

RANCO: EIN RAIM-ALGORITHMUS FÜR GNSS

CES-Seminararbeit
von
B. Sc. Florian Kliem
Matrikelnummer 287393

Studienrichtung: CES
Dauer der Arbeit: Semesterbegleitendes Seminar, 5CP
Abgegeben am: 6. Mai 2014
Nummer: S1696
Betreuer: Dipl.-Ing. Michael Breuer

Die Arbeit ist nur zum internen Gebrauch bestimmt. Alle Urheberrechte liegen beim Verfasser und bei Univ.-Prof. Dr.-Ing. Abel, Lehrstuhl und Institut für Regelungstechnik. Für den Inhalt wird keine Gewähr übernommen.

Ich versichere, diese Arbeit im Rahmen der am Institut üblichen Betreuung selbständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Quellen verwendet zu haben.

(Florian Kliem)

Aachen, 6. Mai 2014

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | GNSS und RAIM | 2 |
| 2.1 | Übersicht operativer GNSS | 2 |
| 2.2 | Funktionsweise | 2 |
| 2.3 | Integritätsüberwachung: RAIM | 3 |
| 2.4 | Anzahl sichtbarer Satelliten | 5 |
| 3 | RANCO | 6 |
| 3.1 | Funktionsweise | 6 |
| 3.2 | Auswahl der Referenzsets | 7 |
| 3.3 | Bewertung der Referenzsets | 8 |
| 3.4 | Abschließende Positionsschätzung | 10 |
| 3.5 | Implementierung und Tests | 10 |
| 4 | Zusammenfassung | 12 |
| | Literaturverzeichnis | 13 |

Einleitung

In den vergangenen Jahren haben verschiedenen Projekte zum Auf- und Ausbau globaler Satellitennavigationssysteme (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) die Zuverlässigkeit satellitengestützter Positionsbestimmung drastisch verbessert. Das US-amerikanische Global Positioning System (GPS) und das russische GLObal Navigation Satellite System (GLONASS) sind voll bzw. größtenteils funktionsfähig. Das europäische Galileo sowie das chinesische Compass werden bis Ende dieses Jahrzehnts ebenfalls einsatzbereit sein.

Diese weitreichende Verfügbarkeit wird zu erhöhter Zuverlässigkeit und Genauigkeit führen und erlaubt die Anwendung von GNSS auch in sicherheitsrelevanten Bereichen. Insbesondere in der Luftfahrt wurden bereits große Fortschritte bei Zertifizierung und Anwendung neuer Verfahren zur Integritätsüberwachung erzielt. Im Rahmen des aktuellen Forschungsprojekts SiPoS-Rail arbeitet das Institut für Regelungstechnik zur Zeit an einer Verwendung von GNSS auch im Bereich des Schienenverkehrs.

Ziel dieser Arbeit ist es, an die Thematik von GNSS und Receiver Autonomous Integrity Monitoring (RAIM) heranzuführen und letzteres insbesondere im Hinblick auf den sogenannten Range Consensus Algorithm (RANCO) zu erläutern. RANCO ist ein 2007 vorgestellter neuer RAIM-Ansatz zur Erkennung mehrerer, auch gleichzeitig auftretender Satellitenfehler bei dennoch vertretbarem Rechenaufwand.

Die Arbeit bildet einen Beitrag zum CES-Seminar des Wintersemester 2013/14.

GNSS und RAIM

2.1 Übersicht operativer GNSS

Die Idee eines Global Navigation Satellite System (GNSS) ist stets, anhand der Signale mehrerer Satelliten eine Positionsbestimmung am Empfänger vorzunehmen.

In der Literatur wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass bis Ende dieses Jahrzehnts die folgenden vier GNSS betriebsbereit sein werden (vgl. z.B. [6]); zusätzlich werden hier die Betreiber(nation(en)) und das Datum der ersten Betriebsbereitschaft gelistet:

- GPS (Global Positioning System): USA, global seit 1995
- GLONASS (GLObal NAVigation Satellite System): Russland, global seit 2011
- Compass: China, als BeiDou/BDS seit 2012 bereits regional verfügbar
- Galileo: EU, bisher nur Testbetrieb.

2.2 Funktionsweise

Allen diesen Systemen ist gemeinsam, dass ihre 20–30 Satelliten auf verschiedenen Umlaufbahnebenen in einer Höhe von 19–23.000 km (Mittlerer Erdorbit, MEO) die Erde umkreisen. Jeder Satellit sendet dabei fortlaufend seine Position und Uhrzeit.

Ein GNSS-Empfänger kann aus diesen Signalen seine Position bestimmen, indem er die Laufzeit der einzelnen Signale ins Verhältnis mit der jeweiligen Ausgangsposition setzt. Obwohl zur eindeutigen Positionsbestimmung im dreidimensionalen Raum drei Gleichungen (und somit drei Satellitensignale) genügen, ist dieses Verfahren auf Grund der großen Entfernungen

und dennoch geringen Laufzeiten (Erdorbit gegenüber Lichtgeschwindigkeit) zu ungenau. Berücksichtigt man jedoch noch die Uhrzeit, so ergibt sich empfängerseitig eine vierte Unbekannte. Da die Signale ebenfalls Uhrzeiten enthalten, lässt sich daraus auch eine vierte Gleichung aufstellen.

Nach [2] ergibt sich die Gleichung zur Positionsbestimmung dann als

$$y = G \cdot x. \quad (2.1)$$

Für n_{SIV} sichtbare Satelliten (Satellites in View, SIV) bezeichnet $y \in \mathbb{R}^{n_{SIV}}$ dabei die Signallaufzeit (Pseudorange) und $x \in \mathbb{R}^4$ die Empfängerposition (\mathbb{R}^3) und -uhrzeit (\mathbb{R}). $G \in \mathbb{R}^{n_{SIV} \times 4}$ ist die sogenannte Geometriematrix, deren Einträge jeweils die Sichtlinien (Lines of Sight, LOS) vom Empfänger zum jeweiligen Satelliten darstellen. Die LOS sind nach [2, Eq. 3.6e] normierte Zeilenvektoren über die 3D-Koordinaten von Empfänger- und Satellitenposition, also

$$L_k = \frac{(x_k - x_E)}{\|x_k - x_E\|}, \quad k = 1, \dots, n_{SIV}. \quad (2.2)$$

Die Wahl des Koordinatensystems ist egal, solange beide Positionen im gleichen System dargestellt werden. [2, Eq. 3.8b] schreibt die Formel für G explizit als

$$G = \begin{pmatrix} L_1^T & 1 \\ L_2^T & 1 \\ \vdots & \vdots \\ L_{n_{SIV}}^T & 1 \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

Dabei zeigt sich, dass die vierte Spalte von G , also die Uhrenfehler-Komponente, zu Eins angenommen wird. Arbeitet man mit sogenannten Multi-Kostellationen, nutzt zur Positionsbestimmung also die Signale mehrerer verschiedener GNSS, so ist es üblich, dies durch zusätzliche Spalten von G auszudrücken: Die weiteren Spalten werden dann nur mit Einsen und Nullen befüllt, je nachdem, zu welchem System der in dieser Zeile bestimmte Satellit gehört. Gut erkennbar ist dies zum Beispiel in [1, Appendix J: Numerical Exampel].

2.3 Integritätsüberwachung: RAIM

Mit Integrität bezeichnet man im Allgemeinen die Ausfallsicherheit eines Systems. Für GNSS beschreibt der Begriff das Risiko eines kritischen Signalausfalls oder -fehlers, der eine korrekte (bzw. hinreichend genaue) Positionsbestimmung unmöglich macht. Neben der Genauigkeit bildet Integrität eine der wichtigsten Größen beim Einsatz von GNSS in sicherheitskritischen Anwendungen. Insbesondere in automatisierten Betriebsabläufen, etwa der Steuerung eines Autopiloten, müssen die Größen fortwährend überwacht werden; bei Über- oder Unterschreitung spezifizierter Grenzwerte müssen Warnungen erfolgen.

Verschiedenste Faktoren beeinflussen die Positionsbestimmung negativ, beispielsweise Störungen an den Satelliten (Uhrenfehler und Schwankungen der Umlaufbahnen) und am Empfänger (Rauschen und Multipfad-Effekte). Auch Signalablenkungen in der Atmosphäre sind zu beachten. Zur Bereinigung dieser Störungen wurden verschiedenste Lösungsansätze entwickelt, und tatsächlich haben die letzten Jahre große Fortschritte in der Genauigkeit und Zuverlässigkeit von GPS (als lange Zeit einzigem voll funktionsfähigem GNSS) gebracht.

Prinzipiell gibt es die Möglichkeit, die Genauigkeit einer Positionsbestimmung (und damit auch ihre Integrität) durch lokale Hilfsmessungen, beispielsweise Beschleunigung und Höhe, zu verbessern. Im Rahmen des SiPoS-Rail-Projekts am IRT werden dazu z.B. im Bereich des Schienenverkehrs zusätzliche Wegmarker auf den Gleisen verwendet [5]. Gleichzeitig ist man aber bestrebt, die Integrität auch ohne Hilfsmessungen oder zusätzliche Signale zu überwachen. Algorithmen, die dieses Ziel verfolgen, also nur anhand der empfangenen Satellitensignale eine Positionsbestimmung und -gütebewertung durchführen, heißen *Receiver Autonomous Integrity Monitoring* (RAIM).

Ihr Ansatz zur Verbesserung der Positionsbestimmung liegt in der Ausnutzung der Überbestimmtheit des Gleichungssystems (2.1) begründet. Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, stehen zur Bestimmung der Unbekannten $x \in \mathbb{R}^4$ die Gleichungen aus n_{SIV} SIV zur Verfügung. In Kapitel 2.4 wird diese Zahl genauer untersucht werden, aber hier sei vorweggenommen, dass üblicherweise $n_{SIV} > 4$.

Je nach Auslegung unterscheidet man zwei Arten von RAIM-Algorithmen:

- *Fault Detection* (FD) und
- *Fault Detection and Exclusion* (FDE).

FD-Algorithmen sind lediglich darauf ausgelegt, mögliche Positionsfehler zu erkennen, indem sie Unstimmigkeiten zwischen den Lösungen der Satelliten untereinander aufzeigen. Sie benötigen mindestens $n_{SIV} \geq 5$, nämlich vier Satelliten zur Bestimmung einer eindeutigen Lösung von (2.1) und mindestens einen weiteren, mit dessen Messdaten die Position unabhängig davon bestätigt werden kann.

Die zusätzliche *Exclusion* (Ausschluss-) Komponente eines FDE-RAIM ermöglicht es dagegen, einen (oder gar mehrere) der als möglicherweise fehlerhaft identifizierter SIV aktiv von der Positionsbestimmung auszuschließen. Allerdings erfordert FDE dafür mindestens $n_{SIV} \geq 6$, wobei weiterhin vier zur Bestimmung der Lösung und einer zu ihrer Kontrolle verwendet werden; jeder darüber hinaus empfangene SIV ermöglicht dann, falls nötig, den Ausschluss eines weniger guten Signals (und damit Satelliten). Für $n_{SIV} = 5$ fallen FDE-Algorithmen gewöhnlich in ein FD-Verhalten zurück, für $n_{SIV} \leq 4$ liefern sie wie diese eine Warnung.

Bei dem in dieser Arbeit behandelten *Range Consensus Algorithm* (RANCO) handelt es sich um einen FDE-Algorithmus.

2.4 Anzahl sichtbarer Satelliten

[6] simulierte mit Hilfe des *Matlab Algorithm Availability Simulation Tools* MAAST [3] für eine Multi-Konstellation aus GPS und Galileo die Anzahl durchschnittlich sichtbarer Satelliten als $n_{SIV} = 15$. Dabei wurden die jeweiligen Konstellationen über einen Zeitraum von 48 Stunden an 648 Empfängerpositionen beobachtet. Die Empfänger waren dabei gleichmäßig alle 30° (Länge und Breite) innerhalb der beiden Polarkreise (66°N/S) angeordnet, und das Zeitintervall wurde in 20 Einzelmessungen im Abstand von je 2.4 Stunden aufgeteilt.

Im Rahmen der hier vorgelegten Arbeit konnte unter Verwendung einer aktuelleren Version der MAAST (Version ARAIM 0.1, vgl. auch [1]) unter gleichen Bedingungen mit $n_{SIV} = 17$ ein ähnlicher Durchschnittswert ermittelt werden; unter Einbeziehung von GLONASS ergab sich sogar $n_{SIV} = 25$, mit GPS alleine wurden immerhin $n_{SIV} = 8$ erreicht. Die genauen Verteilungen sind auch in Abbildung 2.4 dargestellt und bestätigen, dass die in Kapitel 2.3 für RAIM vorausgesetzte Zahlenwerte von $n_{SIV} > 4$ im Allgemeinen durchaus realistisch sind.

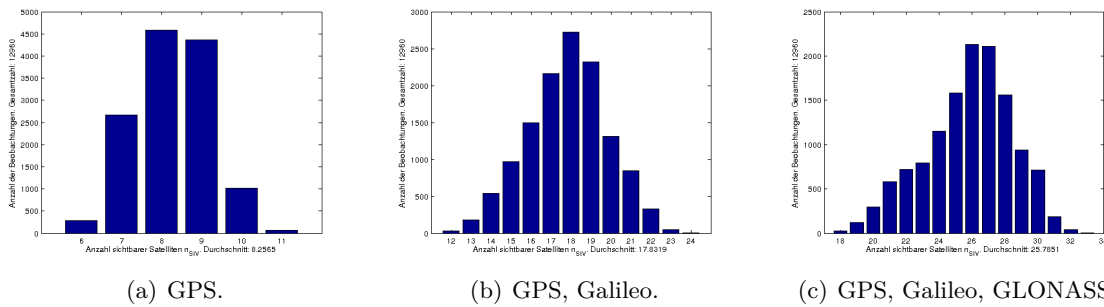


Abbildung 2.1: Anzahl sichtbarer Satelliten innerhalb eines 48h-Zeitraums an 648 verschiedenen Empfangspositionen. Im Durchschnitt ist $n_{SIV} =$ (a) 8, (b) 17 und (c) 25.

RANCO

3.1 Funktionsweise

Beim Range Consensus (RANCO), erstmals vorgestellt in [6], handelt es sich um einen RAIM-Algorithmus auf Basis eines Random Sample Consensus (RANSAC).

Die Grundidee von RANSAC besteht darin, Messdaten nicht durch die Methode kleinster Quadrate (Least Squares, LS) zu glätten, sondern eine Art Referenzlösung aufzustellen und anschließend alle übrigen Messwerte gegen diese zu vergleichen.

Dazu wird zuerst ein sogenanntes *Reference Subset* (RS) gebildet, das genau so viele (beliebig ausgewählte) Messungen enthält, wie zur eindeutigen Lösung des LS-Problems notwendig sind. Die nicht im RS enthaltenen Messungen werden dann gegen diese Lösung verglichen und entweder als *Inlier* oder *Outlier* klassifiziert. Bei einem guten RS kann eine hohe Anzahl an In- gegenüber einer geringen an Outliern erwartet werden. Zur besseren Bewertung der Güte wird die Rechnung mit mehreren anderen RS wiederholt. Das RS mit den meisten resultierenden Inliern wird schließlich als beste Lösung identifiziert. Ein gut nachvollziehbares 2D-Beispiel findet sich in [6, Fig. 1–3].

Überträgt man die RANSAC-Idee auf die GNSS-Positionsbestimmung, so ergibt sich der RANCO-Algorithmus. Gemäß den Erläuterungen aus Kapitel 2.2 entspricht die gesuchte Lösung dem in Gleichung (2.1) beschriebenen Positionsvektor $x \in \mathbb{R}^4$. Für eine exakte Lösung werden also vier Gleichungen benötigt. Es stehen die Pseudorange und Positionsdaten aller vom Empfänger aus sichtbarer Satelliten (Satellites in View, SIV) zur Verfügung. Nach Wahl eines RS werden y und G nur noch aus den Komponenten derjenigen SIV gebildet, die diesem angehören. Die übrigen Satelliten erhalten die Bezeichnung *Satellites under Test* (SUT) und werden im Folgenden wie oben beschrieben entweder der Menge der *Inliers* oder

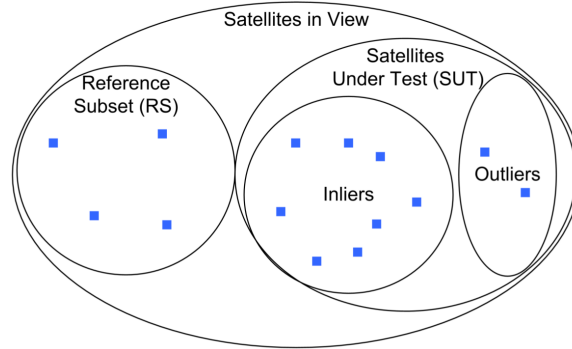


Abbildung 3.1: SIV-Mengendiagramm. [4, Fig. 4].

der der *Outliers* zugeordnet. Abbildung 3.1 veranschaulicht die Beziehungen der eingeführten Mengen untereinander.

Bei der Gesamtbewertung der Lösungsgüte werden die Satelliten des RS übrigens ebenfalls als *Inliers* gewertet. Dies ist insofern gerechtfertigt, dass sie ja zur Bestimmung der Referenzlösung herangezogen wurden, das zu Grunde liegende Gleichungssystem also auch exakt lösen. Von besonderer Wichtigkeit wird dies, wenn später davon die Rede ist, „alle“ SIV als *Inliers* identifiziert zu haben, etwa in [6, Fig. 4, Entscheidungsblock unten links].

3.2 Auswahl der Referenzsets

Im Zuge von RANCO muss für verschiedene Reference Subsets (RS) der Größe $s_{RS} = 4$ eine Positionsbestimmung nach Gleichung (2.1) durchgeführt werden. Die RS sind ihrerseits aus den n_{SIV} SIV zu bilden. Durch die einfache Kombinatorik des Binominalkoeffizienten ergibt sich $rs \in \mathbb{N}$, die Anzahl möglicher RS, zu

$$rs = \binom{n_{SIV}}{s_{RS}}. \quad (3.1)$$

Mit den in 2.4 vorgestellten Daten ergeben sich daraus je nach betrachteter Multi-Konstellation im Mittel z.B. $rs_{GPS} = \binom{8}{4} = 70$, $rs_{GPS, Galileo} = \binom{17}{4} = 2.380$ oder gar $rs_{GPS, Galileo, GLONASS} = \binom{25}{4} = 12.650$. Es ist offensichtlich, dass angesichts dieser Zahlen eine rigorose Vor-Auswahl der betrachteten RS getroffen werden muss, um eine Echtzeit-fähige Lösung zumindest in den Bereich des Möglichen zu rücken.

[6] erklärt, dass die benutzten RS umso aussagekräftiger sind, je weiter die enthaltenen Satelliten auseinander stehen. Diese sogenannte Orthogonalität der Geometrie lässt sich gut aus der Konditionszahl $\kappa(G)$ ablesen. Dies ist insbesondere praktisch, da κ direkt aus dem Ergebnis der Singulärwertzerlegung (Singular Value Decomposition, SVD) berechnet werden kann, die für die spätere Berechnung der Inversen G^{-1} sowieso durchgeführt werden muss.

Für den ursprünglichen RANCO werden die RS lediglich nach ihren Konditionszahlen geordnet und im Folgenden auch in dieser Reihenfolge auf ihre Güte hin geprüft. Dies erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass weniger fehleranfällige RS bevorzugt behandelt werden. Im komplett fehlerfreien Fall können so schon nach wenigen Tests alle Satelliten als Inliers identifiziert und der Algorithmus vorzeitig erfolgreich abgebrochen werden.

Verbesserungen und Varianten

Zusätzlich stellen die Autoren eine zweite, verbesserte Auswahlmethode der RS zur Diskussion. Bei dieser wird die zweidimensionale Korrelationsmatrix der Sichtvektoren zwischen Empfänger und Satelliten berechnet. RS mit hohen Korrelationseinträgen werden dann ebenfalls ausgeschlossen, da hier zwei beteiligte Satelliten offenbar in der gleichen relativen Richtung stehen und demnach wiederum eine unvorteilhafte Geometrie ergeben.

In [7] wurde der RS-Auswahl noch ein weiterer Schritt hinzugefügt: Nach rigorosem Ausschluss schlecht konditionierter RS werden dort in einem nachgeschalteten Auswahl-Schritt wieder einzelne RS hinzugefügt, wenn diese einen Fehlerfall testen, der mit den wenigen nach der ursprünglichen Auswahl noch verbliebenen RS nicht abgedeckt werden kann. Die Details sind gut in [7, Fig. 7] zu erkennen.

Ebenfalls in [7] wurde schließlich noch das Auswahlkriterium von Konditionszahl und Korrelationsmatrix zu Gunsten einer *Weighted Dilution of Precision* $WDOP = \sqrt{(G^T W G)^{-1}}$ verändert. W ist dabei die Inverse der Kovarianz-Matrix, die für den Ansatz allerdings auch erst berechnet werden muss.

Die Auswirkungen dieser beiden Verbesserungen werden außerdem in [4, Sec. 7: Impact of RANCO Enhancements] näher erläutert.

3.3 Bewertung der Referenzsets

Nach Auswahl der vielversprechendsten RS erfolgt die rechnerische Bewertung ihrer Güte. Dazu wird die exakte Gleichung zur Positionsbestimmung (2.1) herangezogen und gemäß [6, Eq. 1] um einen *noise vector* n erweitert:

$$y = Gx + n \tag{3.2}$$

Wichtig ist, dass hier aber nur die Geometrie des RS betrachtet wird, also $G = G_{RS} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$. Ebenso bezeichnet $x = \hat{x}$ die mit diesem RS geschätzte Position und zuletzt $y_{RS}, n_{RS} \in \mathbb{R}^4$ die entsprechenden Pseudorange und Rauschen der am RS beteiligten Satelliten; wie in [6] sei hier auf die weiteren $_{RS}$ -Indizes verzichtet. Durch Auflösen nach der gesuchten Position ergibt sich

$$\hat{x} = G^{-1}(y - n). \tag{3.3}$$

Ebenfalls gilt (2.1) für jeden einzelnen SUT, geschrieben

$$\tilde{y} = g^T x + \tilde{n}, \quad (3.4)$$

solange man nämlich für $g^T \in \mathbb{R}^4$ die dem k ten SUT entsprechende k te Zeile von G einsetzt; $\tilde{y} = y_k$ und $\tilde{n} = n_k$ sind dann Skalare.

Das Verhältnis von „Lösung“ (aus dem RS) und Messung (für den jeweiligen SUT) ergibt sich durch Einsetzen zu

$$\begin{aligned} \tilde{y} &= g^T \hat{x} + \tilde{n} \\ &= g^T \left(G^{-1} (y - n) \right) + \tilde{n} \\ &= g^T G^{-1} y - g^T G^{-1} n + \tilde{n} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Von dieser Form aus gibt es je nach Zielsetzung zwei Möglichkeiten:

Interessieren die konkreten Abweichungen in der Positionsbestimmung oder die analytische Betrachtung, so wandert das Rauschen in den untersuchten *measured pseudorange residual error* ξ und es ergibt sich [4, Eq. 2]:

$$\xi = g^T G_{RS}^{-1} \Delta y. \quad (3.6)$$

Beschränkt sich das Rechenmodell dagegen auf eine reine Simulation des Algorithmus, so genügen die Fehlerkomponenten, und man erhält [6, Eq. 6]:

$$g^T G^{-1} n - \tilde{n} \quad (= \epsilon) \stackrel{!}{=} 0. \quad (3.7)$$

Die so berechneten Abweichungen können nun gegen einen Schwellenwert verglichen werden, um die Einteilung in In- und Outliers vorzunehmen. Im Anschluss werden die Schritte mit dem nächsten RS wiederholt, bis alle vorgesehenen RS untersucht sind. Unter Umständen kann der Test abgekürzt werden, wenn bei einer Prüfung alle SUT als Inliers identifiziert wurden – hier ist jedoch darauf zu achten, dass sichergestellt bleibt, dass genug RS betrachtet werden, um jeden Satelliten mindestens einmal nicht als Teil des RS, sondern in der Menge der SUT behandelt zu haben.

Variante: S-RANCO

S-RANCO ist eine in [6, Sec. 2.3] eingeführte RANCO-Variante. Sie kann ebenfalls einfach fehlerhaftete Satelliten finden, ist aber zusätzlich in der Lage, auch Satelliten mit sehr geringen (und eigentlich nicht identifizierbaren) Messabweichungen als möglicherweise fehlerhaft zu erkennen. Diese Information kann unter Umständen von nachgeschalteten Algorithmen weiterverwertet werden.

S-RANCO zählt, wie oft jeder Satellit als Outlier klassifiziert wurde. Da die Satelliten eines RS aber natürlich keine Outlier werden können, muss hierbei von der in Kapitel 3.1

beschriebenen Praxis abgewichen werden: S-RANCO betrachtet die im RS enthaltenen Satelliten ebenfalls als Outlier. So ist sichergestellt, dass Satelliten, die oft in RS enthalten sind und deshalb selten direkt als Outlier gefunden werden, trotzdem nicht automatisch als die zuverlässigsten Satelliten betrachtet werden. Je näher die abschließende Zählung an der Zahl der insgesamt durchgeführten Tests liegt, umso größer die Wahrscheinlichkeit, dass der jeweilige Satellit doch einer gewissen Fehlerhaftigkeit unterliegt.

3.4 Abschließende Positionsschätzung

Nach Abschluss aller Auswertungen wird das RS bestimmt, das die meisten Inliers identifiziert. Zur abschließenden Positionsschätzung wird nun allerdings doch eine (*Weighted Least Squares Solution*) herangezogen. Dies hat den Vorteil, dass zwar einerseits alle grob fehlerbehafteten Satelliten (die ja als Outliers identifiziert wurden) wie gewünscht *nicht* in die Lösung einfließen, andererseits aber sehr wohl über die (natürlich ebenfalls vorhandenen, aber eben wesentlich geringeren) Messfehler der Inliers gemittelt wird. Die abschließende Positionsschätzung beinhaltet also die Messfehler aller als „normal“ eingestuften SIV und eben nicht nur die vier des RS.

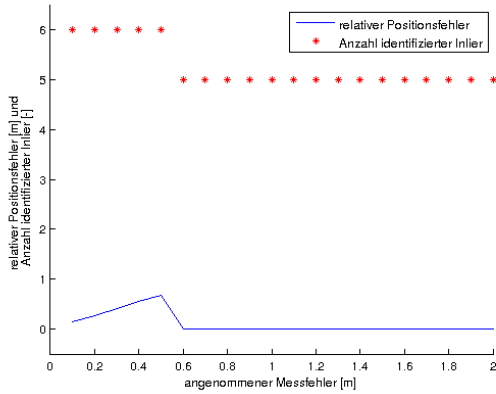
[4, Sec. 6: Final Outlier Identification Probability] legt dar, dass dies kein zusätzliches Fehlerrisiken einführt, und erläutert den Einfluss auf *Missed Detection Rate* und *False Alert Probability*.

3.5 Implementierung und Tests

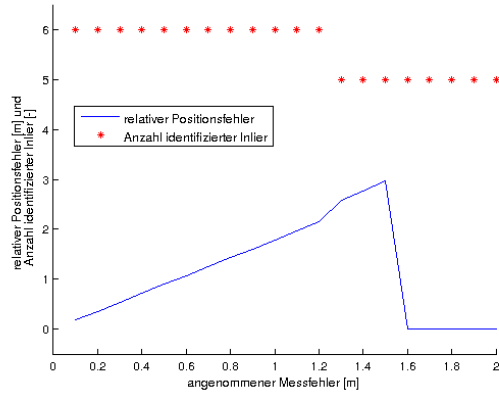
Für den Einsatz in einem am IRT bestehenden Simulink-Gesamtcode wurde im Rahmen dieser Arbeit ein RANCO nach klassischer RS-Auswahl und Fehlergleichung (3.6) umgesetzt. RS-Auswahl und Lösung der Gleichung wurden in jeweils eigenen Unterfunktionen angelegt. Die Thresholds wurden anfänglich auf empirisch sinnvolle Konstanten gesetzt.

Mit Beispiel-Geometrien sowohl aus erfolgreichen Teilmessungen als auch aus hilfsweise durchgeführten Simulationen (MAAST; vgl. Kapitel 2.4) konnte unter Annahme realistischer Pseudorange testweise gezeigt werden, dass einzelne, künstlich mit Messfehlern versehene Satelliten die Qualität der Positionslösung zuerst negativ beeinflussen und dann korrekt als Outliers identifiziert werden; nach ihrem Ausschluss von der Lösung ergibt sich diese wieder korrekt. Abbildung 3.5 zeigt entsprechende Verläufe von Lösungsgüte (bzw. Positionsfehler) und Anzahl der Inlier.

Eine Umsetzung im Gesamtmodell erwies sich im Rahmen dieser Arbeit jedoch als schwierig, da die erforderlichen Geometrien mit den bereits in Vorgängerarbeiten implementierten Funktionen noch nicht fehlerfrei bestimmt werden konnten. Dadurch ergeben sich qualitativ unbrauchbare Positionsschätzungen, von denen auch andere Teile des Gesamtmodells betroffen sind. Eine Fehleranalyse und Codekorrektur wird im Rahmen anschließender Arbeiten angegangen werden müssen.



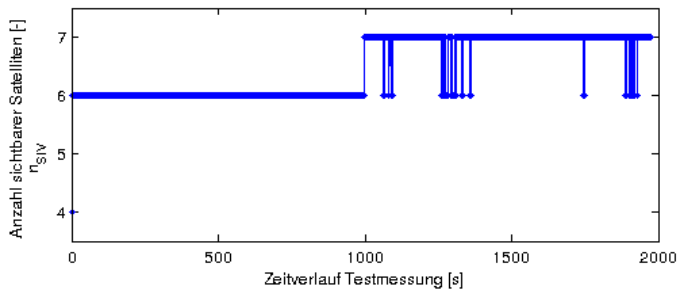
(a) Satellit 2.



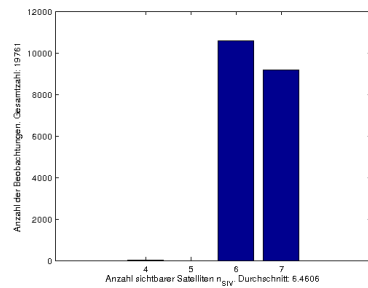
(b) Satellit 5.

Abbildung 3.2: Relative Positionsfehler bei zunehmendem Messfehler einzelner Pseudorange. Der Fehler nimmt zu, bis der fehlerhafte Satellit erkannt und ausgeschlossen wurde. Anschließend wird wieder die korrekte Position errechnet. (b) zeigt einen besonders problematischen Fall, bei dem zuerst ein fehlerfreier Satellit ausgeschlossen wird, bevor der korrekte Fehler erkannt wird.

Für die durchgeführte 35-minütige Testmessung konnte die Anzahl sichtbarer Satelliten untersucht und in Abbildung 3.5 dargestellt werden. Da im Test ein reiner GPS-Empfänger zum Einsatz kam, überrascht das Ergebnis von vier bis sieben SIV nicht; vgl. auch die simulativen Erwartungen aus Abbildung 2.4. Gemäß den Erläuterungen aus Kapitel 2.3 sollte dies in den meisten Fällen FDE-RAIM ermöglichen.



(a) Zeitlicher Verlauf.



(b) Verteilung.

Abbildung 3.3: Anzahl sichtbarer Satelliten (a) im Verlauf der 35-minütigen Testmessung und (b) in statistischer Auswertung (Durchschnitt $n_{SIV} \approx 6.5$; vgl. Abb. 2.4).

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Seminararbeit wurden zunächst die grundsätzlichen Konzepte von Globalen Satellitennavigationssystemen (GNSS) und Receiver Autonomous Integrity Monitoring (RAIM) kennengelernt und vorgestellt.

Anschließend wurde der Range Consensus Algorithm (RANCO) ausführlich nachvollzogen, untersucht und implementiert sowie erfolgreich getestet. Außerdem wurde er in ein größeres, bereits vorhandenes Simulink-Gesamtmodell eingefügt.

Literaturverzeichnis

- [1] BLANCH, Juan ; WALTER, Todd ; ENGE, Per ; LEE, Young ; PERVAN, Boris ; RIPPL, Markus ; SPLETTER, Alexandru: Advanced RAIM User Algorithm Description: Integrity Support Message Processing, Fault Detection, Exclusion, and Protection Level Calculation. In: *ION GNSS Conference*. Nashville, TN, 2012
- [2] GLEASON, Scott ; GEBRE-EGIABHER, Demoz: *GNSS: Applications and Methods*. Artech House, 2009
- [3] MAAST: *Matlab Algorithm Availability Simulation Tool*. Stanford, 2007ff. <http://waas.stanford.edu/staff/maast/maast.html>
- [4] RIPPL, Markus ; SCHROTH, Georg ; BELABBAS, Boubeker ; MEURER, Michael: A probabilistic assessment on the Range Consensus (RANCO) RAIM Algorithm. In: *International Technical Meeting of The Institute of Navigation*. Anaheim, CA, 2009
- [5] RÜTTGERS, René ; BREUER, Michael ; LÜDICKE, Daniel: SiPoS-Rail. Differentielles GNSS-Verfahren mit ortsfesten Elementen. In: *GMA Fachausschuss 7.61*. Braunschweig, 2013
- [6] SCHROTH, Georg ; ENE, Alexandru ; BLANCH, Juan ; WALTER, Todd ; ENGE, Per: Failure Detection and Exclusion via Range Consensus. In: *European Navigation Conference GNSS*. Toulouse, France, 2008
- [7] SCHROTH, Georg ; RIPPL, Markus ; ENE, Alexandru ; BLANCH, Juan ; BELABBAS, Boubeker ; WALTER, Todd ; ENGE, Per ; MEURER, Michael: Enhancements of the Range Consensus RAIM Algorithm (RANCO). In: *ION GNSS Conference*. Savannah, GA, 2008