

LTE Сүлжээний Суурь Платформын Симуляцийн Программ Хангамж, Түүний Үр Дүн

Б.Отгонбаяр¹, О.Тулга², Ө.Буянхишиг³

¹ШУТИС-МХТС Утасгүй холбооны салбарын тэргүүлэх профессор,

²ШУТИС-МХТС Эрдэм шинжилгээ, инновацийн албаны мэргэжилтэн

³ШУТИС-МХТС Утасгүй холбооны салбарын багш,

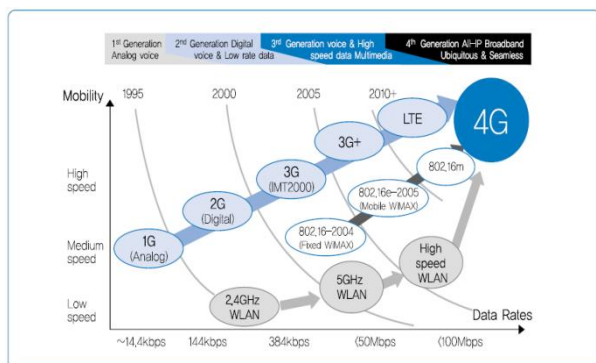
otgonbayar@sict.edu.mn, tulga@sict.edu.mn, buyankhishig@sict.edu.mn

Хураангуй - Энэхүү илтэглд утасгүй хөдөлгөөнт өргөн зурвасын дараа үеийн дэвшилтэт технологи болох LTE(Long Term Evolution) сүлжээний суурь платформыг виртуаль орчинд загварчилах, түүний програм хангамжийг боловсруулж үр дүнг гаргахыг зорьсон. Бодит системийн үр дүнтэй нийцэхүйц боловсруулалт хийж үр дүнг гаргадаг байхын тулд системд шаардлагатай бүхий л загварчлалуудыг (үүрийн загвар,бааз станц, хөдөлгөөнт станц, дохио тархалтын бодит орчин, дохионы олон замын тархалт, унтралт, замхралт, замын алдагдал, антенны цацаргалт г.м) боловсруулсан бөгөөд дэвшилтэт MIMO технологийг энэхүү платформд тусгаж өгсөн.Уг платфорыг цаашдаа сургалт, судалгаанд ашиглах боломжтой юм.

Түлхүүр үг: MIMO, LTE, платформ, сувгийн загвар, сувгийн коэффициент.

1. УДИРТГАЛ

Олон улсын цахилгаан холбооны байгууллагаас (ITU-R) гурав дахь үеийн (3G) хөдөлгөөнт холбооны хөгжлийн өнөөгийн хүрсэн үр дүнг нэгтгэн дүгнэж 2008 онд IMT-Advanced технологийг дэвшүүлэн тавьж 4G технологийн үндсэн үзүүлэлт болон шаардлагыг тодорхойлсон. Утасгүй өргөн зурвасын стандартууд нь энэхүү 4G технологи руу нэгдэн нийлэх чиглэлээр хөгжиж байгаа бөгөөд эдгээрээс LTE болон WiMAX 802.16m стандартууд тэргүүлж байна. Энэхүү судалгааны ажилд LTE технологийг сонгон авч судалгаа хийсэн. LTE технологийг анх Швед ба Норвег улсуудад 2009 онд анх ашиглагдаж эхлэсэн бөгөөд дараагаар Хойд Америк, Япон зэрэг технологийн өндөр хөгжилтэй улсуудад хэрэглээнд нэвтэрсэн.



Зураг1.Утасгүй өргөн зурвасын стандартуудын хөгжлийн явц

А. LTE-ийн давуу тал

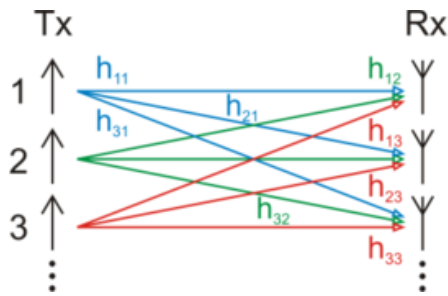
- Уян хатан зурвасын өргөнийг ашиглах боломжтой : 1.4, 3, 5, 10, 15 ба 20МГц давтамжууд дээр ажиллана.
- Маш өндөр өгөдлийн хурдтай (20МГц дотор) 300Мбит/сек - Шууд чиглэлд (Downlink) 75М бит/сек - Гэдрэг чиглэлд (Uplink)
- Хугацааны саатал: Хэрэглэгчийн өгөгдөл дамжуулах <100мсек. Системийн дохио дамжуулах<5мсек.
- Хэрэглэгч 350км/ц-ийн хурдтай байх үед LTE-ийн үйлчилгээг авах боломжтой.
- Харилцан ажиллагаа: E-UTRAN болон UTRAN/GERAN системүүдийн хоорондох гардварын тасалдлын хугацаа үйлчилгээний бодит хугацаанд 300 мсек-ээс бага, бодит бус хугацаанд 500 мсек-ээс бага байна.
- eMBMS (LTE evolved Multimedia Broadcast multicast services) дэмжинэ
- Хямд зардалтай, системийн хялбар бүтэцтэй.

Түүнчлэн LTE технологийг илүү хурдан найдвартай болгож буй технологи нь Олон оролт, олон гаралтат систем буюу MIMO юм.

Б. Олон оролт, олон гаралттай систем(MIMO)

MIMO нь нэвтрүүлэх болон хүлээн авах талдаа 2 ба түүнээс дээш антенн ашиглан холболтын чанарыг сайжруулж байгаа технологи юм. Системийн бааз станцын нэвтрүүлэх чадал эсвэл зурвасыг нэмэгдүүлэхгүйгээр системийн дамжууллын хурд (сувгийн багтаамж), холболтын зайг их хэмжээгээр өсгөх боломжийг олгодог ороо онцлог юм. Энэхүү гол үзүүлэлтээрээ өнөө үеийн утасгүй хөдөлгөөнт холбооны суурь технологи болон хөгжиж байна.

MIMO-гийн үндсэн санаа нь 2 ба түүнээс дээш антенн ашиглан дохиог орон зай, цаг хугацааны хэмжээст боловсруулах явдал юм. Үүний үр дүнд шаардлагатай чиглэлдээ энергийг төвлөрүүлэх замаар дамжуулах болон хүлээн авахад дохио шуугианы харьцааг нэмэгдүүлдэг.Одоогоор MIMO технологийг ашиглан лабораторын туршилтаар 1Ггабит/с хурдыг гарган авсан.



Зураг 2. MIMO системийн үндсэн загвар

MIMO нь нэг талдаа нэвтрүүлэх антенуудаас цацаж байгаа дохионууд, нөгөө талдаа хүлээн авах антенуудаас ирсэн дохионуудыг системийн багтаамж, үйлчилгээний чанар болон өгөгдлийн хурдыг хэрэглэгч бүрд сайжирч байхаар нэгтгэдэг. MIMO нь орон зайн нягтруулга болон орон зайн ялгавартай хүлээн авалтыг хэрэгжүүлснээр нэвтрүүлэх чадамжийг нэмэгдүүлж, мөн илүү найдвартай холболтыг хангадаг.

Орон зайн нягтруулга нь шугамын багтаамжийг өсгөхөд ашиглагддаг. Мэдээлэл нь дамжигдахдаа ялгаатай(өөр хоорондоо хамааралгүй) өгөгдлийн урсгалуудад хуваагдаж, урсгал бүр нь нэгэн зэрэг ялгаатай антеннаар цацагддаг. Хэрвээ \$N\$ ширхэг дамжууллын антеннтай гэвэл \$M\$ ширхэг хүлээн авах антеннтай байх ёстой. Өгөгдлийн урсгалууд нь өөр хоорондоо харилцан хамааралгүй, хангалттайгаар хүлээн авагдсан тохиолдолд холболтын нийт зурвасын нэвтрүүлэх чадамж нь нэг өгөгдлийн урсгалын нэвтрүүлэх чадамжаас \$N\$ дахин их болно.

Орон зайн ялгавартай хүлээн авалт нь шугамын найдваржилт болон үйлчлэх хүрээг өсгөхөд ашигладаг. Ижил өгөгдлүүд нь өөр хоорондоо хамааралгүй, янз бүрийн алдагдалтай замаар хүлээн авагчийн антеннуудад хүрэлцэн очиход, эдгээр дохионуудыг нэгтгэн, дохио шуугианы харьцааг өсгөдөг.

2. LTE СҮЛЖЭЭНИЙ СУУРЬ ПЛАТФОРМЫН БОЛОВСРУУЛАЛТ

LTE системийн суурь платформ нь уг системийн бүхий л функцийг программ хангамжийн орчинд гүйцэтгэсэн хувилбар байх юм. Энэхүү зорилгыг хэрэгжүүлэхийн тулд дараах онолын асуудлуудыг судалж, стандартын шаардлагын дагуу боловсруулсан. Үүнд:

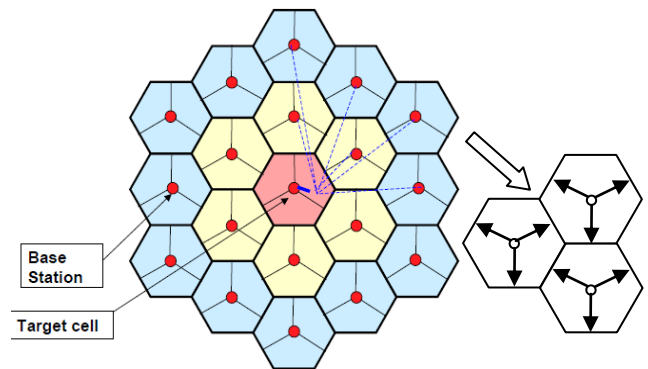
- Бааз станцын нэвтрүүлэх, хүлээн авах антенны загвар
- Нутаг дэвсгэрийн үйлчлэх хүрээг бүрхэх үүрийн загвар
- Хөдөлгөөнт станцын нэвтрүүлэх, хүлээн авах антенны загвар
- Хөдөлгөөнт хэрэглэгчийг 0 – 350км/цаг-ийн хурдтайгаарүүрт санамсаргүйгээр байрлуулах,
- Бааз станцаас хөдөлгөөнт станц дээр дурын байрлалд хүлээн авах чадлыг өгсөх, уруудах шугаманд тодорхойлох

- Нэвтрүүлэгч хүлээн авагчийн хооронд замын алдагдлыг шигүү суурьшилтай хотын төвийн бүс, хүн амын суурьшил харьцангуй бага сум орон нутаг, нээлттэй тархалтын орчинд тодорхойлох
- Сувгийн үнэлгээний олон оролт, олон гаралттай загвар

Эдгээрээс жишээ болгон дараах загварчлалуудыг боловсруулсан.

А. Үүрийн загвар

Суурь платформыг програмчлахын тулд хамгийн түрүүнд тухайн системийн үйлчлэх газар нутгийг загварчлах шаардлагатай. Үүрэн холбооны систем нь Зураг 4-т харуулсанаар олон үүрээс бүрддэг бөгөөд тухайн үүрийг зургаан талт дүрсээр илэрхийлдэг. Энэхүү олон үүрийн загвар нь тус бүр 19 үүр бүхий 7 кластераас бүрдэнэ. Үүрийн голд бааз станц байрлах бөгөөд үүрийн радиусыг 500-5000м хооронд сонгох боломжтой. Мөн үүр нь дотроо тус бүр 120°-ийн өнцөг үүсгэх секторт хуваагдана. Энэ нь ерөнхийдөө тухайн бааз станцад тус бүр 120 градусын цацаргалт бүхий 3 антенн байгаагаар төсөөлж болно. Симуляцийн туршид хийгдэх бүх процессууд энэхүү үүрийн загварын хүрэнболовсруулагдсан.



Зураг 3. Үүрийн загвар

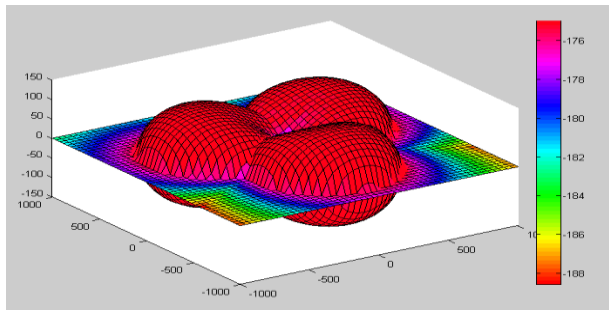
Б. Бааз станцын нэвтрүүлэх, хүлээн авах антенны загвар

Симуляцийн үйлчилэх газар нутагдахь үүрийн загварыг тодорхойлсны дараа бааз станцын нэвтрүүлэх, хүлээн авах антенны загварыг програмчлан гаргахшаардлагатай. Үүнд бааз станцын нэвтрүүлэх антенны цацаргалтын хэвтээ болон босоо өнцгийн тархалтын тооцооллыг авч үзсэн.

$$A(\theta) = -\min \left[12 \left(\frac{\theta}{\theta_{3dB}} \right)^2, A_m \right]$$

$$A(\theta) = -\min \left[12 \left(\frac{\varphi}{\varphi_{3dB}} \right)^2, A_m \right]$$

Үүнийг нэгтгэн Matlab програм дээр харвал тухайн бааз станцын цацаргалтын цар хүрээг хялбархан харж болно. Нэвтрүүлэх станцын тархалтын тооцоолол нь бүх үүрүүдийн хувьд адил тооцоологдоно.

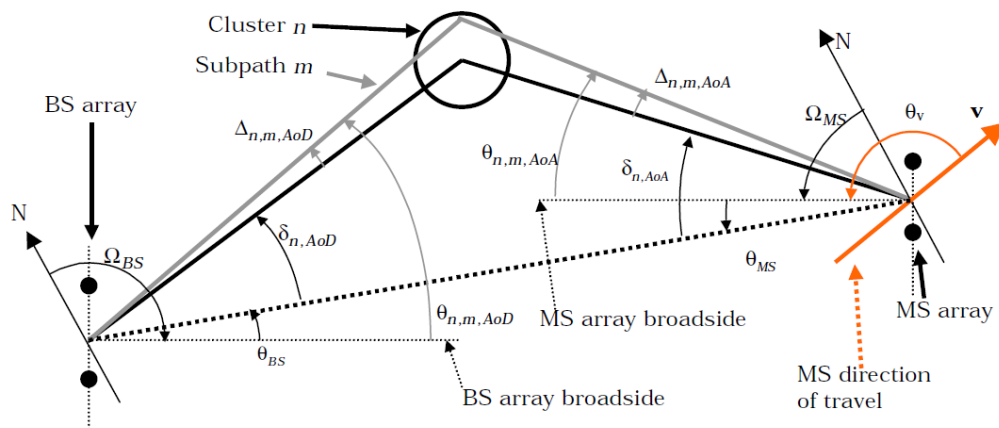


Зураг 4. Бааз станцын антенны гурван хэмжээст загвар

В. Радио сувгийн загварчлал

Радио сувгийн загварчлалын LTE-ийн суурь платформын үндсэн хэсэг юм. Сувгийн загварчлалд ерөнхийдөө бааз станцаас цацаргасан дохио тухайн орчноор тодорхой замыг туулан, зохих унтралт,

замхралттайгаар, мөн замд тааралдах саадыг дайран, зарим саадуудаас ойн хэрэглэгч дээр ирэх процессыг загварчлах явдал юм. Тухайн хэрэглэгчид ирж буй дохионд нөлөөлөх бүхий л хүчин зүйлүүдийг математик загварчлалаар төлөөлүүлэн виртуаль орчинд тооцоолол хийгдэх ёстой. Бааз станцаас цацаргасан дохио хэрэглэгч дээр зөвхөн нэг чиглэлээр ирдэггүй бөгөөд зам дайралдах саадуудад ойн олон замын тархалтыг үүсгэн хэрэглэгч дээр ялгаатай унтралт, хугацааны сааталтайгаар ирнэ. Ингэхдээ мөн л тэдгээр дохионы чиглэл бүрд замын алдагдал, унтралт, мөн тархалтын өнцгийн утгуудыг тооцох хэрэгтэй болно. Энэхүү тархалтын ерөнхий зураглалыг Зураг 5-д харуулсан байна. Үүн дээр нэмээд MIMO-ийн тооцоолуудыг хийх шаардлагатай.



Зураг 5. Бааз станц болон хөдөлгөөнт хэрэглэгч хоёрийн хоорондох өнцгийн параметрууд

Дээр дурьдагдсан тооцооллууд нэвтрүүлэх, хүлээн авах антенн тус бүр дээр хийх шаардлагатай. Эдгээр тооцооллуудын үр дүнд сувгийн коэффициентийг доорх томъёогоор тооцоолон гаргана.

$$h_{u,s,n}(t) = \sqrt{\frac{P_n \sigma_{SF}}{M}} \sum_{m=1}^M \left(\frac{\sqrt{G_{BS}(\theta_{n,m,AoD})} \exp(j[kd_s \sin(\theta_{n,m,AoD}) + \phi_{n,m}])}{\sqrt{G_{MS}(\theta_{n,m,AoA})} \exp(j[kd_u \sin(\theta_{n,m,AoA})]) \times \exp(jk\|v\| \cos(\theta_{n,m,AoA} - \theta_v))} \right) \times$$

Г. Замын алдагдлын тооцоолол

Замын алдагдлыг тухайн орчин бүрд өөр өөрөөр тооцоолдог бөгөөд уг боловсруулсан суурь платформд дараах 3 орчинг загварчилсан бөгөөд тус бүр дээр симуляцыг хийх боломжтой мөн нэмж болох юм.

- Хөдөөгийн сийрэг орчин (Suburban Macrocell)
- Хотын доторх сийрэг орчин (Urban Macrocell)
- хот доторх ачаалал их орчин (Urban Microcell)

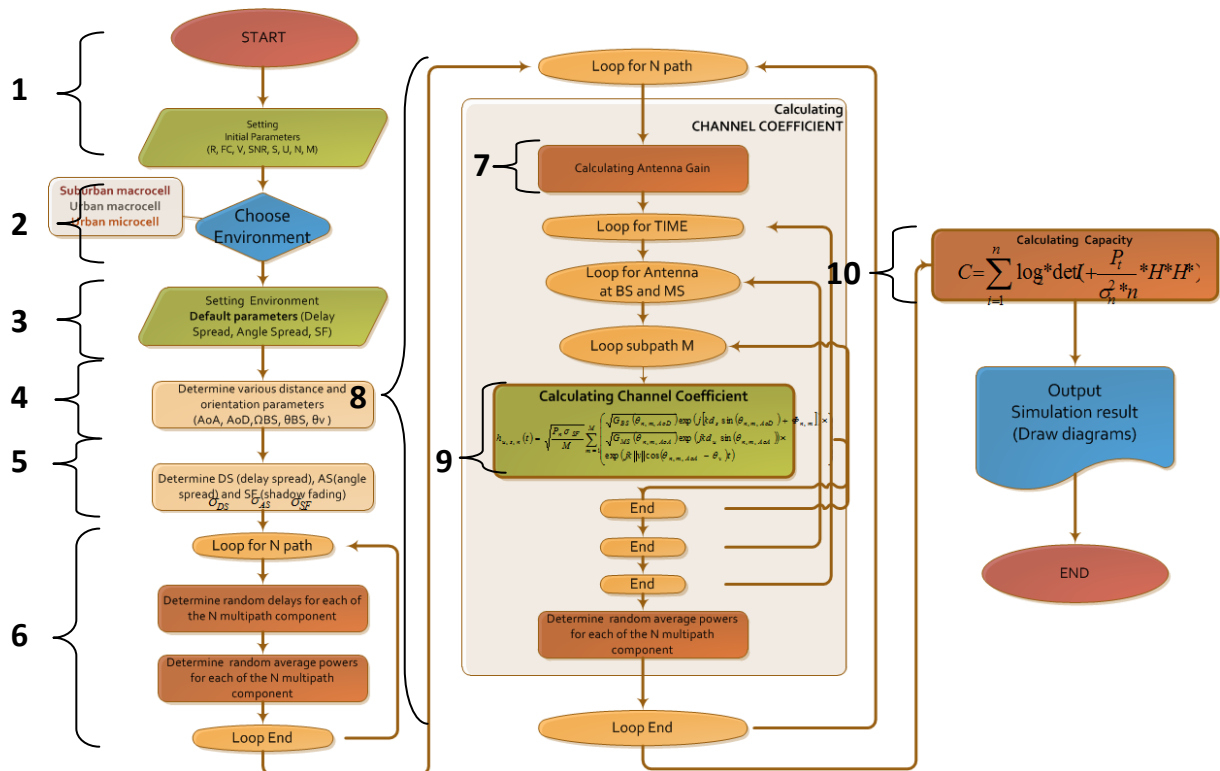
Бид энэхүү платформыг боловсруулахад өмнө дурьдагдсан бүхий л хүчин зүйлсийг загварчилж оруулсан. Ингэхдээ мэдээж бодит амьдрал дээрхтэй нийцэхүйц үр дүн өгөх ёстой учир дэлхийн нэртэй эрдэмтэд, судлаачдын боловсруулсан загвар, тогтмол утгуудыг авч ашигласан.

Жишээ нь: замын алдагдлыг тооцоход Winner Model гэж алдаршсан Hata model -ийг ашигласан.

$$PL[dB] = (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_{bs})) \log_{10}\left(\frac{d}{1000}\right) + 45.5 + (35.46 - 1.1h_{ms}) \log_{10}(f_c) - 13.82 \log_{10}(h_{bs}) + 0.7h_{ms} + C$$

3. LTE СҮЛЖЭЭНИЙ СУУРЬ ПЛАТФОРМЫН СИМУЛЯЦИ, ПРОГРАМ ХАНГАМЖ

Суурь платформын програм хангамжийг Matlab програмыг ашиглан боловсруулсан. Симуляцийн програмын ерөнхий ажиллагааны дарааллыг Зураг 6-д харууллаа.



Зураг 6. LTE сүлжээний суурь платформын симуляцийн ерөнхий ажлын дараалал

LTE системийн суурь платформын симуляци нь дараах дарааллаар гүйцэтгэгдэнэ.

1. Симуляцийн эхний утгуудыг гараас авна.
2. Тухайн системийн тархалтын орчинг сонгоно.
3. Орчноос хамаарсан тогтмол утгуудыг оноож өгнө. (тархалт, унтралт, замын алдагдал г.м.)
4. Хөдөлгөөнт хэрэглэгчийг үүрийн радиус дотор санамсаргүй байршуулна.
5. Зай, хурд, чиглэл, хандалтын өнцгүүдийн утгуудыг санамргүй онооно.
6. Олон замын тархалтын тооцоолол: Зам бүрт дундаж чадал, саатлыг утгуудыг орчноос хамааруулан хэвийн, логнормаль тархалттайгаар санамсаргүй утгуудыг онооно.
7. Хэрэглэгчийн байрлал дахь антенны цацаргалтыг тооцоолно.
8. Гол үр дүнг гаргаж авахын тулд 5 давхар давталтыг гүйцэтгэнэ. Нэвтрүүлэх хүлээн авах антенны тоо, хугацаа, олон замын тархалтын тоо тус бүр дээр тооцоолол хийгдэнэ
9. Давталтын дотор симуляцийн гол үр дүн болох сувгийн коэффициент "H" матрицыг тооцоолон гаргана. Энэ нь 4 хэмжээст комплекс тооны матриц байх юм. Мөн цацаргасан дохион дээр тухайн орчны Гауссын цагаан шуугианыг нэмж өгнө.
10. MIMO системийн багтаамжийг H матрицийг ашиглан дараах томъёогоор тооцоолно.

$$C = \sum_{i=1}^n \log_2 * \det(I + \frac{P_t}{\sigma_n^2 * n} * H * H^*)$$

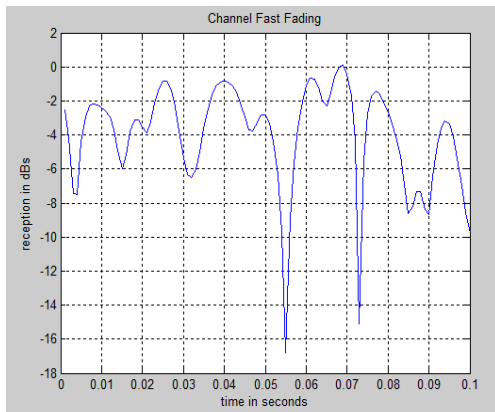
Мөн симуляцийг боловсруулахад хавсралтанд оруулсан LTE-ийн стандартын тогтмол утгуудыг оруулж тооцоолсон болно. Симуляцийн програм нь бааз станцаас хэрэглэгч дээр ирэх дохионы чадал болон дээрх томъёоны үр дүн болох системийн багтаамжийг боловсруулан гаргана. Түүнчлэн симуляцийг олон дахин давтан ажиллуулах мөн параметруудийг өөрчлөх замаар гарах үр дүнгүүдийг харьцуулан харах боломжтой юм.

4. LTE СИСТЕМИЙН СУУРЬ ПЛАТФОРМ АШИГЛАСАН ТУРШИЛТЫН ҮР ДҮН

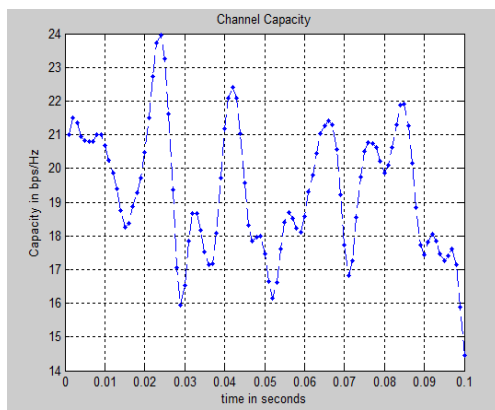
Симуляцийн програм нь өгөгдсөн утгуудын хүрээнд системийн багтаамж, хэрэглэгчийн хүлээн авч буй дохионы чадлыг тооцоолон гаргана. Дараах хувьсах болон хавсралт дээрх тогтмол параметруудийг ашигласан симуляцийн үр дүнг зураг 7,8-д харууллаа.

Симуляцийн параметр:

Орчин: Хөдөө орон нутаг
Хэрэглэгчийн хурд: V = 60 км/цаг
MIMO: 2X2
Олон замын тархалтын тоо: N=6
Тархалтын дэд замын тоо: M=10
Дохио шуугианы харицаа: SNR=15дБ
Үүрийн радиус: 5км
Зөөгчийн давтамж: 1900 МГц

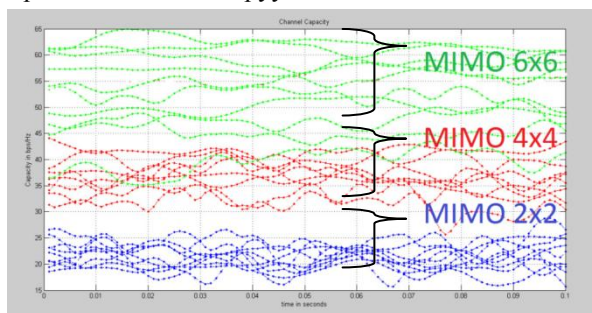


Зураг 7. Системийн багтаамж(бит/сек/Гц)



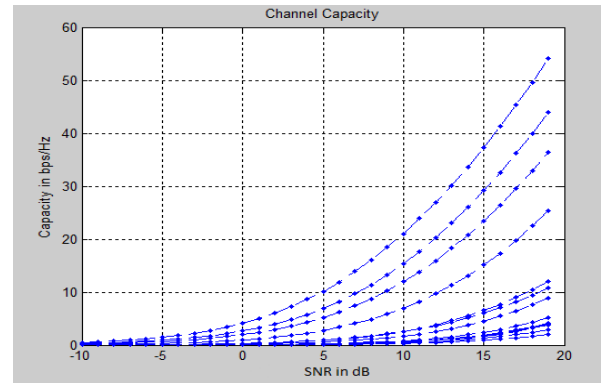
Зураг 8. Хэрэглэгчийн хүлээн авч буй дохионы чадал (дБ)

Симуляцийн параметруудийг өөрчлөх замаар хугацааны агшин дахь системийн багтаамжийг харуулсан үр дүнг ашиглан маш олон байдлаар харьцуулалт хийн харах боломжтой бөгөөд зураг 9-д MIMO-ийн өөр өөр утгуудын хувьд системийн багтаамж хэрхэн өөрчлөгдөхийг харуулсан. Симуляцийг олон дахин давтаж MIMO-ийн тухайн утгууд дээрх тухайн орчны хувьд байх системийн багтаамжийн царааг харах боломжтой байна. Зураг 9-д үзүүлснээр нэвтрүүлэх, хүлээн авах антенны тоо өсөх тусам системийн багтаамж их хэмжээгээр өсч байна. Энэ нь MIMO технологийг ашигласнаар системийн зурвасын өргөн, бааз станцын нэвтрүүлэх чадлыг нэмэгдүүлэхгүйгээр системийг багтаамж хэрхэн өсч байгааг харуулж байна.



Зураг 9. LTE сүлжээний MIMO 2x2, 4x4, 6x6 байх үеийн системийн багтаамж

Түүнчлэн сувгийн чанарыг тодорхойлдог хүчин зүйл болох дохион шуугианы харьцааны утгууд дээрх системийн багтаамжийг харьцуулан харах боломжтой. Доорх зурагт MIMO 2x2, 4x4 үеийн системийн багтаамжийг үзүүлээ. Эндээс дүгнэж үзэхэд сувгийн чанар буюу дохио шуугианы харьцаа SNR-ийн утга өсөхөд системийн багтаамж өсч буй нь харагдаж байна.



Зураг 10. LTE сүлжээний MIMO 2x2, 4x4 байх үеийн системийн багтаамж

5. Дүгнэлт

LTE сүлжээний суурь үндсэн үзүүлэлт стандартад бүрэн нийцсэн платформыг програм хангамжийн тусламжтайгаар виртуаль орчинд дүрслэн, зохион бүтээсэн. Энэхүү платформ нь LTE, MIMO зэрэг утасгүй хөдөлгөөнт холбооны дэвшилтэт, шинэ үеийн технологиудыг виртуаль орчинд загварчилан оруулж өгсөнөөрөө цаг үеэ олсон шинэлэг систем болсон гэж үзэж байна.

Мөн уг платформ нь суурь судалгааны зориулалтаар түүнчлэн сургалтын зориулалтаар ашиглах бүрэн боломжтой систем юм. Үүний үр дүнг маш олон байдлаар харьцуулалт хийж харах боломжтой бөгөөд судалгааны LTE системийг сайжруулах шинэ алгоритмуудыг турших, үр дүнг харьцуулан харах боломжийг олгох юм.

Сургалтын чиглэлээр дараах байдлаар ашиглах боломжтой гэж үзэж байна:

- Системийн тодорхой параметруудийг өөрчлөн туршилт хийх, системийн урьдчилсан төсөөллийг харах.
- Оюутнууд өөрсдийн сурсан тооцоолол, томъёо зэргийн бодит үр дүнг харах

АШИГЛАСАН БҮТЭЭЛИЙН ЖАГСААЛТ

- [1]. Spatial channel model for multiple input multiple output (MIMO) simulations,” Release 8, TR25.996 V8.0.0 (2009-01).
- [2]. Final Report on Link Level and System Level Channel Models
- [3]. OFDM, A Flexible and Adaptive Air Interface for a 4G Communication System, *Hermann Rohling*, 12th International OFDM-Workshop, 2007.
- [4]. Comparison between WiMAX and 3GPP LTE, *Syed Hamid Ali Shah*, 2009

Зохиогчдийн тухай

Доктор, профессор Батаагийн Отгонбаяр

- 1978 онд Политехникийн Дээд Сургуулийг холбооны инженер мэргэжлээр дүүргэсэн.
- Бакалаврын зэргийг “Дискрет мэдээллийн системийн үр ашгийг дээшлүүлэх боломжийн судалгаа”, магистрын (M.Sc) зэргийг 1995 онд “Ярианы синтезийн зарим асуудлууд”, докторын (Ph.D) зэргийг 1996 онд “Монгол хэлний ярианы дохионы синтез, түүнийг холбооны техникт хэрэглэх асуудлын судалгаа” сэдвээр тус тус хамгаалсан.
- ШУТИС-МХТС УХӨНП Багийн тэргүүлэх профессор, Монгол улсын зөвлөх инженер
- Судалгааны ажлын чиглэл: Өргөн зурвасын өндөр хурдны нэгдмэл үйлчилгээтэй технологиуд (WiBro, WiMAX, MobileIPTV, LTEгэх мэт)

Оросоогийн Тулга

- 2010 онд ШУТИС-МХТСургуулийг мэдээллийн технологи мэргэжлээр дүүргэсэн.
- Бакалаврын зэргийг “Монгол хэлний ярианы синтезийн програм”, магистрын (M.Sc) зэргийг 2012 онд “Хөдөлгөөнт Wimax-ийн системийн түвшний симуляци” сэдвээр тус тус хамгаалсан.
- ШУТИС-МХТС ЭШИАлбаны мэргэжилтэн
- Судалгааны ажлын чиглэл: Өргөн зурвасын өндөр хурдны нэгдмэл үйлчилгээтэй технологиуд, симуляци (Programming, MobileIPTV, LTE, WiMAX, Matlab, C++ simulationгэх мэт)

Өлзийнямын Буянхишиг

- 2005 онд ШУТИС-МХТСургуулийг цахилгаан холбоо мэргэжлээр дүүргэсэн.
- Бакалаврын зэргийг “Системийн динамик загварчлалын судалгаа”, магистрын (M.Sc) зэргийг 2008 онд “Олон сувгийн холбооны системд МАТЛАВ програмыг хэрэглэх” сэдвээр тус тус хамгаалсан.
- ШУТИС-МХТС УХӨНП Багийн багш
- Судалгааны ажлын чиглэл: Өргөн зурвасын өндөр хурдны нэгдмэл үйлчилгээтэй технологиуд (WiBro, WiMAX, MobileIPTV, LTEгэх мэт)

Хавсралт (Платформын тогтмол параметрууд)

Channel Scenario	Suburban Macro	Urban Macro	Urban Micro
Number of paths (N)	6	6	6
Number of sub-paths (M) per-path	20	20	20
Mean AS at BS AS at BS as a lognormal RV $\sigma_{AS} = 10^{(\varepsilon_{AS}x + \mu_{AS})}$, $x \sim \eta(0,1)$	$E(\sigma_{AS}) = 5^0$ $\mu_{AS} = 0.69$ $\varepsilon_{AS} = 0.13$	$E(\sigma_{AS}) = 8^0, 15^0$ $\mu_{AS} = 0.810$ $\varepsilon_{AS} = 0.34$	NLOS: $E(\sigma_{AS}) = 19^0$ N/A
$r_{AS} = \sigma_{AoD} / \sigma_{AS}$	1.2	1.3	N/A
Per-path AS at BS (Fixed)	2 deg	2 deg	5 deg (LOS and NLOS)
BS per-path AoD Distribution standard distribution	$\eta(0, \sigma_{AoD}^2)$ where $\sigma_{AoD} = r_{AS} \sigma_{AS}$	$\eta(0, \sigma_{AoD}^2)$ where $\sigma_{AoD} = r_{AS} \sigma_{AS}$	U(-40deg, 40deg)
Mean AS at MS	$E(\sigma_{AS,MS}) = 68^0$	$E(\sigma_{AS,MS}) = 68^0$	$E(\sigma_{AS,MS}) = 68^0$
Per-path AS at MS (fixed)	35^0	35^0	35^0
MS Per-path AoA Distribution	$\eta(0, \sigma_{AoA}^2(\text{Pr}))$	$\eta(0, \sigma_{AoA}^2(\text{Pr}))$	$\eta(0, \sigma_{AoA}^2(\text{Pr}))$
Delay spread as a lognormal RV $\sigma_{DS} = 10^{(\varepsilon_{DS}x + \mu_{DS})}$, $x \sim \eta(0,1)$	$\mu_{DS} = -6.80$ $\varepsilon_{DS} = 0.288$	$\mu_{DS} = -6.18$ $\varepsilon_{DS} = 0.18$	N/A
Mean total RMS Delay Spread	$E(\sigma_{DS}) = 0.17 \mu s$	$E(\sigma_{DS}) = 0.65 \mu s$	$E(\sigma_{DS}) = 0.251 \mu s$ (output)
$r_{DS} = \sigma_{delays} / \sigma_{DS}$	1.4	1.7	N/A
Lognormal shadowing standard deviation, σ_{SF}	8dB	8dB	NLOS: 10dB LOS: 4dB
Pathloss model (dB), d is in meters	$31.5 + 35 \log_{10}(d)$	$34.5 + 35 \log_{10}(d)$	NLOS: $34.53 + 38 \log_{10}(d)$ LOS: $30.18 + 26 * \log_{10}(d)$