

# Correlation based methods for ultrasound blood velocity estimation : a comparative study

## Citation for published version (APA):

Štúriková, E. (1997). *Correlation based methods for ultrasound blood velocity estimation : a comparative study*. [Doctoral Thesis, Maastricht University]. Universiteit Maastricht. <https://doi.org/10.26481/dis.19970220es>

## Document status and date:

Published: 01/01/1997

## DOI:

[10.26481/dis.19970220es](https://doi.org/10.26481/dis.19970220es)

## 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](http://www.umlib.nl/taverne-license)

## Take down policy

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

[repository@maastrichtuniversity.nl](mailto:repository@maastrichtuniversity.nl)

providing details and we will investigate your claim.

## Summary

# Correlation Based Methods for Ultrasound Blood Velocity Estimation

This thesis presents a study of blood velocity estimation using pulsed ultrasound echo signals backscattered from blood. Blood velocity is an important parameter in diagnosing vascular diseases since changes in blood flow caused by pathology (i.e. atherosclerosis) can be directly observed through changes in the speed of blood.

In pulsed wave measurement mode the transducer emits ultrasound pulses with pulse repetition period. Between transmissions, the transducer is switched to reception mode to catch the signals backscattered from blood. The received backscattered signals are aligned to form a set of radio frequency (RF) signals that are separated by the pulse repetition period. Due to the changing distance between the transducer and groups of moving scatterers (red blood cells), each subsequent signal exhibits gradual translation with respect to the previous signal. This translation carries information about the velocity of moving scatterers. By suitable processing of a sequence of observed RF signals, the required information can be extracted. A number of techniques can be employed to extract velocity information from such signals. However, the diversity of descriptions and assumptions of the results reported in the literature do not allow a straight comparison of their performance. Despite this, it can be recognized that the drawbacks of the existing processing methods include limitations arising from the conflicting requirements for velocity precision, and resolution in the spatial and temporal domain.

The goal of this study was to investigate the performance of the existing methods for processing of backscattered signals for blood velocity estimation, and to compare various techniques in an identical way for the effect of processing and system parameters such as the signal-to-noise ratio and the quality factor of the transducer. Furthermore, the goal was to propose new processing techniques for possible improvement in accuracy and spatial resolution of ultrasound blood velocity measurements. These aims have been achieved by encompassing the evaluation and comparison of two processing methods, the maximum likelihood (ML) method and the cross-correlation model (CCM) method and by extending the cross-correlation model method to a wideband situation yielding a new wideband CCM estimator. The resulting gain in accuracy of the new technique for use with wideband signals is desirable for simultaneous improvement of accuracy and axial resolution.

This study allows for a comparison of the reported methods. Conceptually, the reported estimators involve different ideas (maximum likelihood criterion and the cross correlation concept) and various assumptions. The signal processors based on these estimators employ correlation of the data, though in a different way. The maximum likelihood method derives a velocity estimate from correlating the pre-processed version of the observed RF signal with a reference (model) signal, whereas the wideband CCM processor correlates a number of successive RF signals. The ML and the wideband CCM techniques represent two classes of processing methods, distinguished by the type of input data they operate on. ML operates on low frequency, complex signals obtained by pre-processing the observed signals by phase detection. In contrast, the wideband CCM method maintains the real nature of the high frequency signals. The fact that the CCM approach does not involve signal transformation circumvents the problem of assuming a reference frequency.

A simulation study was designed in order to evaluate the effects of the system and processing parameters on the accuracy of the velocity estimators. The evaluation of the maximum likelihood method indicates an acceptable performance only for a limited range of signal and processing conditions. This poor performance is attributed to the fundamental assumption of this method - "the slowly fluctuating point target approximation". This assumption causes incompatibility between the assumed model of the backscattered signal (the reference signal) and the signal actually observed. The performance of the new wideband CCM method is also evaluated, indicating good results over a fairly wide range of signal and processing parameters. A comparative evaluation of the ML and the wideband CCM techniques under the same conditions and in an identical way is accomplished. The wideband CCM estimator is found to offer a consistently higher velocity precision than the ML estimator under all conditions considered. Furthermore, the efficiency of the wideband CCM estimator is demonstrated by the fact that the standard deviation resulting from this estimator approaches the theoretical limit given by the Cramér-Rao lower bound closely.

The results of this study suggest that the conflicting requirements on precision and resolution (axial and temporal) can be satisfactorily met to some extent using the new wideband CCM method. Since the real-time implementation seems to be feasible for the processing procedure, this new technique has a great potential for application in color flow imaging technology.

Possible directions for future research are threefold. First, this comparative study might be continued by including other methods for blood velocity estimation. The second possibility would be the experimental evaluation of the methods with real data. The third direction of interest would be to study the possibilities of the wideband cross-correlation model method in other fields with similar types of problems. A typical task would be to assess the mean velocity of a moving substance by processing signals originating from a large number of moving elements of that substance.

## Samenvatting

# Correlatie Gebaseerde Methoden voor Bloedsnelheidschatting met Ultrageluid

Dit proefschrift beschrijft een onderzoek naar schattingsmethoden voor bloedsnelheden. Hierbij wordt gebruik gemaakt van echosignalen, die ontstaan doordat uitgezonden ultrageluidpulsen worden verstrooid (backscattered) door de rode bloedcellen. Bloedsnelheid is een belangrijke parameter voor de diagnose van vaatziekten, omdat veranderingen in het stromingspatroon, veroorzaakt door pathologie (bijv. atherosclerose) direct waarneembaar is door veranderingen in de bloedsnelheid.

Echosignalen, veroorzaakt door verstrooiing, worden verkregen door uitzending van pulsen. Ze vormen een reeks van radio-frequentie (RF) signalen, onderling gescheiden door de tijdsduur tussen de pulsen, de pulse repetitie periode. Door de veranderende afstand tussen de transducer (de zender en ontvanger van de signalen) en de bewegende verstrooiers (de rode bloedcellen), toont ieder opeenvolgend ontvangen echosignaal een graduele translatie ten opzichte van het voorgaande echosignaal. Deze translatie bevat informatie over de snelheid waarmee de bloedcellen zich voortbewegen. Door een adequate bewerking op de reeks van echosignalen kan deze snelheid worden bepaald. Er bestaat een aantal technieken om deze bloedsnelheid te bepalen. De diversiteit in de beschrijving en gestelde voorwaarden voor deze methoden, zoals ze in de literatuur beschreven zijn, maken een directe vergelijking van de methoden echter onmogelijk. Desondanks kan worden vastgesteld dat de belangrijkste beperkingen van de bestaande schattingsmethoden worden gevormd door de tegenstrijdige eisen van precisie van de schatters enerzijds, en resolutie in ruimtelijk en tijd domein anderzijds.

Het doel van het onderzoek beschreven in dit proefschrift is een aantal van de bestaande methoden voor bloedschatting te vergelijken, uiteraard onder gelijke omstandigheden, en hun werkzaamheid te beschouwen ten aanzien van verschillende systeemparameters zoals de signaal-ruis-verhouding en de kwaliteitsfactor van de transducer. Een tweede doel van het onderzoek is om nieuwe technieken te ontwikkelen met mogelijk verbeterde resolutie in ruimte en tijd. Deze doelen zijn behaald, in de zin dat dit proefschrift een conceptuele basis, evaluatie en vergelijking van twee schattingsmethoden bevat, de Maximum Likelihood (ML) en de Cross-Correlation Model (CCM) methode. Bovendien is de Cross-Correlation Model methode aangepast naar een breedband situatie. Deze nieuwe ontwikkeling leidt tot een gelijktijdige verbetering van de precisie van de schatter, alsmede de axiale resolutie.

Het onderzoek maakt het mogelijk om de beschreven methoden te vergelijken. Conceptueel bevatten de methoden verschillende ideeën (maximale waarschijnlijkheid en kruiscorrelatie), maar beide methoden gebruiken de correlatie van signalen. Bij de Maximum Likelihood methode vindt correlatie plaats tussen een voorbe werkte versie van het echosignaal en een referentie (model) signaal. Bij de Cross-Correlation Model methode vindt correlatie plaats tussen opeenvolgende echosignalen. De Maximum Likelihood methode maakt gebruik van laagfrequente complexe signalen, die worden verkregen door voorbewerking van het echosignaal, terwijl de nieuwe breedband Cross-Correlation Model methode gebruik maakt van het oorspronkelijke hoogfrequente echosignaal. Dit laatste voorkomt de noodzaak tot een veronderstelling ten aanzien van de referentiefrequentie van het echosignaal.

Om het effect te bestuderen van verschillende parameters op de kwaliteit van de snelheidschatting, zijn uitgebreide simulaties uitgevoerd. De evaluatie voor de Maximum Likelihood methode geeft aan dat de kwaliteit van de schatter acceptabel is voor een beperkt bereik van de parameters. Deze zwakke prestaties worden toegemeten aan een fundamentele veronderstelling bij de Maximum Likelihood methode - de "slowly fluctuating point target approximation". Deze veronderstelling veroorzaakt een afwijking tussen het model voor het echosignaal (het referentie signaal) en het werkelijk waargenomen signaal. Ook het gedrag van de breedband Cross-Correlation Model methode is onderzocht voor verschillende parameterwaarden, hetgeen heeft geleid tot goede schattingsresultaten over een breed parameterbereik. Een vergelijkend onderzoek tussen de Maximum Likelihood methode en de breedband Cross-Correlation Model methode leidt tot de conclusie dat de breedband CCM methode een consistent hogere precisie levert onder alle beschouwde parameter condities. Bovendien blijkt dat de breedband Cross-Correlation Model methode een schatter oplevert die efficiënt is in de zin dat de kwaliteit, uitgedrukt in de statistische variantie, dicht bij het theoretisch minimum, de Cramer Rao ondergrens zit.

De resultaten van het onderzoek geven aan dat de tegenstrijdige voorwaarden tussen precisie van de schatter en resolutie (tijd en axiaal) tot tevredenheid kunnen worden verenigd door middel van de breedband Cross-Correlation Model methode. Daar bovendien real-time implementatie haalbaar lijkt te zijn voor de schattingsprocedure, heeft deze techniek een groot potentieel voor toepassing in de "color flow imaging" technologie.

Drie mogelijke richtingen voor toekomstig onderzoek zijn de volgende. Ten eerste, het vergelijkend onderzoek kan worden uitgebreid naar andere schattingsmethoden. Een tweede richting voor verder onderzoek is een evaluatie van de methoden met behulp van reële meetdata, alsmede een praktische implementatie van de breedband Cross-Correlation Model methode. Tenslotte kan worden onderzocht hoe de breedband Cross-Correlation Model methode toepasbaar kan worden gemaakt naar andere schattingsproblemen. Typisch voor geschikte toepassingen is, dat de gemiddelde snelheid dient te worden geschat van een bewegende substantie, waarbij het meetsignaal wordt opgebouwd uit signalen afkomstig van een groot aantal bewegende elementen binnen de substantie.

## Zhrnutie

# Korelačné metódy na ultrazvukové odhadovanie rýchlosti krvi

Predmetom štúdia tejto dizertácie je odhadovanie rýchlosti toku krvi na základe ultrazvukových signálov spätne rozptýlených (odrazených) krvou. Rýchlosť krvi je dôležitý diagnostický parameter pre kardiovaskulárne choroby, pretože zmeny v prúde krvi zapríčinené patologickými procesmi (napríklad atherosclerosis) sú priamo pozorovateľné cez zmeny v rýchlosti toku krvi.

Po vyslaní ultrazvukového impulzu získame signál naspäť odrazený krvou. Vyslaný impulz sa rozptýli od pohybujúcich sa červených krviniek a je spätne prijatý prijímačom. Elektromechanický menič (vysielač aj prijímač) vysiela obyčajne periodicky viac impulzov za sebou. S tou istou periódou sú potom prijímané aj echo signály. Prijaté signály sú zosynchronizované s periódou opakovania impulzov a vytvárajú tak postupnosť rádio-frekvenčných (RF) signálov. Pretože vzdialenosť medzi meničom a skupinami pohybujúcich sa červených krviniek sa mení, každý prijatý signál je posunutý od predchádzajúceho. Toto posunutie je fyzikálnym nositeľom informácie o priemernej rýchlosti, s ktorou sa krvinky pohybujú. Požadovanú informáciu je možné získať vhodným spracovaním postupnosti RF signálov. Existujú rôzne spôsoby ako stanoviť rýchlosť toku krvi, avšak rozdielnosť v popise a v predpokladaných podmienkach nedovoľuje ich priame porovnanie. Jedno z hlavných obmedzení existujúcich metód však spočíva v konfliktných požiadavkách na presnosť a rozlíšiteľnosť (priestorovú a časovú).

Cieľom tohto výskumu bolo preskúmať niektoré existujúce metódy na spracovanie signálov za účelom zistenia rýchlosti toku krvi a porovnať tieto metódy za rovnakých podmienok v závislosti od viacerých parametrov, ako napríklad od pomeru signál-šum, a od šírky vlnového pásma meniča. Ďalším cieľom tohto výskumu bolo navrhnúť nový postup, ktorého výsledkom by bolo súčasné zlepšenie presnosti odhadu a rozlíšiteľnosti v priestore a čase. Tieto ciele boli dosiahnuté vyhodnotením a porovnaním dvoch metód, metódy maximálnej vierohodnosti (ML) a metódy modelovanej vzájomnej korelácie (CCM) a rozšírením metódy modelovanej vzájomnej korelácie na širokopásmové signály, čím sa obdržal nový spôsob stanovenia priemernej rýchlosti toku krvi. Tento nový odhad vedie k zvýšeniu presnosti pri použití širokopásmových signálov, čo má za následok zlepšenie rozlíšiteľnosti v priestore pri zobrazovaní nameraných údajov.

Na základe výsledkov nášho výskumu je možné porovnať (vyššie) uvedené metódy. Koncepcne sú tieto metódy založené na rôznych princípoch (maximálna vierohodnosť a vzájomná korelácia) a vyžadujú odlišné predpoklady. Spracovanie signálov však vedie pre obidve metódy k uplatneniu korelácie, i keď rozličným spôsobom. Pre metódu maximálnej vierohodnosti je charakteristické, že výsledný odhad je získaný koreláciou transformovaného echo signálu s referenčným, zatiaľ čo metóda modelovanej vzájomnej korelácie koreluje prijaté echo signály medzi sebou. Uvedené spôsoby spracovania signálov predstavujú dve kategórie metód rozlíšiteľných podľa typu signálov, ktoré spracúvajú. Metóda maximálnej vierohodnosti používa nízkofrekvenčné, komplexné signály získané demoduláciou prijatého signálu vzhľadom na referenčnú frekvenciu. Na druhej strane, metóda modelovanej vzájomnej korelácie spracúva pôvodné vysokofrekvenčné signály a teda znalosť referenčnej frekvencie nie je nutná.

Za účelom štatistického vyhodnotenia efektu rozdielnych parametrov na kvalitu odhadu rýchlosti sme uskutočnili viaceré simulácie. Výsledky dosiahnuté metódou maximálnej vierohodnosti naznačujú obmedzené použitie tohto postupu, len pre niektoré hodnoty uvažovaných parametrov. Za hlavnú príčinu je považovaný základný predpoklad tejto metódy, čo je - "aproximácia pomaly sa pohybujúcim bodom". Táto aproximácia spôsobuje nekompatibilitu medzi modelom echo signálu (referenčným signálom) a skutočným pozorovaným signálom. Vyhodnotenie širokopásmovej verzie metódy modelovanej vzájomnej korelácie naznačuje jej použiteľnosť pre širokú škálu hodnôt parametrov. Porovnaním výsledkov týchto dvoch metód sme dospeli k záveru, že nová širokopásmová metóda modelovanej vzájomnej korelácie poskytuje vyššiu presnosť odhadov než metóda maximálnej vierohodnosti a je použiteľná pre široký rozsah parametrov. Navyše, účinnosť novej metódy bola demonštrovaná tým, že štatistická odchýlka odhadu získaného touto metódou takmer dosahuje teoretickú minimálnu hodnotu danú Cramér-Raovým dolným ohraničením.

Výsledky našej štúdie ukazujú, že protikladné požiadavky na presnosť odhadu a priestorovú rozlíšiteľnosť je možné do určitej miery splniť použitím novej širokopásmovej metódy modelovanej vzájomnej korelácie. A keďže implementácia tejto metódy sa zdá byť uskutočniteľná v reálnom čase, má táto metóda spracovania signálov dobré predpoklady na aplikáciu v technológii "farebné zobrazovanie toku".

Možnosti pre budúci výskum vidíme trojaké. Prvá možnosť by bola pokračovať v tejto štúdii zahrnutím iných metód na odhadovanie rýchlosti toku krvi. Druhý smer budúceho výskumu by bolo vyhodnotenie metód použitím skutočných nameračných signálov a praktická implementácia novej širokopásmovej metódy modelovanej vzájomnej korelácie. Tretím smerom záujmu by mohol byť prieskum možností aplikácie novej metódy v iných oblastiach na podobný typ problémov. Typickou úlohou by bolo určenie priemernej hodnoty rýchlosti pohybujúcej sa hmotnej substancie na základe signálov odrazených z veľkého počtu pohybujúcich sa častíc tejto substancie.