



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

Факултет по телекомуникации

Катедра „Радиокомуникации и видеотехнологии”

Маг. инж. Хитеш Синг

**МОДЕЛИ ЗА ПРОГНОЗИРАНЕ НА ЗАТИХВАНЕТО НА
РАДИОВЪЛНИТЕ В ДЪЖД, ОБЛАЦИ И МЪГЛА**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
"ДОКТОР"

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: Комуникационна и компютърна техника

Научна специалност: Електродинамика и антенно-фидерни устройства

**Научен ръководител: доц. д-р Бончо Бонев
доц. д-р Петър Петков**

СОФИЯ, 2018 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Радиокомуникации и видеотехнологии“ към Факултет по телекомуникации на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 03.12.2018 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 26.03.2019 г. от 15,30 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ- 5.3-19 / 19.12.2018 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. доц. д-р Бончо Бонев – председател
2. доц. д-р Марин Неделчев – научен секретар
3. проф. д-р Добри Добрев
4. доц. д-р Николай Ташков
5. доц. д-р Габриела Атанасова

Рецензенти:

1. проф. д-р Добри Добрев
2. доц. д-р Марин Неделчев

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Факултет по телекомуникации на ТУ-София, блок №1, кабинет № 1254.

Дисертантът е задочен докторант към катедра „Радиокомуникации и видеотехнологии“ на факултет по Телекомуникации. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: маг. инж. Хитеш Синг

Заглавие: Модели за прогнозиране на затихването на радиовълните в дъжд, облаци и мъгла

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

В съвременните телекомуникации се изискват все по-високи скорости на предаване на информацията. Това от своя страна предполага използването на по-широка честотна лента и респективно на по-високи честоти. При честоти над 3 GHz радиовълните се влияят силно от земната тропосфера – рефракция, затихване в хидрометеорите и молекулите на въздуха и др. Достатъчно точното прогнозиране на затихването на радиовълните в земната атмосфера изисква създаването на адекватни математични модели и е предпоставка за улесняване на процеса на проектиране и повишаване на надеждността при работата на комуникационните линии. От друга страна съществуващите модели за прогнозиране на затихването в дъжд, облаци и мъгла имат редица недостатъци – много голяма сложност на използваните математични изрази, неотчитане на всички влияещи фактори, големи неточности при определени сценарии на разпространение на вълните и т.н.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Да се създадат достатъчно адекватни модели за прогнозиране на затихването на радиовълните в дъжд, облаци и мъгла в атмосферния канал за връзка, които да се използват при проектирането на радиовръзки от бъдещо поколение.

Научна новост

Предложени са нови математични и апроксимационни модели за прогнозиране на затихването на радиовълните при разпространението им в дъжд, облаци и мъгла. В предложеният модел за прогнозиране на затихването в облаци и мъгла е отчетено и влиянието на размера на водните частици в тях, което има много важна роля за достатъчно адекватното прогнозиране на затихването. Като част от този модел е разработен и модел за определяне на диелектричната проницаемост на водата в температурния интервал, в който работи моделът за прогнозиране на затихването. Създаден е и опростен апроксимационен модел за определяне на затихването на радиовълните в дъжд.

Практическа приложимост

Към предложените модели са разработени алгоритми за приложението им. Те могат да се използват при проектирането на радиолинии, работещи в честотния обхват 10-100 GHz, където влиянието на дъжда, облаци и мъглата е значително. Разработените модели и алгоритми, могат да се използват както при наземни така и при сателитни комуникационни линии.

Апробация

Резултатите, получени от предложените модели са сравнени с тези получени от предложените от международния съюз по телекомуникации модели, което са приети за използване в повечето страни. Сравнителният анализ показва много добро съвпадение на резултатите.

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в общо 12 публикации. В една от тях дисертантът е единствен автор. Пет от статиите са в реферирани списания, две от които в списание в impact-фактор – *Wireless Personal Communications*, две в *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)* и една в *International Journal of Scientific & Engineering Research*. Останалите статии са на конференции – 6 от които IEEE конференции. Три от публикациите са приети за печат, но още не са отпечатани.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 132 страници, като включва увод, пет глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо 100 литературни източници, като 99 са на латиница, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо 59 фигури и 8 таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. Литературен обзор

Радиокомуникационните линии от типа точка-точка могат да се разделят на две основни групи – наземни, наричани още радиорелейни линии, и спътникови. При тези радиолинии радиовълните се разпространяват изцяло или частично в най-близкия до земната повърхност слой на земната атмосфера - тропосферата. Земната тропосфера влияе чувствително на радиовълните с по-висока честота (над 3 GHz). Освен чрез тропосферната рефракция, която може да увеличи в някои случаи разстоянието за устойчива радиовръзка при наземните радиолинии, при тези честоти тропосферата има и друго, значително неблагоприятно влияние – затихване в молекулите на въздуха и по специално в молекулите на кислорода и водните пари, затихване в хидрометеорите – дъжд, сняг и градушка, както и затихване в облаци и мъгла. Затихването в облаци има значение основно при сателитните комуникации по обясними причини.

Резултатите от голяма част от изследванията показват, че при честоти над 10 GHz, затихването при разпространение в облаци и дъжд е значително и играе важна роля, сравнено с другите фактори като затихване в градушка, мъгла и молекулите на въздуха. Затихването на радиовълните при разпространение в облаци и дъжд е най-голямо, когато ъгълът на елевация е малък, тъй като пътят на радиовълните в поглъщащата среда е най-голям. Повечето от изследванията в научната литература са посветени на влиянието на затихването на радиовълните при разпространението им в дъжд при сателитни радиовръзки, но не са много тези за затихването в облаци. Облаците от своя страна са много различни видове, намират се на различна височина и могат да имат много комплексна структура. При температура под -20°C облаците са съставени само от водни кристали, при температури от -20°C до 0°C в тях има както вода в течно агрегатно състояние така и ледени кристали, докато при положителни температури в облака се съдържа само течна вода. Затихването в облаци, които се състоят само от водни кристали е значително по-малко от това в облаците съставено само от водни капчици, тъй като диелектричната проницаемост на леда е по-малка от тази на течната вода и размерите на кристалите също са по-малки. Тези облаци обаче могат сериозно да влошат качеството на сателитните радиовръзки, ако се използват две ортогонални линейно поляризирани вълни. Изследванията също така показват, че затихването при разпространение в облаци, съставени от капки от супер охладена вода предизвикват значително затихване. Трябва да се има предвид, че в различните облаци съдържанието на вода може да варира в много широки граници. Появата на облаците също така има случаен характер. Нехомогенността на облаците в хоризонтално направление също

има важна роля за затихването. Това прави изследването на затихването на радиовълните при разпространението им в облаци и създаването на адекватни модели за прогнозирането на това затихване много важни при проектирането на този тип връзки.

За да се създаде достатъчно добър модел за прогнозиране на затихването на радиовълните при разпространението им в облаци е необходимо да се използват както данни за покритието с облаци на даден регион, така и някои от параметрите на облаците – течното водно съдържание (Liquid Water Content – LWC), температурата, вертикални и хоризонтални размери и др. Течното водно съдържание е един от параметрите на облаците, който макар да се променя в не много широки граници – от 0.1 до 1.0 g/m³ – но има сериозно влияние върху затихването и затова участва в повечето модели за прогнозирането му. Височината на облачния слой при лека облачност е около 0.2 km, при средните 0.5 km, а при плътната облачност може да достигне около 1.5 km до 2 km.

Повечето от основните параметри, участващи в известните модели за прогнозиране на затихването на радиовълните при разпространение в дъжд са общи за тези модели, но въпреки това всеки от моделите има предимства и недостатъци – някои дават добри резултати основно при по-слаби валежи, други при по-ниски честоти и т.н. Моделите на ITU-R и García-López дават задоволителни резултати дори при високи честоти и при голяма интензивност на валежите. Моделът на García-López използва повече параметри и коефициенти в сравнение с този на ITU-R, който обаче най-често дава по-ниски от реалните стойности на затихването при много високи интензивности на валежите. Моделът SAM дава доста по-различни от реалните резултати за затихването в голяма част от случаите, с изключение на случаите на слаби валежи и при ниски честоти (Ku band), но е доста по-лесен за използване от споменатите по-горе.

Цел на дисертацията:

Да се създадат достатъчно адекватни модели за прогнозиране на затихването на радиовълните в дъжд, облаци и мъгла в атмосферния канал за връзка, които да се използват при проектирането на радиовръзки от бъдещо поколение.

Задачи на дисертационния труд:

- Да се създаде математичен модел за прогнозиране на затихването на радиовълните с честоти от 10 GHz до 100 GHz при разпространението им в облаци и мъгла.
- Да се изследва затихването на радиовълните при разпространение в облаци и мъгла за различни географски региони като се използва развития модел.
- Да се създаде математичен модел за прогнозиране на затихването на радиовълните с честота от 10 GHz до 100 GHz при разпространението им в дъжд.

- Да се изследва затихването на радиовълните при разпространение в дъжд за различни случаи (сценарии).
- Да се направи сравнителен анализ на резултатите, получени от предложените модели с други съществуващи модели (ITU-R).

Глава 2. Модел за затихване на радиовълните в облаци и мъгла

2.1. Модел за прогнозиране на затихването на радиовълните в облаци и мъгла (ЗРВОМ)

Няколко модели за прогнозиране на ЗРВОМ са развити в годините като са използвани различни теоретични и емпирични методи. Моделирането на облаци за определяне на затихването при разпространението на радиовълните може да се раздели в три основни категории - базирани на апроксимация на Рейли (Rayleigh) и теория на Ми - Gunn и Libe модели; базирани на връзката на затихването с абсолютната влажност на въздуха на земната повърхност - Altshuler модел; базирани на модели от първата категория, които използват метеорологични данни и изчислителни методи за определяне на течното водно съдържание в облаци - модели на Slobin и Dintelmann.

Математичните изрази и резултатите, получавани от моделите от последната група варират в доста широки граници. Общият параметър, който се използва във всички обаче е течното водно съдържание (LWC) в облака. Този параметър е и доста труден за определяне. Той също така не е единственият параметър, който влияе върху затихването. Размерите на водните капки (кристали) и температурата в облака също играят много съществена роля. Размерите на водните капки се променят сериозно във вертикална посока в облака и също така са различни в различните географски региони и при различни метеорологични условия. Предложеният в тази работа модел използва като входни данни именно посочените параметри – течното водно съдържание в облака, размера на водните капки и температурата. Диелектричната проницаемост на водата също е параметър, участващ в предложения модел. От своя страна тя също е зависима от температурата и честотата на електромагнитната вълна и варира в много широки граници при промяна тези параметри. Комбинацията от посочените входни параметри различава предложения модел от съществуващите и го прави по-комплексен от някои от най-често използваните.

Математичният израз, описващ предложения модел за прогнозиране на ЗРВОМ [85] има следния вид:

$$\Delta_{total} = \frac{rf}{u} (l + mr^2 f^2 + nr^3 f^3) \quad (2.35)$$

където r е радиусът на водните частици в метри, f – честотата в GHz а u , l , m , n , се дават със следните изрази

$$u = 1,002(-0,071C^2W + 2,213 \cdot C \cdot W + 141,56W)^{0,6473} \quad (2.36)$$

$$l = \frac{1886\varepsilon''}{(\varepsilon'+2)+\varepsilon''^2} \quad (2.37)$$

$$m = 137 \cdot 10^3 \varepsilon'' \left\{ \frac{6}{5} \left(\frac{7\varepsilon'^2 + 7\varepsilon''^2 + 4\varepsilon' - 20}{[(\varepsilon'+2)^2 + \varepsilon''^2]^2} \right) + \frac{1}{15} + \frac{5}{3[(2\varepsilon'+3)^2 + 4\varepsilon''^2]} \right\} \quad (2.38)$$

$$n = 379 + 10^4 \left\{ \frac{(\varepsilon'-1)^2(\varepsilon'+2) + [2(\varepsilon'-1)(\varepsilon'+2) - 9] + \varepsilon''^4}{[(\varepsilon'+2)^2 + \varepsilon''^2]^2} \right\} \quad (2.39)$$

Участващите в тези изрази реална и имагинерна част на диелектричната проницаемост на водата ε' и ε'' могат да се определят чрез модела на ITU-R [91]. Изразите в този модел обаче са относително сложни и за нуждите на представения модел за прогнозиране на ЗРВОМ е развит емпиричен модел за определяне на диелектричната проницаемост на водата.

2.2. Емпиричен модел за определяне на диелектричната проницаемост на водата

Двете части (реалната и имагинерната) на диелектричната проницаемост на водата, съгласно предложения модел се дават с изразите:

$$\varepsilon' = af^b \quad (2.40)$$

$$\varepsilon'' = cf^d \quad (2.41)$$

където ϵ' и ϵ'' са реалната и имагинерната части на диелектричната проницаемост на водата, f е честотата в GHz. a , b , c и d са коефициенти, зависещи от температурата в Келвини и имат вида:

$$a = pX^{4.7} + q \quad (2.42)$$

където $p=4,2224 \cdot 10^{-6}$; $q=18,75$;

$$b1 = rT + s \text{ [от } -10^{\circ} \text{ C до } 20^{\circ} \text{ C]} \quad (2.43)$$

$$b2 = uT^2 + vT + w \text{ [от } -30^{\circ} \text{ C до } -10^{\circ} \text{ C]} \quad (2.44)$$

където $r=-0,01929$; $s=4,776$; $u=-0,0002485$; $v=0,12314$; $w=-15,5068$;

$$c = gX^3 + hX^2 + iX + j \quad (2.45)$$

където $g=-0,0125269$; $h=0,89$; $i=-4,286$; $j=105,8$;

$$d = kX^3 + lX^2 + mX + n \quad (2.46)$$

където $k=3,796 \cdot 10^{-6}$; $l=-1,151 \cdot 10^{-4}$; $m=-0,006538$; $n=-0,6667$;

$$X = T - 243,15 \quad (2.47)$$

Така предложения модел (изрази (2.40)-(2.47)) е получен въз основа на апроксимация на резултатите за диелектричната проницаемост на водата, изчислени чрез модела на ITU-R [91]. Резултатите за ϵ' и ϵ'' получени от предложения модел са сравнени с тези от модела на ITU в Глава 4.

Алгоритъм за изчисление на специфичното затихване в облаци по предложения модел

1: Изчислява се стойността на коефициента a от израз (2.42).

2: За изчисляване на коефициента b ,

Ако температурата е между -10°C и 20°C се изчислява $b1$ от (2.43)

Ако температурата е между -30°C и -10°C се изчислява b_2 от (2.44)

3: Изчислява се стойността на c от израз (2.45).

4: Изчислява се стойността на d от израз (2.46)

5: Изчисляват се реалната част ϵ' и имагинерната част ϵ'' на диелектричната проницаемост на водата от изрази (2.40) и (2.41).

6: Изчислява се стойността на l , m и n от изрази (2.36), (2.37) и (2.38).

7: Определят се стойностите на течното водно съдържание в облаците и мъглата W в g/m^3 и температурата C в $^{\circ}\text{C}$.

8: Изчислява се стойността на u от израз (2.36).

9: Избира се честотата f в GHz, за която се прави изчислението и размера на водните частици r в m.

10: Определените стойности на величините се заместват в израз (2.35) и се изчислява специфичното затихване в dB/km.

Основните приносни претенции към втора глава са:

- Предложен е нов математичен модел за прогнозиране на затихването на радиовълните при разпространение в облаци и мъгла, който използва повече входни параметри – течно водно съдържание, температура и размер на водните частици, което позволява по-точно определяне на затихването при различни реални радиолинии – изрази (2.35) до (2.39).
- Предложен е емпиричен модел за определяне на реалната и имагинерната част диелектрична проницаемост на водата за честоти от 10 до 100 GHz и температури от -30 до $+20^{\circ}\text{C}$ – изрази (2.40) до (2.47).
- Предложен е алгоритъм за определяне на специфичното затихване на радиовълните при разпространение в облаци и мъгла за честоти от 10 до 100 GHz и температури от -30 до $+20^{\circ}\text{C}$, базиран на предложените модели – раздел 2.3.3.

Резултатите от тази глава са публикувани в [A5, A6, и A11].

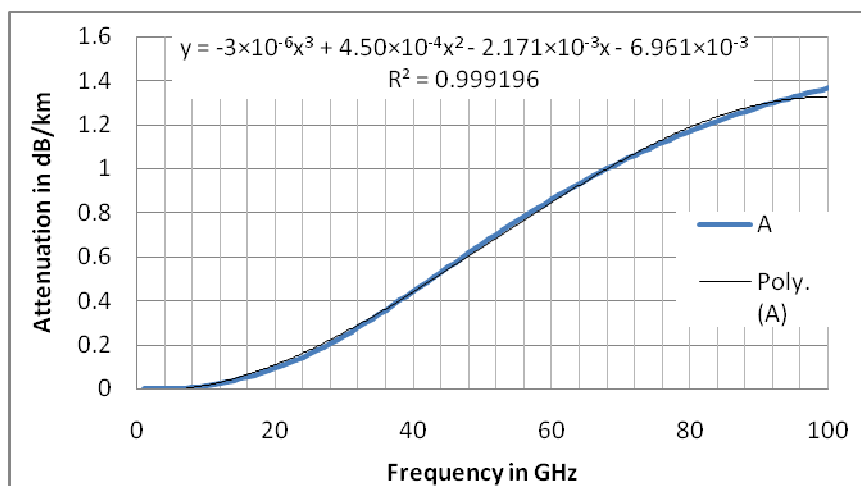
Глава 3. Модел за специфичното затихване на радиовълните в дъжд при наземни и сателитни радиолинии

3.1. Модел за прогнозиране на затихването на радиовълните в дъжд (ЗРВД)

Предложеният в тази глава апроксимационен модел за прогнозиране на затихването на радиовълните при разпространение в дъжд се базира на модела на ITU-R. Той е получен чрез следните основни стъпки:

1: С помощта на зависимостите от модела на ITU-R за затихване на радиовълните в дъжд е изчислено специфичното затихване за честоти от 1 GHz до 100 GHz при различни интензивности на валежа и за вертикална и хоризонтална поляризация.

2: Въз основа на получените по т. 1 резултати са начертани съответните графики (фиг. 3.6).



Фиг. 3.6. Крива на специфичното затихване в дъжда в зависимост от честотата за интензивност на валежа 1mm/h

3: Така изчертаните криви са апроксимирани с полиноми от трета степен и са получени такива полиноми (от типа на израз (3.22) за различните интензивности на валежа.

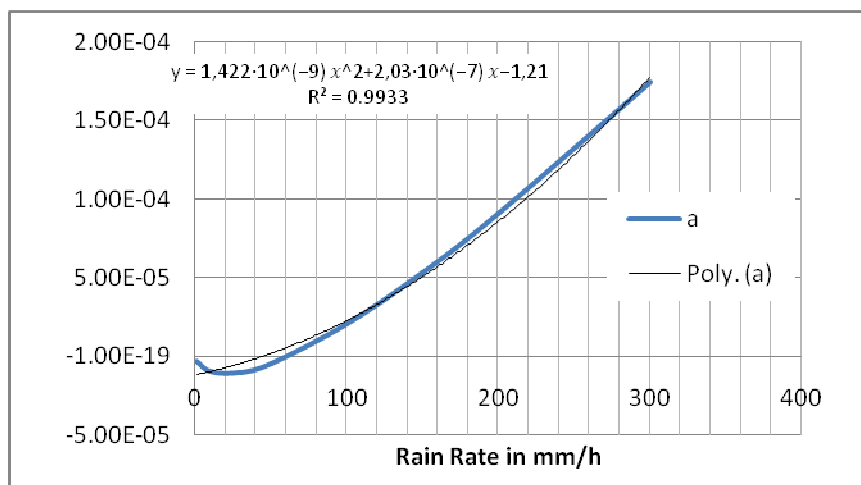
$$A \left(\frac{dB}{km} \right) = af^3 + bf^2 + cf + d \quad (3.22)$$

4: Коефициентите a , b , c и d от израза (3.22) за различните интензивности на дъжда при хоризонтална поляризация са дадени в табл. 3.1.

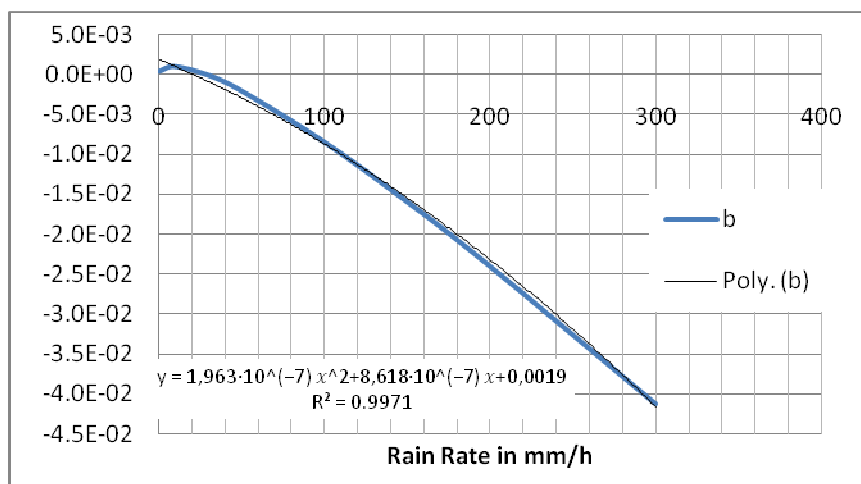
Таблица 3.1. Стойности на коефициентите a , b , c и d за хоризонтална поляризация

Интензивност на дъжда (mm/h)	a	b	c	d
1	-2.952×10^{-6}	4.502×10^{-4}	-2.17×10^{-3}	-6.961×10^{-3}
10	-1×10^{-5}	1.05×10^{-3}	6.1375×10^{-2}	-0.3523
30	-1.044×10^{-5}	2.0×10^{-6}	0.2494	-1.1721
50	-4.77×10^{-6}	-1.951×10^{-3}	0.4523	-1.9601
100	2.029×10^{-5}	-8.368×10^{-3}	0.9798	-3.782
150	5.331×10^{-5}	-1.587×10^{-2}	1.5182	-5.426
200	9.09×10^{-5}	-2.397×10^{-2}	2.0605	-6.9242
300	1.745×10^{-4}	-4.125×10^{-2}	3.1474	-9.5547

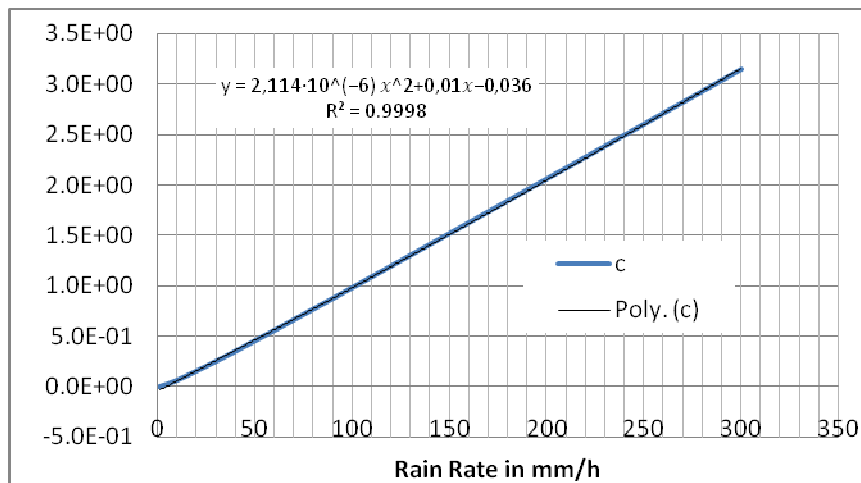
5: От стойностите от горната таблица са изчертани зависимостите на коефициентите a , b , c и d от интензивността на валежа, които са показани на фиг. 3.7 до фиг. 3.10.



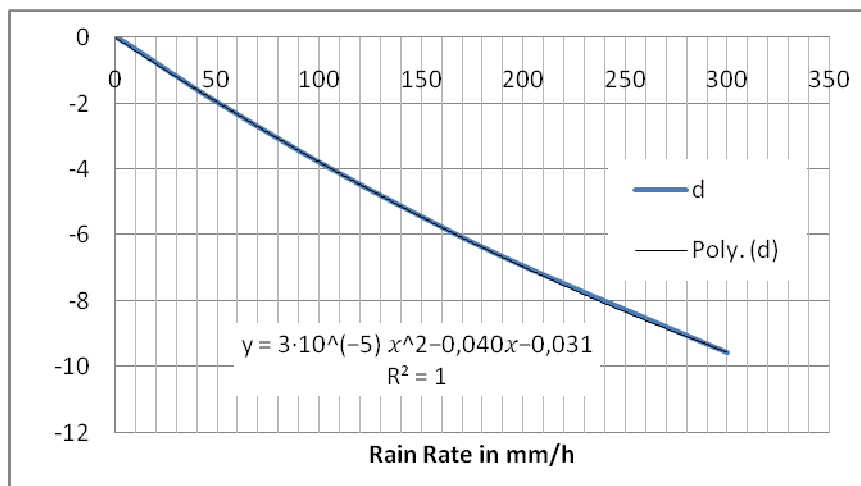
Фиг.3.7. Зависимост на a от интензивността на дъжда за хоризонтална поляризация



Фиг.3.8. Зависимост на b от интензивността на дъжда за хоризонтална поляризация



Фиг.3.9. Зависимост на c от интензивността на дъжда за хоризонтална поляризация



Фиг.3.10. Зависимост на d от интензивността на дъжда за хоризонтална поляризация

б: За всяка от графиките получени по т. 5 се прави апроксимация с полином. За кривите с хоризонтална поляризация, които са представени на фиг. 3.7-фиг.3.10 полиномите са от втора степен, а за тези с вертикална по аналогичен начин са получени полиноми от трета степен:

$$ah = 1,422 \cdot 10^{-9}x^2 + 2,03 \cdot 10^{-7}x - 1,21 \quad (3.23)$$

$$bh = 1,963 \cdot 10^{-7}x^2 + 8,618 \cdot 10^{-7}x + 0,0019 \quad (3.24)$$

$$ch = 2,114 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,01x - 0,036 \quad (3.25)$$

$$dh = 3 \cdot 10^{-5}x^2 - 0,040x - 0,031 \quad (3.26)$$

$$av = -5,520 \cdot 10^{-12}x^3 + 3,26 \cdot 10^{-9}x^2 - 1,21x \cdot 10^{-7} - 6 \cdot 10^{-6} \quad (3.27)$$

$$bv = 8 \cdot 10^{-10}x^3 - 4,552 \cdot 10^{-7}x^2 - 3,03x \cdot 10^{-5} + 0,001 \quad (3.28)$$

$$cv = -5,71 \cdot 10^{-9}x^3 + 6 \times 10^{-7}x^2 + 8,707x \cdot 10^{-3} - 0,018 \quad (3.29)$$

$$dv = -1,073 \cdot 10^{-7}x^3 + 1,068 \cdot 10^{-4}x^2 - 0,0598x + 0,0442 \quad (3.30)$$

В изрази (3.23) до (3.30) x е интензивността на валежа в mm/h.

7: След получаване на стойностите на коефициентите от изрази (3.23) до (3.30) специфичното затихване в дъжда в dB/km за хоризонтална или вертикална поляризация и съответната интензивност на валежа и честотата се получават от израза:

$$A \left(\frac{\text{dB}}{\text{km}} \right) = P f^3 + Q f^2 + R f + S \quad (3.31)$$

където P , Q , R и S са както следва: $P=av$ за вертикална поляризация и $P=ah$ за хоризонтална поляризация; $Q=bv$ за вертикална и $Q=bh$ за хоризонтална поляризация; $R=ch$ за хоризонтална и $R=cv$ за вертикална поляризация и $S=dh$ за хоризонтална и $S=dv$ за вертикална поляризация.

3.2. Алгоритъм за определяне на специфичното затихване на радиовълните при разпространение в дъжд, базиран на предложения модел.

1: Определя се интензивността на валежа (x) в mm/h, за която ще се изчислява специфичното затихване.

2: Ако поляризацията е хоризонтална от изрази (3.23) до (3.26) се определят стойностите на коефициентите ah , bh , ch и dh .

Ако поляризацията е вертикална коефициентите av , bv , cv и dv се определят от изрази (3.27) до (3.30).

3: Определените стойности по т. 2 и честотата f , за която се прави пресмятането се заместват в израз (3.31).

4: След пресмятането по т.3 се получава специфичното затихване при разпространението на радиовълните в дъжд в dB/km.

Основните приноси претенции към трета глава са:

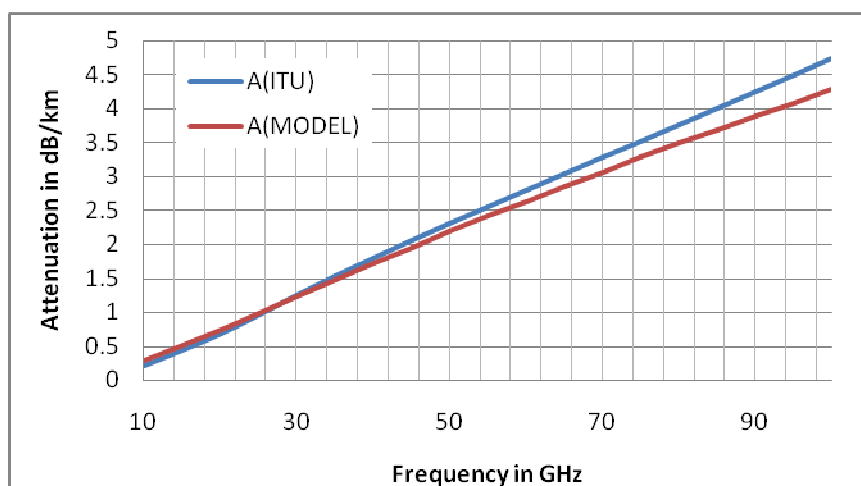
- Получен е емпиричен модел за затихване на радиовълните при разпространение в дъжд за честоти до 100 GHz и интензивности на валежа до 300 mm/h за хоризонтална и вертикална поляризация изрази (3.31) и (3.23) до (3.30).
- Предложен е алгоритъм за определяне на специфичното затихване на радиовълните при разпространение в дъжд, базиран на получения апроксимационен модел.

Резултатите от тази глава са публикувани в [A7, A12].

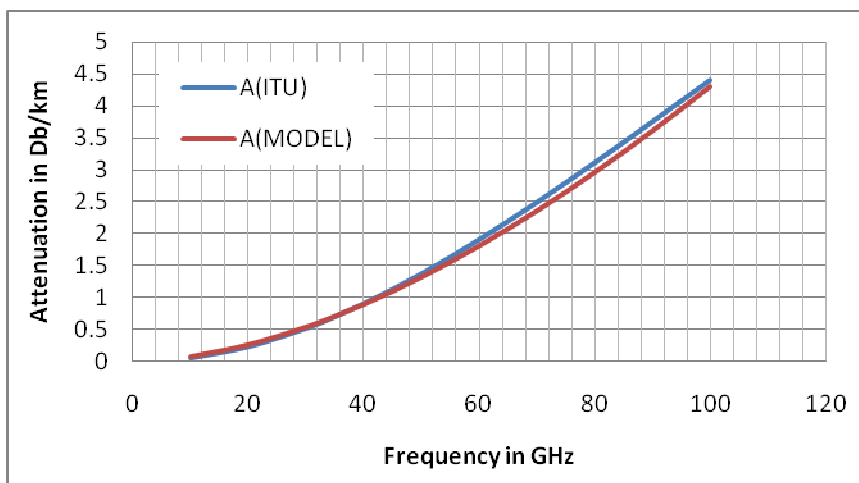
Глава 4. Симулационни резултати, получени от предложените модели

4.1. Симулационни резултати за предложения емпиричен модел за определяне на диелектричната проникваемост на водата

В глава 2 е представен емпиричен модел за изчисляване на реалната и имагинерната част на диелектричната проникваемост на водата. Изчислените по този модел стойности са използвани в модела за затихване на радиовълните при разпространение в облаци на ITU-R, описан в [9]. Освен това по модела на ITU-R е изчислено и затихването в облаци като са използвани стойностите на диелектричната проникваемост, получени от модела на ITU-R от [26]. Температурният обхват, в който се прави сравнението е от 243.15K до 293.15 K, а течното водно съдържание на облаци е 1 g/m^3 . Получените резултати са представени на фиг. 4.1 и фиг. 4.2. От тях ясно се вижда, че стойностите на затихването в облаци, определено по модела на ITU-R, в който диелектричната проникваемост на водата е изчислена веднъж от модела на ITU-R и веднъж по предложения модел имат много добро съвпадение. Може да се отбележи, че при честоти над 70 GHz и температури от 248.15 K, 258.15 K до 268.15 K има малки разлики, но те са в границите на допустимото при изчисления, свързани с разпространение на радиовълните. Това може да се види и от представените в табл. 4.1 и 4.2 осреднени грешки от сравнението на предложия модел с този на ITU-R.



Фиг.4.1. Сравнителен анализ на модела на ITU и предложия модел при температура 248.15 K



Фиг.4.2. Сравнителен анализ на модела на ITU и предложения модел при температура 288.15 К

Различията между специфичното затихване, изчислено чрез използването на двата модела за определяне на диелектричната проникваемост на водата могат да бъдат оценени като се пресметне осреднената грешка от израза:

$$error = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|x_{i\text{apr}} - x_{i\text{ITU}}|}{x_{i\text{ITU}}} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

където i е индексът на текущата стойност на оценяваната и еталонната величина, а n е общия брой на стойностите, които се осредняват. Резултатите по температури и честоти са представени в табл. 4.1 и 4.2.

Таблица 4.1. Осреднена грешка за различни температури

Temperature	Average %age of Error
243.15	0.785966
248.15	2.185489
253.15	0.549894
258.15	1.591315
263.15	0.557321
268.15	1.724925
273.15	1.07666
278.15	0.50152
283.15	0.818748
288.15	0.950223
293.15	0.797026

Таблица 4.2. Осреднена грешка за различни честоти

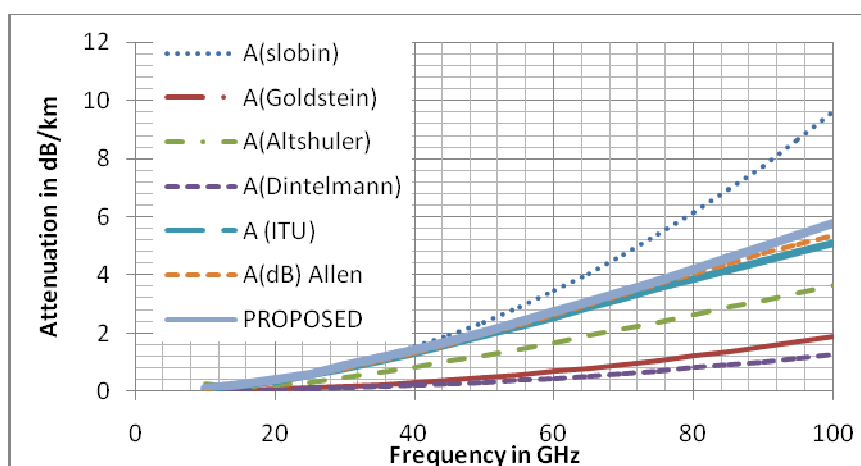
f(GHz)	Average %age of Error
10	0.537921
20	0.66529
30	0.402729
35	0.311354
40	0.348489
45	0.372301
50	0.515502
55	0.670539
60	0.833864
65	1.002154
70	1.171761
75	1.338826
80	1.499413
85	1.652129
90	1.891434
95	2.169333
100	2.450094

4.2. Симулационни резултати от предложения модел за прогнозиране на затихването на радиовълните в облаци и мъгла

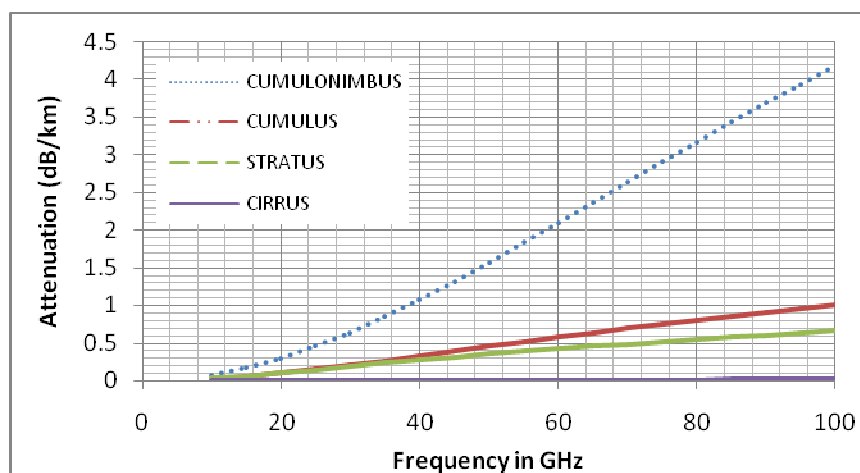
Предложеният модел за затихване на радиовълните при разпространение в облаци и мъгла, представен в глава 2 е базиран на теорията на Ми, но за разлика от други подобни методи използва повече входни параметри (размера на водните частици) и това позволява да се извърши по-адекватно прогнозиране на затихването. Освен това в модела се използват и основните параметри на облаци и мъглата, които имат важно отношение към затихването – течното водно съдържание и температурата. Основният модел, който най-често се използва при изчисления, свързани с разпространение на радиовълните е този на ITU-R, който използва като входни параметри само температурата и течното водно съдържание. Предложеният модел е използван за получаване на симулационни резултати за облаци от типа Cumulonimbus, чийто параметри, заедно с тези на други типове облаци са дадени в табл. 4.3. Резултатите за специфичното затихване в Cumulonimbus облаци, получени по най-известните модели и по предложения модел са представени на фиг. 4.3.

Таблица 4.3: Параметри на облаците

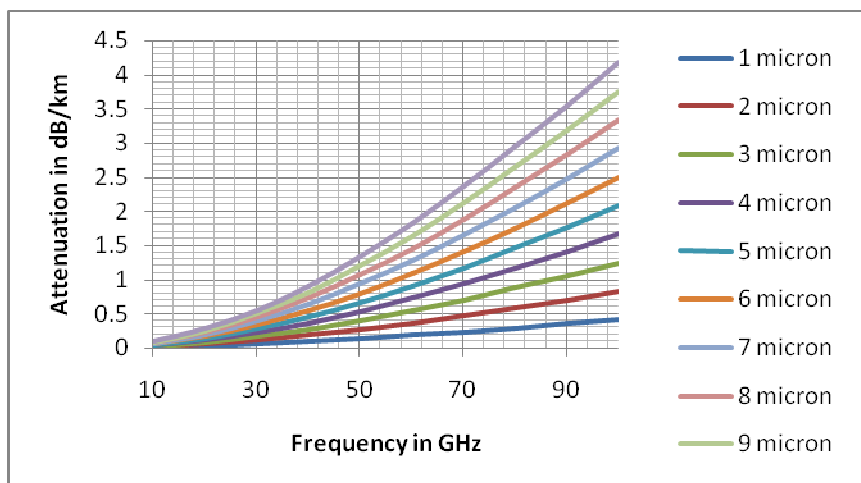
S.No	Тип на облаците	Височина (km)	Течно водно съдържание (g/m^3)	Размер на водните частици (microns)	Температура (Celsius)
1	Cumulonimbus	1.5	2.5	8	0
2	Cumulus	1.8	1	4.8	-10
3	Stratus	0.4	0.15	4.7	10
4	Cirrus	10.6	0.03	2	-30



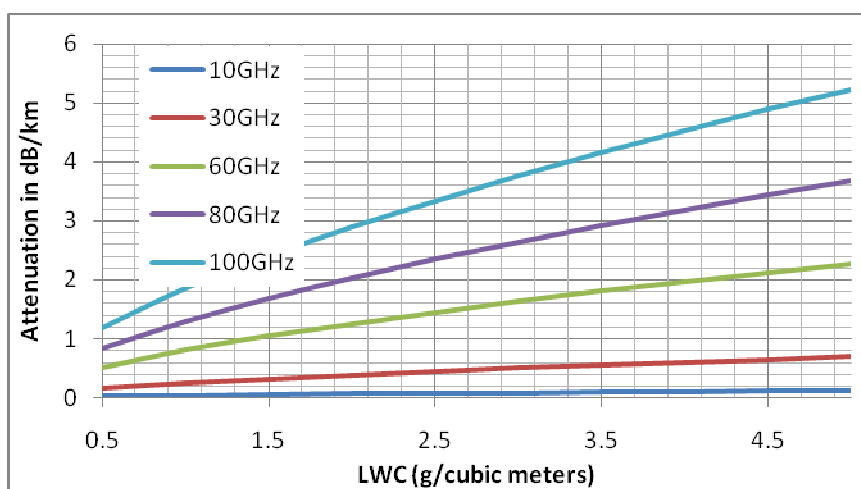
Фиг 4.3. Сравнение на резултатите за специфичното затихване в облаци, получени от предложения модел и други модели за $LWC=2.5\text{g/m}^3$, $T=0^0\text{C}$ и $r= 8 \mu\text{m}$.



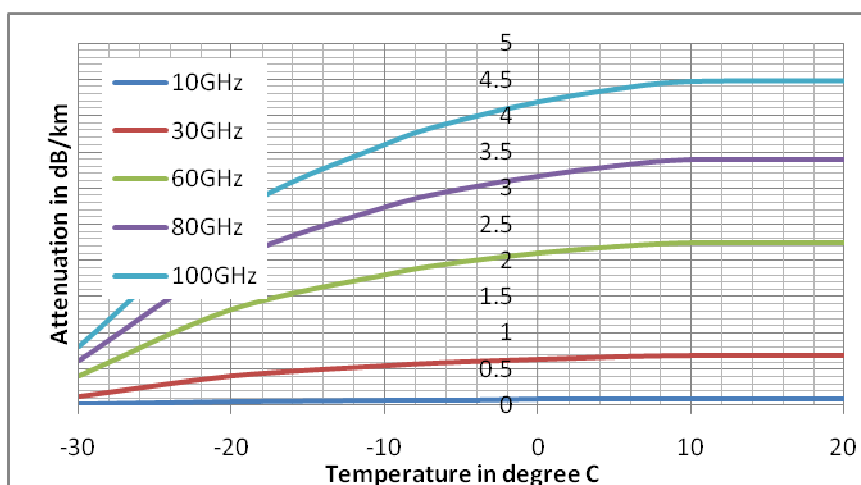
Фиг. 4.4. Резултати за специфичното затихване в облаци, получени от предложения модел за различни типове облаци



Фиг 4.5. Резултати за специфичното затихване в облаци, получени от предложения модел за различни размери на водните частици при $LWC=2.5 \text{ g/m}^3$ и $T= 0^0\text{C}$.



Фиг. 4.6. Резултати за специфичното затихване в облаци, получени от предложения модел за различни стойности на течното съдържание на вода LWC при $T=0^0\text{C}$ и $r=8 \text{ }\mu\text{m}$.



Фиг. 4.7. Резултати за специфичното затихване в облаци, получени от предложия модел за различни стойности на температурата при $LWC= 2.5 \text{ g/m}^3$ и $r= 8 \text{ }\mu\text{m}$.

На фиг. 4.5 е представена зависимостта на специфичното затихване на радиовълните в

облаци от честотата при различни стойности на размера на водните частици. За по-ниски честоти – от 10 GHz до 30 GHz затихването не се влияе много силно от размера на частиците, докато при честоти над 60 GHz разликата между специфичното затихване при облаци, съставени от водни частици с размер 1 μ m и 10 μ m е значителна.

Зависимостта на специфичното затихване от течното водно съдържание е дадена на фиг. 4.6. При честоти от 10 GHz до 30 GHz затихването е относително малко дори и при големи стойности на *LWC*, докато при честоти от 60 GHz до 100 GHz затихването силно се влияе от течното водно съдържание в облака. На фиг. 4.7. се вижда, че температурата също оказва съществено влияние върху специфичното затихване в облаци и мъгла. За по-ниски честоти отново се наблюдава относително слабо изменение на специфичното затихване с температурата, но при по-високи честоти разликата в затихването при температура -30°C и 20°C достига 3 и повече dB/km.

Таблица 4.4: Отклонение на специфичното затихване в облаци и мъгла, изчислено по предложението модел от модела на ITU-R за различни температури

Температура	Осреднена грешка в %
243.15	2.300983
248.15	2.419373
253.15	2.533578
258.15	2.64181
263.15	2.742289
268.15	2.833253
273.15	2.912958
278.15	2.979679
283.15	3.031712
288.15	3.067366
293.15	3.084963

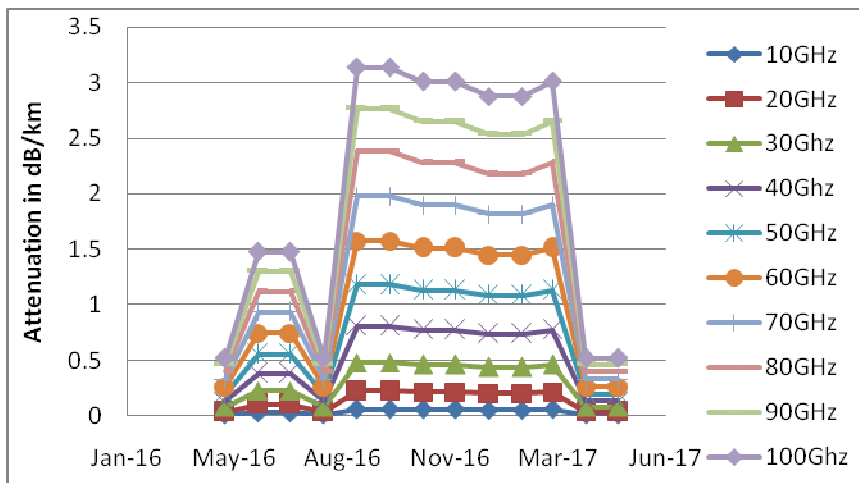
Отклонението на стойностите на специфичното затихване в облаци, изчислени по предложението метод от тези, изчислени по метода на ITU-R е представено за различни температури и различни честоти съответно в табл. 4.4 и табл. 4.5. Средната грешка при дадена температура е от порядъка на 2-3 %. Грешката освен това расте с честотата и при честота 100 GHz е малко над 5%, което е съвсем приемливо за точност на модел за прогнозиране на затихване при разпространение на радиовълните.

Таблица 4.5: Отклонение на специфичното затихване в облаци и мъгла, изчислено по предложения модел от модела на ITU-R при различни честоти

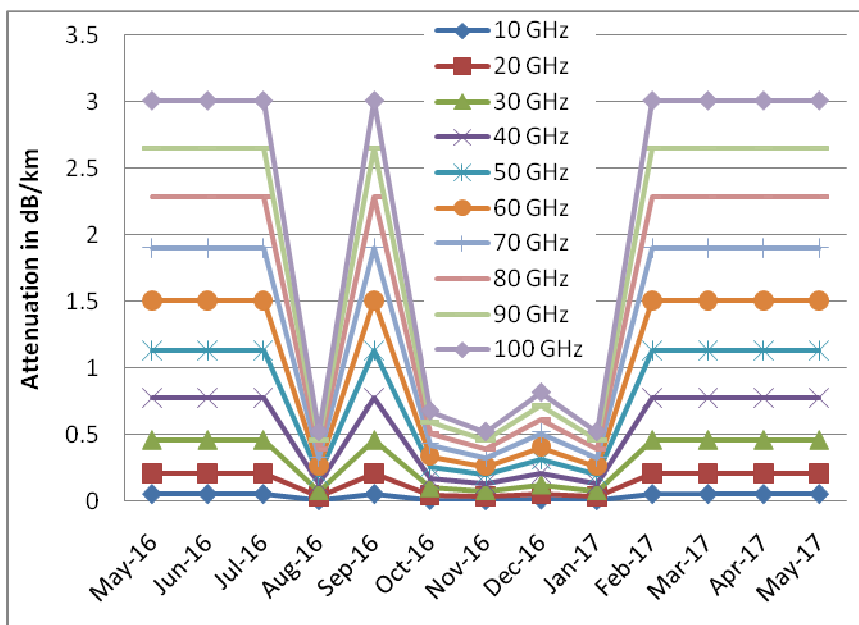
Честота	Осреднена грешка в %
10	0.137582361
15	0.299368216
20	0.509526448
25	0.756574055
30	1.030225921
35	1.322160722
40	1.626073757
45	1.937381471
50	2.252834404
55	2.570163978
60	2.887803423
65	3.204682676
70	3.520083148
75	3.833536615
80	4.144755066
85	4.453581767
90	4.759956699
95	5.063891754
100	5.365452586

4.3. Симулационни резултати от предложения модел за прогнозиране на ЗРВОМ за различни географски региони

В този раздел са представени числени резултати за затихването в облаци при сателитни радиолинии за регионите на различни водни басейни в Европа и в близост до Индия. Стойностите на течното водно съдържание в облака LWC са от сателита AMSR-2. Резултатите за Бенгалския залив и Черно море са показани на фиг. 4.8 и фиг. 4.9. Температурата в облаците, за която са направени изчисленията е 0°C , а размера на водните частици е $8\ \mu\text{m}$.



Фиг. 4.8. Специфично затихване в облаци за периода май 2016-май 2017 за района на Бенгалския залив.



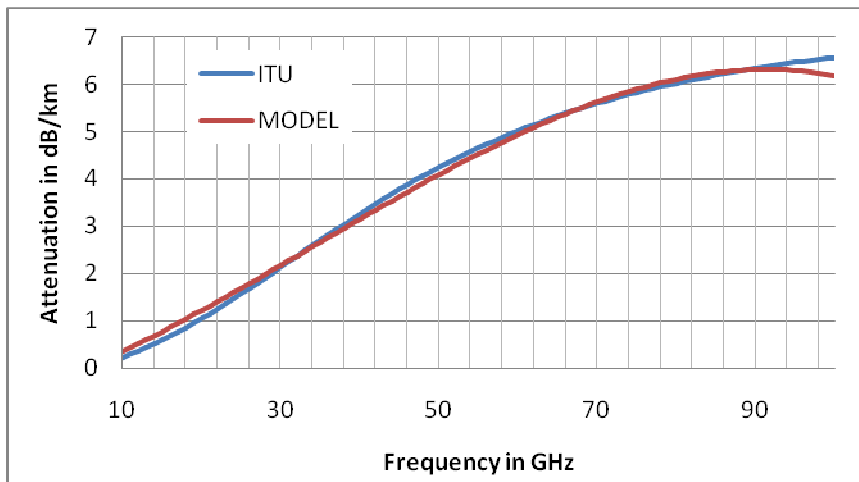
Фиг. 4.8. Специфично затихване в облаци за периода май 2016-май 2017 за района на Черно море.

От тези графики може да се заключи, че специфичното затихване на радиовълните при разпространение в облаци обяснимо е най-високо през дъждовните периоди и то достига до около 3, а и малко над 3 dB/km за региона на Бенгалския залив и то при честота 100 GHz. Затихването над различните морета при една и съща честота е относително еднакво в периодите с по-плътна облачност, тъй като стойността на LWC в тези случаи е почти една и съща за различните морета.

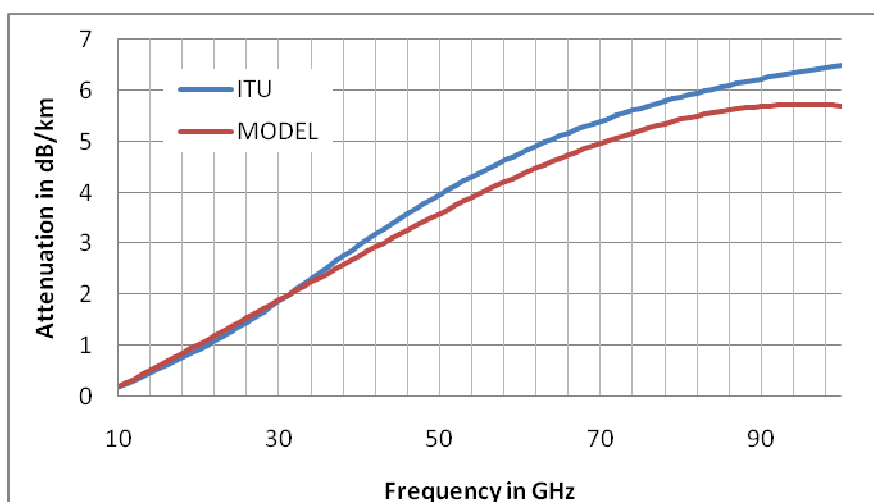
4.4. Числени резултати и анализ по предложения модел за прогнозиране на затихването на радиовълните при разпространение в дъжд

В глава 3 беше представен емпиричен модел за определяне на затихването на радиовълните при разпространението им в дъжд, базиран на апроксимации на кривите на

ITU-R, който да позволява по-опростени изчисления. На фиг. 4.10 и фиг. 4.11 са представени резултатите за специфичното затихване, определено по предложениния модел и по модела на ITU-R за хоризонтална и вертикална поляризация при интензивност на валежа 10 mm/h.



Фиг.4.10. Специфично затихване в дъжд с интензивност 10mm/h, определено по предложениния модел и по модела на ITU-R за хоризонтална поляризация



Фиг.4.11. Специфично затихване в дъжд с интензивност 10mm/h, определено по предложениния модел и по модела на ITU-R за вертикална поляризация

Анализ на отклонението, базиран на израз (4.1) за различни интензивности на валежа (от 10 до 300 mm/h) и различни честоти (от 10 до 100 GHz) за хоризонтална и вертикална поляризация са представени съответно в табл. 4.6. и табл. 4.7. Може да се каже че грешката е под или около 10 %, което е приемливо за такива изчисления като най-големи грешки се получават при по-ниски стойности на честотата, където и абсолютната стойност на затихването е относително ниска.

Таблица 4.6: Отклонение на стойностите, изчислени по предложения модел по отношение на модела на ITU-R за хоризонтална поляризация

Интензивност на валежа mm/h	Осреднена грешка %	f(GHz)	Осреднена грешка %
10	1.215862	10	14.85888
30	9.612869	20	6.042186
50	11.02816	30	5.335574
100	6.177366	40	7.680219
150	8.36225	50	5.779106
200	12.18925	60	7.61633
300	8.440672	70	8.172776
		80	9.349502
		90	9.817334
		100	10.18381

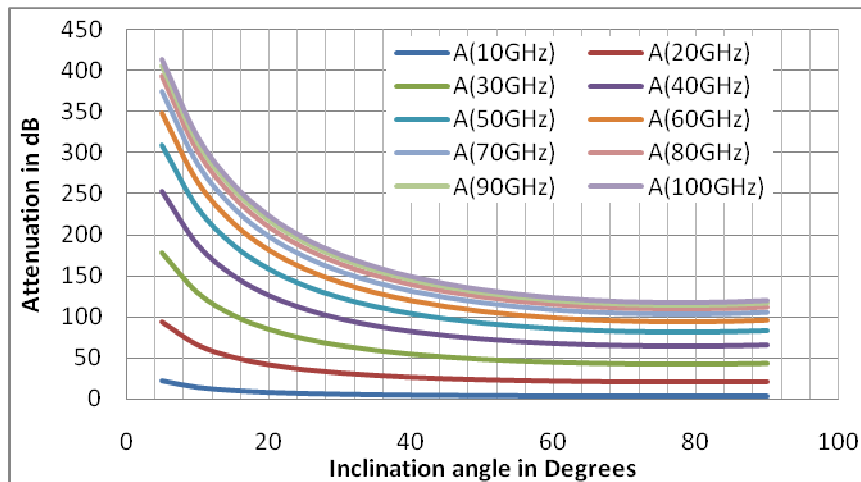
Таблица 4.7: Отклонение на стойностите, изчислени по предложия модел по отношение на модела на ITU-R за вертикална поляризация

Интензивност на валежа mm/h	Осреднена грешка %	f(GHz)	Осреднена грешка %
10	3.679135	10	1.631458
30	5.202705	20	11.20266
50	2.744695	30	1.574097
100	5.850573	40	6.317629
150	5.385005	50	4.473838
200	6.529882	60	4.15285
300	6.677555	70	5.061046
		80	5.111247
		90	5.183695
		100	5.936194

4.5. Симулационни резултати за затихването при разпространение на радиовълните в дъжд при сателитни радиолинии

Чрез предложия модел за прогнозиране на затихването при разпространение на радиовълните в дъжд е направено изследване на затихването при радиовръзка със сателит за честоти от 10 GHz до 100 GHz за различни ъгли на елевация. Наземната станция се намира на северна ширина 25.17° и интензивността на валежа е 42 mm/h, както е определено от ITU модела за климатичния регион на Индия [99]. На фиг. 4.12 са представени резултатите от изчисленията за затихването в дъжд по сателитно трасе за различни честоти и ъгли на елевация от 5 до 90° . Затихването при малки ъгли на елевация (до 25°) на практика прави невъзможна осъществяването на връзка на честоти над 20-25 GHz. Направен е и сравнителен

анализ на разликата в затихването, определено по предложения модел и по модела на ITU-R, който показва много добро съвпадение на резултатите.



Фиг. 4.12. Затихване в дъжд по сателитно трасе в зависимост от ъгъла на елевация за различни честоти

Основните приносни претенции към четвърта глава са:

- Направен е анализ на грешката на предложениния модел за определяне на диелектричната проницаемост на водата по отношение на аналогичния модел на ITU-R;
- Извършен е симулационен анализ на затихването на радиовълните при разпространение в облаци въз основа на предложениния в глава 2 модел. Сравнителен анализ на получените резултати, с такива получени по модела на ITU-R;
- Изследвано е затихването за различни региони на Индия и Европа чрез предложениния модел с реални данни за течното водно съдържание в облациите;
- Предложеният в глава 3 апроксимационен модел за прогнозиране на затихването на радиовълните в дъжд е апробиран при сателитни радиовръзки, като получените симулационни резултати чрез предложениния модел са сравнени с тези от модела на ITU-R и е направен анализ на грешката.

Резултатите от тази глава са публикувани в [A8, A9, A10, A11, A12].

Глава 5. Изводи по дисертационния труд

5.2. Приносни претенции

1. Предложен е модел за прогнозиране на затихването на радиовълните в облаци и мъгла за честотния обхват 10 GHz – 100 GHz. Като част от предложения модел е развит апроксимационен модел за опростено изчисляване на диелектричната проницаемост на водата.
2. Предложен е модел за прогнозиране на затихването на радиовълните в дъжд за честотния обхват 10 GHz – 100 GHz.
3. Разработен е алгоритъм за определяне на затихването на радиовълните в облаци и мъгла, базиран на предложения модел.
4. Разработен е алгоритъм за определяне на затихването на радиовълните в дъжд, базиран на предложения модел.
5. Изследвано е влиянието на затихването в облаци за различни географски региони като са използвани реални данни за течното водно съдържание на облаците.
6. Направен е сравнителен анализ на предложените модели със съответните модели на ITU-R и са анализирани отклоненията на резултатите по двата модела.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

- [A1] Hitesh Singh, Boncho Bonev, "Modeling of Propagation Channels at Different frequencies of Millimeter Waves in Indoor and Outdoor Environments for Designing of 5G Networks", International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 5, Issue 10, special issue 2017.
- [A2] Hitesh Singh, Ravinder Kumar, Boncho Bonev, Peter Petkov, "The Studies of Millimeter Waves at different Frequencies in different Environmental conditions for 5G Applications – A State of Art", International Journal of Scientific & Engineering Research Volume 8, Issue 7, July-2017.
- [A3] Hitesh Singh, Ravinder Kumar, Boncho Bonev, Peter Petkov, "Cloud Attenuation Issues in Satellite Communications at millimeter frequency bands – State of Art", International Journal of Scientific & Engineering Research Volume 8, Issue 7, July-2017.
- [A4] Singh, Hitesh, Ramjee Prasad, and Boncho Bonev. "The Studies of Millimeter Waves at 60 GHz in Outdoor Environments for IMT Applications: A State of Art." Wireless Personal Communications: Vol. 100, Issue 2, pp.463-474, May 2018.
- [A5] Singh, Hitesh, Boncho Bonev and Ashoak Chandra, "Effect of Atmospheric Impairments of Satellite Links in Ka bands." Wireless Personal Communications: Volume 101, Issue 1, pp. 425–437, July 2018.

- [A6] Hitesh Singh, Boncho G. Bonev, Peter Z. Petkov and Sarang M. Patil, "Cloud Attenuation Model at Millimeter wave frequency Bands," IEEE International Conference on Infocom Technologies and Unmanned Systems (ICTUS'2017), Amity Directorate of Engineering & Technology (ADET), Dubai, December 2017.
- [A7] Hitesh Singh, Boncho Bonev, Peter Petkov, Sarang Patil, "Approximations for ITU Rain Model", Proceedings of the 12th INDIACom; INDIACom-2018; IEEE Conference ID: 42835 2018 5th International Conference on "Computing for Sustainable Global Development", 14th - 16th March, 2018, New Delhi, India.
- [A8] Hitesh Singh, "The Impact of Liquid Water Content on Clouds Attenuation at Bay of Bengal, India" Proceedings of the 12th INDIACom; INDIACom-2018; IEEE Conference ID: 42835 2018 5th International Conference on "Computing for Sustainable Global Development", 14th - 16th March, 2018, New Delhi, India.
- [A9] Singh, H., Bonev, B. G., Petkov, P. Z., Patil, S. The Impact of Liquid Water Content over Different Seas of Europe on Satellite Communication. In 2018 IX National Conference with International Participation (ELECTRONICA) (pp. 1-4), Sofia, 2018, May
- [A10] Hitesh Singh, Boncho Bonev, Peter Petkov, Sarang Patil, "The Effect of Liquid Water Content Over the Seas of India and Europe for Ka Band Satellite Communication", HMR Institute of Technology and Management is organizing two days SPRINGER International Conference on Manufacturing, Advance Computing, Renewable Energy and Communication (MARC 2018) on July 19th and 20th 2018 (in Print)
- [A11] Hitesh Singh, Boncho Bonev, Peter Petkov, Ravinder Kumar, "A Novel Method for Predicting Attenuation Caused by Clouds for Higher Frequency Bands", 2nd IEEE International conference on power Electronics, Intelligent Control and Energy systems (ICPEICES-2018), (in Print)
- [A12] Hitesh Singh, Boncho Bonev, Peter Petkov, Ravinder Kumar, "A Novel Approach for Predicting Attenuation of Radio Waves caused by Rain", 2nd IEEE International conference on power Electronics, Intelligent Control and Energy systems (ICPEICES-2018), (in Print)

ЛИТЕРАТУРА

- [9] Harb, Kamal, et al. "A proposed method for dust and sand storms effect on satellite communication networks." Innovations on Communication Theory INCT, (Istanbul, Turkey) (2012): 33-37.
- [26] Attenuation due to cloud and fog, Recommendation ITU-R P.840-5, P Series Radio wave propagation .
- [85] Hanna, Jay W., David M. Schultz, and Antonio R. Irving. "Cloud-top temperatures for precipitating winter clouds." Journal of Applied Meteorology and Climatology 47.1 (2008): 351-359.
- [91] Kathiravelu, Gopinath, Terry Lucke, and Peter Nichols. "Rain drop measurement techniques: a review." Water 8.1 (2016): 29.
- [99] "Specific attenuation model for rain for use in prediction methods", ITU-R P.838-3, 2003.



**TECHNICAL UNIVERSITY OF SOFIA
FACULTY OF TELECOMMUNICATIONS
DEPARTMENT „RADIO COMMUNICATIONS AND
VIDEO TECHNOLOGIES”**

Hitesh Singh

Models for Prediction of Radio Wave Attenuation in Rain, Clouds and Fog

SUMMARY

The thesis consists of 5 chapters, 132 pages, 59 figures, 8 tables. The analysis, proposed methods and conclusions are presented through 12 publications – 5 are published in Journals and 7 are presented at scientific conferences. 1st chapter consists of the literature survey. It consists of the latest work done in the field of radio wave propagation and effects of atmospheric impairments like rain, cloud, dust, scintillation, etc. From this literature survey it has been concluded that cloud and rain has significant impact on radio wave propagation. 2nd chapter proposes a novel model for predicting the cloud attenuation of radio waves. This model was based on Mie theory. One of the advantages of proposed model over other models is use of Drop Size in meters as parameter as for a certain heights LWC can remain constant but size of water droplets may vary. An empirical model is also proposed to determine the real and imaginary parts of dielectric constants of water. Proposed model can work for temperature from -30°C to 20°C effectively. 3rd chapter proposes the model for predicting radio wave attenuation due to the rain. The proposed rain attenuation model is very simple as compared with other models like ITU, Crane, RAL, SAM etc. as those other models uses very complex equations which are very tedious task to solve and also depends on lot of regression coefficients. 4th Chapter described the implementation results of the proposed cloud and rain models. These results are compared with the other models and works done by other researchers. In the 5th Chapter are given overall conclusions and contributions.

Overall Contributions:

1) Model for prediction of radio wave attenuation due to clouds and fog for frequency range from 10GHz to 100GHz are presented. For simpler calculation of dielectric constants of water empirical model is also developed; 2) Model for prediction of radio wave attenuation caused by rain for frequency band 10 GHz to 100 GHz is proposed; 3) Algorithm for the calculation of radio wave attenuation caused by clouds and fog based on proposed model is presented; 4) Algorithm for the calculation of radio wave attenuation caused by rain based on proposed model is presented; 5) Propagation studies based on proposed model with real time data of LWC for some geographical regions are performed; 6) Error Analysis and comparative study for proposed models with the other existing models (ITU-R) has been performed.