlov. V prípade, ak prenos zo susediacich uzlov spôsobuje interferenciu nad preddefinovanou prahovou hodnotou SRC a DEST, je začatá nová séria výpočtov súčtu na SRC a DEST pozíciách, aby sa stanovila hodnota nuly k smeru rušivých uzlov (t.j. SNOI). Pri dokončení DATA paketu, signál potvrdzujúci (ACK) prenos prostredníctvom DEST-u upovedomí o úspešnom prijímaní. Tréningové pakety RXTRN a TXTRN sú premenlivé. Ich dĺžka má vplyv na dĺžku DATA paketu, čo je dôležité, pretože tento paket prenáša informáciu. Pri krátkom DATA pakete je nízka sieťová priepustnosť a menej prenesených dát, pri dlhom DATA pakete je to naopak. Ak by všesmerové antény boli používané namiesto smart antén, komunikačný kanál by bol počas DATA prenosu zablokovaný.