

Nové možnosti v rádioastronomii nielen pre amatérov

Pavol Ďuriš, SAS pri SAV, Slovakia, duris @radioastronomia.sk

Ladislav Křivský, Hvězdárna v Úpici, Czech Rep., ladislav.krivsky @gmail.com

Jakub Kákona, UST, Czech Rep., kaklik @mlab.cz

Rudolf Slošiar, Hvezdáreň Partizánske, Slovakia, slosiar @radioastronomia.sk

Abstrakt

Rádioastronómia je jedna z najdynamickejších sa rozvíjajúcich odvetví astronómie. Prispieva k tomu rýchly vývoj a dostupnosť nových technológií, preto sa stáva čoraz dostupnejšou pre širší okruh záujemcov. V poslednom desaťročí vznikajú nové unikátne projekty a observatóriá založené na nových princípoch – softvérové rádioteleskopy. V práci je uvedený prehľad najnovších projektov postavených na týchto princípoch a ukázané možnosti využitia softvérových prijímačov pre hvezdáreň a široký okruh záujemcov o rádioastronomické pozorovania.

1. ÚVOD

Informácie o vesmíre vo všeobecnosti získavame skúmaním elektromagnetického žiarenia, častíc a v budúcnosti snáď aj gravitačných vln. Rádiovým žiarením nazývame dlhovlnnú oblasť elektromagnetických vln a podľa spôsobu vzniku ho rozdeľujeme na synchrotrónne žiarenie t.j. nabitú časticu urýchľovanú v magnetickom poli, tepelné žiarenie t.j. horúce a chladné telesá vyžarujúce elektromagnetické žiarenie, nabitú časticu interagujúcu s plazmou a emisné žiarenie alebo spektrálne čiary, ktoré vznikajú kvantovými prechodmi v atómoch a molekulách.

Informácie o vesmíre získavame v rádioastronomii pomocou získavania obrazu - mapovaním a to plošným 2D alebo priestorovým 3D. Informáciu je možné ešte rozšíriť o spektrum. Kľúčové parametre, ktoré v hlavnej miere vplývajú na kvalitu obrazu či spektra sú citlivosť, rozlíšenie a presnosť merania.

2. RÁDIOTELESKOP

Anténa s jednoduchým zväzkom

Základným prístrojom je rádioteleskop v podobe antény s jednoduchým zväzkom (single-dish). Rozlíšenie je limitované priemerom $\theta \sim \lambda/D$. Hlavným hendikepom je uhlové rozlíšenie. Vlnová dĺžka rádiového žiarenia je oproti optickej oblasti min. 1000-krát dlhšia, takže aj najväčšie rádioteleskopy výrazne zaostávajú v rozlíšení za optickými ďalekohľadmi ($D=\varnothing 100\text{m}$, $\lambda=21\text{cm}$, $\theta \sim 10'$). Konštrukčný limit je praxi $D \sim \varnothing 100\text{m}$ pri plne pohyblivých systémoch a $D \sim \varnothing 1000\text{m}$ pri nepohyblivých rádioteleskopoch. Preto sa vysoké rozlíšenie dosahuje interferometrom.

Ďalším typickým znakom je súčasný príjem signálu iba s jediného smeru a malé zorné pole. Dipól v ohnisku deteguje intenzitu žiarenia a táto informácia zodpovedá 1 bodu obrazu pri optickom snímaní pomocou CCD. Pre získanie 2D obrazu je nutné mechanicky smerovať rádioteleskop a tak postupne preskúmať celé zorné pole. Uvedené nevýhody odstraňujú až rádioteleskopy novej generácie.

Rádiová interferometria

Hlavný hendikep klasickej rádioastronómie – rozlíšenie bol prekonaný, keď v roku 1974 dostáva Martin Ryle Nobelovu cenu za fyziku za vynájdenie metódy apertúrnej syntézy obrazu. Tento prelomový krok v rádioastronomii nielenže poskytol väčšie rozlíšenie, ale pri určitých aplikáciách dokonca prekonáva uhlové rozlíšenie najvýkonnejších súčasných optických teleskopov (kontinentálne alebo celoplanetárne interferometre – sieť VLBI až $0.00012''$). Pri metóde VLBI súčasné pozorovanie objektu prebieha samostatne na každom observatóriu pomocou antén s jednoduchým zväzkom alebo interferometrov. Synchronizácia záznamov a apertúrna syntéza obrazu sa deje až po pozorovaní.

3. NOVÁ EPOCHA RÁDIOASTRONÓMIE

Neustály pokrok v oblasti elektroniky a výpočtovej techniky ponúka nové možnosti využitia tohto potenciálu v službách vedy. Príkladom bude softvérový rádioteleskop novej éry The Square Kilometre Array (SKA).

SKA - The Square Kilometre Array

Bude najväčší a najcitlivejší rádioteleskop na svete, 50x citlivejší a 10000x rýchlejší ako najvýkonnejšie dnešné rádioteleskopy. Odhadované náklady sú €1,5 biliónov. Na medzinárodnom projekte sa zúčastňuje 20 krajín. Mal by byť umiestnený v Južnej Afrike a prvé svetlo je plánované na rok 2020. Jeho zberná plocha bude úctyhodných 1,000,000 m² na území o priemere 3000km. Súvislý frekvenčný rozsah 70 MHz až 30 GHz.

SKA si kladie za cieľ hľadať odpoveď na najzákladnejšie otázky: vznik prvých hviezd a galaxií, expanzia tmavej energie, úloha magnetizmu vo vesmíre, povaha gravitácie a hľadanie mimozemského života.



Obr. 1. Umelcova predstava o SKA nízkofrekvenčnej anténnej sústave. Kredit: SKA Organisation/TDP/DRAO/Swinburne Astronomy Productions

Základný princíp SKA je fázová anténa sústava, ktorá je zložená z obrovského počtu jednoduchých nepohyblivých antén. Antény sú natáčané elektronicky zmenou fázového napájania jednotlivých elementov. Pracujú na princípe elektronického formovania zväzku (beamforming). Môžu byť viacväzkové t.j. vytvárajú viacero zväzkov súčasne a širokopásmové, takže pokrývajú veľký rozsah vlnových dĺžok. Hardware prijímača je redukovaný na najnutnejšie komponenty (zosilňovač, filter a A/D prevodník) a ďalšie spracovanie signálu je realizované softvérom => výhodou sú nízke zriaďovacie náklady.

Uvedené princípy majú revolučné dôsledky. Rádioteleskop zaznamenáva všetko, čo sa deje na oblohe deje v danom rádiovom okne (ekvivalent celooblohovej komory). Pokiaľ sa rádiový tok archivuje, je možné sa k nemu kedykoľvek vrátiť a zopakovať pozorovanie s inými parametrami. Antény je možné kombinovať do interferometra (apertúrna syntéza obrazu) a tým ešte zvýšiť rozlíšenie.

LOFAR - Low Frequency Array

Holandské konzorcium ASTRON v súčasnosti spúšťa do ostrej prevádzky prvý softvérový IT rádioteleskop na svete. Je označovaný ako oficiálny predchodca SKA. Jeho frekvenčný rozsah je 10-250 MHz. Jadro o priemere 3km tvoria anténne farmy (Holandsko), ostatné stanice sú umiestnené v okruhu 50km až 1500 km v okolitých štátoch (Nemecko, Švedsko, Veľká Británia, Francuzsko). Stanice

sú navzájom pospájané rýchlou sieťou s priepustnosťou Tb/sek. V jadre sa nachádza centrálny superpočítač IBM Blue Gene s výkonom 34 TFlops. Zaujímavosťou je, že celý rádioteleskop je tvorený jednoduchými všesmerovými dipólmi, ktorých celkový počet je ~7000. Softvérový beamforming ako základný princíp ostáva rovnaký ako v prípade SKA.

LOFAR si kladie nasledovné kľúčové úlohy: éra reionizácie, hlboké extragalaxické prehliadky, prechodové deje a pulzary, kozmické žiarenie a magnetizmus, Slniečna fyzika, kozmické počasie a tomografia ionosféry. V súčasnosti najväčšími detektormi kozmického žiarenia sú Pierre Auger Observatory a LOFAR.

Vývoj LOFAR prešiel projektovými fázami, ktorého prototypy sú vlastne zjednodušeným modelom finálneho systému. Za zmienku stojí prvý projekt THETA, ktorý obsahoval 10 antén v tvare Y. Ako centrálny počítač boli použité zosieťované bežné PC. Rozlíšenie THETA bolo 10⁹ na frekvencii 42MHz. Po ukončení testovacej prevádzky bol rozobratý a stal sa súčasťou ďalších prototypov ako LOFAR Initial Test Station (ITS) (32 antén) optimalizovaný na mapovanie oblohy v reálnom čase. Projekt LOPES bol optimalizovaný na detekciu sekundárneho kozmického žiarenia v atmosfére a napokon LORUN - LOFAR Radboud University Nijmegen - 4 antény na detekciu sekundárneho kozmického žiarenia v atmosfére.

Ukážkovým príklad mapovania len s 10 anténami THETA je pozorovanie koronálneho výronu CME dňa 28.10.2003 (Wijnholds, 2010).

4. SDR - SOFTWARE-DEFINED RECEIVER

Doposiaľ bola jediná koncepcia konštrukcie prijímača fyzická t.j. celý prijímač bol zhotovený z „fyzických“ súčiastok. V súčasnosti sa otvárajú nové možnosti konštrukcie, kedy fyzické bloky prijímača nahrádzajú bloky softvéru. Hardware plní funkciu detektoru signálu a tvorí iba najnutnejšie časti prijímača (anténa, zosilňovač, filter, A/D prevodník).

Softvérové rádio je budúcnosť rádiotechniky. Prináša vlastnosti, ktoré nie sú realizovateľné fyzickou cestou.

Rozlišujeme tieto koncepcie:

(a) *Direct Sampling Receiver (DS SDR)* je priamo vzorkujúci prijímač t.j. nevyžaduje zmiešavanie signálu a lokálny oscilátor (LO) odpadá. Na vstupe prijímača je A/D, ktorý vzorkuje priamo zosilnený rádiový signál.

(b) *Direct Conversion Receiver (DC SDR)* – priamo zmiešavajúci prijímač má na vstupe kvadraturný zmiešavač, ktorý vyžaduje LO a konvertuje signál na nulovú medzifrekvenciu. Až potom nasleduje A/D, ktorý vzorkuje komplexný signál.

5. VYUŽITIE SDR V RÁDIOASTRONÓMII

Uvedené technológie nie sú iba doménou drahých medzinárodných projektov, ale sú dostupné aj pre

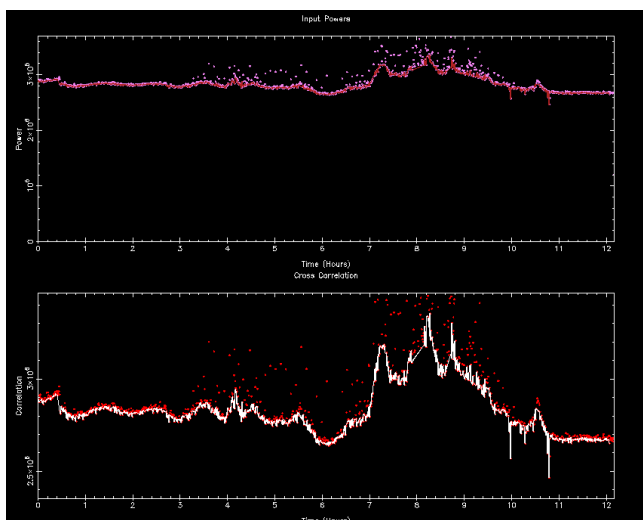
hvezdárne a tiež široké spektrum záujemcov o rádioastronómiu.

Uvádžam 2 príklady, s ktorými sme robili praktické pozorovania:

SDR Perseus (Microtelecom)

Úplný krátkovlnný komunikačný prijímač založený na technológii DS SDR. Vstupný rozsah 10 kHz - 30 MHz. Obsahuje prepínateľné pásmové filtre. ADC 14 bit, 80 Ms/s, 24-bit. Jadrom je digital Downconverter (DDC) FPGA Xilinx Spartan III XC3S250E. Výstupná šírka pásma 100kHz až 1,6 MHz. Orientačná cena 850 €. Hlavná nevýhoda je nemožnosť synchronizácie viacerých prijímačov do interferometra.

Testovali sme možnosti softvérového rádioteleskopu založeného na prijímači Perseus (Microtelecom). Pre potreby rádioastronómie sme postavili 2 prvkový interferometer, ktorý sa skladal z 2 antén typu celovlnný dipól (quad loop) na frekvencii 29.5MHz. Antény sme fyzicky zlúčili na vstupe prijímača. Základňa interferometra mala dĺžku 55m a bola orientovaná v smere východ-západ. Pokus sme realizoval P.Đuriš, G.Šalata počas seminára Kolofota 2012 na Astronomickom observatóriu na Kolonickom sedle 24.3.2012, 02h40 – 14h50 UT.



Obr 2. Na výslednom zázname vidno formou záznejev (fringes) detekciu rádiových zdrojov Cas A, Cyg A a prechod aktívneho Slnka popred zorné pole antény.

SDR USRP (Ettus Research)

Universal Software Radio Peripheral je všestranný SDR. USRP má možnosť vysielat' a tiež synchronizácie viacerých zariadení. Obsahuje DDC FPGA Altera EP1C12, šírka pásma až 8 MHz, ADC 12-bit, 64 MS/s, DAC 14-bit, 128 MS/s. Podporuje zásuvné moduly - karty 2x TX, 2x RX. Pripojenie cez USB 2.0. Orientačná cena 700 USD. RX karty (75 – 200 USD) v rozsahu DC až 2.4 GHz.

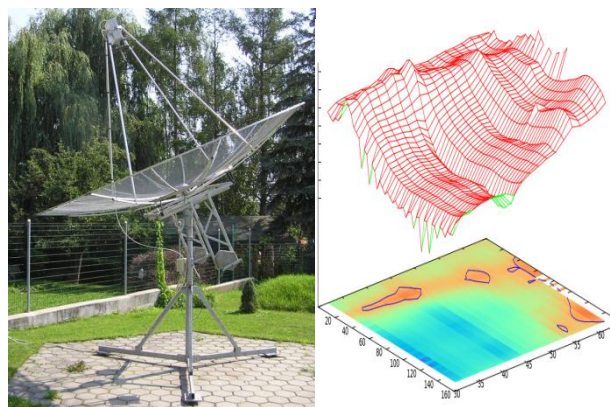
Testovali sme možnosti softvérového rádioteleskopu založenom na USRP s kartou DBS-RX. Anténa s

parabolickým reflektorom mala priemer 3.2m, uhlové rozlíšenie antény 4.6°, šumová teplota LNA 30K, vstupný



Obr 3. Universal Software Radio Peripheral (Ettus Research)

filter ladený na spektrálnu čiaru neutrálneho vodíka 1420 MHz (HI) a šírka pásma prijímača 4 MHz. Použitý software GNU Radio (Linux).



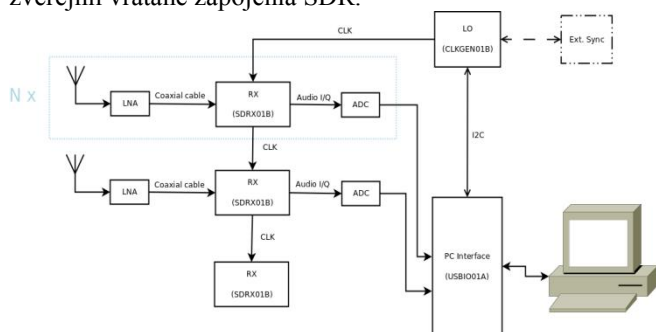
Obr 4. Rádiová mapa oblohy (vpravo) 35°x 65° na frekvencii 1420MHz zhotovená rádioteleskopom s parabolickým reflektorom s priemerom 3.2m (vľavo), Autor: Rudolf Slošiar, Bojnice

Výsledkom bola detekcia Cas A, Cyg A a ďalších diskretných zdrojov. Bol nameraný profil spektrálnej čiar HI špirálneho ramena Galaxie a detekovaný dopplerov posuv ramena. Neskôr na základe dlhodobých pozorovaní bola zhotovená rádiová mapa oblohy 35°x 65° na frekvencii 1420 MHz. Realizácia 21.7.2009 Rudolf Slošiar, Bojnice.

Projekt modulárneho SDR - MLAB SDRX01B

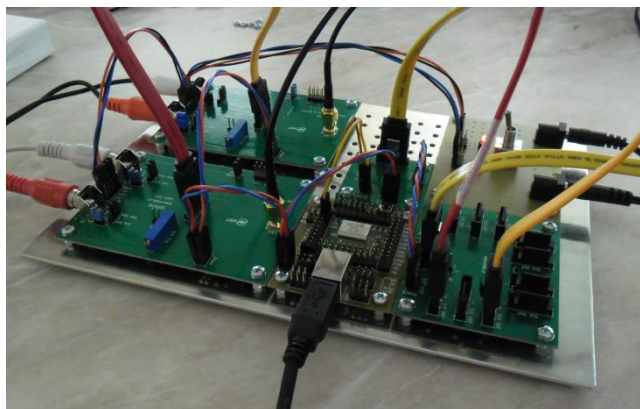
Po dlhodobých skúsenostiach s SDR sa ukázalo, že realizácia sústavy s drahými komerčnými zariadeniami a veľkým počtom antén je veľmi nákladná. Preto sme upriamili pozornosť na jednoduchý, ale geniálne riešený DC SDR, ktorý pracuje na princípe spínaného zmiešavača. SDR síce vyžaduje kvadraturný zmiešavač (teda aj LO), avšak konvertuje signál na nulovú medzifrekvenciu. To znamená, že vzorkovacie frekvencie A/D sú nízke (rádovo x10kHz) a ležia v pásme počtateľných frekvencií (ostáva možnosť záznamu aj pomocou kvalitnej zvukovej karty). Princíp spínaného zmiešavača vynašiel rádioamatér Tasič

Siniša (YU1LM) s Belehradu, ktorý ho na svojom webe zverejnil vrátane zapojenia SDR.



Obr 5. Bloková schéma modulárneho SDR - MLAB SDRX01B

Po stavbe prototypu sa ukázali slabé miesta konštrukcie a prijímač bol navrhnutý nanovo (J.Kákona) tak, aby bol odolnejší a vstupný rozsah bol zvýšený z pôvodných 50MHz na 200 MHz (pri špeciálnom výbere súčiastok až 450 MHz). J. Kákona implementoval prijímač do stavebnice MLAB a skonštruoval ďalšie moduly (A/D, frekvenčná ústredňa LO a iné). Tým sa otvorila cesta modulárneho vývoja rádioteleskopu novej generácie aj pre hviezdárne a záujemcov o rádioastronómiu z radov amatérov.



Obr 6. Realizácia modulárneho SDR - MLAB SDRX01B

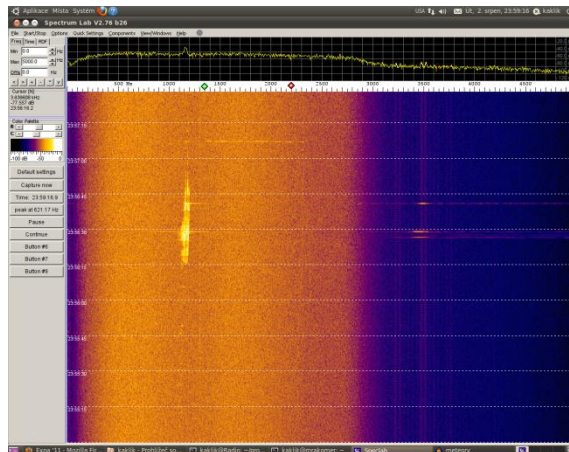
Samotný modul prijímača obsahuje iba zopár súčiastok a je oveľa lacnejší ako dostupné DS SDR zariadenia (USRP, Perzeus), preto umožňuje za rovnaké náklady postaviť mnohonásobne viac prijímačov.

Zahájili sme vývoj vlastnej konštrukcie optimalizovanej pre potreby rádioastronómie založenej na stavebnici Modular electronic Laboratory (MLAB), ktorú vyrába Universal Scientific Technologies (UST). Ďalšie možnosti použitia sú: poslech leteckej radiokomunikácie, prijímač pre rádioamatérske pásma a pre kozmickú komunikáciu (ISS, Amsat, ARISsat).

Prototyp: Back-Scatter Meteor Radar

Služi na detekciu rádiového signálu odrazeného od stopy meteoru. Prijímaná frekvencia 143,0398 MHz, záznej

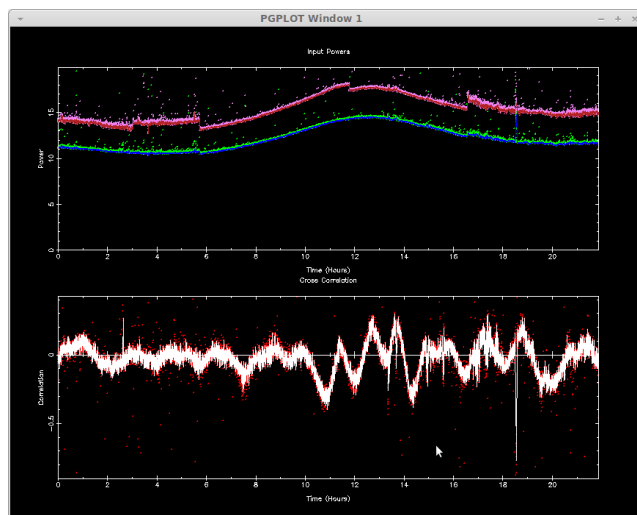
10,2kHz. Vysielačom je francúzsky radar GRAVES. Prijímač je SDRX01B + LNA. A/D tvorí zvuková karta 48kHz/16bit/stereo. Použitá anténa typu Ground plane 0.5m. Úspešne realizoval J.Kákona (UST) a L.Křivský (Úpice).



Obr 7. Záznam preletu meteoru, frekvencia 143,0398 MHz

Prototyp: Multiplikatívny rádiový interferometer

Základňa orientovaná v smere východ-západ má 36m. Frekvencia 39.644MHz, šírka pásma 16kHz, časová konštanta 5s. Prijímač je SDRX01B. A/D Tascam US-144 48kHz/16bit. Použitá aktívna anténa, 2 invertované V dipóly s LNA. Overená rádiová interferometria, úspešná detekcia kozmického šumu (Galaxia) a záznejov (fringes) od diskretných rádiových zdrojov Cas A a Cyg A. Úspešne realizoval: P. Ďuriš (Cerová)



Obr 8. Na hornom snímku vidno prechod Galaxie popred dipól (amplitúdy jednotlivých dipólov). Na spodnom snímku je záznam interferometra kombinovaný s 2 dipólom na 40 MHz, dĺžka záznamu 22h. Pozorované dňa 21.4.2012

6. ZÁVER

Po uvedených skúsenostiach sa domnievame, že je možné zostrojiť svojpomocne aj fázové anténne sústavy a interferometre založené na princípoch moderných softvérových rádioteleskopov. Plánujeme odskúšanie ďalšieho prototypu anténnej sústavy s elektronickým natáčaním zväzku. Ďalšie informácie budú publikované na <http://www.radioastronomia.sk>

LITERATÚRA

- Wijnholds, Stefan J.: Fish-Eye Observing with Phased Array Radio Telescopes, Ph.D. thesis, Delft, The Netherlands, 2 March 2010
- The Square Kilometre Array, 2012,
<http://www.skatelescope.org/>
- LOFAR, 2012,
<http://www.lofar.org>
- Perseus SDR Home Page, 2012,
<http://microtelecom.it/perseus/>
- Ettus Research, 2012,
<http://www.ettus.com/>
- Modular electronic LABoratory, 2012,
<http://www.mlab.cz/>
- GNU Radio, 2012,
<http://www.gnuradio.org/>