

Тэмүүлэл хиймэл дагуулын радио дохионы тархалтын тооцоо

Б.Сумьяабазар^{1*}, Х.Амгалан¹, М.Сүндэрмаа¹,
Т.Төртогтох¹, Д.Эрдэнэбаатар¹

¹ Монгол Улсын Их Сургууль, Нано хиймэл дагуул хөгжүүлэлтийн лаборатори 14210, Монгол улс

Энэ ажлаар 1U хэмжээтэй, монгол орны зургийг авч илгээх гол даалгавартай, дэлхийн нам тойрог замд ажиллах, UHF сонирхогчийн давтамжийн мужид BFSK модуляцаар мэдээ дамжуулах Тэмүүлэл хиймэл дагуулын радио долгионы тархалтын тооцоог хийж гүйцэтгэсэн. Хиймэл дагуулын холбооны системийн үзүүлэлтүүд болон радио дохионы чадлын алдагдал үүсгэгч хүчин зүйлсийг авч үзсэн.

Түлхүүр үг: Кубсат, хиймэл дагуулын холбоо, тархалтын тооцоо, чөлөөт замын алдагдал, зурвасын өргөн, давтамж, радио долгион.

I. УДИРТГАЛ

Кубсат гэдэг нь куб хэлбэр бүхий хиймэл дагуулын төрөл бөгөөд төсөр өртгөөр, харилцаа холбооны үйлчилгээ, дэлхийг тандах, технологийн туршилт хийх, сансрын судалгаа хийх боломж олгодог тул тус чиглэлд судалгаа, хөгжүүлэлт эрчимтэй хийгдэх болсон[2]. Хэмжээсний хувьд нэг нэгж(1U) кубсат нь 10см x 10см x 10см эзэлхүүнтэй, 1.3кг -аас хэтрэхгүй жинтэй байна. 1U, 2U гэх мэтээр 24U хүртэлх хэмжээтэй кубсатыг бүтээдэг[3]. Хямд өртөг, богино хугацаанд бүтээх боломж, хялбар дизайнтай учир их дээд сургуулийн оюутан залуус, судлаачид кубсат бүтээх үйл явцад оролцож сансартай холбоотой туршлага хуримтлуулах, электроникийн систем инженерчлэлд суралцах боломжтой байдаг.

Тэмүүлэл хиймэл дагуулын гол даалгавар нь Монгол орны зургийг дарж газрын станц руу илгээх, дэд даалгавруудад орбитод байх үеийн програмчлал, өгөгдөл хадгалах, илгээх, мөрөөдлөө сансарт илгээх нар багтана. Тус хиймэл дагуул нь Birds-1 төслийн Мазаалай хиймэл дагуулын дараагийн хувилбар ба монгол улсад дотооддоо бүтээж буй анхны хиймэл дагуул гэдгээрээ онцлогтой. Төслийн хүрээнд сансрын технологийг оюутан залууст таниулан эзэмшүүлэхийг зорилт болгосон.

Хиймэл дагуулын холбооны систем гэдэг нь газрын станц ба хиймэл дагуулын хоорондын найдвартай харилцаа холбоог зохицуулдаг техник хангамж ба програм хангамжийн системийг нэрлэнэ. Одоогоор холбооны системүүдийн хэрэглэдэг гол хоёр технологиудад радио долгионы, оптик холбооны технологи нар багтана. Оптик холбооны технологи нь харьцангуй шинэ арга юм. Харин уламжлалт радио долгионы

технологи нь илүү өргөнөөр ашиглагдсан хэвээр байна[2]. Тэмүүлэл хиймэл дагуулын холбооны систем ч мөн радио долгионы технологийг ашиглана.

Радио дохионы тархалтын тооцоо гэдэг нь илгээгч хүлээн авагчийн хооронд долгионы чадлын хувьд найдвартай холбоо тогтооход шаардлагатай үзүүлэлтийг илэрхийлэх параметруудийн цогцын нэрлэнэ[4].

II. ОНОЛ БОЛОН ТООЦОО

A. Холбооны системийн шаардлагууд

Цахилгаан соронзон долгионы давтамжийн мужуудад хуваан ангилдаг ба радио давтамжийн муж нь 3кГц – 300гГц байна[5]. Хиймэл дагуулд радио давтамжийн UHF муж буюу 300МГц – 3гГц давтамжтай, 1м – 10см долгионы урттай хэсгийг өргөн ашигладаг. UHF мужийн 432MHz – 438MHz хэсэг сонирхогчийн мужид хамарна[21]. Тэмүүлэл хиймэл дагуулын хувьд сонирхогчийн UHF мужийн 437.135MHz давтамж дээр BFSK модуляцын аргаар ажиллуулахыг төлөвлөж буй.

Зурвасын өргөн ба мэдээ дамжуулах хурд: Зурвасын өргөн нь мэдээ дамжуулах хурдтай шууд хамааралтай[6]. UHF мужид AX.25 протоколыг ашиглан бүрэн-дуплекс холбоо тогтоож мэдээ дамжуулах хурдыг нэмэгдүүлдэг. Тэмүүлэл хиймэл дагуултай ижил төстэй даалгаврыг сансарт амжилттай гүйцэтгэсэн Birds-3, Birds-4 төслүүдийн үзүүлэлттэй нийцүүлэн мэдээ дамжуулах хурдыг 9600бит/с, зурвасын өргөнийг 26кГц байлгах аргаар сонгосон [18,22].

Зөөгч шуугианы харьцаа: Дохио шуугианы харьцааг тодорхойлохын тулд бит алдааны харьцааг(BER) 10^{-5} байхаар тооцоолж[22].

* sumyafire1@gmail.com

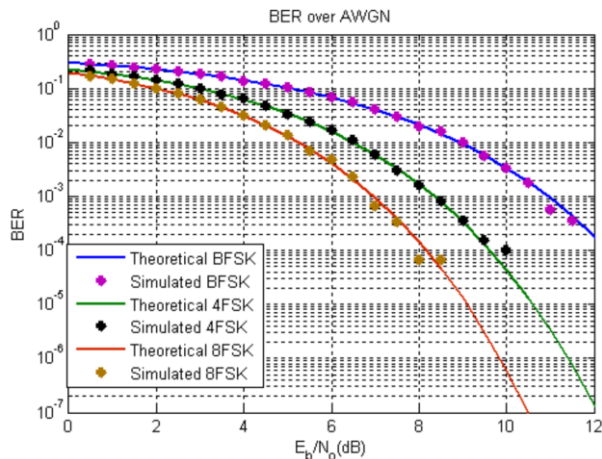
Энэ нь илгээгч хүлээн авагчийн хооронд 100000 бит мэдээ дамжихад 1 бит алдахыг зөвшөөрөх үзүүлэлт болно. Алдагдалгүй мэдээ дамжуулахад шаардлагатай Зөөгч шуугианы харьцааг тодорхойлохын тулд тэгшитгэл (1) -ийг хэрэглэнэ. Хүснэгт 1-т хэмжигдэхүүний тайлбарыг үзүүлэв.

$$\frac{S}{N} = \frac{E_b}{N_o} \cdot \frac{R_b}{B} \quad (1)$$

1-р хүснэгт. Хэмжигдэхүүний тайлбар

$\frac{E_b}{N_o}$	Дохио шуугианы харьцаа (Модуляцын техник, бит алдааны харьцаанаас хамаарна)
R_b	Мэдээ дамжуулах хурд
B	Зурвасын өргөн

Зураг 1-ээс үзвэл бит алдааны харьцаа 10^{-5} байх үеийн BFSK дохио шуугианы харьцаа $\frac{E_b}{N_o} = 13\text{дБ}$ байна.



1-р зураг. Дохио шуугианы харьцаа ба бит алдааны харьцааны хамаарал[9]

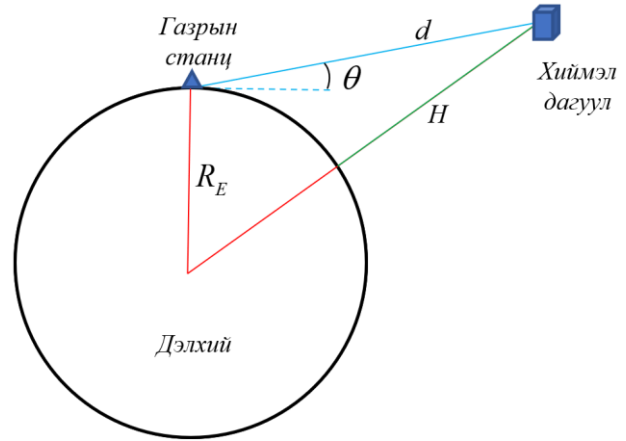
Эндээс зөөгч шуугианы харьцааг тооцоолбол тэгшитгэл 2 дахь үр дүн гарна.

$$\frac{S}{N} = 13\text{дБ} \cdot \frac{9.6\text{кГц}}{26\text{кГц}} = 4.8\text{дБ} \quad (2)$$

В. Хиймэл дагуулын орбит

Тэмүүлэл хиймэл дагуул дэлхийн нам тойрог замаар яг газрын станцын дээгүүр нисэх үедээ далайн түвшнээс дээш 400км орчим өндөрт байна. Чөлөөт замын алдагдлыг тооцоолохын тулд тэдгээрийн хооронд мэдээлэл дамжих боломжтой хамгийн хол зайгаар тооцно. Зураг 2-т үзүүлснээр R_E – Дэлхийн радиус(6371км), D

- Хиймэл дагуул ба газрын станц хоорондын зай, H - Хиймэл дагуул далайн түвшнээс алслагдах зай (Тэмүүлэл хиймэл дагуулын хувьд 400км), θ – Хиймэл дагуул газрын станцыг холбосон шулуун хэвтээ тэнхлэгтэй үүсгэх өнцөг(elevation).



2-р зураг. Хиймэл дагуул ба газрын станц, жишээ байрлал

Газрын станц хиймэл дагуулын хоорондох D зайг тэгшитгэл 3 -аар тооцоолно.

$$D = -R_E \cdot \sin \theta + \sqrt{(R_E \cdot \sin \theta)^2 + H^2 + 2 \cdot R_E \cdot H} \quad (3)$$

Хүснэгт 3 -т θ өнцгийн 6 тохиолдолд D зайг тооцоолсныг үзүүлэв.

3-р хүснэгт. Хиймэл дагуул газрын станцаас алслагдах зай

	Өнцөг (θ) [градус]	Зай (D) [км]
1.	10	1440
2.	20	984
3.	40	598
4.	60	457
5.	80	500
6.	90	400

Хүснэгт 3 -ын үр дүнгээс 10 градус дээр газрын станц хиймэл дагуулын хоорондын D зай 1440км байна. Өнцөг $\theta = 10$ градус байх үеийн зайгаар чөлөөт замын алдагдалыг тооцоолно[18].

Дэлхийн нам тойрог замын хиймэл дагуулууд 7.8км/с хурдтай нисдэг[10]. Тиймээс 400км өндөрт нисч буй хиймэл дагуул 91 минутад дэлхийг нэг бүтэн тойрно. Өдөрт 16 удаа дэлхийг тойрно. Нэг удаад газрын станцтай мэдээ солилцох хугацаа 7 – 12 минутаар тооцдог.

С. Чөлөөт замын алдагдалын тооцоо

Радио долгионы тархалтын үндсэн алдагдал буюу чөлөөт замын алдагдал нь илгээгч хүлээн авагчийн хоорондын зай болон долгионы давтамжаас хамаардаг. Тус алдагдалын хэмжээг тэгшитгэл (4) -аар тооцоолно.

$$L_{FSPL} = 20 \cdot \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad (4)$$

Тэгшитгэл (5)-т үзүүлснээр Тэмүүлэл хиймэл дагуулын радио дохионы долгионы уртыг тооцоолбол:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{М}}{\text{с}}}{437.175 \text{МГц}} = 68.6 \text{см} \quad (5)$$

Өмнөх өгөгдлүүдийг ашиглан чөлөөт замын алдагдлыг тооцоолбол тэгшитгэл (6) -д үзүүлсэн үр дүн гарна.

$$L_{FSPL} = 20 \cdot \left(\frac{4\pi \cdot 1440 \text{км}}{68.6 \text{см}} \right) = 148.4 \text{дБ} \quad (6)$$

Мөн [1] дэх холбоосоор нэвтэрч онлайн тооцоолуур ашиглан чөлөөт замын алдагдлыг тооцоолж болно. Тус тооцоолуураар Тэмүүлэл хиймэл дагуулын радио дохионы чөлөөт замын алдагдлыг бодсон үр дүнг Зураг 3 -т үзүүлэв.

Calculation
Distance: 1440 Kilometers
Frequency: 437.135 MHz
Result: Free Space Path Loss: 148.4 dB
Find Related Products >

3-р зураг. Чөлөөт замын алдагдалыг тооцоолсон үр дүн [1]

Д. Бусад алдагдлууд

Борооны алдагдал: Борооны алдагдал нь давтамжаас шууд хамаардаг бөгөөд VHF-ээс нам давтамжийн жишээ дээр тооцохгүй байж болно. S зурвасын 2.2ГГц (Тэмүүлэл хиймэл дагуулын ажиллах давтамжаас 5 дахин их) давтамж дээрх жишээ 0.093дБ байна[4]. Тиймээс Тэмүүлэл хиймэл дагуул дээр тус алдагдлыг 0.1дБ -ээр тооцоход хангалттай.

Туйлшралын нөлөө: Кубсатууд шугаман эсвэл цагариг туйлшралтай антеныг ашигладаг. Тэмүүлэл хиймэл дагуулд шугаман туйлшралтай диполь антеныг сонгосон. Хиймэл дагуулын антены туйлшрал нэг хэвийн тогтвортой байвал илүү ашигтай байх боловч сансраас ирж буй дохионы хувьд тийм байдаггүй. Радио долгионы давтамж 2ГГц -ээс

бага тохиолдолд түүнд үзүүлэх дэлхийн соронзон орны нөлөө өсөж туйлшрал нь өөрчлөгддөг. Тус үл мэдэгдэх өөрчлөлтийг хялбарчилж хүлээж авахын тулд газрын станц дээр цагариг туйлшралтай антен ашиглаад туйлшралтай холбоотой алдагдлыг 3дБ -ээр тооцоолж болно[4].

Ионосфер давхаргын алдагдал: Ионосфер давхарга дахь ионы нягтын огцом өөрчлөлтөөс үүдэн 3ГГц-ээс бага давтамжтай долгионы далайц, фаз, туйлшрал, тархалтын чиглэл зэрэгт өөрчлөлт ордог[13]. Birds-3 төслөөс эшлэн тус алдагдлыг 0.4дБ -ээр сонгов[18].

Антену чиглэлийн алдагдал: Тэмүүлэл хиймэл дагуул радио дохионы долгионы уртын хагастай тэнцүү урттай диполь антен ашиглана. Түүний цацрагийн өргөн $\theta_{3dB} = 32$ градус байна[16]. Хиймэл дагуулын чиглэлийн алдагд тооцоолоход dipole антены хувьд тэгшитгэл 6-г ашиглана[17].

$$L_{\theta} = -12 \left(\frac{e}{\theta} \right)^2 \quad (6)$$

Birds-3 төсөлтэй нийцүүлэн диполь антены чиглэлийн алдааны θ өнцгийг 13 градусаар сонгож, чиглэлээс үүдэлтэй радио долгионы чадлын алдагдлыг 5дБ байхаар тооцов. МУИС дээрх газрын станцын хүлээн авагч төхөөрөмж Birds-3 -ын мөн төхөөрөмжтэй техникийн үзүүлэлтийн хувьд ижил тул газрын станцын чиглэлээс үүдэлтэй алдагдлыг 4дБ байхаар сонгов[18].

Е. Хүлээн авагч болон илгээгч төхөөрөмжүүдийн техникийн үзүүлэлтүүд

Антену өсгөлт: Тэмүүлэл хиймэл дагуулын хувьд Birds-3 хиймэл дагуулын адил диполь антен, газрын станц яги антен ашиглана. Иймд Birds-3 -аас эшлэн Тэмүүлэлийн антены өсгөлтийг 1.1дБ, газрын станцын өсгөлтийг 18дБ -ээр тооцно[18].

Радио модуль төхөөрөмж: Радио долгионыг илгээгч хүлээн авагч модулиар RFM98PW -ийг сонгосон. Модулийн гаралтын радио дохионы чадал үйлдвэрийн тодорхойлолтоор 1Вт буюу 30дБм хүртэл, мэдээ дамжуулах хурд нь 300кбит/с хүртэл байна[19]. Тус модуль олон нийтэд нээлттэй худалдаалагддаг, олдоц сайн ба үнэ хямд. Тэмүүлэл хиймэл дагуулын радио

дохионы гаралтын чадлыг Birds-3 төсөлтэй нийцүүлэн 0.5Вт буюу 27дБ -ээр тооцно[18].

Ш. ҮР ДҮН, ДҮГНЭЛТ

А. Тархалтын тооцооны үр дүн

Өмнөх хэсгүүдэд тодорхойлсон радио дохионы чадлын алдагдал болон өсгөлтүүдийг нэгтгээд хүснэгт 4 -т үзүүлэв.

4-р хүснэгт. Тархалтын тооцооны параметрууд ба тооцооны үр дүн

1.	Хиймэл дагуулын тойрог замын өндөр	400км
2.	Мэдээ дамжуулах хамгийн хол зай	984км
3.	Давтамж	437.175МГц
4.	Зурвасын өргөн	26кГц
5.	Задгай сансрын алдагдал	148.4дБ
Хиймэл дагуул		
6.	Радио дохионы гаралтын чадал	27дБм
7.	Чиглэлээс үүдэлтэй алдагдал	5 дБм
8.	Антенны туйлшралын алдагдал	3 дБм
9.	Антенны өсгөлт	1.1дБм
10.	Дамжуулагч кабелийн алдагдал [18]	1дБм
11.	Ионосфер давхаргын алдагдал	0.4дБм
12.	Борооны алдагдал	0.1дБм
Газрын станц		
13.	Газрын станцын өсгөлт	18дБ
14.	Газрын станц чиглэлийн алдагдал	4дБ
15.	Газрын станц талын дамжуулагч дээрх алдагдал [18]	3дБ
16.	Хүлээн авагч дээр ирэх дохионы чадал	-115.5дБм
17.	Зөөгч шуугианы харьцаа	4.8дБ
18.	Газрын станцын мэдрэг	-130дБм
19.	Холбооны нөөц	6.4дБм

Газрын станц дээр хүлээж авах дохионы чадал зөөгч шуугианы харьцааны нөхцөлийг хангаж байна. Холбооны нөөцийн хувьд Birds-3, Birds-4 төслийн үзүүлэлтэд нийцсэн үр дүн гарсан[18,22].

В. Дүгнэлт

Тэмүүлэл хиймэл дагуулын радио дохионы тархалтын тооцоог хийж гүйцэтгэсэн. RFM98PW радио төхөөрөмжөөр бүтээсэн холбооны системийн радио дохионы тархалтын тооцоогоор сансраас газрын станцтай амжилттай холбоо тогтоох боломжтой гэж үзсэн.

ТАЛАРХАЛ

Тэмүүлэл төслийн удирдагч, дэд профессор, доктор багш Т.Төртогтох, Д.Эрдэнэбаатар нартаа, холбооны систем багийн гишүүн Х.Амгалан, М.Сүндэрмаа болон төслийн багийн бүх залуустаа талархал илэрхийлж байна.

НОМ ЗҮЙ

- [1] WWW.PASTERNAK.COM/T-CALCULATOR-FSPL.ASPX
- [2] CubeSat Communications: Recent Advances and Future Challenges, <https://ieeexplore.ieee.org/document/9079470>
- [3] www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/cubesat/what-is-a-cubesat.asp
- [4] Link budget analysis for a proposed Cubesat Earth observation mission, <https://ieeexplore.ieee.org/document/8400026>
- [5] www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/outreach/funfacts/what_are_radio_waves
- [6] www.geeksforsatellites.org/difference-between-bandwidth-and-data-rate/
- [7] 9600 baud packet radio modem design J. Miller, in Papers of ARRL 7th Computer Networking Conference, USA, Oct. 1988
- [8] ARU-R1 VHF Handbook. International Amateur Radio Union, Nov. 2017
- [9] BER Performance of M-ary FSK Modulation over AWGN and Rayleigh Fading Channels, Yazen Saifuldeen Almashhadani, www.iasj.net/iasj/download/9602f3efa1784af5
- [10] www.oceanweb.com/leo-satellites/
- [11] ubirds3.birds-project.com/wpcontent/uploads/2018/11/BIRDS-3_Link_Budget.pdf
- [12] www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/faraday-effect
- [13] Small satellite link budget calculation, Marcos Arias, Fernando Aguado, 2016
- [14] ITU Recommendation P.531-13: Ionospheric propagation data and prediction methods required for the design of satellite services and systems, International Telecommunication Union.
- [15] P. Kullstam and M. Keskinen, "Ionospheric scintillation effects on UHF satellite communications," in 21st Century Military Communications Conference Proceedings MILCOM 2000, Los Angeles, USA.
- [16] www.techplayon.com/antenna-gain-and-antenna-beam-calculation/
- [17] Link budget analysis, Justin Rhodes

- [18] birds3.birds-project.com/wp-content/uploads/2018/11/BIRDS-3_Link_Budget.pdf
- [19] RFM95PW datasheet, www.hoperf.com/modules/lora/RFM98P.html
- [20] www.techopedia.com/definition/14828/multiple-frequency-shift-keying-mfsk
- [21] www.spaceacademy.net.au/spacelink/radiosp ace.htm
- [22] birds-project.com/birds1/files/BIRDS4_Link_Budget_20190529.pdf

ABSTRACT

In this work, the link budget analysis of the 1U-sized Temuulel satellite, which has the main task of taking pictures of Mongolia and transmitting information in the UHF amateur frequency range, LEO orbit, and FSK modulation, was completed. Satellite communication system parameters and signal power loss factors are discussed.

АННОТАЦИЯ

В данной работе был выполнен анализ бюджета связи спутника Temuulel размером 1U, работающего на LEO-орбите и основной задачей которого является фотографирование Монголии и передача информации модуляцией FSK в диапазоне любительских частот UHF. Обсуждены параметры системы спутниковой связи и факторы потерь мощности сигнала.