

# Směrnost a zisk antén (2)

Jindra Macoun, OK1VR

Po krátké rekapitulaci o závislosti směrnosti a zisku na tvaru vyzařovací charakteristiky směrnost antén, uvedené v první části článku, se druhá část zabývá obecnějším způsobem výpočtu směrnosti a zisku z tzv. apertury, čili efektivní plochy antény. U plošných antén (parabolických, trychtýřových, soufázových soustav) se apertura přibližuje jejich fyzikálním rozměrům. Uplatní se i u podélných tvarů Yagiho antén, i když je obtížněji představitelná.

## Zisk a úhel záření

V první části článku jsme připomněli, že směrnost antény je schopnost antény vysílat/přijímat elmag. vlny s různou intenzitou v závislosti na směru. Je definována činitelem směrnosti ( $D$ ) jako poměrem intenzity záření ve směru maxima k intenzitě záření všesměrové izotropické antény do celého sférického prostoru. Přesnější pojmenování je proto absolutní činitel směrnosti ( $D_i$ ). Záření ve směru maxima je určeno dvěma směry, ve kterých klesá intenzita záření z maxima na polovinu vyzařovaného výkonu, tedy o 3 dB. Úhel mezi oběma směry je úhlem záření, vyzařovacím úhlem nebo šířkou svazku.

Zisk antény  $G_i$  (proti izotropickému zářiči) je logaritmickým vyjádřením absolutního činitele směrnosti v dB. Zisk antény  $G_d$  (proti půlvlnnému dipólu) je o 2,15 dB nižší, protože dipól již nezáří všesměrově, ale se směrností 1,64 v rovině kolmé k jeho podélné ose.

Při tomto postupu je tedy zisk antény odvozen ze směrnosti antény, definované změřenou nebo vypočtenou šířkou 3dB svazku ve stupních. V praxi bývá odečítán z grafů (obr. 1 na této stránce a obr. 3 v PE-AR 9/2012, s. 32) nebo počítán z jednoduchých vzorců.

Získané údaje jsou víceméně přibližné, protože 3dB svazek neznázorňuje přesně tvar celého směrnostového diagramu.

Pro lepší pochopení jsme uvažovali parametry antén vysílacích, přestože podle principu reciprocity jsou shodné s parametry antén přijímacích.

## Zisk a efektivní plocha antény

Je pochopitelné, že plošné směrnost antény (parabolické, trychtýřové, plošné anténní řady), orientované hlavním lalokem směrem ke zdroji elmag. záření, budou přijímat signály tím silněji, čím větší plochu „postaví do cesty“ elmag. záření. Při výpočtu směrnosti a zisku se zde vychází z plochy ústí antény, z tzv. apertury  $A$ .

Činitel směrnosti  $D_i$  je pak dán vztahem

$$D_i = 4\pi A/\lambda^2 = 12,56A/\lambda^2 \quad (1),$$

kde  $A$  je plocha apertury a  $\lambda$  je vlnová délka, vyjádřené ve stejných rozměrových jednotkách.

Tento výraz nám vlastně udává, kolikrát se zvýší intenzita elmag. záření ze směrnost antény s plochou  $A/\lambda$  ve směru maxima proti záření všesměrové antény  $4\pi/\lambda$ , kterou je opět izotropický zářič. Obě antény při tom vyzařují stejný výkon.

Logaritmicky vyjádřená směrnost je opět ziskem v dB:

$$G_i = 10\log(4\pi A/\lambda^2) = 10\log(12,56A/\lambda^2) \quad (2).$$

Zvolíme-li např.  $A = 1 \lambda^2$ , pak  $D_i = 12,56$  a  $G_i = 11$  dB; bude-li  $A = 2 \lambda^2$ , pak  $D_i = 25,13$  a  $G_i = 14$  dB.

Dvojnásobná plocha zvýší zisk o 3 dB, takže vysílaná/přijímaná vlny energie se zvětší dvakrát.

Výpočet zisku podle vzorce (2) však platí jen za předpokladu, že veškerá vlny energie prochází aperturou antény, podél které by měla být také rovnoměrně rozložena, ale zároveň by ji neměla na okrajích přezářovat. Protože tomu tak v praxi není, považuje se za plochu ústí tzv. efektivní plocha apertury  $A_e$ . Ta je vždy menší než její fyzikální rozměr. Proto jsou reálné směrnosti a zisky, odvozené z fyzikálních rozměrů apertury, menší. Souvisí to se způsobem, jakým je vysílána (ale i přijímaná) vlny energie podél této apertury rozložena, s tzv. ozářením apertury.

Typickým představitelem plošných antén jsou reflektory parabolických antén, ozářované primárním zářičem z ohniska paraboly. Ozáření jejich apertury závisí na vyzařovacích vlastnostech primárního zářiče. Způsob a parametry ozáření parabolického reflektoru pak ovlivňují diagram záření a tím směrnost a zisk parabolické antény. Rovnoměrné, okraje (hrany) reflektoru nepřezářující ozáření apertury by přineslo maximální zisk odpovídající fyzikální ploše antény. Takové ozáření je nereálné.

Obvykle se reflektory plošných antén ozářují s 10dB snížením úrovně ozáření okrajů, tak aby vlastní vyzařovací diagram plošné antény nebyl znehodnocen nežádoucími postranními laloky, které vznikají interferencí na hranách plošných reflektorů. V praxi se účinnost ozáření pohybuje jen kolem 50 až 60 %, takže skutečné zisky jsou o 2 až 3 dB menší. (Podrobnější informace k ozáření a zisku parabolických antén např. v lit. [1].) Ani u jiných plošných antén nelze počítat s rovnoměrným ozářením jejich apertury. K účinnějšímu ozáření dochází i fázově i amplitudově optimálně uspořádaných plošných sestav dipólů nad společným reflektorem.

Např. populární TV anténa (tzv. „matrace“), soufázově napájená čtveřice celovlnných dipólů nad plošným reflektorem (0,6 x 0,9 m) by podle uvedených vzorců (1) a (2) měla na kmitočtu 750 MHz ( $\lambda = 0,4$  m) vykazovat směrnost  $D_i = 42,4$  a zisk  $G_i = 16,3$  dB, resp. 14,15 dBd, pokládá-li se při tomto výpočtu plocha reflektoru  $1,5 \lambda \times 2,25 \lambda = 3,375 \lambda^2$  za rovnoměrně ozářenou aperturu antény. Reálně naměřený zisk podle (2) činí 12,5 dBd, resp. 14,65 dB. Z toho pak zpětně směrnost  $D = 28,6$  a efektivní plocha  $A_e = 28,6/12,56 = 2,28 \lambda^2$ . Fyzikální rozměr reflektoru je tedy větší než účinná plocha antény. Pokud by anténa teoreticky nevykazovala žádné další ztráty, pak by její efektivní plocha vypočtená z aktuálního zisku 12,5 dBd byla o 33 % menší než uvažovaný fyzikální rozměr re-

flektoru  $3,375 \lambda^2$ . Účinnost ozáření tak činí 67,5 %. Ozáření apertury však není jediným faktorem, který ovlivňuje účinnost antény a tím i konečný zisk antény.

Do celkové účinnosti antény je nutné započítat jednak ohmické ztráty v důsledku konečné vodivosti použitých kovových materiálů, ale i dielektrické ztráty izolačních materiálů. Celkovou účinnost ovlivňují ještě objekty, které se nacházejí v blízkém poli antény.

Zahrnuje-li celková účinnost ještě ztráty nepřizpůsobením, uplatňující se obvykle na okrajových kmitočtech provozního pásma, dostáváme reálný (provozní) zisk antény.

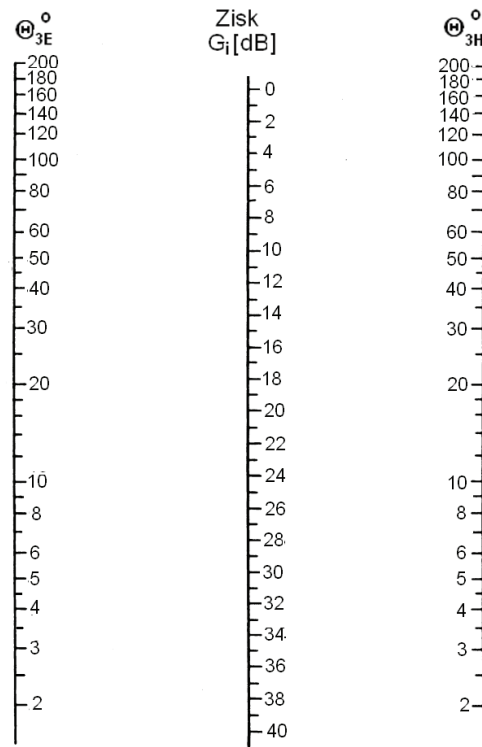
## Zisk a efektivní plocha Yagiho antén

Yagiho antény jsou poměrně rozšířeným typem s často diskutovaným a zároveň nadhodnocovaným ziskem. Historické názory o významném vlivu počtu direktorů na zisk Yagiho antény se nepotvrdily. I při různém počtu direktorů na ráhnech shodné délky se při jejich optimálním uspořádání nakonec dosáhne stejného zisku.

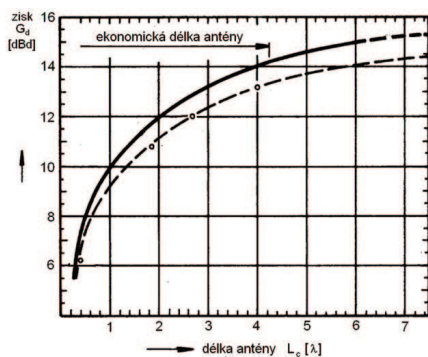
Rozhodujícím rozměrem, ovlivňujícím maximální zisk, je celková délka Yagiho antény.

Obr. 2. je grafickým a praxí ověřeným vyjádřením závislosti zisku na délce antény. Horní křivka ohraničuje dosažitelné maximum, obvykle na nejvyšším kmitočtu provozního pásma. Původně byla stanovena experimentálně z četných měření různých typů, později potvrzena modelováním. V praxi se velikost zisků pohybuje v oblasti omezené oběma křivkami.

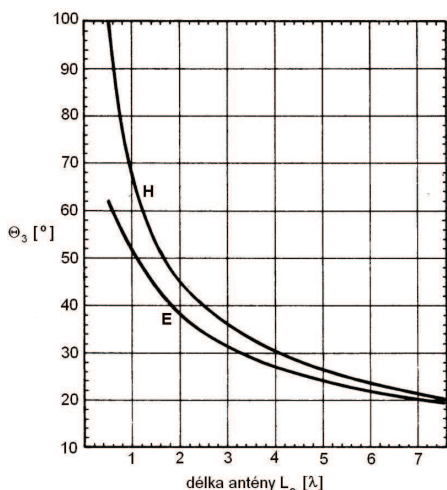
Skutečný zisk lze určit jen měřením. Principiálně je to měření jednoduché, jeho správné provedení je však z mnoha příčin obtížné. Je tím obtížnější, čím delší, resp. rozměrnější anténa je měřena. Pokud je to možné, měří se zisk na přesně zmenšených modelech, popř. v bezdrázových ko-



Obr. 1. Spojnicový nomogram pro určení zisku  $G_i$  [dB] z šířky svazku (úhlu záření) v rovinách E a H ( $\Theta_{3E}$  a  $\Theta_{3H}$  [°])



Obr. 2. Maximální zisk Yagiho antény ( $G_d$  – proti půlvlnnému dipólu) v závislosti na celkové délce antény  $L_c$  [ $\lambda$ ]



Obr. 3. Vztah mezi úhly příjmu/záření (šířkou svazku) v rovinách E a H a celkovou délkou Yagiho antény  $L_c$  [ $\lambda$ ] v oblasti maximálního zisku, obvykle na nejvyšším kmotočtu provozního pásma

morách. Proto se zisk obvykle odvozuje ze směrového diagramu, resp. z úhlů záření ve dvou rovinách. Jde o způsob jednoduchý, v praxi postačující. Nemusíme měřit celý směrový diagram, stačí stanovit úhly záření z poklesu signálu o 3 dB. Z nich pak pomocí grafů (obr. 1 zde nebo obr. 3 v 1. části článku) určíme přibližný zisk.

V souvislosti s předchozí kapitolou se nabízí otázka **efektivní plochy Yagiho antény**. Jak je možné si ji představit, popř. je-li tento parametr u této antény aktuální?

Známe-li její zisk, můžeme efektivní plochu vypočítat odlogaritmováním výrazu (2) pro zisk  $G_i$ .

Např. ze zisku  $G_i = 14$  dB dostaneme směrovost  $D = 25,13$  a z ní aperturu  $A = 2 \lambda^2$ . Za zjednodušeného předpokladu, že prostorový (3D) vyzařovací diagram Yagiho antény se ziskem 14 dBi je rotačně symetrický, tzn. že oba vyzařovací úhly jsou shodné (ve skutečnosti činí přibližně  $38^\circ$

v rovině E a  $45^\circ$  v rovině H (obr. 3), má tato kruhová apertura s plochou  $A = 2 \lambda^2$  průměr  $d = \sqrt{4A/\pi} = 1,6 \lambda$  (odvozeno ze vzorce pro kruhovou plochu apertury  $A = \pi d^2/4$ ). Tento údaj je použitelný např. při volbě rozměrů anténních soustav. Udává minimální vzdálenost mezi ráhny sestavovaných antén, aby se jejich apertury nepřekrývaly, a zvětšil se tak zisk. Skutečná vzdálenost (rozteč) Yagiho antén pro maximální přírůstek zisku je zpravidla větší, závislá na úrovni prvních postranních laloků výsledného diagramu záření. Optimální úroveň prvních postranních laloků činí asi -10 dB pro 3dB zvýšení zisku při každém zdvojení antény.

Znalost uvedených zjednodušených postupů je při úvahách o směrových parametrech antén užitečná. Patří do oblasti základních informací, usnadňujících využití počítačových programů a jejich aplikací při praktické realizaci antén v současné době.

## Poznámky k názvosloví

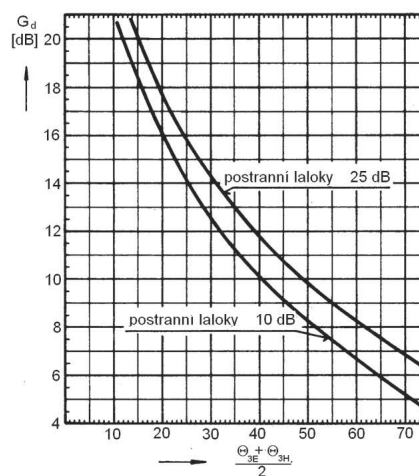
Srozumitelnost textů, zabývajících se anténní problematikou, závisí značnou měrou na všeobecném použití shodně definovaných standardních výrazů. V roce 1960 byla vydána publikace „IEEE Standard Definitions of Term for Antennas“, představující jednotný a vyčerpávající slovník, který má usnadňovat výklad anténní teorie a usnadnit diskuse o anténní problematice především v odborném tisku. Obecné používání standardních definic odstranilo původně široký nesoulad ve formulacích základních parametrů – zisku, šířky svazku, polarizace, účinnosti a dalších.

Někteří autoři anténních publikací však přinášejí ke stejným parametrům definice víceméně jinak formulované, popř. zdánlivě úplně jiné. Často tím sledují záměr, aby byly srozumitelné odborné úrovni zájemců o danou publikaci nebo článek. I když jsou často určeny různě vzdělaným čtenářům, neměly by být z odborného hlediska vzájemně v rozporu.

Zda tomu tak je, mohou čtenáři posoudit na definicích zisku vybraných z několika publikací:

**Zisk antény** je dán poměrem vysílaného výkonu (výkon na výstupní ploše antény transformovaný do vzdálené zóny) k výkonu dodávanému na vstup antény. Často se definuje jako  $4\pi$  krát poměr intenzity vyzařování v daném směru k výkonu přiváděnému na vstup antény. (Mazánek, M.; Pečač, P.; Vokurka, J.: *Antény a šíření vln*. ČVUT 1999 – vysokoškolská učebnice.)

**Zisk antény** lze definovat jako součin směrovosti a účinnosti, nebo jako poměr druhých mocnin intenzit elmag. pole vybuzeného ve stejné vzdálenosti od uvažované a referenční antény za předpokladu, že obě antény jsou napájeny stejným příko-



Obr. 4. Přibližný zisk Yagiho antény ( $G_d$  – proti půlvlnnému dipólu) v závislosti na úhlu příjmu/záření (šířce svazku)  $\Theta_3$ . Uvažuje se jeho průměrná velikost z rovin E a H

nem. (Šimíček, B.: *Antény pro TV a rozhlasové vysílání na VKV*. NADAS 1990.)

**Zisk antény** – součinitel určující praktickou hodnotu směrovosti antény, tj. zahrnuje i účinnost ( $\eta$ ) antény. Lze jej vyjádřit činitelem zisku (absolutním nebo relativním), který je dán vztahem  $G = 10 \log(\eta D)$  [dB]. Zahrneme-li do výpočtu zisku antény i impedanční nepřizpůsobení antény na napáječ, dostaneme **provozní zisk** antény. (Sdělovací technika – oborová encyklopedie. SNTL 1970.)

**Zisk antény** – relativním výkonovým ziskem nejakej smerovej antény rozumieime vzrast výkonu v hlavnom smere vyzařovania tejto smerovky v porovnaní s normovaným dipólom. (Ikrényi, I.: *Amatérské krátkovlnové antény*. Bratislava, ALFA 1972, 2. vyd.)

**Zisk** – nárůst efektivně vyzařovaného výkonu v požadovaném směru hlavního laloku v porovnání s referencí – dipólem nebo izotropickým zdrojem. (ARRL Antenna Book. 19th Edition, 2002.)

**Směrový zisk** (antény) – v daném směru je  $4\pi$  násobek poměru radiční intenzity v uvažovaném směru k celkovému výkonu vyzařovanému anténou.

**Relativní zisk antény** – poměr výkonového zisku v uvažovaném směru k výkonovému zisku (referenční) antény v jejím referenčním směru. Pozn.: Obvykle bývá referenční anténou půlvlnný dipól, elektrický dipól, magnetický dipól, unipól a kalibrovaný trychtýřový zářič. (IEEE Test Procedure for Antennas, AP-13. No 3, May 1965 [2].)

**Zisk, dBi** – zisk vyjádřený v decibelech vzhledem k izotropickému zářiči, lineárně polarizovanému.

**Izotropický zářič** – hypotetická anténa, vyzařující stejnou intenzitou do všech směrů. Pozn.: Izotropický radiátor představuje obvyklou referenci pro vyjádření směrových vlastností aktuální antény. (ARA – Antenna Research Associates Inc.: *Standard Antenna Terms and related Formulas*.)

## Literatura

- [1] Procházková, M.: *Antény*, encyklopedická příručka. 3., rozšířené vydání. BEN – technická literatura 2005.
- [2] IEEE Test Procedure for Antennas. AP-13. No 3, May 1965.
- [3] Mazánek, M.; Pečač, P.; Vokurka, J.: *Antény a šíření vln*. ČVUT 1999 (vysokoškolská učebnice).

Tab. 1. Zisky antén v dBi stanovené několika způsoby (viz 1. část v PE-AR 9/2012)

1	2	3	4	5	6	7	8
Anténa	Zisk [dBi]	$\Theta_{3E}$ [°]	$\Theta_{3H}$ [°]	Zisk dle PE 09	Zisk dle PE 10	Zisk 41 253/ $\Theta_3^2$	Zisk 52 525/ $\Theta_3^2$
Yagi 2,4 $\lambda$ (TV III)	13,7	38,8	43	13	12,2	13,9	15,0
Yagi 5,3 $\lambda$ (WiFi)	17,1	22,4	23	18,2	18	19	20,1
TVa	14,8	25,8	41	15	14,2	15,9	16,9
Parab. $\varnothing$ 10 $\lambda$	28	6,5	6,5	28	28	30	31

Sloupec 1 – název antény; sl. 2, 3, 4 – údaje vypočtené v programu EZNEC; 5 – odečteno z nomogramu na obr. 3 v PE-AR 9; 6 – odečteno z nomogramu na obr. 1; 7, 8 – vypočteno podle vzorců pro směrovost, resp. zisk v 1. části článku

