Monitoring nieregularności jonosferycznych w oparciu o obserwacje astrofizyczne systemem LOFAR.

Paweł Flisek

Rozprawa doktorska napisana pod kierunkiem
dr. hab. Leszka Błaszkiewicza, prof. UWM

Olsztyn, 2024

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie
Wydział Geoinżynierii

Niniejszą pracę doktorską pragnę zadedykować
mojej żonie Joli, bez której wsparcia by nie powstała,
rodzicom, którzy zawsze we mnie wierzyli
oraz wszystkim moim bliskim.

Szczególne podziękowania dla
prof. Leszka Błaszkiewicza za naukową opiekę,
przyjaciół z Centrum Diagnostyki
Radiowej Środowiska Kosmicznego
oraz tym spoza.

Spis treści

Wprowadzenie **5**

1 Propagacja fal radiowych **8**

2 LOFAR – LOw Frequency ARray **15**
2.1 Generalna zasada obserwacji i budowa 15
2.2 Typy obserwacji 20
2.3 Astrofizyczne źródła fal radiowych 21
2.4 Wpływ jonosfery na obserwacje radioteleskopem LOFAR 23

3 Jonosfera **26**
3.1 Budowa jonosfery 27
3.2 Nieregularności w jonosferze na średnich szerokościach geograficznych . 29
3.3 Tradycyjne techniki monitorowania jonosfery 30

4 Indeks S_4 – obserwacje silnych radioźródeł **38**
4.1 Przetwarzanie danych 38
4.2 Wyznaczenie indeksu S_4 42
4.3 Metodyka detekcji nieregularności. 46
4.4 Wyniki obserwacji nieregularności jonosferycznych w obserwacjach. . . 50
4.5 S_4 Pipeline 66

5 Wpływ jonosfery na obserwacje pulsarów **71**
5.1 Algorytm przetwarzania danych 71
5.2 Widma dynamiczne pulsarów bazujące na S/N 74
5.3 Analiza i wyniki obserwacji pulsarów 76
5.4 Symultaniczne obserwacje parą stacji LOFAR 81

Podsumowanie **85**

Załącznik 1 – Solar and Scintillation LOFAR UTILISATION TOOL **87**

Bibliografia **92**

Wprowadzenie

Badania jonosfery są obiektem zainteresowań wielu doświadczalnych dyscyplin naukowych ze względu na jej znaczący wpływ na propagację fal radiowych. Monitorowanie stanu jonosfery jest niezwykle istotne dla radioastronomii, szczególnie w przypadku, gdy obserwacje prowadzone są na niskich częstotliwościach. Jonosfera jako ośrodek dyspersyjny skutecznie potrafi zaburzyć obserwacje nawet najbardziej precyzyjnych instrumentów. Zatem badanie zjawisk zachodzących w obszarze jonosfery ma fundamentalne znaczenie. Przez długi czas astronomiczne obserwacje radiowe wykorzystywały głównie częstotliwości powyżej 1 GHz, aby zminimalizować lub nawet pominąć wpływ jonosfery na rejestrowane dane. Radioteleskop LOFAR (z ang. *LOw Frequency ARray*) w przeciwieństwie do innych, wcześniej budowanych instrumentów, zaprojektowany został do rejestracji sygnałów radiowych w zakresie częstotliwości od 10 MHz do 250 MHz. Ten fakt w połączeniu z budową instrumentu wymaga skomplikowanej kalibracji wynikającej z zaburzenia sygnału przez jonosferę, jednocześnie jest źródłem cennych obserwacji prowadzonych w zakresach widma elektromagnetycznego (EM) niedostępnych dla astronomii wcześniej.

Monitorowanie stanu jonosfery oraz rozwijanie dotychczasowej wiedzy o mechanice zjawisk w niej zachodzących ma istotny wpływ na dokładność pozycjonowania satelitarnego, które to pomiary są wykorzystywane powszechnie w geodezji i nawigacji. Zaburzenia w propagacji sygnału wynikające z nieregularności w jonosferze są jednymi z najistotniejszych czynników wpływających na dokładność wyznaczenia pozycji. Dlatego właśnie badania struktury i dynamiki jonosfery przyczyniają się do powstawania nowych modeli i metod eliminacji bądź zmniejszenia wpływu jonosfery na dokładność pozycjonowania. Otoczenie kosmiczne (w tym jonosfera) jest przedmiotem zainteresowań geodezji, szczególnie w dobie dynamicznego rozwoju technik satelitarnych.

Wpływ nieregularności jonosferycznych, napędzanych między innymi przez wiatr

słoneczny (aktualnie występuje maksymalna faza cyklu słonecznego) jest widoczny w wynikach obserwacji nawet na średnich szerokościach geograficznych. Niezwykle czułe anteny, zastosowane w radioteleskopie LOFAR, są w stanie wychwycić nawet niewielką zmianę w intensywności wykrywanych fal radiowych wywoływanych przez nieregularności struktury jonosfery, co rejestrowane jest jako scyntylacje sygnału.

Dzięki zdolności do wykonywania szerokopasmowych obserwacji (10–90 MHz i 110–250 MHz) możliwe jest zbadanie gradientów jonosferycznych niedostępnych dla innych, tradycyjnych instrumentów. Unikatową cechą obserwacji jest również rozdzielczość czasowa instrumentu wynosząca nawet 20 ms. Oprócz badań w domenie częstotliwościowej i czasowej LOFAR dysponuje istotnymi zdolnościami do badania przestrzennego jonosfery, poprzez wykorzystanie obserwacji ze stacji rozlokowanych w Europie. W jonosferycznych projektach obserwacyjnych biorą udział wszystkie stacje systemu, wliczając stację PL612 znajdującą się w Bałdach i zarządzaną przez Centrum Diagnostyki Radiowej Środowiska Kosmicznego działające na Uniwersytecie Warmińsko-Mazurskim w Olsztynie.

W niniejszej pracy poruszono zagadnienia związane z nieregularnościami jonosfery ze szczególnym uwzględnieniem ich obserwacji wykonanych radioteleskopem LOFAR. W pracy zidentyfikowano nieregularności jonosferyczne wywołujące scyntylacje sygnału w obserwacjach radioźródeł rejestrowanych radioteleskopem LOFAR. Przedstawione analizy pozwalają na wyciągnięcie wniosków o skalach przestrzennych i czasowych nieregularności oraz mechanizmach ich powstawania. Wyniki z obserwacji scyntylacyjnych radioteleskopem porównano do tradycyjnych metod badania stanu jonosfery. Praca przedstawia również możliwości monitorowania wpływu jonosfery na propagację sygnału w obserwacjach bardzo szczególnych astrofizycznych obiektów – pulsarów, które dla systemu LOFAR stanowią jeden z głównych celów obserwacyjnych. Kluczowym pytaniem poruszonym w pracy jest to, jakich cennych informacji o nieregularnościach dostarczają nam obserwacje radioteleskopem LOFAR.

Praca składa się z pięciu rozdziałów. Rozdziały pierwszy, drugi i trzeci stanowią teoretyczny i techniczny wstęp do wykonanych badań. W pierwszym rozdziale przedstawiono zagadnienie propagacji fal radiowych i zjawiska wpływające na kierunek, amplitudę i fazę fali radiowej. Rozdział drugi przedstawia techniczny opis radioteleskopu LOFAR, z uwzględnieniem sposobu i rodzajów wykonywanych obserwacji. W rozdziale tym przedstawiono obiekty astrofizyczne, których obserwacje zostały przedstawione

i przeanalizowane w pracy. Rozdział trzeci przybliża budowę jonosfery ze szczególnym uwzględnieniem nieregularności w niej występujących. W rozdziale tym przedstawiono także tradycyjne techniki monitorowania jonosfery.

Rozdział czwarty skupia się na algorytmie wyznaczania parametru S_4 z obserwacji scyntylacyjnych oraz oparte na nim autorskie oprogramowanie do kalkulacji parametru. Rozdział czwarty przedstawia ponadto analizy obserwacji scyntylacyjnych radioźródeł, omawia skale czasowe i przestrzenne nieregularności jonosferycznych oraz porównuje uzyskane wyniki z obserwacjami tradycyjnymi technikami.

Rozdział piąty przedstawia badania sygnałów od szczególnych obiektów astrofizycznych, jakim są pulsary. W rozdziale przedstawiono algorytm wyznaczania widm dynamicznych na podstawie stosunku sygnału do szumu, oddzielono wpływ propagacji sygnału przez ośrodki międzygwiazdowe i przedstawiono wpływ jonosfery na obserwacje pulsarów zarejestrowanych stacją w Bałdach oraz zaprezentowano wyniki wspólnej kampanii pomiarowej przeprowadzonej stacją w Bałdach (PL612) ze stacją w Łazach (PL611).

Rozdział 1

Propagacja fal radiowych

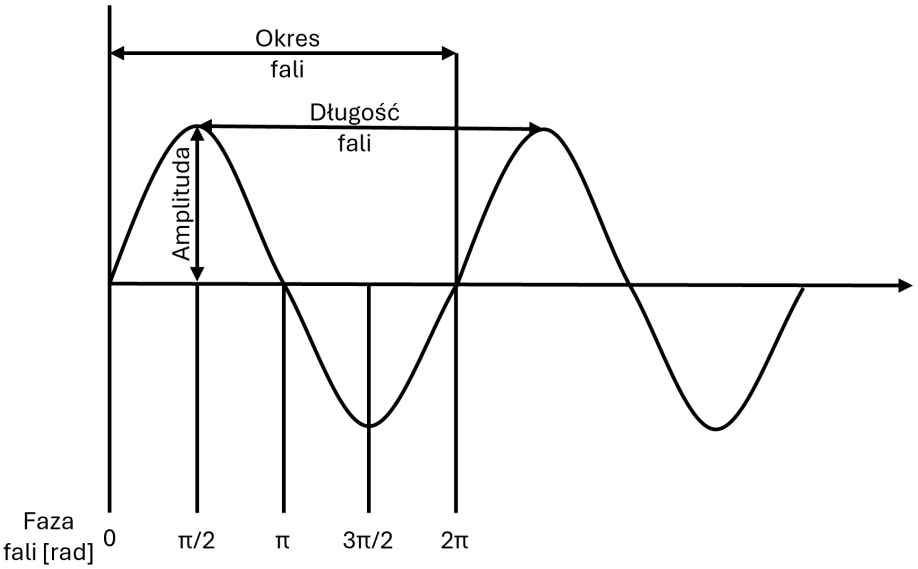
Promieniowanie elektromagnetyczne możemy sklasyfikować pod względem częstotliwości i odpowiadającej jej długości fali. Fale o różnych częstotliwościach posiadają różne właściwości oraz różnie oddziałują z materią. Zwyczajowo widmo elektromagnetyczne dzieli się na siedem grup promieniowania elektromagnetycznego – zaczynając od najniższych częstotliwości: fale radiowe, mikrofale, promieniowanie podczerwone, światło widzialne, ultrafiolet, promieniowanie rentgenowskie i promieniowanie gamma (Tabela 1.1). Podstawą rozważań w niniejszej pracy są fale radiowe, dla których głównym zastosowaniem są techniki telekomunikacyjne. Jednakże fale radiowe są też wykorzystywane w wielu innych dziedzinach, jak na przykład medycyna czy astronomia – ta druga stanowi jedną z podstaw niniejszej rozprawy.

Promieniowanie EM składa się z fal pola elektrycznego i magnetycznego. Fale, rozchodząc się w przestrzeni, niosą ze sobą energię promieniowania. Powstawanie fal elektromagnetycznych wynika z praw Maxwella, które mówią o wzajemnym indukowaniu się zmiennego pola magnetycznego i zmiennego pola elektrycznego przemieszczającego się w przestrzeni. Taka wzajemna zależność powoduje, że fala elektromagnetyczna rozchodzi się bez istnienia ośrodka materialnego.

Fale radiowe podlegają dodatkowemu podziałowi ze względu na częstotliwość (długość) 1.2. Każdą falę charakteryzują amplituda, faza, okres i długość (rys. 1.1). Fale radiowe poruszają się w próżni z prędkością światła ($v = c$), stąd równanie 1.1 pokazuje związek między długością fali (λ) a częstotliwością (f).

Grupa	**Przedział częstotliwości [Hz]**	**Długość fali [m]**
Fale radiowe	10^4 – 10^8	$3 \cdot 10^4$ – 1
Mikrofale	10^8 – 10^{12}	1 – $3 \cdot 10^{-5}$
Promieniowanie podczerwone	10^{12} – $4 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{-5}$ – $7,9 \cdot 10^{-7}$
Światło widzialne	$4 \cdot 10^{14}$ – $8 \cdot 10^{14}$	$7,9 \cdot 10^{-7}$ – $3,9 \cdot 10^{-7}$
Ultrafiolet	$8 \cdot 10^{14}$ – $3 \cdot 10^{16}$	$3,9 \cdot 10^{-7}$ – $5 \cdot 10^{-9}$
Promieniowanie rentgenowskie	$3 \cdot 10^{16}$ – $3 \cdot 10^{20}$	$1 \cdot 10^{-8}$ – $1 \cdot 10^{-12}$
Promieniowanie gamma	10^{18} – 10^{22}	$3 \cdot 10^{-1}0$ – $3 \cdot 10^{-14}$

Tabela 1.1: Grupy fal elektromagnetycznych w spektrum elektromagnetycznym z podziałem na częstotliwość i długość fali.



Rysunek 1.1: Parametry charakteryzujące falę elektromagnetyczną.

$$v = f \cdot \lambda \tag{1.1}$$

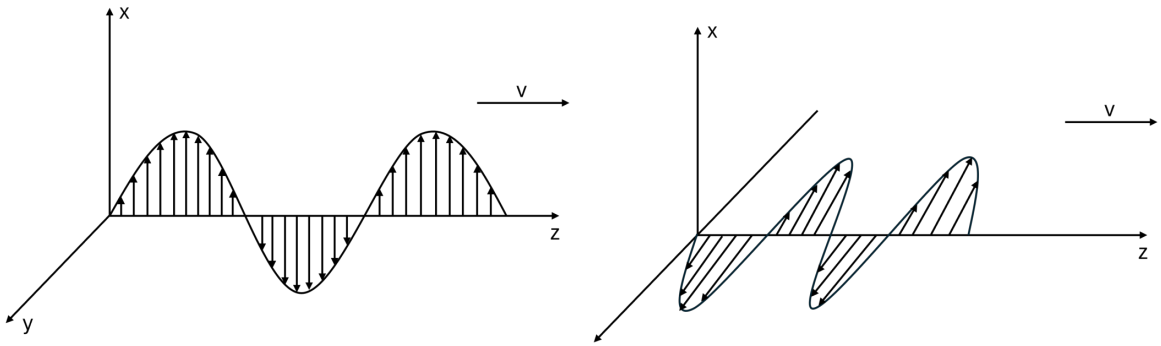
Jednak nie zawsze fala radiowa porusza się w idealnej próżni, a podróżując po ośrodku określonym stałą dielektryczną (ϵ_r) prędkość fali (v) określa wzór 1.2.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \tag{1.2}$$

Fala	**Oznaczenie**	**Przedział częstotliwości [MHz]**	**Długość fali [m]**
myriametrowe	VLF	0,003 – 0,03	100000 – 10000
kilometrowe	LF	0,03 – 0,3	10000 – 1000
hektametrowe	MF	0,3 – 3	1000 – 100
dekametrowe	HF	3 – 30	100 – 10
metrowe	VHF	30 – 300	10 – 1
decymetrowe	UHF	300 – 3000	1 – 0,1
centymetrowe	SHF	3000 –30000	0,1 – 0,01
milimetrowe	EHF	30000 – 300000	0,01 – 0,001

Tabela 1.2: Podział fal radiowych ze względu na częstotliwość i długość fali.

Cechą charakterystyczną fal elektromagnetycznych, w tym radiowych, jest polaryzacja, która odnosi się do kierunku, w jakim zachodzi indukowanie się pola elektrycznego i magnetycznego fali. Fale elektromagnetyczne są falami poprzecznymi, co znaczy, że ich oscylacja jest prostopadła do kierunku propagacji. Wyróżniamy polaryzację pionową (rys. 1.4a), poziomą (rys. 1.2b) oraz w dowolnym kierunku (rys. 1.3).



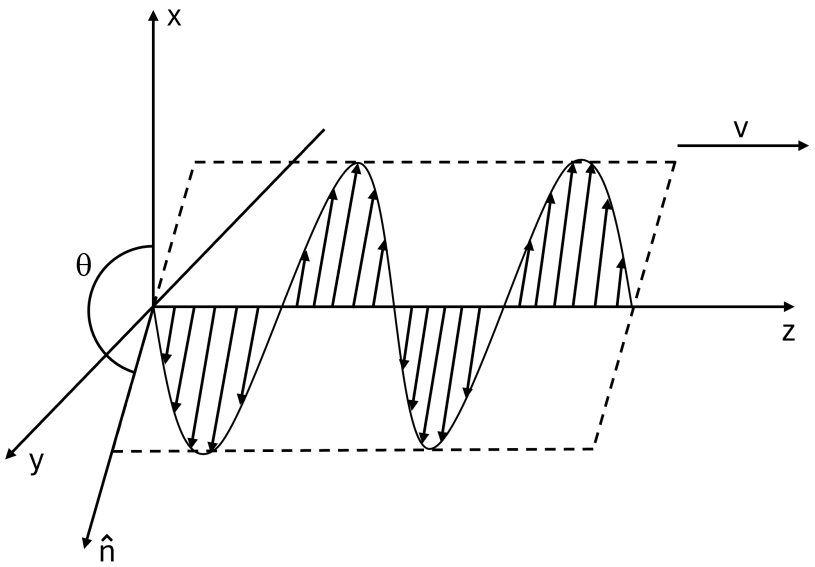
(a) Polaryzacja pionowa

(b) Polaryzacja pozioma

Rysunek 1.2: Rodzaje polaryzacji na podstawie (Griffiths, 2023)

Kąt polaryzacji przyjmuje wartość zgodną ze wzorem 1.3. Falę elektromagnetyczną o dowolnym kącie polaryzacji wówczas można rozpatrywać jako superpozycję dwóch fal: jednej spolaryzowanej pionowo i drugiej spolaryzowanej poziomo. Falę, której kąt polaryzacji pozostaje niezmienny w czasie, nazywamy spolaryzowaną liniowo.

$$\hat{n} = \cos\theta\hat{x} + \sin\theta\hat{y} \tag{1.3}$$

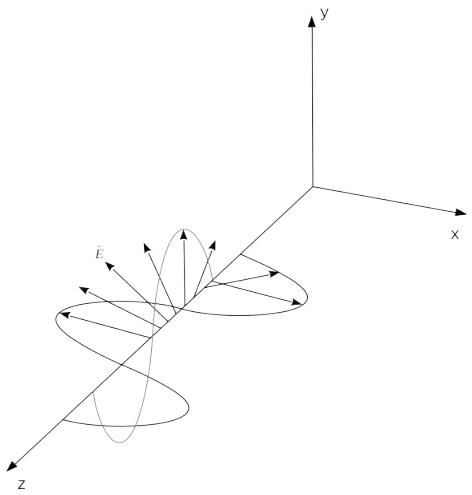


Rysunek 1.3: Wektor polaryzacji oraz jej kąt. Na podstawie (Griffiths, 2023)

Oprócz polaryzacji liniowych wyróżniamy polaryzację kołową, którą charakteryzuje zmienny kierunek pola elektromagnetycznego $\hat{E}$ w czasie (rys. 1.4). Wyszczególnić możemy dwa rodzaje polaryzacji kołowych: prawoskrętne i lewoskrętne. Polaryzację kołową nazywa się prawoskrętną, kiedy kierunek wektora $\hat{E}$ porusza się zgodnie z ruchem zegara, patrząc z perspektywy kierunku propagacji fali. Gdy zaś kierunek wektora jest przeciwny do ruchu wskazówek zegara, mówimy o polaryzacji kołowej lewoskrętnej.

Fala radiowa, przemieszczając się przez ośrodek jednorodny, nie zmienia swoich cech, jednak taka wyidealizowana sytuacja jest rzadko spotykana w naturze. Fale EM zmieniają swoją charakterystykę propagacji każdorazowo, kiedy napotykają na granicę ośrodków o różnych właściwościach. Przykładem przejścia z jednego ośrodka do drugiego jest przejście sygnału z przestrzeni międzyplanetarnej do ziemskiej atmosfery.

Zmiana ośrodka propagacji może skutkować zmianą amplitudy, fazy, polaryzacji czy kierunku fali.



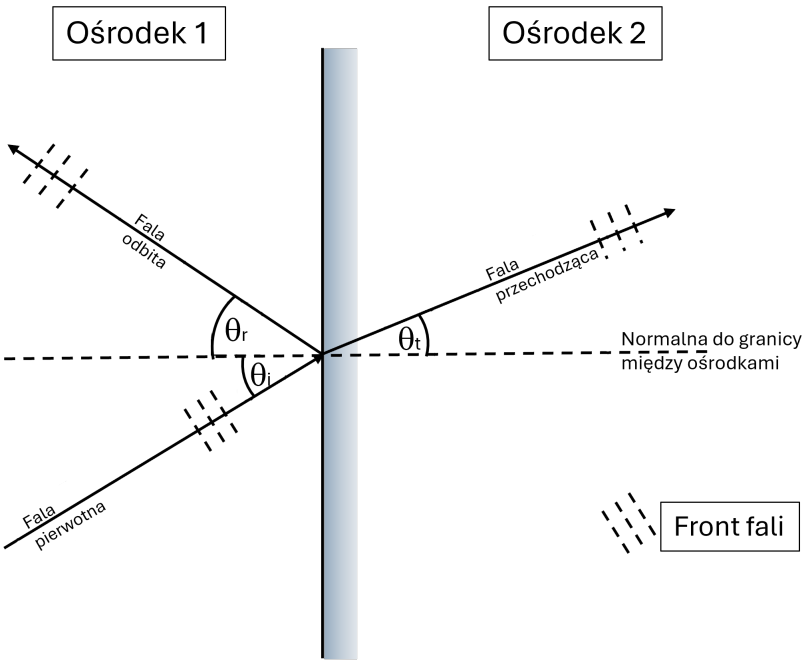
(a) Polaryzacja kołowa

Rysunek 1.4: Polaryzacja kołowa. Rysunek wykonany na podstawie (Hecht, 2017)

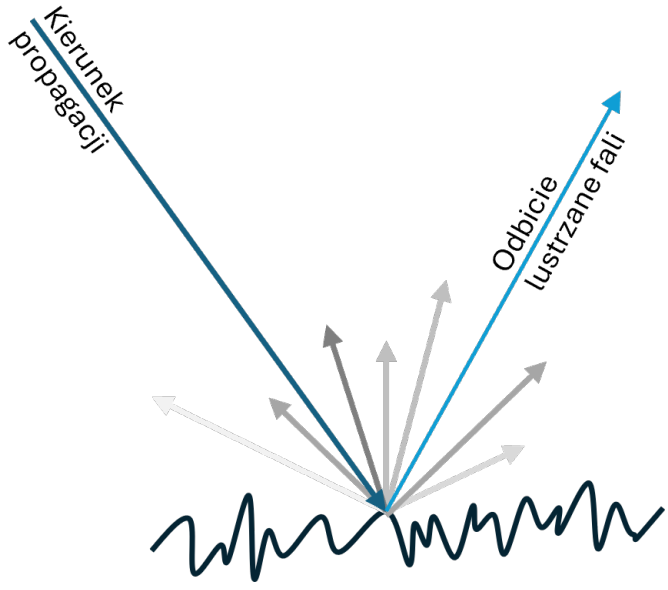
Jednymi z najpowszechniejszych zjawisk zmiany parametrów fali są zjawisko odbicia i refrakcji (Saunders i Aragón-Zavala, 2007). Fala, docierając do granicy ośrodka, rozbija się na dwie części: odbitą oraz przechodzącą (rys. 1.5). Pierwsza składowa odbija się od granicy ośrodków i propaguje dalej w ośrodku pierwotnym. Nowy kierunek propagacji i normalna do granicy ośrodków tworzą kąt θ_r, który jest taki sam jak ten między kierunkiem propagacji fali pierwotnej a normalną, oznaczony przez θ_i. Kierunek fali przechodzącej jest nachylony do normalnej pod kątem θ_t, który nie jest tożsamy z θ_i, zjawisko to nazywamy refrakcją. Kąt fali przechodzącej możliwy jest do obliczenia z zależności:

$$\frac{sin\theta_i}{\sin\theta_t} = \frac{n_2}{n_1}, \tag{1.4}$$

w której n_1 i n_2 są współczynnikami refrakcji ośrodków, obliczanymi ze stosunku prędkości światła w próżni i prędkości światła w danym ośrodku.



Rysunek 1.5: Zjawisko odbicia i refrakcji fali. Na podstawie (Saunders i Aragón-Zavala, 2007)

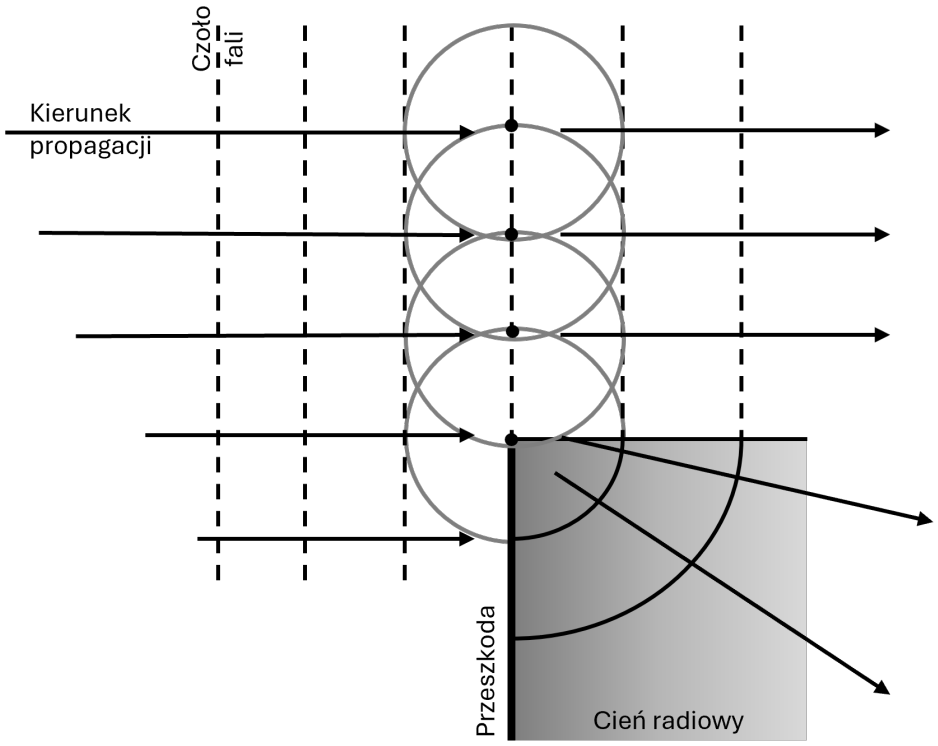


Rysunek 1.6: Zjawisko rozproszenia fali.

Rozwinięciem refrakcji jest rozpraszanie, które spowodowane jest nierównością po-

wierzchni ośrodka, przez który fala przechodzi. Rozpraszanie powoduje zmniejszenie energii w kierunku, w którym fala odbiłaby się, gdyby powierzchnia była gładka (tzn. odbicie lustrzane, rys. 1.6), a zwiększenie energii fali w innych kierunkach. Stopień zmniejszenia energii fali jest zależny od kąta padania fali na powierzchnię oraz chropowatości ośrodka.

Na drodze propagacji fali radiowej często występują też różnego rodzaju przeszkody, powodujące absorpcję fali, ale też zjawisko dyfrakcji fali. Zjawisko dyfrakcji jest wyjaśnione w zasadzie Huygensa, formułowane przez Christiaana Huygensa w 1678 roku, która postuluje, że w każdy punkt na fali, możemy traktować jako źródło fali wtórnej. Według zasady Huygensa fala elektromagnetyczna, która natrafiła na przeszkodę absorbującą fale, w punkcie końca krawędzi absorbującej stacje się nowym źródłem fali wtórnej w regionie cienia (rys. 1.7).



Rysunek 1.7: Zjawisko dyfrakcji fali radiowej po napotkaniu przeszkody absorbującej.

Rozdział 2

LOFAR – LOw Frequency ARray

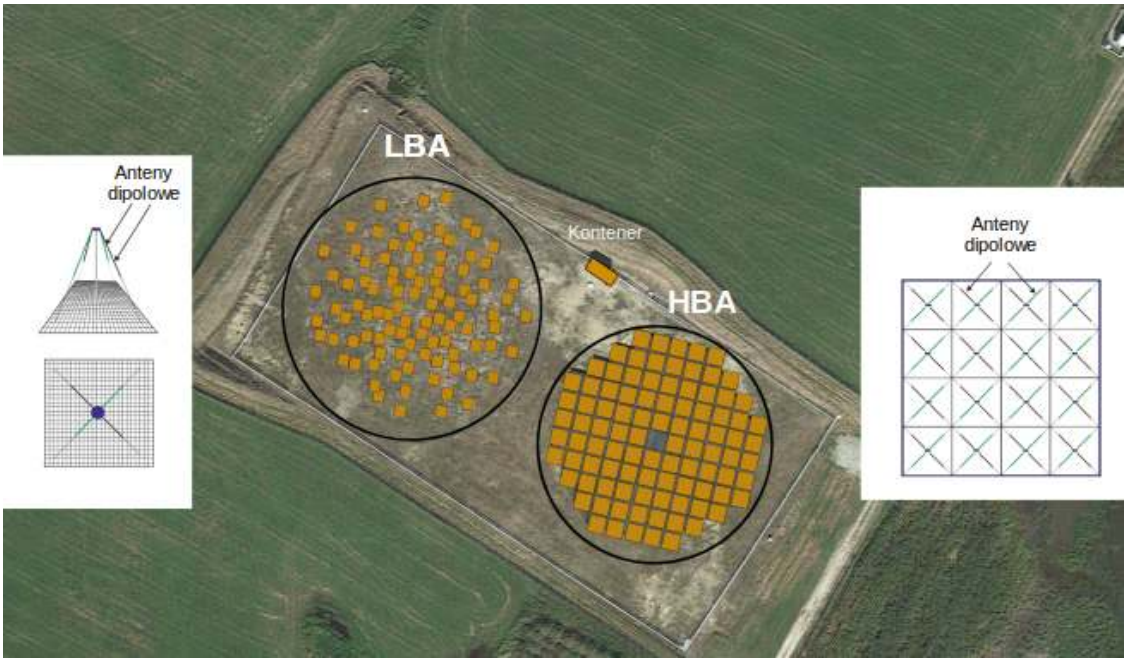
2.1 Generalna zasada obserwacji i budowa

Na terenie Europy znajdują się aktualnie 52 stacje LOFAR. W Niderlandach rozmieszczono 38 z nich, 6 w Niemczech, 3 w Polsce a po jednej ze stacji posiadają Francja, Irlandia, Łotwa, Szwecja i Wielka Brytania. Planowana jest budowa dwóch kolejnych stacji – we Włoszech oraz w Bułgarii. W systemie LOFAR występują trzy typy stacji: centralne (core), zdalne (remote) oraz międzynarodowe (international). Stacja LOFAR składa się z dwóch pól anten: LBA (z ang. *Low Band Antenna*) (rys. 2.1a) oraz HBA (z ang. *High Band Antenna*) (rys. 2.1b). Każdy z typów posiada inną konfigurację pola HBA. Niezależnie do typu stacji, układ pola LBA (każde pole zawiera 96 anten) i układ pola pozostaje niezmienny. Największą grupę stanowią stacje centralne (z ang. *core station*), które rozlokowane są na obszarze 3 na 2 kilometry, blisko wsi Exloo w Niderlandach. Sześć z nich, tzw. "Superterp", znajduje się na sztucznej wyspie o średnicy 400 metrów. W tym obszarze ulokowano też dodatkowe detektory, wspomagające obserwacje promieniowania kosmicznego. W przypadku stacji centralnych, pole HBA jest podzielone na dwie części, każde z nich liczy 24 anteny, łącznie 48 anten HBA. Stacje zdalne oddalone są od serca systemu LOFAR o kilkanaście do kilkudziesięciu kilometrów. Najdłuższa baza między stacjami wynosi około 120 kilometrów. Pole HBA, w przypadku zdalnych stacji, stanowi 48 anten ułożonych w jedno pole. Ostatni typ międzynarodowy (rysunek 2.2) charakteryzuje się największym polem HBA, na które składa się 96 anten, ułożonych w jednym polu.



(a) *AntenaLBA* (b) *AntenaHBA*

Rysunek 2.1: Widok na anteny LBA i HBA, będące częścią stacji LOFAR PL612, znajdującej się w Bałdach, zarządzanych przez Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie. Fot. P. Flisek



Rysunek 2.2: Schemat pola międzynarodowej stacji LOFAR PL612 w Bałdach. Zdjęcia satelitarne: Google Earth.

Poszczególne stacje systemu LOFAR są układami fazowymi, co oznacza, że składają

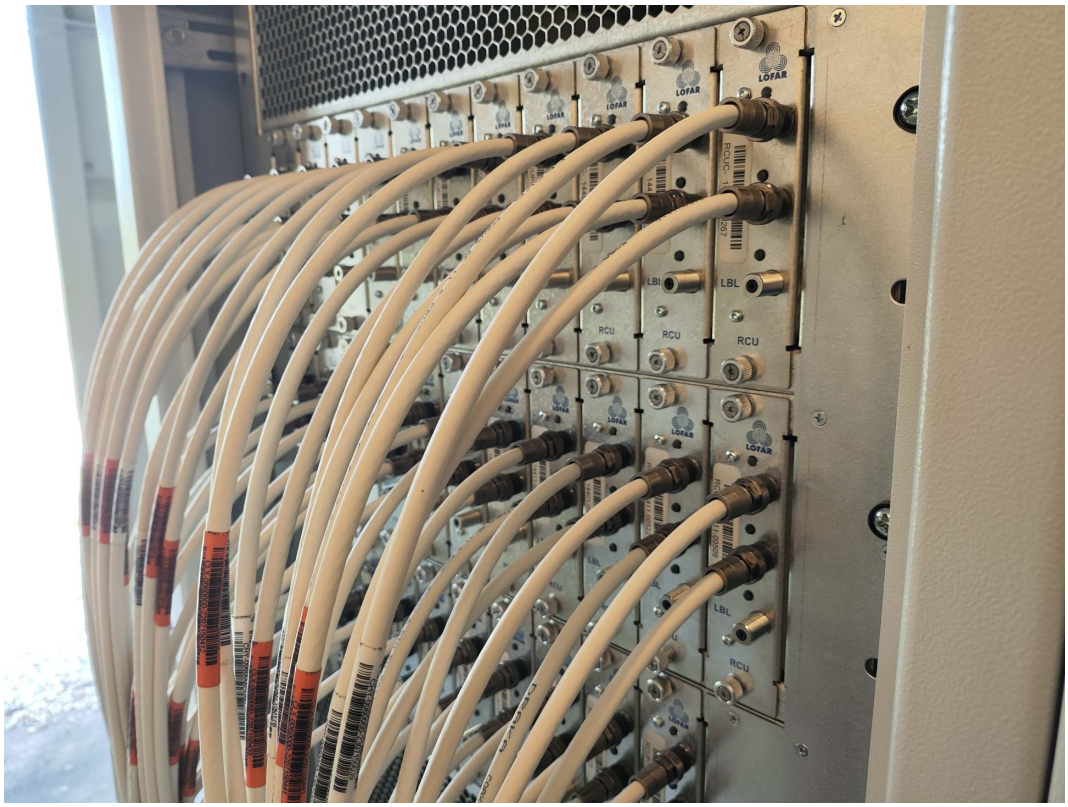
się z szeregu detektorów – anten dipolowych pracujących wspólnie w układzie fazowym (z ang. *phase array*) (Hansen, 2009). W odróżnieniu od innych typów instrumentów radioastronomicznych system fazowy nie posiada fizycznie kierowanej anteny celem wyboru współrzędnych na niebie. Proces ten opiera się na precyzyjnym dostrojeniu fazy sygnału rejestrowanego przez poszczególne anteny w układzie. Dzięki uniknięciu konieczności fizycznego celowania systemy fazowe są w stanie obserwować kilka źródeł jednocześnie.

Zarówno anteny LBA jak i HBA należą do anten dipolowych (Furse, Gandhi i Lazzi, 2008) – zbudowane są z par przewodników umieszczonych wzajemnie prostopadle. Fale elektromagnetyczne powodują zmianę rozkładu ładunku poprzez działanie siły Lorentza, a co za tym idzie, powodują zmianę różnic potencjałów, czyli napięć elektrycznych (v), co z kolei generuje powstawanie zmiennych prądów, których charakterystyka odwzorowuje charakterystykę fali. Długość przewodnika wynosi zazwyczaj połowę długości fali, gdyż w takiej konfiguracji antena jest najbardziej czuła na danej częstotliwości fali. Antena LOFAR ma jednak charakterystykę szerokopasmową, czyli posiada możliwość odbioru sygnału o różnych częstotliwościach. Najsilniejszy sygnał w antenie dipolowej otrzymamy z kierunku prostopadłego do osi anteny.

Anteny LBA, zdolne do obserwacji w przedziale 10-90 MHz, są zamontowane na plastikowym słupku i ustabilizowane za pomocą czterech odciągów. Pod anteną zamontowana jest metalowa, kwadratowa siatka o boku dwóch metrów, która zmniejsza wpływ wahań przewodności gleby i pełni rolę tzw. przeciwwagi. Antena LBA odbiera dwie polaryzacje – X i Y. Polaryzacja X pokrywa się z kierunkiem północny wschód – południowy zachód (NE-SW); polaryzacja Y – północny zachód – południowy wschód (NW-SE). Obserwacje z każdej polaryzacji przesyłane są do RCU (z ang. *Receiver Unit*) osobnym przewodem koncentrycznym. Całe pole LBA jest podzielone na dwie sekcje: LBL (z ang. *Low Band Low*) i LBH (z ang. *Low Band High*), dzięki temu podczas obserwacji można wybrać, z których anten odbierany będzie sygnał.

Anteny HBA pozwalają na rejestrację sygnałów w przedziale 110-240 MHz i pogrupowane są w moduły (z ang. *tile*). Pojedynczy moduł HBA składa się z 16 elementów, ułożonych w konfiguracji 4 na 4, a każdy z nich to dwie prostopadle skonfigurowane anteny dipolowe. W porównaniu do anten LBA impedancja anteny HBA jest bardziej stabilna w zadanym przedziale częstotliwości. Różni się również budowa anteny, w HBA użyto dipola muszkowego. Wszystkie elementy umieszczone są w styropianowej kon-

strukcji, przykrytej czarną plastikową folią. W odróżnieniu od anten LBA, HBA jest znacznie bardziej skomplikowane elektronicznie. Każda z 32 dipolowych anten każdego z modułów wyposażona jest w trzyetapowy wzmacniacz sygnału. Ponadto każdy z modułów posiada sumator sygnałów i kontroler opóźnień. Podobnie jak LBA, antena HBA dostarcza dwóch polaryzacji X i Y. Każda z nich jest zorientowana w przestrzeni w ten sam sposób jak jej odpowiednik w LBA.



Rysunek 2.3: Komponenty RCU, znajdujące się w kontenerze na stacji PL612. Fot. P. Flisek

Trzecim elementem stacji jest kontener z elektronicznymi systemami back end, które z racji generowania niechcianych sygnałów radiowych umieszczone są w zainstalowanej wewnątrz kontenera klatce Faradaya [1]. Do kontenera poprowadzone są pary przewodów

[1]Klatka Faradaya lub osłona Faradaya to obudowa używana do blokowania niektórych pól elektromagnetycznych. Osłona Faradaya może być utworzona przez ciągłe pokrycie przewodzącym materiałem lub w przypadku klatki Faradaya przez siatkę z takiego materiału. Klatki Faradaya zostały nazwane

z każdego elementu systemu LBA oraz sygnał zbiorczy z każdego szesnastoelementowego *tile'a* w części HBA (po 96 na każdy system LBA i HBA). Sygnał z anten trafia do RCU. W przypadku stacji międzynarodowych (np. PL612 w Bałdach) do RCU podłączona jest para przewodów – LBA i HBA, w przypadku stacji centralnych – trzy przewody: LBL, LBH i HBA. RCU kontroluje, które sygnały odbierać, a następnie konwertować z sygnału analogowego na cyfrowy. Do RCU podłączony jest także wzorzec częstotliwości – SCO (z ang. *Station Central Oscillator*), determinujący, z jaką częstotliwością sygnał cyfrowy jest przesyłany do RSP (z ang. *Remote Station Processor*). RCU może przyjmować jeden z ośmiu dostępnych trybów przedstawionych w tabeli 2.1. Tryb 0 jest spoczynkowym, w którym RCU jest w stanie oszczędzania energii.

Tryb RCU	**Źródło sygnału**	**Częstotliwość [Mhz]**	**Częstotliwość zegara [Mhz]**
0	–	–	–
1	LBL	10 – 90	200
2	LBL	30 – 90	200
3	LBH	10 – 90	200
4	LBH	30 – 90	200
5	HBA	110 – 190	200
6	HBA	170 – 230	160
7	HBA	210 – 270	200

Tabela 2.1: Tryby RCU z wyszczególnionymi sygnałami wejściowymi, obserwowaną częstotliwością oraz częstotliwością zegara.

Płyta RSP odbiera cyfrowy sygnał z RCU, który następnie filtruje i za pomocą zmodyfikowanej szybkiej transformaty Fouriera nadaje opóźnienia i przekształca sygnał na domenę częstotliwościową, co nosi nazwę tworzenia wiązki (z ang. *beamforming*). Ponadto RSP odpowiada za kanałowanie (z ang. *channeling*), czyli rozbicie sygnału na zadane częstotliwości. Na tym etapie zachodzi również obliczenie statystyk wiązki lub korelacji krzyżowej między antenami, w zależności od wybranego typu obserwacji. RSP podłączony jest do LCU (z ang. *Local Control Unit*), który zarządza operacjami na RSP.

na cześć Michaela Faradaya, który jako pierwszy skonstruował ją w 1836 r.

2.2 Typy obserwacji

W monitorowaniu jonosfery stacją LOFAR najpowszechniej wykorzystywany jest tryb BST (z ang. *Beamlet Statisticts*). Jak wspomniano powyżej, moduł RSP stacji umożliwia obliczanie statystyk wiązki. W przypadku trybu BST moduł RSP oblicza sumę sygnałów ze wszystkich kanałów, uwzględniając wagę w każdym z nich. BST umożliwia wykonanie obserwacji w 16, 8 i 4 bitach. W zależności od wybranej wartości zmienia się liczba promieni (beamlet – zdefiniowany jako zespolony sygnał dwóch polaryzacji) kolejno dla 4, 8 i 16 bitów: 244, 488 i 976 promieni. Wiedząc, że szerokość pojedynczego kanału wynosi 195,312 Hz, można łatwo obliczyć, że szerokość obserwowanego pasma dla 4, 8 i 16 bitów wynosi odpowiednio: 190,62 MHz, 95,31 MHz i 47,65 MHz. Najpowszechniej używany jest 8-bitowy tryb. Wynikiem obserwacji BST jest rzeczywista moc sygnału zintegrowana w czasie jednej sekundy.

Pochodną trybu BST jest mod "357"(McKay-Bukowski i in., 2015), który pozwala na obserwowanie szerszego pasma częstotliwości. W tym przypadku stacja rozdziela RCU na trzy tryby 3, 5 i 7 – zgodnie z Tabelą 2.1. Tabela 2.2 przedstawia, w jakim trybie znajduje się dane RCU podczas obserwacji. Zastosowanie tej techniki jest możliwe w przypadku, gdy obserwowane źródło jest bardzo silne, co ma miejsce w przypadku obserwacji scyntylacji Cassiopei A i Cygnusa A oraz Słońca. Taka kombinacja pozwala na obserwowanie bardzo szerokiego pasma częstotliwości (10–90 MHz, 110–190 MHz i 210–270 MHz).

Numer RCU	**Tryb RCU**
0–31	3
32–63	5
64–95	7
96–127	3
128–159	5
160–191	7

Tabela 2.2: Wykaz trybów RCU w trybie obserwacji "357".

2.3 Astrofizyczne źródła fal radiowych

W prezentowanych w niniejszej pracy wynikach najczęściej obserwowanymi przez LOFAR źródłami fal radiowych są Cassiopeia A i Cygnus A. W przedziale częstotliwości, jaki jest obserwowany w radioteleskopie, oba źródła świecą z jasnością ponad $10^4 Jy$ – gdzie Jy (jansky) to jednostka promieniowania równa $10^{-26}\frac{W}{Hz \cdot m^2}$.

Cassiopeia A, znajdująca się w gwiazdozbiorze Kajsopei, jest jednym z najdokładniej zbadanych radioźródeł; jest też jednym najmłodszych obiektów obserwowanych na niebie w zakresie fal radiowych. Po raz pierwszy została zaobserwowana w 1948 roku (Ryle i Smith, 1948). Jej współrzędne są wyrażone w astronomicznym układzie współrzędnych równikowych[2] i przyjmują wartości: RA: $23^h23^m24^s,0$ oraz DEC: $+58°48'54'',0$. Cassiopeia A znajduje się około 11 tysięcy lat świetlnych od Ziemi, a promień rozchodzącej się chmury ma 10 lat świetlnych (ly – z ang. *light year*). Jest pozostałością po wybuchu supernowej, który został zaobserwowany nieco ponad 300 lat temu (Krause i in., 2008). Na jej wiek wskazuje prędkość ekspansji po zapadnięciu się jej macierzystej gwiazdy. Niedawne odkrycie wskazuje, że supernowa należała do typu IIb, czyli powstała wskutek zapadnięcia się i wybuchu masywnej gwiazdy (prawdopodobnie czerwonego olbrzyma).

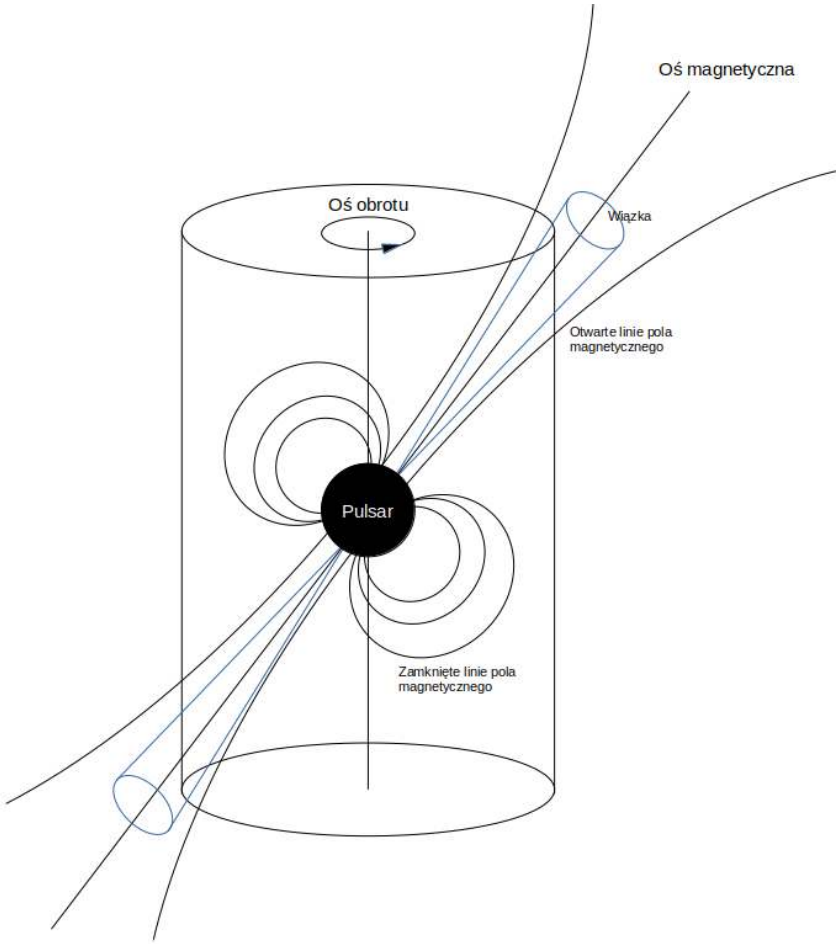
Nazwa	**Rektascencja** $[h:m:s]$	**Deklinacja** $[\circ:':'']$	**Okres** $[s]$	**Miara dyspersji** $[cm^{-3}]$
J0332+5434	03:32:59.4096	+54:34:43.329	0.714	26.764
J1509+5531	15:09:25.6298	+55:31:32.394	0.740	19.619
J1921+2153	19:21:44.815	+21:53:02.25	1.337	12.400
J0814+7429	08:14:59.50	+74:29:05.70	1.292	5.751

Tabela 2.3: Lista pulsarów obserwowanych radioteleskopem LOFAR w ramach pracy.

Radiogalaktyka Cygnus A, podobnie jak Cassiopeia A, jest jednym z najsilniejszych radioźródeł na naszym niebie. Cygnus A znajduje się w gwiazdozbiorze Łabędzia. Odkryta w 1939 przez Grote Rebera. We współrzędnych astronomicznych jego pozycja przyjmuje wartości, RA: $19^h59^m28^s,3RA$ oraz DEC: $+40°44'02'',0$. W centrum tej aktywnej radiowo galaktyki znajduje się aktywne jądro (z ang. AGN – *Active Galatic*

[2]Współrzędne te to Rektascencja, oznaczana jako RE albo α, oraz Deklinacja, odpowiednio DEC lub δ

Nucleus), które w tym przypadku jest supermasywną czarną dziurą o masie $2,5*10^9 M_\odot$ (Graham, 2008). Charakterystyczną właściwością galaktyki są dwa dżety rozchodzące się w przeciwnych kierunkach.



Rysunek 2.4: Model obracającego się pulsara i jego magnetosfery.

Jednymi z najbardziej egzotycznych typów obiektów astronomicznych, jakie obserwowane są przez radioteleskop LOFAR, są pulsary. Zostały odkryte w 1967 roku przez Jocelyn Bell Burnell i Anthonego Hewisha (Hewish i in., 1968). Pulsary są gwiazdami neuronowymi, które powstają w wyniku zapadnięcia się masywnej gwiazdy w końcowych etapach ewolucji, zazwyczaj podczas wybuchu supernowej. Pulsar jest szybko rotującą gwiazdą, która emituje promieniowanie elektromagnetyczne ze swoich biegunów magnetycznych, co nazywane jest efektem latarni morskiej. W obszarach jego biegu-

nów magnetycznych, gdzie znajdują się otwarte linie pola magnetycznego, emitowane jest promieniowanie elektromagnetyczne, zwane wiązką pulsara. Obiekt jest możliwy do zaobserwowania wyłącznie wtedy, gdzie wiązka skierowana jest na obserwatora. Prosty model pulsara przedstawiony został na rysunku 2.4. Typowo masa pulsara mieści się w przedziale do dwóch mas Słońca, a prędkość jego rotacji wynosi od 0,001 do 10 sekund (Lorimer i Kramer, 2004). Lista obserwowanych pulsarów teleskopem LOFAR w ramach pracy przedstawiona jest w tabeli 2.3. Ważną charakterystyką w obserwacji pulsarów jest miara dyspersji DM (z ang. *dispersion measure*). Wynika ona z przechodzenia promieniowania elektromagnetycznego pulsara przez zjonizowany ośrodek międzygwiazdowy. Powoduje to dryf pulsu proporcjonalny do częstotliwości (Hewish i in., 1968). Miara dyspersji jest liczona w cm^{-3}, i wyrażona jest jako gęstość wolnych elektronów w kolumnie, wzdłuż linii widzenia.

2.4 Wpływ jonosfery na obserwacje radioteleskopem LOFAR

Pasmo VHF obserwowane radioteleskopem LOFAR jest bardzo podane na oddziaływanie z jonosferą. Stąd poznanie mechanizmów zachodzących w jonosferze jest niezwykle istotne z punktu widzenia badań astrofizycznych. Pomimo usytuowania stacji na średnich szerokościach geograficznych konieczne jest zastosowanie technik kalibracyjnych obserwacji, które nie tylko znacząco zniwelują wpływ jonosfery na obserwacje, ale także innych czynników, takich jak: błąd zegara, błędy związane z polaryzacją i kształt wiązki (Intema i in., 2009; de Gasperin, F. i in., 2019).

Wpływ jonosfery na obserwacje radioteleskopu przejawia się na różnych poziomach. Ze względu na zjawiska zachodzące podczas przechodzenia sygnału przez jonosferę i skalę ich wpływu na obserwacje, wyróżnić możemy efekty trzech rzędów. Każdy z rzędów odznacza się inną wielkość błędu i genezę powstania. W obserwacjach astronomicznych LOFAR najbardziej znaczące są pierwszy i drugi rząd efektu jonosferycznego, jednak nie mniej istotny przy obserwacjach LBA jest trzeci rząd.

Pierwszy rząd efektu jonosferycznego związany jest z całkowitą zawartością elektronów wzdłuż kierunku obserwacji, który zwyczajowo określa się jako TEC (z ang. *Total Electron Content*). W obserwacjach LOFAR nie jest możliwe wyznaczenie absolutnej liczby elektronów na drodze wiązki, ale możliwe jest wyznaczenie względnej różnicy

TEC między stacjami (δTEC) (Mevius i in., 2016; Beser i in., 2022). Względna liczba elektronów jest otrzymywana na podstawie obserwacji źródeł kalibracyjnych takich jak np. 3C295, dokładnie na podstawie rozwiązań (z ang. *solutions*, będących reprezentacją wszystkich błędów systematycznych. Wyznaczenie wartości δTEC możliwe jest z równania:

$$\delta\phi_{ij}(v) = 2\pi \cdot \delta\tau_{ij} - \frac{C_1 \cdot \delta TEC_{ij}}{v} \tag{2.1}$$

gdzie C_1 jest równy $8.45e^9 m^2 s^{-1}$, v jest częstotliwością sygnału wyrażoną w hercach, $\delta TEC_{ij} v$ różnicą wartości TEC między stacjami i i j, $\delta\tau_{ij}$ relatywnym błędem zegarów stacji i i j.

Ze wzoru 2.1 wynika, że rozwiązania z obserwacji kalibratora zawierają błędy zegara stacji, który wynika z faktu, że jedynie stacje centralnego współdzielą zegar, natomiast wszystkie inne posiadają własne zegary. Wiedząc, że równanie 2.1 jest zależne od częstotliwości i posiadając obserwacje dla spektrum częstotliwości, możliwe jest estymowanie wartości δTEC. Pierwszy rząd efektu jonosferycznego wpływa jednakowo na obie polaryzacje.

Za efekt jonosferyczny drugiego rzędu odpowiada zjawisko Faradaya[3]. Rotacja Faradaya powoduje zmianę kąta polaryzacji podczas przechodzenia fali przez ośrodek, w którym istnieje pole magnetyczne. Rotację Faradaya wyznacza się na podstawie polaryzacji kołowych otrzymanych z polaryzacji liniowych oraz otrzymanych wcześniej poprawek zegara (de Gasperin, F. i in., 2018; Porayko i in., 2018).

Trzeci rząd efektów jonosferyczny jest istotny podczas obserwacji dolnym pasmem częstotliwości LOFAR. Wykluczenie wpływu rzędu trzeciego jest istotnym czynnikiem podczas obserwacji LBA, szczególnie dla obserwacji poniżej 40 MHz. Podobnie jak rząd pierwszy, rząd trzeci zależy od liczby elektronów wzdłuż kierunku obserwacji. Trzeci rząd efektów jonosferycznego obserwowany jest jako scyntylacje sygnału, spowodowane przez propagację fali radiowej przez niejednorodną strukturę powodującą drobne zmiany współczynnika refrakcji. Przejście fali przez taki ośrodek powoduje zmianę amplitudy fali. Poza jonosferą scyntylacje sygnału może powodować również ośrodek międzyplanetarny (R.A. Fallows i in., 2016). Wpływ scyntylacji międzyplanetarnych jest znacznie mniejszy niż scyntylacji pochodzenia jonosferycznego.

[3]Rotacja Faradaya, jedno z fundamentalnych zjawisk elektromagnetycznych, została odkryta i opisana przez Michaela Faradaya w roku 1845.

Badania mechanizmów zachodzących w jonosferze są kluczowym elementem w doskonaleniu obserwacji radioteleskopem LOFAR. Nieodkrytym obszarem w tej dziedzinie są efekty jonosferycznego trzeciego rzędu, które odpowiadają za badane w niniejszej pracy scyntylacje sygnału. Badanie niejednorodności, które je powodują, umożliwiają obserwacje w trybie *beamformed*, które w jednoznaczny sposób mówią nam o amplitudzie odbieranego sygnału. Właśnie tego typu obserwacje stanowią fundament niniejszej pracy.

Rozdział 3

Jonosfera

Jonosfera jest częścią ziemskiej atmosfery, pokrywającą się głównie z troposferą i mezosferą. Umieszczając ją na wykresie wysokościowym, jonosfera rozpościera się od 50 do 1000 kilometrów od powierzchni Ziemi. Cechą charakterystyczną dla tego obszaru jest zdolność odbijania fal radiowych wskutek znacznych gradientów w gęstości zawierającej się w niej plazmy. Największa koncentracja wolnych elektronów występuje na wysokości około 300 kilometrów; poniżej tej granicy jonosfera posiada kilka lokalnych punktów przegięć i maksimów lokalnych. Jonosfera jest ośrodkiem dynamicznym w domenie czasowej i przestrzennej.

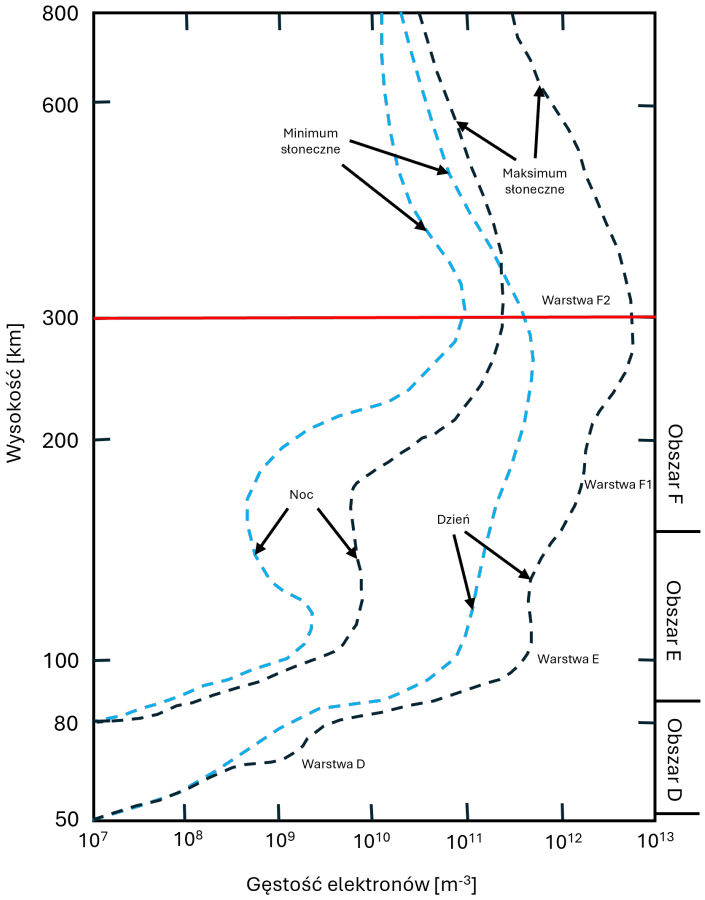
Jedną z przyczyn formowania się jonosfery jest słoneczne promieniowanie ultrafioletowe – UV (z ang. *Ultra Violet*) i EUV (z ang. *Extreme Ultra Violet*) [1]. Promieniowanie wybija elektrony z cząstek neutralnych, produkując jony i wolne elektrony. Zjawisko to nosi nazwę fotojonizacji. Obok fotojonizacji w jonosferze dochodzi do zderzania się jonów z cząsteczkami naturalnymi, co prowadzi do wymiany ładunków.

Oprócz zderzeń z wymianą ładunku istotną rolę w dynamice czasowej jonosfery odgrywa rekombinacja jonów i swobodnych elektronów. Odpowiada ona choćby za zmienność dobową jonosfery – w nocy, gdy ustaje fotojonizacja związana z ekspozycją na promieniowanie słoneczne, gęstość jonosfery spada wstutek wzrastającego udziału zjawisk rekombinacji w dynamice jonosfery.

[1] Zakresy długości fali dla EUV to 10-120 nm, zaś dla UV od 120 do 400 nm

3.1 Budowa jonosfery

Jonosferę można podzielić na warstwy, w których wyróżnia się lokalne maksima i punkty przegięć (rys. 3.1). Region F znajduje się na wysokościach od 160 do 600 kilometrów. W ciągu dnia w warstwie F można wyróżnić dwie warstwy: F_1 i F_2. Warstwa F_1 zanika w nocy, w przeciwieństwie do F_2, która obserwowana jest przez cały dzień. W warstwie F_2 znajduje się punkt największej koncentracji wolnych elektronów – spowodowane jest to stanem równowagi fotochemicznej, czyli równoważenia się procesów jonizacji i rekombinacji. W nocy, gdy zanika proces produkcji jonów, koncentracja elektronów maleje w dolnej części warstwy. Mimo tego kształt profilu warstwy pozostaje zbliżony, ze względu na dopływ plazmy z obszarów powyżej punktu maksimum.



Rysunek 3.1: Wysokościowy profil jonosfery z uwzględnieniem obszarów i warstw, na podstawie (Emery i Camps, 2017)

Na wysokości 180 kilometrów jony powstałe wskutek wymiany ładunków i promieniowania EUV ulegają znacznej rekombinacji, co następuje jeśli wysokość, na której dochodzi do maksimum szybkości jonizacji, jest mniejsza niż wysokość, na której dochodzi do wymiany ładunków i rekombinacji. Na profilu wysokościowym jonosfery tworzy się wówczas lokalne maksimum w postaci warstwy F_1. Warstwa F_1 najczęściej pojawia się w ciągu dnia, w porze letniej oraz częściej występuje w okresie minimum słonecznego.

Obszar E znajduje się na wysokości 90 do 150 km nad powierzchnią Ziemi. Dochodzi tutaj głównie do jonizacji cząsteczek tlenu O_2 spowodowanej promieniowaniem, które nie zostało zaabsorbowane przez wyższe partie jonosfery. Ponadto w warstwie E można zaobserwować sporadyczną warstwę E_s, powstającą przede wszystkim na średnich szerokościach geograficznych. E_s jest wynikiem uskoków wiatru, które powodują zamknięcie elektronów.

Najniżej położoną regionem jest region D, znajdujący się w przedziale 60–90 kilometrów, co w profilu wysokościowym ziemskiej atmosfery kwalifikuje się jako mezosfera. Głównym czynnikiem jonizacyjnym w tej warstwie jest promieniowanie słoneczne o długościach fal większych niż w warstwie E i F. W warstwie D dochodzi głównie do jonizacji tlenku azotu NO pochodzącego z termosfery. Stąd koncentracja elektronów w warstwie D jest silnie uzależniona od odległości zenitalnej od Słońca i jest obserwowalna jedynie w ciągu dnia.

Poza podziałem jonosfery na regiony w profilu wysokościowym należy wspomnieć o podziale przestrzennym w perspektywie horyzontalnej. Podział ten jest zależny od szerokości geograficznej i wyróżniamy w nim trzy strefy: okołobiegunową, umiarkowaną i równikową.

W strefie równikowej, po obu stronach równika magnetycznego zaobserwować można dwa pasy, noszą one nazwę anomalii równikowej. Powstaje ona wskutek zorientowania wektora $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ku górze, co skutkuje wypychaniem plazmy ku górze, która następnie opada na $10^\circ - 15^\circ$ szerokości geograficznej. Zjawisko to nosi nazwę efektu fontannowego.

Jonosfera na dużych szerokościach geograficznych jest mocno zróżnicowana, co wynika z opadających z magnetosfery naładowanych cząstek o znacznych energiach. Jonosferę w tym obszarze możemy podzielić na trzy regiony: strefę zorzową, obszar lejka polarnego i czapę polarną (Wernik, 1996). Do każdego z tych obszarów wpływają elektrony o różnych energiach – od kilku do kilkudziesięciu eV ($1eV = 1,602176634 \cdot 10^{-19} J$). Charakterystyczne dla tego obszaru są dwa wiry znajdujące się po stronie porannej

i wieczornej, obiegające biegun magnetyczny. Wynikają one z horyzontalnego ruchu plazmy, a ich rozmiar zależy przede wszystkim od wiatru słonecznego[2]. Powszechnie na wyższych szerokościach występują niejednorodności w rozmiarach od kilkuset kilometrów do kilku centymetrów.

3.2 Nieregularności w jonosferze na średnich szerokościach geograficznych

Jonosfera na średnich szerokościach geograficznych, należących do obszaru umiarkowanego, nie przejawia takiej dynamiki jak strefa podbiegunowa. W obszarze na średnich szerokościach stan jonosfery kształtują przede wszystkim przemieszczające się zaburzenia jonosferyczne (ang. *TID – Travelling Ionosphere Disturbances*). TID są powiązane bezpośrednio z akustycznymi falami grawitacyjnymi (ang. AGWs – *Acoustic Gravity Waves*) – obserwowana jest znaczna zbieżność w ich charakterystykach czasowo-przestrzennych. Przemieszczające się zaburzenia powstają w przypadku, gdy mechaniczne fale gęstości powstałe w neutralnej części atmosfery propagują do wysokości jonosferycznych i reagują z plazmą, wskutek czego powstają quasi-okresowe perturbacje plazmy.

Typ	**Okresowość [minut]**	**Prędkość propagacji [m/s]**
Wielkoskalowe TID	> 60	> 300 m/s
Średnioskalowe TID	10 – 60	50 – 300 m/s
Małoskalowe TID	< 10	< 50 m/s

Tabela 3.1: Rodzaje TID.

Podróżujące zaburzenia jonosferyczne możemy podzielić ze względu na ich skalę na: wielkoskalowe (ang. LSTID – *Large-Scale Travelling Ionosphare Disturbance*), średnioskalowe (ang. MSTID – *Medium-Scale Travelling Ionpshere Disturbance*) i małoskalowe (ang. SSTID – *Small-Scale Travelling Ionpshere Distrubance*). Głównymi cechami roz-

[2]Wiatr słoneczny to strumień naładowanych cząstek, głównie protonów i elektronów, wyrzucanych z zewnętrznej warstwy Słońca, zwanej koroną, w przestrzeń międzyplanetarną. Typowe prędkości cząstek wiatru to od około 300 do nawet 800 km/s

różniającymi typ TID jest okresowość i prędkość propagacji. W tabeli 3.1 przedstawiono typowe parametry z podziałem na rodzaj TID (Cander, 2019).

Wielkoskalowe TID najczęściej obserwowane są podczas burz magnetycznych spowodowanych aktywnością słoneczną. Siła burzy zależna jest od klasy rozbłysku oraz czy koronalny wyrzut materii (ang. CME – *Coronal Mass Ejection*) skierowany jest ku Ziemi. Jednym z przykładów burzy magnetycznej jest burza 17 marca 2015, zwana Burzą Świętego Patryka. Zjawiska geomagnetyczne o podobnej – a nawet większej – sile zostały zaobserwowane również w maju i październiku 2024. Liczne badania nie potwierdziły żadnej korelacji między wielkoskalowymi TID a porą dnia, sezonu czy cyklem słonecznym. Niewątpliwie istnieje silna zależność występowania wielkoskalowych TID z aktywnością geomagnetyczną.

Genezę średnioskalowych TID na średnich szerokościach geograficznych można rozpatrywać w kontekście pory dnia. W ciągu dnia nieregularności tej klasy najczęściej są spowodowane przez akustyczne fale grawitacyjne, zatem ich powstawanie zależy od lokalnych warunków troposferycznych. Nocne TID są powiązane z niestabilnością Perkinsa i powiązanym z tym zjawiskiem występowanie warstwy *spread-F* (rozproszone F) na średnich szerokościach (Perkins, 1973). Niestabliność Perkinsa opisuje nieregularności powstające na średnich szerokościach Perkins, 1973; Nanan i in., 2018 przy współwystępowaniu pól elektrycznych w kierunkach północ-południe i wschód-zachód. Skutkuje to powstawaniem chmur plazmy o różnej gęstości. W profilu pionowym jonosfery objawia się jako *spread F*, czyli rozproszenie obszaru maksymalnej gęstości elektronów. Statystyka występowania średnioskalowych TID pokazuje, że nocne warianty zjawiska częściej mają miejsce latem, natomiast dzienne zimą. Średnioskalowe TID są również łączone z przemieszczaniem się terminatora (Afraimovich, 2008).

3.3 Tradycyjne techniki monitorowania jonosfery

Jednym z najbardziej powszechnych i dostępnych instrumentów do monitorowania jonosfery jest system GNSS (ang. *Global Navigation Satellite Systems*, chociaż głównym jego zastosowaniem jest pozycjonowanie. GNSS składa się z czterech systemów: amerykańskiego GPS (ang. *Global Positioning System*, rosyjskiego GLONASS (z ros. *GŁObalnaja NAwigacjonnaja Sputnikowaja Sistiema*), europejskiego Galileo i chińskiego Beidou. Tabela 3.2 przestawia główne parametry każdego z wymienionych systemów.

System	Liczba satelitów	Częstotliwości [MHz]	Kąt inklinacji [◦]	Wysokość orbity [km]
GPS	32	1575.42; 1227.60; 1176.45	55	20 200
GLONASS	24	1598.0625–1605.375; 1242.9375–1248.625[a]	64.8	19 100
Galileo	30	1575.42; 1191.795; 1278.750	56	23 222
Beidou	45	1561.098; 1207.14; 1268.52	55	21 528; 35 787[b]

Tabela 3.2: Podstawowe parametry systemów GPS, GLONASS, Galileo i Beidou.

[a] częstotliwość dla poszczególnych satelitów różni się o 562.5 kHz

[b] niższa orbita dotyczy satelitów na średniej orbicie, wyższa dotyczy satelitów geosynchronicznych i geostacjonarnych

Niezależnie od systemu sposób wykonywania pomiaru jest tożsamy. Odbiornik rejestruje odległość do satelity na podstawie pomiaru różnicy czasu między zarejestrowanym sygnałem satelity a jego własnym. Znając różnicę czasu oraz prędkość rozchodzenia się sygnału (prędkość światła) wyznaczana jest odległość. Na podstawie obserwacji do przynajmniej czterech satelitów można wyznaczyć pozycję odbiornika. Satelity emitują sygnał na dwóch częstotliwościach (zwanych L1 i L2), których wartości nieznacznie się różnią w zależności od systemu. Na podstawie przesunięcia kodu nałożonego na falę nośną wyznaczana jest pseudoodległość. W obserwacjach fazowych wyznaczane jest przesunięcie fazy fali nośnej. Równanie 3.1 opisuje obserwacje kodowe, natomiast równanie 3.2 opisuje obserwacje fazowe (Teunissen, Montenbruck i in., 2017).

$$p = \rho_r^s + c(dt_{r,j} - dt_j^s) + T_r^s + I_{r,j}^s + c(\delta_r - \delta^s) + \epsilon_{r,j}^s \tag{3.1}$$

$$\phi = \rho_r^s + c(dt_{r,j} - dt^s + T_{r,j}^s) - I_{r,j}^s + c(\delta_r - \delta^s) + \lambda_j N_j + \epsilon_{r,j}^s \tag{3.2}$$

p i ϕ są kolejno obserwacjami kodowymi i fazowymi dla odbiornika r, satelity s i częstotliwości j, ρ – odległością geometryczną pomiędzy satelitą s i odbiornikiem r, c jest prędkością światła, dt_r i dt^s są poprawkami chodu zegara odbiornika i satelity, T_r^s i I_r^s są poprawkami troposferycznymi i jonosferycznymi, δ^r oraz δ^s są błędami systemowymi kolejno odbiornika i satelity, ϵ_r^s symbolizuje pozostałe błędy. Komponenty oznaczone indeksem dolnym j są zależne od częstotliwości. W odróżnieniu od obserwacji kodowych, w obserwacjach fazowych znajdziemy jeszcze parametr nieoznaczoności – λN, wynikający z nieznanej liczby pełnych cykli fali nośnej.

Jednym z najbardziej istotnych parametrów jest poprawka jonosferyczna, która ma kluczowe znaczenie dla uzyskania najbardziej precyzyjnej pozycji, a ponadto dostarcza informacji o stanie jonosfery. Na jej podstawie można wyliczyć TEC. W tym celu wykorzystywane są obserwacje dwuczęstotliwościowe, gdyż ta sama gęstość elektronów powoduje różne opróżnienie dla różnych częstotliwości, co pozwala na obliczenie opóźnienia sygnału – poprawka jonosferyczna, w przeciwieństwie do innych komponentów równań 3.1 i 3.2 zależna jest od częstotliwości sygnału.

TEC wyliczany jest przy pomocy kombinacji *geometry-free*, a wzór 3.4 przedstawia TEC obliczany z obserwacji kodowych, natomiast wzór 3.5 z obserwacji fazowych.

$$S_I \cdot (P_2 - P_1) = TEC + C_p + \epsilon_p \tag{3.3}$$

$$S_I \cdot (\phi_1 - \phi_2) = TEC + C_\phi + \epsilon_\phi \tag{3.4}$$

gdzie P_1 i P_2 są obserwacjami kodowymi obserwacjami pseudoodległości, ϕ_1 i ϕ_2 fazowymi obserwacjami wyrażonymi w metrach, C_p i C_ϕ to kolejno szumy (odchyłki) dla obserwacji kodowych i fazowych.Komponenty owych szumów obejmują między innymi opóźnienie zegarów satelity i odbiornika oraz dla obserwacji fazowych błędy związane z niejednoznacznością fazy. Obie wartości są obliczane z obserwacji (Lanyi i Roth, 1988). ϵ_p i ϵ_ϕ to pozostałe błędy. S_I jest przelicznikiem kombinacji *geometry-free* z metrów na liczbę elektronów na metr sześcienny i wyrażany jest wzorem 3.5.

$$S_I = \frac{1}{40.3} \cdot \frac{f_1^2 \cdot f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \tag{3.5}$$

Otrzymana wartość TEC jest liczbą elektronów wzdłuż linii odbiornik – satelita, co oznacza, że jest wartością skośną STEC (z ang. *Slant TEC*). Aby otrzymać wartość pionową $VTEC$ (z ang. *Vertical TEC*) korzysta się ze wzoru:

$$VTEC = \frac{1}{\cos(z_I)} \cdot STEC \tag{3.6}$$

gdzie z_I obliczone jest na podstawie:

$$z_I = \arcsin(\frac{r_e}{r_e + h_I} \cdot \cos(e)) \tag{3.7}$$

W którym r_e to promień ziemi, h_I przyjęta wysokość jonosfery, a e to elewacja satelity.

Powszechnie w jonosferycznych obserwacjach GNSS wykorzystywany jest ROT (z ang. *Rate of TEC*), czyli pochodna ukośnej wartości TEC dla kolejnych epok. ROT jest obliczany ze wzoru:

$$ROT(t_2) = S_I \cdot (\phi_1(t_2) - \phi_2(t_2) - \phi_1(t_1) + \phi_2(t_1)) \tag{3.8}$$

Interwał czasowy t_1 a t_2 w zastosowaniach praktycznych na ogół przyjmowany jest jako 1 minuta – wówczas ROT opisuje zmianę TEC na minutę wzdłuż przebiegu satelity po niebie. Szereg czasowy ROT doskonale oddaje warunki jonosferyczne i sprawdza się wykrywaniu gradientów jonosferycznych.

Jedną z najważniejszych cech systemów GNSS jest ich dostępność czasowa i przestrzenna, utrzymywana przez organizacje międzynarodowe, których głównym przedstawicielem jest IGS (z ang. *International GNSS Service*). IGS zajmuje się przede wszystkim utrzymywaniem najlepszej wydajności systemów nawigacyjnych poprzez przechowywanie, udostępnianie obserwacji z około 500 stacji permanentnych rozlokowanych na całym globie, dostarczanie produktów i usług niezbędnych do nawigacji, badań Ziemi, służby czasu i wielu innych dyscyplin naukowych i społecznych. Autor niniejszej pracy jest członkiem IGS w ramach grupy *IGS Ionoshpere Working Group* zajmującej się badaniami jonosfery.

IGS przechowuje oraz udostępnia obserwacje ze stacji w formacie tekstowym RINEX (z ang. *Receiver Independent Exchange System*) (rysunek 3.2), który zaprojektowany został w celu unifikacji obserwacji z różnych typów odbiorników. Na początku pliku w formacie RINEX znajdziemy metadane o obserwacjach. Na rysunku 3.2 zaprezentowany jest RINEX w wersji 3, w użytku również jest wersja 2, która nieznacznie różni się od nowszej wersji. Nowa wersja plików RINEX usunęła konieczność stosowania stałej szerokości linii w pliku, dostosowała plik do obserwacji pochodzących z wielu systemów

oraz pozwoliła na przechowywanie obserwacji o różnych kodach. W nagłówku (rys. 3.2a można znaleźć przede wszystkim informacje o wersji pliku RINEX, nazwę stacji, typ odbiornika, przybliżoną pozycję, kody częstotliwości zapisanych sygnałów, długość epoki oraz czas początku i końca obserwacji. Obserwacje w pliku RINEX (rysunek 3.2b) są posortowane epokami, w których znajdziemy obserwacje zaobserwowane dla widocznych satelitów. Na początku linii znajdziemy oznaczenie satelity, a następnie obserwacje ułożone zgodnie z kolejnością zawartą w nagłówku.

IGS nie tylko gromadzi historyczne dane, ale również udostępnia strumienie czasu rzeczywistego, a także dane o różnej rozdzielczości czasowej: jednosekundowe oraz 30-sekundowe. IGS poprzez zrzeszone organizacje i centra obliczeniowe umożliwia dostęp do pochodnych obserwacji – produktów. Jednymi z najbardziej istotnych dla precyzyjnej nawigacji są produkty jonosferyczne.

```
     3.05           OBSERVATION DATA    M (MIXED)           RINEX VERSION / TYPE
Spider V7.7.2.9082                      20240604 010012 UTC PGM / RUN BY / DATE
gfzrnx-1.16-8177    FILE PROCESSING     20241029 203256 UTC COMMENT
LAMA00POL                                                   MARKER NAME
12209M001                                                   MARKER NUMBER
                                                            OBSERVER / AGENCY
1870222             LEICA GR50          4.50/7.710          REC # / TYPE / VERS
25299035            LEIAR20         LEIM                    ANT # / TYPE
        0.0600          0.0000       0.0000                 ANTENNA: DELTA H/E/N
  3524523.2670  1329693.4580  5129846.1890                  APPROX POSITION XYZ
C    5 C2I C7I L2I L7I S7I                                  SYS / # / OBS TYPES
E    4 C1C C5Q L1C L5Q                                      SYS / # / OBS TYPES
G    4 C1C C2W L1C L2W                                      SYS / # / OBS TYPES
R    6 C1C C2C C2P L1C L2C L2P                              SYS / # / OBS TYPES
START OF RINEX header check by ROB      20240606 042140 UTC COMMENT
 with respect to                                            COMMENT
 https://gnss-metadata.eu/v1/sitelog/exportlog?id=LAMA00POL COMMENT
RINEX file downloaded from BKG                              COMMENT
RINEX header corrections                                    COMMENT
 MARKER NAME   LAMA                 -> LAMA00POL            COMMENT
END OF RINEX header check by ROB                            COMMENT
INITIAL_RINEX_VERSION: 3.04                                 COMMENT
C L2I                                                       SYS / PHASE SHIFT
C L7I                                                       SYS / PHASE SHIFT
E L1C  0.50000                                              SYS / PHASE SHIFT
E L5Q -0.25000                                              SYS / PHASE SHIFT
G L1C                                                       SYS / PHASE SHIFT
G L2W                                                       SYS / PHASE SHIFT
R L1C                                                       SYS / PHASE SHIFT
R L2C                                                       SYS / PHASE SHIFT
R L2P  0.25000                                              SYS / PHASE SHIFT
 24 R01  1 R02 -4 R03  5 R04  6 R05  1 R06 -4 R07  5 R08  6 GLONASS SLOT / FRQ #
    R09 -2 R10 -7 R11  0 R12 -1 R13 -2 R14 -7 R15  0 R16 -1 GLONASS SLOT / FRQ #
    R17  4 R18 -3 R19  3 R20  2 R21  4 R22 -3 R23  3 R24  2 GLONASS SLOT / FRQ #
SNR is mapped to RINEX snr flag value [1-9]                 COMMENT
LX:     < 12dBHz -> 1; 12-17dBHz -> 2; 18-23dBHz -> 3       COMMENT
       24-29dBHz -> 4; 30-35dBHz -> 5; 36-41dBHz -> 6       COMMENT
       42-47dBHz -> 7; 48-53dBHz -> 8; >= 54dBHz -> 9       COMMENT
Product                                                     COMMENT
Merged by BKG Frankfurt                                     COMMENT
 C1C  -71.940 C1P  -71.940 C2C  -71.940 C2P  -71.940        GLONASS COD/PHS/BIS
DBHZ                                                        SIGNAL STRENGTH UNIT
    18    18  1929     7                                    LEAP SECONDS
     0                                                      RCV CLOCK OFFS APPL
GFZRNX.NUM_EPOCHS: 122                                      COMMENT
    45                                                      # OF SATELLITES
   C06   122   122   121   122   122                       PRN / # OF OBS
   C09   122   122   122   122   122                       PRN / # OF OBS
   C11   122   122   122   122   122                       PRN / # OF OBS
   C12    80    84    77    83    84                       PRN / # OF OBS
   C16   105   122   100   122   122                       PRN / # OF OBS
   C21   122         122                                   PRN / # OF OBS
   C22   122         122                                   PRN / # OF OBS
   C26     8           8                                   PRN / # OF OBS
   C34   122         122                                   PRN / # OF OBS
   C36   122         122                                   PRN / # OF OBS
   C39    28           6                                   PRN / # OF OBS
   C42   122         122                                   PRN / # OF OBS
   C43   122         122                                   PRN / # OF OBS
   C44     6           4                                   PRN / # OF OBS
   C45   122         122                                   PRN / # OF OBS
```

(a) $NagwekRINEX$

```
> 2024 06 04 18 29 00.0000000  0 39
C06  38710219.860    38710219.140   201574290.34606 155870032.43407        45.600
C09  38000161.620    38000162.020   197876852.80807 153010954.76708        49.750
C11  24306689.760    24306691.600   126571334.41207  97873009.53208        49.650
C12  25448096.440    25448100.600   132514893.14506 102468925.87507        45.800
C16  39533652.420    39533656.880   205862126.03806 159185682.22307        43.650
C21  22568079.920                   117518011.58209
C22  22046615.860                   114802649.46309
C34  24710905.920                   128676180.33307
C36  23143141.660                   120512456.71708
C39  39813626.280                   207320007.94205
C42  26320651.560                   137058549.25105
C43  25189067.860                   131166100.49807
C44  26592758.940                   138475452.08205
C45  24636918.600                   128290938.70707
C46  25039620.260                   130387909.12507
E03  25397384.540    25397390.480   133464271.19848  99664974.67908
E07  25628507.620    25628514.340   134678776.94448 100571909.45408
E08  23322436.600    23322439.420   122560348.72949  91522408.75709
E13  24739540.760    24739547.540   130007208.44248  97083368.65308
E15  27906429.100    27906443.660   146649234.52946 109518027.97707
E24  27986696.420    27986701.920   147071080.99346 109825829.92206
E25  26617386.060    26617393.140   139875315.83847 104452381.18207
E26  24996425.760    24996429.120   131357141.43148  98091407.83508
G03  23148924.460    23148928.980   121648485.46206  94791088.39406
G04  20864277.240    20864277.900   109642630.31008  85435859.82908
G06  21510151.520    21510154.100   113036643.41108  88080531.85108
G09  20160320.000    20160321.040   105943311.28809  82553294.82509
G11  22553359.420    22553359.980   118518737.73208  92352284.15407
G20  24543078.720    24543080.500   128974749.78306 100499799.91306
G26  23620382.600    23620387.500   124125948.35206  96721536.17306
R03  20811012.180    20811013.500    20811013.480   111403097.04908
R04  19317767.780    19317768.340    19317768.320   103445904.56409
R05  21941982.540    21941986.380    21941986.080   117292527.65807
R12  22982868.720    22982873.160    22982873.160   122770402.25607
R13  20808895.820    20808898.960    20808898.860   111118374.52606
R14  21976465.720    21976471.980    21976472.140   117146969.60507
R19  22277206.400    22277211.900    22277211.260   119168007.38305
R20  21017217.600    21017222.480    21017221.720   112388516.37506
R21  23806212.320    23806214.720    23806214.240   127391848.25106
> 2024 06 04 18 29 30.0000000  0 39
C06  38715709.080    38715708.260   201602873.93406 155892135.06107        45.600
C09  38003255.220    38003255.680   197892962.27407 153023411.60208        49.850
C11  24310412.460    24310414.340   126590719.46407  97887999.29408        49.400
C12  25465478.560    25465482.780   132605406.55606 102538916.40507        46.500
C16  39539415.420    39539419.900   205892134.88206 159208886.96107        43.900
C21  22558925.420                   117470341.85209
C22  22054438.360                   114843383.79409
C34  24722538.740                   128736754.49507
C36  23138631.980                   120488973.35408
C39  39820294.000                   207354727.92405
C42  26303237.220                   136967869.31106
```

(b) $ObserwacjeRINEX$

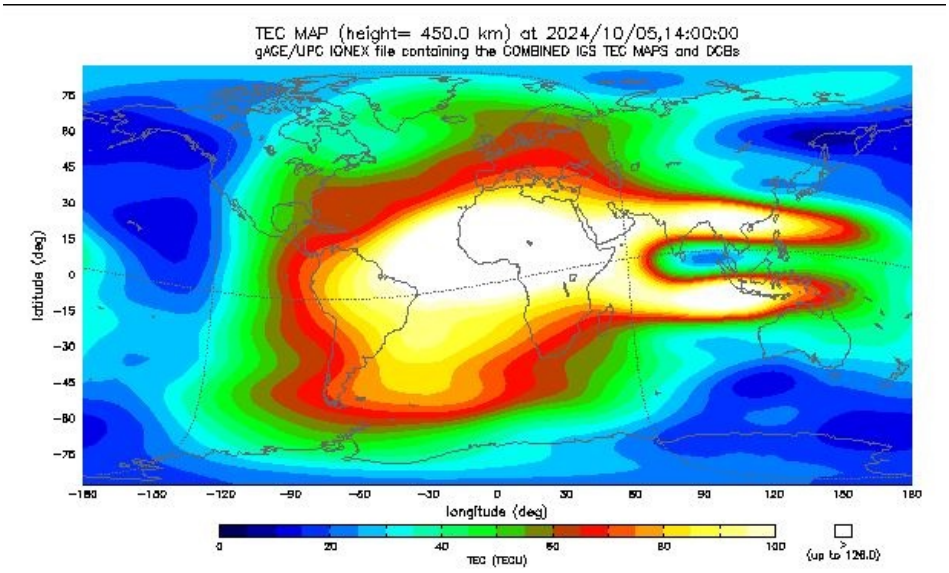
Rysunek 3.2: Przykładowy produkt IGS w formacie RINEX

```
  G  xmis                   -16.984     0.544             STATION / BIAS / RMS
  G  yar2 50107M004         -29.545     0.000             STATION / BIAS / RMS
  G  yar3                     5.153     0.000             STATION / BIAS / RMS
  G  yarr 50107M004           1.504     0.226             STATION / BIAS / RMS
  G  yell 40127M003           7.209     0.245             STATION / BIAS / RMS
  G  ykro 32601M001           1.254     0.235             STATION / BIAS / RMS
  G  zeck 12351M001           8.821     0.103             STATION / BIAS / RMS
  G  zim2                   -12.927     0.146             STATION / BIAS / RMS
  G  zim3                   -13.999     0.000             STATION / BIAS / RMS
  G  zimm 14001M004         -11.567     0.000             STATION / BIAS / RMS
DIFFERENTIAL CODE BIASES                                  END OF AUX DATA
                                                          END OF HEADER
    1                                                     START OF TEC MAP
 2024     1     1     0     0     0                       EPOCH OF CURRENT MAP
  87.5-180.0 180.0   5.0 450.0                           LAT/LON1/LON2/DLON/H
 69   70   71   72   72   73   74   74   75   75   75   75   75   75   75   75
 75   75   75   74   73   72   70   70   69   69   68   67   67   65   65   64
 62   61   61   60   59   58   58   56   56   55   55   54   54   53   53   53
 52   52   53   53   52   53   53   53   53   54   54   55   56   56   57   58
 59   60   62   63   63   65   66   68   69
  85.0-180.0 180.0   5.0 450.0                           LAT/LON1/LON2/DLON/H
 76   78   80   82   83   85   86   86   87   87   88   87   88   88   87   86
 85   84   82   80   79   79   78   78   78   76   74   72   71   69   68   66
 65   64   63   61   60   58   57   55   53   52   51   49   49   48   47   47
 47   46   46   46   47   47   47   48   48   49   50   50   52   53   54   56
 57   59   62   64   67   69   72   74   76
  82.5-180.0 180.0   5.0 450.0                           LAT/LON1/LON2/DLON/H
 86   88   90   92   93   95   96   97   98   98   98   97   96   95   93   92
 91   89   88   87   85   83   82   82   79   79   79   78   76   75   73   71
 70   67   65   63   61   59   58   56   55   53   51   50   48   47   46   47
 47   47   46   46   47   46   46   46   46   46   47   48   50   51   54   56
 59   62   65   69   73   77   80   82   86
  80.0-180.0 180.0   5.0 450.0                           LAT/LON1/LON2/DLON/H
 98   99  100  102  104  107  108  109  109  108  107  106  104  102  100   98
 97   95   94   92   89   83   82   87   89   92   92   92   91   88   87   84
 80   78   74   70   67   63   60   58   57   56   56   55   54   53   52   53
 53   53   52   52   51   50   50   49   48   48   48   50   52   55   59   63
 67   71   75   80   85   90   92   96   98
  77.5-180.0 180.0   5.0 450.0                           LAT/LON1/LON2/DLON/H
114  113  114  115  116  118  119  120  118  116  114  110  105  102   98   95
 91   89   86   83   82   86   88   90   93   93   97   94   92   92   91   90
 90   87   83   78   75   70   66   64   62   62   61   62   63   62   62   63
 63   63   62   59   58   56   55   53   53   52   53   55   59   64   69   74
 80   86   91   96  103  107  112  114  114
  75.0-180.0 180.0   5.0 450.0                           LAT/LON1/LON2/DLON/H
136  133  133  131  135  135  137  139  136  131  125  116  109  101   94   87
 80   76   75   76   75   80   82   87   91   96   95   96   97   96   94   93
 91   88   85   82   79   76   73   71   69   69   68   70   71   72   73   75
 75   74   72   69   65   61   59   57   57   57   59   62   68   74   81   88
 96  103  111  117  125  130  136  137  136
  72.5-180.0 180.0   5.0 450.0                           LAT/LON1/LON2/DLON/H
163  161  160  161  160  162  164  161  158  151  141  131  119  107   93   83
 75   68   65   63   66   72   76   81   87   92   95   96   97   95   92   90
 89   87   83   80   78   76   74   71   71   71   71   74   76   78   80   82
 83   83   81   77   71   66   62   58   58   59   62   67   74   83   92  102
112  121  130  140  147  154  158  160  163
  70.0-180.0 180.0   5.0 450.0                           LAT/LON1/LON2/DLON/H
190  191  190  189  186  186  185  185  180  173  166  155  137  118  102   87
 75   65   62   62   64   70   74   78   82   87   89   91   92   91   88   85
 82   80   78   75   74   72   71   69   68   69   69   72   76   80   83   85
```

Rysunek 3.3: Przykładowy produkt IGS w formacie IONEX.

Produkty jonosferyczne są globalnymi mapami zawierającymi informację o TEC, przechowywanymi w formacie IONEX (zbliżonym do formatu RINEX) (rysunek 3.3. Format IONEX jest plikiem tekstowym zwierającym wartości produktu w odniesieniu

do lokalizacji przestrzennej. W danych nagłówkowych znajdziemy informacje o źródłowym centrum obliczeniowym, interwale między kolejnymi epokami, liczbie stacji użytych w produkcie czy rozdzielczości przestrzennej mapy. Mapy zawarte w pliku IONEX podzielone są na epoki, w każdej z nich znajdziemy informację o wartości produktu na zadanej szerokości i długości geograficznej. Produkty finalne są kombinacyjnym rozwiązaniem z wielu centrów obliczeniowych:



Rysunek 3.4: Finalna mapa przedstawiające wartości TEC.

- Centre for Orbit Determination in Europe – CODE,
- European Space Operations Centre – ESOC,
- Jet Propulsion Laboratoty – JPL,
- Universitat Politècnica de Catalunya – UPC,
- Chinese Academy of Sciences – CAS,
- Wuhan University – WUH
- Natural Resources Canada – NRCan,
- Technische Universität München – OPTIMAP.

Mapy TEC są dostępne jako rozwiązania szybkie (dostępne po 24 godzinach), jak również jako produkt finalny dostępny po 11 dniach. Oprócz globalnych map TEC IGS udostępnia polarne mapy indeksu ROTI dla północnej półkuli (Cherniak, Krankowski i Zakharenkova, 2014; Cherniak, Krankowski i Zakharenkova, 2018). Testowo wprowadzane są również mapy ROTI dla półkuli południowej oraz strefy okołorównikowej.

Szczególny udział w badaniach stanu jonosfery mają jonosondy. Działanie tych instrumentów opiera się na zasadzie obserwacji odbić sygnału od jonosfery. Plazma znajdująca się w poszczególnych warstwach jonosfery różnie opóźnia sygnał, zależnie od jego częstotliwości. Na tej zasadzie jonosonda wyznacza wysokość, obliczając opóźnienie między sygnałem wysłanym a odebranym, zakładając prędkość sygnału równą prędkości światła. Wyznaczone wysokości określa się jako wirtualne i wymagają skalowania do wysokości fizycznych, poprzez uwzględnienie spowolnienia fal w jonosferze (Wakai, Ohyama i Koizumi, 1987). Jonosondy, z uwagi na rejestrację odbić z nadajnika naziemnego, są w stanie ukazać profil gęstości jedynie do wysokości szczytowej koncentracji elektronów f_oF2. Niemniej jednak jonosondy poza obserwacją szczytowej wysokości, wyznaczają również wysokości lokalnych submaksimów oraz obliczają minimalną częstotliwość odbicia, poniżej której fale ulegają absorbcji.

Rozdział 4

Indeks S_4 – obserwacje silnych radioźródeł

W obserwacjach radioastronomicznych prowadzonych na niskich częstotliwościach radiowych kluczowym czynnikiem umożliwiającym wykonanie obserwacji jest uwzględnienie czynnika dyfrakcyjnego, jakim jest jonosfera. Obserwacje radioźródeł (Cassiopei A i Cygnusa A) radioteleskopem LOFAR dostarczają informacji o scyntylacjach sygnału propagującego przez jonosferę. Miarą dyspersji jest współczynnik S_4 Briggs i Parkin, 1963, który opisuje występowanie i stopień scyntylacji sygnału.

W niniejszym rozdziale przedstawione zostaną: autorska metodyka postępowania oraz przetwarzania danych celem wyznaczenia indeksu S_4 z danych obserwacyjnych LOFAR. Przedstawiony zostanie sposób detekcji nieregularności oraz omówione są wybrane przypadki pokazujące zaobserwowane tym sposobem nieregularności w jonosferze.

4.1 Przetwarzanie danych

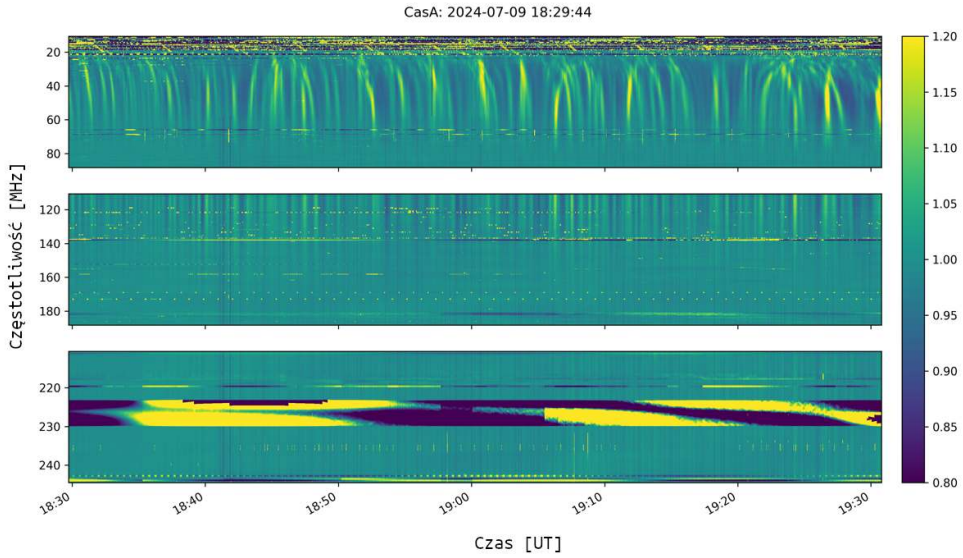
Proces przetwarzania obserwacji Cassiopei A i Cygnusa A różni się w przypadku danych pochodzących z obserwacji wykonanych w trybie międzynarodowym i lokalnym. Dane z obserwacji międzynarodowych przechowywane są w formacie HDF5, zawierającym wyliczoną z dwóch polaryzacji intensywność sygnału (parametr Stokesa I), który jest rejestrowany w zakresie 10-90 MHz. Obserwacje, które wykonywane są radioteleskopem LOFAR w Bałdach zapisywane są jako dwie osobne wartości zawierające informację o polaryzacjach liniowych x i y (horyzontalnej i wertykalnej). Za pomocą wzoru 4.1

przeliczne są na intensywność I. Głównym trybem obserwacji na stacji PL612 jest mod "357", dzięki, któremu uzyskiwane jest szerokie pasmo częstotliwości (10–90 MHz, 110–190 MHz, 210–250 MHz).

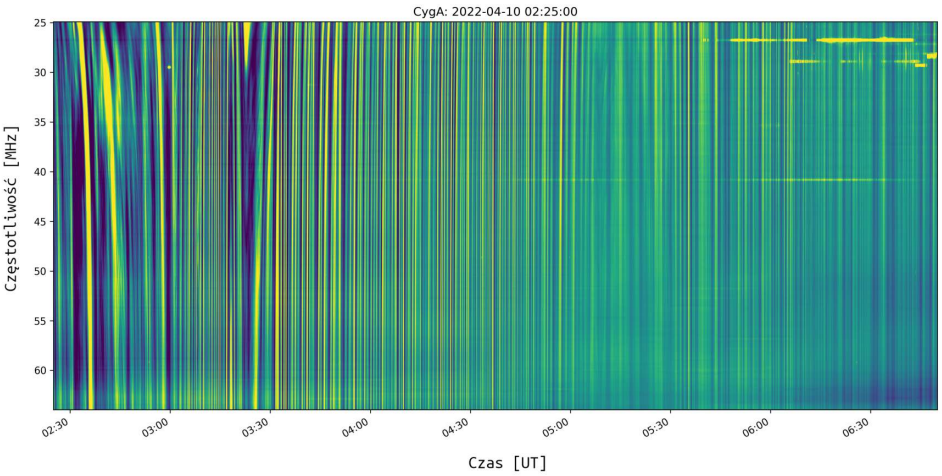
$$I = \sqrt{{e_x}^2 + {e_y}^2} \tag{4.1}$$

Istotną różnicą w obserwacjach międzynarodowych i lokalnych, poza liczbą stacji, biorących udział w kampanii pomiarowej, jest liczba źródeł. Obserwacje międzynarodowe standardowo rejestrują jednocześnie trzy radioźródła: Cassiopeię A, Cygnusa A oraz w przeszłości Taurusa A, obecnie Perseusa A. Pasmo 488 kanałów jest dzielone między te trzy źródła. Lokalne obserwacje prowadzone są na jednym radioźródle, wybieranym spośród pary: Cassiopeia A i Cygnus A. PL612, jako pojedyncza stacja, dzieli pasmo na cztery części (zwane *lane'ami*) w celu szybszego zapisu danych na magistrali pamięci. W rezultacie z pojedynczej obserwacji otrzymujemy osiem plików wyjściowych (po dwie polaryzacje na jedną część pasma). Cztery pasma są łączone, a następnie wyliczane są wszystkie składowe Stokesa (Stokes, 1851). Rysunek 4.1 przestawia obserwacje wykonane w lokalnym trybie (mod "357"), natomiast obok znajdują się obserwacje z tej samej stacji (PL612) jednak zgromadzone w ramach kampanii pomiarowej ILT.

Oprócz szerokości obserwowanego pasma obserwacje znacząco różnią się od siebie pod względem ilości interferencji radiowych. Wynika to z faktu wykorzystania innego trybu obserwacji. Jak wspomniano w podrozdziale "Typy obserwacji", mod "357"ze względu na ograniczoną liczbę anten, biorących udział w obserwacji, jest narażony na większy wpływ zakłóceń radiowych. Ich usuwanie realizowane jest poprzez stworzenie odpowiedniej maski zakłóceń – w pierwszym kroku obserwacje wygładzane są w dziedzinie częstotliwości i czasu za pomocą dwóch (jednowymiarowych) filtrów medianowych; następnie błędy grube (zakłócenia radiowe) identyfikowane są za pomocą filtru pięć sigma (R. A. Fallows i in., 2014). Jednocześnie przeprowadzana jest normalizacja obserwacji, która wynika ze zmian czułości anteny ze względu na kąt elewacji źródła. Korekty intensywności dokonuje się poprzez podzielenie kanału przez wpasowany wielomian trzeciego stopnia. Rysunek 4.2 przedstawia efekt usuwania szumów radiowych oraz normalizacji z obserwacji.

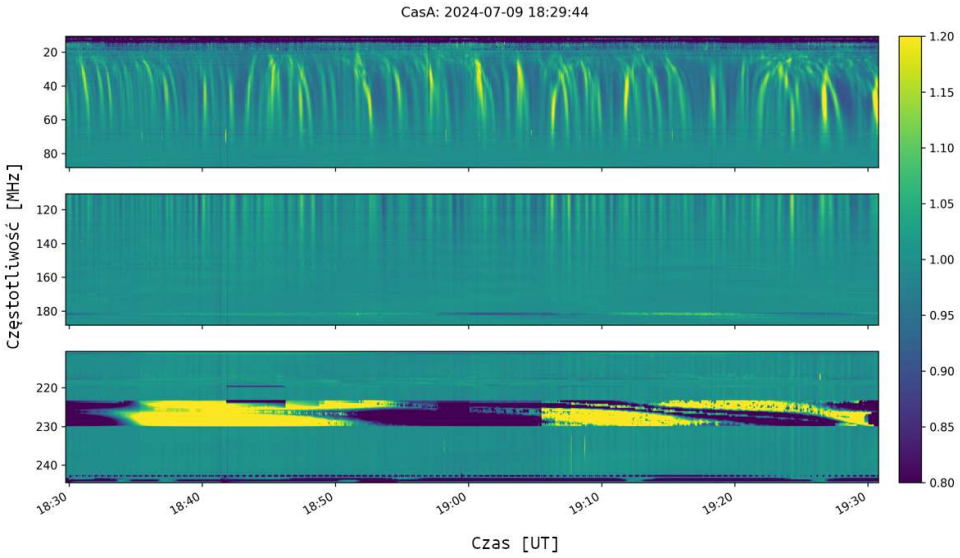


(a)



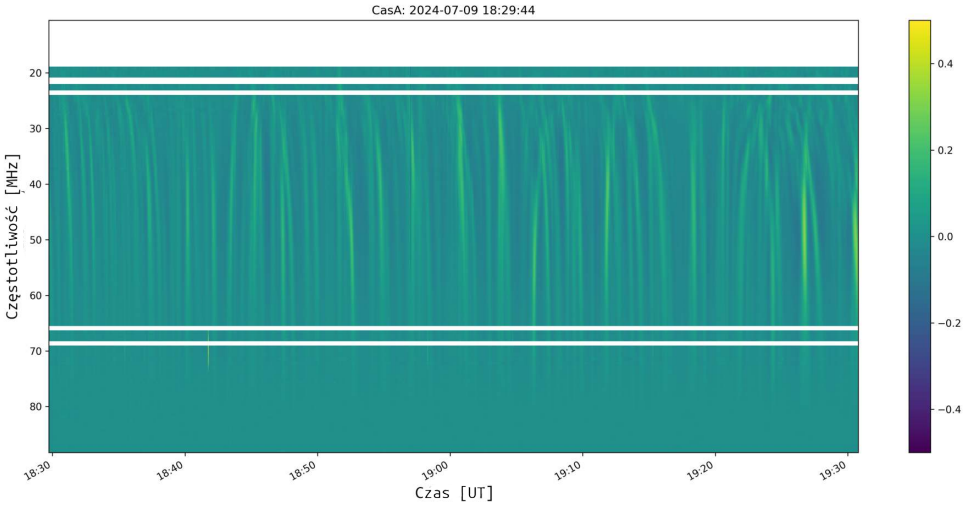
(b)

Rysunek 4.1: Obserwacje scyntylacyjne zarejestrowane (a) w modzie "357"oraz (b) w trybie międzynarodowym przez stację PL612 w Bałdach.



Rysunek 4.2: Obserwacje scyntylacyjne oczyszczone z szumów radiowych.

Nieobarczone interferencjami obserwacje poddawane są usuwaniu trendów liniowych przy pomocy średniej kroczącej (o minutowym kroku i szerokości okna wynoszącej 3 minuty). Jednocześnie obserwacje są normalizowane do zerowej wartości oczekiwanej (rys. 4.3). Na rysunku 4.3 została przedstawiona część LBA. Przedstawione kroki stanowią podstawę do wyliczenia indeksu S_4 oraz wybranych analiz widmowych.



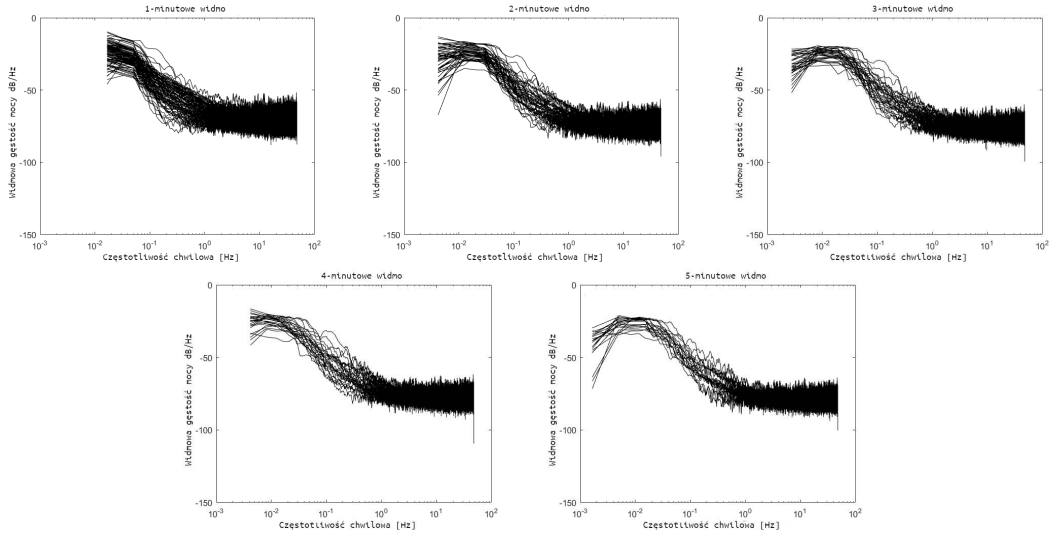
Rysunek 4.3: Pozbawione trendów obserwacje scyntylacyjne przeprowadzone na stacji w Bałdach.

4.2 Wyznaczenie indeksu S_4

Indeks S_4 to parametr ilustrujący występowanie i skalę scyntylacji sygnału (Briggs i Parkin, 1963) – wyliczany jest jako odchylenie standardowe z intensywności w zadanym okresie, jak w poniższym wzorze:

$$S_4 = \sqrt{\frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2}}, \tag{4.2}$$

I z powyższego wzoru odpowiada względnej intensywności, przy czym szeregi czasowe I są uprzednio pozbawione trendu czasowego oraz sprowadzone do zerowej wartości oczekiwanej. Istotnym czynnikiem jest długość okna, jaka została przyjęta do obliczeń. Jest ona z jednej strony zależna od skali czasowej scyntylacji a z drugiej od czasowej zmienności w całym zakresie obserwacji. Dla ustalenia odpowiedniej wielkości okna wyznaczono widmowe gęstości mocy (z ang. *power spectral density*). Widmowe gęstości mocy zostały obliczone dla pięciu okresów: 1, 2, 3, 4 i 5 minut dla środkowego kanału obserwacji (rysunek 4.4).



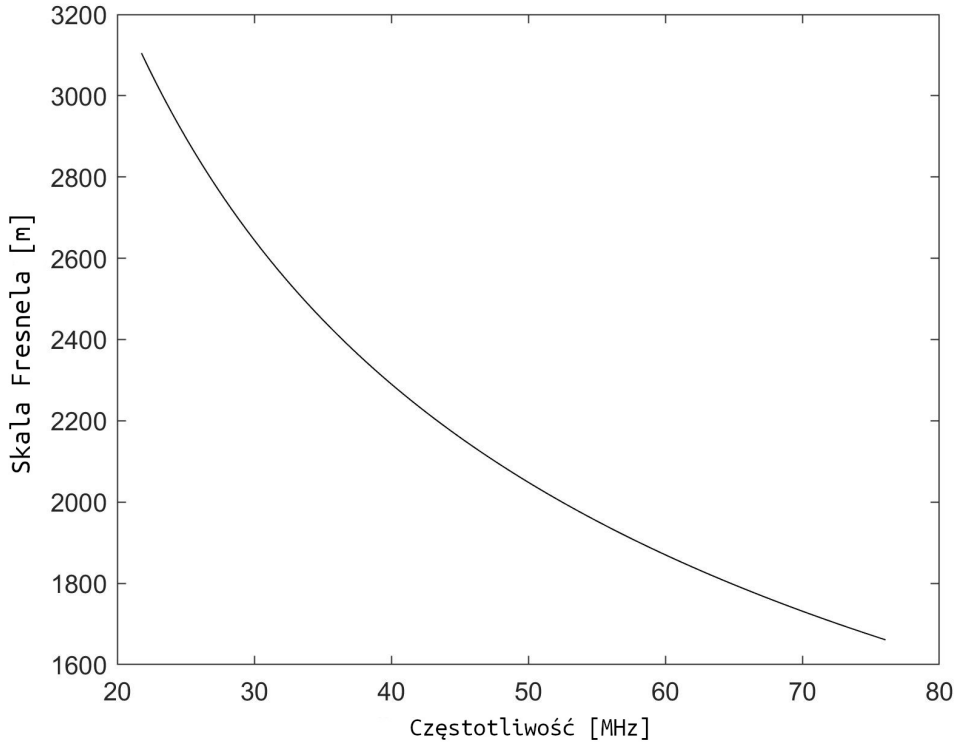
Rysunek 4.4: Widmowe gęstości mocy obliczone na podstawie intensywności dla 1-, 2-, 3-, 4- i 5-minutowych okresów.

Na podstawie widmowych gęstości mocy można zauważyć, że 1-minutowy okres nie ujawnia granicy niższych częstotliwości tak jak okresy dłuższe ("obcina"składowe

niskoczęstotliwościowe). Widmowa gęstość mocy w okresie dwóch minut nie spełnia założeń ergodyczności, ponieważ sygnał przechodzi przez mniejszą liczbę nieregularności powodujących scyntylacje sygnału. Zakładając względną prędkość dryftu nieregularności w stosunku do linii kierunku (z ang. *LoS – Line of sight*) na poziomie 100 m/s dla okresu 2-minutowego otrzymujemy uśrednianie na przestrzeni 12 km. Porównując to do skali przestrzennej nieregularności wywołujących scyntylacje sygnału, zgodnie ze skalą Fresnela (równanie 4.3, rysunek 4.5), otrzymuje się mniejszą liczbę nieregularności powodujących scyntylacje sygnału.

$$l_F = \sqrt{2 \cdot \lambda z} \tag{4.3}$$

gdzie λ to długość fali i z to odległość do hipotetycznej nieregularności, powodującej scyntylacje, założono odległość na poziomie 350 km.

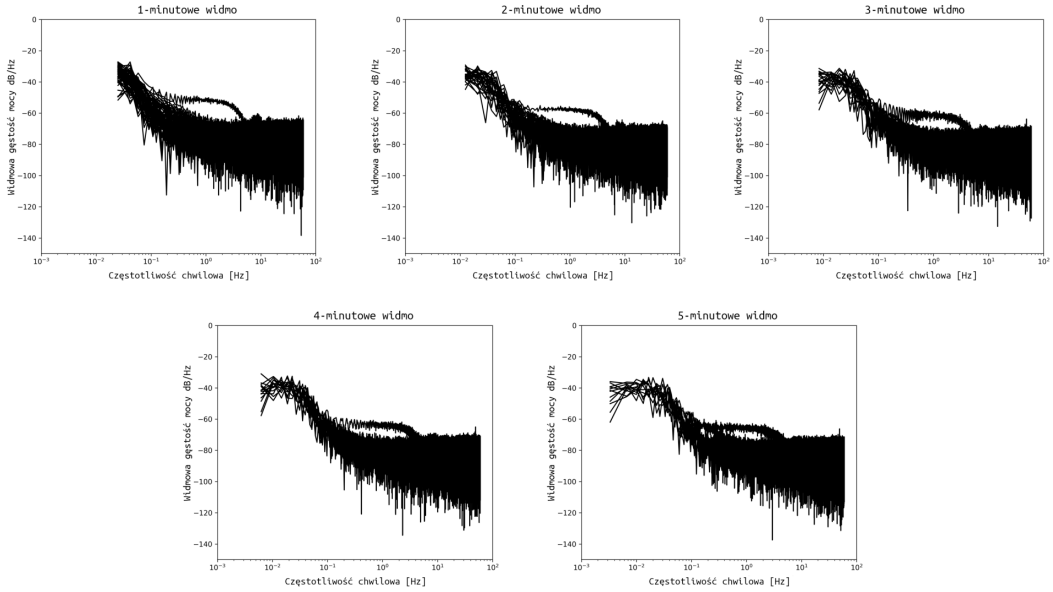


Rysunek 4.5: Skala Fresnela w odniesieniu do obserwowanych częstotliwości na pasmie LBA.

Widmowe gęstości mocy dla okresów 4- i 5-minutowych powodują uśrednianie na

zbyt dużej skali przestrzennej, co powodowałoby wygładzenie się fluktuacji sygnału. Biorąc pod uwagę wszystkie czynniki, ustalono, że okres 3-minutowy stanowi złoty środek między skalą nieregularności a ich zmiennością w całym szeregu czasowym.

Przeprowadzona analiza została wykonana na obserwacjach w trybie międzynarodowym dla obserwacji z 27 września 2017 miedzy 16.45 a 18.30 UT. Widmowe gęstości mocy zostały również policzone dla obserwacji pojedynczej stacji, która obserwowała radioźródło w modzie "357"(rysunek 4.6.

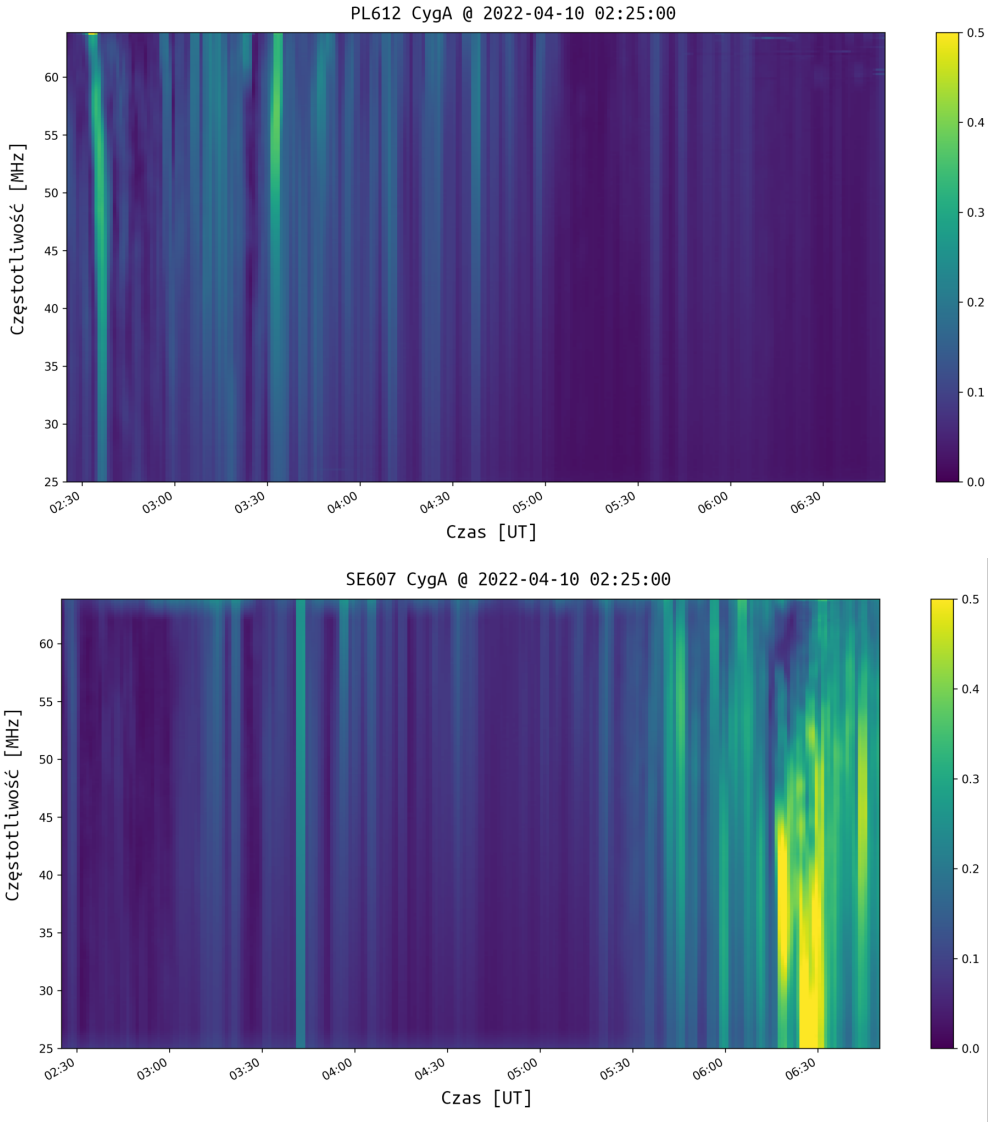


Rysunek 4.6: Widmowe gęstości mocy obliczone na podstawie intensywności dla 1-, 2-, 3-, 4- i 5-minutowych okresów dla stacji PL612 w Bałdach obserwującej w "modzie 357".

Okresy 1- i 2-minutowe nie ujawniają niższych granic częstotliwości oraz nie spełniają założeń ergodyczności. Okres 4- i 5-minutowy zdecydowanie wyraźniej wskazują niższe granice częstotliwości niż okres 3-minutowy, jednak skala przestrzenna tych okresów jest zbyt długa i zanadto wygładzałby fluktuację sygnału. Warto zwrócić uwagę, że moc sygnału na niższych częstotliwościach jest mniejsza niż w przypadku obserwacji w trybie międzynarodowym. W modzie "357"liczba anten biorących udział w obserwacjach jest mniejsza niż w obserwacjach prowadzonych w kampanii międzynarodowej, co skutkuje zmniejszeniem mocy. Zmniejszona moc sygnału dla niższych częstotliwości ma wpływ na skalę indeksu S_4, powodując, że odchylenie standardowe sygnału jest

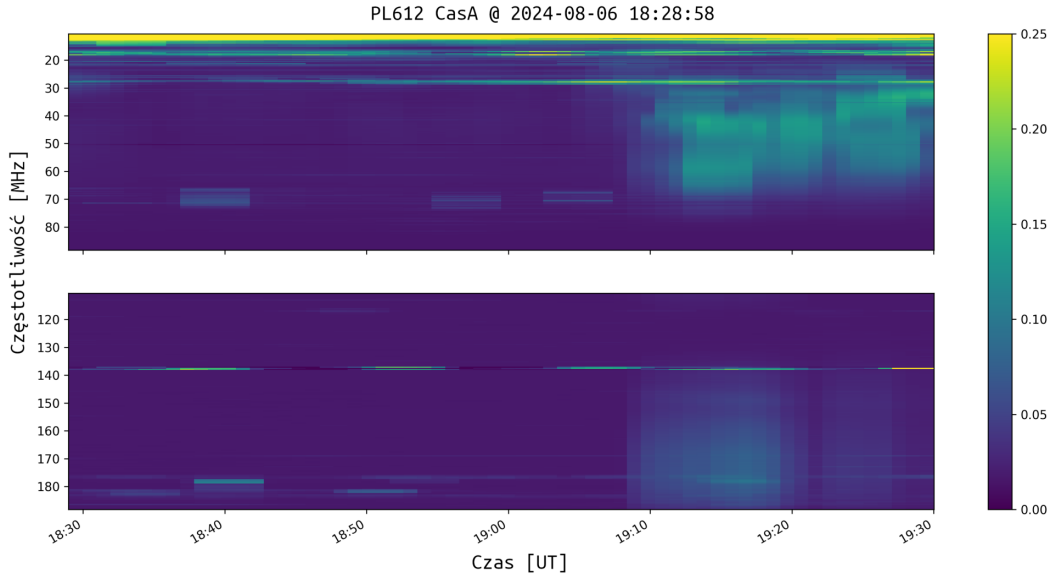
znacznie mniejsze niż w przypadku obserwacji prowadzonych w obserwacjach międzynarodowych. Ponownie jako złoty środek między zachowaniem ergodyczności układu i uwzględnienia zmienności czasowej wybrano okres 3-minutowy.

Analiza widmowych gęstości mocy odpowiedziała na pytanie, w jakim okresie powinien być obliczany indeks S_4. S_4 obliczane jest z krokiem minutowym na okres 3 minut. Rysunek 4.7 prezentuje przykładowe widmo indeksu S_4 dla obserwacji przeprowadzonych w kampanii międzynarodowej.



Rysunek 4.7: Widma indeksu S_4 obliczone z obserwacji międzynarodowych.

Przedstawione na rysunku 4.7 przedstawiają indeks S_4 z dwóch wybranych stacji: PL612 i SE607. Na rysunku 4.8 przedstawiony jest indeks S_4 obliczony z obserwacji prowadzonych w trybie lokalnym stacji PL612. Tryb lokalny wyróżnia przede wszystkim szersze pasmo obserwacji, które obejmuje pasmo LBA i HBA stacji. Natomiast w trybie międzynarodowym uzyskujemy obserwacje z wielu stacji i większą moc sygnału na pasmie LBA.



Rysunek 4.8: Widma indeksu S_4 obliczone z obserwacji lokalnych wykonanych 6 sierpnia 2024.

4.3 Metodyka detekcji nieregularności.

Jonosfera jest zmiennym się w czasie i bardzo dynamicznym ośrodkiem w całym przestrzennym zakresie występowania. Z tego powodu nie tylko jej analiza czasowa, ale też przestrzenna jest niezwykle istotna. W tym celu wykorzystano obserwacje GNSS ze stacji permanentnych rozmieszczonych w Europie (sieć stacji EPN – ang. *European Permanent Network*). Z obserwacji pochodzących z ponad 200 stacji obliczono ROTI (z ang. *Rate of TEC Index*), który przedstawiono w formie mapy. Punkt przebicia jonosfery wyznaczono na podstawie wzorów (4.4, 4.5).

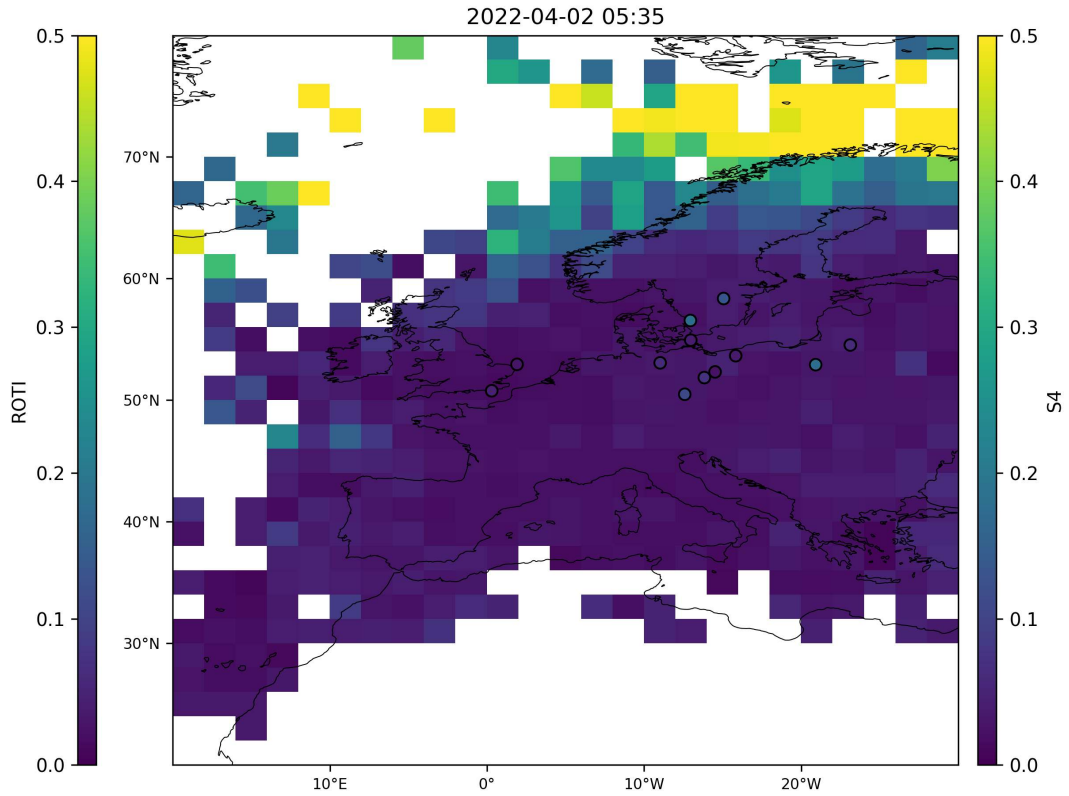
$$\phi_{IPP} = \phi_{rec} + \psi cosAz \tag{4.4}$$

$$\lambda_{IPP} = \lambda_{rec} + \frac{\psi sinAz}{cos\phi_{IPP}} \tag{4.5}$$

$$\psi = arccos((\frac{R_E}{R_E + h})cosE) - E \tag{4.6}$$

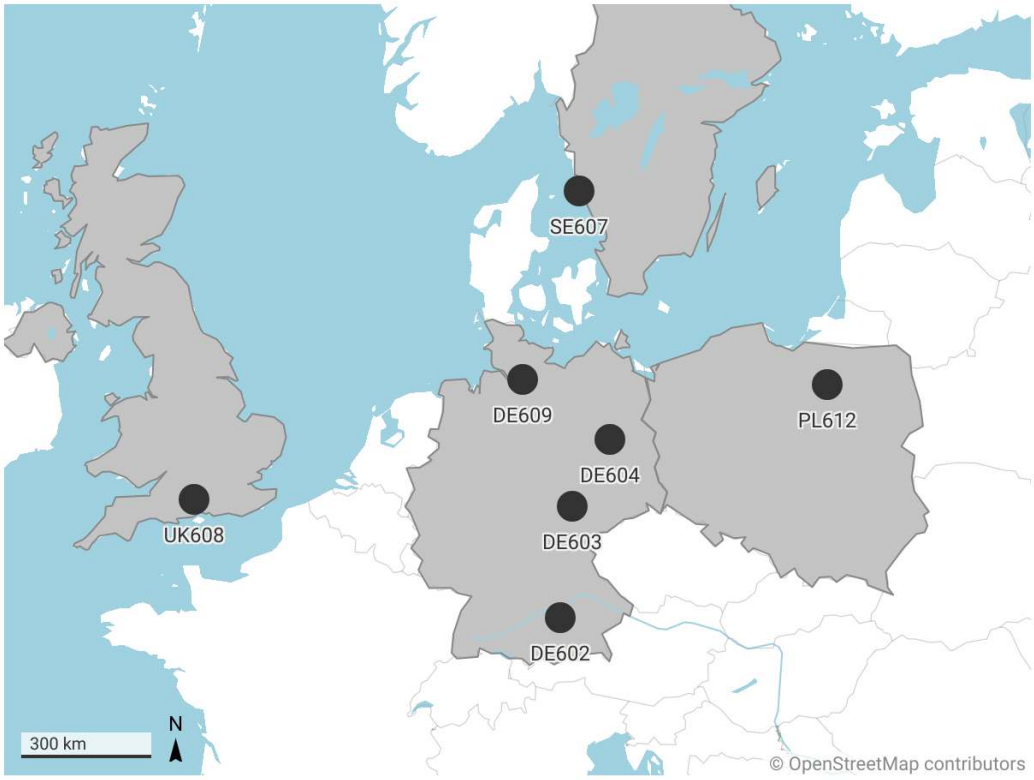
gdzie ϕ_{rec} i λ_{rec} to współrzędne geograficzne stacji, Az i E to kolejno azymut i kąt elewacji satelity, R_E to promień Ziemi, natomiast h to wysokość warstwy jonosferycznej.

Wartości ROTI wyznaczone są w regularnej siatce o rozmiarach $2° \times 2°$ i zostały wyznaczone w interwałach jednominutowych z szerokością okna uśredniania równą 5 minut. Na mapy naniesiono również punkty przebicia radioźródeł obserwowanych za pomocą radioteleskopu LOFAR oraz wartości S_4 obliczone dla środkowej częstotliwości (48,92 MHz) i odpowiadające epoce, dla której obliczono ROTI. Rysunek 4.9 przedstawia przykładową mapę ROTI.



Rysunek 4.9: Przykładowa mapa ROTI obliczona na postawie danych GNSS, wchodzących w skład sieci EPN wraz z punktami przebicia wyznaczonych z radioźródeł obserwowanych przez stacje LOFAR oraz wartościami S_4.

Obserwacje LOFAR zostały wykonane w ramach trybu międzynarodowego, do celów stworzenia map wykorzystano obserwacje z 4 stacji zlokalizowanych w Niemczech, po jednej z Polski (PL612), Szwecji (SE607) i Wielkiej Brytanii (UK608) (rysunek 4.10). Punkty przebicia zostały wyznaczone dla dwóch radioźródeł: Cassiopei A i Cygnusa A.

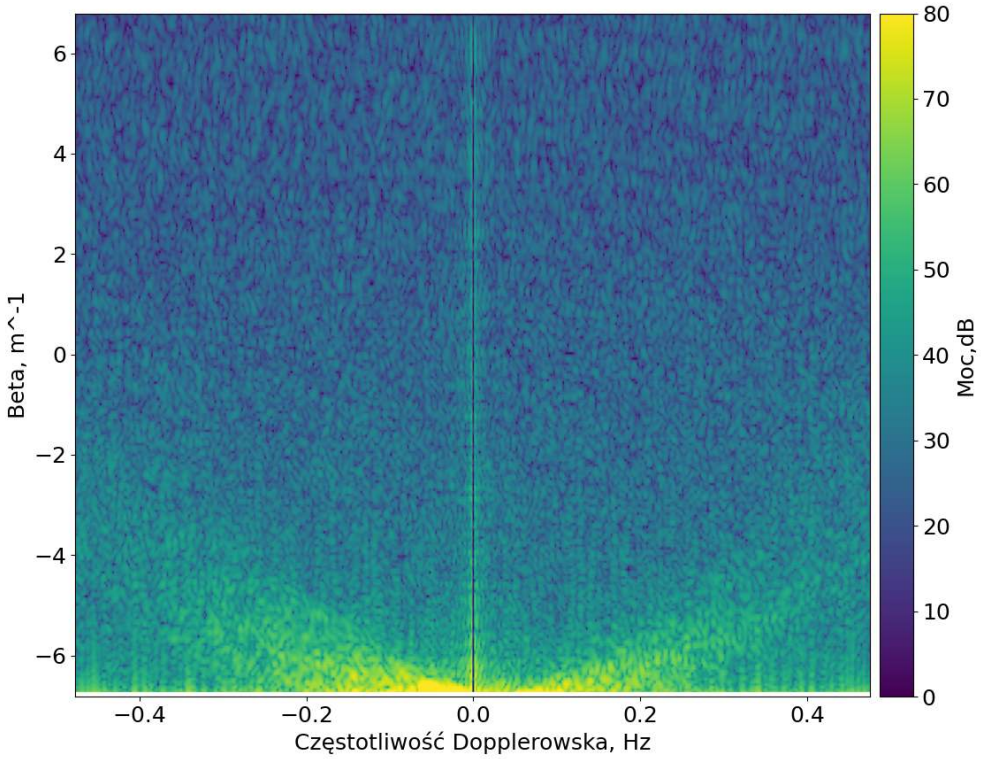


Rysunek 4.10: Lokalizacja stacji LOFAR, których obserwacje zostały wykorzystane w pracy.

Na podstawie widm dynamicznych wyznaczono również widma drugiego rzędu (z ang. *secondry spectra*), na podstawie których można określić dynamikę przemieszczania się nieregularności jonosferycznych. Widma dynamiczne podzielono na 5-minutowe części, na podstawie których przy użyciu dwuwymiarowej transformaty Fouriera otrzymano widma drugiego rzędu (rys. 4.11). Na podstawie krzywizny łuku (C) możliwe jest zgrubne wyznaczenie prędkości przemieszczania się nieregularności względem linii widzenia ze wzoru 4.7, w którym założono wysokość występowania nieregularności (L) na poziomie 350 km. Wyznaczona prędkość jest wypadkową przemieszczania się linii

widzenia i ruchu struktury.

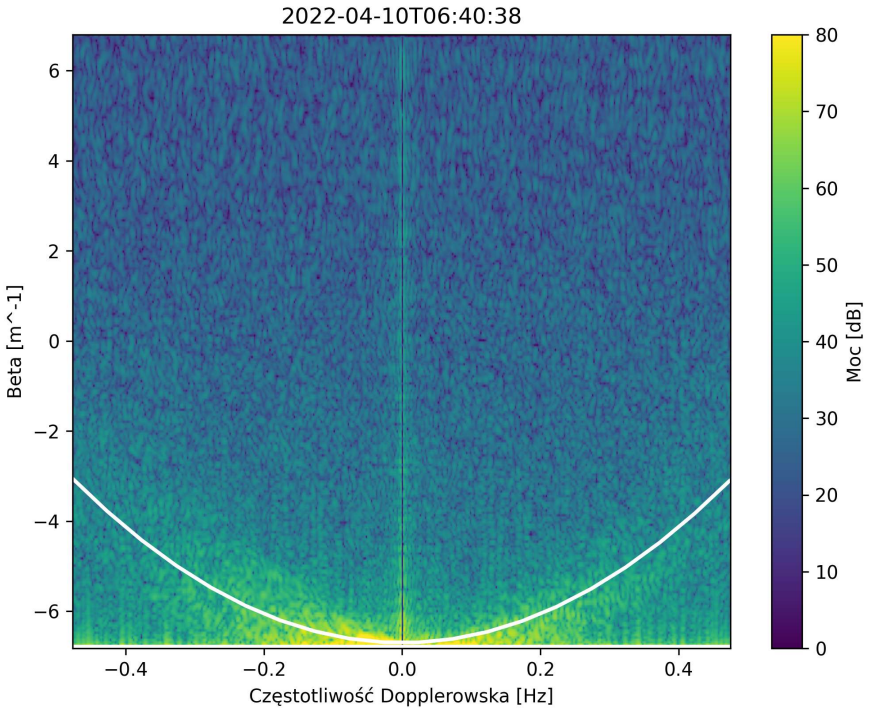
$$v = \sqrt{\frac{L}{2 \cdot C}} \tag{4.7}$$



Rysunek 4.11: Widmo drugiego rzędu otrzymane na podstawie 5-minutowej części obserwacji.

Na rysunku 4.11 wyraźnie widać strukturę łuku, w który została wpasowana funkcja (wzór 4.8. Wpasowanie funkcji wymagało ręcznego wyboru punktów leżących na łuku widocznym na widmie dopplerowym. Efekt wpasowania przedstawia rysunek 4.12.

$$y = C \cdot x^2 \tag{4.8}$$



Rysunek 4.12: Widmo drugiego rzędu ze wpasowaną funkcją w widoczny łuk.

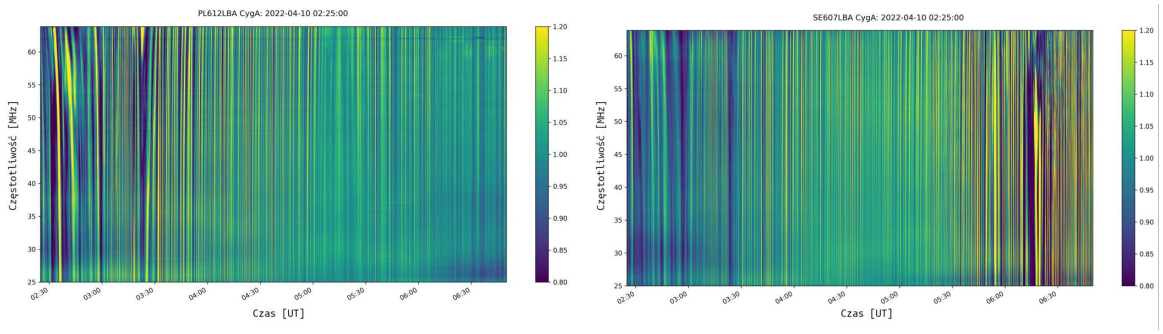
4.4 Wyniki obserwacji nieregularności jonosferycznych w obserwacjach.

Analiza nieregularności jonosferycznych widocznych w obserwacjach scyntylacyjnych radioteleskopem LOFAR skupia się na przedstawieniu kilkunastu obserwacji, w trakcie których zaobserwowano nieregularności o różnej skali i dynamice. Analizowane poniżej przypadki zawierają zarówno obserwacje wykonane podczas kampanii międzynarodowych, jak i obserwacje w trybie lokalnym stacji PL612.

Obserwacje z dnia 10 kwietnia 2022

Obserwacja dwóch radioźródeł Cassiopei A i Cygnusa A została wykonana między 2:30 a 7.00 UT 10 kwietnia 2022 roku. Niestety, z uwagi na problemy techniczne z archiwum obserwacje Cassiopei A są niedostępne. Widma dynamiczne obserwacji z polskiej

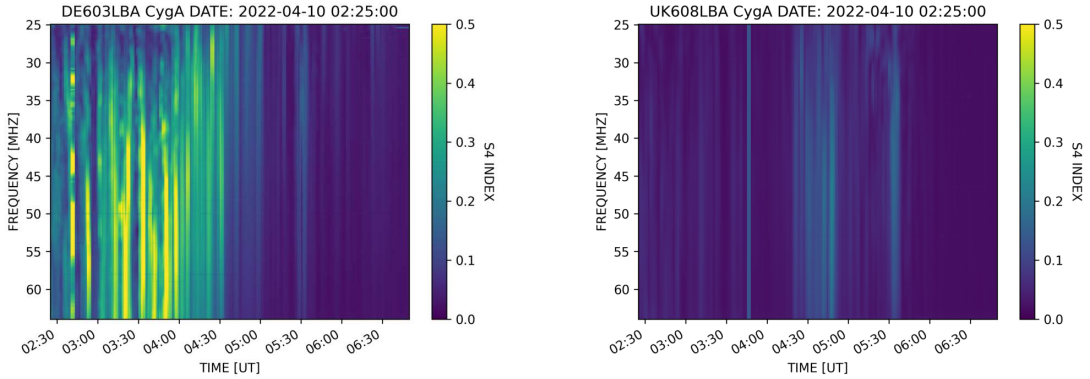
i wszystkich niemieckich stacji ukazały silne scyntylacje sygnału przez pierwsze 2 godziny obserwacji, natomiast stacja szwedzka wraz ze stacją w Wielkiej Brytanii ukazały silne scyntylacje podczas ostatnich dwóch godzin obserwacji. Rysunek 4.13a przedstawia widmo dynamiczne z polskiej stacji, natomiast rysunek 4.13b przedstawia obserwacje wykonane przez stację szwedzką.



(a) (b)

Rysunek 4.13: Widma dynamiczne obserwacji wykonanych 10 kwietnia 2022 dla obserwacji wykonanych na stacji: (a) PL612 i (b) SE608.

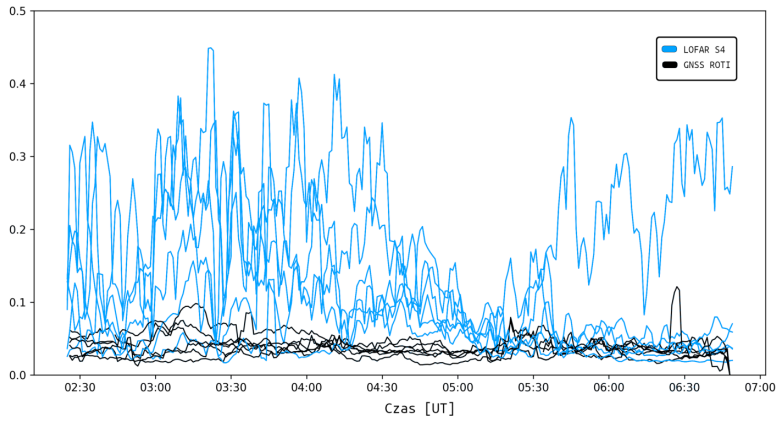
Indeks S_4 obliczony na podstawie intensywności sygnału osiągał poziom 0,5. Stacje SE607 i DE603 (rys. 4.14a)przedstawiają znacznie większe wartości indeksu S_4 niż stacja UK608 (rys. 4.14b).



(a) (b)

Rysunek 4.14: Index S_4 obliczony na podstawie obserwacji wykonanych 10 kwietnia 2022 na stacjach: (a) DE603 i (b) UK608.

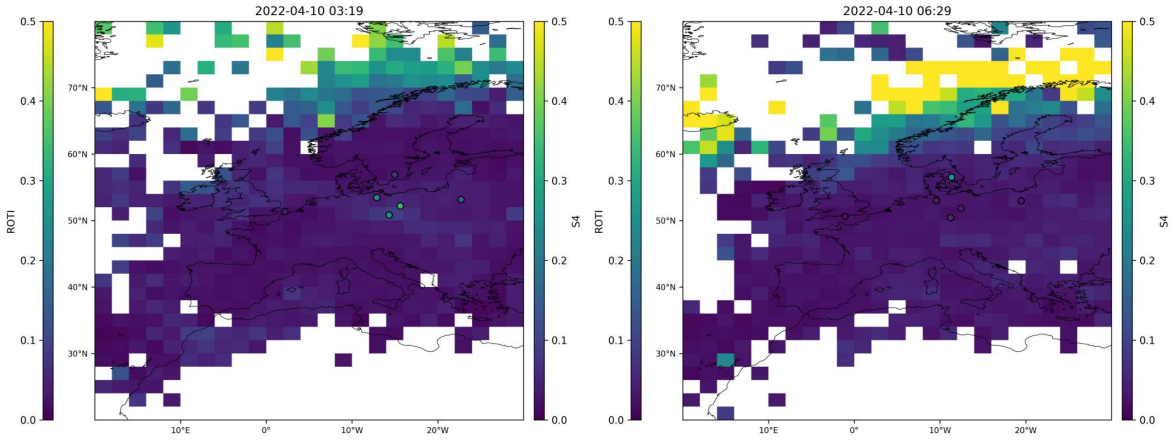
Wartości S_4 porównano do ROTI otrzymanych na podstawie obserwacji GNSS i przedstawiono w formie mapy. Mapy wykonano na jednominutową epokę, tożsamą z epoką indeks S_4. Posłużyły one do analizy generalnego stanu jonosfery, natomiast szczegółowa analiza nieregularności ukazana jest na wykresach przedstawiających wartość ROTI i S_4 w tym samym punkcie (rysunek 4.15). Na podstawie punktu przebicia z obserwacji radioteleskopu, wybrano odpowiadający mu piksel mapy.



Rysunek 4.15: Szereg czasowy S_4 oraz ROTI w punkcie przebicia obserwacji radioteleskopem LOFAR.

Szereg czasowy przedstawia obserwacje z wszystkich stacji wybranych do analizy. Zauważyć należy, że wartości ROTI przez cały okres obserwacji pozostają na niskim poziomie (0,05 TECU/min), podczas gdy wartości S_4 dochodzą nawet do 0,4 jednostki. Pod koniec obserwacji zauważyć można, że na większości stacji poziom S_4 spada, podczas gdy na wcześniej wspomnianej stacji SE607 poziom wzrasta.

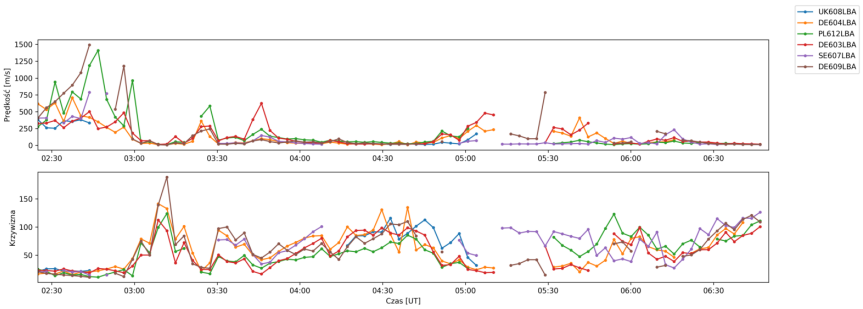
Rysunek 4.16a przedstawia mapę ROTI wykonaną na jedną z początkowych epok obserwacji, podczas których wartości indeksu S_4 wynosiły do 0,5. Wartości ROTI nad Europą oscylują w granicach $0,05\ TECU/min$ z wyjątkiem obszaru podbiegunowego, sięgającego do północnej części Skandynawii. Stan jonosfery pod koniec obserwacji jest podobny z wyjątkiem regionu owalu zorzowego, którego zasięg objął niższe szerokości geograficzne. Należy zwrócić uwagę, że punkt przebicia stacji SE607 znajduje się niemal na granicy owalu zorzowego.



(a) (b)

Rysunek 4.16: Mapy ROTI i wartości S_4 wykonane na moment intensywnych scyntylacji widocznych na początku (a) i na końcu obserwacji (b).

Rysunek 4.17 przedstawia krzywizny łuków obserwowanych w widmach drugiego stopnia, na których wyznaczono względną prędkość przemieszczania się nieregularności. Zaobserwować można, że na początku obserwacji (do 3.00 UT) prędkości osiągają znacznie większe wartości niż później. Większe względne do linii widoku prędkości nieregularności powodują zmniejszenie indeksu S_4 widoczne również na początku obserwacji, gdyż zbyt szybko poruszająca się nieregularność może nie powodować silnego rozpraszania widocznego na widmach S_4.



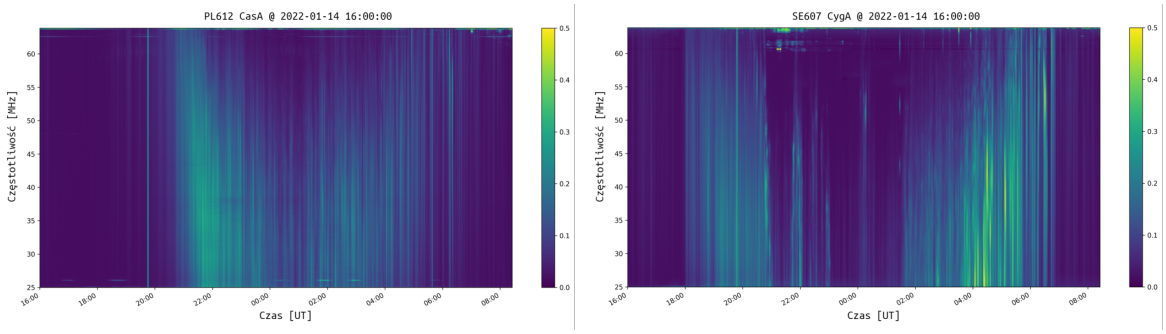
Rysunek 4.17: Krzywizna łuków widocznych w widmach drugiego rzędu oraz wyznaczona na ich podstawie względna prędkość. Parametry wyznaczone dla radioźródła Cygnus A.

W części widma, gdy wartości S_4 dochodzą do poziomu 0,5, względna do linii widoku

prędkość nieregularności znacząco spada do poziomu około 100 m/s. Widma dopplerowskie nie wykazały podwójnych łuków, co sugeruje, że obserwowane są wolno poruszające się nieregularności mieszczące się w skali Fresnela (Richard Fallows i in., 2020; Flisek i in., 2023).

Obserwacje z dnia 14 stycznia 2022

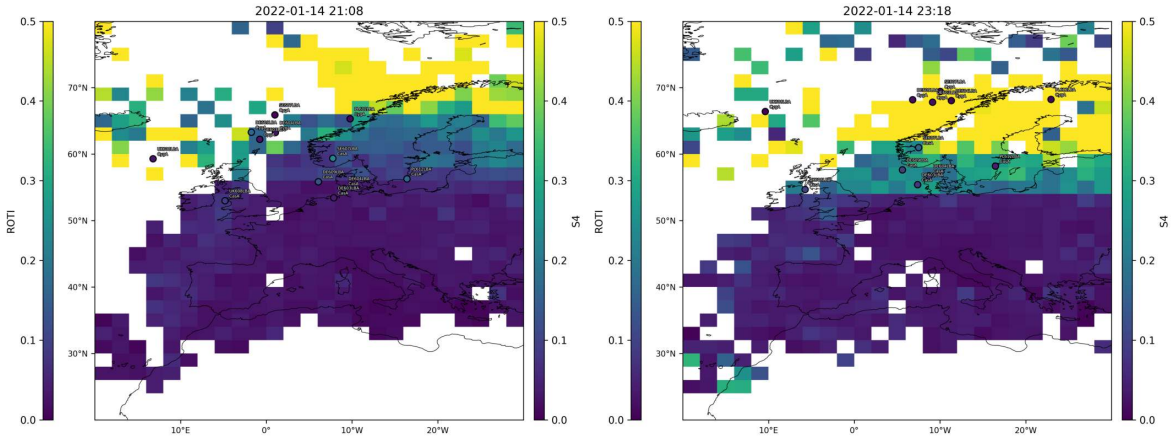
Podczas obserwacji z 14 stycznia 2022 roku zarejestrowano scyntylacje z dwóch radioźródeł Cassiopei A i Cygnusa A. Obserwacje były wykonane w trybie międzynarodowym, a do analizy wybrano 6 stacji LOFAR. Obserwacje obejmują 14 godzin, podczas których na wszystkich stacjach możemy zaobserwować charakterystyczny wzór (S_4 wynoszące 0,3 – krótko po rozpoczęciu obserwacji między 20.00 UT a 22.00 UT oraz na koniec obserwacji między 3.00 a 6.00 UT) na wszystkich stacjach jednocześnie i na obu radioźródłach (rysunek 4.18). Aktywność geomagnetyczna była wysoka – indeks Kp na początku obserwacji wynosił 6 z tendencją spadkową, natomiast indeks Dst osiągnął około -100 nT o godzinie 22.00 UT.



(a) (b)

Rysunek 4.18: Indeks S_4 obliczony na podstawie obserwacji z dnia 14 stycznia 2022 (a) na stacji PL612 dla Cassiopei A i (b) na stacji SE607 dla Cygnusa A.

Dla obserwacji wykonano mapy ROTI z naniesionymi punktami przebicia w kierunku radioźródeł obserwowanych przez stacje LOFAR (rysunek 4.19).

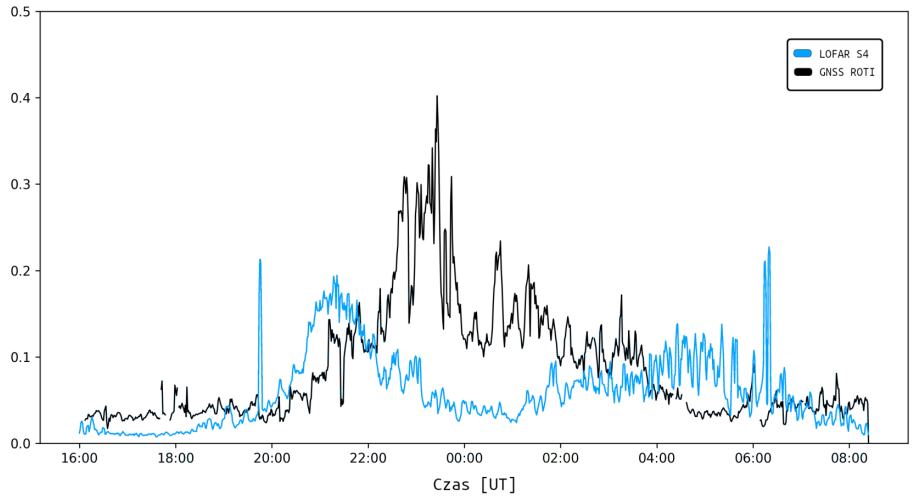


(a) (b)

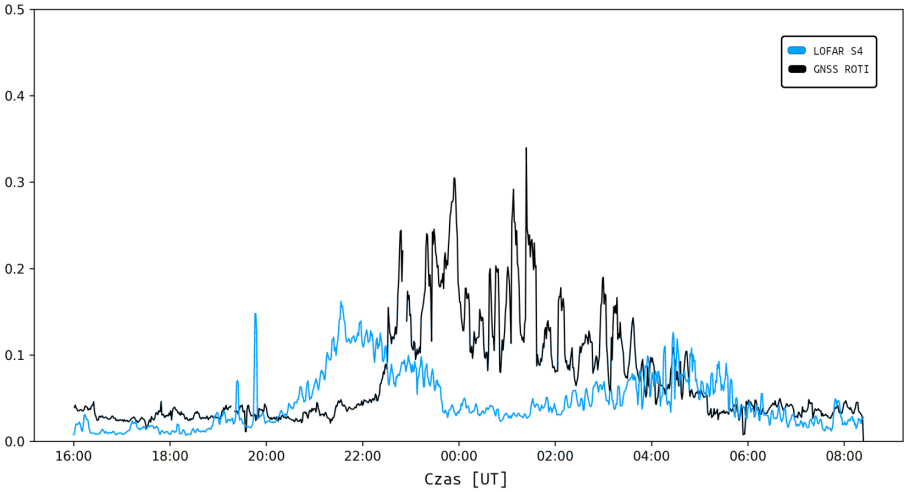
Rysunek 4.19: Mapy ROTI wraz z punktami przebicia jonosfery liniami widoku stacji LOFAR (a) na epokę i (b).

Około godziny 22.00 UT zauważono, że linie widzenia zmierzają ku północy, gdzie na średnie szerokości geograficzne schodzi owal zorzowy. Wartości S_4, które znalazły się w tym obszarze (rysunek 4.19a), rosną, co oznacza, że na szerokościach geograficznych tuż poniżej zasięgu owalu znajdują się nieregularności, które mieszczą się w skali Fresnela i powodują wzmożoną scyntylację sygnału. Wniosek taki potwierdzają wartości ROTI, które w tym obszarze pozostają na poziomie 0 – 0.1 TECu/min, co sugeruje, że nie występują duże struktury powodujące zwykle refrakcję.

Dokładnie zjawisko prezentują rysunki 4.20, na których przedstawiono wartości ROTI w punktach obserwacji radioźródeł radioteleskopem LOFAR. Na dwóch prezentowanych stacjach można zaobserwować wzrost indeksu S_4 na moment przed wejściem obserwacji w obszar owalu zorzowego. Na moment wejścia linii widoku stacji LOFAR, wartości S_4 spadają, natomiast wartości ROTI dochodzą do granicy 0,3 TEC/min. Sygnał z radioźródeł w obszarze owalu zorzowego przestaje scyntylować (wartości S_4 do 0,1) (rysunek 4.19b), ponieważ nie są obecne nieregularności w skali Fresnela. Dochodzi natomiast do znaczącej refrakcji jonosferycznej, obrazowanej przez wartości ROTI.



(a)



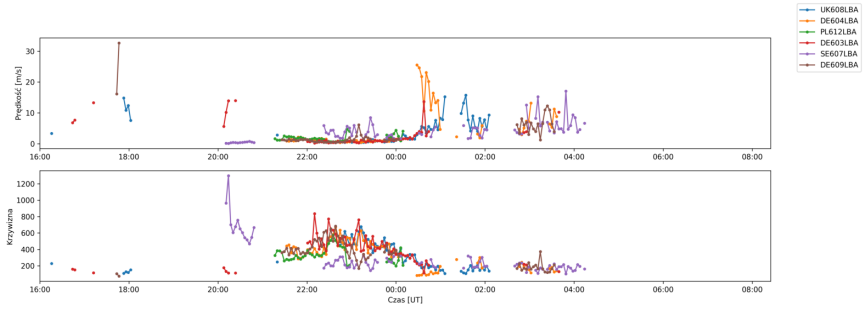
(b)

Rysunek 4.20: Szeregi czasowe indeksu S_4 (kolor niebieski) i ROTI (kolor czarny), wyznaczonego dla linii widoku Cassiopei A ze stacji (a) PL612 (b) DE604.

Podobne zjawisko przejścia obserwacji radioźródeł przez granicę owalu zorzowego obserwujemy również pod koniec obserwacji. Obserwowane zjawisko nie wykazuje takiej intensywności jak to pojawiające się około 22.00 UT. W tym przypadku najpierw zauważamy spadek wartości ROTI około godziny 4.00 UT, a następnie wzrost indeksu

S_4 do poziomu 0.3. Wykresy ROTI i S_4 wykonane na Cygnusie A nie obrazują w pełni zjawiska z powodu znacznego wysunięcia pozycji radiogalaktyki na północ, gdzie dostępność stacji GNSS jest ograniczona.

Podczas obserwacji zauważono łuki w widmach drugiego rzędu na okres, gdy linia widoku Cassiopei A weszła w zasięg owalu zorzowego 4.21. Prędkości wyznaczona na podstawie krzywizn łuku są bardzo małe rzędu 10 m/s, co sugeruje, że obserwowana jest wolno przemieszczająca się struktura, zidentyfikowana jako owal zorzowy.

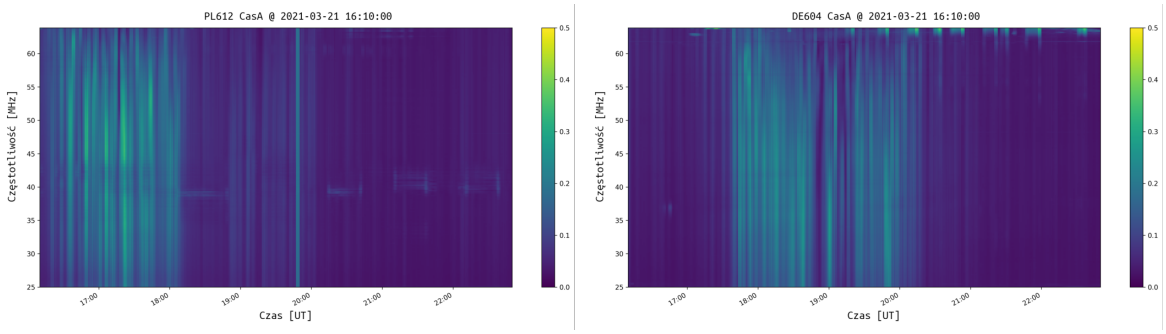


Rysunek 4.21: Krzywizna łuków widocznych w widmach drugiego rzędu oraz wyznaczona na ich podstawie względna prędkość. Parametry wyznaczone dla radioźródła Cassiopeia A.

Obserwacje z dnia 21 marca 2021

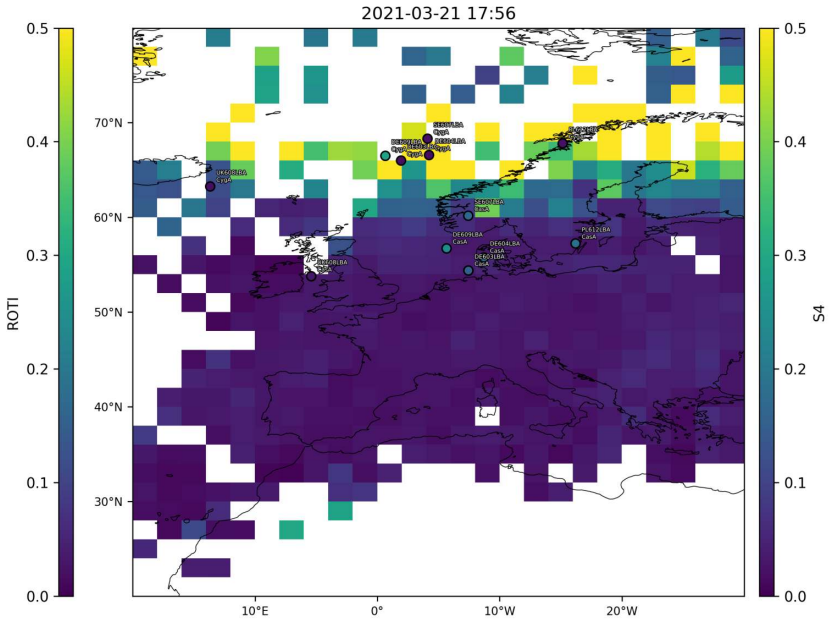
Obserwacje scyntylacyjne rozpoczęły się o godzinie 16.10 UT i trwały przez 7 godzin. Aktywność geomagnetyczna była umiarkowana – indeks Kp wynosił 4+ na początku obserwacji i zachowywał tendencję spadkową. Indeks Dst oscylował na poziomie -30 nT przez cały okres obserwacji. Z analizy wykluczono stację DE609 ze względu na uszkodzone obserwacje.

Obliczony indeks S_4 wykazuje tendencję wzrostową wraz z kierunkiem obserwacji Cassiopei A przesuwającym się na północ (rysunek 4.22). Na widmach S_4 zaobserwować można wyraźne przesunięcie w czasie wzrostu wartości S_4 powyżej 0,3 ze stacji na stację. Stacje rozlokowane bardziej na północy doświadczają wzmożonych scyntylacji sygnału Cassiopei A wcześniej niż pozostałe.



(a) (b)

Rysunek 4.22: Indeks S_4 obliczony dla obserwacji scyntylacyjnych Cassiopei A ze stacji (a) PL612 (b) DE604.

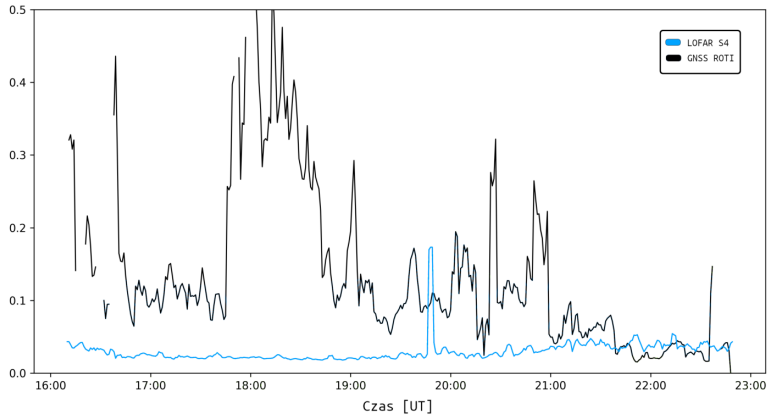


Rysunek 4.23: Mapa ROTI wraz z punktami przebicia jonosfery liniami widoku stacji LOFAR.

Nieregularności jonosfery i lokalizację punktów przebicia przedstawia rysunek 4.23, na którym można zaobserwować granicę owalu zorzowego na podstawie obliczonych wartości ROTI. Podobnie jak w przypadku obserwacji z 14 stycznia 2022, linie widzenia obserwacji Cassiopei A przecinają obszar graniczny owalu zorzowego, ale w tym

przypadku nie wkraczają w sam owal – aktywność geomagnetyczna maleje, a owal cofa się na wyższe szerokości geograficzne.

Z rysunku 4.23 można zauważyć, że obserwacje wykonane na Cygnusie A przez cały okres obserwacji znajdują się w obszarze owalu zorzowego, jednak jedynie szeregi czasowe wykonane dla stacji PL612 mają na tyle ciągłe wartości ROTI dla punktu przebicia obserwacji Cygnusa A, aby możliwe było ich dokładne przeanalizowanie 4.24 (na wyższych szerokościach wskutek ograniczonej dostępności obserwacji GNSS, w mapach ROTI częściej zdarzają się puste piksele).

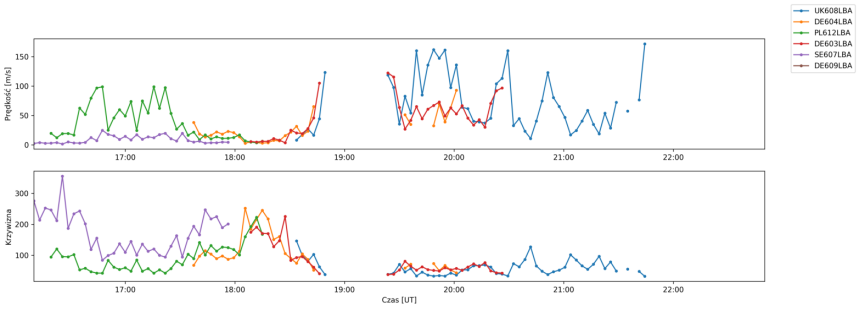


Rysunek 4.24: Szeregi czasowe indeksu S_4 (kolor niebieski) i ROTI (kolor czarny), wyznaczonego dla linii widzenia Cygnus A ze stacji PL612.

Rysunek 4.24 ujawnia zróżnicowane wartości ROTI, których zakres waha się w przedziale 0,1 – 0,4 TECU/min. W tym samym czasie wartości S_4 nie przejawiają większej zmienności i zachowują stabilne wartości na poziomie 0,05. Szereg czasowy wartości ROTI i indeksu S_4 pokazuje, że w obszarze owalu zorzowego nie występują nieregularności w skali Fresnela, powodujące wzrost indeksu S_4, natomiast występuje zjawisko refrakcji odzwierciedlone w ROTI. Istotna różnica występuje po opuszczeniu linii widzenia z obszaru zorzowego, gdyż inaczej niż w przykładzie z 14 stycznia 2022 nie następuje wzrost S_4. Należy jednak pamiętać, że w przypadku z 14 stycznia nie obserwujemy cofania się owalu do wysokich szerokości, tylko dwukrotne przejście punktów przebicia przez jego granicę. W obecnej obserwacji następuje cofnięcie owalu, co implikuje hipotezę, że podczas cofania się owalu zorzowego na jego granicy nie występują

nieregularności w skali do 3.2 km.

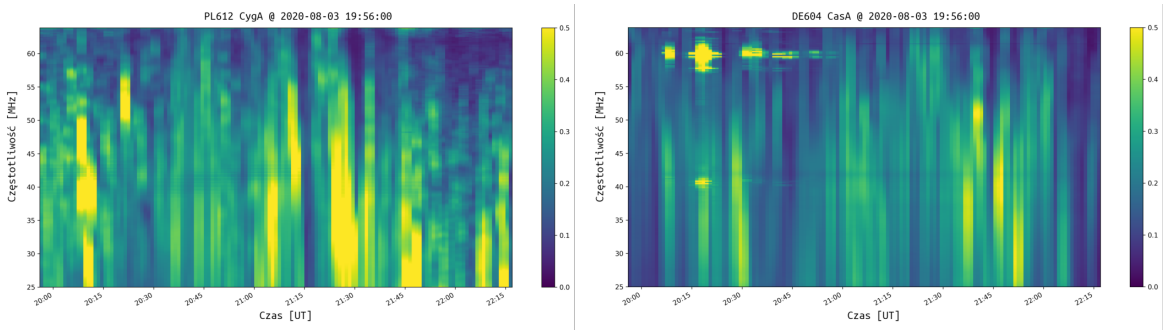
Względne prędkości obserwowanych nieregularności są mocno zróżnicowane 4.25. Zauważalna jest korelacja prędkości struktur obserwowanych na początku obserwacji w obrębie południka, przez który przechodzą linie widoku stacji niemieckich i stacji szwedzkiej. Wyznaczone w tym miejscu prędkości nie przekraczają 50 m/s. Po godzinie 19.30 UT zaobserwować można prędkości znacznie większe, rzędu 50 – 100 m/s. Niski poziom indeksu S_4 (poniżej 0,1) w tym czasie sugeruje, że za cofającym się owalem zorzowym nie występują nieregularności powodujące scyntylacje sygnału. Występowanie łuków w widmach dopplerowych sugeruje przemieszczające się z umiarkowaną prędkością struktury. Na widmach drugiego rzędu opracowanych dla Cygnusa A nie zauważono obecności łuków.



Rysunek 4.25: Krzywizna łuków widocznych w widmach drugiego rzędu oraz wyznaczona na ich podstawie względna prędkość. Parametry wyznaczone dla radioźródła Cassiopeia A.

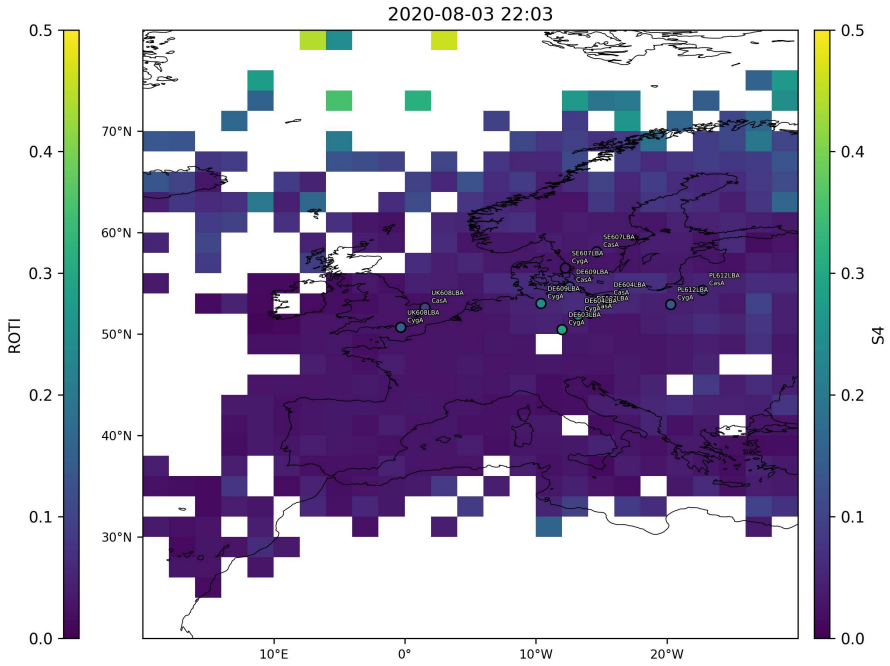
Obserwacje z dnia 3 sierpnia 2020

Obserwacje scyntylacyjne wykonano między 20.00 a 22.15 UT przy niskiej aktywności geomagnetycznej: indeks Kp – 3, Dst oscylowało w granicach -20 nT. Na analizowanych stacjach i radioźródłach indeks S_4 oscyluje w granicach 0,3 – 0,5, wyjątek stanowią obserwacje Cassiopei A na stacjach w Szwecji i Wielkiej Brytanii. Widmo indeksu S_4 z dwóch wybranych stacji przedstawia rysunek 4.26.



(a) (b)

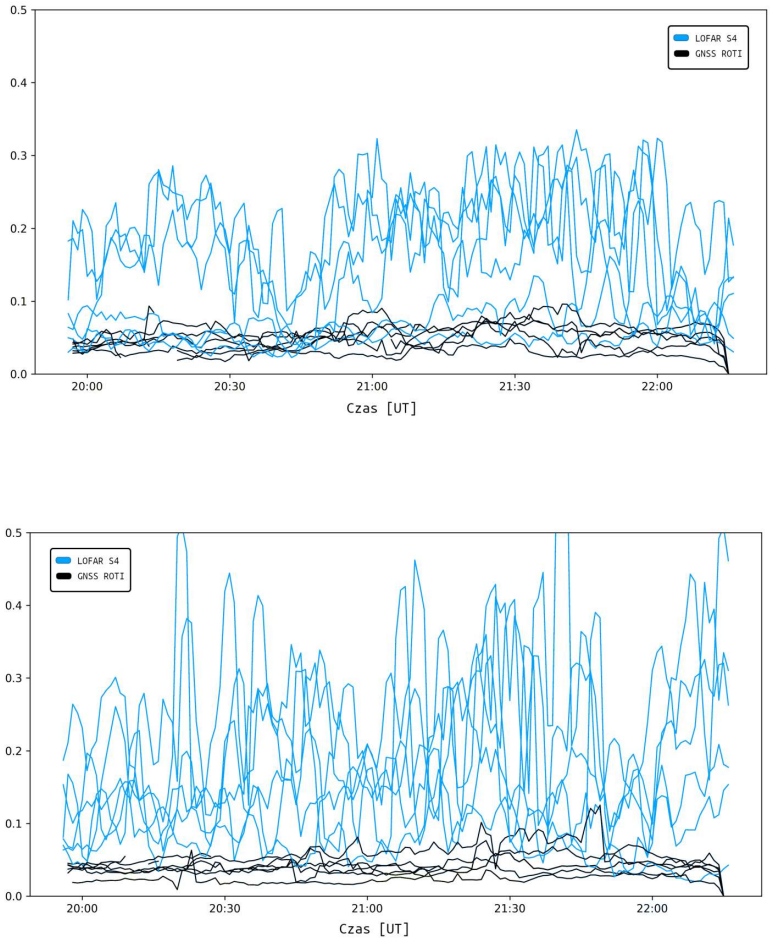
Rysunek 4.26: Indeks S_4 obliczony dla obserwacji scyntylacyjnych radioźródeł: (a) Cassiopei A na stacji PL612 i (b) Cygnus'a A na stacji DE604.



Rysunek 4.27: Mapa ROTI wraz z punktami przebicia jonosfery liniami widoku stacji LOFAR.

Mapa ROTI przedstawia zasięg owalu zorzowego na okres obserwacji LOFAR (rysunek 4.27). Wartości ROTI w punktach przebicia obserwacji radioźródeł przedstawiają szeregi czasowe (rysunek 4.28). Wartości pochodzące z obserwacji GNSS nie wykazują

większych zmian, a ich wartości dla każdego punktu przebicia nie są większe niż 0,1 TECU/min.



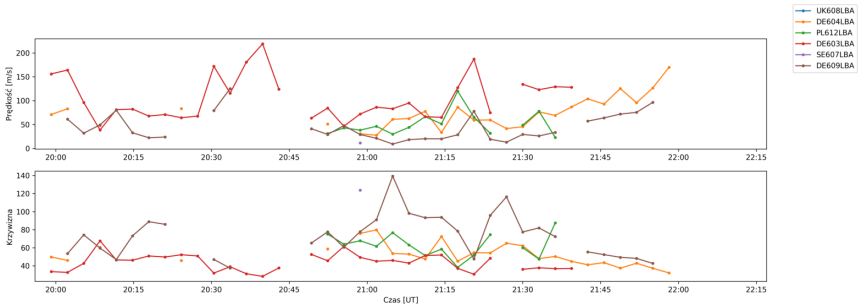
Rysunek 4.28: Szeregi czasowe indeksu S_4 (kolor niebieski) i ROTI (kolor czarny), wyznaczonego dla linii widoku radioźródeł (a) Cassiopei A i (b) Cygnusa A dla wszystkich analizowanych stacji.

Na podstawie wykonanych analiz nie stwierdzono jednoznacznego związku między zasięgiem owalu zorzowego a wzmożonymi scyntylacjami sygnału rejestrowanego przez stację LOFAR. Granica owalu przebiega podczas obserwacji przez północną część Skandynawii, podczas gdy punkty przebicia znajdują się nad środkową Europą. Odwołując się do wcześniej omówionych obserwacji, odległość między czołem owalu, w którym do-

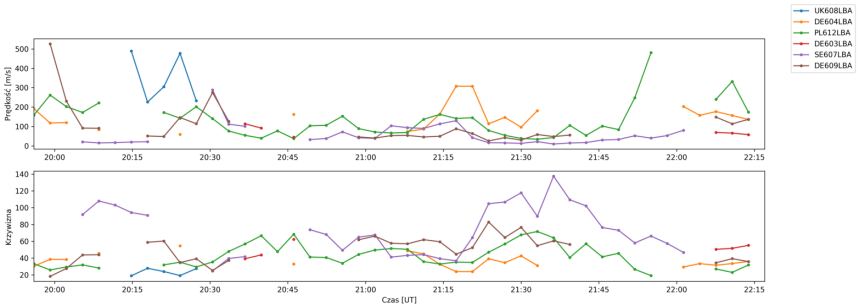
chodzi do powstawania gradientów jonosferycznych widocznych dla GNSS w postaci wzmożonego ROTI, jest zbyt duża, aby były one źródłem powstawania scyntylacji.

W widmach drugiego rzędu zaobserwowano łuki przez cały okres obserwacji dla obu radioźródeł 4.29. Wyznaczone względne prędkości są stałe w czasie i oscylują w granicy 100 – 150 m/s dla obu celów.

Prawdopodobnym wytłumaczeniem pochodzenia nieregularności jonosferycznych obserwowanych może być niestabilność Perkinsa. Argumentem przemawiającym za hipotezą jest pora letnia, umiarkowana aktywność geomagnetyczna oraz czas obserwacji (niedługo po zmierzchu), czyli warunki, w których zazwyczaj występuje zjawisko niestabilności Perkinsa na średnich szerokościach geograficznych.



(a) Cassiopeia A



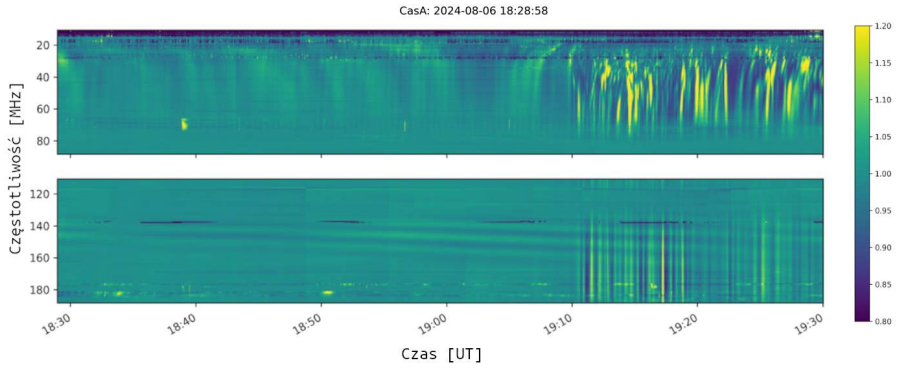
(b) Cygnus A

Rysunek 4.29: Krzywizna łuków widocznych w widmach drugiego rzędu oraz wyznaczona na ich podstawie względna prędkość.

Obserwacje z dnia 6 sierpnia 2024

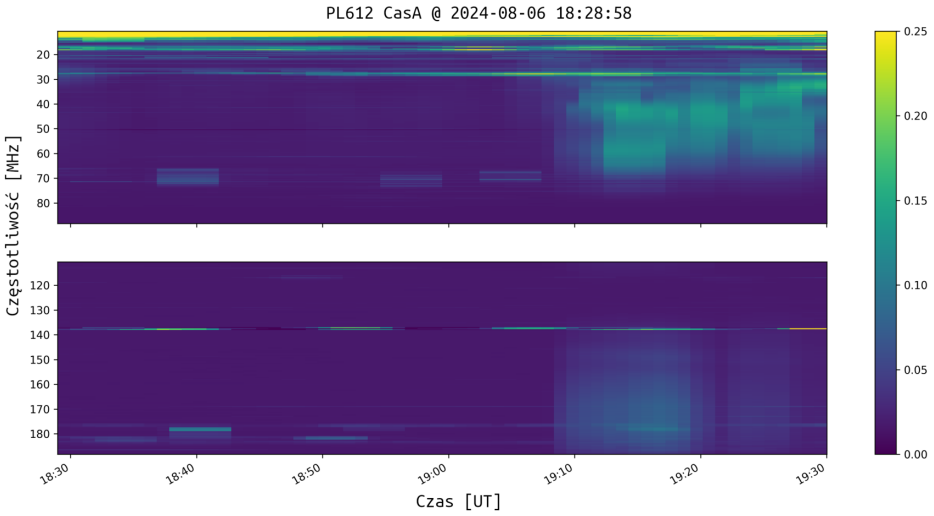
Obserwacje z 6 sierpnia 2024 zostały wykonane w trybie pojedynczej stacji dla Cassiopei A podczas niskiej aktywności geomagnetycznej (indeks Kp – 1+, Dst – 0 nT). W trak-

cie obserwacji widmo dynamiczne wykazało scyntylacje sygnału pod koniec obserwacji (rysunek 4.30). Zarówno pasmo LBA i HBA wykazują znaczną scyntylację sygnału.



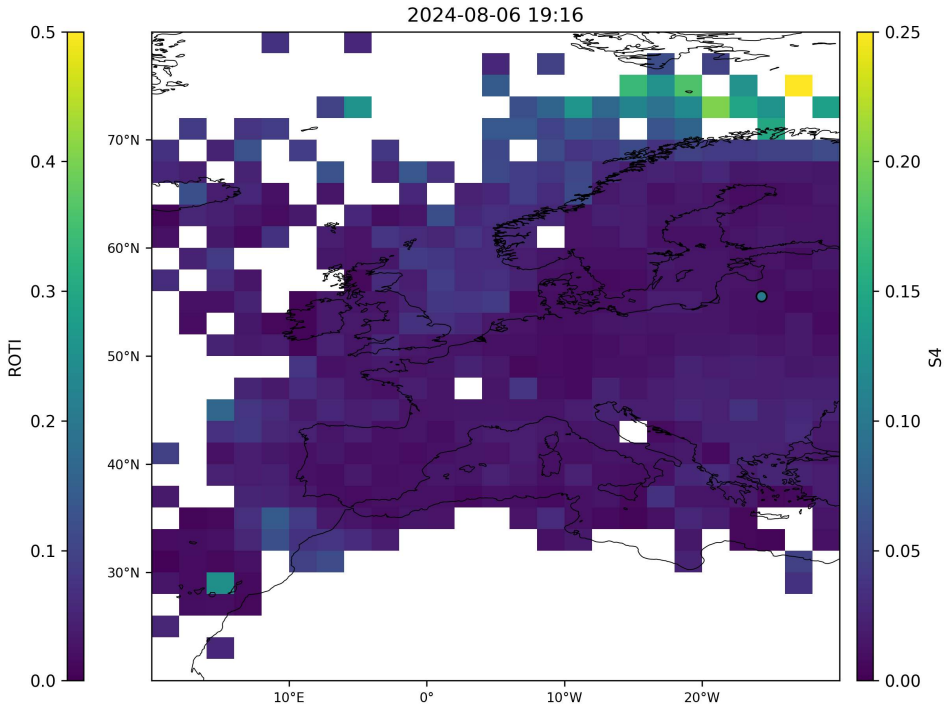
Rysunek 4.30: Widmo dynamiczne obserwacji zarejestrowanych przez stacje PL612 w trybie lokalnym.

Widmo indeksu S_4 wykazuje, wyraźnie większe wartości pod koniec obserwacji (rysunek 4.31), jednak są one niższe niż oczekiwane ze względu na mniejszą moc sygnału otrzymywaną w trybie "357", jest to również rezultat zmniejszenia skali dla obserwacji w trybie lokalnym.

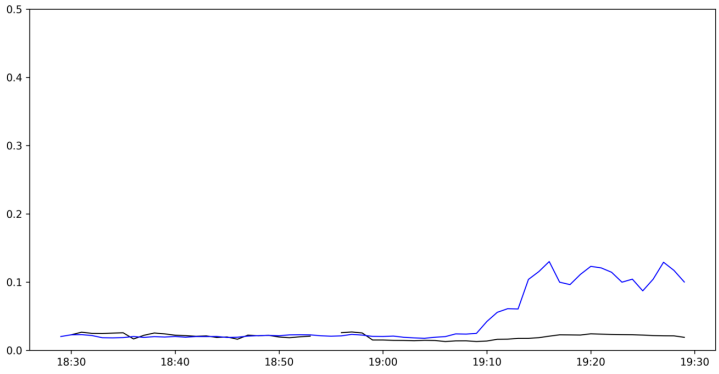


Rysunek 4.31: Widmo indeksu S_4 obliczone dla obserwacji zarejestrowanych przez stacje PL612 w trybie lokalnym.

Wartości ROTI nie przekraczają granicy 0,05 TECU/min przez cały okres obserwacji, co przedstawia rysunek 4.32. ROTI w miejscu punktu przebicia jonosfery przez linię widzenia Cassiopei A przedstawia rysunek 4.33.

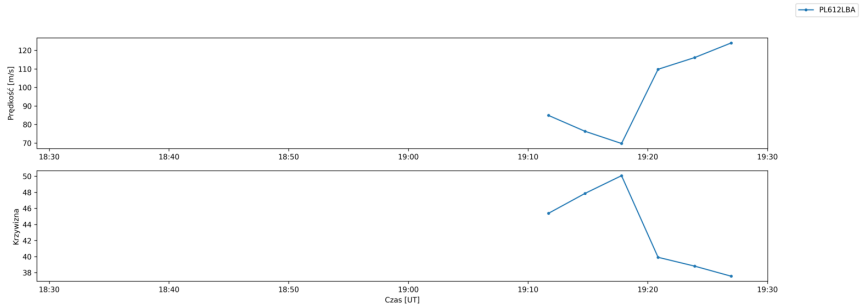


Rysunek 4.32: Mapa ROTI z zaznaczoną linią widoku na Cassiopeie A obserwowaną przez stację PL612.



Rysunek 4.33: Szeregi czasowe indeksu S_4 (kolor niebieski) i ROTI (kolor czarny), wyznaczonego dla linii widoku Cassiopei A ze stacji PL612.

Widma drugiego rzędu ujawniły w czasie wzrostu indeksu S_4 łuki (rysunek 4.34). Na podstawie ich krzywizn obliczono przybliżone względne prędkości przemieszczania się struktur, które wynosiły w granicach 100 m/s. Skala nieregularności w przypadku obserwacji wykonywanych modem "357"jest bardziej precyzyjna do określenia. Biorąc pod uwagę skalę Fresnela dla częstotliwości HBA, otrzymujemy przedział 1080 m – 1320 m (kolejno dla częstotliwości 120 MHz i 180 MHz). Zgodnie z twierdzeniem, obserwowana nieregularność powinna mieć poniżej 1080 m w skali przestrzennej.



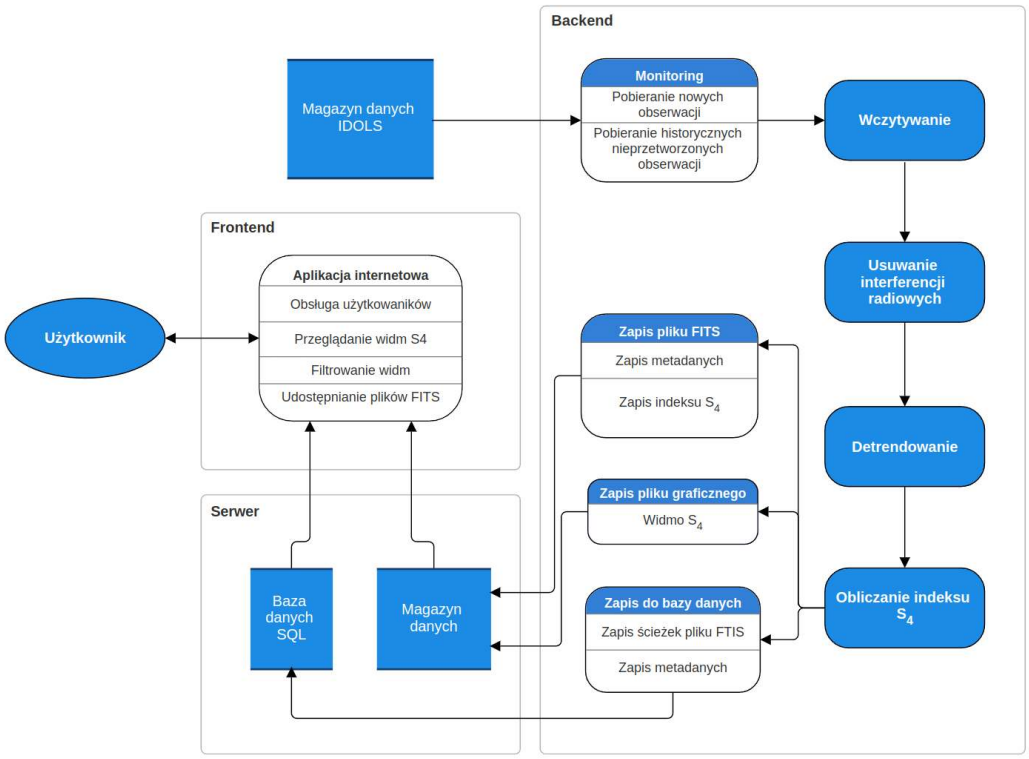
Rysunek 4.34: Krzywizna łuków widocznych w widmach drugiego rzędu oraz wyznaczona na ich podstawie względna prędkość.

4.5 S_4 Pipeline

Przeprowadzone analizy znalazły praktyczne zastosowanie w zintegrowanym zbiorze oprogramowania (ang. *pipeline*) do przetwarzania obserwacji scyntylacyjnych wykonywanych w ramach inicjatywy IDOLS (z ang. *Incremental Development of LOFAR Space-weather*) (Zhang i in., 2022). W programie IDOLS jedna z centralnych stacji, o kodzie CS021, została odłączona od trybu międzynarodowego i działa w trybie pojedynczej stacji. Głównym jej zadaniem jest obserwacja Słońca i pogody kosmicznej. W dziennych obserwacjach na stacji IDOLS skonstruowane są dwie dwiązki, z których jedna z nich skierowana na Słońce, a druga na Cassiopeię A. W trakcie nocy stacja obserwuje wyłącznie Cassiopeię A. Dzięki temu otrzymano całodobowe obserwacje scyntylacyjne z jednej stacji. Stwarza to doskonałą możliwość do monitorowania pogody kosmicznej za pomocą parametru S_4.

We współpracy z badaczami z Uniwersytetu w Bath w Wielkiej Brytanii oraz naukowcami z ASTRON w Niderlandach, autor pracy stworzył pipeline przetwarzający obserwacje w dobowym czasie rzeczywistym oraz stronę internetową, udostępniającą

wyliczony parametr S_4. W ramach pipeline'u opracowane zostały dwa pakiety oprogramowania: algorytm do wyliczenia parametru S_4 oparty na metodologii z publikacji autora (Flisek i in., 2023), (silnik obliczeniowy działający jako *backend*) oraz warstwa wizualizacyjna – strona internetowa[1] (*frontend*). Dokładny przepływ danych od obserwacji pozyskanych z stacji IDOLS do docelowego użytkownika przestawia rysunek 4.35.

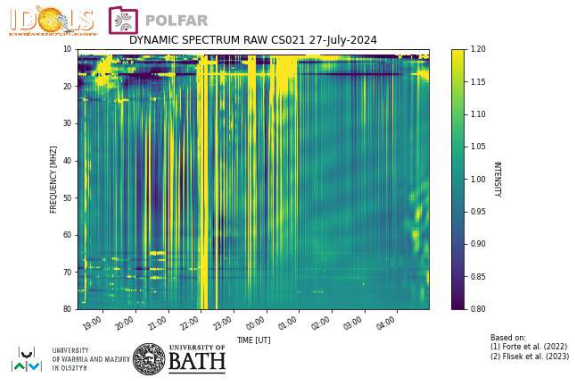


Rysunek 4.35: Diagram przepływu danych z rozróżnieniem na warstwy *frontend* i *backend*.

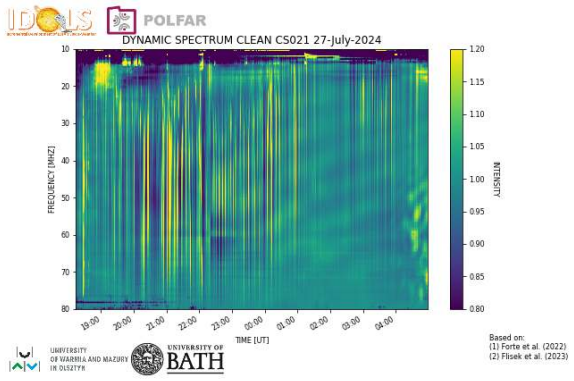
Warstwa *backend* odpowiada za pobieranie, przetwarzanie, zapis parametru S_4 w formie obrazka oraz plików FITS (z ang. *Flexible Image Transport System*) oraz zapis do bazy danych. Pobieranie obserwacji odbywa się wykorzystując otwarty dostęp do obserwacji z IDOLS poprzez protokół HTTPS (z ang. *Hypertext Transfer Protocol Secure*) ze strony[2]. Pobrane dane w formacie FITS są poddane przetworzeniu według schematu

[1] http://wgipb-dc.uwm.edu.pl:25010/
[2] https://spaceweather.astron.nl/SolarKSP/data/

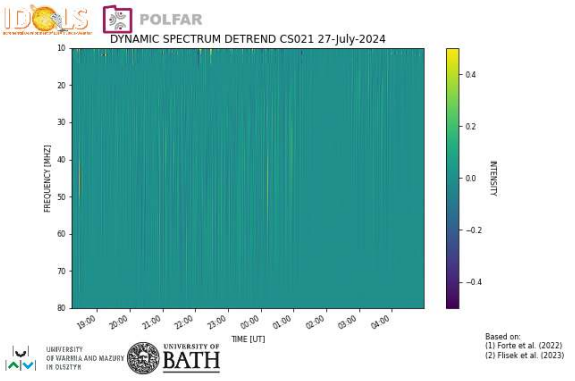
opisanego w rozdziale "Przetwarzanie danych". Na każdym z etapów (surowe obserwacje (rys. 4.36a), oczyszczone z szumów radiowych (rys. 4.36b), zdetrendowanych (rys. 4.36c) i obliczonego indeksu S_4 (rys. 4.36d)) zapisywane jest obraz przedstawiający widmo dynamiczne.



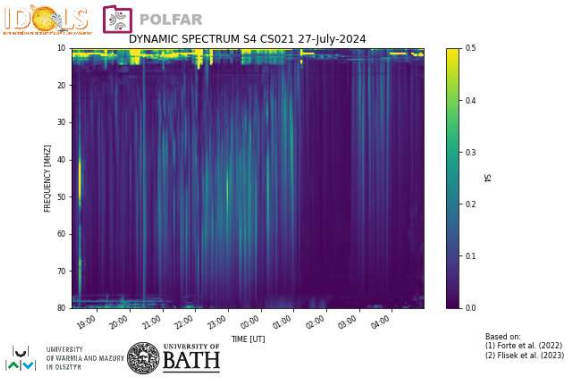
(a) Surowe obserwacje



(b) Obserwacje bez szumów radiowych



(c) Zdetrendowane obserwacje



(d) Widmo S_4

Rysunek 4.36: Poszczególne etapy obróbki obserwacji ze stacji IDOLS (CS021) w pipeline S_4

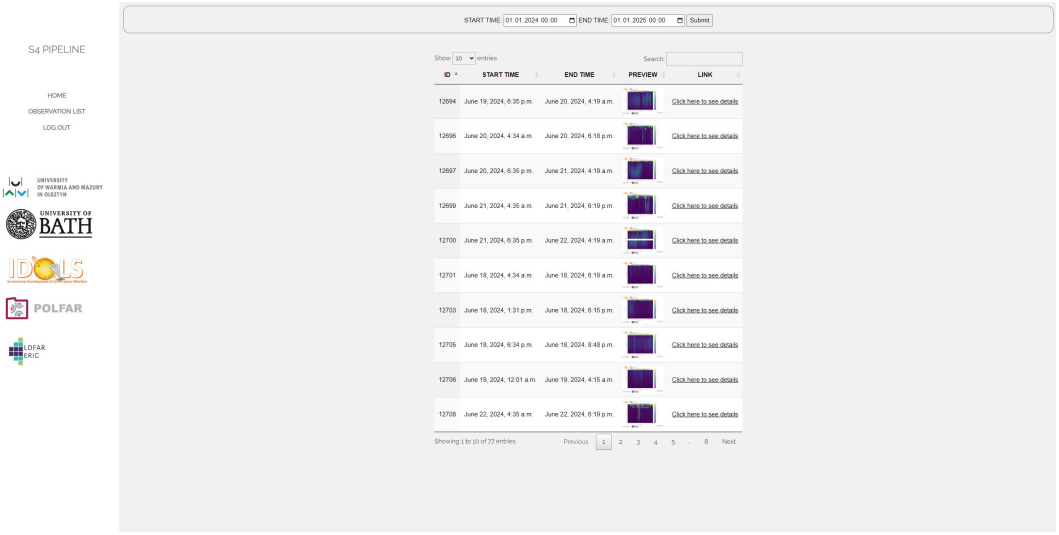
Oprócz samych obrazów program zapisuje widmo dynamicznego indeksu S_4 do plików w formacie FITS. Poza fizycznymi plikami warstwa *backend* wpisuje dane do bazy danych, którą współdzieli z warstwą wizualizacyjną. Dodatkowo algorytm wylicza z każdego widma S_4 podstawowe statystyki: maksimum, minimum, średnią oraz medianę (rysunek 4.37).

Warstwa wizualizacyjna (*frontend*) jest oparta na silniku Django, który wykorzystuje bazę danych SQL (z ang. *Structured Query Language*). Główna strona zawiera

menu z odnośnikami do poszczególnych podstron oraz wykresy z podstawowymi statystykami.



Rysunek 4.37: Strona internetowa udostępniająca widma S_4 – widok główny.

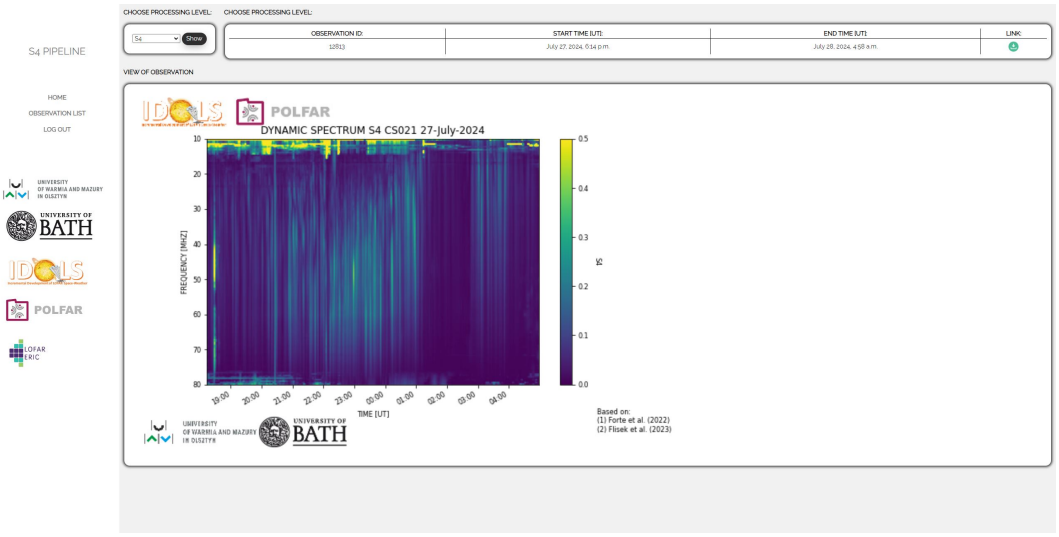


Rysunek 4.38: Podstrona witryny internetowej – lista obserwacji.

Podstawową podstroną serwisu jest lista obserwacji (ang. *Observation list*), która zawiera tabelę z wszystkimi obserwacjami. W tabeli znajdują się podstawowe metadane (identyfikator obserwacji zgodny z tym przypisanym na stronie IDOLS, czas rozpoczęcia i zakończenia obserwacji) (rys. 4.38). Dodatkowo tabela zawiera szybki podgląd widma S_4, który po kliknięciu powiększa się do pełnego rozmiaru okna. W każdym wierszu

tabeli znajduje się odnośnik do szczegółów obserwacji. Ponadto na górze strony znajduje się formularz filtrujący obserwacje ze względu na wybrany okres.

Ostatnim elementem jest szczegółowy widok obserwacji (rys. 4.39), do którego użytkownik przenosi się z odnośnika w tabeli. W części centralnej widoczne jest widmo indeksu S_4, które użytkownik może zmienić na dowolny inny etap obserwacji, dostępny z listy znajdującej się w lewym górnym rogu strony. Obok znajduje się powtórzenie metadanych obserwacji z tabeli oraz odnośnik do pliku FITS, zawierającym widmo S_4.



Rysunek 4.39: Szczegółowy widok obserwacji.

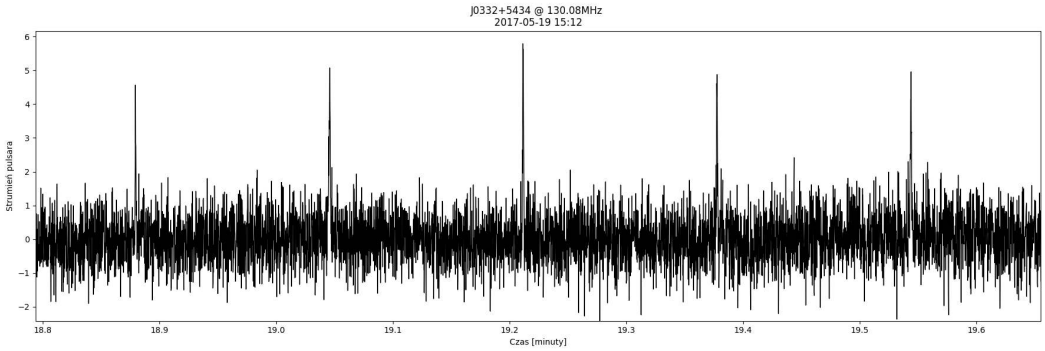
Rozdział 5

Wpływ jonosfery na obserwacje pulsarów

Istotnym czynnikiem badań jonosfery jest jej wpływ na jakość obserwacji źródeł astrofizycznych. Oprócz obserwacji scyntylacyjnych Cassiopei A i Cygnusa A, które zorientowane są na badania jonosfery, jej wpływ można zaobserwować w obserwacjach innych radioźródeł – pulsarów (Błaszkiewicz i in., 2021). Pulsary są wielokrotnie słabiej widzialne w paśmie radiowym niż Cassiopeia A i Cygnus A, dlatego nawet minimalny wpływ struktur jonosferycznych na ich obserwacje ma duże znaczenie.

5.1 Algorytm przetwarzania danych

Podobnie jak tryb obserwacji scyntylacyjnych, tryb obserwacji pulsarów przy pomocy radioteleskopu LOFAR opiera się na cyfrowej konstrukcji wiązki (*beamforming*). Specyfika sygnałów odbieranych od pulsarów, w przeciwieństwie do Cygnusa A i Cassiopei A, polega na ich dyskretnym charakterze. Nie emitują bowiem jednostajnego sygnału, a szereg pulsów, co zostało wyjaśnione w Rozdziale 2.3. Wskutek rotacji gwiazdy neutronowej do detektorów dociera pulsacyjny sygnał o charakterystycznej dla każdego pulsara okresowości (rysunek 5.1). Widoczne pojedyncze szpilki to promieniowanie pulsara. Znaczącym utrudnieniem jest wielokrotnie słabszy sygnał docierający do anten niż w przypadku obserwacji opisanych w poprzednim rozdziale.



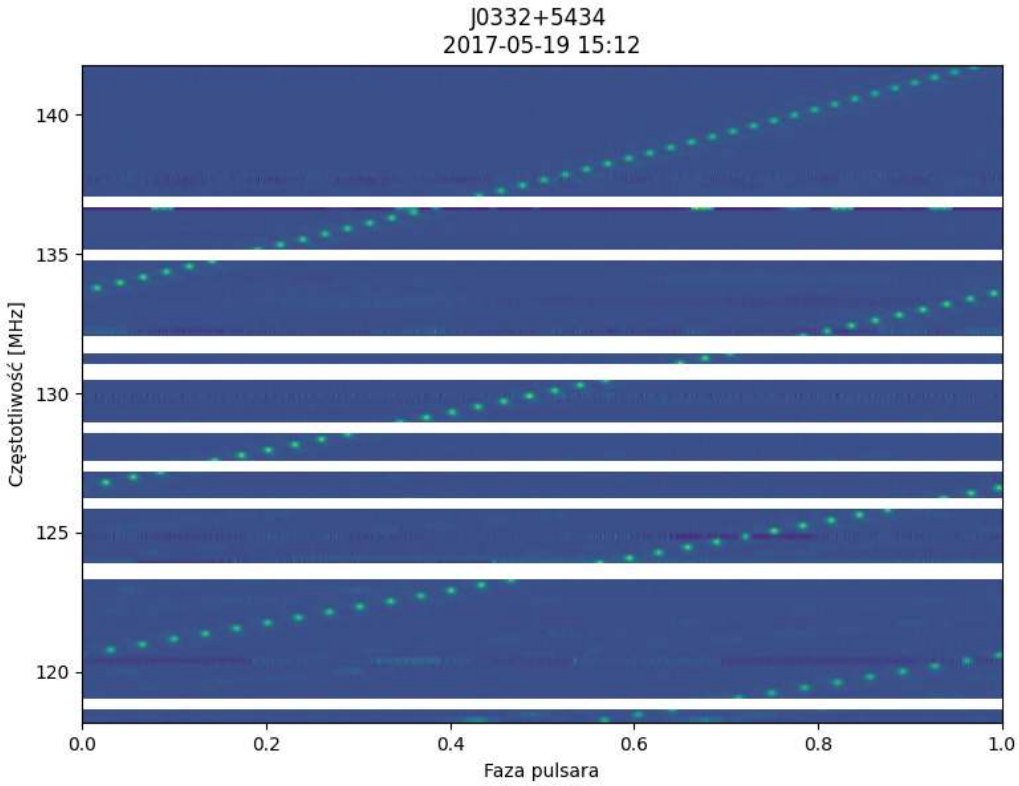
Rysunek 5.1: Strumień pulsara J0332+5434 dla pojedynczej częstotliwości (130.08 MHz) zarejestrowany przez stację PL612 w Bałdach.

Oprogramowanie LuMP (*LOFAR und MPIfR*[1] *Pulsare*) zainstalowane na stacji odpowiada za nagrywanie strumienia sygnału docierającego ze stacji. W przypadku stacji PL612 LCU wysyła całkowity sygnał podzielony na trzy strumienie obserwacji (*lane*) na maszyny obliczeniowe, noszące nazwy lofar1 i lofar2. LuMP zainstalowany jest na obu maszynach i odpowiada za zapisanie strumieni do odpowiedniego formatu danych. Na maszynę lofar1 wysyłany jest jeden strumień, zaś na lofar2 – trzy, z czego skrajne części są usuwane ze względu na interferencje radiowe. LuMP zapisuje strumienie do formatu zdolnego do odczytania przez DSPSR (z ang. *Digital Signal Processing Software for Pulsar Astronomy*) (van Straten i Bailes, 2011). Etap przetwarzania zapisanych obserwacji odbywa się na maszynie lofar1 w czasie rzeczywistym.

Promieniowanie radiowe emitowane przez pulsar przechodzi przez zjonizowany ośrodek międzygwiazdowy (z ang. *ISM – Interstellar Medium*), które powoduje dyspersje fal elektromagnetycznych (rys. 5.2), wpływając na zależną od częstotliwości prędkość fali (Hankins, 1971; Hankins i Rickett, 1975). W obserwacjach radioteleskopem LOFAR posłużono się znanymi a priori wartościami miary dyspersji (DM – z ang. *disspersion measure*). Informacje o DM dla poszczególnych pulsarów dostępne są w ATNF Pulsar Catalogue (Manchester i in., 2005), który jest archiwum gromadzącym parametry pulsarów na podstawie opublikowanych wyników. DSPSR oprócz korekty sygnału pulsara ze względu na ośrodki międzygwiazdowe, wykonuje również składanie sygnału (ang. *folding*) z pojedynczych faz pulsara (ang. *phase bin*) zawierających wycentrowany puls. Każda faza posiada długość czasową, otrzymaną z czasowych modeli pulsara (Hobbs, Edwards i Manchester, 2006). Składanie polega na zintegrowaniu n faz, dzięki czemu sy-

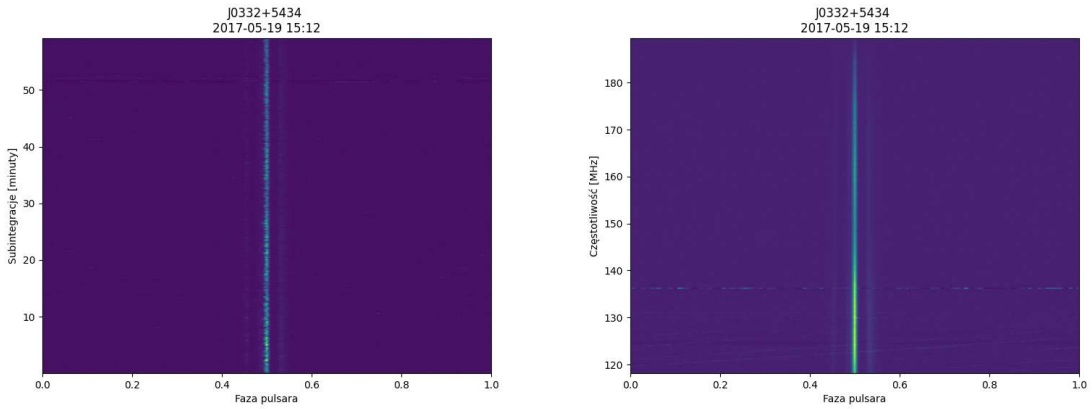
[1]Max Planck Institute for Radio Astronomy

gnał pulsara zostaje wzmocniony, a przypadkowy szum tła zredukowany. Zestaw uśrednionych próbek nazywamy subintegracją (z ang. *subintegration*).



Rysunek 5.2: Sygnał pulsara J0332+5434 przed uwzględnieniem miary dyspersji. Poziome linie to pozostałość po procesie usuwania zakłóceń.

Każde z trzech pasm przetwarzane jest przez oprogramowanie DSPSR osobno, a następnie – przy wykorzystaniu oprogramowania PSRCHIVE (Hotan, Straten i Manchester, 2004) – przeprowadzane jest wstępne usunięcie szumów oraz integracja pasm do jednego pliku. Standardowo dane pulsara zapisywane są w postaci trójwymiarowej macierzy, w której kolejne osie odpowiadają częstotliwości, fazie pulsara oraz kolejnym subintegracjom. Standardowo widmo pulsara analizowane jest w dwóch dziedzinach: subintegracja–faza (rysunek 5.3a) lub częstotliwość–faza (rysunek 5.3b). W przypadku pierwszego rodzaju macierz danych ulega uśrednieniu wzdłuż osi częstotliwości, natomiast druga uśrednia wszystkie subintegracje.



(a) Obserwacje pulsara uśrednione po częstotliwości.

(b) Obserwacje pulsara uśrednione po subintegracjach.

Rysunek 5.3: Obserwacje pulsara J0332+5434 przedstawione w dwóch domenach: subintegracje–faza i częstotliwość–faza.

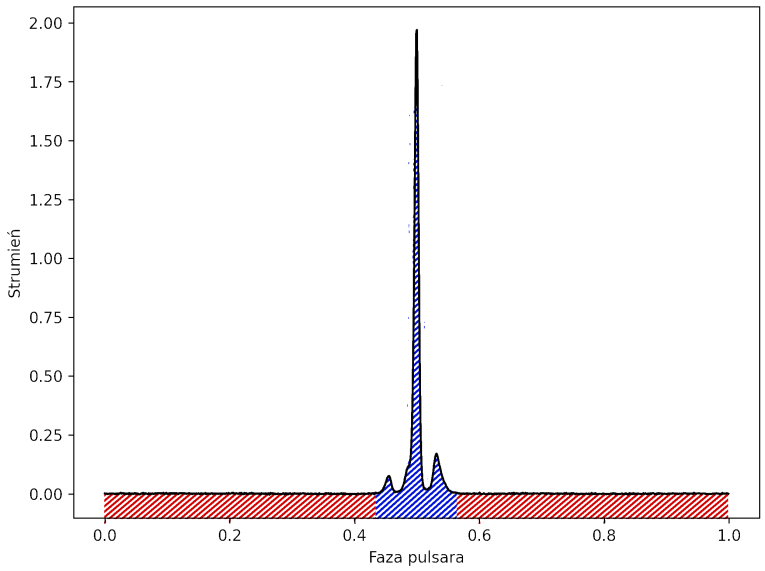
5.2 Widma dynamiczne pulsarów bazujące na S/N

Podobnie jak w przypadku obserwacji Cassiopei A i Cygnusa A, obserwacje pulsara możemy przedstawić w postaci widma dynamicznego. Proces tworzenia widma dynamicznego pulsara zaczyna się od wyznaczenia parametru S/N (z ang. *Signal-to-Noise*), czyli stosunku sygnału do szumu. Na rysunku 5.4 przedstawiono zintegrowany profil pulsara (uśredniony w czasie i częstotliwości), na którym przedstawiono sygnał pulsara (kolor niebieski) oraz szum (kolor czerwony).

Podobnie do profilu pulsara wygląda pojedyncza subintegracja, ale różnica widoczna jest w poziomie sygnału, który w pojedynczej subintegracji jest znacznie mniejszy. Wyznaczenie S/N polega na wyznaczeniu stosunku scałkowanego pulsu do uśrednionego poziomu szumu:

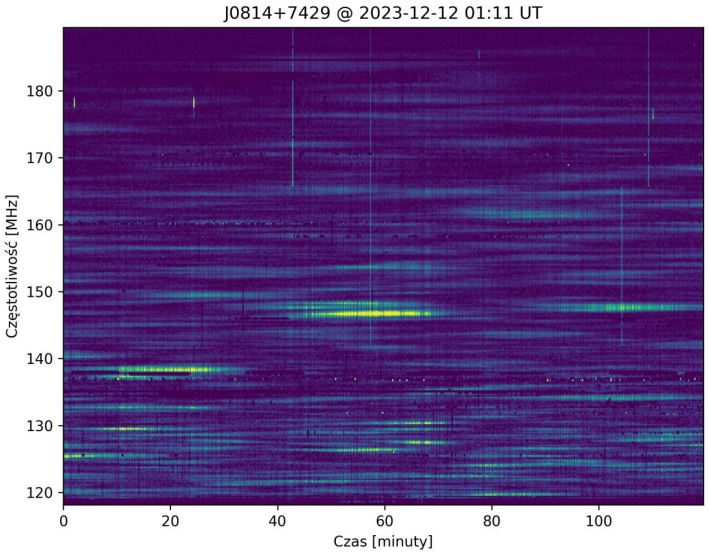
$$S/N = \frac{\sum_i^{n_{on}} I_i^{on} - \langle I^{off} \rangle}{\sigma I^{off} \cdot \sqrt{n_{off}}^{-1}} \tag{5.1}$$

gdzie $\langle I^{off} \rangle = \frac{\sum_i^{n_{off}} I^{off}}{n_{off}}$.



Rysunek 5.4: Profil pulsara z przedstawionym obszarem sygnału i szumu.

Przykład widma sygnału do szumu przedstawia rysunek 5.5.



Rysunek 5.5: Widmo S/N wykonane dla pulsara J0814+7429, zaobserwowanego przez stację PL612 w trybie lokalnym.

Warto nadmienić, że niezwykle istotny jest dobór czasu integracji, w ramach którego do wynikowych i podlegających dalszej analizie plików zapisywane są dane uśrednione dla n pulsów. W trybach obserwacji pulsarów istnieje możliwość obserwacji każdego z poszczególnych pulsów oddzielnie – próbkowanie jest dokładnie takie jak okres pulsara. Jednakże sama natura powstawania emisji radiowej w okolicach gwiazdy neutronowej powoduje fluktuacje sygnału w sensie niewielkich zmian strumienia emitowanego w wiązce wydostającej się okolic biegunów magnetycznych gwiazdy neutronowej (Rysunek 2.4). Aby tego uniknąć wprowadzona została dwuetapowa integracja:

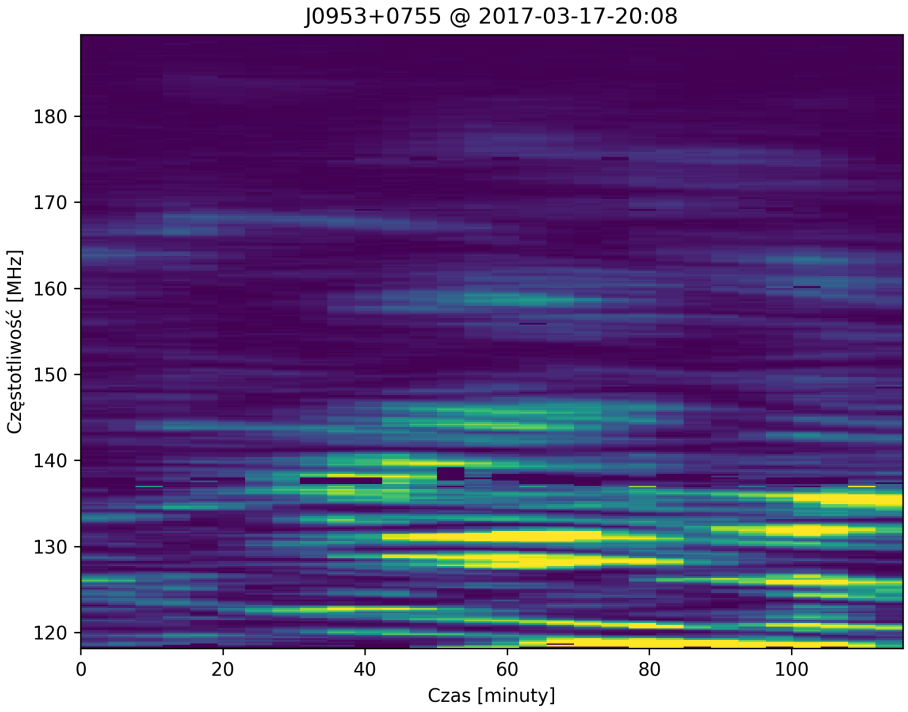
- integracja 10-sekundowa stosowana dla większości obserwowanych pulsarów i wykorzystywana do otrzymywania widm dynamicznych pierwszego rzędu,
- integracja 60-sekundowa wykorzystywana dla analizy widm dynamicznych drugiego rzędu dla pulsara J0814+7429

Integracja polega na nakładaniu na siebie kilku (minimum 3) pulsów, celem wyznaczenia pulsu średniego, branego pod uwagę w pomiarach. W prezentowanym przypadku okresy dla obserwowanych pulsarów wynoszą od około 0.7 do 1.3 sekundy. Tak wyznaczony profil średni jest mniej podatny na efekty związane z samą emisją, a jednocześnie zapewnia na tyle gęste próbkowanie danych w czasie, że daje możliwość wychwycenia zmian w widmach dynamicznych, które mogą być powiązane choćby z niejednorodnościami w jonosferze i wywoływanymi przez nie scyntylacjami sygnału.

5.3 Analiza i wyniki obserwacji pulsarów

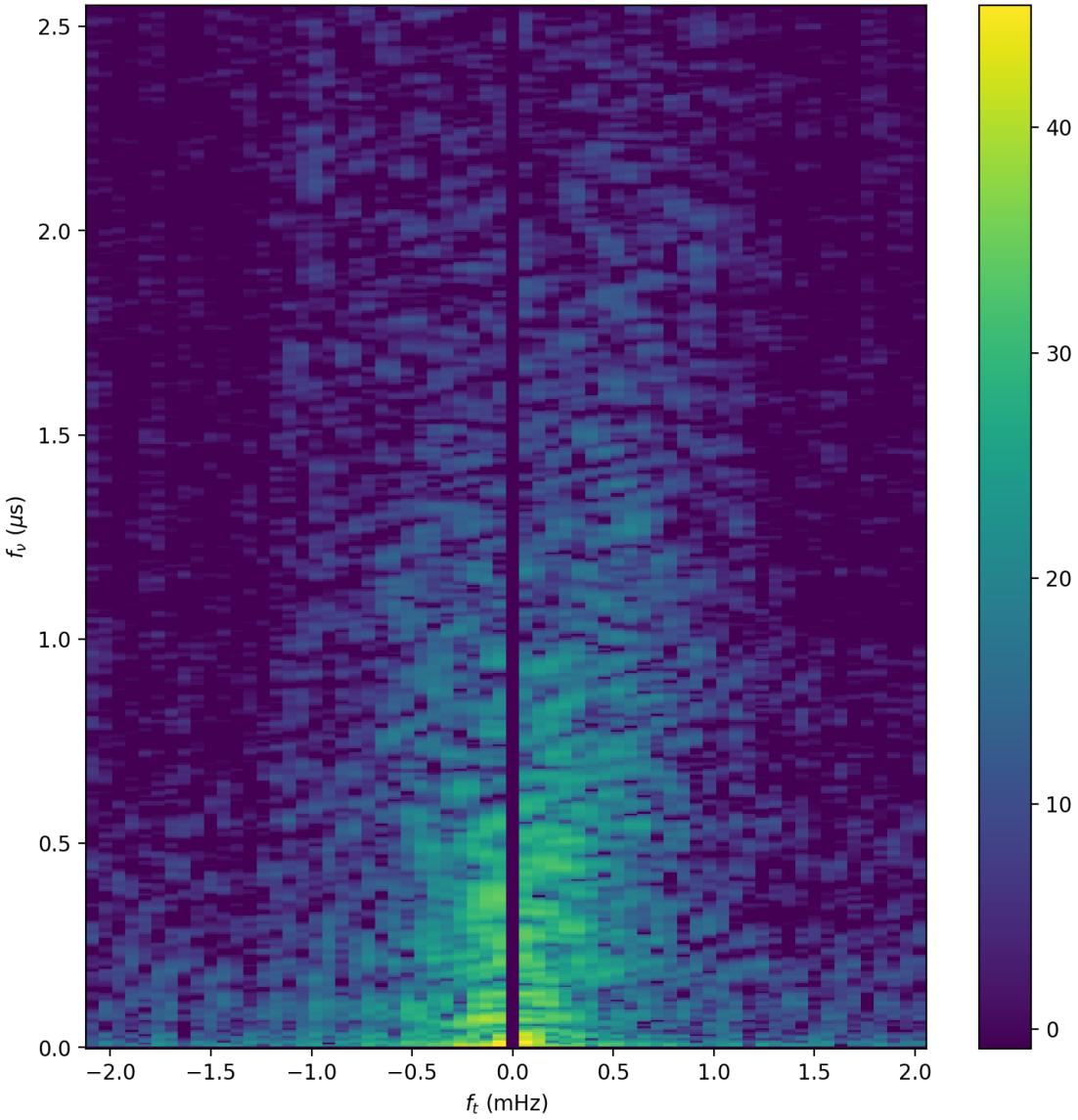
Fale radiowe emitowane przez pulsary ulegają zjawiskom rozpraszania, refrakcji i soczewkowania podróżując przez ośrodki międzygwiazdowe, międzyplanetarne oraz jonosferę. Obserwacje pulsarów są wykorzystywane do analiz ośrodków międzygwiazdowych od ponad 50 lat (Rickett, 1977), również obserwacje pulsarów wykonane przez radioteleskopy LOFAR służą badaniu tych ośrodków (Filothodoros i in., 2024; Wu, Z. i in., 2022).

Skutek propagacji fali radiowej pulsara przez ośrodek międzygwiazdowy widoczny jest wyraźnie w widmach S/N, w postaci scyntyli (rysunek 5.6). Scyntyle ukazują się na widmie pod postacią wąskich w częstotliwości i okresowo występujących owalnych struktur.



Rysunek 5.6: Widmo S/N przedstawiające scyntyle pulsara J0953+0755, zaobserwowanego przez stację PL612 w trybie lokalnym.

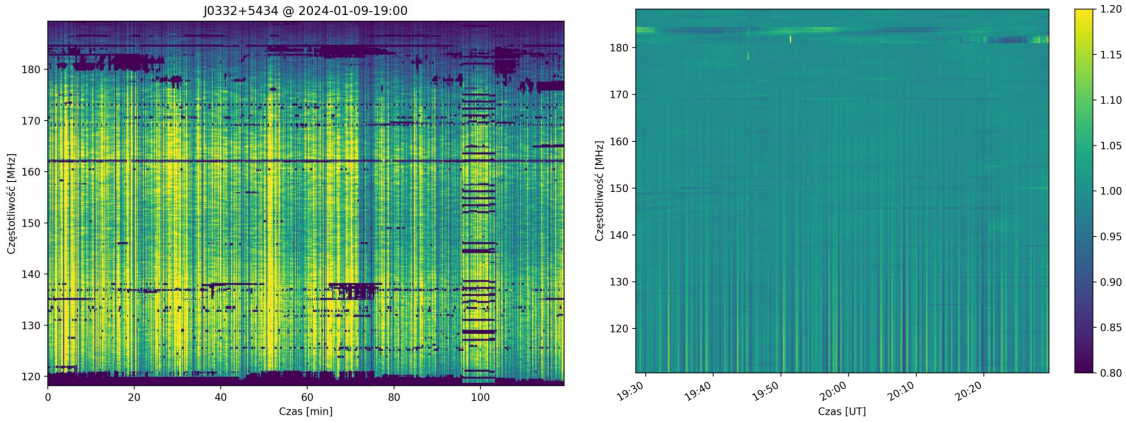
Obserwacje, dla których zostało wykonane widmo (rysunek 5.6) zostały wykonane dla subintegracji wynoszącej 60 sekund. Na podstawie widma S/N wyliczono widmo drugiego rzędu (rysunek 5.7), które ujawniło łuk. Powstawanie łuku wiąże się z interferencją nierozproszonych i rozproszonych promieni w punkcie przecięcia linii widoku z ośrodkiem, które w widmie drugiego rzędu ukazuje się jako różnica w czasie dotarcia fali spowodowana pokonaniem różnej odległości oraz różnicy w częstotliwości wynikającej z przesunięcia dopplerowskiego (Cordes i in., 2006).



Rysunek 5.7: Widmo drugiego rzędu zawierające łuk, wykonane na podstawie obserwacji pulsara J0953+0755, zaobserwowanego przez stację LOFAR PL612.

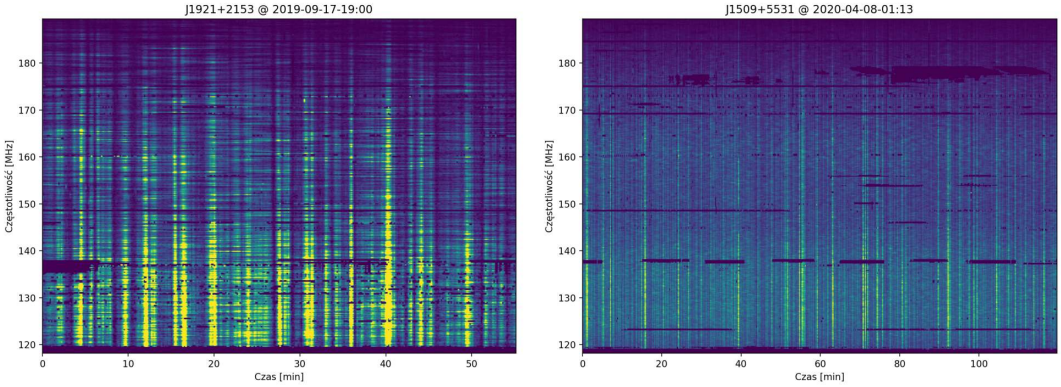
Fale radiowe emitowane przez pulsary oprócz propagacji przez ośrodek międzygwiazdowy przechodzą również przez inny zjonizowany ośrodek – jonosferę. Jej wpływ na obserwacje pulsarów został opisany w (Błaszkiewicz i in., 2021) w odniesieniu do obserwacji GNSS – analizy te zostały wykonane przez autora niniejszej rozprawy. Przy analizie widm dynamicznych pulsarów, wyraźnie widać pionowe wzmocnienia i spadki poziomu rozciągające się przez całe pasmo (rysunek 5.8a). Pionowe struktury zdecy-

dowanie przypominają obserwacje scyntylacyjne na pasmie HBA (rysunek 5.8b), które zostały w tym przypadku uśrednione do rozdzielczości 10 sekund.



(a) (b)

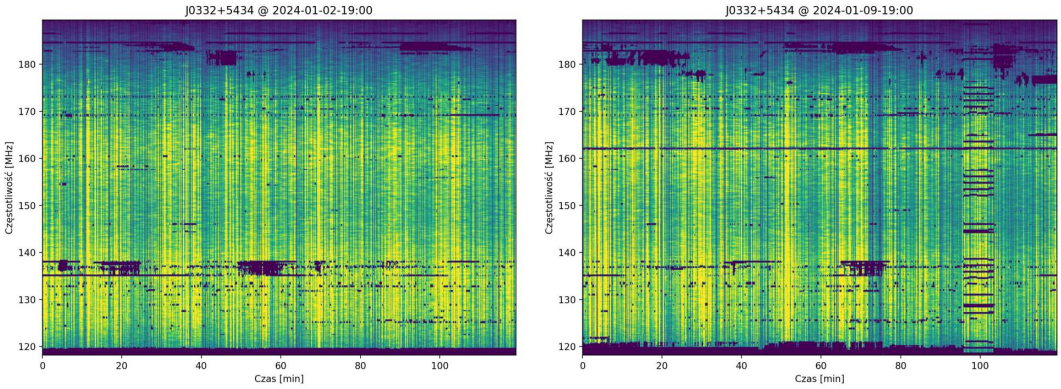
Rysunek 5.8: (a) Widmo dynamiczne pulsara J0332+5434 oraz (b) obserwacje scyntylacyjne Cassiopei A. Obserwacje wykonane przez stację PL612 w trybie lokalnym.



Rysunek 5.9: Widmo dynamiczne pulsarów (a) J1921+2153 i (b) 1509+5531 przedstawiające fluktuacje sygnału do szumu.

Obserwowane fluktuacje stosunku sygnału do szumu wykazują się dużą zmiennością w czasie. Podobne fluktuacje sygnału zaobserwowane zostały również na innych pulsarach J1509+5531 i J1921+2153 (rysunek 5.9). Fluktuacje nie są skorelowane ze sobą pod względem pory dnia, co pokazuje rysunek 5.10. W odstępie tygodnia widmo dyna-

miczne tego samego pulsara o tej samej porze dnia znacząco się różni. Brak czasowej powtarzalności 5.10 może świadczyć o jonosferycznym pochodzeniu zaobserwowanych struktur. Różnice wynikałyby z nieokresowych, incydentalnych zaburzeń w jonosferze, spowodowanych choćby zaburzeniami pola magnetycznego Ziemi.

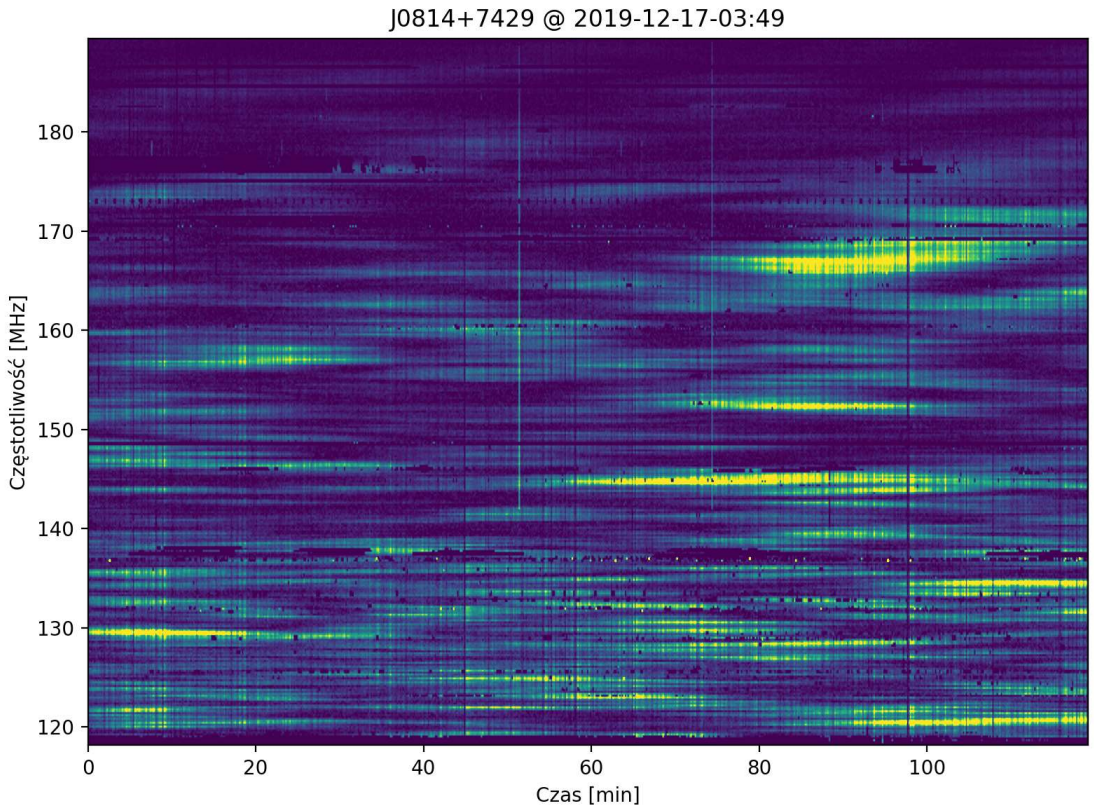


(a) (b)

Rysunek 5.10: Widmo dynamiczne pulsara J0332+5434 na godzinę 19.00 UT w dniu (a) 2 styczeń 2024 i (b) 9 styczeń2024.

Podobne fluktuacje zaobserwowano również dla pulsara J0814+7429 (rysunek 5.11), w przypadku którego obserwacje wykonano z subintegracją 10-sekundową. Na widmie widać nałożone na siebie scyntyle, wynikające z propagacji przez ośrodki międzygwiezdne oraz pionowe wzmocnienia i osłabienia sygnału w stosunku do szumu.

Powyższe rozważania skłaniają do postawienia tezy, że obserwowane fluktuacje są konsekwencją propagacji w jonosferze. Występowanie zarówno scytyli, jak i fluktuacji jednocześnie w obserwacjach pulsara J0814+7429, wskazuje jednoznacznie, że obserwowane fluktuacje nie mają swojej genezy w ośrodku międzygwiezdnym. Szybka dynamika zmian widoczna na widmach S/N, zdecydowanie przypomina obserwacje radioźródeł Cassiopei A i Cygnusa A na paśmie HBA, co skłania do założenia, że wzmocnienia i osłabienia sygnału pulsara mogą być spowodowane wpływem jonosfery.



Rysunek 5.11: Widmo dynamiczne pulsara J0814+7429 z widocznymi scytylacji i nałożonymi szerokopasmowymi fluktuacjami.

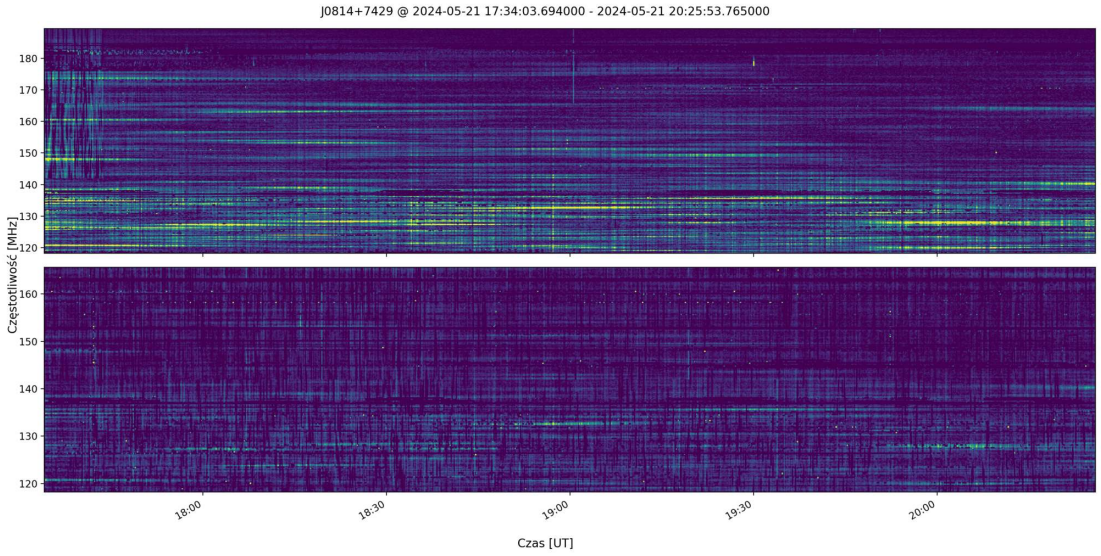
5.4 Symultaniczne obserwacje parą stacji LOFAR

W celu potwierdzenia tezy o fluktuacjach sygnału pulsar mającej genezę w jonosferze zaplanowano eksperyment z wykorzystaniem dwóch stacji LOFAR. W eksperymencie brała udział stacja PL611, znajdująca się w Łazach, zarządzana przez Uniwersytet Jagielloński w Krakowie. W ramach obserwacji wykonano obserwacje czterech pulsarów: J0814+7429, J0332+5434, J1509+5434 i 1921+2153. Należy wspomnieć, że stacja PL611 ma inną konfigurację pola HBA niż reszta stacji międzynarodowych. Ze względu na ukształtowanie terenu pole HBA stacji zawiera jedynie połowę anten, co powoduje, że moc widoczna na widmie dynamicznym jest niższa niż w przypadku choćby PL612. Różnica wzmocnienia obu instrumentów jest zdecydowanie widoczna na widmach sygnałów do szumów.

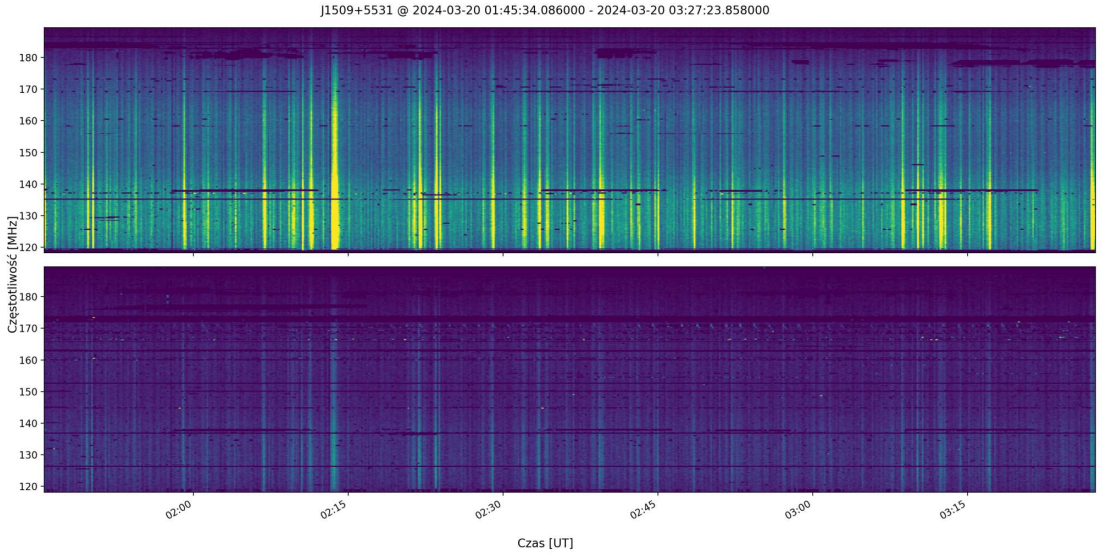
Eksperyment przeprowadzony został w trybie lokalnym obu stacji, czego konsekwencją jest brak synchronizacji zegarów stacji, która obecna jest w trybie międzynarodowym, gdzie zrównywane są momenty rozpoczęcia i zakończenia obserwacji oraz częstotliwość próbkowania z poszczególnych stacji.

W celu synchronizacji czasu ustalono wspólny okres obserwacji obu stacji, a następnie wyznaczono epoki obserwacyjne na podstawie założonej długości subintegracji (10 sekund). Ostatecznie obserwacje zsynchronizowano przy pomocy interpolacji liniowej, dzięki czemu otrzymano dane o równym okresie obserwacji i z tożsamą rozdzielczością czasową.

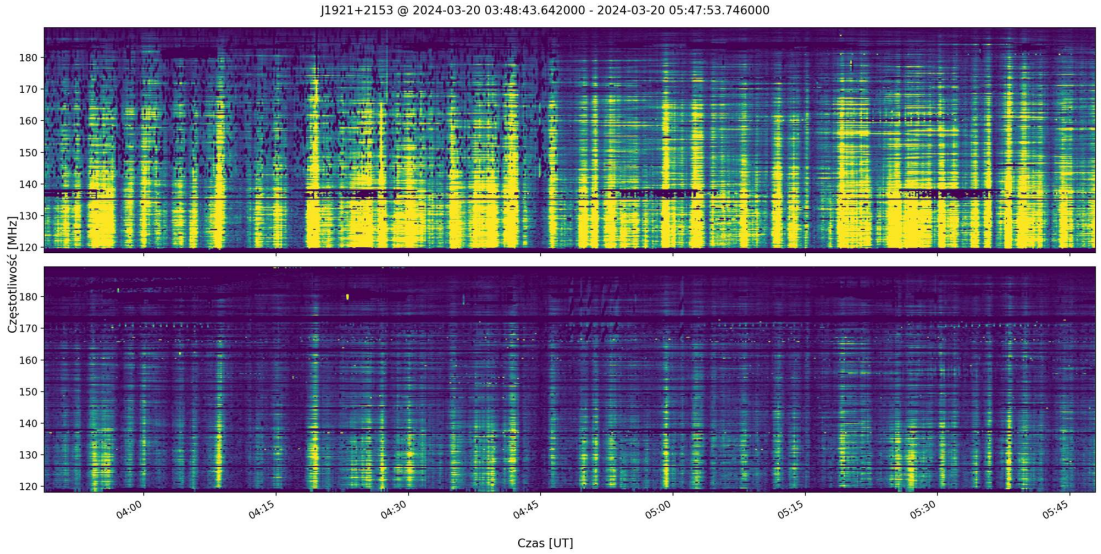
Zsynchronizowane obserwacje stacjami PL611 i PL612 dla pulsarów J0814+7429, J1509+5531 i J1921+2153 są przedstawione na rysunkach: 5.12, 5.13 i 5.14). Na podstawie obserwacji pulsarów J1509+5531 i J1921+2153 można zaobserwować, że wzmocnienia i osłabienia sygnału występują w tym samym czasie na obu stacjach. Obserwacje pulsara J0814+7429 są niejednoznaczne ze względu na utrudnioną ocenę czasu występowania fluktuacji S/N na nałożonych scytylach. Fluktuacje występujące na J0814+7429 są zdecydowanie słabsze niż w przypadku J1509+5531 i J1921+2153.



Rysunek 5.12: Widmo dynamiczne pulsara J0814+7429 dla stacji PL612 (górny panel) i PL611 (dolny panel).



Rysunek 5.13: Widmo dynamiczne pulsara J1509+5531 dla stacji PL612 (górny panel) i PL611 (dolny panel).



Rysunek 5.14: Widmo dynamiczne pulsara J1921+2153 dla stacji PL612 (górny panel) i PL611 (dolny panel).

Widmo sygnału do szumu pulsara J0814+7429 wykonane dla stacji PL611 zawiera mniejszy zakres częstotliwości z powodu błędu zapisu jednego pasma. Wszystkie przedstawione i wykonane obserwacje miały miejsce podczas małej aktywności geomagnetycz-

nej – indeks Kp 2 oraz Dst -10 nT. Występowanie nasileń i osłabień sygnałów jednocześnie w obserwacjach wykonanych dwiema stacjami może być spowodowane globalnym wpływem jonosfery, a nie lokalnie występującymi nieregularnościami. Alternatywną hipotezą jest obecność akustycznych fal grawitacyjnych podróżujących w kierunku S–W. Takie zjawisko mogłoby powodować identyczne fluktuacje sygnału na stacjach PL612 i PL611, które znajdują się tym samym południku. Zakładana teza o jonosferycznej genezie fluktuacji wymaga włączenia obserwacji z okresu zaburzonego.

Podsumowanie

Analizy i wyniki przedstawione w niniejszej pracy potwierdzają tezę o komplementarności wspólnych obserwacji radioteleskopu LOFAR oraz GNSS. LOFAR dostarcza nieosiągalnych dotychczas możliwości badania nieregularności i ich fizyki. Techniki GNSS i obserwacje LOFAR uzupełniają się w pełni, dostarczając informacji zarówno o wielkoskalowej i drobnoskalowej strukturze jonosfery.

Obserwacje scyntylacyjne radioźródeł Cassiopeia A i Cygnus A dostarczają pełnej analizy odnośnie prędkości i wielkości struktur wywołujących scyntylacje na średnich szerokościach geograficznych. Względne prędkości wyznaczone na podstawie łuków występujących w widmach drugiego rzędu są zbieżne z dotychczasową wiedzą o prędkościach przemieszczania się nieregularności, co potwierdza, że fluktuacje sygnału zachodzą w jonosferze. Przedstawione obserwacje scyntylacyjne ukazują nieregularności występujące na szerokościach geograficznych poniżej frontu owalu zorzowego. Indeks S_4 wyznaczony w punktach przebicia jonosfery w obszarze owalu zorzowego wykazał, że skale struktur będące powyżej skali Fresnela nie wywołują scyntylacji sygnału. Analiza obserwacji scyntylacyjnych wykonana dla dnia o umiarkowanej aktywności geomagnetycznej wykazała występowanie nieregularności niezwiązanych z owalem zorzowym, których prawdopodobnym mechanizmem powstawania jest niestabilność Perkinsa.

Obserwacje scyntylacyjne wykonane przez stację PL612 w trybie lokalnym w modzie "357"przedstawiają nieregularności o skalach jeszcze mniejszych niż te obserwowane w trybie międzynarodowym, co wynika ze skali Fresnela.

Opracowana metodyka wyznaczania indeksu S_4 znalazła zastosowanie w przetwarzaniu obserwacji zebranych przez stację IDOLS (CS021). Stworzony *pipeline* dostarcza cennych informacji, które umożliwiają całodobowe monitorowanie stanu jonosfery. Zbieżny cel przyświecał stworzeniu aplikacji "Solar and Scintillation LOFAR Utilisation Tool", który zapewnia dostęp do wstępnie przetworzonych obserwacji słonecznych

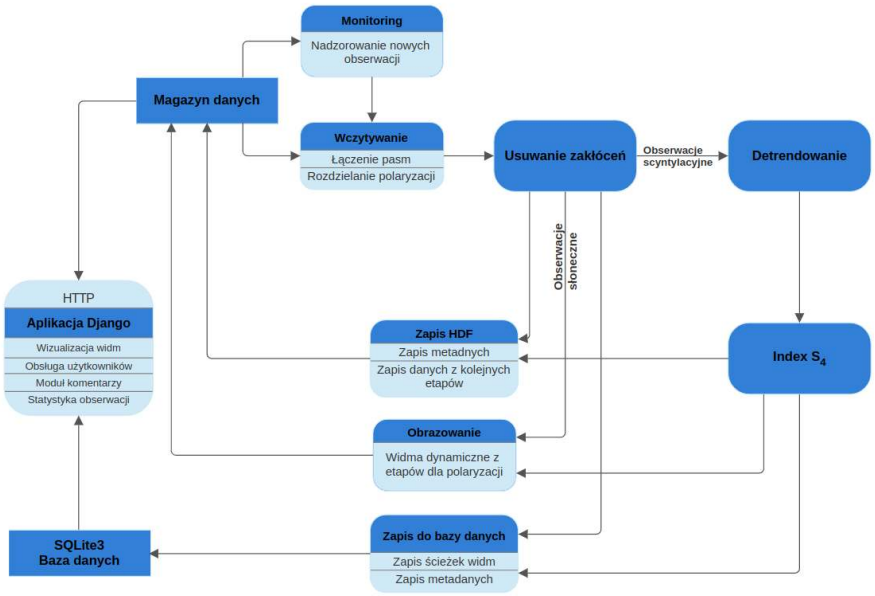
i scyntylacyjnych w Centrum Diagnostyki Radiowej Środowiska Kosmicznego.

Widma dynamiczne pulsarów wykonane na podstawie obserwacji zarejestrowanych w trybie lokalnym stacją PL612 ujawniły fluktuacje sygnału mogącą mieć genezę jonosferyczną. W widmie widoczne są zarówno scyntylacje powstające w przestrzeni międzygwiazdowej, jak również krótkookresowe prążki typowe dla scyntylacji jonosferycznych. Ponadto dynamika i szerokopasmowe oddziaływanie pokrywa się ze wzorcami scyntylacji obserwowanymi na radioźródłach Cassiopeia A i Cygnus A w pasmie HBA. Zaprojektowany eksperyment obserwacyjny ze stacją PL611 dostarczył do tej pory wyników mówiących o możliwym wpływie wielkoskalowego stanu jonosfery na obserwacje pulsarów. Pozyskiwanie dalszych obserwacji jest kluczowe do dogłębnego zbadania hipotezy.

Obserwacje jonosferyczne LOFAR okazały się cennym źródłem informacji jednakowo dla badań nieregularności jonosferycznych występujących na średnich szerokościach geograficznych oraz dla badań pulsarów, wzbogacając obecny stan wiedzy o propagacji sygnału przez zjonizowane ośrodki.

Załącznik 1 – Solar and Scintillation LOFAR Utilisation Tool

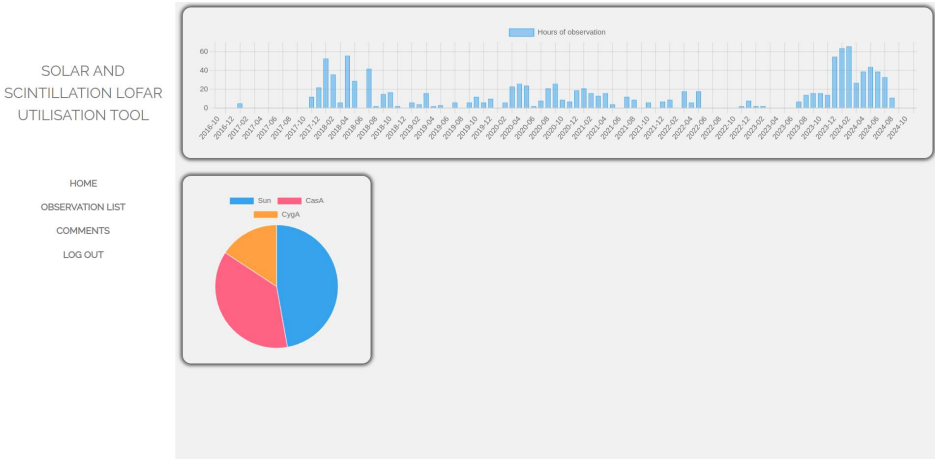
Solar and Scintillation LOFAR Utilisation Tool jest oprogramowaniem przetwarzający obserwacje zebrane przez stację PL612, znajdującą się w Bałdach, w trybie pojedynczej stacji. Głównym zadaniem aplikacji jest przetwarzanie obserwacji słonecznych i scyntylacyjnych oraz udostępnianie ich na potrzeby Centrum Diagnostyki Radiowej Środowiska Kosmicznego (rysunek 5.15).



Rysunek 5.15: Diagram przepływu danych i wykonywanych procesów w oprogramowaniu.

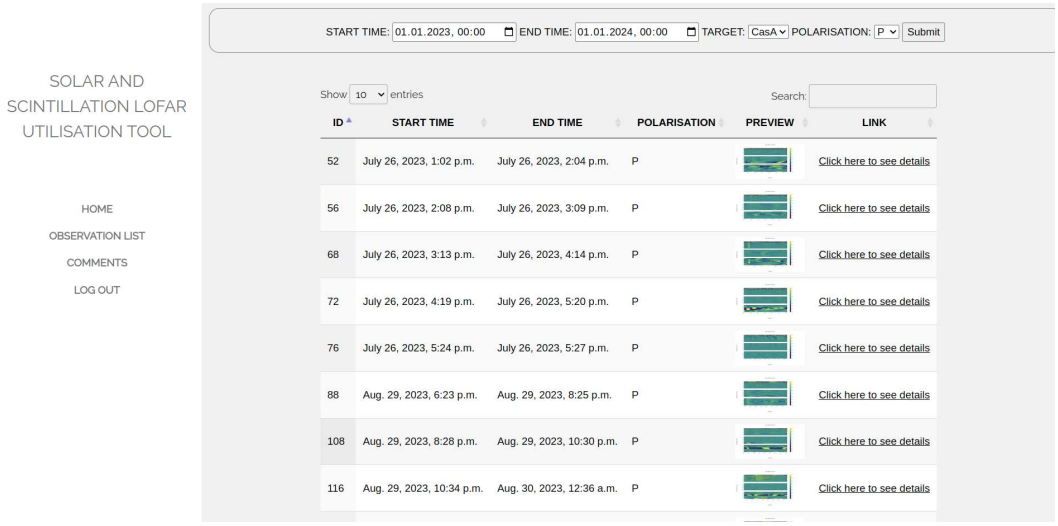
Algorytm napisany w języku Python wykorzystuje metodologię opracowaną dla wyznaczania indeksu S_4. Obserwacje scyntylacyjne poddane są usuwaniu szumów i trendów, natomiast z obserwacji słonecznych są usuwane jedynie zakłócenia radiowe. Algorytm przetwarza obserwacje z wszystkich czterech polaryzacji, produkuje widma dynamiczne surowych obserwacji, z usuniętymi zakłóceniami oraz dla obserwacji scyntylacyjnych zdetrendowane oraz widma indeksu S_4. Opracowane dane zapisywane są w formacie HDF (z ang. *Hierarchical Data Format*) oraz metadane zapisywane są do bazy danych.

Główna strona aplikacji internetowej (rysunek 5.16) przedstawia wykresy liczby godzin obserwacji w trybie lokalnym w danym miesiącu oraz zbiorczą całkowitą ilość godzin poszczególnych źródeł (należy zauważyć, że statystyki nie obejmują obserwacji pulsarów, które stanowią pokaźną część obserwacji wykonywanych w trybie lokalnym).



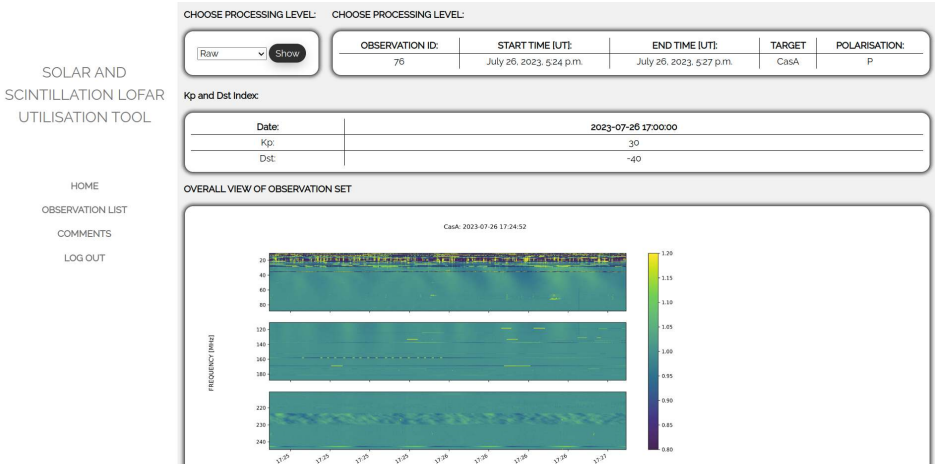
Rysunek 5.16: Strona główna przedstawiająca statystyki obserwacji.

Główna funkcja prezentuje się na podstronie "Observation list", która przedstawia wszystkie wykonane obserwacje wraz z możliwością filtrowania po źródle oraz czasie obserwacji (rysunek 5.17).



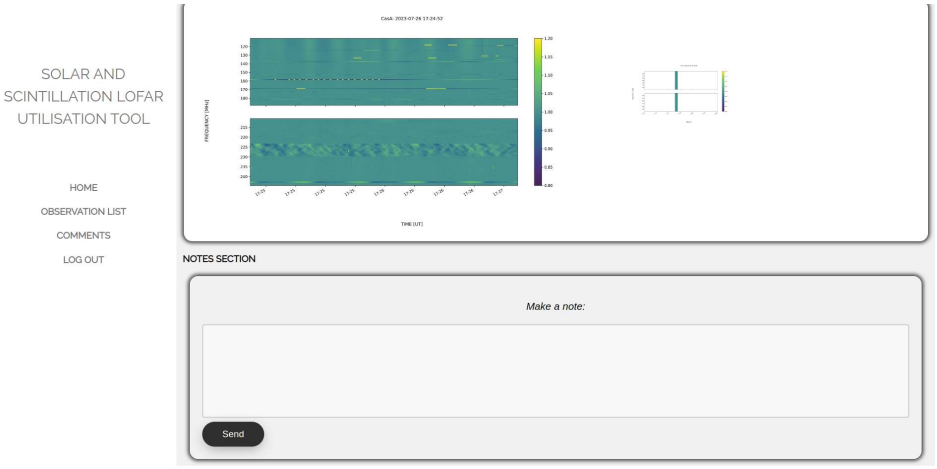
Rysunek 5.17: Diagram przepływu danych i wykonywanych procesów w oprogramowaniu.

Widok szczegółowy (rysunek 5.18) przedstawia podstawowe informacje o obserwacji oraz aktywność geomagnetyczną na moment obserwacji[2] W lewym górnym rogu znajduje się pole wyboru poziomu przetwarzania (RAW, RFI-FREE, DETREND, S4). Oprócz standardowych widm obserwacji, na dole widoku szczegółowego znajduje się sekcja notatek (rysunek 5.19).



Rysunek 5.18: Lista obserwacji z odnośnikami do widoków szczegółowych i możliwością filtrowania obserwacji.

[2]indeks Kp jest przedstawiony w formie dziesiętnej tj. Kp 30 = 3, Kp 33 = 3+, Kp 26 = 3- itd.



Rysunek 5.19: Sekcja notatek w widoku szczegółowym.

Na moment pisania pracy oprogramowanie przetworzyło ponad 10TB surowych obserwacji i wyprodukowało około 20TB danych w postaci rysunków oraz plików HDF obejmujących wszystkie poziomy przetwarzania.

Lista akronimów

LOFAR LOw Frequency ARay

HBA High Band Antenna

LBA Low Band Antenna

RCU Receiver Unit

LBL Low Band Low

LBH Low Band High

SCO Station Central Oscillator

RSP Remote Station Processor

LCU Local Control Unit

BST Beamlet Staticts

AGN Active Galatic Nucleus

TEC Total Electron Content

UV Ultra Violet

EUV Extreme Ultra Violet

TID Travelling Ionosphere Disturbances

AGW Acoustic Gravity Waves

LSTID Large-Scale Travelling Ionosphare Disturbance

MSTID Medium-Scale Travelling Ionosphare Disturbance

SSTID Small-Scale Travelling Ionosphare Disturbance

CME Coronal Mass Ejection

GNSS Global Navigation Satellite Systems

GLONASS GŁObalnaja NAwigacjonnaja Sputnikowaja Sistiema

STEC Slant Total Electron Content

VTEC Vertical Total Electron Content

ROT Rate of Total Electron Content

RINEX Receiver Independent Exchange System

IGS International GNSS Service

EPN European Permanent Network

ROTI Rate of TEC Index

IDOLS Incremental Development of LOFAR Space-weather

FITS Flexible Image Transport System

HTTPS Hypertext Transfer Protocol Secure

LuMP LOFAR und MPIfR Pulsare

DSPSR Digital Signal Processing Software for Pulsar Astronomy

ISM Interstellar Medium

S/N Signal-to-Noise

HDF Hierarchical Data Format

Bibliografia

Afraimovich, E. (2008). „First GPS-TEC evidence for the wave structure excited by the solar terminator". W: *Earth, Planets and Space* 60. DOI: 10.1186/BF03352843.

Beser, K., M. Mevius, M. Grzesiak i Rothkaehl H. (2022). „Detection of Periodic Disturbances in LOFAR Calibration Solutions". W: *Remote Sensing* 14.7. ISSN: 2072-4292. DOI: 10.3390/rs14071719.

Błaszkiewicz, L., P. Flisek, K. Kotulak, A. Krankowski, W. Lewandowski, J. Kijak i A. Froń (2021). „Finding the Ionospheric Fluctuations Reflection in the Pulsar Signals' Characteristics Observed with LOFAR". W: *Sensors* 21.1. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s21010051.

Briggs, B.H. i I.A. Parkin (1963). „On the variation of radio star and satellite scintillations with zenith angle". W: *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* 25.6, s. 339–366. ISSN: 0021-9169. DOI: https://doi.org/10.1016/0021-9169(63)90150-8.

Cander, L. R. (2019). „Ionospheric Irregularities and Waves". W: *Ionospheric Space Weather*. Cham: Springer International Publishing, s. 179–195. ISBN: 978-3-319-99331-7. DOI: 10.1007/978-3-319-99331-7_7.

Cherniak, I., A. Krankowski i I. Zakharenkova (2014). „Observation of the ionospheric irregularities over the Northern Hemisphere: Methodology and service". W: *Radio Science* 49.8, s. 653–662.

Cherniak, I., A. Krankowski i I. Zakharenkova (2018). „ROTI Maps: a new IGS ionospheric product characterizing the ionospheric irregularities occurrence". W: *GPS Solutions* 22.3, s. 1–12.

Cordes, J. M., B. J. Rickett, D. R. Stinebring i W. A. Coles (2006). „Theory of Parabolic Arcs in Interstellar Scintillation Spectra". W: 637.1, s. 346–365. DOI: 10.1086/498332.

de Gasperin, F., Mevius, M., Rafferty, D. A., Intema, H. T. i Fallows, R. A. (2018). „The effect of the ionosphere on ultra-low-frequency radio-interferometric observations". W: *AA* 615, A179. DOI: 10.1051/0004-6361/201833012.

de Gasperin, F. i in. (2019). „Systematic effects in LOFAR data: A unified calibration strategy". W: *AA* 622, A5. DOI: 10.1051/0004-6361/201833867.

Emery, E. i A. Camps (2017). „Chapter 5 - Radar". W: *Introduction to Satellite Remote Sensing*. Red. W. Emery i A. Camps. Elsevier, s. 291–453. ISBN: 978-0-12-809254-5. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809254-5.00005-1.

Fallows, R. A. i in. (2014). „Broadband meter-wavelength observations of ionospheric scintillation". W: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 119.12, s. 10, 544–10, 560. DOI: https://doi.org/10.1002/2014JA020406.

Fallows, R.A., M.M. Bisi, B. Forte, Th. Ulich, A.A. Konovalenko, G. Mann i C. Vocks (2016). „Separating Nightside Interplanetary and Ionospheric Scintillation with LOFAR". W: 828.1, L7, s. L7. DOI: 10.3847/2041-8205/828/1/L7.

Fallows, Richard i in. (lut. 2020). „A LOFAR Observation of Ionospheric Scintillation from Two Simultaneous Travelling Ionospheric Disturbances". W: *Journal of Space Weather and Space Climate* 10. DOI: 10.1051/swsc/2020010.

Filothodoros, A., W. Lewandowski, J. Kijak, B. Śmierciak, K. Chyży, L. Błaszkiewicz i A. Krankowski (2024). „Observations of interstellar scattering of six pulsars using Polish LOFAR station PL611". W: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 528.4, s. 5667–5678. ISSN: 0035-8711. DOI: 10.1093/mnras/stae399.

Flisek, P. i in. (list. 2023). „Towards the possibility to combine LOFAR and GNSS measurements to sense ionospheric irregularities". W: *Journal of Space Weather and Space Climate* 13. DOI: 10.1051/swsc/2023021.

Furse, C. M., O. P. Gandhi i G. Lazzi (2008). „Wire Elements: Dipoles, Monopoles, and Loops". W: *Modern Antenna Handbook*. John Wiley Sons, Ltd. Rozd. 2, s. 57–95. ISBN: 9780470294154. DOI: https://doi.org/10.1002/9780470294154.ch2.

Graham, A. W. (2008). „Populating the Galaxy Velocity Dispersion: Supermassive Black Hole Mass Diagram, A Catalogue of (Mbh,) Values". W: *Publications of the Astronomical Society of Australia* 25.4, s. 167–175. DOI: 10.1071/AS08013.

Griffiths, D. J. (2023). *Introduction to Electrodynamics*. 5 wyd. Cambridge University Press.

Hankins, T. H. (1971). „Microsecond Intensity Variations in the Radio Emissions from CP 0950". W: 169, s. 487. DOI: 10.1086/151164.

Hankins, T. H. i B. J. Rickett (1975). „Pulsar Signal Processing". W: *Radio Astronomy*. T. 14. Methods in Computational Physics: Advances in Research and Applications. Elsevier, s. 55–129. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-460814-6.50007-3.

Hansen, R. C. (2009). „Basic Array Characteristics". W: *Phased Array Antennas*. John Wiley Sons, Ltd. Rozd. 2, s. 7–47. ISBN: 9780470529188. DOI: https://doi.org/10.1002/9780470529188.ch2.

Hecht, E. (2017). *Optics*. Pearson Education, Incorporated. ISBN: 9780133977226.

Hewish, A.R., S. Bell, J. Pilkington, P. Scott i R. Collins (1968). „Observation of a Rapidly Pulsating Radio Source". W: *Nature* 217. DOI: 10.1038/217709a0.

Hobbs, G. B., R. T. Edwards i R. N. Manchester (2006). „TEMPO2, a new pulsar-timing package - I. An overview". W: 369.2, s. 655–672. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2006.10302.x.

Hotan, A. W., W. van Straten i R. N. Manchester (2004). „psrchive and psrfits: An Open Approach to Radio Pulsar Data Storage and Analysis". W: *Publications of the Astronomical Society of Australia* 21.3, s. 302–309. DOI: 10.1071/AS04022.

Intema, H., S. Tol, W. Cotton, A. Cohen, I. Bemmel i H. Rottgering (kw. 2009). „Ionospheric Calibration of Low Frequency Radio Interferometric Observations using the Peeling Scheme: I. Method Description and First Results". W: *Astronomy and Astrophysics* 501. DOI: 10.1051/0004-6361/200811094.

Krause, O., S. M. Birkmann, T. Usuda, T. Hattori, Goto M., G. H. Rieke i K. A. Misselt (2008). „The Cassiopeia A Supernova Was of Type IIb". W: *Science* 320.5880, s. 1195–1197. DOI: 10.1126/science.1155788.

Lanyi, G. E. i T. Roth (1988). „A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using global positioning system and beacon satellite observations". W: *Radio Science* 23.4, s. 483–492. DOI: https://doi.org/10.1029/RS023i004p00483.

Lorimer, D. i M. Kramer (2004). „Handbook of Pulsar Astronomy". W: *Handbook of pulsar astronomy* 4.

Manchester, R. N., G. B. Hobbs, A. Teoh i M. Hobbs (2005). „The Australia Telescope National Facility Pulsar Catalogue". W: 129.4, s. 1993–2006. DOI: 10.1086/428488.

McKay-Bukowski, Derek i in. (2015). „KAIRA: The Kilpisjärvi Atmospheric Imaging Receiver Array—System Overview and First Results". W: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 53.3, s. 1440–1451. DOI: 10.1109/TGRS.2014.2342252.

Mevius, M. i in. (2016). „Probing ionospheric structures using the LOFAR radio telescope". W: *Radio Science* 51.7, s. 927–941. DOI: 10.1002/2016RS006028.

Nanan, Balan, T. Maruyama, A. Patra i Viswanathan Narayanan (grud. 2018). „A minimum in the latitude variation of spread-F at March equinox". W: *Progress in Earth and Planetary Science* 5. DOI: 10.1186/s40645-018-0180-y.

Perkins, F. (1973). „Spread F and ionospheric currents". W: *Journal of Geophysical Research* 78 (1), s. 218–226. DOI: 10.1029/ja078i001p00218.

Porayko, N. K. i in. (2018). „Testing the accuracy of the ionospheric Faraday rotation corrections through LOFAR observations of bright northern pulsars". W: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 483.3, s. 4100–4113. ISSN: 0035-8711. DOI: 10.1093/mnras/sty3324.

Rickett, B. J. (1977). „Interstellar Scattering and Scintillation of Radio Waves". W: *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 15.Volume 15, 1977, s. 479–504. ISSN: 1545-4282. DOI: https://doi.org/10.1146/annurev.aa.15.090177.002403.

Ryle, M. i F. G. Smith (1948). „A New Intense Source of Radio-Frequency Radiation in the Constellation of Cassiopeia". W: *Nature* 162, s. 462–463. DOI: 10.1038/162462a0.

Saunders, S.R. i A.A. Aragón-Zavala (2007). *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*. Wiley. ISBN: 9780470848791.

Stokes, G. G. (sty. 1851). „On the Composition and Resolution of Streams of Polarized Light from different Sources". W: *Transactions of the Cambridge Philosophical Society* 9, s. 399.

Teunissen, O., P. Montenbruck i in. (2017). *Handbook of Global Navigation Satellite Systems*.

van Straten, W. i M. Bailes (sty. 2011). „DSPSR: Digital Signal Processing Software for Pulsar Astronomy". W: 28.1, s. 1–14. DOI: 10.1071/AS10021. eprint: 1008.3973.

Wakai, N., H. Ohyama i T. Koizumi (1987). *Manual of ionogram scaling*.

Wernik, A. (1996). „Jonosfera na dużych szerokościach i jej badania w polskiej stacji polarnej na Spitsbergenie". W: *Przegląd Geofizyczny* XLI (1-2).

Wu, Z. i in. (2022). „Pulsar scintillation studies with LOFAR - I. The census". W: *AA* 663, A116. DOI: 10.1051/0004-6361/202142980.

Zhang, P., P. Zucca, K. A. Kozarev, P. Gallagher i M. Nedal (2022). „Incremental Development of LOFAR Space-weather (IDOLS)". W: *AGU Fall Meeting Abstracts*. T. 2022.

Streszczenie

Niniejsza rozprawa prezentuje analizy obserwacji scyntylacyjnych najjaśniejszych radioźródeł (Cassiopeia A, Cygnus A) oraz obserwacje pulsarów radioteleskopem LOFAR. Obserwacje wykorzystane zostały w celu badania nieregularności jonosferycznych na średnich szerokościach geograficznych. Wyniki obserwacji wykonane za pomocą radioteleskopu zestawiono z wynikami obserwacji GNSS.

Celem niniejszej pracy było stworzenie metodyki komplementarnego badania nieregularności jonosferycznych na średnich szerokościach geograficznych na podstawie wspólnych obserwacji radioteleskopu LOFAR oraz pomiarów GNSS. Celem pomocniczym było opracowanie metodyki analizy wpływu jonosfery na obserwacje pulsarów przez radioteleskop LOFAR.

W pracy opracowano autorską metodykę obliczania parametru S_4 na podstawie obserwacji scyntylacyjnych. Zaprojektowany algorytm wykorzystany został do przetwarzania obserwacji Cassiopei A stacją IDOLS (LOFAR CS021). Obserwacje radioźródeł posłużyły do badania skal, prędkości oraz zjawisk odpowiedzialnych za powstawanie nieregularności jonosferycznych.

Istotną część pracy stanowi badanie wpływu stanu jonosfery na obserwacje pulsarów. W ramach analizy pokazano różnicę wpływu ośrodka międzygwiazdowego oraz wpływu jonosfery widocznego w wynikach obserwacji. Zaprojektowano i przeprowadzony eksperyment obserwacyjny wspólnie ze stacją LOFAR w Łazach.

Celem podjętych działań była weryfikacja hipotezy badawczej: "radioteleskop LOFAR umożliwia wspólne i komplementarne badania jonosfery z pomiarami GNSS oraz dostarcza niedostępnych wcześniej analiz niestabilności w strukturze plazmy i ich fizyki". W pracy sformułowano hipotezę pomocniczą: "jonosfera wywiera zauważalny wpływ na obserwacje pulsarów obserwowany w postaci scyntylacji sygnału".

W celu udowodnienia hipotezy podjęto się następujących zadań: (1) opracowanie

metodyki obliczania indeksu S_4 dla szerokopasmowych obserwacji LOFAR, obejmującego usuwanie interferencji radiowych oraz detrendowanie, (2) porównanie pomiarów wykonanych przez GNSS oraz indeksu S_4, (3) wyznaczenie przybliżonych prędkości przemieszczania się nieregularności na podstawie widm drugiego rzędu.

Obserwacje pulsarów zostały zastosowane do zrealizowania zadań: (1) obliczenie widma dynamicznego pulsara, (2) wizualizacja scyntyli w widmach S/N, będących konsekwencją propagacji sygnału przez ośrodek międzygwiezdny, (3) wizualizacja fluakcji w widmach dynamiczych pulsarów, co do których postawiono hipotezę o ich jonosferycznym pochodzeniu, (4) symultaniczne obserwacje pulsarów przeprowadzone na stacjach PL611 i PL612.

Na podstawie analiz przeprowadzonych w pracy radioteleskop LOFAR i pomiary GNSS są uzupełniającymi się technikami. Zastosowanie dwóch instrumentów w pełni obrazuje stan jonosfery. Wyniki obserwacji scyntylacyjnych wykazały nieregularności na granicy owalu zorzowego oraz struktury jonosferyczne mogące być konsekwencją niestabilności Perkinsa na średnich szerokościach geograficznych.

Wykazano, w jaki sposób ośrodek międzygwiazdowy wpływa na propagację sygnału pulsarów – ukazywanie się scyntyli w widmach dynamicznych i łuków w widmach drugiego rzędu. W widmach dynamicznych pulsarów zaobserwowano dynamiczne, szerokopasmowe wzmocnienia i spadki S/N, za które odpowiadać może stan jonosfery. Przeprowadzone wspólne obserwacje dwiema stacjami LOFAR ujawniły w jednym przypadku zbieżne czasowo struktury, natomiast w drugim wykazały niejednoznaczny wynik.

Słowa kluczowe: nieregularności jonosferyczne, LOFAR, pulsary, GNSS, indeks S_4

Abstract

This dissertation presents scintillation observations of the brightest radio sources (Cassiopeia A, Cygnus A) and observations of pulsars performed using the LOFAR radio telescope. These observations were utilized to investigate ionospheric irregularities at mid-latitudes. The data collected by the radio telescope were compared with GNSS measurements.

The objective of this dissertation was to develop a methodology for complementary examination of ionospheric irregularities at mid-latitudes, based on LOFAR radio telescope observations and GNSS measurements. An additional aim was to create a methodology for analyzing the influence of the ionosphere on pulsar observations conducted with the LOFAR radio telescope.

In the study, a new methodology for calculating the S_4 index based on scintillation observations was established. The designed algorithm was implemented in a pipeline for calculating Cassiopeia A IDOLS observations. Radio source observations were used to determine the scales, velocities, and phenomena responsible for the development of ionospheric irregularities.

A significant part of the study discusses the impact of the ionosphere on pulsar observations. The analysis distinguishes between the contributions of the interstellar medium and the ionosphere to pulsar observations. An observational experiment was designed and performed in collaboration with the LOFAR Łazy station.

The aim of the study was to confirm the hypothesis: "The LOFAR radio telescope enables joint and complementary ionospheric studies in conjunction with GNSS measurements and provides unique insights into instabilities in plasma structures and their physics."A subsidiary hypothesis was also formulated: "The ionosphere has a significant impact on pulsar observations, visible as signal scintillation."

To prove these hypotheses, the following tasks were undertaken: (1) development of

a methodology for S_4 index calculation for broadband LOFAR observations, including radio interference detection and detrending,(2) comparison of GNSS measurements with the S_4 index, (3) determination of line-of-sight relative velocities of irregularities based on the secondary spectrum.

Pulsar observations were used to address the following tasks: (1) calculation of signal-to-noise spectrum, (2) visualization of scintillation in S/N spectra, resulting from signal propagation through the interstellar medium, (3) simultaneous observations of pulsars using the PL611 and PL612 LOFAR stations.

The analysis confirmed that LOFAR radio telescope and GNSS measurements are mutually supportive techniques. Using both instruments allows for a comprehensive description of the ionospheric state. Scintillation observation results revealed irregularities at the auroral oval boundary and ionospheric structures potentially generated by Perkins instability at mid-latitudes.

It was demonstrated how the interstellar medium affects pulsar signal propagation, evidenced by scintillation in dynamic spectra and arcs in secondary spectra. Dynamic, broadband enhancements and decreases in the signal-to-noise ratio were observed in pulsar dynamic spectra, potentially caused by ionospheric effects. Simultaneous observations using two LOFAR stations showed, in one case, time-correlated structures, while in the other, the results were ambiguous.

Keywords: ionospheric irregularities, LOFAR, pulsars, GNSS, S_4 index