

Radioteleskop LOFAR w Polsce

Leszek BŁASZKIEWICZ, Andrzej KRANKOWSKI, Marian SOIDA,
Hanna ROTHKAEHL, Robert PEKAL

L.B. i A.K. – Centrum Diagnostyki Radiowej Środowiska Kosmicznego, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie; M.S. – Obserwatorium Astronomiczne Uniwersytetu Jagiellońskiego; H.R. – Centrum Badań Kosmicznych PAN; R.P. – Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe.

Radioastronomia to dziedzina badań Kosmosu, dzięki której odkryliśmy i poznaliśmy kwazary, pulsary czy też kosmiczne masery. Za początek radioastronomii uznajemy odkrycie dokonane przez Karla Jansky'ego (1905–1950), który podczas prac badawczych prowadzonych dla Bell Telephone Laboratories odkrył, a później opisał, promieniowanie radiowe Drogi Mlecznej. Już przed II wojną światową inżynier Grote Roemer (1911–2002) eksperymentował z antenami kierunkowymi o klasycznym kształcie czaszy (jak np. antena satelitarna), ale prawdziwy rozkwit radioastronomii nastąpił dopiero pod koniec lat 40.

Czym jest interferometr?

Od samego początku w radioastronomii kluczową rolę odgrywał kształt i rozmiar czaszy radioteleskopu. Wpływa on na dwa ważne dla każdego instrumentu obserwacyjnego parametry: czułość instrumentu oraz jego rozdzielczość. Z czasem tworzono coraz lepsze odbiorniki, które instalowano na coraz większych czaszach teleskopów. Dzięki temu zwiększano ich czułość, która jest zależna od powierzchni głównego zwierciadła radioteleskopu (analogią tutaj może być łapanie deszczówki – im większa powierzchnia naczynia, tym więcej wody złapiemy). Jednak czułość to nie wszystko. Ważna jest też rozdzielczość instrumentu, czyli zdolność do obserwacji obiektów o określonej odległości kątowej, którą determinują rozmiary instrumentu oraz to, jakie fale elektromagnetyczne obserwujemy. Przy tej samej średnicy teleskopu zdolność rozdzielcza dla obserwacji fal radiowych jest zdecydowanie mniejsza niż dla obserwacji wykonywanych w zakresie światła widzialnego. Dlatego nawet największe pojedyncze radioteleskopy mają gorszą rozdzielczość od małych amatorskich teleskopów optycznych.

Radioastronomowie bardzo sprytnie poradzili sobie z problemem rozmiarów teleskopów, a mianowicie zaczęli łączyć ze sobą mniejsze instrumenty. Sir Martin Ryle (1918–1984) jako pierwszy przeprowadził obserwacje za pomocą dwóch anten jednocześnie, a skomplikowane operacje związane ze wspólną analizą odebranych sygnałów (zwane syntezą apertury) pozwoliły mu na uzyskanie wyniku takiego, jakby użył teleskopu o średnicy równej odległości pomiędzy antenami. Tak narodziła się technika zwana interferometrią radiową, dziś stosowana powszechnie, między innymi jako interferometria wielkobazowa, nazywana w skrócie VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*).

Jak działa VLBI?

W celu zwiększenia rozdzielczości obserwacji powstały interferometry o zasięgu globalnym – z antenami rozproszonymi po całej kuli ziemskiej, a nawet interferometry, w których skład wchodzi anteny znajdujące się w kosmosie. Przykładem jest radioteleskop HALCA (*Highly Advanced Laboratory for Communications and Astronomy*) działający w ramach projektu VSOP (*VLBI Space Observatory Programme*). Problem z interferometrią radiową pojawiał się jednak, gdy próbowano zastosować ją do detekcji fal radiowych o długości w okolicach metra i więcej.

Każdy z nas widział zapewne, jak migoczą gwiazdy. To efekt związany z ruchami powietrza, które zniekształcają ich obraz. Podobnie jest z falami radiowymi – bardzo krótkie fale radiowe (do kilkudziesięciu centymetrów) przechodzą przez atmosferę bez większych zakłóceń, jednak te o długości powyżej metra ulegają odkształceniom w sposób podobny do światła, aczkolwiek wolniejszy i bardziej wielkoskalowy. Próbowano oczywiście budować interferometry pracujące na falach metrowych, ale miały one bardzo małe rozmiary i były nieskomplikowane, tak aby można było dokonać korelacji sygnału poprzez analogowe systemy elektroniczne. Większe rozmiary interferometrów (dłuższe bazy) sprawiały, że

Rozdzielczość wieloelementowego instrumentu to

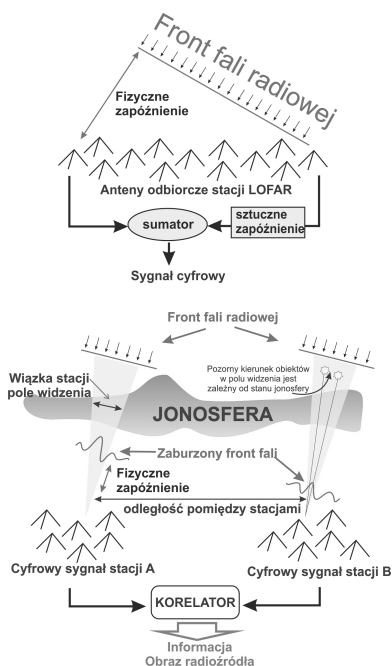
$$\alpha\lambda/L,$$

gdzie L to odległość między skrajnymi elementami, α to pewien parametr, dla LOFAR-a wynoszący 0,8, zaś λ to długość fali radiowej w metrach. W przypadku instrumentu LOFAR, gdzie odległość między skrajnymi instrumentami to około 2000 km, maksymalna zdolność rozdzielcza to mniej niż 0,1 arcsec.



Rozwiązanie zadania M 1681.

Niech XYZ będzie danym trójkątem, a punkt O będzie jego środkiem okręgu opisanego. Przypuśćmy, że $X \in BC$, $Y \in CD$, $Z \in DA$, $O \in AB$, gdzie $ABCD$ jest kwadratem. Ponieważ odcinek OY przecina odcinek XZ , to $\sphericalangle XYZ > 90^\circ$, więc XZ jest podstawą trójkąta XYZ , tj. $XY = YZ$. Wtedy też $OY \perp XZ$, a ich rzuty na prostopadłe proste BC i AB , odpowiednio, są równe (bokowi $BC = CD$ kwadratu). Wobec tego również $OY = XZ$, czyli podstawa XZ jest równa promieniowi okręgu opisanego na XYZ . Oznacza to, że trójkąt OXZ jest równoboczny, czyli $\sphericalangle XYZ = 150^\circ$, skąd wynika oczywiście, że pozostałe kąty mają po 15° .



Na początku działania cyfrowego teleskopu LOFAR rolę systemu przetwarzania danych odgrywał superkomputer IBM Blue Gene/P z przeszło ćwiercią miliona procesorów. Dziś system obliczeniowy bazuje na klastrze COBALT, na który składa się kilkadziesiąt kart graficznych NVIDIA Tesla – które muszą poradzić sobie ze strumieniem około 13 terabitów danych na sekundę.



Rozwiązanie zadania M 1683.
Liczby wymierne możemy zapisać w postaci

$$x = \frac{a}{D}, \quad y = \frac{b}{D}, \quad z = \frac{c}{D},$$

gdzie $\text{NWD}(a, b, c, D) = 1$. Wtedy

$$x^2 + y^2 + z^2 = \frac{a^2 + b^2 + c^2}{D^2}$$

jest całkowita, więc $D^2 \mid a^2 + b^2 + c^2$, skąd $D \mid a^2 + b^2$. Podobnie $D \mid b^2 + c^2$ oraz $D \mid c^2 + a^2$. Zatem liczba

$$2c^2 = (b^2 + c^2) + (a^2 + c^2) - (a^2 + b^2)$$

jest podzielna przez D . Podobnie $D \mid 2a^2$ i $D \mid 2b^2$.

Gdyby liczba pierwsza $p > 2$ dzieliła D , to z otrzymanych podzielności wnioskujemy, że $p \mid a$, $p \mid b$ oraz $p \mid c$ – co przeczy założeniu $\text{NWD}(a, b, c, D) = 1$. Wobec tego D jest potęgą dwójki.

Gdyby jednak $4 \mid D$, to analogicznie uzyskalibyśmy podzielności $2 \mid a$, $2 \mid b$ oraz $2 \mid c$ – znów sprzeczność ze względu na pierwszość a , b , c i D .

Ostatecznie $D \in \{1, 2\}$, skąd $2x = \frac{2a}{D}$ jest liczbą całkowitą.

sygnał był zniekształcony tak dalece, że uniemożliwiał obserwacje. Przez długi czas więc obserwowanie rozległymi interferometrami fal radiowych o długości powyżej metra nie było możliwe. Na szczęście nasza wiedza na temat jonosfery jest obecnie tak duża, że nawet dla interferometrów o dużych rozmiarach jesteśmy w stanie uwzględnić dynamikę atmosfery ziemskiej w obserwacjach. Dzięki temu zbudowano interferometr pracujący na falach o długości od metra do około 17 metrów, który jest zdolny penetrować Wszechświat na wcześniej niezbadanych obszarach widma radiowego.

Mowa tutaj o interferometrze *Low Frequency Array* (LOFAR). Jest to sieć radioteleskopów o budowie hierarchicznej, gdzie pojedyncze zestawy elementów odbiorczych, zwane stacjami, powstały na początku 2010 roku w Holandii, a później zaczęły powstawać w innych krajach Europy. Dziś cała sieć to 52 stacje – z czego 38 stacji znajduje się na terenie Holandii (24 stanowią tzw. *Core*, w tym 6 ulokowano na sztucznej wyspie, w tzw. obszarze *Superterp*, czyli centralnej części całego LOFARA. Pozostałych 14 stacji jest rozproszonych na terenie całej Europy, trzy z nich zainstalowano w Polsce. Dodatkowo planowana jest budowa kolejnych dwóch stacji we Włoszech i w Bułgarii. Każda ze stacji to dwa pola anten tworzących tzw. układ fazowy. Składa się on ze 192 (96 par) anten dipolowych pracujących w zakresie 30–90 MHz oraz 3072 anten działających w zakresie 110–240 MHz, pogrupowanych w 32-elementowe zespoły. Każda z anten pracuje, rejestrując sygnał, który jest próbkowany 200 milionów razy na sekundę. Z zarejestrowanego sygnału po procesie cyfryzacji powstaje strumień nawet 10 GB/s danych. To bardzo dużo informacji. Te dane trzeba przetworzyć, co stanowi nie lada problem – szczególnie gdy wytwarza je jednocześnie ponad 100 tysięcy anten z całego interferometru!

Jak dokładnie działa teleskop LOFAR?

Każda stacja LOFAR składa się z dużej liczby pojedynczych dipoli. Rejestrowana fala elektromagnetyczna wzbudza w nich zmienne prądy elektryczne, które w postaci napięć są mierzone z częstotliwością 200 MHz. Każda z anten w stacji „widzi” z grubsza całe niebo znajdujące się ponad horyzontem, przy czym jej czułość jest największa w pewnym zakresie obszaru wokół zenitu (najwyższego punktu na niebie w danym miejscu). Mając układ wielu anten, połączonych przewodami równej długości z systemem sumującym ich sygnał, jesteśmy zdolni obserwować obszar wokół zenitu, a wielkość tego obszaru zależy od ilości anten oraz od długości rejestrowanej fali. Dzieje się tak dlatego, że sygnał w postaci fali elektromagnetycznej dochodzi w tym samym momencie do wszystkich elementów teleskopu fazowego – i dzięki temu wzmacnia się. Tutaj dobrym przykładem są dwie dodawane do siebie sinusoidy. Sygnał sumuje się, gdy ich fazy są zgodne, lub wygasa, gdy fazy są przeciwne.

A co, jeśli chcemy obserwować obiekt oddalony od zenitu? Wtedy wystarczy „powiedzieć” systemowi sumującemu o sygnałach z poszczególnych anten, do której z anten i w jakim momencie dotrze czoło fali (patrz rysunek). W ten sposób sztucznie wprowadzane jest opóźnienie, co widać po prawej stronie ilustracji. Oczywiście proces ten, zwany formowaniem wiązki, jest realizowany po wyborze współrzędnych obserwowanego obiektu i dla długości fal obserwowanych teleskopem LOFAR.

Tak dzieje się w pojedynczej stacji LOFAR, a jak wygląda sytuacja w przypadku interferometru? Jest analogiczna, przy czym sygnał całej stacji traktuje się jako ten od jednego elementu układu. Musimy przy tym bardzo dobrze znać geometrię interferometru oraz precyzyjnie zsynchronizować zegary systemowe we wszystkich stacjach. I nie byłoby kłopotu, gdyby nie fakt, że na kształt czoła sygnału w częstotliwościach obserwowanych przez LOFAR ma wpływ jonosfera, która nie jest jednorodna. I jeszcze jedna kwestia – pokazująca, jak potężnym jest i może być radioteleskop. Skoro w teleskopie LOFAR każdy jego element widzi jednocześnie całe niebo, a my niejako tylko wybieramy interesujący nas kierunek, to czy można obserwować więcej niż jeden kierunek, to znaczy, czy można obserwować więcej niż jedno źródło w tym samym momencie? Odpowiedź brzmi: tak! Jednak sam proces formowania wiązki

LOFAR w Polsce

Polska dołączyła do systemu LOFAR jako konsorcjum POLFAR. W jego skład weszło 9 instytucji: Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Uniwersytet Jagielloński, Centrum Badań Kosmicznych PAN w Warszawie, Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe – jako instytucje zaangażowane infrastrukturalnie, a obecnie tworzące konsorcjum operacyjne POLFARO, oraz Centrum Astronomiczne Mikołaja Kopernika PAN, Uniwersytet Szczeciński, Uniwersytet Zielonogórski, Uniwersytet Mikołaja Kopernika i Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu. W roku 2015 w trzech polskich lokalizacjach powstały stacje systemu: Stacja PL612 w Baldach pod Olsztynem, należąca do Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, gdzie zainstalowano maksymalną konfigurację, czyli łącznie 3264 dipole. Podobna konfiguracja znajduje się w stacji w Borówcu pod Poznaniem, należącej do Centrum Badań Kosmicznych. Ostatnia stacja, należąca do Uniwersytetu Jagiellońskiego, została zbudowana w Łazach koło Krakowa, w nieco mniejszej wersji. Od początku 2016 roku polskie stacje biorą udział w badaniach prowadzonych w ramach Europejskiej grupy – International LOFAR Telescope (ILT). O transfer gigantycznej ilości danych oraz częściowo o ich przechowywanie dba Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe.

wymaga bardzo skomplikowanych systemów cyfrowych i informatycznych. Zatem jeśli te będą odpowiednio wydajne, to za pomocą interferometru LOFAR można teoretycznie obserwować nawet 2^8 , czyli 256 obiektów jednocześnie, co wiąże się z maksymalnym podziałem pasma na tyleż kanałów.

Co badamy radioteleskopem LOFAR?

Trwające już od ponad dekady obserwacje radioastronomiczne na falach wcześniej nieeksplorowanych zaowocowały wieloma znakomitymi wynikami, na wyliczenie których nie ma tu miejsca. Warto jednak podkreślić, że od początku zainicjowano kilka wiodących tematów badawczych – nazwano je projektami kluczowymi. W wielu z tych projektów uczestniczą naukowcy z Polski. Jednym z nich są obserwacje Słońca i Kosmiczna Pogoda – tematy bardzo istotne nie tylko w sensie poznawczym, ale i społecznym, bo wyniki tych badań wykorzystywane są w telekomunikacji satelitarnej. Wykorzystując LOFAR, możemy też na falach radiowych obserwować najwcześniejsze momenty istnienia Wszechświata – tzw. epokę rejonizacji. Ponadto tworzymy przeglądy całego nieba uwzględniające odległe obiekty kosmiczne, takie jak kwazary czy radiogalaktyki, badając m.in. ich pola magnetyczne. Ważną częścią pracy systemu LOFAR (także pojedynczych jego elementów) są obserwacje zjawisk i obiektów szybkozmiennych w czasie. Do takich zaliczamy pulsary, które akurat w zakresach częstotliwości LOFAR-a emitują najwięcej promieniowania. Dzięki teleskopowi LOFAR badane są też promieniowanie kosmiczne oraz zjawiska burzowe.

Warto na koniec dodać, że LOFAR to niezwykle ważny instrument dla prawdopodobnie najbardziej rozbudowanego radioteleskopu, który aktualnie powstaje w Australii i RPA – jest bowiem swego rodzaju „pathfinderem” technologii dla projektu *Square Kilometre Array* (SKA). Sam LOFAR niebawem wkroczy też w kolejną fazę swojego istnienia. W 2022 roku zacznie się bowiem transformacja systemu do wersji LOFAR 2.0.

O pewnych średnich w ułamkach łańcuchowych

Karol GRYSZKA*

* Wydział Nauk Ścisłych i Przyrodniczych, Uniwersytet Pedagogiczny w Krakowie

Prawo Benforda jest przykładem niezwyklej zależności obserwowanej wśród danych liczbowych. Głosi ono, że dla wielu zbiorów liczb o różnym pochodzeniu (powierzchnia państw, kwoty wystawiane na czekach, parametry pierwiastków chemicznych, pierwsze cyfry kolejnych potęg liczby 143) pierwsze cyfry znaczące tych liczb występują z częstością w dobrym przybliżeniu określoną przez wzór

$$(1) \quad P(k) = \log_{10} \left(1 + \frac{1}{k} \right),$$

gdzie $k = 1, 2, \dots, 9$. Tym samym około 30,1% wszystkich liczb w wielu zbiorach danych rozpoczyna się od 1, a tylko 4,6% od 9. Prawo to jest dość uniwersalne, choć oczywiście nie wszystkie dane liczbowe je spełniają (np. wzrost człowieka).

Jednak nie prawem Benforda będziemy się tu zajmować (o tym pisano już w $\Delta_{10}^3, \Delta_{10}^{12}$ czy Δ_{16}^4). Nas interesować będzie podobne w sformułowaniu pytanie – o liczby, jakie znajdują się w rozwinięciu liczby rzeczywistej w ułamek łańcuchowy. Wyjaśnijmy pokrótce to pojęcie (omówione np. w Δ_{21}^5).

Ułamkiem łańcuchowym liczby $x > 0$ nazywamy wyrażenie postaci

$$x = a_0 + \frac{1}{a_1 + \frac{1}{a_2 + \frac{1}{\ddots + \frac{1}{a_{k-2} + \frac{1}{a_{k-1} + \frac{1}{a_k + \dots}}}}}}, \quad \text{przy czym każde } a_i \in \mathbb{N} \setminus \{0\}.$$

