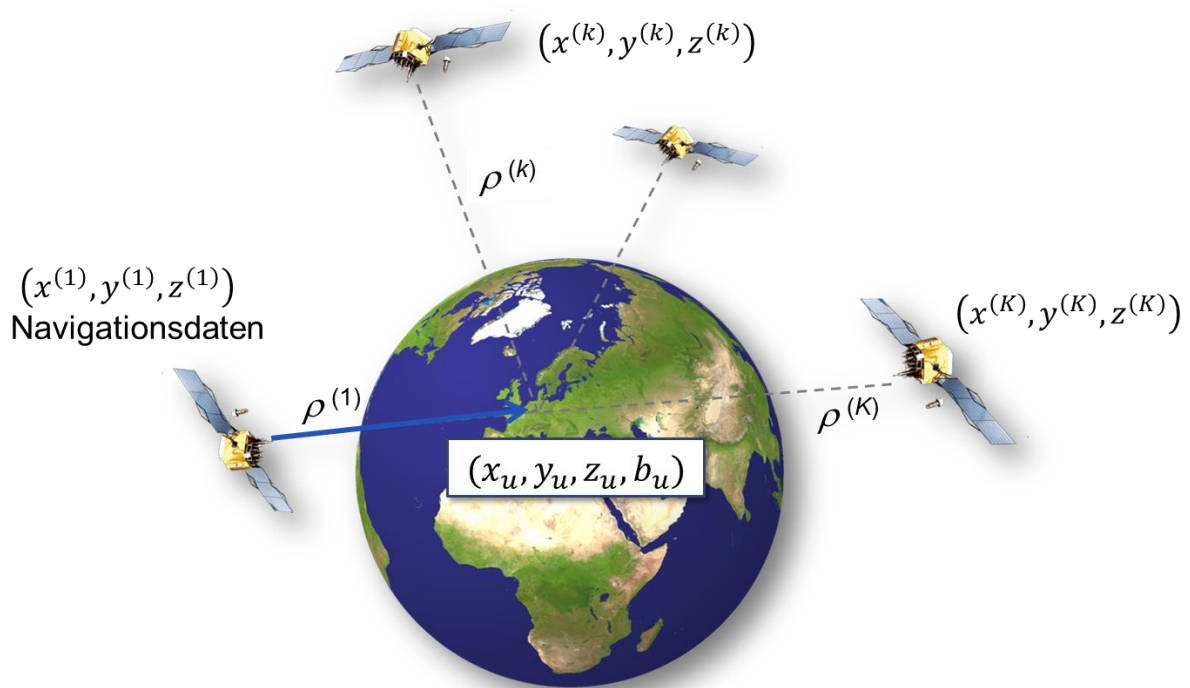


# Praktikum

## *Ortung und Navigation*



Prof. Dr.-Ing. Götz C. Kappen  
Labor für Nachrichtentechnik  
Fachbereich Elektrotechnik und Informatik  
FH Münster  
Email: [goetz.kappen@fh-muenster.de](mailto:goetz.kappen@fh-muenster.de)

Stand Version: 06.06.2021



## Inhalt

Einleitung und generelle Regeln.....	5
Termin 1: Traditionelle Navigation und Koordinatensysteme .....	7
Einleitung.....	7
Versuchsdurchführung .....	7
Navigation mit Landmarken und Kompass (entfällt in Corona Semestern).....	7
Koordinatentransformation .....	7
Erforderliche Hilfsmittel .....	8
Lernziele .....	8
Termin 2: Bestimmung der Satellitenposition .....	11
Einleitung.....	11
Versuchsdurchführung .....	11
Einführung in die Software u-center .....	11
Einlesen der RINEX Daten.....	12
Erforderliche Hilfsmittel .....	13
Lernziele .....	13
Termin 3: Akquisition .....	15
Einleitung.....	15
Versuchsdurchführung .....	15
Programmierung einer einfachen Akquisition .....	15
Beschleunigung der Akquisition .....	<b>Fehler! Textmarke nicht definiert.</b>
Aufnahme der Rohdaten .....	18
Erforderliche Hilfsmittel .....	18
Lernziele .....	18
Termin 4: Extraktion der Navigationsdaten .....	19
Einleitung.....	19
Versuchsdurchführung .....	19
Dekodierung der Ephemeriden .....	19
Aufnahme der Rohdaten .....	19
Erforderliche Hilfsmittel .....	20
Lernziele .....	20
Termin 5 PVT .....	21

Einleitung.....	21
Versuchsdurchführung.....	21
Positionsbestimmung mit 4 Satelliten.....	21
Positionsbestimmung für > 4 Satelliten .....	22
Positionsbestimmung auf Basis von RINEX Daten.....	22
Erforderliche Hilfsmittel .....	23
Lernziele .....	23
Termin 6: Fehlerkorrektor und PVT.....	25
Einleitung.....	25
Versuchsdurchführung.....	25
Berechnung des Elevationswinkels für die Satelliten.....	25
Berechnung der Verzögerung der Ionosphäre .....	25
Berechnung der Verzögerung der Troposphäre.....	25
Korrektur der Pseudoentfernungen .....	25
Berechnung der Empfängerposition .....	25
Erforderliche Hilfsmittel .....	26
Lernziele .....	26
Literatur .....	27

## Einleitung und generelle Regeln

Die Navigation ist seit jeher ein wichtiger Teil des menschlichen Lebens. Wir finden in unserem alltäglichen Leben den Weg (z.B. der Weg zum Bäcker, zur Hochschule) meist mit Landmarken (z.B. Straßenkreuzungen, Gebäuden). In diesem Praktikum werden diese rudimentären, in der Vorlesung beschriebenen, Navigationstechniken angesprochen und praktisch angewendet. Durch die Anwendung werden schnell die Probleme und Einschränkungen sichtbar.

Nach dem einführenden ersten Termin befasst sich ein Großteil des folgenden Praktikums mit der Satellitennavigation. Hierbei wird in den Beispielen meist auf das amerikanische NAVSTAR GPS zurückgegriffen, da es nach wie vor das bekannteste und am besten dokumentierte System ist [1]-[9].

Als Simulations- und Berechnungsumgebung wird vorzugsweise MATLAB<sup>1</sup> verwendet. Sollten Ihnen hier Kenntnisse fehlen, greifen Sie bitte z.B. auf die im ILIAS vorhandene MATLAB-Einführung oder entsprechende Literatur zurück.

Das Praktikum findet vorzugsweise in Zweiergruppen statt. Im Einzelfall kann das Praktikum auch alleine oder in Dreiergruppen durchgeführt werden. Größere Gruppen sind nicht zulässig. Zur erfolgreichen Teilnahme am Praktikum und der Zulassung zur Prüfung benötigen Sie sechs Testate. Testate werden vergeben, wenn alle erforderlichen Aufgaben erfolgreich bearbeitet und dokumentiert wurden, d.h. für das Abtestat ist zu jedem Versuch eine Dokumentation mit einem Textverarbeitungsprogramm zu erstellen, welche die Vorgehensweise und die Ergebnisse umfasst. Die Abgabe der Dokumentation und der Software-Funktionen erfolgt spätestens zum nachfolgenden Praktikumstermin.

Die Praktikumstermine, welche maßgeblich auf MATLAB basieren und keine ausschließlich an der Hochschule vorhandenen Hilfsmittel benötigen, können von Ihnen vorbereitet und zum Praktikums-termin vorgestellt werden. Bei der Vorstellung muss in jedem Fall klar werden, dass die Aufgabe von Ihnen bearbeitet wurde. Darüber hinaus bieten Ihnen die Praktikumstermine Gelegenheit Fragen zu stellen und Hilfestellung zu erhalten. In jedem Fall sind die Programmieraufgaben in Skripte oder Funktionen zu kapseln und vorzuzeigen bzw. die Funktionalität zu präsentieren.

---

<sup>1</sup> MATLAB wird ab hier als bevorzugte Sprache erwähnt. Sie dürfen aber eine Programmiersprache Ihrer Wahl verwenden. Wichtig ist, dass erkenntlich ist, dass das Programm von Ihnen erstellt wurde und Sie den Code erläutern können. Die Verwendung offener Werkzeuge wie z.B. Octave, Python oder C/C++ ist ebenfalls möglich, da in der Regel keine MATLAB spezifischen Funktionen verwendet werden. Ersetzen Sie daher in allen folgenden Versuchen gedanklich MATLAB durch eine Programmiersprache Ihrer Wahl. Ein sicherer Support von Dozentenseite kann allerdings nur für MATLAB sichergestellt werden.



## Termin 1: Traditionelle Navigation und Koordinatensysteme

### Einleitung

In diesem Versuch sollen die ersten Erfahrungen mit traditionellen Navigationsinstrumenten gesammelt werden. Der Versuch soll neue Begriffe einführen und zudem eine Sensibilität für die Schwierigkeiten der traditionellen Navigationsinstrumente schaffen. Hierzu wird ein auf Landmarken- und Kompass-basierendes Geocaching-Spiel zurückgegriffen. Abschließend sollen kurz die Vorteile und Vereinfachungen bei GPS-basierter Navigation aufgezeigt werden.

Die verschiedenen Koordinatensysteme die bei GPS und den übrigen Navigationssystemen zu verschiedenen Zeitpunkten der Positionsschätzung verwendet werden, stellen einen weiteren Schwerpunkt in diesem Versuch dar. Die Koordinatensysteme und die Transformationsvorschriften wurden in der Vorlesung beschrieben und sollen im Praktikum in MATLAB realisiert werden.

### Versuchsdurchführung

#### Navigation mit Landmarken und Kompass (entfällt in Corona Semestern)

Für diesen Versuch erhalten Sie einen Umschlag, in dem sich Positionsinformationen und Informationen für eine Koppel- und Landmarkennavigation befinden, die Sie nachfolgend verwenden sollen.

1. Versuchen Sie den ersten Cache durch Verwendung Ihres Mobiltelefons und/oder Google Earth zu finden.
2. Versuchen Sie den zweiten Cache mit Hilfe der gestellten Koppelnavigationsinformationen (Richtung, Schrittzahl) zu finden. **Ausgangspunkt ist der Fundort des ersten Caches.**
3. Versuchen Sie den dritten Cache durch die Beschreibung mit Landmarken zu finden. **Ausgangspunkt ist der Fundort des zweiten Caches.**
4. Versuchen Sie den vierten Cache mit den Messungen einer Zeitverzögerung eines Audiosignals zu finden
  - a. Ein an den jetzt bekannten drei Cache-Fundorten gleichzeitig ausgesendetes Audiosignal wird an dem gesuchten Punkte mit der in den Unterlagen gegebenen Verzögerung empfangen. Nehmen Sie eine Schallgeschwindigkeit von 343 m/s an.

Diskutieren Sie die Ergebnisse im Versuchsprotokoll. Welchen Vor- und Nachteil haben die einzelnen Methoden, von welchen Randbedingungen hängt die Genauigkeit ab? **Die jeweilige Wegbeschreibung oder Berechnungsgrundlage gehört zum Versuchsprotokoll!**

#### Koordinatentransformation

Dieser Versuch wird vollständig in der Software MATLAB durchgeführt<sup>2</sup>.

1. Entwickeln Sie eine MATLAB-Funktion (`g2c.m`), welche als Eingangsparameter geografische Koordinaten (Länge, Breite und Höhe) erhält und daraus kartesische Koordinaten (X, Y, Z) berechnet (verwenden Sie das WGS84 Bezugssystem).  
Nutzen Sie die Funktion, um die in Ihrem Umschlag gegebenen Koordinaten zu transformieren.  
(Im Corona-Semester verwenden Sie hier die Position 52°08'35.7764"N 7°19'16.6976"E).

---

<sup>2</sup> Für diesen Versuch benötigen Sie die Folien aus Kapitel 2 der Vorlesung.

Als Vorarbeit:

- a. Schreiben Sie eine MATLAB-Funktion (`dec2dez.m`) die aus der Darstellung in Grad, Minuten, Sekunden (plus Nachkommastellen) die Darstellung in Grad und Dezimalstellen berechnet.
  - b. Entwickeln Sie außerdem die Umkehrfunktion (`dez2dec.m`), die aus der dezimalen Darstellung, in die die Darstellung in Minuten und Sekunden transformiert.
  - c. Machen Sie einen Screenshot, der die Position in Google-Maps darstellt. Da Google-Maps auch eine Umrechnung vornimmt, können Sie das Ergebnis aus a. überprüfen.
2. Entwickeln Sie die inverse Funktion (`c2g.m`), die kartesische Koordinaten in geografische Koordinaten transformiert.
  3. Schreiben Sie ein MATLAB Testscript in dem Sie Funktionen testen. Validieren Sie die Ergebnisse außerdem mit frei verfügbaren Werkzeugen<sup>3</sup>  
(z.B. [https://www.sapos-bw.de/trafoErg\\_B\\_X.php](https://www.sapos-bw.de/trafoErg_B_X.php))
  4. Bestimmen Sie die Länge des S-Gebäudes der FH Münster auf verschiedenen Wegen:
    - a. Nutzen Sie die integrierte Messfunktion von Google-Maps. Dokumentieren Sie durch einen Screenshot die gemessene Strecke.



- b. Bestimmen Sie die Länge auf Basis der geografischen Koordinaten und vergleichen Sie Ihre Ergebnisse. Bitte erläutern Sie in dieser Aufgabe den von Ihnen gewählten Weg der Längenbestimmung. Welche vereinfachten Annahmen haben Sie unter Umständen genutzt.

## Erforderliche Hilfsmittel

Dieser Abschnitt beschreibt die erforderlichen Hilfsmittel, die Sie benötigen, um den Versuch durchzuführen. Vermerkt ist, ob Sie die Hilfsmittel gestellt kriegen oder ob Sie diese mitbringen müssen (ein Exemplar pro Gruppe genügt).

1. Kompass (wird gestellt)
2. Schrittzähler (wird gestellt)
3. Umschlag mit den Vorgabedaten
4. Vorlesungsunterlagen (von Ihnen mitzubringen)
5. Mobiltelefon und Rechner.

## Lernziele

Nach Abschluss dieses Praktikumsversuches sollen Sie in der Lage sein:

1. Die Funktionalität eines Kompasses und die Navigation mit einem Kompass im Detail zu erläutern.
2. Eine Wegbeschreibung zu erstellen, welche einem Dritten das Auffinden einer geografischen Lokalität mit Hilfe eines Kompasses und einem Schrittzähler ermöglicht.

---

<sup>3</sup> Nehmen Sie zur Vereinfachung für alle Aufgaben eine Höhe von 100m an.



3. Eine Koordinatentransformation (kartesisch  $\leftrightarrow$  geografisch) in MATLAB zu entwickeln und die verschiedenen, für GPS relevanten, Koordinatensysteme zu beschreiben und deren Verwendung zu erläutern.



## Termin 2: Bestimmung der Satellitenposition

### Einleitung

Dieser Versuch besteht aus zwei Teilen. Im ersten Teil arbeiten Sie mit einer Software für kommerzielle Empfänger der Firma u-blox. Sie erhalten einen aufgezeichneten Datensatz und sollen aus diesem Datensatz sichtbare Satelliten ablesen und mit den Daten des bekannten Trimble Tools vergleichen. Zudem sollen verschiedene statistische Werte und Kennwerte aus den Zeitreihen aus der Software entnommen werden. Da wir die Software u-center im Praktikum weiter einsetzen werden soll dieser Versuch auch dazu dienen, den Umgang zu erlernen.

Im zweiten Teil dieses Versuchs stehen die Satelliten, deren Umlaufbahnen und die zur Satellitenpositionsbestimmung relevanten Daten im Mittelpunkt. Zu Beginn soll das Standardformat RINEX verwendet werden, um aus den darin enthaltenen Daten die Satellitenposition zu einer bestimmten Zeit zu bestimmen. Nachfolgend soll das Programm so angepasst werden, dass es ebenfalls die Almanach-Daten [13] im Standard-Textformat verwenden kann. (Wie unterscheiden sich die Positionen der Satelliten bei der Verwendung der Almanach Daten und der Ephemeriden?) Es soll eine einfache Software entwickelt werden, welche es ermöglicht die sichtbaren Satelliten auf Basis der Almanach-Daten vorherzusagen. Ein Vergleich mit der Trimble Planning Software [12] dient der Verifikation.

### Versuchsdurchführung

#### Einführung in die Software u-center

Kommerzielle Empfänger verwenden häufig ein proprietäres Datenformat. In diesem Praktikum greifen wir auf die Hardware und Software des Herstellers u-blox zurück (Daten haben die Endung \*.ubx). u-center ist die Software des Empfängerherstellers u-blox, welche eine sehr tiefgehende Betrachtung der Eingangs- und Ausgangsdaten, sowie der internen Daten von Navigationsempfängern erlaubt. Zusätzlich ist die Konfiguration von Empfänger über u-center möglich. Die Software arbeitet mit den im Labor vorhandenen Empfängern zusammen<sup>4</sup> und erlaubt die Betrachtung in Echtzeit, das Aufzeichnen und Wiedergeben sowie die Analyse<sup>5</sup>.

1. Laden Sie die aktuellste Version der Software u-center<sup>6</sup>.
2. Öffnen Sie die aufgezeichneten Daten (AufnahmeUblox.ubx).
3. Lassen Sie sich die folgenden Informationen anzeigen und übernehmen Sie die geforderten Plots per Screenshot und Copy&Paste in Ihr Versuchsprotokoll
  - a. Bestimmen Sie das Datum und den Zeitraum der Aufzeichnung.
  - b. Vergleichen Sie die Messung mit der Vorhersage aus dem Trimble Planning Tool. Beschränken Sie sich auf die Satelliten des amerikanischen Systems Navstar GPS.
  - c. Zeigen Sie den Positionsplot über der Zeit, um einen ungefähren Eindruck von der Genauigkeit der Messung zu erhalten. Passen Sie die Auflösung so an, dass Sie alle Messwerte bei höchster Genauigkeit sehen.
  - d. Zeigen Sie eine statistische Auswertung und die Zeitreihendarstellung für die berechnete Höhe über Grund (Height above Earth; HAE) an.

---

<sup>4</sup> Im CORONA-Semester werden die Daten aufgezeichnet und über das ILIAS-System zur Verfügung gestellt.

<sup>5</sup> Hierzu erfolgt eine Einführung in der Vorlesung.

<sup>6</sup> <https://www.u-blox.com/en/product/u-center?lang=de>

## Einlesen der RINEX Daten

RINEX ist im Gegensatz zu \*.ubx ein lesbares und kein binäres Datenformat. Die exakte Beschreibung findet man in [14]<sup>7</sup>. In der Vorlesung wurde zudem eine erste Einführung in das Datenformat und die weitere Datenverarbeitung gegeben.

1. Laden Sie die aktuellen RINEX-Daten für das Datum, welches Sie in der vorherigen Aufgabe stimmt haben, von [11]. Nutzen Sie die Daten der Station aus Delft.

Die Daten liegen in dem entsprechen komprimierten Format vor.

2. Auf dem Server der TU Delft<sup>8</sup> erhalten Sie die Daten verschiedener Stationen mit jeweils unterschiedlicher Aufzeichnungsfrequenz. Nutzen Sie den Link „Download daily RINEX Files (30 sec) (all stations)“.

### Dutch Permanent GNSS Array (DPGA)

The Dutch Permanent GPS Array (DPGA) consists of about 18 continuously operating GPS (and GLONASS) receivers in the Netherlands. GNSS data to the [International GNSS Service \(IGS\)](#), [EUREF Permanent GNSS Network \(EPN\)](#), [EUMETNET GPS water vapour program](#) educational applications.

#### Latest news

Since Thursday 4 February 2021, 15:00 UTC, the high-rate RINEX-3 files for stations AMEL, APEL, EIDS, IJMU, SCHI, TERS, TXE2 and streams). High-rate RINEX-3 files for the stations CBW1 and VLIE are still generated from data streams. [4 February 2021]

Tuesday 26 January, around 9:00 UTC, this server migrated to new hardware. It runs now a virtual server with Redhat Enterprise 8 but no data was lost. [26 January 2021]

[older news items...](#)

### GNSS Local Data Center Delft (GNSS-LDC-Delft)

Hourly and daily RINEX data from the Dutch Permanent GPS Array are available through this web site (<http://gnss1.tudelft.nl/doga/>)

[Download daily RINEX files \(30 sec\) \[ http | ftp \]](#)

[Download hourly RINEX files \(30 and/or 10 sec\) \[ http | ftp \]](#)

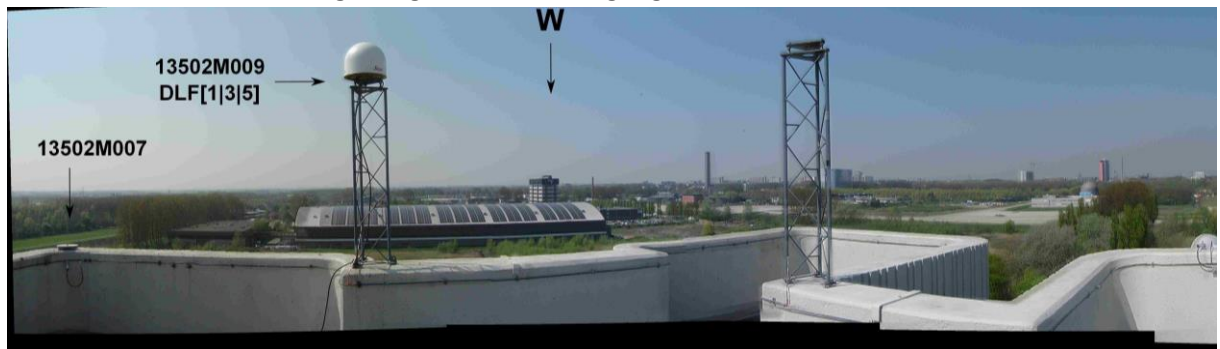
[Download high-rate RINEX files \(1 sec\) \[ http | ftp \]](#)

[Check availability and latency of daily rinex2 data](#)

[Check availability and latency of hourly rinex2 data](#)  
(Selected stations only)

Die Daten sind komprimiert abgelegt. Laden und extrahieren Sie daher die RINEX \*.nav Daten und Observationsdaten im Rinex 2.\* Format<sup>9</sup>.

Die verwendeten Antennen, Empfänger und weitere Details können Sie sich unter <http://gnss1.tudelft.nl/dpga/station/Delft.html#DELF> anschauen. Hier finden Sie auch Informationen über die Umgebung und die Anbringung der Antennen.



<sup>7</sup> Die RINEX Beschreibung finden Sie als PDF-Datei im ILIAS unter „Literatur“

<sup>8</sup> Wegen der räumlichen Nähe dürfen Sie davon ausgehen, dass die sichtbaren Satelliten in Steinfurt und in Delft ungefähr die gleichen sind.

<sup>9</sup> Die Daten sind komprimiert. Zur Extraktion verwenden Sie bitte das Kommandozeilentool (bevorzugt) oder das JAVA-basierte Werkzeug.



3. Verwenden Sie die Funktion *rdRinex.m*, die Sie im ILIAS finden, um die Rinex-Daten zu dekodieren. Schreiben Sie jetzt eine Funktion, die Ephemeriden für die Zeit aus dem vollständigen Datensatz extrahiert, die Sie laut Trimble Tool sehen müssten.
4. Speichern Sie die Navigationsdaten der sichtbaren Satelliten in einer Datei (zweispaltig, Name des Parameters - Wert)
5. Bestimmen Sie die aktuellen Satellitenposition für mindestens vier der Satelliten<sup>10</sup> in kartesischen Koordinaten.
6. Bestimmung des Azimut- und Elevationswinkels für den Empfängerstandort (TU Delft). Hierzu sollten Sie Satellitenkoordinaten in das ENU-Koordinatensystem transformieren (siehe Vorlesung Kapitel 2)
7. Bestimmung der sichtbaren Satelliten. Verwenden Sie eine Elevationsmaske von 10°.
8. Vergleich der bestimmten sichtbaren Satelliten mit den in den Observationsdaten sichtbaren Satelliten. Woher könnten Unterschiede herrühren?
9. Vergleich der sichtbaren Satelliten mit den Ergebnissen der Trimble Planning Software [12]. Woher könnten hier Unterschiede herrühren?

## Erforderliche Hilfsmittel

Dieser Abschnitt beschreibt die erforderlichen Hilfsmittel, die Sie benötigen, um den Versuch durchzuführen. Vermerkt ist, ob Sie die Hilfsmittel gestellt kriegen oder ob Sie diese mitbringen müssen (ein Exemplar pro Gruppe genügt).

1. Eine Version der RINEX-Formatbeschreibung Version 2.10
2. Rechner mit MATLAB
3. Internet-Zugriff
4. Vorlesungsunterlagen
5. GPS ICD (am Einfachsten in elektronischer Form)

## Lernziele

Nach Abschluss dieses Praktikumsversuches sollen Sie in der Lage sein:

1. Das universelle Datenformat RINEX zu beschreiben, die Unterschiede zwischen einer Observations- und einer Navigationsdatei zu erläutern und die zur Positionsbestimmung relevanten Inhalte aus den Dateien mit MATLAB zu extrahieren.

---

<sup>10</sup> Verwenden Sie nur die zuerst auftretenden Navigationsdaten in den RINEX Files. Die Daten treten wegen der 24 Stunden Aufnahmezeit für die Satelliten mehrfach auf.

2. Die erforderlichen Schritte durchzuführen, um mit Hilfe von verfügbaren Ephemeris-Daten die sichtbaren Satelliten für eine geografische Position zu bestimmen.
3. Mit Hilfe der Almanach-Daten und dem Werkzeug Trimble-Planning Tool die sichtbaren Satelliten zu einem gewissen Zeitpunkt zu bestimmen.

Siehe:  
Kap 5 Folie 25/81

## Termin 3: Akquisition

### Einleitung

Der erste Schritt bei einer Positionsbestimmung mit Hilfe von GPS<sup>11</sup> ist die Akquisition der sichtbaren Satelliten. Ein Empfänger ohne verfügbare Vorinformationen (z.B. aus einer kürzlich durchgeführten Positionsbestimmung oder Zusatzdaten aus dem Mobilfunknetz) hat dabei keine Kenntnis über:

- Aktuelle Uhrzeit
- Ungefähre Empfängerposition
- Sichtbaren Satelliten
- Dopplerfrequenzverschiebung der Satelliten
- Entfernung zum Satelliten und damit PRN-Code-Phase

Die ersten beiden Unbekannten ergeben sich nach der ersten Positionsbestimmung oder über Zusatzinformationen z.B. aus dem Mobilfunknetz.

Die drei letzten Unbekannten müssen durch eine (serielle<sup>12</sup>) Suche gefunden werden. In diesem Versuch sollen Sie eine einfache Funktion programmieren, die eine Akquisition aller für den Empfänger sichtbaren Satelliten ermöglicht. Ein Herunterladen der vollständigen Navigationsnachricht ist nicht erforderlich.

### Versuchsdurchführung

#### Programmierung einer einfachen Akquisition

#### Aufgabe

Für die folgenden Aufgaben werden aufgezeichnete Daten genutzt. Für diese gilt:

Sampling-Frequenz	$f_s = 1/T = 16,3676 \text{ MHz}$
Frequenz des CA-Codes	$f_{CA} = 1,023 \text{ MHz}$
Zwischenfrequenz	$f_{ZF} = 4,1304 \text{ MHz}$
Länge eines Codes CA-Codes	$T_{code} = 1 \text{ ms}$

Außerdem wurde eine \*.mat Datei mit den PRN-Codes bereits vorbereiten. \*.mat Dateien können in Matlab einfach mit dem load-Befehl eingelesen werden. In der Datei GPST1\_LUT.mat finden Sie die Codes aller zivilen 37 GPS Satelliten (Variablenname nach dem Laden caCodesLUT) die P-Codes die ebenfalls geladen werden, werden in diesem Versuch nicht benötigt.

<sup>11</sup> Aber auch allen übrigen Satellitennavigationssystemen (GNSSs)

<sup>12</sup> In modernen GPS-Empfängern wird diese Suche parallelisiert und daher beschleunigt durchgeführt.

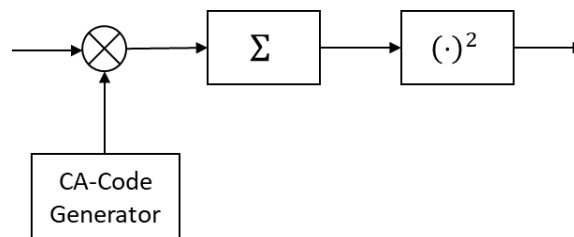
Als letztes steht Ihnen die einfache Funktion `rsmp` zur Verfügung. Diese ermöglicht es Ihnen die Sample-Rate heraufzusetzen. So können Sie z.B. die Sampling Frequenz des CA-Codes (in der \*.mat Datei mit 1,023 MHz gespeichert) auf 16,3676 MHz erhöhen<sup>13</sup>.

### Zur Vorarbeit

Schauen Sie sich den Code der Funktion der Funktion `rsmp.m` an und versuchen Sie die einzelnen Zeilen zu verstehen. Testen Sie den Code an einfachen Beispielen.

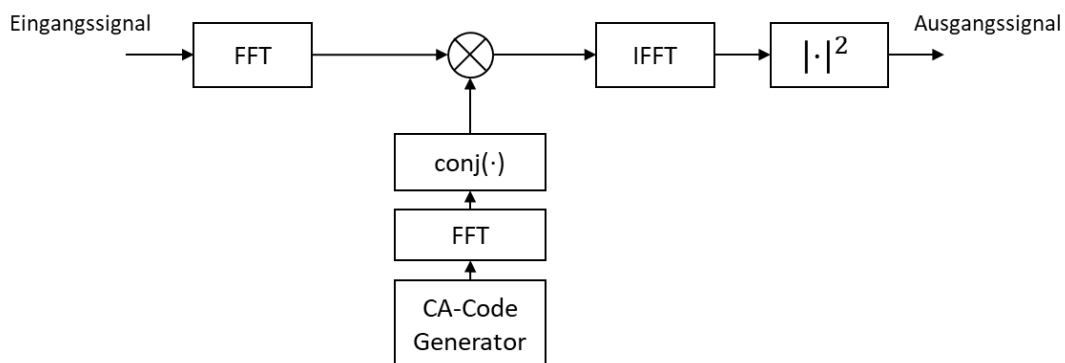
- a) Schreiben Sie eine Funktion, die alle Phasen eines PRN-Codes (diesen finden Sie in der Datei `GPSL1_LUT.mat`<sup>14</sup>) nach Übereinstimmung der Phase mit dem eingehenden Signal (dieses finden Sie in der Datei `prnOnly.mat`) überprüft.

In dieser Datei ist nur der Satellit mit der Nummer 1 vorhanden eine Suche über die Satellitendimension ist daher nicht erforderlich. Sie sollten ein sehr deutliches Maximum der Kreuzkorrelation finden. Plotten Sie das Akquisitionsspektrum mit der korrekten Achsenbeschriftung auf der Abszisse und normieren Sie das Korrelationsergebnis auf 1. Der lokale Oszillator in *Abbildung 1* entspricht in der Aufgabe noch einer Multiplikation mit Eins und es gibt nur den *I*-Pfad.



*Abbildung 1: Akquisition für eine definierte PRN und eine Code-Phase im Zeitbereich*

- b) Beschleunigen Sie die Berechnung der Akquisition.



*Abbildung 2: Durchführung der Korrelation im Frequenzbereich. Parallele Berechnung aller Code-Phasen*

Hinweis: Schauen Sie sich die Korrelation im Frequenzbereich an (siehe *Abbildung 2*) und versuchen Sie diese Eigenschaften auszunutzen, um die FOR-Schleifen über alle bei Code-Phasen der Akquisition zu umgehen. Sie können diese Berechnung wieder mit der Datei `prnOnly.mat` testen.

<sup>13</sup> Nutzung der Funktion: `rsmp(Daten, Ausgangsfrequenz, Wunschfrequenz)`

<sup>14</sup> In der Datei sind der militärische Code (P-Code) und der zivile Code (CA-Code) gespeichert. Verwenden Sie den zivilen CA-Code. In der Datei sind 37 Codes gelistet, von denen nicht alle verwendet werden.



- c) Ergänzen Sie jetzt die Suche über die möglichen Frequenzen (komplexer Mischer in der *Abbildung 1* bzw. *Abbildung 2*). Verwenden Sie ein Frequenzraster von 250 Hz und den Suchbereich, den Sie in Aufgabe 3.2.1 berechnet haben. Einen Test können Sie mit der Datei `prn-FreqOnly.mat` durchführen. Wie viele Kombinationen aus Frequenzen und Code-Verschiebungen müssen getestet werden?

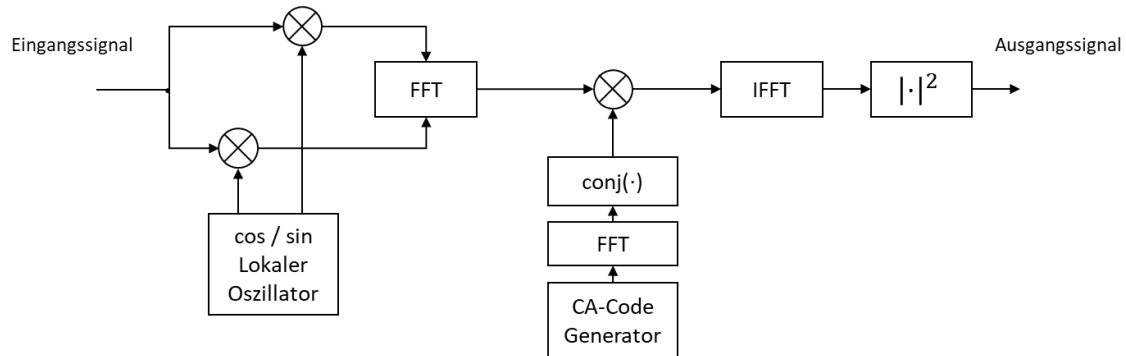


Abbildung 3: Schnelle Akquisition im Frequenzbereich mit sin/cos-Mischer

In der finden Sie die Lösung mit einem komplexen Mischer an Eingang. Diese Lösung ist die schnellste und flexibelste Lösung und sollte im Folgenden genutzt werden. *Abbildung 3* dient daher nur der Veranschaulichung.

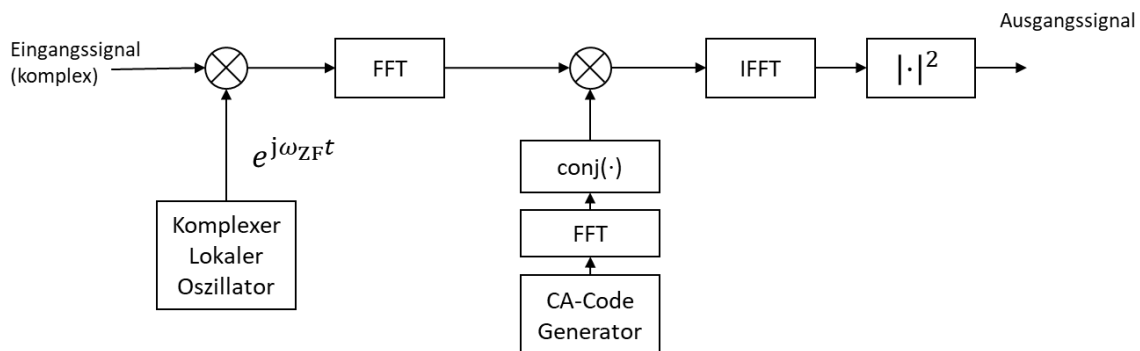


Abbildung 4: Schnelle Akquisition im Frequenzbereich mit komplexen Mischer

- d) Nehmen Sie zuletzt noch die Suchdimension der Satelliten-Codes mit auf. Suchen Sie über die ersten 32 der 37 vorhandenen Codes. Die Codes finden Sie in der Datei `GPSL1_LUT.mat`. Ein Blockschaltbild der schnellen Akquisition für eine bestimmte PRN ist in *Abbildung 2* gezeigt. Den Test können Sie mit realen, aufgezeichneten Daten (`rfCplx.mat`) durchführen. Wichtig ist, dass sich hier um komplexe Eingangsdaten handelt. Wie ändert sich der Basisbandmischer. Bitte beachten Sie, dass sich die Konstanten wie folgt ändern:

Sample-Frequenz	$f_s = 1/T = 16 \text{ MHz}$
Frequenz des CA-Codes	$f_{CA} = 1,023 \text{ MHz}$
Zwischenfrequenz	$f_{ZF} = 4 \text{ MHz}$
Länge eines Codes	$T_{code} = 1 \text{ ms}$

- e) Welche Satelliten können Sie in der bereitgestellten Datei sicher identifizieren? Notieren Sie PRN-Nummern, Code-Verschiebung und Doppler-Frequenz für jeden gefundenen Satelliten (d.h. für das Maximum im Suchraum) und vergleichen Sie die gefundenen Satelliten mit den Satelliten, die Sie mit der Anwendung auf der Website <https://www.gnssplanning.com/#/settings> finden. Verwenden Sie die folgende Aufnahmezeit der Daten: 12.05.2021 ca. 12 Uhr.

### Aufnahme der Rohdaten

1. Verwenden Sie die von Ihnen erstellte MATLAB-Funktion zur Akquisition der Satelliten in den von Ihnen aufgenommenen Daten.
2. Gleichen Sie die akquirierten Satelliten mit einem Planning Tool ab [12].

### Erforderliche Hilfsmittel

Dieser Abschnitt beschreibt die erforderlichen Hilfsmittel, die Sie benötigen, um den Versuch durchzuführen. Vermerkt ist, ob Sie die Hilfsmittel gestellt kriegen oder ob Sie diese mitbringen müssen (ein Exemplar pro Gruppe genügt).

1. Rechner mit MATLAB oder OCTAVE
2. Internet-Zugriff
3. Vorlesungsunterlagen
4. Synthetische GPS-Rohdaten (nur Code, Code und Träger)
5. Gespeicherte GPS-Rohdaten
6. Eine \*.mat Datei mit den CA-Codes für alle GPS-Satelliten
7. Eine Version des Interface Control Documents (ICD) für Navstar GPS

### Lernziele

Nach Abschluss dieses Praktikumsversuches sollen Sie in der Lage sein:

1. Den Unterschied zwischen einem A-GPS und einem Standard-GPS-Empfänger zu erläutern.
2. Die erforderlichen Informationen für die Akquisition eines Satellitensignals zu benennen.
3. Eine einfache Akquisitionsroutine in MATLAB zu programmieren.
4. Die für weitere Navigationssysteme notwendigen Erweiterungen zu benennen.

## Termin 4: Extraktion der Navigationsdaten

### Einleitung

Sowohl im RINEX Format als auch in den Standard Almanach Format liegen die Navigationsdaten dekodiert und in lesbarer Form vor. In diesem Versuch sollen zunächst an der SDR-Hardware die Rohdaten aufgezeichnet werden. Ziel dieses Versuchs ist es die Ephemeriden des jeweiligen Satelliten aus einem binären Navigationsdatenstrom zu extrahieren<sup>15</sup> und mit schon dekodierten Daten zu vergleichen.

Der Schritt des Empfangs und der Dekodierung der Navigationsdaten ist der erste erforderliche Schritt bevor die Satellitenpositionsberechnung durchgeführt werden kann (siehe Versuch 2). Die Rohdaten aus denen die Navigationsdaten gewonnen werden, sind die Ausgangsdaten des Prompt-Korrelators. Da in der Regel eine Integrationszeit von 1 ms für das Tracking verwendet wird, müssen 20 Integrationsperioden zu einem Datenbit von 50 Hz zusammengefasst werden.

### Versuchsdurchführung

#### Dekodierung der Ephemeriden

Für diesen Versuch erhalten Sie eine Datei mit den Werten der gespeicherten Korrelatorausgänge eines getrackten Satelliten. Darüber hinaus

1. Schreiben Sie eine Funktion, welche den Ausgangsdatenstrom der Korrelatorwerte in einen binären Strom von 50 Hz Navigationsdaten transformiert.
2. Schreiben Sie eine Funktion, die in dem binären Datenstrom die Präambel findet und dekodieren Sie in den nachfolgenden Bits die Nummer des Unterrahmens. Finden Sie den Start jedes Unterrahmens und notieren Sie die Bit-Nummer.
3. Dekodieren Sie die vollständigen Ephemeriden des entsprechenden Satelliten mit Hilfe des ICDs [1]. Beachten Sie einen eventuellen Polaritätswechsel durch das Bit D30 (siehe ICD).
4. Ein Paritäts-Check sollte bei Daten mit einem guten SNR nicht notwendig sein. Kann aber natürlich durchgeführt werden.
5. Vergleichen Sie Ihre Ergebnisse mit den bereits dekodierten zeitlich passenden RINEX-Daten. Den zeitlichen Bezug erhalten Sie aus Wochennummer und der Time of Week (TOW).

#### Aufnahme der Rohdaten

1. Zeichnen Sie an einer der SDR-Plattformen mindestens 32 s Rohdaten auf.
2. Verwenden Sie den Software-Empfänger, um Akquisition und Tracking für **einen** sichtbaren Satelliten durchzuführen.
3. Führen Sie Ihre Funktion aus, um die aktuellen Ephemeriden aus dem durch das Tracking bestimmten Navigationsdatenstrom zu extrahieren.
4. Bestimmen Sie außerdem die Sendezeit aus den Ephemeriden und vergleichen Sie diese mit der lokalen Zeit zum Start der Aufzeichnung.

---

<sup>15</sup> Zur Dekodierung der Almanach-Daten sind bis zu 12,5 Minuten Rohdaten erforderlich.

## **Erforderliche Hilfsmittel**

Dieser Abschnitt beschreibt die erforderlichen Hilfsmittel, die Sie benötigen, um den Versuch durchzuführen. Vermerkt ist, ob Sie die Hilfsmittel gestellt kriegen oder ob Sie diese mitbringen müssen (ein Exemplar pro Gruppe genügt).

1. Rechner mit MATLAB oder OCTAVE
2. Internet-Zugriff
3. Vorlesungsunterlagen
4. Eine \*.mat Datei mit den Korrelatorausgangsdaten
5. Eine \*.mat Datei mit den SDR-Einstellungen
6. Eine Version des Interface Control Documents (ICD) für Navstar GPS

## **Lernziele**

Nach Abschluss dieses Praktikumsversuches sollen Sie in der Lage sein:

1. Die Ephemeriden aus dem Bit-Datenstrom der Navigationsdaten zu extrahieren.
2. Die aktuelle Sendezeit der Ephemeriden aus den Navigationsdaten zu extrahieren.
3. Den Unterschied zwischen Almanach und Ephemeriden zu erläutern.
4. Zu erläutern, wie aus den Informationen von mindestens vier Satelliten (d.h. Sendezeit, Ephemeriden) eine Positionsbestimmung für den Empfänger möglich ist.

## Termin 5 PVT

### Einleitung

Das zentrale Element in der Nachverarbeitung eines Satellitennavigationsempfängers ist die Berechnung der Position, der Geschwindigkeit und die Synchronisation der Empfängeruhrzeit (PVT). In diesem Versuch sollen basierend auf RINEX-Daten die Position und die Korrektur der Empfängerzeit berechnet werden.

### Versuchsdurchführung

In diesem Versuch werden Sie die Empfängerposition auf Basis der gegebenen Satellitenposition und der Pseudoentfernung berechnen. Dies soll zunächst für vier Satelliten erfolgen. Dies führt zu einem Gleichungssystem mit vier Gleichungen und vier Unbekannten, welches iterativ gelöst werden muss.

Nach der Lösung des Gleichungssystem mit vier Gleichungen und vier Unbekannten soll nachfolgend ein überbestimmtes Gleichungssystem mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate (LMS) bestimmt werden. Dies ist der Standardfall bei der Positionsbestimmung mit GPS.

Abschließend sollen die entwickelten Funktionen genutzt werden, um auf Basis von RINEX-Daten eine Empfängerposition zu bestimmen.

### Positionsbestimmung mit 4 Satelliten

Ausgehend von der ersten Positionsschätzung  $\hat{x}$ , der Satellitenposition  $svPos$  und der Entfernungsmessung  $p_r$  sollen Sie in dieser Aufgabe eine Funktion schreiben, die die Position des Empfängers und die Korrektur der Empfängeruhr bestimmt<sup>16</sup>. Verwenden Sie die folgenden Daten<sup>17</sup>.

```
xhat = [6377000.0 3000.0 4000.0 0];

svPos = [22808160.9 -12005866.6 -6609526.5;
         21141179.5 -2355056.3 -15985716.1;
         20438959.3 -4238967.1 16502090.2;
         18432296.2 -18613382.5 -4672400.8];

pr = [21480623.3 21971919.2 22175603.9 22747561.5];
```

### Detaillierte Aufgabenstellung

1. Bestimmen Sie die Geometriematrix  $H$ .
2. Bestimmen Sie die Differenz zwischen geschätzter und gemessener Pseudorange.
3. Lösen Sie das lineare Gleichungssystem und bestimmen Sie den Korrekturvektor für die Position und die Zeit.
4. Korrigieren Sie Ihre erste Positionsschätzung ( $\hat{x}$ ).
5. Bestimmen Sie mit der neuen Positionsschätzung eine neue Geometriematrix und führen Sie das iterative Verfahren weiter aus.

**Hinweis:** Sie können das iterative Verfahren fest mit 5 Iterationen implementieren.

<sup>16</sup> Verwenden Sie als Hilfe die Vorlesungsfolien Kapitel 2, Folie 79-81.

<sup>17</sup> Die Daten für diese und die folgende Aufgabe finden Sie auch im ILIAS System.

### Positionsbestimmung für > 4 Satelliten

Schreiben Sie, basierend auf der vorherigen Funktion, eine Funktion, die die Positionsbestimmung für mehr als vier Satelliten ermöglicht und das überbestimmte Gleichungssystem mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate löst<sup>18</sup>.

$$\Delta x = (\mathbf{H} \cdot \mathbf{H}^T)^{-1} \mathbf{H}^T \Delta \rho$$

#### Detaillierte Aufgabenstellung

1. Bestimmen Sie die Geometriematrix  $\mathbf{H}$ .
2. Bestimmen Sie die Differenz zwischen geschätzter und gemessener Pseudorange.
3. Lösen Sie das lineare Gleichungssystem und bestimmen Sie den Korrekturvektor für die Position und die Zeit.
4. Korrigieren Sie Ihre erste Positionsschätzung ( $\hat{x}$ ).
5. Bestimmen Sie mit der neuen Positionsschätzung eine neue Geometriematrix und führen Sie das iterative Verfahren weiter aus.

**Hinweis:** Sie können das iterative Verfahren fest mit 5 Iterationen implementieren.

### Positionsbestimmung auf Basis von RINEX Daten

Berechnen Sie die Empfängerposition auf Basis von RINEX-Daten[11]. Hierzu sind die wesentlichen Funktionen wie z.B. die Funktionen zur Satellitenpositionsberechnung (siehe auch Versuch 2) und zum Einlesen der RINEX-Daten gegeben<sup>19</sup>. Falls nötig finden Sie die RINEX-Formatbeschreibung im ILIAS System [14].

#### Detaillierte Aufgabenstellung

1. Versuchen Sie die Struktur des gegebenen Codes (`v5.m`) zu verstehen. Achten Sie insbesondere auf doppelte Kommentarzeichen (`,%'`). Diese trennen die funktionalen Blöcke des Skripts.
2. In der Datei `v5.m` finden Sie in den Zeilen 36-39 den Aufruf der Funktion `pvt`.
3. Die Funktion ist von Ihnen zu vervollständigen. Versuchen Sie zunächst sich einen Überblick über diese Funktion zu machen. In diesem Praktikum entfallen alle Korrekturen (d.h. keine Korrektur der Atmosphäre, o.Ä.).
4. Im Unterschied zu den beiden vorherigen Aufgaben dieses Versuchs sind die Satellitenpositionen nicht gegeben. Verwenden Sie zur Berechnung die Funktion `satpos.m`. Überlegen Sie welche Zeit Sie zur Berechnung der Satellitenposition verwenden müssen. Berechnen Sie dann für die eingelesenen Ephemeriden die Satellitenposition.
5. Verwenden Sie die Pseudoranges (aus den Observationsdaten) und die berechneten Satellitenpositionen zur Berechnung der Empfängerposition.
6. Bewerten Sie die Genauigkeit der Positionsbestimmung anhand der Empfängerposition in den RINEX Daten.
7. Woher können etwaige Fehler stammen?

<sup>18</sup> Verwenden Sie als Hilfe die Vorlesungsfolie Kapitel 2, Folie 82 und die Daten im ILIAS System.

<sup>19</sup> Sie finden die zu verwendenden RINEX-Daten und die MATLAB Funktionen im ILIAS System.

## Erforderliche Hilfsmittel

Dieser Abschnitt beschreibt die erforderlichen Hilfsmittel, die Sie benötigen, um den Versuch durchzuführen. Vermerkt ist, ob Sie die Hilfsmittel gestellt kriegen oder ob Sie diese mitbringen müssen (ein Exemplar pro Gruppe genügt).

1. Rechner mit MATLAB oder OCTAVE
2. Internet-Zugriff
3. Vorlesungsunterlagen
4. RINEX-Daten, MATLAB-Funktionen aus dem ILIAS

## Lernziele

Nach Abschluss dieses Praktikumsversuches sollen Sie in der Lage sein:

1. Die Herleitung des Verfahrens zur Positionsbestimmung im Detail zu erläutern.
2. Das Verfahren (LMS-Schätzung) der Positionsschätzung für vier und mehr Satelliten zu beschreiben.
3. Das LMS-Verfahren zu implementieren.
4. Den Einfluss der Anzahl der Iterationen qualitativ anzugeben.
5. Weitere erforderliche Schritte bei der Positionsschätzung zu erläutern.
6. Mögliche Verfahren zur Geschwindigkeitsberechnung zu benennen.





## Termin 6: Fehlerkorrektor und PVT

### Einleitung

Wie in der Vorlesung besprochen unterliegt das Sendesignal eines GPS-Satelliten verschiedenen Fehlereinflüssen, die für eine exakte Positionsbestimmung korrigiert werden müssen. Hierzu sollen die erforderlichen Daten aus den Ephemeriden dekodiert werden und die Modelle zur Korrektur der Fehler durch Ionosphäre, Troposphäre und Uhrzeit angewendet werden.

### Versuchsdurchführung

#### Berechnung des Elevationswinkels für die Satelliten

Berechnen Sie den Elevationswinkel für alle sichtbaren Satelliten mit Hilfe der gegebenen Funktion<sup>20</sup>.

#### Berechnung der Verzögerung der Ionosphäre

Berechnen Sie Verzögerung, welche durch die Ionosphäre verursacht wird. Verwenden Sie hierzu das Klobuchar-Modell, welches in der Vorlesung besprochen wurde und die Informationen aus den Ephemeriden.

1. In welcher Größenordnung liegt der Fehler?
2. Was wären weitere Korrekturmöglichkeiten?

Kapseln Sie Ihre Berechnungen in einer Funktion.

#### Berechnung der Verzögerung der Troposphäre

Berechnen Sie Verzögerung, welche durch die Troposphäre verursacht wird. Verwenden Sie hierzu das Saastamoinen-Model, welches in der Vorlesung besprochen wurde.

1. In welcher Größenordnung liegt der Fehler?
2. Was wären weitere Korrekturmöglichkeiten?

Kapseln Sie Ihre Berechnungen in einer Funktion.

#### Korrektur der Pseudoentfernungen

Korrigieren Sie die gemessenen Pseudoentfernungen, welche Sie aus den RINEX-Observationsdaten erhalten haben mit Hilfe der Funktionen für die Berechnung der Iono- und Troposphärenlaufzeit.

#### Berechnung der Empfängerposition

Berechnen Sie mit den korrigierten Pseudoentfernungen die Empfängerposition (siehe Versuch 5) und vergleichen Sie die Position mit der nicht korrigierten Variante.

1. Wie groß ist der Fehler in Meter?
2. Wie groß ist dieser Fehler im Vergleich mit den theoretischen Werten aus der Vorlesung?

---

<sup>20</sup> Sie finden die Funktion im ILIAS-System

## **Erforderliche Hilfsmittel**

Dieser Abschnitt beschreibt die erforderlichen Hilfsmittel, die Sie benötigen, um den Versuch durchzuführen. Vermerkt ist, ob Sie die Hilfsmittel gestellt kriegen oder ob Sie diese mitbringen müssen (ein Exemplar pro Gruppe genügt).

1. Rechner mit MATLAB oder OCTAVE
2. Internet-Zugriff
3. Vorlesungsunterlagen

## **Lernziele**

Nach Abschluss dieses Praktikumsversuches sollen Sie in der Lage sein:

1. Die Korrektur der Pseudorange mit den Standardmodellen für die Ionosphäre und die Troposphäre durchzuführen.
2. Die Fehlergröße für Ionosphäre und Troposphäre anzugeben.
3. Qualitativ die Einflussfaktoren der Pseudorange-Fehler und der Satellitenposition bei der Empfängerpositionsbestimmung anzugeben.

## Literatur

- [1] GPS ICD
- [2] Zogg, J.M, GPS und GNSS: Grundlagen der Ortung und Navigation, uBlox, 2011.
- [3] Borre, K., et al., A Software-Defined GPS and Galileo Receiver: A Single-Frequency Approach, Birkhäuser Boston, 2006.
- [4] Misra, P., Enge, P., Global Positioning System: Signals, Measurements and Performance, Ganga-Jamuna, 2001.
- [5] Mansfeld, Satellitenortung und Navigation: Grundlagen, Wirkungsweise und Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme, 2010.
- [6] Kaplan, E., Understanding GPS: Principles and Applications, 2006.
- [7] Parkinson, B., Global Positioning System: Theory and Application, 1996.
- [8] Hofmann-Wellenhof, B., Global Positioning System: Theory and Practice, 2001.
- [9] Tsui, J. B.-Y., Fundamentals of Global Positioning System Receivers: A Software Approach, 2005.
- [10] Institute of Navigation, [www.ion.org](http://www.ion.org)
- [11] TU Delft, <http://gnss1.tudelft.nl/dpga/>
- [12] Trimble, <http://www.trimble.com/gnssplanningonline>
- [13] US Navigation Center. <http://www.navcen.uscg.gov/?pageName=gpsAlmanacs>
- [14] NASA, <ftp://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/data/format/rinex210.txt>