

Монгол орны хэмжээнд аянга цахилт илрүүлэх төхөөрөмж, байршил тогтоох сүлжээ зохион бүтээх нь

М.Алтансүх¹, М.Отгонбаатар¹, Ж.Дөлгөөн¹, Д.Эрдэнэбаатар², Т.Төртогтох²,
М.Ананд², Д.Улам-Оргих^{1*}, Т.Бэгзсүрэн²

¹ Монгол Улсын Их Сургууль, Шинжлэх Ухааны Сургууль, Физикийн тэнхим

² Монгол Улсын Их Сургууль, Нано-хиймэл дагуул хөгжүүлэх лаборатори

Дэлхийг хамарсан аянга илрүүлэх олон системийн өгөгдөл нийтэд нээлттэй байдаг. Гэвч Монгол оронд аянга бүртгэх өөрийн станц байхгүй тул бага эрчимтэй аянга бүртгэгдэхгүйгээс гадна байршлын нарийвчлал бага, бодит хугацаанд бүртгэх боломжгүй байна. Иймд энэ ажлаар Монгол орны аянга цахилт илрүүлэх ба аянгын байршлыг тодорхойлох аргачлалыг авч үзэн системийн дизайныг зохион бүтээсэн. Орчны цахилгаан соронзон бохирдол, нарны цацаргалт, хүмүүсийн үйл ажиллагаанаас хамааран аянга бүртгэх системийн эхний даалгавар нь зөвхөн аянгын цахилгаан соронзон сигналыг шүүх байдаг тул бид маш бага давтамжийг (VLF) шүүдэг 2-р эрэмбийн дифференциал аналог шүүлтүүрийг давхарлаж туршлаа. Шүүлтүүрийн харьцангуй нэвтрүүлэх чадвар 1.0 кГц – 50 кГц хүртэл 50 хувиас дээш, 0.8 кГц – 200 кГц мужийн гадна 5 хувиас бага байгаа нь бидний бүтээсэн төхөөрөмжийн шүүлтүүр зөв ажиллаж байгааг харуулж байна. Мөн “Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 CPU” процессор ашиглан бүртгэгдсэн дохиог хүлээн авах, шүүх, хадгалах, дамжуулах асуудлыг шийдвэрлэсэн. Цаашид Монгол орны хэмжээнд аянга цахилтын байршил-хугацааны тархалт тодорхойлох, аянгат борооны аюулаас урьдчилсан сэргийлэх систем бүтээх санал дэвшүүлж байна.

Түлхүүр үг: Аянга цахилт, сигнал өсгөгч, тархалт, аянгын осол

I. УДИРТГАЛ

Цаг уурын гамшгийг урьдчилан таамаглах, иргэний нисэхийн аюулгүй байдал, аянгын аюулаас урьдчилан анхааруулж сэргийлэх зэрэгт аянгын байршил-цаг тогтоох систем чухал үүрэг гүйцэтгэдэг. Удаан хугацааны туршид төрөл бүрийн арилжааны болон судалгааны аянгын байршлын сүлжээг голчлон хүн ам шигүү суурьшсан газруудад байршуулсаар ирсэн. Зарим хүн ам сийрэг суурьшсан газар нутаг, тэгш өндөрлөг эсвэл өргөн уудам далай, цөлийн хувьд газрын долгионы тархалтын горимд суурилсан аянгын байршил тогтоох сүлжээ нь аянга илрүүлэх зай 1000 км-ээс дээш байх үед тухайн бүсийг үр дүнтэй хамарч илрүүлж чадахгүй. Аянга нь үүлнээс үүл, үүлнээс газарт, эсвэл үүлнээс агаар мандлын давхарга хооронд үүсдэг хүчтэй цэнэг шилжих үйл явц юм. Аянга нь 1 Гц-ээс дээш 300 МГц хүртэлх давтамжийн мужид их хэмжээний цахилгаан соронзон энерги ялгаруулж чаддаг [1]. 1980-аад оноос хойш төрөл бүрийн цахилгаан соронзон долгион бүртгэх технологид суурилсан аянгын байршил тогтоох олон системийг дэлхийн янз бүрийн бүс нутагт

зохион бүтээж, байршуулсан. Аянгын байршил тогтоох систем нь долгион ирэх хугацааны арга дээр ихэнх нь суурилсан байдаг тул хэд хэдэн бүртгэх станц шаарддаг. 1980-иад оноос өмнөх үед өргөн зурвасын соронзон орны хэмжилтийн модулийг ашиглан соронзон чиглэлийг тодорхойлох хэрэгсэл бүтээгдсэн [2]. Аянгын үүсгэж буй цахилгаан оронг хоорондоо перпендикуляр ороомог антенаар бүртгэж азимутын өнцгийг олох аргачлал байдаг. Олон станцын тооцоолсон чиглэлүүд аянга буусан байршил дээр нийлдэг. Багахан өнцгийн зөрүү хэдэн зуун, мянган километрийн цаана болох процессын хэмжилтийн алдааг нэмэгдүүлдэг тул тодорхой бус байдал үүсгэдэг. Иймд одоо ашиглаж буй хамгийн өндөр нарийвчлалтай аянгын байршил тогтоох аргачлал бол аянгын радио долгион станцад ирэх хугацааны арга (ToA -Time of Arrival) байна [3].

Дэлхийн байршил тогтоох систем (GPS) өргөн ашиглах болсноор GPS-ээс авч болох өндөр нарийвчлалтай цаг хугацааны мэдээлэл нь аянга илрүүлэх цэгүүдийн хоорондох цагийн

* ulamorgikh@num.edu.mn

нарийвчлалыг цэлмэг өдөр 20 нано секундээс бага болгодог. Төрөл бүрийн аяндын цахилгаан соронзон долгион хүлээн авагч станцад ирэх хугацаа (ТоА) аргыг GPS-ээс системийн цагийн мэдээлэлтэй хамт хэрэглэж байна [4]. Аянгыг өндөр нарийвчлалтай бүхэлд нь дүрслэх зорилгоор Япон улсад нам давтамжийн (LF) зурваст ажилладаг хурдан антены аяндын зураглалын массивыг (FALMA) зохион бүтээж байрлуулсан [5]. Станц хоорондын зай нь 20-30 км, аяндын цахилтын байршлын нарийвчлал нь 25 м-ээс бага байна. Хэрэв тодорхой хэсэг газар 10-100 км орчимд аянга нарийвчлалтай бүртгэх шаардлагатай бол маш өндөр давтамжийн (VHF) цахилгаан соронзон цацрагийг хүлээн авах станцуудыг байгуулдаг [6]. Аянга илрүүлэх зай нь 100 км-ээс хол аяндын байршлыг голчлон маш бага давтамжийн эсвэл бага давтамжийн (VLF/LF) мужид аяндын дохиог хүлээн авдаг юм. Япон улсын аяндын байршил тогтоох сүлжээ (JLDN) [7], АНУ-ын Үндэсний аянга илрүүлэх сүлжээ (NLDN) [8] болон Европын Аянга илрүүлэх хамтын ажиллагаа (EUCLID) [9] бүгд VLF/LF зурваст ажилладаг.

VLF зурвасын долгионы энерги нь дэлхийн гадаргуу болон ионосфер дээр ойж маш хол зайд тархдаг тул Дэлхийн ионосферийн долгионы энэ тархалтын горимд суурилсан Дэлхийн аяндын байршлын сүлжээ (WWLLN) 2001 онд байгуулсан [10, 11]. WWLLN нь одоогоор дэлхий даяар тархсан 70 гаруй VLF зурваст дохио илрүүлэх станцтай бөгөөд станц хоорондох суурь зай их байдаг тул аянга илрүүлэх үр ашиг хязгаарлагдмал байдаг.

Монгол улсын хувьд аянгаас шалтгаалсан нас баралт, хохирлыг бүртгэсэн нарийн бүртгэл байхгүй байгаагаас гадна аяндын байршлыг тогтоох томоохон станц байхгүй байна. Цахилгааны шугамруу шууд аянга цахих, эсвэл ойролцоох аяндын цахилгаас цахилгаан төхөөрөмж дээр үүссэн түр зуурын хүчдэлийн ноцтой өсөлт нь жил бүр асар их хохирол авчирдаг [12]. Хөгжиж буй орнуудад аянга цахилт илрүүлэх, урьдчилан сэргийлэх, аянгад нас барсан, гэмтсэн хүмүүсийн баримтжуулсан тоо ихэвчлэн байдаггүй. Манай улсын хувьд мөн

адил бүртгэл дутмаг хэдий ч цаг уурын хүрээлэнгээс 2004-2013 он хүртэлх 10 жилийн хугацааг хамарсан судалгаанд жилд 10 сая хүн тутамд 15.4 хүн нас барж байгаа нь ижил изокерауникийн түвшинтэй олон орныхоос өндөр байгааг тогтоосон [13].

Бидний ажлын зорилго нь Монгол орны нутагт байрладаг хэд хэдэн хүлээн авагч станц дээр суурилсан бага төсөвтэй аяндын байршлын сүлжээг бий болгох явдал юм. Станцууд өгөгдлөө төвлөрсөн тооцоолох сервер рүү дамжуулах бөгөөд дохионы ирэх цагийг харгалзан бүртгэж цахилтын байршлыг тооцоолох. Аянгыг судалснаар аяндын үзэгдлийн тархалтын эрчмийг, цахилгаан тоног төхөөрөмжид үзүүлэх нөлөөлөл зэргийг авч үзэх алсын зорилготой. Энэ өгүүллээр аянга цахилтаас үүссэн цахилгаан соронзон долгиог VLF зурваст бүртгэн авч хугацааны хамаарлаас зайг бага нарийвчлалтай тооцоолохыг авч үзсэн.

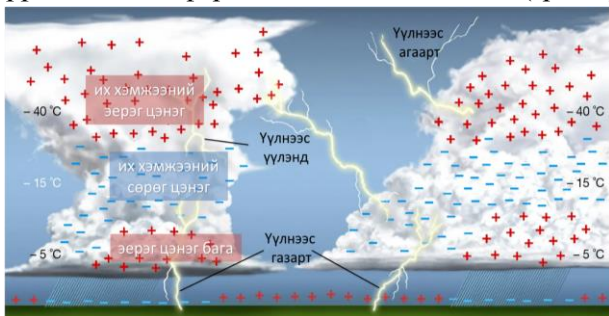
II. АРГА ЗҮЙ

II. А. Аянга цахилгаантай бороо

Нарны гэрлийн нөлөөгөөр чийг дээш хөөрч үүл бий болдог ба цахилгаан цэнэг мөн адил зарчмаар дээш хөөрдөг [14]. Энэ үүл нь томорсоор их хэмжээтэй болж нэгж дусал дахь масс хэт томорсноор бороо болон доош унадаг. Үүл дотор эерэг ба сөрөг цэнэгийн шилжилт нь аянга цахилтыг үүсгэнэ. Аянга цахих үед ойр орчимд дуу тархахаас гадна хүчтэй цахилгаан соронзон долгион, гэрэл орчинд тархдаг. Аянга цахих үед ойр орчмын агаарын температур нарны гадаргаас 5 дахин халуун буюу 30,000 К температураас их болдог [15] ба тус халалтаас болж тэсрэлт үүсч атмосферт дууны долгион үүсдэг байна.

Аянгыг ихэвчлэн үндсэн дөрвөн төрөлд хуваадаг. Үүнд: **Үүлнээс газарт сөрөг шилжилт**; Үүлнээс газар хүртэлх аянга хамгийн аюултай. Газар нь ихэвчлэн эерэг цэнэгтэй хэсгүүдээс бүрддэг бол хүчтэй аянга цахилгаантай үүлний ёроол нь сөрөг цэнэгтэй бөөмсөөр баялаг. Цэнэгүүд хоорондоо таталцаж агаарын хамгийн их дамжуулалттай хэсгээр аянга цахидаг. Үүлнээс газар хүртэлх хамгийн түгээмэл аянга нь сөрөг

цэнэгтэй цахилт ба газарт буух аянгын 90-95% сөрөг шилжилт [16, 23] байдаг. **Үүлнээс газарт эерэг шилжилт;** Аянга нь газрын түвшинд сөрөг цэнэгтэй бөөмсийг олж, үүлний дээд хэсэгт байрлах эерэг цэнэгүүд үүлний ёроолд сөрөг цэнэгийг даван буух тохиолдол юм. Эерэг аянга цахих нь түгээмэл биш (5-10%) боловч өндөр эрсдэлтэй. **Үүлнээс үүлэнд;** Сөрөг цэнэгтэй үүл эерэг цэнэгтэй үүл олж, эсрэг тал нь татагдах үед үүлнээс үүлэнд аянга цахилна. **Үүлнээс агаарт;** зарим тохиолдолд өндөр цахилгаан эрчимтэй үүлнээс ионосферт цахилах явдал байдаг (sprites).

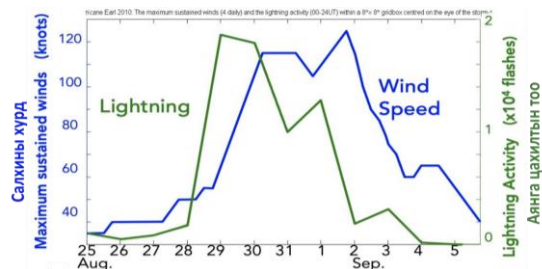


1-р зураг. Үүл доторх эерэг, сөрөг цахилгаан цэнэгийн шилжилт

Үүлнээс газарт эерэг, сөрөг цахилгаан цэнэг буух үзэгдлийг $-CG$, $+CG$ гэж тус бүр тэмдэглэдэг. Харин үүл хоорондын цахилгаан цахилтыг $\pm IC$ гэж тэмдэглэнэ. Аянга цахилтын үүл хоорондын нийт тоон хэмжээ $\pm IC$ –г үүлнээс газарт цахих тоон хэмжээ $\pm CG$ –д харьцуулсан ноогдворыг Z харьцаа гэнэ. WWLLN системээс авсан өгөгдлөөс тооцсон тооцооллоор Z -харьцаа нь экватороос 50° өргөрөг хүртэл 2.9-0.29 хооронд хэлбэлзэж байжээ [17].

$$Z = \frac{IC}{CG} \quad (1)$$

Үүлнээс газарт буух цахилтууд нь 30 кА-ийн дундаж гүйдэлтэй байдаг бол зарим хүчтэй цахилт нь 100 кА-аас дээш гүйдэлтэй байдаг [18]. Аянга цахилгаан бүртгэгдэн чиглэлийг тодорхойлбол салхины хурдыг ашиглан хүчтэй аянга цахилгаантай бороо ирж байгааг хэдэн цагийн өмнө тодорхойлж болно. Өндөр эрчимтэй хүчтэй хар шуурга болохоос 1-2 хоногийг өмнө аянга их хэмжээгээр цахилдаг ба хойд Америкт хийсэн судалгаа үүнийг тод харуулдаг [19]. Зураг 2-т тус өгүүллийн гол үр дүнг дахин орууллаа.

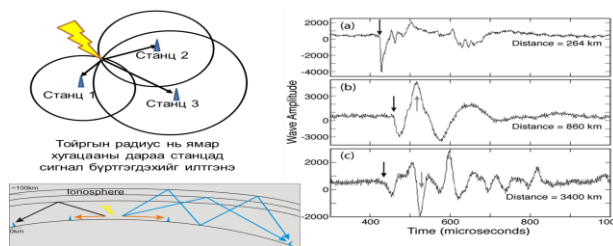


2-р зураг. Аянгын цахилтын тоо болон хүчтэй хар шуурганы эрчим хоорондын хамаарал. Хойд Америкийн тивийн зүүн эрэгт 2010 оны 8 сарын 28-нд аянгын эрчим их хэмжээгээр бүртгэгдэж 8 сарын 30-ны өдөр хар салхины хурд хамгийн их байв [19].

Дэлхийг хамарсан аянга илрүүлэх системүүд өгөгдлийг олон нийтэд нээлттэй түгээдэг. Дэлхийн аянга цахилтын тархалтын эрчмийг харуулсан судалгаанаас [20] харахад Монгол оронд цахилах аянгын тоо харьцангуй бага байна. Учир нь аянга цахилтын тоон хэмжээг тэдгээр системүүд байршлаар бүгдийг хүлээн авч буй мэт боловч Монгол оронд аянга бүртгэх станц байхгүй тул бага эрчимтэй аянга бүртгэгдэхгүй байгаад оршино. Энэ ажил манай оронд цахисан аянгыг өндөр нарийвчлалтай бүртгэх, тархалтын газрын зургийг зурах боломжийг олгох юм.

II. В. Байрлалыг бүртгэгдсэн хугацаагаар тодорхойлох арга (ТоА)

Нам давтамжийн сигналыг бүртгэхээр чагнаж байхад өндөр давтамжийн бүрэлдэхүүн хэсгүүд давхар байгаа тул цахилгаан орныг бүртгэж буй дохионд илт өсөх эсвэл буурах фронт ажиглагддаг. Станц болон аянга цахилтын зай нь 100 км-ээс бага зайд байх үед аянгын дохио нь шууд станцад бүртгэгдэх боломжтой байдаг. Алс хязгаарт буюу 100 км зайнаас хол цахисан аянгын дохио нь Дэлхий-ионосферийн гадаргад хэд хэдэн удаа ойх байдлаар тархдаг бөгөөд VLF цахилгаан соронзон дохио нь цахилгаан орны огцом өөрчлөлтгүй станцад бүртгэгддэг.



3-р зураг. Аянгын байршил тодорхойлох.

Олон хүлээн авагч станцтай тохиолдолд станц бүр дээр дохио ирэх цагийг (TOGA) нарийн олохын тулд гох үе дэх давтамжтай холбоотойгоор сферик фазын өөрчлөлтийн хурдыг хэмжсэн [10] нь илүү нарийн байршил тогтоох боломжийг олгосон. Ихэнх судалгаанд Гильбертийн хувиргалтыг ашиглан аянгын нийлмэл долгионы хэлбэрийг үүсгэж, аянгын агшин зуурын давтамж, фазын мэдээллийг авч, агшин зуурын үе шатанд үндэслэн ирэх цагийн зөрүүг тооцдог.

Аянгын байршлыг тодорхойлоход дор хаяж 3 ба түүнээс дээш станц байх шаардлагатай. Энэ хэсэгт дохио бүртгэгдсэн хугацаанд үндэслэн байршил тогтоодог ТоА хэмжилт дээр суурилсан ерөнхий зураглалыг 2 хэмжээст байдлаар Зураг 3-т үзүүлэв. Зорилтот байрлалыг тодорхойлохын тулд үндсэн станц дээрх мэдрэгчийг (S_i) гэж нэрлэж мөн станцын тоог N ($N \geq 3$) гэж үзье. Мэдрэгчийн зангилааны координатууд нь мэдэгдэж байгаа бөгөөд тэдгээр нь $S_i = (a_i, b_i)^T$, $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ бөгөөд $(\cdot)^T$ нь хөрвөсөн матриц болно. Зорилтот координатыг $p = (x, y)^T$ гэе.

Анхны үндсэн мэдрэгч S_1 -ийн байрлалыг тулгуур цэг болгон авч, дэлхий болон ионосферээс өөр тархалтын нөлөөг харгалзахгүйгээр дохио нь зорилтот болон үндсэн мэдрэгч бүрийн хооронд шулуун шугамаар тархдаг гэж үзье. S_1 ба S_i үндсэн станц дээрх мэдрэгчүүдэд дохио ирэх хугацаа нь тус бүр t_1 ба t_i , дохионы тархалтын хурд гэрлийн хурд c байна. Зорилтот болон үндсэн хоёр мэдрэгч S_1 ба S_i хоорондын зайн ялгавар нь $\{r_i, 1\}$ байна. Энд $\{n_i\}$ хугацаа бүртгэж авахтай холбоотой зайн зөрүү алдаа бөгөөд түүний дисперс σ_i^2 , өөрөөр хэлбэл $N(0, \sigma_i^2)$ бүхий бие даасан Гауссын санамсаргүй хэмжигдэхүүнүүд гэж үздэг. Зайг

$$d_i = \sqrt{(x - a_i)^2 + (y - b_i)^2}, \quad i \in \{1, \dots, N\}. \quad (2)$$

гэж тооцно.

Хэдий онолын дагуу станцууд дээр бүртгэгдсэн хугацаагаар тооцох хэд хэдэн аргачлал байх боловч одоогийн байдлаар бид нэг л мэдрэгчийг

Улаанбаатар хотод ажиллуулж байгаа тул энэ аргачлалыг бодитоор туршиж үзээгүй байна.

Нэг мэдрэгч дээр ирж буй дохионы эхний өндөр далайц нь аянга 100 км зайнаас ойрхон бол аянгаас шууд ирсэн дохио, харин түүнээс хол бол ионосфер дээр ойж ирсэн сигнал байдаг. Биднийг хэмжилт хийж байх үед бүртгэгдсэн сигнал маш өндөр өсгөлттэйгөөр 1000 км хол зайд байсан сигналуудыг бүртгэсэн. Нэг станц дээр ирж буй аянгын байршлын системүүд нь ихэвчлэн чиглэл илрүүлэгч болон эх үүсвэрийн зайг тооцоолох техниктэй хослуулдаг. Хепберн [21] 1960 онд станц дээр бүртгэгдсэн дохион дээр хүлээн авсан сферик талбайн хэв маягт дүн шинжилгээ хийж, аянга буух зайг анх тооцоолсон. Энэхүү шинжилгээнд хэлбэлзэж буй долгионы хэлбэр нь газар ионосфер ойсон цахилгаан соронзон цацраг хагас үечилсэн гэж үзсэн. Аянга цахилт хүртэлх зай d ба түүнээс бага ионосферийн өндөр h ба дохионы хугацааны үеийн дундаж τ ба эхний далайц болон дараагийн далайц хүртэлх хугацааны саатал T хугацаа нь дараах байдлаар хамааралтай гэж таамагласан.

$$T = d \left[\left(1 - \frac{\tau^2 c^2}{4h^2} \right)^{-1/2} - 1 \right] / c \quad (3)$$

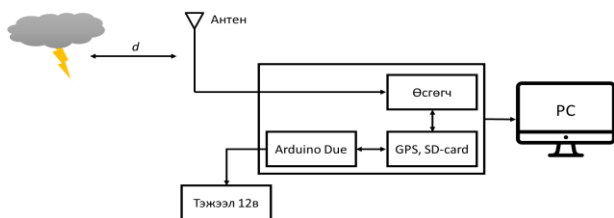
Энд газрын гадаргаас ионосфер хүртэлх зай $h = 85$ км өндөртэй ба аянга цахисан зай d -ийн өөр утгуудын хувьд хугацааны саатал ба дундаж үеийн хугацааны муруйг ($T - \tau$ график) зурж тооцсон. Хепберны тооцоо туршилтын графикууд дундаж $d < 3200$ км үед $\sim 17.5\%$ -ийн алдааны хазайлттай байсан.

III. ТЕХНИК ХАНГАМЖ

Судалгааны хамгийн эхний шат бол аянгын сигналыг 1.0-2.5 урттай металл антенаар хүлээн авч дараа нь зөвхөн аянгын сигналыг VLF завсарт өсгөн авах юм. Аянга ойролцоогоор 1000 км хол газар цахихад станц дээр мэдрэгдэх цахилгаан орны хүчлэгийн хэмжээ нь аянгын хүчтэй сулаас хамааран 1-10 mV/m эрэмбэтэй байдаг. Ийм бага хэмжээний дохиог бусад шуугианаас ялгахын тулд бид 2-р эрэмбийн тодорхой зурвас нэвтрүүлдэг шүүлтүүр үйлдлийн өсгөгч интеграл схем ашиглан зохион бүтээсэн. Зураг 6.а-д өсгөгчийн схемийг

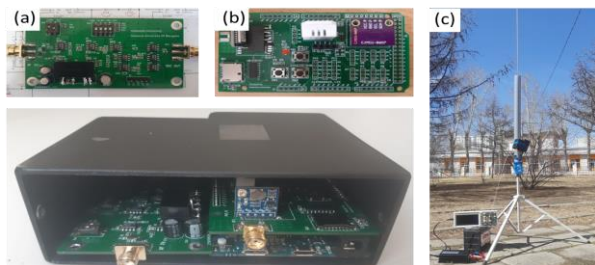
харуулсан. 2-р эрэмбийн зурвас нэвтрүүлэх шүүлтүүр нь хэд хэдэн цуваа шүүлтүүрээс бүтэх ба 1 кГц -ээс 50кГц –ийн хоорондын давтамжийн мужид дохиог нэвтрүүлэх үүрэгтэй зохиогдсон. Хамгийн өндөр өсгөлт нь 510 байхаар дизайныг гаргасан.

Энд мөн гол процессорт залгагдах мэдрэгчүүдийн схем дизайныг зохион бүтээсэн ба үүнд Дэлхийн байршил тогтоох систем GPS модуль, агаарын харьцангуй чийгшил, агаарын температур, агаарын даралт мэдрэгчүүд, SD санах ойн карт, интернетэд холбогдох сүлжээ модуль зэргийг холбогдох байдлаар зохион бүтээсэн. Зураг 5.b –д тус хавтангийн зургийг харуулав.



4-р зураг. Системийн блок диаграмм

Бүх гадаргуу дээр холбох төхөөрөмжүүд (SMD) гар аргаар гагнасан.



5-р зураг. (a,b) аянгын сигналын антен, өсгөгч, (c) VLF монополь антен 2.0 м

Энэ ажлаар Монгол орны аянга цахилт илрүүлэх ба аянгын байршлыг тодорхойлох аргачлалыг тооцон системийн дизайныг зохион бүтээсэн.

IV. ҮР ДҮН, ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

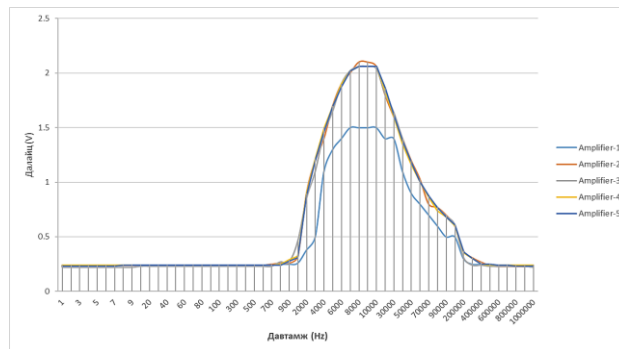
Орчны цахилгаан соронзон бохирдол, нарны цацаргалт, хүмүүсийн үйл ажиллагаанаас хамааран аянга бүртгэх системийн эхний даалгавар нь зөвхөн аянгын цахилгаан соронзон сигналыг шүүх байдаг тул бид маш бага давтамжийг (VLF) шүүдэг 2-р эрэмбийн дифференциал аналог шүүлтүүрийг давхарлаж туршиж үзсэн. Шүүлтүүрийг энгийн функцийн

генератороос янз бүрийн давтамж, далайцтай дохио өгч гаралтын дохиог осциллоскоп ашиглан бүртгэн авсан. Зураг 6-д хэмжилтийн ерөнхий байдлыг харуулсан ба үр дүнг Зураг 7-д харуулав.



6-р зураг. Хэмжилт

Шүүлтүүрийн харьцангуй нэвтрүүлэх чадвар 1.0 кГц – 50 кГц хүртэл 50% дээш, 0.8 кГц – 200 кГц гадна мужид 5.0% -иас бага байгаа нь шүүлтүүр бидний гаргасан дизайн амжилттай, мөн зарчмын дагуу ажиллаж байгааг илтгэж байна. Энэ ажлын хүрээнд 5-н өсгөгч угсарсан нь нэгэн төрөл байдлыг шалган үзэх зорилготой. Мөн энэ систем нь Монгол орны цаг агаарын нөхцөлд -40° -өөс $+40^{\circ}$ цельс хүртэл температурт асуудалгүй ажилладаг байхаар элементүүдийн чанарыг сонгон авсан. Өвлийн шөнө туршилт хийхэд -30° цельс температурт систем ямар нэгэн гацалтгүй хэвийн ажиллаж байв.



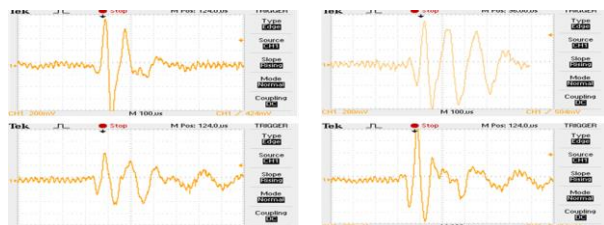
7-р зураг. Хоёрдугаар эрэмбийн дифференциал аналог шүүлтүүр.

Зураг 7–т харуулсан графикт хэмжилтийн утгуудаас үндэслэн оролт, гаралтын дохионы далайц, давтамжийг үндэслэн нэвтрэх чадварыг хэмжилтийн үр дүнгээр байгуулав. Энэхүү графикаас аянга цахилтаас үүсэх цахилгаан соронзон долгиог ялган өсгөж байгаа нь харагдаж байна.

Дан станцаар хугацааны зөрүүнд үндэслэн аянга цахилтын дохионы хаанаас ирсэн чиглэлийг бус харин ямар зайнаас ирсэн болохыг (3) тэгшитгэлийн дагуу тодорхойлох боломжтой.



Зураг 8. Нэг антенаар аянгын сигнал бүртгэсэн байдал.
2022.04.12 17:00 цаг орчим



9-р зураг. Хэмжилтийн үр дүн

Бид бүтээсэн төхөөрөмжөөрөө хэд хэдэн дохиог бүртгэн тооцоо хийж үзэхэд барагцаалбал 2500 км цаанаас ирсэн аянгын дохиог бүртгэж чадаж байна. Гураваас дээш тогтвортой ажилладаг аянга бүртгэх станц ашиглан аянга цахилтын чиглэлийг тодорхойлж болохоос гадна зайны нарийвчлалыг өндөр болох боломжтой.

Эдгээр станцууд дээр дохиог хүлээн авах, хадгалах, дамжуулах үйлдлийг гүйцэтгэх модулыг “Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 CPU” процессор ашиглан бүтээж байна.

V. ДҮГНЭЛТ

Бид Монгол оронд болж буй бүх төрлийн аянга цахилтын үзэгдлийн байршлыг нарийвчлан бүртгэх системийн үндсэн нэгж болох аянга цахилтын бүртгэх төхөөрөмж зохион бүтээж туршлаа. Аянгын цахилгаан соронзон сигналыг шүүх нарийн ажиллагаатай, маш бага давтамжийг (VLF) шүүдэг 2-р эрэмбийн дифференциал аналог шүүлтүүрийг давхарлан туршиж үзэхэд 2000-3000 км зайд болсон аянга цахилтыг мэдрэн бүртгэж байна. Шүүлтүүрийн харьцангуй нэвтрүүлэх чадвар 1.0 кГц – 50 кГц хүртэл 50 хувиас дээш, 0.8 кГц – 200 кГц гадна мужид 5 хувиас бага байгаа нь аянга цахилтын дохиог ялган шүүж чадаж байгааг харуулж байна. Цаашид аянга цахилт бүртгэх станцыг иж бүрэн ажилд оруулж, улмаар гурваас дээш станц бүхий сүлжээ зохион бүтээж жилийн турш тасралтгүй ажиллуулж Монгол оронд болж буй бүх төрлийн аянга цахилтын үзэгдлийг иж бүрэн судлах судалгаа хөгжүүлэлтийн санал дэвшүүлж байна.

VI. ТАЛАРХАЛ

Энэхүү судалгааг P2020-3793 төслийн хүрээнд эхлэн гүйцэтгэв.

VII. НОМ ЗҮЙ

- [1]. Rakov, V. A. “Electromagnetic Methods of Lightning Detection.” *Surveys in Geophysics*, vol. 34, no. 6, Nov. 2013, pp. 731–53. DOI.org, <https://doi.org/10.1007/s10712-013-9251-1>.
- [2]. Krider, E. Philip, et al. “A Gated, Wideband Magnetic Direction Finder for Lightning Return Strokes.” *Journal of Applied Meteorology*, vol. 15, no. 3, Mar. 1976, pp. 301–06. DOI.org, [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1976\)015](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1976)015).
- [3]. Thomas, Ronald J. “Accuracy of the Lightning Mapping Array.” *Journal of Geophysical Research*, vol. 109, no. D14, 2004, p. D14207. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1029/2004JD004549>.
- [4]. Dowden, Richard L., et al. “VLF Lightning Location by Time of Group Arrival (TOGA) at Multiple Sites.” *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 64, no. 7, May 2002, pp. 817–30. ScienceDirect, [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(02\)00085-8](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00085-8).
- [5]. Wu, Ting, et al. “Lightning Mapping With an Array of Fast Antennas.” *Geophysical Research Letters*, vol. 45, no. 8, Apr. 2018, pp. 3698–705. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1002/2018GL077628>.
- [6]. Edens, H. E., et al. “VHF Lightning Mapping Observations of a Triggered Lightning Flash: TRIGGERED LIGHTNING.” *Geophysical Research Letters*, vol. 39, no. 19, Oct. 2012, p. n/a-n/a. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1029/2012GL053666>.
- [7]. Ishii, Masaru, et al. “LEMP from Lightning Discharges Observed by JLDN.” *電気学会論文誌 b (電力・エネルギー部門誌)*, vol. 125, no. 8, 2005, pp. 765–70. J-Stage, <https://doi.org/10.1541/ieejpes.125.765>.
- [8]. Cummins, Kenneth L., and Martin J. Murphy. “An Overview of Lightning Locating Systems: History, Techniques, and Data Uses, With an

- In-Depth Look at the U.S. NLDN.” IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 51, no. 3, Aug. 2009, pp. 499–518. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1109/TEMC.2009.2023450>.
- [9]. Poelman, D. R., et al. “European Cloud-to-Ground Lightning Characteristics.” 2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP), IEEE, 2014, pp. 24–29. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1109/ICLP.2014.6971989>.
- [10]. Dowden, Richard L., et al. “VLF Lightning Location by Time of Group Arrival (TOGA) at Multiple Sites.” Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, vol. 64, no. 7, May 2002, pp. 817–30. DOI.org, [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(02\)00085-8](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00085-8).
- [11]. Smith, D. A. “The Los Alamos Sferic Array: A Research Tool for Lightning Investigations.” Journal of Geophysical Research, vol. 107, no. D13, 2002, p. 4183. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1029/2001JD000502>.
- [12]. M, Pratignjo, et al. Electronics & Lightning—A Study on Secondary Protection in the Arun Field. 1992, pp. 185–98. archives.datapages.com, http://archives.datapages.com/data/ipa/data/021/021002/185_ipa021b0185.htm.
- [13]. Doljinsuren, Myagmar, and Chandima Gomes. “Lightning Incidents in Mongolia.” Geomatics, Natural Hazards and Risk, vol. 6, no. 8, Nov. 2015, pp. 686–701. Taylor and Francis+NEJM, <https://doi.org/10.1080/19475705.2015.1020888>.
- [14]. Sanders, Frederick, and David O. Blanchard. “The Origin of a Severe Thunderstorm in Kansas on 10 May 1985.” Monthly Weather Review, vol. 121, no. 1, Jan. 1993, pp. 133–49. journals.ametsoc.org, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1993\)121](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1993)121).
- [15]. Chameides, W. L., et al. “NO_x Production in Lightning.” Journal of the Atmospheric Sciences, vol. 34, no. 1, Jan. 1977, pp. 143–49. journals.ametsoc.org, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1977\)34<0143:NPIL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1977)34<0143:NPIL>2.0.CO;2).
- [16]. Barrington-Leigh, C. P., and U. S. Inan. “Elves Triggered by Positive and Negative Lightning Discharges.” Geophysical Research Letters, vol. 26, no. 6, Mar. 1999, pp. 683–86. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1029/1999GL900059>.
- [17]. Bandholnopparat, K., et al. “Estimation of the IC to CG Ratio Using JEM-GLIMS and Ground-Based Lightning Network Data.” Journal of Geophysical Research: Atmospheres, vol. 125, no. 23, Dec. 2020. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1029/2019JD032195>.
- [18]. Orville, Richard E., et al. “Cloud-to-Ground Lightning Flash Characteristics from June 1984 through May 1985.” Journal of Geophysical Research, vol. 92, no. D5, 1987, p. 5640. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1029/JD092iD05p05640>.
- [19]. Price, Colin, et al. “Maximum Hurricane Intensity Preceded by Increase in Lightning Frequency.” Nature Geoscience, vol. 2, no. 5, May 2009, pp. 329–32. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1038/ngeo477>.
- [20]. Holle, Ronald L., and Martin J. Murphy. “Lightning in the North American Monsoon: An Exploratory Climatology.” Monthly Weather Review, vol. 143, no. 5, May 2015, pp. 1970–77. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1175/MWR-D-14-00363.1>.
- [21]. Hepburn, F. “Analysis of Smooth Type Atmospheric Waveforms.” Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, vol. 19, no. 1, Sept. 1960, pp. 37–53. DOI.org (Crossref), [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(60\)90105-7](https://doi.org/10.1016/0021-9169(60)90105-7).
- [22]. https://www.blitzortung.org/Compendium/Hardware/Documentation/20_6.html
- [23]. Rakov, V. A. (2003), A review of positive and bipolar lightning discharges, Bull. Am. Meteorol. Soc., 84, 767–776, doi:10.1175/BAMS-84-6-767.