

Гильберт-Хуангийн Хувиргалт ба Бодит Агууламжаар Задлах (нэгэн шинэ аргын тухай)

Ү.Сүхбаатар¹, Э.Батмагнай¹

1 - ШУА. Одон орон геофизикийн хүрээлэн

sukhbaatar_y@yahoo.com

I. УДИРТГАЛ

Геофизикийн судалгаанд өргөн ашиглагддаг потенциал орны нэг гол шинж чанар нь орон нутгийн (регионал) ба газар нутгийн (локал) гаж гэж ялган салгаж болдогт оршдог. Регионал гаж нь далайц ихтэй, харьцангуй өргөн уудам газар нутгийг хамрах боловч үүсгэгч нь дундач гүнд байрлах учир хэвтээ чигийн өөрчлөлт (градиент) багатайгаараа ялгарна. Локал гаж нь үүнийхээ эсрэг. Гаж орныг ялган салгах янз бүрийн арга байхаас орчин үед Фурье хувиргалт болон вайвлет аргыг өргөн хэрэглэж байна. Фурьегийн түргэн хувиргалт (ФТХ-FFT) нь шугаман ба тогтвортой (стационар) дохиог (сигнал) боловсруулахад зохицсон бол вайвлет, Вагнер-Виллын тархалт нь нэг талаас тогтворгүй дохиог боловсруулахад хангалттай боловч шугаман бус мэдээлэл боловсруулахад тохиромж муутай (Hassan and Pierce, 2008). Өргөн дэлгэр хэрэглэгддэг олон гишүүнтээр (полиномоор) дөхөх, гүйдэг дундач, үүсгэгчээс нь дээш ба доош үргэлжлүүлэх, долгионы уртаар шүүх зэрэг аргууд хэрэглэгдсээр байна.

Гэвч геофизикийн мэдээлэл нь өөрөө шугаман бус, тогтворгүй учраас дээр дурьдсан аргуудаар ялган авсан гаж нь анхны дөхөлт болгон авсан параметруудээс ихээхэн хамаардаг. Ер нь бодит физик системийн гаргаж байгаа мэдээлэл нь үнэн хэрэг дээрээ шугаман бус, тогтворгүй мэлээлэл байдаг бөгөөд мэдээлэлийг боловсруулах аргаа заавал нэг хялбаршуулсан хэлбэртэй юм уу эсвэл өөрсдийн дураар сонгосон суурь дээр үндэслэж хийж гүйцэтгэдэг. Тогтворгүй, шугаман бус

мэдээлэлийг бодитой боловсруулах нэг үндэс нь мэдээлэлд өөрт нь байгаа шинж чанараас

улбаалсан дасан зохицох суурь (адаптив базис) гарган авч ашиглах явдал юм. Чухамхүү ийм хандлага бидний энэ авч үзэх аргын үндэс болсон юм.

Сүүлийн жилүүдэд эртний танил Гильбертын спектр арга (ГСА), шинэ тутам хөгжиж байгаа бодит агууламжаар нь задлах (БАЗ-EMD) арга хоёрыг хамтруулан НАСА-ийн өмчлөлд байгаа Гильберт-Хуангийн хөрвүүлэлт (ГХХ) гэсэн арга гарган авсан нь мэдээлэл боловсруулах арга зүйд шинэ дэг жаягийг тогтоож байна. Гильберт-Хуангийн хөрвүүлэлтийн гол хэсэг болох бодит агууламжаар нь задлах (БАЗ) арга нь мэдээлэлийг хувирашгүй хэсэг ба цөөн тооны дотоод агууламжийн функц (ДАФ-IMF)-уудын нийлбэр байдлаар илэрхийлдэгт оршино [3].

II. БОДИТ АГУУЛАМЖААР НЬ ЗАДЛАХ (БАЗ)

Бодит агууламжаар задлах (Empirical Mode Decomposition-EMD) гэдэг нь дохиог бодит агууламж гэсэн нэр бүхий функци-д задлах арга юм. Энэхүү арга нь тасралтгүй үргэлжилсэн ба дискрет өгөгдсөн мэдээлэлийг бодит агууламжаар нь буюу дотоод агууламжийн функц (intrinsic mode functions- IMF) –иар нь дөхүүлэн тооцоолох арга юм [1,3].

Бидний гарган авч байгаа бүх л мэдээлэл нь янз бүрийн өөрийн дотоод хэлбэлзлээс тогтоно гэдгийг үндэс болгож байгаа бөгөөд

үүнийг дотоод агууламжийн функци (ДАФ) гэж нэрлэнэ. Задлах арга нь цаг хугацааны дурын агшинд бие биетэйгээ давхцсан, харилцан оршин тогтногч хэлбэлзэлүүдийн өөрөөр хэлбэл ДАФ-уудын нийлбэрийг олно гэсэн үг. Шугаман ба шугаман бус хэлбэлзэл бүхэн нь экстремум бүхий ба тэг түвшнийг хэрчсэн агууламжийн функц байх бөгөөд тухайлсан дундач утгын хувьд тодорхой тэгш хэмтэй байдаг.

Бодит агууламж гэдэгт доорх шинж бүхий функцийг ойлгоно. Үүнд:

1. Функцийн экстремум (максимум ба минимум)-ын тоо бо тэг түвшинг хэрчиж буй тоо хоёр нэгээс илүү ялгаатай байж болохгүй.
2. Дурын цэгт тухайн максимум ба минимумын утгуудаар байгуулсан бүрхэгч муруйнуудын утгын дундач нь тэг байна.

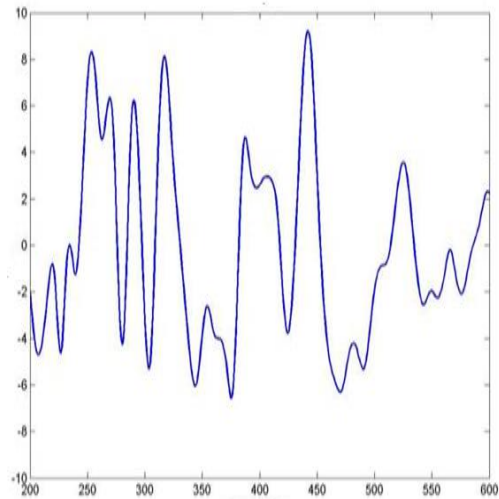
Дотоод агууламжийн функц (ДАФ-IMF) нь тогтмол далайц, давтамж бүхий ердийн гармоник функцийн хэлбэлзэх хэлбэр нь байж болох боловч ердийн гармоникаас ялгарах нь ДАФ цаг хугацаанаас хамаарсан хувирагч далайц ба давтамжтай байж болдогт оршдог. Доор өгүүлэх аргыг хэрэглэн дурын функци ба дурын мэдээлэлийг ДАФ-ийн бүлд задалж болно.

$x(t)$ гэсэн дурын дохио (сигнал) өгөгдсөн гэж үзье. БАЗ аргын зорилго нь $c_j(t)$ гэсэн ДАФ ба $r_j(t)=r_{j-1}(t)-c_j(t)$ гэсэн ялгаварыг тооцоолоход оршдог. Энд $j=1,2,3, \dots, n$ ба $r_0=x(t)$. Үүний дүнд өгөгдсөн дохиог дотоод агууламжийн функцийн нийлбэр ба эцсийн үлдэгдэл байдлаар бичиж болно.

$$x(t) = \sum_{j=1}^n c_j(t) + r_n(t)$$

энд n -нь тооцоололын явцад тодорхойлогдох дотоод агууламжийн функц (ДАФ)-ийн тоо.

ДАФ бодох алгоритмыг доорх зурагнуудаас амархан ойлгох болно.



Зураг 1. Дотоод агууламжаар задлах (ДАЗ) арга турших мэдээлэл

Нэгдүгээр алхам

Өгөгдсөн мэдээлэл $x(t)$ -ийн бүх локал экстремумын утгыг харгалзах хугацааны хамт олно.

Хоёрдугаар алхам

Куб сплайнаар (эсвэл өөр аргаар) максимум ба минимум утгуудыг Зураг 2-д үзүүлсэн шиг бүрхэгч муруйгаар (ногоон муруй) холбож эдгээр муруйнуудын дундач утга $m_1(t)$ -ийг олно (улаан муруй). Дохио $x(t)$ ба функци $m_1(t)$ хоёрын ялгаварыг нэгдүгээр ДАФ-ийн эхний дөхөлт буюу хэрчих үйлдлийг тодорхойлогч гэж нэрлэж доорх байдлаар бичье

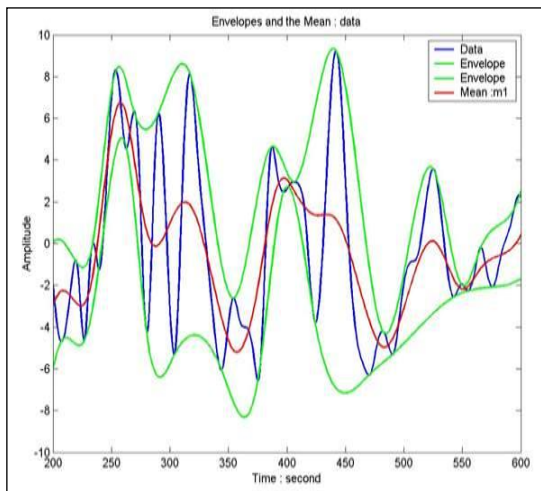
$$h_1(t) = x(t) - m_1(t). \quad (1)$$

Гуравдугаар алхам

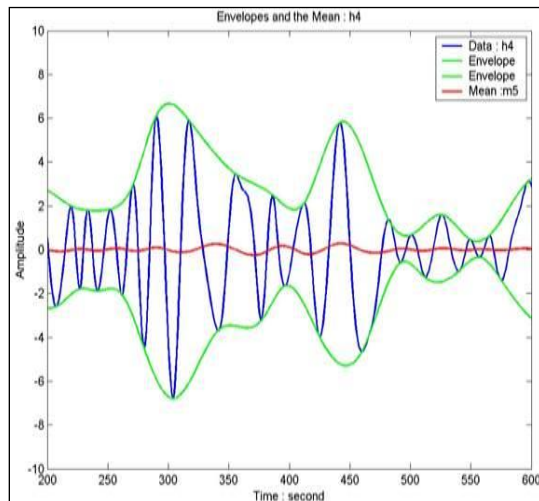
$x(t)$ дохионы оронд $h_1(t)$ функцийг авч нэг ба хоёрдугаар алхамыг давтан хийж ДАФ-ийн хоёрдах дөхөлтийг олж Зураг 3 дээр үзүүлсэн хэрчигч үйлдлийг тодорхойлогч - $h_2(t)$ функцийг

$$h_2(t) = h_1(t) - m_2(t) \quad (2)$$

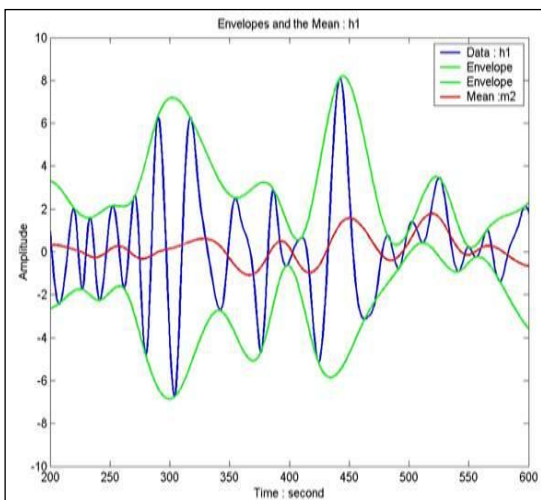
ГЭЖ ОЛНО.



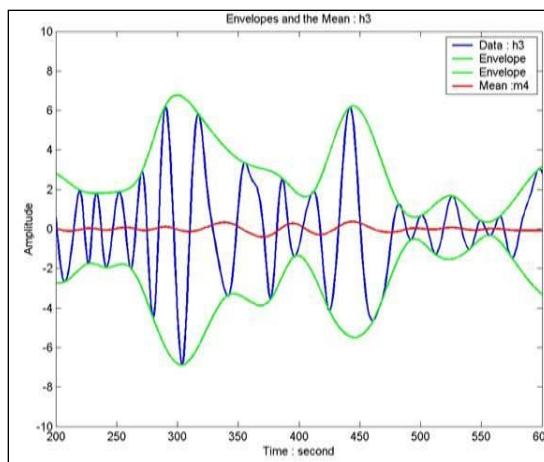
Зураг 2. Бүрхэгч муруйнууд ба дундач утгуудын функц $m_1(t)$.



Зураг 4. Бүрхэгч муруйнууд ба дундач утгуудын функц



Зураг 3. Бүрхэгч муруйнууд ба дундач утгуудын функц $m_2(t)$.



$m_3(t)$.

Зураг 5. Бүрхэгч муруйнууд ба дундач утгуудын функц $m_4(t)$.

Цаашидын алхамууд

Дээрхи алхамууд дараалан хийгдэнэ өөрөөр хэлбэл ДАФ-ийн нэгдүгээр функцийг олох дөхөлтүүд давтагдан хийгдэнэ.

$$h_k(t) = h_{(k-1)}(t) - m_k(t), \quad (3)$$

Зураг 4 ба Зураг 5 дээр дараагийн дөхөлтүүдийг харуулав.

$m_i(t)$ – функцийг олох дөхөлтийн тоо ихсэхийн хирээр $m_i(t)$ – функц нь $h_i(t)$ функц шиг хэлбэр нь өөрчлөгдөхгүй болж ирнэ. Дөхөлтийг зогсоох S,SD гэсэн хоёр арга байдаг. Эхний нилээн эртний SD (1998 он) гэгдэх арга нь дараалсан хоёр хэрчих үйлдлийн ялгаваруудын квадратын нормчлогдсон утгыг тогтоосон босгонд (SD_{min}) хүрмэгц зогсоодог. Үүнийг доорх томъёогоор илэхийлэн бичиж болно.

$$SD_k = \frac{\sum_{t=0}^T |h_{k-1}(t) - h_k(t)|^2}{\sum_{t=0}^T h_{k-1}^2}$$

Энэхүү арга нь судлаж буй мэдээлэлийн физик утгаас нь хамааруулан $h_i(t)$ функцийг янз бүрийн хэлбэрт тохируулан дөхөх утгын босгыг тогтооход төвөгтэй байдаг муу талтай.

Хоёр дахь арга S -нь мэдээлэлийн экстремумын тоо ба $h_s(t)$ функцийг тэг төвшинийг огтлох тоо өмнөх дөхөлтийнхээсээ өөрчлөгдөхгүй байгаагаар тодорхойлогддог. Туршлагаас харахад зохистой хэрчихийн тулд S -ийн утга 4-өөс 8-ын хооронд байх ёстой.

$h_k(t)$ функцийг сүүлчийн дөхөлтийг өгөгдсөн мэдээлэл $x(t)$ -г бүрэлдүүлэхэд шууд оролцдог дотоод агууламжийн функц (ДАФ)-ийн бүлд багтах хамгийн өндөр давтамжтай функц $c_1(t) = h_k(t)$ гэж үзэх ба энэ нь $c_1(t)$ –г анхны өгөгдсөн мэдээлэл $x(t)$ –ээс хасаж арай нам давтамжийн хэсгийг үлдээх боломжийг олгоно. (Зураг 6)

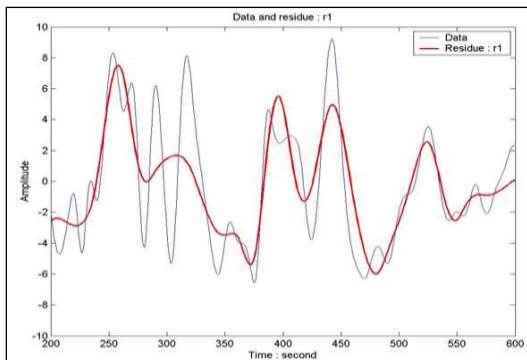
$$r_1(t) = x(t) - c_1(t). \quad (4)$$

Үлдэгдэл функц $r_1(t)$ -г цааш нь шинэ мэдээлэл $x(t)$ мэтээр боловсруулж дээр өгүүлсэн алхам ба дөхөлтийг гүйцэтгэж дотоод агууламжийн функц (ДАФ)-ийн бүлд багтах хоёр дахь функцийг олно.

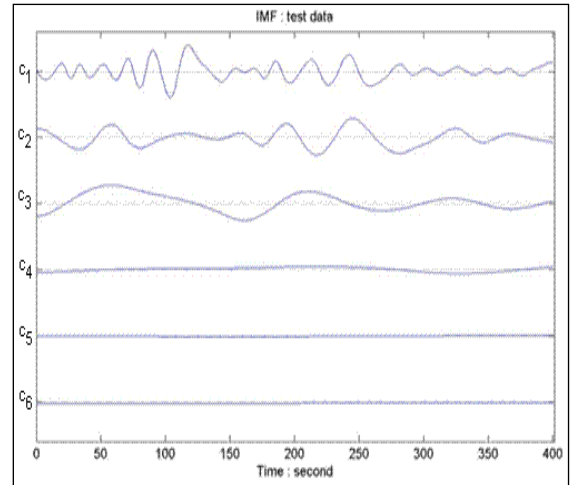
$$r_2(t) = r_1(t) - c_2(t), \quad (5)$$

Ийм байдлаар n -дөхөлтийн дараа мэдээлэлийг бодит агууламжаар задлах (ДАЗ) үйл ажиллагаа бүрэн дуусгавар болно.

$$x(t) = \sum_{j=1}^n c_j(t) + r_n(t) \quad (6)$$



Зураг 6. Анхны өгөгдсөн мэдээлэл ба үлдэгдэл $r_1(t)$



Зураг 7. Туршилтын мэдээлэлийн дотоод агууламжийн функц (ДАФ)-ууд

Задлах үйл ажиллагааг доорх шалтгаанаар зогсоож болно. Үүнд:

а. $c_n(t)$ буюу үлдэгдэл $r_n(t)$ нь мэдээлэл өгөгдсөн цаг хугацааны туршид далайцаараа буюу өгөгдсөн дохионы чадалтай харьцуулахад харьцангуй маш бага болох

б. Үлдэгдэл $r_n(t)$ монотон функц болж түүнээс ДАФ ялгах боломжгүй болох.

Дундач утга нь тэг мэдээлэлийн хувьд эцсийн үлдэгдэл тэгээс ялгаатай байж болдог. Хэрэв мэдээлэл ташилттай бол эцсийн үлдэгдлийн утга энэхүү ташилтийн утгатай тэнцүү байна. БАЗ аргыг хэрэглэхэд өгөгдсөн мэдээлэлийг төвлөрүүлж дундач утгыг тэг болгох оролдлого хийх шаардлага байхгүй. Задаргааны гишүүн бүрийн тэг шугам хэрчих явцад өөрөө олддог.

Бодит агууламжаар нь задлахад үүсэх гишүүн бүр нь физик утгатай байх ба учир нь ДАФ зөвхөн өгөгдсөн бодит мэдээлэлээр тодорхойлогддог.

Өөрөөр хэлбэл томъёо (6)-аас харахад өгөгдсөн дохио $x(t)$ –нь ямар нэг аналитик байдлаар өгөгдөөгүй гэхдээ суурь функцийг шаардлаганд нийцсэн тийм функциудаар тодорхойлогдож байна. Зөвхөн өөрийн дотоодод байгаа мэдээллийн бааз ашиглан задаргаа хийж байгаа учраас энэхүү (БАЗ) арга нь боловсруулалтын дасан зохицсон (адаптив) арга юм

III. ГИЛЬБЕРТИЙН СПЕКТР АРГА (ГСА-HAS)

Дээр өгүүлсэн аргаар ялган авсан ДАФ нь физик утга нь тодорхой байх хоромхон зуурын спектр бодох боломжийг олгодог ба энэ нь Гильбертын хувиргалтанд суурилан дохиог цаг хугацаа-давтамжийн мужид тооцоолон дүрслэх үндэс болдог.

Бодит дохио $s(t)$ -ийн хувьд Гильбертын хувиргалт нь доорх интегралын гол утга (PV)-р тодорхойлогддог [2].

$$\mathcal{H}_s(t) := \frac{1}{\pi} PV \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (7)$$

Үүнийг доорх аналитик дохиогоор илэрхийлж болно.

$$Z(t) = s(t) + i\mathcal{H}_s(t) = a(t)e^{i\theta(t)} \quad (8)$$

$$a(t) = \sqrt{s(t)^2 + \mathcal{H}_s(t)^2}, \quad (9)$$

$$\theta(t) = \arctan\left[\frac{\mathcal{H}_s(t)}{s(t)}\right]$$

энд $a(t)$ ба $\theta(t)$ нь- t хугацаанд харгалзсан дохионы далайц ба давтамж юм. Харин хоромхон зуурын давтамжийг доорх томъёгоор олно.

$$\omega(t) = d\theta(t)/dt. \quad (10)$$

Дээр дурьдсан далайц ба хоромхон зуурын давтамж нь цаг хугацааны функц гэдгийг мартаж болохгүй. Хэрэвээ бид Гильбертын хувиргалт ашиглан дурын дохионы хувьд цаг хугацаа –давтамжийн зураглалыг гаргаж чадвал Фурье хувиргалт ба вайвлетынхээс илүү энергийн нягтрал бүхий зураглал гарган авах боломжтой.[3] Өмнө хэрэглэгдэж байсан аргуудын үндсэн хүндрэл нь өгөгдсөн мэдээлэлээс гарган авсан хоромхон зуурын спектр нь ямар ч физик үндэслэлд харгалзахгүй тохиолдол гардаг байлаа. Ийм учир шалтгааны улмаас удаан хугацааны туршид Фурье хувиргалт болон элдэв шүүлтүүрийн аргаас салж чадахгүй байв.

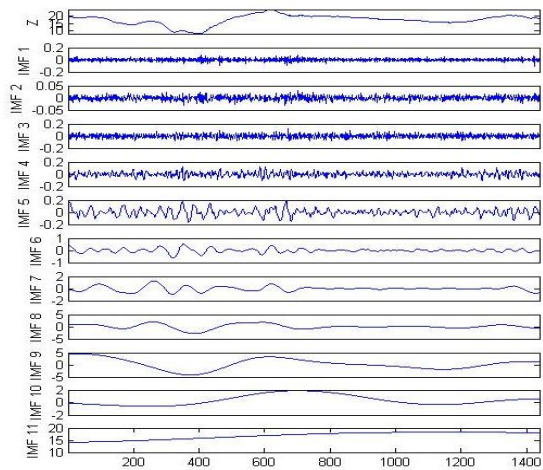
Дотоод агууламжийн функц (ДАФ)-ийн байгуулагч болгонд Гильбертын хувиргалт хийсний дараа анхдагч дохиог доорх байдлаар бодит хэлбэрээр бичиж болно.

$$x(t) = \Re\{\sum_{j=1}^n a_j(t) \exp[i \int \omega_j(t) dt]\} \quad (11)$$

Энд үлдэгдэл r_n –ийг тооцоогүй бөгөөд учир нь түүний утга эсвэл тогтмол эсвэл өсөх юм уу буурах (монотон) функц байдаг

IV. ҮР ДҮН, ТАЙЛБАР

Бид энэхүү аргыг зүгшрүүлж өөрсдийн судалгаанд өргөн ашиглах туршилтууд хийж байна. Үүний нэг жишээ болгон Улаанбаатар хотын ойролцоо Таван толгойд байгуулсан соронзон оргилд дэлхийн соронзон орны өөрчлөлтийг тасралтгүй бүртгэдэг ферросоронзон магнитометр LEMI-25–н 2013 оны 07-р сарын 30-ны өдрийн бичлэгийн Z-байгуулагчийн нэг хоногийн минутын утганд бодит агууламжаар нь задлах (БАС) арга хэрэглэн гаргаж авсан дотоод агууламжийн функц (ДАФ-INF)- уудийг Зураг 8-д үзүүлэв.

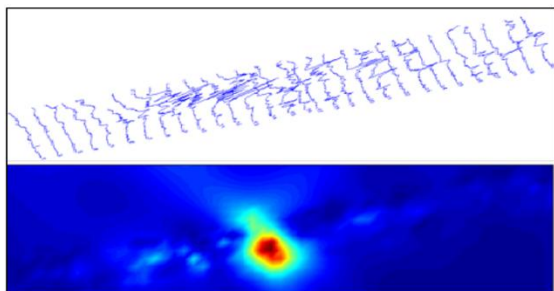


Зураг 8. Хоногийн хувьсал Z-ийн ДАФ-ууд

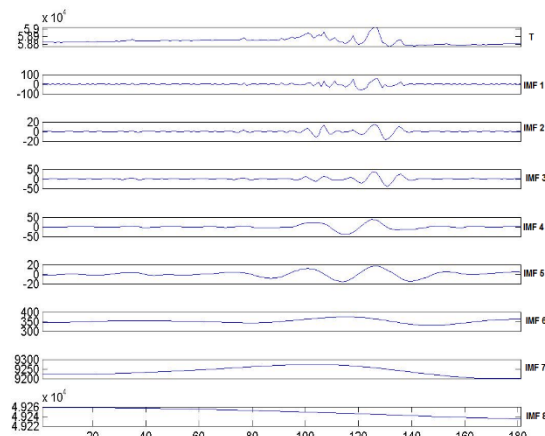
Эндээс харахад соронзон орны хоногийн бичлэг нь янз бүрийн үетэй өөрчлөлтүүдийн нийлбэр болох нь харагдаж байна. Урт үетэй вариациудын (INF 10, 9,8) зэрэгцээ богино үет өөрчлөлт сайн ялгарч байгаа нь соронзон оронд ажиглагддаг P_1, P_2 болон P_3 төрлийн лугшилтуудын тархалт, үүсэх механизмыг судлах цаашид автоматаар таних зэрэг судалгааны ажилд чухал ач холбогдолтой болох нь харагдаж байна.

Чулуулаг мандлын соронзон орныг үүсгэгч биетүүд, газар хөдлөлтийн улмаас газрын гүнд үүсэх эвдрэлийг илрүүлэх, газрын гүнд орших археологийн байр байдал, эд зүйлсийг эрж хайх, зураглахад дэлхийн соронзон орны хэмжилтийг ашиглах өргөн боломжтой. Ингэхдээ соронзон орны хэмжилтийг хэд хэдэн орны нийлбэр байдлаар илэрхийлж нилээн дурын гэж болох хязгаарлалт, хялбаршуулалт хийж байж гаж орныг ялган авч үүсгүүрийн болон гүний тооцоо хийдэг.

Төв аймгийн Алтанбулаг сумын нутагт орших “Шархайн хөндий” хэмээх газарт, газар хөдлөлийн улмаас үүссэн байж болох хагаралыг соронзон хэмжилтээр зураглах боломжтой эсэхийг тодорхойлох улмаар боловсруулалтын арга зүй буй болгох зорилгоор 4x1 км талбай дээр нийт 30 шугамын дагуу хийсэн соронзон хэмжилтийн мэдээлэлийг боловсруулахад бодит агууламжаар задлах (БАЗ) аргыг туршиж үзсэн юм. Зураг 9 дээр хэмжилтийн талбайд ажиглагдсан соронзон орны үнэмлэхүй утгын график ба ялгасан газар орны (локал) гажийн зургийг үзүүлэв.

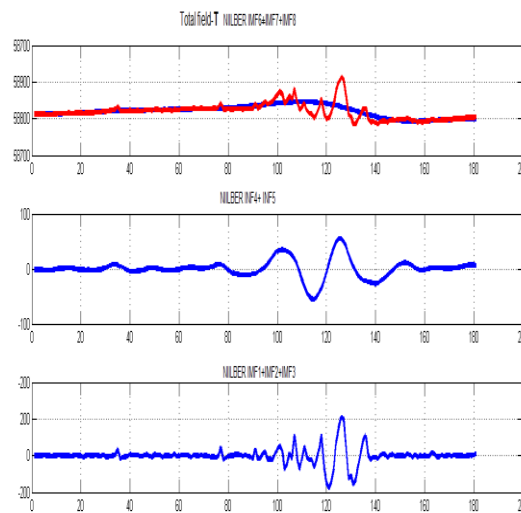


Зураг 9 Ажиглагдсан утга ба газар орны гаж [4]



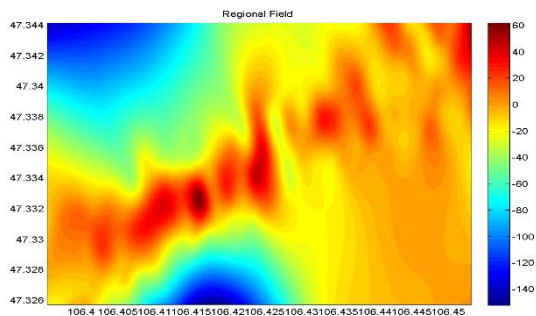
Зураг 10 Профил 10-ын утгын ДАФ-ууд

Зураг 10 дээр 10-р шугамын дагуу ажиглагдсан утгыг бодит агууламжаар задлах (БАЗ) аргаар задалж дотоод агууламжийн функц(ДАФ)-уудыг тодорхойлсоныг үзүүлэв.

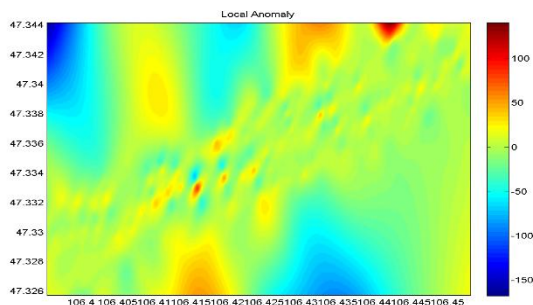


Зураг 11 Орон нутгийн (регионал) ба газар орны (локал) гаж орон

11-р зургийн дээд хэсэгт ажиглагдсан орон (улаан) ба ДАФ6, ДАФ7 ба ДАФ8 нийлбэрээр илэрхийлэгдэх түүний аажим өөрчлөгдөх хэсгийг (хөх) үзүүлэв. ДАФ4 ба ДАФ5-ын нийлбэр орон нутгийн (регионал) гажийг, ДАФ1, ДАФ2 ба ДАФ3 газар орны (локал) гажийг тус тус илэрхийлж байна. Нийт талбайгаар ялгасан орон нутгийн (регионал) ба газар орны (локал) гажийг Зураг 12 ба Зураг 13 дээр тус тус үзүүлэв.



Зураг 12. Соронзон орны региональ утга



Зураг 13. Соронзон орны локаль гажил

V. ДҮГНЭЛТ

М.Е.Торрес, М.А.Коломинас, Г.Шлоттхауер, Р.Фландрин нарын боловсруулсан алгоритмыг ашиглан бүх тооцоог хийж гүйцэтгэсэн бөгөөд SD параметрийг 0.2 гэж авсан нь бодит байдалд дөхсөн сонголт боллоо.

Дотоод агууламжийн функц (ДАФ)-аар дөхөх бодит агууламжаар задлах(БАЗ) арга нь мэдээлэл боловсруулах хүчтэй аргуудын нэг болох нь хийсэн судалгаанаас харагдаж байна. Соронзон орны тодорхой үет хувьсалыг судлах өргөн боломж байгаагийн зэрэгцээ геофизикийн потенциал орныг задлахад өргөн ашиглаж болохыг харуулав.

1. The Hilbert-Huang transform and its applications / editors, Norden E. Huang, Samuel S.P. Shen. - World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 5 Toh Tuck. Link, Singapore 596224
2. M.E.TORRES, M.A. COLOMINAS, G. SCHLOTTHAUER, P. FLANDRIN "A complete Ensemble Empirical Mode decomposition with adaptive noise," IEEE Int. Conf. on Acoust., Speech and Signal Proc. ICASSP-11, pp. 4144-4147, Prague (CZ)
3. Huang, N. E., and Z. Wu (2008), A review on Hilbert-Huang transform: Method and its applications to geophysical studies, Rev. Geophys., 46, RG2006.
4. Э.Батмагнай, Ү.Сүхбаатар Соронзон орны өгөгдөлд боловсруулалт хийх аргачлал. Хэвлэлд. 2015