

Монгол орны нутаг дэвсгэр дээр Ки зурвасын радио долгионы тархалтанд борооны улмаас үүсэх унтрал

Г.Бямбахишиг, С.Жамъян, О.Цэнд-Аюуш, Ж.Нямжав

Монгол Улсын Их Сургууль, Хэрэглээний Шинжлэх Ухаан, Инженерчлэлийн Сургууль
Электроник, Холбооны Инженерчлэлийн Тэнхим

Цахим шуудан: {Byambakhishig, Jamiyan, Tsendayush, [Nyamjav](mailto:Nyamjav@seas.num.edu.mn)}@seas.num.edu.mn

Хураангуй— Энэхүү судалгааны ажлаар 1957-2001оны хоорондох 44 жилийн турш хийсэн цаг уурын хэмжилтийг агуулсан ERA40 өгөгдлийн санд тулгуурлан ITU P.837-6 аргыг хэрэглэн борооны эрчмийн статистик түгэлтийг Монгол орны нийт нутаг дэвсгэр дээр тодорхойлсон. Үүн дээрээ тулгуурлан Монгол орны нийт нутаг дэвсгэрт телевизийн нэвтрүүлгийг хүргэхэд ашиглаж байгаа Apstar 5 хиймэл дагуулын Ки зурвасын радиодолгионд борооны улмаас үүсэх унтралын статистик түгэлтийг ITU-R P618-11 аргыг хэрэглэн тооцоолж улмаар телевизийн дохионы чанарыг харуулах Eb/No харьцааг тодорхойлсон. Тооцоог Matlab ашиглан хийсэн ба үр дүнг Монгол орны газрын зураг дээр тоон утгын хүрээ дүрслэлээр харуулсан болно.

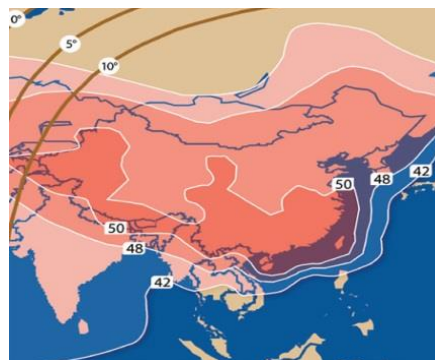
Түлхүүр үг— ITU, ERA40, борооны эрчим, борооны унтрал.

I. ОРШИЛ

10ГГц-ээс дээш давтамжтай радио долгионы тархалт цас, бороо, шороон шуурга гэх мэт цаг уурын үзэгдэлээс ихээхэн хамаардаг ба эдгээрээс хамгийн их нөлөөлдөг нь бороо юм. Хатуу төлөвтэй цасан ширхэг болон агаарт дэгдсэн шорооны жижиг тоосонцортой харьцуулахад борооны дусал шингэн төлөвтэй учир радио долгионыг илүү ихээр шингээж сарьниулдаг бөгөөд үүний улмаас радио долгионы чадал унтарч тархалт нь хязгаарлагддаг. Радиодолгионд борооны улмаас үүсэх энэ унтрал давтамж ихсэхэд дагаад өсөж байснаа 100 ГГц-ээс дээш давтамжийн мужид тогтворжиж ерөнхийдөө ханасан шинжтэй болдог[1]. Хиймэл дагуулын болон газрын радиохолбооны системд 10 ГГц болон түүнээс дээш давтамжтай радиодолгион ашиглахаар бол холбооны системийн найдвартай тасралтгүй байдлыг хангахын тулд радиодолгионд тухайн газар нутагт орох борооны улмаас үүсэх унтралыг зайлшгүй тооцох статистик түгэлт шаардлагатай юм. Радиодолгионы тархалтын хувьд бороо нь 0.1-ээс 5 хүртэлх мм хэмжээтэй усны дуслуудаас тогтсон орчин бөгөөд унтралыг тодорхойлох гол хүчин зүйл нь борооны дуслын хэмжээний түгэлт болдог. Нөгөө талаас цаг уурын үзэгдэлийн хувьд бороог нэгж талбайд нэгж хугацаанд цугларах усны түвшин болох борооны эрчим гэдэг хэмжигдэхүүнээр тодорхойлдог бөгөөд үүнийг тодорхойлох гол хүчин зүйл нь мөн л борооны дуслын хэмжээний түгэлт байдаг. Үүний улмаас борооны эрчим ба радиодолгионд борооны улмаас үүсэх унтрал

хоёрын хоорондох хүчтэй хамаарал ажиглагддаг. Иймд радиодолгионд борооны улмаас үүсэх унтралын (цаашид борооны унтрал гэнэ.) түгэлтийг таамаглан тооцоолох олон аргачлал борооны эрчмийн түгэлт дээр тулгаарласан байдаг[2].

Монгол орны хувьд телевизийн нэвтрүүлгийг хөдөө орон нутагт түгээдэг DDISH компани нь геотогтвортой орбитын уртрагын 138.04 градуст байрладаг Apstar 5 хиймэл дагуулын Ки зурвасын нэг транспондерийг ашигладаг. (Зураг 1) Энэ Ки зурвасын радиодолгионы тархалтанд Монгол орны нийт нутаг дэвсгэрт үүсэх борооны унтралын түгэлтийг ITU-н аргачлал ашиглан тооцоо хийлээ.



Зураг 1: Apstar 5 хиймэл дагуулын Ки зурвасын транспондерийн хамрах хүрээ

II. СУДАЛГААНЫ АРГАЧЛАЛ

A. Борооны эрчмийг таамаглах арга

Борооны эрчмийг таамаглах хэд хэдэн аргууд байдаг. Энэ ажлаар борооны эрчмийг тооцоолохдоо ITU P.837-6 аргыг ашигласан. Мөн (1957 - 2001) оны хооронд хэмжилт хийсэн ERA40 өгөгдлийн сан дээр үндэслэн тооцоогоо хийсэн. Оролтын параметрууд болох тухайн мужид 6 цаг тутамд бороо орох магадлал(P_{r6}), нэг жилд монгол орны нутаг дэвсгэрийн хэмжээнд орох нийт хур тунадас(M_t), β коэффициентийг ашиглан борооны эрчмийн түгэлтийг тооцоолсон.

Алхам 1: Аадар бороог тооцоолох

$$M_c = \beta * M_t \quad (2.1)$$

Зөөлөн бороог тооцоолох

$$M_s = (1 - \beta) * M_t \quad (2.2)$$

Алхам 2: Жилд дунджаар бороо орох магадлал

$$P_o(lat, lon) = P_{r6}(lat, lon) \left(1 - e^{-0.0079(M_s(lat, lon)/p_{r6}(lat, lon))} \right) \quad (2.3)$$

Алхам 3: Борооны эрчмийг тооцоолох

$$R_p(lat, lon) = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (2.4)$$

$$A = a * b \quad (2.4a)$$

$$B = a + c \ln(p/p_o(lat, lon)) \quad (2.4b)$$

$$C = \ln(p/p_o(lat, lon)) \quad (2.4c)$$

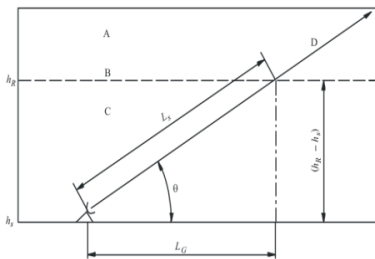
$$a = 1.09 \quad (2.4d)$$

$$c = 26.02b \quad (2.4e)$$

$$b = \frac{(M_c(lat, lon) + M_s(lat, lon))}{21797p_o} \quad (2.4f)$$

В. Борооны улмаас үүсэх унтралын түгэлт

Борооны унтралын түгэлтийг таамаглах хэд хэдэн загварууд дэлхий дахинд хэвлэгдсэн байдаг. Энэ талаарх нарийн мэдээллийг COST 255-с авч болно[4]. Монголын орны хэмжээнд борооны унтралыг боловсруулхадаа ITU-R P618-11 загварыг ашигласан. ITU-н борооны унтралыг таамаглах загварыг найман ялгаатай аргачлалаас дундажлаж гаргаж авсан байдаг. Зураг 2-т радио долгионы тархалтын замын дагуух бороотой байх үе буюу борооны унтралыг таамаглахад шаардлагатай оролтын параметруудийн бүдүүвч зургийг харуулж байна. А нь хөлдүү хур тунадас, В нь борооны өндөр, С нь шингэн хур тунадас, D нь радио долгионы тархалтын зам, L_s нь радио долгионы тархалтын дагуух бороотой байх үеийн урт, θ нь өргөлтийн өнцөг, h_R нь далайн түвшинээс дээших өндөр, h_s нь үүлний өндөр, L_G нь хэвтээ тэнхлэгийн дагуух бороотой байх үеийн урт юм.



Зураг 2: Радио долгионы тархалтын зам

Борооны унтралын ерөнхий томъёог доор харуулж байна. k болон α нь давтамж болон туйлшралаас хамаарах кэффициентууд юм.

$$A = \int_0^L k * R^\alpha(l) dl = k * R_{eff}^\alpha * L_{eff} \quad (2.5)$$

Радио долгион тархахад бороотой байх үеийн уртыг (L_{eff}) борооны эрчмийн түгэлтээс хамааруулаад тооцоолж олж болно.

$$L_{o.01} = f_1(R_{0.01}) \quad (2.6)$$

P_{r6}, M_t, M_c –ээс түгэлтийн 0.01% -д харгалзах борооны эрчим болон жилд дунджаар бороо орох магадлалыг тооцоолно.

$$(p_o, R_{0.01}) = f_2(P_{r6}, M_t, M_c) \quad (2.7)$$

Жилд дунджаар бороо орох магадлал болон түгэлтийн 0.01% -д харгалзах борооны эрчимээс түгэлтийн 0.01% -д харгалзах борооны унтралыг тооцно.

$$A_{0.01} = f_3(p_o, R_{0.01}) \quad (2.8)$$

Дараах томъёог ашиглан борооны унтралыг дурын хугацаанд тооцоолж болно.

$$A_p = f_4(A_{0.01}, p) \quad (2.9)$$

С. Радио холболтын тооцоолол (Link Budget)

Apsatr 5 хиймэл дагуулын цацсан радио долгион хэрэглэгчдэд хүрэхдээ хэр зэрэг унтралттай байгааг мөн энэ радио долгионы тархалтанд борооны улмаас үүсэж байгаа унтралыг тооцоолно. Хөдөө орон нутагт телевизийн нэвтрүүлгийг түгээдэг DDISH компани нь 8PSK3/4 модуляци харин Юнивишн компани нь 8PSK2/3 модуляцийг ашигладаг. Модуляцаасаа хамаараад хүлээн авагч дээрх босго утга болон битийн хурд нь өөр өөр байдаг. Ерөнхийдөө аналог холболтын чанарыг үнэлэхдээ дохио шуугианы харьцааг (C/N) тооцоолдог бол тоон холболтонд битийн алдааны эрчмийг (BER) тодорхойлох нь чухал юм. Тэгшитгэл (2.10)д харуулсаны дагуу BER-г тооцоолоход битийн энерги болон шуугианы нягтын харьцааг E_b/N_0 тооцоолох шаардлагатай. Манай тохиолдолд BER нь 10⁻⁷ -аас бага байх ёстой ба

E_b/N_0 нь 4.431dB-ээс их байх ёстой. Доорх оролтын параметруудийг ашиглан дараах алхамуудаар тооцоолол хийнэ.

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{E_b/N_0}) \quad (2.10)$$

EIRP - Нэвтрүүлэгчээс илгээж буй дохионы түвшин (dB)

T_A - Нэвтрүүлэгчийн антенны шуугианы температур (К)

T_B - Хүлээн авагчийн антенны шуугианы температур (К)

V - Зурвасын өргөн (МГц)

R_b - Битийн хурд (бит/с)

Δ - Хиймэл дагуулын уртраг болон газрын антенны уртрагийн ялгавар (градус)

k - Больцманы тогтмол ($1,38 * 10^{-23}$)

θ - Хүлээн авагч антенны өргөрөг (градус)

η - Антенны бүтээмж

D - Антенны диаметр (м)

λ - Долгионы урт (м)

Алхам 1: Нийт системийн температур

$$T = T_A + T_B \quad (2.11)$$

Алхам 2: Хүлээн авагчийн антенны gain

$$G_R = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \quad (2.12)$$

Алхам 3: Хүлээн авагчийн антенны gain болон нийт системийн температурын харьцаа

$$\frac{G}{T} = \frac{G_R}{T_A + T_B} \quad (2.13)$$

Алхам 4: Чөлөөт орон зайн унтралт

$$L_b = 185 + 20 \log f + 10 \log (1 - 0.296 * \cos \Delta \varphi * \cos \theta) \quad (2.14)$$

Алхам 5: Аналог холболтын үзүүлэлт

$$\frac{C}{N} = \frac{EIRP * G / T}{k L_a L_b B} \quad (2.15)$$

$$\frac{C}{N_o} = \frac{C}{N} * B \quad (2.16)$$

Алхам 6: Тоон холболтын үзүүлэлт

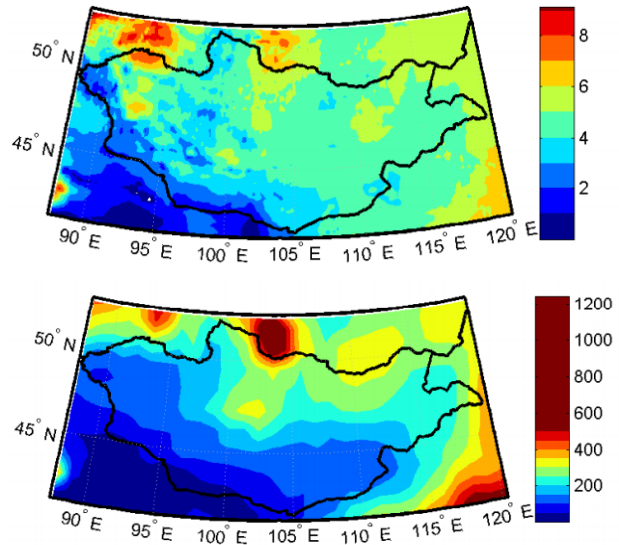
$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{C}{N_o} / R_b \quad (2.17)$$

III. ХЭРЭГЖҮҮЛЭЛТ БА ҮР ДҮН

Монгол орны нийт нутаг дэвсгэрийг хамарсан уртраг, өргөргийн 0.1 градусын нарийвчлалтай тор үүсгэн зангилаа цэгүүд дээр борооны эрчмийн түгэлт, K_u зурвасын радиодолгионы тархалтын замд борооны үүсгэх сулралын түгэлт ба телевизийн дохионы чанарын үнэлгээг Matlab орчинд програм бичиж тооцолсон ба үр дүнг интерполяцийн арга ашиглан Монгол орны газрын зураг дээр хүрээ дүрслэлийн аргаар харуулсан.

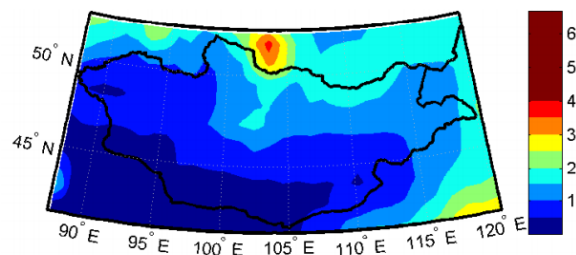
A. Жилд дунджаар орох бороо

Монгол орны нутаг дэвсгэр дээр олон жилийн дунджаар нэг жилд борооны улмаас орох нийт хур тунадасыг зураг 3-д харуулав. Эндээс харахад жилд дунджаар 50-400мм хур тунадас ордог бөгөөд нутгийн өмнөд хэсгээр буюу говийн бүсэд 50-200мм харин нутгийн хойд хэсгээр буюу хангайн бүсээр нь 200-400мм байна. Үүнээс үзэхэд уулархаг нутгуудаар бороо их ордог ба нам дор газруудаар бороо орох хэмжээ нь бага байна.



Зураг 3: Монгол орны нийт хур тунадасны хэмжээ

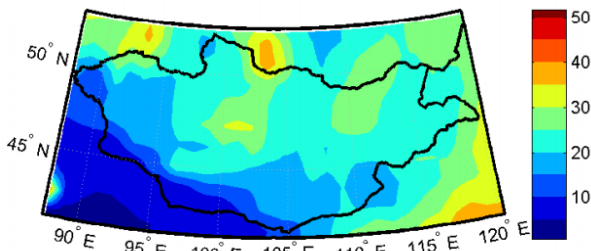
Монгол орны нутаг дэвсгэр дээр нэг жилд дунджаар бороо орох магадлалыг зураг 4-т харууллаа. Үүнээс үзэхэд нутгийн хойд хэсгээр буюу өндөрлөг газруудаар бороо орох магадлал нь 1% - 2.5% байна. Харин нутгийн өмнөд хэсгээр буюу нам дор газруудаар 0.5% - 1% магадлалтай байна. Үүнээс дүгнэхэд Монгол орны уулархаг хойт хэсэгт бороо орох магадлал нь их, нам дор өмнөт хэсэгт бороо орох магадлал нь бага байна.



Зураг 4: Монгол орны нутаг дэвсгэрт бороо орох магадлал

B. Борооны эрчмийн түгэлт

Монгол орны хэмжээнд борооны эрчмийн түгэлтийг ITU-R P.837-6 аргаар тооцолсон ба үүний нэг тулгуур үр дүн болох борооны эрчмийн түгэлтийн 0.01% -д харгалзах борооны эрчмийн утгыг зураг 5-д харуулав. Эндээс харахад жилийн нийт хугацааны 0.01% -д нутгийн өмнөд хэсгээр буюу нам дор газруудаар борооны эрчим нь 10-20 мм/ц -аас их, харин нутгийн хойд хэсгээр буюу өндөрлөг газруудаар 20-30мм/ц -аас их байхаар байна.



Зураг 5: Түгэлтийн 0.01% -д харгалзах борооны эрчим

C. Борооны унтралын түгэлт

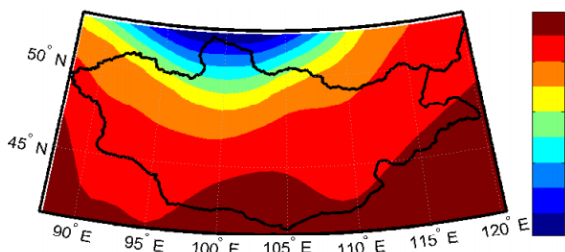
Монгол орны нутаг дэвсгэр дээр Apstar 5 хиймэл дагуулын Ku зурвасын радиодолгионд борооны улмаас үүсэх унтралын түгэлтийг тооцоолж холбооны системийн найдвартай байдлыг үнэлэхэд тулгуур өгөгдөл болгон хэрэглэдэг түгэлтийн 0.01%-д харгалзах борооны унтралын утгыг Зураг 6-д харуулав. Эндээс жилийн нийт хугацааны 0.01% -д борооны унтрал нутгийн өмнөд хэсгээр буюу нам дор газруудаар 1-4 dB -ээс их, харин нутгийн хойд хэсгээр буюу өндөрлөг газруудаар 4-5 dB-ээс их байхаар байна.

Зураг 6 : Түгэлтийн 0.01% -д харгалзах борооны унтрал

D. Радио холболтын тооцоолол (Link Budget)

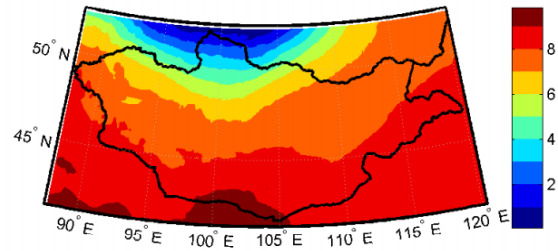
DDISH TV -н ашигладаг Apstar 5 хиймэл дагуулын Ku зурвасын радио долгионы холболтын тооцоолол хийсэн. Үүнийг тооцоолохдоо хүлээн авагч дээрх битийн энерги болон шуугианы нягтын харьцааг E_b/N_0 тооцоолсон. Хүлээн авагч дээрх дохионы түвшин нь антенны диаметрээс хамаардаг. Тухайн антенны диаметр нь их байвал дохиог илүү сайн хүлээн авна. DDISH -н хүлээн авах антенны диаметр нь анх гарж байхдаа 1.8 м диаметртэй байсан бол одоо 0.45 м, 0.6 м, 0.75 м, 0.9 м гэсэн диаметруудтай байдаг. Одоогоор 0.75 м диаметртэй антенныг стандарт болгон ашигладаг.

Зураг 7-д харуулсанчлан антенны диаметр нь 0.75 м байх үед нутгийн өмнөд хэсгээр буюу говийн бүсээр хүлээн авагч дээрх битийн энерги болон шуугианы нягтын харьцаа нь 8-9 dB харин нутгийн хойд хэсгээр буюу хангайн бүсээр 2-7 dB байна.



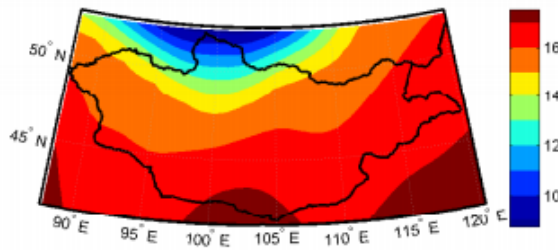
Зураг 7: Антенны диаметр 0.75 м, бороогүй байх үеийн (E_b/N_0)

Хиймэл дагуулаас дэлхийрүү цацаж байгаа радио долгионд түгэлтийн 0.01% -д харгалзах бороо хэрхэн нөлөөлж байгааг зураг 8-д харуулж байна. Антенны диаметр 0.75 м үед нутгийн өмнөд хэсгээр битийн энерги болон шуугианы нягтын харьцаа нь 7-9 dB, харин нутгийн хойд хэсгээр 1-7 dB байна.



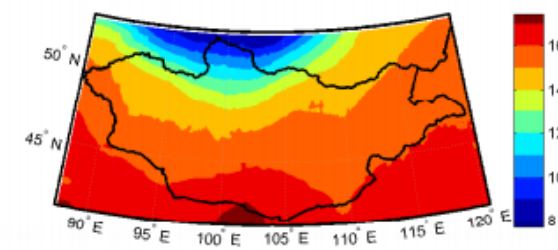
Зураг 8: Антенны диаметр 0.75 м, түгэлтийн 0.01% -д харгалзах бороотой байх үеийн (E_b/N_0)

Дээрх тооцооллоос үзвэл нутгийн хойд хэсгээр телевизийн нэвтрүүлэг тасалдах магадлал өндөр байна тиймээс үүнийг шийдэх арга нь хүлээн авагч антенны диаметрийг ихэсгэх юм. Одоогоор манай улсад хэрэглэж буй антенны диаметр нь 0.75 м байгаа ба үүнийг анх гарж байсан антенны диаметрээр буюу 1.8 м болгож тооцоолол хийсэн. Зураг 9-д харуулсанчлан хүлээн авагч дээрх E_b/N_0 нь нутгийн хойд хэсгээр 9-14 dB харин нутгийн өмнөд хэсгээр 14-17 dB байна.



Зураг 9: Антенны диаметр 1.8 м, бороогүй байх үеийн (E_b/N_0)

Түгэлтийн 0.01% -д харгалзах бороотой болон антенны диаметр нь 1.8 м үед зураг 10-д харуулсанчлан хүлээн авагч дээрх E_b/N_0 нь нутгийн хойд хэсгээр 8-14 dB харин нутгийн өмнөд хэсгээр 14-17 dB байна. Энэ антенныг ашигласнаар E_b/N_0 ба босго утгын ялгавар нь 6 dB байх ёстой гэсэн нөхцөлийг хангаж байгаа юм.



Зураг 10: Антенны диаметр 1.8 м, түгэлтийн 0.01% -д харгалзах бороотой байх үеийн (E_b/N_0)

ДҮГНЭЛТ

Монгол орны нутаг дэвсгэр дээрх Ku зурвасын радио долгионы тархалтанд борооны улмаас үүсэх унтрал болон борооны эрчмийг хугацааны 0.01%-д тооцооллоо. Үүнээс дүгнэхэд нутгийн хойд хэсгээр буюу бороо их ордог газруудаар борооны эрчим их үүнийгээ дагаад Ku зурвас дахь борооны унтрал их, харин өмнөд хэсгээр дээрх үзүүлэлтүүд бага байна. Хиймэл дагуулаас цацсан дохиог хүлээн авч буй газрын антен дээрх E_b/N_0 -г тооцоолж үзэхэд дохионы

түвшин нь нутгийн өмнөд хэсэгтэй харьцуулбал нутгийн хойд хэсгээр бага байна. Энд бороотой үед хугацааны 0.01%-д харгалзах E_b/N_0 утга хүлээн авагч антенны мэдрэх босго утгаас бага болж байна. Үүнээс үзвэл нутгийн хойд хэсгээр зуны гурван сард телевизийн нэвтрүүлэг (жилийн нийт хугацааны 0.01% буюу 52.56 минут орчим) тасалдах магадлал өндөр байна. Үүнийг шийдэх нэг арга зам нь хүлээн авч буй антенны диаметрийг ихэсгэх юм. Одоогоор манай улсад хэрэглэж буй антенны диаметр нь ихэвчлэн 0.75 м байгаа ба үүнийг 1.8 м болгож тооцоолоход E_b/N_0 -ийн утга антенны мэдрэх босго утгаас дээш гарч, монгол орны бүх цэгт телевизийн нэвтрүүлэг борооны улмаас тасалдахгүй болох боломжтой болж байна.

НОМ ЗҮЙ

- [1] Y. S Choi, J. H Lee, and J. M Kim, "Rain attenuation measurements of the Koreasat beacon signal on 12 GHz,"
- [2] B. Segal, "The Influence of Raingauge Integration Time on Measured Rainfall Intensity Distribution Functions,"
- [3] ITU-R. Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design of Earth-Space Telecommunications Systems, "Recommendation P.618-8, ITU-R P Series, Int. Telecomm. Union, Geneva. 1999a.
- [4] COST 255, "Radiowave Propagation Modeling For New Satcom Services At Ku Band and above," Final Document. 2002.
- [5] ITU-R., "Specific Attenuation Model for Rain for Use in Prediction Methods," Recommendation P.838-1, 2, ITU-R
- [6] ITU-R., "Rain Height Model for Prediction Methods," Recommendation P.839-3, ITU-R P Series, Int. Telecomm
- [7] ITU-R., "Characteristics of precipitation for propagation modeling," Recommendation ITU-R P.837-6