

Technische notities van PA3EET

Mark Bentum PA3EET en André Gunst

LOFAR - Low Frequency Array

Nog een paar maanden en dan wordt de grootste radiotelescoop ter wereld officieel geopend: LOFAR, de 'Low Frequency Array'. LOFAR is een nieuwe radiotelescoop die in Nederland gebouwd wordt door ASTRON, de Stichting Astronomisch Onderzoek in Nederland. Met LOFAR heeft Nederland er straks een uniek instrument bij. Voor het eerst wordt het frequentiegebied van 30 tot 240 MHz onderzocht. In dit artikel zullen we LOFAR beschrijven: van de astronomische mogelijkheden met de nieuwe telescoop tot aan een nadere technische beschrijving van het instrument.

Introductie

Radioastronomie heeft een zeer brede achtergrond in Nederland. In 1944 tijdens de Tweede Wereldoorlog deden Professor Oort en zijn promovendus Hendrik van de Hulst de voorspelling dat de 21cm waterstoflijn gevonden moest kunnen worden. Het heeal zit vol met waterstofatomen. Door de verdeling van atomen te meten, kunnen we iets leren over de vorm en samenstelling van de Melkweg en het heeal. Direct na het beëindigen van de oorlog richtte Oort de Stichting Radiostraling van Zon en Melkweg op, thans ASTRON. De stichting was een samenwerking tussen de PTT, het Philips NatLab en de sterrenwachten van Leiden, Utrecht en Groningen. In 1956 werd de 25 meter Dwingeloo telescoop operationeel. Op dat moment was deze telescoop de grootste ter wereld. Na 8 maanden kwam hier een einde aan toen de Lovell telescoop in Jodrell Bank, UK, in bedrijf kwam. Momenteel is de Dwingeloo telescoop in beheer van een stichting van vrijwilligers, CAMRAS.

In 1970 werd de tweede grote radiotelescoop in Nederland geopend, de Westerbork Synthese Radio Telescoop (WSRT). Hiermee zette Nederland zich opnieuw op de kaart. Zowel de Dwingeloo telescoop als de WSRT bestaan uit mechanisch beweegbare schotelantennes. Door de telescoop te richten kan een bepaald object in het heeal bekeken worden. Als de astronoom een ander gedeelte van de hemel wil onderzoeken, dan moet de schotel gedraaid worden. Als je vervolgens zwakkere signalen wilt ontvangen, moet de schotel worden vergroot. Dat houdt natuurlijk een keer op. De grootste schotel op dit moment is de GBT (Green Bank Telescope) in de Verenigde Staten. Maar ASTRON wil meer. We willen uiteindelijk een telescoop van een vierkante kilometer oppervlakte (de SKA - Square Kilometer Array). Om dat mogelijk te maken, worden vele

kleinere telescopen gecombineerd tot één grotere schotel. Dit wordt interferometrie genoemd. De gedachte achter interferometrie is dat het niet echt nodig is om een compleet 'gevulde' parabool te hebben zolang de signalen van de 'afzonderlijke' delen van de telescoop maar kunnen worden gecombineerd tot de grote parabool. Zo worden bij de WSRT de signalen van de 14 schotels van 25 meter in diameter gecombineerd tot één grote telescoop met een doorsnede van 2,7 km (de afstand tussen de twee buitenste antennes).

Om dit mogelijk te maken, is het van belang dat de signalen coherent (op een samenhangende wijze) worden gecombineerd. Dat betekent dat weglengteverschillen van de telescopen gecorrigeerd moeten worden. Dit is ook bij een platte antenne het geval, zoals in figuur 1 is aangegeven. Bij interferometrie zijn de groene blokjes in het rechterplaatje de individuele radiotelescopen. Zoals te zien is in de figuur, wordt het signaal in de meest rechtse telescoop eerder ontvangen dan in de meeste linkse telescoop. Dit weglengteverschil moet worden gecorrigeerd.

Platte antenne techniek

Het gedrag van een schotel kan ook gerealiseerd worden door het gebruik van meerdere platte antennes. Door iedere afzonderlijke antenne een vertraging te geven kan de 'telescoop' richten. Dit is te zien in figuur 1. Zoals eerder gezegd, ontvangt de meest rechtse antenne het signaal van de bron eerder dan de meest linkse antenne. Deze tijdsverschillen (physical delay in de figuur) worden gecompenseerd in elektronica (artificial delay). Als deze gelijk zijn, worden de

signalen perfect gecombineerd. Door het veranderen van de 'artificial delay' kan de richting van de gehele telescoop worden aangepast. Als de 'artificial delay' nul is, worden alleen de signalen precies boven de antenne array perfect gecombineerd.

De gevoeligheid van zo'n telescoop wordt bepaald door het aantal elementen. In tegenstelling tot een telescoop is een platte antenne even gevoelig in alle richtingen (in de praktijk wordt de platte antenne minder gevoelig richting de horizon). Tellen we de signalen van al deze antennes bij elkaar op zonder vertraging dan 'kijkt' het geheel recht omhoog.

De vertragingen van de verschillende elementen kunnen in elektronica gerealiseerd worden. Hierdoor is het goed mogelijk om meerdere richtingen tegelijkertijd op te kijken. Dit opent de mogelijkheid om meerdere observaties tegelijkertijd uit te voeren. De platte antenne techniek wordt toegepast in LOFAR.

LOFAR

LOFAR (Low Frequency Array) is een wijd verspreid sensornetwerk met als toepassingen de astronomie, geofysica en precisielandbouw [1,3,4]. De infrastructuur van LOFAR bestaat uit een verzameling sensorvelden (stations). In het centrale gebied van LOFAR (core) worden 18 stations gebouwd. De overige 18 worden over een groter gebied gebouwd. Aangezien andere landen in Europa ook interesse hebben getoond in de aanschaf van stations, worden er ook minimaal 8 stations gebouwd in het buitenland. Deze stations worden ook op het LOFAR netwerk aangesloten. Het grote voordeel van deze buitenlandse stations is dat

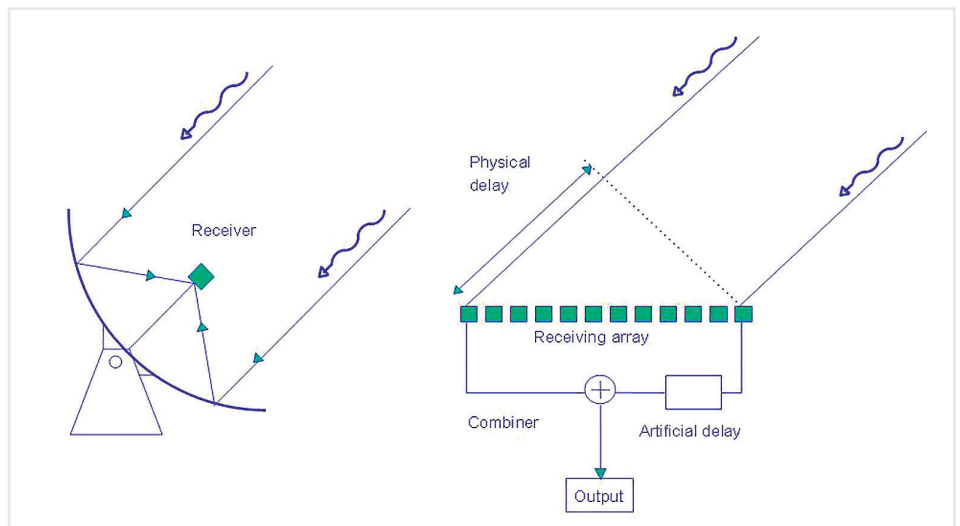


Fig. 1 Conventionele radiotelescoop en de platte antenne techniek

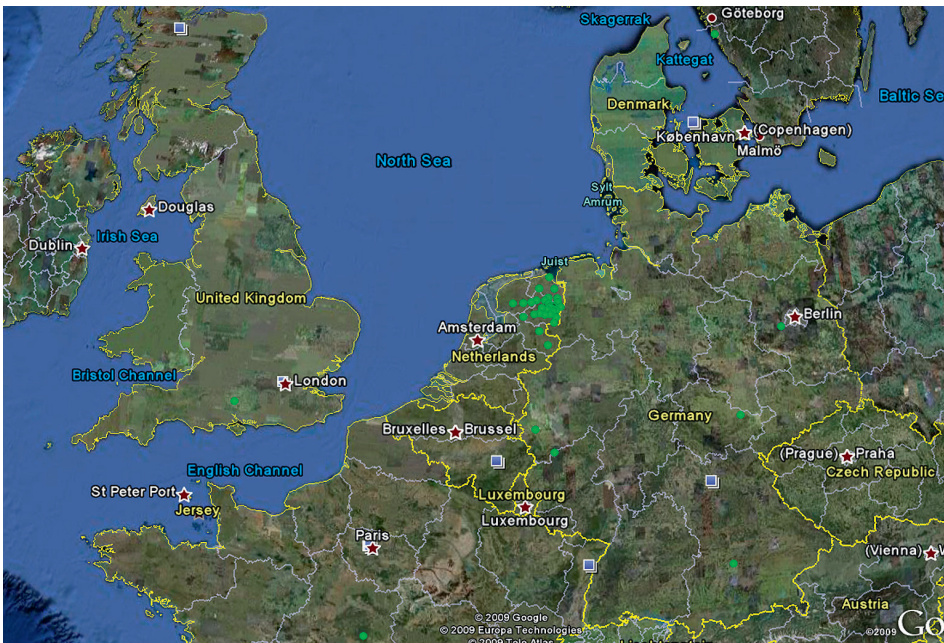


Fig. 2 Layout van LOFAR, elke groene stip is een LOFAR station

de spatiële resolutie van LOFAR daarmee verhoogd wordt. In figuur 2 een overzicht van de LOFAR stations in Europa.

Een supercomputer wordt ingezet om de grote hoeveelheden data uit het veld te combineren en verder te verwerken. De data uit de velden wordt getransporteerd via optische fibers naar de centrale processor [2].

De hoeveelheid data die gegenereerd wordt op een station is 230 Gbps (~6 dvd's per seconde). Deze wordt lokaal op een station ingedikt tot 3 Gbps door de antennesignalen van ieder veld bij elkaar op te tellen en zo een bundel aan de hemel te vormen.

Wetenschappelijke uitdagingen

Met LOFAR wordt een nieuw stuk van het elektromagnetisch spectrum beschikbaar gesteld voor de wetenschap. Wetenschappelijk gezien zijn er een aantal interessante onderzoeken geïdentificeerd met dit nieuwe instrument:

Studie van het heelal op hoge roodverschuivingen

Neutrale waterstof EM-golven afkomstig van melkwegstelsels worden gebruikt om deze objecten aan de hemel te detecteren. Uitgaande van een expanderend heelal bewegen objecten aan de hemel van ons af. Hierdoor zal de oorspronkelijke emissielijn van neutrale waterstof op 1420 MHz ten gevolge van dopplerverschuiving in frequentie verlaagd worden (wat roodverschuiving genoemd wordt). De mate van roodverschuiving zegt iets over de 'leeftijd' van het ontvangen signaal. Hoe verder weg hoe hoger de roodverschuiving en dus hoe lager in frequentie de emissielijn van neutrale waterstof te detecteren valt. Onderzoek naar straling van neutrale waterstof van de 'eerste' objecten is nu mogelijk met LOFAR. Met deze 'tijdmachine' kunnen modellen van het ontstaan van het heelal worden verbeterd. Tevens kunnen er nieuwe nauwkeuriger modellen worden ontwikkeld.

Bepaling van de epoche van reïonisatie

Vlak na de big bang was de temperatuur van het heelal zo hoog dat er nog geen sprake kan zijn geweest van atomen. Op een gegeven moment, nadat het heelal voldoende was afgekoeld, zijn er waterstofatomen ontstaan door de samenklontering van een neutron, proton en elektron. Dit plotselinge versterkende proces zou meetbaar moeten zijn met behulp van LOFAR. Er is sprake van waterstof, dus we zoeken naar de neutrale waterstoflijn die roodverschuiven is. De precieze roodverschuiving (en dus de waarneembereik) is niet exact bekend maar valt wel in het waarneembereik van LOFAR. Het detecteren van dit verschijnsel zal een gigantische bijdrage leveren aan de wetenschap.

In kaart brengen van galactische kosmische straling

Een andere wetenschappelijke bijdrage van LOFAR ligt in het in kaart brengen van de driedimensionale verdeling van galactische kosmische straling.

Studie naar fenomenen in het heelal op het gebied van uitbarstingen en andere snel variërende bronnen

Wie denkt dat het heelal zich relatief statisch gedraagt, heeft het mis. Er zijn fenomenen waargenomen waarbij er plotseling uitbarstingen voorkomen (Gamma Ray Bursts, supernova's) of waarin snel variërende bronnen voorkomen (pulsars). Om deze zogeheten 'transients' waar te nemen is LOFAR bij uitstek geschikt. Traditionele radiotelescopie maken gebruik van parabolen, waardoor het beeldveld (field-of-view) zeer beperkt is (bijvoorbeeld een halve graad voor een Westerbork telescoop op 1400 MHz, wat ongeveer de grootte van de maan is). LOFAR is instantaan gevoelig voor bijna de gehele zichtbare hemel. Hierdoor wordt de kans op detectie van transients veel groter en is LOFAR een bij uitstek geschikt instrument om hier onderzoek naar te doen. Ook de detectie van pulsars en het onderzoek ernaar kan door LOFAR worden gedaan vanwege het feit dat de flux sterker is op lagere frequenties. Helaas is de versmering ten gevolge van dispersie van het signaal groot maar dat kan worden ondervangen door een coherente de-dispersie-computer.

Relatie tussen de zon en de ionosfeer

Met behulp van LOFAR kunnen zogeheten CMEs (Coronal Mass Ejections) vanuit de zon vroegtijdig worden gedetecteerd. Tezamen met zonnereadersystemen kan dan de ionosfeer van de aarde onderzocht worden.

En dan is er natuurlijk een grote groep van onderzoeken en wetenschap mogelijk waarvan we nu nog geen weet hebben. Een antwoord op een wetenschappelijke vraag genereert immers weer tien nieuwe vragen. Bovendien worden er misschien verschijnselen gedetecteerd die nieuwe modellen van het ontstaan van het heelal vereisen. Het is bekend dat belangrijke uitvindingen (zoals penicilline en röntgenstraling) per ongeluk ontdekt zijn. Wie weet wat er met LOFAR gemeten wordt zodra het instrument gereed is.

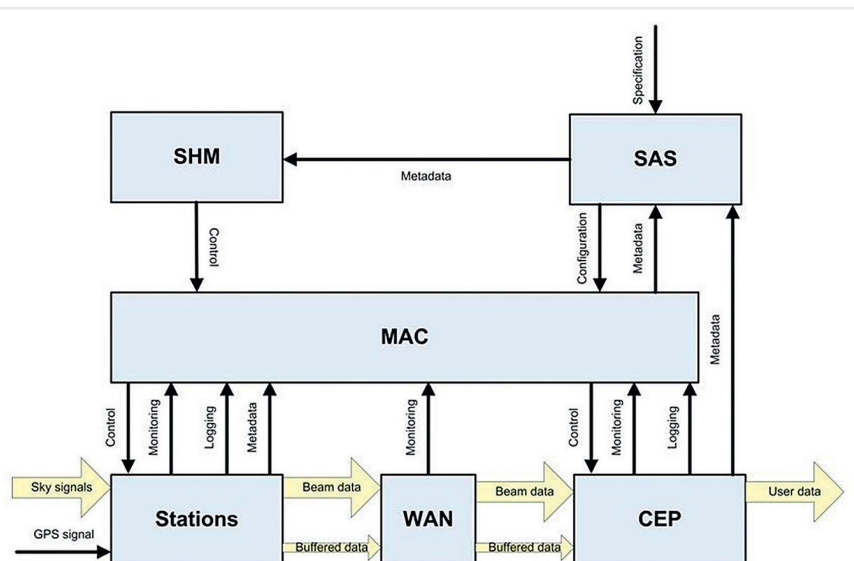


Fig. 3 LOFAR systeemarchitectuur

LOFAR systeemarchitectuur

Voor de astronomische toepassingen is de architectuur van LOFAR weergegeven in figuur 3. De architectuur is opgebouwd uit de volgende elementen:

Stations

Voor iedere specifieke observatie selecteert een station een gedeelte of meerdere gedeeltes van de hemel. Het uitgangssignaal van een station bestaat dan ook uit meerdere bundels. In figuur 2 staan de stations in Nederland en verder in Europa weergegeven.

Wide Area Network (WAN)

Het WAN subsysteem vormt een transparante laag tussen de stationbundels en de centrale processor. Door middel van dit netwerk worden de gegevens uit de velden getransporteerd naar een centrale locatie.

Hiervoor wordt een glasvezelinfrastructuur gebruikt.

Central processor (CEP)

In de centrale processor worden de bundels van alle stations gecombineerd en verwerkt, zodat een gebruiker uiteindelijk krijgt wat er gespecificeerd was.

Scheduling And Specification (SAS)

Gegeven een specificatie, zorgt SAS ervoor dat een observatie ingepland wordt en dat de juiste instellingen doorgestuurd worden. Verder faciliteert SAS ook de opslag van meta data voor de langere termijn en het toegankelijk maken van deze data voor gebruikers. Meta data zijn extra gegevens die ook voor de gebruiker van belang zijn: zoals gebruikte antennes, temperatuur, enz.

Monitoring And Control (MAC)

Het MAC systeem configureert alle onderlig-

gende subsystemen voor een waarneming. Ook wordt de toestand van de subsystemen door MAC bijgehouden.

System Health Management (SHM)

SHM houdt de gezondheid van het systeem bij en identificeert vroegtijdig falen van componenten voordat ze daadwerkelijk stuk gaan. Dit is vooral een belangrijk subsysteem omdat LOFAR dermate groot is dat de gezondheid op een automatische manier bijgehouden moet worden.

Sensors

Voor de astronomische toepassing zijn twee typen antennes nodig om het gehele spectrum van 30 - 240 MHz te dekken met voldoende gevoeligheid. Tussen de 80 - 120 MHz wordt niet waargenomen aangezien daar de FM radiozenders voor teveel storing zouden zorgen.

De lage band van 30 - 80 MHz wordt ontvangen door de lage band antenne (LBA) en de hogere band van 120 - 240 MHz door de hoge band antennes (HBA). Iedere HBA tegel bestaat uit een set van 4×4 individuele antenne-elementen.

Voor de geofysische toepassing worden vibratiesensoren (geophones) geplaatst. Tevens worden er een aantal microbarometers geplaatst ten dienste van de infrasond detectie.

In een subset van de stations worden er sensoren ten behoeve van de precisielandbouw geplaatst. Tevens is de netwerkinfrastructuur van LOFAR voldoende om additionele sensoren toe te voegen aan de stations. De sensorsystemen van de verschillende applicaties zijn behoorlijk onafhankelijk van elkaar. De enige componenten die gedeeld worden zijn:

- De glasvezelinfrastructuur draagt zorg voor de communicatie tussen de velden en de centrale processor;
- Het klok- en synchronisatiesysteem voorziet in nauwkeurige timing en synchronisatiesignalen naar een deel van de sensorsystemen.

Stations

Binnen LOFAR maken we onderscheid tussen drie stationtypes, die vooral verschillen in het aantal componenten:

- Core stations, bestaande uit 96 Low Band Antennes (LBA) en 2 velden van ieder 24 High Band Antennes (HBA);
- Remote stations, bestaande uit 96 LBAs en 1 veld met 48 HBAs;
- Internationale stations bestaande uit 96 LBAs en 96 HBAs.

De signalen van de antennes binnen een station komen samen op een centrale locatie per station. Daar staan een drietal kasten waarin de rest van de stationselektronica gehuisvest is. De componenten van een station zijn in figuur 6 weergegeven. Een aantal belangrijke parameters van een station zijn opgesomd in tabel 1. In een station worden de elektromagnetische signalen ontvangen en omgezet naar het



Fig. 4 De Low Band Antennes van LOFAR. De LBA bestaat uit een (PVC) buis die afgespannen wordt door draden die de antenne vormen. In de kop van de LBA bevindt zich de Low Noise Amplifier. De signalen worden via coaxkabels naar de ontvanger in de centrale kast op het station getransporteerd.



Fig. 5 Hier zien we de plaatsing van High Band Antennes op de LOFAR stations. Elke HBA is een tegel van 5 bij 5 meter met daarin 16 ontvangstelementen.

elektrisch domein door middel van antennes. In de HBA worden de signalen van de individuele 4×4 antennes gewogen bij elkaar opgeteld (analoge bundelvorming), zodat er slechts één kabel per polarisatie hoeft te worden aangesloten.

Aangezien de antennes binnen een station over een oppervlakte van ca. 150 bij 100 vierkante meter geplaatst zijn, dienen de antennesignalen getransporteerd te worden via coaxiale kabels naar de drie stationskasten. De elektrische signalen worden in de stationskasten door ontvangers (receivers) versterkt, gefilterd en omgezet naar het digitale domein. Vervolgens worden de gegevens in het digitale domein (digital processing) gereduceerd door:

- Filtering en het selecteren van subbanden;
- Combineren van alle antennedata voor de geselecteerde subbanden (bundelvorming).

Ten slotte worden aan de datastroom de controledata en data van de niet-astronomische applicaties toegevoegd en geconverteerd naar het optische domein alvorens te transporteren via het glasvezelnetwerk.

Beschrijving	Waarde	Eenheid
Aantal LBAs	96	
Aantal HBAs	48	
Aantal polarisaties	2	
LBA frequentiebereik	30 - 80	MHz
HBA frequentiebereik	120 - 240	MHz
Aantal subbanden	512	
Max. aantal bundels	8	
Min. aantal bundels	1	
A/D omzetterresolutie	12	bit
Bemonsterfrequentie	200/160	MHz
Uitgangsbreedte	48	MHz

Tabel 1. Belangrijke parameters van een station (alle parameters zijn weergegeven voor één polarisatie)

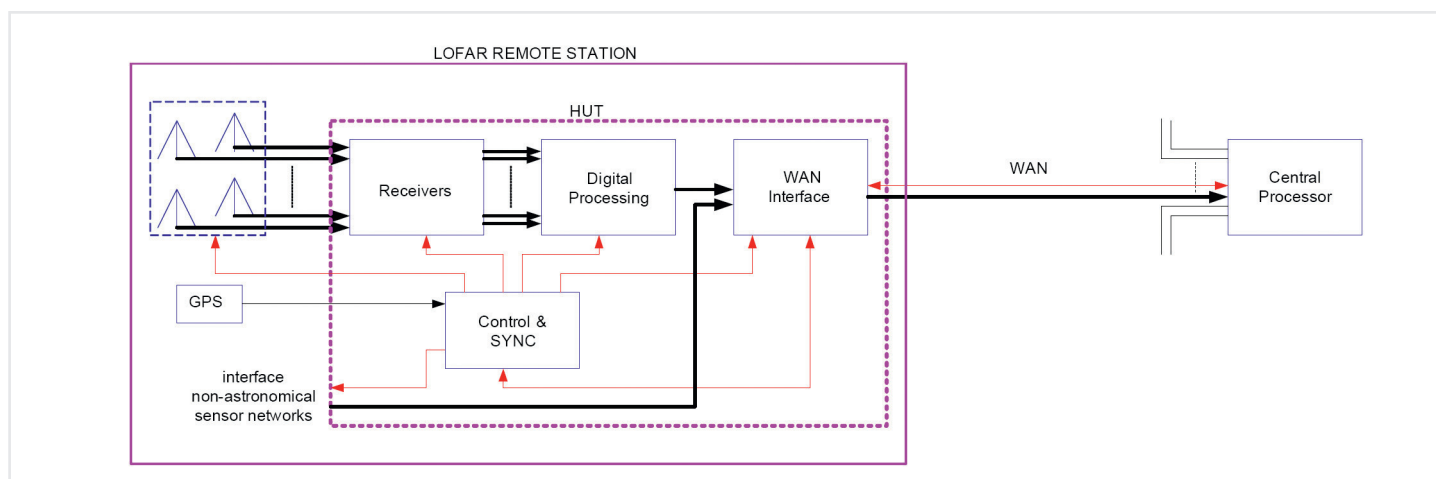


Fig. 6. Blokdigram van een LOFAR station

Ontvangersysteem

De ontvanger in een station selecteert één van de antennes. Er zijn drie antenne-ingangen. Eén antenne-ingang wordt gebruikt voor de HBA en de twee andere voor LBAs (alleen in de Nederlandse stations worden beide LBA antenne-ingangen gebruikt). Dit maakt het mogelijk om uit verschillende LBA configuraties te kiezen. Voor een aantal waarnemingen is het gewenst dat de LBA antennes ver uit elkaar liggen, terwijl andere observaties juist een dicht bijeengepakte configuratie vereisen. Na selectie van het antennesignaal wordt het signaal gefilterd door middel van één van de vier geïntegreerde filters. De filters verdelen de ingangsbreedte in vier verschillende stukken. Vervolgens wordt het signaal versterkt en nogmaals gefilterd om de invloed van de ruis buiten de band te minimaliseren. Om het aantal analoge componenten te reduceren is er gekozen voor een breedbandige directe digitale conversie architectuur. De analoog naar digitaal (A/D) omzetter converteert het analoge signaal naar 12 bits en bemonstert het signaal met maximaal 200 MHz.

De directe conversie beperkt ons om alleen in de Nyquistzones waar te nemen. Om vouwvervorming tijdens A/D omzetting te voorkomen, wordt het signaal sterk gefilterd tot de bovengrens van de Nyquistzone. Het gevolg is dat men niet goed kan waarnemen rondom deze Nyquistgrenzen (bij 200 MHz). Vandaar dat nog een alternatieve bemonsterfrequentie van 160 MHz geïmplementeerd is. Hiermee wordt het mogelijk om ook rondom 200 MHz waar te nemen. Rondom 100 MHz wordt niet waargenomen in verband met de FM radiosignalen.

Digitale processingsysteem

Na de analoog naar digitaal omzetting wordt de band gesplitst in 512 gelijke stukken door een filterbank. Het negatieve gedeelte van het spectrum wordt genegeerd. Met andere woorden: het reëleingangssignaal wordt vanaf hier gerepresenteerd door complexe signalen. Iedere subband wordt gedecimeerd met een factor 1.024 na de filtering. Vandaar dat de klokfrequentie na filtering gereduceerd is tot

195 kHz en 156 kHz respectievelijk, voor een bemonsterfrequentie van 200 MHz en 160 MHz. Na filtering wordt een subset (248) van de subbanden geselecteerd. De maximale bandbreedte uit een station is ca. 48 MHz per polarisatie. Deze bandbreedte komt overeen met wat de centrale processor nog kan verwerken [5].

De antennesignalen worden digitaal gecombineerd tot bundels. Dit wordt gedaan per subband door onafhankelijke bundelvormers. De gewichten die nodig zijn om de juiste tijdsvertraging aan te brengen worden berekend door een lokale computer (LCU: Local Control Unit). Iedere seconde worden er nieuwe gewichten richting de bundelvormer gestuurd om een bron aan de hemel te volgen. Tevens worden er nog statistieken opgenomen van de antennesignalen. Deze informatie wordt verzonden naar het controle (MAC) subsysteem. Naast de bundelvorming worden de antennesignalen voor één subband met elkaar gecorreleerd. Dit wordt gedaan om de verschillende analoge signaalpaden te kunnen

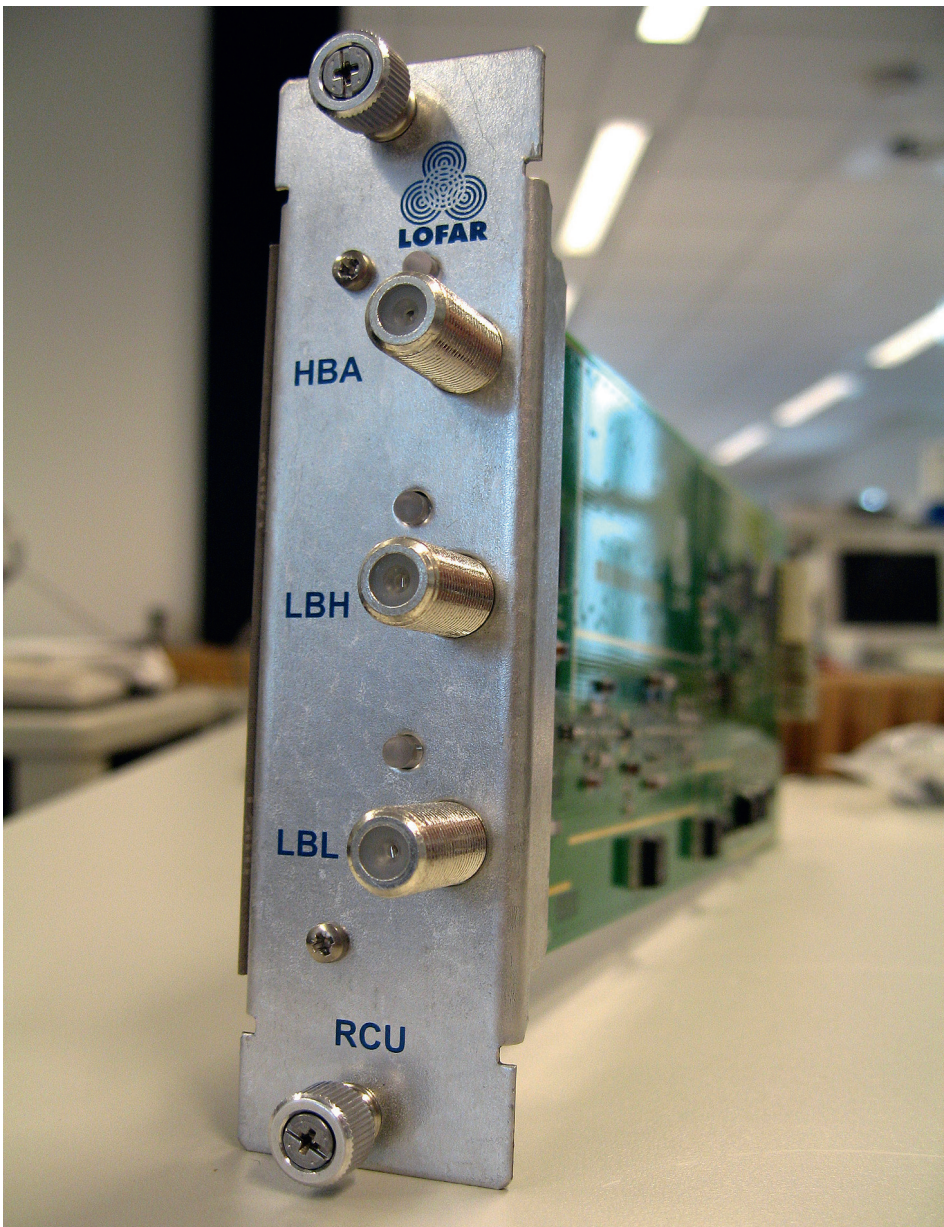


Fig. 7 Een van de ontvangersystemen van LOFAR (de RCU - Receiver Unit)

kalibreren voor amplitude- en faseverschillen. Deze informatie kan ook gebruikt worden voor RFI (Radio Frequency Interference) detectie.

De antennedata of subbanddata kan ook nog opgeslagen worden in een transient buffer. Zodra er een interessant gebeurtenis plaatsvindt kunnen deze buffers bevroren worden en kan deze informatie naar de centrale processor verstuurd worden voor nader onderzoek. Dit bevroermoment kan bepaald worden door interne of externe triggers. De interne triggers worden gegenereerd door een detectie-algoritme dat voor ieder signaalpad geïmplementeerd is.

Centrale processor faciliteit

De centrale processor hardware wordt gebruikt om de gegevens van de stations verder te verwerken. Een overzicht van de centrale processor architectuur is weergegeven in figuur 8. Het hart van de centrale processor vormt een BlueGene/P supercomputer van IBM [6]. Deze ontvangt de gegevens van de stations en lijnt deze op zodat vertragingen ten gevolge van het netwerk er

uit gehaald worden. Tevens vindt er tijdcompensatie plaats om de weglengte tussen de stations te compenseren. Vervolgens worden de subbanden van de stations opgesplitst in kleinere frequentiekanalen. Ieder frequentiekanal van een station wordt gecorrigeerd

met hetzelfde frequentiekanal van alle andere stations.

Het resultaat van de correlatie wordt opgeslagen in een cluster van opslagnodes. Uiteindelijk is de hoeveelheid opslag ca. 2 PByte groot. Een offline cluster van 10 Pflop wordt gebruikt om de informatie te kalibreren en verder te reduceren tot een eindproduct. De eindproducten worden vervolgens geëxporteerd richting een archief.

Status van het project

Momenteel is de bouw van LOFAR in volle gang. Bijna de helft van de stations worden al gebruikt in waarnemingen. De verwachting is om in de zomer van 2010 klaar te zijn. In figuur 9 is een foto te zien van de zogenaamde superterp. Hierop zijn zes stations gebouwd in het hart van LOFAR, te Exloo. De installatie van de HBA tegels is weergegeven in figuur 10. Figuur 11 geeft de drie stationskasten weer en de bekabeling daarvan.

Tot nog toe zijn er al tal van wetenschappelijke testen gedaan met LOFAR om te controleren of het systeem werkt zoals het zou moeten werken. Voor dit soort testen worden bekende bronnen waargenomen waarvan het gedrag bekend is. Een resultaat van de eerste drie stations is weergegeven in figuur 12. De stations zijn gericht naar Cygnus A, een van de helderste radiobronnen. De twee bovenste plaatjes laten de ruwe data zien van de LBA en HBA. In de twee onderste plaatjes is de opgeschoonde data te zien.

Tevens zijn we begonnen met de bouw van stations in het buitenland. Momenteel is er al hardware verscheept naar Chilbolton (Engeland) en Juelich (Duitsland). In Garching, Potsdam (Duitsland) en Nancay (Frankrijk) zijn de LBA velden geplaatst. Ten slotte is er in Effelsberg en Tautenburg (Duitsland) al een compleet station gebouwd. Ook zal er een station gebouwd worden in Onsala (Zweden).

Dankzegging

LOFAR wordt gebouwd door een groot team. Allen dank voor de bijdragen aan LOFAR en dit artikel. LOFAR wordt gefinancierd door de Nederlandse overheid in het Bsik programma voor interdisciplinair onderzoek in de ken-

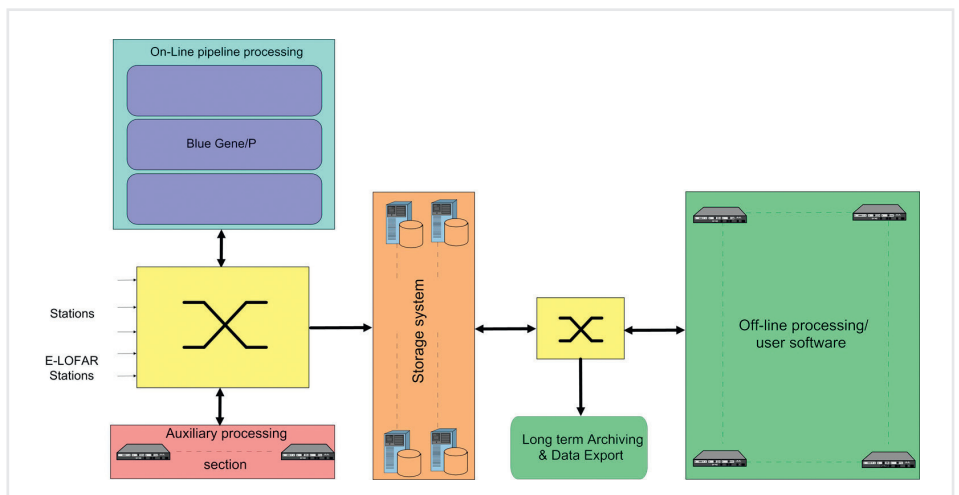


Fig. 8 Centrale processor architectuur



Fig. 9 Het hart van LOFAR waarop 6 core stations zijn gebouwd



Fig. 11 De drie stationskasten waarop alle antennes zijn aangesloten

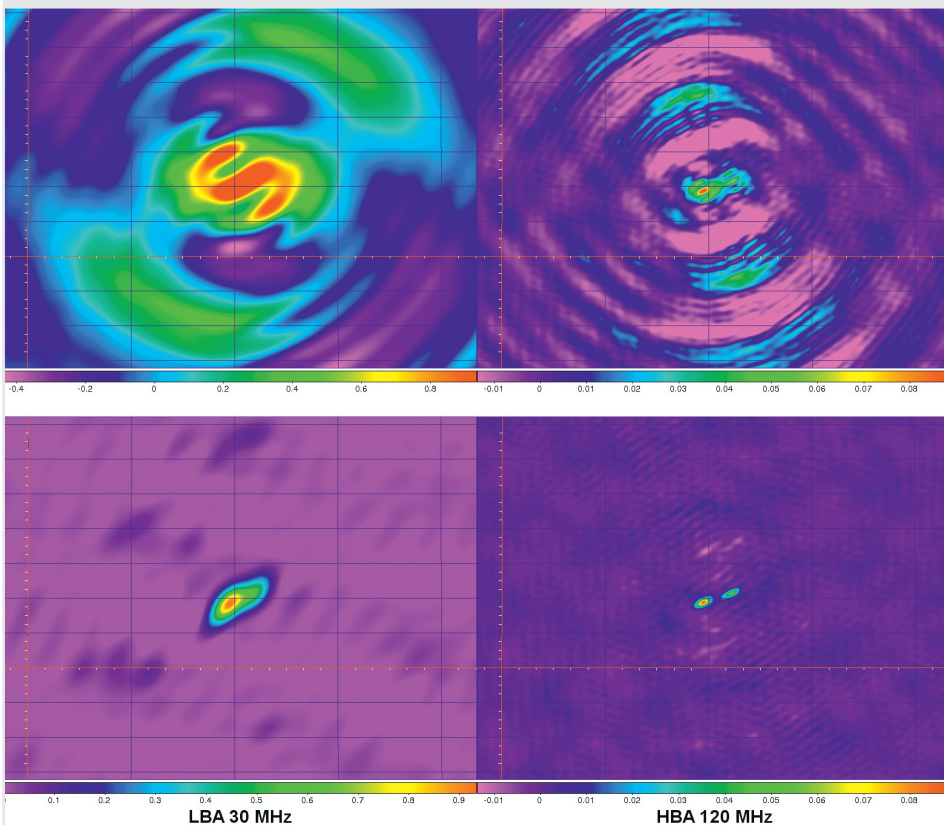


Fig. 12 Eerste resultaten van LOFAR met slechts drie stations



Fig. 10 Installatie van de HBAs

nisinfrastructuur. Additionele financiering is verkregen van de Europese Unie met EFRO subsidie en van het Samenwerkingsverband Noord-Nederland met EZ/KOMPAS subsidie.

Referenties

- [1] J. Bregman, 'Concept design for a Low Frequency Array', Proc. SPIE conf. 4015, 2000.
- [2] A.W. Gunst, G.W. Kant, 'Signal Transport and Processing at the LOFAR Remote Stations', URSI 2005, New Delhi, October, 23 - 29, 2005.
- [3] C.M. de Vos, A.W. Gunst, R. Nijboer, 'The LOFAR Telescope: System Architecture and Signal Processing', Proceedings of the IEEE, vol. 97, No. 8, pp. 1431-1437, August 2009.
- [4] C.M. de Vos, 'LOFAR: The First of a New Generation of Radio Telescopes', Proceedings ICASSP, vol. 5, pp. 865 - 868, March 2005.
- [5] H.R. Butcher, 'LOFAR: First of a New Generation of Radio Telescopes', proceedings of the SPIE conf, 5489: 537 - 544, October 2004.
- [6] K. v.d. Schaaf, J.D. Bregman, C.M. de Vos, 'Hybrid Cluster Computing Hardware and Software in the LOFAR Radio Telescope', proceedings of PDPTA 2003, CSREA Press.
- [7] J.W. Romein, P.C. Broekema, J. Mol, R. van Nieuwpoort, 'The LOFAR Correlator: Implementation and Performance Analysis, ACM Symposium on Principles and Practice of Parallel Programming (PPoPP'10)', Bangalore, India, January, 2010.
- [8] J.W. Romein, P. C. Broekema, E. van Meijeren, K. van der Schaaf, W. H. Zwart, 'Astronomical Real-Time Streaming Signal Processing on a Blue Gene/L Supercomputer', ACM Symposium on Parallel Algorithms and Architectures (SPAA'06), Cambridge, MA, pp. 59-66, July 2006.
- [9] LOFAR Press release, 'First high quality wide field LOFAR image', Dwingeloo, the Netherlands, 25 April 2007 (<http://www.astron.nl>).
- [10] Stefan J. Wijnholds, Jaap D. Bregman, Albert-Jan Boonstra, 'Sky Noise Limited Snapshot Imaging in the Presence of RFI with LOFAR's Initial Test Station', Experimental Astronomy, V17, pp. 35 - 42, 2004.