



СОФИЙСКИ УНИВЕРСИТЕТ
“СВ. КЛ. ОХРИДСКИ“
ФИЗИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ
КАТЕДРА “МЕТЕОРОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА“

СОНДИРАНЕ НА ТРОПОСФЕРАТА С МЕТОДА ГНСС ТОМОГРАФИЯ

БАКАЛАВЪРСКА ДИПЛОМНА РАБОТА

на

Евгения Стефанова Егова

ф.н. 80092

Научен ръководител:

/доц. д-р Г. Герова/

Ръководител катедра:

/доц. д-р Н. Рачев/

Рецензент:

/ас. д-р В. Данчовски/

София Юли 2013

Съдържание

1 Увод	4
2 Обзор на научните приложения на томографския метод	5
2.1 Томографски метод: първи приложения	5
2.2 Изследване на атмосферата с метода ГНСС томография	7
3 ГНСС Томография	11
3.1 Грешки при разпространение на ГНСС сигнала	11
3.2 Атмосферна рефракция	13
3.3 Хидростатично и водно закъснение	14
3.4 Наклонено водно закъснение	16
3.5 Система уравнения на ГНСС томография	17
3.6 Рефракционен Калман Филтър	20
4 Примери за приложение на метода ГНСС томография	24
4.1 ГНСС томография: студен фронт	24
4.2 ГНСС томография: конвективен процес	27
4.3 Подобрения на метода томография	31
5 Заключение	34

Списък на фигуранте

2.1	Компютърна томография в медицината	6
2.2	Регистрация на ГНСС сигнали с наземен приемник и с приемник на спътник на ниска орбита (радиокултация) и реконструкция на електронното съдържание на йоносферата	7
2.3	Приложение на томографския метод за сondиране на тропосферата	9
2.4	ГНСС томографска мрежа от воксели	10
3.1	Общи грешки на ГНСС сигнала	12
3.2	Зенитно (ЗПЗ - ZTD) и наклонено (НПЗ - STD) пълно закъснения	17
3.3	Опростен модел на мрежа от воксели с показан път на ГНСС сигнали между 2 приемника и 4 спътника	19
4.1	Мрежата от хоризонтална проекция на воксели за територията на Германия. С червени точки са означени ГНСС станциите предоставящи наблюдения за метода томография	25
4.2	Път на наклонените ГНСС закъснения от 9 спътника, получени от един наземен приемник за 15 минутен интервал от време	26

4.3 Сравнение на резултата от ГНСС томографията (среден панел) с полето на водната пара от числен модел COSMO-DE (ляв панел), и полето на ИВП (десен панел)	26
4.4 Вертикален разрез на водната рефракция на 6 август 2007 в 22:00 UTC	28
4.5 Радарна отражаемост на 15 юли 2007	29
4.6 Водна пара (лява колона) и плътност на водната пара на височина 1000 m (дясна колона) на 15 юли 2007 от ГНСС томография	30
4.7 Времево изменение на водната пара за четири ГНСС станции на 15 юли 2007	31

Глава 1

Увод

Разработването на томографския метод започва през 30-те години на ХХ век, като първите приложения са в медицината, а по-късно в сейзмологията и изследването на нови материали. Чрез този метод се получават двумерни разпределения и тримерни профили на изследваните обекти. В последното десетилетие методът се използва и за атмосферно сондиране - по-специално на йоносферата и тропосферата.

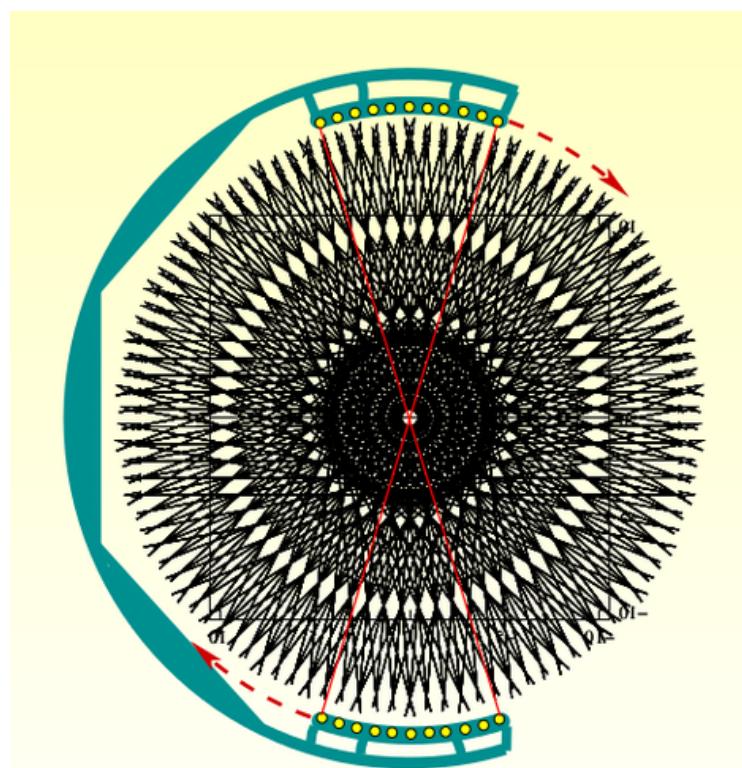
Цел на настоящата дипломна работа е да се направи обзор на метода томография за сондиране на тропосферата. Дипломната работа е се състои от увод, четири глави и заключение. В глава 2 са представени общи сведения за метода и приложението му в различни области на науката. В глава 3 е описан методът ГНСС (Глобални навигационни спътникови системи) томография за сондиране на тропосферата, както и проблемите свързани с реализацията му. В глава 4 са представени два примера за използване на метода - проследяване на студен фронт и конвективен процес, които показват ползата от прилагането на метода за намиране на разпределението на водната пара. Дискутиирани са и предложения за подобряване на метода томография, с цел приложението му в оперативната прогноза на времето.

Глава 2

Обзор на научните приложения на томографския метод

2.1 Томографски метод: първи приложения

Томографският метод е разработен с цел получаване на двумерни разпределения и тримерни профили на изследваните обекти, посредством интегрални измервания от различни ъгли и позиции. Той е предложен през 1930 година от рентгенолога Alessandro Vallebona, а през 1953 В. Pollak публикува статия в медицински журнал, която описва приложенията на томографията. В медицината за получаване на 2D томографски изображенията се използват източник и детектор, правещ снимки под различни ъгли. На фиг. 2.1 е представен системата детектор-източник, която се върти около наблюдавания обект, намиращ се в центъра. Вижда се геометрията, която се постига с наблюденията направени от различни ъгли и позиции. Необходимо условие за получаване на изображение е наличието на голям брой наблюдения покриващи обекта. Тази добре контролирана среда дава възможност за реконструкция на изображения с висока резолюция. За пръв път приложението на метода в медицината е представено от двама учени- G.N. Hounsfield and A.M. Cormack през 1979 (*Gradinarsky, 2002a*) Томографският метод е широко използван в медицинската практика.

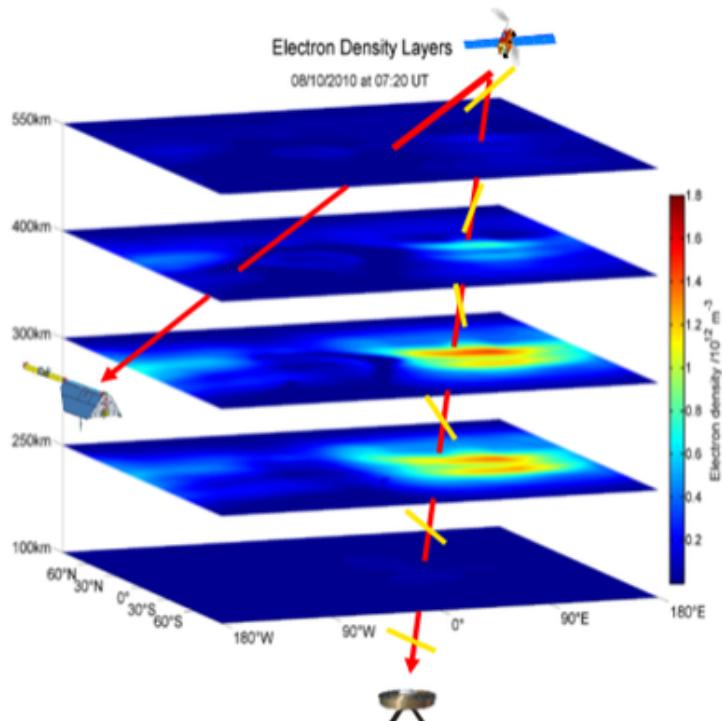


Фигура 2.1: Компютърна томография в медицината

тика за изследване на човешкото тяло, като първата снимка на човек с томограф е направена през 1971. Второто приложение на томографията е в сейзмологията (*Nolet, 1987*). Методът е успешно приложен за изследване на строежа на Земята с цел да се разбере по-добре нейните структура и състав. Приложенията на томографията в медицината и геофизиката са сходни, като и при двете изследвания се генерира серия от плоски изображения. Тези изображения се създават като се проследи преминаването на вълните и тяхната енергия през изследвания обект. В сейзмологията могат да се използват два различни източника на енергия. Единият е енергията от земетресенията, която генерира вълни, регистрирани по-късно от приемници на земната повърхност. С получената информация се реконструира изображение на материала, по начина на преминаване на вълните. Другият метод е чрез генериране на вълни и наблюдението на тяхната рефракция. Тази техника се използва за получаване на информация от обекта, представляващ интерес за изследването. Това е сходно с прило-

жението в медицината, където информация за изследвания обект също се събира само от рефракцията на вълните при преминаването им през него. За разлика от приложението в медицината, контролът върху геометрията на детектор-източник в сейзмологията е по-малък. Въпреки това предимството е, че полето и детекторът не се изменят драстично във времето. Тази времева стабилност дава възможност за оптимизация на мрежата (*Gradinarsky*, 2002b).

2.2 Изследване на атмосферата с метода ГНСС томография



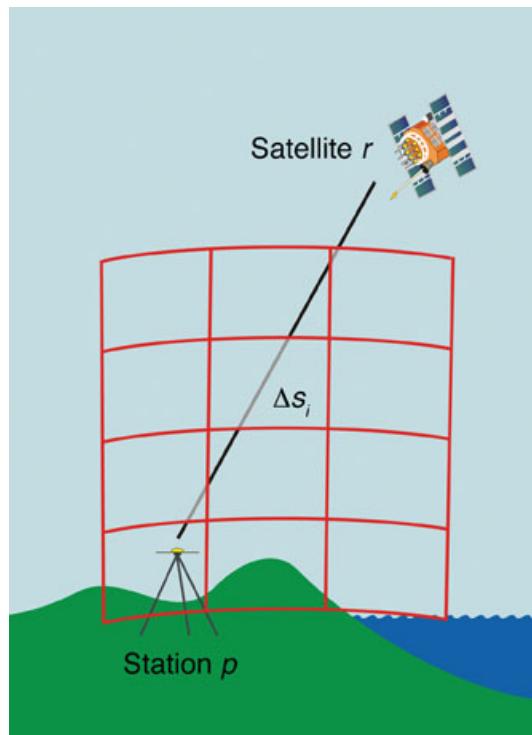
Фигура 2.2: Регистрация на ГНСС сигнали с наземен приемник и с приемник на спътник на ниска орбита (радио окултация) и реконструкция на електронното съдържание на йоносферата.

Томографският метод намира приложение и в изследването на ат-

мосферата и по-специално на йоносферата (атмосферният слой между 50 и 1000 km съдържащ свободни електрони) и тропосферата. Приложението на томографията за изучаване на йоносферата е предложено от *Ruffini et al.* (1998). Изследването на вертикалното разпределение на свободните електрони в йоносферата е възможно, тъй като сателитните сигнали преминават през различни участъци на йоносферата. Предимството на томографския метод при йоносферното сондиране, е че освен регистрариране на сигналите от (ГНСС) от наземни приемници се използва и регистрация на сигнала от спътници на ниски орбити (200-800 km). Методът за регистрация на ГНСС сигнала от спътници на ниски орбити е известен като ГНСС радио окултация. На фиг. 2.2 е показана реконструкцията на йоносферата чрез използване на радио окултация и измервания от наземни спътници. Вижда се, че ГНСС сигналите преминават през слоеве с различно съдържание на свободни електрони. След обработката на сигналите се получава триизмерна картина за съдържанието на свободни електрони в йоносферата.

Тропосферата се простира от земната повърхност до височина 12-18 km и съставена от газове, течни и твърди частици (аерозоли). Около 50% от водната пара в атмосферата се намира на височина от морското ниво до 850 hPa (1.5 km). Използване на томографския метод за сондиране на тропосферата е предложено от *Flores* (1999). На фиг. 2.3 е показан принципът на ГНСС томографията за тропосферно сондиране.

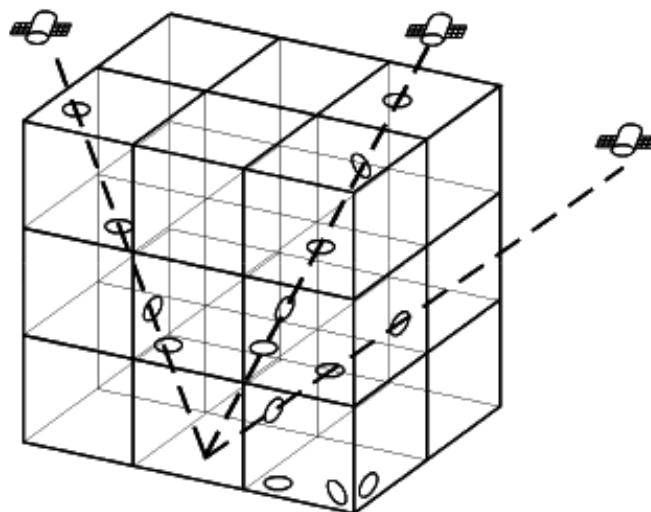
Пространството над наземната станция може да се опише от чрез мрежа от така наречени "тримерни пиксели" или "воксели" (фиг. 2.4). Изпратеният от ГНСС спътник сигнал преминава през голям брой воксели и се регистрира от наземния приемник. Във всеки воксел се приема, че атмосферната рефракция е константа. За да се приложи правилно методът томография, е необходима мрежа от воксели с голям брой преминаващи през нея сигнали. В най-добрия случай във всеки воксел от мрежата трябва да има поне едно измерване. Поради ограничения брой сателити и приемници това не е възможно и се налага модифициране на мрежата. Чрез модифициране на мрежата може да се увеличи резолюцията при томографията (по-малки размери на мрежата) на местата, където се пре-



Фигура 2.3: Приложение на томографския метод за сондиране на тропосферата

сичат повече наблюдения или да се намали резолюцията (по-големи размери на мрежата) за районите с по-малко наблюдения. Чрез наблюдения от ГНСС приемници, формиращи гъста локална мрежа, може да се получи информация, както за количества водна пара по пътя на сигнала, така и за нейната тримерна структура. Първите резултати използвани този подход, наречен ГНСС томография, са приложени успешно за възстановяване на рефракцията, дължаща се на водната пара. За нуждите на оперативната прогноза на времето е необходимо точно определяне на разпределението на водната пара в атмосферата и промяната ѝ с времето. Времевата и пространствена информация за разпределението на водната пара, която се получава чрез метода ГНСС томография е от голям интерес. За реализацията на томографията са разработени няколко модела:

-Разработен е пакет LOTTOS (Local Tropospheric Tomographic Software) (*Flores*, 1999), който използва данни от ГНСС. С него са направени симу-



Фигура 2.4: ГНСС томографска мрежа от воксели.

лации и сравнения между метода томография и реални данни (*Flores et al.*, 2000).

-В ГНСС метеорологичен проект в Япония *Seko et al.* (2000) и *Hirahara* (2000) разработват томографски софтуерен пакет с основна цел помагане на изследването на водната пара по време на азиатските мусони.

-В Швейцария *Kruse* (2001) разработва софтуер наречен AWATOS (Atmospheric Water Vapor Tomography) а *Troller et al.* (2002) прави симулации и анализ на получените резултати.

-Методът разработен *Grandinarsky* (2002b) и описан в глава 3 се базира на използване на калманов филтър и е наречен Рефракционен Калманов Филтър (РКФ).

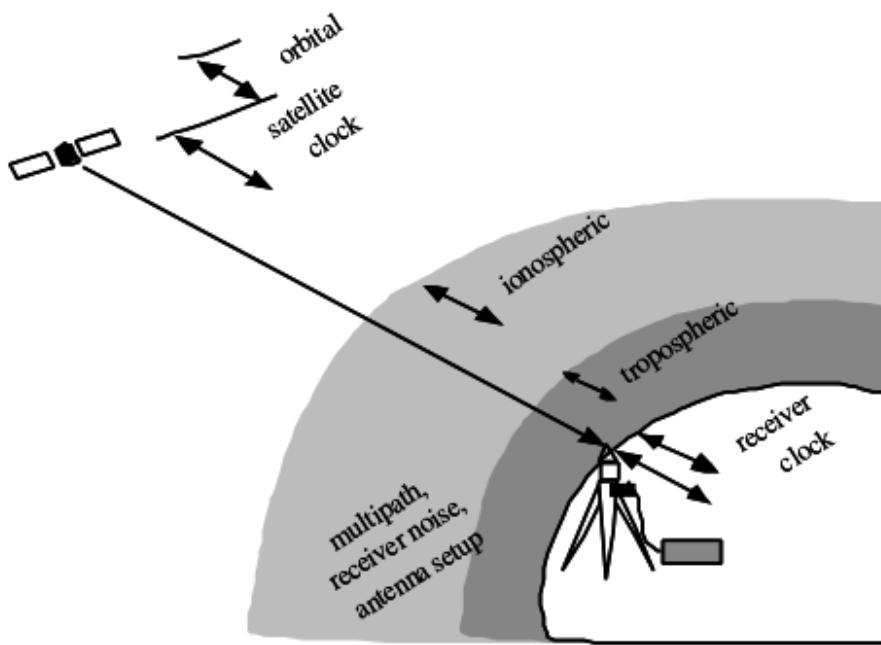
Глава 3

ГНСС Томография

3.1 Грешки при разпространение на ГНСС сигнала

Важно е да се оценят грешките при ГНСС наблюденията, тъй като те имат директно влияние върху точността на измерванията. На фиг. 3.1 са показани възможните източници на грешки. Те са: 1) орбитални грешки, 2) грешки на часовника на спътника, 3) йоносферни грешки, 4) тропосферни грешки, 5) грешка на часовника на наземния приемник и 6) грешка вследствие на многократно отражение на ГНСС сигнала от наземни прегради.

- 1) Орбиталната грешка представлява разликата между позицията на спътника изчислена от предадената информация за ефемерида (прекурсорна информация за орбитата, която се обновява на всеки два часа) и "истинската" позиция на спътника. Нормално тези грешки варираат от 5 до 25 м, но може да достигне и 100 м.
- 2) Грешките на часовника на спътника са от порядъка на 10 м, като тези корекции са достъпни от информацията за спътника.
- 3) Йоносферните грешки варираат от 50 м към зенит (където ъгълът е 90°) до 150 м към хоризонта (ъгълът е 0°).



Фигура 3.1: Общи грешки на ГНСС сигнала

- 4) Тропосферните грешки са от 2 м в зенит до 20 м за сигнали на 10° над хоризонта. Грешките за сателитите на ниски тъгли са по-големи, защото сигналът преминава по-дълъг път през тропосферата и йоносфера.
- 5) Грешката на часовника на наземния приемник е в диапазон от 10 м до 100 м, в зависимост от качеството на часовника.
- 6) Появяват се грешки от многократно отражение на ГНСС сигнала от наземни препятствия. Сигналите се получават директно, заедно с отразения сигнал от близо намиращи се обекти като истинския сигнал е засегнат от интерференцията с отражения.

Уравнението, което описва тези грешките при разпространение на ГНСС сигнала е:

$$L_{1i}^k = \varrho_i^k(t) + N_{1i}^k \lambda_1 + T_i^k(t) + I_i^k(t) + c(\delta_i(t) - \rho_k(t)) + \epsilon$$

където k е индексът за спътника, а i за приемника. Членовете имат значение на: ϱ -разстояние, N - неопределеност, δ_i -параметър на часовника на наземния приемник, δ_k - параметър на часовника на спътника, T - грешка от тропосферата, I - грешка от йоносферата, ϵ - остатък.

3.2 Атмосферна рефракция

Поради факта, че показателят на пречупване n на атмосферата не е равен на единица (поради наличието на газове) за електромагнитни вълни в радио диапазона, те се разпространяват със закъснение $\Delta L(\epsilon, \phi)$, сравнено с разпространението във вакум. Колкото по-дълъг е пътят изминат през атмосферата, толкова по-голямо е закъснението. Закъснението варира главно с височина ϵ от посоката на пристигане на сигнала, но също и с азимута ϕ за нехомогенна атмосфера. Закъснението може да се представи като:

$$\Delta L(\epsilon, \phi) = \int_S n \, dx - G \quad (3.1)$$

Първият член в 3.1 определя най-късия път на разпространение на радио сигнала. Вторият член е най-късият геометричен път. Можем да представим горното уравнение като:

$$\Delta L(\epsilon, \phi) = \int_S (n - 1) \, dx + S - G \quad (3.2)$$

където S е геометричният път на рефракционния сигнал: $S = \int_S dx$. Първият член е закъснението на сигнала, дължащо се на намалената скорост на разпространение, вследствие на показателя на пречупване. Разликата между вторият и третият отчита геометричното закъснение, причинено от закривянето на сигнала. Геометричното закъснение може да се пре-небрегне за ъгли на наблюдение около 15° , но трябва да се отчете и за по-ниски ъгли (5°), където то достига стойности 10 см. За удобство, ин-

дексът на рефракция n се представя като рефракция N :

$$N = 10^6(n - 1) \quad (3.3)$$

Тогава уравнение 3.2 добива вида:

$$\Delta L(\epsilon, \phi) = 10^{-6} \int_S N(s) dx. \quad (3.4)$$

3.3 Хидростатично и водно закъснение

Поради различната природа на газовете съставящи атмосферата, закъснението на ГНСС сигнала може да бъде разделено на хидростатично и водно. Водното закъснение се дължи на индуцирания и на постоянния диполен момент на водната молекула. Хидростатичното е вследствие на индуцирания диполен момент на всички останали газове в атмосферата. И двата ефекта са недисперсионни на микровълнови честоти. Използвайки представянето на рефракцията за газ, съставен от q компоненти (Debye, 1929) и трансформирайки го за случая на атмосфера, получаваме:

$$N_{atm} = \sum_{i=1}^{q_{dry}} A_i \rho_i + (A_\nu + \frac{B_\nu}{T}) \rho_\nu \quad (3.5)$$

където сумата е направена за сухото закъснение, а вторият и третият член отчитат разпределението на водната пара. Константите A_i и B_i описват индуцирането и ориентирането на поляризацията на молекулите. B_i е нула за сухите газове, T е температурата, а ρ_i е плътността на i -тата компонента. Използвайки уравнението на състоянието на i -тата компонента $p_i = Z_i \rho_i R_i T$ (R_i -газова константа) (Elgered, 1993), рефракцията N на неутралната атмосфера се записва като:

$$N_{atm} = k_1 \frac{p_d}{T} Z_d^{-1} + k_2 \frac{p_\omega}{T} Z_\omega^{-1} + k_3 \frac{p_\omega}{T^2} Z_\omega^{-1} \quad (3.6)$$

където p_d е парциалното налягане на сухата компонента, p_ω е парциалното налягане на водната пара, Z_d^{-1} и Z_ω^{-1} са реципрочните стойности на

свиваемостта на сухия и влажния въздух. Стойностите за константите k_i , $i \in 1, 2, 3$, както и тези за свиваемостта на газовете са дадени от *Davis et al.* (1985). Възможно е, първият член на уравнение 3.6 да се представи като се приема, че се използва обща плътност $\rho = \rho_\omega + \rho_d$, а не сума от плътностите на водните и хидростатичните компоненти (*Davis et al.*, 1985).

$$N_{atm} = k_1 R_d \rho + k_2' \frac{p_\omega}{T} Z_\omega^{-1} + k_3 \frac{p_\omega}{T^2} Z_\omega^{-1} \quad (3.7)$$

където $k_2' = k_2 - k_1 [M_\omega / M_d]$, а M_ω и M_d са моларните маси на водната пара и на сухия въздух, а R_d е специфичната газова константа за сухия въздух ($R_d = R/M_d$, R е универсалната газова константа). Тази форма на първия член на рефракцията, позволява интегриране в уравнение 3.4 без знанието на профилите на различни височини на сухите компоненти. Използвайки крайния резултат за сухото закъснение (*Davis et al.*, 1985), което благодарение на предположението за хидростатично равновесие занапред се отнася към хидростатично закъснение, се получава уравнението:

$$\Delta L_h = [(2.2768 \cdot 10^{-3} \pm 5 \cdot 10^{-7})] \frac{P_0}{f(\lambda, H)} \quad (3.8)$$

$$f(\lambda, H) = (1 - 2.66 \cdot 10^{-3} \cos(2\lambda) - 2.8 \cdot 10^{-7} H) \quad (3.9)$$

където ΔL_h е в метри, P_0 е атмосферното налягане при земята в hPa, λ и H са географската широта в градуси и височината над геоида в метри. Останалите два члена са свързани с водната пара:

$$N_\omega = [k_2' \frac{p_\omega}{T} + k_3 \frac{p_\omega}{T^2}] Z_\omega^{-1} \quad (3.10)$$

В уравнение 3.10 влиянието на свиваемостта Z_ω може да се пренебрегне поради малкия ефект, който оказва (по-малък от грешката на цялата формула) (*Rueger*, 1999). Общото количество водна пара породило водното закъснение може да се получи като се интегрира по пътя на разпространение на сигнала. Тъй като получаването профила на водната пара е трудно само чрез наземни измервания на температурата, налягането и влажността, се налага използването на повече методи като например използване на радиометър за измерване на водна пара и други техники. Често, за прес-

мятане на интегрираното водно закъснение (ΔL_ω) са използвани профили на температурата, налягането и относителната влажност, получени от аерологични сондажи. Установяването на закъснението чрез използване на тези профили може да се получи от формулата:

$$\Delta L_\omega = 10^{-6} k_3' \int \frac{p_\omega}{T^2} ds \quad (3.11)$$

Където $k_3' = k_3 + k_2' T_m$ е коефициентът k_2 , модифициран за ефекта на константата k_2' ; T_m е средната температура на атмосферата и се дава с:

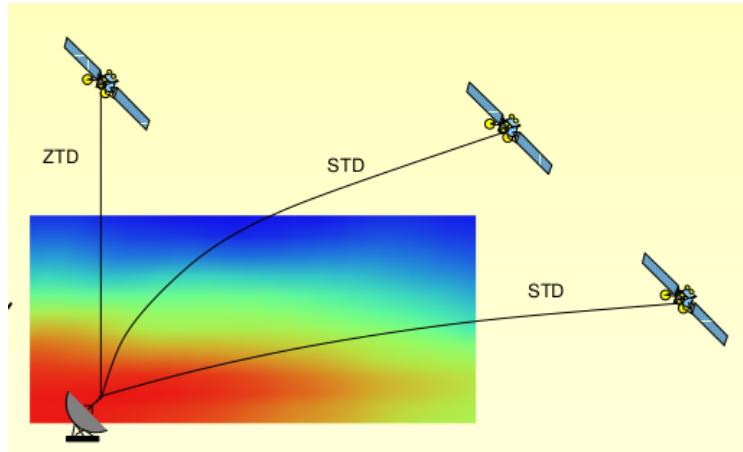
$$\int \frac{e}{T} dz = T_m \int \frac{p_\omega}{T^2} dz \quad (3.12)$$

За пресмятане на закъснението, трябва да бъде установена средната температура на атмосферата за определено място. Това може да се постигне или чрез интегриране на ансамбъл от профили от аерологичен сондаж и намирането на стойностите за всеки сезон и местоположение, или чрез предположението за линейна връзка между наземните температури и стойностите на "средната температура". Тези коефициенти са намерени чрез използването на фит с линейна регресия за установяването на стойностите. Ако са използвани подходящи константи k_i очакваната грешка, дължаща се на грешката на средната температура на атмосферата е под 0.2 mm за зенитното закъснение (Davis et al., 1985).

3.4 Наклонено водно закъснение

Томографският метод базиран на наклонените пълни закъснения (НПЗ) (Ware et al., 1997) има следните предимства: 1) използва се по-голям набор от наблюдения, 2) наблюденията съдържат повече информация за нееднородната атмосфера-градиенти на температурата и влажността, докато ЗПЗ(зенитно пълно закъснение) се използват при условие на еднородна атмосфера и 3) ЗПЗ могат да се приемат като частен случай на НПЗ. НПЗ осигуряват информация за изследването на водната пара с метода томография, с който могат да се направят 3D профили на разпределението ѝ в

атмосферата.



Фигура 3.2: Илюстрация на Зенитно (ЗПЗ - ZTD) и наклонено (НПЗ - STD) пълно закъснения.

За изчисляване на наклонени закъснения използваме формулата:

$$STD = m_h \cdot ZHD + m_w \cdot [ZWD + \cot\epsilon(G_N \cos\phi + G_E \sin\phi)] + delta \quad (3.13)$$

където ZHD и ZWD са зенитното хидростатично и водно закъснения. m_h и m_w хидростатичната и водна функции за проекция към зенит, G_N и G_E градиентните параметри на закъсненията в северна и източна посоки, ϵ е тъгъла, ϕ е географската ширина, а $delta$ е остатъка. За да се намери наклонено закъснение е нужно да се отдели зенитното хидростатично от зенитното водно закъснение. След използването на уравнения 3.4 и 3.7, които дават двете закъснения и замествайки в уравнение 3.13 се намират търсените наклонени закъснения.

3.5 Система уравнения на ГНСС томография

Задача на метода томография е съставяне и решаване на система от уравнения. В медицината измерванията на човешкото тяло се правят от всички страни и за достатъчно дълго време. Това е необходимо условие, ако вътрешната структура на тялото трябва да се намери само с външни измер-

вания. При томографията измерванията в атмосферата са възможни само в определена конфигурация, зависеща от местоположението на спътника и наземния приемник.

Броят на преминаващите ГНСС сигнали през всеки voxel зависи от гъстотата на мрежата от voxeli. Мрежата от своя страна, зависи от броя на слоевете и броя на voxelите за един слой, от разпределението на наземните станции, положението на спътниците и от времето за наблюдение. На практика няма достатъчно спътници и наземни станции, които да правят измервания във всеки voxel. Това води до лошо дефинирана задача, което е основен проблем при томографския метод. В някои voxeli има много измервания, докато в други такива изобщо липсват. Цялата система уравнения не е добре дефинирана и се появява проблем с еднозначното ѝ решаване.

За намиране на наклоненото закъснение на ГНСС сигнала в атмосферата се използва уравнението:

$$STD = 10^{-6} \int_S N ds \quad (3.14)$$

където N е рефракцията на атмосферата, а S пътят на ГНСС сигнала. В случая, полето на рефракция N трябва да се намери и реконструира.

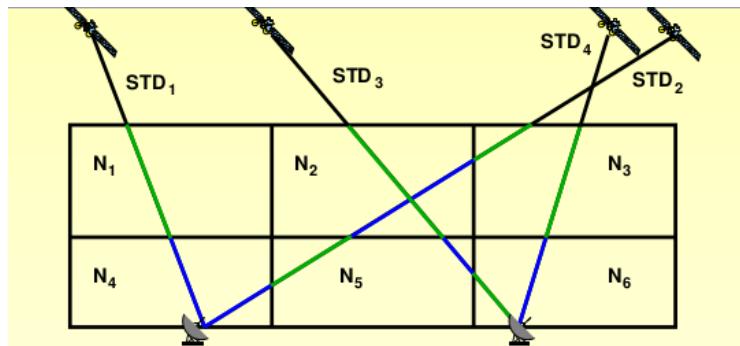
За да се реши уравнение 3.13 се конструира дискретна мрежа от клетки наречени voxeli, в които рефракцията се приема за константа. Получава се уравнението:

$$Ax = m \quad (3.15)$$

където m е векторът, който представя наблюденията или наклонените водни закъснения, x дава моментното състояние на атмосферната рефракция N_j във всеки voxel j а матрицата A дава състоянието x на наблюдение m .

Системата уравнения за представеният на фиг. 3.3 опростен модел от 4 спътника и 2 наземни приемника има следния вид:

$$I_{11}N_1 + 0N_2 + 0N_3 + I_{14}N_4 + 0N_5 + 0N_6 = STD_1$$



Фигура 3.3: Опростен модел на мрежа от воксили с показан път на ГНСС сигнали между 2 приемника и 4 спътника.

$$0N_1 + I_{22}N_2 + I_{23}N_3 + I_{24}N_4 + I_{25}N_5 + 0N_6 = STD_2 \quad (3.16)$$

$$0N_1 + I_{32}N_2 + 0N_3 + 0N_4 + I_{35}N_5 + I_{36}N_6 = STD_3$$

$$0N_1 + 0N_2 + I_{43}N_3 + 0N_4 + 0N_5 + I_{46}N_6 = STD_4$$

$$\begin{pmatrix} I_{11} & 0 & 0 & I_{14} & 0 & 0 \\ 0 & I_{22} & I_{23} & I_{24} & I_{25} & 0 \\ 0 & I_{32} & 0 & 0 & I_{35} & I_{36} \\ 0 & 0 & I_{43} & 0 & 0 & I_{46} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ N_4 \\ N_5 \\ N_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} STD_1 \\ STD_2 \\ STD_3 \\ STD_4 \end{pmatrix}$$

В тази система известни са: наклонените закъснения $STD_1, STD_2, STD_3, STD_4$ а неизвестните рефракции за всеки воксел $N_1, N_2, N_3, N_4, N_5, N_6$ се определят като се реши системата. Разработени се различни методи за решение на системата, като всички зависят от матрицата на уравненията. Матрицата зависи само от мрежата и геометрията на наблюденията и избрания модел за вокселите. Възможно е намиране на модел, който да позволява намиране на тази матрица. Тези методи описват колко добре параметрите от модела могат да бъдат определени в сравнение с истинските. Някои от тези модели са: Singular value decomposition, Tikhonov-Regularization, Conjugate gradient method, Weighted least-squares solution, Kalman-Filter, Algebraic reconstruction techniques

За да се намери еднозначно матрицата тя трябва да отговаря на следните условия:

1. През всеки воксел трябва да преминава поне един ГНСС сигнал. По тази начин проблемът с решаването на системата уравнения няма да се появи. Това не е възможно, но прилагането на томографията за подходящо определени височини на ГНСС станциите води до подобряване на решениета.
2. Пътят на зенитните закъснения не е достатъчен за съставянето на подходяща система уравнения, без значение колко са те на брой. С наклонените водни закъснения е възможно да се определи воксел, дори и в него да няма ГНСС приемник. Нужен е голям брой наклонени водни закъснения, под различни ъгли, които да подобрят решението.
3. Качеството на измерените наклонени закъснения ограничава чувствителността на решението. Затова, е необходимо да се направят ограничения, с цел да се намали влиянието на шума причинен най-често от многократни отражения на ГНСС сигнала.

3.6 Рефракционен Калман Филтър

Един от методите използвани за решаването на системата уравнения 3.16 е Рефракционният Калманов Филтър (РКФ) разработен от *Grardinarsky* (2002b). Методът използва методът на калманови филтри (КФ) (?) (КФ) за обработка на наклонените пълни закъснения получени от ГНСС наблюденията.

При решението на системата използвайки РКФ рефракциите във всеки воксел (вектор на състоянието) за последователни моменти от време x_k , x_{k+1} са свързани чрез матрица на състоянието. Внезапната промяна в рефракцията се отчита чрез импулсна функция означена с вектора w_k . При направено предположението за случаен ход на рефракцията ($\phi_k = 1$)

параметризирания модел може да се напише като:

$$x_{k+1} = \phi_k + w_k = x_k + w_k \quad (3.16)$$

Рефракциите x_k са свързани с измерванията z_k чрез линейната връзка:

$$z_k = H_k x_k + V_k \quad (3.17)$$

където H_k е матрицата на наблюденията, а V_k е грешката от измерванията.

За да се приложи методът РКФ, трябва да се направят три важни предположения: 1. Грешката от измерванията V_k и както и внезапната промяна на рефракцията w_k са изцяло независими:

$$E(w_k V_i^T) = 0$$

$$\forall k, i \quad (3.18)$$

Ако за получаване на рефракцията се използват директни измервания на фазата на ГНСС сигнала предположението ще бъде валидно тъй като измерванията ще зависи само от характеристиките на приемника, а не на състоянието на тропосферата. В действителност, наклоните закъснения се определят от фазови измервания на ГНСС сигнала в комбинация с априорен модел на атмосферата. За това е трудно да се проследи корелацията на рефракцията в отделните вокселите и предполагаемите грешки от измерванията.

2. Ковариационната матрица на V_k има позната ковариационна структура:

$$E(w_k V_i^T) = \begin{cases} R_k & i = k \\ 0 & i \neq k \end{cases} \quad (3.19)$$

Предполага се, че наблюденията не корелират, което не е напълно вярно, особено в случая на общи за всички сателити грешки. Но поради факта, че природата на тези корелации не ни е позната и за простота се предполага, че ковариационната матрица на грешките е диагонална.

3. Ковариационната матрица на w_k също има известна ковариационна структура:

$$E(w_k w_i^T) = \begin{cases} Q_k & i = k \\ 0 & i \neq k \end{cases} \quad (3.20)$$

В следващите параграфи е обърнато специално внимание на структура на Q_k , тъй като тя е от съществено значение за реализацията на Калмановите филтри.

При изпълнението на РФК се използва алтернативен затворен калманов филтър. Калмановият филтър е инициализиран като се използва начално състояние на параметър X_0^- и неговата ковариационна матрица на грешките P_0^- . При това изпълнени на РКФ се използва предположението, че ковариационната матрица на грешките P_0^- е просто матрицата на рефракцията Q_0 и началната стойност за параметъра може да се даде с $X_0^- = \sqrt{\text{diag}(Q_0)}$. ковариационната матрица на грешките се изчислява от формулата:

$$\begin{aligned} P_0^- &= Q_0(h_1, h_2, R) = \text{cov}[\chi h_1, \chi(h_2, R)] \\ &= \frac{D_\chi(h_1, h_2, \infty) - D_\chi(h_1, h_2, R)}{2} = \frac{(L^{2/3} - C_R)C_c}{2} \end{aligned}$$

където h_1 и h_2 са височините на измерванията в две точки, R е разстоянието между тях, χ е рефракцията, D_χ е пространствената структурна функция, а L , C_c и C_R са константи (*Treuhhaft87*, 1987).

Следваща стъпка е определяне на ковариационната матрица на грешките като се използва структурна функция определена в предишен момент. Моделът за рефракцията във всеки воксел предполага случаен ход. Рефракцията във i -тият и j -тият воксел и за последователни извадки k и $k+1$ могат да бъдат представени като:

$$\begin{aligned} \chi_i(k+1) &= \chi_i(k) + w_i \\ \chi_j(k+1) &= \chi_j(k) + w_j. \end{aligned}$$

Истинското разстояние между вокселите на земната повърхност е R . Може да се дефинира еквивалентно разстояние което свързва отделните воксели в различни моменти от време. Ако V_w е скорост на вятъра в посока перпендикулярна на посоката на вектора на разстоянието между

вокселите а t е времето между двета момента то еквивалентното разстояние е $R = V_w * t$. Дефинира се следното отместване рефракцията между X_i и X_j за време k и $k+1$:

истинското разстояние между $X_i(k)$ и $X_i(k)$ е:

$$R_f^2 = R^2 + (h_1 - h_2)^2 \quad (3.21)$$

модифицираното разстояние между $X_i(k)$ и $X_j(k+1)$ е: $r_f^2 = R_f^2 + (V_w \cdot T)^2$ Използвайки горните дефиниции, ковариацията между промяната в рефракцията във вокселите X_i и X_j нужна за реализацията на РКФ се дава от:

$$\begin{aligned} Q_{ij} &= E[(\chi_i(k+1) - \chi_i(k))(\chi_j(k+1) - \chi_j(k))] \\ &= 0.5^* [D_\chi(r_f) - D_\chi(R_f) + D_\chi(r_f) - D_\chi(R_f)] \\ &= D_\chi(r_f) - D_\chi(R_f) \end{aligned} \quad (3.22)$$

Това е най-важният резултат, който се използва при приложението на РКФ. Друго предимство е, че се използва резултат получен само от статистическо поведение на рефракция.

Крайното уравнение за ковариационна матрица на шумовете е:

$$Q_{ij} = D_\chi(h_1, h_2, r) - D_\chi(h_1, h_2, R) = \frac{r_f^{2/3}}{1+(r_f/L)^{2/3}} - \frac{R_f^{2/3}}{1+(R_f/L)^{2/3}} .$$

Глава 4

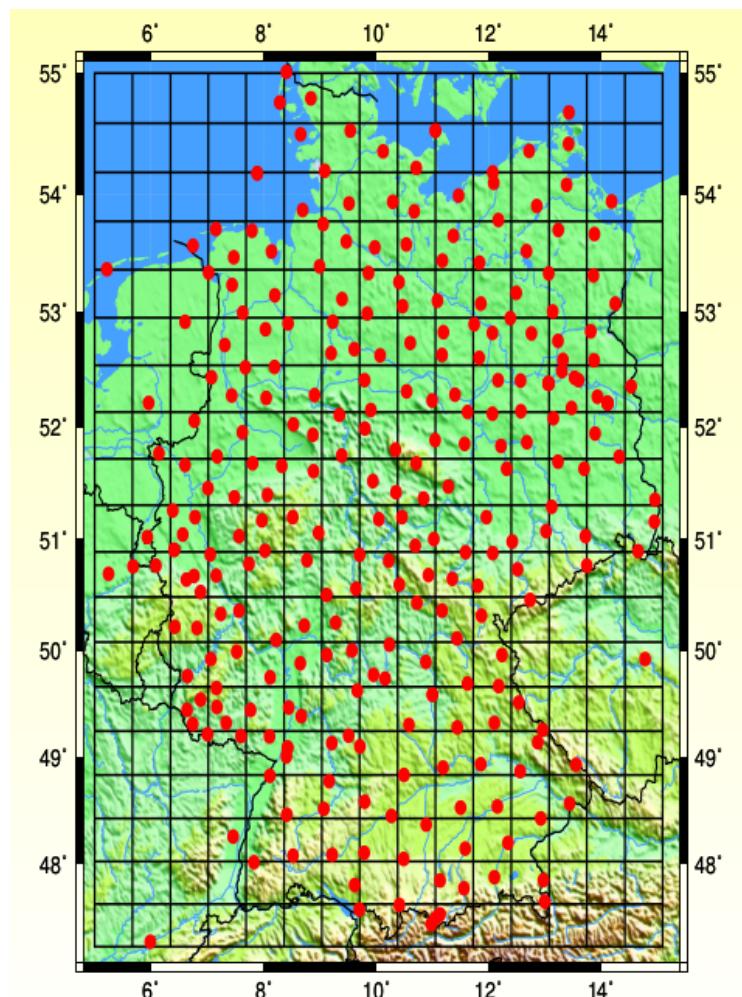
Примери за приложение на метода ГНСС томография

В тази глава са представени резултати от реконструкция на водната пара с метода ГНСС томография при преминаване на студен фронт през Германия (*Bender et al.*, 2010) и развитие на конвективна валежна клетка (*Baelen et al.*, 2011).

4.1 ГНСС томография: студен фронт

На фиг. 4.1 са показани ГНСС станциите в Германия и съседните страни, които предоставят данни за наклонените закъснения. За покриване на района от $700 \times 900 \times 10 \text{ km}^3$ е изградена мрежата от 2025 воксела хоризонтално, и 20-30 вертикално (*Bender et al.*, 2010). Хоризонталната резолюция е 35-45 km, а вертикалната - 200-500m. Измерванията са на всеки 30 минути, а общият брой воксели е между 10000-15000.

На фиг. 4.2 е показан пътят на наклонените закъснения за един ГНСС приемник. Наблюденията се правят през 15 минути като носят информация за 45 наклонени закъснения. В червено са показани пътищата на закъсненията от спътника към приемника, а в бяло хоризонталната проекция.

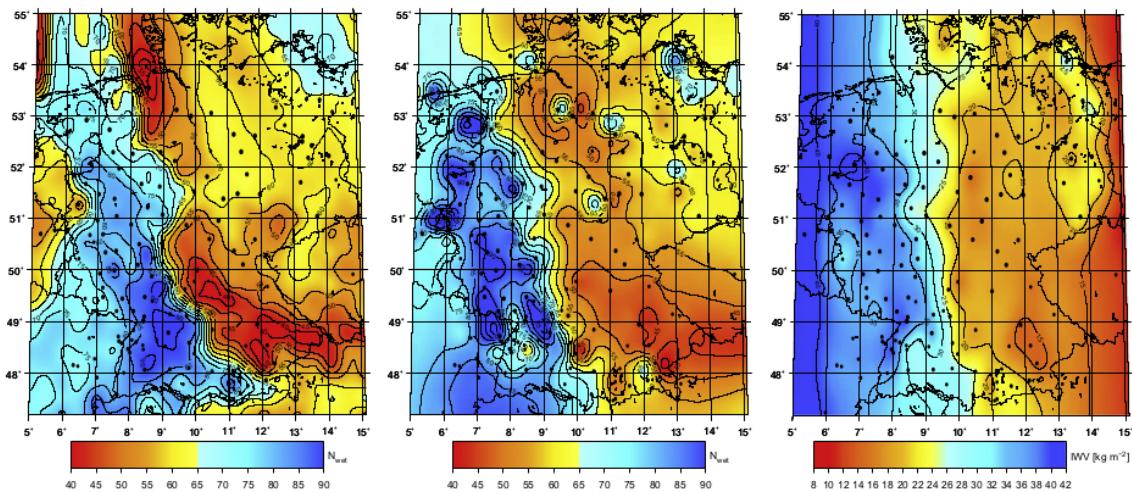


Фигура 4.1: Мрежата от хоризонтална проекция на voxeli за територията на Германия. С червени точки са означени ГНСС станциите предоставящи наблюдения за метода томография.

Реконструкцията на разпределението на водната пара е направена за 6 август 2007 в 22:00 UTC и е показана на фиг. 4.3. На нея се виждат студена и суха (в син цвят) и топла и влажна (в червен цвят) въздушна маса разделени от студен фронт. Фронтът се движи от запад на изток. В левия панел е показано полето на водната пара получено от модел за числени прогнози COSMO-DE, в средата е реконструкцията с томографският метод, а в дясното полето на ИВП (интегрирана водна пара) получено по метода ГНСС Метеорология. С черни точки са отбележани станциите, които



Фигура 4.2: Път на наклонените ГНСС закъснения от 9 спътника, получени за един наземен приемник за 15 минутен интервал от време.



Фигура 4.3: Сравнение на резултата от ГНСС томографията (среден панел) с полето на водната пара от числен модел COSMO-DE (ляв панел), и полето на ИВП (десен панел)

са използвани за измерванията. Полето на ИВП показва отделни меридионални изолинии. Томографската реконструкция използва 31,222 наклонени водни закъснения за 1 час (22:00 UTC-23:00 UTC) само от ГНСС данни.

В 22:00 UTC в полето на водната пара на модела се вижда, че високи стойности и градиенти са концентрирани в югозападната част на района, докато северната част е суха. Според COSMO-DE линията на конвергенцията настъпва от посока югозапад, а не от запад. Томографската реконструкция дава поле на водната пара близко с това на метода

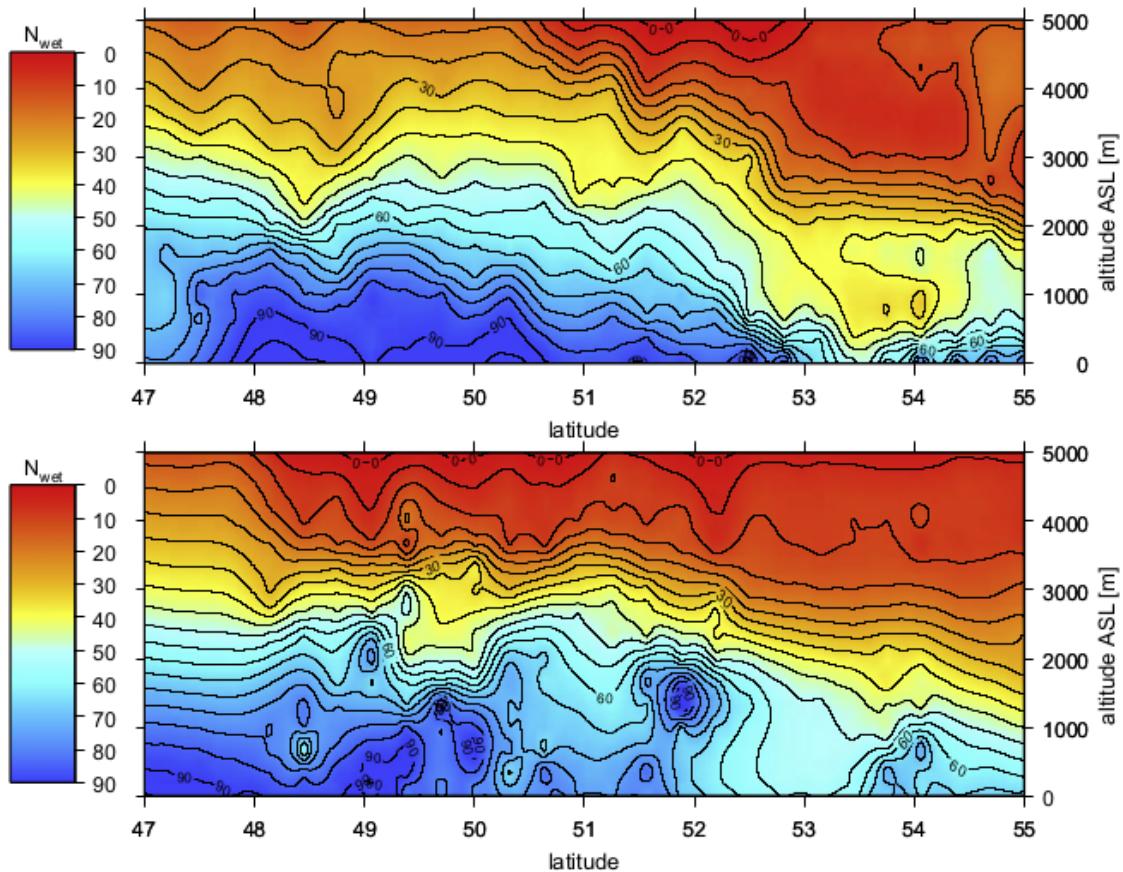
ГНСС метеорология и модела COSMO-DE. Томографската реконструкция на полето на водната пара е близка до това на модела, тъй като полето на COSMO-DE в 18:00 UTC се използва за инициализация на томографската реконструкция. Изолираните структури в реконструираното поле се дължат главно на недостатъчния брой станции. Разстоянието между тях е 30-60 km, което води до по-малко на брой наблюдения и липсващи такива в някои воксели. Формата на конвергентната линия в томографската реконструкция е по-близка до тази получена по метода ГНСС метеорология като разликата е в по-сухата южна част. Това се дължи на рядката мрежа от ГНСС станции в тази част на Германия, които не носят достатъчно данни за наклонените водни закъснения. Въпреки това, реконструираното с томографския метод поле на водната пара е по-добро от това на числения модел за прогноза на времето COSMO-DE.

Вертикален разрез на водна рефракция на 7.52° изток е показано на фиг. 4.4. Сравнението на полето на водната рефракция от COSMO-DE (горен панел на фиг. 4.4) с това от томографската реконструкция (долен панел на фиг. 4.4) показва, че областта на засушаване в северната част на модела е станала много по-влажна според томографската реконструкция. Това вероятно се дължи на факта, че влажната въздушна маса в този район е разположена до по-голяма височина.

4.2 ГНСС томография: конвективен процес

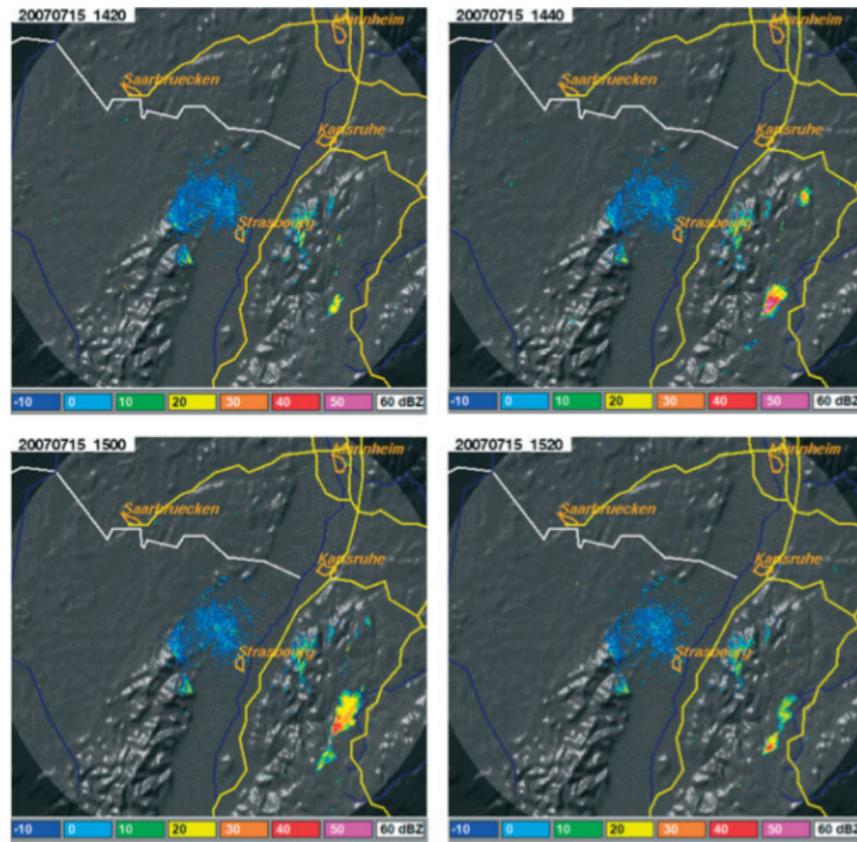
Baelen et al. (2011) описват развитие на конвективен процес на 15 юли 2007. На фиг. 4.5 е показана радарната отражаемост и се вижда развитието на една изолирана, краткоживуща, но много интензивна конвективна клетка, която се развива по източните хребети на Шварцвалд.

На радарните изображенията на фиг. 4.5 може да се проследи възникването на конвективната клетка в 14:20 UTC, растежа и развитието между 14:40 -15:00 UTC. На фиг. 4.6 са представени двумерните полета на водна пара (лява колона) и плътност на водната пара за слоя на височина 1000 m (дясна колона), с ежечасова резолюция в периода 13:00-15:00



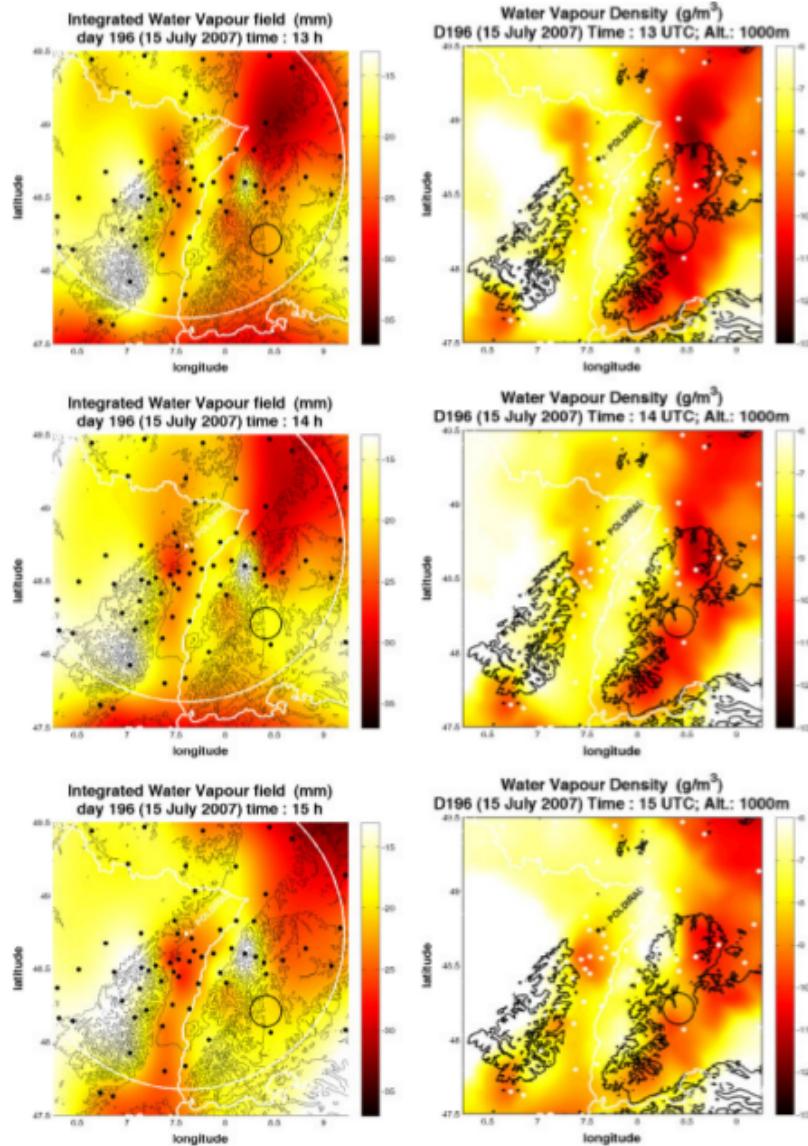
Фигура 4.4: Вертикален разрез на водната рефракция на 6 август 2007 в 22:00 UTC. Горният профил е от моделът COSMO-DE, а долният от томографската реконструкция.

UTC. На фиг. 4.6 се вижда покачване на водната пара по южните хребети на Шварцвалд в ранния следобед на 15 юли 2007, най-вероятно в резултат на югозападен пренос. В периода 13:00-15:00 UTC, водната пара започва да намалява в района, където по-късно се развива конвективната клетка (около 48.2° N, 8.3° E). Водната пара достига минимум около 14:00 UTC, което е един час преди началото на валежа. *Baelen and Penide* (2009) изказват предположението, че изчерпването на водната пара подпомага облакообразуването преди започването на обилен валеж. Настоящият експеримент за първи път потвърждава това предположение чрез реконструкция на тримерното поле на водната пара съвместно с наблюдение

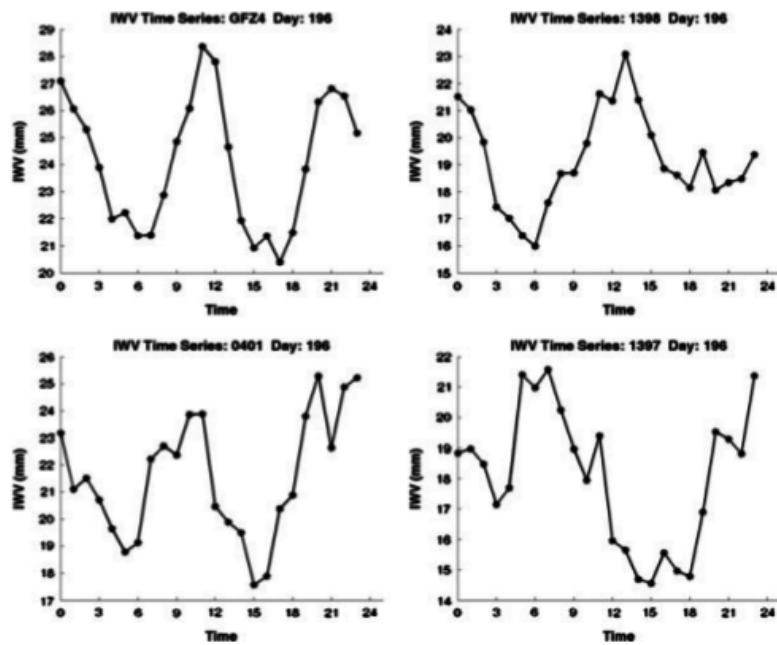


Фигура 4.5: Радарна отражаемост на 15 юли 2007 в 14.20, 14.40, 15.00 и 15.20 UTC.

на развитието на облачна система. Допълнително доказателство са и индивидуалните времеви редове на водната пара получена от четири ГНСС станции близо до района с интензивен валеж (фиг. 4.7). На фигурата се вижда, че до 12:00 UTC водната пара в района нараства вследствие на пренос на влажна въздушна маса от равнината намираща се югоизточно от Шварцвалд. След 12:00 UTC, водната пара започва да намалява значително, което е индикация за възможно изнасяне на влажен въздух във височина, кондензация и образуване на валеж. Минимумът на водната пара съвпада с началото на валежа.



Фигура 4.6: Водна пара (лява колона) и плътност на водната пара на височина 1000 m (дясна колона) на 15 юли 2007 13.00-15.00 UTC получени с ГНСС томография



Фигура 4.7: Времево изменение на водната пара за четири ГНСС станции на 15 юли 2007.

4.3 Подобрения на метода томография

Минимизацията на грешката получена при томографската реконструкция на полето на водната пара може да се подобри чрез:

1. Намаляване на линейната зависимост на наблюденията (увеличавайки ранга на матрицата) като се подобри геометрията на мрежата (избирайки оптимална решетка) чрез оптимизиране на местоположенията на станциите или добавяне на допълнителни станции. Могат да бъдат включени данни от други ГНСС като GLONASS и Galileo. За тази цел трябва да се използват комбинирани приемници, които да могат да проследят сателитите от различни системи.
2. Намаляване на шума на наклонените водни ГНСС закъснения. Дори добра геометрия е недостатъчна в присъствието на големи нива на шум.

3. Подобряване на моделирането на изходното поле на рефракцията, което се използва за томографската реконструкция.

Оптимизация на мрежата:

Използваната мрежа е оптимизирана според разположението на наземните ГНСС станции. Едно възможно изпълнение е конфигурация на мрежата да се запазва за всички слоеве. Друга възможност е промяна в мрежата над наземното ниво, така че с всяко ниво нагоре по-малките централни воксели започват леко да се увеличават по размер. Предимство на това изпълнение е, че плътността на лъчите намалява с височина и затова се изискват по-големи размери на мрежата, за да се запази броят на параметрите.

Добавяне на нови ГНСС:

В момента за томографски реконструкции се използват американската ГНСС GPS и руската GLONASS. Това дава до 15 спътника, които могат да се регистрират от една наземна ГНСС станция. До 2020 г. се очаква да бъде въведена в експлоатация и Европейската навигационна система Galileo. Тя ще се състои от 30 спътника на 3 кръгови орбити с инклинация 56 градуса по отношение на Земният екватор. Добавянето на Galileo би довело до увеличаване на броя наблюдавани наклонени закъснения.

Добавяне на допълнителни сензори и данни:

Данните за метода томография могат да бъдат допълнени и с данни от други сензори или моделни данни. Предложен е метод базиран на движението на вокселите с вятъра като информация за вятъра се получава от числен модел за прогноза на времето. Този подход позволява по-дълго наблюдение на всеки воксел. Широко използвано е и добавяне на информация от аерологичен сондаж, но значителни подобрения се достигат трудно поради доминиращия ефект на шума на наклонените ГНСС закъснения. От друга страна, томографските ГНСС реконструкции ще бъдат най-полезни в операционната практика ако при обработката не се добавят данни от модели. Друга възможност, която се тества в момента в Германската Метеорологична Служба, е директна асимилация на наклонените

ГНСС закъснения в числения модел за прогноза на времето COSMO-DE.

Глава 5

Заключение

Метода ГНСС томография за тропосферно сондиране е предложено от *Flores* (1999). През последното десетилетие в четири Европейски центъра (CHALMERS University of Technology, Sweden; Institute of Geodesy and Photogrammetry (ETHZ), Switzerland; German Research Centre for Geosciences (GFZ); Universite Blaise Pascal, France) се разработват методи за томографска реконструкция на двумерното и тримерно разпределение на водната пара в тропосферата.

В тази дипломна работа е направен обзор на метода ГНСС томография и са дискутиирани резултати за приложение на метода в два случая - студен фронт и конвективен валеж. Направена е реконструкция на полето на водната пара при преминаване на студен атмосферен фронт над Германия на 6 август 2007 година. На вертикалния разрез получен след томографската реконструкция се вижда, че районът на засушаване в северната част е станал много по-влажен. Във втория представен случай е проследено развитието на конвективна клетка на 15 юли 2007 в югозападна Германия. В ранния следобед започва натрупване на влажен въздух над южните хребети на планината Шварцвалд в резултат на югозападен пренос. В периода 13:00-15:00 UTC, двумерното поле на водната пара намалява в района, където по-късно се развива конвективната клетка. Намаляването на водната пара започва един час преди началото на валежа. Това изчерпване на водната пара вероятно е резултат от възходящите потоци

водещи до облакообразуване, при които става изнасяне на водната пара от приземния слой във височина, кондензация и образуване на валеж. При сравняването на резултатите, получени с томографския метод с тези получени с ГНСС метеорология трябва да се отбележи, че томографията дава по-добро визуално описание на локалните вариации на водната пара. В тази дипломна работа е описан потенциалът на метода ГНСС томография за сондиране на тропосферата. Подобрения в точността на томографската реконструкция на полето на водната пара може се очакват при повишаване гъстотата на използваната наземна ГНСС мрежа от приемници и на броя на спътниците. Методът все още не е използван в България и би било уместно да се развие в бъдеще.

Искам да благодаря на:

- Научният ми ръководител доц. д-р Г. Герова за насоките и помощта, които ми оказа в процеса на работа.
- На колегите ми Надежда Йорданова за помощта при оформянето на дипломната работа и на Цветан Симеонов за непрекъснатата техническа помощ в използването на различни софтуерни продукти.

БЛАГОДАРЯ!

Библиография

Baelen, J. V., and G. Penide, Study of water vapour vertical variability and possible cloud formation with a small network of gps stations., 2009.

Baelen, J. V., M. Reverdy, F. Tridon, L. Labbouz, G. Dick, M. Benderb, and M. Hagenc, On the relationship between water vapour field evolution and the life cycle of precipitation systems, 2011.

Bender, M., G. Dick, M. Ge, Z. Deng, J. Wickert, H. Kahle, A. Raabe, and G. Tetzlaff, (development of a gnss water vapor tomography system using algebraic reconstruction techniques, michael bender;, 2010.

Davis, J. L., T. A. Herring, I. Shapiro, A. Rogers, and G. Elgered, Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on the estimates of the baseline lnght, 1985.

Debye, P., Polar molecules, 1929.

Elgered, G., Tropospheric radio-path delay from ground-based microwave radiometry, 1993.

Flores, A., Atmospheric tommography using satellite radio signals, ., 1999.

Flores, A., C. Ruffini, and A. Rius, 4d tropospheric tomography using gps slant wet delays, 2000.

Gradinarsky, L., *Sensing Atmospheric Water Vapor Using Radio Waves*, 73,129, Chalmers University of Technology, Gotenborg, Sweden, 2002a.

Gradinarsky, L. G., Atmospheric water vapour using radio waves, *PhD thesis, Chalmers University of Technology*, 2002b.

- Hirahara, K., Local gps tropospheric tomography, 2000.
- Kruse, L., Spatial and temporal distribution of atmospheric water vapor using space geodetic technique, 2001.
- Nilson, T., *Measuring and modelling variations in the distribution of atmospheric water vapor using GPS*, 55,80, Chalmers University of Technology, 2008.
- Nolet, G., Seismic tomography with applications in global seismology and exploration geophysics, 1987.
- Rueger, J., Report of the ad-hoc working party on refractive og light, indrared and radio waves in the atmosphere of the iag special comission sc3-fundamental constants (scfc), *Journal of Climate*, 1999.
- Ruffini, G., A. Flores, and A. Ruis, *GPS tomography of the ionospheric electron content with a correlation functional*, 1998.
- Seko, H., S. Shimada, H. Nakamura, and T. Kato, Three-demensional distribution of water vapor estimated from tropospheric delay of gps data in mesoscale precipitaton system of the baiu front, 2000.
- Treuhhaft87, Study of water vapour vertical variability and possible cloud formation with a small network of gps stations., 1987.
- Troller, M., *GPS based Determination of the Integrated and Spatially Distributed Water Vapor in the Troposphere*, 69,104, Institute of Geodey and Photogamemetric, 2004.
- Troller, M., B. Burki, and B. Kahle, 3d refractivity field from gps double difference tomography, 2002.
- Ware, R., C. Alber, C. Rocken, and F. Solheim., Sensing integrated water vapour along gps ray paths., 1997.