



Nieuwe methoden om kortstondige astronomische fenomenen op te sporen

M.J. Kuiack

Nederlandse samenvatting

Elk object dat gezien kan worden vanaf de andere kant van onze Melkweg, of vanuit een ander melkwegstelsel, moet wel een geweldige hoeveelheid energie uitstralen. Objecten die dit maar heel kort doen zijn bovendien interessant omdat hun dynamische aard vereist dat deze energie in een kleiner volume bevat is, waarvan de grootte evenredig is met de tijdschaal van de evolutie. Over deze gebieden van ons universum, waar de meest extreme natuurkundige processen zich afspelen, hebben we nog veel te leren. Dit is zowel het geval voor het emissiemechanisme van pulsars, waarvan de voorlopers bekend en goed bestudeerd zijn, als voor fast radio bursts, waarvan de details betreffende de gebeurtenis-populatie, het voorloperobject, en het emissiemechanisme nog onbekend zijn. En het is nog meer het geval voor eventuele, tot op heden nog niet waargenomen, kortstondige fenomenen waar de hemel vol van zou kunnen zijn.

Voor het ontwikkelen en testen van goede modellen voor deze bronnen is het nodig om een zo compleet mogelijk beeld te hebben van hun emissie-eigenschappen, hun spectrale energieverdelingen, en populatiestatistieken. Dit vereist het verzamelen van vele voorbeelden, in alle frequenties waarin waarnemingen gedaan kunnen worden. Voor niet-herhalende of zelden-herhalende bronnen is ofwel een flinke dosis geluk nodig om hen bij toeval waar te nemen, of er moet veel tijd worden besteed om systematische zoektochten te verrichten. Tot voor kort hebben technische beperkingen de zoekcapaciteit op lage radiofrequenties beperkt. Het Amsterdam-ASTRON Radio Transient Facility And Analysis Center (AARTFAAC) project maakt gebruik van recente vorderingen in rekenkracht om een lage-radiofrequentie hemelmonitor mogelijk te maken die in staat is om elke seconde de volledige hemel af te beelden, live, met minimale vertraging. Het overkoepelende doel van dit proefschrift is om AARTFAAC te gebruiken om astronomisch gezien interessante transiënt kandidaten te detecteren en te classificeren.

De definitieve inbedrijfstelling van AARTFAAC-6, weergegeven in [Figuur A](#), inclusief de ontwikkeling van de kalibratie- en beeldvormingssoftware, werd voltooid in 2015/2016. Als eerste wetenschappelijke gebruiker van het array was mijn eerste prioriteit het kenschetsen van de kwaliteit van de uitvoergegevens. Dit werk, beschreven in [Hoofdstuk 2](#), omvatte een gedetailleerde analyse van de ruiskenmerken van alle heldere, persistente bronnen die werden gedetecteerd door het instrument en onze methode voor het kalibreren van de real-time beeldstroom.



Figuur A: De 'superterp', de centrale 6 stations van de LOFAR-kern waaruit de AARTFAAC-6 configuratie bestaat die in dit proefschrift wordt gebruikt. Elk station bestaat uit een HBA-component, twee vierkanten van 24 antenne-tegels en een LBA-component, 96 antennes met een min-of-meer Gaussiaanse ruimtelijke verdeling. Foto: Aerophoto Eelde, 2011

N

Onze transiënt-zoektocht zou vereisen dat op elk beeld een nauwkeurige schaling van de fluxdichtheid wordt toegepast, waarbij de pixelwaarden van willekeurige eenheden naar janskys worden vertaald. Dit wordt gedaan door de gemeten fluxdichtheid van bekende kalibratorbronnen die over het beeld worden gedetecteerd te vergelijken. Helaas ontdekten we dat de bestaande lage-frequentie catalogi ofwel niet genoeg bronnen bevatten om te allen tijde de hemel voldoende te beslaan, ofwel niet dicht genoeg bij onze waarnemingsfrequentie van 60 MHz werden waargenomen. [Perley & Butler \(2017\)](#) hebben van 20 bronnen de spectrale vorm van 50 MHz tot 50 GHz met hoge nauwkeurigheid gemeten. Helaas bleven er na het weglaten van de helderste bronnen, die we tijdens de kalibratie moeten verwijderen, slechts acht bronnen over in ons declinatiebereik. De Very Large Array Low-frequency Sky Survey Redux (VLSSr; [Lane et al., 2014](#)) is een veel grotere catalogus, met meer dan 90.000 bronnen die op 74 MHz gedetecteerd zijn. [Helmboldt et al. \(2008\)](#) verzamelden voor de 388 helderste bronnen metingen op hogere frequenties en leidde hun spectrale vorm af. De onzekerheid in de fluxdichtheid op 60 MHz is daarentegen veel groter, aangezien de laagst waargenomen frequentie 74 MHz was.

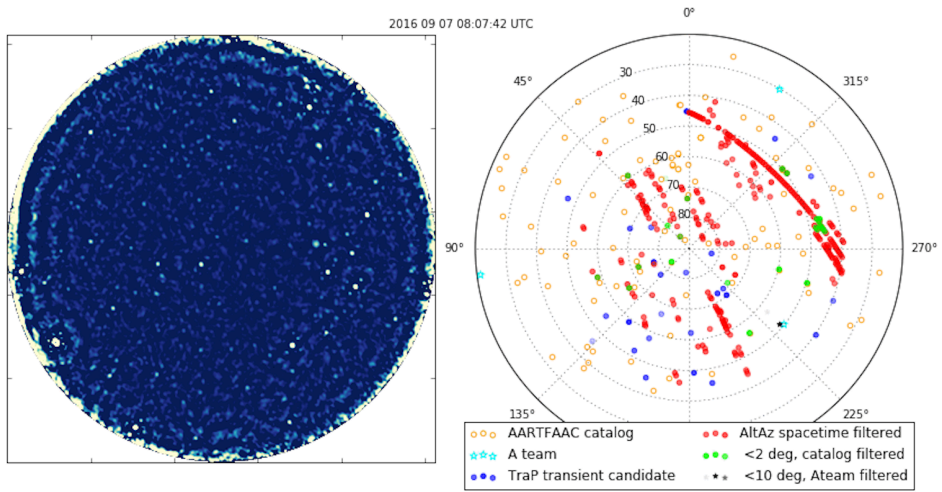
Aangezien geen van beide catalogussen voldoende was voor onze behoeften, hebben we ze beide gebruikt om onze eigen kalibratiecatalogus samen te stellen en te testen. De unieke kenmerken van AARTFAAC: het grote gezichtsveld, de tijdsresolutie en de lange duur van onze waarnemingen, stellen ons in staat om een zeer groot aantal onafhankelijke metingen te doen van de fluxdichtheid van 30–50 heldere bronnen, verdeeld over de hemel. We hebben dus een bootstrapping-methode gebruikt door eerst met behulp van de nauwkeurigere [Perley & Butler \(2017\)](#) kalibrators de fluxdichtheidsverdelingen van alle bronnen in de hemel te schalen als er voldoende kalibrators binnen het gezichtsveld waren.

Vervolgens hebben we alle andere bronnen in de kalibratiecatalogus opgenomen om de fluxdichtheidsverdelingen van nieuwe bronnen op verschillende tijdstippen te kunnen schalen. Na 31 uur waren 167 bronnen, verdeeld over de hele noordelijk hemel, met voldoende significantie waargenomen. We ontdekten dat het passen van scheef-normale verdelingen en het rapporteren van de modus van de fluxdichtheidsmetingen de neiging verrekende van ionosferische storingen om met een bepaalde voorkeur de schijnbare fluxdichtheid van een bron te vergroten.

Met onze kunde om de uitvoergegevens correct te kalibreren en een stroom beelden te genereren met goed bekende ruiskenmerken, werden van augustus 2016 tot september 2019 1100 uur aan waarnemingen genomen. Hieruit zijn 545 uur aan goede data, of bijna vier miljoen één-seconde snapshot-beelden, geanalyseerd voor de eerste AARTFAAC transiënt zoektocht, die in Hoofdstuk 3 is gepresenteerd.

Het doel van dit eerste onderzoek, waarbij ongeveer de helft van de data werd gebruikt, was allereerst om ofwel nieuwe populaties van onbekende transiëntbronnen op lage frequenties te vinden, of er de diepst mogelijke statistische grenzen aan te stellen. Door onze bevindingen te vergelijken met andere recente lage-frequentie transiëntzoektochten, hebben we aangetoond dat zowel onze detecties als non-detecties helpen om grenzen te plaatsen op de mate waarin sommige, eerder ontdekte brontypen vóórkomen. We plaatsen een sterke bovengrens van 1,1 bronnen per dag over de gehele hemel op de mate waarin tot nog toe onbekende transiënten vóórkomen die helderder zijn dan 60 Jy en die aanzienlijk veranderen op tijdschalen van één seconde tot een paar uur. Ten tweede was ons doel tijdens de analyse van de data van deze zoektocht het ontwikkelen van nieuwe technieken voor geautomatiseerde detectie en classificatie van transiënten. Daartoe hebben we nieuwe filtermethoden voor transiënt-kandidaten ontwikkeld met statistische heuristieken, weergegeven in het rechterpaneel van Figuur B, die eerst 97% van de gedetecteerde signalen wegfilteren, afkomstig van niet-astrofysische bronnen zoals RFI, vliegtuigen en satellieten (rode cirkels), en zijlobben van heldere bronnen (zwarte en groene cirkels). De rest werd zowel handmatig geanalyseerd, wat leidde tot de detectie van een reuzenpuls, die in Hoofdstuk 4 wordt besproken, alsook met een nieuw algoritme voor de detectie van lichtcurvepieken, dat automatisch 99% van de overgebleven kandidaten wegfilterde, wat de 76 enkelvoudige schitteringen overliet, waaronder één extragalactische kandidaat, die in Hoofdstuk 5 beschreven zijn.

De mogelijkheid om de overgrote meerderheid van de gedetecteerde bronnen automatisch weg te filteren als duidelijk onecht, maakte het mogelijk om een handmatige follow-up te doen van een meer handelbaar aantal resterende kandidaten. Dit leidde tot de ontdekking van de eerste heldere transiënt met AARTFAAC, reuzenpulsen van PSR B0950+08, het onderwerp van Hoofdstuk 4. Deze pulsar en zijn reuzenpulsen zijn goed bestudeerd, en dus is er een uitgebreide literatuur waarmee we onze resultaten kunnen vergelijken. Vanwege het grote data volume dat is verzameld in het AARTFAAC archief, konden we prioriteit geven aan het verwerken van waarnemingen waarin deze bron zichtbaar zou zijn, en konden we dus snel een grote hoeveelheid data analyseren, en een aantal detecties van reuzenpulsen verzamelen dat vergelijkbaar was met de grootste eerder gepubliceerde studies.



Figuur B: Een voorbeeld van een één-seconde snapshot beeld (links) en de bronnen die zijn gedetecteerd in de voorgaande vijf minuten (rechts). De bronnen hebben een kleurcode die hun classificatie weergeeft, gebaseerd op hun afstand in positie en tijd tot bekende heldere bronnen, of tot elkaar.

Interessant is dat de pulsenergieverdeling die we vonden goed overeenkomt met de resultaten van studies met een vergelijkbaar instrument, de Long Wavelength Array (LWA; Tsai et al., 2016): de verdeling volgt een machtwet met een index van $-4,66$ en $-4,82$ op respectievelijk $58,3$ MHz en $61,8$ MHz. We ontdekten dat deze energieverdeling constant is over waarnemingen met zeer verschillende activiteitsniveaus van de reuzenpulsen. Opvallend is echter dat de verdeling die we waarnemen verschoven is naar tien keer hogere energiën in vergelijking met de LWA-studie. Ten slotte ontdekten we dat de pulsemissie erg smalbandig kan zijn, met soms de totale waargenomen energie geconcentreerd in slechts één van onze $195,3$ kHz subbanden.

Handmatige inspectie van de bijna 10.000 resterende transiënt-kandidaten leverde inzichten op over de dynamische aard die zelfs typische radiobronnen bleken te hebben op lage frequenties, als ze waargenomen worden met voldoende tijdsresolutie. Dankzij het vermogen van AARTFAAC om één-seconde snapshot-beelden te maken konden we de effecten van extreme twinkeling volledig onderzoeken. Dit heeft geleid tot de ontwikkeling van geavanceerdere detectiemethoden voor transiënten, die gebaseerd zijn op het herkennen van uitbarsting-achtige eigenschappen binnen een lichtcurve, zoals beschreven in Hoofdstuk 5. Analyse van de resterende lijst met kandidaten om de kandidaten te vinden die enkelvoudige, geïsoleerde uitbarstingen leken te zijn, leverde de ontdekking op van een tot nog toe nog niet beschreven fenomeen: dat de fluxdichtheid van intrinsiek stabiele achtergrond-radiobronnen verhoogd kan worden, doorgaans met een factor 10, maar soms wel met een factor 100, gedurende een tijdsspanne van tien tot tientallen seconden. We konden dit fenomeen alleen onderscheiden van een echte kosmologische transiënt door onze multi-frequentie analyse. Het vergelijken van de aankomsttijd van de uitbarsting in de ver-

schillende waarneem-frequenties bracht geen significante dispersie-vertraging aan het licht, wat aangeeft dat de transiënt signalen niet inherent konden zijn aan de extragalactische bronnen waar hun posities mee samenvielen.

Door middel van deze analyse van lichtcurve-kenmerken hebben we bronnen waargenomen die zo sterk twinkelden dat honderden twinkels konden worden waargenomen van een paar bronnen, met eigenschappen die vergelijkbaar zijn met de geïsoleerde versterkingen, maar met enigszins andere statistische verdelingen. Verscheidene waarnemingen toonden aan dat deze zich voordeden in gebieden waarvan de positie noch gebonden was aan de rotatie van de aarde, noch vastzat aan de hemel, en die bleven bestaan voor tijdsperioden van uren tot een dag. Uitgaande van een simpel model van een plasmalens konden we sommige eigenschappen achterhalen van het medium dat de versterkingen veroorzaakt. We ontdekten dat de lenzen hoogstwaarschijnlijk vóórkomen op een hoogte van 300–400 km in de ionosfeer. Verder zijn de dichtheid en snelheid van de lens, die nodig zijn om de waargenomen lichtcurven te produceren, in redelijke overeenstemming met andere metingen die zijn gedaan tijdens een voortbewegende ionosferische verstoring, waar geomagnetische activiteit grote vervormingen in de ionosfeer veroorzaakt, die zich vervolgens naar buiten verbreiden zoals de golven van een steen die in een vijver plonst.

Ten slotte maken we ook melding van een 10 s, 100 Jy extragalactische transiëntkandidaat. Het feit dat de transiënt hoogstwaarschijnlijk extragalactisch is, is afgeleid uit de tijd-frequentie-vertraging, die de dispersie-vertraging nauw volgt die het gevolg is van de voortplanting van radiogolven door een lange weglengte van interstellair medium. Op basis van de dispersie-vertraging leiden we een zogeheten dispersiemaat (DM) af (een grootheid die evenredig is met de hoeveelheid materiaal waar het signaal doorheen reisde) die de bron tenminste in de buitenste regionen van de halo van de Melkweg plaatst, en waarschijnlijk zelfs op een extragalactische afstand, met een bovengrens van 63 Mpc, ervan uitgaande dat er geen DM-bijdrage is van het gaststelsel of de lokale omgeving. Met drie potentiële gaststelsels binnen dit positie- en afstandsbereik, is deze bron de beste kandidaat voor een daadwerkelijke extragalactische lage-frequentie radio-transiënt die tot op heden gevonden is.