

Газрын гадаргуу орчмын радио хугарлын илтгэгчийн улирлын явцын тогтвортой хэсгийн загварчлал

С.Жамъян, Ж.Баттогтох, З.Болд, Д.Бямбажав, Э.Дамдинсүрэн, Ж.Нямжав*

Монгол Улсын Их Сургууль, Хэрэглээний шинжлэх ухаан, инженерчлэлийн сургууль, Электроник, холбооны инженерчлэлийн тэнхим

Радио хугарлын илтгэгч нь радио долгионы тархалт болон радио системийн төлөвлөлтөд чухал параметр болдог. Энэ судалгааны ажлаар газрын гадаргуу орчмын радио хугарлын илтгэгчийн улирлын явцын загварыг Улаанбаатар хотын хувьд Гауссын функцийг ашиглан гаргасан. Бид радио хугарлын илтгэгчийн улирлын явцын загварыг сонгоход үндсэн хоёр шаардлага тавьсан. Нэгдүгээрт, загвар нь улирлын явцын ерөнхий шинж төрхтэй таарах ёстой. Хоёрдугаарт, загвар нь цөөн параметртэй байх ёстой. Ингэснээр загвар энгийн бөгөөд тооцоолол хялбар болно. Энэ үндсэн шаардлагуудаас гадна статистик хэмжүүрийг тохирох загвар сонгохдоо ашигласан. Үр дүнд нь есөн параметртэй Гауссын функцийг сонгож загварчилсан. Ингэж загварчилснаар тухайн жилийн аль ч өдрийн радио хугарлын илтгэгчийн утгыг таамаглах боломжтой болсон.

Түлхүүр үгс: Радио хугарлын илтгэгч, Гауссын функц, Радио долгион тархалт

УДИРТГАЛ

30 МГц-с өндөр давтамжтай радио долгионы энерги ионосферээс ойдоггүй [1] учир тархаж буй орны шинж чанарын өөрчлөлтөд агаар мандлын доод давхаргын нөлөө буюу радио хугарлын илтгэгчийн нөлөө их байдаг. Агаар мандлын доод давхарга ялангуяа тропосферийн мужид радио долгион тархахад радио хугарлын илтгэгч гол параметр болдог. Хэрвээ радио долгион чөлөөт огторгуйд тархах бол шулуун замаар тархдаг. Харин дэлхийн агаар мандалд тархсан радио долгион агаар мандлын хугарлын илтгэгчийн өөрчлөлтөөс хамаарч долгион тархах зам мурийдаг. Тархах замын мурийлт нь радио хугарлын илтгэгчийн босоо градиентээр тодорхойлогддог. Бидэнд радио хугарлын илтгэгчийн газрын гадаргуу орчмын өгөгдөл байгаа боловч босоо градиентийн өгөгдөл байхгүйн улмаас тооцоо хийх боломжгүй. Хэдий тийм ч газрын гадаргуу орчмын хугарлын илтгэгч газрын гадаргуугаас дээших хугарлын илтгэгчийн утгуудтай маш хүчтэй хамааралтай бөгөөд газрын гадаргуу орчмын радио хугарлын илтгэгчийн утгаас босоо градиентийг таамаглах судалгаа хийгдсэн байдаг [3]-[5].

Хугарлын илтгэгчийн өөрчлөлтийн жигд бус тархалтаас үүдэлтэй радио долгионы мурийлт нь олон замын тархалт, интерференц, долгион тархаж буй орчны саад зэргээс үүссэн унтралт гэх мэт тааламжгүй үр нөлөөг авч ирдэг [2].

Эдгээр үр нөлөө нь радио холбоо, навигац, радарын системүүдэд муугаар нөлөөлдөг.

Радио хугарлын илтгэгчийг радио долгион чөлөөт огторгуйд тархах хурдыг тодорхой орчинд тархах хурдтай харьцуулсан харьцаагаар тодорхойлдог:

$$n = \frac{V_{fs}}{V_m} \quad (1)$$

Үүнд: V_{fs} болон V_m нь долгион чөлөөт огторгуйд болон бусад орчинд тархах хурд.

Газрын гадарга орчим радио хугарлын илтгэгч (n) ойролцоогоор 1.0003 байдаг. Гэхдээ практикт радио хугарлын илтгэгчийн индекс (РХИИ) N , ($N - units$) гэсэн хэмжигдэхүүнийг ашигладаг ба энэ нь дараах илэрхийллээр тодорхойлогддог:

$$N = (n - 1) \times 10^6 \quad (2)$$

Радио хугарлын илтгэгчийн индексийг шууд болон шууд бус аргаар тодорхойлж болдог. Шууд бус аргад цаг уурын параметрууд болох агаарын температур, даралт, харьцангуй чийгшлээс хамааруулж тодорхойлж болдог. Хэрвээ хэмжилтийн төхөөрөмж гэрлийн хурдыг хэмжиж чаддаг бол шууд аргаар тодорхойлох боломжтой. Шууд хэмждэг төхөөрөмж нь радио давтамжийн рефрактометр ба рефрактометр ашиглан шууд тодорхойлох нь агаарын температур, даралт, чийгшил гэсэн гурван

* Electronic address: nyamjav@num.edu.mn

параметрээс хамааруулж хугарлын илтгэгчийн тодорхойлохоос хялбар. Гэвч рефрактометрүүд нь нарийн төвөгтэй бүтэцтэйгээс гадна үнэ өртөг ихтэй байдаг. Иймд практикт радио хугарлын илтгэгчийн индексийг шууд бус аргаар тодорхойлдог.

Радио хугарлын илтгэгчийн индексийг Б.Р.Бийний тодорхойлсноор бичвэл [1]:

$$N = N_{dry} + N_{wet} = \frac{77.6}{T} \left(P + 4810 \frac{e}{T} \right) \quad (3)$$

Р-агаарын даралт (hPa), Т-абсолют температур (K), e-усны уурын даралт (hPa). Температур болон даралтыг цаг уурын станцын мэдээллээс шууд авч болох бөгөөд усны уурын даралтыг агаарын чийгшлээс тодорхойлбол:

$$e = \frac{H e_s}{100} \quad (4)$$

$$e_s = a \exp \left(\frac{bt}{t+c} \right) \quad (5)$$

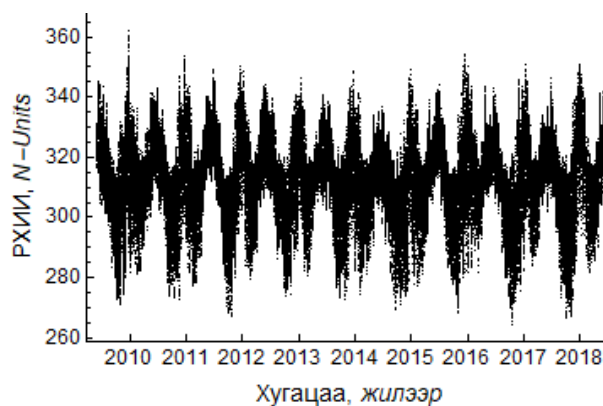
Үүнд: Н-харьцангуй чийгшил (%), t-Цельсийн температур (°C), e_s-ханасан уурын даралт (hPa), a, b, c- тогтмол утгууд ба усанд a = 6.1115, b = 17.502, c = 240.97, мөсөнд a = 6.1115, b = 22.452, c = 272.55 байна.

Бид Б.Р.Бийний тодорхойлсноор цаг уурын өгөгдөл дээр тулгуурлаж газрын гадаргуу орчмын радио хугарлын илтгэгчийн индексийн утгуудыг тооцоолсон. Цаг уурын өгөгдөл улирлаас хамаарч өөрчлөгддөг учир радио хугарлын илтгэгчийн утгууд мөн улирлаас хамаарч өөрчлөгддөг. РХИИ-н утгуудаас улирлаас хамаарсан ерөнхий төрхийг олон жилийн дунджаар тодорхойлох боломжтой. Олон жилийн утгуудыг дундчилснаар улирлын явцын тогтвортой утгуудыг авна. Энэ судалгааны ажлаар Улаанбаатар хотын цаг уурын 9 жилийн өгөгдөл дээр тулгуурлаж газрын гадарга орчмын радио хугарлын илтгэгчийн индексийн улирлын явцыг загварчилсан. Энэ загварыг ашиглан РХИИ-н утгуудыг жилийн аль ч өдрийн хувьд таамаглах боломжтой болно.

ӨГӨГДӨЛ

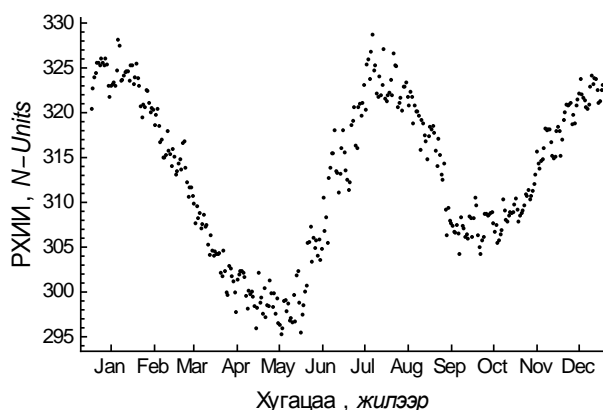
Улаанбаатар хотын WMO44292 дугаартай цаг уурын станцын 2010 оны 1 сараас 2019 оны 1 сар хүртэлх цаг уурын өгөгдлийг ашиглаж (3) илэрхийллийн дагуу РХИИ-г тодорхойлсон. Цаг уурын хэмжилт 30 минут тутамд хийгдсэн ба

хэмжилтийн утгуудыг SWOP [6] сангаас авч ашигласан. Цаг уурын өгөгдлийн 7% орчим хаягдсан байсан бөгөөд энэ хаягдсан утгуудыг шугаман интерполяцын аргаар тооцоолж өгөгдлийг нөхсөн. Есөн жилийн эдгээр РХИИ-н утгууд дээр тулгуурлаж улирлын явцыг загварчилсан. Зураг 1-д 9 жилийн РХИИ-н утгуудыг үзүүлсэн.



Зураг 1. 2010-2018 оны РХИИ-н утгууд.

Бидний зорилго РХИИ-н улирлын явцыг загварчлах бөгөөд Зураг 1-д үзүүлсэн утгууд улирлын явц болон өдрийн явцыг хамт агуулсан. Тиймээс өдөр болон жилээр РХИИ-н утгуудыг дундчилснаар өдрийн явцыг арилгаж олон жилийн тогтвортой утгуудыг гаргаж авна. Есөн жилийн РХИИ-н дундаж утгуудыг Зураг 2-д үзүүлэв.



Зураг 2. РХИИ-н жилийн дундаж утгууд.

РХИИ-н дундаж утгуудаас харахад өвөл, зуны улиралд өндөр, хавар, намар бага утгатай байна. Учир нь өвөл агаарын температур болон усны уурын даралт бага байх бөгөөд зун болоход энэ хоёр параметр ихсэж эсрэгээрээ агаарын даралт зун бага өвөл өндөр байдагтай холбоотой.

АРГА ЗҮЙ

Бид РХИИ-н улирлын явцын загварчлалд үндсэн хоёр шаардлагыг тавьсан. Нэгдүгээрт, улирлын

явцын загвар РХИИ-н жилийн дундаж утгуудын ерөнхий шинж төрхтэй таарах ёстой. Өөрөөр хэлбэл РХИИ-н утгуудыг хэт дагахгүй байх хэрэгтэй. Энэ шаардлагыг хангахын тулд сонгогдсон загвар жилийн дундаж утгууд болох Зураг 2-д үзүүлсэн утгуудтай графикийн хувьд таарах ёстой. Хоёрдугаарт, сонгогдсон загвар цөөн параметрүүдтэй байх ёстой. Ингэснээрээ загвар нь энгийн бөгөөд тооцоолоход хялбар болно. Мөн цөөн параметртэй загвар нь РХИИ-н утгуудыг хэт дагахгүй гэсэн бидний тавьсан эхний шаардлагыг биелүүлнэ.

Дээрх хоёр шаардлагаас гадна алдаануудын квадратуудын нийлбэр (SSE), бодит утгууд болон таамагласан утгуудын хоорондын хамаарлын квадрат (R^2), квадрат дундаж алдаа (RMSE) зэрэг статистик хэмжүүрүүд сайн загвар сонгоход тусална. Гэхдээ статистик хэмжүүрүүдээс илүү графикийн хэмжүүр нь илүү ач холбогдолтой. Учир нь график хэмжүүр загварчлал өгөгдөлд хир тохирч байгааг бүхэлд нь харах боломжийг бидэнд олгох ба загвар болон бодит РХИИ-н утгуудын хамаарлыг хялбар харуулдаг. Статистик хэмжүүрүүд нь хязгаарлагдмал хүрээнд өгөгдөлд үнэлгээ өгдөг бөгөөд өгөгдлийн мэдээллийг ганц тоогоор тодорхойлдог дутагдалтай. Практикт бодит өгөгдлөөс хамаараад сайн загвар сонгохдоо график хэмжүүр болон статистик хэмжүүрийг аль алийг нь хэрэглэж болдог.

Бид энэ судалгааны ажлаар Гауссын функцийг ашиглан РХИИ-н улирлын явцыг загварчлахыг зорьсон. Учир нь Зураг 2-с харахад РХИИ-н утгууд хэд хэдэн хонх хэлбэрийн муруйнуудаас тогтсон байна. Тухайлбал 1-р сараас 5-р сар хүртэлх утгууд хагас хонх хэлбэртэй, 5-р сараас 10-р сар хүртэлх утгууд бүтэн хонх хэлбэртэй мөн 8-р сараас 12-сар хүртэлх утгууд мөн хагас хонх хэлбэртэй байна. Гауссын функц бидэнд хонх хэлбэрийн муруйг өгч чадна. Хонх хэлбэрийн муруйг өгөх Гауссын функц дараах томъёогоор илэрхийлэгдэнэ:

$$N(d) = \sum_{i=1}^m a_i e^{\left[-\left(\frac{d-b_i}{c_i}\right)^2\right]} \quad (6)$$

Энд: d нь тухайн өдрийг заах ба a нь хонхны амплитуд буюу өндөр, b хонхны байрлал, c хонхны өргөн, m нь хэчнээн хонх ашиглахыг заана. Эдгээр нь Гауссын функцийн параметрүүд ба эдгээр параметрүүдийг Улаанбаатар хотын РХИИ-н жилийн явцыг илэрхийлж чадахаар олно. Бид загвар сонгохдоо

цөөн параметртэй байх гэсэн шаардлага тавьсан бөгөөд (6) илэрхийллээс харахад Гауссын функцийн параметрийн тоо $m \times 3$ байна. Загварыг үнэлэх статистик хэмжүүрүүдийг дараах байдлаар тооцоолно:

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (7)$$

Энд: y_i нь РХИИ-н бодит утга бол \hat{y}_i нь загварчлалаар олсон утга.

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (8)$$

Квадратуудын нийлбэр (SST) нь дараах томъёогоор олно:

$$SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (9)$$

Энд: \bar{y} нь РХИИ-н дундаж утга.

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (10)$$

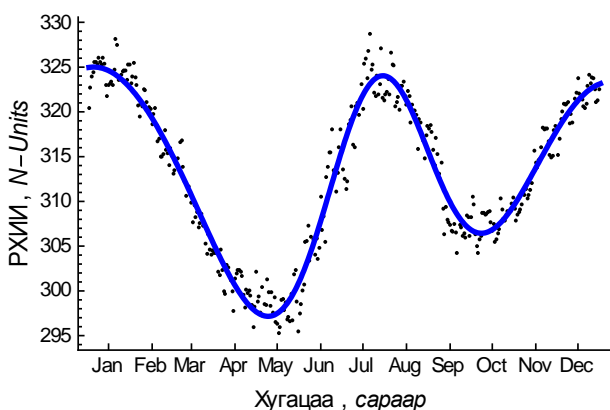
Үүнд: MSE нь дундаж квадрат алдаа.

SSE нь статистик загвар болон бодит утгын хоорондох зөрүүг хэмждэг. SSE-ийн утга бага байх тусмаа загвар өгөгдөлтэй сайн таарч байгааг илтгэдэг.

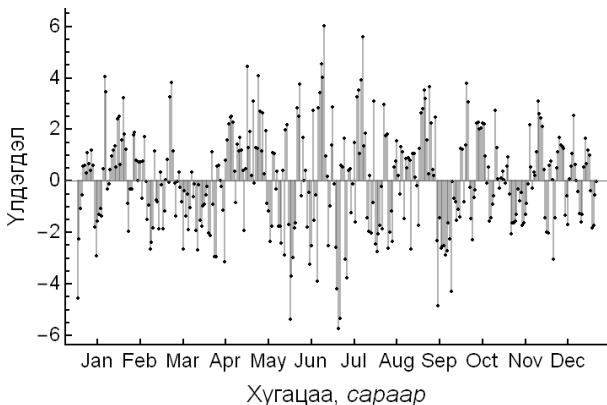
R^2 статистик нь загвараар олсон утгууд болон бодит утгуудын хоорондох хамаарлыг өгдөг. Авах утга нь 0-с 1-ийн хооронд байх ба 1-тэй ойролцоо бол бодит өгөгдөл дэх нийт вариацийг загварт агуулж чадсан байна гэдгийг илтгэдэг. RMSE нь статистик бодит утгууд болон загварын өгөх утгуудын хоорондох ялгааг хэмждэг. Иймд RMSE-ийн утга бага байх нь сайн загвар болсныг илэрхийлдэг.

ҮР ДҮН

Гауссын функцийн $m = 1$, $m = 2$ тохиолдолд буюу 3 болон 6-н параметртэй үед улирлын явцыг загварчлах боломжгүй. Учир нь Зураг 2-с харахад дор хаяж гурван хонх байна. Доорх зурагт $m = 3$ үед Гауссын функцээр жилийн дундаж утгуудыг МАТЛАБ программыг ашиглан дүйцүүлэлт (fitting) хийснийг үзүүлсэн. Зураг 3-с харахад Гауссын функцээр загварчилсан загвар жилийн дундаж утгуудын ерөнхий төрхтэй таарч байна. Энэ нь бидний нэгдүгээр шаардлагыг хангаж байна. Мөн $m = 3$ үед нийт параметрийн тоо 9 байна.



Зураг 3. РХИИ жилийн дундаж утгууд болон $m=3$ үеийн Гауссын функцийг загварчлал (тасралтгүй шугам).



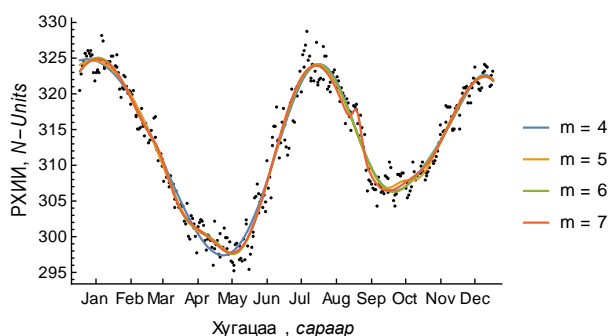
Зураг 4. Гауссын функцийг $m=3$ үеийн загвар болон РХИИ жилийн дундаж утгын ялгавар.

РХИИ-н жилийн дундаж утгуудаас $m = 3$ тохиолдолд Гауссын загварын утгуудыг хассан үлдэгдлийг Зураг 4-д үзүүлсэн. Үлдэгдлийн эдгээр утгууд тохирох загварыг сонгоход гол үүрэгтэй. Хэрвээ үлдэгдлийн утгууд тодорхой хэлбэртэй (pattern) байвал сонгосон загвараас сайн загвар байх боломжтой гэсэн үг бөгөөд хэрвээ үлдэгдлийн утгууд санамсаргүй төрхтэй бол сонгосон загвар өгөгдөлд тохирсон загвар гэж үздэг. Үлдэгдлүүдийн утгаас харахад тодорхой хэлбэр (pattern) харагдахгүй, санамсаргүй төрхтэй байна.

үлдэгдэл=өгөгдөл-загвар

Дээрх шалгууруудаас гадна статистик хэмжүүрүүд болох (7), (8), (10) томъёогоор илэрхийлэгдэх үр дүнг хүснэгт 1-д үзүүлсэн. SSE, RMSE утгууд 0-тэй ойролцоо, R^2 утга 1-тэй ойролцоо байвал загвар өгөгдөлтэй сайн таарсан гэж үздэг.

Зураг 5-д $m = 4, m = 5, m = 6, m = 7$ тохиолдолд Гауссын загваруудыг үзүүлсэн.



Зураг 5. Гауссын функцийг $m=4$ үеийн загвар болон дундаж утгын ялгавар.

Зураг 5-с харахад $m = 4$ үеийн Гауссын загвар $m = 3$ үеийн Гауссын загвартай маш ойролцоо байна.

Харин $m = 6$ болон $m = 7$ үеийн Гауссын загварууд РХИИ-н утгуудыг илүү дагасан байна. Гэвч $m = 6$ үед Гауссын загварын параметрийн тоо 18, $m = 7$ үед 21 бөгөөд энэ нь бидний тавьсан хоёр дахь шаардлагыг биелүүлэхгүй байна. Иймд бид $m = 3$ үеийн 9 параметртэй Гауссын загварыг Улаанбаатар хотын газрын гадаргуу орчмын радио хугарлын илтгэгчийн индексийн улирлын явцын загвараар сонгосон. Хүснэгт 1-д $m = 3, 4, 5, 6, 7$ үеийн статистик хэмжүүрүүдийн утгуудыг үзүүлсэн. Хүснэгт 2-т бидний сонгосон $m = 3$ үеийн Гауссын загварын параметрүүдийг үзүүлсэн.

Хүснэгт 1. Гауссын загварын статистик хэмжүүрүүд.

Гауссын гишүүн	SSE	R^2	RMSE
$m = 3$	1.3334e+03	0.9520	1.9353
$m = 4$	1.3223e+03	0.9524	1.9354
$m = 5$	1.2012e+03	0.9568	1.8525
$m = 6$	1.2067e+03	0.9566	1.8648
$m = 7$	1.1319e+09	0.9593	1.8140

Хүснэгт 2. Гауссын загварын параметрүүд.

Гауссын функцийг параметрүүд								
a_1	b_1	c_1	a_2	b_2	c_2	a_3	b_3	c_3
46.48	206.8	57.58	319.4	-8.7	206.4	292	401.8	203.4

ДҮГНЭЛТ

Бид энэхүү судалгааны ажлаар Улаанбаатар хотын газрын гадаргуу орчмын радио хугарлын илтгэгчийн индексийн улирлын явцыг Гауссын функцээр загварчиллаа. Олон параметртэй Гауссын функцийг загвар радио хугарлын илтгэгчийн индексийн улирлын явцтай илүү таарч байсан хэдий ч тооцооллын хувьд төвөгтэй, улирлын явцын утгуудыг хэт дагаж

байсан учраас 9 параметртэй загварыг сонгосон. Бидний сонгож загварчилсан энэ загвар цөөн параметртэйгээс гадна РХИИ-н улирлын явцын ерөнхий төрхийг бүрэн агуулсан. Гауссын функцээр тодорхойлсон улирлын явцын загварыг ашиглан Улаанбаатар хотын РХИИ-н утгуудыг бүрэн тодорхойлох боломжтой болсон.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ

- [1] Bean.B.R, Dutton.J.E (1966), “Radio Meteorology”, NBS Monograph no. 92, Superintendent of Documents, U.S.Government Print Office.
- [2] Lavergnat.J, Sylvain.M (2000), “Radio Wave Propagation: Principles and Techniques”, John Wiley & Sons., ISBN 0-471-49027-X, Chichester, UK.
- [3] Bean.B.R, Thayer.G.D, Cahoon.B.A, “Methods of Predicting the Atmospheric Bending of Radio Rays” Journal of research of the National Bureau of Standards2D. Radio Propagation, vol. 64, no. October, 1960.
- [4] Schiavone.J.A, “Prediction of Positive Refractivity Gradients for Line-of-Sight Microwave Radio Paths,” Bell Syst. Tech. J., vol. 60, no. 6, pp. 803–822, Jul. 1981.
- [5] Salamon.S.J, Hansen.H.J, D. Abbott.D, “Prediction of Surface Refractivity Gradient Distributions, from Weather Station Surface Data” The 8th European Conference on Angennas and Propagation, April, pp. 296–300, 2014.
- [6] Citizen Weather Observer Program, CWOP Database. [Online]. Available: www.wxqa.com.