

Amatérský radioteleskop

Ing. Jiří Polívka, CSc.

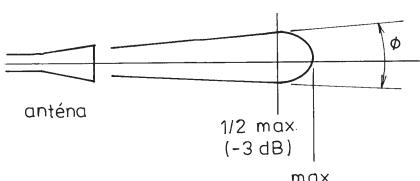
Mnoho amatérů astronomů sleduje hvězdnou oblohu, pořizuje fotografie ve viditelném a díky CCD kamerám i infračerveném obooru. Amatérů radioastronomů je jen málo. Zatímco optické dalekohledy se nabízejí ve velkém výběru a za dostupné ceny, přístroje pro pozorování v rádirovém obooru si musí každý udělat sám. Nebylo to snadné ještě před dvaceti lety. Dnes však díky rozvoji družicové televize jsou nízkošumové mikrovlnné přijímače v pásmech 4 a 11 až 12 GHz dostupné všem. Dokonce mnozí mají malý radioteleskop doma, aniž o tom vědí. Přijímají totiž televizi z družic! Dnes jsou dostupné výborné přijímače i antény a stačí přidat jen jednoduché doplňky, aby zájemce mohl přijímat rádiový šum Slunce.

Základní problémy

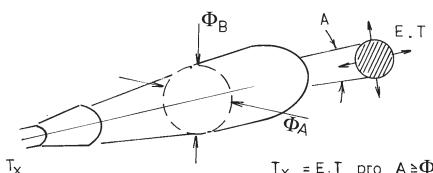
V optickém a infračerveném obooru je Slunce dominantním zdrojem záření. Dokonce většina energie, kterou na Zemi využíváme, byla či je dodávána Sluncem. V rádirovém spektru je Slunce výrazně slabším zářičem. Navíc potřebná anténa se musí navrhnut tak, aby její velikost (přesněji velikost hlavního laloku vyzařovacího diagramu) byla „přizpůsobená“ úhlovému rozmezru zdroje (obr. 1, 2).

V případě Slunce je jeho úhlový rozmezr $0,5 \times 0,5^\circ$. Velikost přizpůsobené antény vyjadřená ve vlnových délkách pak určuje šířku hlavního laloku podle vztahu

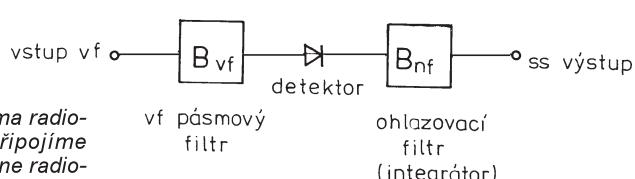
$$\phi = 70\lambda JD \quad [1],$$



Obr. 1. Definice šířky hlavního svazku (لالوک) mikrovlnné antény. Používá se u všech antén s jednoduchým vyzařovacím diagramem (soustavy antén mívají složitější diagram)

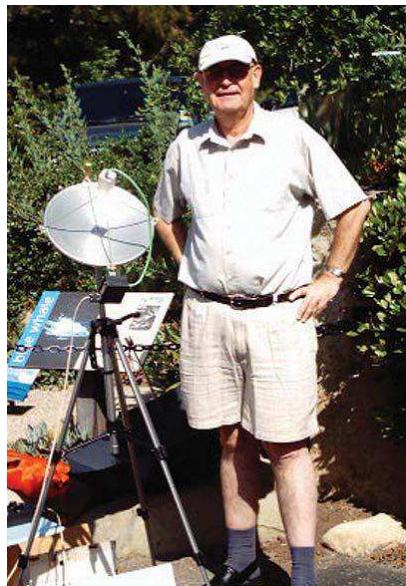


Obr. 2. Jak radiometrický systém měří teplotu objektu na dálku: Objekt s teplotou T a emisivitou E vyzařuje do prostoru (šumový) výkon úměrný teplotě T . Část tohoto výkonu je zachycena naší anténou se svazkem o úhlovém rozmezru $\Phi_A \cdot \Phi_B$. Na výstupu antény změříme šumovou teplotu podle vztahu v obrázku. Neplatí-li $A \geq \Phi$, pak $T_x = E \cdot T \cdot A^2 / (\Phi_A \cdot \Phi_B)$



Obr. 3. Základní schéma radiometru. Ke vstupu připojíme vhodnou anténu: vznikne radiometrický systém

VYBRALI JSME NA
OBÁLKU



Autor článku se svým radioteleskopem

kde Φ je šířka hlavního laloku vyzařovacího diagramu antény ve stupních, λ je vlnová délka v metrech, D je rozměr ústí antény v rovině E nebo H , též v metrech.

Tentýž vzorec určuje rozlišovací schopnost radioteleskopu s takovou anténou. Dosadíme-li velikost antény, např. $D = 1,0$ m, vlnovou délku např. $0,1$ m (odpovídá kmitočtu 3000 MHz), zjistíme, že šířka svazku naší antény je 7° .

Vzhledem k tomu, že úhlový průměr Slunce je $0,5^\circ$, do přijímače připojeného k takové anténě se dostane šumová teplo.

$$T_a = (\Phi_s^2 / \Phi_a^2) T_s \quad [2],$$

Kde T_s je šumová (přibližně fyzická) teplota zdroje v Kelvinech,

T_a je šumová teplota na výstupu antény, v Kelvinech,

Φ^2 je čtverec zorného úhlu objektu, sterad,

Φ_a^2 je čtverec šířky hlavního svazku antény, sterad.

Pro případ naší metrové antény na vlnové délce 10 cm a Slunce s $T \sim 6000$ K na výstupu této antény po namíření na Slunce dostaneme:

$$T_a = 6000 \cdot 0,25/49 = 30,6 \text{ K}.$$

Detektovat změnu šumové teploty ~ 30 K není snadné. Potřebujeme jednak nízkošumový přijímač, jehož vlastní šum je menší než ~ 1000 K, jednak tento přijímač musí být při velkém zesílení velmi stabilní, aby se změna šumové teploty dala rozseznat. Obr. 4 ukazuje, jak se rozlišení teploty měří.

Přicházíme k další důležité části radioteleskopu, a to je přijímač.

Tento přijímač zpracovává nikoli signál, ale šum: většina přírodních zdrojů vyzařuje tepelný šum. Přírodní zdroje relativně koherentního záření vyzařují šumu podobné signály.

Přijímač radioteleskopu se často nazývá radiometr. Jak se zjistilo, k příjmu a detekci šumu na pozadí vlastního šumu přijímače je potřeba zesilovat šum v širokém pásmu. Nás přijímač musí být širo-

kopásmový a přitom nesmí přijímat umělé signály, které vytvářejí lidé. Potřebujeme tedy vstupní pásmový filtr, který prospustí jen žádoucí šum (obr. 3).

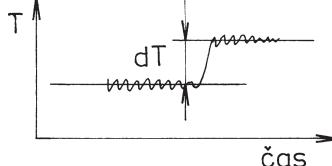
Viditelné a infračervené záření přenášejí fotony s velkou energií; proto k detekci světelného a IR záření postačí vhodný detektor (často polovodičová fotonka apod.).

V rádirovém a mikrovlnném obooru přenášejí energii fotony s velmi malou vlastní energií. Detektor, např. polovodičová dioda, je vlastně usměrňovač. Na jeho výstupu obdržíme zpracovatelné napětí až tehdyn „kdy je co detektovat“, tedy minimální detektovatelný výkon je ~ -40 dBm nebo $0,1 \mu\text{W}$. Pak můžeme očekávat výstupní napětí pod 1 mV .

Uroveň rádiového šumu můžeme také posoudit z Nyquistova vztahu

$$P_n = k \cdot T \cdot B \quad [3],$$

kde P_n je výkon šumu v wattech, k je Boltzmannova konstanta ($k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$), T je teplota v Kelvinech, B je šířka pásmá v Hertzech.



Obr. 4. Jak se definuje rozlišovací schopnost teploty. Na zapisovací registraci je znázorněna vlnová kmitice s periodou dT . Na vlnové kmitici je zaznamenán vlastní šum systému (stopa dole). Pak zvýšíme vstupní teplotu, až je odlišitelná od předešlé

Praktičtější k výpočtu šumu na vstupu přijímače je vyjádření úrovně v dBm (decibely v poměru k 1 mW):

$$P_n (\text{dBm}) = -174 + \text{NF} + 10 \log B \quad [4],$$

Kde „-174“ je logaritmovaná Boltzmannova konstanta násobená okolní teplotou v Kelvinech, NF je šumové číslo přijímače v dB a $10 \log B$ je logaritmus šířky pásma.

Máme-li tedy přijímače se šírkou pásma 10 MHz a šumovým číslem 10 dB, bude takový přijímač mít na svém vstupu „šumové pozadí“ o úrovni

$$P_n (\text{dBm}) = -174 + 10 + 70 = -94 \text{ dBm}.$$

Na výstupu přijímače pak bude úroveň šumu vyšší o zisk zesilovače.

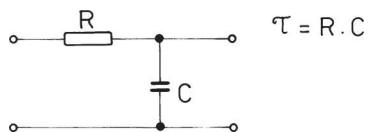
Zmínili jsme, že typický vf detektor potřebuje k fungování vstupní úroveň výkonu (signálu či šumu) aspoň -40 dBm. Chybějících 54 dB musíme tedy zajistit zesilovačem.

Nyní ke způsobu, jak odlišit šum z antény od vlastního šumu přijímače. Zjistilo se, že využitím širokého vf pásma před detektorem a ohlazením detekovaného napětí podle obr. 4 je možné rozlišit změnu šumové úrovni na vstupu přijímače od jeho vlastního šumu (typicky šumové číslo plus vf zesílení). Platí totiž vztah

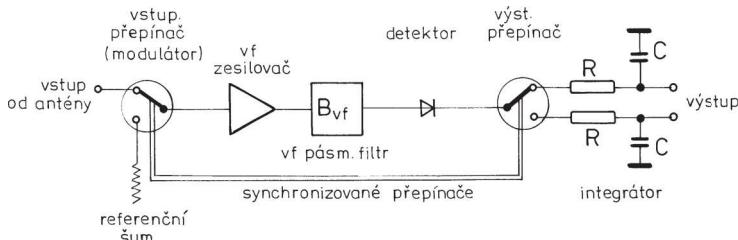
$$dT = T_{\text{sn}} / (\sqrt{B_{\text{vf}} \tau}) \quad [5],$$

kde T_{sn} je šumová teplota celého systému antén plus přijímače v Kelvinech (K),

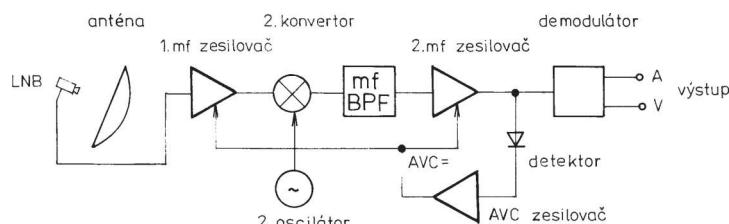
dT je minimální rozlišitelná změna šumové teploty z antény (K),



Obr. 5. Ohlazovací (integrační) článek RC



Obr. 6. Modulační radiometr (podle Dickeho) dovoluje odlišit vstupní šum od šumu systému



Obr. 7. Blokové zapojení družicového TV přijímače. LNB se napájí po mf kabelu. Detektor AVC může poskytnout výstupní napětí k použití systému jako radioteleskopu

B_{vf} je šířka pásma přijímače před detektorem (Hz),
 τ je časová konstanta ohlazovacího obvodu (integrátoru) (sekundy, s).

Časovou konstantu τ známe: je to součin $R \times C$ ohlazovacího článku v ohmech a faradech, obr. 5.

Šumové číslo a šumová teplota přijímače souvisí vztahem

$$N = 1 + T_{\text{sn}} / T_0 \quad [6],$$

kde T_{sn} už známe a T_0 je teplota okolí, obvykle 300 K.

$$\text{NF} = 10 \log N. \quad [7]$$

Náš přijímač se šumovým číslem ~ 10 dB bude mít odpovídající T_{sn} :

$$T_{\text{sn}} = T_0 (N-1) \quad [8],$$

tedy $T_{\text{sn}} = 300 \cdot (10 - 1) = 2700$ K. To je oproti očekávaným 30 K příliš.

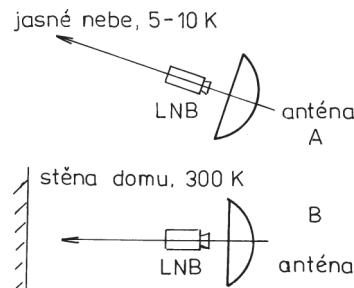
Nyní použijme vztah pro dT a zkuste ohladit výstupní šum RC článkem s konstantou $\tau = 1$ s. Pro $B = 10$ MHz pak dostaneme:

$$dT = 2700 / (\sqrt{10 \ 000 \ 000 \times 1}) = 2700 / 3162 = 0,85 \text{ K}$$

Nyní můžeme vidět, že použitím širokopásmového přijímače a řádného ohlazení výstupního šumu můžeme dosáhnout velmi dobrého rozlišení teploty.

Ted ovšem přijde varování: rozlišení se měří na zápisu výstupního napětí v čase podle obr. 4. Kdo to někdy zkusil, ví, že ss napětí, zvláště řádové v oboru milivoltů, často driftuje z různých důvodů. Hlavní původ ss driftu je v našem zesilovači se ziskem 54 dB či více.

Napájeci napětí můžeme stabilizovat. Obtížnější je stabilizovat teplotu. Je třeba



Obr. 8. Zamíření antény přijímače na „čisté“ nebe s teplotou 5 až 10 K (obr. A) a zamíření na stěnu domu s teplotou 300 K (obr. B)

si uvědomit, že radioteleskop (anténa s přijímačem) je vlastně teplotoměr, který měří teplotu na dálku. Přejeme-li si rozlišit 1 Kelvin v rozsahu 0 až 30 Kelvinů, musíme se postarat, aby náš přijímač, zejména jeho vstupní část, měl teplotu se stálostí lepší než 1 K. To se v praxi těžko dosahuje.

Podobně jako v ss zesilovačích malých ss signálů se s oblibou používá vstupních modulátorů (čopru) a synchronních detektorů, metoda modulace vstupního šumu se používá ve většině radioteleskopů podle obr. 6. Některé zkušenosti uvedu později.

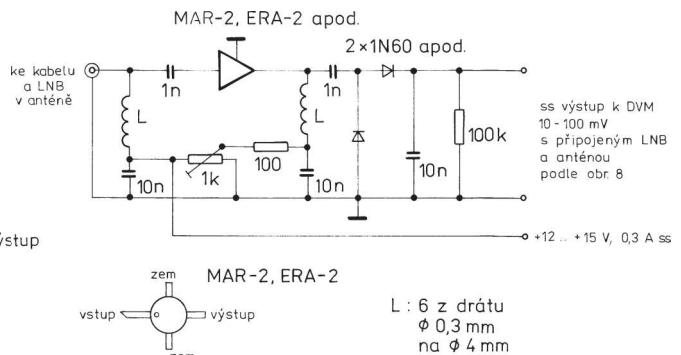
Závěrem tohoto složitého vyprávění s náročnou matematikou:

Úhlové rozlišení radioteleskopu můžeme posoudit ze vztahu [1].

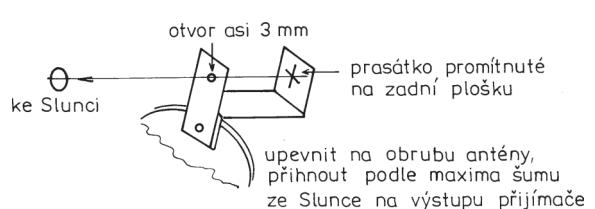
Teplotní rozlišení radioteleskopu můžeme posoudit ze vztahu [5].

Jak postavit radioteleskop

Nyní popíšu, jak jsem jednoduchý radioteleskop „na Slunce“ postavil sám. Kdo má zájem, může pokusy napodobit. Kdo



Obr. 9. Jednoduchý doplněk k LNB: mf zesilovač ~10 dB a mf detektor. Napájí se společně s LNB ze ss zdroje +12 až +15 V. Potenciometrem 1 kΩ nastavte proud do IC asi 15 mA

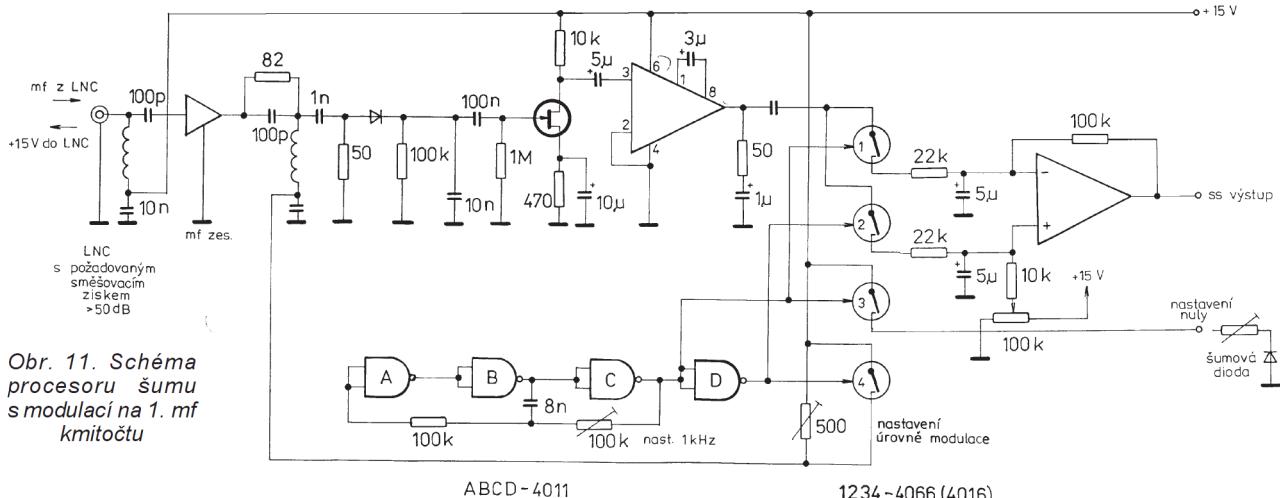


Obr. 10. Jednoduché mířidlo na Slunce, vhodné pro offsetové antény (viz obr. 20)

HP-MSA-0204

КП303 LM386

1/2 LM358



Obr. 11. Schéma procesoru šumu s modulací na 1. mfremitočtu

je zkušenější, může se vydat vlastní cestou. Uví tam odezvu čtenářů, možná někdo vytvoří lepší přístroj, než se povedl mně.

Základní pokusy

Kdo má starší družicový přijímač, může zkoušit „vytáhnout“ šum na mezipřekvěz. Některé přijímače mají detektor úrovně signálu, na jehož výstupu se může měřit ss napětí, odpovídající vstupnímu šumu. Obr. 7 ukazuje schéma typického přijímače. Prosím, než se pustíte do vašeho družicového přijímače, uvědomte si, že jeho anténa je přesně zaměřena na vybranou družici. Dobře zapište úhly nastavení, abyste se s anténou dokázali vrátit zpět. Bez schématu nedoporučují otevírat skříňku přijímače. Po-

škodíte- li maličkost, nebude přijímač pracovat. Starší vyřazené přijímače jsou vhodnejší – také proto, že jejich struktura dovolovala sledovat signál od vstupu k výstupu. Moderní přijímače demodulují FM signál již v pouzdro „tuneru“, a protože ladění i jiné funkce řídí počítač, nedají se použít k pokusům.

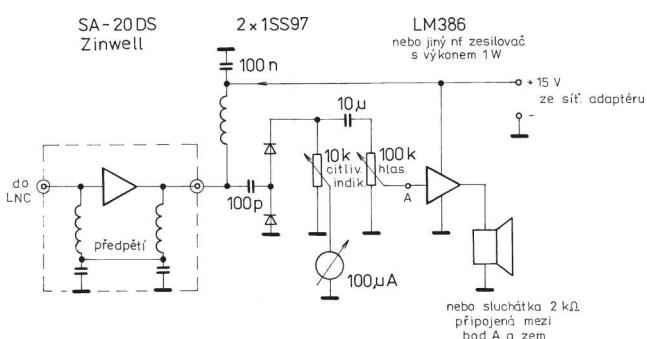
Pokud chcete použít družicový přijímač, najděte ss signál detektoru AVC. Kýváte-li anténou, toto napětí se mění. Ujistěte se, že nepřijímáte signál z družice.

Na obloze jich vysílá několik. Sám doporučuji použít kontrast „studené nebe/ / stěna domu“ podle obr. 8. Odpovídající napětí se mění hladceji, než pokud přijímáte signál z družice.

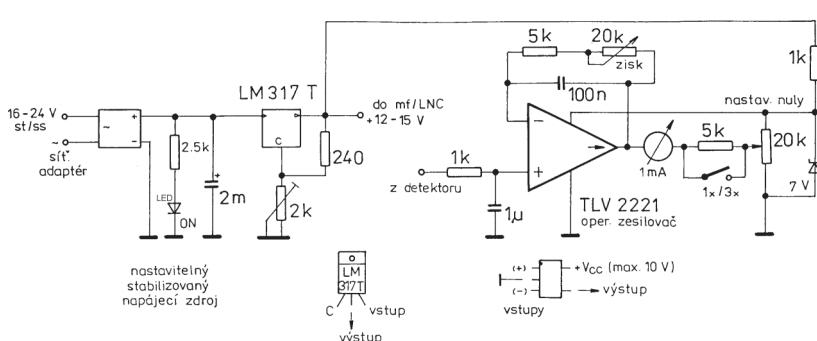
Najdete-li výstupní signál a máte-li vhodný kontrast (např. napětí se mění do



Obr. 14. Anténa a LNB



Obr. 12. Mf doplněk se ss a zvukovým výstupem. Zesilovač Zinwell je levný 20 dB mf kabelový zesilovač. LM386 je zvukový zesilovač 0,5 W. Vše se napájí napětím +12 až 15 V ze zdroje.



Obr. 13. Napájecí zdroj, stabilizátor a operační zesilovač, vhodné k předchozím popsaným mf obvodům. Indikátor dovoluje plnou výchylku ~ 5 V, ze vstupního ss napětí kolem 5 až 10 mV

10 do 100 mV), zkuste ještě před anténu vložit ruku. Při zamíření na stěnu (vyšší napětí) má ss napětí ještě stoupnout (vaše ruka je tepelší), při zamíření na nebe má napětí stoupnout ještě o poznání více.

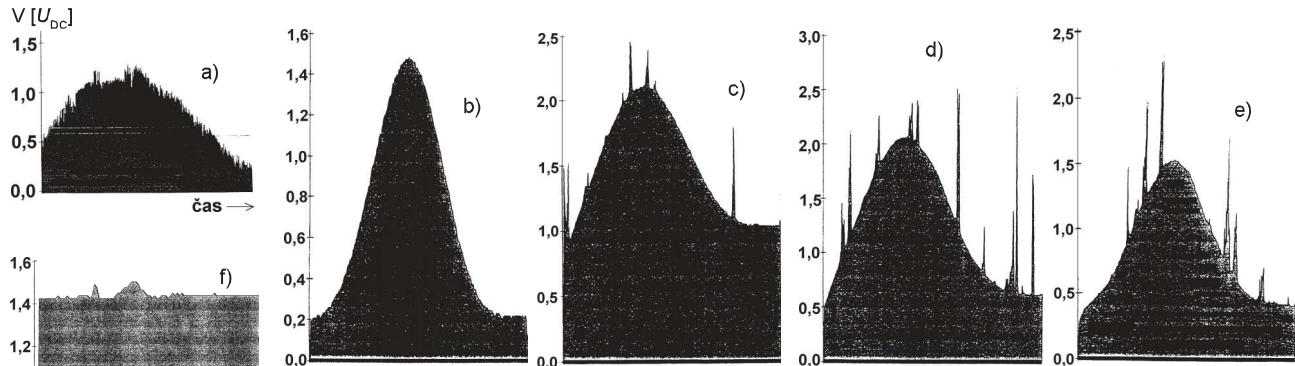
Pokud váš družicový systém reaguje, jak výše popsáno, máte doma radioteleskop. Nyní zaměřte anténu na Slunce a pozorujte ss napětí: má být vyšší než při zamíření na stěnu či na ruku.

Zamíření na stěnu činí takto:
K mym pokusům jsem raději používal pouze anténu s LNB (konvertorem), na jeho mf výstup jsem připojil mf zesilovač ~10 dB a detektor podle obr. 9. Výstupní ss napětí obvykle kolísalo od ~10 mV při anténě hledící na nebe do ~300 mV při zamíření na stěnu.

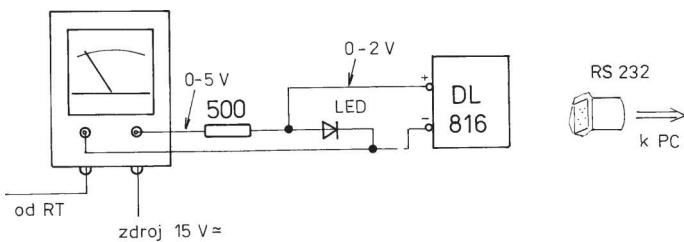
Pak postačí doplnit ss operační zesi-lovač a zdroj jako na obr. 13 a radiotele-skop je připraven k měření teploty Slun-
ce.

Nejvhodnější anténa pro podobné pokusy je rotační parabolické zrcadlo, jako na obr. 14. Offsetové antény „vynikají“ tím, že nepoznáte, kam jsou zamířeny. Budete muset najít Slunce a na anténu doplnit mířidlo, třebas takové, jako používám já, obr. 10 a 20.

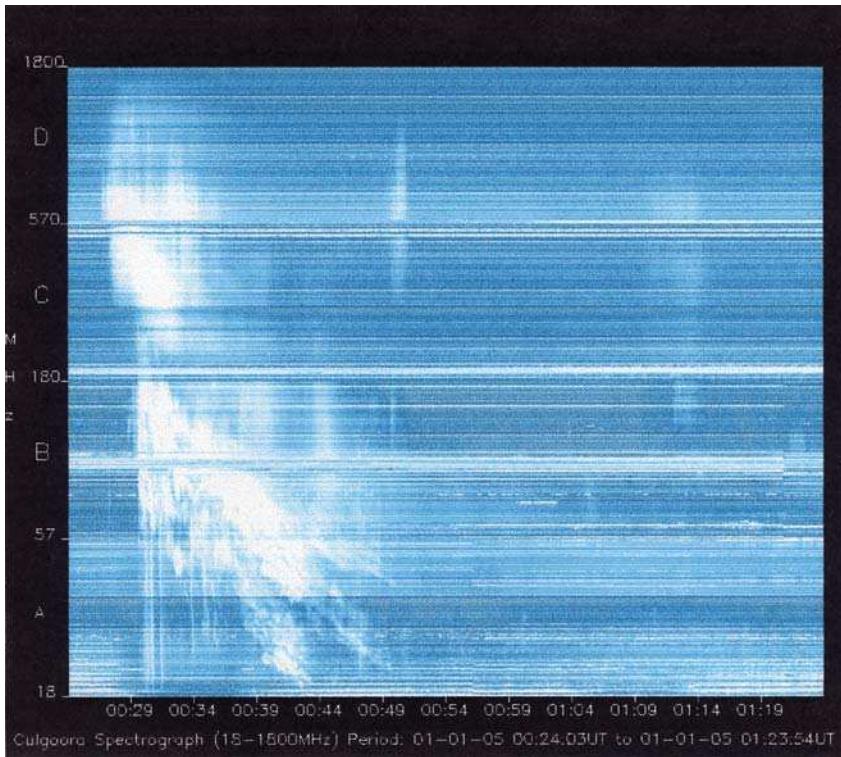
S malou anténnou („kapesní“ radioteleskop) z obr. 14 se sotva dá najít na nebi víc než Slunce. Systém ovšem můžete použít k dálkovému průzkumu: uvidíte, že šum mráků a deště v pásmu 12 GHz je velmi výrazný, že můžete měřit svou tělesnou teplotu, rozlišit suchou a vlhkou půdu či vegetaci.



Obr. 15. a) Sluneční šum na kmitočtu 12 MHz (15. 4. 2000 od 14. do 14.20 UTC), záznam získán s použitím parabolky o \varnothing 30 cm; b) sluneční šum na kmitočtu 12 GHz; c), d) a e) sluneční šum na kmitočtu 4 GHz; výsledky na obr. b) až e) získány s ofsetovou anténou 60 x 80 cm); obr. 15 f) šum Měsice na kmitočtu 12 GHz, měřeno s ofsetovou anténou 60 x 80 cm 3. 12. 2000



Obr. 17. (dole) Novoroční sluneční bouře v pásmu 18 až 1000 MHz (nejzajímavější část je 18 až 180 MHz), zaznamenaná v Austrálii



Když jsem si opatřil větší anténu (offset 60 x 80 cm), pokusil jsem se na nebi „najít“ Měsíc. V pásmu 12 GHz se mi to podařilo. Musel jsem poněkud zvýšit zesílení přijímače a použít mf modulace podle obr. 11 byl můj systém dostatečně stabilní: asi půl hodiny po zapnutí byl ss posuv menší než ~3 mV při špiči šumu z Měsice asi 20 mV velké, obr. 15 f.

Detecte jiných kosmických objektů než Slunce a Měsice vyžaduje větší anténu. Místo velkoplošné antény můžete

zkusit postavit interferometr. Někteří amatéři dokázali detekovat rádiový šum naší galaxie, jiní tvrdí, že zaměřili pulsary.

Často se mne při předvádění zájemci ptali, „co je slyšet“ ze slunečního šumu? Proto jsem v jedné verzi upravil ss výstup z mf detektoru tak, aby k němu bylo možné připojit nf zesilovač a reproduktor jako na obr. 12. Sluneční šum je obvykle jen stálý sykot, který může být doprovázen praskotem či jinými projevy sluneční aktivity.

Obr. 16. Připojení d a t a l o g g e r u LVOLT816 (B & B Electronics) k výstupu indikátoru radioteleskopu. Nedoporučují trvalé připojení dataloggeru k počítači, protože rušení z PC může ovlivnit činnost radioteleskopu

Při pokusech jsem ovšem spíš nabyl dojmu, že můj přijímač je rušen umělými signály z okolí. Casto se také podaří zamířit anténu na nějakou družici. To se pozná tím, že ss výstupní napětí bývá podstatně větší, než ze Slunce. Ve „zvukovém kanálu“ bývá pak slyšet vrčení vlivem vertikální synchronizace TV signálu (50 až 60 Hz) nebo disperzálem (25 Hz).

Zpracování dat

Máme tedy fungující radioteleskop, kterým lze detekovat sluneční či dokonce měsíční šum. Příklad hotového zařízení ukazuje obrázky 14 a 18 až 21.

Výstupní signál je pomalu se měnící ss napětí. Nejobvyklejším výstupním zařízením byl obvykle zapisovač na papírovou pásku. Dnes se dají podobné přístroje stále pořídit ve výprodeji. Inkoustová stopa na kalibrovaném pásu dovoluje po hledem rozpoznat správný zápis od rušení nebo jiných vad. Odborné posouzení zápisu bylo vždy „uměním čist z trávy“. Výhodou analogového záznamu je vždy to, že obsahuje veškerá data. Nic se neztrácí, jen zpracování vyžaduje lidskou účast.

Moderní metody používají vzorkování signálu a digitální zpracování. Tím lze v záznamu i bez lidské účasti rozpoznat zajímavé věci, ale má to háček: vzorkováním ztrácíme všechno, k čemu dochází mezi vzorky! Co jednou ztratíme, je ztraceno nenahraditelně. Přes všechny výhody se mne osobně právě tohle velmi dotýká. Nejde se prostě vrátit ke starému záznamu a najít v něm cosi, co jsme dříve neočekávali.

Nicméně použití moderního vzorkování a digitalizace je pohodlné – každý počítač to umí a záznam lze upravit tak, aby se líbil.

Zkusil jsem připojit malý „datalogger“, do něhož se vejde 16 tisíc vzorků. Přístroj obsahuje A/D konvertor a paměť a lze naprogramovat interval vzorkování i dobu odběru vzorků. Připojí se podle obr. 16.

K přístrojku se dodává i software pro Windows a obsluha je prostinká. Obvyklý interval vzorků byl 1x za 20 sekund; příklad pořízených grafů ukazuje obr. 15.

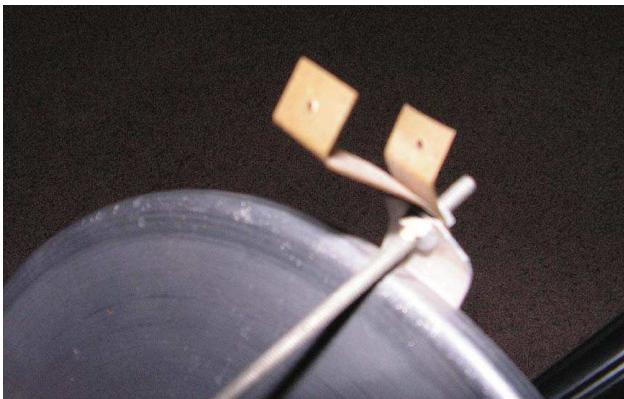
Radioteleskop na 12 GHz s anténoou o \varnothing 30 cm má šířku svazku asi 6° . Je den stupeň otáčení Země trvá čtyři minuty; podle toho můžeme odhadnout šířku svazku antény, obr. a). Tentýž přijímač s větší anténou (60 x 80 cm offset) poskytl záznam na obr. b). Na 4 GHz bývá



Obr. 18. Indikátor s TLV2224



Obr. 19. Mf blok s klíčováním (viz schéma na obr. 11)



Obr. 20. Detail zaměřovače Slunce (viz obr. 10)



Obr. 21. Celý radioteleskop na stojanu

aktivita Slunce častější, jak ukazují zá-znamy c) a d), opět s větší anténou.

Grafy neukazují nic víc, než „przejít“ svazku naší antény Sluncem díky otáčení Země. Kdo má zájem o sledování aktivity Slunce, musí anténu otáčet proti rotaci Země (hodinový stroj či odvozený pohon polární osy) a získá tak časový záznam slunečního šumu. Kmitočty pod 4 GHz jsou ke sledování sluneční činnosti nejlepší. Pod 1 GHz lze detektovat sluneční rádiové „bouře“. Potřebujete ovšem slušně rozmněrou širokopásmovou anténu na polární ose, přeladitelný přijímač (např. TV UHF tuner) a k záznamu dat počítač, na kterém zobrazíte kmitočet např. na ose Y, čas na ose X a intenzitu na ose Z, podobně, jako to dělají profesionální astronomové, obr. 17. Výhoda slunečních bouří pod 1 GHz je v tom, že šumová teplo dosahuje milionů Kelvinů, takže ne-treba vyvíjet nízkošumové přijímače.

Podobný projekt je myslím nad sily jednotlivce, týmová spolupráce bude

vhodnější. Mnozí radioamatéři se zabývají spojením pomocí odrazu od Měsíce v pásmech 432 a 1296 MHz a vyznají se v anténách i mechanismech. Jejich zařízení jsou ovšem úzkopásmová, což je nutné k odlišení slabého umělého signálu od šumu. Zkušenosti těchto radioamatérů se ovšem mohou hodit radioastronomům.

Přejí mnoho zdaru a uvítám připomínky čtenářů!

Literatura

- [1] Polívka, J.: Sluneční radioteleskop. Sdělovací Technika, č. 6, 1992, s. 212-213.
- [2] Long, W.: Radio Astronomy Projects. Radio-Sky Publishing, 1996 (adresa: P. O. Box 3552, Louisville, Kentucky, KY 40201-3552), ISBN: 1-889076-00-7. (Doporučuji vážným zájemcům!)
- [3] Kraus, J. D.: Radio Astronomy. McGraw-Hill Co, New York 1967. (Výborná učebnice, doporučuji všem.)

Poslední připomínka: NIKDY ne-hleďte přímo do Slunce! Anténu směřujte podle stínu LNB ve vrcholu paraboly nebo podle zaměřovače, který jsem popsal – tam se na plechový pásek promítá prasátka. Když jsou mraky a Slunce není vidět, udělejte si detektor s infračervenou fotonkou v černé trubce, s indikátorem 0,1 mA (měřidlo).

e-mail: jpolivka@spaceklabs.com

Jarní radioamatérské a CB setkání

se uskuteční v pátek a v sobotu 12. a 13. května 2006 v areálu Radost v Horním Jelení u Holic. Podrobnosti viz www.ok1khl.com