

- [19] <http://www.elektrokoutek.cz/index.php?p=merici-pristroje-a-cidla&page=2>, 30. 10. 2017.
- [20] Detekce a měření radiace, Praktická elektronika, roč. 21 (2016), č. 1.
- [21] <https://www.gme.cz/tl071-dip8-texas-instruments>, 30. 11. 2017.
- [22] *Punčochář, J.*: Operační zesilovače v elektronice. 5. vydání, BEN-technická literatura, Praha, 2017.
- [23] <https://www.gme.cz/bipolarni-tranzistor-bd139-16-to126>, 23. 11. 2017.
- [24] <https://www.gme.cz/bipolarni-tranzistor-bd138-16-to126>, 23. 11. 2017.
- [25] D/A převodník se sítí R-2R. https://www.fd.cvut.cz/personal/janes/zdt/prednasky/3_prevodniky.pdf, 15. 11. 2017.
- [26] *Adámek, P.*: Obvody a části měřicích přístrojů. PF JU, České Budějovice, 2010.
- [27] <https://www.gme.cz/74hct573-dip20-texas-instruments>, 23. 11. 2017.

Demonstrační mikrovlnný radiometr pro školní použití

LEONTÝNA BRÍZOVÁ – MICHAELA KRÍŽOVÁ – JAN ŠLÉGR

Přírodovědecká fakulta UHK, Hradec Králové

Úvod

Objekt o teplotě T a emisivitě e vyzáří do prostoru výkon úměrný čtvrté mocnině teploty T . Část tohoto výkonu je zachycena anténou, která z celého prostoru vytíná prostorový úhel Φ .

Šířka hlavního svazku parabolické antény (kde je anténou přijato maximum energie; na okrajích hlavního svazku je přijatý výkon poloviční než na spojnicí přijímací anténa – zdroj) je určena vztahem

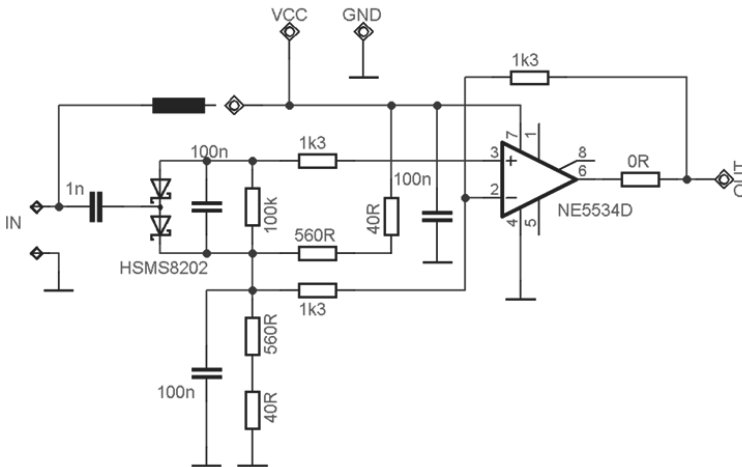
$$\alpha = \frac{70^\circ D}{\lambda} \quad (1)$$

kde λ je vlnová délka záření a D průměr antény. Prostorový úhel hlavního svazku Φ_a je pak určen rotací tohoto rovinného úhlu kolem osy přijímací antény. Do přijímače se dostane šumová teplota

$$T_a = \frac{\Phi_a}{\Phi_z} T_z,$$

kde Φ_z je úhlová velikost zdroje a T_z šumová (přibližně fyzická) teplota zdroje. Přijímač je obvykle označován jako radiometr. K jeho vlastnímu šumu se pak přičítá šum přicházející z antény. Viditelné a infračervené záření lze detekovat pomocí CCD snímačů nebo fotonek, záření tvořené fotony s menší energií vyžaduje jiný detektor, ve zde popsaném případě mikrovlnnou anténu se zesilovačem, za kterým následuje polovodičová dioda, která ze vstupního vysokofrekvenčního signálu vytvoří obálku, čímž je získáno stejnosměrné napětí úměrné teplotě.

Již přibližně třicet let jsou k demonstraci mikrovlnného záření Slunce používány komponenty satelitní televize. Základem je tzv. LNB (*Low Noise Block*), nesprávně česky označovaný jako „satelitní konvertor“. Ve skutečnosti se jedná o nízkošumový zesilovač a transvertor, který mikrovlnný signál převádí z frekvenčního pásma 10–12 GHz do pásma kolem 1 GHz. Výstup je pak veden na vhodný vysokofrekvenční voltmetr (jako v [1]) nebo do počítačového rozhraní (v [2] je vtipně použita televizní karta počítače, jejíž pořizovací cena je však často nad finanční možnosti škol).



Obr. 1 Schéma vysokofrekvenčního voltmetru

Zajímavé je, že oba výše uvedené prameny používají LNB s offsetovou parabolou, což není didakticky příliš vhodné. Proto je v této práci popsáno použití paraboly středové, která má maximum přijatého výkonu ve směru, kterým míří. Navíc byl navržen jednoduchý vysokofrekvenční voltmetr, jehož cena je ve srovnání s [1] nebo [2] velmi nízká. Tento přístroj lze připojit k běžnému školnímu demonstračnímu voltmetru, případně k multimetru se záznamem naměřených hodnot nebo vhodnému AD převodníku (např. ISES nebo karta Arduino).

Konstrukce radiometru

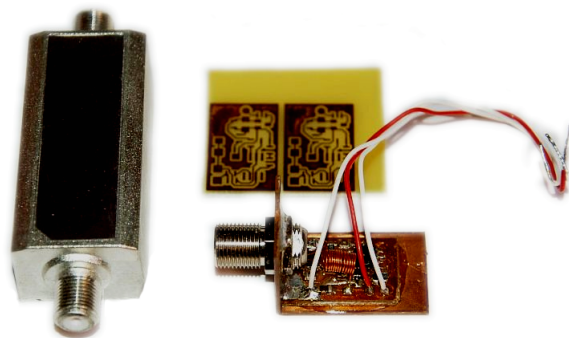
V dnešní době je možné velmi levně (případně zdarma) opatřit hliníkovou parabolickou anténu původně určenou pro bezdrátové WiFi sítě (s přechodem k sektorovým anténám s vestavěnými routery se tyto parabolické antény přestaly používat a mnohé firmy jich mají plné sklady). Tyto antény mají obvykle skalární ozařovač, jehož průměr je stejný jako průměr zúžené části většiny prodávaných LNB. Proto není zapotřebí držák ozařovače nijak upravovat a stačí původní ozařovač nahradit LNB. Je však zapotřebí změnit uchycení paraboly pro použití např. s fotografickým stativem, aby bylo možné anténu jednoduše nasměřovat na Slunce (obr. 2). Zaměření na Slunce lze kontrolovat podle stínu vrženého ozařovačem na parabolou.

Pro použitý průměr antény $D = 60$ cm a frekvenci 12 GHz je šířka hlavního svazku rovna přibližně $3,1^\circ$.



Obr. 2 Demonstrace mikrovlnného záření Slunce

Hned za LNB následuje vysokofrekvenční zesilovač. Stavba zařízení pro mikrovlnné frekvence je poměrně náročná a bez specializované měřicí techniky téměř nemožná, proto je i zde použit tovární výrobek určený pro satelitní televizi. Zesilovač se zesílením 20 dB (obr. 3) lze pořídit za cenu přibližně 200 Kč v obchodech specializovaných na televizní a satelitní techniku.



Obr. 3 Mikrovlny satelitní zesilovač a realizace detektoru

K propojení zesilovače s vysokofrekvenčním voltmetrem není vhodný klasický koaxiální kabel, který je poměrně neohebný. Lze použít slabší a lépe ohebný kabel určený pro WiFi aplikace, který je obvykle osazen konektory SMA. Na obou koncích je však možné osadit redukce SMA na F-konektory, které jsou na výstupu zesilovače a vstupu voltmetru. Použitý kabel má sice větší útlum (a redukce přechodový odpor), ale vzhledem k zařazení 20 dB zesilovače se nejedná o problém. Navíc pokud není tento kabel k dispozici, lze zařízení propojit obyčejným satelitním kabelem s F-konektory, i když práce s ním není příliš pohodlná.

Vysokofrekvenční voltmetr je tvořen diodovým detektorem HSMS8202 a operačním zesilovačem NE5534. Zároveň je přes tento detektor přivedeno na zesilovač a konvertor napájecí napětí 12 V (zesilovače i konvertory se obvykle napájí napětím 17–19 V, ovšem 12 V jim bohatě stačí a navíc se zbytečně nezahřívají).

Na výstupu operačního zesilovače je stejnosměrné napětí přímo úměrné vysokofrekvenčnímu napětí na vstupu. Toto napětí se mění v rozsahu asi od 6,5 V (při namíření antény na oblohu) do 7,5 V (při namíření antény na stěnu budovy). Proto je k měření tohoto napětí použit voltmetr s posunutou nulou. Za Zenerovou diodou s $U_Z = 6,2$ V je napětí v rozsahu 0,3–1,2 V,

které ukazuje ručkový přístroj s rozsahem asi 1,3 V. Ideálním přístrojem je upravený velký demonstrační voltmetr (na obr. 3 je demonstrační voltmetr Metra, jehož dělič je zmenšen na polovinu, takže na rozsahu 3 V má maximální výchylku pro 1,5 V).

Demonstrační experimenty

Při namíření antény na oblohu je výchylka měřicího přístroje malá. Pokud demonstrátor natáhne ruku před anténu, výchylka se zvýší. Podobně pokud je anténa dostatečně nízko a míří na oblohu, lze totéž demonstrovat, když si demonstrátor před anténu stoupne.

Podle zvyšující se výchylky měřicího přístroje lze anténou na obloze najít Slunce. Při namíření antény například na stěnu či zem se výchylka zvětší mnohem více, než při namíření na Slunce. To je způsobeno tím, že stěna je velký plošný zdroj záření, kdežto Slunce se svým úhlovým průměrem kolem $0,5^\circ$ je zdrojem mnohem menším.

Měření ekvivalentní teploty Slunce na frekvenci 12 GHz

Vhodnou kalibrací radiometru lze stanovit funkci $U = f(T)$, kterou lze využít k určení ekvivalentní teploty Slunce na frekvenci 12 GHz podle [1] a [3]. Je zapotřebí vzít v úvahu, že kalibrační křivka je získána z plošně rozlehlých zdrojů (obloha, zeď atd.), kdežto Slunce má mnohem menší úhlový průměr.

Kalibrační křivka se sestaví měřením výstupního napětí radiometru po namíření na různé zdroje, jejichž teplota je známa. Pro zjednodušení jsou použity pouze dvě teploty – oblohy a země nebo stěny. Jako teplotu oblohy lze uvažovat teplotu reliktního mikrovlnného záření 2,7 K. Teplotu země lze změřit infračerveným teploměrem.

S pomocí zjištěných teplot je možné sestavit kalibrační křivku – pro školskou aplikaci je výhodné, že jsou naměřené hodnoty dvě, stačí nakreslit graf a podle napětí naměřeného pro Slunce přiřadit teplotu. Bylo by jistě možné použít více kalibračních bodů, program Microsoft Excel obsahuje funkci „Přidat spojnici trendu“, která prokládá soustavou bodů zvolenou funkci, v tomto případě lineární. Tak je možné použít více bodů, i když žáci neznají metodu nejmenších čtverců.

Odečtením z grafu na obr. 4 nebo dosazením do rovnice regrese získáme pro napětí $U = 1,19$ V naměřené po nasměrování antény radiometru na Slunce hodnotu $T_S = 354$ K. To ovšem není správná teplota fotosféry. Je

nutné si uvědomit, že v obou kalibračních bodech přijímala anténa radiometru záření celým hlavním svazkem, tedy podstavou kužele v vrcholovém úhlu $3,1^\circ$. V případě Slunce však záření vycházelo z plošného zdroje o úhlovém průměru $0,5^\circ$. Poměr plochy primárního svazku a plochy Slunce je

$$p = \frac{\pi \frac{D_1^2}{4}}{\pi \frac{D_2^2}{4}}.$$

Protože průměr podstavy je přímo úměrný vrcholovému úhlu kužele, lze pro tento poměr zapsat

$$p = \frac{\alpha^2}{\Psi_S^2}$$

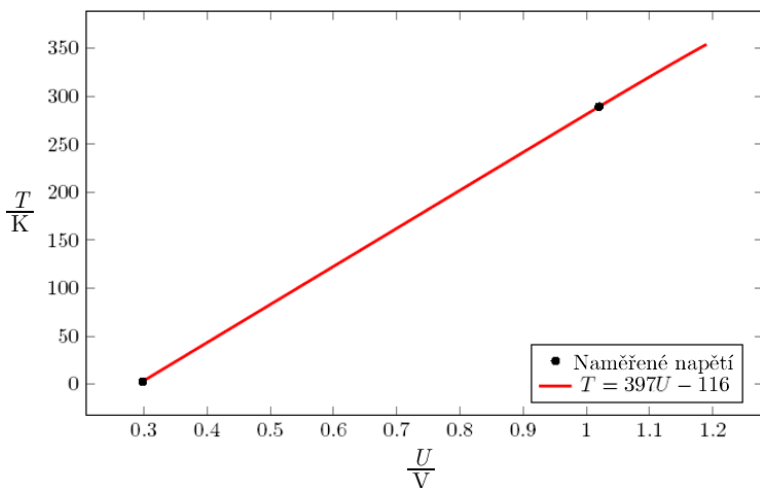
kde α je úhlová šířka hlavního svazku podle (1) a Ψ_S je úhlový průměr Slunce. Pro zadané hodnoty $\alpha = 3,1^\circ$ a $\Psi_S = 0,52^\circ$ dostáváme poměr $p = 35,5$.¹⁾ Tímto faktorem je potřeba vynásobit teplotu získanou z kalibrační křivky, aby byl vzat v úvahu poměr energie absorbovaného záření. Pak platí

$$T_{\text{korig.}} = p \cdot T_S$$

a pro zadané hodnoty dostáváme přibližně $T_{\text{korig.}} = 12\,600$ K (v [3] je jako správná hodnota uváděno 10 000–12 000 K). Je zajímavé, že v [1] je výpočet proveden tak, aby vyšla teplota 5 760 K, což je sice teplota fotosféry, ale jedná se o ekvivalentní teplotu absolutně černého tělesa s maximem vyzářené energie zákona na vlnové délce 550 nm. Na frekvencích řádu jednotek a desítek GHz se však záření Slunce velmi podstatně odchyluje od průběhu popsaného Planckovým rozdělením, a to i během doby, kdy je sluneční aktivita malá. V době slunečních erupcí je tento rozdíl ještě výraznější [5].

Je dobré rovněž zmínit, že přesnost metody není příliš velká – směrnice kalibrační křivky je dána měřenou teplotou země nebo stěny budovy. Nicméně autor si dovoluje říci, že pro školní použití a seznámení s detekcí radiového záření je tato velice jednoduchá metoda dostačující.

¹⁾Na frekvencích řádu jednotek a desítek GHz je úhlový průměr Slunce téměř totožný s fotosférickým průměrem ve viditelném oboru. Úhlová velikost Slunce se zvětšuje až na kratších vlnových délkách, kde začíná zářit svrchní fotosféra a spodní koróna, viz [4].



Obr. 4 Napětí na výstupu 12 GHz radiometru

Popsaný radiometr jev současné době k demonstračním účelům využívám mimo jiné i na hvězdárnách v Hradci Králové a ve Vyškově. Zájemci o stavbu mohou kontaktovat autory na adrese jan.slegr@uhk.cz.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl za podpory specifického výzkumu PřF UHK 2104/2017.

Literatura

- [1] *Flou, B.*: Radioastronomie D'Amateur [online]. 1. 2005 [cit. 2012-12-31]. Le radiotélescope LUCIE. Dostupné z: <http://www.astrosurf.com/radioastro/observation2.html>
- [2] *Doherty, M. Fish, V. L. Needles, M.*: Revealing the Hidden Wave: Using the Very Small Radio Telescope to Teach High School Physics In The Physics Teacher. Vol. 49, December 2011, s. 546–548.
- [3] *Carr, D.*: Discovering the temperature of the sun using a standard 12 GHz satellite receiver. 10. 10. 2005. Dostupné z: <http://www.cs.ru.ac.za/research/g02c0108/files/radio/tempsun.pdf>
- [4] *Swanson, P. N.*: The radio radius of the Sun at millimeter and centimeter wave-lengths. Solar Physics, roč. 32 (1973), s. 77–80.
- [5] *Kraus, J. D.*: Radio Astronomy. 2. vydání, Cygnus-Quasar Books, New Hampshire, 2004.