

# 1. Meranie antén

***Aj keď návrh antén s využitím najmodernejších softvérových produktov býva pomerne presný, je treba vždy overovať dosiahnuté výsledky návrhu a vlastnej realizácie antén marením.***

Vzhľadom na to, že anténa predstavuje prvok, ktorý transformuje elektromagnetické vlny šíriace sa pozdĺž napájača (vedenia) na elektromagnetické vlny šíriace sa voľným priestorom (alebo naopak), možno vyžadované merania rozdeliť do dvoch skupín:

- merania spojené s elektromagnetickou vlnou šíriacou sa vo voľnom prostredí (meranie smerových charakteristík, zisku, polarizačných vlastností, atď.),
- merania spojené s vedenou elektromagnetickou vlnou (meranie vstupnej impedancie, rozloženia prúdu, atď.).

Osobitosťou merania antén je, že merané objekty (vlastná anténa, anténové napájače-vedenia, zemská atmosféra, polovodivý zemský povrch) sú v porovnaní s vlnovou dĺžkou vyžarovanej alebo prijímanej elektromagnetickej vlny veľmi rozmerné. Veľmi často je súčasťou antény aj jej najbližšie okolie. Vzhľadom na to, že antény sú vyžarujúce prvky, pri meraní môžu vzniknúť rôzne interferencie s cudzími zdrojmi elektromagnetického poľa, rôzne odrazy od okolitých predmetov, väzby medzi anténou a meracími prístrojmi, atď. Všetky tieto skutočnosti môžu viesť ku skresleniu a nereprodukovateľnosti nameraných výsledkov. Treba pripomenúť, že parametre antén sú definované pre antény umiestnené vo voľnom priestore. V praxi však budú parametre antény viac alebo menej ovplyvnené okolím antény, predovšetkým polovodivým zemským povrchom. Pri vyhodnocovaní a porovnávaní nameraných parametrov antény treba preto okolnosti vždy zhodnotiť a usilovať sa merať tak, aby sme získali hodnoty parametrov, ktoré možno navzájom porovnávať.

Preto sa meranie antén realizuje v pokiaľ možno ideálnych podmienkach, kedy je možné vplyvy okolia na parametre antén zanedbať. Ďalšou podmienkou je, že anténu meriame skutočne v jej žiarivej oblasti a že poznáme tvar vlnoplochy, ktorý je v mieste testovacej antény, ktorú marenou anténu premeriavame. Meranie antén je pomerne široká problematika, ktorá využíva rôzne techniky. Za klasické metódy je možné považovať tzv. metódy merania antén vo vzdialenej žiarivej oblasti. Tieto patria ku triede marení, ktorá určuje vlastnosti antén vo frekvenčnej oblasti. V poslednej dobe sa vďaka vývoju meracích aparátúr stretávame aj s iným prístupom, a to s marením v časovej oblasti. V podstate sa dá povedať, že tak, ako sa dá medzi časovou a frekvenčnou oblasťou prechádzať pomocou Fourierovej transformácie, dá sa prechádzať aj v prostredí nameraných výsledkov.

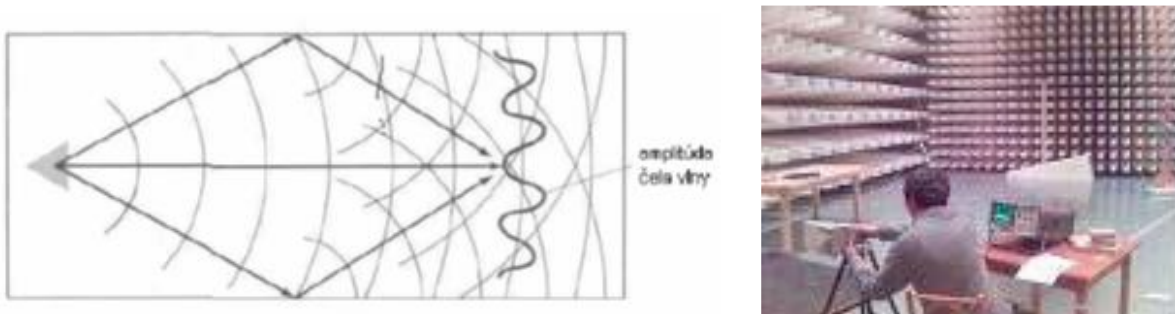
Pretože antény aj prostredie, v ktorom sa šíria elektromagnetické vlny (okrem ionosféry), sú lineárne, platí pre ne princíp reciprocity a netreba medzi sebou rozlišovať parametre vysielačnej a prijímacej antény.

Testovanie a hodnotenie anténových parametrov je vykonané v rozsahoch antény. Typicky, existuje rozsah otvoreného meracieho prostredia a rozsah pre merania v uzatvorených priestoroch s priradenými ohraničeniami pre oba. Rozsahy otvorených meracích prostredí nie sú chránené pred vplyvmi okolia, zatiaľ čo pre uzatvorené prostredia sú ohraničené priestorovými obmedzeniami. Rozsahy pre merania v

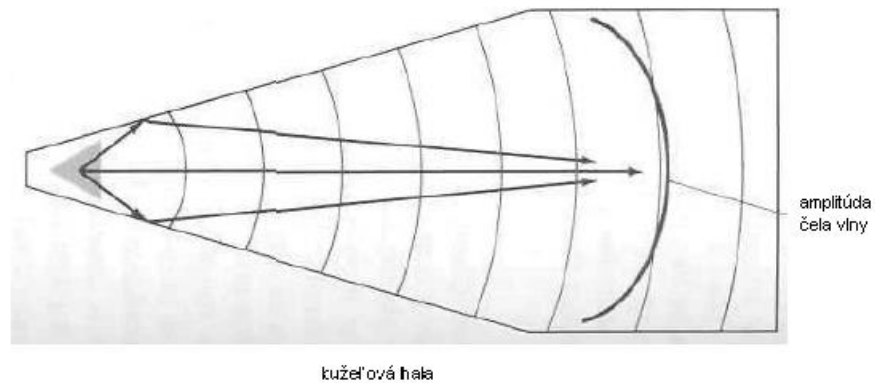
uzatvorených priestoroch umožňujú využívať anechoidné komory, ktoré sú lemované materiálmi pohlcujúcimi rádiové signály na eliminovanie odrazov od stien.

Anechoidná komora poskytuje riadené prostredie, nezávislé od počasia, bezpečnosť a na minimalizovanie elektromagnetickej interferencie. Bola vyvinutá ako alternatívne prostredie k vonkajšiemu. Steny sú pokryté vysokokvalitnými materiálmi na absorpciu odrazov respektíve na ich zmenšenie – minimalizovanie.

Existujú dve základné podoby semianechoidných komôr (komory kde podlaha je odrazová): obdĺžnikové anechoidné komory Obr. 13.1 a ihlanové anechoidné komory Obr. 13.2. Obdĺžnikové sú typicky používané pre frekvencie nad 1 GHz, zatiaľ čo pre frekvencie pod 1 GHz sa používajú ihlanové anechoidné haly.



**Obr. 1.1: Obdĺžniková semianechoidná komora**



**Obr. 1.2: Ihlanová anechoidná komora**

Používajú sa rôzne metódy na meranie parametrov antén. Niektoré z metód vyžadujú kritéria vzdialeného poľa a homogénny zdroj žiarenia a niektoré môžu byť realizované v blízkom poli meranej antény (AUT, Antenna Under Test).

Tu už nie je možné považovať vlnu, ktorou je anténa testovaná, za rovinnú a tak meranie smerových charakteristík je nutné robiť ako vo fáze, tak aj v amplitúde a použiť matematickú transformáciu pre výpočet skutočného vyžarovania, aké bude mať anténa pre vzdialenú žiarivú oblasť. Opäť sa ale jedná o meranie vo frekvenčnej oblasti, kedy je nutné zabezpečiť bezodrazovosť okolia. Toto marenie kladie s ohľadom na nutnosť vektorového marenia vyššie finančné nároky na prístrojové vybavení.

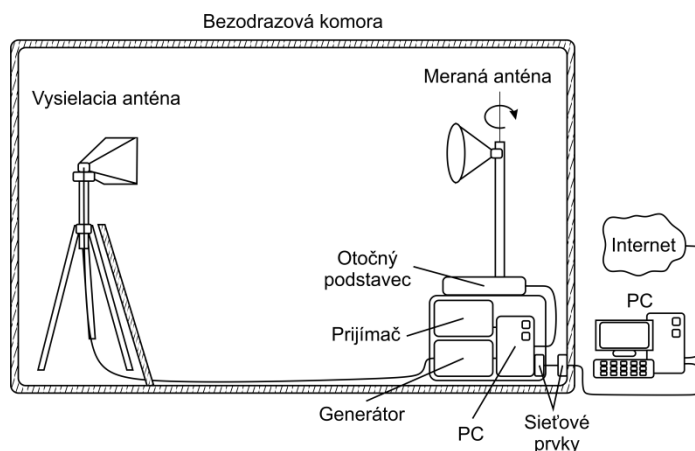
Ďalším typom marení sú marenia v časovej oblasti. Tie opäť potrebujú špeciálne vybavenie. Vyslaním elektromagnetického krátkého impulzu, ktorý v sebe nesie veľké frekvenčné pásmo, je ovšem možné premazať v danom smere vždy vlastne celé frekvenčné pásmo antény. Dá sa tiež merať v časovej oblasti pomocou spojitaj vlny. Základnou výhodou je, že môžeme stanoviť čas za ktorý impulz resp. spojitú vlnu musí registrovať testovaná anténa a naopak a teda ďalšie odrazy, ktoré prídu od nežiaducich objektov neskoršie ako signál od testovanej (testujúcej) antény je možné z dát eliminovať. V takomto prípade vlastne nepotrebujeme už ani bezobrazové prostredie.

### 1.1. Meracie prostredie a techniky

Meracím prostredím (measuring site, range) nazývame blízke aj vzdialené okolie meranej antény. Podľa druhu antény, dĺžky vlny a použitej meracej metódy volíme meracie prostredie. Iné nároky sú kladené na prostredie pri meraní impedancie, iné pri meraní smerových diagramov a zisku. Iné nároky sú kladené pre meranie rozmerových antén pre cm vlny a iné pre meranie stacionárnych alebo mobilných antén.

Základné vybavenie meracích pracovísk pozostáva z (pre požadovaný frekvenčný rozsah):

- vysielateľ - generátor s dostatočným výkonom.
- prijímač s veľkou dynamikou (napr. spektrálny analyzátor), alebo sa používajú špeciálne prijímače s niekoľkonásobným zmiešaváním a pilotným signálom pre meranie antén,
- testujúce (testované) antény,
- otočný mechanizmus - točňa, ktorá umožní marenie v príslušnom reze priestoru (používa sa niekoľko rôznych variant otáčania) azimut nad eleváciou, elevácia nad azimutom a prípadne ich zložitejšie kombinácie,
- točňa pre polarizačné marenia,
- vektorový analyzátor pre marenie impedancie antény.

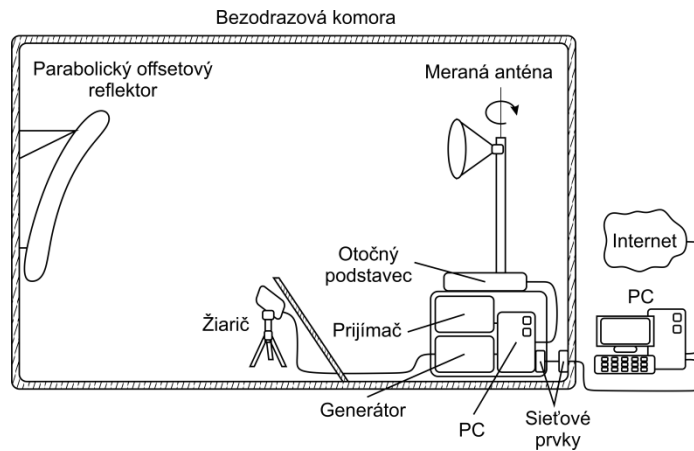


Obr. 1.3: Merania antén vo vzdialenej zóne (oblasti) žiarenia

Marenia je možné rozdeliť na:

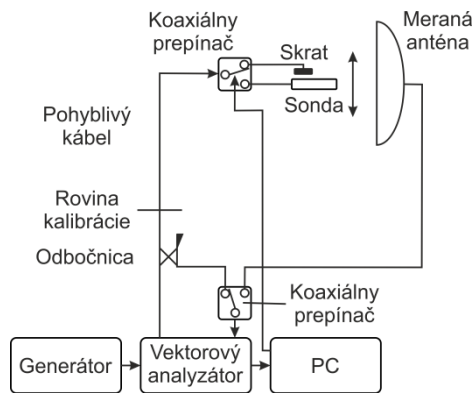
- marenia vo frekvenčnej oblasti:

- marenia vo vzdialenej zóne žiarenia (Obr. 13.3),
- marenia v kompaktnom usporiadaní (Obr. 13.4),
- marenia v blízkej zóne žiarenia (Obr. 13.5),



**Obr. 1.4: Kompaktné usporiadanie pracoviska pre merania antén vo frekvenčnej oblasti**

- marenia v časovej oblasti:
  - pomocou impulzu,
  - so spojitou vlnou.



**Obr. 1.5: Merania antén v blízkej zóne (oblasti) žiarenia**

Podrobnejšie – rôzne druhy rozdelenia anténnych marení sú:

1. Meranie antén:

- marenia vo frekvenčnej oblasti,
- marenia v časovej oblasti.

2. Meranie antén:

- vonkajšie merania:
  - nad polovodivým zemským povrchom,

- v otvorenom priestore,
- v anténnych komorách:
  - nad vodivou rovinou,
  - v bezodrazovom priestore,

### 3. Meranie antén:

- metóda vzdialeného poľa,
- metóda kompaktného usporiadania,
- metóda blízkeho poľa,

### 4. Meranie antén:

- vo vzdialenej oblasti žiarenia,
- v blízkej oblasti žiarenia,

### 5. Meranie antén:

- smerové charakteristiky,
- vstupná impedancia,
- zisk,
- polarizačné vlastnosti,
- ďalšie parametre (účinnosť,...).

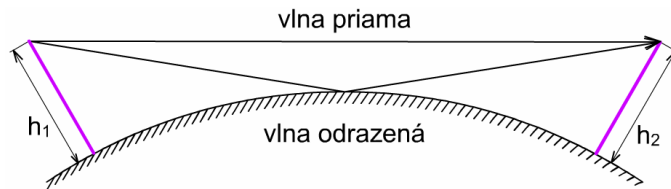
## 1.2. Meranie vyžarovacích (smerových) charakteristík antén

Meranie vyžarovacích charakteristík antén je jedno z najdôležitejších meraní parametrov antén. Vyžarovacia charakteristika antény je priestorový útvar, preto vo všeobecnosti treba merať intenzitu elektrického poľa vo všetkých smeroch v určitej vzdialenosti od antény. Pri meraní treba dodržiavať niektoré zásady, aby výsledky merania neboli skreslené vonkajšími vplyvmi. Sú to predovšetkým požiadavky na merací priestor, najmä homogenitu poľa v okolí antény, ďalej vzájomnú vzdialenosť medzi dvomi anténami, ako aj geometrické usporiadanie v priestore. Vo všeobecnosti sa vyžaduje, aby merací priestor mal rovinný povrch, veľkú plochu a neboli na ňom ani v jeho bezprostrednej blízkosti objekty, ktoré by mohli spôsobiť odraz elektromagnetických vln. Prostredie, v ktorom meriame, musí byť podľa možností dokonale homogénne a izotropné.



Obr. 1.6: Spôsob šírenia prízemnej elektromagnetickej vlny

Mechanizmus šírenia elektromagnetických vln je pre rôzne frekvencie rôzny. Na Obr. 13.6 je znázornený mechanizmus spojenia v pásme VKV, kde do miesta príjmu prichádza ako vlna priama, tak aj vlna odrazená od zemského povrchu. Výslednú intenzitu elektrického poľa ovplyvní teda ako vzdialenosť a výška antén, tak aj zakrivenie Zeme. Veľkosť intenzity poľa v oblasti tieňa (Obr. 13.7) závisí od vlnovej dĺžky. Čím väčšia je dĺžka vlny, tým väčšia je intenzita poľa za obzorom. Na prijímaný signál má značný vplyv aj nerovnosť povrchu Zeme. Vplyv prekážok sa zväčšuje so zmenšujúcou sa vlnovou dĺžkou. Vplyvom nehomogenít troposféry dochádza k rozptylu elektromagnetických vln, takže v niektorých prípadoch môžeme prijímať rádiové vlny aj v oblasti tieňa.



**Obr. 1.7: Priama a odrazená vlna na zakriveným zemským povrchom**

Vplyvom odrazov od zeme, ako aj okolitých predmetov sa v priestore vytvára stojaté vlnenie, podobne ako na vedeniach, čo má za následok skreslenie výsledkov merania. Túto skutočnosť treba uvažovať s ohľadom na pracovnú vlnovú dĺžku. Pri snímaní vyžarovacích charakteristík nás obvykle zaujíma intenzita elektromagnetického poľa vo vzdialenej oblasti žiarenia. V tejto oblasti predpokladáme rovinnú elektromagnetickú vlnu, potom pre vzájomnú vzdialenosť medzi anténami platí

$$r \geq 2 \frac{a^2}{\lambda}, \quad (13.1)$$

v ktorej  $\lambda$  je vlnová dĺžka,  $a$  najväčší rozmer apertúry a  $r$  je vzdialenosť medzi vysielačou a prijímacou (skúmanou) anténou. Táto požiadavka má predovšetkým význam pre antény, ktorých rozmery sú porovnateľné alebo väčšie ako vlnová dĺžka.

Podľa Obr. 13.6 si potom možno utvoriť približný odhad aj na geometrické umiestnenie antén v požadovanej výške.

Antény pre VKV a mikrovlnné antény vykazujú vo všeobecnosti veľkú smerovosť, preto pri meraní treba medzi VA a PA dodržať väčšiu vzdialenosť. Obyčajne je výkon meracieho vysielača relatívne malý a okrem toho na odstránenie vplyvu odrazov používame smerovú vysielačiu (VA) aj prijímaciu (PA) anténu. V takomto prípade dostaneme pre vyžadovanú vzdialenosť na meranie vo vzdialenej oblasti žiarenia väčšiu hodnotu, ako určuje vzťah (13.1). Vzdialenosť medzi VA a PA teraz bude

$$r \geq \frac{2}{\lambda} (a_1^2 + a_2^2), \quad (13.2)$$

kde  $a_1$  a  $a_2$  sú najväčšie rozmery apertúry vysielačej a prijímačej antény (alebo anténovej sústavy).

Vyžarovaciu charakteristiku antény možno merať dvoma spôsobmi:

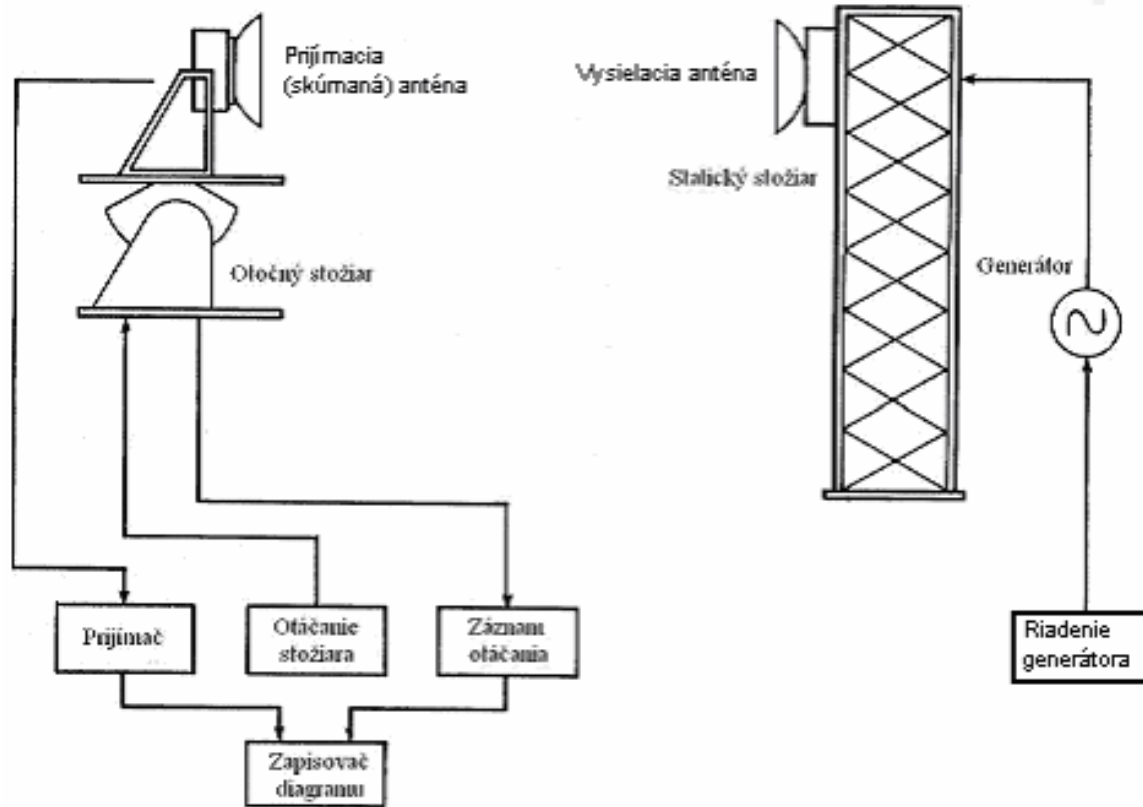
- Meraná anténa je pevná a pomocnou anténou snímame pole po kružnici s konštantným polomerom, aby elektromagnetické pole bolo vzdialeným poľom.
- Meraná anténa sa otáča okolo svojej osi a pomocná anténa je pevná.

Pri oboch týchto spôsoboch merania vyžarovacích charakteristík možno skúmanú anténu použiť ako vysielač alebo ako prijímač, pretože na základe princípu reciprocity sú parametre antény bez ohľadu na to, či ju použijeme ako vysielač alebo prijímač, rovnaké.

Prvý spôsob sa používa vtedy, ak je skúmaná anténa rozmerovo veľká a keď sa ma súčasne zaznamenať aj vplyv nosných stožiarov, prípadne odrazov od zeme. Používa sa alebo pozemné meranie, alebo pomocou lietadiel, prípadne vrtuľníkov. Pozemné merania sa uskutočňujú obyčajne len v oblasti hlavného maxima vyžarovania, pretože sú drahé a zdĺhavé. Okrem toho dovoľujú odmerať smerovú charakteristiku len v jednej rovine, a to ešte nie v tej, v ktorej leží smer maximálneho vyžarovania, zvierajúci so zemským povrchom určitý elevačný uhol  $\gamma$ . Viac informácií získame z merania pomocou lietadiel alebo vrtuľníkov. V tomto prípade možno odmerať smerovú charakteristiku v niekoľkých výškach, prípadne použiť automatický záznam meraných veličín.

V oblasti kratších vlnových dĺžok a rozmerovo menších antén sa používa druhá metóda, kedy sa meraná anténa otáča a pomocná anténa je pevná. Pri tejto metóde najčastejšie pracuje meraná anténa ako prijímač a pomocná ako vysielač.

Pri meraní smerových charakteristík je výhodné použiť testovanú (skúmanú) anténu ako prijímač. Potom vysielač anténa je umiestnená pevne a prijímač sa otáča okolo svojej osi. Pritom treba mať na zreteli polarizačné vlastnosti antén. Ak napr. obidve antény majú lineárne polarizačné vlastnosti, treba pri meraní dodržať ich súhlasnú geometrickú orientáciu. To znamená, že pri snímaní smerovej charakteristiky v  $E$  rovine budú obidve antény usporiadané horizontálne, zatiaľ čo pri meraní v  $H$  rovine budú usporiadané vertikálne.



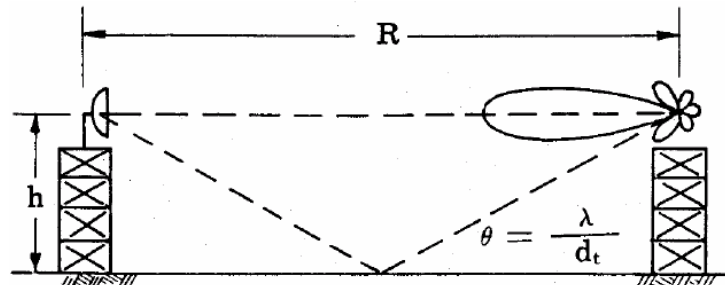
Obr. 1.8: Bloková schéma pracoviska na meranie vyžarovacieho diagramu antén

Antény musia byť nasmerované tak, aby odhadnuté stredy oboch antén ležali v horizontálnej osi, veľký dôraz sa na to kladie hlavne pri meraní antén s veľmi úzkym vyžarovacím lalokom. Meraná anténa sa spravidla umiestňuje na tzv. otočný stožiar, ktorý je konštruovaný tak, že umožňuje jednak natáčanie antény v horizontálnej rovine, v ktorej je meraný diagram a ďalej umožňuje natočenie antény okolo vodorovnej osi, tak aby mohli byť merané rôzne rezy priestorovým diagramom (Obr. 13.8). Veľmi výhodné je, keď otočný stožiar umožňuje naklonenie antény vo vertikálnej rovine. Toto naklonenie sa využíva pri meraní so zvýšenou polohou meranej antény, ktoré obmedzuje odraz od zeme. Konštrukcia otočného stožiara má byť z izolačného materiálu, aby kovová konštrukcia neovplyvňovala rozloženie poľa okolo meranej antény. Otáčanie stožiara s anténou je prenášané na zapisovacie zariadenie spojené s výstupom prijímača. Naklonenie vo vertikálnej rovine nemožno často realizovať pre zložitosť konštrukcie - musíme sa uspokojiť s meraním len v horizontálnej rovine. Požiadavka celo izolačnej konštrukcie narazí často na ekonomické problémy, a preto musíme dbať na to, aby aspoň meraná anténa bola dostatočne vzdialená od kovových súčastí otočného stožiara a upevnená na izolačnom držiaku. Vertikálna os otáčania má prechádzať fázovým stredom meranej antény. Pokiaľ to pozdĺžne rozmery antény neumožňujú (práve pri nižších frekvenciách), je treba polohu antény voči osi otáčania označiť na nameraných diagramoch. Vysielacia anténa je umiestnená na podstavci, ktorý umožňuje nastavenie výšky antény tak, aby maximum jej žiarenia bolo na spojnici medzi meranou anténou a vysielacou anténou. Upevnenie vysielacej antény, alebo jej konštrukcie má umožniť natáčanie antény pozdĺž vodorovnej osi tak, aby sa mohla meniť



orientácia polarizácie vlnenia dopadajúceho na meranú anténu. Schematické znázornenie meracej sústavy je na Obr. 13.8.

Pre správne meranie smerovej charakteristiky antén je dôležitá aj výška antény nad povrchom. Na Obr. 13.9 je zobrazené výškové usporiadanie antén.



Obr. 1.9: Usporiadanie meracieho pracoviska (merací polygón)

V tomto usporiadaní meracieho pracoviska (merací polygón), vlny odrazené od zeme budú utlmené ich absorpciou, prípadne ich rozptýlením na povrchu Zeme. Vysielacie a prijímacie antény bývajú umiestnené na stožiaroch, budovách alebo kopcoch. Ideálny prípad nastane, ak zvolíme výšku umiestnenia antény  $h$  tak, aby prvé minimum smerového diagramu vysielacej antény smerovalo do miesta zrkadlového odrazu. Potom pre výšku antény platí

$$h \approx \frac{\theta R}{2}, \quad (13.3)$$

kde  $\theta$  je uhol prvého minima vyžarovacieho diagramu.

Požiadavky podľa Obr. 13.9 v praxi ťažko splníme. Ak sa ukáže kontrola intenzity poľa v mieste meranej antény väčšia než povolené výchylky, môžeme v mieste zrkadlového odrazu priečného na smer šírenia umiestniť tzv. difrakčnú prekážku, alebo zúžiť smerový diagram vysielacej antény. Z obrázka je viditeľné, že na výšku antény má vplyv smerový diagram antény v opačnej polarizácii ako je tá, ktorá je meraná. Čím je táto charakteristika užšia tým je možné výšku  $h$  zmenšiť. Z tohto dôvodu je vhodné používať vysielaciu anténu (pomocnú) s čo najužším vyžarovacím diagramom. Táto požiadavka sa ale v pásmach do 1 GHz ťažšie dodržiava ako na vyšších frekvenciách.

Tam, kde nemožno nájsť vhodný vonkajší priestor, alebo kde časté merania ohrozujú vplyvy počasia, sa používajú tzv. anechoidné (bezodrazové) komory. Anechoidná komora je miestnosť, ktorej veľkosť je daná maximálnou veľkosťou meranej antény a ktorá má všetky steny obložené bezodrazovým útlmovým materiálom. Moderné anechoidné komory sú často veľmi veľké a umožňujú meranie antén i na mobilných prostrediach, vozidlách, lietadlách a pod.

Prístrojové vybavenie meracieho pracoviska je závislé od frekvenčného pásma, v ktorom sa bude merať a od veľkosti meraných antén. Zásadne ide o určenie potrebného výkonu vysielачa a citlivosti prijímača. Výkon na výstupe skúmanej prijímacej antény vyvolaný vysielacou anténou je daný vzťahom

$$P_r = P_0 \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right) g(\theta, \Phi) g'(\theta, \Phi), \quad (13.4)$$

kde  $P_r$  je prijatý výkon [W],  $P_0$  je vstupný výkon na vysielacej anténe [W],  $r$  je vzájomná vzdialenosť medzi anténami,  $\lambda$  je vlnová dĺžka,  $g(\theta, \Phi)$  je zisk vysielacej antény v smere  $(\theta, \Phi)$  a  $g'(\theta, \Phi)$  je zisk prijímacej antény v smere  $(\theta, \Phi)$  za predpokladu, že obe antény majú rovnakú polarizáciu.

Táto rovnica sa dá upraviť pre stanovenie minimálnej úrovne prijatého signálu a úrovne vysielacieho výkonu tak, aby sa určil dynamický rozsah, v ktorom sa dá merať vyžarovací diagram. Ak požadujeme napr. dynamický rozsah merania aspoň 40 dB, ktorý určuje najmenšiu úroveň merania postranných lalokov vyžarovacieho diagramu, bude rovnica (13.5) vyzerať nasledovne:

$$L_r = G_{max} + G'_{max} - 40dB - 20 \log \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right), \quad (13.5)$$

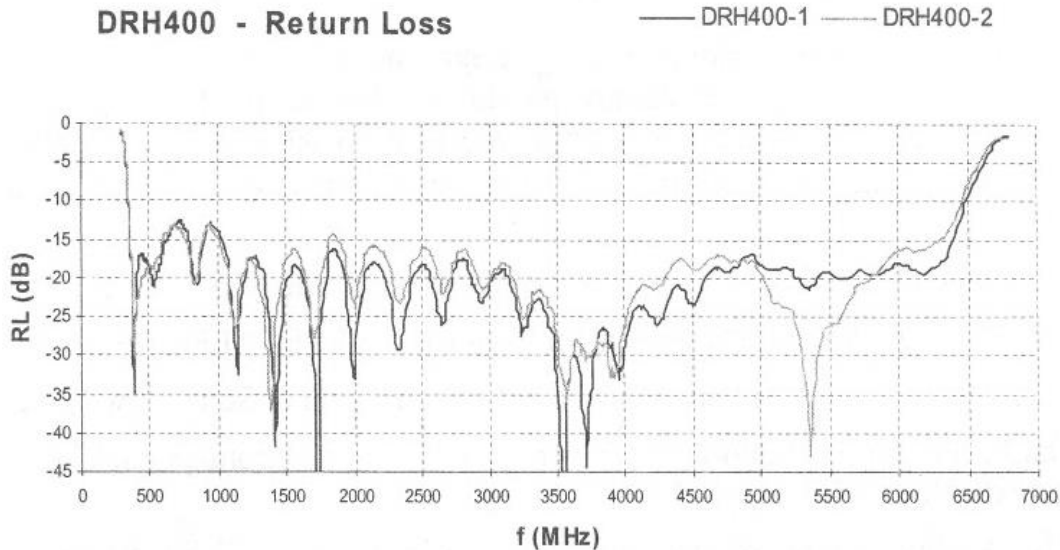
kde  $L_r$  je úroveň signálu na výstupe prijímacej antény [dBm],  $G_{max}$  je maximálny zisk vysielacej antény [dB] a  $G'_{max}$  je maximálny zisk meranej antény [dB].

Uvedená úroveň signálu  $L_r$  prijatého meranou anténou platí pre orientáciu prijímacej antény v smere minima vyžarovacieho diagramu -40 dB. Namerané diagramy zobrazujeme buď v ortogonálnom alebo polárnom zobrazení.

### **1.3. Meranie impedancie a koeficienta odrazu**

Impedanciu antény meriame vrátane mechanickej prevádzkovej podpery. Ak má anténa súmerné napájanie, musíme použiť symetrizačný člen (pokiaľ použité meracie zariadenie nemá pre meranie súmerných záťaží vstup). Vplyv určitého symetrizačného člena je potrebné brať do úvahy hlavne pri meraniach v širšom frekvenčnom pásme. K meraniu impedancie sa v minulosti používali rôzne mostíky alebo reflektometre, prípadne merače vedení na cm vlnách. V súčasnosti poskytuje priemysel meracích prístrojov veľký výber tzv. sieťových analyzátorov (Network Analyser), ktoré v spojení s počítačom vyhodnotí meranú impedanciu rovno na grafickom zázname, napr. na Smithovom diagrame. Renomovanými firmami sú napr. Hewlett Packard alebo Rohde Schwarz.

Meranie sa môže robiť aj klasickým vektorovým marením impedancie, ktoré poskytuje komplexnú informáciu o tom, akým spôsobom anténu prispôbiť. Skalárne merania dávajú len neúplnú informáciu. Výstup týchto meraní sa väčšinou udáva pomocou veľkosti odrazenej vlny (v dB ako tzv. straty odrazom) alebo pomocou činiteľa stojatého vlnenia. Obr. 13.10 udáva príklad prispôbenia dvojice širokopásmových antén. Kritérium prípustné veľkosti odrazu je relatívne a závisí na konkrétnom type antény. Pre širokopásmové použitie sa väčšinou berie šírka pásma na úrovni -10 dB, pre iné antény, väčšinou úzkopásmové sa požaduje bežne -20 dB, v prípade radioreleových antén aj -30 dB.



**Obr. 1.10: Ukážka výstupu merania prispôsobenia širokopásmovej antény DRH400**

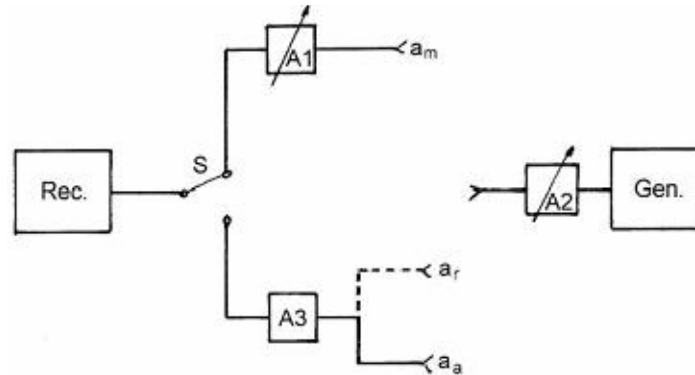
## **1.4. Meranie zisku**

Hlavným parametrom charakterizujúcim účinnosť antény je jej zisk  $G$ . Zisk antény sa meria buď porovnaním s kalibrovanou anténou daného zisku, alebo pomocou vzájomných meraní trojice antén (merajú sa postupne prenosy medzi anténami 1 - 2, 2 - 3 a 3 - 1). Z týchto výsledkov je možné získať hodnotu absolútneho zisku každej z antén. Marenie je možné zjednodušiť v prípade, že máme dve úplne identické antény, potom postačuje len jedno meranie. Marenie zisku je nutné robiť na každej frekvencii pásma, v ktorom anténa funguje, resp. s dostatočne hustým krokom vzhľadom k osekávanej frekvenčnej závislosti antény.

### **1.4.1. Substitučná metóda**

Pre túto metódu platí opäť zákon reciprocity, takže nezáleží na tom, či meraná anténa je prijímacia alebo vysielacia. Meraná anténa spolu s jej nosným systémom sa umiestni do meracieho priestoru (popísaný v kapitolách 13.1, 13.2) a je vystavená dopadu rovinatej elektromagnetickej vlny vysielacej antény, ktorá má polarizáciu zodpovedajúcu polarizácii meranej antény. Výstupný výkon antény, dodávaný do špecifikovanej záťaže, sa porovnáva s výkonom substitučnej referenčnej antény. Substitučnú anténu je treba umiestniť do rovnakého miesta, ako bola umiestnená meraná anténa. Zisk substitučnej antény musí byť presne známy, rovnako ako jej smerovosť, polarizácia a charakteristika krížovej polarizácie. Polarizácia referenčnej antény pri meraní musí byť totožná s polarizáciou meranej antény. Odporúča sa, aby sa substitučná anténa typom nelíšila od meranej antény. Ak je to možné, je treba, aby fázové stredy oboch antén (meranej aj substitučnej) boli pri substitúcii v rovnakej polohe. Spojovacie vedenie medzi meranou a substitučnou anténou a meracím prijímačom by malo byť rovnaké. V opačnom prípade musíme poznať útlm vedenia pre každú meraciu frekvenciu. Je treba zaistiť, aby spojovacie vedenie pri meranej anténe zaujalo normálnu pracovnú polohu. V prípade, že nie je táto poloha špecifikovaná, musí sa dbať na to, aby poloha spojovacieho vedenia mala na merané hodnoty čo najmenší vplyv. Ak sa použije nesymetrické vedenie k pripojeniu symetricky napájanej antény, je treba použiť symetrizačný člen. Pri meraní je treba

kontrolovať elektrickú stabilitu meracieho zariadenia. Preto je pri meraní vhodné použiť prijímaciu monitorovú anténu a umiestniť ju do polohy, kde neovplyvní rozloženie poľa v mieste meranej antény. Stupeň impedančného neprispôsobenia medzi meranou anténou, vedením a meracím zariadením nemá na oboch stranách vedenia prekročiť koeficient odrazu 0,1. To isté platí pre obvody substitučnej antény. Príklad zapojenia meracích prístrojov a antén je na Obr. 13.11.



**Obr. 1.11: Schéma meracej sústavy substitučnou metódou**

Zoslabovačom  $A_1$  zaradeným do vedľajšieho vedenia nastavíme rovnakú úroveň signálu na vstupe prijímača pre obe polohy prepínača  $S$ , ktorý pripája na prijímač ako monitorovaciu anténu  $a_m$ , tak aj substitučnú anténu  $a_r$ . Zoslabovač  $A_3$  je spravidla nemenný, s útlmom 3 dB a znižuje prípadný vplyv impedančného neprispôsobenia substitučnej a meranej antény  $a_a$ . Zoslabovač  $A_2$  je presný premenný zoslabovač. Týmto zoslabovačom nastavíme rovnakú výchylku indikátora prijímača ako po pripojení substitučnej antény, tak aj pripojení meranej antény. Rozdiel medzi oboma zoslabovačmi  $A_d$  udáva rozdiel medzi ziskom substitučnej antény  $G_r$  a meranej antény  $G_a$ . Výsledný zisk meranej antény je daný rovnicou

$$G_a = G_r + (-A_d) . \quad (13.6)$$

Tomuto prípadu sa spravidla vyhýbame a za substitučnú anténu volíme anténu s väčším ziskom, ako je očakávaný zisk meranej antény. Zisk meriame väčšinou pre niekoľko frekvencií v pracovnom (pozn.: znamienko - predpokladá, že zisk meranej antény je menší ako zisk referenčnej antény) pásme antény a niekoľko meraní opakujeme, vždy s kontrolou signálu monitorovacej antény. Namerané zisky zapíšeme do tabuľky alebo do grafu. Rozptyl nameraných údajov pre danú frekvenciu ukazuje na stabilitu našich prístrojov. Špeciálne meracie prijímače majú pre tieto účely vedľajší vstup pre signál z monitorovacej antény a ich citlivosť je priebežne riadená podľa prípadnej odchýlky signálu vysielača. Pri meraní zisku rozmerných antén (napr. parabolického reflektora s priemerom  $D \cong 100 \lambda$  je treba meniť, najlepšie priebežne, polohu substitučnej antény naprieč vertikálnym rozmerom meranej antény a štatisticky vyhodnotiť namerané hodnoty.

### 1.4.2. Recipročná metóda

K tomuto meraniu potrebujeme dve totožné antény. Jedna je použitá ako prijímacia a druhá ako vysielačia. Každá anténa je umiestnená spolu s upevňovacou konštrukciou na stožiar (teleskopický) a sú vzájomne nasmerované (maximom vyžarovacieho diagramu). Výšku antén nad zemou je možné nastaviť tak, že obe

antény sú v rovnakej výške nad zemou. Minimálna výška nad zemou má byť najmenej  $2\lambda$ . Vzájomná vzdialenosť medzi anténami  $r$  musí byť známa a má byť najmenej  $3\lambda$  alebo  $4b^2/\lambda$ , kde  $b$  udáva najväčší rozmer antény. Z oboch hodnôt použijeme tu väčšiu. Vplyv odrazov od zeme kontrolujeme súčasne zmenou výšky oboch antén z minima  $2\lambda$  a zaznamenáme relatívnu zmenu na indikátore prijímača. Zmeny by nemali prekročiť  $\pm 0,5$  dB. Za týchto podmienok zanedbateľného vplyvu odrazov od zeme je útlm medzi oboma anténami daný vzťahom

$$A_s = 20 \log \left( \frac{4\pi r}{\lambda} \right), \quad (13.7)$$

kde  $A_s$  je nameraný útlm [dB],  $G_i$  je zisk voči izotropnému žiariču [dB],  $r$  je vzdialenosť medzi fázovými stredmi oboch antén a  $\lambda$  je vlnová dĺžka meracej frekvencie.

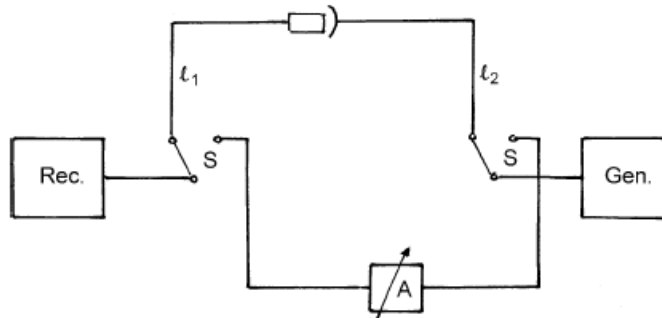
V praxi môžeme vzdialenosť  $r$  merať medzi napájacími svorkami antén (s výnimkou „apertúrových antén“, napr. lievikové antény, šošovkové, reflektorové a pod.). Zisk antény (dB) voči izotropnému žiariču je daný vzťahom

$$G_i = 10 \log \left( \frac{4\pi r}{\lambda} \right) - \frac{A_s}{2}, \quad (13.8)$$

alebo voči polvlnovému dipólu vzťahom

$$G_i = 10 \log \left( \frac{4\pi r}{\lambda} \right) - \frac{A_s}{2} - 2,15. \quad (13.9)$$

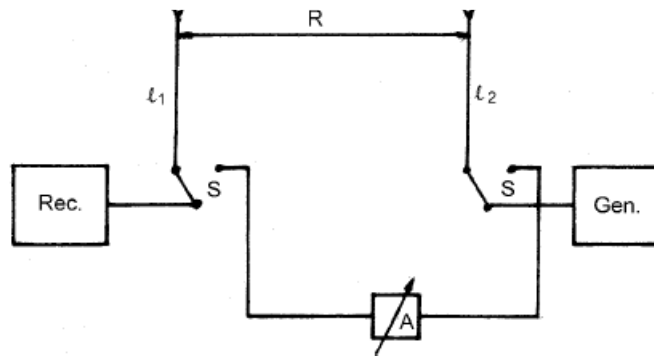
Útlm  $A_s$  medzi oboma anténami môžeme merať rôznymi spôsobmi podľa toho, aký merací prístroj použijeme.



**Obr. 1.12: Schéma merania útlmu káblov (vodičov)**

Prístroje zapojíme podľa Obr. 13.12 a Obr. 13.13. Pri tom dbáme na to, aby impedančné prispôsobenie medzi káblami  $l_1$ ,  $l_2$  a meranými anténami a použitými meracími prístrojmi vykazovalo maximálne koeficient odrazu 0,1 (pozn.: dĺžky vodičov - káblov  $l_1$ ,  $l_2$  nemusia byť rovnaké). Najskôr spojíme anténne konce káblov navzájom podľa Obr. 13.12. Pre každú meraciu frekvenciu nastavíme zoslabovač  $A$  tak, aby prijímač ukazoval rovnakú výchylku pre obe polohy prepínačov  $S$ . Túto hodnotu zoslabovača označíme  $A_1$ . Potom pripojíme káble k anténam podľa Obr. 13.13 a znova nastavíme zoslabovač  $A$  na rovnakú výchylku prijímača pre obidve polohy prepínačov  $S$ . Túto hodnotu zoslabovača označíme  $A_2$ . Výsledný meraný útlm v dB je daný vzťahom

$$A_s = (A_2 - A_1) \cdot \quad (13.10)$$



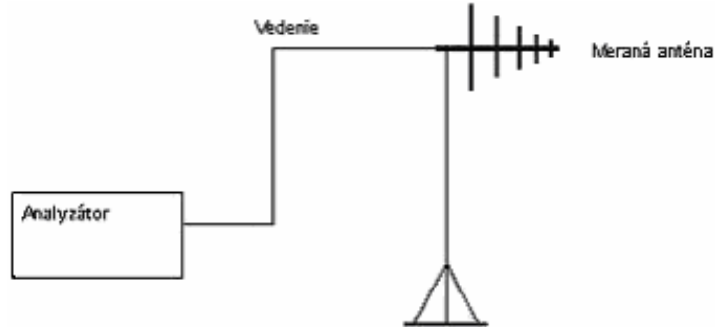
Obr. 1.13: Schéma merania útlmu systému

## 1.5. Príklady merania parametrov antén

Cieľom tejto časti skrípt je meranie parametrov antén (smerová charakteristika, zisk a tlmenie odrazu) využitím automatizovaného pracoviska v dvoch vybraných lokalitách a vyhodnotenie nameraných výsledkov.

### 1.5.1. Meranie tlmenia odrazu

Určuje ho pomer stojatých vln PSV. Bloková schéma zapojenia je na Obr. 13.14.



Obr. 1.14: Bloková schéma merania tlmenia odrazu

Meracie prístroje:

- Vektorový analyzátor Agilent 8753ET pracujúci vo frekvenčnom pásme (300 kHz – 6 GHz).

Merané antény:

- HL 223 od firmy R&S pre pásmo 200 MHz – 1 GHz.
- GSM anténa od firmy Kathrein pre frekvenčné pásmo 870 – 960 MHz.
- Všesmerová anténa pre frekvenčné pásmo 700 MHz – 850 MHz.

Najskôr je potrebné kalibrovať rozhranie do antény (napájač – vedenie, pripojený na analyzátor) ako otvorený potom zavretý (skrat), tým sa nakalibruje maximálny odraz. Potom sa upevní na jeho koniec

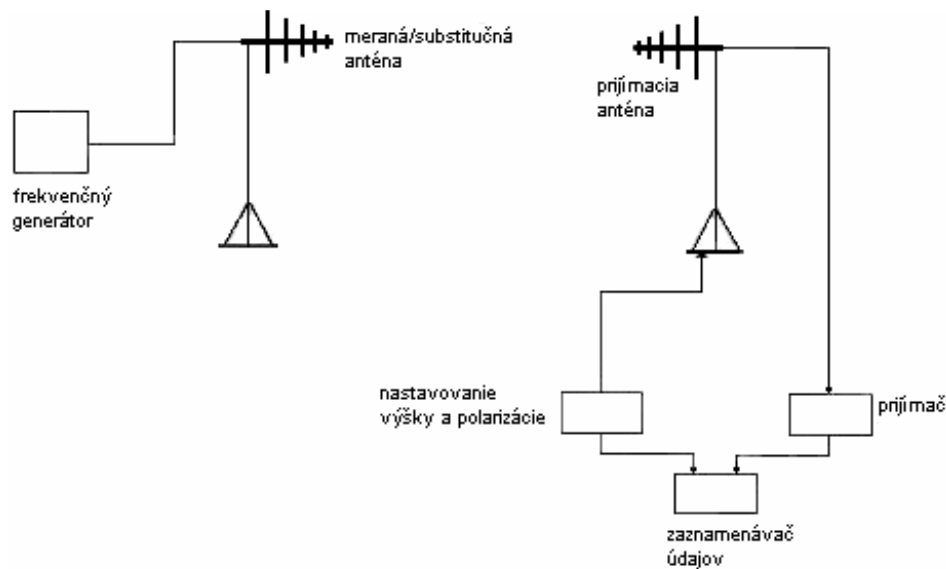
záťaž s odporom  $50 \Omega$ , ktorá sa nakalibruje voči tomuto maximálnemu odrazu. Následne na dané už nakalibrované vedenie sa napojí meraná anténa, ktorej PSV (je to bezrozmerné číslo) sa určí pomocou použitého analyzátora. Pre prvú anténu sa vyhľadá maximum priebehu pomocou markera (označovača - šípka), čiara v strede určuje ideálne PSV = 1. Jej PSV na frekvencii 242,540 MHz je  $\cong 1,7$ , čo je dobré lebo pre tieto antény býva PSV do 1,8.

Pre antény GSM majú PSV výrobcom zaručované do hodnoty 1,3. Pre polarizáciu  $+45^\circ$  je PSV  $\cong 1,12$ , pre polarizáciu  $-45^\circ$  je PSV  $\cong 1,15$ . Z nameraných údajov vyplýva, že táto anténa má veľmi dobré impedančné prispôsobenie. Vysielacie antény musia mať lepšie PSV ako prijímacie, aby nedošlo k zničeniu vysieláča.

PSV všesmerovej antény nebolo výrobcom definované. Tlmenie odrazu na  $f \cong 779$  MHz je rovné  $-13,658$  dB. Z toho PSV = 1,532. Táto hodnota je postačujúca, keďže meraná anténa sa používa ako prijímacia.

### 1.5.2. Meranie zisku

Meranie sa vykonáva substitučnou metódou pre anténu HL 223 od firmy R&S pre pásmo 200 MHz – 1 GHz na troch rôznych frekvenciách. Na obrázku Obr. 13.15 je bloková schéma zapojenia pracoviska.



Obr. 1.15: Blokovaná schéma pracoviska na meranie zisku antény

Použité prístroje:

- Frekvenčný generátor HP 83640B, pracovné pásmo 10 MHz – 40 GHz.
- Nastavovanie výšky a polarizácie antény R&S Positioning controller, HCC.
- Merný prijímač R&S EMI TEST Receiver ESVS, 10 – 20 – 1000 MHz.

Na zaznamenávanie úrovní pre jednotlivé frekvencie sa použil počítač vybavený programom – EMI Measurement software ES – K1 V1.60. Pomocou neho sa nastavuje frekvencia, polarizácia a výška antény na prijímacej strane.

Najskôr sa nastavuje frekvencia na ktorej sa má meranie vykonať na generátore a na mernom prijímači. Výkon na generátore bol nastavený na 0 dBm. Prijímacia a vysielačacia anténa boli pri experimente vo vzdialenosti 10 m od seba a nastavené tak, aby na mernom prijímači bola dosiahnutá maximálna hodnota. Táto hodnota sa zaznamenala. Meranie sa opakovalo na ďalších dvoch zvolených frekvenciách. Potom sa namiesto meranej antény pripojila substitučná anténa, pre ktorú sa meranie zopakovalo. Meranie sa vykonalo na rovnakých frekvenciách, na ktorých sa merala aj meraná anténa. Na pokrytie všetkých troch frekvencií bolo potrebné použiť dve substitučné antény. Pre frekvenciu 200 MHz bol použitý dipól DP1 od firmy RFT. Pre frekvencie 750 a 1000 MHz sa použila anténa DP3 od tej istej firmy.

Rozdiel nameraných úrovní nám potom udáva zisk meranej antény voči substitučnej. Následne potom súčtom zisku meranej antény voči substitučnej a zisku substitučnej antény dostaneme zisk meranej antény oproti izotropnému žiariču. Platí vzťah

$$G_{mvi} = U_{roz} + G_s \text{ [dBi]}, \quad (13.11)$$

kde  $U_{roz}$  je rozdiel nameraných úrovní na spektrálnom analyzátoe pri meranej a substitučnej anténe uvedený v dB,  $G_s$  je zisk substitučnej antény v dB. Hodnoty zisku substitučnej antény, ktoré sú v tabuľke (Tab. 13.1) boli získané použitím vzťahu

$$G_s = 20 \log f - 29,8 - AF, \quad (13.12)$$

kde  $AF$  je anténny koeficient, ktorý sa získa z kalibračných tabuliek antén pre konkrétne frekvencie. Vypočítané hodnoty sú uvedené v tabuľke (Tab. 13.1).

**Tab. 1.1: Namerané a vypočítané údaje**

| Frekvencia<br>f [MHz] | R&S - Úroveň<br>signálu na SA<br>[dBμV] | Substitučná anténa -<br>Úroveň signálu na SA<br>[dBμV] | Rozdiel úrovní<br>$U_{roz}$ [dBV] | $G_s$ [dB] | $G_{mv}$ [dBi] | $G_i$ [dBi]<br>Hodnoty definované<br>výrobcom |
|-----------------------|---|--|-----------------------------------|------------|----------------|---|
| 1000                  | 49,8                                    | 39,7   | 10,1                              | -2,3       | 7,8            | 7,7   |
| 750                   | 63,15                                   | 55,75  | 7,4                               | -0,09877   | 7,3            | 7,5   |
| 200                   | 67,45                                   | 61,35  | 6,1                               | 0,72       | 6,82           | 6,7   |

Z porovnania nameraných hodnôt zisku a hodnôt deklarovaných výrobcom vychádza maximálna chyba merania 0,2 dB.

### 1.5.3. Meranie vyžarovacej charakteristiky

Merania boli urobené na dvoch meracích pracoviskách:

- Semianechoidná komora – keďže nebola k dispozícii anechoidná komora s meracou vzdialenosťou 10 m tak bola použitá pre meranie komora s vodivou podlahou. V tomto prípade bola meraná anténa použitá ako vysielač. Výška antén od podlahy bola 1,8 m.
- Otvorené meracie miesto – umiestnené na streche budovy. Podlaha bola vodivá – plech a výška antén nad podlahou bola podobne ako v hale 1,8 m.



Meranie bolo vykonané s tými istými anténami a na rovnakých frekvenciách ako meranie zisku. Pri meraní boli antény v horizontálnej polarizácii (HP) a vertikálnej polarizácii (VP). Meranie sa vykonalo na troch anténach: Yagi - UDI, Logaritmicko - peridická anténa a sektorová anténa pre GSM.

Anténa typu Yagi – Udi: jedná sa o štvorprvkovú anténu, zisk definovaný výrobcom je 8 dBi vo frekvenčnom pásme 430 – 450 MHz.

Na frekvencii 430 MHz sú výsledky namerané v HP dosť odlišné čo je spôsobené odrazmi od vodivej podlahy keďže výška antén podľa vzťahu 13.2 by mala byť minimálne 6 m ale v skutočnosti boli antény len 1,8 m nad podlahou. Výsledky vo VP sú charakterom blízke ale v charakteristike nameranej na otvorenom meracom pracovisku je hlavný lalok antény užší čo je spôsobené odrazmi od stien v semianechoidnej komore.

Na frekvencii 440 MHz sú výsledky namerané v HP podobné, ale takisto ako na frekvencii 430 MHz sa na smerovej charakteristike prejavili odrazy od stien semianechoidnej komore, čo rozširuje smerovú charakteristiku. Výsledky vo VP sú ako aj pri HP na tejto frekvencii dosť odlišné.

Na frekvencii 450 MHz sú odchýlky v nameraných výsledkoch podobné ako na ostatných frekvenciách.

Z nameraných výsledkov vyplýva, že chyba v semianechoidnej hale je väčšia ako 5 dB oproti meraniu na otvorenom meracom pracovisku Táto chyba je príliš veľká a preto semianechoidná komora nie je vhodná na meranie antén na frekvenciách do 500 MHz.

#### ***1.5.4. Zhrnutie výsledkov experimentálnych meraní***

Na základe nameraných hodnôt je možné určiť požiadavky na optimálne pracovisko na meranie antén v pásme 200 MHz až 1 GHz. Otvorené meracie miesto je vhodnejšie na meranie antén ako anechoidná alebo semianechoidná komora. Výška antén by mala byť minimálne 8 m nad povrchom pri vzdialenosti antén 10 – 15 m. V tomto prípade by chyba merania smerovej charakteristiky bola maximálne  $\pm 1$  dB. Aby bolo možné dosiahnuť túto chybu merania na použitom otvorenom meracom pracovisku, bolo by potrebné zúžiť frekvenčnú charakteristiku vysielačnej antény tak, aby v oboch polarizáciách a v celom frekvenčnom pásme vysielačnej antény, bolo prvé minimum na smerovej charakteristike pod uhlom maximálne  $20^\circ$  od smeru osi hlavného laloku a pokles zisku v tomto smere bol minimálne 10 dB voči zisku v osi hlavného laloku. Tieto podmienky spĺňa lieviová anténa. Táto anténa ale pri meraní nebola k dispozícii pre frekvencie pod 1 GHz, ale len pre vyššie frekvencie.

Meranie zisku sa realizovalo v semianechoidnej komore. Keďže maximálna chyba merania vychádza 0,2 dB, táto hala je postačujúca na uskutočňovanie týchto meraní.