

Informace č. 15/2008
NRL pro neionizující elektromagnetická pole a záření

**Zhodnocení možných zdravotních rizik vyvolaných elektromagnetickým zářením
radiolokátoru Europe Based Radar (EBR)**

Cílem této informace je ukázat parametry uvažované radarové stanice, definovat skutečná rizika, která mohou vzniknout při expozici člověka mikrovlnnému záření generovanému touto radarovou stanicí a vyvrátit některá mylná tvrzení o možných zdravotních účincích tohoto zařízení.

Technické parametry radaru EBR

Radiolokátor EBR (Europe Based Radar), který má být umístěn na kótě 718 ve vojenském újezdu Brdy blízko obce Míšov, je v současné době provozován na tichomořském ostrově Kwajalein pod označením GBR (Ground Based Radar), někdy také GBX (Ground Based X-Band).

- Vysokofrekvenční výkon přenášený svazkem během vysílání impulsu je 170 kilowattů. Oficiální sdělení MO ČR, že hodnota 170 kW se týká výkonu vysílače v impulsu a nikoli průměrného výkonu, odpovídá vysokofrekvenčnímu výkonu 10 W jednoho vysílacího modulu a souhlasí s hodnotou výkonu, kterou lze očekávat jako maximální u použitých polovodičových zářičů.
- Plocha aktivní (přibližně kruhové) části rovinné antény je 105 m².
- Frekvence vysílače je z pásma „X“ (8 GHz – 12 GHz, vlnová délka středu pásma je 0,03 metru).
- Úhlová šířka svazku v dostatečné vzdálenosti od antény je 0,18°.
- Nejmenší používaný elevační úhel svazku je rovný 2°.
- Vysokofrekvenční výkon vyzařovaný jednotlivými postranními (parazitními) laloky je o 40 dB (tj. desettisíckrát) menší než vysokofrekvenční výkon hlavního svazku.
- Počet elementárních polovodičových zářičů v anténě je 16896.
- Výkon vyzařovaný v impulsu je čtyřikrát větší než průměrný vyzařovaný výkon, což odpovídá poměru 1:3 časové délky impulsu k délce doby, kdy vysílač radiolokátoru nevysílá a zařízení čeká na příchod odraženého signálu. Výše uvedená informace je uvedena v článku [1] spolu s dosahovanou hustotou zářivého toku ve svazku.
- Svislý i vodorovný úhel rozmítání svazku, které je prováděno elektronicky bez mechanického pohybu antény, je 12,5°.

Vypočet elektromagnetického pole vyzařovaného radarovou stanicí

Pro výpočet šířky svazku a jeho výkonových parametrů byla použita kvazioptická teorie šíření vlnového svazku. Profil svazku byl aproximován Gaussovou křivkou s šířkou $w_0 = 5,78$ m rovnou poloměru antény.

S použitím vztahů kvazioptické aproximace dostaneme po dosazení numerických hodnot:

a) Pro úhlovou šířku svazku hodnotu (celý úhel rozevření) $\theta = 2 \cdot \lambda / (\pi \cdot w_0) = 0,19^\circ$; pětiprocentní odchylka ve srovnání s deklarovanou hodnotou 0,18° je menší, než jakou lze

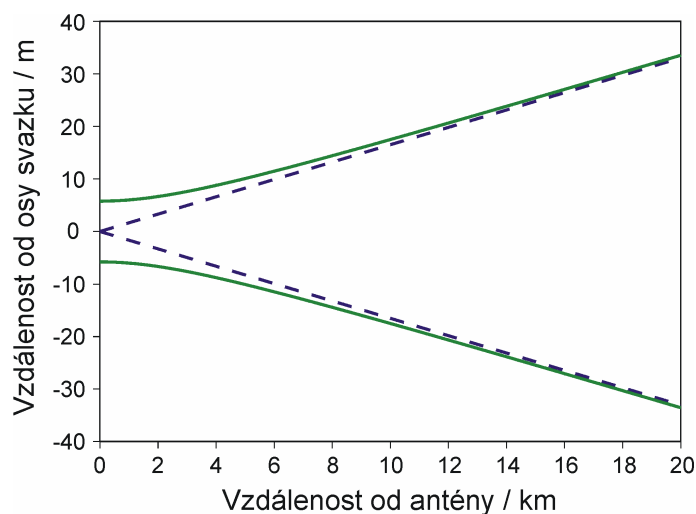
očekávat vzhledem k nejistotě vlnové délky, která byla pro výpočet vzata ze středu intervalu frekvenčního pásma X. Dobrý souhlas ukazuje také oprávněnost volby Gaussovy křivky pro aproximaci profilu svazku.

b) Pro Rayleighovu vzdálenost, v které se svazek začíná rozšiřovat: $z_R = (\pi \cdot w_0^2) / \lambda = 3500 \text{ m}$; v této vzdálenosti je hustota zářivého toku ve svazku rovná polovině hustoty těsně u antény, kde je svazek nejužší.

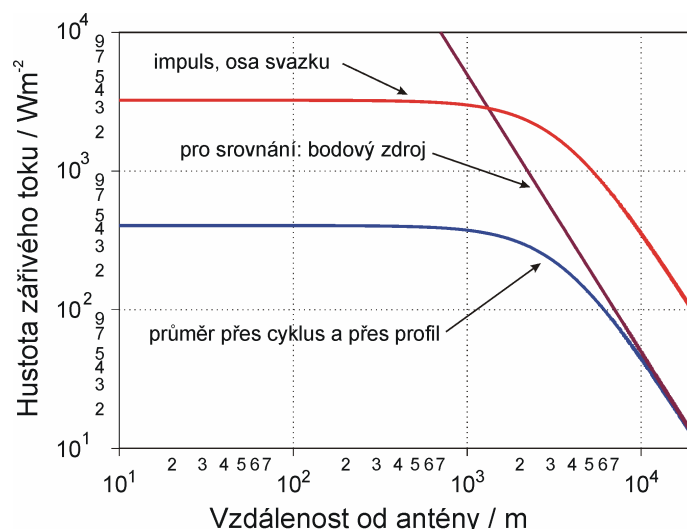
c) Pro závislost šířky svazku $w(z)$ na vzdálenosti z od antény: $w(z) = w_0 \cdot (1 + (z / z_R)^2)^{1/2} = 5,78 \cdot (1 + z^2 / 3500^2)^{1/2}$. Rozšiřování vlnového svazku s rostoucí vzdáleností od antény je znázorněno plnými křivkami na obr. 1. Čárkované přímky odpovídají bodovému zdroji se stejnou směrovou charakteristikou.

d) Pro závislost hustoty zářivého toku S na vzdálenosti z od antény a na vzdálenosti r od osy svazku platí pro Gaussův profil vztah: $S(z, r) = K \cdot \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot w(z)^2} \cdot \exp(-2 \cdot r^2 / w(z)^2)$.

Na obrázku 2 je výsledek výpočtu znázorněn graficky. Hustota zářivého toku v ose svazku během vysílání impulsu vyjde položením koeficientu K rovným jedné (horní křivka). Časově průměrná hustota zářivého toku, prostorově průměrovaná přes profil svazku, vyjde položením bezrozměrného koeficientu K rovným 1/8 (dolní křivka). Tato veličina je rozhodující při hygienickém hodnocení expozice. Přímka, která se asymptoticky blíží dolní křivce, odpovídá hustotě zářivého toku bodového zdroje průměrované v čase a přes profil svazku.



Obr. 1 Rozšiřování vlnového svazku s rostoucí vzdáleností od antény



Obr. 2 Hustota zářivého toku – závislost na vzdálenosti od antény

Na obr. 3 umístěném na konci textu jsou se započtením zakřivení zemského povrchu vyneseny polohy vrcholů kopců v okolí předpokládaného umístění radiolokátoru EBR a dva průběhy vlnového svazku zakřiveného pozvolným lomem způsobeným poklesem velikosti indexu lomu atmosféry s výškou nad terénem: horní křivka odpovídá dráze svazku při normálním stavu atmosféry (svislý gradient indexu lomu je v tomto případě rovný $-40 \cdot 10^{-9} \text{ m}^{-1}$), nižší křivka odpovídá ohybu svazku při výjimečně se vyskytující situaci, kdy gradient indexu lomu v přízemní vrstvě atmosféry dosahuje extrémní hodnoty $-160 \cdot 10^{-9} \text{ m}^{-1}$. V obrázku jsou kromě polohy os obou svazků vyznačeny slabšími čarami i hranice svazků (hustota zářivého toku na hranicích je 13,5 % z hodnoty v ose). I při volbě extrémní hodnoty gradientu indexu lomu atmosféry je rozdíl poloh obou svazků malý. Výpočet byl proveden počítačovým programem. Jeho použití pro větší vzdálenost ukázalo, že ani v druhém naprosto extrémním případě se svazek namířený vzhůru s elevací 2 úhlových stupňů nevrátí k Zemi. K tomu může dojít jen u svazku s elevací rovnou nule nebo nule velmi blízkou.

Výsledky měření u radiolokátoru EBR na ostrově Kwajalein

K odstranění nejistoty o intenzitě postranních laloků v blízké zóně radarové antény a tím i nejistoty o možném překročení expozice osob nacházejících se v úrovni terénu bylo provedeno měření na atolu Kwajalein u radiolokátoru EBR.

Pro měření za provozu radaru bylo vybráno osm bodů v úrovni terénu v různých vzdálenostech od antény v azimutu hlavního vyzařovaného svazku zaměřeného nad vodorovnou rovinu s elevací dvou úhlových stupňů. Vysílání radaru bylo nastaveno na maximální deklarovanou hodnotu 170 kW. K měření hustoty zářivého toku s frekvencí z pásma 10 GHz byl použit přístroj firmy Narda s kalibrovanou sondou určenou pro tento frekvenční obor (měřicí souprava Narda 8718B, výrobní číslo 04114, mikrovlnná sonda Narda 8721, výrobní číslo 12109; zařízení byla kalibrována v květnu 2007 u výrobce v USA). Přístroj, patřící armádě České republiky, zaznamenává jednak *průměrnou* hodnotu hustoty zářivého toku (v jednotkách watt na čtvereční metr; režim měření označený v tabulce č. 1 zkratkou AVG), jednak uloží do paměti *maximální* hodnotu hustoty zářivého toku dosaženou během doby měření (v tomto případě šesti minut v každém měřicím bodu). Zachycené elektromagnetické záření pocházelo od postranních laloků, hlavní svazek mířil v úhlu 2 stupňů vzhůru a místa měření míjel. Terén, v kterém se měřilo, je rovinný bez význačných překážek. Výsledky měření jsou v tabulce č. 1. Pouze v nejbližších čtyřech měřicích bodech

překračoval signál dostatečně úroveň pozadí, takže bylo možné stanovit jeho intenzitu s přijatelnou přesností. Z výsledků měření vyplývá:

a) Hustoty zářivého toku ve výšce dva metry nad úrovní terénu zjištěné v měřicích místech vzdálených 50 metrů, 100 metrů, 210 metrů a 270 metrů od antény jsou nízké a jejich hodnoty svědčí o velmi účinném potlačení nežádoucích bočních laloků vyzařování. I v blízkosti antény, kdy záření v hlavním svazku nemá ještě charakter blízký rovinné vlně a struktura vektorového pole je složitá, je tedy elektromagnetické pole vyzařované postranními laloky velmi slabé.

b) Poměr mezi naměřenými špičkovými hodnotami a naměřenými průměrnými hodnotami je poměrně malý (se započtením nejistoty měření ± 1 dB lze odhadnout, že tento poměr leží v intervalu čísel 2 až 4). Toto zjištění je v souladu s údajem v článku [1] o 25 % využití doby celého cyklu k vysílání impulsu.

Vyhodnocení expozice

Expozici elektromagnetickému poli generovanému radarovou stanicí lze rozdělit do tří částí. První je expozice hlavnímu svazku, druhou je expozice postraním lalokům antény a třetí je expozice záření způsobenému odrazem hlavního svazku od letícího objektu.

a) Expozice hlavnímu svazku

Exponována hlavnímu svazku může být osoba v balónu, na rogalu či na jiném létajícím zařízení, ve kterém by nebyla kryta kovovou stěnou nebo jinak stíněna proti elektromagnetickému poli. Hustota zářivého toku bezprostředně před anténou, průměrovaná přes průřez svazku, je během vysílání impulsu rovná nejvýše $1,6 \text{ kW/m}^2$, v ose svazku může dosáhnout (viz vztahy uvedené výše) dvojnásobku, tj. $3,2 \text{ kW/m}^2$. Žádná z těchto hodnot nepřekračuje mezní referenční hodnotu 10 kW/m^2 pro impulsní expozici obyvatelstva stanovenou v nařízení vlády č. 1/2008 Sb. [2] a tím spíše nepřekračuje mezní referenční hodnotu 50 kW/m^2 pro impulsní expozici zaměstnance. Expozici osob vysokofrekvenčnímu elektromagnetickému poli radiolokátoru EBR je tedy nutné hodnotit podle hustoty energie (časového integrálu z hustoty zářivého toku) dopadnuvší během kterýchkoli šesti minut na tělo.

Při hodnocení expozice elektromagnetickému záření je běžné srovnávat zjištěnou hodnotu hustoty zářivého toku s příslušnou referenční hodnotou, případně s příslušnou nejvyšší přípustnou hodnotou. Tím někdy vzniká mylný dojem, že nejvyšší přípustná nebo referenční hodnota, stanovená pro nepřetržitou expozici, musí být dodržena i při expozici kratší než šest minut. Při hodnocení krátkodobé expozice nebo přerušované expozice je však třeba vzít na vědomí, že nejvyšší přípustná hodnota expozice (případně referenční hodnota) je ve skutečnosti stanovena pro dávku záření (v joulech na čtvereční metr), které je osoba exponována během kterýchkoli šesti minut. Tato dávka ($50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ krát 360 sekund) je rovná 18000 J/m^2 pro zaměstnance a 3600 J/m^2 ($10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ krát 360 sekund) pro ostatní osoby.

V malé vzdálenosti od antény (menší než jeden kilometr) má svazek konstantní průměr a hustota zářivého toku průměrovaná prostorově přes profil svazku a časově přes celý cyklus má hodnotu 400 W/m^2 . Kdyby osoba z kategorie zaměstnanců prolétávala těsně před anténou radiolokátoru a byla při tom exponována průměrné hustotě zářivého toku 400 W/m^2 , překročila by nejvyšší přípustnou hodnotu expozice, jestliže by průlet svazkem trval dobu delší než 45 sekund. V případě, kdy by exponovaná osoba pobývala v blízkosti antény a stále v ose svazku, byla by nejvyšší přípustná expozice překročena za poloviční dobu. Ve

vzdálenosti přibližně 9,5 km klesne průměrná hustota zářivého toku uvnitř svazku na 50 W/m^2 a připouští tak časově neomezenou expozici.

Vezmeme-li v úvahu skutečnost, že nejvyšší přípustné hodnoty jsou nastaveny tak, aby jejich desetinásobné překročení ještě nevedlo k újmě na zdraví, je zřejmé, že ani krajně nepravděpodobná situace, kdy se létající osoba dostane do bezletového pásma a proletí svazkem blízko antény, neznamená ohrožení zdraví.

b) Expozice postranním lalokům

Hustota zářivého toku bočních laloků v úrovni terénu, kterou skupina českých expertů naměřila při provozu radiolokátoru EBR na ostrově Kwajalein v několika vybraných místech, nepřekročila v těchto místech ani hodnotu 10 W/m^2 , přípustnou pro trvalý pobyt ostatních osob (obyvatelstva). Místa byla vybrána po dohodě s americkou obsluhou a je možné je pokládat za dostatečně reprezentativní pro zjišťování významu vedlejších laloků pro expozici osob. Velmi nízké hodnoty výsledků měření na ostrově Kwajalein (viz tabulku č. 1 na konci zprávy) odpovídají údajům americké strany o potlačení vedlejších laloků speciálním softwarem a je z nich zřejmé, že toto potlačení je účinné i v blízkém poli antény radiolokátoru. Deklarované čtyřicetidecibelové potlačení postranních laloků pak zcela vylučuje, že by laloky mohly vně uzavřeného prostoru způsobit expozici, která by se i jen řádově přiblížila nejvyšší přípustné hodnotě pro obyvatelstvo.

c) Expozice osob elektromagnetickému záření odraženému od předmětu

Expozice osob elektromagnetickému záření odraženému od předmětu (letadla, balonu atd.) nepřekročí ani v bezletové zóně nejvyšší přípustnou hodnotu: časově průměrná hustota zářivého toku ve svazku je sama o sobě nízká – v těsné blízkosti antény dosahuje 400 W/m^2 , odražené záření od jakéhokoli letícího předmětu by bylo ještě řádově slabší a navíc doba jeho působení by vzhledem k pohybu odrážejícího předmětu byla podstatně kratší než šest minut.

Poznámka. Teplotní inverze a extrémní stavy atmosféry vedoucí k odchylce šíření svazku od přímočarého se uplatní až na delší dráze, kdy svazek je ovšem již značně široký a hustota zářivého toku v něm nízká. Vrchol padesátimetrové meteorologické věže na kopci Praha by mohl být výjimkou: i při normálním stavu atmosféry se svazek (při minimální možné elevaci rovné dvěma stupňům a příslušném azimutu) svým okrajem téměř dotýká vrcholu věže. Americká strana však 4. března 2008 oficiálně sdělila, že směřování svazku do tohoto místa bude znemožněno softwarovým nastavením radaru. Hustota zářivého toku je ovšem v tomto místě vzhledem k vzdálenosti od radaru již značně zeslabená. Jde tedy spíše o ochranu přijímače meteorologického radiolokátoru, jehož rotující parabolická anténa je umístěna na vrcholu věže.

Stejně tak jsou bezpředmětné i obavy z rušení leteckého provozu (palubních přístrojů atd.). Tato otázka, patřící do oboru elektromagnetické kompatibility, byla řešena a vyřešena již při provozu radiolokátoru na ostrově Kwajalein, kde je letiště vzdálené méně než dva kilometry od radiolokátoru.

Závěr

Bude-li radiolokátor, umístěný nyní na ostrově Kwajalein v Tichém oceánu, instalován se stejnými technickými parametry v České republice ve vojenském újezdu Brdy na kótě 718, nebudou obyvatelé žijící v okolí vystaveni expozici, která by překročila přípustnou hodnotu pro obyvatelstvo („ostatní osoby“) stanovenou v nařízení vlády č. 1/2008 Sb. Velikost expozice osob v úrovni terénu se v místech mimo (nepřístupný) prostor v bezprostřední blízkosti antény nepřiblíží ani řádově nejvyšší přípustné hodnotě hustoty zářivého toku (10 W/m^2) stanovené pro trvalou expozici ostatních osob (obyvatelstva). Osoba, která by na

rogalu nebo v balonu prolétala hlavním svazkem, by mohla překročit přípustnou expozici, kdyby se ve svazku zdržela dostatečně dlouhou dobu. Taková expoziční situace je však čistě teoretická vzhledem k faktu, že by tato osoba musela prolétat bezletovým pásmem a k tomu ještě přizpůsobovat svou letovou dráhu poloze svazku.

Literatura

[1] Richard A. Tell, Las Vegas, USA. An Overview of Several Large Scale RF Projects in the United States Relative to Non-Human Environmental Impacts. Ve sborníku Proceedings International Seminar on Effects of Electromagnetic Fields on the Living Environment, Ismaning, Germany. October 4. and 5. 1999. Editors: R. Matthes, J. H. Bernhardt, M. H. Repacholi (ICNIRP, WHO, Bundesamt für Strahlungsschutz)

[2] Nařízení vlády č. 1/2008 Sb., o ochraně zdraví před neionizujícím zářením, ze dne 12. prosince 2007.
Poznámka. Nejvyšší přípustné hodnoty použité v nařízení vlády č. 1/2008 Sb. vycházejí z doporučení mezinárodní komise ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) a jsou totožné s limity uvedenými v direktivě Evropského parlamentu a Rady „Directive 2004/40/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004, Official Journal of the European Union L 159 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields) (18th individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 9/391/EEC)”.

Zpracovali: Ing. Lukáš Jelínek, Ph.D., doc. RNDr. Luděk Pekárek, DrSc.
v červenci 2008

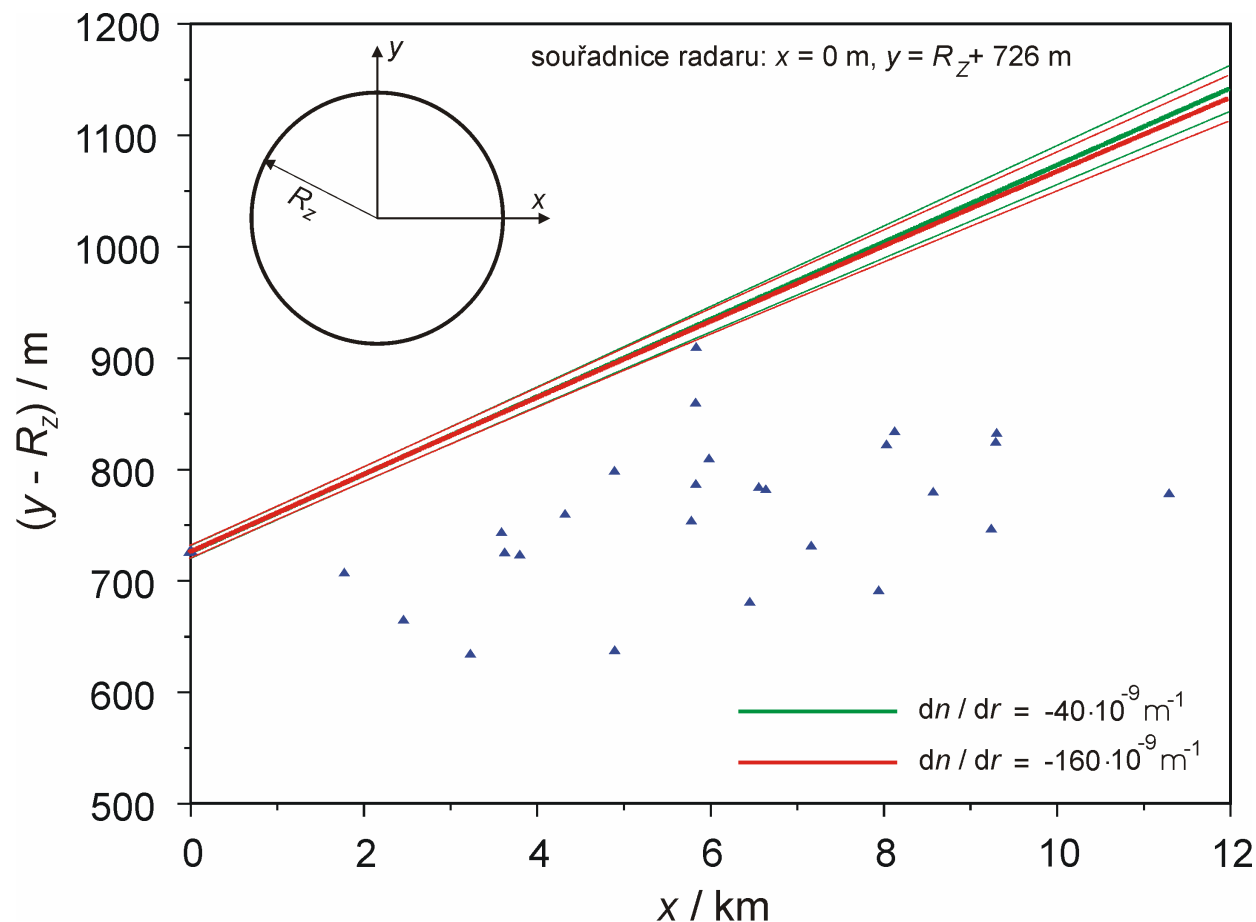
Tabulka č. 1

Měření dne 3. 10. 2007 Kwajalein, Marshallovy ostrovy
 Elevace vyzařovaného svazku: 2° (= minimální možná)
 Doba měření: vždy 6 minut v každém měřicím bodu

RADAR GBX

Vzdálenost měřicího bodu	50 m	100 m	210 m	270 m	560 m	931 m	2104 m	2666 m
hustota zářivého toku (W/m ²) MAX (špičková hodnota)	5,70	7,00	2,60	1,80	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
nejistota měření (W/m ²)	± 1,4	± 1,8	± 0,7	±0,5				
hustota zářivého toku (W/m ²) AVG časový průměr	2,14	4,40	1,40	1,06				

Měřili pracovníci Armády České republiky přístroji ministerstva obrany ČR, přítomni byli pracovníci ministerstva zdravotnictví a čeští nezávislí experti



Obr. 3 Hranice radarového svazku pro elevaci rovnou 2° . Dvě silné čáry zobrazují osy svazku pro dva různé gradienty indexu lomu ovzduší, tenké čáry značí okraje svazků pro pokles na 13,5 % hodnoty v ose. Použitá horizontální a vertikální osa odpovídá náčrtku v levém horním rohu obrázku ukazujícímu Zemi jako kouli o poloměru R_z se středem souřadného systému ve středu Země. Modré trojúhelníky vyznačují vrcholy jednotlivých kopců v pořadí podle vzdálenosti, tj. zleva doprava: *Okrouhlík, Stará hora, Trokavecká skála, Na Skalách, Jahodová hora, Palcíř, Gelsemanka, Nad Maráskem, Dubová hora, Kobylí hlava, Praha (kopec), Kočka, Meteo věž, Peterák, Kokšín, Hřebence, Březový vrch, Kamenná, Třemešný vrch, Třemšín (vrch), Hradiště, Plešec, Štěrbina, Koruna, Brdce, Hlava.*