

Bewertung von State-of-the-Art Algorithmen zur Bestimmung des Time Difference of Arrival (TDOA)

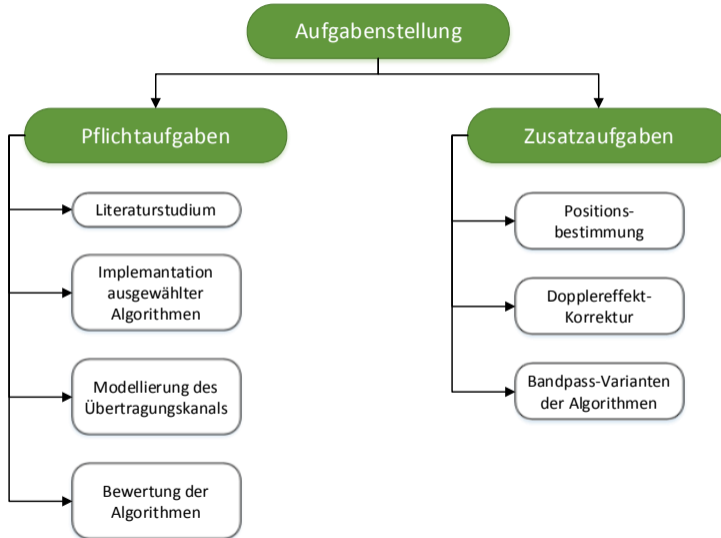
Ilkay Wunderlich

11. August 2016

1. Einleitung
 - Übersicht über die Aufgabenstellung
 - Motivation: Positionsbestimmung
2. Algorithmen
 - Klassifizierung der Algorithmen
 - Bandpass gefilterte Algorithmen
3. Kanalmodell
 - Übertragungsstrecke
 - Kanalrauschen
 - Dopplereffekt
4. Gütekriterien
5. Bewertung der Algorithmen
 - Simulation
 - Doppler-Korrektur
 - Auswertung

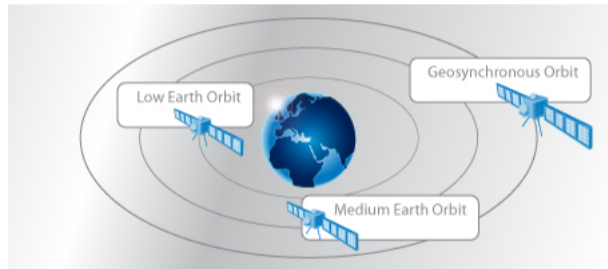


Inhaltsverzeichnis

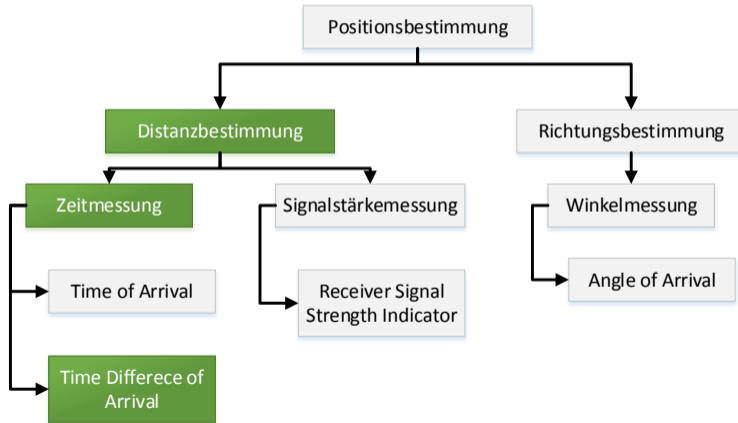


SATELLITENKLASSEN

- ▶ Low Earth Orbit (LEO):
160km bis 2 000km
- ▶ Medium Earth Orbit (MEO):
2 000km bis 35 786km
- ▶ Geosynchronous Orbit (GEO):
ca. 35 786km

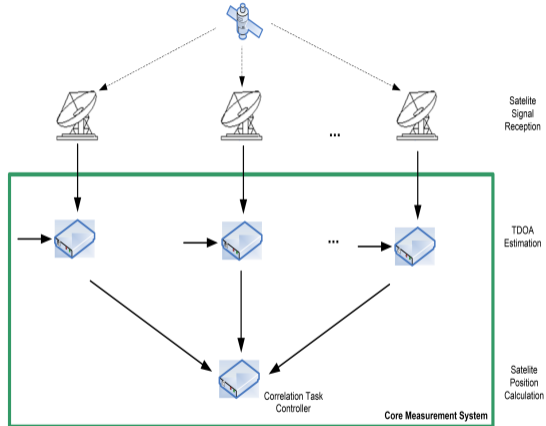


POSITIONSBESTIMMUNG DURCH TDOA



POSITIONSBESTIMMUNGSSYSTEM

- ▶ Empfangen des Satellitensignals
- ▶ Berechnung der jeweiligen TDOAs
- ▶ Bestimmen der Position durch Multilateration



1. Einleitung
 - Übersicht über die Aufgabenstellung
 - Motivation: Positionsbestimmung
2. Algorithmen
 - Klassifizierung der Algorithmen
 - Bandpass gefilterte Algorithmen
3. Kanalmodell
 - Übertragungsstrecke
 - Kanalrauschen
 - Dopplereffekt
4. Gütekriterien
5. Bewertung der Algorithmen
 - Simulation
 - Doppler-Korrektur
 - Auswertung



Inhaltsverzeichnis

KLASSIFIZIERUNG

► Klassische Verfahren:

Grundlage: Kreuz- und Autokorrelationsfunktionen

$$R_{uv}(l) = \frac{1}{2L} \cdot \sum_{k=-L}^L u(k) \cdot v(k-l)$$

► Zyklstationäre Verfahren:

Grundlage: zyklische Kreuz- und Autokorrelationsfunktionen

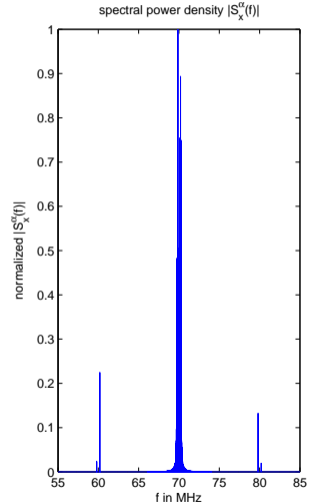
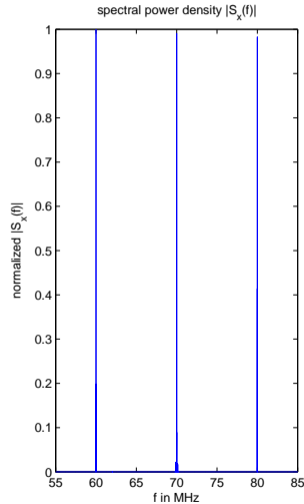
$$R_{uv}^{\alpha}(l) = \frac{1}{2L} \cdot \sum_{k=-L}^L u(k) \cdot v(k-l) \cdot e^{-j2\pi\alpha k}$$

Mit Keying Rate α gleich der Symbolrate f_{symbol} der Signale.

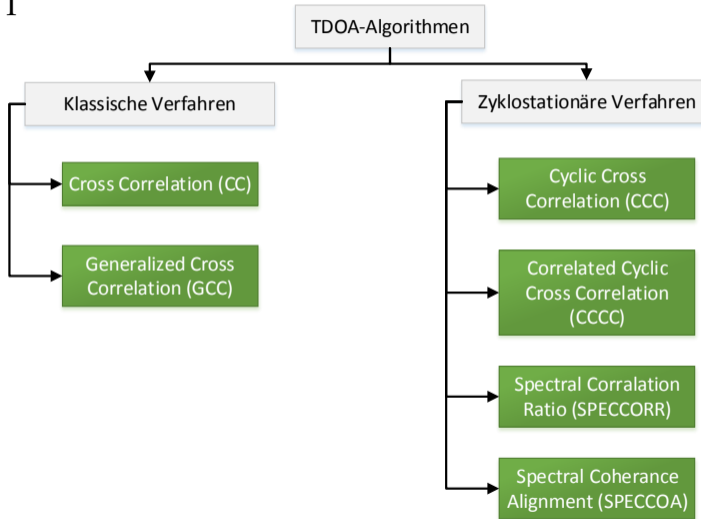
EINFLUSS DER KEYING RATE

Störsignalunterdrückung:

- ▶ links:
Spektrale
Leistungsdichte
- ▶ rechts:
zyklische Spektrale
Leistungsdichte



ÜBERSICHT

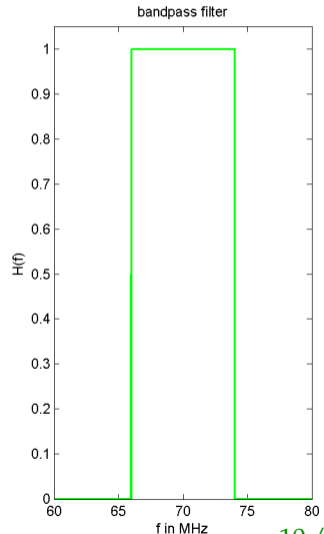
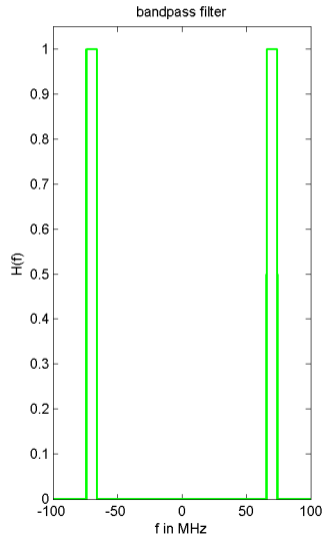


BANDPASS GEFILTERTE ALGORITHMEN

Bandbreite im Durchlassbereich von 8MHz um die Trägerfrequenz von 70MHz :

$$f_{\text{pass}} \in [66 \text{ MHz}; 74 \text{ MHz}]$$

- ▶ BL-CC
- ▶ BL-GCC
- ▶ BL-CCC
- ▶ BL-CCCC
- ▶ BL-SPECCORR
- ▶ BL-SPECCOA



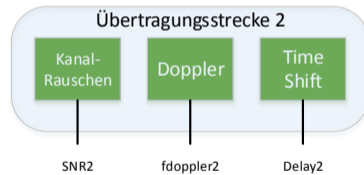
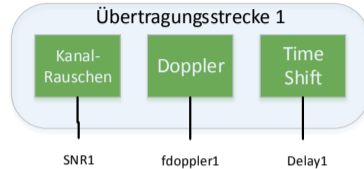
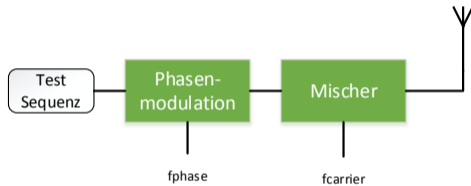
1. Einleitung
 - Übersicht über die Aufgabenstellung
 - Motivation: Positionsbestimmung
2. Algorithmen
 - Klassifizierung der Algorithmen
 - Bandpass gefilterte Algorithmen
3. Kanalmodell
 - Übertragungsstrecke
 - Kanalrauschen
 - Dopplereffekt
4. Gütekriterien
5. Bewertung der Algorithmen
 - Simulation
 - Doppler-Korrektur
 - Auswertung



Inhaltsverzeichnis

ÜBERTRAGUNGSTRECKE

Generierte Testsequenz
des Telemetrie-Kanals



- ▶ Testsequenz: $f_{symbol} = 16.384kHz$
- ▶ $f_{phase} = 65.536kHz$
- ▶ $f_{carrier} = 70MHz$

TIME DIFFERENCE OF ARRIVAL

- ▶ simuliertes TDOA:

$$D = \text{Delay}2 - \text{Delay}1$$

Zeitdifferenz zwischen Signal $x(t)$ und $y(t)$

- ▶ Schätzung des TDOA durch die Algorithmen:

$$\hat{D} \approx D$$

KANALRAUSCHEN

AWGN-Kanal:

A... Additive

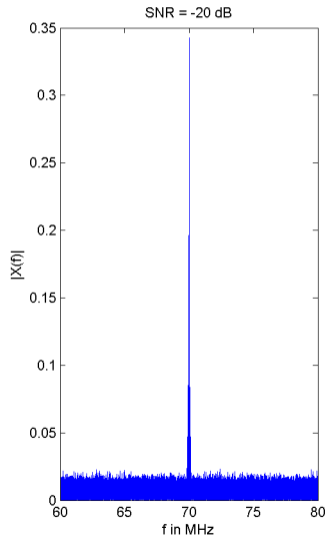
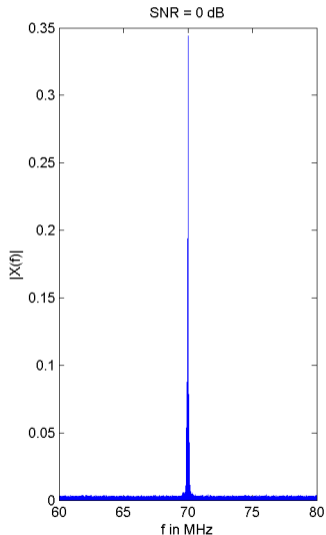
W... White

G... Gaussian

N... Noise

Parameter:

Signal-Rausch-Abstands
(SNR) in dB



DOPPLEREFFEKT

Ursache für den Dopplereffekte:

- ▶ Relative Bewegung des Senders (hier: Satellit) zum Empfänger

Modellierung:

- ▶ Frequenzshift mit Bandbreitenstreckung bzw. -Stauchung

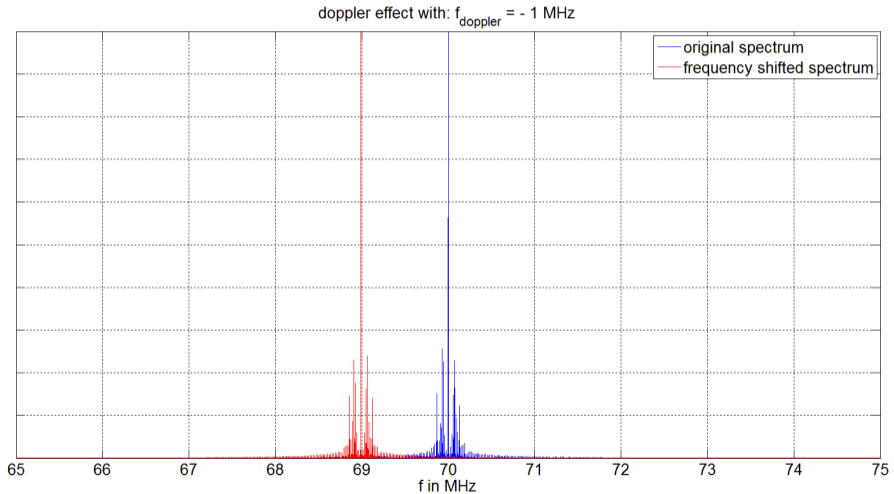
Voraussetzung:

- ▶ Keine Mehrwegeausbreitung bzw. Signalreflexionen vernachlässigbar

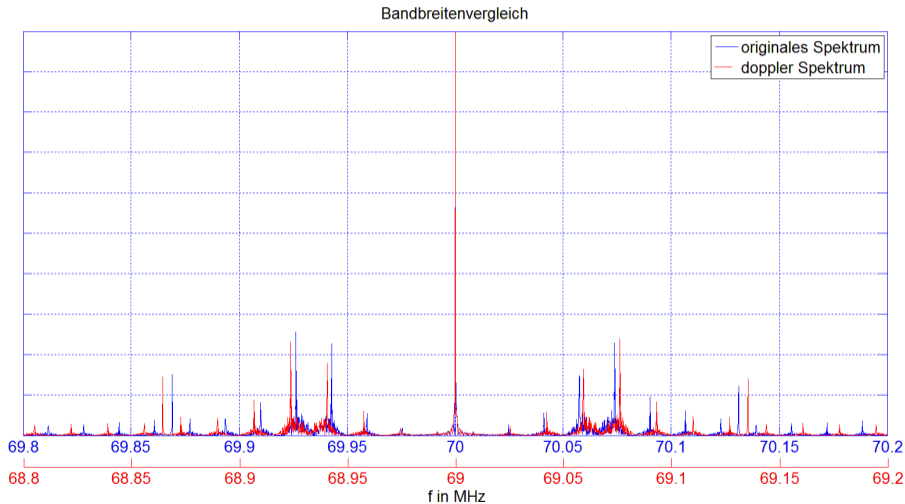
Vereinfachung:

- ▶ Frequenzshift nur auf das zweite Signal: $\rightarrow f_{\text{doppler1}} = 0$
 $f_{\text{doppler}} = f_{\text{doppler2}} - f_{\text{doppler1}} = f_{\text{doppler2}}$

DOPPLEREFFEKT



DOPPLEREFFEKT: BANDBREITE



1. Einleitung
 - Übersicht über die Aufgabenstellung
 - Motivation: Positionsbestimmung
2. Algorithmen
 - Klassifizierung der Algorithmen
 - Bandpass gefilterte Algorithmen
3. Kanalmodell
 - Übertragungsstrecke
 - Kanalrauschen
 - Dopplereffekt
4. Gütekriterien
5. Bewertung der Algorithmen
 - Simulation
 - Doppler-Korrektur
 - Auswertung



Inhaltsverzeichnis

GÜTEKRITERIEN

- ▶ **Dekodierwahrscheinlichkeit:**

$$\hat{D} \in [D - \Delta; D + \Delta]$$

mit Δ als vorher definierte maximale Abweichung.

- ▶ **Mean Squared Error (MSE):**

$$MSE = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N (\hat{D} - D)^2$$

1. Einleitung
 - Übersicht über die Aufgabenstellung
 - Motivation: Positionsbestimmung
2. Algorithmen
 - Klassifizierung der Algorithmen
 - Bandpass gefilterte Algorithmen
3. Kanalmodell
 - Übertragungsstrecke
 - Kanalrauschen
 - Dopplereffekt
4. Gütekriterien
5. Bewertung der Algorithmen
 - Simulation
 - Doppler-Korrektur
 - Auswertung



Inhaltsverzeichnis

SIMULATIONSMATRIX

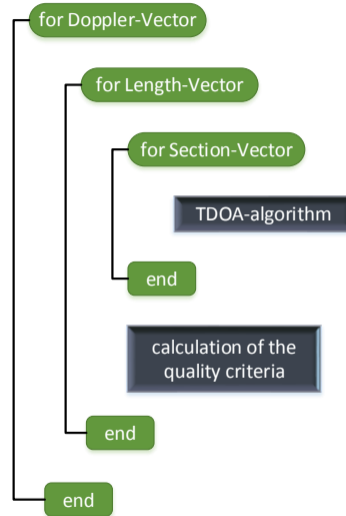
Grundlage:

generiertes Grundsignal mit Länge 128 Megasamples

- (1) Ausschnitte über das Grundsignal fester Sample-Länge
- (2) Kanalsimulation & TDOA-Berechnung
- (3) Bestimmen der Korrelationsgenauigkeit anhand der Gütekriterien

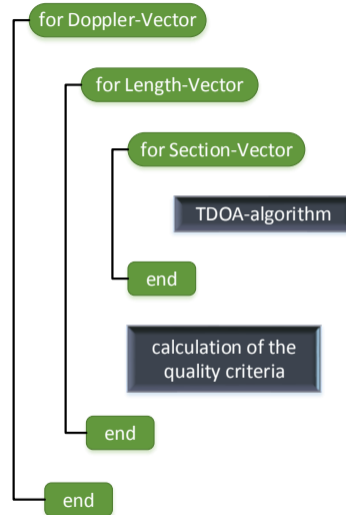
SIMULATIONSMATRIX

- ▶ Doppler-Vector:
 $(0, 3.2e3, 100e3, 1e6, 2e6)^T$ in Hz
- ▶ Length-Vector:
 $(0.1 \dots 30)^T$ in MegaSamples
- ▶ Section-Vector:
50 verschiedene Ausschnitte.



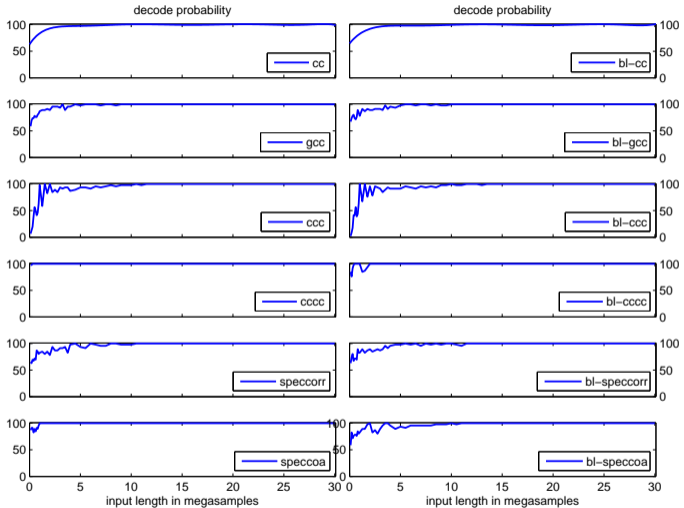
KONSTANTE WERTE

- ▶ Signal-Rausch-Abstände:
 - ▶ $SNR_1 = 10dB$
 - ▶ $SNR_2 = 20dB$
- ▶ Simuliertes TDOA:
 - ▶ $D = 30\mu s$
- ▶ maximal zulässige Abweichung:
 - ▶ $\Delta = 1\mu s$



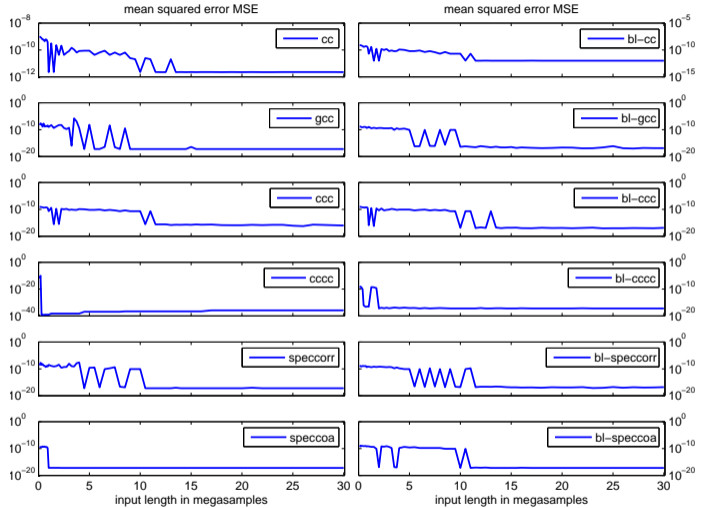
Ergebnisse:

- ▶ Dekodier-
Wahrscheinlichkeit
- ▶ $f_{doppler} = 0$



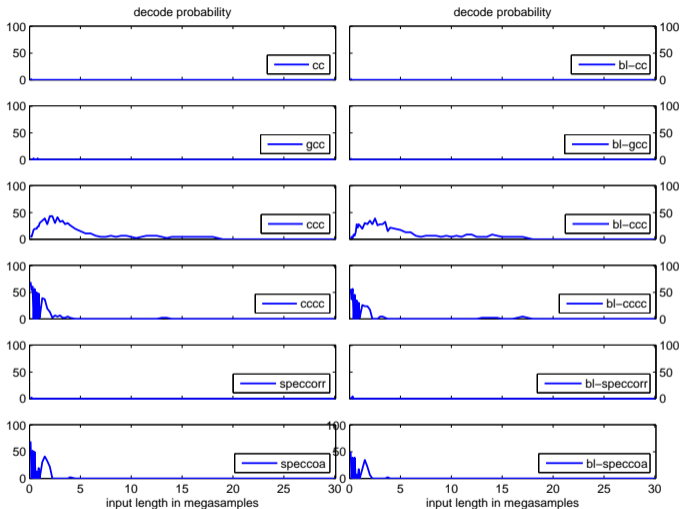
Ergebnisse:

- ▶ MSE
- ▶ $f_{doppler} = 0$



Ergebnisse:

- ▶ Dekodier-
Wahrscheinlichkeit
- ▶ $f_{doppler} = 3.2 \text{ kHz} !$
- ▶ Doppler-
Korrektur
notwendig



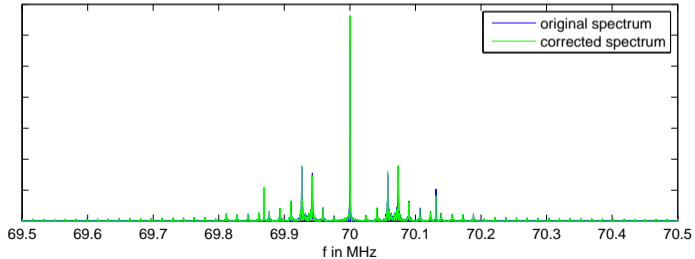
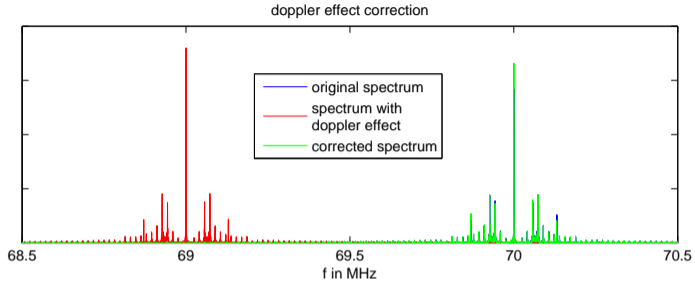
1. Einleitung
 - Übersicht über die Aufgabenstellung
 - Motivation: Positionsbestimmung
2. Algorithmen
 - Klassifizierung der Algorithmen
 - Bandpass gefilterte Algorithmen
3. Kanalmodell
 - Übertragungsstrecke
 - Kanalrauschen
 - Dopplereffekt
4. Gütekriterien
5. Bewertung der Algorithmen
 - Simulation
 - Doppler-Korrektur
 - Auswertung



Inhaltsverzeichnis

DOPPLER-KORREKTUR

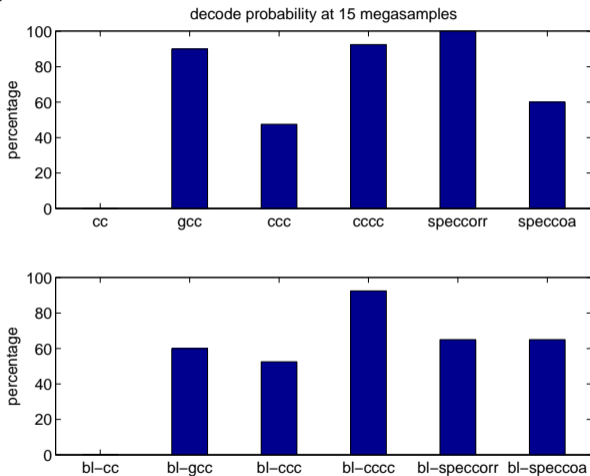
- ▶ Estimation der Frequenzverschiebung \hat{f}_d
(frequency difference of arrival FDOA)
- ▶ Zurück-Shiften eines der beiden Signale um \hat{f}_d
unter Beachtung der Bandbreitenveränderung
- ▶ Kleinere Abweichungen trotz Korrektur



ERGEBNISSE MIT KORREKTUR

Ergebnisse:

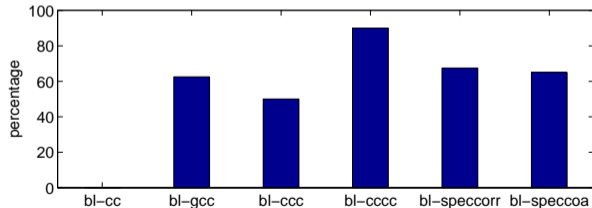
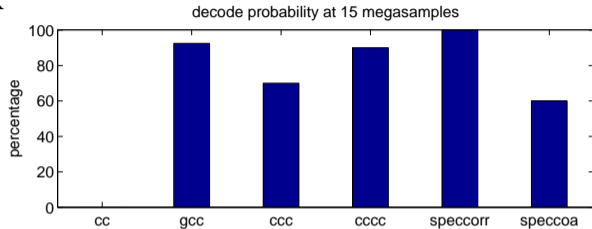
- ▶ Dekodier-
Wahrscheinlichkeit
- ▶ Input-Länge fest bei
15 MSample
- ▶ $f_{doppler} = 100 \text{ kHz}$



ERGEBNISSE MIT KORREKTUR

Ergebnisse:

- ▶ Dekodier-
Wahrscheinlichkeit
- ▶ Input-Länge fest bei
15 MSample
- ▶ $f_{doppler} = 2 \text{ MHz}$
- ▶ Gute Ergebnisse bei:
 - ▶ GCC
 - ▶ CCCC
 - ▶ BL-CCCC
 - ▶ SPECCORR



1. Einleitung
 - Übersicht über die Aufgabenstellung
 - Motivation: Positionsbestimmung
2. Algorithmen
 - Klassifizierung der Algorithmen
 - Bandpass gefilterte Algorithmen
3. Kanalmodell
 - Übertragungsstrecke
 - Kanalrauschen
 - Dopplereffekt
4. Gütekriterien
5. Bewertung der Algorithmen
 - Simulation
 - Doppler-Korrektur
 - **Auswertung**

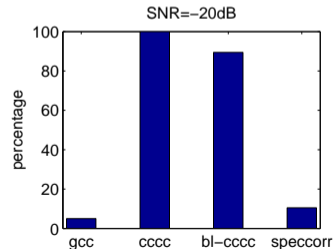
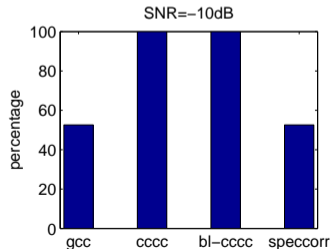
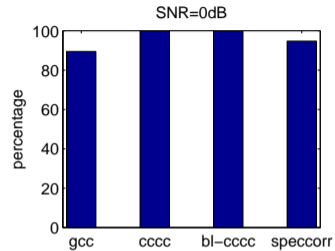
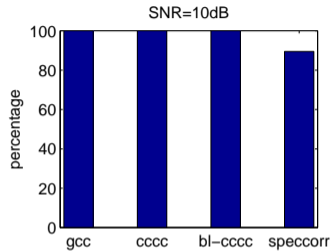


Inhaltsverzeichnis

RAUSCHTOLERANZ

Ergebnisse:

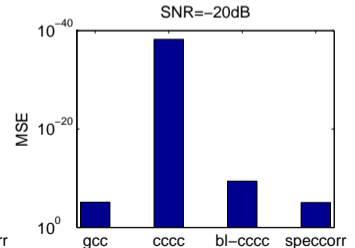
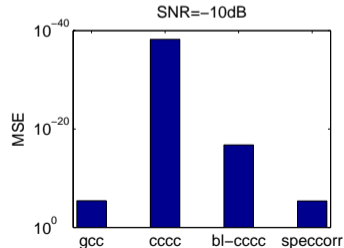
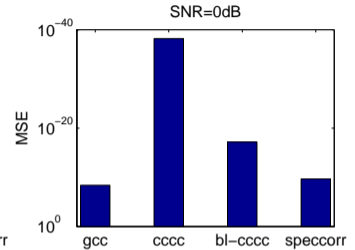
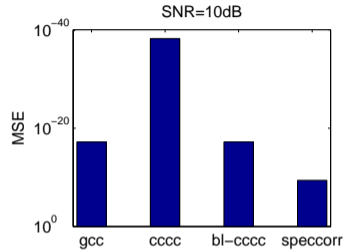
- ▶ Dekodier-
Wahrscheinlichkeit
- ▶ Input-Länge fest
bei 15 MSample
- ▶ SNR gleichmäßig
auf beide Signale



RAUSCHTOLERANZ

Ergebnisse:

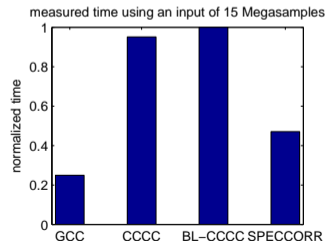
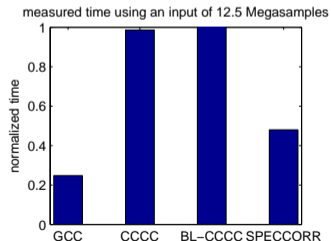
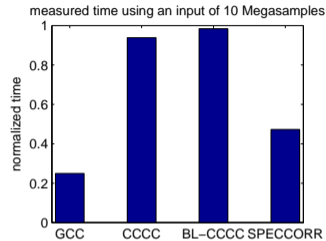
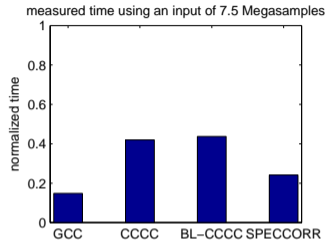
- ▶ MSE
- ▶ Input-Länge fest bei 15 MSample
- ▶ SNR gleichmäßig auf beide Signale



BEARBEITUNGSZEIT

Ergebnisse:

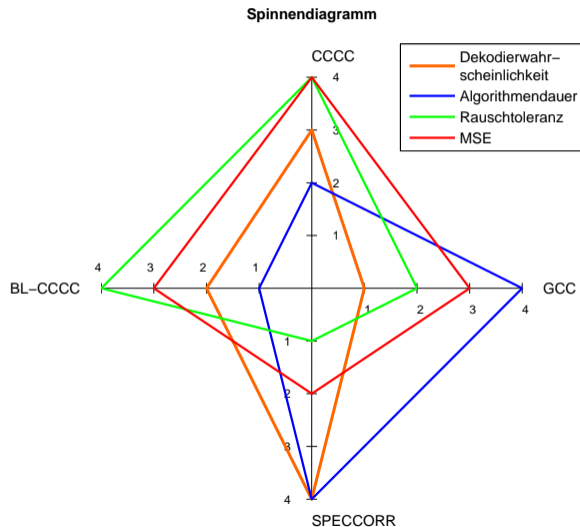
- ▶ verschiedenen Input-Längen
 - ▶ 7.5 MSample
 - ▶ 10 MSample
 - ▶ 12.5 MSample
 - ▶ 15 MSample
- ▶ normiert auf Maximum aller Durchläufe



FAZIT

Trade-Off- Charakteristik:

- ▶ Rauschtoleranz
- ▶ Algorithmen
Dauer
- ▶ Dekodier-
Wahrscheinlichkeit
- ▶ Mittlere
quadratische
Abweichung



FRAGEN

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



PAPER:

WILLIAM A. GARDNER und CHIH-KANG CHEN:

Signal-Selective Time-Difference-of-Arrival Estimation for Passive Location of Man-Made Signal Sources in Highly Corruptive Environments

CROSS CORRELATION (CC)

Algorithmus:

- ▶ Bestimmen der Cross Correlation Function (deutsch: KKF)
- ▶ Suche nach größtem Peak:

$$D_{cc} = \arg \max \{|R_{yx}|\}$$

GENERALIZED CROSS CORRELATION (GCC)

Algorithmus:

- ▶ Rücktransformierte des Verhältnis aus gemischtem Leistungsdichtespektrum und Leistungsdichtespektrum:

$$a = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \frac{S_{yx}}{S_{xx}} \right\}$$

- ▶ Suche nach größtem Peak:

$$D_{gcc} = \arg \max \{|a|\}$$

CYCLIC CROSS CORRELATION (CCC)

Algorithmus:

- ▶ Bestimmen der Cyclic Cross Correlation :
→ liefert um TDOA symmetrische Korrelation
- ▶ Suche nach den beiden Hauptpeaks mit Mittelpunkt als geschätztes TDOA:

$$D_{ccc} = \frac{\arg \max_1 \{|R_{yx}^\alpha|\} + \arg \max_2 \{|R_{yx}^\alpha|\}}{2}$$

CORRELATED CYCLIC CROSS CORRELATION (CCCC)

Algorithmus:

- ▶ Bestimmen der zyklischen KKF zwischen y,x und zyklischen AKF von x
- ▶ Erneutes korrelieren von $R_{y,x}^{\alpha}$ und $R_{x,x}^{\alpha}$
→ nur noch ein Hauptpeak

$$a = \sum_{k=-L}^L R_{y,x}^{\alpha}(k) \cdot R_x^{\alpha}(k-l)$$

- ▶ Peaksuche:

$$D_{cccc} = \arg \max\{|a|\}$$

SPECTRAL CORRELATION RATIO (SPEC CORR)

Algorithmus:

- ▶ Prinzip: GCC mit zyklstationären Leistungsdichtespektren:

$$a = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \frac{S_{yx}^\alpha}{S_{xx}^\alpha} \right\}$$

- ▶ Suche nach größtem Peak:

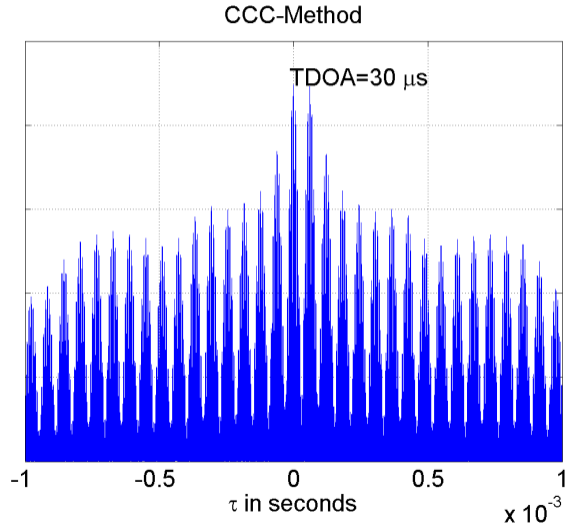
$$D_{speccorr} = \arg \max \{|a|\}$$

SPECTRAL COHERENCE ALIGNMENT SPECCOA

Algorithmus:

- ▶ $a = \mathcal{F}^{-1}\{S_{yx}^{\alpha} \cdot S_{xx}^{\alpha*}\}$
- ▶ Suche nach größtem Peak:
 $D_{speccoa} = \arg \max\{|a|\}$

VISUALISIERUNG



VISUALISIERUNG

Bandlimited SPECCOA-Method

