

Gravitational wave astronomy with current and future generation detectors

Citation for published version (APA):

Singha, A. (2024). *Gravitational wave astronomy with current and future generation detectors*. [Doctoral Thesis, Maastricht University]. Maastricht University. <https://doi.org/10.26481/dis.20240404as>

Document status and date:

Published: 01/01/2024

DOI:

[10.26481/dis.20240404as](https://doi.org/10.26481/dis.20240404as)

Document Version:

Publisher's PDF, also known as Version of record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.umlib.nl/taverne-license

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

repository@maastrichtuniversity.nl

providing details and we will investigate your claim.

Summary

Gravitational waves are extremely small ripples in the stationary curvature of space-time in the Universe, produced by the motion and collisions of astrophysical objects of extreme mass and density, such as neutron stars and black holes. They were predicted by Albert Einstein in 1916 and detected by LIGO 100 years later. Detecting gravitational waves is an extremely challenging task because of their tiny amplitude, which requires exceptional precision from the measuring instrument.

Laser interferometer gravitational wave detectors split a laser beam into two arms with mirrors at the ends. When a gravitational wave passes through, it changes the lengths of the arms, causing a phase difference in the recombined laser beams. Detection challenges arise from various sources of noise, including seismic, thermal, quantum, Newtonian, detector noise and instrumental artifacts that can mimic a GW signal.

In the first half of the dissertation, I discussed Newtonian noise mitigation techniques for gravitational wave detectors, focusing on a comprehensive analysis of Newtonian noise in the Virgo detector. Newtonian noise, also known as gravitational gradient noise, manifests as the fluctuations of local gravitational fields, which originate from the density variations in the surroundings of the test masses caused by seismic, atmospheric, or anthropogenic factors. These density variations exert excess gravity force on the test mass in the gravitational wave detector, thereby mimicking GW signals at low frequencies.

While it is not possible to shield the detector directly from NN, there are conventional strategies for noise reduction. One such approach is to select for detector construction seismically quiet sites with minimal natural and man-made seismic disturbances. Going underground, as planned for the Einstein telescope, reduces seismic noise. Current detectors use NN subtraction with seismic sensors close to the test masses to estimate and cancel NN. This is challenging due to the complexity of

real seismic fields. It is favorable to choose flat surfaces to avoid scattering. Proper seismometer placement is critical due to limited coverage. Another possible method involves modifying the infrastructure, such as creating depressions around test masses. These recessed structures raise the test mass above the ground, reducing the NN. Virgo used such structures for operational reasons, raising questions about their effectiveness in reducing NN. I detailed the dimensions of recesses under Virgo's input and end test mirrors in central and end buildings in chapter 3, section 3.3

Figure 3.9 (bottom) illustrates the reduction factors of NN attributable to the VIRGO recess. I have calculated a nearly 2-fold reduction in Newtonian noise (NN) within the 12 to 15 Hz range. Reduction of Rayleigh-wave Newtonian noise by a factor of 2 or more is significant, especially considering that achieving a similar reduction through Newtonian noise cancellation typically requires the use of large arrays and complex techniques.

In chapter 4, I conducted spectral analyses, both spatially and temporally, and characterized the seismic field using data from the indoor and outdoor seismic arrays in the North End Building of the Virgo detector. Figure 4.3 provides an example of a spatial spectrum obtained from seismic arrays at a frequency of 10 Hz, where we observe multiple modes simultaneously present within the spectrum. I have considered the dominant seismic sources for different frequencies and estimated their corresponding velocities and propagation directions, as shown in figure 4.10. Through the array analysis, It is observed a lower speed of Rayleigh waves at Virgo, suggesting that NN suppression may be more pronounced than previously estimated when assuming a constant Rayleigh wave speed of 250 m/s.

Incorporating seismic dispersion into the estimation of Newtonian noise reduction has resulted in a more substantial reduction compared to previous estimates, as shown in figure 4.16. We observed a reduction in Newtonian noise by a factor of up to 10, attributed to the lower seismic velocity. According to these findings, the Newtonian noise cancellation system may only require minor additional noise reduction efforts, as seismic NN is already anticipated to be below the sensitivity targets for most frequencies. The verification of these findings will contribute to the optimization and fine-tuning of the Virgo detector's performance in preparation for the upcoming observation runs.

In chapters 5, 6, 7, I studied different topologies of Einstein Tele-

scope within the networks of third-generation gravitational wave detectors and their influences on the data analysis of gravitational wave signals. The response of a gravitational wave detector network to a GW signal depends on several critical factors, including the positions, orientations, and geometrical topologies of individual detectors. The antenna response function characterizes how a detector's orientation and geometry influence its ability to detect gravitational waves originating from various directions and polarizations. In figure 5.5, as presented in chapter 5, we observe that the antenna response function for a triangular detector, like the proposed Einstein Telescope (ET), offers several advantages. Specifically, ET's response is 50% higher compared to a single L-shaped detector, which lacks null directions.

Another important metric for evaluating detector performance is the horizon distance, which is the maximum distance at which a gravitational wave source directly above the detector can be detected, assuming optimal polarisation. Figure 5.9 shows the detectable redshift range for sources of different masses, illustrating the capabilities of both the Einstein Telescope and the Cosmic Explorer. Gravitational wave sources are diverse and distributed across the sky, so an evaluation of the detectors' capabilities requires consideration of their coverage of the entire sky. I have assumed that the sources are uniformly distributed across all sky locations, with random polarisations and tilt angles, and have shown that the redshift achieved for 50%, 90% of the best sources provides a realistic assessment of detector performance.

In chapter 6, I have examined the sky localization capabilities of third-generation gravitational wave detector networks such as the Einstein Telescope and Cosmic Explorer. This investigation includes a comparison between the 'L' shape and the proposed triangular topology of the Einstein Telescope.

I analyze two configurations: the 'Triangular' setup with a 10 km arm length and the 'L' configuration with arm lengths of 10 km, 15 km, and 20 km. I evaluate the performance of these networks using two types of sources: modeled sources and unmodeled sources. Then I utilize the Fisher information matrix to estimate the uncertainty associated with the sky localization of gravitational wave sources.

In figures 6.7 and 6.9, I compare the directional precision for an unmodeled gravitational wave source between the Einstein Telescope with a proposed triangular configuration and a single 'L' shaped detector in the network with two Cosmic Explorers, which provides insights into

the accuracy of sky localization. The findings consistently show that, for both modeled and unmodeled gravitational wave sources in a network with two Cosmic Explorer detectors, the Einstein Telescope configured in a triangular shape outperforms the 'L' shaped detector with a 15 km or 10 km arm length in terms of angular resolution.

In chapter 7, I explored the application of the Einstein Telescope's intrinsic null stream, focusing on its usefulness for the source localization. This null stream combines signals from the telescope's three xylophone interferometers, and it is unaffected by the source's location. My goal was to subtract the null stream noise from the estimator to improve the accuracy of the sky localization estimates. However, it is found that there would be no improvement in the accuracy of sky localization, and it would reduce a data stream from the estimator. This result is consistent with the findings of Wong et al. [225]

I have utilized the ET's null stream to enhance the calibration of the detector's data, employing the self-calibration method as described by Schutz et al [195]. This approach involves modeling the calibration error by analyzing the residual signal found in the null stream. Given that the calibration error in modeling the detector data is at a sub-percent level, the residual signal strength within the null stream is exceedingly faint and difficult to detect individually. Therefore, instead of focusing on a single event, I analyzed a group of events and computed the cumulative signal-to-noise ratio for the residual signal within the null stream. By maximizing this accumulated SNR, I have demonstrated how one can achieve calibration parameter estimates with an accuracy of less than 2% error after analyzing 100 events. While I have considered only one parameter of the calibration function for each side of the ET, in principle, it can be generalized to include more calibration parameters.

Samenvatting

Gravitatiegolven zijn extreem kleine rimpelingen in de stationaire kromming van de ruimtetijd in het heelal, geproduceerd door de beweging en botsingen van astrofysische objecten met extreme massa en dichtheid, zoals neutronensterren en zwarte gaten. Ze werden in 1916 voorspeld door Albert Einstein en 100 jaar later gedetecteerd door LIGO. Het detecteren van zwaartekrachtgolven is een extreem uitdagende taak vanwege hun kleine amplitude, die een uitzonderlijke precisie van het meetinstrument vereist.

Laser-interferometer-detectoren voor gravitatiegolven splitsen een laserstraal in twee armen met spiegels aan de uiteinden. Wanneer een gravitatiegolf passeert, verandert de lengte van de armen, wat een faseverschil veroorzaakt in de gerecombineerde laserstralen. Uitdagingen met betrekking tot detectie komen voort uit verschillende bronnen van ruis, waaronder seismische, thermische, kwantum-, Newtoniaans, detectorruis en instrumentele artefacten die een GW-sigitaal kunnen nabootsen.

In de eerste helft van dit proefschrift heb ik technieken besproken om Newtoniaans ruis voor gravitatiegolfdetectoren te beperken, waarbij ik me heb gericht op een uitgebreide analyse van Newtoniaans ruis in de Virgo-detector. Newtoniaans ruis (NR), ook bekend als gravitationele gradiëtruï, manifesteert zich als de fluctuaties van lokale zwaartekrachtvelden, die voortkomen uit de dichtheidsvariaties in de omgeving van de testmassa's veroorzaakt door seismische, atmosferische of antropogene factoren. Deze dichtheidsvariaties oefenen een overmatige zwaartekracht uit op de testmassa in de zwaartekrachtgolfdetector, waardoor GW-signalen bij lage frequenties worden nagebootst.

Hoewel het niet mogelijk is om de detector direct af te schermen van NR, zijn er conventionele strategieën voor ruisreductie. Eén zo'n aanpak is om voor de bouw van de detector seismisch rustige locaties te kiezen met minimale natuurlijke en door de mens veroorzaakte seismische verstoringen. Ondergronds gaan, zoals gepland voor de Einstein-

telescoop, vermindert seismische ruis. De huidige detectoren gebruiken NR-subtractie met seismische sensoren dicht bij de testmassa's om NR te schatten en te annuleren. Dit is een uitdaging vanwege de complexiteit van echte seismische velden. Het is gunstig om vlakke oppervlakken te kiezen om verstrooiing te voorkomen. Een juiste plaatsing van de seismometer is cruciaal vanwege de beperkte dekking. Een andere mogelijke methode bestaat uit het aanpassen van de infrastructuur, zoals het creëren van depressies rond testmassa's. Deze verzonken structuren tillen de testmassa boven de grond, waardoor het NR wordt verminderd. Virgo gebruikte dergelijke structuren wegens operationele redenen, wat vragen oproept over hun effectiviteit bij het verminderen van NR. Ik heb de afmetingen van uithollingen onder Virgo's ingangs- en eindtestspiegels in centrale en eindgebouwen gedetailleerd beschreven in hoofdstuk 3, sectie 3.3.

Figuur 3.9 (onder) illustreert de reductiefactoren van NR die kunnen worden toegeschreven aan de VIRGO-uitsparing. Ik heb een bijna 2-voudige reductie berekend van Newtoniaanse ruis binnen het bereik van 12 tot 15 Hz. Het verminderen van Newtoniaanse ruis veroorzaakt door Rayleigh-golven met een factor 2 of meer is aanzienlijk, vooral gezien het feit dat het bereiken van een vergelijkbare vermindering door Newtoniaanse ruisonderdrukking meestal het gebruik van grote arrays en complexe technieken vereist.

In hoofdstuk 4 voerde ik spectrale analyses uit, zowel spatiaal als temporaal, en karakteriseerde ik het seismische veld met behulp van data van de seismische arrays binnen en buiten het noordelijke eindgebouw van de Virgo detector. Figuur 4.3 geeft een voorbeeld van een spatiaal spectrum verkregen uit seismische arrays bij een frequentie van 10 Hz, waar we meerdere modi zien die tegelijkertijd aanwezig zijn in het spectrum. Ik heb de dominante seismische bronnen voor verschillende frequenties in rekening genomen en schatte hun overeenkomstige snelheden en voortplantingsrichtingen, zoals weergegeven in figuur 4.10. Door middel van de array-analyse is er een lagere snelheid van Rayleigh-golven waargenomen bij Virgo, wat suggereert dat NR-onderdrukking meer uitgesproken kan zijn dan eerder werd geschat bij de aanname van een constante Rayleigh-golfsnelheid van 250 m/s.

Het opnemen van seismische dispersie in de schatting van de reductie van Newtoniaans ruis heeft geresulteerd in een meer substantiële reductie vergeleken met eerdere schattingen, zoals te zien is in figuur 4.16. We hebben tot een factor 10 aan reductie van Newtoniaans ruis waargen-

omen, die wordt toegeschreven aan de lagere seismische snelheid. Volgens deze bevindingen vereist het Newtoniaanse ruisonderdrukkingssysteem mogelijk slechts kleine extra inspanningen om het ruis te onderdrukken, aangezien het seismische NR naar verwachting voor de meeste frequenties al onder de gevoeligheidsdoelen ligt. De verificatie van deze bevindingen zal bijdragen aan de optimalisatie en fijne afstemming van de prestaties van de Virgo-detector ter voorbereiding op de komende observatiereeks.

In de hoofdstukken 5, 6, 7, bestudeerde ik verschillende topologieën van de Einstein Telescoop binnen de netwerken van gravitatiegolfdetectoren van de derde generatie en hun invloeden op de data-analyse van gravitatiegolfsignalen. De responsiviteit van een netwerk van gravitatiegolfdetectoren op een GW-signaal hangt af van verschillende kritische factoren, waaronder de posities, oriëntaties en geometrische topologieën van individuele detectoren. De antenna response function karakteriseert hoe de oriëntatie en geometrie van een detector zijn vermogen beïnvloedt om gravitatiegolven afkomstig uit verschillende richtingen en polarisaties te detecteren. In figuur 5.5, zoals gepresenteerd in hoofdstuk 5, zien we dat de antenna response function voor een driehoekige detector, zoals de voorgestelde Einstein Telescoop (ET), verschillende voordelen biedt. In het bijzonder is de responsiviteit van ET 50% hoger vergeleken met een enkele L-vormige detector, die geen nulrichtingen heeft.

Een andere belangrijke metriek voor het evalueren van de prestaties van de detector is de horizonafstand, de maximale afstand waarop een gravitatiegolfbron direct boven de detector kan worden gedetecteerd, uitgaande van optimale polarisatie. Figuur 5.9 toont het detecteerbare roodverschuivingsbereik voor bronnen van verschillende massa's, ter illustratie van de mogelijkheden van zowel de Einstein Telescoop als de Cosmic Explorer. Gravitatiegolfbronnen zijn divers en verspreid over de hemel, dus een evaluatie van de capaciteiten van de detectoren vereist een beschouwing van hun dekking van de volledige hemel. Ik heb aangenomen dat de bronnen uniform verdeeld zijn over alle hemellocaties, met willekeurige polarisaties en kantelhoeken, en heb aangetoond dat de roodverschuiving die bereikt is voor 50%, 90% van de beste bronnen een realistische beoordeling van de detectorprestaties aangeeft.

In hoofdstuk 6 heb ik het lokaliseringsvermogen aan de hemel onderzocht voor netwerken voor gravitatiegolfdetectoren van de derde generatie, zoals de Einstein Telescoop en de Cosmic Explorer. Dit onderzoek

omvat een vergelijking tussen de 'L'-vorm en de voorgestelde driehoekige topologie van de Einstein Telescoop.

Ik analyseer twee configuraties: de 'driehoekige' opstelling met een armlengte van 10 km en de 'L'-configuratie met armlengtes van 10 km, 15 km en 20 km. Ik evalueer de prestaties van deze netwerken met behulp van twee typen bronnen: gemodelleerde bronnen en niet-gemodelleerde bronnen. Daarna gebruik ik de Fisher-informatiematrix om de onzekerheid te schatten die samenhangt met de lokalisatie van gravitatiegolfbronnen aan de hemel.

In figuren 6.7 en 6.9, vergelijk ik de directionele precisie voor een niet-gemodelleerde gravitatiegolfbron tussen de Einstein Telescoop met een voorgestelde driehoekige configuratie en een enkele 'L' vormige detector in het netwerk met twee Cosmic Explorers, wat inzicht geeft in de nauwkeurigheid van het lokaliseren aan de hemel. De bevindingen tonen consistent dat, voor zowel gemodelleerde als niet-gemodelleerde gravitatiegolfbronnen in een netwerk met twee Cosmic Explorer detectoren, de Einstein Telescoop geconfigureerd in een driehoekige vorm beter presteert dan de 'L' vormige detector met een armlengte van 15 km of 10 km in termen van hoekresolutie.

In hoofdstuk 7 onderzocht ik de toepassing van de intrinsieke nulstroom van de Einstein-telescoop, waarbij we ons concentreerden op het nut ervan voor bronlokalisatie. Deze nulstroom combineert signalen van de drie xylofooninterferometers van de telescoop en wordt niet beïnvloed door de locatie van de bron. Mijn doel was om de ruis van de nulstroom van de schatter af te trekken om de nauwkeurigheid voor hemellokalisatie te verbeteren. Het bleek echter dat de nauwkeurigheid van de hemellokalisatie niet zou verbeteren en het zou een datastroom van de schatter verminderen. Dit resultaat komt overeen met de bevindingen van Wong et al. [225]

Ik heb de nulstroom van ET gebruikt om de kalibratie van de data van de detector te verbeteren met behulp van de zelfkalibratiemethode zoals beschreven door Schutz et al [195]. Bij deze aanpak wordt de kalibratiefout gemodelleerd door het restsignaal in de nulstroom te analyseren. Aangezien de kalibratiefout bij het modelleren van de detectorgegevens op een niveau van minder dan één procent ligt, is de sterkte van het restsignaal in de nulstroom buitengewoon zwak en moeilijk afzonderlijk te detecteren. Daarom heb ik, in plaats van me op één enkel event te richten, een groep events geanalyseerd en de cumulatieve signal-to-noise ratio (SNR) voor het restsignaal in de nulstroom berekend.

Door deze geaccumuleerde SNR te maximaliseren, heb ik aangetoond dat schattingen van de kalibratieparameter met een nauwkeurigheid van minder dan 2% bereikt kunnen worden na het analyseren van 100 events. Hoewel we slechts één parameter van de kalibratiefunctie voor elke kant van ET hebben overwogen, kan deze in principe worden veralgemeend om meer kalibratieparameters op te nemen.