



## UvA-DARE (Digital Academic Repository)

### Transient and variable radio sources in the LOFAR sky: an architecture for a detection framework

Scheers, L.H.A.

**Publication date**  
2011

[Link to publication](#)

#### **Citation for published version (APA):**

Scheers, L. H. A. (2011). *Transient and variable radio sources in the LOFAR sky: an architecture for a detection framework*. [Thesis, fully internal, Universiteit van Amsterdam].

#### **General rights**

It is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), other than for strictly personal, individual use, unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

#### **Disclaimer/Complaints regulations**

If you believe that digital publication of certain material infringes any of your rights or (privacy) interests, please let the Library know, stating your reasons. In case of a legitimate complaint, the Library will make the material inaccessible and/or remove it from the website. Please Ask the Library: <https://uba.uva.nl/en/contact>, or a letter to: Library of the University of Amsterdam, Secretariat, P.O. Box 19185, 1000 GD Amsterdam, The Netherlands. You will be contacted as soon as possible.

---

---

## Samenvatting in het Nederlands

---

Lang was het blote oog het enige instrument van de mens om de sterrenhemel te kunnen waarnemen, totdat Galileï aan het begin van de 17de eeuw de telescoop introduceerde. In de loop der eeuwen is dit instrument in velerlei opzichten enorm verbeterd en heeft het astronomen in de gelegenheid gesteld om het firmament in steeds meer detail te bestuderen. Hoe het ook zij, met het oog of een telescoop, de waarnemingen aan de sterrenhemel werden tot 1932 slechts in het zichtbare deel van het elektromagnetisch spectrum gedaan. De opkomst van het transatlantisch telefoonverkeer aan het begin van de 20ste eeuw maakte de ontdekking van radiostraling van kosmische oorsprong mogelijk. Radiostraling is ook elektromagnetisch van aard en heeft langere golflengten en lagere energieën en frequenties dan straling van zichtbaar licht en kan met radiotelescopen worden gedetecteerd. Karl Jansky toonde in 1932 aan dat de door hem waargenomen radiostraling uit het centrum van onze eigen Melkweg afkomstig was. In rap tempo werden na de Tweede Wereldoorlog nog meer bronnen van radiostraling ontdekt, uiteenlopend van verre sterrenstelsels op miljarden lichtjaren afstand, tot de nabije overblijfselen van ontplofte sterren (supernova's), de snelroterende en pulserende neutronensterren (pulsars) in onze Melkweg. Ook de alomverteenwoordigde 3 Kelvin achtergrondstraling, de nagalm van de Oerknal, is voor het eerst waargenomen met radiotelescopen.

De huidige radiotelescopen bestaan vaak uit een reeks identieke schotelantennes, zoals te zien in Figuur 1, die tezamen een groter oppervlak hebben en zodoende hogere resoluties halen. Omdat het signaal van een ver verwijderde radiobron de voorste telescoop als eerste bereikt en de achterste als laatste, kan door het inbouwen van tijdvertragingen per telescoop het signaal door interferentie versterkt worden. Op deze manier kunnen zwakkere signalen opvangen worden. Door verder tijdens een waarneming gebruik te maken van de draaiing van de Aarde zorgt een goede *uv*-bedekking voor betere afbeeldingen dan in het geval van een enkele schoteltelescoop. De zware constructies en beweegbare onderdelen van deze instrumenten zijn echter complex en kostbaar en leggen beperkingen op aan de ontwerpen ervan.

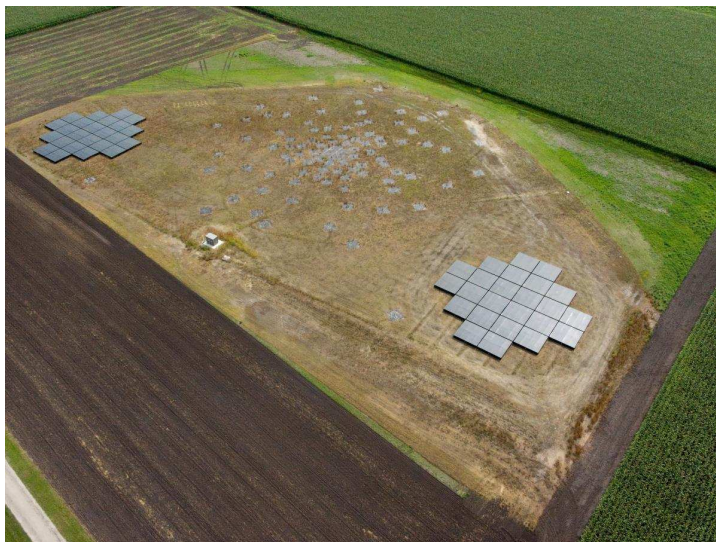


**Figuur 1:** Enkele schotelantennes van de Westerbork Synthese Radio Telescoop. De diameter van een schotel is 25 m.

Het rechtstreeks koppelen van krachtige computers aan de instrumenten, maakt het nu mogelijk alternatieve ontwerpen in ogenschouw te nemen, waarbij de signaalverwerking en gegevensanalyse softwarematig afgehandeld worden. LOFAR, de *LOW* Frequency *AR*ray, is het eerste instrument in zijn soort dat op deze manier ontworpen is en verschilt wezenlijk van de klassieke radiotelescopen. LOFAR bestaat uit vele relatief simpele radioantennes die gegroepeerd zijn in stations, welke weer verspreid zijn over een oppervlak ter grootte van Noordwest-Europa. Elk station bestaat uit twee typen antennes: de lage-frequentie Low Band Antennas (LBA) zijn gevoelig in het frequentiegebied van 30 tot 80 MHz en de hoge-frequentie High Band Antennas (HBA) zijn gevoelig van 120 tot 240 MHz. Figuur 2 laat de twee antennetypen van LOFAR zien. De kern van het instrument bevindt zich bij Exloo, Drenthe. Hier liggen zes kernstations dicht bij elkaar op een super-



**Figuur 2:** Links: De lage-frequentie Low Band Antennas (LBA) zijn operationeel tussen 30 en 80 MHz (foto T. Krieg). De door de antennes ontvangen signalen worden in een computercontainer, linksboven op de foto, gecombineerd, voordat de gegevens naar de supercomputer in Groningen getransporteerd worden voor verdere verwerking. Rechts: De hoge-frequentie High Band Antennas (HBA) zijn operationeel tussen 120–240 MHz.



**Figuur 3:** Een LOFAR kernstation bestaat uit een LBA veld en twee HBA velden. Het LBA veld bevat 96 dipoolantennes. Een (kernstation) HBA veld bevat 24 *tegels* met elk 16 HBA antennes. NB. Een kernstation is iets anders van ontwerp dan een *remote* of EU station.



**Figuur 4:** Impressie van de gerealiseerde en geplande lokaties van de LOFAR stations in Europa (Spektrum der Wissenschaft/Emde-Grafik).

terp van 340 m doorsnede. Nog eens zestien kernstations liggen hieromheen verspreid over een gebied van 2 tot 3 km. Een voorbeeld van een kernstation is te zien in Figuur 3. De stations in de verder naar buiten gelegen gebieden (remote stations) zijn dunner verspreid over Noord-Nederland, met afstanden tot de kern tot ongeveer 100 km. De gefinancierde Europese stations liggen momenteel in Duitsland, Frankrijk, Engeland en Zweden en hebben basislijnen tot 1000 km. Figuur 4 laat een overzicht zien van gerealiseerde en geplande LOFAR stations.

De signalen die door de antennes opgevangen zijn worden eerst op stationsniveau verwerkt voordat ze worden verzonden naar de supercomputer in Groningen, waar de gegevens van alle LOFAR stations tezamenkomen om te worden gecorreleerd. Hierna zorgt een zogenaamd *post-processing* computercluster voor ijking en *imaging* van de gegevens. De gegevens die na deze stappen beschikbaar komen, worden voor wetenschappelijke doeleinden verder onderzocht. Eén van LOFARs onderzoeksprojecten is het Transients Key Science Project (TKP) dat zich ten doel stelt alle veranderlijke en vergankelijke objecten met LOFAR waar te nemen en wetenschappelijk te onderzoeken. Objecten en fenomenen van speciale aandacht zijn o.a. de pulsars, uitbarstingen van magnetars (neutronensterren met extreem ster-

ke magneetvelden), de radiostraalstromen (Eng.: *radio jets*) afkomstig van zwarte gaten in röntgendubbelsterren en superzware zwarte gaten in actieve kernen van sterrenstelsels, de nagloeiers van gammaflitsers en exoplaneten. Al deze objecten zijn veranderlijk op tijdschalen variërend van seconden tot zelfs jaren.

De eigenschappen van LOFAR zijn uitermate geschikt om bovengenoemde typen bronnen waar te nemen. Het grote gezichtsveld van de antennes, de lange afstanden tussen de stations en de grote bandbreedte van 48 MHz maken het mogelijk om grote gebieden van de hemel met een ongekeerde gevoeligheid en resolutie waar te nemen, veel groter vergeleken met de klassieke radiotelescopen. Door verschillende bundels te vormen kunnen zelfs nog grotere oppervlakken, al dan niet aan elkaar grenzend, tegelijkertijd waargenomen worden, hoewel dit ten koste gaat van de gevoeligheid. Bronnen in het grote frequentiebereik van LOFAR, 30–240 MHz, zijn nog relatief weinig in kaart gebracht, en van vele buigt het spectrum om in dit gebied.

Omdat LOFAR softwarematig bestuurd kan worden zijn nieuw te vormen waarneemconfiguraties relatief eenvoudig te bewerkstelligen. Aldus kan LOFAR snel reageren op gebeurtenissen die een specifieke resolutie of gevoeligheid vereisen. Een andere ongeëvenaarde eigenschap van LOFAR is de korte integratietijd van de observaties. De supercomputer en het computercluster zijn er op gericht om tijden zo kort als 1 seconde te halen, oplopend tot de gewenste waarneming-specifieke integratietijden. Door deze “snapshots” van één seconde is het mogelijk om de hele hemel in een korte tijd, ongeveer een dag, in kaart te brengen.

LOFAR luidt het begin in van een nieuw tijdperk voor de radiosterrenkunde. en zelfs de sterrenkunde. De nieuwe generatie telescopen zullen in belangrijke mate volgens de principes van een nieuw paradigma ontworpen worden, waarbij sterrenkunde, electrotechniek en informatica met elkaar verstrengeld zijn.

Eén van de belangrijkste doelen van dit proefschrift was inzicht te verschaffen in het gedrag van veranderlijke bronnen in de LOFAR frequenties. Hiertoe zijn interferometriedata van verschillende observaties van de nagloeier van een gammaflitsers en de uitbarsting van een zogenaamde *soft gamma-ray repeater* (SGR) gereduceerd en geanalyseerd. LOFAR zal de klassieke observatiemethoden voorbijgaan in het feit dat vele (miljoenen) metingen per object gemaakt zullen worden met tussenpozen zo kort als één seconde. Deze enorme hoeveelheden gegevens kunnen dan niet meer handmatig worden geanalyseerd, maar zullen uiteindelijk automatisch verwerkt moeten worden in zogenaamde *software pipelines*, die er speciaal op gericht zijn veranderingen in de helderheden van bronnen te detecteren. Dit diende als het kader voor de wetenschappelijke software: het ontwerpen van een database die in staat is alle metingen van alle waargenomen bronnen op te slaan tijdens LOFAR waarnemingen; en het opstellen van snelle re-

kenkundige regels om bronnen te localiseren en veranderlijke helderheden te registreren. *Hoofdstukken 2, 3 & 4* zijn gerelateerd aan de TKP software en *Hoofdstukken 5 & 6* aan de typen veranderlijke bronnen die te detecteren zijn met LOFAR.

*Hoofdstuk 2* beschrijft de belangrijkste waarneemstrategieën van LOFAR die relevant zijn voor de TKP. Hiertoe behoren de *Zenith Monitor* en de *Rapid All-Sky Monitor*. Ook is de *Million Sources Sky Survey* (MSSS) behandeld en de modus waarbij alle Nederlandse LOFAR stations betrokken zijn, de *Full-NL Array*. Voor elke configuratie hebben we voor de kortste (1 seconde) tot de langste integratietijden de te verwachte aantallen bronnen uitgerekend en de hiervan afgeleide benodigde schijfruimte en gegevensverwerkingstijden. We hebben het databaseschema, de belangrijkste tabellen en algoritmes uitgewerkt en daarbij de snelheid gemeten van de algoritmes die bronnen associëren en veranderlijke helderheden detecteren in twee typen databases, MySQL en MonetDB. De resultaten geven een duidelijke voorkeur om het kolomgeoriënteerde databasesysteem van MonetDB in de TKP *software pipeline* te gebruiken. Bovendien is uit Figuren 2.13 en 2.14 op te maken dat het verwerken van de grote datastromen *in* de database zelf voor vrijwel alle gevallen binnen de te verwachte verwerkingstijden blijft.

De algoritmes van het associëren van bronnen – het bepalen van de kans dat een bron in de ene waarneming dezelfde is als een bron in de andere waarneming – is beschreven in *Hoofdstuk 3*. Ook de algoritmes om variabiliteit van bronnen te kunnen detecteren zijn hier uitgewerkt. Voor ieder paar bronnen dat mogelijk met elkaar geassocieerd is, worden drie parameters bepaald. Dat zijn hun onderlinge afstand, het gewogen positieverschil en de waarschijnlijkheidsverhouding. De laatste is de verhouding van de kans dat een associatie een positieverschil heeft door meetfouten (dit volgt de bekende Rayleigh-verdeling) en de kans dat de associatie puur toevallig is met een ongerelateerde bron op de achtergrond. Evaluatie van deze parameters bepaalt op een betrouwbare en snelle manier of een associatiepaar echt of toevallig is. Verder hebben we twee indices gedefinieerd die een maat voor de variabiliteit zijn. De eerste index beschrijft de absolute variabiliteit, terwijl de tweede de gewogen fluxveranderingen, oftewel de significantie, weergeeft. De significantie van de variabiliteit is een kwantitatieve maatstaf voor de waarschijnlijkheid die uitmaakt of een gebeurtenis daadwerkelijk variabel was en aldus de basis vormt voor beslissingen om deze bron eventueel op te volgen met nieuwe waarnemingen.

We hebben de algoritmes toegepast op gesimuleerde en echte gegevens. De gesimuleerde data maakten gebruik van ruiskaarten van VLA waarnemingen op 325 MHz. Per kaart werden 64 bronnen op vaste posities ingevoerd, wat betekent dat positieafwijkingen slechts veroorzaakt worden door variaties in de locale ruis, en een Rayleigh-verdeling volgen. Op deze manier zijn 1000 kaarten verwerkt en konden we de kritieke waarden van de as-

sociatieparameters bepalen. Deze criteria zijn vervolgens toegepast op een serie waarnemingen van de nagloeier van gammaflitsers GRB 030329. Tussen 2003 en 2007 heeft de Westerbork Radio Telescoop het bijbehorende stuk van de hemel in verschillende frequenties, resoluties en gevoelheden waargenomen. Hierin vonden we acht veranderlijke bronnen, waarvan er twee als serieuze kandidaat beschouwd worden om met LOFAR waargenomen te worden.

*Hoofdstuk 4* beschrijft het gebruik van verschillende catalogi in de TKP database. Deze catalogi zijn geproduceerd naar aanleiding van waarnemingen met verschillende observatoria om de hemel in kaart te brengen en bevatten alle gevonden bronnen. Uiteindelijk zal LOFAR zelf ook een catalogus met alle waargenomen bronnen (en hun lichtkrommen) produceren en deze reeds in een vroeg stadium beschikbaar stellen aan de astronomische gemeenschap. Deze lijst van ijkbronnen is van belang voor het calibratieproces van LOFAR en voor de TKP om bronnen op te sporen die in vergelijking met eerdere of andere waarnemingen veranderlijk zijn. Het identificeren van de bronnen gebeurt volgens de principes zoals beschreven in *Hoofdstukken 2 & 3*. Verder hebben we de betrouwbaarheid bepaald van waarden voor de waarschijnlijkheidsverhouding. Op basis hiervan hebben we een lijst van hoge kwaliteit kunnen samenstellen. De initiële lijst bevat bijna 2800 bronnen die in de drie belangrijkste radiocatalogi voorkomen, VLSS (74 MHz), WENSS (325 MHz) en NVSS (1400 MHz) en helderder zijn dan 1 Jy op 74 MHz en liggen tussen declinaties  $44^\circ$  en  $64^\circ$ .

*Hoofdstuk 5* rapporteert over de *Galactic Centre Radio Transient source*, GCRT J1745–3009. Deze was ontdekt in maart 2005 op 325 MHz door Hyman et al. (2005), en liet vijf uitbarstingen op Jansky-niveau zien die elk 10 minuten duurden met tussenpozen van 77 minuten. Uitgezette campagnes om dit onbekende object opnieuw waar te nemen hadden weinig succes, op twee herdetecties van zwakke uitbarstingen na. De dataset van de ontdekking is opnieuw geanalyseerd, wat leidde tot een nauwkeurigere bepaling van het verloop van de uitbarsting als ook een verbeterde waarde voor de periodiciteit van de uitbarstingen. Tot nu toe is deze bron alleen bij 325 MHz waargenomen en het is nog steeds niet duidelijk wat voor object het is. LOFAR kan een belangrijke rol spelen bij het ontrafelen van de aard van dit object, hoewel de lage declinatie parten zal spelen, door de mogelijkheid om langdurige waarnemingen uit te voeren met hoge resolutie en gevoeligheid.

De resultaten van waarnemingen snel na de Grote Uitbarsting op 27 december 2004 van de *soft gamma-ray repeater* SGR 1806–20 zijn beschreven in *Hoofdstuk 6*. Een soft gamma-ray repeater is een neutronenster met zeer sterk magneetveld, die met enige regelmaat heldere flitsen uitstoot van gammastraling, veel energetischer dan radiostraling. Dat we deze SGR toch met radiotelescopen konden waarnemen, komt doordat de elektronen in de eromheenliggende nevel van geïoniseerd gas in het magneetveld spiraliseren

en daarbij synchrotron radiostraling uitzenden. Metingen van de Westerbork radiotelescoop aan de polarisatie en de intensiteit van SGR in de lage frequenties, wezen uit dat de depolarisatie op deze lage frequenties afwezig is, wat erop kan duiden dat andere substructuren bekeken worden dan bij hogere frequenties. Ook hier zou LOFAR de uitbarsting hebben kunnen detecteren en de evolutie van de radioniveau en het magnetisch veld nauwkeurig hebben kunnen volgen.