

# Үүлэн тооцоолол хэрэглэгчдийн энергийн үр ашигтай байдлын судалгаа

Ц. Баатархүү<sup>1</sup>, О. Бат-Энх<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ШУТИС, МХТС, доктор (Ph.D), дэд профессор

\*o\_bat\_enkh@yahoo.com, †baatarkhuuc@yahoo.com

**Хураангуй:** Энэхүү судалгаа нь гар утасны үүлэн тооцоолол хэрэглэгчдийн энергийн үр ашигтай байдлыг судлах болно. Одоогийн ихэнх гар утасны тооцооллын шинж чанарууд нь дотоод тооцооллыг ашиглаж байна. Энэ нь гар утасны хязгаарлагдмал нөөцтэй, бага хэмжээний хэрэглээний программуудыг ашиглахад хүргэж байгаа юм. Их хэмжээний тооцоолол шаарддаг хэрэглээний программууд байдаг хэдий ч ховор юм. Үүлэн тооцоолол нь эдгээр хэрэглээний программуудыг хэрэгжүүлэх нөхцөл нь болж хувирна.

Үүлэн тооцоолол нь гар утсанд олон давуу талыг санал болгодог технологи. Энэ судалгаагаар тооцооллыг харьцаагаар тодорхойлох бөгөөд энэ нь дотоод боловсруулалт ба тооцооллын шилжүүлэлт хоорондын шийдвэрийн гол хүчин зүйл нь юм.

*Түлхүүр үг: Хөдөлгөөнт холбоо, үүлэн тооцоолол, хийсвэрлэл, найдвартай байдал, энерги зарцуулалт*

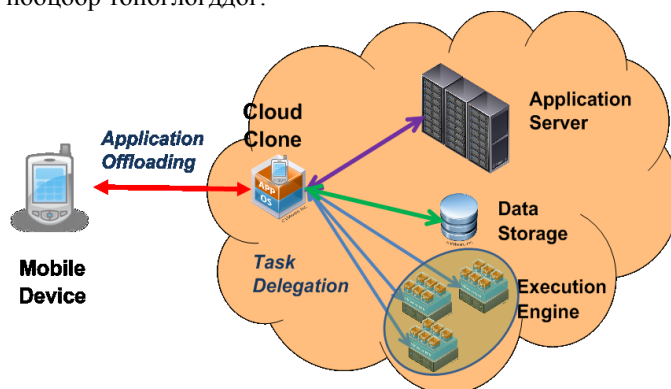
## I. ОРШИЛ

Орчин үед мэдээллийн технологийн хурдацтай хөгжлийг даган ухаалаг утаснууд гарч бүх л систем ухаалаг болон хөгжиж байна. Жишээлбэл, 2009 оны байдлаар 4 тэрбум гар утас үйлдвэрлэгдсэн бол 2013 онд уг үзүүлэлт 6 тэрбум болж өссөн байна. Энэ нь компьютерын үйлдвэрлэлтэй харьцуулахад хэд дахин их юм. Хэдэн зуун сая хүн өдөр болгон утсаараа дамжуулан өөрт хэрэгтэй аппликейшн, GPS, зураг авах, бичлэг хийх, ном сэтгүүл унших гэх мэт үйлчилгээнүүдийг авдаг. Хэдийгээр сүүлийн үеийн ухаалаг утасны багтаамж улам сайжирч байгаа ч гэсэн хэдэн том хэмжээний аппликейшн, өндөр үзүүлэлттэй бичлэгийг хадгалахад хангалттай хүрэлцэхгүй байна. Тийм учраас үүлэн тооцоолол хөгжих үндэс суурь тавигдсан.

Гар утасны бүтцийн хөгжилд тулгарч буй асуудлуудын нэг нь нөөцийг ихээр шаарддаг аппликейшн ба нөөцийн хязгаартай гар утаснуудын хоорондын зөрүүтэй байдал билээ. Хязгаарлагдмал физик хэмжээнийхээ дагуу гар утаснууд нь тооцоолол, энерги, зурвасын өргөн, санах ой зэрэг нөөцүүдийн хувьд хязгаартай байдаг [1]. Гар утасны хувьд хязгаартай батерейны багтаамжийн энергийн нийлүүлэлт нь хамгийн их чадварыг сорьсон дизайны асуудлуудын нэг билээ [2]. Ухаалаг утасны хувьд хязгаарлагдмал батерейны амьдрах хугацаа нь зах зээлийн судалгаагаар хамгийн их гомдол хүсэлтийг дагуулдаг [3]. Тиймээс гар утасны нөөцийн хязгаарлагдмал байдлыг аппликейшнүүдийн дизайнд авч үзэх хэрэгтэй.

Үүлэн тооцооллын технологи нь хамтын сангаас уян хатан нөөцийн хуваарилалтыг эзэмшдэгээрээ нөөц их хэрэглэдэг аппликейшнүүдийн чадварыг сайжруулж өгдөг [4]. Янз бүрийн үүлэн тооцоололтой гар утасны бүтцүүд санал дэвшүүлэгдсэн бөгөөд заримыг нь

дурдвал: Cloudlet, Clone Cloud ба Weblet нар юм. Эдгээр бүтцүүдийн хувьд гар утас бүр нь үүлний дэд бүтцийн үүлний клон гэж нэрлэгддэг системийн түвшний клонтой холбогдоно. Виртуал машин (Virtual Machine VM) дээр ажилладаг үүлний клон нь төхөөрөмжийн аппликейшнүүдийг гүйцэтгэж чадах ба үүнийг ихэвчлэн аппликейшн offload хийх (application offloading) гэдэг. Энэ бүтэц нь аппликейшн offload хийх механизм ба аппликейшнийг Өмнө хийгдсэн судалгааны ажлуудад үүл рүү аппликейшнүүдийг offload хийх янз бүрийн бүтэц ба механизмуудыг санал болгосон байдаг. Энэхүү судалгаанд авч үзэж буй аргад гар утас бүр нь виртуал машин (virtual machine VM) дээр ажиллаж буй системийн түвшний клон руу хуулагддаг (Зураг 1). VM нь үүлний дэд бүтцийн хажууд байрлах ба хэрэглэгчийн байрлалын дагуу нүүдэг. Үүлний клон нь физик гар утасны төлвийг тогтмол синхрончлол хийдэг. Үүлний клон нь дотоод VM орчны тооцоолол ба санах багтаамжаар хангахаас гадна алс байгаа үүлний хадгалах багтаамжийн ба тооцооллын нөөцөөр тоноглогддог.



Зураг 1. Үүлтэй холбогдсон гар утасны аппликейшний бүтэц

Энэ бүтцийн дагуу гар утасны аппликейшн нь төхөөрөмжин дээр (гар утасны гүйцэтгэл mobile execution) эсвэл үүлний клонд (үүлний гүйцэтгэл cloud execution) гүйцэтгэгдэж болно. Энэ дизайны зорилго нь төхөөрөмжийн зарцуулах энергийг хэмнэн оновчтой аппликейшн гүйцэтгэлийн бодлогыг хөгжүүлэх юм.

Аппликейшн нь төхөөрөмжинд гүйцэтгэгдэж байгаа үед динамик хүчдэлийн хэмжилт (Dynamic Voltage Scaling DVS) ашиглан төхөөрөмжийн CPU клок давтамжийг оновчтой төлөвлөснөөр тооцооллын энергийг хэмнэнэ [9].

Аппликейшн нь үүлний клонд гүйцэтгэгдэж байгаа үед хэлбэлзсэн утасгүй сувгийн өгөгдөл дамжууллын түвшнийг оновчтойгоор төлөвлөснөөр дамжууллын энергийг хэмнэнэ. Дээрх хоёр төлөвлөлтийн асуудлын хувьд эдгээрийг гүдгэр оновчлолын

асуудал гэж үзэх бөгөөд энэ нь аппликейшн гүйцэтгэгдэж дуусах эцсийн хугацаанаас хамаарна. Оновчлолын эдгээр асуудлуудыг аналитик байдлаар шийдсэн бөгөөд оновчтой төлөвлөлт ба төхөөрөмжийн зарцуулах хамгийн бага энергийг тус бүрийнх нь хувьд хаалттай формын шийдлийг боловсруулсан. Манай онолын фреймворк нь энергийн хувьд ашигтай аппликейшний гүйцэтгэлд зориулан оновчтой төлөвлөлтийн бодлогыг боловсруулахад хүргэнэ.

Энэ судалгаа нь хамгийн түрүүнд гар утасны гүйцэтгэл ба үүлний гүйцэтгэл нарын оновчтой төлөвлөлтийн бодлогын асимптотик (ойролцоогоор дөхүүлэх) анализаар хангана. Хоёрдугаарт, гар утасны гүйцэтгэл эсвэл үүлний гүйцэтгэл нь илүү энергид хэмнэлттэй байх оновчтой ажиллагааны бүсийг тодорхойлно. Хамгийн сүүлд нь гаралтын бага өгөгдөлтэй (CloudAV [11]) аппликейшнүүдийн хувьд энергийн ашигтай гүйцэтгэлийн бодлогын босгыг гаргана.

## II. СУДАЛГААНЫ ХЭСЭГ

### *Ижил төстэй ажлын судалгаа*

Судалгаанууд ажлуудад янз бүрийн аргуудыг тусгасан байдаг. Rudenko судалгаандаа зарим даалгавруудыг /task/ алсад боловсруулалт хийхэд тодорхой хэмжээний хүчин чадлыг хэмнэж байгааг туршилтаар харуулсан байна (батерейг 50% хүртэл хэмнэсэн). Othman судалгаандаа өмнөх CPU хугацааны хэмжилтүүд дээр тулгуурлан судлаад дараа нь шийдвэрээ хөгжүүлдэг шийдвэр гаргадаг алгоритм санал болгосон. Xian судалгаандаа батерейгээр тэжээгддэг системүүдийн хувьд энергийг хэмнэхийн тулд дотоод гүйцэтгэл ба тооцооллын шилжүүлэлтэд /offloading/ тохирох дасан зохицож ажиллах арга санал болгоход тохиромжтой амрах хугацааг судалсан. Rong судалгаандаа алсын боловсруулалт ашиглан төхөөрөмжийн хүчин чадлын зарцуулалтыг багасгах шугаман оновчлолын асуудлыг боловсруулсан. Huang судалгаандаа төхөөрөмжийн энергийг хэмнэхэд Lyapunov-ийн оновчлолд тулгуурлан динамик шилжүүлэлтийн алгоритмыг танилцуулсан бөгөөд энэ нь аппликейшний гүйцэтгэлийн хугацаатай тохирно.

Мөн бусад үүлэн тооцооллын энергийн асуудлын талаар судалгааг судалсан болно. Төхөөрөмжийн тооцооллын энерги ба шилжүүлэлтийн /offloadng/ харилцааны энергийг харгалзан аппликейшнүүдийг үүл рүү шилжүүлэлт хийхийг шинжлэх энергийн загварыг судалсан [3]. Үүлэн тооцоолол дахь гар утасны аппликейшнүүдийн энергийн зарцуулалтанд хамгийн их нөлөөлдөг гол хүчин зүйлүүд болох ажлын ачаалал/workload/, өгөгдөл харилцааны хэв/pattern/ ба хэрэглэж буй технологүүд (WLAN ба 3G)-ын талаарх судалгаануудыг авч үзсэн байдаг [2]. Энэ судалгааны хувьд шинжилгээ нь статистик хэмжилт ба шалгалтанд тулгуурласан. Мөн зарим судалгаанд ихэвчлэн төхөөрөмжийн тогтмол тооцооллын төлөвлөлт ба утасгүй сувгийн тогтмол өгөгдлийн хурдны загварыг авч үзсэн [2,3]. Бодит загварууд нь үүлэн тооцоололд суурилсан гар утасны платформын тооцоолол ба харилцааны зөрүүг судлах

хэрэгтэй. Эдгээр өмнөх судалгаануудтай харьцуулахад энэ судалгаа нь нэлээд хэдэн давуу талтай.

Нэгдүгээрт, үүлний гүйцэтгэлийн хувьд Гилберт-Эллиоттын (Gilbert-Elliott) загварыг судалсан ба тогтмол сувгийн оронд хэлбэлзсэн утасгүй сувгийг авч үзсэн ба мөн дээрээс нь гар утасны гүйцэтгэлийн тооцооллын загварыг гаргасан.

Хоёрдугаарт, гүйцэтгэлийн эцсийн хугацааг хангаж байхад энергийн зарцуулалтыг багасгахын тулд гар утасны гүйцэтгэл ба үүлний гүйцэтгэлийн онолын бүтцийг дурдсан. Эцэст нь хаалттай формын шийдлийг гаргасан ба оновчтой энергитэй аппликейшний гүйцэтгэлийн босгоны бодлогыг санал дэвшүүлсэн.

Гар утасны хэрэглээний бүх төлөв байдлыг гүйцэд илэрхийлдэг загвар нь нийлмэл билээ. Маш олон нарийн деталиудыг авч үзэх хэрэгтэй болдог. Гэвч шинж чанаруудын өндөр зэрэглэлүүд нь асуудлыг математикийн аргаар тодорхойлоход хэцүү болгох тул инженерийн практикт зайлшгүй хэрэгтэй чухал ойлголтуудыг л ашиглана. Энэ судалгаанд нийтлэг гар утасны аппликейшний үндсэн үзүүлэлтүүдийг харгалзан үздэг жишээ загварыг хөгжүүлнэ. Гар утасны аппликейшний дараах хоёр хүчин зүйлтэй гэж хийсвэрлэе:

- Оролтын өгөгдлийн хэмжээ  $L$ : аппликейшний оролтын өгөгдлийн битүүдийн хэмжээ;

- Аппликейшн бүрэн ажиллаж дуусах эцсийн хугацаа  $T$ : аппликейшн биелэгдэж дуусах хугацаа.

Оролтын өгөгдлийн хэмжээ  $L$  ба аппликейшний биелэгдэх эцсийн хугацаа  $T$  нь хоёулаа гар утасны аппликейшний эрчим хүчний зарцуулалтанд нөлөөлнө гэдгийг анхаарах хэрэгтэй. Ихэвчлэн оролтын өгөгдөл их ба (эсвэл) биелэгдэх хугацаа бага үед энергийн зарцуулалт өндөр байдаг. Иймээс эдгээр хоёр хүчин зүйлийг ашиглан гар утасны аппликейшнийг тодорхойлох ба функцийг бичвэл  $A(L, T)$  болно. Үйл ажиллагааны оновчтой зарчмын талаар ойлголт өгсний дараагаар илүү олон хүчин зүйлийг авч үзэх болно.

Аппликейшн нь төхөөрөмжинд/гар утас/ гүйцэтгэгдэж байхад эрчим хүчний зарцуулалтыг CPU –гийн ачааллаар тодорхойлдог. Ачаалал нь аппликейшнд шаардлагатай CPU циклийн тоогоор хэмжигддэг ба  $W$  үсгээр тэмдэглэгддэг бөгөөд оролтын өгөгдлийн хэмжээ ба аппликейшн дэх алгоритмын нийлмэл байдлаас хамаардаг. Ерөнхийдөө,  $W$  нь санамсаргүй хувьсагчаар загварчлагдах болно.

CPU-ны хүчин чадал нь динамик хүчин чадлаас тогтдог ба динамик хүчин чадал нь богино холбооны хүчин чадал мөн алдагдлын хүчин чадал бөгөөд энд динамик хүчин чадал нь давамгайлдаг. Иймээс гар утасны гүйцэтгэлд зөвхөн динамик хүчин чадлыг авч үзэх болно. CMOS хэлхээнд үйл ажиллагаа бүрийн энерги  $E_{\omega}$  нь  $V^2$  –тай тэнцүү байх ба энд  $V$  нь чипийн нийлүүлэлтийн хүчдэл юм. Үүнээс гадна, сул хүчдэлийн хязгаартайгаар ажиллаж байгаа үед чипийн клок давтамж  $f$  нь ойролцоогоор хүчдэлийн нийлүүлэлт  $V$  –тэй шугаман пропорциональ байна.

Үүнээс дүгнэхэд ажиллагаа бүрийн энерги нь дараах байдлаар илэрхийлэгдэнэ:

$$E_{\omega}(f) = kf^2, \quad (1)$$

Энд  $k$  нь чипийн бүтцээс хамаарсан үр ашигтай шилжигдсэн эзлэхүүн юм. Энергийн зарцуулалт нь судалгаа [2]-ны хэмжилтүүдтэй таарч байхын тулд  $k = 10^{-11}$  гэсэн утга онооё. Гар утасны гүйцэтгэлийн нийт тооцооллын энерги нь  $\sum_{\omega=1}^W \varepsilon_{\omega}(f_{\omega})$  болно.

Гар утасны гүйцэтгэлийн хувьд DVS ашиглан чипийн клок давтамжийг оновчтойгоор тохируулснаар түүний нийт энергийн зарцуулалтыг багасгах боломжтой [9]. Мөн энд дурдахад CPU нь аппликейшнийг удаанаар ажиллуулснаар өөрийн энергийн зарцуулалтыг нэлээд хэмжээгээр бууруулах боломжтой. Хэдий тийм боловч аппликейшн нь эцсийн хугацааны саатал  $T$  –тэй зохицож ажиллах ёстой бөгөөд үүний дагуу клок давтамж нь доогуур байхгүй байлгахыг зөвлөдөг. Тиймээс нийт энергийн зарцуулалтыг бууруулахын тулд аппликейшний эцсийн хугацааны сааталд тохирохоор клок давтамжийг тааруулах хэрэгтэй. Оновчтой CPU давтамжийн төлөвлөлтийн дагуу гар утасны гүйцэтгэлийн хамгийн бага энергийн зарцуулалтын хэмжээ нь

$$\varepsilon_m^* = \min_{\psi \in \Psi} \{ \varepsilon_m(L, T, \psi) \}, \quad (2)$$

Энд  $\psi = \{f_1, f_2, \dots, f_W\}$  нь эцсийн хугацааны сааталд нийцэх клок давтамжийн вектор,  $\Psi$  нь боломжит бүх клок давтамжийн векторын иж бүрдэл ба  $\varepsilon_m(L, T, \psi)$  нь төхөөрөмжийн /гар утас/ зарцуулах нийт энерги юм.

Нарийвчлан тодорхойлоход  $g$  нэмэгдэлтэй хэлбэлзсэн утасгүй сувгаар хугацааны слотод  $s$  битийн өгөгдлийг дамжуулахад зарцуулах энерги нь давхар ганц гишүүнт функцээр илэрхийлэгдэнэ:

$$\varepsilon_c(s, g, n) = \lambda \frac{s^n}{g}, \quad (3)$$

Энд  $n$  нь ганц гишүүнтийн зэрэг,  $\lambda$  нь энергийн коэффициентийг илэрхийлж байна. Энэ ганц гишүүнт функц нь өргөн хэрэглэгддэг.

Энэ нь судалгаанд энерги-бит харьцаа нь ганц гишүүнт функцээр маш сайн нарийвчилж байгааг харуулж байна. Ганц гишүүнт функц нь тохиромжтой  $\lambda$  коэффициент ба  $n$  зэргийг сонгоход багтаамжид суурилсан хүчин чадлын функцтэй тун ойрхон байх боломжтой. Ийм ганц гишүүнт функц нь үүлэн гүйцэтгэлийн нарийвчлалын асуудлын аналитик шийдлийг боловсруулж чадна. Илэрхийлэл (3) –ын хувьд модуляцын схемээс хамаарч ихэвчлэн  $2 \leq n \leq 5$  гэж үздэг.  $\lambda = 1.5$  гэсэн утга өгөхөд энергийн зарцуулалт нь [2] –ийн хэмжилтүүдтэй тохирно.

Аппликейшн нь үүлний клоноор биелэгдэж байгаа үед төхөөрөмжийн зарцуулах энерги нь төхөөрөмжөөс үүлний клон руу дамжуулах өгөгдлийн хэмжээ ба утасгүй сувгийн загвараас хамаарна.  $A(L, T)$  гар утасны аппликейшний хувьд үүлний клон руу  $L$  битийн өгөгдөл нь  $T$  хугацааны дотор дамжих ёстой. Төхөөрөмжийн үүлэн гүйцэтгэлийн үе дэх нийт энергийн зарцуулалт нь  $\sum_{t=1}^T \varepsilon_c(s_t, g_t, n)$ , энд  $s_t$  ба  $g_t$  нь  $t$  хугацааны

слотод тус тус дамжуулсан битийн тоо ба сувгийн төлөв юм.

Үүлэн гүйцэтгэлийн үед түүний энергийн нийт зарцуулалтыг санамсаргүй сувгийн хариунд тааруулан өгөгдлийн хурдыг(өгөгдсөн хугацааны слотод дамжуулагдсан битийн тоо) оновчтойгоор өөрчлөх замаар багасгаж болно. Хугацааны слот бүрийн энерги нь дамжуулсан битийн давхар функц тул аль болох бага битийг дамжуулах нь тохиромжтой. Хэдийгээр хугацааны слот бүр дэх дамжуулсан битийн тоог багасгаснаар аппликейшний нийт саатал нэмэгдэх болно. Иймээс саатлын шаардлагад нийцэхийн сацуу нийт дамжууллын энергийг багасгахын тулд дамжууллын оновчтой өгөгдлийн хурдын төлөвлөлт байдаг. Дамжууллын оновчтой төлөвлөлтийн дагуу үүлэн гүйцэтгэлийн дамжууллын энергийн хамгийн бага хэмжээ нь дараах байдлаар тодорхойлогдоно:

$$\varepsilon_c^* = \min_{\phi \in \Phi} E\{ \varepsilon_c(L, T, \phi) \}, \quad (4)$$

Энд  $\phi = s_1, s_2, \dots, s_T$  нь эцсийн хугацааны саатал( $T$  хугацааны слотууд) –уудад тааруулсан өгөгдөл дамжууллын төлөвлөлт,  $\Phi$  нь боломжит бүх өгөгдөл төлөвлөлтийн векторуудын иж бүрдэл, ба  $\varepsilon_c(L, T, \phi)$  нь дамжууллын энергийг тэмдэглэж байна. Энд дурдахад энергийн зарцуулалтыг өөр өөр сувгийн төлөвт тооцоолох хэрэгтэй.

Оновчтой энергийн аппликейшний гүйцэтгэлийн шийдэл нь төхөөрөмжийн зарцуулсан нийт энергийг багасгах зорилготойгоор хаана аппликейшнийг гүйцэтгэхийг сонгох юм. Оновчтой бодлого нь дараах шийдвэрийн хуулиар тодорхойлогдоно:

$$\left[ \begin{array}{ll} \text{Гар утасны гүйцэтгэл} & \text{if } \varepsilon_m^* \leq \varepsilon_c^* \\ \text{Үүлний гүйцэтгэл} & \text{if } \varepsilon_m^* > \varepsilon_c^* \end{array} \right] \quad (5)$$

$\varepsilon_m^*$  нь  $k$ -тэй пропорциональ бол  $\varepsilon_c^*$  нь  $\lambda$ -тай пропорциональ байна. Иймээс,  $k$  ба  $\lambda$ -ийн абсолют утгууд нь чухал биш боловч, харин эдгээр тогтмол энергийн коэффициентийн харьцаа  $\frac{k}{\lambda}$  нь оновчтой гүйцэтгэлийн бодлогыг тодорхойлоход нөлөөлдөг.

*Гар утасны гүйцэтгэлийн оновчтой тооцооллын энерги*

Энэ хэсэгт төхөөрөмжийн/гар утас/ аппликейшн гүйцэтгэлийн энергийн зарцуулалтыг багасгах асуудлыг авч үзнэ. CPU-ны зарцуулсан энерги нь санах ой ба дэлгэцийн зарцуулсан энергиэс хамаагүй их тул зөвхөн төхөөрөмжинд аппликейшн гүйцэтгэх тооцооллын энергийг тодорхойлох болно. Иймээс хамгийн бага энергийн тулд асуудал нь чипийн клок давтамжийг оновчтойгоор тохируулах юм. Нэгдүгээрт, гар утасны гүйцэтгэлийн таамаглалт бүтцийг байгуулна. Дараа нь аппликейшнд зориулсан CPU цикл бүрийн клок давтамжийн төлөвлөлтийн асуудлыг тодорхойлох хэрэгтэй.

*Төхөөрөмжийн таамаглалт аппликейшн гүйцэтгэл*  
Аппликейшнд шаардлагатай CPU циклийн тоог  $W$  гэж тэмдэглэе. Өгөгдсөн оролтын өгөгдлийн хэмжээ  $L$ -ийн хувьд, [2], [26] –гаас



$$W=LX, \quad (6)$$

Энд  $X$  нь эмпирик тархалттай санамсаргүй хувьсагч юм[26]. Энэ тархалтын үнэлгээ нь аппликейшний үндсэн шинж, жишээ нь алгоритмын нийлмэл байдал, зэрэг шинжүүдээс хамаарна [27], [19], [28]. Энэ судалгаанд  $X$ -ийн магадлалын тархалтын функц/ probability distribution function PDF/ нь  $P(x)$  ба түүний тархалтын нягтын функц / cumulative distribution function CDF/ нь

$$F_X(x) = \Pr[X \leq x], \quad (7)$$

болох ба түүний хамтын нягтын функц /complementary cumulative distribution function CCDF/ нь  $F_X^c(\omega)$  гэж тэмдэглэгдэх ба дараах байдлаар илэрхийлэгдэнэ:

$$F_X^c(x) = 1 - F_X(x), \quad (8)$$

Иймээс ачаалал  $W$ -ийн CDF нь  $F_W(\omega) = F_X(\omega/L)$  ба түүний CCDF нь  $F_W^c(\omega) = F_X^c(\omega/L)$  болно.

[26], [27], [19]-д үзүүлсний дагуу бит бүр дэх CPU циклийн тоог Гамма тархалтаар загварчилж болно. Гамма тархалтын PDF нь дараах байдлаар өгөгдөнө:

$$p_X(x) = \frac{1}{\beta\Gamma(\alpha)} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}, \quad x > 0, \quad (9)$$

Энэ нь хоёр хүчин зүйлээс хамаарч байна(хэлбэр  $\alpha$  ба хэмжээ  $\beta$ ).

Энэ судалгаанд таамаглалт гүйцэтгэлийн шаардлагыг хөгжүүлэх болно. Ажилууд нь уян бодит хугацааны шаардлагыг/soft real-time requirement/ хангах ёстой. Энэ уян бодит цагийн шаардлага нь мультимедиа апплидешнүүдэд хэрэгтэй байдаг. Эндээс аппликейшн бүр эцсийн хугацааг  $\rho$  магадлалтайгаар,  $W_\rho$  CPU циклийг хуваарилснаар хангагдана.  $\rho$  хүчин зүйл нь аппликейшний биелэлийн магадлал/application completion probability ACP/ гэж нэрлэгдэнэ. Аппликейшний биелэлт нь энэ эцсийн хугацааг хангаж чадахгүй байгаа үед энэ нь биелэгдэхийн тул хамгийн их клок давтамжийг гүйцэтгэх болно. Аппликейшний биелэлтийн магадлал нь 1-тэй маш ойр үед нэмэлт тооцооллын энергийг бодох хэрэггүй байдаг. Үр дүнд нь аппликейшний биелэлтийн магадлал нь 1-тэй маш ойр байна гэж тооцогдоно.

### III. ХЭРЭГЖҮҮЛЭЛТ

#### A. Оновчтой аппликейшний гүйцэтгэлийн бодлого

Энэхүү хэсэгт оновчтой аппликейшний гүйцэтгэлийн босго бодлогыг судалсан. Өөрөөр хэлбэл, өгөгдсөн аппликейшний тодорхойлолт болох  $A(L,T)$  дагуу гар утасны гүйцэтгэлийн хамгийн бага тооцооллын энергийг үүлний гүйцэтгэлийн хамгийн бага дамжууллын энергитэй харьцуулах юм. Оновчтой аппликейшний гүйцэтгэлийн бодлого нь батерейны амьдрах хугацааг уртасгахын тулд төхөөрөмжийн аль нь бага энерги зарцуулж байгааг сонгох юм.

Энергийн зарцуулалт ба аппликейшний тодорхойлолт (өгөгдлийн хэмжээ ба эцсийн хугацааны саатал) дундаас гарсан хэмжүүрийн хуулиуд нь: гар утасны гүйцэтгэлийн хувьд

$$\epsilon_m^* \sim L^3 \text{ ба } \epsilon_m^* \sim T^{-2}$$

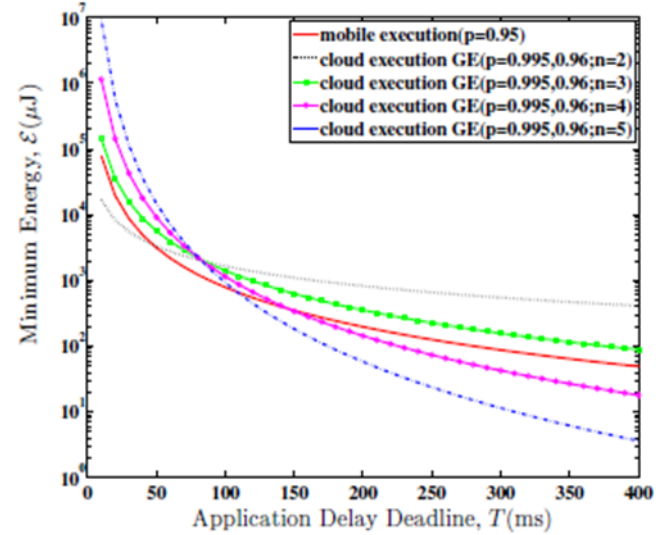
$$(10)$$

бол үүлний гүйцэтгэлийн хувьд

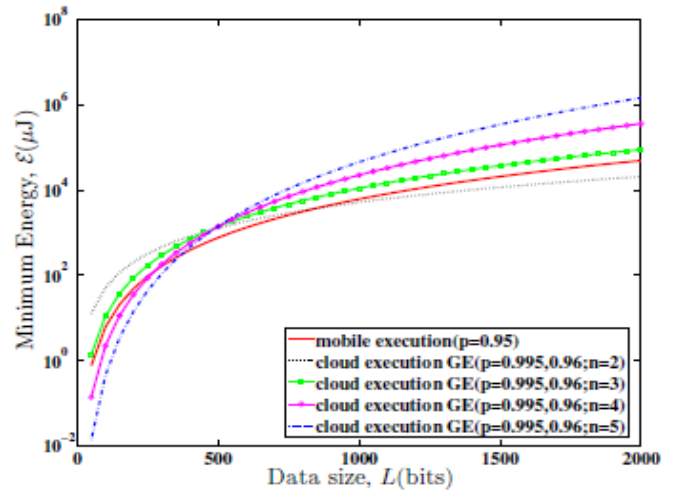
$$\epsilon_c^* \sim L^n \text{ ба } \epsilon_c^* \sim T^{-(n-1)}$$

$$(11)$$

байна. Иймээс үүлний гүйцэтгэл нь  $n < 3$  байхад их хэмжээний өгөгдлийн хувьд бага энерги зарцуулах бол  $n > 3$  байхад харьцангуй удаан эцсийн хугацааны саатлаар аппликейшнийг үүл рүү ачаалах болно.



Зураг 2. Хамгийн бага энерги  $\epsilon^*$  нь аппликейшний эцсийн хугацааны саатал  $T$  –аас хамаарсан функц



Зураг 3. Хамгийн бага энерги  $\epsilon^*$  нь өгөгдлийн хэмжээ  $L$  –ээс хамаарсан функц

Зураг 2 –д үзүүлсний дагуу төхөөрөмжийн гар утасны гүйцэтгэл ба үүлний гүйцэтгэлд зарцуулах хамгийн бага энергийг аппликейшний биелэлтийн эцсийн  $T$  хугацаанаас хамаарсан функцийг үзүүлсэн байна. Үүний дагуу хоёр тохиолдлыг авч үзнэ: (1)  $n$  утга 3 –аас бага үед үүлний гүйцэтгэл нь эцсийн хугацааны саатал нь босгоос доогуур байгаа үед илүү эрчим хүчинд хэмнэлттэй байна. Энэ нь  $n < 3$  үед үүлний гүйцэтгэлийн хэмжүүрийн хүчин зүйл нь гар утасны гүйцэтгэлийн хэмжүүрийн хүчин зүйл болох  $T^{-2}$  утгаас доогуур байгаатай холбоотой.

Хэрвээ  $n$  нь 3-аас их байх үед болон эцсийн хугацааны саатал нь босгоноос дээгүүр байх үед үүлний гүйцэтгэл нь илүү энерги хэмнэлттэй байна. Энэ нь үүлний гүйцэтгэлийн хэмжүүрийн хүчин зүйл нь гар утасны гүйцэтгэлийн хэмжүүрийн хүчин зүйл болох  $T^{-2}$  –оос илүү хурдан байгаатай холбоотой. Иймээс  $L$  нь тогтвортой үед  $n$  ганц гишүүнт зэрэг нь оновчтой гүйцэтгэлийн стратегид нөлөөлдөг.

Зураг 3 –д үзүүлсэнээр төхөөрөмжийн гар утасны гүйцэтгэл ба үүлний гүйцэтгэлийн зарцуулах хамгийн бага энергийг оролтын өгөгдлийн  $L$  хэмжээнээс хамаарсан функц байна. Үүний дагуу дараах 2 тохиолдлыг авч үзнэ:

1.  $n$  нь 3-аас бага мөн өгөгдлийн хэмжээ нь босгоос дээгүүр байх үед үүлний гүйцэтгэл нь эрчим хүчний хувьд илүү үр ашигтай байна. Энэ нь  $n < 3$  байхад үүлний гүйцэтгэлийн хэмжүүрийн хүчин зүйл нь гар утасны гүйцэтгэлийн хэмжүүрийн хүчин зүйл болох  $L^3$  –аас илүү удаан байна.

2. Хэрвээ  $n$  нь 3 –аас их үед болон оролтын өгөгдлийн хэмжээ нь босгоноос доогуур байгаа үед үүлний гүйцэтгэл нь эрчим хүчинд илүү хэмнэлттэй байна. Энэ нь  $n > 3$  байхад үүлний гүйцэтгэлийн хэмжүүрийн хүчин зүйл нь гар утасны гүйцэтгэлийн хэмжүүрийн хүчин зүйл болох  $L^3$  –аас илүү хурдан байна. Иймээс  $T$  нь тогтвортой байхад ганц гишүүнт зэрэг  $n$  нь оновчтой гүйцэтгэлийн стратегид нөлөөлнө. Нэмж хэлэхэд аппликейшнийг хаана гүйцэтгэхийг оновчтойгоор шийдсэнээр төхөөрөмжийн тодорхой хэмжээний энергийг хэмнэж болно. Жишээ нь, зураг 7-ийн хувьд  $A(800 \text{ бит}, 400 \text{ мс})$  аппликейшний тодорхойлолттой үед  $n=5$  байхад үүлний гүйцэтгэл нь гар утасны гүйцэтгэлтэй харьцуулахад 13 дахин бага энергийг зарцуулна.

### В. Гүйцэтгэлийн бодлогод зориулсан оновчтой ажиллагааны бүсүүд

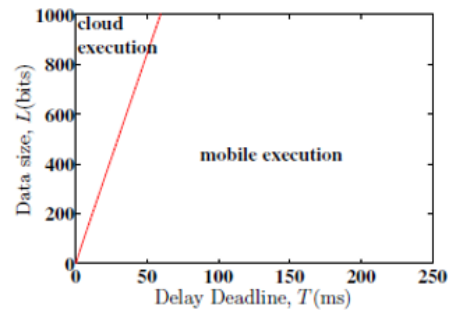
Энэ дэд хэсэгт бага хэмжээний гаралтын өгөгдөлтэй гар утасны аппликейшнд зориулсан оновчтой энергийн гүйцэтгэлийн бодлогыг тооцоолсон.

Нэгдүгээрт  $L$  нь 0-1000 бит ба  $T$  нь 0-250мс утгуудтай  $A(L,T)$  аппликейшний янз бүрийн тодорхойлолттой байхад гар утасны гүйцэтгэл ба үүлний гүйцэтгэлийн энергийн зарцуулалтыг тооцоолсон.

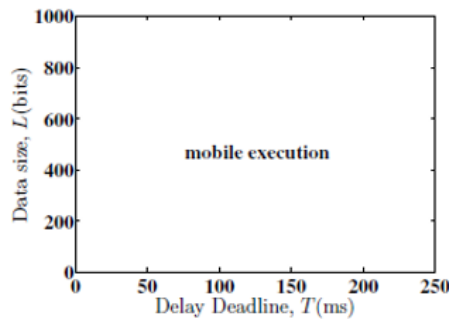
Зураг 4 –д янз бүрийн  $n$  утгатай үед гар утасны гүйцэтгэл эсвэл үүлний гүйцэтгэл илүү эрчим хүчинд хэмнэлттэй байгаа бүсүүдийг тодорхойлсон. Жишээ нь  $n=2$  байхад хоёр оновчтой ажиллагааны бүсийн хоорондын хил хязгаар нь зураас байна. Энэ тохиолдолд хэрвээ  $(T,L)$  цэг нь шугамаас дээгүүр байхад үүлний гүйцэтгэл нь энергийн хувьд илүү хэмнэлттэй бол эсрэг тохиолдолд гар утасны гүйцэтгэл нь илүү хэмнэлттэй байна. Гар утас ба үүлний гүйцэтгэлүүд ижил параметруудтэй бөгөөд  $n=3$  утгатай тохиолдлыг төхөөрөмжийнд ажиллуулах ёстой. Энэ нь  $n=3$  байхад үүлний гүйцэтгэлийн муруй нь гар утасны гүйцэтгэлээс үргэлж дээгүүр байх ба энэ нь гар утасны гүйцэтгэл бага энерги зарцуулж байгааг илтгэнэ.  $n=4$  байгаа тохиолдолд хоёр оновчтой ажиллагааны бүс хоорондын хил хязгаар нь шулуун байна. Хэдий тийм боловч энэ тохиолдолд

$(T,L)$  цэг нь шулуунаас доогуур байхад эрчим хүчинд илүү хэмнэлттэй, эсрэг тохиолдолд гар утасны гүйцэтгэл нь илүү хэмнэлттэй байна.

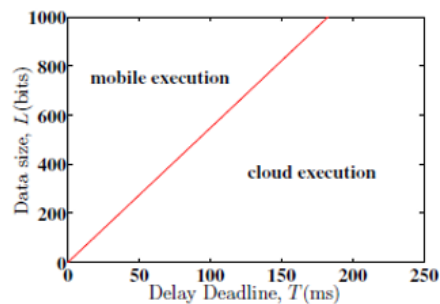
Дараа нь, энэ аргыг аппликейшний өөр параметруудад (CPU циклийн тооноос хамаарсан Гамма тархалтын хэмжүүрийн параметр ба хэлбэрийн параметр, дамжууллын загварын ганц гишүүнт зэрэг) аппликейшний гүйцэтгэлийн оновчтой бодлогыг тодорхойлохын тулд хөгжүүлэгдэнэ. Өмнөхтэй ижилхэнээр, гар утасны ба үүлний гүйцэтгэлийн шулуунаар тусгаарлагдсан оновчтой ажиллагааны бүсүүд тус тус олдоно.



(a)  $n=2$



(b)  $n=3$



(c)  $n=4$

Зураг 4. Оновчтой энергийн шийдвэрийн ажиллагааны бүсүүд

Зураг 4 –ийн ажиглалтуудыг үндэслэн гүйцэтгэлийн бодлогыг математик байдлаар тодорхойлъя. Өгөгдлийн үр ашигтай зарцуулалтын түвшинг өгөгдлийн оролтын хэмжээ ба эцсийн хугацааны саатал хоорондын харьцаагаар  $(R_s = L/T)$

илэрхийлэгдэх бол босго нь  $R_{th} = \left[ \frac{M}{C(n)} \right]^{\frac{1}{n-3}}$  гэж тэмдэглэгдэнэ.

Өгөгдлийн үр ашигтай зарцуулалтын түвшин нь гар утасны гүйцэтгэлийн өгөгдөл боловсруулах хурд мөн үүлний гүйцэтгэлийн өгөгдөл дамжууллын хурдтай хамааралтай байна.  $R_{th}$  нь ганц гишүүнт зэргээс  $(n)$  хамаарна.  $n$  нь өөр өөр утга авч болох тул теорем 6.1

–д өгөгдсөний дагуу гүйцэтгэлийн оновчтой энергийн өөр өөр шийдвэрүүд гарна.

*Теорем 6.1:* Оновчтой энергитэй гүйцэтгэлийн бодлого нь өгөгдлийн үр ашигтай зарцуулалтын түвшинг ( $R_e=L/T$ ) урьдчилан тодорхойлсон босготой

$$(R_{th} = \left[ \frac{M}{C(n)} \right]^{\frac{1}{n-3}}) \text{ харьцуулснаар тодорхойлогдоно.}$$

Төхөөрөмжийн оновчтой энергитэй гүйцэтгэл нь:

$$n < 3 \quad \text{гар утасны гүйцэтгэл хэрвээ} \\ R_e \leq R_{th} \\ \text{үүлний гүйцэтгэл хэрвээ } R_e > R_{th} \quad (7)$$

$$n > 3 \quad \text{гар утасны гүйцэтгэл хэрвээ} \\ R_e \geq R_{th} \\ \text{үүлний гүйцэтгэл хэрвээ } R_e < R_{th} \quad (8)$$

$$n = 3 \quad \text{гар утасны гүйцэтгэл хэрвээ} \\ M \leq C(n) \\ \text{үүлний гүйцэтгэл хэрвээ } M > C(n) \quad (9)$$

Теорем 6.1 нь геометр зүй тогтлоор тайлбарлагдана. Зураг 4 (a) ба 4 (c) дээр шулуун нь ажиллагааны бүсийг гар утасны гүйцэтгэл ба үүлний гүйцэтгэлд тус тус хуваадаг. Шийдвэрийн босго  $R_{th}$  нь шулууны налуу нь юм. Энэ нь энерги зарцуулалтын загварын коэффициентүүд, утасгүй дамжууллын загварын ганц гишүүнт зэргээс(n) хамаардаг.

Теорем 6.1 нь гаралтын бага өгөгдлийн хэмжээтэй(жишээ нь вирус илрүүлэлт, нүүр царай танилт, шатрын тоглоомууд гэх мэт) зарим гар утасны аппликейшнүүдэд тохирно. Аппликейшний тодорхойлолт  $A(L, T)$  нь янз бүрийн аппликейшнүүдэд тохирно. Үүлэн тооцоололд суурилсан антивирусны CloudAV гэсэн аппликейшнийг авч үзье. CloudAV нь хэрэглэгчдээс их хэмжээний оролтын өгөгдлийг авах ба гүнзгий тооцооллоор хортон эсвэл хүсээгүй контентийг илрүүлэн төхөөрөмжийн дотоод тусгай нөөцөд (GPS эсвэл мэдрэгчүүд) хандалгүйгээр гаралтын бага хэмжээний өгөгдлийг буцаана. Энэ аппликейшний шинж чанарыг харгалзан үзсэнээр хортоны илрүүлэлт нь гар утсан дээр эсвэл үүлэн дээр гүйцэтгэгдэхийг тодорхойлоход босгын бодлого нь тохиромжтой. Бодлого нь аппликейшний тодорхойлолт(файлын хэмжээ L ба аппликейшний биелэгдэж дуусах эцсийн хугацаа T), утасгүй дамжууллын загвар(ганц гишүүнт зэрэг n ба түүний энерги зарцуулалтын томъёо) ба энергийн коэффициентийн харьцаа(төхөөрөмжийн системийн чип дэх үр ашигтай шилжигдсэн эзлэхүүн k ба утасгүй сувгийн загварын энергийн коэффициент  $\lambda$  байна. Манай жишээнд  $\frac{\kappa}{\lambda} = 6.67 * 10^{-12}$ ). Өгөгдөл зарцуулалтын үр ашигтай түвшингийн(L/T) утгыг үнэлснээр оновчтой энергийн зарцуулалттай хортон илрүүлэх бодлогыг тодорхойлно. Хортон илрүүлэлтийг хаана гүйцэтгэхийг шийдсэнээр төхөөрөмжийн зарцуулах энергийг хэмнэнэ.

#### IV. ДҮГНЭЛТ

Гар утасны үүлэн тооцооллын тохиргоо нь уламжлалт клиент-сервер тооцооллын зохион байгуулалтаас нэлээд хэмжээгээр өөр байна. Энерги

нь батерейгээр тэжээгддэг төхөөрөмжүүдийн хувьд суурь хүчин зүйл бөгөөд үүл рүү тооцооллыг шилжүүлж байгаа үед чухал шалгуур болдог. Дотоод ба алсын тооцооллын суурь тэнцвэр нь энерги ба тооцооллын энергийн зөрүүгээр тодорхойлогдоно.

Хэдий тийм боловч гар утасны тооцооллын бүтцээс бодоход олон хүчин зүйлээс хамаарна. Үүл рүү нүүх өгөгдлийн харьцааны тооцоолол нь утасгүй харилцаа ба дотоод тооцооллын энергийн үр ашигтай байдлаас ба маш их хамааралтай. Тусгайлан төхөөрөмжинд зориулсан хэрэгжилтийн шийдвэрүүд нь тэнцвэрт нөлөөлдөг ч радикал хэмжээнд бага нөлөөлдөг. Мөн тооцооллын дамжуулал буюу offload-г хэрэглэгчдэд харагдах үйлдлүүдийн удаан саатлаас сэргийлэхийн тулд маш сайн загвар хэрэгтэй.

Тооцооллын дамжуулал нь зарим тохиолдолд энерги хэмнэхээс гадна гүйцэтгэлийг нэмэгдүүлдэг.

Утасгүй харилцааны хувьд ганцхан өгөгдлийн хэмжээ биш мөн тооцооллын загвар нь энергийн зарцуулалтанд чухал нөлөө үзүүлдэг

#### Ашигласан материал

- [1] M. Satyanarayanan, “Fundamental challenges in mobile computing,” Proc. 1996 ACM Symp. Principles of Distributed Computing, pp. 1–7.
- [2] A. P. Miettinen and J. K. Nurminen, “Energy efficiency of mobile clients in cloud computing,” in Proc. 2010 USENIX Conference on Hot Topics in Cloud Computing.
- [3] K. Kumar and Y. H. Lu, “Cloud computing for mobile users: can offloading computation save energy?” IEEE Computer, vol. 43, no. 4, pp. 51–56, 2010.
- [4] M. Armbrust, A. Fox, R. Griffith, A. Joseph, R. Katz, A. Konwinski, G. Lee, D. Patterson, A. Rabkin, I. Stoica, and M. Zaharia, “A view of cloud computing,” Commun. of the ACM, vol. 53, no. 4, pp. 50–58, 2010.
- [5] M. Satyanarayanan, R. C. P. Bahl, and N. Davies, “The case for Vmbased cloudlets in mobile computing,” IEEE Pervasive Computing, vol. 8, no. 4, pp. 14–23, 2009.
- [6] B. G. Chun and P. Maniatis, “Augmented smartphone applications through clone cloud execution,” in Proc. 2009 Conference on Hot Topics in Operating Systems.
- [7] X. W. Zhang, A. Kunjithapatham, S. Jeong, and S. Gibbs, “Towards an elastic application model for augmenting the computing capabilities of mobile devices with cloud computing,” Mobile Networks and Applications, vol. 16, no. 3, pp. 270–284, 2011.
- [8] B. G. Chun, S. Ihm, P. Maniatis, M. Naik, and A. Patti, “Clonecloud: elastic execution between mobile device and cloud,” in Proc. 2011 European Conference on Computer Systems, pp. 301–314.
- [9] J. M. Rabaey, Digital Integrated Circuits. Prentice Hall, 1996.
- [10] Y. Wen, W. Zhang, and H. Luo, “Energy-optimal mobile application execution: taming resource-poor mobile devices with cloud clones,” in Proc. 2012 IEEE INFOCOM, pp. 2716–2720.
- [11] J. Oberheide, E. Cooke, and F. Jahanian, “CloudAV: N-version antivirus in the network cloud,” in Proc. 2008 Conference on Security Symposium, pp. 91–106.