

Софийски университет
„Св. Климент Охридски”
Физически факултет



Sofia University
„St. Kliment Ohridski”
Faculty of Physics

Филип Асенов Атанасов

**Модели за предвиждане на затихването
в комуникационна LTE мрежа**

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертационен труд
за присъждане на образователна и научна степен „ДОКТОР”

Професионално направление:

4.1. Физически науки (Радиофизика и физическа електроника)

Научен ръководител:

доц. д-р Живко Господинов Кисъовски

София

Юни 2017

Дисертационният труд е обсъден и одобрен за защита на Катедрения съвет на катедра „Радиофизика и електроника“ на Физически факултет на СУ „Св. Климент Охридски“, състоял се на 29.06.2017 г.

Данни за дисертационния труд:

Брой страници – 116

Брой фигури – 71

Брой таблици – 15

Брой литературни източници – 105

Защитата на дисертационния труд ще се състои на от часа в зала А415 на Физически факултет, СУ „Св. Климент Охридски“, бул. Джеймс Баучър №5.

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в библиотеката на Физически факултет на СУ „Св. Климент Охридски“, бул. Джеймс Баучър №5, сграда А и на сайта на Физически факултет.

Актуалност на темата

Мобилните комуникации са се превърнали в неизменна част от нашия живот. През последните няколко години ясно се откроява тенденция в нарастването на броя на мобилните абонати в световен мащаб. Това води до значително нарастване на общия трафик в мобилните мрежи, като се забелязва, че мобилния трафик на данни вече надвишава по обем гласовия трафик. От една страна крайните потребители очакват по-разнообразни услуги и предоставяне на високоскоростен пренос на данни, а от друга страна мобилните операторите се нуждаят от по-голям капацитет за трафик на данни с по-ниски разходи за доставка на услуги за развиващите се пазари. Всички тези изисквания и очаквания обуславят динамичното развитието на безжичните комуникационни системи.

4G Long Term Evolution (LTE) мрежите, предлагат високоскоростен пренос на данни в широка честотна лента. В резултат на въведената система за пакетна комутация на данни, LTE стандартът се отличава с по-ефективно използване на радиочестотния спектър и с много по-високи скорости за пренос на данни в сравнение с GSM и UMTS мрежите.

За успешната реализация и разгръщане на 4G LTE мрежи в България е от изключителна важност точното определяне на затихването на сигнала (PL). Затихването е основен параметър при определяне енергийния бюджет на клетките и неговата точна оценка гарантира високо качество на предлаганите услуги в зоната на покритие. Затихването на сигнала силно зависи от конкретната среда на разпространение (градски, крайградски, селски райони, гъсто застроена градска среда, наличие на растителност и др.). 4G LTE мрежи в България се разгръщат предимно в големите градове и затова градската среда е интересна за проучване, както и поради сложността на разпространението на радиовълните в тази среда. Плътно застроената градска среда се състои от голям брой близко разположени сгради с различни геометрични размери, както и различни по размери обекти по улиците, което неминуемо води до многобройни отражения, дифракции, интерференции и разсейвания при разпространението на радиосигнала от базовата станция до потребителя. Важно е да се отбележи също така, че градските среди са от голям практически интерес, тъй като в тези райони има голяма концентрация от потребители. Популярността и използването на безжичните услуги в тези райони води до претоварване на мрежите. Поради гореизложените особености на градската среда е важно да се подчертае необходимостта от детайлно изследване на влиянието на различните параметри, особено в застроена градска среда, върху мобилния радиосигнал и неговото затихване. Тази необходимост изисква прилагането на модели за разпространение на сигнала в LTE мрежите, които адекватно отчитат особеностите на терена и са адаптирани за съответният честотен обхват. Съществуват различни модели за описание на разпространението на сигналите и оценка на затихването. Тези модели намират широко приложение в процеса на планиране и проектиране на 4G LTE мрежите. Като цяло, моделите за оценка на затихването на сигнала могат да бъдат категоризирани в три основни типа - емпирични, статистически и детерминистични. Емпиричните модели се базират на проведени измервания на нивото сигнала и дават възможност за бърза и лесна оценка на затихването в изследваната област. Изборът на подходящ емпиричен модел за определяне на затихването на сигнала в LTE мрежата е важен при определяне на енергийния бюджет на клетките. Необходимостта от точната оценка на затихването е изключително важна при определяне на размерите на клетките в LTE мрежата и зоната на покритието им. Изборът на подходящ модел не е лесен за решаване проблем, защото видът и профилът на терена варират значително в различните региони в изследваната област. Следователно, няма универсален емпиричен модел за определяне на затихването, който да е приложим за всички среди и сценарии на разпространение на

сигнала. Всеки от емпиричните модели може да доведе до неточна оценка на затихването, ако се прилага в област различна от тази, за която е разработен модела. За да се подобри точността на емпиричните модели е необходимо да се коригират техните параметри отчитащи влиянието на средата на разпространение, като се вземат предвид специфичните характеристики на изследвания район. За да се определят стойностите на параметрите в изследваната среда на разпространение е необходимо да се измери нивото на сигнала в избраната област, като на базата на получените експериментални резултати се изчисляват тези параметри.

Цел и задачи

Настоящият дисертационен труд си поставя следната цел:

Да се подберат и оптимизират, на базата на експериментално получени резултати за нивото на сигнала в 4G LTE мрежа в София, подходящи емпирични модели, които да позволяват правилно определяне на затихването на сигнала и съответно изчисляване радиуса на клетките в LTE мрежа за изследвания район на София.

С оглед на целта на дисертацията и постигането ѝ са формулирани следните задачи:

1. Да се изберат емпирични модели, които са подходящи за приложение при изследване на затихването на сигнала в 4G LTE мрежа в София, като на базата на тези модели да бъдат направени симулации за определяне на затихването в изследвания район.
2. Да се проведе експериментално измерване на нивото на сигнала в реална 4G LTE мрежа в София.
3. Да се направи оптимизация на избраните емпирични модели на базата на получените експерименталните резултати, като оптимизираните модели да дават точна оценка за затихването в изследваната област в София. Да се изчисли радиуса на клетките и зоната на покритие в 4G LTE мрежа.
4. Да се направи статистическо описание на голямомасщабния и малкомасщабния фединг в изследвания район, като се анализира неговото влияние върху нивото на приетия сигнал и да се определи стойността на фединговата граница в този район.

Съдържание на дисертацията

Дисертацията се състои от увод, четири глави и заключение.

Глава 1 е литературен обзор на актуалните въпроси и проблеми, свързани с изследванията в дисертацията. Главите от 2 до 4 представят изследванията по всяка една от задачите в дисертацията и резултатите от тях. В заключението е направено обобщение на основните резултати от проведените изследвания в дисертационния труд. В края на дисертацията са представени приносите на дисертационния труд.

Кратко изложение на дисертацията

В **Глава 1** са разгледани моделите за предвиждане на затихването на сигнала в 4G LTE мрежите.

Затихването на сигнала е особено важен елемент в процеса на проектиране на мобилните клетъчни мрежи. Поради тази причина е необходимо затихването на сигнала да се оцени достатъчно точно и прецизно, за да се осигури ефективна и надеждна зона на покритие и оптимално определяне на енергийния бюджет на клетките в мрежата. За предвиждане на затихването в 4G LTE мрежите се използват моделите, които описват адекватно разпространението на сигнала. Тези модели могат да бъдат категоризирани най-общо в три типа – детерминистични, емпирични и статистически.

- **Детерминистични модели**

Детерминистични модели се характеризират с точно отчитане на разположението и размерите на обектите между eNodeB и UE. Един от най-често прилаганите детерминистични модели е лъчевото трасиране (ray tracing), който се състои в софтуерно симулиране на разпространението на сигнала за ограничена област. Този модел се базира на законите на физичната оптика - отражения от стени, дифракции от остри ръбове, дифузно разсейване, поглъщане в бетонни, тухлени стени и някои други ефекти. Първоначално трябва да се създаде 2D или 3D карта на местността и след това да се изследват различните комбинации на местоположенията на eNodeB и UE. На базата на получените резултати може да се създаде карта за нивото на сигнала и покритието в дадения район. В зависимост от броя на отчитаните процеси в модела (пример - до 7 последователни отражения на един и същи лъч, до 2-3 дифракции, комбинирани с отражения и др.) могат да се постигнат много достоверни резултати [1]. Прилагането на детерминистичните модели за голяма и сложна мобилна радио среда е трудно и поради тази причина приложението им е ограничено за малки области.

- **Емпирични модели**

Емпиричните модели за предвиждане на затихването на сигнала намират приложение не само в научните изследвания, но и при изграждането на безжични мобилни мрежи. Тези модели са широко използвани при проектирането на клетъчните мрежи и по-специално в предпроектното проучване и определянето на енергийния бюджет на клетката (link-budget), както и в процеса на първоначалното разгръщане на дадена мрежа. При емпиричните модели се ползват приближени формули за затихването на сигнала, получени след обработка на голямо количество експериментални данни за измереното ниво на сигнала в конкретната среда на разпространение [1].

Избрани са подходящи емпирични модели, които намират приложение за определяне на затихването в LTE мрежите:

Log-distance модел [2]:

$$PL = PL(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + \chi_{\sigma} \quad (\text{dB}) \quad (1)$$

COST 231 Hata модел [3]:

$$PL = 46.3 + 33.9 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(h_t) - \alpha(h_r) + \\ + (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_t)) \log_{10} d + c_m \quad (\text{dB}) \quad (2)$$

SUI модел [4]:

$$PL = A + 10\gamma \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_f + X_h + s \quad d > d_0 \quad (\text{dB}) \quad (3)$$

WINNER II модел [5]:

$$PL = (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_{BS})) \log_{10}(d) + 34.46 + 5.83 \log_{10}(h_{BS}) + + 23 \log_{10}(f/5) \quad (\text{dB}) \quad (4)$$

COST 231 Walfisch-Ikegami модел [6]:

$$PL_{NLOS} = \begin{cases} L_{FSL} + L_{rts} + L_{msd} \\ L_{FS} \end{cases} \quad (\text{dB}) \quad (5)$$

ITU 1411 модел [7]:

$$PL_{NLOS} = \begin{cases} L_{fsl} + L_{rts} + L_{msd} & L_{rts} + L_{msd} > 0 \\ L_{fsl} & L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \end{cases} \quad (\text{dB}) \quad (6)$$

Ericsson модел [8]:

$$PL = a_0 + a_1 \log_{10}(d) + a_2 \log_{10}(h_{bs}) + a_3 \log_{10}(h_{bs}) \log_{10}(d) - 3.2 \log_{10}(11.75h_m)^2 + g(f) \quad (\text{dB}) \quad (7)$$

Extended Sakagami модел [9]:

$$PL = 54 + 40 \log_{10}(d) - 30 \log_{10}(h_b) + 21 \log_{10}(f) + \alpha(h_0) + \alpha(W) + \alpha(h_m) \quad (\text{dB}) \quad (8)$$

- **Статистически модели**

Статистическите модели се базират на статистическото разпределение на нивото на приетия сигнал и определят осреднените му параметри в дадена среда - средна стойност, дисперсия, среден брой пропадания на сигнала и др. Те описват влиянието на голямомощабния и малкотоощабния фединг [10].

Разгледани са следните статистическите модели в дисертацията:

Лог-нормално разпределение [11]:

$$p(Y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{Y - M_Y}{\sigma_Y}\right)^2\right] \quad (9)$$

Разпределение на Ричи [12]:

$$p(r) = \frac{r}{\sigma_r^2} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_r^2}(r^2 + a^2)\right] I_0\left(\frac{ra}{\sigma_r^2}\right) \quad (10)$$

Разпределение на Релей [13]:

$$p(r) = \frac{r}{\sigma_r^2} \exp\left[-\frac{r^2}{2\sigma_r^2}\right] \quad (11)$$

В Глава 2 са представени и анализирани резултатите от проведените симулациите за определяне на затихването, изследвано е влиянието на различните параметри в моделите, като височините на приемната и предавателната антени, честота и конкретната среда на разпространение. Определен е максималния радиус на клетката при отчитане на характерните особености на изследвания район на София. Тези изследвания са направени с цел да се изберат най-подходящи модели за оценка на затихването, които след това да бъдат оптимизирани.

Изследване на зависимостта на затихването от височината на приемната и предавателната антени.

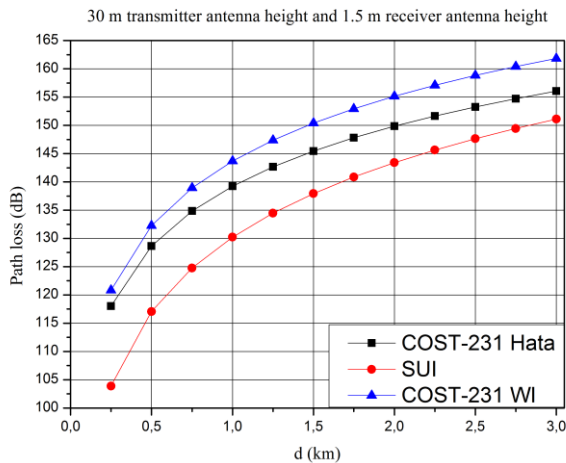
В [A1] и [A2] е изследвана зависимостта на затихването от разстоянието (d) между базовата станция и мобилната станция, като са сравнени емпиричните модели COST 231 Hata, SUI, COST 231 Walfisch-Ikegami. На базата на тези модели за разработени симулации за изчисляване на затихването. Тези 3 модела се характеризират с това, че включват необходимия брой параметри, които позволяват адекватно отчитане на характеристиките на мобилната радио среда в София.

В таблица 1 са представени определените входните параметри за провеждането на симулациите. Избора на тези параметри е съобразен с конкретната среда на разпространение - кампуса на СУ в квартал Лозенец и неговите основни характеристики и особености.

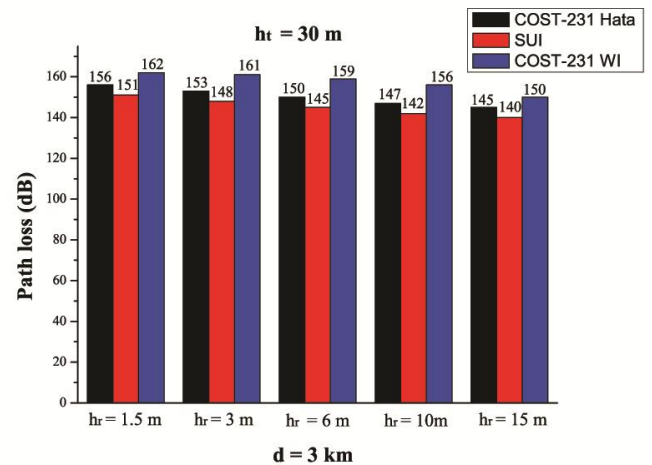
Параметри	Стойност
Предавателна мощност на антената на базовата станция	43 (dBm)
Предавателна мощност на антената на мобилната станция	30 (dBm)
Височина на предавателната антена	40, 30, 20 (m)
Височина на приемната антена	1.5, 3, 6, 10, 15(m)
Работна честота	1800 (MHz)
Разстояние между предавателната и приемната станции	до 3 (km)
Разстояние между сградите	20 (m)
Средна височина на сградите	15 (m)
Ширина на улиците	20 (m)
Ъгъл на ориентация на улиците (спрямо сигналния лъч)	90 (degrees)
Корегиращ фактор дължащ се на засенчване	8.2 (dB)

Таблица 1. Параметри за симулациите

В [A1] е изследвана зависимостта на затихването от височината на приемната антена (h_r) при фиксирана височина на предавателната антена. Представени са резултати за затихването получени с трите модела, като е анализирано влиянието на параметъра h_r върху PL.



Фигура 1. Затихване на сигнала при височина на антената на базовата станция 30 m и височина на приемната антена 1.5 m

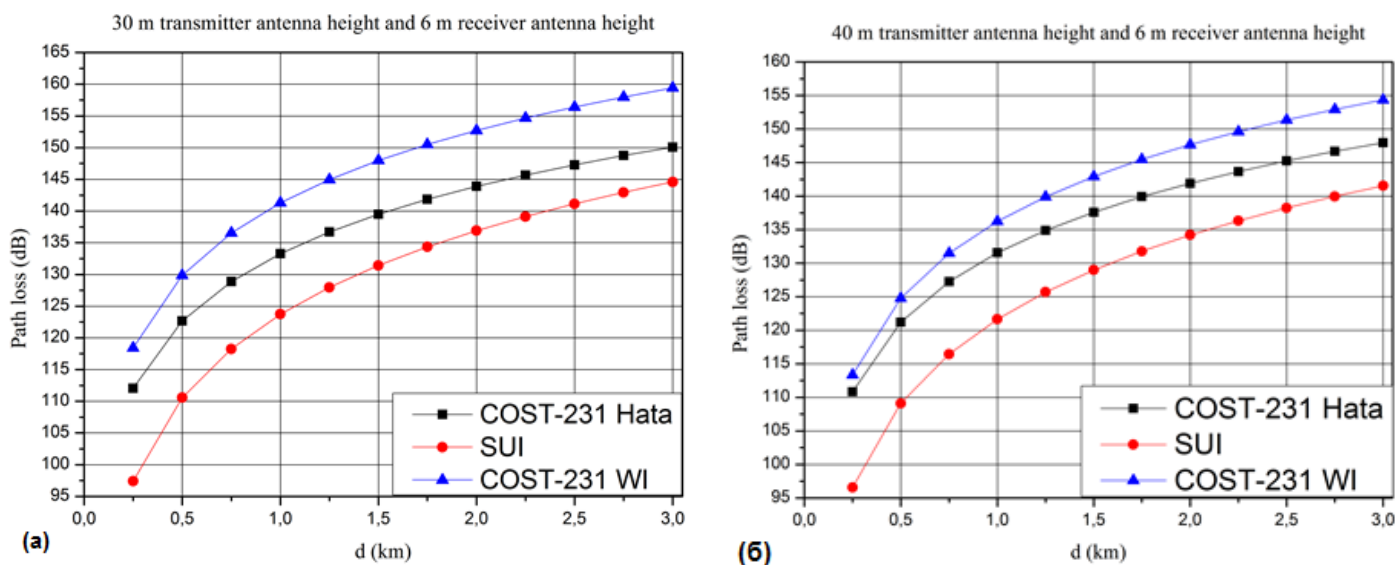


Фигура 2 Резултати от трите модела получени за затихването на сигнала при различна височина на приемната антена

На фиг.1 са представени резултатите за зависимостта на затихването на сигнала от разстоянието при височина на антената на базовата станция 30 m и височина на приемната антена 1.5 m. Видно е, че затихването нараства с увеличаване на разстоянието, като при COST 231 Walfisch-Ikegami тази тенденция е най-силно изразена, спрямо другите 2 модела. От резултатите се вижда, че най-ниски стойности за затихването дава SUI модела, като на разстояние 250 m затихването е около 103 dB, а на 3 km е около 151 dB. Стойностите за затихването получени с COST 231 Hata модела са съответно при разстояние 250 m затихването е около 117 dB, а на 3 km е около 156 dB. Най-високи стойности за затихването се получават при COST 231 Walfisch-Ikegami модела – на разстояние 250 m затихването е около 120 dB, а на 3 km е около 162 dB. На фиг. 2 са илюстрирани резултатите за затихването на сигнала получено с тези 3 модела при различни височини на приемната антена. Затихването е определено при фиксирана височина на предавателната антена от 30 m и разстояние между базовата и мобилната станция от 3 km, като височината на приемната антена приема стойности 1.5 m, 3 m, 6 m, 10 m и 15 m. Забелязва се от получените резултати, че PL намалява с увеличаване на височината на приемната антена, но тази

зависимост е слабо изразена и при трите модела. При увеличаване на височината на приемната антена 10 пъти (от 1.5 m на 15 m) затихването намалява с около 11 – 12 dB. От резултатите за затихването, които са получени с трите модела може да се заключи, че зависимостта на PL от h_r е слаба, като при съществено увеличаване на h_r се постига малко намаляване на PL.

В [A2] е изследвана зависимостта на затихването от височината на предавателната антена и разстоянието между базовата и мобилната станция с моделите - COST 231 Hata, SUI, COST 231 Walfisch-Ikegami. Изследването е проведено при фиксирана височина на приемната антена $h_r = 6$ m, като височината на антената на базовата станция h_t приема стойности от 20 m, 30 m и 40 m. На фиг. 3 (а) са представени резултатите за затихването получени при височина на антената на базовата станция 30 m и височина на приемната антена 6 m. Резултатите, които се получават при SUI модела са съответно на разстояние 250 m затихването е около 97 dB, а на 3 km е около 145 dB, докато при COST 231 Hata модела при разстояние 250 m затихването е около 112 dB, а на 3 km е около 150 dB.



Фигура 3 Затихване на сигнала при височина на антената на базовата станция 30 m (а) и 40m (б) и височина на приемната антена 6 m

На фиг. 3 (а) се вижда, че резултатите получени за затихването при COST 231 Walfisch-Ikegami модела са по-високи в сравнение с другите 2 модела, като на разстояние 250 m затихването определено с този модел е около 118 dB, а на 3 km е около 159 dB. На фиг. 3 (б) са представени резултатите за затихването получени при височина на антената на базовата станция 40 m и височина на приемната антена 6 m. При увеличаване на предавателната антена с 10 m се забелязва намаляване на затихването на сигнала и при трите модела. Резултатите, които се получават при SUI модела са съответно на разстояние 250 m затихването е около 96 dB, а на 3 km е около 142 dB, докато при COST 231 Hata модела на разстояние 250 m затихването е около 110 dB, а на 3 km е около 148 dB. Отново резултатите получени за затихването при COST 231 Walfisch-Ikegami модела са с най-висока стойност, като на разстояние 250 m затихването определено с този модел е около 113 dB, а на 3 km е около 154 dB.

При увеличаване на височината на предавателната антена два пъти (от 20 m на 40 m) затихването на сигнала намалява и при трите модела, както е показано в дисертацията. От резултатите представени в дисертацията може да се обобщи, че затихването на сигнала значително намалява с увеличаването на височината на предавателната антена, като то е най-голямото при COST 231 Walfisch-Ikegami (около 24 dB) и най-малко при Hata модела (около 5 dB). Получените резултати с COST 231 Walfisch-Ikegami

показват, че при височина на предавателната антена близка до средната височина на сградите, затихването полученото с този модел е значително.

От представените резултати в [A1] и [A2] може да се обобщи, че влиянието на височина на предавателната антена върху затихването на сигнала е по-голямо отколкото влиянието на височината на приемната антена.

Честотна зависимост на затихването в моделите

Важен фактор при определяне на затихването на сигнала е носещата честота, която се използва. В [A3] е изследвано влиянието на носещата честота върху затихването на сигнала. В това изследване сме използвали моделите WINNER II, ITU 1411 и Ericsson, които са подходящи за приложение при определяне на затихването в 4G LTE мрежи по отношение на честотна област и механизми на затихване. Вземайки предвид определените от ITU честотни обхвати за LTE стандарта в Европа – 1.8 GHz, 2.6 GHz и 3.5 GHz, в дисертацията са разработени програми за числено моделиране на затихването на сигнала на базата на моделите WINNER II, ITU 1411 и Ericsson, в застроена градска среда.

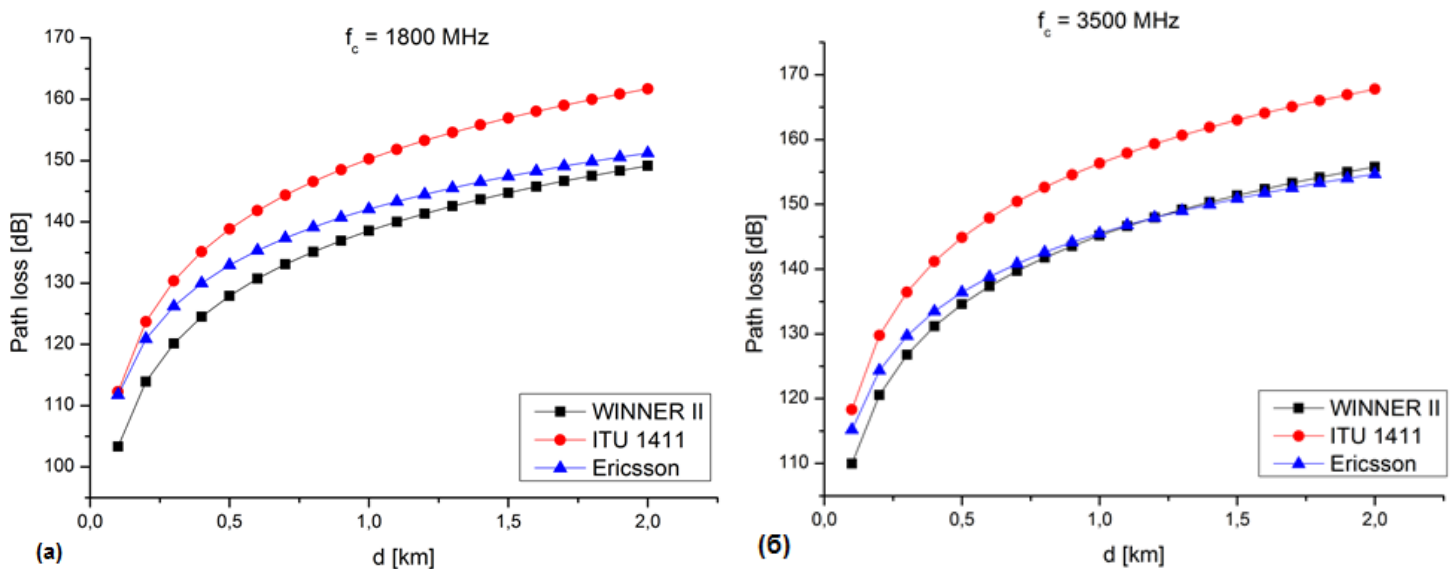
В таблица 2 са представени характерните параметри на средата на разпространение.

Параметри	Стойност
Предавателна мощност на антената на базовата станция	43 (dBm)
Предавателна мощност на антената на мобилната станция	30 (dBm)
Височина на предавателната антена	30 (m)
Височина на приемната антена	2 (m)
Честота	1.8, 2.6 и 3.5 (GHz)
Разстояние между базовата и приемната станции	до 2 (km)
Разстояние между сградите	20 (m)
Средна височина на сградите	20 (m)
Средна ширина на улиците	10 (m)
Ъгъл на ориентация на улиците (спрямо сигналния лъч)	60 (degrees)

Таблица 2. Входни параметри за симулациите

Изследвана е зависимостта на затихването, като функция от разстоянието между базовата и мобилната станция при различни честотни обхвати - 1.8, 2.6 и 3.5 (GHz)., чрез симулиране на затихването с моделите - WINNER II, ITU 1411 и Ericsson.

На фиг. 4 (а) са представени резултатите за затихването на сигнала при честота 1.8 GHz. От получените резултати се вижда, че най-голямо затихване дава модела ITU 1411, като на разстояние 100 m затихването е около 112 dB, а на 2 km е около 161 dB. При Ericsson модела получаваме следните резултати - на разстояние 100 m затихването е около 112 dB, а на 2 km е около 150 dB. Докато при WINNER II имаме - на разстояние 100 m затихването е около 104 dB, а на 2 km е около 150 dB. На фиг 4 (б) са представени резултатите за затихването на сигнала при честота 3.5 GHz. При увеличаване на честотата почти двойно от 1.8 GHz на 3.5 GHz се забелязва повишаване на затихването на сигнала и при трите модела, като при различните модели повишаването на затихването варира в диапазона от 4 dB до 8 dB. От фиг. 4 се забелязва, ITU 1411 модела се характеризира с най-високи стойности за затихването, както и най-силно изменение на затихването при увеличаване на честотата от 1.8 GHz на 3.5 GHz - около 7 dB. Докато при WINNER II модела изменението на затихването при увеличаване на честотата от 1.8 GHz на 3.5 GHz е около 5 dB. А най-слабо изменение се наблюдава при Ericsson модела около 4 dB.



Фигура 4. Затихване на сигнала при честота 1.8 GHz (а) и 3.5 GHz (б)

В [A3] са представени резултати за зависимостта на затихването на сигнала от честотата в 4G LTE мрежа в застроена градска среда. Затихването е определено с моделите WINNER II, ITU 1411 и Ericsson. Целта на това изследване е да се представи сравнителен анализ на затихването и да се определят възможностите за използване на честотните обхвати 1.8 GHz, 2.6 GHz и 3.5 GHz в България за развитие на LTE.

Определяне на радиуса на клетката в 4G LTE мрежа

Точната оценка на затихването в LTE мрежите дава възможност да бъдат определени зоната на покритие (радиуса на клетката) на всяка базова станция (eNodeB) и качеството на услугите в тази зона. В [A4] е направен анализ на влиянието на затихването при определяне радиуса на клетката в 4G LTE мрежа, също така са разгледани възможностите за разгръщане на LTE мрежи в София в честотните обхвати 1.8 GHz, 2.6 GHz и 3.5 GHz. В това изследване са използвани моделите Sakagami, WINNER II и SUI, тъй като тези модели включват достатъчно параметри отчитащи характеристиката на изследваната област. Направен е сравнителен анализ на стойностите на затихване на сигнала при различни честотни обхвати (1.8 GHz, 2.6 GHz и 3.5 GHz) в LTE мрежа на територията на квартал Лозенец в София. В това изследване е изчислен енергийният бюджет на клетката за типична базова станция (eNodeB) с цел да се определи максималния радиус на клетката и зоната на покритие. Направено е сравнение на получените резултати за максималния радиус на клетката при използването на трите честотни обхвата - 1.8 GHz, 2.6 GHz и 3.5 GHz. При изчисляване на енергийният бюджет (downlink link budget) са взети предвид следните фактори – използват се 2 MIMO антени (предавателни антени), скоростта за пренос на данни в мрежата е 50 Mbps.

Сега ще бъде представена методиката за определяне на максималния радиус на клетката и зоната на покритие в LTE мрежа в изследваната област.

В таблица 3 са представени параметрите, използвани при симулациите. Тези параметри са избрани съобразно характеристиките на изследвания район - квартал Лозенец в София.

Параметри	Стойност
Честота	1.8, 2.6 и 3.5 (GHz)
Ширина на честотната лента	10 (MHz)
предавателна мощност на eNodeB	43 (dBm)
Усилване на предавателната антена на eNodeB	18 (dBi)
Височина на антената на eNodeB	25 (m)
Усилване на антената на UE	0 (dBi)
Височина на антената на UE	1.5 (m)
Шумово число на UE	7 (dB)
Допустима граница на интерференцията	3 (dB)
Загуби по фидера	2 (dB)
Загуби в тялото	0 (dB)
Средна височина на сградите	17 (m)
Средна ширина на улиците	8 (m)

Таблица 3. Използвани параметри при симулациите

В дисертацията е представена методиката за изчисляване на радиуса на клетката в LTE мрежа, която включва следните стъпки.

За еквивалентната изотропно излъчвана мощност (EIRP) от базовата станция се получава:

$$EIRP = P_{Tx} + G_{Tx} - L_c = 43 + 18 - 2 = 59 \text{ (dBm)} \quad (12)$$

Необходимо съотношение сигнал към шум плюс интерференция (SINR), за да се постигне скорост на пренос на данни от 50 Mbps при използване на ефективна ширина на честотната лента от 9 MHz (50 RB x 180 kHz) е:

$$SINR = 10\log_{10}\left(2^{\frac{C}{B}} - 1\right) = 10\log_{10}\left(2^{\frac{50 \cdot 10^6}{9 \cdot 10^6}} - 1\right) = 16.63 \text{ (dB)} \quad (13)$$

Нивото на общия шум (total noise power) е:

$$N = -174 + \log_{10}(\Delta f) + NF + M = -174 + \log_{10}(9 \cdot 10^6) + 7 + 3 = -94.45 \text{ (dBm)} \quad (14)$$

Следователно за минималното ниво на приетия сигнал от мобилната станция се получава:

$$P_{Rx} = N + SINR = -94.45 + 16.63 = -77.82 \text{ (dBm)} \quad (15)$$

Това е минималното необходимо ниво на приетия сигнал от мобилната станция, което трябва да бъде осигурено, за да се поддържа скорост на пренос на данни от 50 Mbps. От тук следва, че максималното затихване на сигнала, което трябва да се предвиди при изчисляване на енергийния бюджет на клетката, за да се постигне заложената скорост за пренос на данни е:

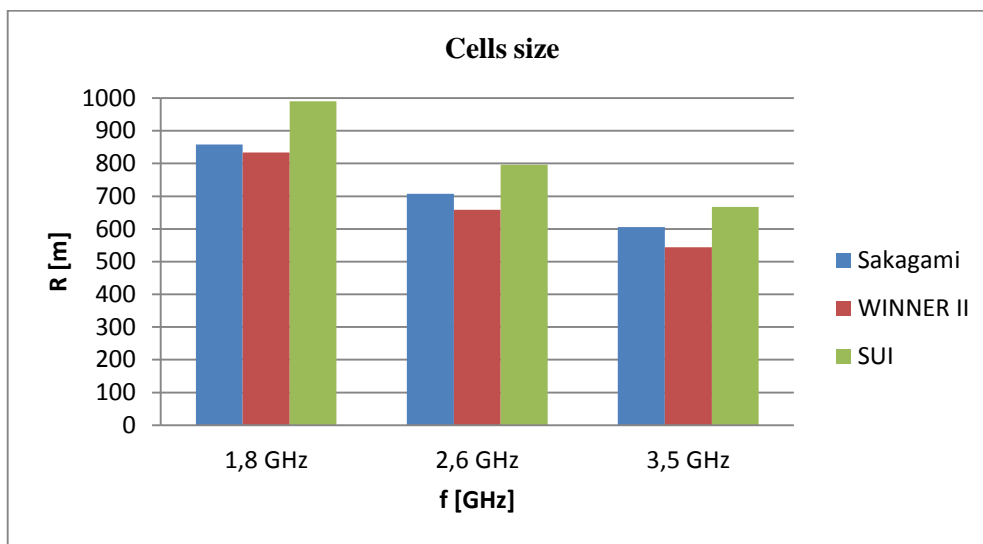
$$PL = EIRP + G_{Rx} - P_{Rx} = 59 + 0 - (-77.82) = 136.82 \text{ (dB)} \quad (16)$$

Полученият резултат за максималното затихване се използва, за да се определи максималния радиус на клетката в изследвания район на София (кв. Лозенец) чрез прилагането на моделите Sakagami, WINNER II и SUI. Определен е максималния радиус на клетката в LTE мрежа, разгърнат на територията на квартал Лозенец за честотните обхвати 1.8 GHz, 2.6 GHz и 3.5 GHz.(таблица 4).

Модел	R (m) при 1.8 GHz	R (m) при 2.6 GHz	R (m) при 3.5 GHz
Sakagami	858	708	605
WINNER II	834	658	544
SUI	990	797	668

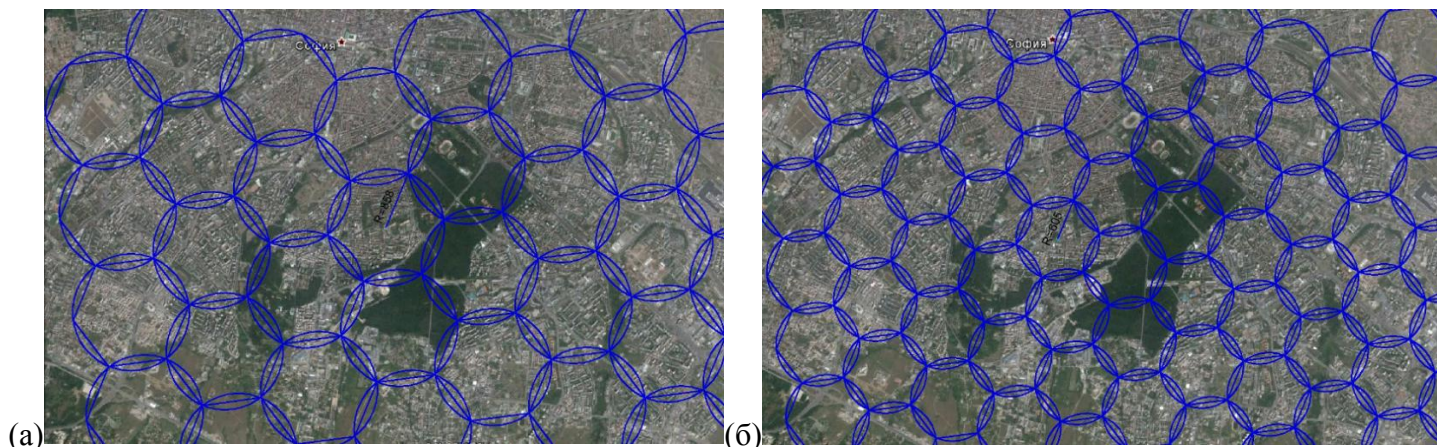
Таблица 4. Резултати за радиуса на клетката

На фиг. 5 е представено сравнение на получените резултати за радиуса на клетката в София (кв. Лозенец) с моделите Sakagami, WINNER II и SUI при честота 1.8 GHz, 2.6 GHz и 3.5 GHz, При увеличаване на честотата, поради увеличаването на затихването (дължащо се на зависимостта на PL от честотата), радиуса на клетката намалява. При увеличаване на честотата почти два пъти от 1.8 GHz на 3.5 GHz наблюдаваме намаляване на радиуса на клетката в диапазона от 253 m до 322 m (около 300 m) при различните модели, като тази тенденция е най-силно изразена при SUI модела – намаляването на радиуса на клетката е 322 m. Получените резултати са сравнително близки, като разликата в стойностите за радиуса на клетката, получени с различните модели е около 150 m.



Фигура 5. Радиус на клетка при честота 1.8 GHz, 2.6 GHz и 3.5 GHz

Примерна визуализация на минималния брой клетки, които ще са необходими, за да се осигури покритието в изследвания района на София при използването на различни честотни обхвати (1.8 GHz, 2.6 GHz и 3.5 GHz) е представена в дисертацията, като радиусът на клетката е изчислен при използването Sakagami модела. Фигура 6 (а) показва минималния брой клетки, осигуряващи покритие в избраната област на София при честота 1.8 GHz.



Фигура 6. Минимален брой на клетките в изследваната област на София при честота 1.8 GHz (а) и 3.5 GHz (б)

Фигура 6 (б) илюстрира минималният брой клетки, необходими за осигуряване на покритието в изследваната област на София при честота 3.5 GHz. От фиг. 6 (б) се вижда, че броят на необходимите клетки е около два пъти по-голям в сравнение с броя на клетките при честота 1.8 GHz. Следователно

използването на честота 3.5 GHz води до необходимостта от разгръщане на LTE мрежа с най-малко два пъти повече базови станции.

При използването на по-ниските честоти, като 1.8 GHz радиуса на клетката е по-голям, както и зоната на покритие е по-голяма. Докато при използването на по-високи честоти, като 3.5 GHz радиуса на клетката е по-малък и зоната на покритие намалява. Следователно необходимият брой базови станции, осигуряващи покритие в избраната област на София ще се увеличи значително при използване на честота 3.5 GHz. Поради тази причина телекомуникационните оператори в България следва да използват по-ниските честотни обхвати за осигуряване на покритие в по-голяма част от LTE мрежата си, като използват по-високите честотни обхвати за повишаване на капацитета на мрежата си в гъсто населените градски райони.

Определяне на затихването в офис среда

С повишаване на нуждата от предоставяне на високоскоростен пренос на данни, както и предлагане на услуги с по-добро качество, все по-актуален става въпросът за осигуряването на добро покритие в бизнес сградите и офисите. Честа практика е разгръщането на фемто или пико клетка в сградата, която да осигури покритие и услуги с достатъчно добро качество на потребителите, който се намират на територията на тази сграда. При инсталирането на фемто клетка в офис среда от изключителна важност е точното определяне на затихването на сигнала, което се явява основен фактор в енергийния бюджет на клетката и определя нейното покритие. За предвиждане на затихването на сигнала е необходимо да се използват модели, адекватно отчитащи всички важни характеристики на конкретната офис среда – конструкция на сградата, брой и размери на помещенията, стените и етажите.

За изследване на затихването на сигнала в LTE мрежа в офис среда са използвани моделите WINNER II - indoor [5] и COST 231 - multi walls multi floors (COST 231 MWMF) [3]. Тези модели са представени детайлно в дисертацията. В [A5] са използвани моделите WINNER II – indoor и COST 231 MWMF, които се прилагат за определяне на затихването на сигнала в офис среда. На базата на посочените модели, са разработени софтуерни симулации за определяне на затихването на сигнала, излъчен от LTE фемто-клетка, като изследването е направено за част от сградата на Физически факултет на СУ „Св. Климент Охридски“ - сграда Б, като са взети под внимание основните ѝ характеристики.

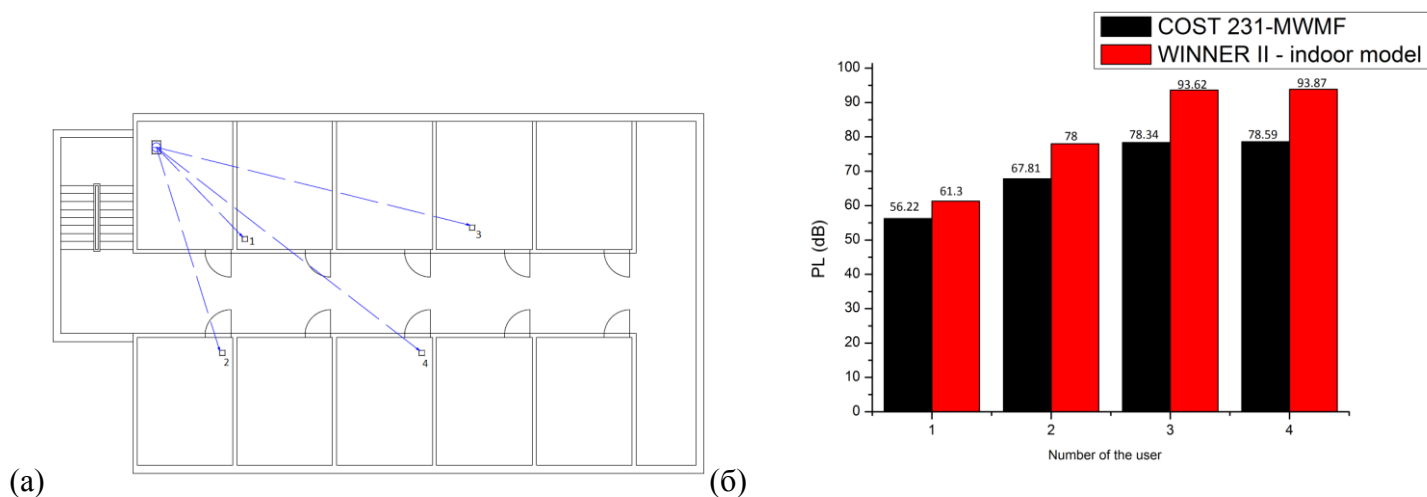
В таблица 5 са представени параметрите, използвани при симулациите с модела COST 231 MWMF. Докато моделът WINNER II – indoor използва осреднени параметри. Избора на тези параметри е съобразен с характерните особености на сградата на Физически факултет.

Изследвана е зависимостта на затихването на сигнала от вида и броя на стените и етажите в сградата. Направено е сравнение на получените резултати от симулациите с моделите WINNER II – indoor и COST 231 MWMF.

Параметри	Стойност
Размери на офисите	4x3x2.8 (m)
Размери на коридора	20x2.5x2.8 (m)
Дебелина на стените	0.20 (m)
Дебелина на плочите на етажите	0.30 (m)
L_{wi} е коефициент изразяващ загубите на проникване през стените (за тухлени стени)	6.9 (dB)
L_f е коефициент на загубите на проникване през етажите (за стоманобетонна плоча)	18.3 (dB)
b	0.46
Честота	1800 (MHz)

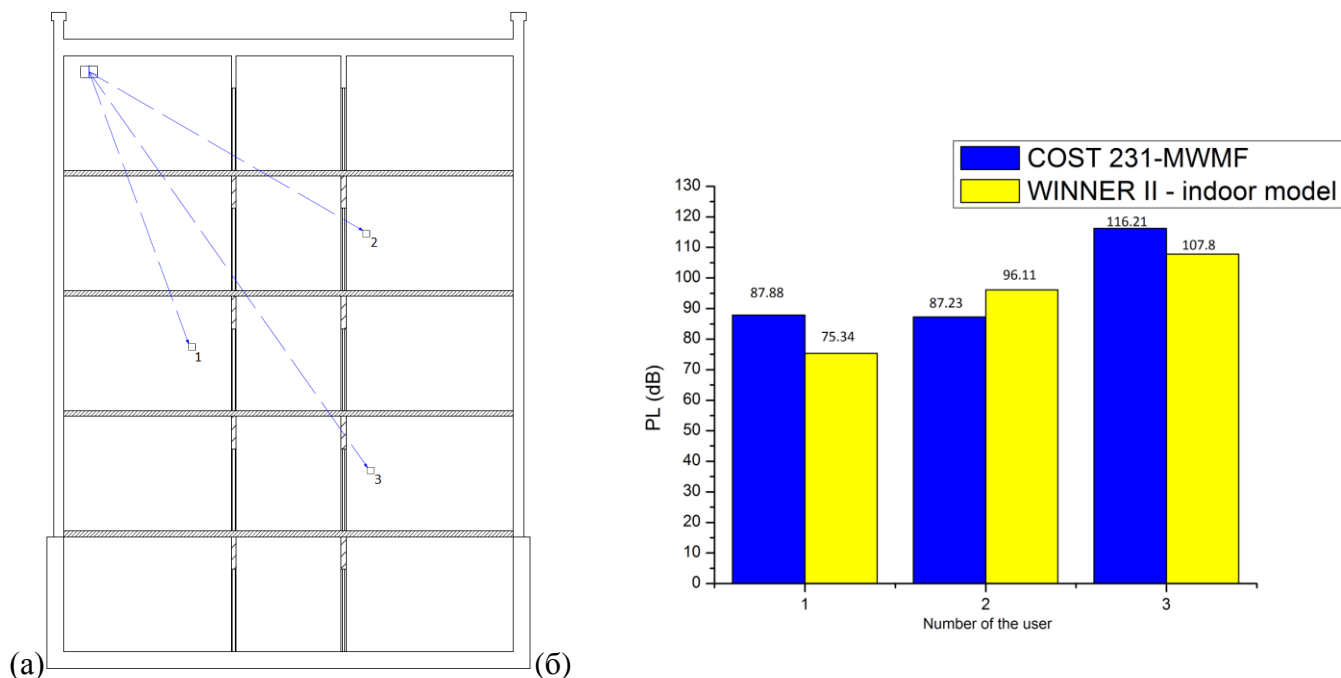
Таблица 5 Параметри на сградата използвани при симулациите

Принципна схема на четвъртия етаж от сградата на Физическия факултет е представена на фиг. 7 (а), като е показано разположението на предавателя спрямо четирима ползватели разположени в различни части на етаж. От получените резултати (фиг. 7 (б)) се вижда, че затихването на сигнала в крайните части на четвъртия етаж може да достигне до 94 dB, което ще ограничи скоростта за пренос на данни. Моделът WINNER II – indoor дава по-големи стойности за затихване спрямо COST 231 MWMF при разглеждането направено за четвъртия етаж от сградата (фиг. 7(б)), като това се дължи на факта, че отчита с по-голям принос затихването от стените.



Фигура 7 План на четвъртия етажна сградата (а) и резултати за затихването (б)

На фиг. 8 (а) е представен вертикален план на сградата, като тук се отчита затихването, дължащо се на преминаването на сигнала през плочите на сградата.



Фигура 8 Вертикален план на сградата (а) и резултати за затихването (б)

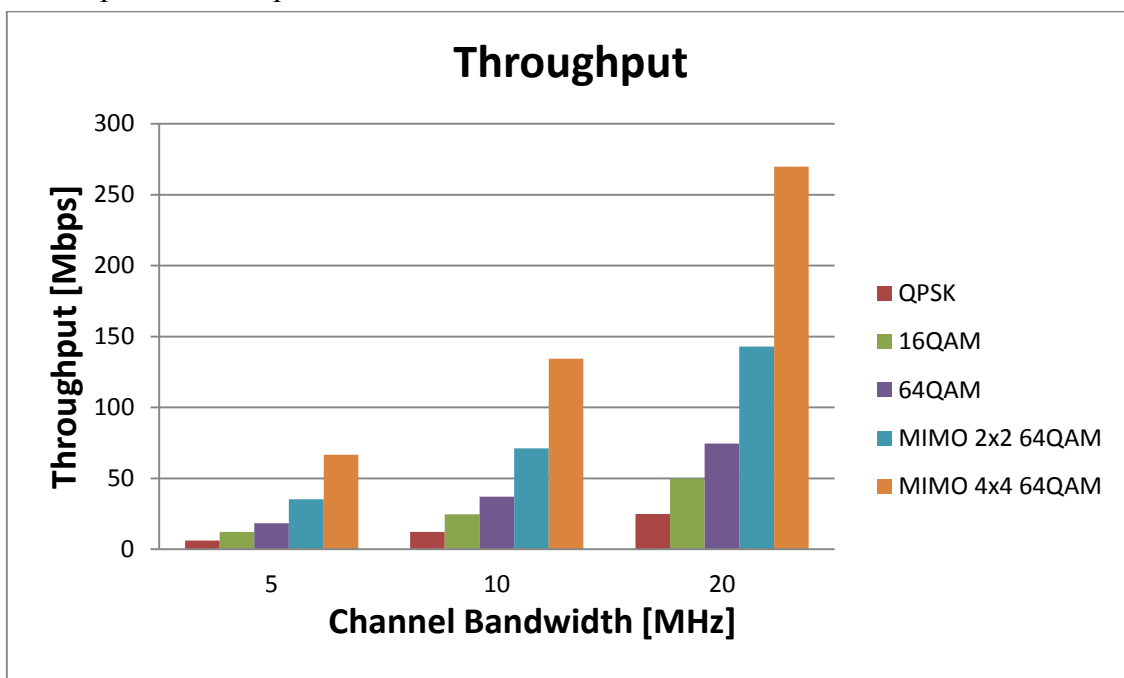
На фиг. 8 (б) са представени резултати за затихването на сигнала при разпространението му между етажите. Както се вижда от получените резултати, затихването на сигнала достига стойности до 117 dB на първия етаж на сградата, което ще ограничи скоростта за пренос на данни. Затихването на сигнала при

разпространението му към долните етажи на сградата се увеличава, като това ще доведе до намаляване на качеството на връзката на първия етаж. Забелязва се, че моделът COST 231 MWMF отчита с по-висок принос затихването, дължащо се на преминаването на сигнала през плочите на сградата (фиг. 8 (б)).

Извършеното изследване в [A5] дават възможност за предварително определяне на необходимия брой фемто клетки и тяхното разположение в сградата при разгръщането на LTE мрежа в конкретната офис среда. В резултат на това изследване може да се заключи, че са необходими поне две фемто клетки в сградата, за да се осигури необходимото ниво на сигнала за постигане на високоскоростен пренос на данни, характерен за 4G LTE мрежите.

Изследване на влиянието на MIMO антенната система върху скоростта за пренос на данни в 4G LTE мрежите

В [A6] са представени резултати за скоростта на пренос на данни в LTE мрежа в downlink в зависимост от избраната MIMO антенна система, вида на модулацията и ширината на честотната лента. На фиг. 9 са представени резултатите за скоростта на пренос на данни в downlink при отстраняване на контролната информация. Тези резултати са получени при използване на нормален CP (cyclic prefix) и поддържаната скорост на кодиране е 0.83.



Фигура. 9 Резултати за скоростта на пренос на данни в downlink при отстраняване на контролната информация

Скоростта на пренос на данни нараства с увеличаване на броя на MIMO антените (фиг. 9).

В [A6] са анализирани основните фактори, които влияят върху скоростта на пренос на данни в LTE мрежите, като ширината на честотната лента, вида на модулацията и конфигурацията на антенната система. Направена е оценка на влиянието на броя на MIMO антените върху скоростта на пренос на данни. Резултатите показват, че при използването на 4×4 MIMO антенна система може да се постигне скорост на пренос на данни от 270 Mbps в downlink.

Глава 3 Измерването на нивото на сигнала в 4G LTE мрежа в София

В Глава 3 е описана структурата на LTE сигнала в downlink, детайлно са представени използваните методи за измерване. Представени и анализирани са получените резултати от измерванията проведени в част от 4G LTE мрежата на Булсатком ЕАД в София, Студентски град.

Състоянието на downlink канала се определя от всички потребителски устройства (UEs) в клетката посредством измерване на референтните сигнали, които се излъчват от eNodeB. Измереното ниво на референтните сигнали от мобилните устройства служи за оценка на качеството на канала [14]. При определяне на качеството на канала, както и при хендоувър е необходимо мобилните устройства в LTE мрежата да измерват следните три параметъра: RSRP (Reference Signal Received Power), RSSI (Receive Strength Signal Indicator) и RSRQ (Reference Signal Received Quality) [15]. RSRP и RSRQ са ключови за определянето на нивото на сигнала и качеството на връзката в downlink при LTE мрежите. Трите измерени величини, RSRP, RSSI и RSRQ, се използват при вземане на решение за избор на клетка или хендоувър.

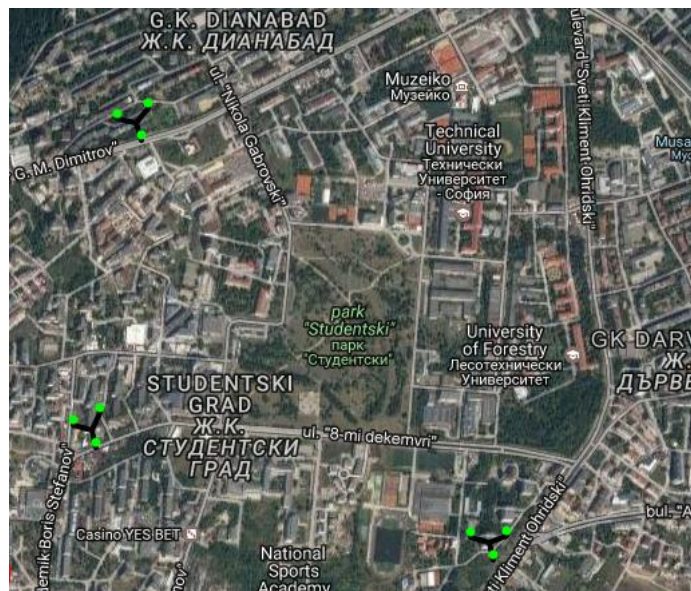
Радиочестотен спектър в обхвата 1800 MHz в България

Булсатком ЕАД има издадено разрешение за ползване индивидуално определен ограничен ресурс – радиочестотен спектър в обхвата 1800 MHz за осъществяване на обществени електронни съобщения чрез мобилна наземна мрежа, като използва честотна лента 2 x 5 MHz, съответно за downlink и uplink:

- DL : 1852.7 – 1857.7 MHz
- UL : 1757.7 – 1762.7 MHz

Експериментална постановка

Измерванията на нивото на сигнала са проведени в част от 4G LTE мрежата на Булсатком ЕАД в град София – квартал Студентски град. В този район покритието се осигурява от 3 базови станции (eNodeB).



Фигура 10. Карта на изследвания район

На фиг. 10 е показана карта на района, където са проведени измерванията, както и разположението на базовите станции (отбелязани с черен знак на картата). Базовите станции (eNodeB) се състоят от RRU Huawei 3938 и 2 MIMO антени. Всяка от базовите станции има следните основни параметри $P = 40\text{ W}$ (46 dBm) и $G = 18\text{ dBi}$, като те са взети предвид при изчисляване на затихването и определяне на енергийния бюджет на клетката.

Измерване на нивото на сигнала с измервател уред RF Analyzer - HF38B в град София - квартал Лозенец, кампус на СУ "Св. Климент Охридски"

Първият метод на измерване е реализиран чрез използването на измервател уред RF Analyzer - HF38B и лентово пропускащ филтър. Измерванията са проведени в честотната лента 1.7 - 1.85 GHz в град София (квартал Лозенец, кампус на СУ "Св. Климент Охридски"). В таблица 6 са представени резултатите от проведеното измерване. Получените резултати са използвани за да се определи затихването на ЕМ вълни на честота 1800 MHz.

d (m)	S ($\mu\text{W}/\text{m}^2$)	E (mV/m)	PL (dB)
350	0.25	9.71	89
380	0.16	7.77	91
400	0.06	4.76	95
500	0.04	3.9	97
550	0.1	6.14	93

Таблица 6 Експериментални данни от измерванията

Използването на този метод на измерване има цел да се определят характеристиките на затихването на сигнала в честотния обхват 1.8 GHz, който в България се използва за разгръщане на LTE мрежи. Измерванията за проведени за базовата станция разположена на Химическия факултет на СУ ($P_t = 40\text{ W} = 46\text{ dBm}$ и $G_t = 18\text{ dBi}$).

Резултатите от измерването са представени и анализирани в [A1] и [A2].

Измерване на RSRP, RSSI и RSRQ с мобилно устройство

Директното измерване на нивото на излъчения сигнал от eNodeB в реално работеща LTE мрежа е трудно поради флукуациите на максималната излъчена мощност, дължащи се на трафика в мрежата. Ако се измерва мощността на референтните сигнали (RS) излъчени от eNodeB, които се използват от мобилните устройства (UE) за оценка на качеството на канала в downlink, могат да се осигурят точни резултати за затихването на сигнала в клетката. Това се дължи на факта, че излъчената мощност на RS е константна и не зависи от трафика в мрежата, като стойността ѝ се изчислява от максималната мощност на eNodeB. Следователно измерването на приетата мощност на RS ще позволи да се направи точна оценка на затихването на сигнала в конкретната LTE клетка.

Посредством използването мобилно устройство (UE) и специализиран софтуер могат да бъдат измерени следните параметри на референтния сигнал в LTE мрежата:

- Reference Signal Received Power (RSRP) – RSRP се дефинира, като линейно осреднената мощност (W) на ресурсните елементи (REs), които пренасят референтни сигнали, специфични за клетката, в рамките на измерваната честотна лента [14]. Обикновено RSRP се измерва в dBm. Стойността на RSRP се използва от UE при хендоувър.
- Reference Signal Received Quality (RSRQ) – RSRQ е специфичен показател за качеството на сигнала в клетката. Този показател се използва основно за определяне на качеството на сигнала от различните клетки. RSRQ може да се използва при вземането на решение за хендоувър в случаите, при които измерванията на RSRP не са достатъчни, за да се вземе надеждно решение. RSRQ се определя като [14]:

$$RSRQ = N \frac{RSRP}{RSSI} \quad (17)$$

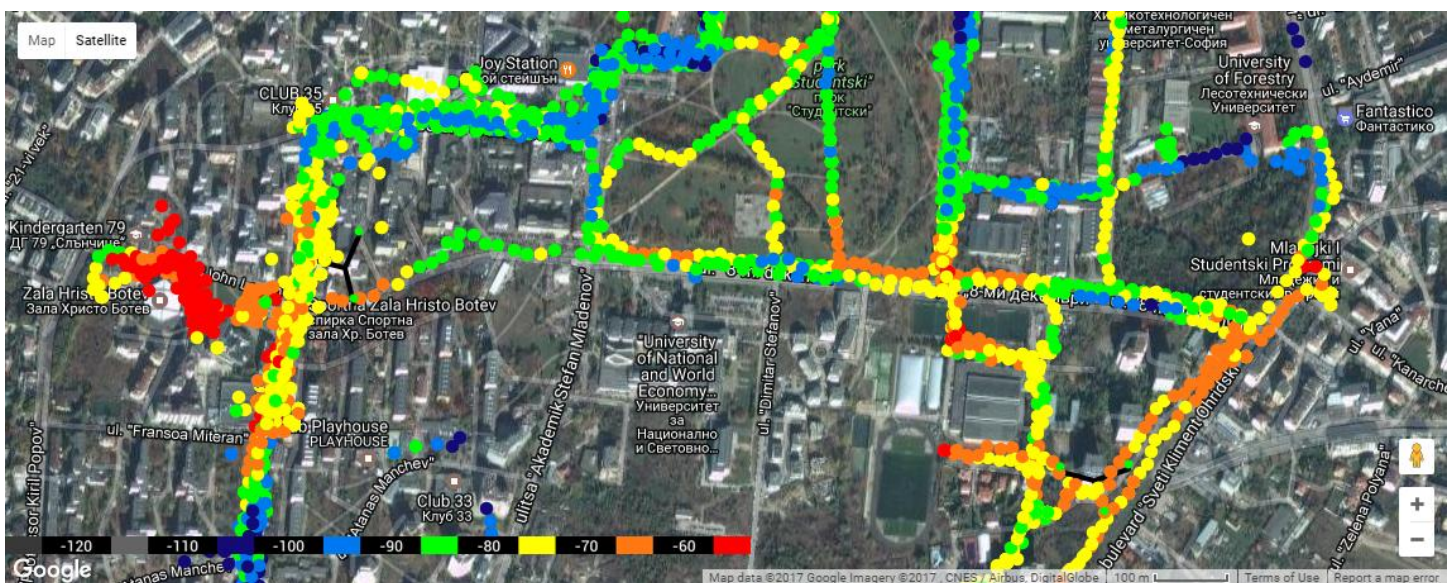
Където, N е броя на ресурсните блокове (RBs) в честотната лента на измерване на Received Signal Strength Indicator (RSSI) в LTE.

- Received Signal Strength Indicator (RSSI) – RSSI е линейно осреднената стойност на общата приета мощност, която включва междуканалната интерференция и топлинните шумове в рамките на измерваната честотната лента [14, 16]. RSSI се използва за изчисляване на RSRQ, както е показано в (17).

Проведеното изследване е осъществено в сътрудничество с Булсатком ЕАД, като измерванията са реализирани в 4G LTE мрежата на мобилния оператор в София.

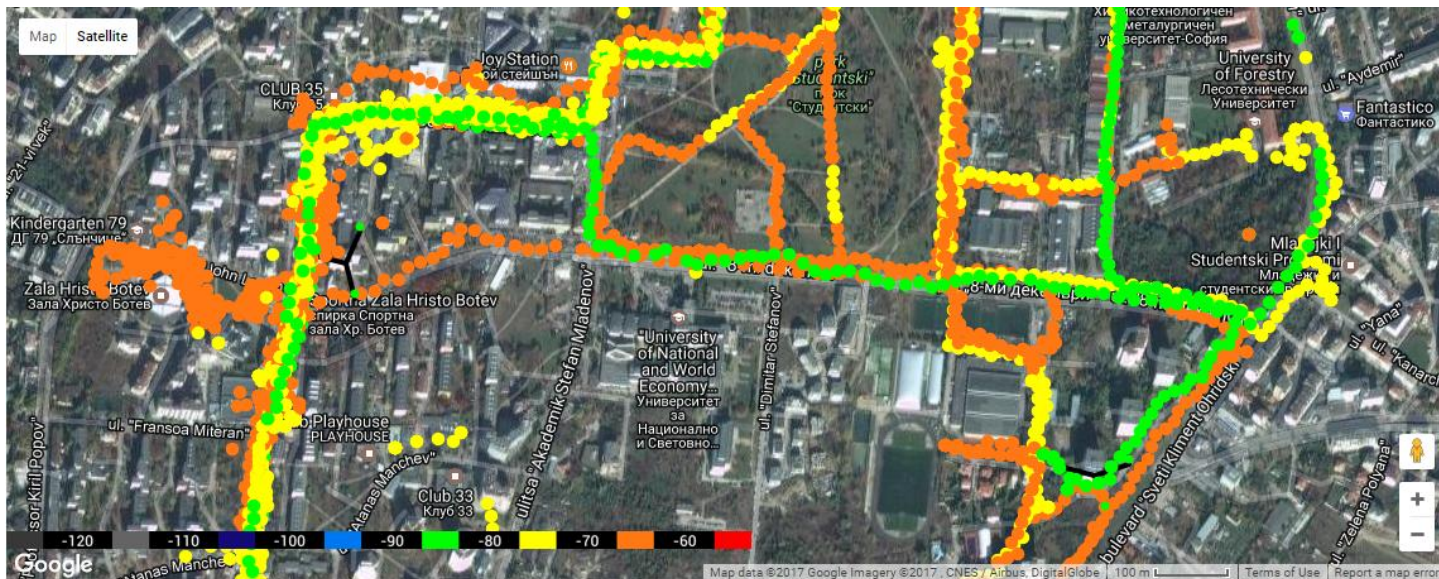
В [A7] са представени резултати от измерването на RSRP и RSRQ в 4G LTE мрежата на Булсатком ЕАД, като е направен анализ на получените резултати. Измерванията са проведени за част от територията на град София (квартал Студентски град), където мобилния оператор Булсатком ЕАД предоставя 4G покритие. Резултатите включват измерването ниво на сигнала от две базови станции (eNodeB), като всяка от тях има три сектора (3 различни Cell ID). Измерванията са реализирани чрез използването на мобилен телефон ZTE Apex Blade 2, който има LTE модул и поддържа FDD-LTE bands 3 - 1800 MHz. На мобилното устройство е поставена сим карта на Булсатком ЕАД, като от оператора ни беше предоставен достъп до специално разработения от тях софтуер за осъществяване на измерването. Софтуерът се състои от мобилно приложение и web приложение. На мобилния телефон беше инсталирано мобилното приложение Bulsatcom Reporter v.9.4. Чрез това приложение могат да се измерват едновременно различни параметри на мобилната мрежа на оператора, като RSRP, RSRQ, RSSI, SNR, ping, ping loss, скоростта на пренос на данни съответно в downlink и uplink и др. Измерванията са реализирани чрез обхождане на изследвания район, като разстоянието между различните точки на измерване и базовите станции се определя посредством GPS. Резултатите от измерванията се изпращат към сървър, където се създава база от данни на измерванията. Изследването е проведено в рамките на 1 месец, като за този период за реализирани 9050 измервания в различни точки.

Част от получените резултати са представени на фигури от 11 до 14. На тези фигури изследваните базовите станции са означени с черен знак. Всяка базова станция включва по 3 клетки (сектора) с специален номер (код) т.н „Cell ID“.



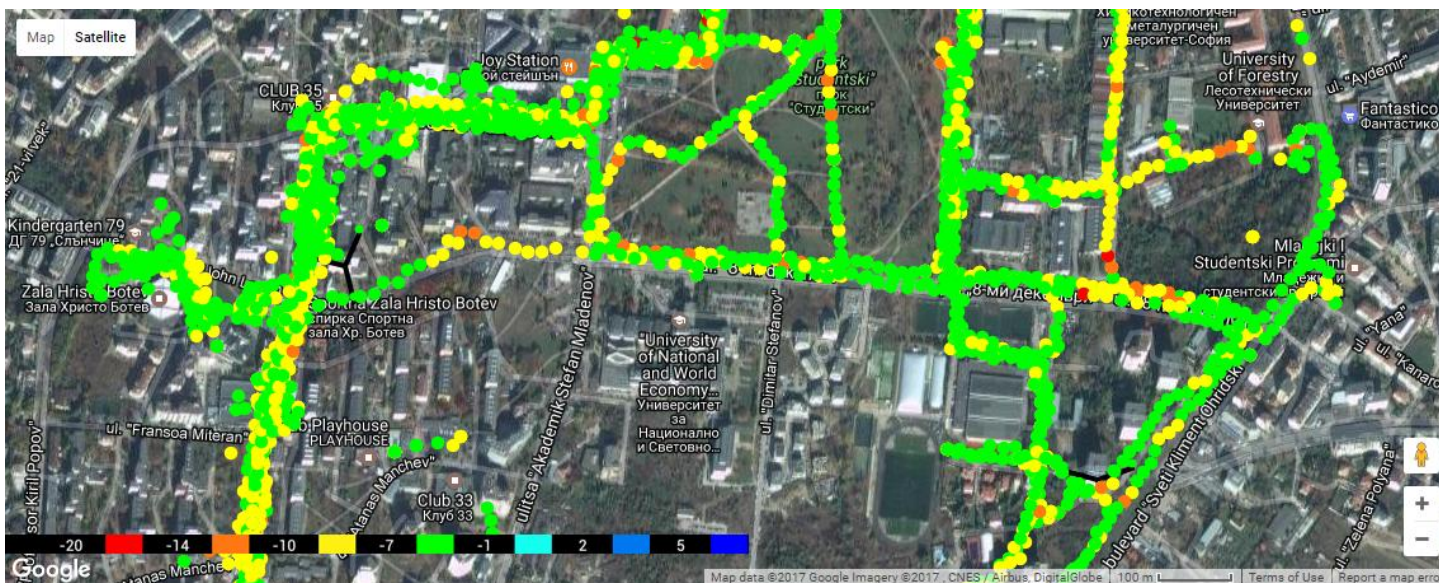
Фигура 11. Резултати от измерването на RSRP

На фиг. 11 са представени резултатите от измерването на RSRP в dBm [A7]. Както се вижда от фиг. 11 резултатите получени за RSRP са в диапазона от около -60 dBm (червен цвят) до около -100 dBm (тъмно син цвят). Стойността на RSRP е под -60 dBm в областта близо до базовите станции, където има наличие на пряка видимост (LOS) между eNodeB и UE, докато в ъглите на клетката тази стойност достига нива до -100 dBm, тъй като в тези точки няма наличие на пряка видимост (NLOS). Обикновено стойностите на RSRP са в диапазона от под -60 dBm до -90 dBm (зелен цвят), както може да се види от фиг. 11. Получените резултати за RSRP показват, че нивото на сигнала и респективно покритието на клетката, силно зависи от профила на терена и плътността на сградите. В областите характеризиращи се с наличието на широки булеварди и паркове, затихването на сигнала е по-слабо с увеличаване на разстоянието. Докато в области с хълмист терен и висока плътност на застрояване, затихването на сигнала е значително при отдалечаване от базовата станция.



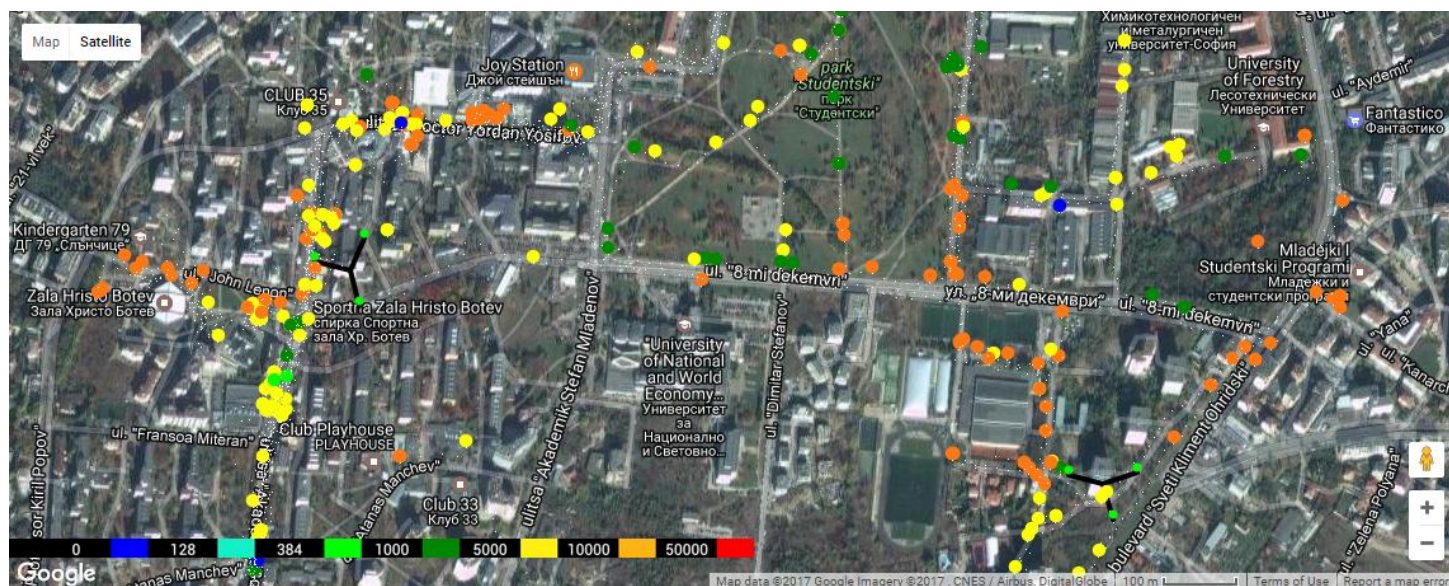
Фигура 12. Резултати от измерването RSSI

На фиг. 12 са представени резултатите от измерването на RSSI в dBm. Получените резултати са в диапазона от около -60 dBm (оранжев цвят) до около -80 dBm (зелен цвят). За разлика от стойностите получени за RSRP, резултатите за RSSI са с около 20 dBm по-високо ниво, поради факта, че в тяхната стойност са включени наличното ниво на интерференция и шум в измерваната честотна лента.



Фигура 13. Резултати от измерването на RSRQ

На фиг. 13 са представени резултатите от измерването на RSRQ в dB [A7]. Като измерените стойности за RSRQ са показател за качеството на канала в LTE downlink. По-голямата част от получените резултати за RSRQ са в диапазона от -10dB до -3dB, което показва ниското ниво на интерференция и шум в изследваната честотна лента.



Фигура 14. Резултати от измерването на Downlink test data rate

На фиг. 14 са представени резултати от проведеното измерване на скоростта на пренос на данни в downlink. Получените резултати основно са в диапазона от 50 000 kbps до 10 000 kbps и има малък брой точки, в които скоростта на пренос на данни има по-ниски стойности. Като се има предвид, че използваната честотна лента за downlink е 5 MHz и базовите станции имат 2 MIMO антени, резултатите получени за скоростта на пренос на данни са изключително високи.

Измерване на нивото на сигнала с Narda SRM 3006

За да бъде осъществено прецизно измерване на нивото на референтния сигнал в 4G LTE мрежата на Булсатком ЕАД е използвана специализирана измервателна апаратура - Narda Selective Radiation Meter (SRM) 3006 [17]. Narda SRM-3006 е компактна, честотно-селективна измервателна система за високочестотни електромагнитни полета, която работи в честотния обхват от 9 kHz до 6 GHz [17]. Това устройство има вграден GPS модул, който позволява автоматично записване на координатите в точките на измерване. Нивото на сигнала се измерва чрез три-аксиална антена, която осигурява изотропно приемане на сигналите в честотния обхват 420 MHz - 6 GHz [17]. Измервателният уред (Narda SRM-3006) е калибриран със свързаната към него приемна антена.

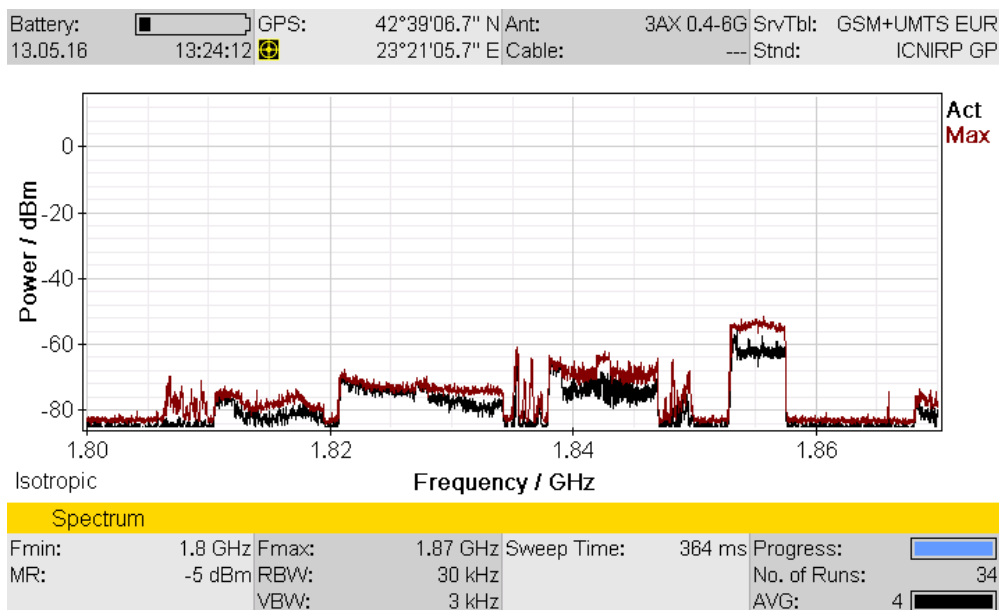
Narda SRM-3006 предоставя основно два различни метода за измерване на сигналите на LTE базовите станции, както и метод за екстраполация до максималното работно натоварване на мрежата. Двата основни метода, които измервателният уред предоставя за измерване на сигналите от LTE базовите станции са: спектрално измерване и код-селективно измерване (измерва се сигнала от клетка (сектор) с определен код - cell ID).

Code selective measurement

Narda SRM-3006 извършва декодирането и измерването на RS (мощност на ресурсен елемент, осреднена за всички записани RS елементи) след това се извеждат на дисплея като "RS 0" и "RS 1"(2 MIMO)

Проведените от нас измервания са в честотната лента 1852.7 - 1857.7 MHz, която се използва за излъчване в downlink канала в LTE мрежата на Булсатком ЕАД в Студентски град.

На фиг. 15 е представен спектъра на сигнала в честотната област 1.8 GHz – 1.87 GHz в района на измерването, както се вижда в тази честотна област електромагнитния спектър е плътно запълнен. Поради тази причина без използването на измервателния метод - code selective measurement, трудно може да се измери нивото на сигнала на конкретно изследвана базова станция от мрежата на Булсатком.



Фигура 15 Спектър на сигнала в честотната област 1.8 GHz – 1.87 GHz

На фиг. 16 е илюстриран LTE режима (code selective measurement) на Narda SRM-3006. Сигналите от различните базови станции се декодират и се разделят, тъй като всяка клетка има различно Cell ID. Измервателният уред позволява едновременно измерване на P-SS, S-SS и RS [18]. Вградения GPS модул осигурява също така записване на координати на точките на измерване, което позволява лесно да се определи разстоянието между базовата станция и точка на измерване. Информацията за всички измервания се записва във вътрешната паметта на уреда, след което се прехвърля на компютър и допълнително се обработва. За целите на изследването са използвани измерените стойности за RS Avg (осреднената мощност от двете антени).

Battery: 10.05.18
GPS: 11:43:25
42°38'50.5" N
23°21'13.0" E
Ant: 3AX 0.4-8G
Cable: ---
SrvTbl: GSM+UMTS EUR
Std: ICNIRP GP

Table View

Index	Cell ID	No. Ant	Act (PSS)	Act (SSS)	Act (RS Avg)	Act (RS Sum)
1	16	2	-78.60 dBm	-79.10 dBm	-83.47 dBm	-80.46 dBm
2	17	2	-77.26 dBm	-77.88 dBm	-79.88 dBm	-76.87 dBm
3	19	2	-86.98 dBm	-86.95 dBm	-92.03 dBm	-89.02 dBm
Total			-74.61 dBm	-75.14 dBm	-78.13 dBm	-75.12 dBm
Analog			-58.07 dBm			

Isotropic

LTE

Fcent: 1.855 2 GHz CBW: 5 MHz Sweep Time: 2.600 s Progress:

MR: -8 dBm Extr. Fact.: Off Noise Suppr.: Off No. of Runs: 4

Cell Sync.: Sync. CP Length: Normal AVG: 4

Фигура 16 LTE mode - code selective measurement

Измерването на нивото на референтния сигнал (RS Avg) в 4G LTE мрежата на Булсатком ЕАД за територията на Студентски град е извършено в голям брой различни точки (52 различни локации) с цел да бъдат отчетени характеристиките на изследвания район и тяхното влияние върху нивото на измерения референтен сигнал (респективно затихването). Във всяка една от точките, нивото на сигнала е измервано в продължение на 6 мин., за да се снее времевата зависимост на измерваната величина.

Оптимизация на моделите и статистическо описание на фединга

В Глава 4 е представена методика за обработка и анализа на получените експериментални данни за нивото на сигнала в 4G LTE мрежата на Булсатком ЕАД в София - района на Студентски град. Избрани са моделите log-distance, COST 231 Hata и Ericsson (описани в Глава 1) за изследване на затихването в района на Студентски град. От получените експериментални данни е изчислено затихването на сигнала и е определена експонентата на затихване. На базата на тези резултати е направена оптимизация на посочените три емпирични модела. От експерименталните данни е направена оценка за влиянието на голямомощабния и малкомощабния фединг върху нивото на приетия сигнал и е определена е фединговата в изследвания район.

Оптимизация на емпиричните модели на базата на експерименталните резултати

В [A8] е определено затихването на сигнала в изследвания район на София чрез използването на получените при измерването експерименталните данните.

За определяне на затихването, първо трябва да се изчисли мощността за излъчване на един ресурсен елемент (RE). Тази мощност се изчислява по следния начин [19]:

$$P_{tx_RE} = P_{tx} - 10 \log_{10}(12N_{RB}) \quad (\text{dBm}) \quad (18)$$

където P_{tx_RE} е мощността за излъчване на един RE в dBm, $P_{tx} = 46 \text{ dBm}$ е мощността на базовата станция (eNodeB) в dBm и N_{RB} е броя на ресурсните блокове. След това определяме затихването чрез следното уравнение:

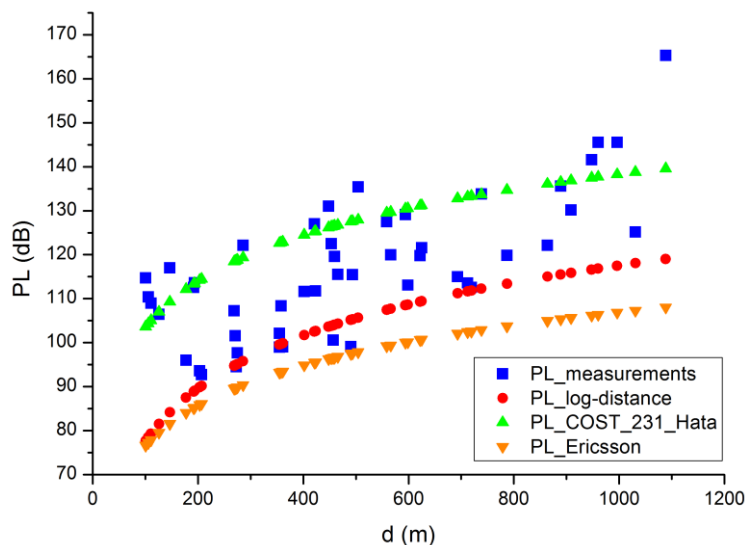
$$PL = P_{tx_RE} + G_{tx} + G_{rx} - P_{RS_measure} \quad (\text{dB}) \quad (19)$$

В горната формула P_{tx_RE} е мощността за излъчване на един RE, изчислена от уравнение (18) в dBm, $G_{tx} = 18 \text{ dBi}$ е усилването на антената на базовата станция (eNodeB) в dBi, G_{rx} е усилването на приемната антена в dBi и $P_{RS_measure}$ е приетата мощност на референтния сигнал измерена с Narda SRM-3006. В нашия случай приемаме, че G_{rx} е 0, защото измервателния уред Narda SRM-3006 е калибриран заедно с антената (в измерената стойност с този уред е отчетено усилването на приемната антена).

Използвайки гореописаната процедура са получени експериментални резултати за зависимостта на затихването (PL) от разстоянието (между базовата станция и точките на измерване) [A8].

На фиг. 17 е представено сравнение на експерименталните данни за затихването и резултатите получените с моделите log-distance, COST 231 Hata и Ericsson. При разстояния по-къси от 100 м и наличието на пряка видимост (LOS), затихването може да бъде изчислено по формулата на Фрииз. Затова резултатите за затихването са определени за разстояния по-големи от 100 м. При изчисляването на затихването в изследвания район посредством моделите log-distance, COST 231 Hata и Ericsson са взети предвид следни параметри – средна височина на антената на базовата станция $h_{bS} = 35 \text{ m}$ и височина на приемната антена (т.е. измервателния уред Narda) $h_{mS} = 1.5 \text{ m}$. Сравнението между резултатите от измерванията и тези, получени от емпиричните модели, показва, че прилагането на трите модела за определяне на затихването в изследваната област на София, може да доведе до получаването на неточни стойности на затихването. От фиг. 17 се вижда, че моделите Ericsson и log-distance дават по-ниски

стойности за затихването на сигнала, докато резултатите, получени с модела COST 231-Hata, са по-близки до стойностите на експерименталните данни в изследваната област [A8]. Това е причина да се направи оптимизация на теоретичните модели на базата на получените данни от измерването.



Фигура 17 Експериментални данни за затихването и резултати получени с трите модела

В таблица 7 (колона 2) са представени резултати за средно квадратичната грешка дължаща се на разликите между експерименталните данни и резултатите получени с теоретичните модели преди да бъдат оптимизирани. Тези резултати показват, че е необходимо използваните модели да се оптимизират, за да бъде адекватно тяхното приложение за предвиждане на затихването в района на Студентски град [A8].

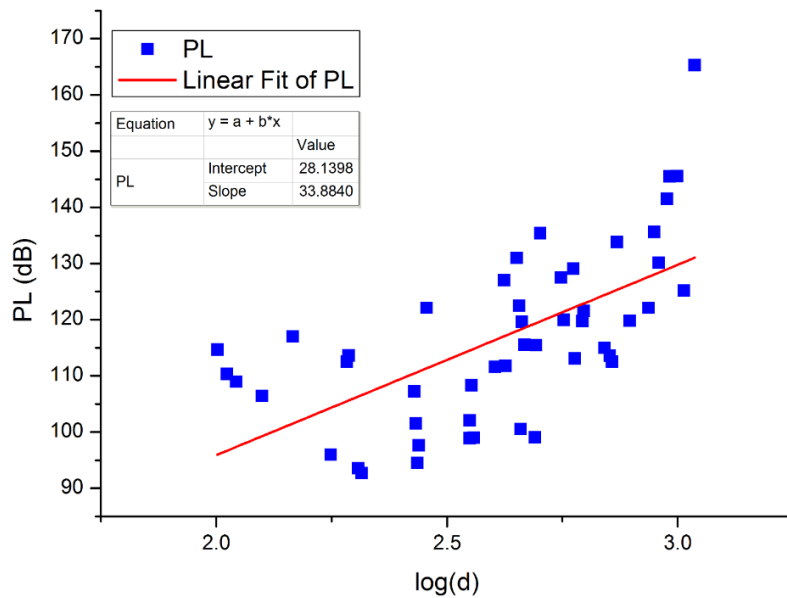
Модел	RMSE преди оптимизация [dB]	RMSE след оптимизация [dB]
Ericsson	24.6	11.8
log-distance	18.8	11.8
COST-231 Hata	14.3	11.8

Таблица 7 Средно квадратична грешка преди и след оптимизацията на моделите

Поради факта, че всеки от моделите включват различни коефициенти, отчитащи зависимостта на затихването от разстоянието е необходими те да се прецизират съобразно изследвания район. Важно е да се отбележи, че тези коефициенти са определени при отчитането на основните характеристики на района, в който е разработен всеки от моделите. С цел подобряване на точността на селектираните модели за предвиждане на затихването на сигнала в LTE мрежа в изследваната област на София, тези коефициенти са преизчислени и коригирани в процеса на оптимизация.

Основните стъпки, които включва процеса на оптимизация на моделите са определяне на експонентата на затихване (зависимостта на затихването от разстоянието) и изчисляване на затихването на сигнала за фиксирано разстояние d_0 .

На фиг. 18 в логаритмичен мащаб са представени експериментално получените резултати за затихването на сигнала (PL) в dB, като функция на разстоянието $\log_{10} d$, като d е в m.

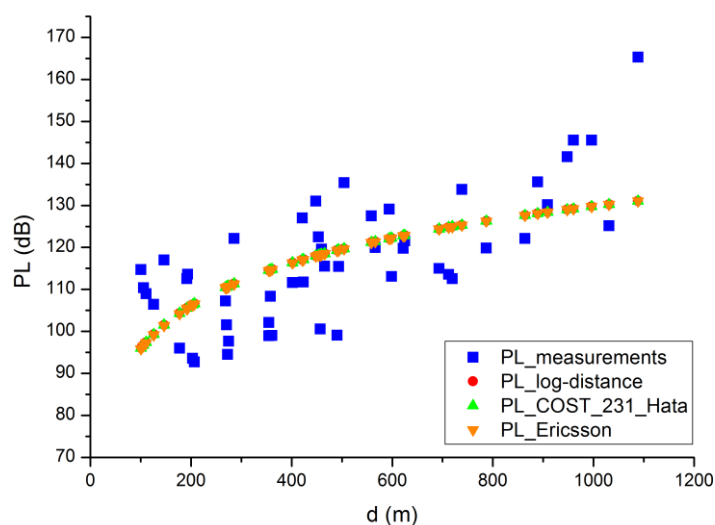


Фигура 18 Зависимостта на експерименталните данни за затихването (PL) от разстоянието между eNodeB и точката на измерване

Представените резултати на фиг. 18 дават възможността да се определи точната зависимост на затихването от разстоянието, поради факта, че PL в dB е линейна функция на $\log_{10} d$, която има вида:

$$PL = a + b * \log_{10} d \quad (20)$$

където a и b са реални коефициенти. Чрез прилагане на метода на най-малките квадрати определяме наклона ($b \approx 33.88$) на линейната зависимост на PL (dB) от $\log_{10} d$. Наклонът на тази линейна зависимост представлява физична величина, която е мярка за експонента на затихване в изследваната област [A8]. Следователно стойността на експонентата на затихването в изследваната част от София е 3.38, като получената стойност е между 2 (свободно пространство) и 4 (многолъчево разпространение – липса на пряка видимост). От друга страна получената стойност от пресечната точка с ордината на линейната зависимост на PL (dB) от $\log_{10} d$, определя началната стойността на затихването, като тази стойност също трябва да се вземе предвид при оптимизиране на моделите. От получената линейната зависимост на PL (dB) от $\log_{10} d$ може да се определи затихването при фиксирано разстояние $d_0 = 100 \text{ m}$.



Фигура 19 Сравнение на оптимизираните модели и експерименталните данни

На фиг. 19 са представени резултатите за затихването на сигнала получени с оптимизираните модели, както се вижда и трите оптимизирани модели описват коректно зависимостта на затихването от разстоянието. Процеса на оптимизация на модели води до значително намаляване на средно квадратичната грешка отчитаща разликите между експериментално и теоретично получените резултати за затихването на сигнала (виж таблица 7, колона 3) [A8].

Следва да отбележим, че след процеса на оптимизация коефициентите отчитащи влиянието на средата на разпространение при моделите ще се променят по следния начин [A8]:

1. Оптимизирания Log-distance модел ще има следния вид:

$$PL = 95.908 + 33.884 \log_{10} \left(\frac{d}{100} \right) \quad (\text{dB}) \quad (21)$$

2. Оптимизирания COST-231-Nata модел ще има вида:

$$PL = 37.78 + 33.9 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(h_t) - \alpha(h_r) + \\ + (44 - 6.55 \log_{10}(h_t)) \log_{10} d + c_m \quad (\text{dB}) \quad (22)$$

3. При оптимизирания Ericsson модел коефициентите за градска среда ще бъдат $a_0 = 59.11$ и $a_1 = 33.884$.

Прилагането на оптимизирате модели ще осигури коректни резултати за средното затихване на сигнала в изследвания район на София. Анализът на получените резултати след оптимизацията на моделите показва, че средно квадратичната грешка намалява значително, като това води до повишаване на точността на тези модели при определяне на затихването в изследваната област на София.

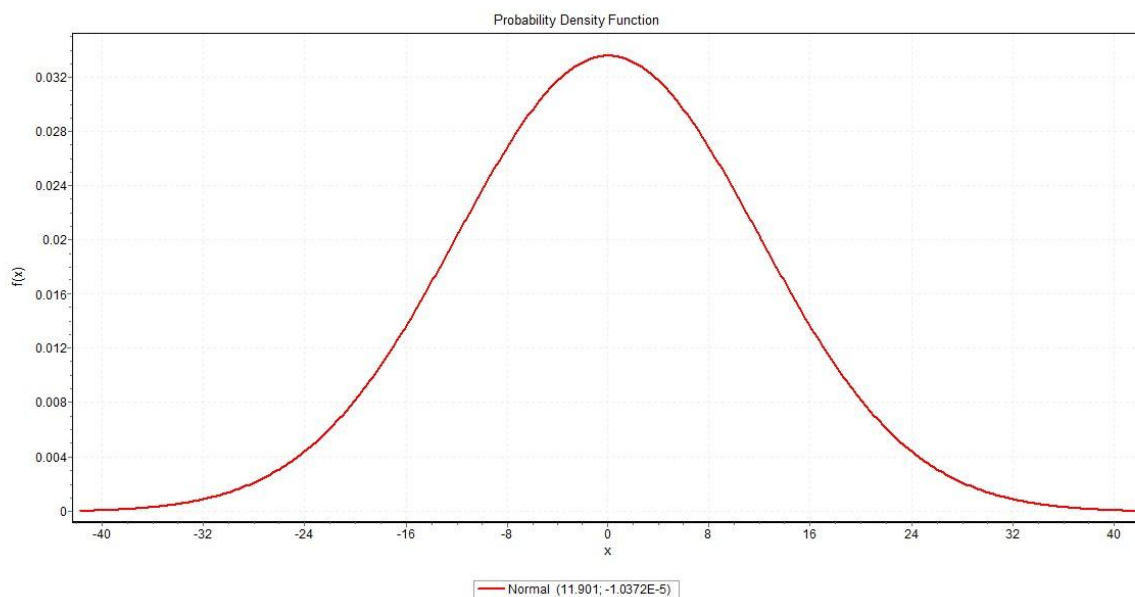
Оценка на влиянието на фединга в изследваната област и определяне на фединговата граница

При определяне на енергийния бюджет на клетката, както и зоната и на покритие е необходимо да се направи точна оценка на затихването. Също така е важно да се отчете влиянието на голямомощабния и малкомощабния фединг в изследваната област. Получените резултати за измерването ниво на сигнала в 4G LTE мрежата на Булсатком ЕАД, дават възможност да бъде определено влиянието на голямомощабния и малкомощабния фединг в изследвания район.

Отчитайки факта, че измереното ниво на приетия сигнал е случайна величина зависеща от голям брой фактори, съгласно централната гранична теорема следва, че и затихването на сигнала ще има случаен характер с Гаусово разпределение, тъй като затихването е функция на приетата мощност. От представените експериментални резултати за затихването на фиг. 4.2 можем да определим отклоненията на затихването в отделните точки на измерване от определената линейната зависимост на затихването от разстоянието.

На фиг. 20 е показано разпределението на отклоненията на затихването (PL) в отделните точки на измерване от получената линейна зависимост за затихването от разстоянието (фиг. 18). Полученото разпределение се характеризира със средна стойност $\mu = -1 \cdot 10^{-5} \text{ dB}$ (на практика 0) и дисперсия $\sigma = 11.9 \text{ dB}$. Дисперсията $\sigma = 11.9 \text{ dB}$ определя отклонението на резултатите за затихването от линейната зависимост, като тези отклонения се дължат на голямомощабния фединг. Забелязваме, че получената стойност за голямомощабния фединг ($\sigma = 11.9 \text{ dB}$) е висока, което е показател, че в изследваната област от София ефектът на засенчване е силен и трябва да се вземе предвид при определяне на енергийния бюджет на клетката. Този силен ефект на засенчване се дължи на големия брой обекти с размери

значително по-големи от дължината на вълната (наличието на големи обществени сгради и високи жилищни блокове в Студентски град).



Фигура 20 Разпределение на отклоненията на затихването

Влиянието на малкомащабния фединг е съществено при определяне на енергийния бюджет на клетките и съответно техния радиус, тъй като определя стойността на фединговата граница (fading margin - M). За да определим фединговата граница, първо трябва да се определи вида на разпределението на обвивката на приетия сигнал, и след това от него съответната федингова граница. Отчитайки факта, че експонентата на затихване в район на Студентски град е 3.38 (наличие и на директен лъч), както е показано в [A8], за описание на обвивката на приетия сигнал най-подходящо да се използва разпределението на Ричи. Отношението на мощността на сигнала дължаща се на LOS и NLOS се изразява чрез К-фактора на разпределението на Ричи (Rician K-Factor). К-факторът в dB се дава чрез следния израз:

$$K = 10 \log_{10} \frac{s^2}{2\sigma^2} \quad (\text{dB}) \quad (23)$$

Както $\frac{s^2}{2}$ се явява силата на сигнала на директния лъч (LOS), а σ^2 е силата на случайния сигнал при многолъчево разпространение (NLOS).

Изчисляването на К-фактора може да бъде използвано за определяне на силата на сигнала (SIR), BER (bit error rate), капацитет на канала и фединговата граница (M). Функцията на разпределение на плътността на вероятността (PDF) на обвивката на случайния сигнал при разпределението на Ричи може да се изрази, като функцията К-фактора:

$$PDF_{RICE}(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} e^{-K} I_0\left(\frac{r}{\sigma} \sqrt{2K}\right) \quad (24)$$

За интегралната вероятност (CDF) се получава:

$$CDF_{RICE}(r) = 1 - Q\left(\sqrt{2K}, \frac{r\sqrt{2}}{\sigma}\right) \quad (25)$$

Където Q(a, b) е Marcum's Q function, като a и b са положителни реални числа.

Стандартната Marcum Q-Function се дефинира по следния начин [20]:

$$Q(a, b) = \int_b^{\infty} x \exp\left(-\frac{x^2 + a^2}{2}\right) I_0(ax) dx \quad (26)$$

Където I_0 е модифицираната функция на Бесел от нулев порядък.

Метод на моментите

В дисертацията е използван метода на моментите [21], който позволява К-фактора да бъде определен от експерименталните данни. При наличието на случаен сигнал, чийто обвивка се описва с разпределението на Ричи от експериментално измерените данни могат да изчислят неговите централни моменти. При метода на моментите, К-фактора е точна функция на моментите на разпределението на обвивката на сигнала, изчислени от времевата зависимост на експерименталните данни (измерената мощност, като функция на времето).

Метода на моментите е представен в [21] и [22], където К-фактора може да бъде определен чрез използването на два момента, които се изчисляват от експериментално получените данни за приетата мощност, като функция на времето.

Сложния характер на приетия сигнал, вариращ с времето може да бъде представен по следния начин [22]:

$$g(t) = V + v(t) \quad (27)$$

Където V е фиксирана комплексна амплитуда и $v(t)$ отчита времевата зависимост на приетия сигнал (случайните колебания във времето). $v(t)$ е случайна величина, зависеща от много фактори с нулева средна стойност и дисперсия σ^2 . Важно е да се отбележи, че както V така и σ^2 може да се променят от един времеви-честотен сегмент към друг.

Действително измерената приета мощност, подходящо нормализирана, дава моментната мощност [22]:

$$G(t) = [g(t)]^2 \quad (28)$$

К-факторът може да бъде определен чрез използването на два момента, които се изчисляват от данните за $G(t)$. Първият момент G_m е средната стойност на мощността [22]:

$$G_m = \sum_{i=1}^N \frac{G_i}{N} \quad (29)$$

където N е броя на измерените стойности, а G_i е всяка конкретна стойност.

Точната стойност на G_m (различна от изчислената от краен брой данни) е показана в [21] и има вида:

$$G_m = |V|^2 + \sigma^2 \quad (30)$$

Втория момент G_v е средно квадратичното отклонение на G от G_m [22]:

$$G_v = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (G_i - G_m)^2} \quad (31)$$

Точната стойност на момента G_v (различна от изчислената от краен брой данни) е показана в [21] и има вида:

$$G_v = \sqrt{\sigma^4 + 2|V|^2\sigma^2} \quad (32)$$

Използвайки уравнения (30) и (32) можем да намерим $|V|^2$ и σ^2 , тъй като моментите G_m и G_v могат да бъдат определени от експерименталните данни. Получаваме система от две уравнение, съдържащи две неизвестни величини. Следователно за $|V|^2$ и σ^2 получаваме [22]:

$$|V|^2 = \sqrt{G_m^2 - G_v^2} \quad (33)$$

$$\sigma^2 = G_m - \sqrt{G_m^2 - G_v^2} \quad (34)$$

Накрая за К-фактора се получава [22]:

$$K = \frac{|V|^2}{\sigma^2} \quad (35)$$

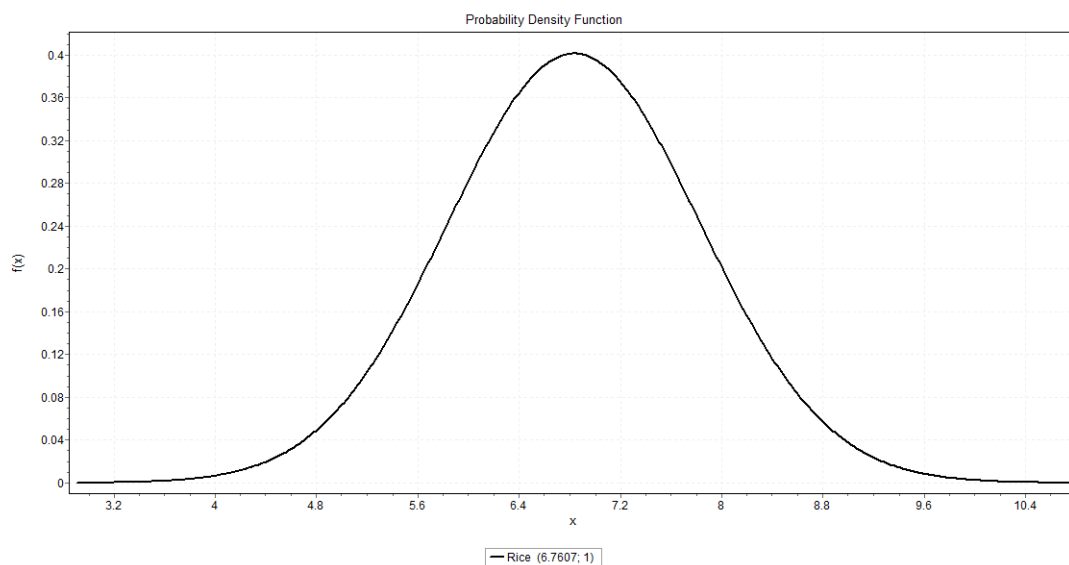
След като сме изчислили K и G_m , чрез тях може да се определи разпределението на Ричи (Rician PDF).

Тъй като К-факторът беше въведен чрез $\frac{s^2}{2}$ и σ^2 , ще приемем следното означение:

$$|V|^2 = \frac{s^2}{2} \quad (36)$$

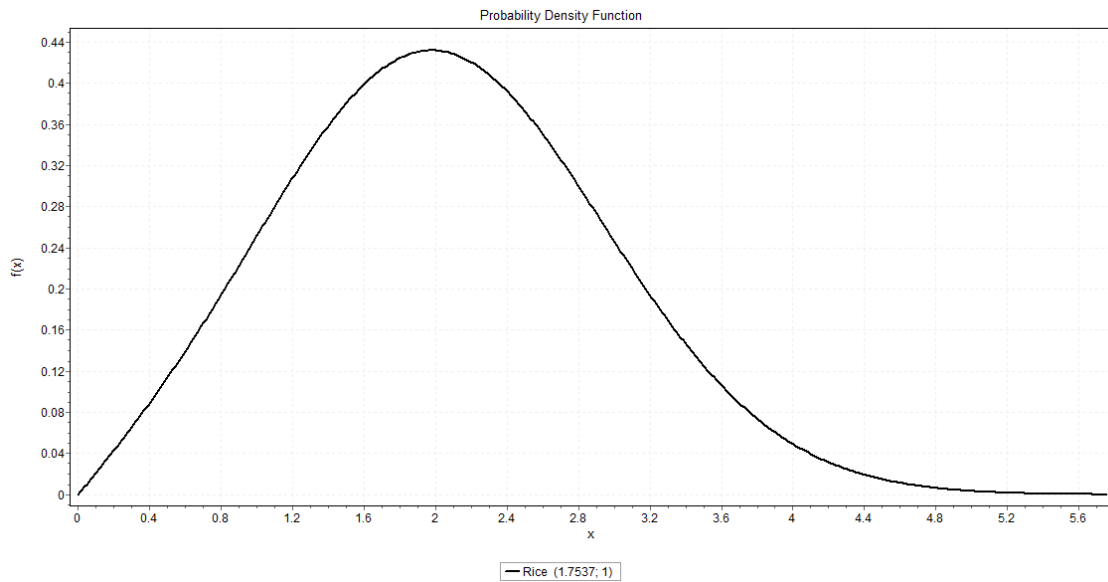
Получените експериментални данни за нивото на приетата мощност във всяка различна точка от измерванията са използвани за определяне на К-фактора. Подробно описание на експеримента е представено в Глава 3 на дисертацията. Във всяка точка на измерване, нивото на сигнала (мощността) е измервано за период от 6 мин. с цел да се снее времевата зависимост и да се определи средната стойност. От представените в резултати за К – фактора в дисертацията (таблица 4.2) е установено, че с увеличаване на разстоянието (отдалечаване от базовата станция) К намалява. При увеличаване на разстоянието влиянието на директния лъч намалява в сравнение с нарастващото влияние на многолъчевото разпространение. С цел да се онагледят разпределенията на обвивката на сигнала (приетата мощност) ще бъде представено неговото разпределение в три характерни точки от изследваната област (близо до базовата станция, в среда на клетката и в ъглите на клетката).

На фиг. 21 е представено нормираното разпределение на обвивката на сигнала (мощността) на разстояние $d = 202.89$ m. Поради факта, че тази точка на измерване се намира близо до базовата станция, се наблюдава наличието на доминиращ директен лъч. В този случай стойността на К е голяма - 22.85 (мощността на сигнала от директния лъч е повече от 22 пъти по-голяма от тази на отразените и дифрактирани сигнали) и разпределението е близко до Гаусово.



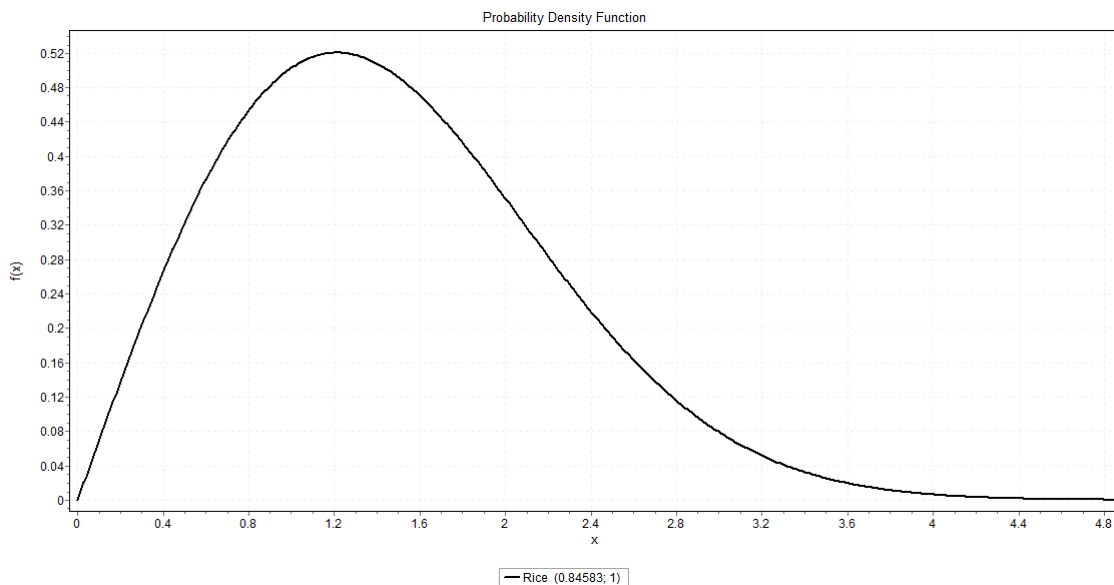
Фигура. 21 Разпределение на плътността на вероятността на обвивката на сигнала на разстояние $d=202.89$ m

На фиг. 22 е представено нормираното разпределение на обвивката на сигнала (мощността) при разстояние $d = 503.85$ m. Забелязва се, че с отдалечаване от базовата станция влиянието многолъчевото разпространение се засилва и съответно стойността на К-фактора намалява значително ($K = 1.54$). Тук разпределението на обвивката на сигнала се описва с разпределението на Ричи.



Фигура 22. Разпределение на плътността на вероятността на обвивката на сигнала на разстояние $d=503.85\text{ m}$

На фиг. 23 е представено нормираното разпределение на обвивката на сигнала (мощността) в ъглите на клетката при разстояние $d = 1088.27\text{ m}$. При значително отдалечаване от базовата станция наблюдаваме липса на пряка видимост (липса или много малка стойност на директния лъч), като приетата мощност главно се формира от сигналите дължащи се на многолъчевото разпространение. В този случай K е по-малко от 1 ($K = 0.36$) и разпределението на обвивката на сигнала (мощността) е близко до Релей.



Фигура 23. Разпределение на плътността на вероятността на обвивката на сигнала на разстояние $d=1088.27\text{ m}$

Получените резултати за K -фактора дават възможност да се определи влиянието на малкомащабния фединг (small scale fading), като изчислим фединговата граница (fading margin) за всяка различна точка от измерването.

Процеса за определяне на фединговата граница включва изчисляването на интегралната вероятност за разпределението на Ричи [23]:

$$P(r < r_{min}) = \int_0^{r_{min}} \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} e^{-K} I_0\left(\frac{r}{\sigma} \sqrt{2K}\right) dr, \quad (37)$$

където $0 \leq r_{min} < \infty$.

За определяне на интегралната вероятност (CDF) $P(r < r_{min})$ се използва формула (25), следователно имаме:

$$P(r < r_{min}) = 1 - Q_M(\sqrt{2K}, \frac{r_{min}}{\sigma}) \quad (38)$$

Изчисляването на интегралната вероятност дава възможност да се определи вероятността за прекъсване:

$$P(r < r_{min}) = P_{outage} \quad (39)$$

Стойността на фединговата граница, като функция на К-фактора се дава посредством уравнението [24]:

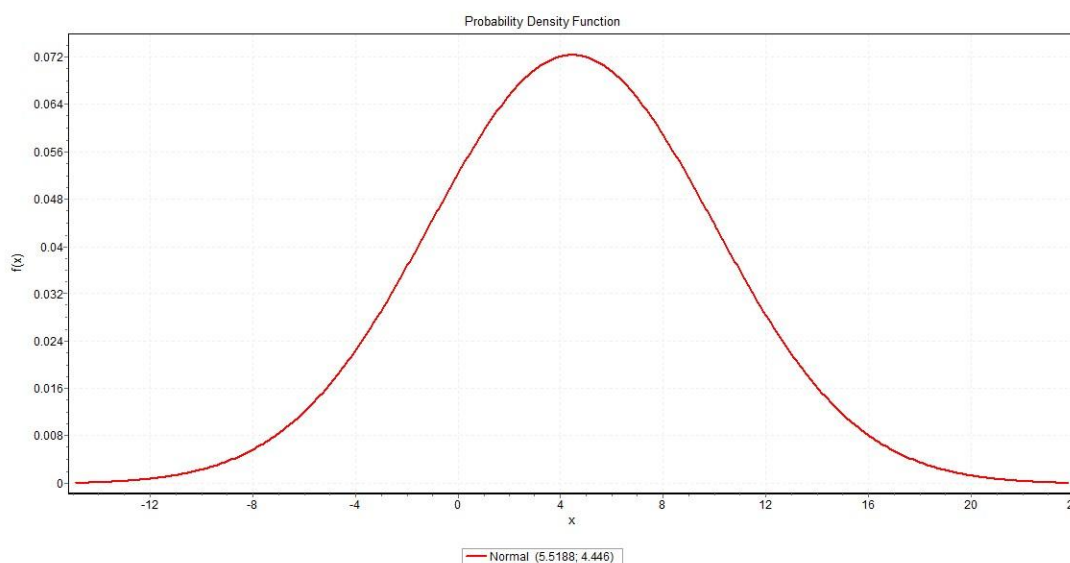
$$M = \frac{2\sigma^2(1+K)}{r_{min}^2} \quad (40)$$

При изчисляване на фединговата граница се приема, че вероятността за прекъсване не трябва да е повече от 5 % ($P_{outage} = 5\%$).

От получените резултати за фединговата граница представени в дисертацията (таблица 4.3) е установено, че при наличието на пряка видимост (доминиращ директен лъч - съответно голям К-фактор) стойността на фединговата граница е ниска, като в тези точки от измерванията влиянието на малкомащабния фединг е малко. Когато имаме доминиращия сигнал се дължи на многолъчево разпространение (малък К-фактор) стойността на фединговата граница се увеличава. В тези точки от измерванията се отчита по-голямо влияние на малкомащабния фединг върху нивото на приетия сигнал. (имаме множество сигнали пристигащи по различни пътища, с различно време на закъснение и различно затихване дължащо се на отражение, интерференция, дифракция и разсейване).

Тъй като К-фактора е случайна величина зависи от голям брой фактори. От централната гранична теорема следва, че фединговата граница също ще има случаен характер.

На фиг. 24 е представено разпределението на фединговата граница.



Фигура. 24 Разпределение на фединговата граница

За да се определи стойността на фединговата граница в изследваната областна на София, която е ключов компонент в енергийния бюджет на клетката се използва математическото очакване на фединговата граница. Следователно получаваме:

$$M(investigated_area) = 10 \log_{10} \bar{M} = 10 \log_{10} 4.446 = 6.48 (dB) \quad (41)$$

Получената стойност за фединговата граница, трябва се включи при определяне на енергийния бюджет при разгръщането на нови клетки в области с близки характеристики до изследвания район на София - Студентски град.

Заклучение

В дисертацията са разгледани емпирични модели, които намират приложение при определяне на затихването в 4G LTE мрежи. От разгледаните модели са избрани тези, които отчитат характеристиките на изследваните райони в София и са подходящи за определяне на затихването в 4G LTE мрежа. В тях е отчетено влиянието на височините на предавателната и приемна антени, честотната област на сигнала, средно разстояние между сградите, средна височина на сградите, средна ширина на улиците и други фактори характеризиращи средата на разпространение. От получените резултати в дисертацията може да се заключи, че с нарастване на височина на предавателната антена силно намалява затихването на сигнала, докато при увеличаване на височината на приемната антена намаляването на затихването в застроена градска среда е значително по-малко.

В застроена градска среда е изследвано затихването на сигнала в 4G LTE мрежа посредством прилагането на емпирични модели, като е направен сравнителен анализ за честотните обхвати 1.8 GHz, 2.6 GHz и 3.5 GHz. При използването на по-ниските честотни обхвати (1.8 GHz), радиуса на клетката е по-голям и съответно зоната на покритие. Използването на по-високи честотни обхвати (3.5 GHz) радиуса на клетката намалява, както и зоната на покритие. Следователно, необходимия брой базови станции, осигуряващи покритие в избрана област на София ще се увеличи значително при избор на носеща честота 3.5 GHz. Тези резултати показват, че е препоръчително телекомуникационните оператори в България да използват по-ниските обхвати за осигуряване на покритие в рядко населени области, като използват по-високите носещи честоти за повишаване на капацитета на мрежата в гъсто населените градски райони.

В дисертацията е изследвано и затихването на сигнала на 4G LTE мрежа в офис среда. Резултатите от извършените симулации, дават възможност за предварително определяне на необходимия брой фемто-клетки и тяхното разположение в сградата при разгръщането на 4G LTE мрежа в конкретната офис среда. От тези резултати може да се заключи, че е необходим предварителен анализ на затихването в сградата, за да се определи броят на клетките, осигуряващи необходимото ниво на сигнала за постигане на високоскоростен трансфер на данни.

Направена е и оценка на влиянието на броя на MIMO антените върху скоростта за пренос на данни в 4G LTE мрежа. Резултатите показват, че при използването на 4×4 MIMO антенна система и 10 MHz честотна лента на оператора, може да се постигне скорост за пренос на данни от 270 Mbps в downlink.

Експериментално е измерено нивото и качеството на приетия сигнал в 4G LTE мрежата на Булсатком ЕАД. Резултатите от измерванията, реализирани чрез използването на мобилно устройство и специализиран софтуер, дават възможност за бърза и лесна оценка на покритието и скоростта за пренос на данни в изследваната част от LTE мрежата в София.

Използвана е специализирана измервателната апаратура, имаща режим за измерване на LTE сигнали (code selective measurement), с която е измерено нивото на сигнала излъчен от базовите станции в изследваната област. Направените прецизни измервания на нивото на референтния сигнал са използвани за определяне на затихването на сигнала и за оптимизиране на емпиричните модели за предвиждане на затихването.

Разработена е методика за обработка и анализ на експерименталните данни, която позволява оптимизиране на селектираните емпирични модели. Направено е сравнение на резултатите за затихването получено с моделите преди и след оптимизация. Показана ефективността на процеса на оптимизация, изразяващ се в намаляване на средно квадратичната грешка. Представена е методика за анализ на голямомасщабния и малкомасщабния фединг в изследваната област. От експериментално получените резултати са определени експонентата на затихване, влиянието на голямомасщабния и малкомасщабния

фадинг върху нивото на приетия сигнал и стойността на фадингвата граница за изследвания район от София. За успешно проектиране и разгръщане на нови клетки в район с близки параметри на изследвания, трябва да бъде използван оптимизиран модел, даващ правилни стойности на затихването в тази област. Определени са стойностите на дисперсията на голямомощабния фадинг и локалната и осреднена фадингва граница в изследвания район, които трябва да се отчитат при определяне радиуса на клетките.

Основни приноси на дисертационния труд

1. На основата на емпирични модели приложими за определяне на затихването в 4G LTE мрежи е осъществена числена симулация на затихването на сигнала при параметрите на мобилната радиосреда в София, като са получени зависимостите на затихването от разстоянието, височината на приемната и предавателната антени и честотата.
2. Определен е максималният радиуса на клетката в и зоната на покритие в 4G LTE мрежа в изследван район на София, оценени са перспективите за използване на по-високочестотни обхвати за изграждане на LTE мрежи чрез прилагането на емпирични модели. Оценено е влиянието на броя на MIMO антените и различните видове модулация върху максималната скорост за пренос на данни.
3. Разработена е методика за измерване на нивото и качеството на приетия сигнал в LTE мрежа, позволяваща експериментално определяне на затихването на сигнала.
4. Оптимизирани са избрани емпирични модели, на базата на получените експериментални резултати, които правилно предвиждат затихването на сигнала в изследвания район.
5. Определено е влиянието на голямомащабния фединг върху нивото на сигнала, като е получена оценка за неговата дисперсия.
6. Определено е влиянието на малкомащабния фединг върху на сигнала, като са определени K-фактора на разпределението на Ричи за обвивката на приетия сигнал и е определена локалната и осреднена федингова граница, необходими за изчисляване на енергийния бюджет на клетките.

Публикации по темата на дисертацията

- [A1] Philip Atanasov and Zhivko Kiss'ovski, „Investigations of the signal path loss in 4G LTE network”, *Bulgarian Journal of Physics*, vol.40, no.3, 2013, pp. 265-268
- [A2] Филип Атанасов и Живко Кисъовски, „Изследване на затихването на сигналите в 4G LTE безжична комуникационна мрежа”, Национална конференция с международно участие „Телеком 2013”, 17 - 18 октомври, 2013 г., София, България
- [A3] Филип Атанасов и Живко Кисъовски, „Моделиране на разпространението на сигнали на 1.8 GHz, 2.6 GHz и 3.5 GHz в 4G LTE мрежа”, Национална конференция с международно участие „Електроника 2014”, 15 май, 2014 г., София, България
- [A4] Philip Atanasov and Zhivko Kiss'ovski, „Prediction of the Cell Radius of LTE Network”, *Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sciences*, 2016, vol. 69, no. 12, pp. 1631-1640
- [A5] Филип Атанасов и Живко Кисъовски, „Определяне на затихването в офис среда за 4G LTE мрежа на 1.8 GHz”, Национална конференция с международно участие „Телеком 2014”, 23 - 24 октомври, 2014 г., София, България
- [A6] Philip Atanasov and Zhivko Kiss'ovski, „Estimation of throughput in LTE network, depending on MIMO antenna systems”, National Conference with International Participation „Telecom 2015”, 15 - 16 October, 2015, Sofia, Bulgaria
- [A7] Philip Atanasov and Zhivko Kiss'ovski, „Measurement of the reference signal in 4G LTE network in Sofia”, National Conference with International Participation „Telecom 2016”, 27 - 28 October, 2016, Sofia, Bulgaria
- [A8] Philip Atanasov and Zhivko Kiss'ovski, „Optimization of Path Loss Models Based on Signal Level Measurements in 4G LTE Network in Sofia”, *Bulgarian Journal of Physics*, vol.44, no.2, 2017, pp. 145-154

Списък със забелязаните независими цитирания на публикациите

Публикация [A1] е цитирана 2 пъти

¹Sharma, Purnima K., et al. "Comparative analysis of propagation models in LTE networks with spline interpolation." *Communication Control and Intelligent Systems (CCIS), 2016 2nd International Conference on*. IEEE, 2016.

²Sharma, Purnima K., Dinesh Sharma, and Akanksha Gupta. "Cell Coverage Area and Link Budget Calculations in LTE System." *Indian Journal of Science and Technology* 9.S1 (2016).

Литература

- [1] de la Roche G., A. A. Glazunov, B. Allen (2013) LTE-Advanced and Next Generation Wireless Networks- Channel Modelling and Propagation, John Wiley & Sons Ltd.
- [2] RAPPAPORT T. S. *Wireless Communications: Principles and Practice*. 2nd ed. Prentice Hall, 2002.
- [3] COST Action 231. Digital Mobile Radio Towards Future Generation Systems. COST 231 group Final Report, European Communities, EUR 18957, 1999.
- [4] Milanovic J., S. Rimac-Drlje, K. Bejuk (2007) Comparison of propagation model accuracy for WiMAX on 3.5 GHz, In: Proc. 14th IEEE Int. Conf. Electronic Circuits and Systems, Morocco, 111–114.
- [5] <http://www.cept.org/files/1050/documents/winner2%20-%20final%20report.pdf>
- [6] V. Erceg et al, *Channel Models for Fixed Wireless Applications, IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group*, 2001.
- [7] Recommendation ITU-R P.1411-7, 09.2013.
- [8] Noman Shabbir, Muhammad T. Sadiq, Hasnain Kashif, Rizwan Ullah, *Comparison of radio propagation models for Long Term Evolution (LTE) Network*, International Journal of Next-Generation Networks (IJNGN) Vol.3, No.3, September 2011
- [9] Fujii, T. (2003) Path-loss prediction formula in mobile communication -an expansion of “SAKAGAMI” path-loss prediction formula-. Trans. IEICE, Japan, J86-B, 10, p. 2264-2267.
- [10] Michel Daoud Yacoub, *Foundations of Mobile Radio Engineering*, CRC Press, 1993.
- [11] Heyde, CC. (1963), "On a property of the lognormal distribution", *Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological)*, **25** (2): 392–393.
- [12] K. K. Talukdar and W. D. Lawing, .Estimation of the parameters of the Rice distribution,. *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 89, pp. 1193.1197, 1991.
- [13] SKLAR, B. Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems, Part I: Characterization. *IEEE Communications Magazine*, 1997, vol. 35, no. 7, p. 90 - 100.
- [14] S. Sesia, I. Toufik, and M. Baker, *LTE- The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*, Chichester, U.K. Wiley, 2009.
- [15] 3GPP TS 36.214 version 11.1.0 Release 11 , *LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer; Measurements*. Available: <http://www.etsi.org>, 2013.
- [16] Dr. Wes McCoy, *Overview of the 3GPP Long Term Evolution Physical Layer*, Technical Editor, 07/2007.
- [17] NARDA, [Datashet SRM-3006](https://www.narda-sts.com/en/selective-emf/srm-3006/), [Online] Available at: <https://www.narda-sts.com/en/selective-emf/srm-3006/>
- [18] NARDA, LTE Principles, [Online] Available at: <https://www.narda-sts.com/en/selective-emf/srm-3006/>
- [19] NARDA, LTE Measurement and Methods, [Online] Available at: <https://www.narda-sts.com/en/selective-emf/srm-3006/>
- [20] Marcum, J. I. (1950), Table of Q functions. Rand Corp., Santa Monica, CA. U.S.A.F. Project RAND Research Memorandum M-339.

- [21] L. J. Greenstein, D. G. Michelson, and V. Erceg, "Moment-method estimation of the Ricean K -factor," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 3, no. 6, pp. 175–176, Jun. 1999
- [22] L. J. Greenstein, S. Ghassemzadeh, V. Erceg, and D. G. Michelson, "Ricean K -factors in narrow-band fixed wireless channels: Theory, experiments, and statistical models," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 8, pp. 4000–4012, October 2009
- [23] A. F. Molisch, *Wireless Communications*, 2nd ed. IEEE Press - Wiley, 2011.
- [24] A. F. Molisch and F. Tufvesson, *Handbook of Signal Processing for Wireless Communications*. CRC, 2004

Благодарности

Искам да изразя дълбоката си благодарност и признателност към майка ми Розиана Атанасова и баща ми Асен Атанасов, които винаги са били до мен и са ме подкрепяли в начинанията ми.

Бих искал да изкажа благодарности на научният си ръководител доц. д-р Живко Кисьовски за ценните съвети и отделеното внимание по време на работата върху дисертацията.

Изказвам специални благодарности към семейството и приятелите ми за оказаната подкрепа.

Изказвам своите благодарности към Булсатком ЕАД за сътрудничеството и възможността да извърша измервания във високоскоростната им 4G LTE мрежа в София.

Специални благодарности изказвам към Кабитс ООД - официален представител на Narda за България, за предоставената специализирана измервателна апаратура за осъществяване на част от експериментите.

Acknowledgments

I wish to express my thanks to Bulsatcom for cooperation and the opportunity to carry out measurements in their high-speed 4G LTE network in Bulgaria. In the activities concerning my measurements, I had supported by: Narda STS - Germany; WILLTRON Technologies GmbH - Austria; Kabits Ltd. - official local representative of Narda in Bulgaria.