

ĐẠI HỌC BÁCH KHOA HÀ NỘI  
TRƯỜNG ĐIỆN – ĐIỆN TỬ



## ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP

### Nghiên cứu phát triển một số giải pháp tăng độ chính xác cho hệ thống định vị toàn cầu

Ngành Kỹ thuật Điện tử - Viễn thông  
Chuyên ngành Kỹ thuật máy tính

**LÊ THÀNH LUÂN**

[luan.lt203494@sis.hust.edu.vn](mailto:luan.lt203494@sis.hust.edu.vn)

**PHẠM HỒNG THI**

[thi.ph20376@sis.hust.edu.vn](mailto:thi.ph20376@sis.hust.edu.vn)

**HÀ VĂN ĐỨC**

[duc.hv203677@sis.hust.edu.vn](mailto:duc.hv203677@sis.hust.edu.vn)

**Giảng viên hướng dẫn:** PGS.TS Nguyễn Đức Minh  
TS. Hoàng Phương Chi

  
Chữ ký của GVHD

**KHOA:** Khoa Điện tử  
Khoa Kỹ thuật truyền thông

**HÀ NỘI, 07/2024**



## ĐÁNH GIÁ QUYỀN ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP (DÀNH CHO CÁN BỘ HƯỚNG DẪN)

Tên đồ án: Nghiên cứu phát triển một số giải pháp tăng độ chính xác cho hệ thống định vị toàn cầu

Họ tên SV: Lê Thành Luân

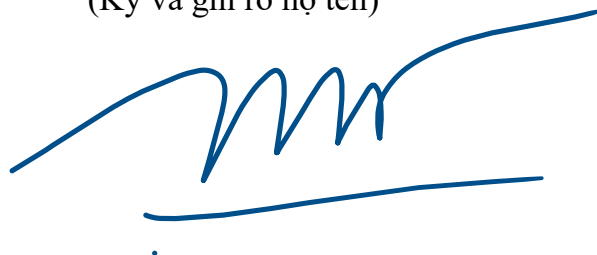
MSSV: 20203494

Cán bộ hướng dẫn: TS. Hoàng Phương Chi

STT	Tiêu chí (Điểm tối đa)	Hướng dẫn đánh giá tiêu chí	Điểm tiêu chí
1	Thái độ làm việc (2,5 điểm)	Nghiêm túc, tích cực và chủ động trong quá trình làm ĐATN Hoàn thành đầy đủ và đúng tiến độ các nội dung được GVHD giao	2.5
2	Kỹ năng viết quyền ĐATN (2 điểm)	Trình bày đúng mẫu quy định, bố cục các chương logic và hợp lý: Bảng biểu, hình ảnh rõ ràng, có tiêu đề, được đánh số thứ tự và được giải thích hay đề cập đến trong đồ án, có căn lề, dấu cách sau dấu chấm, dấu phẩy, có mở đầu chương và kết luận chương, có liệt kê tài liệu tham khảo và có trích dẫn, v.v. Kỹ năng diễn đạt, phân tích, giải thích, lập luận: Cấu trúc câu rõ ràng, văn phong khoa học, lập luận logic và có cơ sở, thuật ngữ chuyên ngành phù hợp, v.v.	2
3	Nội dung và kết quả đạt được (5 điểm)	Nêu rõ tính cấp thiết, ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài, các vấn đề và các giả thuyết, phạm vi ứng dụng của đề tài. Thực hiện đầy đủ quy trình nghiên cứu: Đặt vấn đề, mục tiêu đề ra, phương pháp nghiên cứu/ giải quyết vấn đề, kết quả đạt được, đánh giá và kết luận. Nội dung và kết quả được trình bày một cách logic và hợp lý, được phân tích và đánh giá thỏa đáng. Biện luận phân tích kết quả mô phỏng/ phần mềm/ thực nghiệm, so sánh kết quả đạt được với kết quả trước đó có liên quan. Chỉ rõ phù hợp giữa kết quả đạt được và mục tiêu ban đầu đề ra đồng thời cung cấp lập luận để đề xuất hướng giải quyết có thể thực hiện trong tương lai. Hàm lượng khoa học/ độ phức tạp cao, có tính mới/tính sáng tạo trong nội dung và kết quả đồ án.	4.5
4	Điểm thành tích (1 điểm)	Có bài báo KH được đăng hoặc chấp nhận đăng/ đạt giải SV NCKH giải 3 cấp Trường trở lên/ Các giải thưởng khoa học trong nước, quốc tế từ giải 3 trở lên/ Có đăng ký bằng phát minh sáng chế. (1 điểm) Được báo cáo tại hội đồng cấp Trường trong hội nghị SV NCKH nhưng không đạt giải từ giải 3 trở lên/ Đạt giải khuyến khích trong cuộc thi khoa học trong nước, quốc tế/ Kết quả đồ án là sản phẩm ứng dụng có tính hoàn thiện cao, yêu cầu khối lượng thực hiện lớn. (0,5 điểm)	0.5
Điểm tổng các tiêu chí:			9.5
Điểm hướng dẫn:			9.5

Cán bộ hướng dẫn

(Ký và ghi rõ họ tên)

A handwritten signature in blue ink, consisting of a series of loops and a long horizontal stroke at the end.

## ĐÁNH GIÁ QUYỀN ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP (DÀNH CHO CÁN BỘ PHẢN BIỆN)

Tên đồ án: Nghiên cứu phát triển một số giải pháp tăng độ chính xác cho hệ thống định vị toàn cầu

Họ tên SV: Lê Thành Luân

MSSV: 20203494

Cán bộ phản biện:

STT	Tiêu chí (Điểm tối đa)	Hướng dẫn đánh giá tiêu chí	Điểm tiêu chí
1	<b>Trình bày quyền ĐATN (4 điểm)</b>	<p>Đồ án trình bày đúng mẫu quy định, bố cục các chương logic và hợp lý: Bảng biểu, hình ảnh rõ ràng, có tiêu đề, được đánh số thứ tự và được giải thích hay đề cập đến trong đồ án, có căn lề, dấu cách sau dấu chấm, dấu phẩy, có mở đầu chương và kết luận chương, có liệt kê tài liệu tham khảo và có trích dẫn, v.v.</p> <p>Kỹ năng diễn đạt, phân tích, giải thích, lập luận: cấu trúc câu rõ ràng, văn phong khoa học, lập luận logic và có cơ sở, thuật ngữ chuyên ngành phù hợp, v.v.</p>	
2	<b>Nội dung và kết quả đạt được (5,5 điểm)</b>	<p>Nêu rõ tính cấp thiết, ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài, các vấn đề và các giả thuyết, phạm vi ứng dụng của đề tài. Thực hiện đầy đủ quy trình nghiên cứu: Đặt vấn đề, mục tiêu đề ra, phương pháp nghiên cứu/ giải quyết vấn đề, kết quả đạt được, đánh giá và kết luận.</p> <p>Nội dung và kết quả được trình bày một cách logic và hợp lý, được phân tích và đánh giá thỏa đáng. Biện luận phân tích kết quả mô phỏng/ phần mềm/ thực nghiệm, so sánh kết quả đạt được với kết quả trước đó có liên quan.</p> <p>Chỉ rõ phù hợp giữa kết quả đạt được và mục tiêu ban đầu đề ra đồng thời cung cấp lập luận để đề xuất hướng giải quyết có thể thực hiện trong tương lai. Hàm lượng khoa học/ độ phức tạp cao, có tính mới/ tính sáng tạo trong nội dung và kết quả đồ án.</p>	
3	<b>Điểm thành tích (1 điểm)</b>	<p>Có bài báo KH được đăng hoặc chấp nhận đăng/ đạt giải SV NCKH giải 3 cấp Trường trở lên/ Các giải thưởng khoa học trong nước, quốc tế từ giải 3 trở lên/ Có đăng ký bằng phát minh sáng chế. <b>(1 điểm)</b></p> <p>Được báo cáo tại hội đồng cấp Trường trong hội nghị SV NCKH nhưng không đạt giải từ giải 3 trở lên/ Đạt giải khuyến khích trong cuộc thi khoa học trong nước, quốc tế/ Kết quả đồ án là sản phẩm ứng dụng có tính hoàn thiện cao, yêu cầu khối lượng thực hiện lớn. <b>(0,5 điểm)</b></p>	
<b>Điểm tổng các tiêu chí:</b>			
<b>Điểm phản biện:</b>			

**Cán bộ phản biện**  
(Ký và ghi rõ họ tên)



### **Lời cảm ơn**

Nhóm chúng em gồm 5 thành viên Trần Minh Đức, Hà Văn Đức, Lê Thành Luân, Phạm Thị Xuân Mai, Phạm Hồng Thi xin chân thành cảm ơn PGS. TS. Nguyễn Đức Minh và TS. Hoàng Phương Chi đã trực tiếp hướng dẫn và cung cấp các kiến thức cũng như tài liệu để thực hiện đề tài. Chúng em cũng xin gửi lời cảm ơn tới toàn thể thành viên phòng nghiên cứu vi mạch và hệ thống nhúng EDABK đã tạo điều kiện và tận tình hỗ trợ nhóm để hoàn thành đề tài này.

## LỜI CAM ĐOAN

Nhóm nghiên cứu gồm 3 thành viên: Trần Minh Đức (K65), Hà Văn Đức (K65), Lê Thành Luân (K65), Phạm Thị Xuân Mai (K65), Phạm Hồng Thi (K65) đều là sinh viên trường Điện - Điện Tử. Người hướng dẫn là TS. Hoàng Phương Chi và PGS.TS Nguyễn Đức Minh - Phó hiệu trưởng trường Điện - Điện Tử, Đại học Bách Khoa Hà Nội. Chúng tôi xin cam đoan toàn bộ nội dung được trình bày trong đề án “*Nghiên cứu phát triển một số giải pháp tăng độ chính xác cho hệ thống định vị toàn cầu*” là kết quả quá trình tìm hiểu và nghiên cứu của nhóm. Các dữ liệu được nêu trong đề án là hoàn toàn trung thực, phản ánh đúng kết quả nghiên cứu và mô phỏng. Mọi thông tin trích dẫn đều tuân thủ các quy định về sở hữu trí tuệ; các tài liệu tham khảo được liệt kê rõ ràng. Nhóm xin chịu trách nhiệm với những nội dung được viết trong đề án này.

Hà Nội, ngày 08 tháng 07 năm 2024

**Người cam đoan**

Luân  
Lê Thành Luân



## **Tóm tắt nội dung đồ án**

Đồ án trình bày nghiên cứu về một số giải pháp tăng cường độ chính xác của hệ thống định vị toàn cầu GPS, dựa trên đầu vào là các dữ liệu GNSS thô thu được từ điện thoại thông minh. Nhóm tập trung vào xây dựng hai hệ thống để giải quyết vấn đề đặt ra. Hệ thống thứ nhất là xử lý dữ liệu GNSS dựa trên phương pháp Weighted Least Square và Kalman Filter, hệ thống thứ hai là sử dụng công cụ RTKLib để tính toán ra tọa độ chính xác.

Để kiểm chứng hiệu suất của những nghiên cứu có trong đề tài, nhóm lựa chọn thực nghiệm dựa trên hai tập dữ liệu, tập thứ nhất được Google cung cấp trong cuộc thi “Google Smartphone Decimeter Challenge”, tập thứ hai được thu bằng ứng dụng điện thoại do nhóm tự xây dựng. Hệ thống cho thấy kết quả khá tốt khi kiểm chứng trên các tập dữ liệu GNSS được cung cấp sẵn bởi Google, cho thấy tiềm năng ứng dụng. Tuy nhiên việc triển khai đề tài trong thực tế vẫn chưa ổn định, để lại nhiều định hướng phát triển trong tương lai.

Nội dung đồ án được chia thành bốn chương chính như sau:

- Chương 1: Tổng quan đề tài
- Chương 2: Cơ sở lý thuyết
- Chương 3: Thiết kế giải pháp và triển khai hệ thống
- Chương 4: Kết quả thực nghiệm

## ABSTRACT

The project presents research on several solutions to enhance the accuracy of the Global Positioning System (GPS), based on raw GNSS data obtained from smartphones. We focus on developing two systems to address the problem. The first system processes GNSS data based on the Weighted Least Square method and Kalman Filter, while the second system uses the RTKLib tool to calculate precise coordinates.

To verify the performance of the research presented in the project, my team conducted experiments based on two datasets. The first dataset was provided by Google during the "Google Smartphone Decimeter Challenge," and the second dataset was collected using a smartphone application developed by the team. The system showed quite promising results when tested on the GNSS datasets provided by Google, demonstrating potential for application. However, the implementation of the project in practice is still unstable, leaving many development directions for the future.

The content of the project include four main chapters as follows:

- Chapter 1: Overview
- Chapter 2: Theoretical Basis
- Chapter 3: System design and implementation
- Chapter 4: Experimental results

Sinh viên thực hiện

Ký và ghi rõ họ tên

Luân

Lê Thành Luân

## MỤC LỤC

<b>DANH MỤC CHỮ VIẾT TẮT .....</b>	<b>14</b>
<b>DANH MỤC HÌNH VẼ .....</b>	<b>15</b>
<b>DANH MỤC BẢNG BIỂU .....</b>	<b>17</b>
<b>CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN ĐỀ TÀI .....</b>	<b>19</b>
1.1 Lý do lựa chọn đề tài .....	19
1.2 Các giải pháp đã có hiện nay .....	20
1.3 Mục tiêu đề tài .....	20
1.4 Kết luận chương 1 .....	21
<b>CHƯƠNG 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT.....</b>	<b>22</b>
2.1 Tổng quan về hệ thống định vị GNSS.....	22
2.1.1 Kiến trúc GNSS .....	22
2.1.2 Tín hiệu GNSS .....	23
2.1.3 Hệ thống định vị toàn cầu GPS .....	23
2.1.4 Hệ thống GPS trong điện thoại.....	26
2.1.5 Hệ tọa độ cố định tâm trái đất ECEF.....	26
2.1.6 Cơ chế tính toán vị trí tọa độ GPS.....	28
2.1.7 Các sai số trong quá trình tính toán .....	29
2.2 Các tham số dữ liệu thô của tín hiệu GNSS .....	31
2.3 Công cụ xây dựng ứng dụng trích xuất dữ liệu GNSS.....	35
2.3.1 Phần mềm Android Studio .....	35
2.3.2 Lớp GNSSClock và lớp GNSSMeasurement.....	35
2.4 Các tham số của vệ tinh.....	36
2.4.1 Các tham số trong quá trình tính toán .....	36
2.4.2 Bản tin điều hướng của NASA .....	37
2.4.3 Các thông số Kepler .....	37
2.4.4 Các thông số vệ tinh .....	38
2.4.5 Ảnh hưởng của khí quyển Trái Đất đối với việc tính toán vị trí của người dùng.....	39
2.5 Phương pháp Bình phương tối thiểu trọng số (Weighted Least Square) .	40
2.5.1 Ma trận hiệp phương sai .....	40
2.5.2 Phân phối chuẩn .....	41
2.5.3 Đơn giản hóa mô hình .....	41
2.5.4 Thuật toán Gauss-Newton .....	43

2.5.5	Định vị vị trí bằng khoảng giả .....	45
2.5.6	Phát hiện điểm ngoại lai .....	54
2.5.7	Phép nội suy khôi phục điểm ngoại lai.....	55
2.6	Bộ lọc Kalman.....	57
2.6.1	Bước dự đoán ( Prediction step) .....	57
2.6.2	Bước cập nhật (Update step) .....	58
2.6.3	Tóm tắt.....	60
2.6.4	Khoảng cách Mahalanobis.....	61
2.7	Định vị động học thời gian thực (Real Time Kinematic).....	61
2.8	Kết luận chương 2 .....	63
<b>CHƯƠNG 3. THIẾT KẾ VÀ TRIỂN KHAI HỆ THỐNG .....</b>		<b>64</b>
3.1	Tổng quan hệ thống .....	64
3.1.1	Kiến trúc hệ thống .....	64
3.2	Sơ đồ luồng dữ liệu .....	65
3.3	Thiết kế hệ thống .....	67
3.3.1	Thiết kế khối thu thập dữ liệu GNSS .....	67
3.3.2	Thiết kế khối tính khoảng giả .....	67
3.3.3	Thiết kế khối lấy dữ liệu từ vệ tinh .....	67
3.3.4	Thiết kế khối WLS .....	67
3.3.5	Thiết kế khối KF.....	71
3.3.6	Thiết kế khối RTK.....	73
3.4	Triển khai hệ thống.....	76
3.4.1	Xây dựng phương pháp tính tọa độ vị trí .....	77
3.4.2	Xây dựng bộ lọc KF .....	82
3.4.3	Xây dựng RTK .....	84
3.5	Kết luận chương 3 .....	85
<b>CHƯƠNG 4. TRIỂN KHAI THỰC NGHIỆM .....</b>		<b>87</b>
4.1	Mô tả thực nghiệm.....	87
4.2	Triển khai thực nghiệm trên toàn bộ hệ thống .....	88
4.2.1	Phương pháp đánh giá thực nghiệm .....	88
4.2.2	Kết quả thực nghiệm.....	90
4.3	Kết luận chương 4 .....	93
<b>KẾT LUẬN .....</b>		<b>94</b>
Kết luận chung.....		94
Phương hướng phát triển trong tương lai .....		94

<b>TÀI LIỆU THAM KHẢO .....</b>	<b>94</b>
<b>PHỤ LỤC .....</b>	<b>97</b>

### DANH MỤC CHỮ VIẾT TẮT

GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
WLS	Weighted Least Square
KF	Kalman Filter
RTK	Real Time Kinematic
IMU	Inertial Measurement Unit
PPP	Precise Point Positioning
RMS	Root Mean Square
MCS	Master Control Station
MS	Monitor Station
GA	Ground Antenna
AMCS	Alternate Master Control Station
MS (NGA)	Monitor Station from National Geospatial- Intelligence Agency
MS (USAF)	Monitor Station from United States Air Force
CDMA	Code Division Multiple Access
BPSK	Binary Phase Shift Keying
<b>ECEF</b>	<b>Earth-centered Earth-fixed</b>
LLA	Latitude Longitude Altitude
SV	Space Vehicles
ENU	East North Up
CORS	Continuously Operating Reference Station
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
NTRIP	Network Transport of RTCM via Internet Protocol
RTCM	Real Time Correction Message
NASA	National Aeronautics and Space Administration
DGNSS	Differential Global Navigation Satellite System

## DANH MỤC HÌNH VẼ

Hình 2.1 Kiến trúc GNSS .....	22
Hình 2.2 Quỹ đạo hoạt động của chòm 27 vệ tinh GPS.....	24
Hình 2.3 Các trạm mặt đất của hệ thống GPS hiện có .....	25
Hình 2.4 Hệ tọa độ ECEF .....	27
Hình 2.5 Giao điểm của ba vệ tinh.....	29
Hình 2.6 Các yếu tố khoảng cách trong quá trình truyền tín hiệu.....	30
Hình 2.7 Vị trí của các vệ tinh ảnh hưởng tới phép tính Trilateration .....	30
Hình 2.8 Khí quyển ảnh hưởng tới các tín hiệu vệ tinh.....	31
Hình 2.9 Tín hiệu xảy ra hiện tượng đa đường .....	31
Hình 2.10 Phần mềm Android Studio.....	35
Hình 2.11 Sơ đồ khối của hệ thống tính toán vị trí và vận tốc của vệ tinh .....	37
Hình 2.12 Góc ngẩng và góc phương vị.....	39
Hình 2.13 Các thành phần của khí quyển trái đất .....	39
Hình 2.14 Biểu đồ hàm mật độ phân phối chuẩn.....	41
Hình 2.15 Sơ đồ minh họa cách quan sát “giả khoảng cách” thông qua các tín hiệu đồng hồ của vệ tinh và máy thu.....	42
Hình 2.16 Sự thay đổi của giá trị hàm mục tiêu (tổng bình phương sai số) qua từng lần lặp của thuật toán Gauss-Newton .....	44
Hình 2.17 Biểu đồ minh họa sự khác biệt giữa tổn thất L2 (L2 loss) và tổn thất Huber (Huber loss) với sự thay đổi trọng số $W$ tương ứng .....	52
Hình 2.18 Biểu diễn các trục quay cơ bản trong không gian 3 chiều.....	53
Hình 2.19 Mô tả hệ tọa độ Đông-Bắc-Lên (East-North-Up, viết tắt là ENU), thường được sử dụng trong các ứng dụng định vị và địa lý.....	54
Hình 2.20 Biểu đồ so sánh cách các phương pháp nội suy khác nhau từ một tập hợp các điểm dữ liệu. ....	56
Hình 2.21 Mô tả dự đoán và cập nhật điển hình của bộ lọc Kalman .....	57
Hình 2.22 Sơ đồ hoàn chỉnh về hoạt động của Bộ lọc Kalman.....	61
Hình 2.23 Hệ thống RTK cơ bản.....	62
Hình 3.1 Sơ đồ khối hệ thống tính toán tọa độ thứ nhất .....	64
Hình 3.2 Sơ đồ khối hệ thống tính toán tọa độ thứ hai .....	65
Hình 3.3 Sơ đồ luồng dữ liệu của hệ thống thứ nhất.....	66
Hình 3.4 Sơ đồ tổng quan khối chức năng bình phương tối thiểu có trọng số (WLS) .....	67
Hình 3.5 Các khối chính trong module WLS.....	69
Hình 3.6 Sơ đồ tổng quan khối chức năng phát hiện điểm ngoại lai.....	70
Hình 3.7 Các khối chính trong module Outlier Detection .....	70
Hình 3.8 Sơ đồ khối tổng quan Kalman Filter .....	71
Hình 3.9 Các khối chính trong Kalman Filter .....	72

<i>Hình 3.10 Sơ đồ luồng dữ liệu ước tính tọa độ của Kalman Filter.....</i>	<i>73</i>
<i>Hình 3.11 Cách thu dữ liệu từ CORS.....</i>	<i>75</i>
<i>Hình 3.12 Các thành phần mạng lưới của hệ thống RTK.....</i>	<i>76</i>
<i>Hình 3.13 Sơ đồ luồng dữ liệu khối WLS.....</i>	<i>77</i>
<i>Hình 3.14 Sơ đồ thuật toán Kalman Filter.....</i>	<i>83</i>
<i>Hình 4.1 Cách thức lấy dữ liệu của Google.....</i>	<i>87</i>
<i>Hình 4.2 Hình mô tả phân vị 50 và 95.....</i>	<i>89</i>
<i>Hình 4.3 Sai lệch khoảng cách của Baseline và các phương pháp khác với Pixel 4XL.....</i>	<i>90</i>
<i>Hình 4.4 Sai lệch khoảng cách của Baseline và các phương pháp khác với Pixel 4A.....</i>	<i>91</i>
<i>Hình 4.5 Sai lệch khoảng cách của Baseline và các phương pháp khác với Pixel 4A.....</i>	<i>92</i>



## **DANH MỤC BẢNG BIỂU**

<i>Bảng 1.1 Một số công cụ xử lý dữ liệu GNSS .....</i>	<i>20</i>
<i>Bảng 2.1 Các trường dữ liệu thô GNSS được thu bởi điện thoại Android.....</i>	<i>32</i>
<i>Bảng 2.2 Các thông số Kepler trong bản tin điều hướng .....</i>	<i>37</i>
<i>Bảng 2.3 Bảng tóm tắt kí hiệu .....</i>	<i>60</i>
<i>Bảng 3.1. Quy ước viết tắt các tham số đầu vào khối WLS .....</i>	<i>68</i>
<i>Bảng 4.1 Bảng mô tả ký hiệu của công thức tính khoảng cách Vincenty.....</i>	<i>88</i>
<i>Bảng 4.2 Bảng đánh giá kết quả các phương pháp so với Baseline của Google.</i>	<i>93</i>



## CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN ĐỀ TÀI

Chương đầu tiên trình bày tổng quan về thực tế hiện nay của bài toán xác định tọa độ, từ đó đưa ra lý do lựa chọn đề tài “Nghiên cứu phát triển một số giải pháp tăng độ chính xác cho hệ thống định vị toàn cầu” và mục tiêu đề ra trong đề tài nghiên cứu này.

### 1.1 Lý do lựa chọn đề tài

Công nghệ định vị hiện nay chiếm vai trò vô cùng quan trọng trong cuộc sống hiện đại và có ảnh hưởng sâu sắc đến nhiều ngành công nghiệp và dịch vụ. Không chỉ gắn liền với các thiết bị định vị theo dõi người dùng, công nghệ xác định tọa độ địa lý còn được tích hợp với các thiết bị di động, hệ thống dẫn đường cho các phương tiện giao thông cùng các ứng dụng trong quân sự và cứu hộ.

Độ chính xác của bài toán xác định tọa độ địa lý là yếu tố quyết định mức độ hiệu quả của các hệ thống nêu trên. Những ứng dụng như theo dõi người dùng, tìm đồ thất lạc, dẫn đường, ... đều yêu cầu vị trí có độ chính xác cao để phát huy hết tác dụng của mình. Tuy nhiên, việc xác định được vị trí chính xác không hề đơn giản, do ảnh hưởng của nhiều thành phần phức tạp như sai số đo lường, điều kiện môi trường, giới hạn của thiết bị và các thành phần nhiều khác.

Trong thực tế, công nghệ định vị hiện tại đã có những bước phát triển vượt bậc. Các hệ thống vệ tinh định vị hiện nay có thể kể đến bao gồm hệ thống định vị Global Positioning System (GPS) hiện đại của Mỹ, cùng với các hệ thống định vị vệ tinh khác như GLONASS, Galileo và BeiDou. Tuy nhiên các công nghệ trên vẫn còn tồn tại những hạn chế, đặc biệt trong những nơi mà tín hiệu vệ tinh bị suy giảm hoặc nhiễu loạn, ví dụ như trong đô thị có mật độ nhà cao tầng dày đặc, vùng rừng núi hoặc dưới nước.

Để khắc phục các nhược điểm và tối ưu độ chính xác của định vị, nhiều nghiên cứu đã được tiến hành. Các hướng nghiên cứu hiện nay bao gồm việc cải thiện các thuật toán xử lý tín hiệu từ vệ tinh, áp dụng các công nghệ trí tuệ nhân tạo (AI) như học máy (ML) để dự đoán vị trí và xử lý sai số, ngoài ra còn phát triển giải pháp kết hợp nhiều nguồn tín hiệu để nâng cao độ chính xác của vị trí.

Mặt khác, sự phát triển của các loại cảm biến và thiết bị di động cũng mở ra cánh cửa mới trong nghiên cứu cải thiện độ chính xác của định vị. Ví dụ như các cảm biến quán tính (IMU) như cảm biến gia tốc kế, cảm biến con quay hồi chuyển và cảm biến từ kế kết hợp với tín hiệu vệ tinh có thể giúp cải thiện đáng kể độ chính xác của tọa độ địa lý.

Một số nghiên cứu được triển khai và cho thấy các kết quả định vị đầy hứa hẹn. Trong nghiên cứu về định vị tọa độ thời gian thực trên điện thoại Xiaomi Mi 8 [1], nhóm tác giả đã thử nghiệm phương pháp Định vị điểm chính xác (Precise Point Positioning – PPP) mà không sử dụng tới các hiệu chỉnh khác ngoài trên một chiếc điện thoại Mi 8 tĩnh (không di chuyển thiết bị). Kết quả nghiên cứu của nhóm là sai số căn bậc hai bình phương trung bình (Root Mean Square – RMS) giữa tọa độ tính được và tọa độ thực tế nhận được giá trị dưới 1 mét khi định vị trong vòng 30 giây.

Trong một nghiên cứu khác về hậu xử lý dữ liệu định vị GNSS, nhóm tác giả đến từ Đức đã triển khai thuật toán RTK kết hợp IMU trên điện thoại Mi8 và thử nghiệm nó bằng cách gắn điện thoại lên một chiếc xe chạy trong khu vực ngoại ô. Sau hai lần lái thử, 95% sai số RMS trên hai quãng đường có giá trị khoảng 1 mét. Những nghiên cứu trên cho thấy kết quả đầy hứa hẹn về khả năng tối ưu định vị cho điện thoại thông minh trong tương lai.

Từ những tiền đề trên, chúng em lựa chọn xây dựng một phương pháp giúp tối ưu độ chính xác của tọa độ vị trí ngay từ bước tính toán tọa độ với tín hiệu mà chip GNSS thu được từ vệ tinh.

## 1.2 Các giải pháp đã có hiện nay

Nhiều kỹ thuật xử lý dữ liệu GNSS có độ chính xác cao đã được nghiên cứu và đưa vào sử dụng trong thực tế. Dưới đây là Bảng 1.1 mô tả một số thư viện mã nguồn mở liên quan và các công cụ có thể sử dụng để xử lý dữ liệu GNSS và tối ưu độ chính xác định vị [8].

*Bảng 1.1 Một số công cụ xử lý dữ liệu GNSS*

Author	Name	Last Update	Programming language	Constellations	Receiver motion	Core
Tomoji Takasu	RTKLIB	2019	C	GPS, GLO, GAL, QZS, BDS, SBAS	Static, dynamic	WLS, RTK, PPP, NTRIP client/server
Wuhan University	PRIDE PPP-AR	2019	Fortran 95	GPS	Static, dynamic	Undifferenced PPP with ambiguity resolution; based on least-square.
Hacettepe University, Turkey	PPPH	2018	Matlab	GPS, GLO, GAL, BDS	Static, dynamic	PPP
ARL at UT-Austin	GPSTk	2020	C++	GPS, GLO, GAL, QZS, BDS, SBAS	Static, dynamic	PPP
European Space Agency (ESA)	gLAB	2019	Windows, Linux, Mac	GPS, GLO, GAL, QZS, BDS, SBAS, IRNSS	Static, dynamic	PPP, DGNSS, WLS

## 1.3 Mục tiêu đề tài

Mục tiêu đặt ra của đề tài là xây dựng một phương pháp nhằm tối thiểu hóa sai số trong xác định tọa độ địa lý, cụ thể hơn là tăng độ chính xác của tọa độ được tính bằng các thông số truyền trực tiếp từ tín hiệu vệ tinh. Ở đây nghiên cứu được tiến hành dựa trên chipset GPS có sẵn trong điện thoại. Để thực hiện được mục tiêu trên, đề tài đặt ra các nhiệm vụ như sau:

- Xây dựng ứng dụng điện thoại có khả năng lấy được dữ liệu GNSS thô được truyền từ vệ tinh.
- Xây dựng hệ thống lấy các dữ liệu Ephemeris (Lịch thiên văn) của vệ tinh, từ đó tính toán ra được vị trí và vận tốc của vệ tinh tương ứng với thời điểm thu được dữ liệu GNSS thô.
- Xây dựng phương pháp tính toán vị trí tọa độ gồm kinh độ và vĩ độ, với dữ liệu đầu vào là các dữ liệu GNSS thô thu được từ vệ tinh, vị trí và vận tốc của vệ tinh.
- Xây dựng phương pháp xử lý ngoại lệ và cải thiện sai số, giúp giảm độ sai lệch giữa các tọa độ vừa tính được.

Từ những nhiệm vụ đặt ra, nhóm nghiên cứu mong muốn phát triển một phương pháp tính toán vị trí tọa độ địa lý trực tiếp từ tín hiệu vệ tinh với độ chính xác cao, giảm sai số định vị xuống 1 - 2 mét sau khi kết hợp cùng các phương pháp hiệu chỉnh tọa độ khác.

#### **1.4 Kết luận chương 1**

Như vậy, trong chương đầu, nhóm đã trình bày về tầm quan trọng của hệ thống định vị với con người hiện nay, đưa ra các giải pháp hiện có, đặt vấn đề cải thiện độ chính xác của tọa độ và đưa ra các mục tiêu nhằm giải quyết vấn đề vừa đặt ra. Chương tiếp theo là nội dung cơ sở lý thuyết được áp dụng trong đề tài nghiên cứu này.

## CHƯƠNG 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

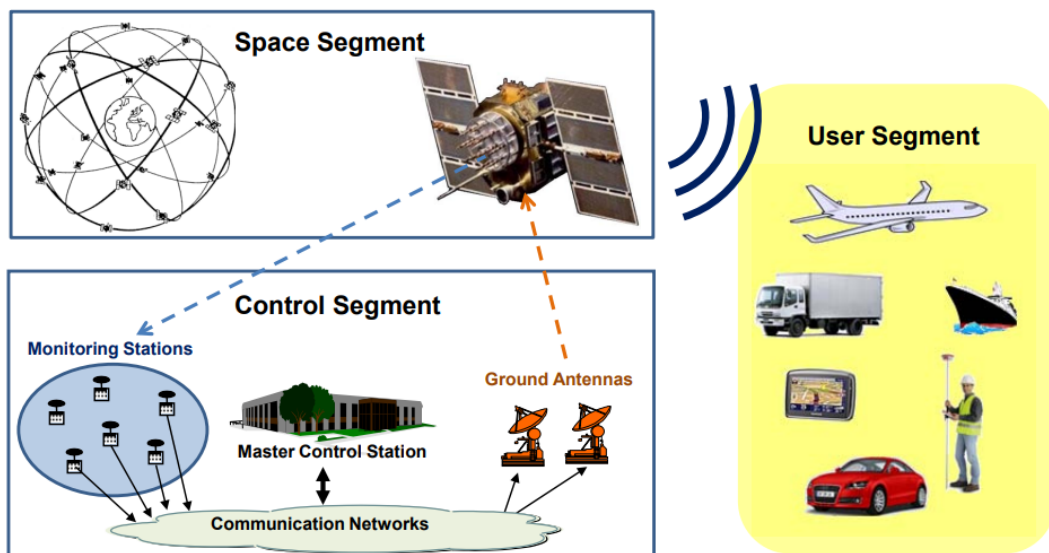
Chương thứ 2 giới thiệu tổng quan về hệ thống định vị vệ tinh toàn cầu (Global Navigation Satellite System – GNSS), hệ thống định vị toàn cầu phổ biến nhất hiện nay – GPS, hệ tọa độ cố định tâm trái đất (Earth-centered, Earth-fixed – ECEF), nguyên lý tính toán vị trí tọa độ địa lý, các tham số dữ liệu thô của GNSS và các tham số của vệ tinh được sử dụng trong đề tài. Ngoài ra chương 2 còn đề cập tới các phương pháp nhằm gia tăng độ chính xác và giảm thiểu sai số trong tính toán như phương pháp Bình phương trọng số tối thiểu (Weighted Least Square – WLS), bộ lọc Kalman cùng phương pháp Định vị động học thời gian thực (Real Time Kinematic – RTK).

### 2.1 Tổng quan về hệ thống định vị GNSS

#### 2.1.1 Kiến trúc GNSS

Hệ thống định vị vệ tinh toàn cầu (GNSS) là thuật ngữ chung biểu thị cho các hệ thống định vị vệ tinh cung cấp chức năng định vị liên tục trên toàn cầu. GNSS bao gồm các chòm vệ tinh quay quanh Trái đất, liên tục truyền tín hiệu để cho phép người dùng xác định vị trí ba chiều (3D) với phạm vi phủ sóng toàn cầu. Hệ thống GNSS hoạt động đầy đủ duy nhất là hệ thống định vị toàn cầu GPS của Hoa Kỳ. Ngoài ra còn các hệ thống định vị khác đang được vận hành và phát triển, ví dụ như hệ thống định vị vệ tinh toàn cầu GLONASS của Nga, BeiDou của Trung Quốc, Galileo của Châu Âu và Quasi-Zenith (QZSS) của Nhật Bản [3].

Về cơ bản, GNSS bao gồm ba phần chính: Phần không gian, Phần điều khiển (Các trạm mặt đất) và Phần người sử dụng.



Hình 2.1 Kiến trúc GNSS

Hình 2.1 thể hiện ba thành phần chính trong kiến trúc GNSS [3]. Phần không gian (Space Segment) bao gồm mạng lưới các vệ tinh bay trong không gian. Chức năng chính của phần không gian là tạo và truyền tín hiệu, đồng thời lưu trữ và quảng bá thông báo điều hướng được gửi lên bởi phần điều khiển. Các chòm vệ tinh của mỗi hệ thống định vị được sắp xếp để đảm bảo mỗi vị trí của Trái đất sẽ

luôn được bao phủ trong tầm nhìn của ít nhất 4 vệ tinh. Các vệ tinh phát ra tín hiệu định vị liên tục, cung cấp thông tin về thời gian và vị trí hiện tại. Mỗi vệ tinh được trang bị đồng hồ nguyên tử có độ chính xác cao để đảm bảo tính đồng bộ và độ chính xác của tín hiệu.

Phần điều khiển (Control Segment) chịu trách nhiệm điều hướng và chỉ huy hoạt động cho hệ thống GNSS. Các chức năng cơ bản của trạm mặt đất bao gồm:

- Kiểm soát và duy trì trạng thái và cấu hình của các chòm vệ tinh.
- Dự đoán Ephemeris và độ tăng của đồng hồ vệ tinh.
- Duy trì thang thời gian GNSS phù hợp thông qua đồng hồ nguyên tử.
- Cập nhật các bản tin điều hướng cho mọi vệ tinh.

Phần thứ ba là phần người dùng (User Segment), bao gồm các thiết bị thu GNSS. Các thiết bị thu có thành phần cơ bản giống nhau, trong đó có ăng ten với bộ phận tiền khuếch đại, khối tần số vô tuyến, bộ vi xử lý, bộ tạo dao động, nguồn cấp dữ liệu, bộ nhớ để lưu trữ dữ liệu và giao diện với người dùng. Các thiết bị thu GNSS thường thấy có thể là điện thoại di động, đồng hồ thông minh, thiết bị theo dõi người dùng,... Chức năng chính của các thiết bị này là nhận tín hiệu GNSS, xác định khoảng cách giả (Pseudorange) và giải các phương trình điều hướng để thu được tọa độ trong thời gian chính xác.

### **2.1.2 Tín hiệu GNSS**

Các vệ tinh GNSS liên tục truyền tín hiệu dẫn đường ở hai hoặc nhiều tần số trong băng L (từ 1GHz đến 2GHz). Các tín hiệu này chứa mã phạm vi và dữ liệu điều hướng, cho phép người dùng tính toán tọa độ vệ tinh và thời gian di chuyển của tín hiệu từ vệ tinh đến máy thu. Các thành phần chính có trong tín hiệu GNSS là:

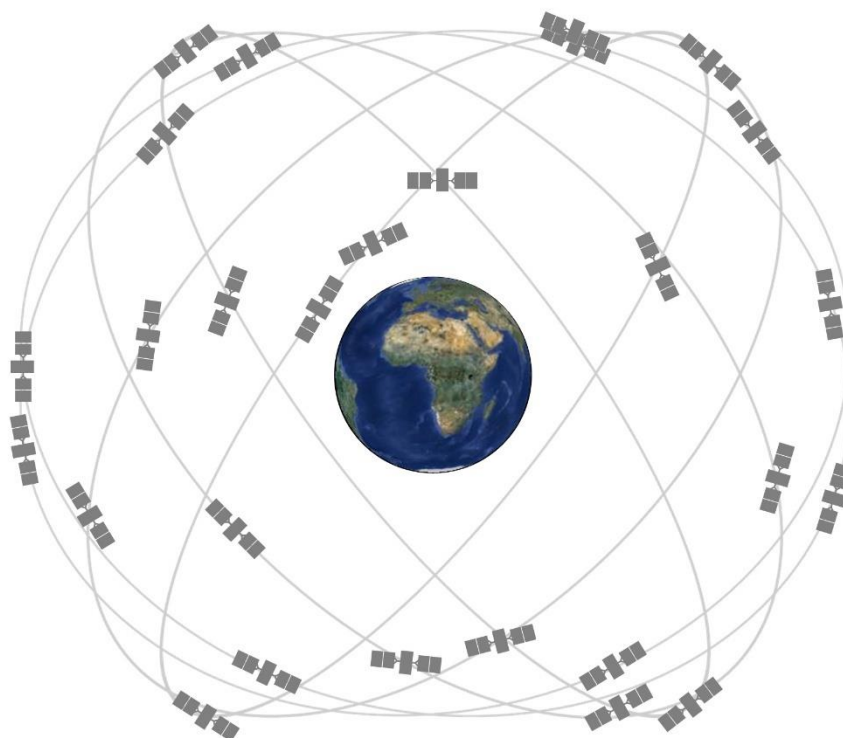
- Sóng mang: Tín hiệu tần số vô tuyến hình sin ở một tần số nhất định, thường là các tần số trung tâm của băng L.
- Mã phạm vi (Ranging code): Chuỗi số 0 và 1, đặc trưng cho mỗi vệ tinh trong chòm vệ tinh. Đoạn mã này cho phép xác định danh tính của vệ tinh vừa truyền tín hiệu và cho phép máy thu xác định thời gian truyền của tín hiệu vô tuyến từ vệ tinh đến máy thu. Có thể gọi là chuỗi PseudoRandom Noise (PRN) hoặc mã PRN.
- Dữ liệu điều hướng: Bản tin được mã hóa nhị phân, cung cấp thông tin về Ephemeris của vệ tinh, các thông số sai lệch đồng hồ, trạng thái vệ tinh và các thành phần bổ sung khác. Chi tiết về phần dữ liệu điều hướng sẽ được trình bày trong các chương sau.

### **2.1.3 Hệ thống định vị toàn cầu GPS**

Vì là hệ thống định vị đầy đủ và phát triển nhất toàn cầu nên hệ thống GPS được lựa chọn nghiên cứu trong đề tài này. Đây là hệ thống định vị GNSS được Bộ Quốc phòng Hoa Kỳ thiết kế, xây dựng, vận hành và quản lý, gồm 3 thành phần chính tương tự như các hệ thống GNSS khác.

Về phần không gian, hệ thống GPS hiện tại gồm một chòm sao khoảng 31 vệ tinh hoạt động trong quỹ đạo trung bình quanh trái đất (Medium Earth Orbit – MEO), trong đó có 27 vệ tinh hoạt động thường trực, số còn lại hoạt động ở chế

độ dự phòng. Các vệ tinh này được đặt ở độ cao khoảng 20,200 Km và được phân bố đều trong 6 quỹ đạo với góc nghiêng khoảng 55 độ so với mặt phẳng xích đạo [4]. Mỗi vệ tinh hoàn thành một chu kỳ quỹ đạo trong khoảng 12 giờ. Hình 2.2 dưới đây thể hiện quỹ đạo của 27 vệ tinh GPS hiện tại đang hoạt động xung quanh Trái đất.



Hình 2.2 Quỹ đạo hoạt động của chòm 27 vệ tinh GPS

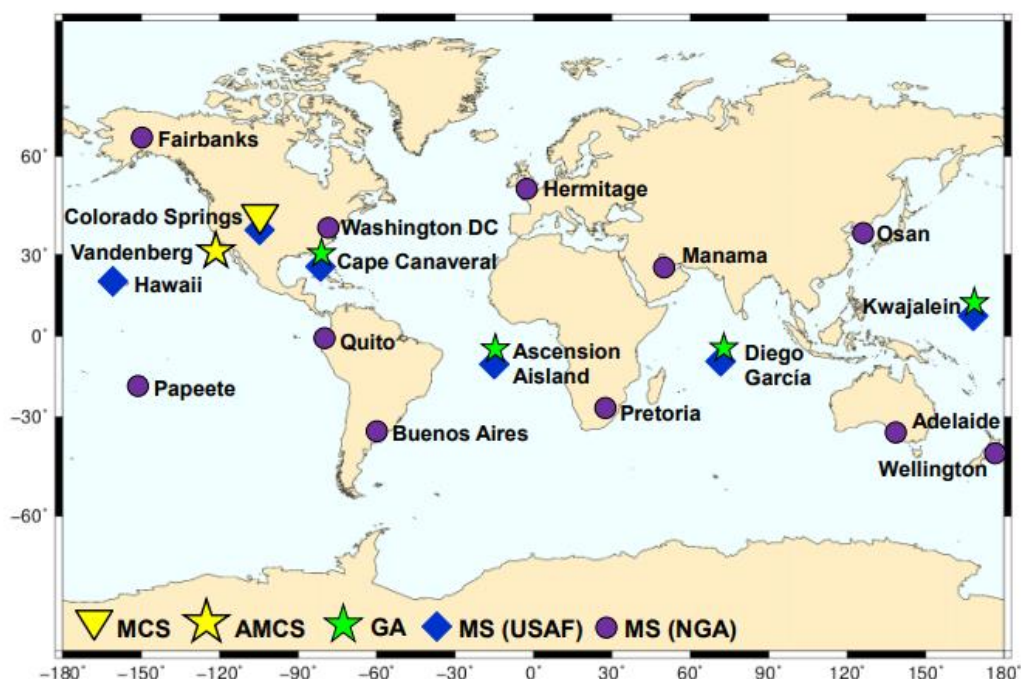
Phần kiểm soát của GPS gồm một mạng lưới các trạm trên mặt đất, bao gồm ba loại trạm chính:

**Trạm điều khiển chính (Master Control Station – MCS):** Trạm điều khiển chính nằm ở Colorado Spring, Hoa Kỳ, là trung tâm điều hành và kiểm soát toàn bộ hệ thống GPS. Trạm điều khiển cung cấp lệnh điều khiển các chòm vệ tinh GPS, sử dụng dữ liệu của các trạm giám sát toàn cầu để tính toán vị trí chính xác của các vệ tinh, tạo các bản tin điều hướng để tải lên vệ tinh, giám sát các chương trình phát sóng vệ tinh, giám sát tính toàn vẹn của hệ thống GPS và đảm bảo trạng thái cũng như độ chính xác của các chòm vệ tinh [5].

**Trạm giám sát (Monitor Station – MS):** Các trạm giám sát được phân bố rải rác trên khắp thế giới để theo dõi quỹ đạo và tình trạng hoạt động của các vệ tinh. Các trạm này sử dụng máy thu GPS có độ chính xác cao để thu thập tín hiệu điều hướng, đo phạm vi và dữ liệu khí quyển, sau đó cung cấp dữ liệu quan sát vệ tinh cho trạm điều khiển chính để phân tích [5].

**Trạm điều chỉnh (Ground Antennas – GA):** Các trạm điều chỉnh nhận lệnh từ MCS và gửi lệnh, dữ liệu điều hướng cùng chương trình bộ xử lý, thông qua băng S, đến vệ tinh để đảm bảo vệ tinh di chuyển đúng quỹ đạo và phát tín hiệu chính xác [5].





Hình 2.3 Các trạm mặt đất của hệ thống GPS hiện có

Hình 2.3 thể hiện các trạm mặt đất hiện có trên toàn cầu của hệ thống GPS. Trong đó có một trạm điều khiển chính tại Colorado Spring và một trạm điều khiển chính thay thế (Alternate MCS – AMCS) tại Vandenberg. Chiếm số lượng nhiều nhất là các trạm giám sát từ Cơ quan Tình báo Không gian Địa lý Quốc gia (MS from National Geospatial-Intelligence Agency – MS (NGA)) và một số trạm giám sát từ Không quân Hoa Kỳ (MS from United States Air Force – MS (USAF)). Còn lại là các trạm điều chỉnh phân bố tại bốn hòn đảo (Ascension, Cape Canaveral, Diego Garcia và Kwajalein) cùng MS (USAF) [3].

Phần người dùng bao gồm tất cả các thiết bị có khả năng nhận và xử lý tín hiệu từ các vệ tinh GPS. Các thiết bị này có thể là điện thoại di động, hệ thống dẫn đường cho xe ô tô, máy bay, tàu biển, các thiết bị chuyên dụng cho quân sự và nghiên cứu khoa học. Hệ thống GPS có ứng dụng vô cùng rộng rãi trong mọi lĩnh vực, không chỉ trong hàng không, hàng hải, dân sự mà còn trong quân sự.

Về loại tín hiệu, hệ thống GPS thường truyền tín hiệu trên các băng tần L1, L2 và L5. Băng L1 có tần số sóng mang là 1,575.420 MHz, băng L2 có tần số là 1,227.600 MHz, hiện nay tín hiệu GPS được hiện đại hóa và có thêm băng tần L5 với tần số 1,176.450 MHz. Hệ thống GPS sử dụng công nghệ đa truy nhập phân chia theo mã (Code Division Multiple Access – CDMA) để gửi nhiều tín hiệu khác nhau trên cùng một tần số vô tuyến và sử dụng cơ chế điều chế pha nhị phân (Binary Phase Shift Keying - BPSK) để điều chế các tín hiệu gửi đi.

Hiện nay hệ thống GPS cung cấp hai dịch vụ chính:

- Dịch vụ Định vị tiêu chuẩn (Standard Positioning Service – SPS): là dịch vụ mở, cho phép người dùng sử dụng miễn phí trên toàn cầu. Tín hiệu được cung cấp bởi dịch vụ SPS là tín hiệu chứa loại mã dân sự (Civilian access code – C/A code). Dịch vụ này được truyền trên băng tần L1.

- Dịch vụ Định vị chính xác (Precise Positioning Service – PPS): là dịch vụ bị hạn chế, được mã hóa chuyên dụng và chỉ cung cấp cho lĩnh vực quân sự cũng như những người dùng được ủy quyền. Tín hiệu được cung cấp bởi dịch vụ PPS là tín hiệu chứa loại mã chính xác (Precise code – P code). Các tín hiệu của dịch vụ này được cung cấp trên cả hai băng L1 và L2.

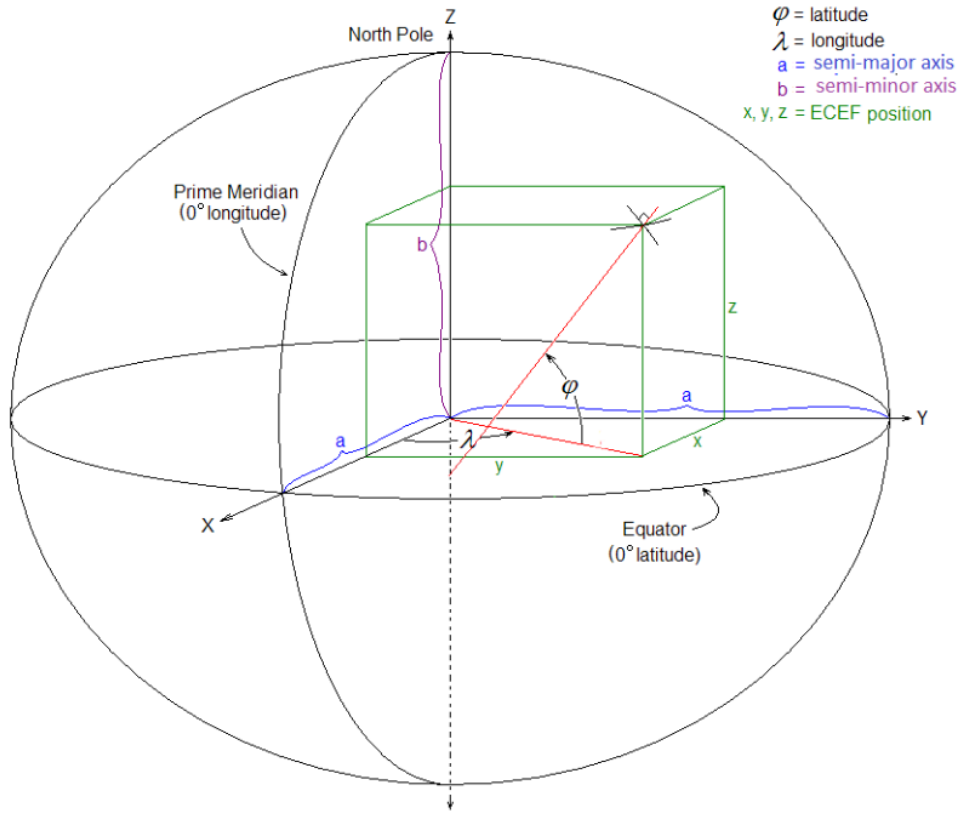
#### **2.1.4 Hệ thống GPS trong điện thoại**

Nghiên cứu sử dụng điện thoại là công cụ thu thập dữ liệu GPS chính. Trong mỗi điện thoại được trang bị một bộ thu GNSS nhỏ gọn, có khả năng nhận tín hiệu từ các vệ tinh, không chỉ tín hiệu vệ tinh GPS mà còn có các tín hiệu GNSS khác. Bộ thu này hoạt động liên tục để cung cấp thông tin vị trí chính xác. Ngoài bộ thu GNSS, điện thoại còn sử dụng các cảm biến quán tính khác như gia tốc kế, con quay hồi chuyển, từ kế,... để cải thiện độ chính xác của định vị.

Để hỗ trợ cho hệ thống GPS, điện thoại thông minh hiện nay còn được trang bị thêm các công nghệ Assisted-GPS (A-GPS) sử dụng thông tin từ mạng di động để cải thiện tốc độ và độ chính xác của định vị, kết hợp cùng các hệ thống GNSS khác để tính toán chính xác hơn vị trí tọa độ, ngoài ra còn sử dụng các mạng Wifi và Bluetooth để xác định vị trí khi tín hiệu GPS yếu hoặc không khả dụng. Tuy nhiên, trong đề tài nghiên cứu này, nhóm tập trung vào cải thiện độ chính xác định vị GPS với dữ liệu đầu vào chính là các tín hiệu vệ tinh truyền vào điện thoại mà không sử dụng đến những công cụ tích hợp có sẵn. Chi tiết cơ chế tính toán vị trí tọa độ GPS từ dữ liệu vệ tinh sẽ được trình bày trong phần tiếp theo.

#### **2.1.5 Hệ tọa độ cố định tâm trái đất ECEF**

Hệ tọa độ cố định tâm trái đất ECEF là một hệ tọa độ không gian ba chiều thường được sử dụng trong các ứng dụng định vị toàn cầu như GPS và các hệ thống GNSS khác. Hình 2.4 cho thấy các thông số và đặc điểm của hệ tọa độ ECEF. Gốc tọa độ của hệ ECEF được đặt tại tâm của Trái đất, cũng là tâm của các hệ thống định vị. Trục X đi qua kinh tuyến gốc (Kinh tuyến Greenwich) tại mặt phẳng xích đạo). Trục Y vuông góc với trục X và nằm trong mặt phẳng xích đạo, đi qua kinh tuyến 90 độ Đông. Trục Z đi qua cực Bắc của Trái Đất. Trong hệ tọa độ này, vị trí của một điểm trên hoặc gần bề mặt Trái đất được xác định bởi ba tọa độ  $(x, y, z)$  tương ứng với khoảng cách từ điểm đó đến các mặt phẳng tọa độ gốc theo các trục X, Y, Z.



Hình 2.4 Hệ tọa độ ECEF

Để chuyển đổi từ hệ tọa độ ECEF  $(x, y, z)$  sang hệ tọa độ địa lý (vĩ độ  $\varphi$ , kinh độ  $\lambda$ , độ cao  $h$ ), ta sử dụng các bước và công thức như sau:

- Công thức tính kinh độ  $\lambda$ :

$$\lambda = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \quad (2.1)$$

- Công thức tính bán kính  $p$  từ tâm đến điểm chiếu trên mặt phẳng xích đạo:

$$p = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2.2)$$

- Công thức tính góc thiên đỉnh (Zenith) ban đầu:

$$\theta = \arctan\left(\frac{z \cdot a}{p \cdot b}\right) \quad (2.3)$$

Với  $a$  là bán kính trục lớn của elip,  $b$  là bán kính trục nhỏ của elip.

- Công thức tính vĩ độ  $\varphi$ :

$$\varphi = \arctan\left(\frac{z + e'^2 \cdot b \cdot \sin^3(\theta)}{p - e^2 \cdot a \cdot \cos^3(\theta)}\right) \quad (2.4)$$

Trong đó:

$$e \text{ là độ lệch tâm của elip, } e = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2}$$

$$e' \text{ là độ lệch tâm thứ hai của elip, } e' = \sqrt{\left(\frac{a}{b}\right)^2 - 1}$$

- Công thức tính bán kính độ cong  $N$  tại vĩ độ  $\varphi$ :

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2(\varphi)}} \quad (2.5)$$

- Công thức tính độ cao  $h$ :

$$h = \frac{p}{\cos(\varphi)} - N \quad (2.6)$$

Từ các công thức trên, ta có thể chuyển tọa độ vị trí tính toán được từ hệ tọa độ ECEF sang hệ tọa độ địa lý vĩ độ, kinh độ, cao độ, từ đó có thể quan sát vị trí tọa độ trên bản đồ.

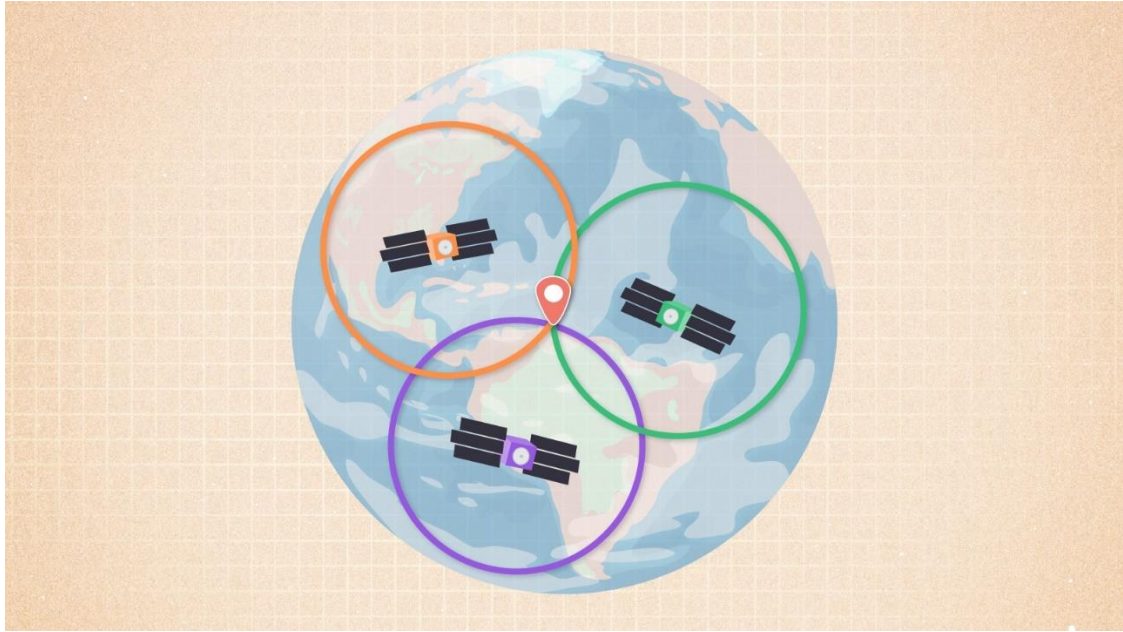
### 2.1.6 Cơ chế tính toán vị trí tọa độ GPS

Cơ chế tính toán tọa độ GPS được dựa trên hai khái niệm toán học cơ bản. Khái niệm thứ nhất là Trilateration, tức là phương pháp xác định vị trí dựa trên ít nhất ba khoảng cách từ vị trí cần tính đến các điểm khác đã biết vị trí. Khái niệm thứ hai là biểu thức (2.7) thể hiện mối quan hệ giữa vận tốc, khoảng cách và thời gian.

$$\text{Khoảng cách} = \text{Vận tốc} \times \text{Thời gian} \quad (2.7)$$

Để thực hiện phương pháp Trilateration, trước hết cần phải có khoảng cách từ vị trí tọa độ đến các vệ tinh. Các tín hiệu vô tuyến mà máy thu GPS nhận được từ vệ tinh mang theo hai thông tin quan trọng và cần thiết để tính được khoảng cách. Đầu tiên là Ephemeris của vệ tinh, là một tập hợp các tham số quỹ đạo của vệ tinh, được sử dụng để tính toán vị trí và vận tốc của vệ tinh. Thứ hai là thời gian vệ tinh gửi tín hiệu đến máy thu. Mỗi vệ tinh GPS được trang bị đồng hồ nguyên tử, cho phép tính toán thời gian chính xác đến hàng chữ số thập phân thứ 14. Các máy thu GPS nhận được thông tin về thời gian truyền tín hiệu, so sánh với thời gian nhận được trong máy thu được tính toán bằng đồng hồ có sẵn trong máy thu với độ chính xác khoảng  $e-10$ . Vì sóng vô tuyến truyền với tốc độ ánh sáng là 299.792.458 m/s, máy thu sử dụng biểu thức (2.7), lấy chênh lệch giữa thời gian gửi ở vệ tinh với thời gian nhận ở máy thu nhân với tốc độ ánh sáng, từ đó tính được khoảng cách giữa vệ tinh và máy thu.

Dựa vào khoảng cách vừa tính được, máy thu GPS sử dụng phương pháp Trilateration để tính toán vị trí của mình. Hình 2.5 cho thấy giao điểm của ba hình cầu với tâm là ba vệ tinh cho ta một vị trí cụ thể trên Trái đất. Khi máy thu xác định khoảng cách giữa nó và một vệ tinh, nó có thể thu hẹp vị trí của mình nằm ở trên mặt cầu có bán kính là khoảng cách đó. Để thu hẹp hơn nữa, dựa vào ít nhất ba vệ tinh, máy thu có thể xác định vị trí của mình là giao điểm của ba mặt cầu có bán kính là các khoảng cách vừa tính được. Dù giao điểm của 3 mặt cầu là hai điểm, tuy nhiên ta có thể loại trừ điểm không nằm gần bề mặt Trái đất, từ đó tính được tọa độ GPS. Ngoài ra, khi thêm thông tin khoảng cách và vị trí của vệ tinh thứ tư, ta có thể tính được thêm thông tin độ cao của vị trí máy thu và giảm sai số của đồng hồ tại máy thu.



Hình 2.5 Giao điểm của ba vệ tinh

Vị trí của máy thu được xác định bằng cách giải hệ phương trình (2.8) sau, với đầu vào là tọa độ vị trí và khoảng cách của ít nhất ba vệ tinh:

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 = R_i^2 \quad (2.8)$$

Trong đó:

$(x, y, z)$  là tọa độ máy thu

$(x_i, y_i, z_i)$  là tọa độ của vệ tinh thứ  $i$

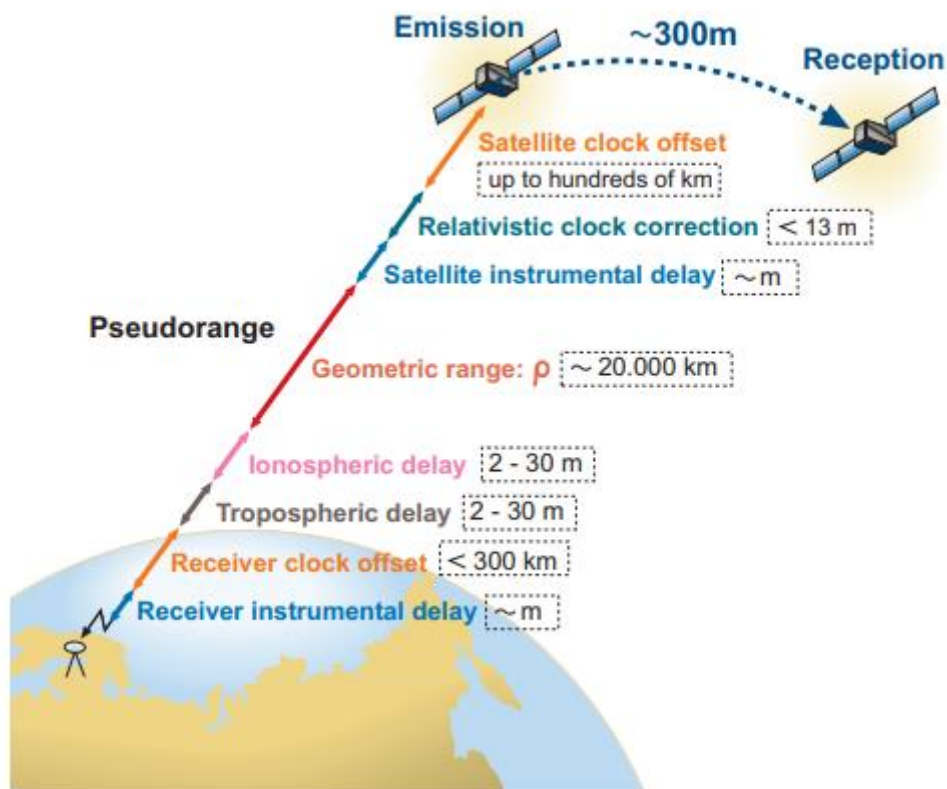
$R_i$  là khoảng cách từ máy thu đến vệ tinh thứ  $i$

Phương pháp Weighted Least Square được sử dụng để giải hệ phương trình trên và tìm ra nghiệm tối ưu nhất. Chi tiết phương pháp được trình bày trong phần WLS.

### 2.1.7 Các sai số trong quá trình tính toán

Với một hệ thống tính toán phức tạp và yêu cầu tín hiệu truyền đi ở khoảng cách lớn như vậy, có rất nhiều yếu tố gây ra sai số trong việc tính toán vị trí và làm giảm độ chính xác của phép đo. Hình 2.6 dưới đây cho thấy các yếu tố khoảng cách xuất hiện trong quá trình truyền tín hiệu từ vệ tinh xuống máy thu. Trong đó, những yếu tố chính gây ra sai số lớn trong quá trình truyền tín hiệu bao gồm sai số đồng hồ, sai số trong quỹ đạo vệ tinh, sai số do nhiễu khí quyển gây ra. Ngoài ra còn có sai số do cách sắp xếp vị trí của các vệ tinh hoặc sai số đa đường [7].



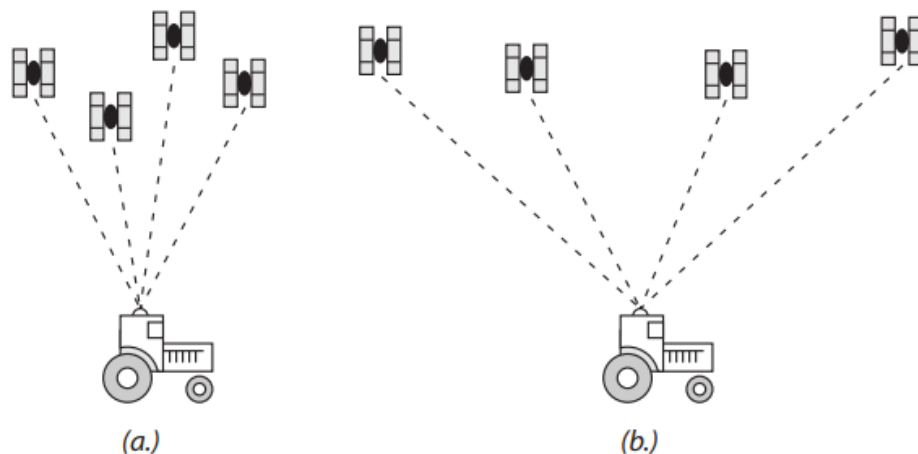


Hình 2.6 Các yếu tố khoảng cách trong quá trình truyền tín hiệu

Chi tiết về các yếu tố gây ra sai số lớn trong quá trình truyền tín hiệu:

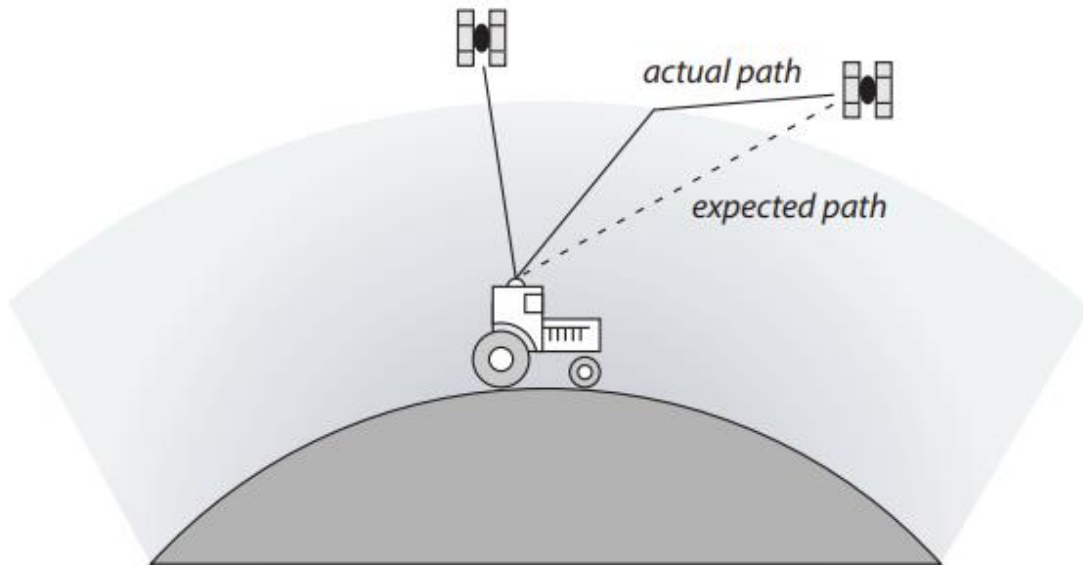
Sai số đồng hồ: các đồng hồ trong máy thu thường không có độ chính xác cao như những đồng hồ trong vệ tinh vì lý do giá cả, và chúng cũng không được đồng bộ tuyệt đối với các đồng hồ trong vệ tinh. Chỉ cần sai lệch 0.001 giây giữa 2 đồng hồ có thể khiến cho khoảng cách giữa máy thu và vệ tinh bị lệch tới 299.792 mét.

Sai số do vị trí của các vệ tinh: độ chính xác của phép tính Trilateration bị ảnh hưởng đáng kể bởi cách sắp xếp của các vệ tinh trên bầu trời. Nếu tất cả các vệ tinh tình cờ tập trung tại một vị trí như Hình 2.7a, phép tính sẽ không thể chính xác được như khi các vệ tinh phân bố đều xung quanh (Hình 2.7b).



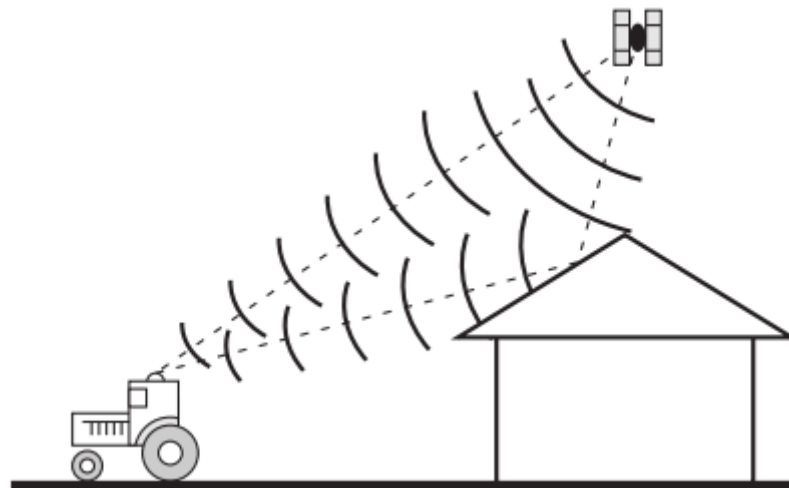
Hình 2.7 Vị trí của các vệ tinh ảnh hưởng tới phép tính Trilateration

Sai số do điều kiện khí quyển: Khi tín hiệu vô tuyến đi vào bầu khí quyển của Trái đất, nó có thể bị uốn cong hoặc khúc xạ như biểu diễn trong Hình 2.8. Tốc độ truyền tín hiệu cũng bị thay đổi bởi tầng ion, khiến cho thời gian nhận tín hiệu dài hơn thời gian truyền thực tế, từ đó dẫn tới sai số khoảng cách.



Hình 2.8 Khí quyển ảnh hưởng tới các tín hiệu vệ tinh

Sai số đa đường: Sai số xảy ra khi cùng một tín hiệu vô tuyến được nhận tại hai thời điểm khác nhau như được biểu diễn trong Hình 2.9. Hiện tượng này xảy ra khi tín hiệu bị bật lại từ một vật thể nào đó. Hiện tượng đa đường thường xảy ra khi máy thu GPS hoạt động xung quanh các vật thể phản xạ sóng vô tuyến như các tòa nhà hoặc các vùng nước lớn. Sai số đa đường có thể gây ra sai lệch lớn khi tính toán vị trí của máy thu.



Hình 2.9 Tín hiệu xảy ra hiện tượng đa đường

Từ các loại sai số nêu trên, nhóm tiến hành nghiên cứu để giảm thiểu các loại sai số, từ đó tăng độ chính xác của vị trí, dựa trên đầu vào là dữ liệu thô GNSS thu được từ các cảm biến có sẵn trong điện thoại.

## 2.2 Các tham số dữ liệu thô của tín hiệu GNSS

Sau khi tiến hành quan sát và tìm hiểu về tập các dữ liệu thô GNSS có thể lấy được từ điện thoại, dựa trên các tập dữ liệu của cuộc thi “Google Smartphone Decimeter Challenge” cùng tài liệu “Bộ dữ liệu GNSS thô của Android để định vị chính xác”[8] do các kỹ sư về định vị của Google cung cấp. Nhóm lựa chọn xây dựng tập dữ liệu đầu vào bao gồm 36 trường dữ liệu có thể trích xuất trực tiếp từ cảm biến trong điện thoại Android. Tên của các trường dữ liệu và ý nghĩa của chúng được mô tả chi tiết trong Bảng 2.1 dưới đây [8].

*Bảng 2.1 Các trường dữ liệu thô GNSS được thu bởi điện thoại Android*

STT	Tên trường dữ liệu	Ý nghĩa
1	utcTimeMillis	Thời gian trong điện thoại tính từ thời điểm UTC (1/1/1970), đơn vị mili giây
2	TimeNanos	Giá trị thời gian của đồng hồ phân cứng nội bộ bên trong điện thoại, đơn vị nano giây
3	LeapSecond	Giây nhuận, được thêm vào thời gian của đồng hồ để đồng bộ với thời gian chuẩn quốc tế UTC, đơn vị giây
4	TimeUncertaintyNanos	Độ bất định của thời gian đồng hồ phân cứng, đơn vị nano giây
5	FullBiasNanos	Khoảng chênh lệch thời gian giữa đồng hồ phân cứng trong máy thu GPS và mốc thời điểm bắt đầu GPS (6/1/1980), đơn vị nano giây
6	BiasNanos	Độ lệch của đồng hồ trong thời gian dưới một nano giây, đơn vị nano giây
7	BiasUncertaintyNanos	Độ bất định của độ lệch đồng hồ, đơn vị nano giây
8	DriftNanosPerSecond	Độ trôi của đồng hồ, được tính bằng số nano giây sai lệch mỗi giây, đơn vị nano giây
9	DriftUncertaintyNanosPerSecond	Độ bất định của độ trôi của đồng hồ, đơn vị nano giây



10	HardwareClockDiscontinuityCount	Số lần gián đoạn của đồng hồ phần cứng, đơn vị lần
11	Svid	ID của vệ tinh
12	TimeOffsetNanos	Độ lệch thời gian giữa đồng hồ của máy thu và thời gian thực tại thời điểm đo lường, đơn vị nano giây
13	State	Trạng thái đồng bộ của vệ tinh trong hệ thống GNSS, là số nguyên, mỗi bit trong số nguyên đại diện cho một trạng thái của vệ tinh.
14	ReceivedSvTimeNanos	Thời gian vệ tinh gửi tín hiệu GNSS đến máy thu, đơn vị nano giây
15	ReceivedSvTimeUncertaintyNanos	Độ bất định của thời gian vệ tinh gửi tín hiệu GNSS đến máy thu, đơn vị nano giây
16	Cn0DbHz	Tỷ lệ sóng mang trên tạp âm, đơn vị dB-Hz
17	PseudorangeRateMetersPerSecond	Tốc độ biến thiên của khoảng cách giả theo thời gian, đơn vị m/s
18	PseudorangeRateUncertaintyMetersPerSecond	Độ bất định của tốc độ biến thiên của khoảng cách giả, đơn vị m/s
19	AccumulatedDeltaRangeState	Chỉ số trạng thái của phép đo ADR – phép đo khoảng cách dựa trên tích lũy thay đổi khoảng cách từ lúc bắt đầu đo
20	AccumulatedDeltaRangeMeters	Tổng của các thay đổi khoảng cách tính từ lần reset trước đó, đơn vị mét
21	AccumulatedDeltaRangeUncertaintyMeters	Độ bất định của tổng các thay đổi của khoảng cách, đơn vị mét
22	CarrierFrequencyHz	Tần số sóng mang của tín hiệu, đơn vị Hz
23	CarrierCycles	Số lượng chu kỳ tần số sóng mang giữa vệ tinh và máy thu

24	CarrierPhase	Pha tần số vô tuyến được phát hiện bởi máy thu
25	CarrierPhaseUncertainty	Độ bất định của pha tần số
26	MultipathIndicator	Trạng thái đa đường của tín hiệu
27	SnrInDb	Tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu, đơn vị dB
28	ConstellationType	Số nguyên đại diện cho loại hệ thống GNSS, ví dụ giá trị 1 đại diện cho hệ thống GPS
29	AgcDb	Mức tự động điều chỉnh độ khuếch đại, đơn vị dB
30	BasebandCn0DbHz	Tỷ số sóng mang trên tạp âm ở băng tần cơ sở, đơn vị dB-Hz
31	FullInterSignalBiasNanos	Độ lệch giữa các tín hiệu GNSS đo được dưới một nano giây, đơn vị nano giây
32	FullInterSignalBiasUncertaintyNanos	Độ bất định của độ lệch giữa các tín hiệu GNSS đo được, đơn vị nano giây
33	SatelliteInterSignalBiasNanos	Độ lệch giữa các tín hiệu từ các vệ tinh GNSS, đơn vị nano giây
34	SatelliteInterSignalBiasUncertaintyNanos	Độ bất định của độ lệch giữa các tín hiệu từ vệ tinh GNSS, đơn vị nano giây
35	CodeType	Loại mã của tín hiệu GNSS thu được
36	ChipsetElapsedRealtimeNanos	Thời gian kể từ khi hệ thống chipset khởi động, đơn vị nano giây

Từ tập dữ liệu đầu vào gồm các trường dữ liệu trích xuất trực tiếp từ cảm biến có sẵn trong điện thoại như trên, nhóm tiến hành tiền xử lý dữ liệu để có được kết quả làm đầu vào cho thuật toán tính toán vị trí. Để tính toán được vị trí tọa độ GNSS, cần có dữ liệu về khoảng cách và vị trí tọa độ của các vệ tinh. Biểu thức (2.7) được dùng để tính toán khoảng cách giả giữa điện thoại và vệ tinh.

Sau khi tính toán được các khoảng cách giả cần thiết, ta sử dụng thời gian trong dữ liệu vừa thu được để lấy Ephemeris của các vệ tinh, từ đó tính được vị trí tọa độ và vận tốc của vệ tinh. Chi tiết các tham số có trong Ephemeris cũng như cách tính toán vị trí và vận tốc của vệ tinh được trình bày trong các phần tiếp theo.

## 2.3 Công cụ xây dựng ứng dụng trích xuất dữ liệu GNSS

### 2.3.1 Phần mềm Android Studio



Hình 2.10 Phần mềm Android Studio

Trên Hình 2.10 là phần mềm được nhóm sử dụng để lập trình ứng dụng điện thoại di động có khả năng thu được các dữ liệu GNSS thô từ cảm biến trên điện thoại. Android Studio là môi trường phát triển tích hợp (IDE) chính thức do Google phát triển dành cho việc xây dựng các ứng dụng di động trên nền tảng Android.

Điểm nổi bật của phần mềm này là khả năng tích hợp với Android SDK (Software Development Kit), cho phép nhóm truy cập vào các API của Android để sử dụng các tính năng của hệ điều hành như camera, hoặc lấy dữ liệu trực tiếp từ các bộ phận của điện thoại như chip GPS, cảm biến,...

### 2.3.2 Lớp GNSSClock và lớp GNSSMeasurement

Trong Android Studio, hai lớp quan trọng trong việc xử lý dữ liệu định vị vệ tinh là GNSSClock và GNSSMeasurement. Cả hai lớp này đều thuộc về gói android.location và đóng vai trò không thể thiếu trong việc thu thập và xử lý dữ liệu GNSS, giúp các ứng dụng có thể lấy được thông tin định vị chính xác từ vệ tinh.

#### 2.3.2.1. GNSSClock

Lớp GNSSClock cung cấp thông tin về thời gian GNSS. Nó chứa các thông tin chi tiết về thời gian của hệ thống GNSS có trong điện thoại, bao gồm thời gian đồng hồ và các tham số khác liên quan đến độ trễ và độ lệch thời gian. Một số trường dữ liệu chính của lớp này được nhóm thu thập là:

- TimeNanos
- LeapSecond
- TimeUncertaintyNanos
- FullBiasNanos
- BiasNanos
- BiasUncertaintyNanos
- DriftNanosPerSecond
- DriftUncertaintyNanosPerSecond
- HardwareClockDiscontinuityCount

Lớp này giúp cung cấp thông tin chính xác về thời gian GNSS trong điện thoại, hỗ trợ việc đồng bộ hóa và tính toán vị trí từ các tín hiệu vệ tinh.

#### 2.3.2.2. GNSSMeasurement

Lớp GNSSMeasurement cung cấp dữ liệu đo lường được từ các vệ tinh GNSS, bao gồm thông tin về tín hiệu vệ tinh, chất lượng tín hiệu cùng các tham số liên quan. Các trường dữ liệu của lớp này được nhóm thu thập là:

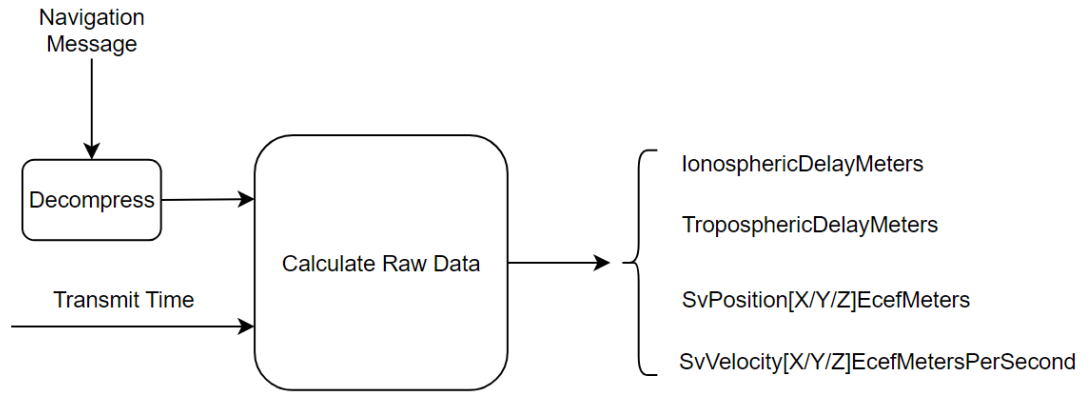
- Svid
- TimeOffsetNanos
- State
- ReceivedSvTimeNanos
- ReceivedSvTimeUncertaintyNanos
- Cn0DbHz
- PseudorangeRateMetersPerSecond
- PseudorangeRateUncertaintyMetersPerSecond
- AccumulatedDeltaRangeState
- AccumulatedDeltaRangeMeters
- AccumulatedDeltaRangeUncertaintyMeters
- CarrierFrequencyHz
- CarrierCycles
- CarrierPhase
- CarrierPhaseUncertainty
- MultipathIndicator
- SnrInDb
- ConstellationType
- AgcDb
- BasebandCn0DbHz
- FullInterSignalBiasNanos
- FullInterSignalBiasUncertaintyNanos
- SatelliteInterSignalBiasNanos
- SatelliteInterSignalBiasUncertaintyNanos
- CodeType
- ChipsetElapsedRealtimeNanos

Bằng cách sử dụng hai lớp trên, nhóm có thể truy cập và trích xuất các dữ liệu GNSS chi tiết, từ đó thực hiện các thuật toán xử lý dữ liệu để cải thiện độ chính xác của thiết bị.

## **2.4 Các tham số của vệ tinh**

### **2.4.1 Các tham số trong quá trình tính toán**

Việc tính toán vị trí của người dùng là sự kết hợp của ít nhất 4 vệ tinh trong không gian vậy nên việc tính toán các thông số của vệ tinh trong không gian là việc đầu tiên để có thể tính toán được vị trí của người dùng.



Hình 2.11 Sơ đồ khối của hệ thống tính toán vị trí và vận tốc của vệ tinh

Để có thể tính toán được vị trí của vệ tinh nhóm nghiên cứu cần 2 phần chính là bản tin điều hướng của vệ tinh và thời gian truyền bản tin đến người dùng. Trong phần bản tin điều hướng sẽ được đính kèm với các thông số Kepler phục vụ cho việc tính toán vị trí và vận tốc của vệ tinh

#### 2.4.2 Bản tin điều hướng của NASA

Bản tin điều hướng là một bản tin mô tả vị trí của vệ tinh trên bầu trời mà máy thu quan sát được. Bản tin điều hướng của NASA có định dạng Rinx 2 chứa các thông số về vệ tinh bao gồm cả các thông số Kepler. Bản tin điều hướng được NASA được công khai trên trang web: <https://cddis.nasa.gov/>. Nhóm nghiên cứu sử dụng một thư viện có sẵn của python là georinex được công khai trên github với đường dẫn: <https://github.com/geospace-code/georinex>. Bảng 1.1

#### 2.4.3 Các thông số Kepler

Với thư viện giải mã file định dạng Rinx được nhóm nghiên cứu sử dụng, file định dạng Rinx sẽ được giải mã thành các thông số Kepler được mô tả sử dụng trong Bảng 2.2

Các thông số Kepler sẽ cho nhóm nghiên cứu có thể tính toán được vị trí của vệ tinh thông qua phương trình Kepler. Dưới đây là bảng giải thích về các thông số Kepler được dùng trong việc tính toán

Bảng 2.2 Các thông số Kepler trong bản tin điều hướng

Thông số	Giải thích
$t_{oe}$	Epoch Time: thời gian tham chiếu của các tham số quỹ đạo
$\sqrt{a}$	Căn bậc 2 bán trục lớn
$e$	Độ lệch tâm quỹ đạo, cho biết mức độ quỹ đạo lệch khỏi hình tròn
$M_o$	Sự bất thường trung bình tại thời điểm tham chiếu
$\omega$	Argument of perigee
$i_o$	Độ nghiêng tại thời điểm tham chiếu
$\Omega_o$	Kinh độ của ascension node tại thời điểm tham chiếu

$\Delta n$	Sự thay đổi chuyển động trung bình từ giá trị chuẩn
$IDOT$	Tỉ lệ góc nghiêng
$\dot{\Omega}$	Tỉ lệ của node's right ascension
$c_{uc}, c_{us}$	Đôi số điều chỉnh của vĩ độ
$c_{rc}, c_{rs}$	Đôi số điều chỉnh của quỹ đạo
$c_{ic}, c_{is}$	Đôi số điều chỉnh của góc nghiêng
$a_0$	SV clock offset
$a_1$	SV clock drift
$a_2$	SV clock drift rate

#### 2.4.4 Các thông số vệ tinh

Sau khi giải mã được các bản tin điều hướng, nhóm nghiên cứu sẽ dùng những thông số Kepler này cùng với thời gian nhận bản tin để tính toán ra được vị trí (SvPosition) và vận tốc (SvVelocity) của vệ tinh trên bầu trời tại thời điểm người dùng nhận được bản tin.

##### 2.4.4.1. Vị trí và vận tốc của vệ tinh trong không gian

Vệ tinh GNSS (Hệ thống vệ tinh dẫn đường toàn cầu) được đặt trong các quỹ đạo tầm trung (Medium Earth Orbit - MEO) ở độ cao khoảng 20,000 km so với bề mặt Trái Đất. Các vệ tinh này bay với vận tốc khoảng 3,870 m/s (13,932 km/h), cho phép chúng hoàn thành một vòng quay quanh Trái Đất trong khoảng 11 giờ 58 phút. Hệ thống GNSS bao gồm các hệ thống nổi bật như GPS (Mỹ), GLONASS (Nga), Galileo (Liên minh châu Âu), và BeiDou (Trung Quốc), với tổng số lượng vệ tinh dao động từ 24 đến hơn 30 vệ tinh cho mỗi hệ thống. Các vệ tinh này được phân bố trong nhiều mặt phẳng quỹ đạo khác nhau để đảm bảo phủ sóng toàn cầu liên tục.

Để xác định chính xác vị trí của các vệ tinh và cung cấp thông tin định vị chính xác cho người dùng, GNSS sử dụng hệ tọa độ vuông góc không gian (Earth-Centered Earth-Fixed, ECEF). Trong hệ tọa độ này:

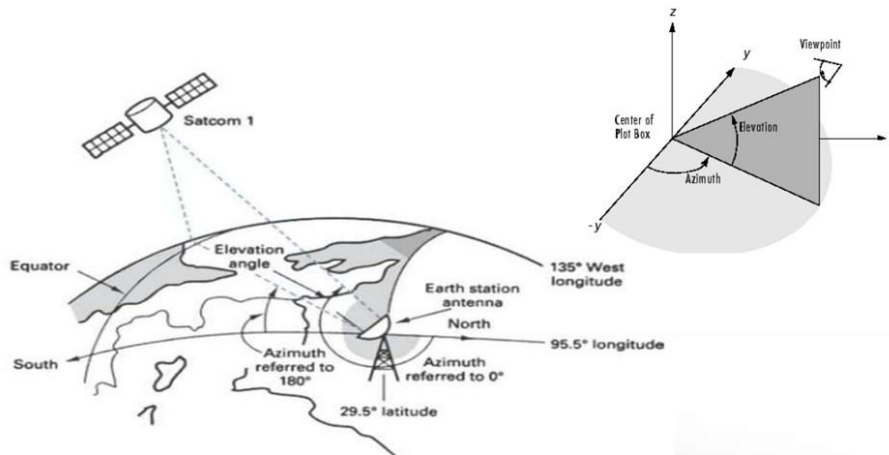
- Trục X hướng từ tâm Trái Đất về điểm gốc ở Xích đạo và kinh tuyến gốc.
- Trục Y hướng từ tâm Trái Đất về phía đông dọc theo Xích đạo.
- Trục Z hướng từ tâm Trái Đất về phía Bắc Cực.

Hệ tọa độ ECEF cho phép xác định vị trí của vệ tinh GNSS theo ba chiều trong không gian, giúp cải thiện độ chính xác của các phép đo định vị. GNSS có ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như dẫn đường, định vị cho các phương tiện giao thông, nghiên cứu khoa học, và ứng dụng trong các thiết bị di động, làm cho chúng trở thành công cụ không thể thiếu trong cuộc sống hiện đại.

Sai số về vị trí và vận tốc của vệ tinh sẽ ảnh hưởng trực tiếp đến vị trí và vận tốc của người dùng. Khi biết vị trí của vệ tinh, nhóm nghiên cứu sẽ biết được thời gian mà bản tin được gửi đi, nếu vị trí của vệ tinh có sai số lớn dẫn đến thời gian truyền bản tin bị sai lệch từ đó việc ước tính khoảng giả sẽ gây ra sai số lớn ảnh hưởng tới vị trí của người dùng.

#### 2.4.4.2. Góc ngẩng và góc phương vị

Góc ngẩng và góc phương vị là hai loại góc không thể thiếu trong việc xác định vị trí của người dùng trên mặt đất so với vệ tinh trên không gian. Chúng được mô tả bằng Hình 2.12 dưới đây.



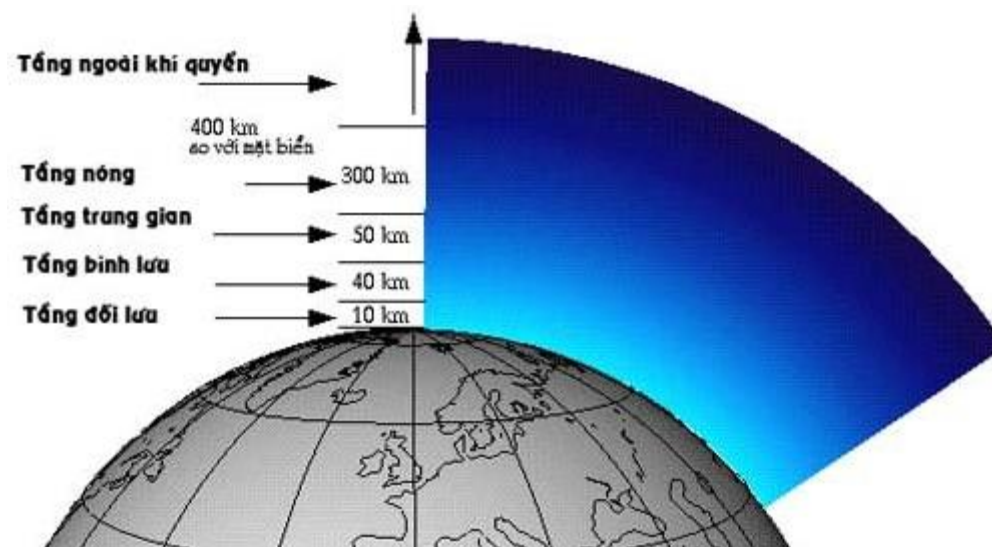
Hình 2.12 Góc ngẩng và góc phương vị

Góc ngẩng (elevation) là góc tạo bởi đường thẳng nối giữa người dùng và vệ tinh kết hợp với đường thẳng là hình chiếu của vệ tinh lên mặt phẳng tiếp tuyến tại điểm người dùng đang đứng như hình vẽ.

Góc phương vị (azimuth) là góc tạo bởi đường thẳng là hình chiếu của người dùng với vệ tinh và trục Y như hình vẽ.

#### 2.4.5 Ảnh hưởng của khí quyển Trái Đất đối với việc tính toán vị trí của người dùng

Các dịch vụ do hệ thống GNSS cung cấp được sử dụng rộng rãi trong các ứng dụng liên quan đến dân sự và cả quân sự. Tất cả các hệ thống GNSS đều bao gồm nhiều vệ tinh quay quanh Trái Đất ở độ cao khoảng 20,000km truyền qua tầng khí quyển của Trái Đất.



Hình 2.13 Các thành phần của khí quyển trái đất

Khí quyển trái đất gồm 4 thành phần:

- Tầng đối lưu: tầng thấp nhất trong bầu khí quyển Trái Đất tính từ bề mặt Trái Đất tới độ cao 16 km. Con người sống trong tầng đối lưu và gần như tất cả các thời tiết xảy ra ở tầng đối lưu. Hầu hết các đám mây xuất hiện ở đây, bao gồm các thành phần thủy tinh ( $N_2, O_2, CO_2$ , cùng với các khí vi lượng khác và thành phần hơi nước).
- Tầng bình lưu: từ độ cao trên tầng đối lưu đến khoảng 50 km. Ở đây không khí loãng, nước và bụi rất ít, không khí chuyển động theo chiều ngang là chính, rất ổn định.
- Tầng trung lưu: từ khoảng 50 km đến 80 km, nhiệt độ giảm theo độ cao đạt đến -75 độ C. Phần đỉnh tầng có một ít hơi nước, thỉnh thoảng có một vài vệt mây bạc gọi là mây dạ quang.
- Tầng điện ly là tầng bao gồm các electron tự do. Thành phần này phụ thuộc vào tần số và có thể ước tính từ các phép đo tần số kép (VD: tần số L1 và tần số L2).
- Tầng ngoài: trên 1,000 km đến 10,000 km, đây là vùng quá độ giữa khí quyển Trái Đất với khoảng không vũ trụ. Vì không khí ở đây rất loãng, nhiệt độ lại rất cao, một số phân tử và nguyên tử chuyển động với tốc độ cao có "vùng vẫy" thoát ra khỏi sự trói buộc của sức hút Trái Đất lao ra khoảng không vũ trụ.

Tại một thời điểm nhất định, máy thu có thể thu được thông tin của một số vệ tinh từ đó xây dựng giải pháp điều hướng riêng của mình. Tuy nhiên, những tín hiệu này dễ bị nhiễu bởi một số nguồn, gây ra lỗi trong phép đo từ đó làm giảm độ chính xác của việc định vị. Phần trình bày này sẽ tập trung vào: độ trễ của tín hiệu GNSS do bầu khí quyển Trái Đất gây ra, tập trung vào vùng gọi là tầng đối lưu và tầng điện ly.

## 2.5 Phương pháp Bình phương tối thiểu trọng số (Weighted Least Square)

Trong phần này chúng ta sẽ đi sâu hơn vào việc mô tả về quan sát khoảng giả (pseudorange). Từ các thông số khoảng giả thu được từ vệ tinh, ta phát triển một mô hình ước tính vị trí, vận tốc máy thu dựa trên phương pháp “bình phương tối thiểu có trọng số”(weight least square). Đồng thời phát hiện những vị trí được cho là bất thường do nằm ngoài tuyến đường di chuyển hoặc không có dữ liệu nhằm áp dụng phép nội suy đơn giản khôi phục các vị trí bị bất thường.

### 2.5.1 Ma trận hiệp phương sai

Ma trận hiệp phương sai là ma trận vuông gồm tập hợp các hiệp phương sai

của biến ngẫu nhiên  $X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$  nhiều chiều để cho thấy mức độ tương quan và phụ

thuộc giữa các biến. Đường chéo chính là các phần tử phương sai và các giá trị còn lại đối xứng qua đường chéo chính.



$$\Gamma = \begin{bmatrix} COV(x_1, x_1) & COV(x_1, x_2) & \cdots & COV(x_1, x_n) \\ COV(x_2, x_1) & COV(x_2, x_2) & \cdots & COV(x_2, x_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ COV(x_n, x_1) & COV(x_n, x_2) & \cdots & COV(x_n, x_n) \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Ma trận hiệp phương sai còn được biểu diễn dưới dạng sau:

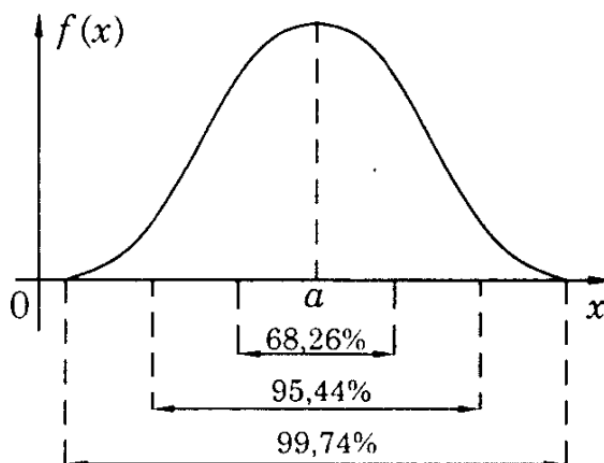
$$\Gamma = E((x - \mu_n)(x - \mu_n)^T) \quad (2.10)$$

### 2.5.2 Phân phối chuẩn

Đây là phân phối liên tục quan trọng và có ứng dụng rộng rãi nhất, còn có tên gọi là phân phối Gauss:

$$f(x; \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.11)$$

Có thể thấy hai tham số  $\mu, \sigma^2$  cũng là hai số đặc trưng quan trọng  $EX, VY$ . Về mặt đồ thị, đường cong có dạng hình chuông



Hình 2.14 Biểu đồ hàm mật độ phân phối chuẩn

Nếu ta lấy lân cận của  $a$  ( $EX$ - giá trị kỳ vọng), thì phần diện tích chắn bởi  $f(x)$  và trục hoành và  $x = a \pm \sigma$  sẽ có diện tích bằng 68,26% (đơn vị diện tích). Đó cũng chính là  $P(|X - a|) < \sigma = 68,26\%$  được gọi là  $1-\sigma$ .

### 2.5.3 Đơn giản hóa mô hình

Thiết bị thu GPS được lấy dữ liệu một cách đều đặn theo chu kỳ được chỉ định trước đến từ người dùng (ví dụ 1 mẫu/ giây theo yêu cầu). Máy thu sử dụng xung đồng hồ riêng để xác định một cách chính xác thời điểm  $T$  và ghi vào giá trị  $T$  này vào tệp dữ liệu quan sát được. Phép đo khoảng giả được mô tả bằng sơ đồ tại Hình 2.15. Quan sát thực tế có thể được biểu diễn đơn giản bởi công thức:

$$P^s = (T - T^s)c \quad (2.12)$$

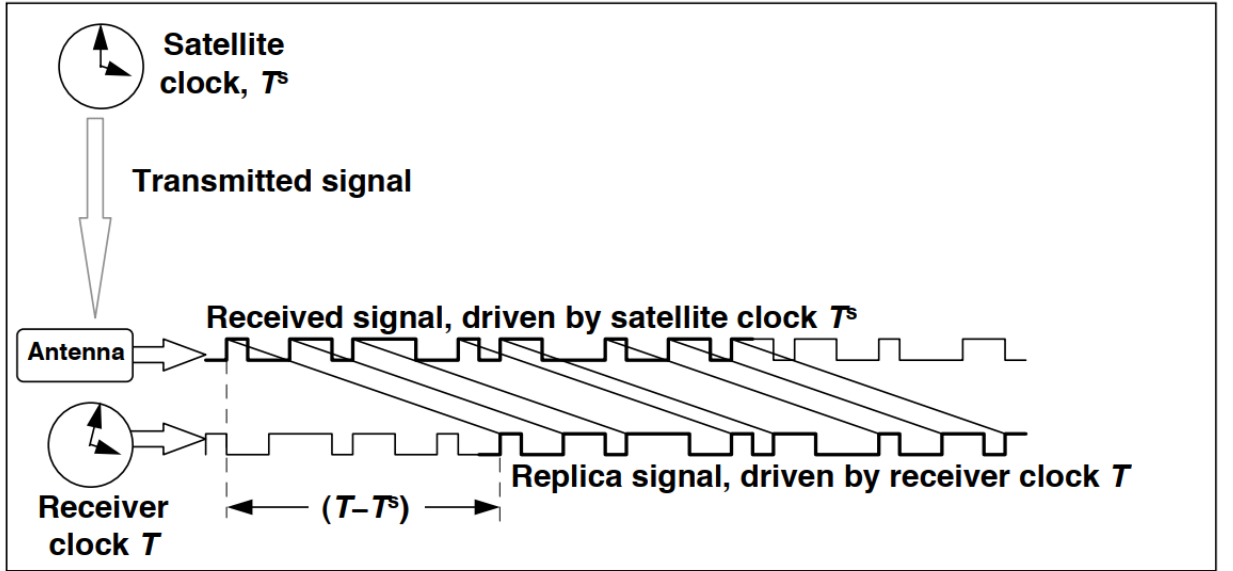
Trong đó:

$T$  là giá trị thể hiện xung đồng hồ máy thu nhận được tín hiệu,

$T^s$  là giá trị thể hiện xung đồng hồ vệ tinh truyền đi tín hiệu,

$P^s$  là khoảng giả cách ước lượng từ vệ tinh đến máy thu,

$C$  là hằng số tốc độ ánh sáng (trong chân không) = 299,792,458 m/s.



Hình 2.15 Sơ đồ minh họa cách quan sát “giả khoảng cách” thông qua các tín hiệu đồng hồ của vệ tinh và máy thu

Quan sát mô hình trên ta dễ dàng nhận thấy cần cải thiện độ sai lệch thời gian bằng cách đặt thời gian xung đồng hồ  $T$  bằng thời gian nhận  $t$  cộng thêm độ lệch đồng hồ cho cả hai thiết bị máy thu lẫn vệ tinh:

$$T = t + \tau,$$

$$T^s = t^s + \tau^s$$

Bằng sự thay thế trên cho ta một hàm biểu diễn khoảng giả theo thời gian thực tại thời điểm tín hiệu được nhận:

$$\begin{aligned} P^s(t) &= ((t + \tau) - (t^s + \tau^s))c \\ &= (t - t^s)c + c\tau - c\tau^s \\ &= \rho^s(t, t^s) + c\tau - c\tau^s, \end{aligned}$$

Trong đó:

$\rho^s(t, t^s)$  là khoảng cách từ máy thu (tại thời điểm nhận) đến vệ tinh (tại thời điểm truyền).

Tuy nhiên mô hình trên đã được đơn giản hóa cụ thể là giả định vận tốc ánh sáng trong khí quyển là  $c$  song nó lại vô cùng hữu ích để làm rõ một cách dễ hiểu cho hệ thống định vị GPS. Theo định lý Pythagoras, ta có thể viết:

$$\rho^s(t, t^s) = \sqrt{(x^s(t^s) - x(t))^2 + (y^s(t^s) - y(t))^2 + (z^s(t^s) - z(t))^2} \quad (2.13)$$

Một bản tin nhận về cho ta những thông số bao gồm vị trí vệ tinh  $(x^s, y^s, z^s)$  và độ lệch đồng hồ của vệ tinh  $\tau^s$ . Do đó ta còn lại một phương trình với 4 ẩn số là vị trí máy thu  $(x, y, z)$  và độ lệch đồng hồ máy thu  $\tau$ . Một lưu ý cần được đề cập đến ở đây: vị trí của vệ tinh phải được tính toán tại thời điểm truyền tín hiệu  $t^s$ , điều này là cực kỳ quan trọng trong việc ước tính khoảng giả do khoảng cách đến vệ tinh có thể thay đổi khoảng vài chục mét nếu thời điểm truyền tín hiệu bị sai lệch khoảng  $\frac{1}{100}$  giây từ đó dẫn đến sai lệch lớn cho mô hình ước tính. Bắt đầu với thời gian nhận  $t$ , thời gian truyền  $t^s$  có thể tính toán bằng một thuật toán lặp có tên “the light time equation” được mô tả [1] như sau:

$$\begin{aligned}
t^S(0) &= t = (T - \tau), \\
t^S(1) &= t - \frac{\rho^S(t, t^S(0))}{c}, \\
t^S(2) &= t - \frac{\rho^S(t, t^S(1))}{c}, \\
&\vdots \\
t^S(n) &= t - \frac{\rho^S(t, t^S(n-1))}{c}.
\end{aligned}$$

Trong đó vị trí vệ tinh được tính ở mỗi bước sử dụng các yếu tố Kepler từ bản tin nhận về, và thuật toán dừng lại khi khoảng cách tính toán hội tụ (không thay đổi nhiều hơn một mức đáng kể được đặt ra). Thuật toán trên bắt đầu với thời gian thực khi nhận tín hiệu, yêu cầu độ lệch đồng hồ máy thu – một tham số chưa biết nhưng với hầu hết các máy thu sẽ không vượt quá vài mili giây (nếu vượt qua, máy thu sẽ khởi động cơ chế tự đặt lại đồng hồ).

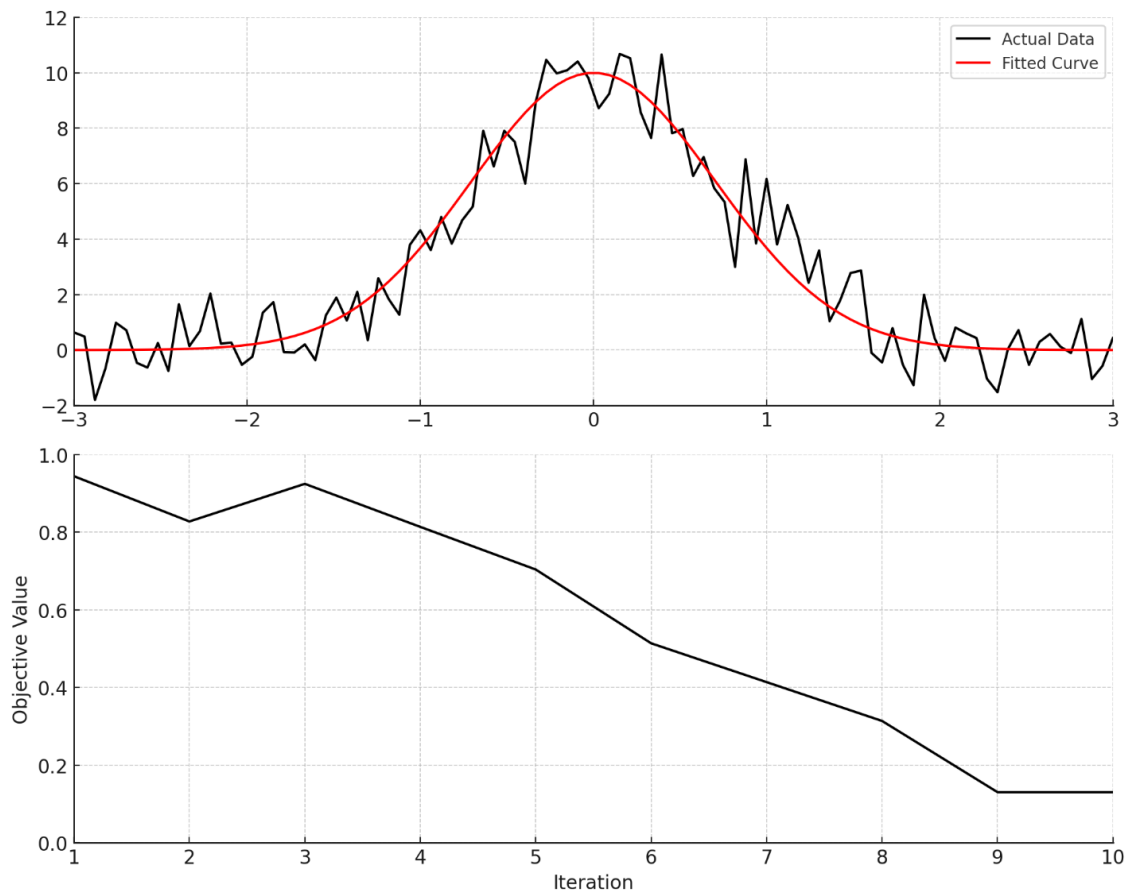
Và để tìm được 4 ẩn số còn thiếu là vị trí máy thu  $(x, y, z)$  và độ lệch đồng hồ máy thu  $\tau$  ta cần một hệ có ít nhất 4 phương trình đồng nghĩa để ước tính vị trí máy thu ta cần ít có được thông tin của ít nhất 4 vệ tinh. Hệ phương trình quan sát đơn giản hóa từ 4 vệ tinh trong tầm hoạt động của máy thu như sau:

$$\begin{aligned}
P^1 &= \sqrt{(x^1 - x)^2 + (y^1 - y)^2 + (z^1 - z)^2} + c\tau - c\tau^1 \\
P^2 &= \sqrt{(x^2 - x)^2 + (y^2 - y)^2 + (z^2 - z)^2} + c\tau - c\tau^2 \\
P^3 &= \sqrt{(x^3 - x)^2 + (y^3 - y)^2 + (z^3 - z)^2} + c\tau - c\tau^3 \\
P^4 &= \sqrt{(x^4 - x)^2 + (y^4 - y)^2 + (z^4 - z)^2} + c\tau - c\tau^4
\end{aligned} \tag{2.14}$$

Trong phương trình trên và các phương trình tiếp theo, các chỉ số trên của các tọa độ vệ tinh được dùng để xác định thứ tự vệ tinh, không phải là các số mũ. Trong phần tiếp theo, chúng ta sẽ giải hệ phương trình 4 ẩn số  $(x, y, z, \tau)$  bằng cách sử dụng phương pháp bình phương tối thiểu có trọng số một cách tổng quát hóa cho các hệ phương trình lớn hơn trong trường hợp có nhiều hơn 4 vệ tinh trong tầm nhìn máy thu bắt được tín hiệu.

#### 2.5.4 Thuật toán Gauss-Newton

Thuật toán Gauss-Newton là một phương pháp mở rộng của phương pháp Newton để tìm giá trị cực tiểu của hàm phi tuyến. Cụ thể nó được sử dụng để giải các bài toán bình phương tối thiểu phi tuyến tính, tương đương với việc đi cực tiểu hóa tổng các giá trị của hàm bình phương. Do tổng bình phương là một kết quả không thể âm nên thuật toán có thể xem như sử dụng phương pháp Newton để xấp xỉ lặp lại các nghiệm của các thành phần tổng, nhờ đó tiến tới việc cực tiểu hóa tổng. Ưu điểm của thuật toán là không cần sử dụng đến đạo hàm cấp hai vốn khó khăn và tốn nhiều thời gian tính toán giúp nó trở nên phổ biến trong các ứng dụng thực tế như định vị GPS, fitting mô hình phi tuyến và tối ưu hóa trong học máy.



Hình 2.16 Sự thay đổi của giá trị hàm mục tiêu (tổng bình phương sai số) qua từng lần lặp của thuật toán Gauss-Newton

Việc khớp đường cong mô phỏng với dữ liệu thực tế sau khi thực hiện thuật toán Gauss-Newton để tối thiểu hóa tổng bình phương sai số giữa dữ liệu thực tế và mô hình được biểu diễn trực quan tại Hình 2.16. Biểu đồ trên cho thấy sự quá trình hội tụ của thuật toán khi giá trị hàm mục tiêu giảm dần sau mỗi lần lặp, cho đến khi đạt được giá trị tối thiểu. Mô tả cụ thể của thuật toán như sau:

Cho  $m$  phép quan sát có một tập hàm  $\mathbf{r} = (\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_m)$  (thường được gọi là hàm tính độ dư) của  $n$  biến  $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_n)$  với điều kiện tiên quyết  $m \geq n$ , thuật toán Gauss-Newton sẽ sử dụng phép lặp để tìm ra giá trị của  $\beta$  sao cho tổng bình phương hàm tính độ dư được coi là nhỏ nhất có thể tìm ra

$$S(\beta) = \sum_{i=1}^m r_i(\beta)^2 \quad \min \quad (2.15)$$

Các bước thực hiện của thuật toán gauss-newton gồm 4 phần chính:

### 1. Khởi tạo:

Bắt đầu với một phỏng đoán ban đầu cho vector tham số  $\beta^{(0)}$  ở mức tối thiểu, giá trị này có thể được chọn ngẫu nhiên hoặc dựa trên những yếu tố đặc thù của bài toán được đưa ra.

### 2. Tính toán ma trận Jacobian:

Ma trận jacobian  $J_r$  là ma trận của các đạo hàm riêng từng phần theo hàm tính độ dư  $r$  theo tham số  $\beta$ , được tính bởi công thức:

$$(J_r)_{ij} = \frac{\partial r_i(\beta^{(s)})}{\partial \beta_j} \quad (2.16)$$

### 3. Cập nhật tham số:

Vector tham số  $\beta$  được cập nhật bằng công thức:

$$\beta^{(s+1)} = \beta^{(s)} + \Delta, \quad (2.17)$$

Với

$$\Delta = -(J^T J)^{-1} J^T r(\beta^{(s)})$$

Trong đó

$r(\beta^{(s)})$  là vector hàm tính độ dư tại biến mới nhất  $\beta^{(s)}$ ,

$J^T$  là ma trận chuyển vị của ma trận Jacobian.

Đặc biệt cần đảm bảo giả định mối quan hệ giữa số phép quan sát  $m$  với số lượng biến  $n$ :  $m \geq n$ , nếu không sẽ tạo nên một phép toán không thể giải khi số lượng phương trình nhỏ hơn số lượng biến cần tìm, điều này tương đương ma trận  $J^T J$  không thể nghịch đảo trong khi thực hiện tính toán.

### 4. Quá trình lặp

Việc thực hiện phép lặp lại các bước tính toán hàm dư và cập nhật tham số cho đến khi sự thay đổi của  $\beta$  dưới một ngưỡng nhất định hoặc khi giá trị của tổng bình phương của hàm  $r$  không giảm đáng kể. Điều này thường được đánh giá qua một tiêu chí hội tụ như:

$$\| -\beta^{(s)} \| < \epsilon,$$

hoặc

$$|S(\beta^{(s+1)}) - S(\beta^{(s)})| < \delta,$$

với  $\epsilon$  và  $\delta$  là các ngưỡng nhỏ đã được lựa chọn trước.

#### 2.5.5 Định vị vị trí bằng khoảng giả

##### 2.5.5.1. Mô hình tuyến tính

Để giải quyết vấn đề định vị điểm máy thu chúng ta cần tuyến tính hóa các phương trình quan sát “giả khoảng cách”, sau đó sử dụng phương pháp phân tích bình phương tối thiểu bằng việc áp dụng thuật toán Gauss-Newton đã được chỉ ra ở phần trước. Trước tiên, ta giả định rằng việc quan sát thực tế là tổng của một quan sát bởi mô hình cộng với một sai số

$$\begin{aligned} P_{\text{observerd}} &= P_{\text{model}} + \text{noise} \\ &= P(x, y, z, \tau) + v \end{aligned} \quad (2.18)$$

Tiếp theo, áp dụng khai triển định lý Taylor's nhằm mở rộng mô hình tính toán sử dụng các giá trị tham số khởi tạo  $(x_0, y_0, z_0, \tau_0)$ , đồng thời bỏ qua bậc hai và các bậc cao hơn của khai triển

$$\begin{aligned} P(x, y, z, \tau) &\cong P(x_0, y_0, z_0, \tau_0) + (x - x_0) \frac{\partial P}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial P}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial P}{\partial z} + (\tau - \tau_0) \frac{\partial P}{\partial \tau} \\ &= P_{\text{computed}} + \frac{\partial P}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial P}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial P}{\partial z} \Delta z + \frac{\partial P}{\partial \tau} \Delta \tau \end{aligned}$$

Các đạo hàm riêng trong biểu thức trên được tính toán bằng cách sử dụng các giá trị tham số khởi tạo  $(x_0, y_0, z_0, \tau_0)$ . Hàm tính toán độ dư được định nghĩa là sự sai lệch giữa quan sát thực tế và quan sát được tính toán bằng cách sử dụng các giá trị tham số khởi tạo:

$$\begin{aligned}\Delta P &= P_{\text{observed}} - P_{\text{computed}} \\ &= \frac{\partial P}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial P}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial P}{\partial z} \Delta z + \frac{\partial P}{\partial \tau} \Delta \tau + v\end{aligned}$$

Biểu thức trên có thể viết lại dưới dạng ma trận dưới đây:

$$\Delta P = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial x} & \frac{\partial P}{\partial y} & \frac{\partial P}{\partial z} & \frac{\partial P}{\partial \tau} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta \tau \end{bmatrix} + v$$

Với mỗi vệ tinh quan sát được trong tầm nhìn của máy thu ta được một phương trình như trên, vậy với  $m$  vệ tinh quan sát được (đảm bảo  $m \geq 4$ ) thì ta có thể khái quát hệ  $m$  phương trình này dưới dạng ma trận như sau:

$$\begin{bmatrix} \Delta P^1 \\ \Delta P^2 \\ \Delta P^3 \\ \vdots \\ \Delta P^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P^1}{\partial x} & \frac{\partial P^1}{\partial y} & \frac{\partial P^1}{\partial z} & \frac{\partial P^1}{\partial \tau} \\ \frac{\partial P^2}{\partial x} & \frac{\partial P^2}{\partial y} & \frac{\partial P^2}{\partial z} & \frac{\partial P^2}{\partial \tau} \\ \frac{\partial P^3}{\partial x} & \frac{\partial P^3}{\partial y} & \frac{\partial P^3}{\partial z} & \frac{\partial P^3}{\partial \tau} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P^m}{\partial x} & \frac{\partial P^m}{\partial y} & \frac{\partial P^m}{\partial z} & \frac{\partial P^m}{\partial \tau} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta \tau \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v^1 \\ v^2 \\ v^3 \\ \vdots \\ v^m \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Phương trình (2.19) thường được biểu diễn một cách đơn giản như sau:

$$\mathbf{b} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{v}$$

Biểu thức biểu thị mối quan hệ tuyến tính giữa hàm tính toán độ dư  $\mathbf{b}$  (quan sát thực tế trừ đi quan sát tính toán) và sự hiệu chỉnh đối với bộ tham số  $\mathbf{x}$ , ma trận cột  $\mathbf{v}$  chứa tất cả các thành phần gây nhiễu (cũng là thành phần chưa biết tại thời điểm hiện tại). Phương trình ma trận trên được gọi là “phương trình quan sát tuyến tính hóa”.

#### 2.5.5.2. Ma trận thiết kế

Ánh xạ từ thuật toán Gauss-Newton ta có ma trận Jacobian chính là ma trận thiết kế  $\mathbf{A}$ , nơi chứa các hệ số tuyến tính thực chất là các đạo hàm riêng của từng quan sát theo mỗi tham số và được tính toán bằng cách sử dụng các giá trị tham số khởi tạo. Từ phương trình quan sát để thu được “giả khoảng cách”, ta tìm ma trận thiết kế  $\mathbf{A}$  bằng cách lấy đạo hàm riêng cấp một theo từng tham số chưa biết. Phương trình quan sát “giả khoảng cách” có dạng:

$$P = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} + c\tau_0 - c\tau$$

Ta lấy đạo hàm riêng cấp 1 theo từng giá trị tham số khởi tạo  $(x_0, y_0, z_0, \tau_0)$  được ma trận thiết kế [2] của mỗi quan sát như sau:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{2(x-x_0)}{2\rho} & \frac{2(y-y_0)}{2\rho} & \frac{2(z-z_0)}{2\rho} & c \\ \frac{(x-x_0)}{\rho} & \frac{(y-y_0)}{\rho} & \frac{(z-z_0)}{\rho} & c \end{bmatrix}$$

Trong đó

$$\rho = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}$$

Từ trên ta được ma trận thiết kế  $A$  có dạng tổng quát dưới đây:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{x_0 - x^1}{\rho^1} & \frac{y_0 - y^1}{\rho^1} & \frac{z_0 - z^1}{\rho^1} & c \\ \frac{x_0 - x^2}{\rho^2} & \frac{y_0 - y^2}{\rho^2} & \frac{z_0 - z^2}{\rho^2} & c \\ \frac{x_0 - x^3}{\rho^3} & \frac{y_0 - y^3}{\rho^3} & \frac{z_0 - z^3}{\rho^3} & c \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_0 - x^m}{\rho^m} & \frac{y_0 - y^m}{\rho^m} & \frac{z_0 - z^m}{\rho^m} & c \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

### 2.5.5.3. Phương pháp bình phương tối thiểu

Ta cần xây dựng một lời giải cụ thể cho mô hình ước lượng mới bao gồm các phương trình quan sát tuyến tính hóa, ký hiệu cho bộ tham số được cập nhật của mô hình ước lượng mới là  $\hat{x}$ . Các “phần dư ước lượng” được định nghĩa là sự khác biệt giữa các quan sát thực tế và mô hình ước lượng mới cho các quan sát. Sử dụng dạng tuyến tính hóa của các phương trình quan sát, chúng ta có thể viết các “phần dư ước lượng” như sau:

$$\hat{v} = b - A\hat{x} \quad (2.21)$$

Theo phương pháp bình phương tối thiểu, ta cần đi thay đổi giá trị bộ tham số  $\hat{x}$  cho đến khi hàm mục tiêu tại công thức (2.15) được tối thiểu hóa:

$$\begin{aligned} S(x) &= \sum_{i=1}^m r_i(x)^2_{\min} \\ &= \sum_{i=1}^m (v_i)^2_{\min} \\ &= v^T v \\ &= (b - Ax)^T (b - Ax) \end{aligned}$$

Hàm mục tiêu trên tuân theo mục tiêu của thuật toán Gauss-Newton, điều này có nghĩa là chúng ta đang tối thiểu hóa tổng bình phương các “phần dư ước lượng”. Nếu chúng ta thay đổi  $x$  một lượng nhỏ thì  $S(x)$  cũng thay đổi ngoại trừ tại điểm giải pháp là vị trí thiết bị thu, nơi mà ta mong muốn nó không thay đổi (độ dốc của hàm bằng xấp xỉ 0 tại điểm làm hàm mục tiêu đạt giá trị nhỏ nhất). Ta minh họa mong muốn về sự thay đổi của hàm mục tiêu  $S(x)$  xấp xỉ giá trị rất nhỏ tiệm cận 0 để thỏa mãn giải pháp bình phương tối thiểu bằng các biến đổi [1] dưới:

$$\begin{aligned} \delta(S(\hat{x})) &= 0 \\ \delta\{(b - A\hat{x})^T (b - A\hat{x})\} &= 0 \\ \delta(b - A\hat{x})^T (b - A\hat{x}) + (b - A\hat{x})^T \delta(b - A\hat{x}) &= 0 \\ (-A\delta\hat{x})^T (b - A\hat{x}) + (b - A\hat{x})^T (-A\delta\hat{x}) &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(-2A\delta\hat{x})^T(b - A\hat{x}) &= 0 \\
(\delta x^T A^T)(b - A\hat{x}) &= 0 \\
\delta x^T(A^T b - A^T A\hat{x}) &= 0 \\
A^T A\hat{x} &= A^T b
\end{aligned}$$

Và cuối cùng ta được lời giải cho hệ phương trình chuẩn là:

$$\hat{x} = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (2.22)$$

#### 2.5.5.4. Hiệp phương sai và ma trận hiệp phương sai

Nếu các quan sát  $\mathbf{b}$  không có sai số và mô hình là hoàn hảo thì các ước lượng  $\hat{\mathbf{x}}$  được cho bởi biểu thức trên sẽ là hoàn hảo. Bất kỳ sai số  $\mathbf{v}$  nào trong các quan sát gốc  $\mathbf{b}$  sẽ được ánh xạ rõ ràng thành các sai số  $\mathbf{v}_x$  trong các ước lượng  $\hat{\mathbf{x}}$ . Cũng như công thức trên đã chứng minh, phép ánh xạ này sẽ có dạng tuyến tính giống như sau:

$$\mathbf{v}_x = (A^T A)^{-1} A^T \mathbf{v} \quad (2.23)$$

Nếu chúng ta có một giá trị kỳ vọng cho sai số trong dữ liệu thì có thể tính toán sai số kỳ vọng trong các tham số. “Ma trận hiệp phương sai” được định nghĩa là ma trận (bình phương) của các giá trị kỳ vọng của một sai số nhân với một sai số khác. Tức là:

$$C_{ij} = E(v_i v_j)$$

Một phần tử đường chéo  $C_{ij}$  được gọi là “phương sai” và thường được viết dưới dạng bình phương của độ lệch chuẩn:

$$\begin{aligned}
C_{ii} &= E(v_i^2) \\
&= \sigma_i^2
\end{aligned}$$

Chúng ta có thể định nghĩa ngắn gọn ma trận hiệp phương sai bằng phương trình ma trận sau:

$$\mathbf{C} = E(\mathbf{v}\mathbf{v}^T)$$

Bây giờ, chúng ta giả sử rằng có thể đặc trưng hóa sai số trong các quan sát bằng một giá trị duy nhất là phương sai

$$\sigma^2 = E(v^2)$$

Phương sai này được giả định là áp dụng cho tất cả  $\mathbf{m}$  quan sát. Chúng ta cũng giả sử rằng tất cả các quan sát là không tương quan, tức là:

$$E(v_i v_j) = 0 \text{ (với } i \neq j\text{)}$$

Do đó, chúng ta có thể viết ma trận hiệp phương sai của các quan sát dưới dạng ma trận đường chéo:

$$\mathbf{C}_\sigma = \sigma^2 \mathbf{I}$$



Trong đó  $I$  là ma trận đơn vị  $m \times m$ . Ma trận hiệp phương sai kỳ vọng trong các tham số cho lời giải bình phương tối thiểu sẽ có dạng đơn giản như sau:

$$\begin{aligned}
 C_x &= E(v_x v_x^T) \\
 &= E(((A^T A)^{-1} A^T v)((A^T A)^{-1} A^T v)^T) \\
 &= E((A^T A)^{-1} A^T v v^T A (A^T A)^{-1}) \\
 &= (A^T A)^{-1} A^T E(v v^T) A (A^T A)^{-1} \\
 &= (A^T A)^{-1} A^T C_\sigma A (A^T A)^{-1} \\
 &= (A^T A)^{-1} A^T (\sigma^2 I) A (A^T A)^{-1} \\
 &= \sigma^2 (A^T A)^{-1} \\
 &= \sigma^2 \times \langle \text{cofactor matrix} \rangle
 \end{aligned}$$

Cofactor matrix là trong phạm vi bài toán định vị còn được gọi là ma trận hiệp phương sai, trong đó ngầm hiểu ma trận được ưu tiên điều chỉnh bởi phương sai của các yếu tố quan sát đầu vào. Do các sai số quan sát định vị GPS phụ thuộc nhiều vào tình huống cụ thể do các yếu tố môi trường nên ta thường sử dụng ma trận này để đánh giá độ mạnh tương đối của việc quan sát hình học, từ đó định lượng mức độ sai sót trong các phép đo đạc, từ đó làm rõ mức độ kỳ vọng của sai số trong các ước lượng vị trí.

Ma trận hiệp phương sai cho các tham số ước lượng có thể được viết theo các thành phần của nó như sau:

$$\begin{aligned}
 C_x &= \sigma^2 (A^T A)^{-1} \\
 &= \sigma^2 \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} & \sigma_{x\tau} \\ \sigma_{yx} & \sigma_y^2 & \sigma_{yz} & \sigma_{y\tau} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_z^2 & \sigma_{z\tau} \\ \sigma_{\tau x} & \sigma_{\tau y} & \sigma_{\tau z} & \sigma_\tau^2 \end{bmatrix} \quad (2.24)
 \end{aligned}$$

Ví dụ về cách diễn giải các thành phần bên trong ma trận:

- Nếu sai số quan sát ở mức  $\sigma = 1$  mét, sai số trong tọa độ  $y$  sẽ ở mức  $\sigma_y$  mét
- Nếu sai số quan sát ở mức  $\sigma = 2$  mét, sai số trong tọa độ  $y$  sẽ ở mức  $2\sigma_y$  mét

Các phần tử ngoài đường chéo cho biết mức độ tương quan giữa các tham số. Nếu  $\sigma_{yz}$  là âm, điều này có nghĩa là một sai số dương trong  $y$  có thể sẽ đi kèm với một sai số âm trong  $z$ , và ngược lại. Một thước đo hữu ích của sự tương quan là "hệ số tương quan", được định nghĩa như sau:

$$\rho_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\sqrt{\sigma_i^2 \sigma_j^2}}$$

Hệ số tương quan là một thước đo thống kê phản ánh mức độ và hướng của mối quan hệ giữa hai biến số, ở bài toán trên nó chỉ phụ thuộc vào ma trận hiệp phương sai và không phụ thuộc vào phương sai quan sát  $\sigma^2$ . Hệ số này có giá trị nằm trong khoảng từ -1 đến +1.

- **Hệ số tương quan bằng +1** biểu thị mối quan hệ tương quan dương hoàn hảo, tức là khi một biến tăng thì biến kia cũng tăng theo một cách tuyến tính.
- **Hệ số tương quan bằng -1** biểu thị mối quan hệ tương quan âm hoàn hảo, tức là khi một biến tăng thì biến kia giảm theo một cách tuyến tính.
- **Hệ số tương quan bằng 0** biểu thị không có mối quan hệ tuyến tính giữa hai biến. Phương pháp bình phương tối thiểu có trọng số

Khi bắt nhiều vệ tinh để ước lượng vị trí, ta có thể sử dụng trọng số khi ước lượng vị trí giúp tối ưu hóa độ chính xác và tính ổn định của quá trình ước lượng. Bằng cách gán trọng số cao hơn cho các tín hiệu vệ tinh đáng tin cậy hơn và trọng số thấp hơn cho các tín hiệu ít tin cậy hơn, hệ thống có thể giảm thiểu ảnh hưởng của các sai số và nhiễu loạn, từ đó cung cấp kết quả ước lượng vị trí chính xác và tin cậy hơn. Các lý do cụ thể như sau:

1. Độ tin cậy khác nhau của tín hiệu vệ tinh
  - **Khoảng cách:** Vệ tinh ở xa hơn có thể có tín hiệu yếu hơn và dễ bị nhiễu hơn.
  - **Góc nhìn:** Vệ tinh ở góc nhìn thấp so với chân trời dễ bị nhiễu bởi vật cản như tòa nhà, cây cối hoặc địa hình.
  - **Tình trạng vệ tinh:** Một số vệ tinh có thể có tình trạng kỹ thuật tốt hơn hoặc tín hiệu ổn định hơn.
2. Ảnh hưởng của môi trường
  - **Nhiều đa đường (multipath interference):** Khi tín hiệu phản xạ từ các bề mặt khác trước khi đến máy thu, gây ra sai số trong việc đo khoảng cách.
  - **Tác động của khí quyển:** Tín hiệu GPS có thể bị bẻ cong hoặc trễ khi đi qua các lớp khí quyển như tầng đối lưu và tầng điện ly.
3. Tính đa dạng của dữ liệu
  - **Tối ưu hóa độ chính xác:** Bằng cách gán trọng số cao hơn cho các vệ tinh có tín hiệu đáng tin cậy hơn, ước lượng vị trí sẽ trở nên chính xác hơn.
  - **Giảm thiểu sai số:** Các quan sát có độ tin cậy thấp hơn sẽ ít ảnh hưởng đến kết quả ước lượng cuối cùng nếu chúng được gán trọng số thấp hơn.
4. Cải thiện tính ổn định của thuật toán
  - **Vệ tinh gần nhau:** Nếu hai vệ tinh có vị trí gần nhau trên quỹ đạo, chúng có thể cung cấp thông tin gần như trùng lặp. Gán trọng số hợp lý giúp giảm thiểu tác động của sự trùng lặp này.
  - **Tính đa dạng trong việc phân bố vệ tinh:** Trọng số giúp đảm bảo rằng các vệ tinh ở các vị trí khác nhau trên bầu trời đều được sử dụng một cách tối ưu.

Từ những lý do trên ta sử dụng phương pháp bình phương tối thiểu có trọng số (Weighted Least Squares, WLS) vốn là một biến thể của phương pháp bình phương tối thiểu thông thường, trong đó mỗi quan sát được gán một trọng số tương ứng. Trọng số này phản ánh độ tin cậy hoặc tầm quan trọng của từng quan sát trong

quá trình tối ưu hóa mô hình. Từ đó hàm mục trong phương pháp bình phương tối thiểu có trọng số tại công thức (2.15) được biểu diễn như sau:

$$S(x) = \sum_{i=1}^m W_i r_i(x)^2$$

min

Ta cập nhật thêm trọng số vào hệ phương trình chuẩn tại công thức (2.22) trong phương pháp mở rộng này:

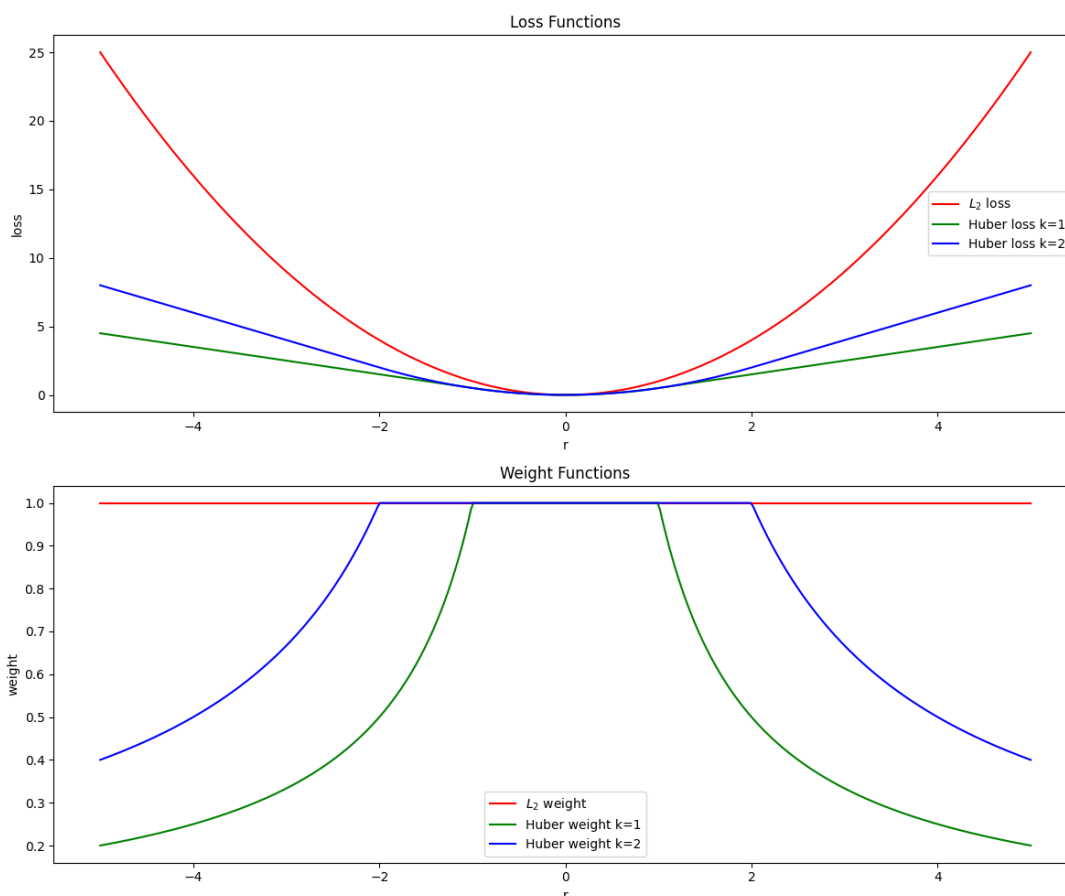
$$\hat{x} = (A^T W A)^{-1} A^T W b$$

Ma trận hiệp phương sai tại công thức (2.24) cũng được cập nhật thêm trọng số:

$$C_x = \sigma^2 (A^T W A)^{-1}$$

Do trong quá trình ước lượng vị trí, các quan sát ngoại lai có thể gây ra sai số lớn cho kết quả sau mỗi bước lặp nên ta sử dụng một biến thể khác của WLS là phương pháp “bình phương tối thiểu có trọng số tăng cường” (Robust WLS). Robust WLS được thiết kế để tăng cường khả năng chống lại các ảnh hưởng của các quan sát ngoại lai (outliers), sử dụng các kỹ thuật bổ sung để giảm thiểu tác động của chúng. Giống như WLS, Robust WLS sử dụng yếu tố “**trọng số**” để phản ánh độ tin cậy của từng quan sát và một yếu tố đặc trưng khác là việc thêm vào các hàm ảnh hưởng (influence functions) để nhận diện và giảm thiểu tác động của các quan sát ngoại lai. Cụ thể sau khi ước lượng phần dư  $r_i(x)$  ta sử dụng hàm **Huber** để cập nhật trọng số  $W_i$  [3]:

$$W_i = \begin{cases} 1 & , \text{với } |r_i| \leq k \\ \frac{k}{|r_i|} & , \text{với } |r_i| > k \end{cases}$$



Hình 2.17 Biểu đồ minh họa sự khác biệt giữa tổn thất  $L_2$  ( $L_2$  loss) và tổn thất Huber (Huber loss) với sự thay đổi trọng số  $W$  tương ứng

### Biểu Đồ Trên: Loss Function

#### 1. $L_2$ Loss (Đường màu đỏ):

- Hàm tổn thất  $L_2$  (còn gọi là Mean Squared Error, MSE) là hàm tổn thất bình phương thông thường. Nó tăng lên rất nhanh khi phần dư  $r$  tăng lên, đặc biệt là đối với các giá trị ngoại lai lớn.
- Công thức:  $L_2 = r^2$

#### 2. Huber Loss với $k = 1$ (Đường màu xanh lá):

- Hàm tổn thất Huber kết hợp giữa tổn thất  $L_2$  và tổn thất  $L_1$  (Mean Absolute Error, MAE). Khi phần dư  $r$  nhỏ hơn ngưỡng  $k$ , tổn thất Huber giống như tổn thất  $L_2$ . Khi  $r$  lớn hơn  $k$ , tổn thất Huber chuyển sang tổn thất  $L_1$  để giảm thiểu ảnh hưởng của các giá trị ngoại lai.
- Công thức:

$$\text{Huber loss} = \begin{cases} \frac{1}{2} r^2 & , \text{với } |r| \leq k \\ k \left( |r| - \frac{1}{2} k \right) & , \text{với } |r| > k \end{cases}$$

#### 3. Huber Loss với $k = 2$ (Đường màu xanh dương):

- Tương tự như Huber loss với  $k = 1$  nhưng ngưỡng  $k$  lớn hơn, do đó, phạm vi mà tổn thất giống  $L_2$  sẽ rộng hơn. Giúp làm giảm nhẹ hơn tác động của các giá trị ngoại lai so với Huber loss với  $k = 1$ .

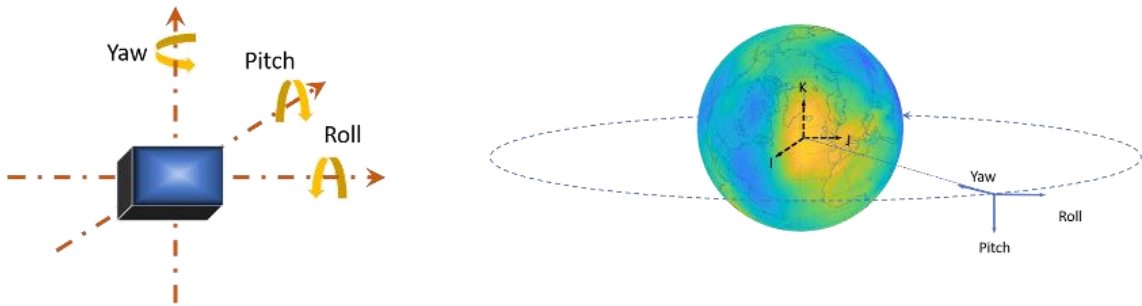
### Biểu Đồ Dưới: Weight Function

#### 1. $L_2$ Weight (Đường màu đỏ):

- Trong phương pháp bình phương tối thiểu ( $L2$ ), tất cả các trọng số đều bằng 1, tức là tất cả các quan sát đều được đối xử bình đẳng mà không quan tâm đến phần dư  $r$ .
2. Huber Weight với  $k = 1$  (Đường màu xanh lá):
- Trọng số Huber giảm khi phần dư  $r$  tăng lên và vượt qua ngưỡng  $k$ . Điều này giúp giảm thiểu ảnh hưởng của các giá trị ngoại lai.
3. Huber Weight với  $k = 2$  (Đường màu xanh dương):
- Tương tự như Huber weight với  $k = 1$  nhưng ngưỡng  $k$  lớn hơn, do đó, trọng số giảm chậm hơn khi phần dư  $r$  tăng lên. Nghĩa là nhiều phần dư sẽ giữ được trọng số cao hơn so với khi  $k = 1$ .

#### 2.5.5.5. Xoay khung tham chiếu vệ tinh

Khi tính toán với các thông số thu được tại vị trí người dùng, vị trí vệ tinh là một vector được khớp với hệ quy chiếu ECEF lấy tâm trái đất làm gốc, lúc này trái đất tương đương với một hệ trục được chọn làm gốc với các phép quay cơ bản trong hệ tọa độ 3D như tại Hình 2.18.



Hình 2.18 Biểu diễn các trục quay cơ bản trong không gian 3 chiều

Ở đây ta bỏ qua độ lệch của trục trái đất, khi trái đất tự quay quanh bản thân chính là đang thực hiện một phép quay theo góc Yaw, góc quay được xác định đơn giản bằng quy tắc “bàn tay phải”: cuộn bàn tay phải để ngón cái hướng theo chiều của trục (ở đây là trục Oz), hướng cuộn tự nhiên của lòng bàn tay chính là hướng quay trái đất từ Tây sang Đông. Dựa vào phép quay được xác định, ta có ma trận quay quanh trục Oz như sau [4]:

$$R_z(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Vị trí của người dùng đang được tính toán tại thời điểm  $T$ . Tín hiệu GPS rời khỏi vệ tinh tại thời điểm  $T^S = T - \tau$  và đến người dùng sau  $\tau$  giây. Trong khi tính toán vị trí của người dùng, chúng ta sẽ tính toán các vị trí của vệ tinh tại  $T - \tau$  thời điểm phát tín hiệu. Nhưng khoảng thời  $\tau$ , Trái Đất đã quay được một góc  $\omega_E \tau$  trong đó  $\omega_E$  là tốc độ quay của Trái Đất. Chúng ta phải quay các vector vị trí vệ tinh một lượng tương ứng để chúng được biểu thị trong hệ quy chiếu của người dùng hay chính là hệ quy chiếu ECEF tại thời điểm  $T$ . Thông thường một vector vị trí mới được xác định bằng công thức quay vật thể:

$$x(T) = R_z(\alpha) \times x(T - \tau) \quad (2.26)$$

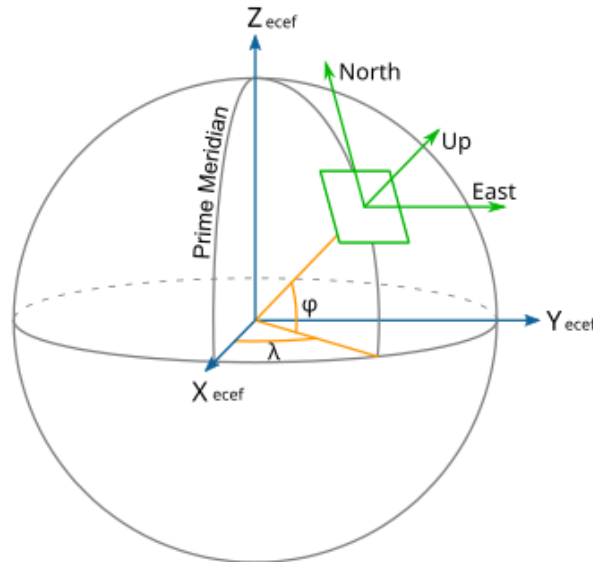
Nhưng ở bài toán hiện tại, trái đất quay đồng nghĩa với việc ta đang tịnh tiến một hệ trục tọa độ so với một điểm cũ chứ không đơn thuần là tịnh tiến một điểm

cũ so với hệ trục tọa độ cố định nên ma trận quay cần được thực hiện phép chuyển vị để đáp ứng mối liên hệ tương đối giữa hệ trục tọa độ với điểm cần cập nhật lại [4]. Ta được công thức phép quay khung tham chiếu cuối cùng:

$$x(T) = R_z(\alpha)^T \times x(T - \tau)$$

$$x(T) = \begin{bmatrix} \cos(\omega_E \tau) & (\omega_E \tau) & 0 \\ -\sin(\omega_E \tau) & \cos(\omega_E \tau) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times x(T - \tau)$$

### 2.5.6 Phát hiện điểm ngoại lai



Hình 2.19 Mô tả hệ tọa độ Đông-Bắc-Lên (East-North-Up, viết tắt là ENU), thường được sử dụng trong các ứng dụng định vị và địa lý

Hệ tọa độ ENU là một hệ tọa độ địa phương dùng trong định vị và trắc địa, định nghĩa các vị trí theo ba trục vuông góc: Đông (East), Bắc (North), và Lên (Up). Hệ tọa độ này thường được sử dụng vì nó phù hợp với cảm nhận trực quan của con người về các hướng trên bề mặt Trái Đất. Giải thích chi tiết về hệ tọa độ ENU bao gồm:

#### 1. Các thành phần và định hướng:

- **Mặt phẳng tiếp tuyến:** Mặt phẳng tạo bởi các trục Đông và Bắc được gọi là mặt phẳng tiếp tuyến địa phương. Mặt phẳng này tiếp xúc với bề mặt Trái Đất tại điểm gốc.
- **Hướng thẳng đứng:** Trục Lên xác định hướng thẳng đứng tại điểm gốc, vuông góc với mặt phẳng tiếp tuyến địa phương.

#### 2. Góc tọa độ:

- **Góc tọa độ của hệ ENU** là một điểm quan tâm trên bề mặt Trái Đất, có thể là vị trí của một máy thu GPS hoặc bất kỳ điểm nào khác nơi các phép đo được thực hiện.

#### 3. Các trục:

- **Đông (E):** Trục Đông là tiếp tuyến với bề mặt Trái Đất và chỉ về phía đông địa lý. Hướng này vuông góc với trục Bắc và nằm trong mặt phẳng chân trời địa phương.

- **Bắc (N):** Trục Bắc cũng là tiếp tuyến với bề mặt Trái Đất và chỉ về phía bắc địa lý. Nó nằm trong mặt phẳng chân trời địa phương và vuông góc với cả hai trục Đông và Lên.
- **Lên (U):** Trục Lên vuông góc với bề mặt Trái Đất tại điểm gốc và chỉ ra xa trung tâm Trái Đất, hiệu quả là chỉ về phía đỉnh trời.

Để chuyển đổi từ hệ tọa độ ECEF sang hệ tọa độ ENU ta cần ba bước chính:

1. Xác định tọa độ gốc trong hệ ECEF:  $(X_0, Y_0, Z_0)$
2. Chuyển đổi tọa độ gốc sang tọa độ địa lý:  $(\varphi_0, \lambda_0, h_0)$
3. Chuyển đổi tọa độ từ ECEF sang ENU bằng cách sử dụng ma trận chuyển đổi [5]:

$$\begin{bmatrix} E \\ N \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\lambda_0) & \cos(\lambda_0) & 0 \\ -\sin(\varphi_0)\cos(\lambda_0) & -\sin(\varphi_0)\sin(\lambda_0) & \cos(\varphi_0) \\ \cos(\varphi_0)\cos(\lambda_0) & \cos(\varphi_0)\sin(\lambda_0) & \sin(\varphi_0) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Sau khi thực hiện các phép chuyển đổi ta cần quan tâm đến 2 tham số để phát hiện điểm ngoại lai đó là “vector vận tốc” (hệ ENU) và “vector tọa độ” (hệ địa lý). Do khi thực hiện các phép quan sát, ta sử dụng các địa hình tương đối bằng phẳng, không có địa hình leo núi hoặc độ dốc cao nên rõ ràng sự thay đổi của độ cao theo thời gian là tương đối nhỏ và gần như tuân theo một phân phối chuẩn. Giải pháp đưa ra là ước lượng giá trị trung bình  $\mu$  và độ lệch chuẩn  $\sigma$  để xác định các điểm ngoại lai nằm ngoài khoảng “ $\mu + 3\sigma$ ”.

### 2.5.7 Phép nội suy khôi phục điểm ngoại lai

Như ở phần trên ta đã phát hiện được các điểm được cho là ngoại lai, kết hợp cùng với những điểm không có hoặc không đủ dữ liệu vệ tinh để quan sát (số lượng vệ tinh  $< 4$ ), ta đánh dấu những mốc thời gian mà tại đó không thể ước lượng tọa độ vị trí máy thu. Dựa vào toàn bộ tập dữ liệu thu được, ta cần một phép nội suy đơn giản để ước lượng lại tọa độ vị trí máy thu và cập nhật ma trận hiệp phương sai tại thời điểm đó.

Để có một phép nội suy mượt mà mà không bị ảnh hưởng bởi các điểm ngoại lai, ta sử dụng “phép nội suy Akima” giúp đảm bảo rằng các đoạn tuyến tính không tạo ra các dao động không mong muốn, điều này thường gặp phải khi sử dụng các phương pháp nội suy bậc cao hơn như spline cubic. Phép nội suy Akima sử dụng các độ dốc của các đoạn tuyến tính giữa các điểm dữ liệu để tính toán giá trị nội suy. Độ dốc này được tính sao cho nó không bị ảnh hưởng quá nhiều bởi các điểm ngoại lai.

1. Tính độ dốc của các đoạn tuyến tính

Giả sử chúng ta có một tập hợp các điểm dữ liệu  $(x_i, y_i)$ . Đầu tiên, tính độ dốc của đoạn tuyến tính giữa mỗi cặp điểm liên tiếp:

$$m_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i},$$

trong đó  $m_i$  độ dốc của đoạn thẳng giữa điểm  $i$  và  $i + 1$ .

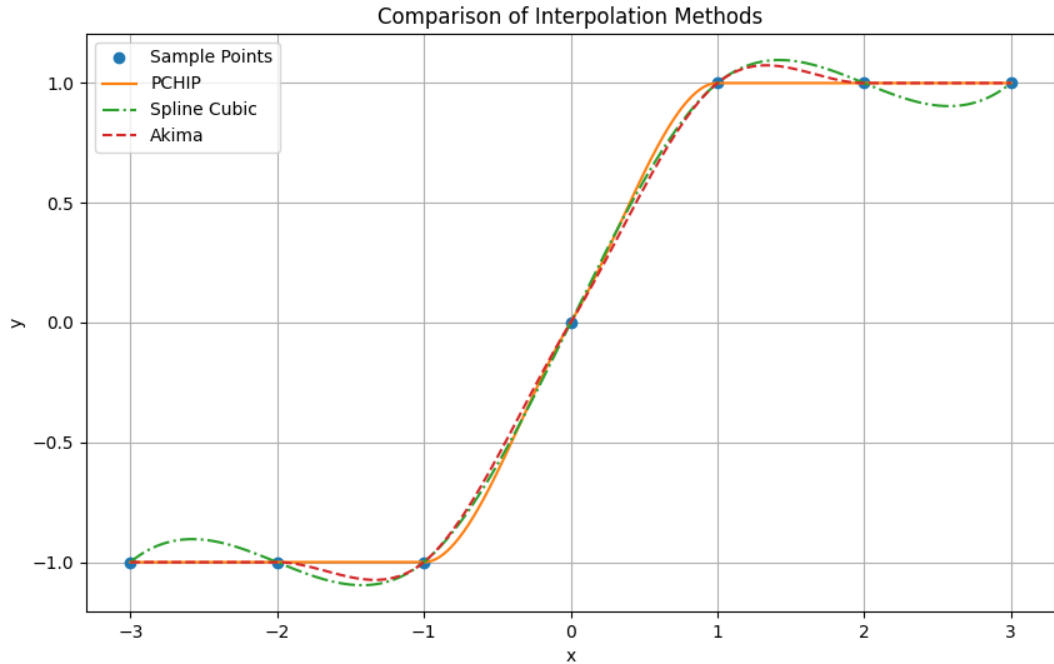
2. Tính độ dốc trung bình có trọng số

Để tính độ dốc tại một điểm nội suy, Akima sử dụng độ dốc trung bình của các đoạn tuyến tính lân cận, nhưng với trọng số được điều chỉnh để giảm ảnh hưởng của các điểm ngoại lai. Độ dốc tại điểm  $i$  được tính như sau:

$$m_i = \frac{w_{i+1}m_{i-1} + w_im_i}{w_{i+1} + w_i},$$

trong đó trọng số  $w_i$  được tính dựa trên sự khác biệt giữa các độ dốc lân cận:

$$w_i = |m_{i+1} - m_{i-1}|$$



Hình 2.20 Biểu đồ so sánh các phương pháp nội suy khác nhau từ một tập hợp các điểm dữ liệu.

Ta có thể quan sát sự khác biệt giữa các phép nội suy bằng biểu đồ tại Hình 2.20. Các phương pháp nội suy được so sánh bao gồm PCHIP, spline cubic, và nội suy Akima. Mỗi phương pháp có các đặc điểm riêng:

- **PCHIP:** Đường nội suy PCHIP duy trì độ mượt mà và không tạo ra các dao động không mong muốn giữa các điểm mẫu. Nó giữ nguyên độ dốc tại các điểm mẫu và phù hợp cho các ứng dụng yêu cầu sự liên tục của độ dốc.
- **Spline Cubic:** Đường spline cubic có xu hướng mượt mà hơn PCHIP nhưng có thể tạo ra các dao động nhỏ giữa các điểm mẫu. Điều này làm cho spline cubic phù hợp cho các ứng dụng yêu cầu sự mượt mà tối đa của đường nội suy.
- **Akima:** Đường nội suy Akima ít bị ảnh hưởng bởi các điểm ngoại lai và không tạo ra các dao động không mong muốn. Nó đảm bảo rằng các đoạn tuyến tính giữa các điểm mẫu là mượt mà và không bị ảnh hưởng bởi các giá trị ngoại lai.

Rõ ràng để loại bỏ sự ảnh hưởng của các yếu tố ngoại lai tới việc nội suy tọa độ ta ưu tiên sử dụng phép nội suy Akima cho từng chiều riêng lẻ  $(x, y, z)$  của tọa độ điểm bị mất.

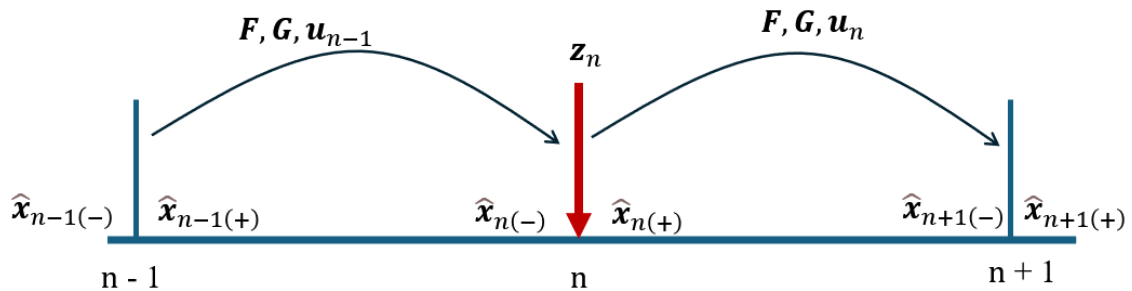


## 2.6 Bộ lọc Kalman

Kí hiệu được sử dụng chung:

- Chữ thường, in đậm đề cập tới vector:  $\mathbf{x}$
- Chữ in hoa, in đậm đề cập tới ma trận:  $\mathbf{F}$
- Chữ thường, không in đậm là phần tử trong vector:  $x$
- Chữ in hoa, không in đậm là những phần tử trong ma trận:  $X$

Cấu trúc của một bộ lọc Kalman gồm có 2 phần tham khảo [6] mô tả các bước dự đoán và cập nhật.



Hình 2.21 Mô tả dự đoán và cập nhật điển hình của bộ lọc Kalman

Kí hiệu  $\hat{\mathbf{x}}$ : dùng để diễn tả trạng thái ước tính.

**Bước dự đoán (chỉ số là dấu -)**: Từ trạng thái ước tính  $\hat{\mathbf{x}}_{n-1(+)}$  tại thời điểm  $n-1$ , sử dụng ma trận chuyển đổi trạng thái  $\mathbf{F}$ , ma trận điều khiển  $\mathbf{G}$ , và tín hiệu điều khiển  $\mathbf{u}_n$  để ước tính trạng thái tiếp theo  $\hat{\mathbf{x}}_{n(-)}$  tại thời điểm  $n$ .

**Bước cập nhật (chỉ số là dấu +)**: Khi nhận được giá trị đo lường  $\mathbf{z}_n$  tại thời điểm  $n$ , trạng thái ước tính  $\hat{\mathbf{x}}_{n(-)}$  được điều chỉnh để đưa ra trạng thái chính xác hơn  $\hat{\mathbf{x}}_{n(+)}$ .

Quá trình này lặp lại cho các thời điểm tiếp theo  $n+1$  với các bước tương tự, từ  $\hat{\mathbf{x}}_{n(+)}$  đến  $\hat{\mathbf{x}}_{n+1(-)}$  rồi  $\hat{\mathbf{x}}_{n+1(+)}$ , duy trì tính chính xác của trạng thái hệ thống qua các bước dự đoán và cập nhật liên tục.

### 2.6.1 Bước dự đoán ( Prediction step)

#### 2.6.1.1. Phương trình ngoại suy trạng thái

$$\hat{\mathbf{x}}_{n(-)} = \mathbf{F}\hat{\mathbf{x}}_{n-1(+)} + \mathbf{G}\mathbf{u}_n \quad (2.28)$$

Trong đó:

- $\hat{\mathbf{x}}_{n(-)}$ : Vecto trạng thái ước tính của bước dự đoán tại thời điểm  $n$
- $\hat{\mathbf{x}}_{n-1(+)}$ : Vecto trạng thái ước tính của bước cập nhật tại thời điểm  $n-1$
- $\mathbf{u}_n$ : Vecto đầu vào điều khiển
- $\mathbf{F}$ : Ma trận chuyển trạng thái
- $\mathbf{G}$ : Ma trận điều khiển

Ước tính trạng thái hệ thống  $\mathbf{x}$  tại thời điểm  $n$  sử dụng  $\hat{\mathbf{x}}_{n-1(+)}$  tại thời điểm  $n-1$  được gọi là dự đoán  $\hat{\mathbf{x}}_{n(-)}$  kết hợp với tích  $\mathbf{G}\mathbf{u}_n$  đầu vào điều khiển. Nó cũng là ước tính tiên nghiệm vì nó áp dụng trước cho một phép đo.

Trong đồ án này phương trình được triển khai từ một mô hình tuyến tính chuyển động có mối quan hệ giữa vị trí (khoảng cách) và vận tốc của hệ chất điểm:

$$\begin{cases} x_{n+1} = x_n + \dot{x}_n \Delta t \\ y_{n+1} = y_n + \dot{y}_n \Delta t \\ z_{n+1} = z_n + \dot{z}_n \Delta t \end{cases}$$

Từ đó có thể rút ra các thành phần tương ứng sau theo lý thuyết ma trận và phương trình (2.28):

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} x_{n+1} \\ y_{n+1} \\ z_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & \Delta t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_n \\ \dot{y}_n \\ \dot{z}_n \end{bmatrix}$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{n+1,n} \quad \mathbf{F} \quad \hat{\mathbf{x}}_{n,n} \quad \mathbf{G} \quad \mathbf{u}_n$$

Chú ý: trong báo cáo này  $\Delta t = 1$ : khoảng thời gian để đo được hay lấy mẫu có giá trị bằng 1.

#### 2.6.1.2. Phương trình ngoại suy hiệp phương sai

$$\mathbf{P}_{n(-)} = \mathbf{F} \mathbf{P}_{n-1(+)} \mathbf{F}^T + \mathbf{Q} \quad (2.29)$$

Trong đó:

$\mathbf{P}_{n(-)}$ : Ma trận hiệp phương sai của trạng thái ước tính tại thời điểm  $n(-)$

$\mathbf{P}_{n-1(+)}$ : Ma trận hiệp phương sai của trạng thái ước tính tại thời điểm  $n-1(+)$  (dùng để ước tính cho thời điểm  $n(-)$ )

$\mathbf{F}$ : Ma trận chuyển trạng thái

$\mathbf{Q}$ : Ma trận hiệp phương sai nhiễu quá trình

$\mathbf{F}^T$ : Chuyển vị của ma trận chuyển trạng thái

Bộ lọc Kalman tính toán và truyền đi hiệp phương sai lỗi trạng thái tại thời điểm  $n$  được cung cấp bởi thông tin của thời điểm  $n-1$ . Nó được biểu diễn bằng ma trận hiệp phương sai  $\mathbf{P}_{n(-)}$ , cũng được biết đến như là ma trận hiệp phương sai tiên nghiệm, là thước đo mức độ chính xác của các ước tính so với hệ thống thực.  $\mathbf{P}_{n-1(+)}$  biểu diễn cho ma trận hiệp phương sai ước tính tốt nhất ở thời điểm trước  $n-1(+)$ .

Ở trong báo cáo này  $\mathbf{P}_{n(-)}$  phụ thuộc vào  $\mathbf{Q}$  sẽ là ma trận hiệp phương sai của vận tốc,  $\mathbf{P}_{n-1(+)}$  là ma trận hiệp phương sai của của trạng thái ước tính tại thời điểm  $n-1(+)$  và ma trận  $\mathbf{F}$  như phần 2.6.1.1.

### 2.6.2 Bước cập nhật (Update step)

#### 2.6.2.1. Phương trình phần dư đo lường

Phần dư đo lường cho biết các phép đo khớp với mô hình đo lường tốt như thế nào, tức là các phép đo thực tế khác với các phép đo dự đoán như thế nào.

$$\mathbf{y}_n = \mathbf{z}_n - \mathbf{H} \hat{\mathbf{x}}_{n(-)} \quad (2.30)$$

Trong đó:

$\mathbf{y}_n$ : Vecto nhiễu ngẫu nhiên (phần dư đo lường) tại thời điểm  $n$

- $z_n$ :** Vecto đo lường chứa giá trị đo lường thực tế tại thời điểm  $n$
- $H$ :** Ma trận đo lường
- $\hat{x}_{n(-)}$ :** Vecto trạng thái được ước tính tại thời điểm  $n(-)$  của bước dự đoán

Ma trận đo lường  **$H$**  ở đây có thể dùng để làm tỉ lệ (scaling), lựa chọn trạng thái (state selection) và kết hợp các trạng thái (combination of states). Ở đây vì sử dụng để quan sát các giá trị  $x, y, z$  nên ma trận  **$H$**  sẽ đóng vai trò lựa chọn trạng thái như ma trận đơn vị  $3 \times 3$  (xem lại ma trận đơn vị ở đây).

**$y_n$**  là một dấu hiệu cho thấy mô hình dự đoán so với các giá trị đo lường thực tế  **$z_n$**  tốt như thế nào. Nếu sự khác biệt này bằng 0, điều đó có nghĩa là các phép đo thực tế bằng với các giá trị đã dự đoán, do đó ước tính tiên nghiệm  **$\hat{x}_{n(-)}$**  được giả định là ước tính tốt nhất của hệ thống thực.

#### 2.6.2.2. Phương trình độ lợi Kalman – trọng số (Kalman Gain):

$$K_n = P_{n(-)} H^T (H P_{n(-)} H^T + R_n)^{-1} \quad (2.31)$$

Trong đó:

- $K_n$ :** Độ lợi Kalman (Kalman Gain)
- $P_{n(-)}$ :** Ma trận hiệp phương sai ở phần dự đoán
- $H$ :** Ma trận đo lường
- $R_n$ :** Ma trận hiệp phương sai nhiễu đo lường
- $K_n$ :** Độ lợi Kalman (Kalman Gain)

Độ lợi Kalman chỉ đơn giản là cân nhắc tác động từ mô hình so với các phép đo. Khi  **$R_n$**  càng nhỏ và  **$P_{n(-)}$**  càng nhỏ thì  **$K_n$**  nhỏ, ngược lại  **$K_n$**  sẽ rất lớn khi  **$R_n$**  rất nhỏ.  **$R_n$**  được sử dụng ở trong báo cáo này sẽ là ma trận hiệp phương sai của  **$z_n$**  giá trị đo lường thực tế tại thời điểm  $n$ .

#### 2.6.2.3. Phương trình cập nhật trạng thái

$$\hat{x}_{n(+)} = \hat{x}_{n(-)} + K_n y_n \quad (2.32)$$

Trong đó:

- $\hat{x}_{n(+)}$ :** Vecto trạng thái ước tính (đầu ra hệ thống)
- $\hat{x}_{n(-)}$ :** Vecto trạng thái ước tính ở phần dự đoán
- $K_n$ :** Độ lợi Kalman (Kalman Gain)
- $y_n$ :** Vecto nhiễu ngẫu nhiên (phần dư đo lường)

Nếu độ lợi  **$K_n$**  bằng không, điều đó có nghĩa là chỉ có mô hình  **$\hat{x}_{n(-)}$**  được tin cậy và khi độ lợi được tăng lên, nó có thể được coi là sự tin tưởng hơn vào các phép đo  **$y_n$** .

#### 2.6.2.4. Phương trình ma trận cập nhật hiệp phương sai

$$P_{n(+)} = (I - K_n H) P_{n(-)} \quad (2.33)$$

Trong đó:

- $P_{n(+)}$ :** Ma trận hiệp phương sai ước tính của trạng thái hiện tại  $n(+)$ .

$P_{n(-)}$ : Ma trận hiệp phương sai ước tính ở phần dự đoán  
 $H$ : Ma trận đo lường  
 $I$ : Ma trận đơn vị  
 $K_n$ : Độ lợi Kalman (Kalman Gain)

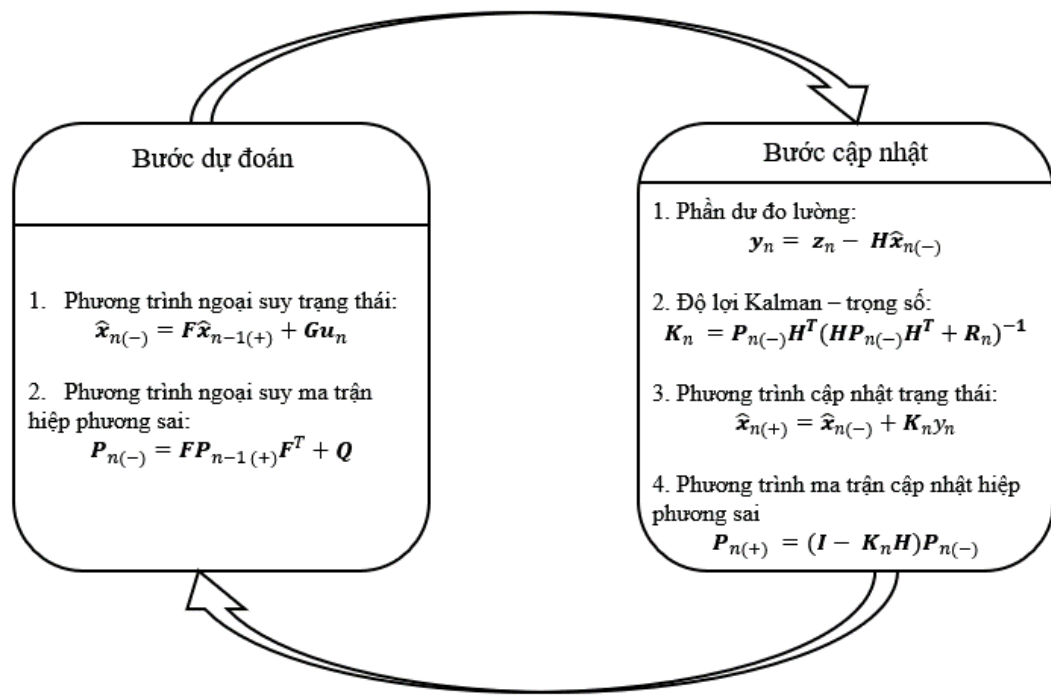
Dựa trên giá trị của  $K_n$ , bộ lọc Kalman cũng cập nhật sự không chắc chắn  $P_{n(+)}$  của dự đoán mới của nó  $\hat{x}_{n(+)}$ . Ở báo cáo này ma trận  $I$  là ma trận đơn vị 3x3.

### 2.6.3 Tóm tắt

Các kí hiệu toán học cho phương trình dự đoán và cập nhật của thuật toán Kalman Filter sẽ được trình bày ở Bảng 2.3 và tóm tắt các bước cũng như phương trình ở Hình 2.22.

Bảng 2.3 Bảng tóm tắt kí hiệu

Kí hiệu	Ý nghĩa
$\hat{x}_{n(-)}$	Vecto trạng thái được ước tính tại thời điểm n của bước dự đoán
$\hat{x}_{n-1(+)}$	Vecto trạng thái được ước tính tại thời điểm n-1 của bước cập nhật
$u_n$	Vecto đầu vào điều khiển dùng để ước tính trạng thái $\hat{x}_{n(-)}$ tại bước dự đoán.
$F$	Ma trận chuyển trạng thái
$G$	Ma trận điều khiển
$P_{n-1(+)}$	Ma trận hiệp phương sai tại thời điểm n-1 của bước cập nhật
$P_{n(-)}$	Ma trận hiệp phương sai tại thời điểm n của bước dự đoán
$Q$	Ma trận hiệp phương sai nhiễu quá trình
$\hat{x}_{n(+)}$	Vecto trạng thái ước tính (đầu ra hệ thống)
$z_n$	Vecto đo lường tại thời điểm n
$y_n$	Vecto phần dư đo lường
$H$	Ma trận đo lường
$I$	Ma trận đơn vị
$K_n$	Độ lợi Kalman (Kalman Gain)
$R_n$	Ma trận hiệp phương sai nhiễu đo lường ứng với $z_n$



Hình 2.22 Sơ đồ hoàn chỉnh về hoạt động của Bộ lọc Kalman.

#### 2.6.4 Khoảng cách Mahalanobis

Công thức được tham khảo từ [7]:

$$d = \sqrt{(x_n - \mu)^T C^{-1} (x_n - \mu)} \quad (2.34)$$

Tính khoảng cách từ một điểm  $x_n$  đến tâm ( $\mu$ ) được xác định bởi các thuộc tính liên quan với ma trận hiệp phương sai ( $C$ ), là ma trận ứng với  $x_n$ .

Ở báo cáo này các tọa độ x,y,z theo hệ tọa độ ECEF sẽ được sử dụng tính toán khoảng cách Mahalanobis để loại bỏ các điểm bất thường. Khoảng cách Mahalanobis được áp dụng cho công thức (2.30) trong bước cập nhật và ma trận P công thức (2.29) trong bước dự đoán của Kalman Filter. Ta có công thức khoảng cách Mahalanobis với từng lần  $n$  như sau:

$$d_n = \sqrt{(z_n - H \cdot x_n)^T C^{-1} (z_n - H \cdot x_n)} \quad (2.35)$$

Trong đó:

- $d_n$ : Khoảng cách Mahalanobis tại thời điểm  $n$
- $z_n - H \cdot x_n$ : Phần dư đo lường (2.30)
- $(z_n - H \cdot x_n)^T$ : Chuyển vị của phần dư đo lường
- $C$ : Ma trận hiệp phương sai của  $\vec{x}_n$  tại mỗi thời điểm  $n$

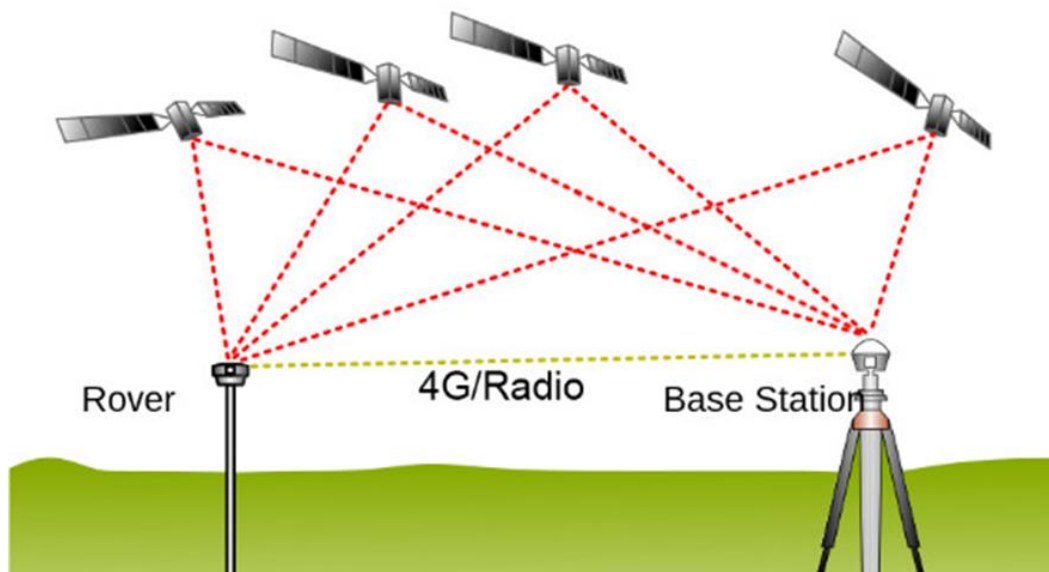
#### 2.7 Định vị động học thời gian thực (Real Time Kinematic)

Định vị Động thời gian thực (RTK) là một kỹ thuật GNSS vì sai xuất hiện vào giữa những năm 1990, cung cấp khả năng định vị hiệu suất cao trong phạm vi gần của một trạm gốc.

Từ góc độ kiến trúc, RTK bao gồm một trạm gốc, một hoặc nhiều thiết bị người dùng di động (rover) và một kênh liên lạc mà qua đó trạm gốc phát thông tin đến người dùng theo thời gian thực.

Kỹ thuật này dựa trên các nguyên lý sau:

- Trong khu vực có bầu trời trong, các lỗi chính trong quá trình xử lý tín hiệu GNSS là không đổi, do đó chúng sẽ bị triệt tiêu khi sử dụng xử lý vi sai. Điều này bao gồm lỗi lệch đồng hồ vệ tinh, lỗi quỹ đạo vệ tinh, độ trễ tầng điện ly và độ trễ tầng đối lưu.
- Nhiễu của các phép đo sóng mang nhỏ hơn nhiều so với các phép đo mã giả. Tuy nhiên, việc xử lý các phép đo sóng mang gặp phải vấn đề gọi là "độ bất định pha sóng mang," một số nguyên không xác định của lần bước sóng sóng mang, cần được xác định để tái tạo đầy đủ các phép đo từ sóng mang.
- Độ bất định pha có thể được cố định đối với các phép đo vi sai tần số kép cho hai máy thu gần nhau.
- Trạm gốc phát sóng vị trí đã biết rõ của nó cùng với các phép đo mã và sóng mang tại các tần số L1 và L2 và L5 cho tất cả các vệ tinh trong tầm nhìn. Với thông tin này, thiết bị di động xác định vị trí của nó so với trạm gốc với độ chính xác cao. Bằng cách cộng thêm sai số vị trí của trạm gốc, thiết bị di động được định vị trong một hệ tọa độ toàn cầu.



Hình 2.23 Hệ thống RTK cơ bản

Kỹ thuật RTK có thể được sử dụng cho các thiết bị người dùng di động có khoảng cách lên đến 10 hoặc 20 km so với trạm gốc, mang lại độ chính xác chỉ vài centimet trong vị trí của thiết bị di động. RTK được sử dụng rộng rãi trong các ứng dụng khảo sát.

RTK là một công cụ mạnh mẽ và hữu ích cho nhiều ngành công nghiệp và ứng dụng, nhờ vào độ chính xác cao, khả năng định vị thời gian thực và nhiều ưu điểm như:

- Độ chính xác cao: RTK cung cấp độ chính xác định vị cao, thường chỉ trong vài centimet, rất hữu ích cho các ứng dụng yêu cầu độ chính xác cao như khảo sát, xây dựng, và nông nghiệp chính xác.
- Định vị thời gian thực: RTK cho phép định vị trong thời gian thực, giúp người dùng có thể nhận được kết quả ngay lập tức mà không cần phải chờ đợi quá trình xử lý dữ liệu sau này.
- Khả năng hiệu chỉnh lỗi: RTK sử dụng kỹ thuật vi sai để loại bỏ các lỗi phổ biến trong tín hiệu GNSS, như lỗi lệch đồng hồ vệ tinh, lỗi quỹ đạo vệ tinh, độ trễ tầng điện ly và độ trễ tầng đối lưu, cải thiện đáng kể độ chính xác của kết quả định vị.
- Độ ổn định cao: Khi đã hội tụ, RTK cung cấp độ ổn định và độ tin cậy cao trong kết quả định vị, điều này rất quan trọng cho các ứng dụng yêu cầu sự chính xác và ổn định liên tục.

Những hạn chế chính của RTK bao gồm:

- Phạm vi giới hạn so với vị trí của trạm gốc.
- Cần có một kênh liên lạc cho các ứng dụng thời gian thực.
- Cần có thời gian hội tụ để cố định độ mơ hồ pha. Thời gian này phụ thuộc vào thuật toán xử lý và khoảng cách giữa trạm gốc và thiết bị di động, và dao động từ vài giây đến vài phút.
- Để tránh việc khởi động lại quá trình xử lý, thiết bị di động phải theo dõi liên tục các tín hiệu GNSS. Điều này làm cho RTK không phù hợp cho các ứng dụng đô thị.

## 2.8 Kết luận chương 2

Chương 2 đã cung cấp chi tiết những lý thuyết về dữ liệu sử dụng trong đề tài, các thuật toán triển khai cũng như những công cụ được sử dụng trong dự án. Những kiến thức này đóng vai trò rất quan trọng trong chương tiếp theo. Chương 3 sẽ là phần trình bày về cách thiết kế và triển khai hệ thống.

## CHƯƠNG 3. THIẾT KẾ VÀ TRIỂN KHAI HỆ THỐNG

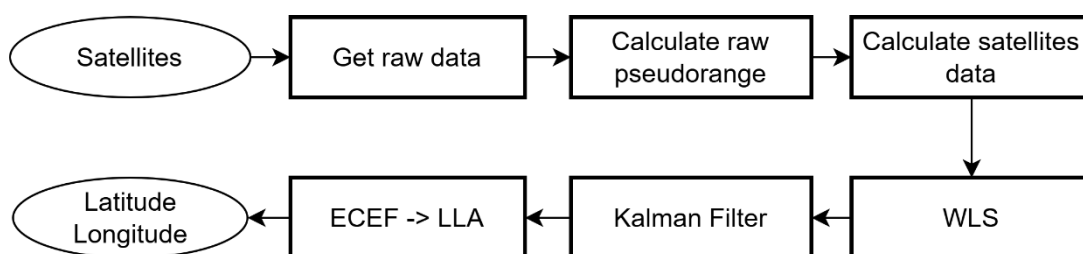
Trong chương 3 này, nhóm trình bày về quy trình thiết kế và các bước triển khai hệ thống tính toán và tối ưu độ chính xác của vị trí tọa độ địa lý. Nội dung chính bao gồm sơ đồ khối của hệ thống, sơ đồ của các khối có trong hệ thống và cách mà nhóm triển khai các khối này thành ứng dụng trong thực tế.

### 3.1 Tổng quan hệ thống

#### 3.1.1 Kiến trúc hệ thống

Nhóm nghiên cứu hai giải pháp tối ưu độ chính xác, giải pháp thứ nhất là sử dụng phương pháp WLS để tính toán tọa độ vị trí, sau đó dùng bộ lọc Kalman để ước tính vị trí tiếp theo, giảm sai lệch giữa các tọa độ, hay nói cách khác là tuyến tính hóa các tọa độ. Giải pháp thứ hai là sử dụng phương pháp RTK tính toán trực tiếp ra các tọa độ vị trí.

Hình 3.1 dưới đây mô tả các khối có trong hệ thống tính toán tọa độ thứ nhất (sau đây gọi là hệ thống thứ nhất).



Hình 3.1 Sơ đồ khối hệ thống tính toán tọa độ thứ nhất

Hệ thống thứ nhất bao gồm 6 khối chính:

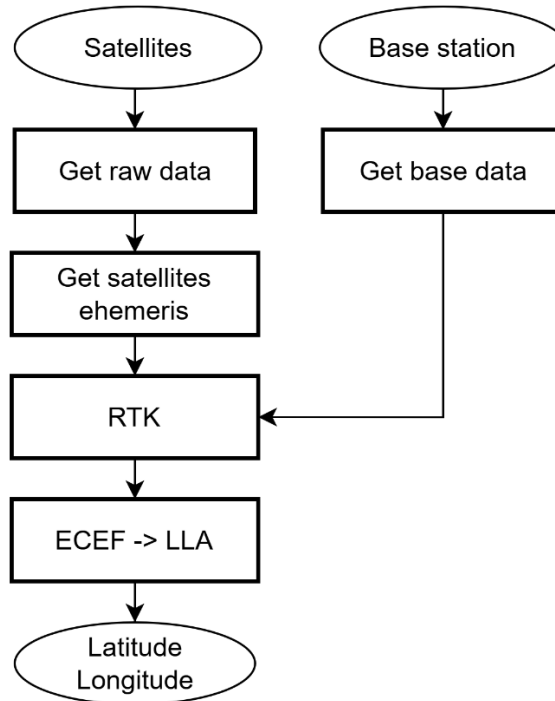
- Khối thu dữ liệu thô GNSS: Các vệ tinh liên tục phát tín hiệu định vị xuống Trái đất. Khi có yêu cầu thu dữ liệu thô, app điện thoại do nhóm xây dựng thu lại các tín hiệu, sau đó xuất file .csv bao gồm 36 trường dữ liệu như đã trình bày trong phần 2.2. File .csv này trở thành đầu vào cho khối tiếp theo.
- Khối tính khoảng cách giữa điện thoại và vệ tinh: Sau khi có đầu vào là file .csv chứa các dữ liệu thời gian của điện thoại và thời gian của vệ tinh, khối này tiến hành đồng bộ hai loại thời gian, từ đó tính được RawPseudorangeMeters là khoảng cách giả giữa điện thoại và vệ tinh (Chưa bao gồm các sai số khác).
- Khối lấy dữ liệu vệ tinh: Sau khi nhận đầu vào là file .csv chứa các thông tin trích xuất trực tiếp từ cảm biến, khối sử dụng thông tin về thời gian có trong file .csv để lấy được dữ liệu Ephemeris của các vệ tinh mà điện thoại thu được tín hiệu, từ đó tính toán ra vị trí và vận tốc của vệ tinh.
- Khối Weighted Least Squares: Dựa vào khoảng cách và tọa độ vệ tinh đã tính được từ trước, áp dụng phương pháp WLS để giải hệ phương trình tọa độ, từ đó đưa ra tọa độ tương ứng với các mốc thời gian thu được tín hiệu.
- Khối Kalman Filter: Khối bộ lọc thực hiện ước tính tọa độ tiếp theo dựa trên tọa độ hiện tại, so sánh tọa độ ước tính với tọa độ tính được bằng phương pháp WLS, sau đó đưa ra kết quả cuối cùng là tọa độ có độ sai lệch



ít nhất. Sau khi đi qua bộ lọc, tập dữ liệu tọa độ được “làm mịn”, giảm chênh lệch giữa các tọa độ.

- Khối ECEF → LLA: Chuyển tọa độ vị trí điện thoại vừa tính được từ hệ tọa độ ECEF sang hệ tọa độ địa lý (vĩ độ, kinh độ, độ cao).

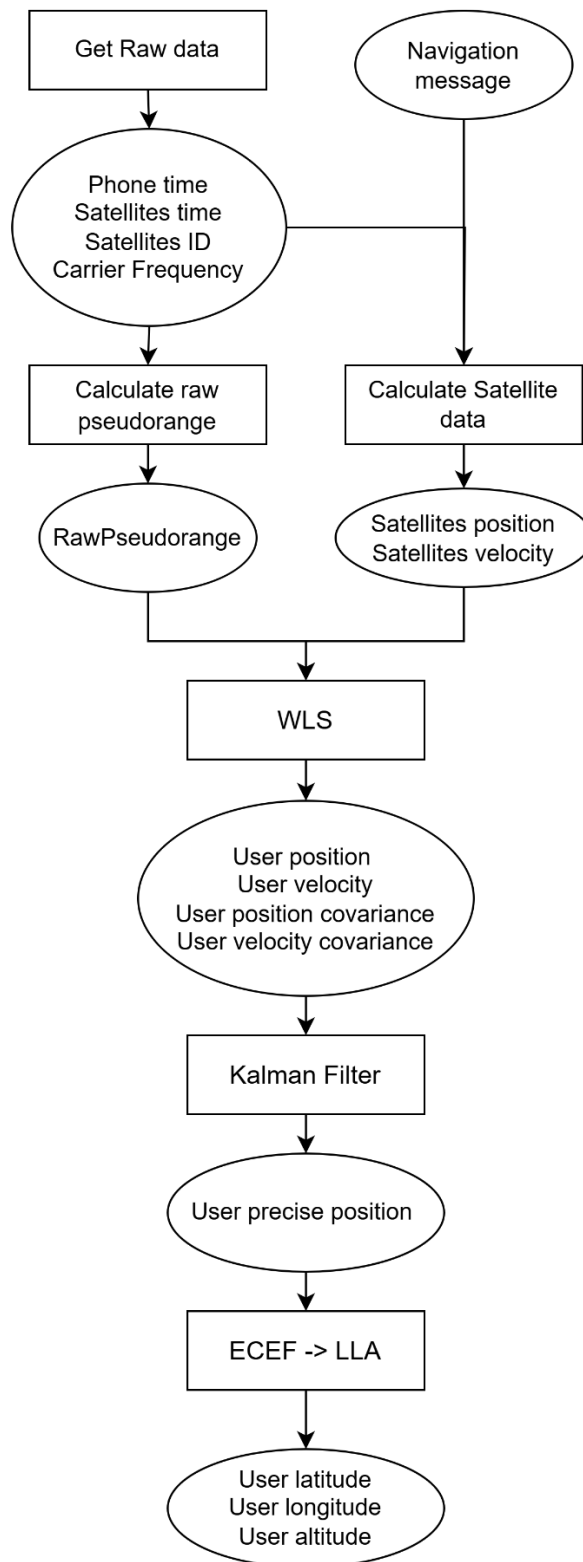
Từ đầu vào là tín hiệu định vị thu được từ vệ tinh, sau khi đưa vào hệ thống tính toán, ta có đầu ra là tọa độ địa lý của điện thoại, gồm vĩ độ, kinh độ và độ cao.



Hình 3.2 Sơ đồ khối hệ thống tính toán tọa độ thứ hai

Hệ thống thứ hai có cơ chế hoạt động khác với hệ thống thứ nhất. Thay vì tính toán ra tọa độ vị trí và vận tốc của vệ tinh rồi đưa vào giải phương trình tọa độ, hệ thống sử dụng RTK yêu cầu đầu vào là Ephemeris trực tiếp của vệ tinh. Từ dữ liệu GNSS thô, khối lấy Ephemeris của vệ tinh thu được file dữ liệu chứa các thông tin về Ephemeris. Mặt khác, khối lấy dữ liệu base thu được file dữ liệu chứa thông tin của các trạm base xung quanh. Hai khối này trực tiếp đưa dữ liệu vào khối RTK để tính toán và đưa ra kết quả cuối cùng là tọa độ vị trí điện thoại.

### 3.2 Sơ đồ luồng dữ liệu



Hình 3.3 Sơ đồ luồng dữ liệu của hệ thống thứ nhất

Hình 3.3 mô tả các luồng dữ liệu và hoạt động của chúng trong toàn bộ hệ thống thứ nhất. Sau khi bắt được tín hiệu vệ tinh, khối lấy dữ liệu vệ tinh xử lý và đưa ra luồng dữ liệu đầu tiên là khối các dữ liệu GNSS thô, bao gồm các thông tin chính là thời gian nhận tín hiệu có trong điện thoại, thời gian vệ tinh gửi tín hiệu xuống, thông tin định danh vệ tinh, pha truyền sóng,... Luồng dữ liệu này sau đó

trở thành đầu vào của khối tính khoảng cách giả, từ đó ta có dữ liệu tiếp theo là khoảng cách giả giữa vệ tinh và điện thoại.

Mặt khác, luồng dữ liệu GNSS thô kết hợp cùng bản tin điều hướng lấy được từ trang chủ của NASA được đưa vào khối tính toán dữ liệu vệ tinh. Khối này tính toán và đưa ra kết quả là các thông tin về tọa độ vị trí vệ tinh và vận tốc của vệ tinh mà điện thoại thu được.

Ba luồng dữ liệu Khoảng cách giả, Tọa độ vệ tinh và vận tốc vệ tinh đồng thời trở thành đầu vào của khối WLS để được đầu ra là tọa độ vị trí, vận tốc của người dùng, ngoài ra còn có ma trận covarian của tọa độ và của vận tốc. Các tọa độ này tiếp tục được đưa vào khối Kalman Filter để xử lý và đưa ra tọa độ ước tính có độ chính xác cao hơn theo hệ tọa độ ECEF. Tập tọa độ chính xác này được đưa vào khối chuyển tọa độ từ hệ tọa độ ECEF sang hệ tọa độ địa lý. Ta nhận được kết quả cuối cùng là vĩ độ, kinh độ và độ cao của vị trí điện thoại.

### 3.3 Thiết kế hệ thống

Do nội dung tổng hợp đầy đủ thiết kế và triển khai hệ thống của 5 thành viên khá dài, nội dung phần 3.3 sau đây tập trung vào thiết kế 3 khối chính bao gồm khối WLS (Weight Least Square), khối KF (Kaman Filter) và khối Real Time Kinematic (RTK). Các khối từ 3.3.1 tới khối 3.3.3 được trình bày chi tiết trong quyển đề tài cùng tên do 2 thành viên Trần Minh Đức và Phạm Thị Xuân Mai trong nhóm thực hiện.

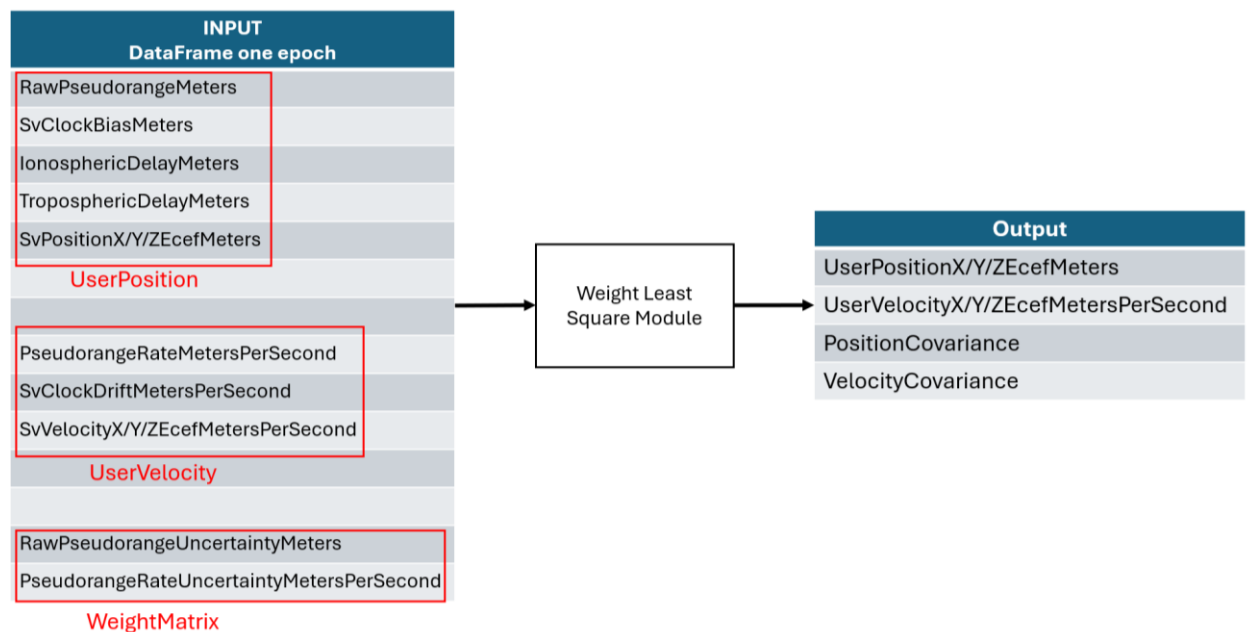
#### 3.3.1 Thiết kế khối thu thập dữ liệu GNSS

#### 3.3.2 Thiết kế khối tính khoảng giả

#### 3.3.3 Thiết kế khối lấy dữ liệu từ vệ tinh

#### 3.3.4 Thiết kế khối WLS

##### 3.3.4.1. WLS cho từng khung thời gian



Hình 3.4 Sơ đồ tổng quan khối chức năng bình phương tối thiểu có trọng số (WLS)

Đầu vào của khối WLS là một bảng dữ liệu bao gồm 14 trường dữ liệu (sắp xếp theo từng cột) trong một đơn vị thời gian thu được, cụ thể như sau:

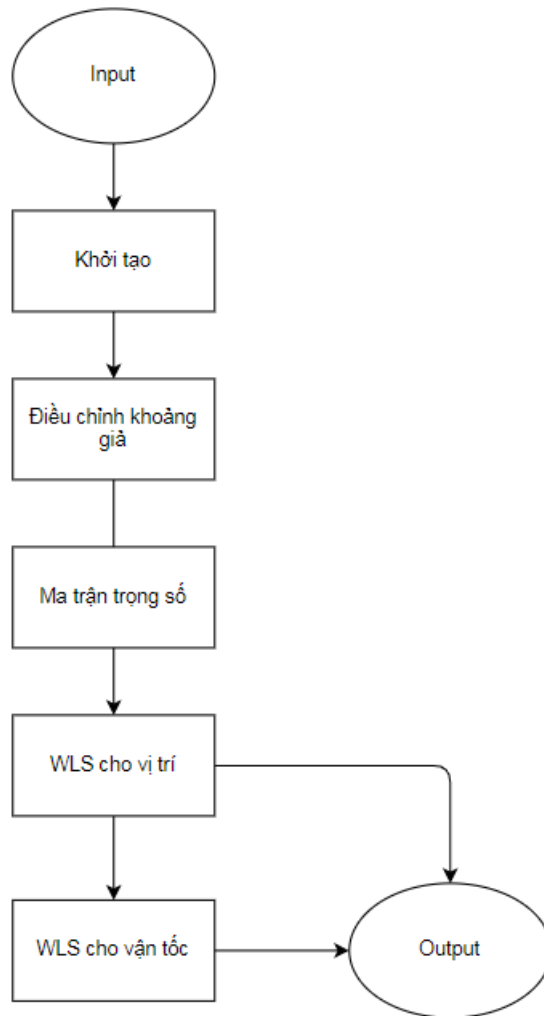
*Bảng 3.1. Quy ước viết tắt các tham số đầu vào khối WLS*

Tên trường dữ liệu	Ký hiệu
RawPseudorangeMeters	pr
SvClockBiasMeters	Sv_clock
IonosphericDelayMeters	Iono_delay
TroposphericDelayMeters	Tropo_delay
IsrbMeters	Isrb
SvPositionXEcefMeters	x
SvPositionYEcefMeters	y
SvPositionZEcefMeters	z
PseudorangeRateMetersPerSecond	pr_r
SvClockDriftMetersPerSecond	Sv_clock_rate
SvVelocityXEcefMetersPerSecond	v_x
SvVelocityYEcefMetersPerSecond	v_y
SvVelocityZEcefMetersPerSecond	v_z
RawPseudorangeUncertaintyMeters	pr_uncer
PseudorangeRateUncertaintyMetersPerSecond	pr_r_uncer

Đầu ra của khối WLS lần lượt là:

- UserPositionX/Y/ZecefMeters: mảng 1 chiều với 3 phần tử để lưu (x,y,z) của vị trí  
Kí hiệu: **x\_wls**
- UserVelocityX/Y/ZecefMetersPerSecond: mảng 1 chiều với 3 phần tử để lưu (x,y,z) của vận tốc  
Kí hiệu: **v\_wls**
- PositionCovariance: mảng 2 chiều 3x3 để lưu ma trận hiệp phương sai vị trí  
Kí hiệu: **cov\_x**
- VelocityCovariance: mảng 2 chiều 3x3 để lưu ma trận hiệp phương sai vận tốc  
Kí hiệu: **cov\_v**

Trong khối chức năng WLS bao gồm các khối nhỏ hơn:

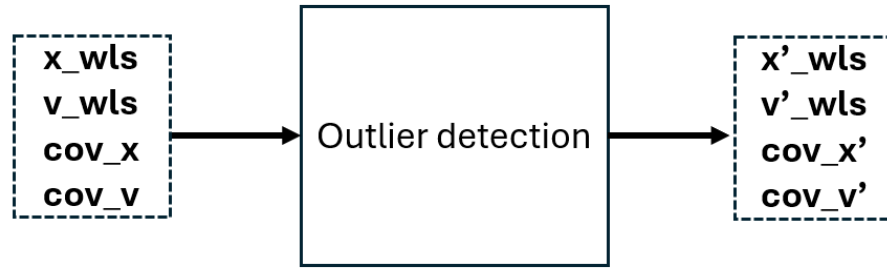


Hình 3.5 Các khối chính trong module WLS

Mô tả ngắn gọn các khối tại hình 2 như sau:

- **Khởi tạo hằng số và ma trận lưu trữ:**  
Khởi tạo các biến số cần thiết như tốc độ ánh sáng (m/s), tốc độ quay trái đất(rad/s), và các ma trận lưu trữ để giữ giá trị vị trí, vận tốc và ma trận hiệp phương sai.
- **Điều chỉnh khoảng giả:**  
Tính toán lại “giả khoảng cách” bằng cách điều chỉnh theo các yếu tố bao gồm độ trễ tín hiệu do xung đồng hồ vệ tinh, trễ do tầng điện ly, tầng phân ly.
- **Ma trận trọng số:**  
Xây dựng ma trận trọng số cho các phép đo “giả khoảng cách” và “tốc độ thay đổi giả khoảng cách”, dựa trên độ tin cậy của từng phép đo thu được.
- **WLS cho vị trí:**  
Thực hiện phương pháp bình phương tối thiểu có trọng số (WLS) để ước tính vị trí người dùng dựa trên các phép đo khoảng cách vệ tinh.
- **WLS cho vận tốc:**  
Thực hiện phương pháp bình phương tối thiểu có trọng số (WLS) để ước tính vận tốc người dùng dựa trên vị trí người dùng và các phép đo tốc độ vệ tinh.

### 3.3.4.2. Phát hiện điểm ngoại lai cho toàn bộ tập dữ liệu



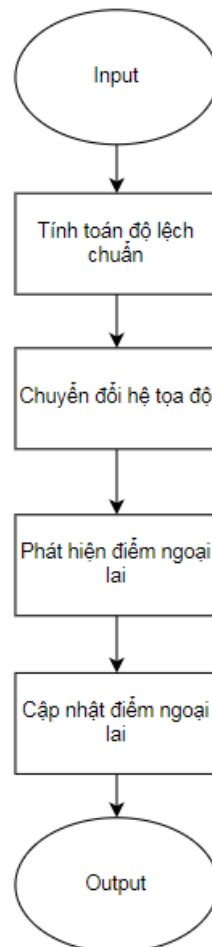
Hình 3.6 Sơ đồ tổng quan khối chức năng phát hiện điểm ngoại lai

Đầu vào của khối Outlier Detection chính là đầu ra của khối WLS sau khi cho chạy qua tất cả các khung thời gian thu được, giả sử có tất cả  $n$  khung thời gian thu được:

- **x\_wls**:  $n$  mảng 1 chiều với 3 phần tử để lưu  $(x,y,z)$  của vị trí
- **v\_wls**:  $n$  mảng 1 chiều với 3 phần tử để lưu  $(x,y,z)$  của vận tốc
- **cov\_x**:  $n$  mảng 2 chiều  $3 \times 3$  để lưu ma trận hiệp phương sai vị trí
- **cov\_v**:  $n$  mảng 2 chiều  $3 \times 3$  để lưu ma trận hiệp phương sai vận tốc

Sau khi qua khối Outlier Detection ta được đầu ra gồm các vector đã được cập nhật sau phép nội suy:

**x'\_wls, v'\_wls, cov\_x', cov\_v'**



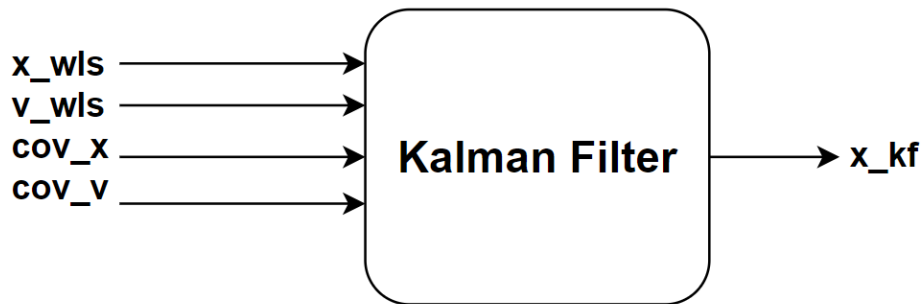
Hình 3.7 Các khối chính trong module Outlier Detection

Mô tả ngắn gọn các khối tại hình 4 như sau:

- **Tính toán độ lệch chuẩn:**  
Tính toán độ lệch chuẩn của các dữ liệu vị trí và vận tốc, bỏ qua các giá trị NaN. Kết quả này sẽ được sử dụng để xác định ngưỡng cho các giá trị ngoại lai.
- **Chuyển đổi hệ tọa độ:**  
Chuyển đổi các tọa độ ECEF (Earth-Centered, Earth-Fixed) thành tọa độ địa lý (LLH - Latitude, Longitude, Height) và ENU (East-North-Up).
- **Phát hiện và cập nhật điểm ngoại lai:**
  - Xác định các điểm ngoại lai của vận tốc và vị trí theo chiều cao trục Z, thay thế chúng bằng NaN (dữ liệu không xác định).
  - Cập nhật ma trận hiệp phương sai của các điểm vận tốc ngoại lai và vị trí ngoại lai.
  - Sử dụng phép nội suy Akima để điền vào các giá trị NaN trong dữ liệu vị trí và vận tốc.

### 3.3.5 Thiết kế khối KF

#### 3.3.5.1. Đặc tả Kalman Filter



Hình 3.8 Sơ đồ khối tổng quan Kalman Filter

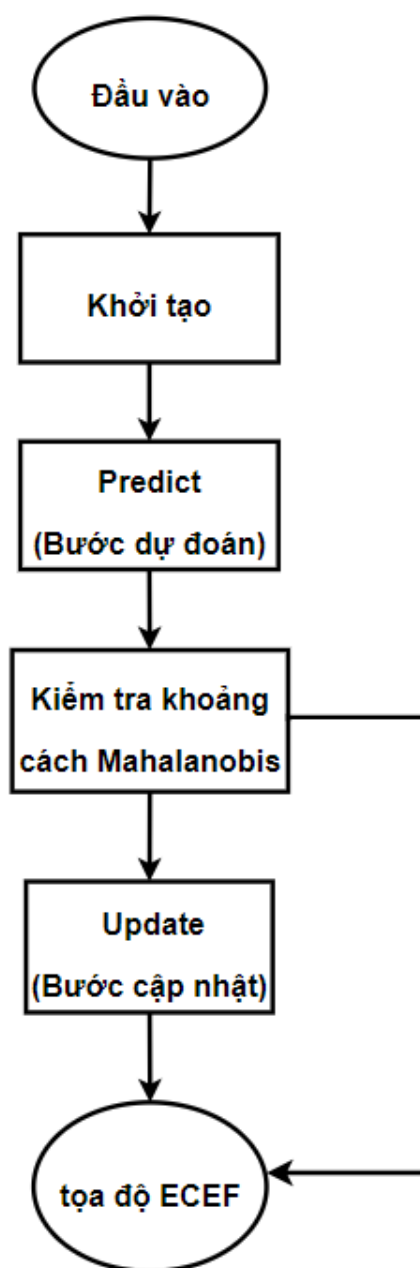
Đầu vào của khối Kalman Filter được lấy từ đầu ra của khối WLS trước đó gồm:

- **x\_wls:** mảng 1 chiều với 3 phần tử để lưu tọa độ (x,y,z) .
- **v\_wls:** mảng 1 chiều với 3 phần tử để lưu vận tốc của tọa độ (x,y,z).
- **cov\_x:** mảng 2 chiều 3x3 để lưu ma trận hiệp phương sai tọa độ.
- **cov\_v:** mảng 2 chiều 3x3 để lưu ma trận hiệp phương sai vận tốc.

Đầu ra của khối Kalman Filter:

- **x\_kf:** mảng 1 chiều với 3 phần tử để lưu tọa độ (x,y,z)

Trong khối chức năng Kalman Filter bao gồm các khối nhỏ hơn:



Hình 3.9 Các khối chính trong Kalman Filter

Mô tả ngắn gọn Hình 3.9 :

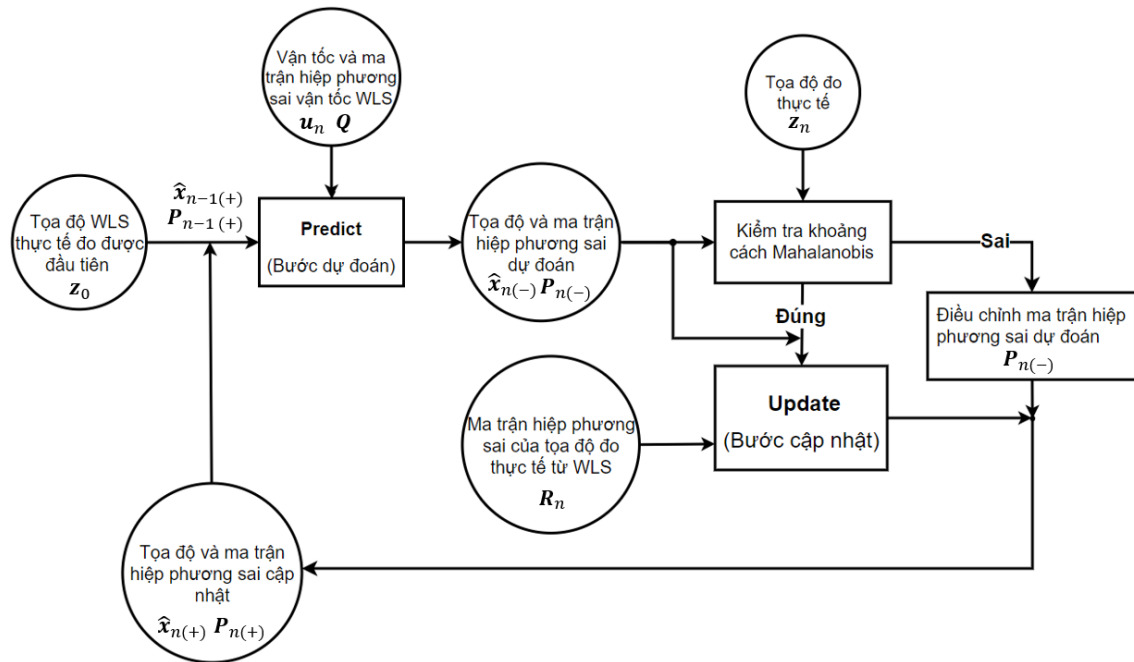
- **Khởi tạo:**  
Các biến để lưu trữ các giá trị của tọa độ, vận tốc và các ma trận đơn vị, ma trận hiệp phương sai.
- **Predict (Bước dự đoán):**  
Dự đoán các giá trị tọa độ tiếp theo (2.28) bằng giá trị tọa độ và vận tốc trung bình hiện tại. Ngoài ra còn sự phân tán, sai lệch về các tọa độ còn được dự đoán bằng ma trận hiệp phương sai (2.29).
- **Kiểm tra khoảng cách Mahalanobis:**  
Kiểm tra khoảng cách Mahalanobis bằng cách thực hiện tính toán với các giá trị tọa độ, ma trận hiệp phương sai được dự đoán từ Predict (bước dự đoán) và tọa độ đo được để loại bỏ các giá trị tọa độ ngoại lai.



- **Update (Bước cập nhật):**

Cập nhật các giá trị tọa độ đã dự đoán từ trước bằng các (2.30), (2.31), (2.32), (2.33) để đưa ra được tọa độ chuẩn xác hơn.

### 3.3.5.2. Sơ đồ luồng dữ liệu



Hình 3.10 Sơ đồ luồng dữ liệu ước tính tọa độ của Kalman Filter

- Tọa độ WLS thực tế đo được đầu tiên  $z_0$  đưa vào xử lý trong khối Predict (Bước dự đoán) ứng với  $\hat{x}_{n-1(+)}$  và ma trận hiệp phương sai ngoại suy  $P_{n-1(+)}$  gồm các biểu thức trình bày phần 2.6.1.
- Dữ liệu đi ra là tọa độ và ma trận hiệp phương sai dự đoán  $\hat{x}_{n(-)}, P_{n(-)}$ . Tiếp theo dữ liệu được đưa vào khối kiểm tra khoảng cách Mahalanobis sử dụng các biểu thức phần 0.
  - Nếu kiểm tra khoảng cách sai, nghĩa là lớn hơn ngưỡng được đưa ra thì điều chỉnh ma trận hiệp phương sai dự đoán  $P_{n(-)}$ , tọa độ dự đoán  $\hat{x}_{n(-)}$  được giữ nguyên và đưa ra tọa độ và ma trận hiệp phương sai cập nhật cho trạng thái tiếp theo  $\hat{x}_{n(+)}$  và  $P_{n(+)}$ .
  - Còn nếu kiểm tra khoảng cách Mahalanobis đúng, nghĩa là nhỏ hơn ngưỡng thì thực hiện bước Update (Bước cập nhật) gồm các biểu thức phần 2.6.2, dữ liệu từ ma trận  $R_n$  là hiệp phương sai tọa độ đo thực tế từ WLS kết hợp với  $\hat{x}_{n(-)}, P_{n(-)}$  đã giải thích từ trước. Từ đó cho ra được dữ liệu cập nhật  $\hat{x}_{n(+)}$  và  $P_{n(+)}$  tốt cho thời điểm n.
- Sau đó  $\hat{x}_{n(+)}$  và  $P_{n(+)}$  với lần lặp tiếp theo tương ứng với  $\hat{x}_{n-1(+)}$  và  $P_{n-1(+)}$  được đưa trở lại khối Predict và thực hiện các thao tác tương tự.

### 3.3.6 Thiết kế khối RTK

Hệ thống RTK của chúng em bao gồm 3 thành phần chính: trạm gốc, thiết bị người dùng và mạng lưới kết nối giữa 2 bên.

#### *3.3.6.1. Thiết bị người dùng*

Thiết bị người dùng (rover) là thành phần di động của hệ thống RTK, nhận các hiệu chỉnh từ trạm cơ sở hoặc mạng và tính toán vị trí chính xác của nó. Rover được trang bị các thành phần cơ bản như anten GNSS để nhận tín hiệu vệ tinh và các hiệu chỉnh từ trạm cơ sở hoặc mạng, máy thu GNSS chính xác cao để xử lý tín hiệu vệ tinh và các hiệu chỉnh vi sai, và bộ điều khiển để hiển thị dữ liệu vị trí và lưu trữ các phép đo. Thiết bị này cũng có thể bao gồm radio hoặc modem di động để nhận các hiệu chỉnh từ trạm cơ sở hoặc mạng NTRIP, cùng với nguồn điện di động như pin để đảm bảo hoạt động liên tục trong thực địa.

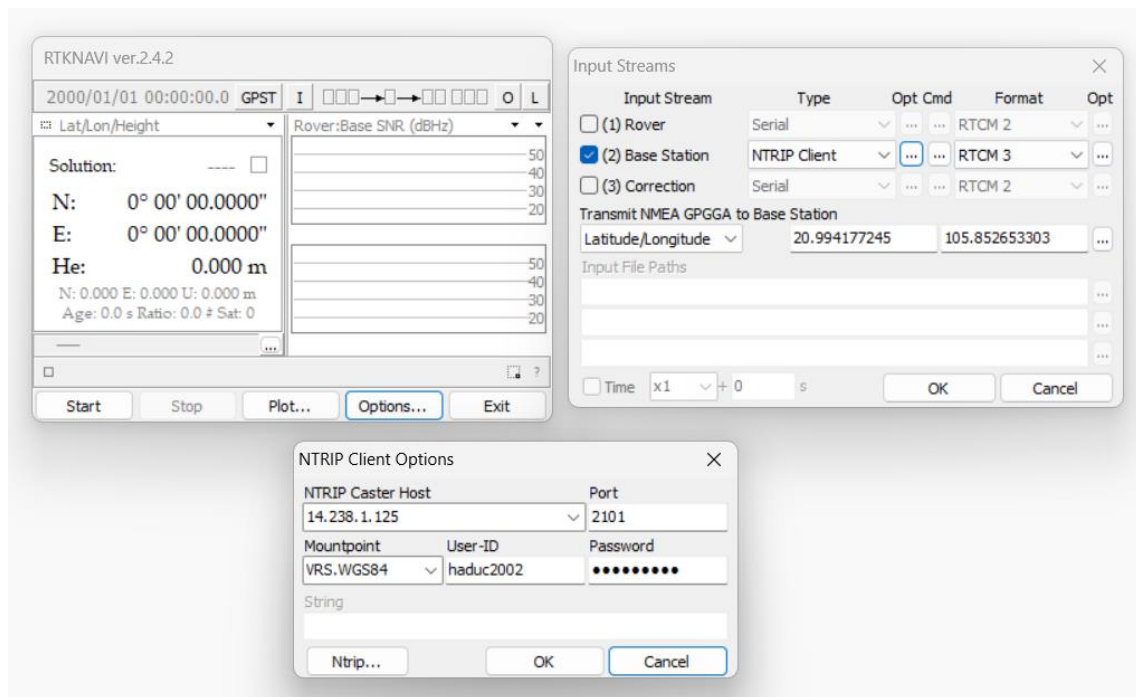
Rover hoạt động bằng cách nhận tín hiệu GNSS thô từ các vệ tinh và các hiệu chỉnh vi sai từ trạm cơ sở hoặc mạng. Sau đó, rover kết hợp dữ liệu hiệu chỉnh từ CORS với tín hiệu GNSS để xử lý. Thiết bị này áp dụng sai số vào chính mã giải mà nó đo được, từ đó xác định vị trí chính xác với độ chính xác centimet. Trong quá trình này, rover xử lý dữ liệu để tính toán vị trí của mình trong thời gian thực, cung cấp dữ liệu định vị với độ chính xác cao cho người sử dụng. Các dữ liệu thô được đo từ điện thoại và dữ liệu này sẽ được chuyển sang file (Receiver INdependent EXchange) RINEX là phương thức chuẩn để trao đổi thông tin của vệ tinh

#### *3.3.6.2. Trạm gốc*

Trạm Tham Chiếu Hoạt Động Liên Tục (CORS) là thành phần quan trọng trong hệ thống RTK, cung cấp dữ liệu GNSS có độ chính xác cao bằng cách liên tục theo dõi tín hiệu vệ tinh và phát các hiệu chỉnh. Để hoạt động hiệu quả, CORS được trang bị các thành phần cơ bản như anten GNSS chất lượng cao, máy thu GNSS, thiết bị truyền thông (modem, bộ phát sóng radio hoặc kết nối internet) và nguồn điện đáng tin cậy như pin hoặc năng lượng mặt trời. Trạm được lắp đặt tại các vị trí cố định với điều kiện môi trường tốt, tránh nhiễu và vật cản, và được gắn kết chắc chắn để tránh mọi sự dịch chuyển có thể ảnh hưởng đến độ chính xác.

CORS thu nhận tín hiệu từ các vệ tinh GNSS (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou) và ghi lại các thông tin như vị trí vệ tinh, thời gian, mã giả và sóng mang. Máy thu GNSS tại trạm cơ sở xử lý tín hiệu nhận được để xác định các lỗi hệ thống như lệch đồng hồ vệ tinh, lỗi quỹ đạo, độ trễ tầng điện ly và tầng đối lưu. Dựa trên các lỗi xác định, trạm tính toán các hiệu chỉnh vi sai cần thiết và truyền chúng đến các rover thông qua sóng radio, kết nối di động hoặc qua internet bằng giao thức NTRIP. Máy chủ NTRIP quản lý và phân phối dữ liệu hiệu chỉnh từ nhiều trạm CORS đến các thiết bị di động.

Rover, khi kết nối với trạm CORS hoặc máy chủ NTRIP, nhận dữ liệu hiệu chỉnh thời gian thực và kết hợp với tín hiệu GNSS để xử lý. Rover giải quyết độ mơ hồ pha sóng mang, từ đó xác định vị trí chính xác với độ chính xác centimet. Vị trí của rover được tính toán dựa trên dữ liệu hiệu chỉnh, cho phép định vị chính xác trong thời gian thực. CORS đóng vai trò quan trọng trong nhiều ứng dụng như khảo sát địa chính, nông nghiệp chính xác và giám sát hạ tầng, đảm bảo độ chính xác cao và liên tục cho các thiết bị di động.



Hình 3.11 Cách thu dữ liệu từ CORS

Dữ liệu từ các trạm Base Station sẽ được stream về các Client thông qua NTRIP dưới định dạng RTCM3RTCM3. Sau đây dữ liệu này sẽ được giải mã thành các file RINEX v2.11 để thuận tiện cho các bước tính toán tiếp theo.

### 3.3.6.3. Mạng lưới liên kết

Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP) là một giao thức truyền dữ liệu hiệu chỉnh GNSS qua internet, đóng vai trò quan trọng trong hệ thống RTK bằng cách cung cấp các hiệu chỉnh vi sai từ mạng các trạm tham chiếu (CORS) đến các thiết bị di động (Rover). NTRIP bao gồm ba thành phần chính: NTRIP caster, NTRIP server và NTRIP client.

**NTRIP caster** là máy chủ trung tâm quản lý các luồng dữ liệu giữa các trạm CORS và các thiết bị di động. Nó nhận dữ liệu hiệu chỉnh từ nhiều NTRIP server và phân phối dữ liệu này cho nhiều NTRIP client.

**NTRIP server** là các trạm CORS hoặc các thiết bị gửi dữ liệu hiệu chỉnh GNSS đến NTRIP caster. Các trạm này liên tục thu thập và xử lý tín hiệu GNSS để tính toán các lỗi hệ thống và tạo ra các hiệu chỉnh vi sai.

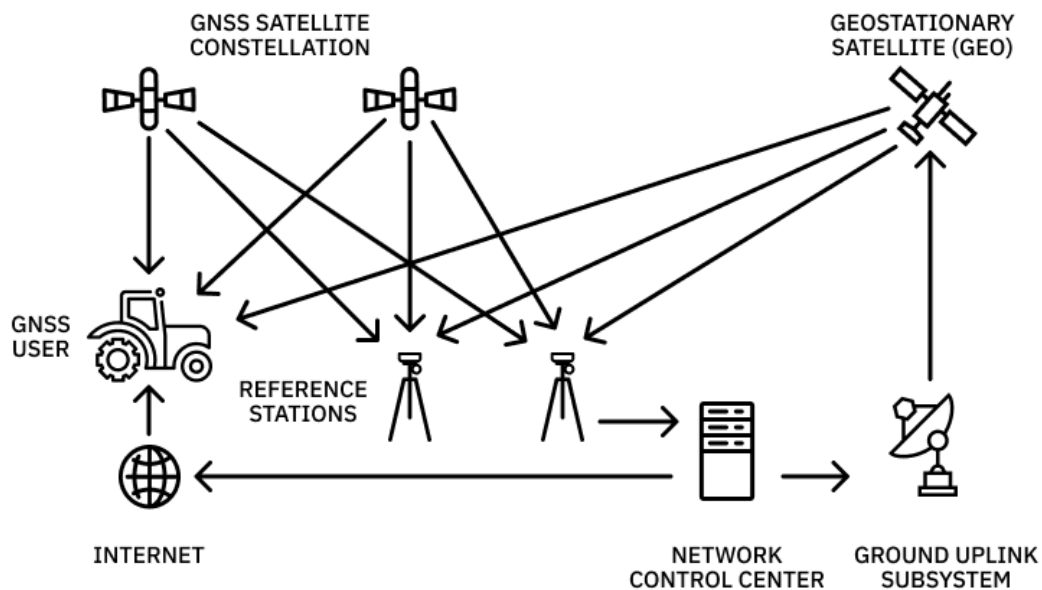
**NTRIP client** là các thiết bị di động (rover) kết nối với NTRIP caster qua internet để nhận dữ liệu hiệu chỉnh.

Quá trình hoạt động của NTRIP bắt đầu bằng việc các trạm CORS (NTRIP server) thu thập tín hiệu từ các vệ tinh GNSS và tính toán các hiệu chỉnh vi sai dựa trên các lỗi hệ thống như lệch đồng hồ vệ tinh, lỗi quỹ đạo và độ trễ tầng điện ly và tầng đối lưu. Dữ liệu hiệu chỉnh này sau đó được gửi đến NTRIP caster. NTRIP caster quản lý các kết nối và luồng dữ liệu, đảm bảo rằng dữ liệu hiệu chỉnh từ các trạm CORS được phân phối một cách hiệu quả và chính xác đến các thiết bị di động.

Thiết bị di động (NTRIP client) kết nối với NTRIP caster qua internet để nhận dữ liệu hiệu chỉnh. Dữ liệu này được sử dụng để xử lý tín hiệu GNSS nhận

được từ vệ tinh, giải quyết độ mơ hồ pha sóng mang và tính toán vị trí với độ chính xác centimet. Quá trình này cho phép rover xác định vị trí của mình trong thời gian thực với độ chính xác cao.

NTRIP mang lại nhiều lợi ích quan trọng, bao gồm khả năng cung cấp phạm vi phủ sóng rộng hơn so với các hệ thống truyền thống dựa trên sóng radio, nhờ vào việc sử dụng internet. Điều này cho phép các rover kết nối với mạng các trạm CORS trên phạm vi rộng lớn mà không cần trạm cơ sở địa phương. Ngoài ra, NTRIP còn cung cấp tính linh hoạt cao, cho phép các rover nhận hiệu chỉnh từ trạm cơ sở gần nhất hoặc phù hợp nhất, cải thiện độ chính xác và độ tin cậy. Hệ thống NTRIP cũng giúp giảm chi phí bằng cách tận dụng các mạng CORS hiện có, thay vì phải thiết lập các trạm cơ sở riêng lẻ.



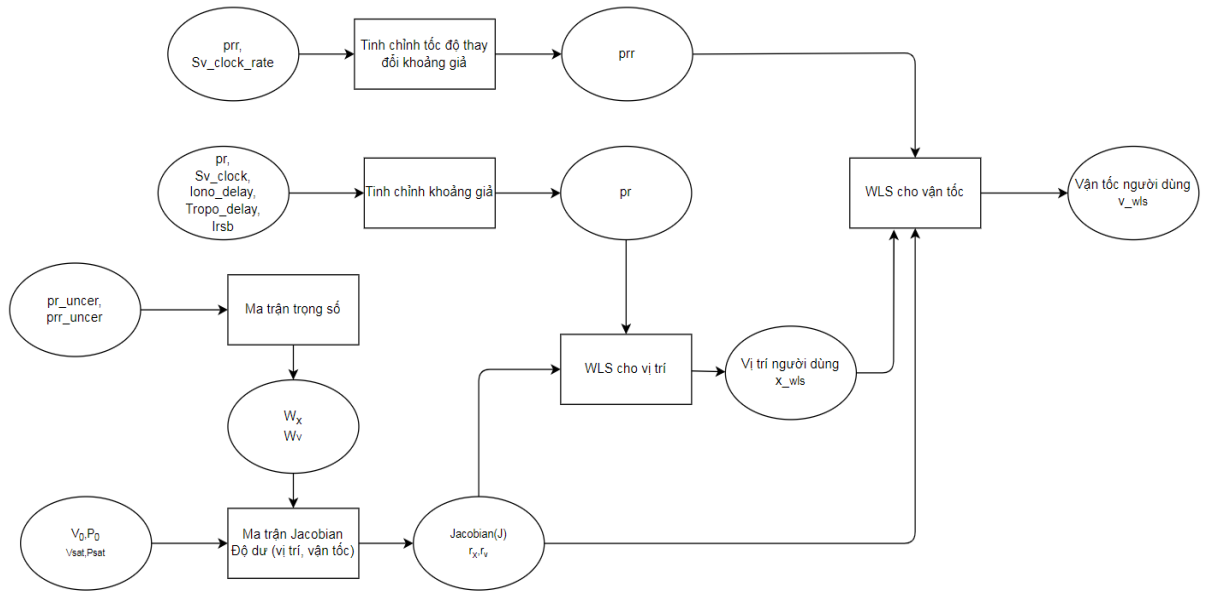
*Hình 3.12 Các thành phần mạng lưới của hệ thống RTK*

Các thiết bị người dùng sẽ đồng thời phải tải dữ liệu của vệ tinh và dữ liệu của các CORS thông qua internet đến các Network Control Center để có thể sử dụng RTK phục vụ cho quá trình tính toán tọa độ.

### 3.4 Triển khai hệ thống

### 3.4.1 Xây dựng phương pháp tính tọa độ vị trí

#### 3.4.1.1. Bình phương tối thiểu trọng số WLS



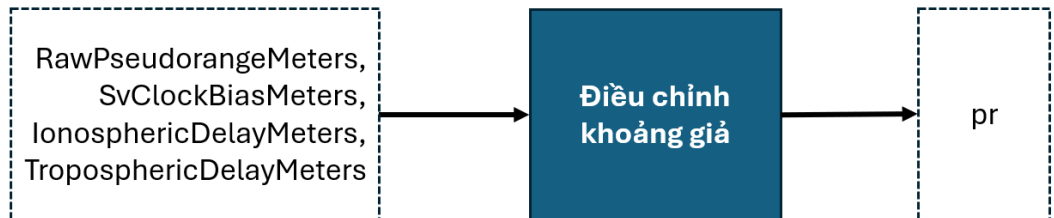
Hình 3.13 Sơ đồ luồng dữ liệu khối WLS

Chi tiết cụ thể các bước xây dựng khối WLS:

#### 1. Khởi tạo

- Đầu vào: không có
- Cụ thể: khởi tạo các hằng số cần thiết cho tính toán bao gồm
  - tốc độ ánh sáng = 299792458 (m/s)
  - tốc độ quay của trái đất =  $7.29221151467 \times 10^{-5}$  (rad/s)
  - ma trận lưu kết quả cho vector vị trí  $\mathbf{x}_{wls}$ , vector vận tốc  $\mathbf{v}_{wls}$
  - ma trận lưu kết quả cho vector vị trí  $\mathbf{x}_{wls}$ , vector vận tốc  $\mathbf{v}_{wls}$

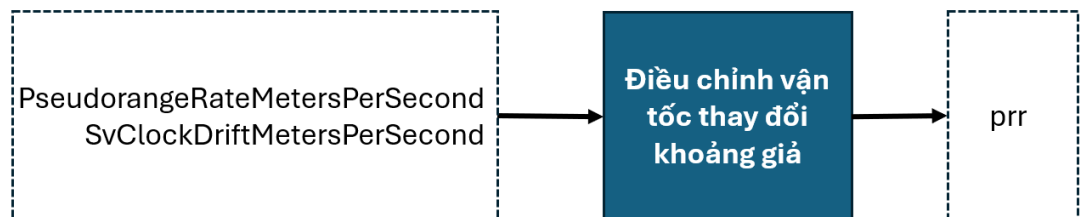
#### 2. Khối điều chỉnh khoảng giả



- Cụ thể: cập nhật lại thông số “RawPseudorangeMeters” bằng phép tính toán đơn giản

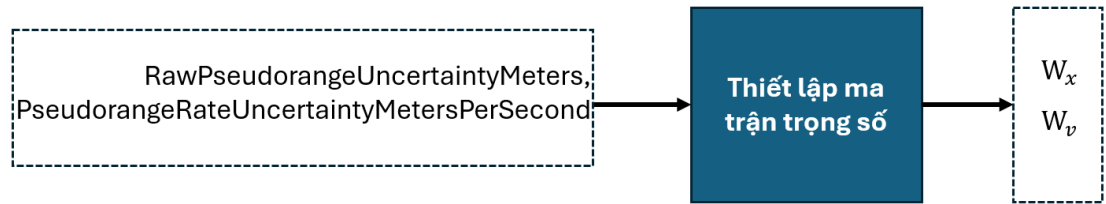
$$pr = \text{"RawPseudorangeMeters"} + \text{"SvClockBiasMeters"} - \text{"IsrbMeters"} - \text{"IonosphericDelayMeters"} - \text{"TroposphericDelayMeters"}$$

#### 3. Khối điều chỉnh vận tốc thay đổi giả khoảng cách



- Cụ thể: cập nhật lại thông số “PseudorangeRateMetersPerSecond” bằng phép tính toán đơn giản
- $$pr = \text{"PseudorangeRateMetersPerSecond"} + \text{"SvClockDriftMetersPerSecond"}$$

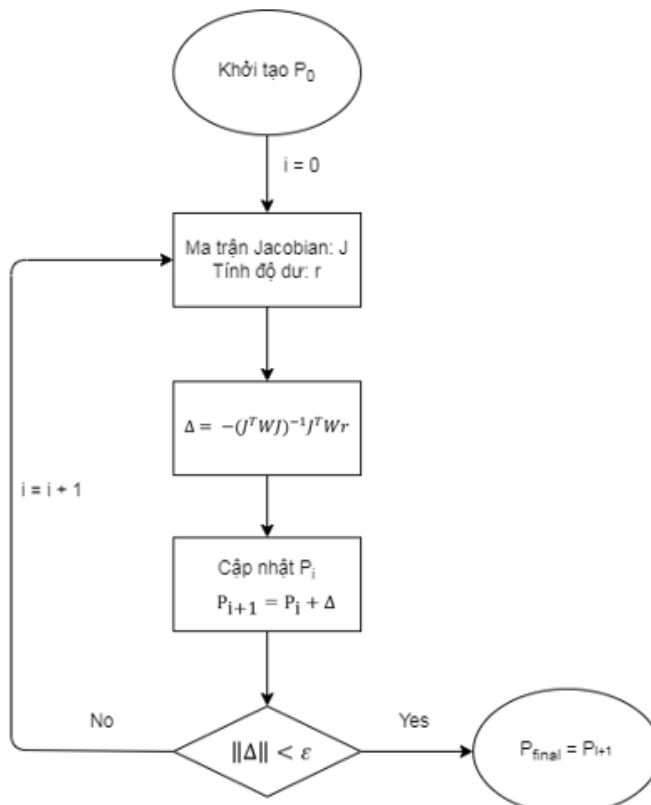
#### 4. Khởi thiết lập ma trận trọng số



- Cụ thể:  
Thiết lập một ma trận đường chéo trong đó mỗi phần tử là “nghịch đảo” các giá trị “Uncertainty” của  $m$  vệ tinh theo công thức [8].

$$W = \begin{bmatrix} \frac{1}{\text{Uncertainty}^{(1)}} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\text{Uncertainty}^{(2)}} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{\text{Uncertainty}^{(m-1)}} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \frac{1}{\text{Uncertainty}^{(m)}} \end{bmatrix}$$

#### 5. Khởi thực hiện WLS cho vị trí



- Cụ thể:

**Ma trận Jacobian** được thiết kế bởi công thức [2]:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{x_0 - x^1}{\rho^1} & \frac{y_0 - y^1}{\rho^1} & \frac{z_0 - z^1}{\rho^1} & 1 \\ \frac{x_0 - x^2}{\rho^2} & \frac{y_0 - y^2}{\rho^2} & \frac{z_0 - z^2}{\rho^2} & 1 \\ \frac{x_0 - x^3}{\rho^3} & \frac{y_0 - y^3}{\rho^3} & \frac{z_0 - z^3}{\rho^3} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_0 - x^m}{\rho^m} & \frac{y_0 - y^m}{\rho^m} & \frac{z_0 - z^m}{\rho^m} & 1 \end{bmatrix}$$

trong đó

- $P_0$  là vị trí tọa độ giả định ban đầu  $(x_0, y_0, z_0)$  thường lựa chọn  $(0,0,0)$
- $(x^1, y^1, z^1), \dots, (x^m, y^m, z^m)$  lần lượt là vector tọa độ của  $m$  vệ tinh quan sát tương ứng các cột dữ liệu “SvPositionXEcefMeters”, “SvPositionXEcefMeters”, “SvPositionXEcefMeters”
- $\rho^1 = \sqrt{(x^1 - x_0)^2 + (y^1 - y_0)^2 + (z^1 - z_0)^2}, \dots,$   
 $\rho^m = \sqrt{(x^m - x_0)^2 + (y^m - y_0)^2 + (z^m - z_0)^2}$

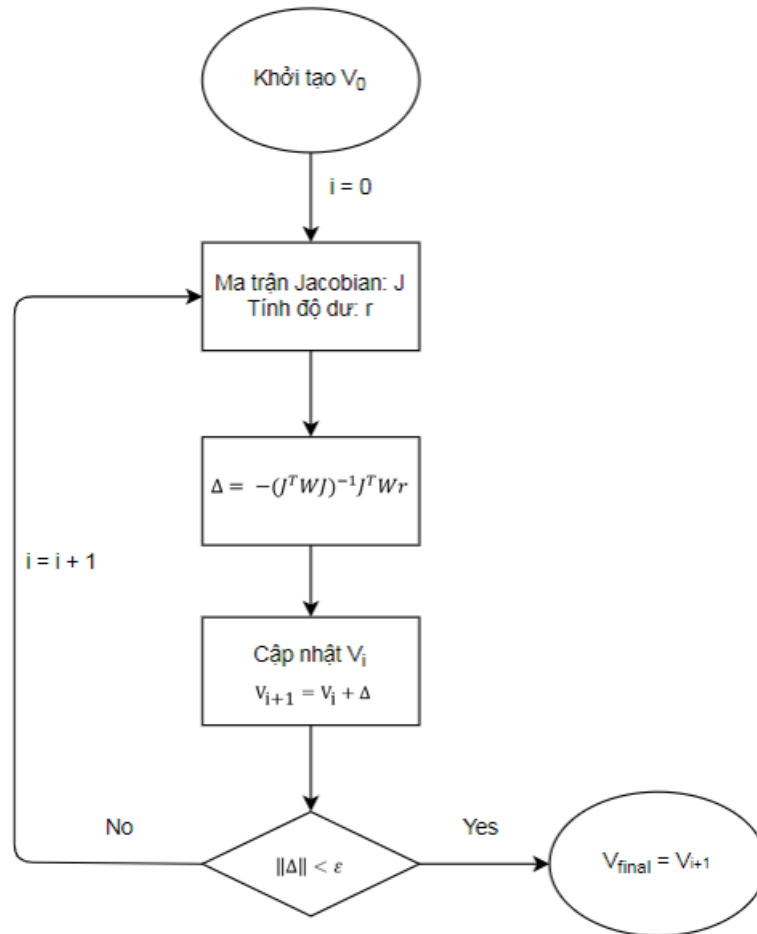
**Hàm tính độ dư** được thiết kế bởi công thức [1]:

$$r = W(\rho - pr)$$

$$\begin{bmatrix} r^1 \\ r^2 \\ \dots \\ r^m \end{bmatrix} = W \times \left( \begin{bmatrix} \rho^1 \\ \rho^2 \\ \dots \\ \rho^m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} pr^1 \\ pr^2 \\ \dots \\ pr^m \end{bmatrix} \right)$$

trong đó  $pr$  là cột dữ liệu “RawPseudorangeMeters”

## 6. Khởi thực hiện WLS cho vận tốc



- Cụ thể:

**Ma trận Jacobian** được thiết kế bởi công thức tương tự như trên:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{x_{user} - x^1}{\rho^1} & \frac{y_{user} - y^1}{\rho^1} & \frac{z_{user} - z^1}{\rho^1} & 1 \\ \frac{x_{user} - x^2}{\rho^2} & \frac{y_{user} - y^2}{\rho^2} & \frac{z_{user} - z^2}{\rho^2} & 1 \\ \frac{x_{user} - x^3}{\rho^3} & \frac{y_{user} - y^3}{\rho^3} & \frac{z_{user} - z^3}{\rho^3} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_{user} - x^m}{\rho^m} & \frac{y_{user} - y^m}{\rho^m} & \frac{z_{user} - z^m}{\rho^m} & 1 \end{bmatrix}$$

trong đó

- $V_0$  là vector vận tốc giả định ban đầu ( $v_{0x}, v_{0y}, v_{0z}$ ) thường lựa chọn (0,0,0)
- $P_{user}$  là vị trí tọa độ điểm ước tính ( $x_{user}, y_{user}, z_{user}$ )
- $(x^1, y^1, z^1), \dots, (x^m, y^m, z^m)$  lần lượt là vector tọa độ của  $m$  vệ tinh quan sát tương ứng các cột dữ liệu “SvPositionXEcefMeters”, “SvPositionXEcefMeters”, “SvPositionXEcefMeters”
- $\rho^1 = \sqrt{(x^1 - x_{user})^2 + (y^1 - y_{user})^2 + (z^1 - z_{user})^2}, \dots,$   
 $\rho^m = \sqrt{(x^m - x_{user})^2 + (y^m - y_{user})^2 + (z^m - z_{user})^2}$

**Hàm tính độ dư** được thiết kế bởi công thức [1]:



$$\begin{bmatrix} r^1 \\ r^2 \\ \dots \\ r^m \end{bmatrix} = W \times \begin{bmatrix} \frac{(v_x^1 - v_{0x})(x^1 - x_{user}) + (v_y^1 - v_{0y})(y^1 - y_{user}) + (v_z^1 - v_{0z})(x^1 - z_{user})}{\rho^1} \\ \frac{(v_x^2 - v_{0x})(x^2 - x_{user}) + (v_y^2 - v_{0y})(y^2 - y_{user}) + (v_z^2 - v_{0z})(x^2 - z_{user})}{\rho^2} \\ \dots \\ \frac{(v_x^m - v_{0x})(x^m - x_{user}) + (v_y^m - v_{0y})(y^m - y_{user}) + (v_z^m - v_{0z})(x^m - z_{user})}{\rho^m} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} pr^1 \\ pr^2 \\ \dots \\ pr^m \end{bmatrix}$$

trong đó

- $pr$  là cột dữ liệu “PseudorangeRateMetersPerSecond”
- $(v_x^1, v_y^1, v_z^1), \dots, (v_x^m, v_y^m, v_z^m)$  lần lượt là vector vận tốc  $\mathbf{m}$  vệ tinh quan sát tương ứng các cột dữ liệu “SvVelocityXEcefMetersPerSecond”, “SvVelocityYEcefMetersPerSecond”, “SvVelocityZEcefMetersPerSecond”

### 3.4.1.2. Phát hiện điểm ngoại lai Outlier Detection

Chi tiết cụ thể các bước xây dựng khối Outlier Detection :

#### 1. Tính toán độ lệch chuẩn:



- Cụ thể: áp dụng công thức tính độ lệch chuẩn

$$\sigma_{x out} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{i wls} - \mu_{wls})^2}$$

với  $N$  là tổng số khung thời gian thu được

#### 2. Chuyển đổi hệ tọa độ:

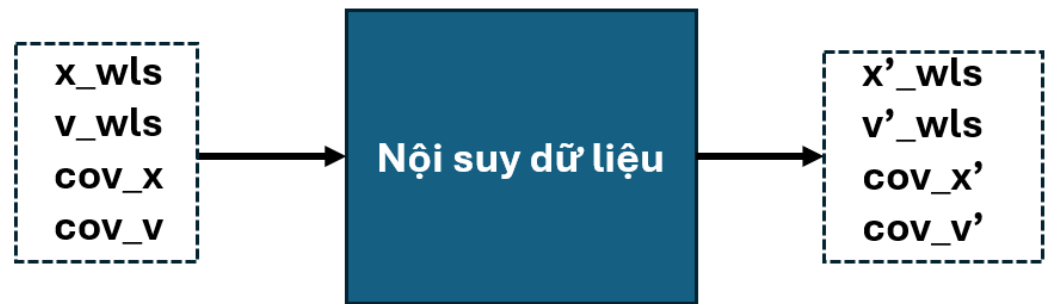


- Trong đó:

$x_{llh}$ : vector vị trí ở hệ tọa độ địa lý (Latitude, Longitude, Height).

$v_{enu}$ : vector vận tốc ở hệ tọa độ ENU(East-North-Up).

#### 3. Phát hiện và cập nhật điểm ngoại lai:



**Bước 1:**

- Tìm  $h\_median$  là trung vị của  $x\_llh\_z$  (tọa độ  $x\_llh$  xét theo hệ trục Oz)
- Tìm  $v\_median$  là trung vị của  $v\_enu\_z$  (tọa độ  $v\_enu$  xét theo hệ trục Oz)

**Bước 2:**

- Tìm  $indx\_x\_out$  tại đó  $x\_llh\_z - h\_median > 3\sigma_{x\_out}$
- Tìm  $indx\_v\_out$  tại đó  $v\_enu\_z - v\_median > 3\sigma_{v\_out}$

**Bước 3:**

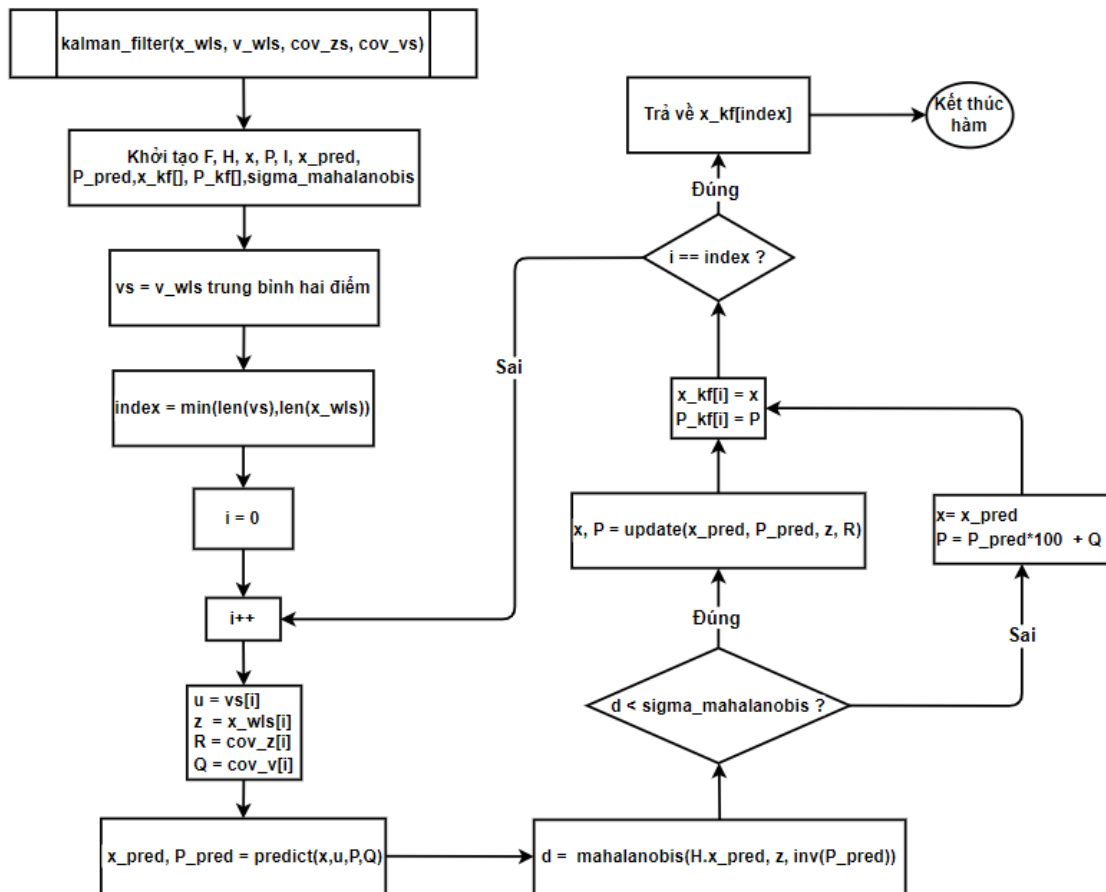
- Thay thế  $x\_wls[indx\_x\_out] = NaN$  (dữ liệu không xác định) và cập nhật  $cov\_x[indx\_x\_out]$
- Thay thế  $v\_wls[indx\_v\_out] = NaN$  (dữ liệu không xác định) và cập nhật  $cov\_v[indx\_v\_out]$

**Bước 4:**

- Nội suy Akima cho  $x\_wls$
- Nội suy Akima cho  $v\_wls$

### 3.4.2 Xây dựng bộ lọc KF

Sơ đồ thuật toán hàm `kalman_filter` được mô tả bằng hình vẽ như sau:



Hình 3.14 Sơ đồ thuật toán Kalman Filter

### 1. Khởi tạo:

- F: ma trận chuyển trạng thái là ma trận đơn vị 3x3 dưới dạng một mảng 2 chiều.
- H: ma trận quan sát là ma trận đơn vị 3x3 dưới dạng một mảng 2 chiều.
- P: ma trận hiệp phương sai cập nhật 3x3 dưới dạng một mảng 2 chiều.
- I: ma trận đơn vị 3x3 dưới dạng một mảng 2 chiều.
- x\_pred: mảng 1 chiều với 3 phần tử x,y,z dự đoán
- P\_pred: ma trận hiệp phương sai dự đoán dưới dạng mảng 2 chiều.
- x\_kf: mảng 1 chiều với 3 phần tử x,y,z lưu lại giá trị.
- P\_kf: ma trận hiệp phương sai cập nhật dưới dạng mảng 2 chiều.
- sigma\_mahalanobis: là một biến số với 1 giá trị ngưỡng cố định.

### 2. vs = v\_wls trung bình hai điểm:

- vs: giá trị vận tốc trung bình giữa điểm được ước tính và điểm trước đó, mục đích sử dụng giá trị vận tốc trung bình để tăng độ chính xác cho bước dự đoán.
- vs: là mảng 1 chiều

### 3. index = min(len(vs), len(x\_wls)):

- Xác định chỉ số nhỏ hơn giữa chiều dài của vs và x\_wls nghĩa là xác định số lượng các số lượng vận tốc vs và tọa độ (x,y,z).

### 4. i = 0:

- Bắt đầu vòng lặp với chỉ số ban đầu bằng 0 thì chuyển sang vòng lặp tiếp theo.

**5.  $i++$ :**

- Tăng giá trị  $i$  lên 1 để thực hiện vòng lặp tiếp theo.

**6.  $x\_pred, P\_pred = \text{predict}(x, u, P, Q)$ :**

- Thực hiện Predict (Bước dự đoán) phần 2.6.1 dựa vào  $x, u, P$  và  $Q$  để dự đoán các giá trị  $x\_pred$  và  $P\_pred$ .

**7. Kiểm tra khoảng cách Mahalanobis:**

- $d = \text{mahalanobis}(H.x\_pred, z, \text{inv}(P\_pred))$ : Tính khoảng cách Mahalanobis phần 0
- $d < \text{sigma\_mahalanobis}$ ?: Kiểm tra xem  $d$  có nhỏ hơn ngưỡng  $\text{sigma\_mahalanobis}$  không.

**8.  $x, P = \text{update}(x\_pred, P\_pred, z, R)$ :**

- Nếu  $d < \text{sigma\_mahalanobis}$  là đúng, thực hiện Update (Bước cập nhật) phần 2.6.2, dựa vào  $x\_pred, P\_pred, z, R$  để cập nhật các giá trị  $x\_pred$  và  $P\_pred$ .

**9.  $P\_pred = P * 100 + Q$ :**

- Nếu  $d < \text{sigma\_mahalanobis}$  là sai, thực hiện cập nhật lại  $P\_pred$ .

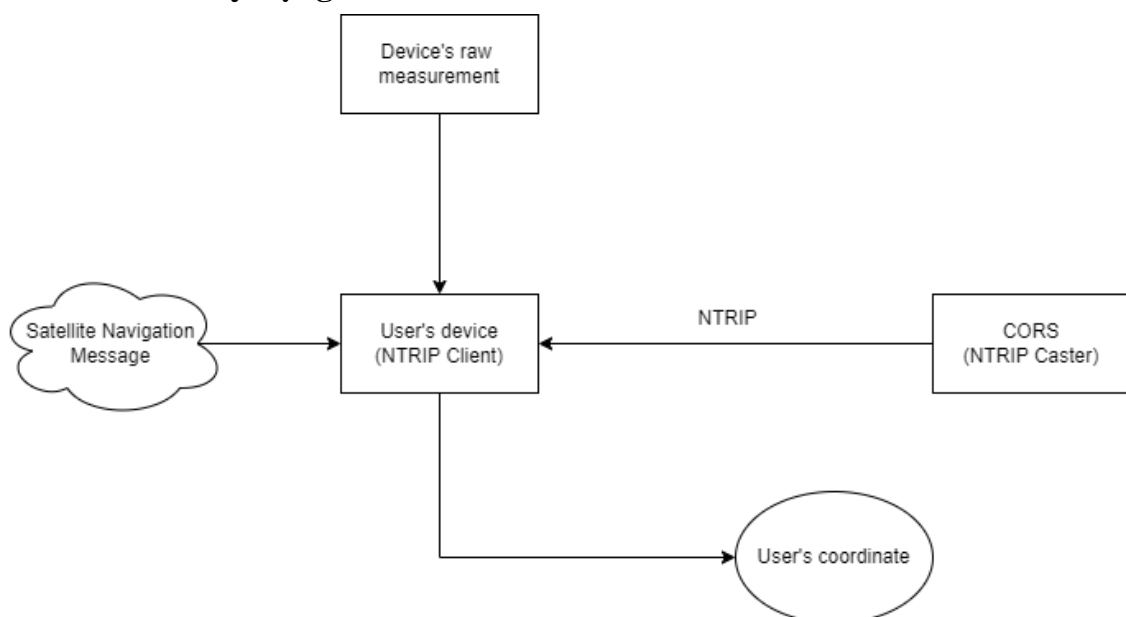
**10.  $x\_kf[i] = x$ :**

- Lưu lại giá trị tọa độ ước tính chính xác sau mỗi lần lặp vào mảng  $x\_kf[i]$ .

**11.  $i == \text{index}$ ?:**

- Kiểm tra xem chỉ số hiện tại có bằng  $\text{index}$  không.
  - Nếu đúng, trả về  $x\_kf[\text{index}]$  và kết thúc hàm.
  - Nếu sai, thực hiện lại từ bước 5.

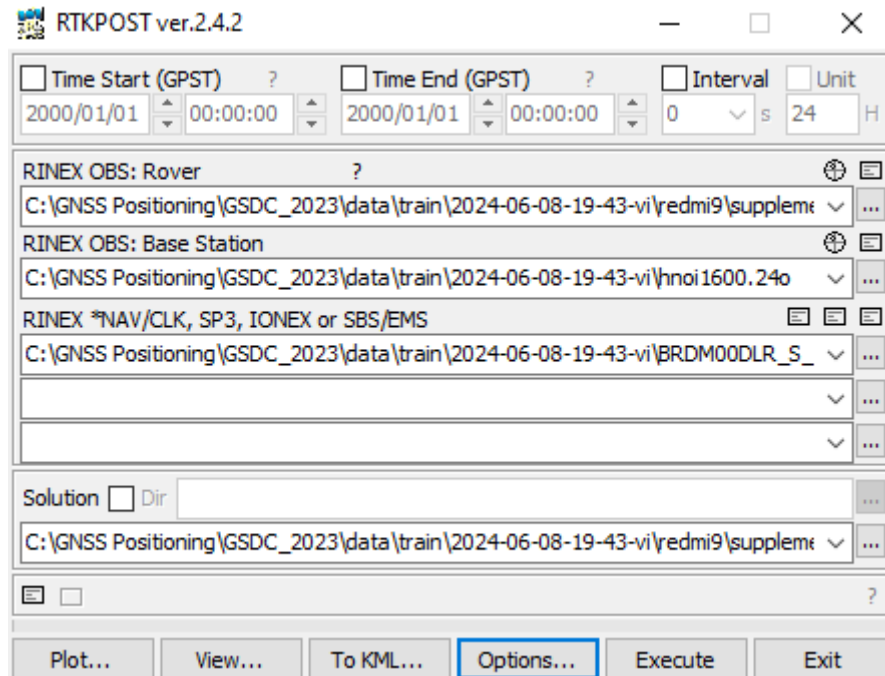
### 3.4.3 Xây dựng RTK



Hình 3.26 Sơ đồ kiến trúc của hệ thống RTK

Để một hệ thống RTK hoạt động ta cần có 3 đầu vào:

- Dữ liệu của vệ tinh trong ngày định dạng RINEX được download từ trang web của CDDIS tại [9].
- Dữ liệu thô đo được từ thiết bị người dùng và giải mã sang định dạng RINEX
- Dữ liệu của các trạm CORS được stream về NTRIP Client thông qua NTRIP dưới định dạng RTCM3 và dữ liệu này cũng cần được giải mã sang RINEX



Hình 3.27 Cách sử dụng RTKLIB để tính toán tọa độ người dùng

Sau khi đã thu thập được các file đầu vào cần thiết thì các file này sẽ được RTKLIB xử lý để ra được kết quả vị trí của người dùng bao gồm kinh độ, vĩ độ và thời gian tại điểm đo được.

```
% program : RTKLIB ver.demo5 gdsc_2022
% inp file : supplemental\gnss_log.obs
% inp file : ..\slac2000.21o
% inp file : ..\BRDM00DLR_S_20212000000_01D_MN.rnx
% obs start : 2021/07/19 20:49:35.4 GPST (week2167 161375.4s)
% obs end : 2021/07/19 21:21:11.4 GPST (week2167 163271.4s)
% pos mode : Kinematic
% freqs : L1+L2/E5b+L5
% solution : Combined-No Phase Reset
% elev mask : 5.0 deg
% dynamics : on
% tidecorr : off
% ionos opt : Broadcast
% tropo opt : Saastamoinen
% ephemeris : Broadcast
% navi sys : GPS GLONASS Galileo
% amb res : OFF
% amb glo : OFF
% val thres : 3.0
% antenna1 : ( 0.0000 0.0000 0.0000)
% antenna2 : ( 0.0000 0.0000 0.0000)
% ref pos : 37.416519040 -122.204268280 63.7780
%
% (lat/lon/height=WGS84/ellipsoidal,Q=1:fix,2:float,3:sbas,4:dgps,5:single,6:ppp,ns=# of satellites)
% GPST latitude(deg) longitude(deg) height(m) Q ns sdn(m) sde(m) sdu(m) sdne(m) sdeu(m) sdu(m) age(s) ratio
2167 161375.441 37.444003526 -122.232822894 -38.7972 2 7 2.4870 1.5051 5.6972 -0.7766 -1.0630 1.8787 5.44 0.0
2167 161376.441 37.444098575 -122.232773275 9.6800 2 7 0.1383 0.1058 0.3446 -0.0524 -0.1007 0.0735 6.44 0.0
2167 161377.441 37.444097227 -122.232772979 9.1179 2 5 0.1378 0.1064 0.3425 -0.0538 -0.1014 0.0936 7.44 0.0
2167 161378.441 37.444096683 -122.232773257 8.9397 2 7 0.1409 0.1074 0.3473 -0.0570 -0.1025 0.0984 8.44 0.0
2167 161379.441 37.444096179 -122.232773217 8.4865 2 7 0.1509 0.1081 0.3692 -0.0632 -0.1146 0.1286 9.44 0.0
2167 161380.441 37.444097231 -122.232774346 7.7941 2 5 0.2042 0.1191 0.3521 -0.1043 -0.1187 0.1442 10.44 0.0
2167 161381.441 37.444091595 -122.232772094 7.8331 2 6 0.1066 0.1042 0.3538 -0.0184 -0.0945 0.0612 11.44 0.0
2167 161382.441 37.444091115 -122.232772737 7.8824 2 4 0.1066 0.1043 0.4605 -0.0260 -0.0488 -0.1010 12.44 0.0
2167 161383.441 37.444099963 -122.232772696 7.7700 2 4 0.0904 0.0990 0.3152 0.0274 -0.0938 0.0771 13.44 0.0
2167 161384.441 37.444087204 -122.232776212 7.6597 2 4 0.0906 0.0992 0.2962 0.0279 -0.0978 0.1042 14.44 0.0
2167 161385.441 37.444082225 -122.232783225 7.3604 2 4 0.0873 0.0982 0.2634 0.0282 -0.0946 0.0861 -14.56 0.0
2167 161386.441 37.444080285 -122.232792042 9.2373 2 6 0.0803 0.1004 0.2076 0.0297 -0.1011 0.0345 -13.56 0.0
2167 161387.441 37.444082251 -122.232798972 11.7358 4 3 0.0781 0.0938 0.1865 -0.0100 -0.0918 0.0381 -12.56 0.0
2167 161388.441 37.444081856 -122.232802579 11.9641 2 9 0.0818 0.1058 0.1781 -0.0319 -0.0875 0.0158 -11.56 0.0
2167 161389.441 37.444089164 -122.232822745 11.6243 2 8 0.1047 0.1722 0.1933 -0.0854 -0.0894 -0.0520 -10.56 0.0
```

Hình 3.28 Kết quả tọa độ người dùng từ RTKLIB

### 3.5 Kết luận chương 3

Chương 3 đã trình bày được tổng quan kiến trúc thuật toán tăng độ chính xác cho hệ thống định vị GPS. Các sơ đồ thiết kế và quy trình triển khai của từng khối cũng đã được trình bày chi tiết trong chương 3. Tiếp theo sẽ là chương triển khai thực nghiệm với các tập dữ liệu để kiểm tra hiệu quả của hệ thống.

## CHƯƠNG 4. TRIỂN KHAI THỰC NGHIỆM

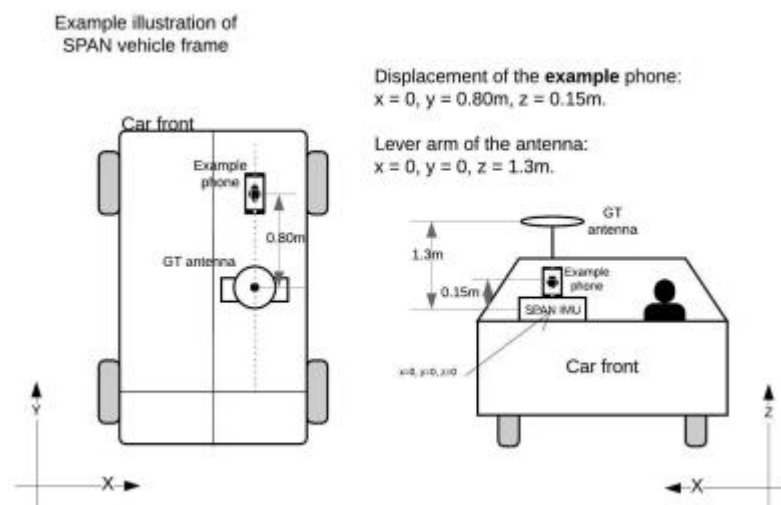
Chương 4 trình bày về kết quả các khối có trong hệ thống và kết quả của toàn bộ hệ thống, cuối cùng so sánh các phương pháp và đưa ra đánh giá.

### 4.1 Mô tả thực nghiệm

Kết quả của hệ thống được triển khai trên dữ liệu GNSS lấy từ cuộc thi “Google Smartphone Decimeter Challenge” do Google tổ chức. Hệ thống lấy dữ liệu gồm hai thiết bị chính: Thiết bị lấy các dữ liệu GNSS thô và thiết bị lấy tọa độ vị trí chuẩn (Ground truth). Thiết bị lấy dữ liệu là các dòng điện thoại thông minh có khả năng bắt được tín hiệu vệ tinh ở nhiều dải tần, cụ thể là điện thoại Xiaomi Mi8, Google Pixel 4XL, Google Pixel 5, Samsung S20,... Thiết bị lấy Ground truth được sử dụng là ăng ten NovAtel SPAN ISA-100C, đây là một thiết bị định vị cao cấp, kết hợp nhiều công nghệ GNSS của NovAtel với các cảm biến IMU để mang lại kết quả định vị chuẩn xác.

Quy trình thu thập dữ liệu của Google được triển khai trong Hình 4.1 như sau: Ăng ten ISA-100C được gắn lên nóc ô tô bằng một cánh tay robot để đảm bảo thu được tín hiệu đầy đủ và chuẩn xác. Tọa độ do ăng ten thu được sau đó được Google xử lý thêm bằng các thuật toán với IMU và RTK, hiệu chỉnh bằng phương pháp WLS để triệt tiêu sai số ngang (Horizontal error) và sai số ngang đường (Cross-track error) trung bình, đảm bảo sai số không bị lệch khỏi cận 0, cuối cùng là xử lý các trường hợp dữ liệu bất thường. Tập dữ liệu sau khi được hậu xử lý được coi như tọa độ chuẩn để so sánh.

Mặt khác, các thiết bị điện thoại thông minh được gắn vào mặt kính trước của ô tô và bật phần mềm chuyên dụng của Google để ghi lại tín hiệu GNSS thu được từ vệ tinh. Mỗi chiếc điện thoại trong một cuộc chạy cung cấp một tập dữ liệu chứa các dữ liệu GNSS thô cần thiết để xử lý. Tên của một tập dữ liệu có định dạng YYYY-MM-DD-{Mã vùng}-{Khu vực}-{Mã thu}. Ví dụ, 2020-05-14-US-MTV-1 có nghĩa là dữ liệu được thu vào ngày 14/05/2020 ở Mountain View, United States.



Hình 4.1 Cách thức lấy dữ liệu của Google

## 4.2 Triển khai thực nghiệm trên toàn bộ hệ thống

### 4.2.1 Phương pháp đánh giá thực nghiệm

#### 4.2.1.1. Phương pháp tính khoảng cách giữa hai tọa độ

Sai số của tọa độ được tính dựa trên khoảng cách giữa tọa độ và ground truth trong hệ tọa độ WGS84 tại cùng một mốc thời gian. Nhóm sử dụng công thức Vincenty để tính khoảng cách trên. Đây là phương pháp thường được sử dụng trong địa lý để tính khoảng cách giữa hai điểm trên bề mặt Trái Đất, có độ chính xác cao với hệ tham chiếu WGS84.

Bảng 4.1 Bảng mô tả ký hiệu của công thức tính khoảng cách Vincenty

Ký hiệu	Định nghĩa	Giá trị
$a$	Độ dài bán trục lớn của Trái Đất	6378137.0m
$f$	Độ dẹt của ellipsoid	1/298.257223563
$b = (1 - f) a$	Độ dài bán trục bé Trái Đất	6356752.3142m
$\Phi_1, \Phi_2$	Vĩ độ của các điểm	
$U_1 = \arctan((1 - f) \tan \Phi_1)$ , $U_2 = \arctan((1 - f) \tan \Phi_2)$	Vĩ độ trên mặt phẳng auxiliary	
$L_1, L_2$	Kinh độ của các điểm	
$L = L_2 - L_1$	Độ lệch giữa 2 giá trị kinh độ	
$\lambda$	Độ lệch giữa 2 giá trị kinh độ trên mặt phẳng auxiliary	
$\alpha_1, \alpha_2$	Góc phương vị tại các điểm	
$\alpha$	Góc phương vị tại đường xích đạo	
$s$	Khoảng cách giữa 2 điểm	
$\sigma$	Khoảng cách góc giữa 2 điểm	
$\sigma_1$	Khoảng cách góc giữa 1 điểm và xích đạo	
$\sigma_m$	Khoảng cách góc của điểm nằm giữa và xích đạo	

Dựa vào tọa độ của hai điểm ( $\Phi_1, L_1$ ) và ( $\Phi_2, L_2$ ), ta tìm khoảng cách  $s$ . Đầu tiên ta cần tính  $U_1, U_2$ , và  $L$ , đặt giá trị ban đầu của  $\lambda = L$ . Sau đó, lặp lại việc đánh giá các phương trình sau cho đến khi  $\lambda$  hội tụ:

$$\sin \sigma = \sqrt{(\cos U_2 \sin \lambda)^2 + (\cos U_1 \sin U_2 - \sin U_1 \cos U_2 \cos \lambda)^2}$$

$$\cos \sigma = \sin U_1 \sin U_2 + \cos U_1 \cos U_2 \cos \lambda$$

$$\sigma = \arctan2(\sin \sigma, \cos \sigma)$$

$$\sin \alpha = \frac{\cos U_1 \cos U_2 \sin \lambda}{\sin \sigma}$$

$$\cos^2 \alpha = 1 - \sin^2 \alpha$$

$$\cos(2\sigma_m) = \cos \sigma - \frac{2 \sin U_1 \sin U_2}{\cos^2 \alpha} = \cos \alpha - \frac{2 \sin U_1 \sin U_2}{1 - \sin^2 \alpha}$$

$$C = \frac{f}{16} \cos^2 \alpha [4 + f(4 - 3 \cos^3 \alpha)]$$

$$\lambda = L + (1 - C) f \sin \alpha \{ \sigma + C \sin \sigma [\cos(2\sigma_m) + C \cos \sigma (-1 + 2 \cos^2(2\sigma_m))] \}$$



Khi  $\lambda$  hội tụ đến giá trị chính xác (0.06mm) ta tiếp tục tính các phương trình:

$$u^2 = \cos^2 \frac{\alpha(a^2 - b^2)}{b^2}$$

$$A = 1 + \frac{u^2}{16384} \{4096 + u^2[-768 + u^2(320 - 175u^2)]\}$$

$$B = \frac{u^2}{1024} \{256 + u^2[-128 + u^2(74 - 47u^2)]\}$$

$$\Delta\sigma = B \sin\sigma \left\{ \cos(2\sigma_m) + \frac{1}{4}B(\cos\sigma[-1 + 2\cos^2(2\sigma_m)] - \frac{B}{6}\cos[2\sigma_m] [-3 + 4\sin^2\sigma] [-3 + 4\cos^2(2\sigma_m)]) \right\}$$

Công thức để tính khoảng cách giữa 2 điểm:

$$s = bA(\sigma - \Delta\sigma) \quad (4.1)$$

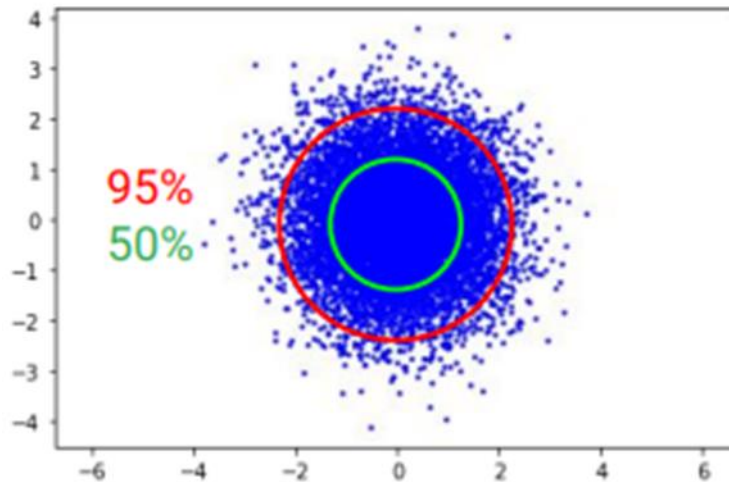
#### 4.2.1.1. Phương pháp tính sai số của tập dữ liệu

Nhóm tham khảo cách tính độ chính xác của cuộc thi mà Google cung cấp. Các khoảng cách giữa tọa độ hệ thống tính toán và ground truth tạo thành một phân phối. Sai số trên toàn tập dữ liệu được tính bằng trung bình cộng của khoảng cách phân vị thứ 50 (50% khoảng cách trong phân phối nhỏ hơn giá trị này) và phân vị thứ 95 (95% khoảng cách trong phân phối nhỏ hơn giá trị này), mô tả cụ thể tại Hình 4.2.

Kết quả được tính theo công thức:

$$d = \frac{\text{quantile}(s, 50) + \text{quantile}(s, 95)}{2} \quad (4.2)$$

- d là kết quả đạt được của tập dữ liệu
- s là tập khoảng cách của từng điểm so với giá trị chuẩn của nó
- quantile (s, 50) là phân vị 50 của tập s
- quantile (s, 95) là phân vị 95 của tập s



Hình 4.2 Hình mô tả phân vị 50 và 95

### 4.2.2 Kết quả thực nghiệm

Nhóm thực hiện so sánh kết quả phương pháp tăng độ chính xác định vị của điện thoại Android trên tập dữ liệu của Google đã cho sẵn với 3 tập dữ liệu thực hiện trên 3 máy khác nhau với các cung đường khác nhau của Google Smart Decimeter Challenge 2023:

2020-06-25-00-34-us-ca-mtv-sb-101/pixel4xl

2021-07-19-20-49-us-ca-mtv-a/sm-g988b

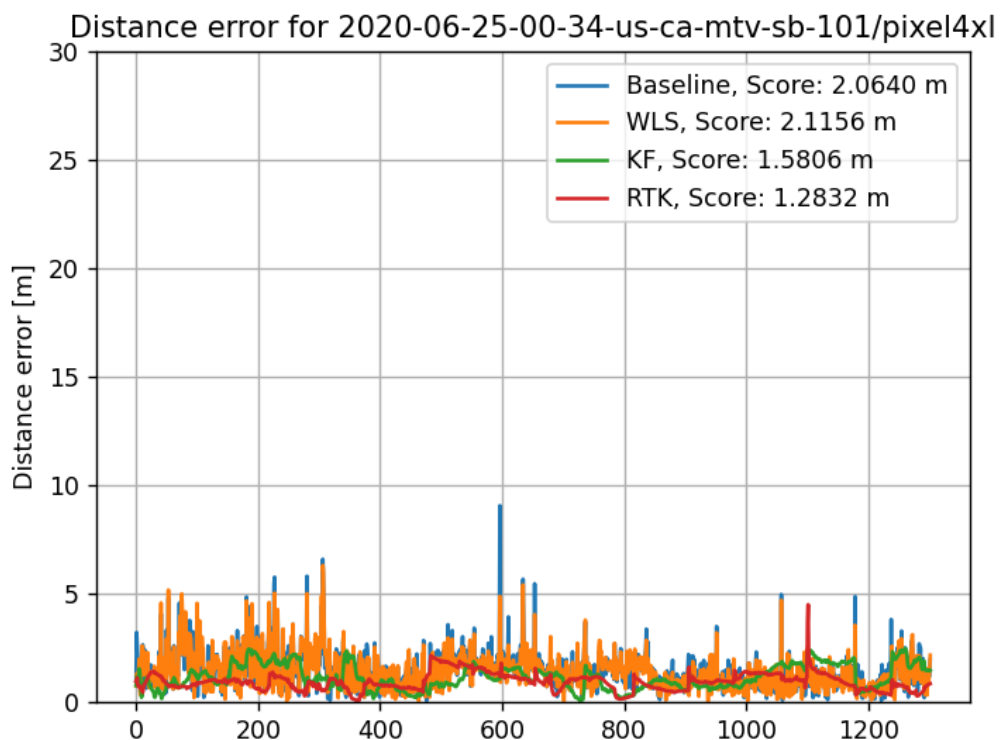
2023-09-07-19-33-us-ca/pixel5a

Kết quả được trình bày bằng cách so sánh sai lệch khoảng cách được tính bằng phương pháp như đã trình bày ở trên với ba tập tọa độ vị trí được xử lý bằng các thuật toán WLS, KF và RTK. Ngoài ra còn tập dữ liệu mẫu Baseline do Google tính toán và cung cấp. Dưới đây là các biểu đồ đường thể hiện giá trị sai lệch khoảng cách của từng thuật toán, cùng sai số trung bình tính được của mỗi tập dữ liệu.

Sau đó số điểm của các tệp sẽ được thống kê và so sánh ở biểu đồ giá trị sai lệch khoảng cách với:

- Trục tung: thể hiện các giá trị sai lệch khoảng cách giữa các phương pháp
- Trục hoành: thể hiện số lượng mẫu được so sánh cùng thời điểm.

#### 4.2.2.1. 2020-06-25-00-34-us-ca-mtv-sb-101/pixel4xl



Hình 4.3 Sai lệch khoảng cách của Baseline và các phương pháp khác với Pixel 4XL

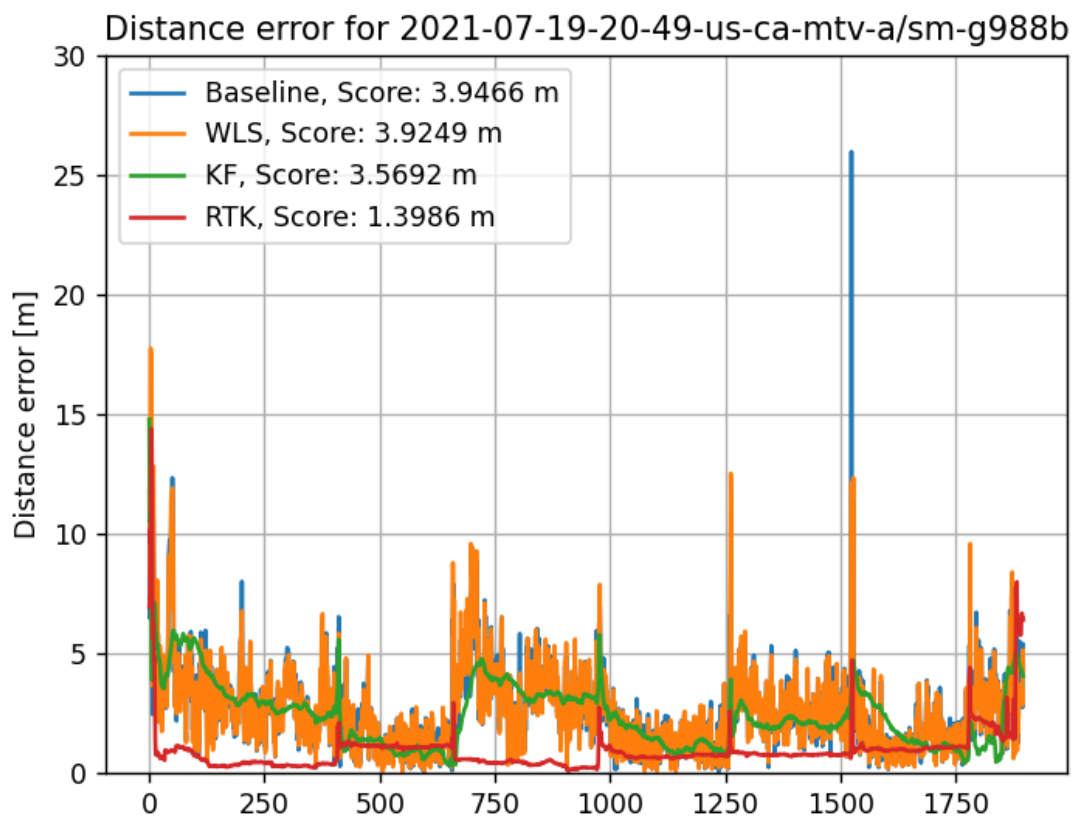
Biểu đồ thể hiện sai lệch khoảng cách cho thiết bị Pixel 4XL vào ngày 25 tháng 6 năm 2020. Trong đó:

- Đường màu xanh dương đại diện cho Baseline với sai số trung bình là 2.0640 mét.

- Đường màu cam là phương pháp WLS với sai số trung bình là 2.1156 mét.
- Đường màu xanh lá là phương pháp Kalman Filter với sai số trung bình là 1.5806 mét.
- Đường màu đỏ là phương pháp RTK với sai số trung bình là 1.2832 mét.

Từ biểu đồ, có thể thấy sai số trung bình của các phương pháp là tương đương nhau, trong Baseline có một vài điểm có sai số khá lớn tuy nhiên đã được hiệu chỉnh lại bằng các phương pháp khác. Có thể thấy các phương pháp WLS, KF và RTK có hiệu quả so với dữ liệu được tính sẵn. RTK là phương pháp giúp giảm sai lệch khoảng cách đáng kể nhất, với độ sai lệch tốt nhất là 1.2832 mét.

4.2.2.2. 2021-07-19-20-49-us-ca-mtv-a/sm-g988b



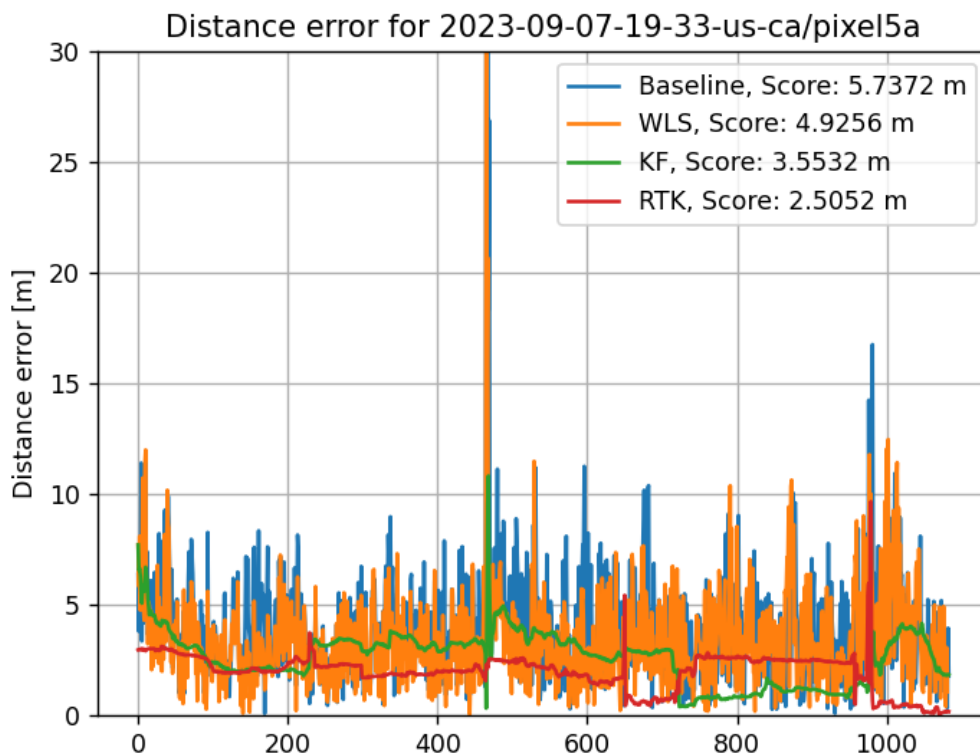
Hình 4.4 Sai lệch khoảng cách của Baseline và các phương pháp khác với Pixel 4A

Biểu đồ thể hiện sai số khoảng cách cho thiết bị SM-G988B vào ngày 19 tháng 7 năm 2021. Trong đó:

- Đường biểu diễn màu xanh dương đại diện cho Baseline với sai số trung bình là 3.9466 mét.
- Đường màu cam là phương pháp WLS với sai số trung bình là 3.9249 mét.
- Đường màu xanh lá là phương pháp Kalman Filter với sai số trung bình là 3.5692 mét.
- Đường màu đỏ là phương pháp RTK với sai số trung bình là 1.3986 mét.

Tương tự như tập dữ liệu trước đó, một số điểm sai lệch lớn đã được hiệu chỉnh bằng các phương pháp còn lại. RTK là phương pháp giảm sai lệch tốt nhất với sai số là 1.3986 mét.

#### 4.2.2.3. 2023-09-07-19-33-us-ca/pixel5a



Hình 4.5 Sai lệch khoảng cách của Baseline và các phương pháp khác với Pixel 4A

Biểu đồ thể hiện sai số khoảng cách cho thiết bị Pixel 5A vào ngày 7 tháng 9 năm 2023. Trong đó:

- Đường biểu diễn màu xanh dương đại diện cho Baseline với sai số trung bình là 5.7372 mét.
- Đường màu cam là phương pháp WLS với sai số trung bình là 4.9256 mét.
- Đường màu xanh lá là phương pháp Kalman Filter với sai số trung bình là 3.5532 mét.
- Đường màu đỏ là phương pháp RTK với sai số trung bình là 2.5052 mét.

Tương tự như hai tập trên, RTK vẫn là phương pháp giúp giảm đáng kể sai lệch về khoảng cách, với điểm số tốt nhất là 2.5052 mét.

*Bảng 4.2 Bảng đánh giá kết quả các phương pháp so với Baseline của Google*

<b>Độ chính xác</b> <b>Điện thoại</b>	<b>Google baseline</b>	<b>Kết quả nghiên cứu (Khối WLS)</b>	<b>Kết quả nghiên cứu (Khối Kalman Filter)</b>	<b>Kết quả nghiên cứu (Khối RTK)</b>
<b>Pixel4xl</b>	2.6040m	2.1156	1.5806m	1.2832m
<b>Pixel5a</b>	5.7372m	4.9256m	3.5532m	2.5052m
<b>Samsung Galaxy S21 Ultra</b>	3.9466 m	3.9249 m	3.5692 m	1.3986m

Từ bảng trên, ta thấy được phương pháp WLS có giúp làm giảm sai số, tuy nhiên không đáng kể trong một số trường hợp. Sau khi kết hợp với KF, sai số giảm đi khá nhiều, với điện thoại Pixel 4XL thì sai số giảm tới dưới 2 mét, tuy nhiên lại không có hiệu quả cao trên tập dữ liệu lấy từ điện thoại S21 Ultra. Phương pháp RTK cho hiệu quả tốt nhất, với sai số giảm đi còn dưới 1 nửa so với Baseline của Google.

#### **4.3 Kết luận chương 4**

Chương 4 đã trình bày chi tiết về quy trình triển khai thực nghiệm, bao gồm cách thu thập dữ liệu, phương pháp tính sai số. Kết quả đạt được của các hệ thống đối với tập dữ liệu có sẵn là khá tốt, tuy nhiên còn nhiều hạn chế đối với triển khai trong thực tế.

## KẾT LUẬN

### Kết luận chung

Trong đề tài đồ án này, nhóm chúng em đã nghiên cứu và phát triển các giải pháp tăng cường độ chính xác của hệ thống định vị toàn cầu GPS dựa trên dữ liệu GNSS thô thu được từ điện thoại thông minh. Đồ án đề ra hai hệ thống chính. Hệ thống thứ nhất xử lý dữ liệu GNSS bằng hai phương pháp Bình phương tối thiểu trọng số (WLS) và bộ lọc Kalman (KF). Hệ thống thứ hai sử dụng công cụ RTKLib để xử lý dữ liệu. Các hệ thống triển khai trên tập dữ liệu GNSS do Google cung cấp đã cho thấy hiệu suất cải thiện độ chính xác đáng kể, đặc biệt là công cụ RTKLib cho thấy hiệu quả rõ rệt với sai số giảm gần một nửa so với dữ liệu cung cấp sẵn.

Mặc dù các hệ thống đã thể hiện khả năng tăng độ chính xác trong môi trường thử nghiệm, việc triển khai trong môi trường thực tế vẫn chưa được ổn định. Các yếu tố giới hạn về phần cứng và môi trường thực tế gây ảnh hưởng khá lớn tới độ chính xác của hệ thống.

### Phương hướng phát triển trong tương lai

Trong tương lai, nhóm nghiên cứu sẽ tiếp tục tối ưu hóa và cải thiện các thuật toán xử lý dữ liệu GNSS để giảm thiểu sai số và tăng độ ổn định khi triển khai trong thực tế. Nghiên cứu và tích hợp thêm các kỹ thuật lọc nâng cao như Particle Filter hoặc các mô hình học sâu sẽ được thực hiện để cải thiện độ chính xác định vị. Ngoài ra, nhóm sẽ mở rộng và cải thiện hệ thống thu thập dữ liệu bằng cách phát triển các ứng dụng trên nhiều loại điện thoại thông minh khác nhau để có tập dữ liệu phong phú và đa dạng hơn, cũng như tích hợp các cảm biến bổ sung như cảm biến quán tính IMU để hỗ trợ và cải thiện độ chính xác của hệ thống định vị.

Các thử nghiệm thực tế sẽ được thực hiện trong nhiều môi trường khác nhau như đô thị, nông thôn, vùng núi và biển để đánh giá và cải thiện hiệu suất của hệ thống, đồng thời phân tích và điều chỉnh để phù hợp với đặc điểm từng môi trường cụ thể. Nhóm cũng sẽ tìm kiếm cơ hội hợp tác và chia sẻ dữ liệu với các tổ chức nghiên cứu và công ty công nghệ để nâng cao chất lượng và độ chính xác của hệ thống, tham gia các cuộc thi và dự án cộng đồng liên quan đến GNSS để học hỏi và cập nhật những tiến bộ mới nhất trong lĩnh vực này.

Cuối cùng, việc phát triển các hệ thống giám sát và cảnh báo thời gian thực dựa trên dữ liệu GNSS để ứng dụng trong các lĩnh vực như giao thông, nông nghiệp và cứu hộ sẽ được chú trọng, nhằm nâng cao tính ứng dụng và khả năng triển khai rộng rãi của hệ thống trong thực tế. Việc nghiên cứu và phát triển các giải pháp tăng cường độ chính xác định vị GNSS là một hướng đi quan trọng và có tiềm năng lớn trong việc ứng dụng công nghệ GPS vào cuộc sống hàng ngày. Chúng tôi hy vọng rằng những kết quả đạt được từ đề tài này sẽ đóng góp vào việc nâng cao hiệu suất và độ chính xác của các hệ thống định vị trong tương lai.

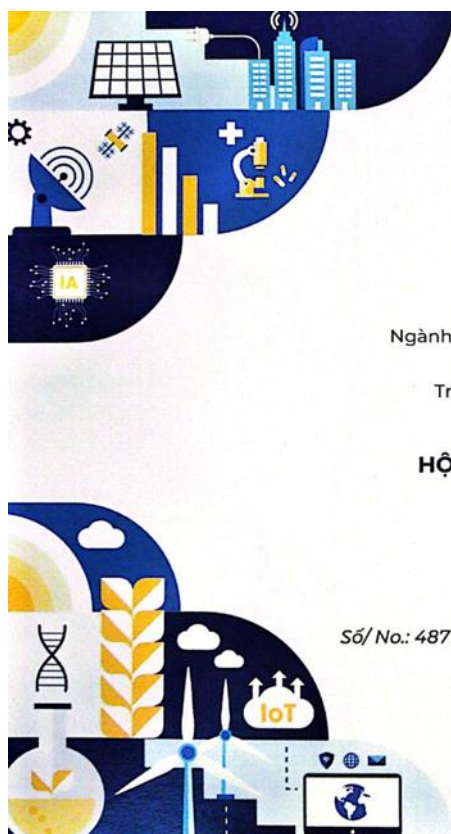
## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] G. Blewitt, Basics of the GPS Technique: Observation Equations, 1996.
- [2] K. H. Yang, "Chapter 3 - Isoparametric Formulation and Mesh Quality," 2018.
- [3] [Online]. Available:  
<https://fsppm.fulbright.edu.vn/attachment.aspx?Language=&ID=63851>.
- [4] [Online]. Available:  
[https://www2.hcmuaf.edu.vn/data/phucnt/CHAPTER3-BIENDOI\\_TOADO.pdf](https://www2.hcmuaf.edu.vn/data/phucnt/CHAPTER3-BIENDOI_TOADO.pdf).
- [5] [Online]. Available:  
[https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Transformations\\_between\\_ECEF\\_and\\_ENU\\_coordinates](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Transformations_between_ECEF_and_ENU_coordinates).
- [6] A. Becker, "Kalman Filter," [Online]. Available:  
[https://www.kalmanfilter.net/VI/background\\_vi.html](https://www.kalmanfilter.net/VI/background_vi.html).
- [7] X. Zhai, "Localization and Change Point Detection using GPS Data".
- [8] S. F. Kamal Parvazi, "The mathematical weighting of GNSS observations based on different types of receivers/antennas and environmental conditions," 2023.
- [9] NASA, "CDDIS, EARTHDATA," [Online]. Available:  
<https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/data/daily/>.
- [10] C. G. Y. L. a. P. S. B. Chen, Real-time precise point positioning with a Xiaomi MI 8 android smartphone., 2019.
- [11] Z. X. Y. W. L. Z. a. R. Z. J. Liu, oward Achieving Robust Sub-meter Kinematic Positioning on Android with Multi-constellation GNSS, ION GNSS+ 2019.
- [12] ESA\_GNSS-Book\_TM-23\_Vol\_I.
- [13] "GPS.gov: Space Segment," [Online].
- [14] "GPS.gov: Control Segment," [Online].
- [15] T. S. Stombaugh, D. McLaren and B. K. and Koosra, The Global Positioning System, 2005.
- [16] "Google Smartphone Decimeter Challenge 2023-2024 | Kaggle," [Online].
- [17] IS-GPS-200L.
- [18] C.-M. L. a. K.-D. Park, Generation of Klobuchar Ionospheric Error Model Coefficients Using Fourier Series and Accuracy Analysis.
- [19] K. S. U. K. o. S. A. Ashraf Farah College of Engineering, Assessment of UNB3M neutral atmosphere model and EGNOS model for near-equatorial-tropospheric delay correction.
- [20] "[https://www.rtklib.com/prog/manual\\_2.4.2.pdf](https://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf)," [Online].

- [21] S. Hust, "Algebra, MI1141," [Online]. Available:  
[https://fami.hust.edu.vn/wp-content/uploads/MI1141-  
%C4%90a%CC%A3i-so%CC%82%CC%81-Nho%CC%81m-1.zip](https://fami.hust.edu.vn/wp-content/uploads/MI1141-%C4%90a%CC%A3i-so%CC%82%CC%81-Nho%CC%81m-1.zip).
- [22] L. D. B. v. c. t. g. khác, Giáo trình Vật lý đại cương – 3 tập Lý thuyết và Bài tập, NXB Giáo dục..



## PHỤ LỤC



ĐẠI HỌC  
BÁCH KHOA HÀ NỘI  
HANOI UNIVERSITY  
OF SCIENCE AND TECHNOLOGY



*Giấy chứng nhận*  
**CERTIFICATE**

**LÊ THÀNH LUÂN**

Ngành học/Field of study: Kỹ thuật điện tử - viễn thông /Electro&Telecom Engr.

MSSV/ Student ID: 20203494 - K65

Trường Điện - Điện tử/School of Electrical and Electronic Engineering

*Đã tham gia/Participated in*

**HỘI NGHỊ SINH VIÊN NGHIÊN CỨU KHOA HỌC LẦN THỨ 41  
THE 41<sup>st</sup> STUDENT RESEARCH CONFERENCE**

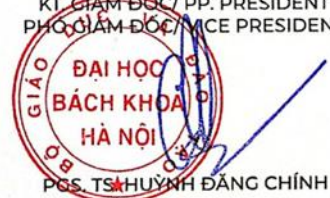
Năm học/Year: 2023-2024

Mã đề tài/ Research ID: S1.6.14

Số/ No.: 4871/QĐ-ĐHBK

Ngày/ Date: 28/05/2024

KT. GIÁM ĐỐC/ PP. PRESIDENT  
PHÓ GIÁM ĐỐC/ MCE PRESIDENT



PGS. TS. HUỖNH ĐĂNG CHÍNH