

Улсын бүртгэлийн
дугаар.....
Аравтын бүрэн
ангиллын код

Нууцын зэрэглэл: А

Төсөл хэрэгжүүлэх
гэрээний дугаар:

ШИНЖЛЭХ УХААНЫ АКАДЕМИ ФИЗИК, ТЕХНОЛОГИЙН ХҮРЭЭЛЭН

НИСГЭГЧГҮЙ НИСЭХ АППАРАТ ДЭЭР СУУРИЛУУЛСАН ГЕОРАДАР
АШИГЛАН ТАЛ ХЭЭР, ГОВИЙН БҮСТ ГҮНИЙ УСЫГ ИЛРҮҮЛЭХ
ОНОВЧТОЙ АРГУУДЫН СУДАЛГАА

ОХУ-Монгол улсын ШУТ-ийн хамтарсан төслийн тайлан
2019-2022

Төслийн удирдагч:
Санхүүжүүлэгч байгууллага:
Захиалагч байгууллага:
Тайлан өмчлөгч:

Т.Галбаатар, доктор (Sc.D), Академич
Шинжлэх ухаан технологийн сан
Боловсрол, Шинжлэх Ухааны яам
Физик, технологийн хүрээлэн
Энхтайваны өргөн чөлөө, 54Б
Улаанбаатар 13330
Утас: 452819, 99001993
Э-хаяг: tgalbaatar@mas.ac.mn

Улаанбаатар
2023

Гарчиг

Реферат.....	3
Түлхүүр үг:	4
Гүйцэтгэгчдийн нэрсийн жагсаалт.....	4
Төслийн үр дүнгийн даалгавар.....	5
Удиртгал	6
Хуурай бүст ус хайх нисгэгчгүй нисэх аппарат дээр суурилуулсан георадарын энергийн характеристик	7
Дохионы тархалтын орчин:	8
Георадарт шаардагдах эрчим хүчний потенциал	13
Диэлектрик нэвтрүүлэх чадварын урьдчилсан тодорхойгүй байдлын нөлөөлөл ба хөрсний бүтцийн цахилгаан соронзон загвар	24
Гүн дэх хөрсний бүтцийн өөрчлөлтийн цахилгаан соронзон загвар	26
Газрын гүний хайгуулын мэдээллийн нарийвчлал, агуулгыг нэмэгдүүлэхийн тулд георадарыг радиометртэй нэгтгэх.....	31
Объектуудын гүнийг тодруулах цахилгаан соронзон хөрсний загварын бүтцийг тодорхойлох арга	32
Георадарын нислэгийн замын дагуу тандаж буй хэсгүүдэд газрын гүний ус бүхий хэсгүүдийн зураглалыг үүсгэх алгоритм.....	36
SAR алгоритмыг ашиглан гүний ус бүхий хэсгүүдийн зураглалыг үүсгэх программын семуляц.....	39
Георадарын төхөөрөмж бүхий нисгэгчгүй нисэх аппаратын техникийн баримт бичиг	42
Георадарын төхөөрөмжийн туршилтын загвар.....	42
Георадарын төхөөрөмж бүхий нисгэгчгүй нисэх аппаратын техникийн шаардлага	44
Нисгэгчгүй нисэх аппарат	45
Нисгэгчгүй нисэх аппаратын электрон удирдлага	47
Цахилгаан тэжээлийн хангамж	48
Газрын удирдлагын станц.....	49
Удирдлагын программ хангамжийн тохируулга	49
Автомат нислэгийн горимын тохируулга	49
Дүгнэлт	51
Төслийн үр дүнгээр хэвлэгдсэн бүтээлийн жагсаалт	56
Хавсралт 1.....	57

Реферат

Энэхүү төслийн хүрээнд Монгол орны тал хээр, говийн бүс нутгуудад гүний ус хайх зорилгоор нисгэгчгүй нисэх аппарат дээр георадарын төхөөрөмжийг суурилуулах боломжийг судлан, тооцоог гүйцэтгэсэн болно.

Судалгааны талбайд давамгайлж буй хөрсний төрлийг радио долгионы тархалтын орчин болгон авсан. Тал хээр болон говийн бүс нутгийн хөрсний онцлог нь усны агууламж багатай ба диэлектрик тогтмол нь бараг ижил байдаг бөгөөд хөрсний сийрэгжилтээс шалтгаалж бага зэргийн ялгаа үүсдэг. Тодорхой гүн дэх хөрсний диэлектрик дамжуулалтын өөрчлөлтийн загварыг авч үзсэн.

Мөн идэвхтэй шугаман давтамжийн модуляц бүхий георадарыг радиометртэй нэгтгэх аргыг тодорхойлсон.

Түлхүүр үг: георадар, хөрсний бүтэц, электрофизик шинж чанар, зайнаас тандан судлах, радиометр, нисгэгчгүй нисэх аппарат.

Гүйцэтгэгчдийн нэрсийн жагсаалт

(овог нэр, эрдмийн зэрэг, цол, албан тушаал)

1. Т.Галбаатар – доктор (Sc.D), Академич, ЭШТА
2. Б.Зандан – ЭШДэдА, аспирант
3. Б.Наранбат – ЭШДэдА, аспирант

Төслийн үр дүнгийн даалгавар

/техникийн даалгавар/

№	Төслөөр бий болох үр дүн	Тоо хэмжээ	Үр дүнгийн үзүүлэлт	Үр дүнг хүлээлгэн өгөх хугацаа (он, сар)
1	Бүтэцдээ тусгай диэлектрик ашигласан өргөн зурваст ажиллах антенны систем болон тохируулгын оновчтой төхөөрөмж	2	Төслийн даалгаварт нийцсэн мэргэжлийн сэтгүүлд хэвлүүлэх өгүүлэл болон туршилтын загвар	2019 оны 12 сар
2	Агаараас тандах георадарын төхөөрөмжийн компьютер загварчлалыг гүйцэтгэж, түүний оновчтой параметруудийн дагуух сонголтын зөвлөмж, техникийн баримт	2	Төслийн даалгаварт нийцсэн мэргэжлийн сэтгүүлд хэвлүүлэх өгүүлэл болон төхөөрөмжийн техникийн даалгавар, зураг	2020 оны 12 сар
3	Георадиолокацийн нислэгийн замын дагуу тандаж буй хэсгүүдэд газрын гүний ус бүхий хэсгүүдийн зураглалыг үүсгэх программ хангамжийн загвар	1	Төслийн даалгаварт нийцсэн мэргэжлийн сэтгүүлд хэвлүүлэх өгүүлэл	2021 оны 11 сар
4	Төслийн эцсийн тайлан бичих хүлээлгэн өгөх.	1	Төслийн эцсийн тайлан	2021 оны 12 сар

Удиртгал

Газар доорх ус нь дэлхийн хуурай бүс нутгуудад үнэ цэнэтэй нөөц болдог. Монгол улс нь төв болон зүүн азийн бүст орших ба ундны усны хомсдолтой, ялангуяа өмнөд хэсгээрээ ундны усны хомсдолд орсон орон юм.

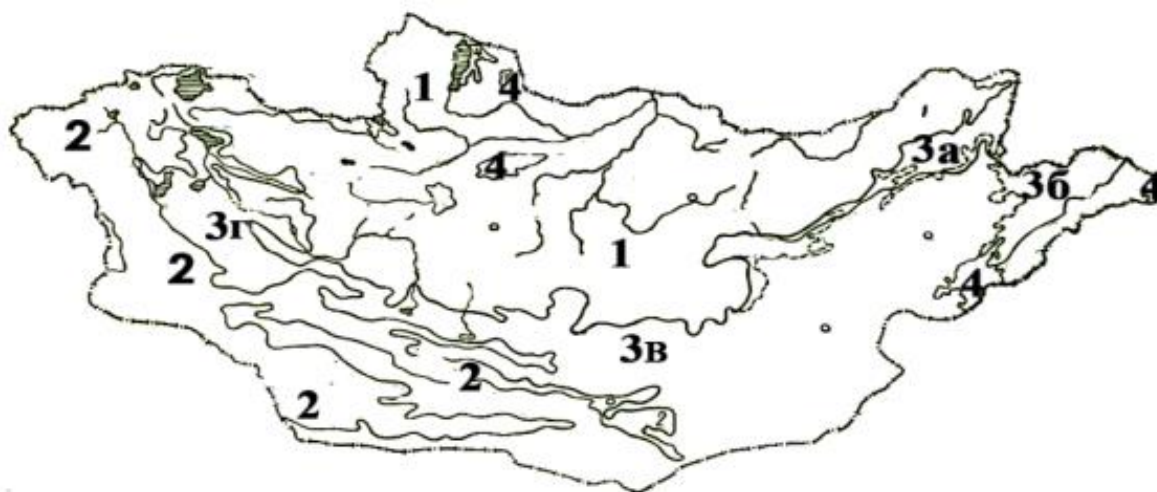
Монгол орны хувьд 1960 оноос 2011 оны хооронд нийт 5 удаагийн судалгаагаар гүний усны 207 эх үүсвэрийг тодорхолсон байдаг. Гэсэн хэдий ч эдийн засаг, байгалийн менежментийн эрчимтэй хөгжил нь усны нөөцийн хэмжээ, хүчин чадлыг тодорхойлох орчин үеийн бүрэн хэмжээний судалгааг шаарддаг бөгөөд энэ нь уг судалгааны ач холбогдлыг харуулж байна [1, 2].

Уг төслийн хүрээнд ОХУ-ын МЭИ-ийн Радиолокацийн тэнхимтэй хамтран нисгэгчгүй нисэх аппарат дээр георадарын төхөөрөмж суурилуулан тал хээр, говийн бүст гүний усыг илрүүлэх оновчтой аргуудын судалгааг хийж гүйцэтгэсэн.

Хамтарсан төслийн тайлангийн материал нь удиртгал, дөрвөн хэсгээс тогтох судалгааны үндсэн агуулга, дүгнэлт, ашигласан материалын жагсаалт, төслийн үр дүнгээр хэвлэгдсэн бүтээлийн хавсралт зэрэг хэсгүүдээс тогтоно.

Хуурай бүст ус хайх нисгэгчгүй нисэх аппарат дээр суурилуулсан георадарын энергийн характеристик

Монгол орны гүний усны нөөцийн томоохон судалгаа нь 1960, 1970, 1980, 1996 онуудад хийгдсэн, хамгийн сүүлд 2011 онд хийгдсэн байна. Эдгээр судалгаагаар Монгол улсын гүний усны 207 эх үүсвэрийг илрүүлсэн байна. Өмнөх судалгааны ажлуудын үр дүнгээс харахад гүний усны нөөцүүд нь янз бүрийн тектоникийн чулуулгийн давхрагуудаас олдсон байна (Зураг 1).



Зураг 1. Монгол орны гидрогеологийн бүсчлэлийн схем. Гидрогеологийн бүс нутаг: 1 - Хангай-Хэнтэйн уулархаг бүсийн хөрсний усны тархалт; 2 - Монгол-Алтай, Говь-Тянь-Шань уулархаг бүс нутгийн хөрсний усны тархалт, хөрсний устай уул хоорондын сав газрын артезиан усны тархалт; 3а-Чойбалсан, 3б-Тамцаг, 3в-Говь, 3г-Их нууруудын сав газар; 4 - Кайнозойн тэгш өндөрлөг-базальтуудын давхардсан бүтэц.

Уг судалгаагаар гадаргын усны нөөц маш багатай буюу хөрсний бүтэц, сул нягтаршилтай улсын өмнөд хэсгийн хуурай, цөлийн бүс нутгуудад гүний усны нөөцийн хайлт хийх сонирхолтой байна. Эдгээр бүсийн хөрс нь элсэн чулуу, элс, сул ба өтгөн конгломерат, нүүрс, алевролит, шаварлаг чулуу, занараас тогтоно. 3б, 3в, 3г бүсүүдэд гүний ус хэд хэдэн метрээс олдох боломжтой ба энэ нь георадарын аргыг хэрэглэн ус хайх боломжтой юм. Өргөн газар нутгийг судлах шаардлагатай тул нисгэгчгүй нисэх аппарат (ННА) дээр георадар суурилуулахаар төлөвлөсөн.

Өгөгдсөн сэдвээр олон улсын шинжлэх ухааны хэд хэдэн өгүүлэлд дурдагдсан болно [4-7]. Үндсэндээ эдгээр хэвлэлүүд нь мөсөн хавтангуудын дуугаралтад дээр үндэслэгдсэн байсан. Георадарын нягтралын хүрээнд мөсөн

бүрхүүлийг диэлектрик тогтмол бага зэрэг өөрчлөгддөг нэгэн төрлийн орчин гэж үзэж болно. Мөн мөсөн голууд нь олон жилийн хуримтлалын улмаас давхаргат бүтэцтэй байдаг. Гэхдээ диэлектрик шинж чанаруудыг багтаадаг электрофизик шинж чанарууд нь бараг тогтмол бөгөөд тэр утга нь хуурай хөрснийхтэй ойролцоо байдаг. Иймээс элсэн цөл, хуурай газрын уст давхаргыг НАА дээр суурилуулсан георадар ашиглан илрүүлэх боломжтой гэж үзэж болно.

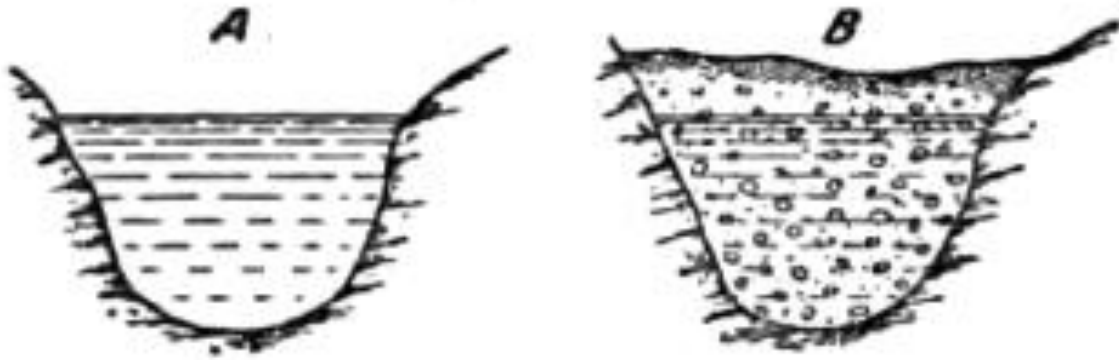
Дохионы тархалтын орчин:

Хоосон зайгаар дүүрсэн, ус хуримтлуулах үүрэгтэй дэлхийн давхаргыг уст давхарга гэж нэрлэдэг. Ус хуримтлуулдаг, шилжилт хийх боломжтой хөрсөн доорх хоосон зайн шинж чанараас хамаарч уст давхаргын гидрогеологийн болон бусад шинж чанарууд өөр өөр байдаг.

Уст давхаргууд дараах байдлаар ангилагдана [8]:

- Сул бөөгнөрөлт буюу мөхлөгт чулуулгийн хоосон зай. Ийм чулуулгийн бие даасан мөхлөгийн хоорондох зай нь хүний биеийн цусны систем шиг бүтцийг үүсгэдэг. Мөн тэдгээр зайд хуритлагдсан ус нь энгийн нэг тасралтгүй дусалт-шингэн бие биш харин нэг нэгэнтэйгээ гидродинамик холбоотой бие даасан усан судал эсвэл урсгал юм. Усан давхрагын мөхлөг бүхий масст хаагдсан хоосон зайг сүв гэж нэрлэдэг ба ийм сүвэрхэг масст үүссэн газар доорх усыг хөрсний ус (Грунтовые воды) гэж нэрлэдэг.
- Хатуу, цул, уулын чулуулаг дах хоосон зай нь хагарал, хонхорхой, агуй бөгөөд энэ нь гүний усны сан болдог байна. Ийм санд хуримлагдсан гүний ус нь гадаргын усны урсгалтай төстэй нэг тасралтгүй дусалт-шингэн биет бөгөөд тэдгээрийг гүний усны урсгал гэж нэрлэдэг (Подземные воды).

Хөрсний болон гүний усны хоорондох ялгааг зураг 2-т үзүүлэв. Хэрэв А сувгийн бүх хэсэг нь зөвхөн усаар дүүрсэн бөгөөд энэ суваг нь газар доор оршдог бол гүний урсгалтай болно. Хэрэв В сувгийн хэсэг нь гүний ус шилждэг элс, хайргагаар дүүрсэн бол энэ нь хөрсний ус болно.



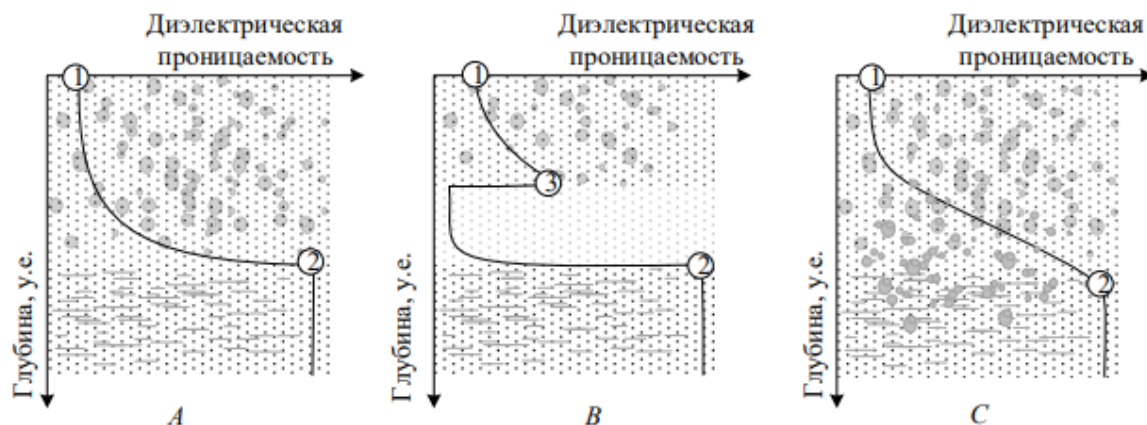
Зураг 2. Гүний болон хөрсний усний ялгааг харуулах схемчилсэн зураг.

Хэрэв хоёр суваг дахь ус хөдөлгөөнтэй байвал А болон В урсгал дахь гидравлик процессууд нь өөр өөр байна гэдгийг ойлгоход хэцүү биш юм. А урсгалд усны урсгалын үед үүсэх үрэлт нь зөвхөн сувгийн хананд үзүүлэх усны үрэлтээс хамаардаг бол В урсгалын хувьд сувгийг дүүргэх мөхлөгт материалын массын улмаас хананд үзүүлэх эсэргүүцэл дээр дотоод эсэргүүцэл нэмэгддэг. Энэ нь усны хөдөлгөөний урсгалын хурдыг удаашруулдаг.

Уст давхарга дахь хөрсний усны урсгалын харьцангуй хүчтэй эсэргүүцэл нь хөрсний усны гадаргуун хэлбэрт тусгалаа олдог байна. Уст давхрагын эсэргүүцлийн нөлөөнд хөрсний усны гадаргуун хэлбэр нь нилээд зөв гадаргууг (правильные поверхности) үүсгэдэг ба тэдгээрийн хэлбэр нь бараг өөрчлөгддөггүй.

Цэг бүр нь энгийн гадаргуу болох хэсэгтэй байх орон зайн дэд олонлогийг зөв гадаргуу гэж нэрлэдэг. Газар доорх усны урсгалд усны гадаргуу нь гадаргын усны урсгалын гадаргаас ямар ч ялгаа байхгүй. А сувгийг хэсэгчлэн эсвэл бүрэн усаар дүүргэж болно гэдгийг онцлон тэмдэглэх нь зүйтэй.

Хөрсний усны толин гадаргуу орших тодорхой гүнд байх хөрсний диэлектрик нэвтрэх чадварын өөрчлөлтийн боломжит ердийн тэнцвэртэй загваруудыг зураг 3-т үзүүлэв.



Зураг 3. Хөрсний диэлектрик нэвтрэх чадварын өөрчлөлтийн боломжит ердийн тэнцвэртэй загварууд: А - сувгийн бүрэн бус урсгалтай хөрсний загвар, В - сувгийн бүрэн урсгалтай хөрсний загвар, С - хөрсний усны загвар.

Зураг 3-т диэлектрик нэвтрэх чадварын боломжит өөрчлөлтийг үзүүлсэн. 1-р цэг нь дэлхийн гадарга бөгөөд төрөл бүрийн хуурай хөрсний хувьд диэлектрик нэвтрэх чадвар нь бараг үргэлж ижил бөгөөд 2 - 3-тай тэнцүү байна.

Тодорхой гүн дэх диэлектрик нэвтрэх чадвар нь хөрсийг бүрдүүлдэг чулуулгийн төрөл, улирал, температур гэх мэтээс хамаарна. Зураг 3-т тодорхой гүнтэй хөрсний диэлектрик нэвтрэх чадварын нөхцөлт өөрчлөлтийг үзүүлсэн. 2-р цэгт хөрсний усны толин гадаргуу орших ба диэлектрик нэвтрэх чадварын утга нь 80 орчим байна.

Зураг 2-т үзүүлсэн В сувгийн хэсгийг хэсэгчлэн усаар дүүргэх үед усны урсгалын гадаргуу болон усанд тэсвэртэй хатуу хөрсний хооронд хоосон зай үүсэх бөгөөд диэлектрик нэвтрэх чадварын утга 1-тэй ойролцоо байна.

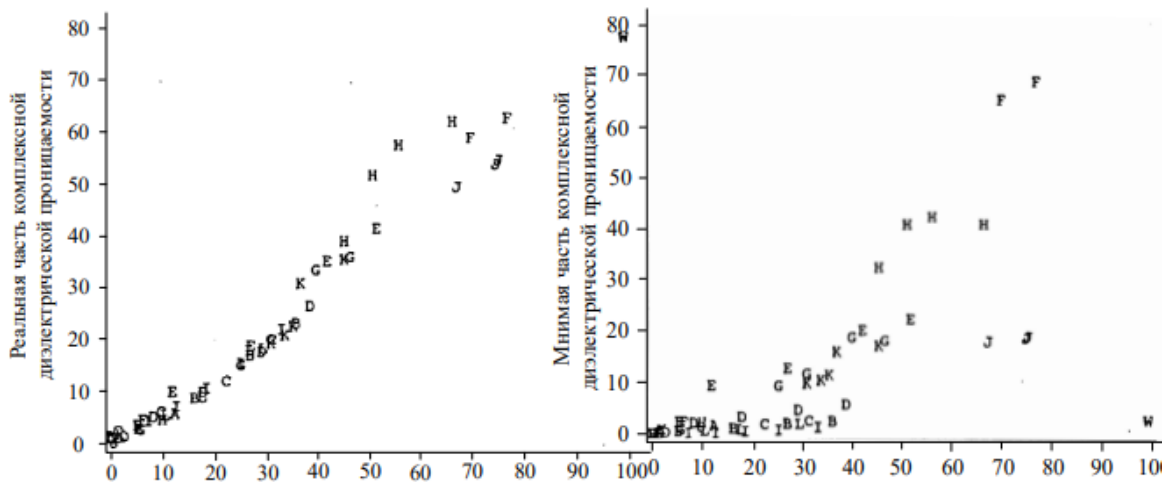
Дээр дурьдсанчлан хуурай хөрсний диэлектрик нэвтрэх чадварын утга нь бараг ижил байдаг. Тиймээс гантай бүс нутагт хөрс усны түвшин хүртэл нэгэн төрлийн гэж үзэж болно. Гантай бүсэд удаан хугацаагаар бороо ороогүйн байсны дараа хөрсөн дэх завсрын бүсийн ихэнх хэсгийн хувьд ийм нөхцөл үүсдэг. Энэ тохиолдолд нэгэн төрлийн хөрсний диэлектрик нэвтрэх чадварын утгат шууд нөлөөлөх чийгийн агууламж нь усны түвшнээс дээш байх болно.

Элсэрхэг хөрсний хувьд зурган дээрх муруйн хамгийн бага чийгтэй хэсэгт (муруй "хуурай хэсэг") бараг тогтмол бага чийгийн агууламжийг тэмдэглэж

болно. Энэ нь муруйн эгц хэсэгтэй холбоотой ба зураг 3В-ээс харж болно. Гэсэн хэдий ч шаврын агууламж өндөртэй хөрсний чийгийн шинж чанар нь тийм эгц шинж чанартай байдаггүй ба илүү жигд өөрчлөгддөг бөгөөд зураг 3А-аас харж болно. Иймээс усанд тэсвэртэй давхарга болох болно. Усны толин тусгал хүртэл чийгээр ханасан гүнд байрлах шилжилтийн давхарга нь түүний диэлектрик нэвтрэх тогтмол нь аажуухан өөрчлөгддөг давхрагатай тохирдог. Мөн ойсон сигнал нь сул байх болно, жишээлбэл зураг 3С. Хөрст давхаргуудын хоорондох жигд шилжилт нь давхрагуудын заагууд дах ойлтоор буурах тохирох эффекттэй байна[9].

Тиймээс хангалттай зузаан шилжилтийн экспоненциал давхарга байгаа нь (диэлектрик нэвтрэх чадварын өөрчлөлтөөр) авч үзэж буй бүтцийн дотоод үеүүдийн тухай мэдээллийн алдагдалд хүргэдэг. Мөн эсрэгээрээ хэрэв маш нимгэн шилжилтийн давхарга байгаа бол авч үзэж буй системээс радио долгионы ойлт нь шилжилтийн давхарга байхгүй үеийнхтэй бараг ижил байх ёстой.

Хөрсний электрофизик шинж чанарт нөлөөлөх чийгийн нөлөөллийг авч үзье. Температур, чийгийн өөрчлөлтийн нөхцөлд янз бүрийн давтамжтайгаар янз бүрийн хөрсний цахилгаан шинж чанарыг хэмжих үр дүнг [10]-д үзүүлэв. Эдгээр өгөгдлөөс харахад чийг 0-ээс 30-35% хүртэл өөрчлөгдөхөд хөрсний диэлектрик нэвтрэх чадварын комплекс тооны бодит хэсэг бараг шугаман өсөж байгаа ба хуурмаг хэсэг нь бага зэрэг өөрчлөгддөг нь илт байна (зураг 4, 5). Гэхдээ чийгшил нэмэгдэхийн хэрээр нэвтрүүлэх чадварын бодит болон хуурмаг хэсгүүд, ялангуяа шаварлаг төрлийн хөрсний хувьд огцом нэмэгддэг.



Зураг 4. 78 МГц давтамж, 20⁰С температурт төрөл бүрийн хөрсний диелектрик нэвтрэх чадварын комплекс тоон бодит хэсгийг чийгшилээс хамаарах хамаарал.

Зураг 5. 78 МГц давтамж, 20⁰С температурт төрөл бүрийн хөрсний диелектрик нэвтрэх чадварын комплекс тоон хуурмаг хэсгийг чийгшилээс хамаарах хамаарал.

*Зураг 4 болон 5 дах үсгэн тэмдэглэгээнүүд нь хүснэгт 1-н өгөгдөлтэй тохирч байна.

Хүснэгт 1-д хөрсний талаархи мэдээллийг өгсөн бөгөөд тэдгээрийн диелектрик нэвтрүүлэх чадварын утгыг Зураг 4, 5-д үзүүлэв.

Хүснэгт 1. Хөрсний тодорхойлолт

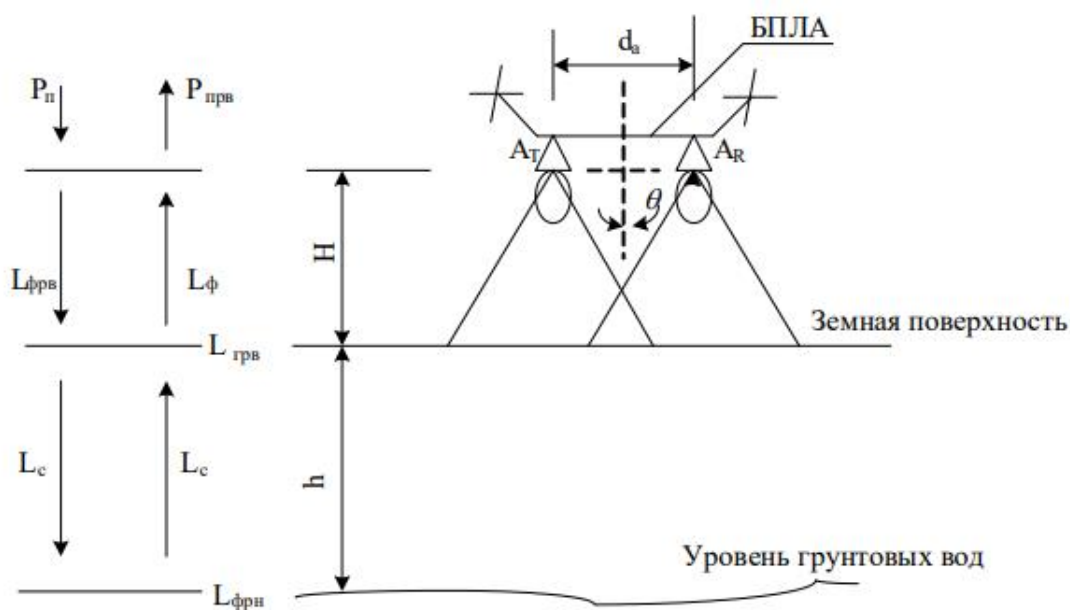
Хөрсний тэмдэглэгээ	Хөрсний төрөл	Жингийн хувиар		
		элс	лаг	шавар
A	Шавар, цайвар саарал	2	22	76
B	Элс, цайвар саарал	98	2	0
C	Шаварлаг элс, Бор	88	8	4
D	Шаварлаг элс, улаан хүрэн	77	9	14
E	Шаварлаг шавар, Бор	-	93	7
F	Глина, серая	1	48	51
G	шаварлаг элс, хар хүрэн	55	32	13
H	Шавар, саарал	2	64	34
I	Элс, цагаан	100	0	0
J	Тунгалаг, цагаан	0	46	54
K	Шаварлаг шавар, Элсний ул мөртэй Бор	4	89	17
L	Элс, бор	99	1	0

Тиймээс зураг 3-г үзүүлсэн загварууд нь бодит байдалтай нийцэж байна гэж үзэж болох бөгөөд тэдгээрийг ашиглан георадарын эрчим хүчний потенциалыг тооцоолох болно.

Георадарт шаардагдах эрчим хүчний потенциал

Газарзүйн байршлын хувьд хөрсөн дэх дохио мэдэгдэхүйц сулрахаас гадна тархалтын орчны цахилгаан физикийн шинж чанарын анхдагч нөхцлийн тодорхойгүй байдлын асуудал үүсдэг. Гэхдээ хуурай хөрсний хувьд бараг бүх төрлийн хөрсөнд диэлектрик нэвтрэх тогтмол ойролцоогоор ижил байна. Энэ нөхцөл байдал нь гандуу, цөлийн бүсийн хөрс нь хэд хэдэн давхаргаас бүрдсэн байсан ч хайлтанд хэрэглэгдэх дохионы хувьд ойролцоогоор нэг төрлийн гэж үзэх боломжийг бидэнд олгодог. Гэхдээ хэрэв дохио явуулах бай нь гүний усны давхарга юм бол уст давхарга дээр байрлах холбогдох усны улмаас гөлгөр шилжилтийн хөрсний давхарга бий болно.

Георадарын янз бүрийн ажиллагааны нөхцөлд хүлээн авсан дохионы энергийн характеристикын шинжилгээ нь төслийн чухал үе шат юм. Ихэнхдээ георадарын параметрийн сонголт, түүний шинж чанарын утга болон чанарын үзүүлэлтүүдийг тодорхойлдог.



Зураг 6. Даалгаварын геометрийн тавилт.

Георадарын энергийн характеристикыг тооцоолохын тулд зураг 6-д үзүүлсэн зайнаас тандан судлах даалгаварын геометрийн тавилтыг авч үзнэ мөн энэ нь зураг 3 дээрх А загвартай тохирно гэж үзье. Энэ тохиолдолд дамжуулагч болон хүлээн авагч антеннууд нь бие биенээсээ хэвтээ хавтгайд хамгийн бага зай d_a -аар тусгаарлагдсан бөгөөд газрын гадаргуугаас Н өндөрт байрладаг гэж үзье. Зайнаас тандан судлах "зорилт"-ын хувьд бид хөрсний дээд хилтэй харьцангуй h гүнд байрладаг, цахилгаан шинж чанар нь мэдэгдэж байгаа хоёр давхаргын хооронд байрлуулсан интерфэйсийг авч үзье.

Георадарын тэгшитгэл нь хөрсөн дэх дохио тархах үед гарч болох бүх төрлийн алдагдлыг харгалзан үздэг. Тухайлбал Н өндрөөс тандах үед долгионы фронтын зөрүүгээс үүсэх алдагдал, орчны хил дээрх алдагдал, орчин дахь алдагдал, фокуслоогүй үеийн алдагдал гэх мэт бүх төрлийн алдагдлыг харгалзан үздэг. Диэлектрик орчинд зайнаас тандан судлах тохиолдолд георадарын тэгшитгэлийг дараах хэлбэрээр бичиж болно:

$$P_R = P_T \cdot G_{A1} \cdot g_1 \cdot \widetilde{L}_{A1} \cdot \frac{\widetilde{L}_{t1} \widetilde{L}_{B1} \widetilde{L}_{h1}}{4\pi R_1^2} \cdot L_{fk} \cdot \widetilde{L}_{tg} \cdot \frac{\widetilde{L}_{t2} \widetilde{L}_{B2} \widetilde{L}_{h2}}{4\pi R_2^2} \cdot \frac{\lambda^2 G_{A2}}{4\pi} \cdot g_2 \cdot \widetilde{L}_{A2} \cdot L_{dfk} \quad (1)$$

Энд P_T болон P_R нь харгалзан дамжуулагч болон хүлээн авагчийн чадал; G_{A1} болон G_{A2} нь хүлээн авах ба дамжуулах антенны чиглэлийн коэффициент; g_1 болон g_2 чиглэлтэй антенны нормчилох диаграмм; $\widetilde{L}_A = \widetilde{L}_{A1} \cdot \widetilde{L}_{A2}$ нь георадарын антенн-фидерын системийн дамжуулагч, хүлээн авч дахь алдагдал; $\widetilde{L}_t = \widetilde{L}_{t1} \cdot \widetilde{L}_{t2}$ нь агаарын давхаргаар тархах үеийн алдагдал; $\widetilde{L}_B = \widetilde{L}_{B1} \cdot \widetilde{L}_{B2}$ нь агаар-газар-агаар, хөрс-газар доорх уст давхаргат тусгах үеийн алдагдал; $\widetilde{L}_h = \widetilde{L}_{h1} \cdot \widetilde{L}_{h2}$ нь хөрсөнд цахилгаан соронзон долгион тархах үеийн алдагдал; \widetilde{L}_{Tg} нь зайнаас тандан судлах үед хоёр давхаргын усны хагалбарын хилээс дохионы ойлттой холбоотой алдагдал; L_{fk} агаар-хөрсний заагийн шилжилтийн үед фокуслолтоос үүсэх өсөлт; L_{dfk} хөрс-агаарын заагийн шилжилтийн үед дэх фокусын гажилтаас үүсэх алдагдал;

Эхний ойролцооллоор налуу мужуудыг тэнцүү гэж үзсэн $R_1(\theta, \varphi) \approx R_2(\theta, \varphi) \approx H$.

Георадарын чадамж

$$p[\text{дБ}] = 10\lg\left(\frac{P_T}{P_{R\min}}\right) = L_A + L_t + L_B + L_h + L_{fk} + L_{dfk} + L_{Tg} \quad (2)$$

Хэрэв георадарын тэгшитгэлийг логарифм хэлбэрээр үзүүлбэл зайнаас тандан судлах суваг дахь нийлбэр алдагдлыг децибелээр (дБ) илэрхийлнэ [11, 12]:

Георадарын антенн-фидерийн систем дэх алдагдлууд

$$L_a = L_{A1} + L_{A2}, \quad (3)$$

тархалтын алдагдал

$$L_t = 10\lg\left(\frac{(4\pi)^3 \cdot R_1^2 \cdot R_2^2}{G_{A1} \cdot \lambda^2 \cdot G_{A2} \cdot g_1 g_2}\right) \approx 10\lg\left(\frac{(4\pi)^3 \cdot H^4}{G_{A1} \cdot \lambda^2 \cdot G_{A2} \cdot g_1 g_2}\right) \quad (4)$$

агаар-хөрс-агаарын (агаар-хөрс), хөрс-гүний усны (хөрс-гүний ус) заагаас ойход үүсэх алдагдал:

$$L_B = L_{B1} + L_{B2}.$$

$$L_{B1} = -20\lg R_{\text{агаар-хөрс}} \quad (5)$$

$$L_{B2} = -20\lg R_{\text{хөрс-гүний ус}} - 20\lg|1 - R_{\text{агаар-хөрс}}^2| \quad (6)$$

Энд $R_{\text{агаар-хөрс}}$ агаар-хөрс ойлт, $R_{\text{хөрс-гүний ус}}$ хөрс-гүний давхрагын ойлтын коэффициент;

L_h - h зайтай алдагдалтай орчинд тархах үеийн цахилгаан соронзон долгионы унтралтаас үүдэлтэй алдагдал

$$L_h = 10\lg\left(8.686 \cdot h \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon'(h)}{2} (\sqrt{1 + tg^2 \delta} - 1)}\right) \quad (7)$$

Энд ε' хөрсний диелектрик нэвтрэх чадварын бодит хэсэг, $tg^2 \delta$ хөрсний диелектрик нэвтрэх чадварын алдагдлын тангенс өнцөг.

L_{fk} агаар-хөрсийн заагийн шилжилтийн үед фокусаас үүсэх өсөлт

$$L_{fk} = 20\lg\left(\frac{H+h}{H+\frac{h}{Re}\sqrt{\varepsilon}}\right) \quad (8)$$

L_{dfk} хөрс-агаарын заагийн шилжилтийн үед фокусын гажилтаас шалтгаалах алдагдал

$$L_{dfk} = 20 \lg \left(\frac{H+h}{h+H \cdot Re\sqrt{\epsilon}} \right) \quad (9)$$

Георадарын зорилтот газар нь газрын гүний урсгалын гадаргуу болох газрын доорх ойлтын давхрага учраас дохионы ойлттой холбоотой алдагдлууд нь заагуудаас үүсэх алдагдлаар тооцдог.

Боловсруулсан арга, программ хангамж нь георадарын үндсэн энергийн характеристикыг тооцоолох боломжийг олгодог: газрын доод давхрагын гажилтаас ойсон дохионы хүлээн авагчийн оролтын чадал, энергийн потенциал болон дохио-шуугианы харьцаа, хөрсний дээд заагаас ирэх дохионы чадал.

Зураг 3-т үзүүлсэн гурван загварын уст давхаргыг илрүүлэх георадарын потенциалыг тооцоолох жишээг авч үзье.

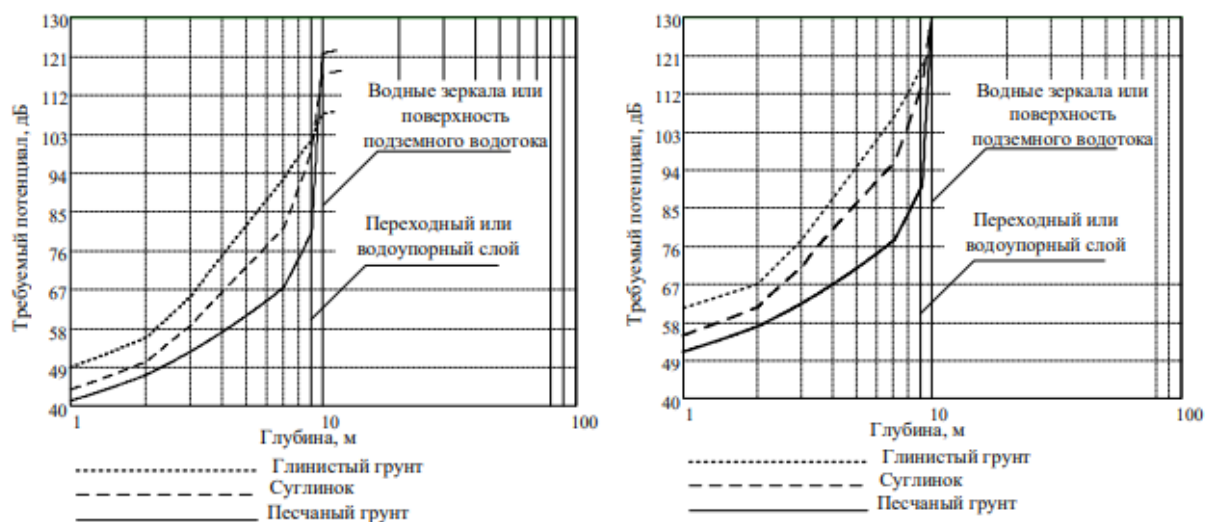
Георадарын дохионы тархалтын гүн нь зөөгч дохионы давтамж буурах тусам нэмэгддэг нь мэдэгдэж байгаа боловч нөгөө талаас гүнийг хэмжих чадамжийн нарийвчлал нь дохионы спектрийн өргөнөөс хамаардаг бөгөөд үүнээс гадна давтамж буурах тусам антенны хэмжээ нэмэгддэг.

Георадар нь нисгэгчгүй нисэх аппаратын тавцан дээр байрлах учраас энэ нь хүндэрлийг үүсгэнэ. Тооцооллын хувьд хоёр боломжит утгын хувьд шугаман давтамжийн модуляц бүхий өргөн зурвасын дохио сонгосон:

- 1) $f_0 = 75 \text{ МГц}, \Delta f_c = 60 \text{ МГц};$
- 2) $f_0 = 200 \text{ МГц}, \Delta f_c = 160 \text{ МГц}.$

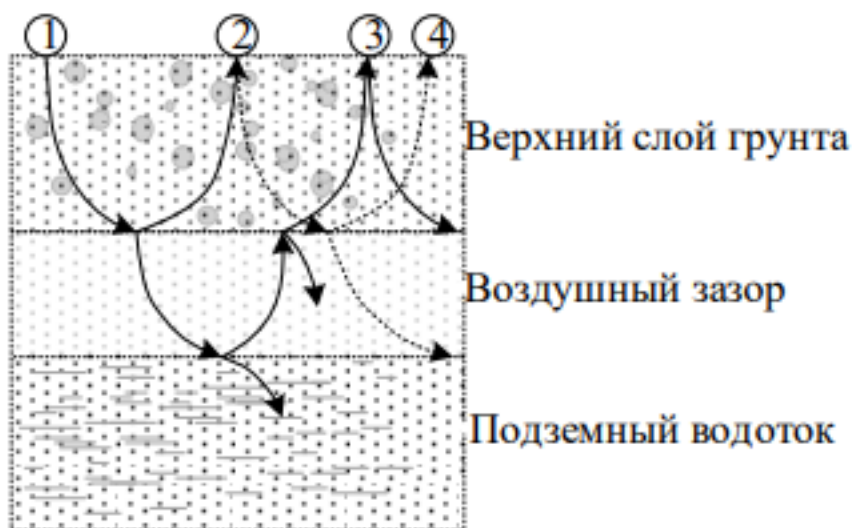
Зураг 3 дээрх А загварын хувьд давхаргат хөрсийг нэгэн төрлийн гэж үзэж болно. Учир нь давхаргын диэлектрик нэвтрүүлэх чадвар нь ойролцоо утгатай байдаг. Шилжилтийн эсвэл ус үл нэвтрэх давхаргууд нь илүү хатуу чулуулаг эсвэл гүний урсгалтай байх чулуулгийн давхрага байх боломжтой. Орчны өгөгдсөн загваруудын хувьд шаардлагатай потенциалын тооцоо нь зураг 7а болон 7б-д үзүүлсэн.

Шилжилтийн давхаргад диэлектрик нэвтрүүлэх чадвар нэмэгддэг, хөрс нь элс агуулсан үед энэ өсөлтийн хурд эсвэл муруйн эгц өсөлт нь хамгийн тод илэрдэг.



Зураг 7. а) 75 МГц давтамжтай $h = 0.3\text{ м}$ зузаантай давхаргын үед хоёр орчны зааг дээрх усан давхаргыг илрүүлэхэд шаардагдах георадарын потенциал, б) 200 МГц давтамжтай $h = 0.3\text{ м}$ зузаантай давхаргын үед хоёр орчны зааг дээрх усан давхаргыг илрүүлэхэд шаардагдах георадарын потенциал. Үүний зэрэгцээ давхаргын чийгшил 30-аас 80-90 хувь хүртэл огцом нэмэгдэж, үүнээс шалтгаалж комплекс диелектрик нэвтрүүлэх чадвар нэмэгддэг (4-р зургийг үз).

Усанд гэсвэртэй хатуу (хад чулуу) хөрс ба гүний усны гадаргын хоорондох агаарын зайг болох завсрын давхаргын зураг 3 дах хөрсний В загварыг авч үзье (зураг 8).



Зураг 8. Олон давхаргат хөрсөнд дохионы тархалтын замууд.

Энэ тохиолдолд хөрсөнд нэвтэрч буй дохионы хэсэг (1-р цэг) нь "хөрс-агаар"-ын заагаас хэсэгчлэн тусаж, гадаргуу руу (2-р цэг) тархдаг, дохионы нөгөө

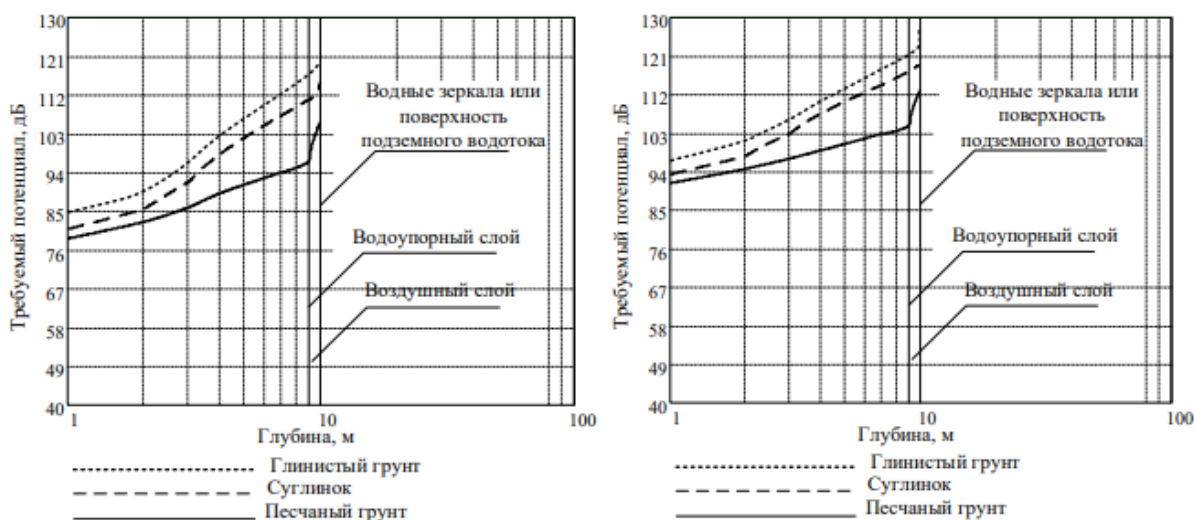
хэсэг нь доошоо гүний усны урсгал хүртэл тархдаг ба түүнээс ойдог. Дээш тархах үед газар доорх усны урсацын гадаргуугаас туссан дохионы энэ хэсэг нь давхрагын заагаас тусдаг бөгөөд гадагшаа (3-р цэгт) гардаг. Тиймээс энэ загварын хувьд олон тусгалууд үүсэх ба алдагдлыг тооцоолохын тулд давхаргын зааг дээр эдгээр тусгалыг харгалзан үзэх шаардлагатай. Зураг 8 дээрх тасархай шугам нь хоёрдогч тусгалын дохиог харуулж байна.

Ийм орчны тусгалын коэффициентийг дараах байдлаар бичиж болно [12].

$$\dot{R}_3 = \frac{\dot{R}_{\text{хөрс-агаар}} + \dot{R}_{\text{агаар-үс}} \exp(-2\gamma_3 h_3)}{1 + \dot{R}_{\text{хөрс-агаар}} \cdot \dot{R}_{\text{агаар-үс}} \exp(-2\gamma_3 h_3)} \quad (9)$$

Энд γ нь тархалтын тогтмол, h_2 нь хөрсний зузаан, h_3 нь агаар бүхий завсарын зузаан.

Мөн энэ тохиолдолд георадарын хайлтын зорилт нь давхрагын хоорондох хагалбар биш, харин газар доорх усны урсгалын гадаргуу байх болно. Зураг 9-д гүн нь хөрсний давхаргын зузаан ба агаарын завсарын зузаанаас бүрдэнэ. Хөрсний давхарга нь электрофизикийн ижил төстэй шинж чанартай элсэрхэг хөрс, усанд тэсвэртэй чулуурхаг хөрсөөс бүрдэнэ.



Зураг 9. а) Агаарын давхаргын зузаан $h = 1.0$ м 75 МГц давтамжтай хоёр орчны хоорондох зааг дээрх усан давхаргыг илрүүлэхэд шаардагдах георадарын потенциал. б) Агаарын давхаргын зузаан $h = 1.0$ м 200 МГц давтамжтай хоёр орчны хоорондох зааг дээрх усан давхаргыг илрүүлэхэд шаардагдах георадарын потенциал.

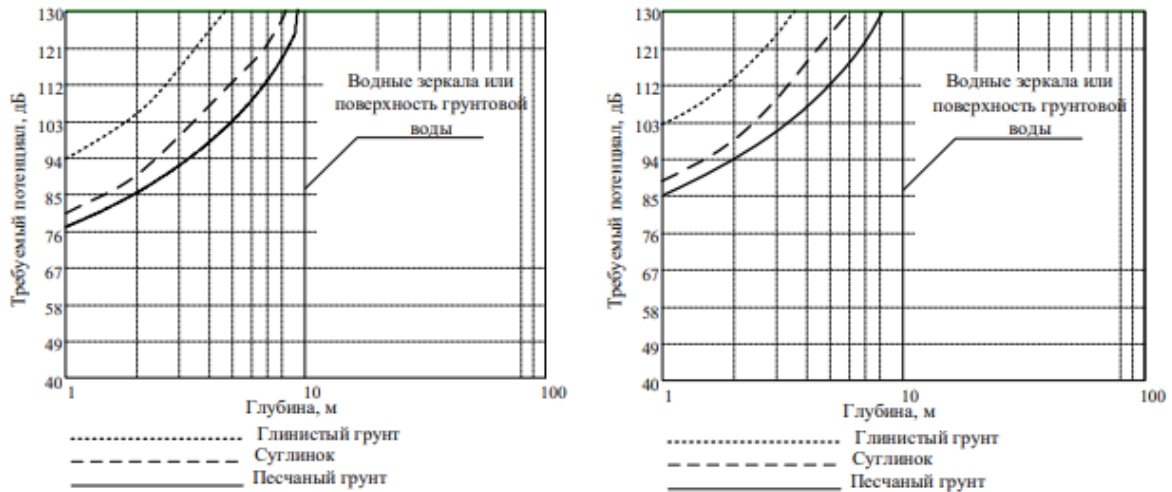
Шаардлагатай георадарын потенциал нь холбогдсон болон чөлөөт усны өндөр агууламжтай давхаргын зузаан ба электрофизик параметрүүдээс ихээхэн хамаардаг. Мэдээж давхаргын зузаан нэмэгдэхийн хэрээр шаардагдах потенциал нэмэгддэг, гэхдээ давхаргын хэмжээ буурахад дээд давхарга дах алдагдал голчлон нөлөөлдөг.

Гурав дахь тохиолдол болох зураг 3 дээрх хөрсний загвар С-г авч үзье, үүнд ус үл нэвтрэх хөрс байхгүй, харин гүний ус нь хөрсний ус гэж нэрлэгддэг сүвэрхэг хөрсний масс хэлбэртэй байдаг. Үүний зэрэгцээ капилляр усны нөлөөгөөр хөрсний диэлектрик нэвтрүүлэх чадвар шугаман өсөлттэй ба мэдэгдэхүйц өндөр потенциал нь георадараас шаардагдана.

Бодит байдал дээр хөрсний орчин ба усны хоорондох хэсэг нь тэгш бус харин барзгар байж болно. Сийрэгжилтийн үр дүнтэй талбай нь тэгш бус байдлын зэргээс хамаарна. Тэгш бус байдал нь тийм ч том биш бол долгион нь ойролцоогоор Френелийн эхний бүсэд хамаарах талбайгаар үүсгэгддэг. Гадаргуугийн тэгш бус байдлын ординатуудын хэвийн тархалтын хуулийн хувьд θ уналтын өнцөг дэх тусгалын коэффициентийн дундаж квадрат язгуурын утгыг доорх томъёогоор тодорхойлно: [13].

$$\bar{R}_3^2(\theta) = R(\theta) \cdot \exp\left(-2 \cdot \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \sigma_h \cdot \cos\theta\right)^2\right) \quad (10)$$

Энд $R(\theta)$ нь гөлгөр гадаргуугийн хувьд Френелийн тусгалын коэффициентийн модуль, σ_h нь тэгш бус байдлын ординатын дундаж квадрат язгуурын утга.



Зураг 10. а. 75 МГц-ийн георадарын хөрсний усны түвшинг илрүүлэхэд шаардлагатай потенциал, б. 200 МГц-ийн георадарын хөрсний усны түвшинг илрүүлэхэд шаардлагатай потенциал.

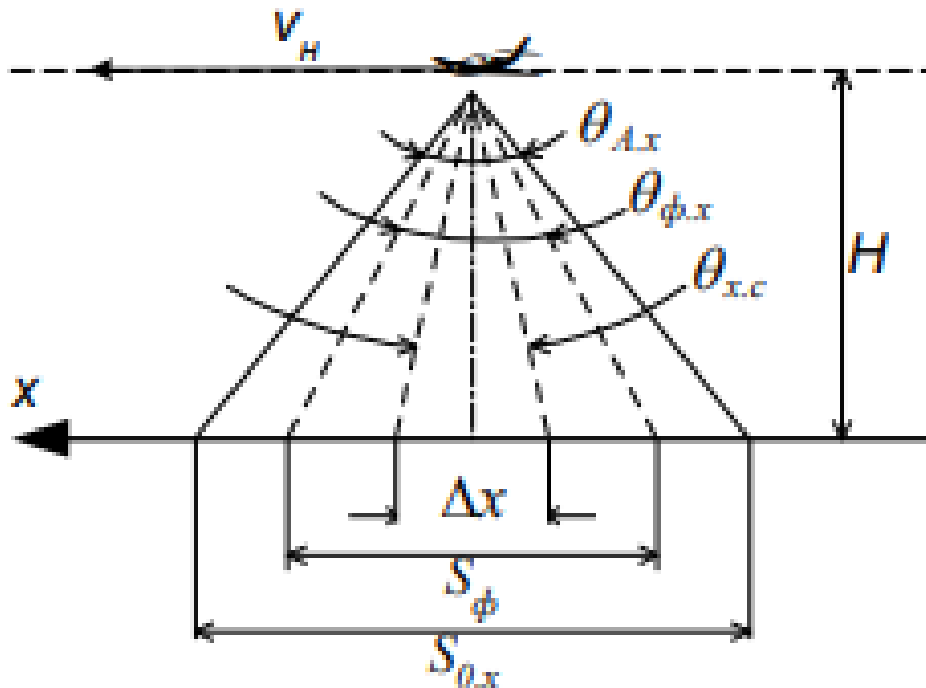
Гөлгөр ба барзгар (тэгш бус) гадаргуугийн зүй тогтолын хэрэглээний мужуудын хоорондох хил хязгаарыг Релен шалгуураар тодорхойлдог. Гадаргуугийн хилийн давхаргын тэгш бус байдлын зөвшөөрөгдөх дундаж квадрат язгуурын ординатууд нь дараах нөхцөлийг хангасан байх ёстой.

$$\sigma_{h \max} \leq \frac{\lambda_c}{16 \cos \theta} \quad (11)$$

Энд хөрсөн дэх долгионы урт нь түүний цахилгаан шинж чанараас хамаарах бөгөөд дараах томъёогоор тооцоолно $\lambda_c = \frac{\lambda}{Re\sqrt{\epsilon}}$. Хил буюу зааг нь барзгар гэж үзэж болох тэгш бус байдлын өндөр нь хуурай элсэрхэг хөрсний хувьд 75МГц болон 200МГц давтамжийн үед харгалзан 0.14 м болон 0.05 м-ээс их байх ёстой. Хэрэв ийм дарааллын барзгар байдал нь уст давхаргатай холбогдох хэсэгт байгаа бол энэ нь мөн георадарын потенциалд нөлөөлдөг.

Газрын гүний хайлтанд ашигладаг антенууд нь бага чиглүүлэлттэй байдаг тул метрийн диапозонд барзгар гадаргууг шалгах үед Френелийн эхний бүсээс давсан гадаргуугаас эрчих ихтэй паразит ойлт үүсэх боломжтой (зураг 11). Хотгор гүдгэр тэгш бус гадаргуугийн элементүүдээс ойх ойлт нь гүний давхаргаас ойх илүү сул ойлтыг дардаг. Тууш координат дахь георадарын нарийвчлалыг цацрагийн өргөнөөр тодорхойлно, Энэ нь түүний апертураар

тодорхойлогддог антенны үр дүнтэй талбайгаас хамаарна. Нисгэгчгүй нисэх аппарат дээрх георадарын хувьд антенны геометр хэмжээсийг нэмэгдүүлэх замаар апературыг сайжруулах боломж маш хязгаарлагдмал байдаг. Тиймээс хайлтын замын дагуух гадаргуу дээрх радар зөөгч хөдөлж байх үед хүлээн авсан дохионы боловсруулалт дээр үндэслэгдсэн апературын синтезийн аргыг ашигладаг.

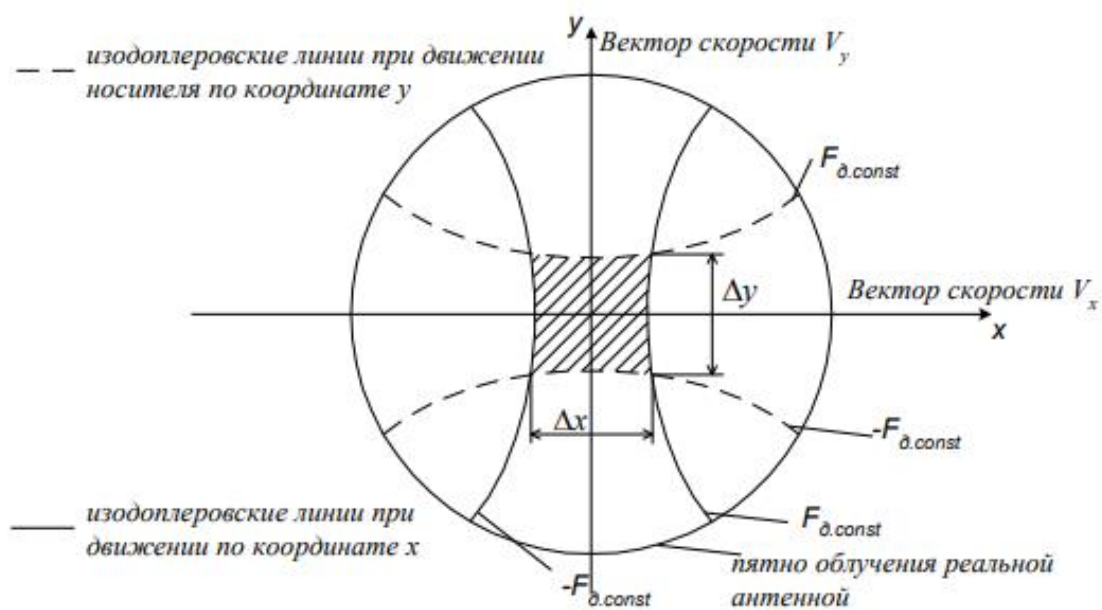


Зураг 11. Доош чиглэж буй хайлтын үед x координатын дагуу антенны апературын синтезийн геометрын график.

Зураг 11-д дэлхийн гадаргуу дээрх гурван онцлог бүсийг харуулав: $S_{\theta,x}$ нь радиолокацийн антеннаас үүссэн $\theta_{A,x}$ диаграммын өргөнөөр тодорхойлогддог цацрагийн цэг; S_{ϕ} нь ойсон дохиог хүлээн авдаг Френель бүс, Френелийн бүсийн диаметр $S_{\phi} = \sqrt{\lambda H}$; Δx нь синтезлэгдсэн антенны диаграммаас үүсэх x координатын нарийвчлалын элемент $\theta_{c,x}$.

Газрын гүний фокуслох болон фокусаа алдах эффектээс шалтгаалж эдгээр диаграмм гажуудаж болох боловч эхний ойролцоолд эдгээр нөлөөллийг үл тооцож болох юм. Нисгэгчгүй нисэх аппарат дээр георадарыг ажиллуулахад зориулж Доплерын шүүлтүүрийн алгоритм нь тохиромжтой [14]. Доплерийн тэг

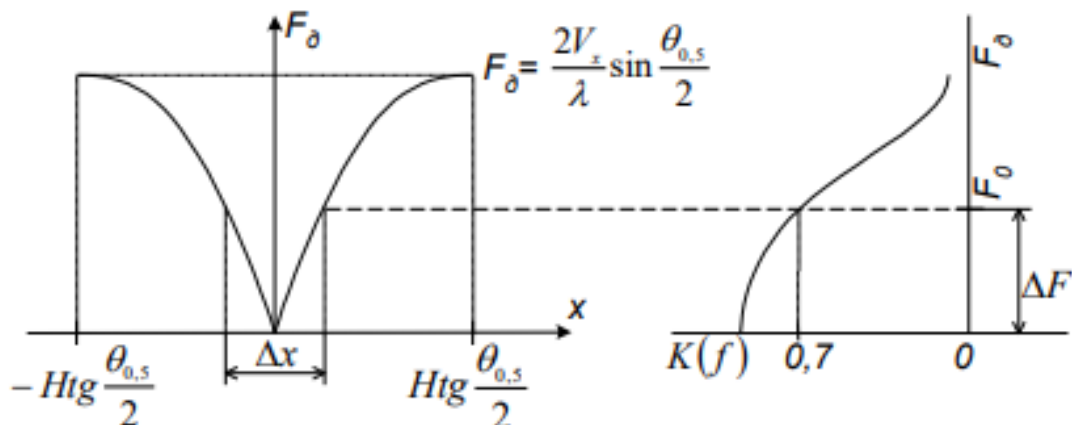
давтамжийг шүүх замаар рельефийн паразит ойлтын нөлөөг багасгаж болно. Диаграммыг нарийсгах зарчим нь Зураг 12-оос тодорхой харагдаж байна.



Зураг 12. x , y координат дах нарийн зурвасыг антенны чиглэлийн диаграммыг синтезлэх даалгаварын геометр.

x , y координатын хувьд хүлээн авах болон дохионы боловсруулалтыг тусад нь хийвэл даалгаврыг хялбарчилж болно. Энэ тохиолдолд нутаг дэвсгэрийн хайгуулыг x тэнхлэгийн дагуу, дараа нь y тэнхлэгийн дагуу хоёр үе шаттайгаар явуулна. x -ийн дагуух хайгуулын мөрийг нарийвчилсан элементүүд (сүүдэрлэсэн хэсэг) нь Δy элементэд нийлүүлсэн байхаар сонгох ёстой ба үүний дагуу y дахь хайгуулын мөрийг Δx дахь нарийвчлалын элементүүдтэй харьцан холбоотой байхаар сонгосон. Үр дүнтэй ажиллахын тулд хайгуулын мөрийг гадаргуугийн координаттай холбож, хянах шаардлагатай. Үүнийг хийдэг орчин үеийн нарийвчлал өндөртэй байрлал тогтоох системүүд байдаг.

Зураг 13-т нэг координатын дагуух Доплер давтамжийн график ба тэг Доплер шүүлтүүрийн давтамжийн характеристикыг үзүүлэв.



Зураг 13. Доплер шүүлтүүрийн зурвас ба F_d -н өөрчлөлтийн график.

$\Delta F \approx F_0$ нэвтрүүлэлтийн зурвастай Доплерын шүүлтүүрээр гүйцгэгдэх хүлээн авсан дохионы зөөгчийн шүүлтүүр нь x тэнхлэгийн дагуу хайлт хийж буй орчны гадаргуугаас ойсон хүлээн авах дохионы мужийг хязгаарладаг. Энэ нь ZOX хавтгайд ашигласан антенны системийн чиглэлийн диаграммын дараах утга хүртэл нарийсгахтай тэнцүү байна.

$$\theta_{\text{эф}} = 2 \arctg \frac{\Delta x}{2H} \cong \Delta x \cdot H \quad (12)$$

Энд H нь хайлтын өндөр. Ялангуяа Δx -ийг Френелийн эхний зоны диаметртэй тэнцүү байхаар $\Delta x = \sqrt{H\lambda_0}$ сонгосон бол, тэгвэл $F_0 = \frac{V_x}{\sqrt{\lambda_0 H}}$ болно. Давхаргын доод хилийн дагуух Δx_H утга (гадаргуугийн дээд хилийг тооцвол) нь тодорхой хэмжээгээр өөрчлөгддөг $\delta \Delta x = \frac{\Delta x_H}{\Delta x}$. Энэ нь хөрсний ε болон $\frac{h}{H}$ харьцаанаас хамаардаг.

Диэлектрик нэвтрүүлэх чадварын урьдчилсан тодорхойгүй байдлын нөлөөлөл ба хөрсний бүтцийн цахилгаан соронзон загвар

Георадарын хайлтын гүн нь хязгаарлагдмал бөгөөд энэ нь материалын цахилгаан дамжуулах чанар ба диэлектрик нэвтрүүлэх чадвар, үйл ажиллагааны давтамж, радарын чадал болон тархалтын хурдны давтамжаас хамаарсан дисперсийн гажуудал зэргээс хамаардаг. Материалын дамжуулах чанар нэмэгдэхийн хэрээр нэвтрэлтийн гүн буурч, энэ нь дамжуулагч материал дахь цахилгаан соронзон энерги хурдан тархаж, энэ энерги нь дулаан болж хувирч, хөрсийг халааж, үүний үр дүнд хүлээн авсан дохионы хүч буурдаг.

Хайгуулын гүнд нөлөөлдөг гол хүчин зүйлүүдийн нэг нь хөрсний нэгэн төрлийн бус байдал, давхаргажилт юм. Хөрсний янз бүрийн диэлектрик тогтмолуудаас үүссэн нэгэн төрлийн бус байдал нь дохионы хүчтэй тархалтад хүргэдэг бөгөөд үүний үр дүнд хүлээн авагч антенн дахь өндөр түвшний хөндлөнгийн оролцоо үүсдэг.

Радио давтамжийн мужид бүх төрлийн шороон бүрхэвч нь диэлектрик байдаг тул георадарт хөрс нь диэлектрикийн нарийн төвөгтэй ϵ нэвтрүүлэх чадвартай диэлектрик гэж тооцогддог [15]. Дэлхийн хөрс нь түүний бүтцээс хамаардаг диэлектрик тогтмол бүхий олон бүрэлдэхүүн хэсэг юм. Хөрсний доорхи объект, янз бүрийн давхаргыг илрүүлэх асуудлыг шийдвэрлэхийн тулд хөрсний цахилгаан соронзон загварын босоо тархалтыг ϵ харгалзан үзэх шаардлагатай [16].

Одоогийн байдлаар георадар нь хэт өргөн зурвасын богино видео импульс эсвэл давтамжийн модуляц бүхий нарийн төвөгтэй хэлбэрийн дохиог ашигладаг. P-хос D-код дээр суурилсан тэг автокорреляцийн бүс бүхий полифазын дохиог георадарт ашиглах ирээдүйтэй байна [17].

3 ... 4 м хүртэл харьцангуй гүехэн хайлт хийхэд георадарт шугаман давтамжийн модуляцтай тасралтгүй хэт өргөн зурвасын дохиог ашиглах нь илүү хялбар (хүчирхэг дамжуулагч шаардлагагүй) ба дохиог оновчтой боловсруулах

корреляцийн шүүлтүүрийн аргыг бий болгодог (автокорреляцийн функцийн хажуугийн дэлбэнгийн залруулгад хамаарна).

Энэ ажилд газрын доорхи янз бүрийн хөрс, объектуудад (гүний усны түвшинг тодорхойлох, газар доорх байгууламж, харилцаа холбоог хайх, төмөр зам, автомашины замын гадаргууг судлах гэх мэт) георадарын гүнтэй харьцуулах шаардлагатай потенциалыг тооцоолсон ба тасралтгүй хайж буй давтамжийн шугаман модуляцийн дохио $f_1 = 300$ МГц, $f_2 = 900$ МГц, спектрийн өргөн $\Delta f = 600$ МГц, модуляцын давтамж $F = 1$ кГц.

Георадар нь газарын гадаргууд ойр байрладаг. Тооцооллын үр дүнд хөрсний дээд давхаргын бага зузаантай үед георадарын потенциал нь голчлон хөрсний диэлектрик нэвтрүүлэх чадвар, илрүүлсэн объектын электрофизик шинж чанар, түүний радарын хөндлөн огтлолоос хамаардаг болохыг харуулж байна. Гүн нэмэгдэх тусам георадараас шаардагдах потенциал нь хөрсөн дэх дохионы сулралаар тодорхойлогддог.

Георадарын хамгийн их гүнийг тооцоолохын тулд дохионы тархалтын үеийн бүх алдагдлыг харгалзан дараах тэгшитгэлийг ашигласан болно [18].

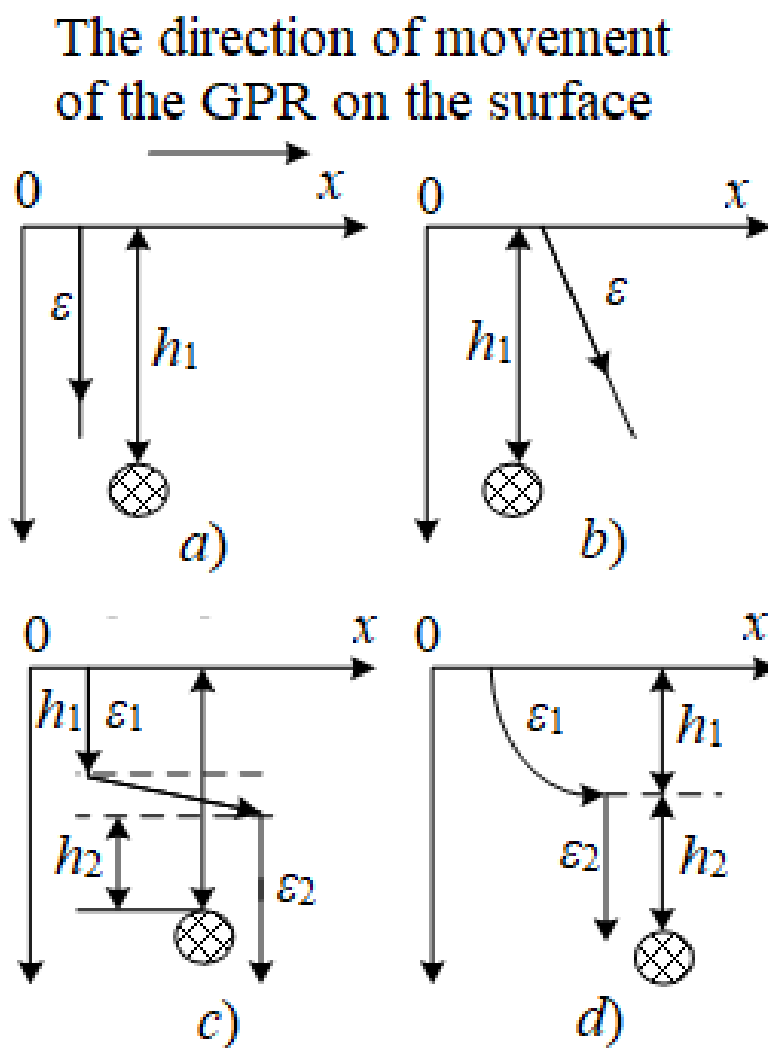
$$P_{MDS} = P_{Tx} \frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 \left(h^2 + \left(\frac{d_a}{2} \right)^2 \right)^2} \eta_{Loss} \quad (13)$$

Энд P_{MDS} нь илрүүлэх хамгийн бага дохионы хүч, P_{Tx} нь дамжуулагчийн хүч, G нь ижил TX-RX антеннуудын антенны нэмэгдэл, d_a хоёр антенны хоорондох зай, h нь газрын гадаргаас доош хүрэх гүн, η_{Loss} нь алдагдлын коэффициент юм. Антен тэжээгчийн зам, агаар мандал, давхаргын хил хязгаар, газар ба радарын хөндлөн огтлол дахь алдагдлыг харгалзан үзнэ.

Георадарын антеннууд нь бараг гадаргуу дээр байрладаг гэж үзвэл хөрсний төрлөөс хамааран шаардлагатай эрчим хүчний нөөц нь 40-110 дБ байна. 3 метр хүртэлх гүнд байгаа объектуудыг илрүүлэхийн тулд георадар нь ойролцоогоор 30 дБм чадалтай дохиог гаргах ёстой. Гэсэн хэдий ч нойтон шаврын хувьд ийм энерги 0.3-0.5 м-ийн гүнд байгаа объектуудыг илрүүлэх боломжийг олгодог.

Гүн дэх хөрсний бүтцийн өөрчлөлтийн цахилгаан соронзон загвар

Давтамжийн шугаман модуляц бүхий георадарт объектын гүн эсвэл давхаргын зузааныг спектрийн шинжилгээний аргаар тодорхойлно. Гбeат цохилтын давтамж, үүний дагуу объектын гүн эсвэл давхаргын зузаан нь диэлектрик нэвтрүүлэх чадвар ϵ -ын босоо тархалтаас хамаарна, өөрөөр хэлбэл хөрсний бүтцийн цахилгаан соронзон загвараас хамаардаг. Зураг 14-д хамгийн их тохиолддог бөгөөд өргөн ашигладаг хөрсний загваруудыг үзүүлэв.



Зураг 14: Хөрсний нэвтрүүлэх чадварын гүнээс хамаарах зарим боломжит хувилбарууд: а) тогтмол, б) шугаман; в) алхам алхмаар, г) экспоненциал

Хэрэв хөрсний загвар нь тогтмол нэвтрүүлэх чадвартай дундаж (Зураг 14а), өөрөөр хэлбэл нэгэн төрлийн орчин бол цохилтын давтамж.

$$F_{beat} = \frac{4\Delta f F}{c} h Re(\sqrt{\varepsilon}) \quad (14)$$

Хөрсний загварын хувьд гүнээс хамаарч шугаман хэлбэлзэлтэй нэвтрүүлэх чадвар (Зураг 14b) нь цохилтын давтамж.

$$F_{beat} = \frac{4\Delta f F}{c} h Re(\sqrt{(\alpha h + \beta)^m}) \quad (15)$$

Энд α ба β нь бодит ба нийлмэл хэмжигдэхүүн байж болно; α нь өөрчлөлтийн хурдыг тодорхойлдог, β нь $h = 0$ үед анхны утга юм. $m = 1$ үед загвар шугаман болно $\varepsilon(h) = \alpha h + \beta = \varepsilon'(h) + j\varepsilon''(h)$ (Зураг 1b).

Хэрэв хөрсний диэлектрик нэвтрүүлэх чадварыг хэсэгчилсэн функцээр тайлбарлавал (Зураг 1c) давхарга болон объектын аль алианаас нь тусгал үүсэх болно.

$$F_{beat1} = \frac{4\Delta f F}{c} h_1 Re(\sqrt{\varepsilon_1}), \quad (16)$$

$$F_{beat2} = \frac{4\Delta f F}{c} [h_1 Re(\sqrt{\varepsilon_1}) + h_2 Re(\sqrt{\varepsilon_2})] \quad (17)$$

Хөрсний олон төрлийн хувьд диэлектрик нэвтрүүлэх чадварын гүн дэх өөрчлөлтийн хуулийг олон тохиолдолд тэгшитгэлээр ойртуулдаг (хөрсний диэлектрик нэвтрүүлэх чадварын өөрчлөлтийн экспоненциал загвар, Зураг 1d)

$$F_{beat1} = \frac{4\Delta f F}{c} h_1 Re(\sqrt{\beta e^{-2\alpha h}}), \quad (18)$$

$$F_{beat2} = \frac{4\Delta f F}{c} [h_1 Re(\sqrt{\beta e^{-2\alpha h}}) + h_2 Re(\sqrt{\varepsilon_2})] \quad (19)$$

Асуудал нь хөрсний цахилгаан соронзон загвар ба түүний электрофизик шинж чанаруудын урьдчилсан тодорхойгүй байдалтай холбоотой юм. Өгөгдсөн хэмжилтийн давтамж дахь диэлектрик нэвтрүүлэх чадвар ε -ийн утгад чийг, температур, тархалт, давсжилт, хөрсний эрдэс бодисын найрлага, нягтрал, түүнчлэн улирлын болон өдөр тутмын хэлбэлзэл зэрэг нэлээд олон тооны параметрууд нөлөөлдөг. Янз бүрийн хөрсний хувьд 300-аас 900 МГц давтамжийн мужид диэлектрик нэвтрүүлэх чадварын тархалт бараг ажиглагддаггүй.

Хөрсний шинж чанар нь тодорхойгүй байгаа тул объектын гүнийг хэмжихэд алдаа гарч, давхаргын орчны хэсгийг сэргээх ажлыг алдаатай хийж

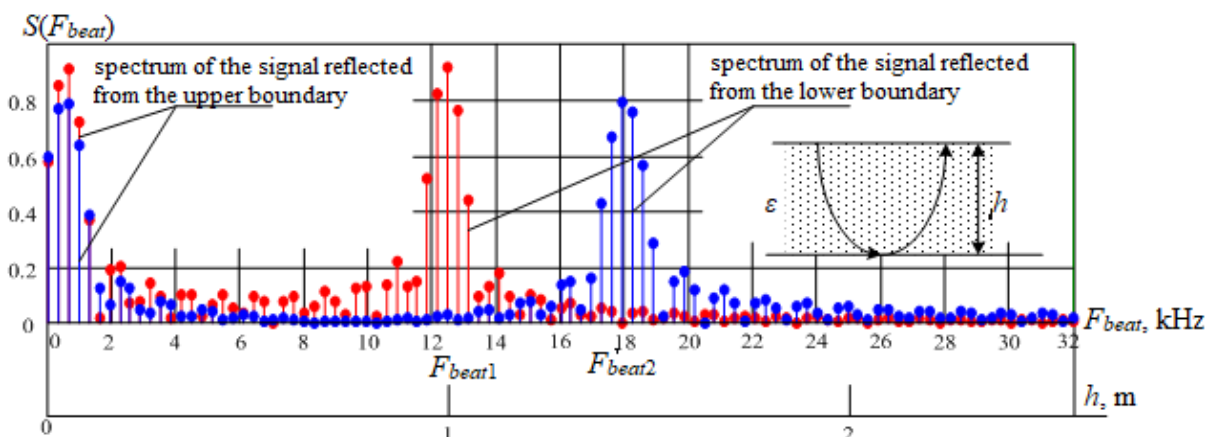
болно. Гүнийг тодорхойлоход ямар алдаа гарах вэ, үүнийг жишээгээр харуулахад хялбар байдаг. Тооцооллын жишээ болгон бид элсийг авч, $\epsilon_{true} = 5 - j0.075$, $W = 4\%$ (жинхэнэ утга); $\epsilon_{chosen} = 10.7 - j0.3$, $W = 12\%$ (урьдчилсан тодорхойгүй байдлын улмаас сонгосон утга), W нь чийгшил % -аар:

$$F_{beat1} = \frac{4\Delta f F}{c} H_a + \frac{4\Delta f F}{c} h_1 Re(\sqrt{\epsilon_{true}}), \quad (20)$$

$$F_{beat2} = \frac{4\Delta f F}{c} H_a + \frac{4\Delta f F}{c} h_2 Re(\sqrt{\epsilon_{chosen}}) \quad (21)$$

Энд H_a нь антеннаас газар хүртэлх өндөр.

Хөрсний доод хязгаараас ойсон дохионы спектрийг $h_1 = h_2 = 1$ м-ийн хөрсөн дэх сулралтыг харгалзахгүйгээр (тодорхой байх үүднээс) зураг 15-д үзүүлэв.



Зураг 15. Диэлектрик нэвтрүүлэх чадвар нь ялгаатай давхаргын доод хилээс ойсон дохионы спектр.

Энэ тохиолдолд гүн дэх мэдэгдэхүйц алдаа нь георадарын ажиллагааг сайжруулахын тулд хөрсний электрофизик шинж чанарын талаархи урьдчилсан мэдээлэл шаардлагатай гэсэн санааг дахин баталж байна. Байгаль орчны талаархи урьдчилсан мэдээллийг ашиглах нь олон давхаргат орчинд гүний координатыг тодорхойлох алдааг багасгах боломжийг олгодог. Хөрсний электрофизик шинж чанарын хувьд нарийн шийдэл байхгүй боловч хэрэв бид тодорхой зөвшөөрөгдөх алдаатай радиофизикийн аргыг ашиглан электрофизик шинж чанарыг тодорхойлох юм бол объектын гүн, давхаргын зузааныг хэмжих үр дүнг сайжруулах боломжтой болно.

Шилжилтийн давхаргын зузаан нь долгионы уртын хагасаас давж, ΔR дарааллын дагуу Δh -ийг тохируулах үед тусгал бараг бүрэн байхгүй байгааг харгалзан бид диэлектрик нэвтрүүлэх чадвар ε -ийг сэргээн засварлах замаар зөвшөөрөгдөх алдааны утгыг олно (Хүснэгт 2-ийг үзнэ үү, энд Δh ба $\Delta\varepsilon$ -ийг нэгэн төрлийн цахилгаан соронзон загварт тооцно).

Хүснэгт 2. Объектийн гүнийг тодорхойлоход гарсан алдаа нь диэлектрикийн нийлмэл нэвтрүүлэх чадварын утгын өөрчлөлтөөс хамаарах хамаарал.

Параметр	0.8ε	ε-ийн жинхэнэ утга	1.2ε
$\varepsilon_1 \pm \Delta\varepsilon_1$	$4 - j0.06$ $Re \sqrt{\varepsilon} = 1.9$	$5 - j0.075$, $W=4\%$, $\Delta\varepsilon_1 = 0$, $Re \sqrt{\varepsilon} = 2.2$	$6 - j0.09$ $Re \sqrt{\varepsilon} = 2.4$
$h \pm \Delta h$	1.118 m	1 m, $\Delta h = 0$	0.913 m
$\varepsilon_2 \pm \Delta\varepsilon_2$	$4.1 - j0.31$ $Re \sqrt{\varepsilon} = 2$	$5.1 - j0.39$, $W=10\%$ $\Delta\varepsilon_2 = 0$, $Re \sqrt{\varepsilon} = 2.3$	$6.1 - j0.468$ $Re \sqrt{\varepsilon} = 2.5$
$h \pm \Delta h$	1.104 m	1 m, $\Delta h = 0$	0.904 m
$\varepsilon_3 \pm \Delta\varepsilon_3$	$6 - j1.918$ $Re \sqrt{\varepsilon} = 2.5$	$7.5 - j2.39$, $W=8\%$ $\Delta\varepsilon_3 = 0$, $Re \sqrt{\varepsilon} = 2.8$	$9 - j2.878$ $Re \sqrt{\varepsilon} = 3$
$h \pm \Delta h$	1.118 m	1 m, $\Delta h = 0$	0.913 m
$\varepsilon_4 \pm \Delta\varepsilon_4$	$8.56 - j0.24$ $Re \sqrt{\varepsilon} = 2.9$	$10.7 - j0.3$, $W=12\%$ $\Delta\varepsilon_4 = 0$, $Re \sqrt{\varepsilon} = 3.3$	$12.8 - j0.36$ $Re \sqrt{\varepsilon} = 3.5$
$h \pm \Delta h$	1.108 m	1 m, $\Delta h = 0$	0.91 m

Хөрсний төрөл тус бүрийн ε -ийн жинхэнэ утга нь 2-р баганад харгалзах ба 1, 3-р баганад ε жинхэнэ утгуудтай харьцуулахад монотон хэлбэлзэлтэй байна; ε_1 элс $W = 4\%$, ε_2 шаварлаг $W = 10\%$, ε_3 шавар $W = 8\%$, ε_4 элс $W = 12\%$.

Хүснэгт 2-оос харахад бодит хэсгийн ε -ийн утга $\pm 20\%$ -иар өөрчлөгдөхөд хөрсний давхаргын зузааныг тодорхойлоход алдаа Δh нь зөвшөөрөгдөх

хэмжээнээс хэтрэхгүй, өөрөөр хэлбэл 8 ... 11 см, харин төсөөллийн хэсэг ε хөрсөн дэх цахилгаан соронзон долгионы тархалтын хурдад бага зэрэг нөлөөлдөг.

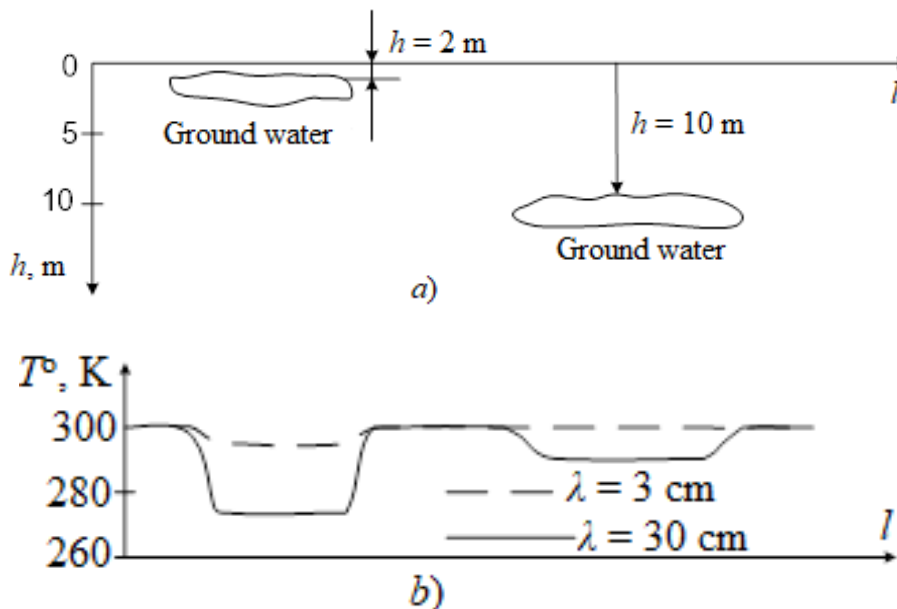
Газрын гүний хайгуулын мэдээллийн нарийвчлал, агуулгыг нэмэгдүүлэхийн тулд георадарыг радиометртэй нэгтгэх

Хөрсний электрофизик шинж чанарыг зайнаах нарийн тодорхойлох асуудлыг шийдвэрлэх нь зөвхөн хөрсний загварын тохиргоог нарийн хийсэн үед л боломжтой.

Харин радиометрийн тусламжтайгаар ε -ийн бодит хэсгийн утгыг багадаа $\pm 20\%$ -иар тооцвол тухайн объект хүртэлх хөрсний давхаргын зузааныг тодорхойлоход Δh алдаа нь газар дээрх хайгуулын дохионы ΔR нарийвчлалаас хэтрэхгүй байх болно.

Бодит орчинд тухайн хэсгийн тархалтын утга ε -д зөвхөн бодисын найрлагаас гадна цаг уурын нөхцөл, хөрсний нэгэн төрлийн бус байдал зэрэг нөлөөлдөг. Радио-дулааны цацраг нь давхаргын зузаанд үүсдэг ба дэлхийн бүрхэвч нь өөр өөр ε бүхий хэд хэдэн давхаргаас бүрдэж болно.

Радио долгионы уртыг зөв сонгогдсон тохиолдолд идэвхгүй арга нь гадаргын доорхи объектуудыг илрүүлэх боломжтой, жишээлбэл, газрын доорхи усны ордууд (зураг 16).



Зураг 16. а) Аномаль бүсүүдийн байршил, б) Төв Азийн хуурай бүс дэх гүний усны янз бүрийн гүн дэх дециметр ба сантиметрийн долгионы цацаргалтын температурын хэлбэлзлийн ойролцоо хамаарал [18].

Радиометрийн хувьд өндөр температурыг мэдрэхийн тулд оролтын шуугиан багатай өсгөгчийн давтамжийн өргөн зурвас шаардлагатай ба георадарт хэт өргөн зурвасын дохиог ашиглах нь өргөн зурвасын өсгөгчийг шаарддаг. Энэ нь радиометрийн богино долгионы хэсэг болон георадиолокцийн хүлээн авах замыг мэдэгдэхүйц өөрчлөлтгүйгээр холбох боломжтой болгодог.

Янз бүрийн хөрсний хувьд ϵ -ийн утга $\pm 20\%$ -иар өөрчлөгддөг (Хүснэгт 1-ийг үзнэ үү) ΔT температурын радио цацарлын тодосгогч нь $6 \dots 11^\circ\text{K}$ хооронд хэлбэлздэг тул радиометрийн мэдрэх чадвар нь ойролцоогоор $0.8 \dots 1^\circ\text{K}$ байх ёстой.

Объектуудын гүнийг тодруулах цахилгаан соронзон хөрсний загварын бүтцийг тодорхойлох арга

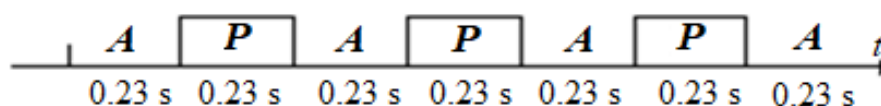
Радиометрийн мэдрэх чадварыг дараах тэгшитгэлээр илэрхийлнэ

$$\delta T T (T_A + T_N) \sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta f}}_{Amin} \quad (22)$$

Энд m_T коэффициентийг шаардлагатай илрүүлэх магадлалын дагуу сонгосон; α нь коэффициент бөгөөд янз бүрийн схемийн хувьд утга нь $1 \dots 5$ дотор хэлбэлздэг; Δf нь хүлээн авагчийн оролтын шугаман хэсгийн зурвасын өргөн; ΔF нь гаралтын интеграторын зурвасын өргөн; T_A нь антенны температур, T_N нь шуугианы температур юм.

Радиометрийн сонгосон параметруудийн хувьд: $m_T = 5$, $\alpha = 2.6$, $\Delta f = 600$ MHz, $T_A = 300^\circ\text{K}$, $T_N = 423^\circ\text{K}$ (LNA - WL1008, шуугианы фактор нь 1.5 dB), $\delta T_{O_{Amin}} \text{K}$, интеграторын зурвасын өргөн 4.3 Hz. Иймд интегралчлах хугацаа нь 0.23c болно.

Нэгдсэн системийн үйл ажиллагааны циклийг зураг 17-д үзүүлэв.



Зураг 17: Радиометртэй нэгтгэсэн Георадарын циклограмм: A - идэвхтэй горим, P - идэвхгүй горим.

Идэвхтэй георадарын горимд дамжуулагчаас шүүрч буй дохионы хүчийг хэмжин, шалгах дохионы хүчийг тасралтгүй хянах замаар радиометрийг тохируулж болно. Өөрөөр хэлбэл металл хуудас ашиглан тохируулга хийж, антенны доод давхаргын диэлектрик нэвтрүүлэх чадварыг харгалзан оролтын хэлхээний температурыг хэмжиж болно. Орчин үеийн элементийн суурьтай бол радиометрийн сувгийн дамжуулах коэффициентийн тогтворгүй байдлын улмаас тооцоолж буй температурын хэлбэлзэл нь $0.1 \dots 0.2^\circ\text{K}$ -ээс хэтрэхгүй байна.

Мэдээллийн агуулгыг нэмэгдүүлдэг гүний дагуух температурын налууг олж авахын тулд радио дулааны цацрагийн олон сувгийн зэрэгцээ хүлээн авах аргыг ашиглахыг санал болгож байна (зураг 18).



Зураг 18. Радио дулааны цацрагийн олон сувгийн хүлээн авалт

Температурын өөрчлөлтийн динамикийг хэмжих замаар чийгийн агууламжийн өөрчлөлтийн шинж чанарыг тогтоох боломжтой бөгөөд энэ нь хөрсний диэлектрик нэвтрүүлэх чадварын утгад хүчтэй нөлөө үзүүлдэг. Температурын радио цацаргалтын ялгаа нь хөрсний чийгээс хамаарах ΔW нь шугаман шинж чанартай байдаг бөгөөд ургамлын бүрхэвчийг халхлах нөлөөг харгалзахгүйгээр (өөр өөр төрлийн хөрсөнд) дараах тэгшитгэлээр тодорхойлогддог [30,31].

$$\frac{\Delta T}{\Delta W} \approx (2 - 3) \quad (23)$$

Үр дүнтэй цацруулагч давхарга нь дараах хамаарлаар тодорхойлогддог h_{eff} зузаантай байна [32]

$$h_{eff} = \frac{8.65}{\Gamma} \quad (24)$$

Энд Γ (дБ/м) нь орчин дахь дохионы тодорхой сулрал юм.

Газар дээрх дохионы сулрал нь давтамжаас хамаардаг ба чийгшлийн өөрчлөлтийн динамикийг тусгадаг нь хүснэгт 3-аас тодорхой харагдаж байгаа

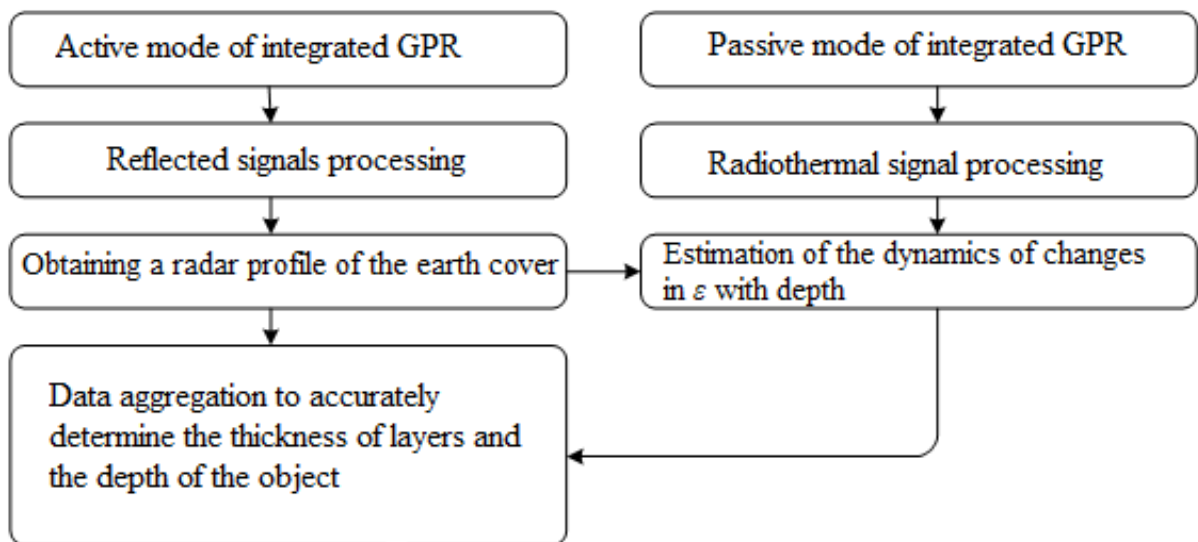
бөгөөд энэ нь диэлектрик нэвтрүүлэх чадварын өөрчлөлтийн мөн чанарыг гүнзгийрүүлэн баталж байна.

Хүснэгт 3. Төрөл бүрийн хөрсний электрофизик шинж чанар

Electrophysical characteristics of sandy soils				
f , MHz	Humidity, %	ε	Γ , dB/m	h_{eff} , m
333	4	4.9	1.4	5
	8	6.9	5.7	1.5
	12	10.9	7.1	1.2
	16	14.9	10.0	0.8
1000	4	5.1	5.7	1.5
	8	7.1	11.4	0.7
	12	10.6	17.2	0.5
	16	14.0	22.0	0.39
Electrophysical characteristics of clayey soils				
f , MHz	Humidity, %	ε	Γ , dB/m	h_{eff} , m
333	4	5.1	20	0.43
	8	8.0	40	0.2
	12	12.6	60	0.14
	16	18.0	80	0.1
1000	4	5.1	40	0.2
	8	7.1	80	0.1
	12	12.0	120	0.08
	16	18.0	150	0.06

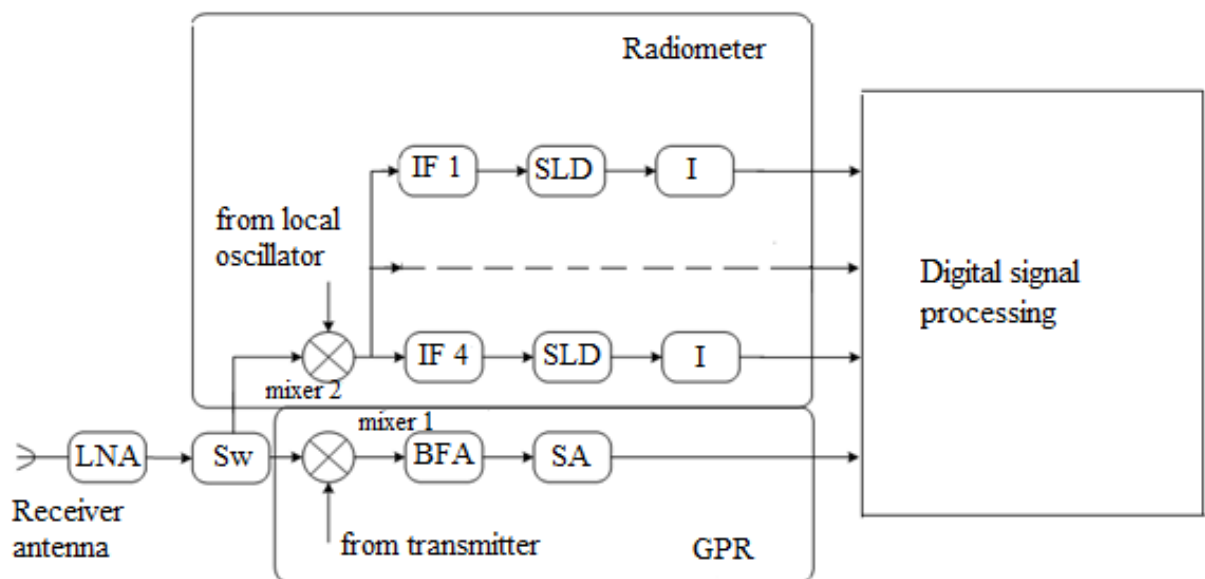
Нэгдмэл георадарын системд янз бүрийн гүнээс радио дулааны цацрагийг бүртгэхийн тулд хүлээн авах дөрвөн сувгийг ашиглахыг санал болгож байгаа бөгөөд энэ нь диэлектрик нэвтрүүлэх чадварын өөрчлөлтийн шинж чанарыг гүнзгийрүүлэн тооцоолох боломжийг олгоно.

Цаашид үүнийг зөөвөрлөгч хоорондын интерфейсийг харуулсан радарын бүрэлдэхүүн хэлбэрээр идэвхтэй хайгуулын үр дүнтэй харьцуулж, орчны электрофизик шинж чанарыг тооцоолоход тохиромжтой хөрсний бүтцийн цахилгаан соронзон загварыг сонгох боломжтой. Цахилгаан соронзон хөрсний загварыг сонгох аргыг зураг 19-д үзүүлэв.



Зураг 19. Хөрсөн дэх объектын гүнийг тодруулах цахилгаан соронзон хөрсний загварын бүтцийг тодорхойлох арга

Идэвхтэй георадарыг радиометртэй нэгтгэхийг зураг 20-д үзүүлэв.



Зураг 20. Нэмэлт дөрвөн сувгийн радиометрийг асаах замаар георадарын хүлээн авах замыг өөрчлөх: LNA – шуугиан багатай өсгөгч, Sw – сэлгэгч, BFA - давтамжийн өсгөгч, SA - спектр анализатор, IF 1 ... 4 - завсрын давтамж өсгөгч, зөвхөн давтамжийн тохиргоогоор ялгаатай, SLD - квадрат хууль илрүүлэгч, I - интегратор (нарийн зурвасын видео өсгөгч)

Радиометрийн суваг бүрийн давтамжийн зурвас нь 200 МГц, сувгуудын төв давтамж нь 200, 400, 600, 800 МГц байна.

Георадарын нислэгийн замын дагуу тандаж буй хэсгүүдэд газрын гүний ус бүхий хэсгүүдийн зураглалыг үүсгэх алгоритм

Георадарын давтамжийн шугаман модуляцтай дохиог ашиглан нисгэгчгүй нисэх аппаратын нислэгийн замын дагуух газрын гүн дэх объектуудын зураглалыг үүсгэсэн. Давтамжийн шугаман модуляцтай дохиог Synthetic Aperture Radar (SAR) алгоритмыг ашиглан боловсруулсан.

SAR алгоритмын функц програмууд:

```
% Анхны нөхцөл, параметрын тохируулгын хэсэг
c = physconst('LightSpeed');
fc = 4e6;
rangeResolution = 3;
crossRangeResolution = 3;
bw = c/(2*rangeResolution);
prf = 1000;
aperture = 4;
tpd = 3*10^-6;
fs = 120*10^6;
waveform = hased.LinearFMWaveform('SampleRate',fs, 'PulseWidth', tpd, 'PRF',
prf,'SweepBandwidth', bw);
speed = 100;
flightDuration = 4;
radarPlatform = phased.Platform('InitialPosition', [0;-200;500], 'Velocity', [0; speed; 0]);
slowTime = 1/prf;
numpulses = flightDuration/slowTime +1;
maxRange = 250;
truncrangesamples = ceil((2*maxRange/c)*fs);
fastTime = (0:1/fs:(truncrangesamples-1)/fs);

% Хүрээ хоорондын боловсруулалтын лавлах мужийг тохируулга.
Rc = 1000;

% Техникийн нөхцлийн тохируулга, бодлогын хэсэг
antenna = phased.CosineAntennaElement('FrequencyRange', [1e9 6e9]);
antennaGain = aperture2gain(aperture,c/fc);
transmitter = phased.Transmitter('PeakPower', 50e3, 'Gain', antennaGain);
```

```

radiator = phased.Radiator('Sensor', antenna, 'OperatingFrequency', fc,
'PropagationSpeed', c);
collector = phased.Collector('Sensor', antenna, 'PropagationSpeed',
c, 'OperatingFrequency', fc);
receiver = phased.ReceiverPreamplifier('SampleRate', fs, 'NoiseFigure', 30);
channel = phased.FreeSpace('PropagationSpeed', c, 'OperatingFrequency',
fc, 'SampleRate', fs, 'TwoWayPropagation', true);

% Байнуудыг болон тандан судлах чиглэлийг зааж өгч буй хэсэг
targetpos = [800,0,0; 1000,0,0; 1300,0,0]';
targetvel = [0,0,0; 0,0,0; 0,0,0]';
target = phased.RadarTarget('OperatingFrequency', fc, 'MeanRCS', [1,1,1]);
pointTargets = phased.Platform('InitialPosition', targetpos, 'Velocity', targetvel);

%Байн байрлал
figure(1);
h = axes;
plot(targetpos(2,1), targetpos(1,1), '*g');
hold all; plot(targetpos(2,2), targetpos(1,2), '*r');
hold all; plot(targetpos(2,3), targetpos(1,3), '*b');
hold off;
set(h, 'Ydir', 'reverse');
xlim([-10 10]);
ylim([700 1500]);
title('Ground Truth');
ylabel('Range');
xlabel('Cross-Range');

% Дохио тусах өнцөг
refangle = zeros(1, size(targetpos, 2));
rxsig = zeros(truncrangesamples, numpulses);
for ii = 1:numpulses

% радар болон байнуудын байршлын өөрчлөлт
[radarpos, radarvel] = radarPlatform(slowTime);
[targetpos, targetvel] = pointTargets(slowTime);

% Байн зай болон өнцгийг хүлээн авах
[targetRange, targetAngle] = rangeangle(targetpos, radarpos);

```

```

% ДШМ-тай импульс үүсгэх
sig = waveform();

% Дохио байн дээр тусах үеийн хэлбэлзэл
sig = sig(1:truncrangesamples);
sig = transmitter(sig);
targetAngle(1,:) = refangle;
sig = radiator(sig, targetAngle);
sig = channel(sig, radarpos, targetpos, radarvel, targetvel);
sig = target(sig);
sig = collector(sig, targetAngle);

% Импульсыг хүлээн авах
rxsig(:,ii) = receiver(sig);
end

% Бодолтын циклийн төгсгөл ба үр дүнг дүрслэх хэсэг
figure(2);
imagesc(real(rxsig));
title('SAR Raw Data')
xlabel('Cross-Range Samples')
ylabel('Range Samples')

pulseCompression = phased.RangeResponse('RangeMethod', 'Matched filter',
'PropagationSpeed', c, 'SampleRate', fs);
matchingCoeff = getMatchedFilter(waveform);
[cdata, rnggrid] = pulseCompression(rxsig, matchingCoeff);

figure(3);
imagesc(real(cdata));
title('SAR Range Compressed Data')
xlabel('Cross-Range Samples')
ylabel('Range Samples')

rma_processed = helperRangeMigration(cdata,fastTime,fc,fs,prf,speed,numpulses,c,Rc);
bpa_processed =
helperBackProjection(cdata,rnggrid,fastTime,fc,fs,prf,speed,crossRangeResolution,c);

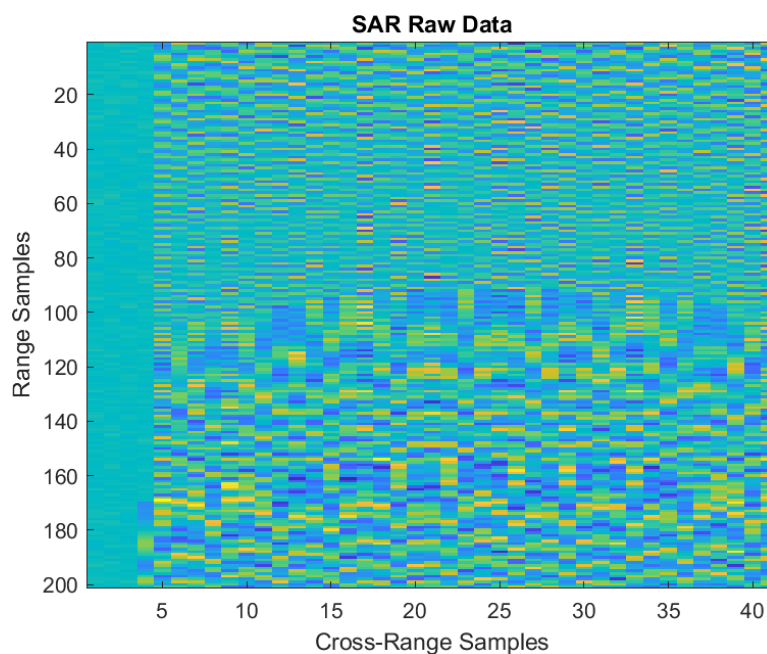
```

```

figure(4);
imagesc((abs((rma_processed(1700:2300, 600:1400).'))));
title('SAR Data focused using Range Migration algorithm')
xlabel('Cross-Range Samples')
ylabel('Range Samples')

figure(5);
imagesc((abs(bpa_processed(600:1400, 1700:2300))));
title('SAR Data focused using Back-Projection algorithm')
xlabel('Cross-Range Samples')
ylabel('Range Samples')

```

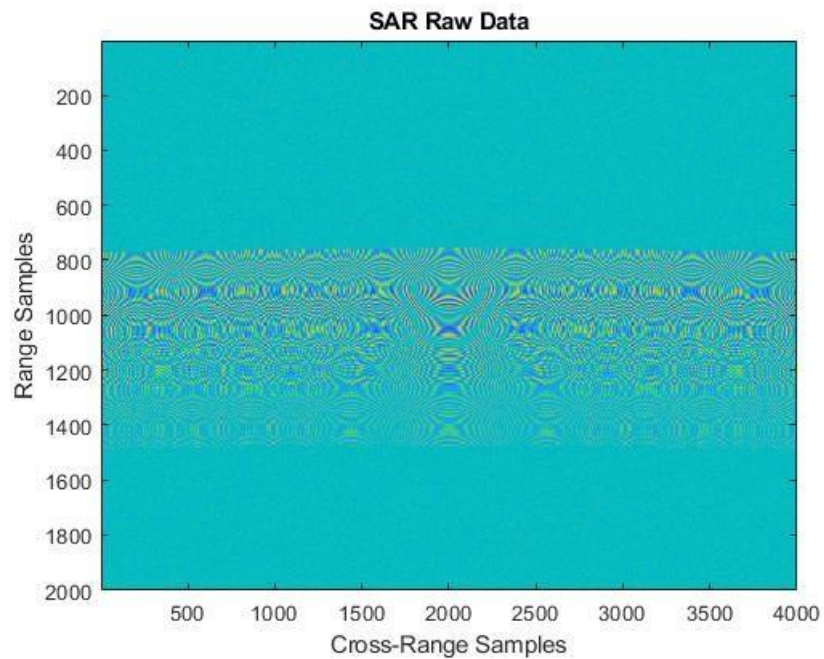


Зураг 21. Газрын гүн дэх объектуудын зураглал.

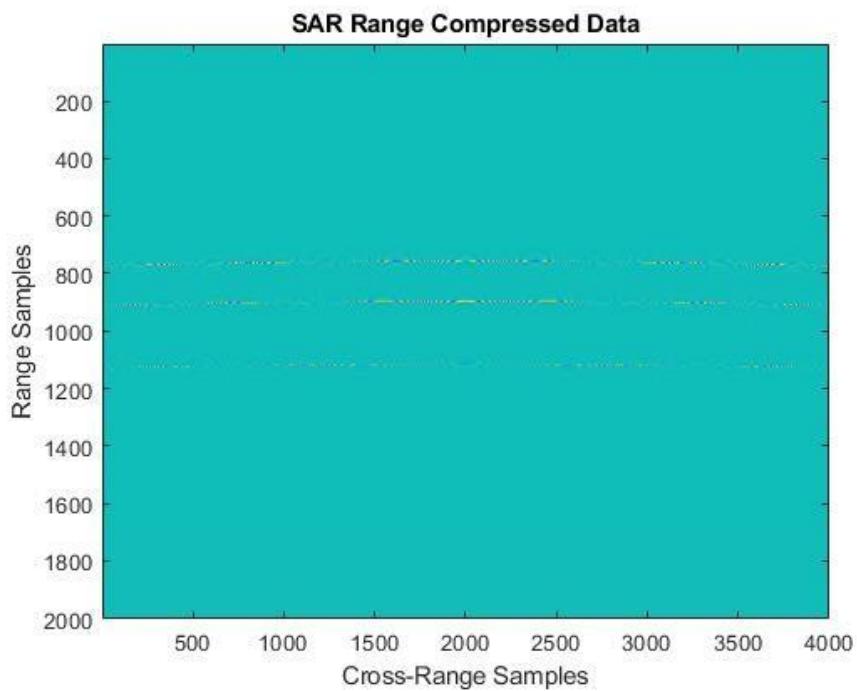
SAR алгоритмыг ашиглан гүний ус бүхий хэсгүүдийн зураглалыг үүсгэх программын семуляц

Георадиолокацийн давтамжийн шугаман модуляцтай дохиог ашиглан нисгэгчгүй нисэх аппаратын нислэгийн замын дагуух газрын гүн дэх объектуудын зураглалыг бүргэсэн ба давтамжийн шугаман модуляцтай дохиог Synthetic Aperture Radar (SAR) алгоритмын 10 шатлалт функц бүхийг программыг MATLAB ашиглан боловсруулсан.

MATLAB программыг ашиглан SAR алгоритмын семуляцийг гүйцэтгэсэн үр дүнгүүд.



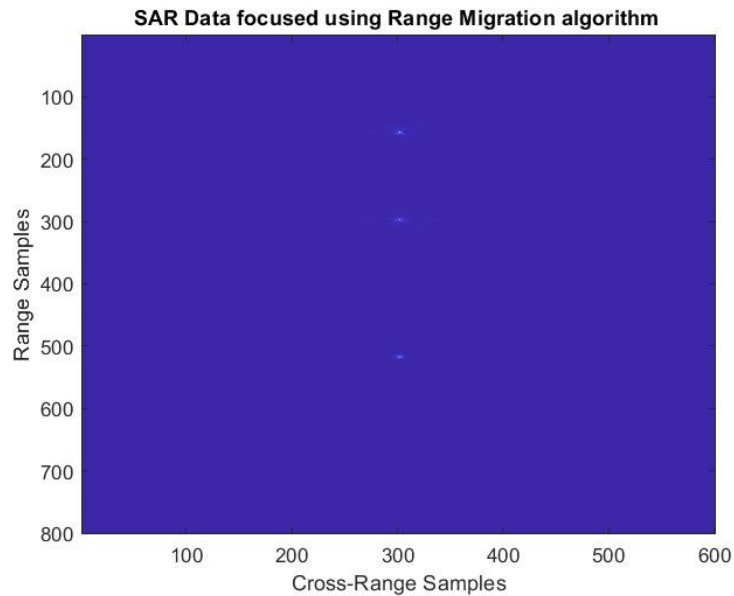
Зураг 22. Газрын гүн дэх объектуудын зураглалын анхны өгөгдөл.



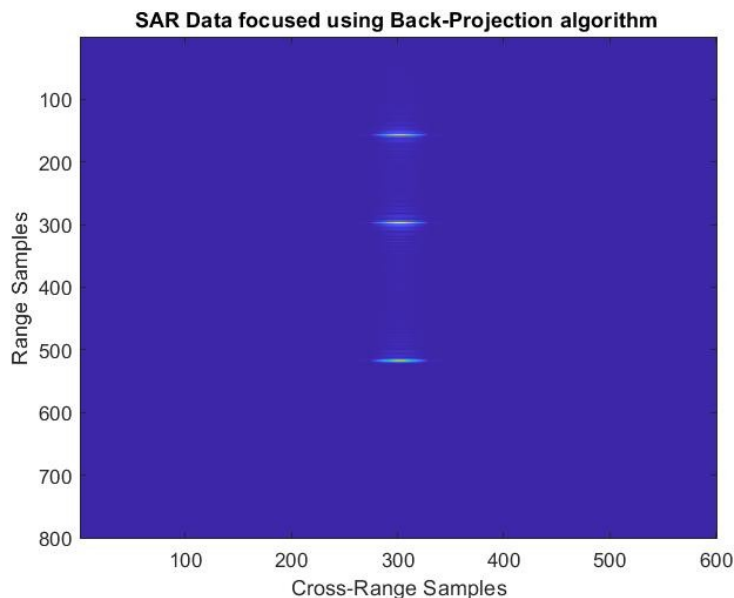
Зураг 23. Газрын гүн дэх объектуудын зураглалын хүрээний шахалт хийгдсэн өгөгдөл.

Георадиолокацын газрын гүн дэх объект илрүүлэлтийн нарийвчлалыг нэмэгдүүлэх зорилгоор Range Migration (RM) болон Back-Projection (BP) алгоритмуудыг үндсэн SAR өгөгдөл боловсруулах программд нэмэлт функц хэлбэрээр ашиглан симуляцийг гүйцэтгэсэн.

Симуляцийн үр дүнгээс хархад RM болон BP алгоритм нь объектын байрлал (оройн цэг)-ын мэдээллийн нарийн ялгаж байна. Зарим тохиолдолд RM алгоритм нь жижиг объектуудыг шугиан болгон хасаж байна. Харин BP алгоритм нь жижиг объектуудын хэмжээ ихэж харуул байна. Иймд RM болон BP алгоритмуудыг хослуулан ашиглах нь тохиромжтой байна.



Зураг 24. Газрын гүн дэх объектуудын зураглалын RM алгоритмаар фокуслагдсан өгөгдөл.

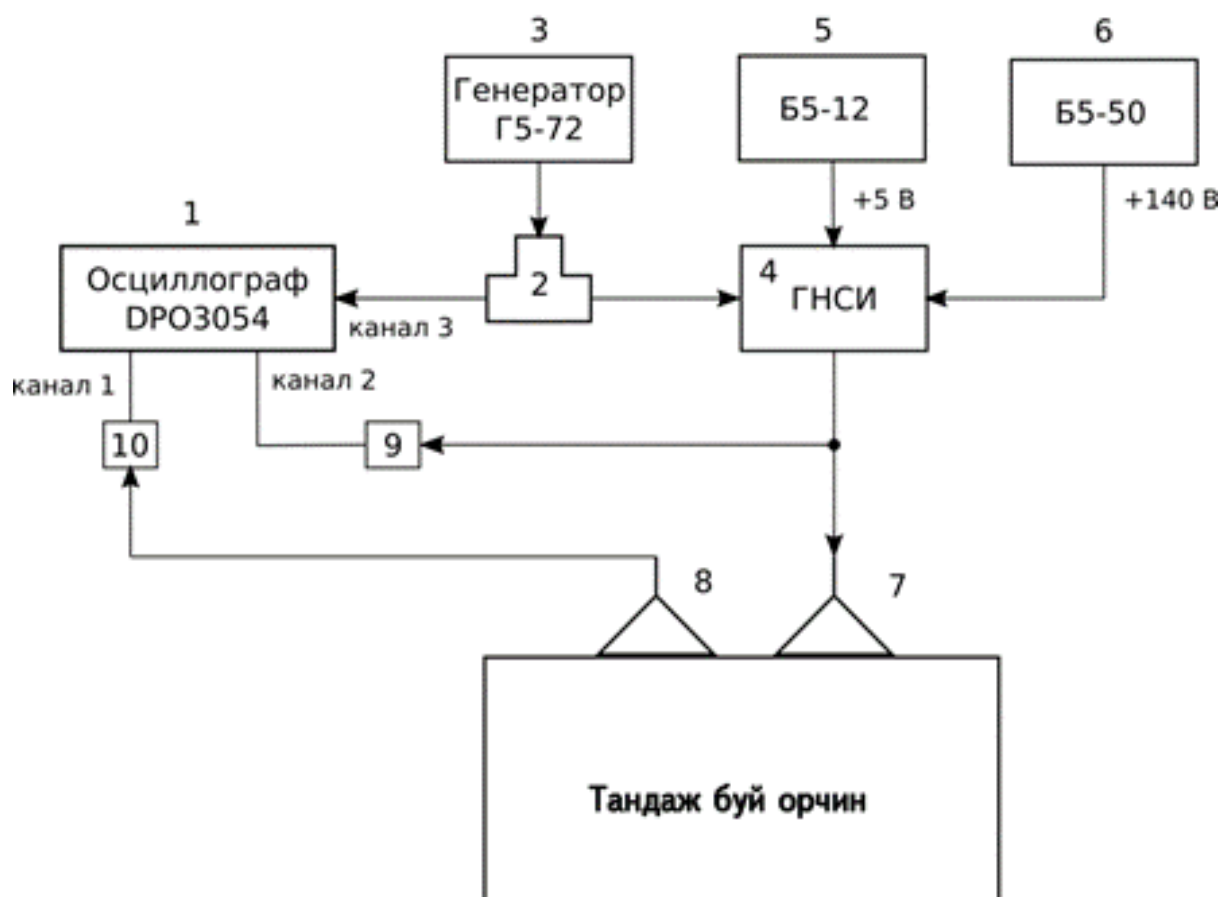


Зураг 25. Газрын гүн дэх объектуудын зураглалын BP алгоритмаар фокуслагдсан өгөгдөл.

Георадарын төхөөрөмж бүхий нисгэгчгүй нисэх аппаратын техникийн баримт бичиг

Георадарын төхөөрөмжийн туршилтын загвар

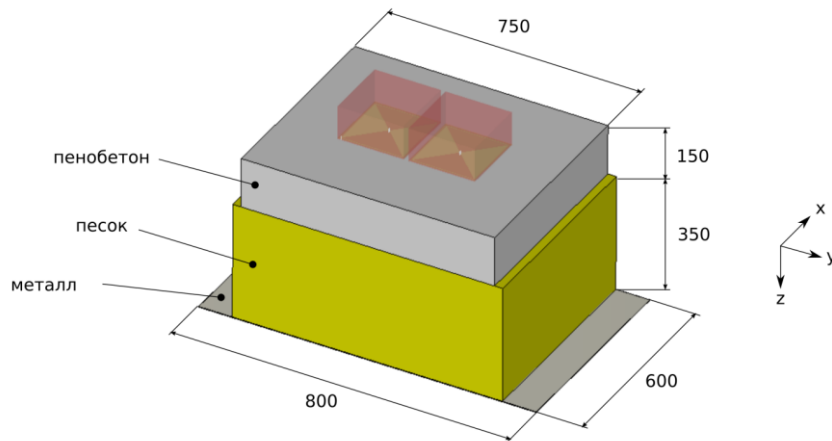
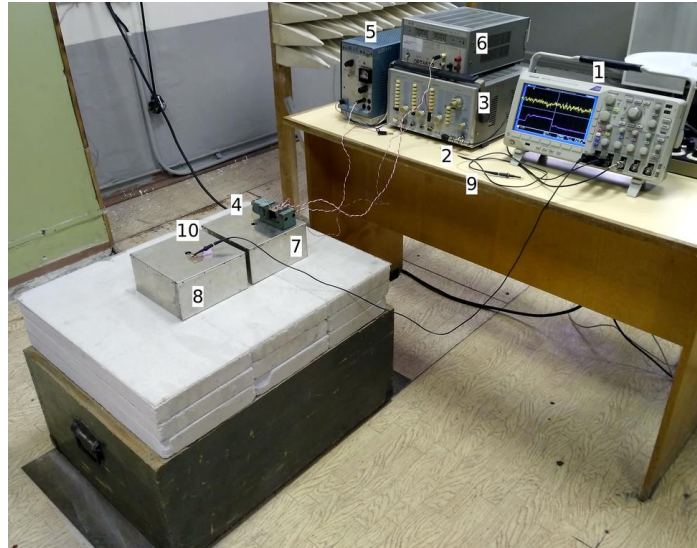
Георадарын төхөөрөмжийн дамжуулагч, хүлээн авагч антенн нь FR-4 диэлектрик суурьтай өргөн зурвасын “Bow-tie” антеннтай байна (Зураг 26).



Зураг 26. Газрын гүний радиолокацийн өргөн зурвасын антенны туршилт явуулах схем

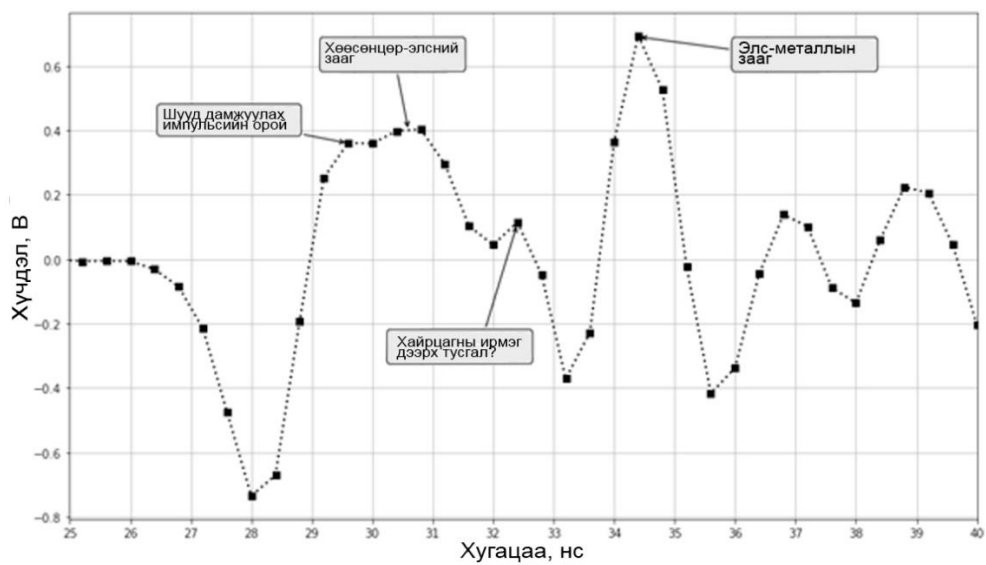
Г5-72, Б5-12, Б5-50 төхөөрөмжүүдийн тусламжтайгаар ГНСИ нь өргөн зурвасын радио дохиог үүсгэх ба үүнийг Осциллограф дээр шууд (9 – суваг 2) болон тандаж буй орчноос ойсны дараа (10 – суваг 1) хүлээн авч үзүүлнэ. (7) ба (8) нь тус бүр дамжуулах болон хүлээн авах антенн болно.

Бодит туршилтын схем болон антенны загварыг зураг 27-д үзүүлэв. Антенн нь зурагт үзүүлсний дагуу хэлбэртэй ба метал корпус дотор суурилагдсан байна.



Зураг 27. Бодит туршилтын схем, Тандах орчны болон антенны загвар.

Туршилтын үр дүнгийн график (Зураг 28).

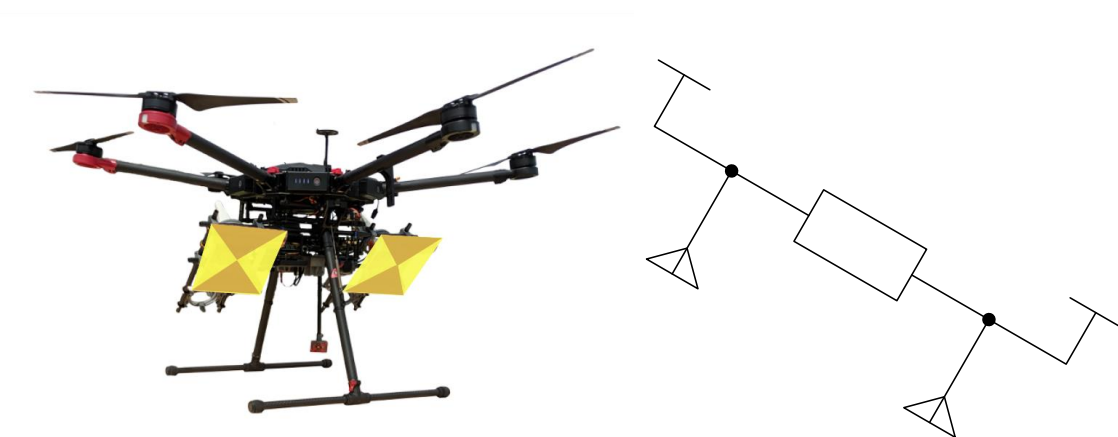


Зураг 28. Тандаж буй орчны үе давхаргуудаас хүлээн авсан дохио

Зураг 28-т шууд хүлээн авч буй импульс, эхний үеийн зааг болон доод давхаргаас ойж буй импульсуудыг тэмдэглэв. Зохион бүтээсэн өргөн зурвасын антенн болон радиолокацийн системийн загвар нь ажиллаж буйг дээрх зургуудаас дүгнэж болно.

Георадарын төхөөрөмж бүхий нисгэгчгүй нисэх аппаратын техникийн шаардлага

Дээрх георадарын төхөөрөмжийг нисгэгчгүй нисэх аппарат дээр суурилуулан тандах үед үүсэх өнцөг, байрлал болон байршил (Зураг 29).



Зураг 29. Георадарын төхөөрөмжийн нисэх аппаратад байрлах байршил

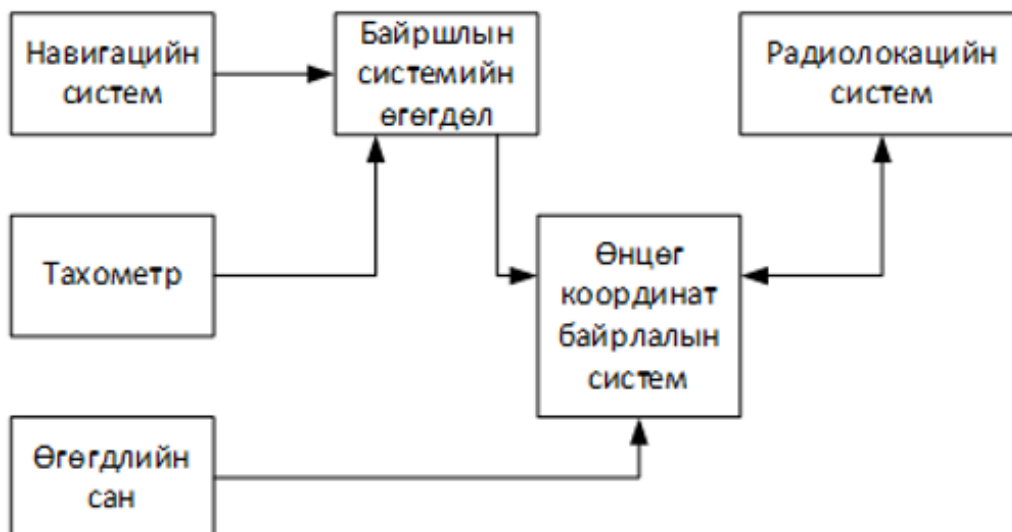
Георадарын төхөөрөмж нь нисэх аппарат дээр зураг 29-д харуулсны дагуу тодорхой суурь өнцөг үүсгэн байрлах ба нисэх аппарат хөдлөх үед өнцөг, байрлал болон байршил өөрчлөгдөж байдаг.

Георадарын төхөөрөмжийг суурилуулах нисгэгчгүй нисэх аппаратад тавигдах техникийн шаардлага:

- Өргөх хүч буюу даац $\geq 6\text{кг}$
- Нислэгийн үргэлжлэх хугацаа $\geq 20\text{мин}$
- Нислэгийн хурдыг хянах, тохируулах боломжтой байх.
- Агаарт тогтвортой нислэг үйлдэх чадвартай байх.
- Нислэгийн замыг урьдчилан тохируулах боломжтой байх.
- Байршил тогтоох системийн эх үүсвэр нь 2 болон түүнээс олон байх. Хугацааны бодит агшинд байршлын мэдээллийг георадарын төхөөрөмжид дамжуулдаг байх.

- Алсын зайн нислэг хийх боломжтой байх.

Дээрх шаардлагад нийцүүлэн георадарын төхөөрөмж бүхий нисгэгчгүй нисэх аппаратын техникийн блок диаграммыг зураг 30-д үзүүлэв.



Зураг 30. Георадарын төхөөрөмж бүхий нисгэгчгүй нисэх аппаратын техникийн блок диаграмм.

Инерциал навигацийн систем нь тахометртэй хамтаар байршил болон өнцгийг тогтооно. Радиолокацийн систем нь эдгээр өгөгдлүүдээс мэдээллээ аван газрын гүний мэдээллийг боловсруулна. Оптик систем нь мөн навигацийн системтэй холбогдсон байх ба нэмэлт тохируулгын үүрэгтэй ажиллана.

Нисгэгчгүй нисэх аппарат

Нисгэгчгүй нисэх аппаратын техникийн үндсэн үзүүлэлтүүд:

- Тэнхлэг хоорондын зай
 - Хөдөлгүүрийн диагональ 1050 мм
 - Сэнс 381 мм
- Жин
 - Газарт 6500 г
 - Агаарт 6650 г
- Нэмэлт ачааны жин 7000 г
- Нислэгийн үргэлжлэх хугацаа 30-35мин (салхины хурд < 4м/с)
- Батарейн хүчин чадал 22.2В; 18000мА/ц; 6S
- Нислэгийн зай 4000м (саадгүй үед)

- Нислэгийн өндөр 3000м
- Мэдээлэл дамжуулах зай 2000-4000м
- Нислэгийн орчин Гадаа/Дотор
- Ажиллах температур $-10^{\circ}\text{C} \sim +40^{\circ}\text{C}$

Нисгэгчгүй нисэх аппаратыг “TAROT T1000” загварын 8 хөдөлгүүрт дроны их биеийг ашиглан угсарсан (Зураг 31).



Зураг 31. “Tarot T1000” дроны их бие ба PIXHAWK V4 удирдлагын системийг суурилуулсан байдал.

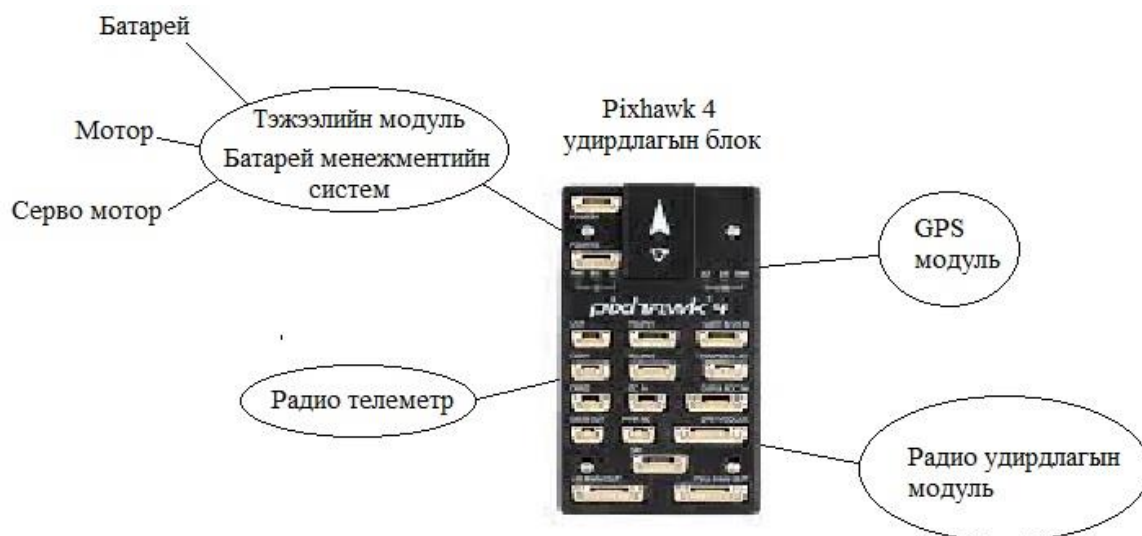
“Tarot T1000” дроны тулгуур хөндлийн хүчитгэсэн холбогчийг 3D принтерээр хэвлэн шинэчлэн угсарсан (Зураг 32).



Зураг 32. “Tarot T1000” дроны тулгуур хөндлийн хүчитгэсэн холбогч

Нисгэгчгүй нисэх аппаратын электрон удирдлага

Удирдлагын системийн блок схемийг зураг 33-т үзүүлэв.



Зураг 33. Удирдлагын системийн блок схем.

Нисэх аппаратын удирдлагад “Pixhawk 4” модулийг ашиглахаар сонгосон. Уг удирдлагын модуль нь тэжээлийн модуль, радио телеметр, GPS модуль болон радио модем зэрэг стандарт модулиудтай шууд холбогдон ажиллах боломжтой. Мөн акселерометр, барометр болон GPS зэргийг өөртөө багтаасан байдаг.

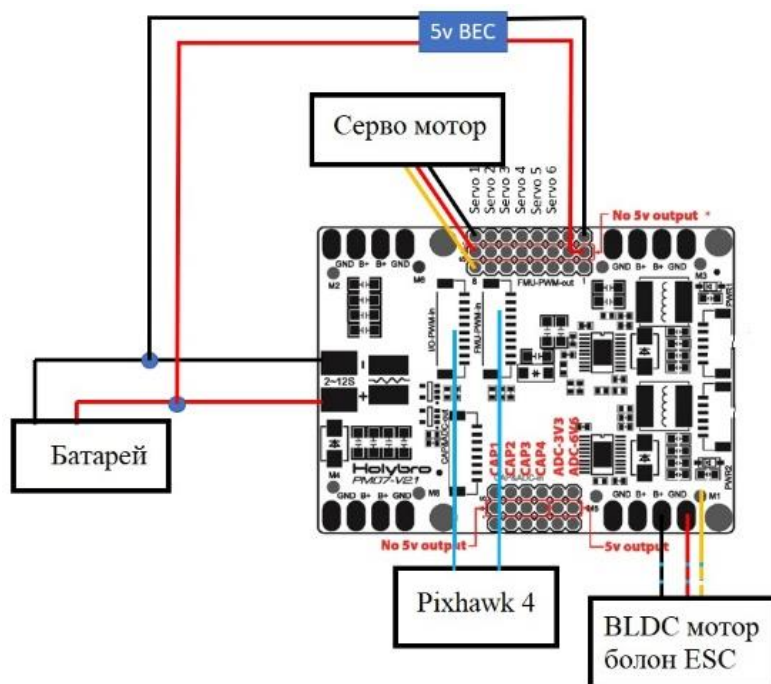
“Pixhawk 4” удирдлагын модулийн техникийн үзүүлэлт:

- Гол удирдлагын процессор STM32F765 - 32 Bit Arm Cortex-M7, 216MHz, 2MB memory, 512KB RAM
- Оролт гаралтын удирдлагын процессор STM32F100 - 32 Bit Arm Cortex-M3, 24MHz, 8KB SRAM
- Өөр дээрээ Accel/Gyro: ICM-20689, Accel/Gyro: BMI055 эсвэл ICM20602, соронзон хэмжигч: IST8310 барометр: MS5611.
- GPS
- Оролт/гаралтын интерфейс:
 - 5 ерөнхий зориулалтын цуваа порт
 - 3 I2C порт
 - 4 SPI порт
 - Цуваа ESC-тэй хос CAN-д 2 хүртэлх CANBus

- 16 PWM гаралт (IO-аас 8, FMU-аас 8)
- FMU дээрх 3 зориулалтын PWM/Capture оролт
- CPPM-д зориулсан R/C оролт
- Аналог / PWM RSSI оролт
- Spektrum / DSM болон S.Bus-д зориулсан тусгай R/C оролт
- S.Bus servo гаралт
- 2 батерейны хүчдэл/гүйдлийн аналог оролт
- Цахилгаан тэжээлийн систем:
 - Тэжээлийн модулийн гаралт: 4.9~5.5V
 - USB тэжээлийн оролт: 4.75~5.25V
 - Servo Rail оролт: 0~36V
- Үйл ажиллагааны температур: -10°C ~ +40°C

Цахилгаан тэжээлийн хангамж

“PM07” модуль нь үндсэн тэжээлийн батарейтай холбогдоно. “Pixhawk 4” нь тэжээлээ “PM07” модулиор дамжуулан авна. Мөн “PM07” модульд нисэх аппаратын үндсэн хөдөлгүүрүүд болох 8ш сойтоггүй моторууд холбогдоно. Зураг 34-т “PM07” модулийн холболтын блок схемийг үзүүлэв..



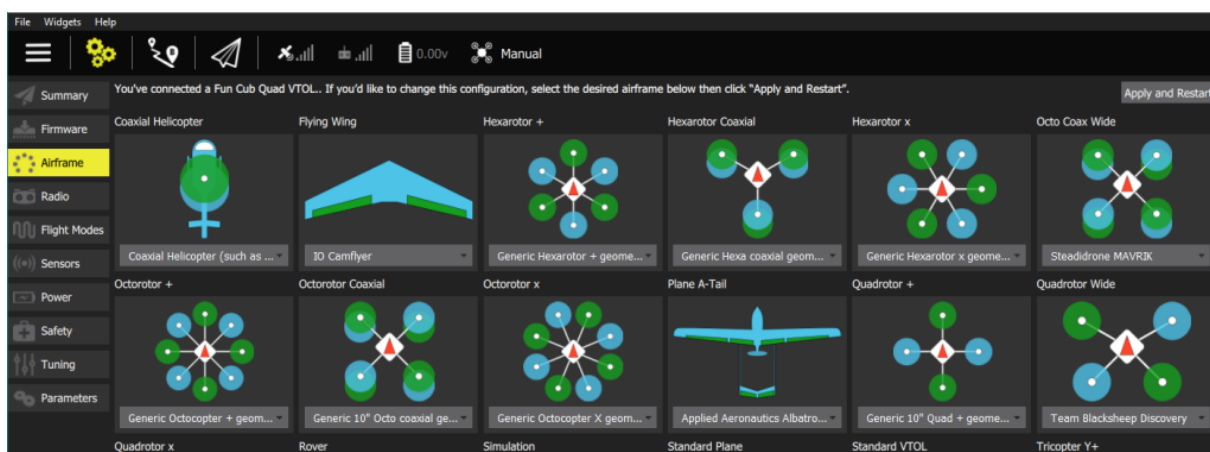
Зураг 34. “PM07” боардын холболтын блок схем

Газрын удирдлагын станц

Гар удирдлага болон нисэх аппаратын хооронд мэдээлэл дамжуулахдаа “RadioLink R12DS” 12 сувагтай, 10B-н радио модемыг ашиглана.

Удирдлагын программ хангамжийн тохируулга

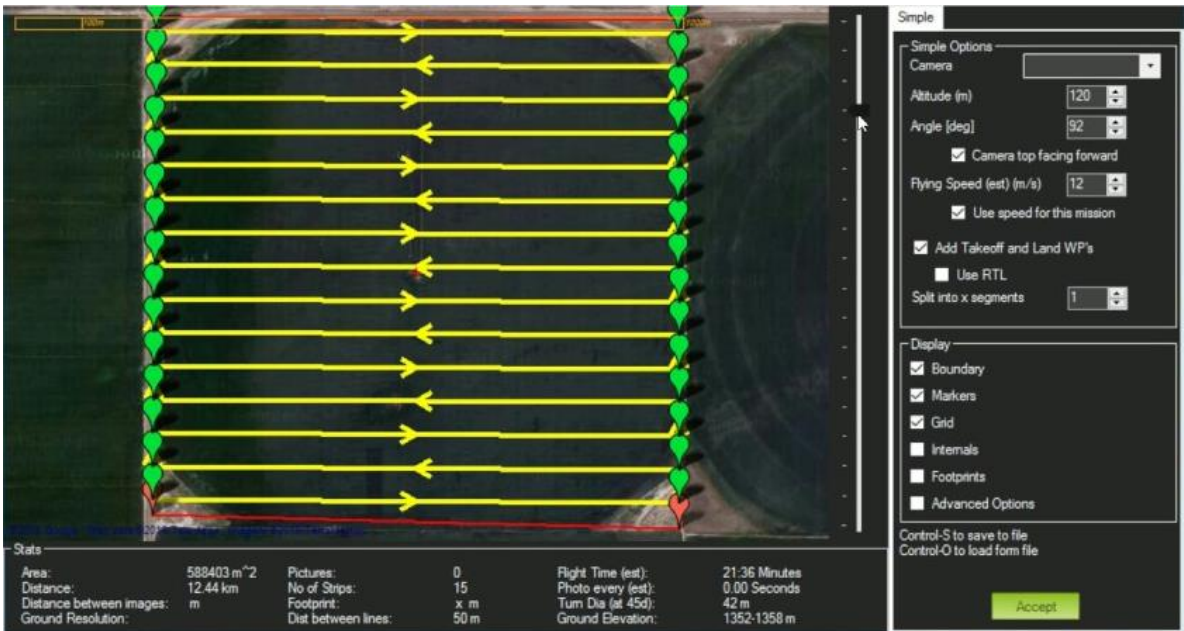
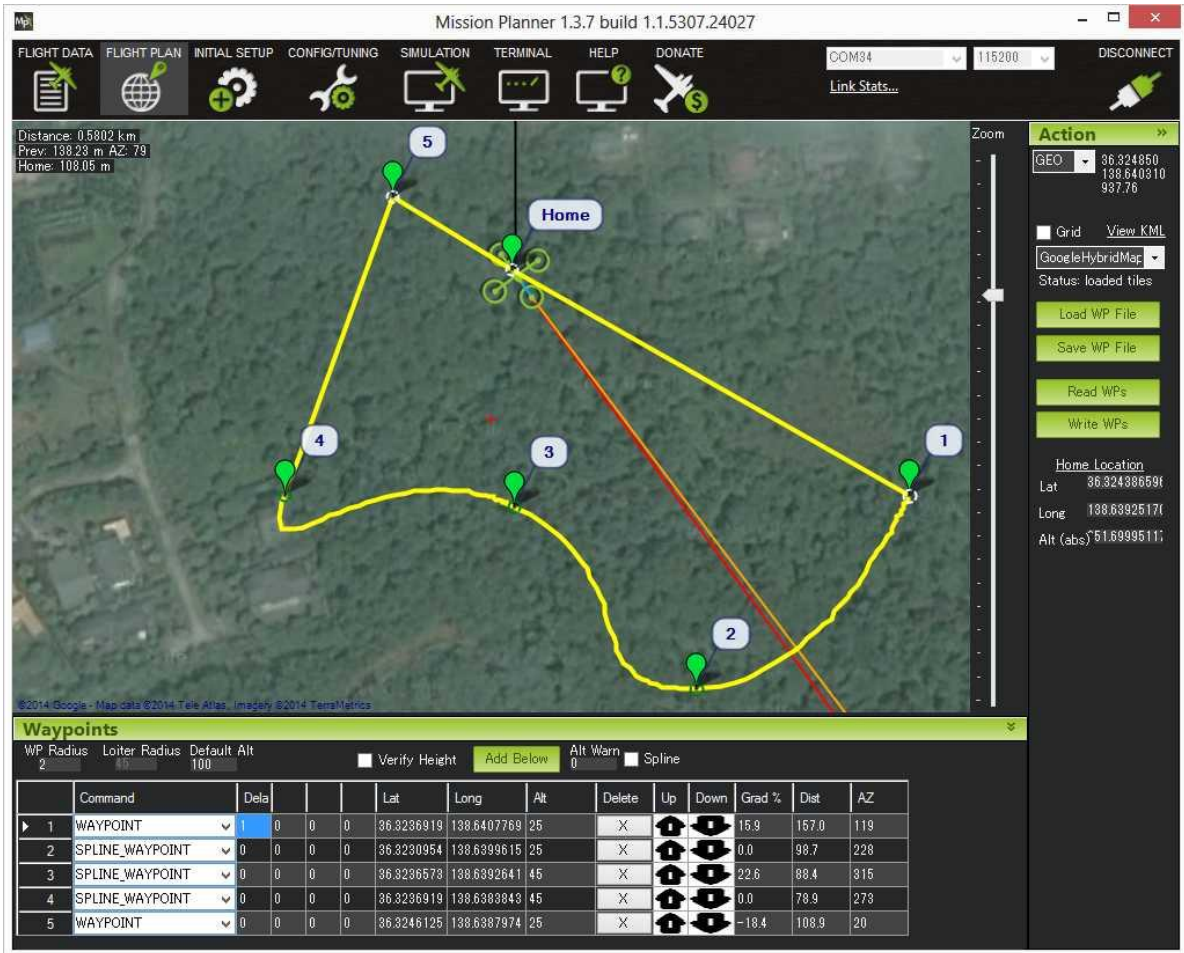
Нисгэгчгүй нисэх аппаратын техникийн үзүүлэлтэд нийцүүлэн PIXHAWK V4 удирдлагыг программчлах шаардлагатай. Үүний тулд Mission Planner авто нислэгийн горимыг тохируулах программыг ашиглав. Энэ нь PIXHAWK V4 удирдлагын модулийг бүрэн дэмждэг онцлогтой. Эхний шатанд дроны техникийн үзүүлэлтийн дагуу тохиргоог хийнэ. Үүнд дроны топологи, радио удирдлагын таниулах тохиргоо, гироскоп болон акселерометрийн тохируулга зэрэг багтана. Mission Planner программын нисэх аппаратын топологи, тохируулгын интерфэйсийг зураг 35-д үзүүлэв.



Зураг 35. Mission Planner программын нисэх аппаратын топологи, тохируулгын интерфэйс.

Автомат нислэгийн горимын тохируулга

Нисгэгчгүй нисэх аппаратын техникийн үзүүлэлтэд нийцүүлэн удирдлагын тохиргоог гүйцэтгэсний дараа авто нислэгийн горимын тохиргоог хийнэ. Авто нислэгийн горимд нислэгийн өндөр, хурд, агаар дахь тогтвортой зогсолтын цэгийн координат, үргэлжлэх хугацаа, нислэгийн траектор гэх мэт тохиргоог гүйцэтгэнэ. Mission Planner программын нисэх аппаратын авто нислэгийн горимын тохиргоог хийх болон нислэгийн хяналтын интерфэйсийг зураг 36-д үзүүлэв.



Зураг 36. Mission Planner программы нисэх аппаратын авто нислэгийн горимын тохиргоог хийх болон нислэгийн хяналтын интерфэйс

Дүгнэлт

Төслийн хүрээнд хуурай бүс нутгуудын уст давхаргыг нисгэгчгүй нисэх аппаратаас хайхад георадарын шаардагдах энергийн потенциалийг тооцсон. Эдгээр нутгууд нь хуурай хөрсөөр тодорхойлогддог бөгөөд уст давхарга болон хөрс нь нойтон шавар, базальт давхаргаар тусгаарлагддаг.

Мөн хөрсөн дэх уст давхаргын гурван ердийн загварыг авч үзсэн бөгөөд тэдгээрийн хувьд хөрсний усыг хайхад шаардагдах георадарын потенциалын тооцоог хийсэн болно.

Газрын гүнээс ирэх сул дохиог ялган авахын тулд хайлт хийх замын дагуу георадар бүхий нисгэгчгүй нисэх аппарат дэлхийн гадаргын дээр хөдөлж буй үед хүлээн авсан ойсон дохиог Доплер шүүлтүүрээр шүүх алгоритмыг ашиглахыг санал болгож байна.

Хөрсний радио-дулааны цацраг нь хөрсний цахилгаан соронзон төлөв болон электрофизик шинж чанараас хамаардаг гэдгийг тодорхойллоо. Иймд цаашид идэвхтэй давтамжийн шугаман модуляц бүхий георадарыг радиометртэй хослуулан георадарыг ажиллуулах явцад мэдээллийн агуулга, хэмжилтийн үр дүнгийн нарийвчлалыг нэмэгдүүлэхийг санал болгож байна.

Газар дээрх ΔR дохионы нарийвчлалд үндэслэн Δh гүнийн хүлцлийг тохируулж болно. 300-аас 900 МГц давтамжийн мужид ажилладаг давтамжийн шугаман модуляцын дохио бүхий георадарын функциональ диаграммыг боловсруулж, түүний элементийн суурийг сонгосон, мөн өөрийн гэсэн давтамжийн шугаман модуляц бүхий георадарын өргөн зурвасын "эрвээхэй" антенныг хэрэгжүүлсэн.

Давхаргын зузаан эсвэл объектын гүнийг тодорхойлоход шаардагдах тооцооллын нарийвчлал нь даалгавар болон илрүүлж буй объектын төрлөөс хамаарч өөр өөр байж болно. Давтамжийн шугаман модуляц бүхий георадарыг радиометртэй нэгтгэснээр мэдээллийн агуулга, хэмжилтийн үр дүнгийн нарийвчлал нэмэгдэх болно.

Хөрсөн дэх объектын гүнийг тодруулахын тулд идэвхтэй болон идэвхгүй георадарын системийн харилцан үйлчлэлийг ашиглан цахилгаан соронзон хөрсний загварын бүтцийг тодорхойлох аргыг санал болгосон. Диэлектрик нэвтрүүлэх чадварын утгыг тодорхойлдог гол үзүүлэлт нь хөрсний их хэмжээний чийг бөгөөд өөрчлөлтийн динамик нь чийгийн өөрчлөлтөөс хамаарна. Хөрсний чийгийн гүн дэх өөрчлөлтийн динамикийг тогтоохын тулд (чийгийн хуваарилалт жигд бус байж болох тул) радио дулааны цацрагийг олон сувгаар хүлээн авахыг санал болгож байна.

Радиометрийн хүлээн авагчтай хамт ажилладаг нэгдсэн георадарын функциональ диаграммыг боловсруулсан. Георадарын шугаман давтамжийн модуляцыг хүлээн авах өргөн зурвасын оролт нь георадарыг радиометртэй нэгтгэх боломжтой болгосон.

Төслийн үр дүнгээр олон улсын хурлын эмхэтгэл, мэргэжлийн сэтгүүлд эрдэм шинжилгээний өгүүлэл гурвыг хэвлүүлсэн байна.

Төслийн цаашид үргэлжлүүлэн георадарын системийг нисгэгчгүй нисэх аппарат дээр суурилуулан хээрийн туршилт, судалгааг хийж хэрэглээнд нэвтрүүлэх шаардлагатай.

Ашигласан материалын жагсаалт


1. Цыренова Т.Б. Политико-правовые аспекты охраны водных ресурсов в Монголии. Власть. 2010. №12. С.169-172.
2. Цыренова Т.Б. О системе управления водными ресурсами в Монголии. Власть. 2011. №7. С.97-100.
3. Маринов Н.А., Попов В.Н. Гидрогеология Монгольской народной республики. Москва, Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы. 1963. 431 с.
4. Church G.J., Bauder A., Grab M., Hellmann S., Maurer H. High-resolution helicopter-borne ground penetrating radar survey to determine glacier base topography and the outlook of a proglacial lake. 17-th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR). 18-21 June 2018. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2018.8441598>
5. Grab M., Bauder A., Ammann F., Langhammer L., Hellmann S., Church G.J., Schmid L., Rabenstein L., Maurer H.R. Ice volume estimates of Swiss glaciers using helicopter-borne GPR — an example from the Glacier de la Plaine Morte. 17--th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR). 18-21 June 2018. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2018.8441613>
6. Langhammer L., Rabenstein L., Bauder A., Schmid L., Grab M., Schaer P., Maurer H.R. Development of a novel dual-polarization helicopter-borne GPR system. 17-th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR). 18-21 June 2018. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2018.8441574> ЖУРНАЛ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ, ISSN 1684-1719, N7, 2021 21
7. Bauder A., Mazzotti G., Berger C., Langhammer L., Griessinger N., Jonas T. Winter Accumulation Measurements on Alpine Glaciers using Ground Penetrating Radar. 1-th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR). 18-21 June 2018. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2018.8441559>
8. Всевожский В.А. Основы гидрогеологии. Москва, Издательство МГУ. 2007. 448 с.
9. Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М., Шульгина Е.М. О возможности определения характеристик поверхностного слоя почвы по его тепловому радиоизлучению. Доклады АН СССР. 1970. Т.94. №6. С.1313–1315.
10. Curtis J.O., Weiss C.A., Everett J. B. Effect of Soil Composition on Complex Dielectric Properties. US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station. 1995. Technical Report EL-95-34.
11. Daniels D.J. Ground Penetrating Radar. The Institution of Engineering and Technology. 2004. 752 p.
12. Финкельштейн М.И., Карпухин В.И., Кутев В.А., Метелкин В.Н. Подповерхностная радиолокация. Москва, Радио и связь. 1994. 216 с.

13. Финкельштейн М.И., Мендельсон В.Л., Кутев В.А. Радиолокация слоистых земных покровов. Москва, Советское радио. 1977. 216 с.
14. Финкельштейн М.И., Кутев В.А., Золотарев В.П. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. Москва, Недра. 1986. 128 с.
15. Persico, R., *Introduction to Ground Penetrating Radar: Inverse Scattering and Data Processing*, Wiley-IEEE Press, 2014c
16. Z. Huang and J. Zhang, "Determination of Parameters of Subsurface Layers Using GPR Spectral Inversion Method," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 52, no. 12, pp. 7527-7533, Dec. 2014, doi: 10.1109/TGRS.2014.2313603.
17. Ipanov, R. N. "Polyphase radar signals with ZACZ based on p-pairs D-code sequences and their compression algorithm," *Infocommunications Journal* 11.3 (2019): 21-27.
18. *Ground Penetrating Radar (Radar, Sonar and Navigation) 2nd Edition*. by David J. Daniels (Editor), IEE, 2004, 752 pagesc
19. A.I. Baskakov *et al.*, "Integration of a GPR with a radiometer to increase information content and accuracy in subsurface sounding," *IGARSS 2021 – 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Brussels, Belgium, 2021
20. Y. Nishioka, O. Maeshima, T. Uno and S. Adachi, "FDTD analysis of resistor-loaded bow-tie antennas covered with ferrite-coated conducting cavity for subsurface radar," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 47, no. 6, pp. 970-977, June 1999, doi: 10.1109/8.777119.
21. N.A. Armand, A.E. Basharinov, and A.M. Shutko "Use of Radiophysical Methods in Environmental Studies. Survey," *Radiophysics and Quantum Electronics*, 20(6), pp. 557-581, June 1977.
22. F. Jonard, L. Weihermüller, M. Schwank, H. Vereecken and S. Lambot, "Soil moisture retrieval using L-band radiometer and ground-penetrating radar," *2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2011, pp. 3093-3096, doi: 10.1109/IGARSS.2011.6049872.
23. F. Jonard, L. Weihermüller, K. Z. Jadoon, M. Schwank, H. Vereecken and S. Lambot, "Mapping Field-Scale Soil Moisture With L-Band Radiometer and Ground-Penetrating Radar Over Bare Soil," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 49, no. 8, pp. 2863-2875, Aug. 2011, doi: 10.1109/TGRS.2011.2114890.
24. A.I. Baskakov *et al.*, "Influence of a priori Uncertainty of Dielectric Permittivity and Electromagnetic Model of Soil Structure on Measurement Errors in Ground Penetrating Radar," *IGARSS 2021 – 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Brussels, Belgium, 2021.
25. S. Lambot, E. C. Slob, I. van den Bosch, B. Stockbroeckx and M. Vanclooster, "Modeling of ground-penetrating Radar for accurate characterization of subsurface electric properties," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 42, no. 11, pp. 2555-2568, Nov. 2004, doi: 10.1109/TGRS.2004.834800.

26. A. P. Tran, F. Wiaux and S. Lambot, "Soil moisture estimation using full-wave inversion of near- and far-field ground-penetrating radar data: A comparative evaluation," *2012 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*, 2012, pp. 296-300, doi: 10.1109/ICGPR.2012.6254877.
27. F. Jonard, F. André, N. Pinel, C. Warren, H. Vereecken and S. Lambot, "Modeling of Multilayered Media Green's Functions With Rough Interfaces," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 57, no. 10, pp. 7671-7681, Oct. 2019, doi: 10.1109/TGRS.2019.2915676.
28. F. Jonard, L. Weihermüller, M. Schwank, K. Z. Jadoon, H. Vereecken and S. Lambot, "Estimation of Hydraulic Properties of a Sandy Soil Using Ground-Based Active and Passive Microwave Remote Sensing," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 53, no. 6, pp. 3095-3109, June 2015, doi: 10.1109/TGRS.2014.2368831.
29. Garcia-Fernandez, M.; Alvarez-Lopez, Y.; Las Heras, F. Autonomous Airborne 3D SAR Imaging System for Subsurface Sensing: UWB-GPR on Board a UAV for Landmine and IED Detection. *Remote Sens.* 2019, 11, 2357. <https://doi.org/10.3390/rs11202357>
30. <https://docs.qgroundcontrol.com/master/en/>
31. <https://ardupilot.org/planner/docs/mission-planner-overview.html>
32. Binley, A., Hubbard, S. S., Huisman, J. A., Revil, A., Robinson, D. A., Singha, K., and Slater, L. D. (2015), The emergence of hydrogeophysics for improved understanding of subsurface processes over multiple scales, *Water Resour. Res.*, 51, 3837– 3866, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2015WR017016>
33. Groundwater Modeling <https://www.ctech.com/industries-2/natural-resources/groundwater-modeling/>
34. <https://www.ecalc.ch/xcoptercalc.php>
35. https://docs.px4.io/main/en/concept/px4_systems_architecture.html
36. <https://www.dronebook.com/>

Төслийн үр дүнгээр хэвлэгдсэн бүтээлийн жагсаалт

1. Баскаков А.И., Одсүрэн Б., Комаров А.А., Тувдендоорж Г. Энергетические характеристики георадара на беспилотном носителе для поиска водоносного слоя в засушливых районах. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №.7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.7.10>
2. A. Baskakov, A. Komarov, G. Tuvdendorj and B. Odsuren, "Influence of a Priori Uncertainty of Dielectric Permittivity and Electromagnetic Model of Soil Structure on Measurement Errors in Ground Penetrating Radar," *2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS*, Brussels, Belgium, 2021, pp. 4852-4855, doi: 10.1109/IGARSS47720.2021.9554443.
3. A. Baskakov, A. Komarov, B. Odsuren and G. Tuvdendorj, "Integration of a Ground Penetrating Radar with a Radiometer to Increase Information Content and Accuracy in Subsurface Sounding," *2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS*, Brussels, Belgium, 2021, pp. 4864-4867, doi: 10.1109/IGARSS47720.2021.9554043.



Минбрнаука России
ФГБУН Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова
Российской академии наук

ЖУРНАЛ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

электронный журнал, eISSN 1684-1719

Главный редактор академик Ю. В. ГУЛЯЕВ

О ЖУРНАЛЕ | АРХИВ ВЫПУСКОВ | РЕДКОЛЛЕГИЯ | РЕЦЕНЗИРОВАНИЕ | ИЗДАТЕЛЬСКАЯ ЭТИКА | ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ | КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ | ПОИСК

№ 7 – июль 2021 г.
(English page)

- РАДИОТЕХНИКА
 - Оценка точности определения координат лазерного источника радиозлучения с борта летательного аппарата пассивным однопозиционным методом путем компьютерного моделирования.**
 Подъявских П.А., Мещеряков А.А., Демков В.П.
[Аннотация](#) | [Текст.pdf](#)
- РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН
 - Измерение водного эквивалента, средней плотности и высоты слоисто-неоднородного снежного покрова СНП электромагнитными импульсами. Теоретическое исследование.**
 Музалевский К.В.
[Аннотация](#) | [Текст.pdf](#)
 - Экспериментальные исследования приемо-передающего модуля радиолокационного комплекса зондирования лунного грунта.**
 Семёнов Д.А.
[Аннотация](#) | [Текст.pdf](#)
 - Энергетические характеристики георадара на беспилотном носителе для поиска водоносного слоя в засушливых районах.**
 Баскаков А.И., Одуурэн Б., Комаров А.А., Туваевоорж Г.
[Аннотация](#) | [Текст.pdf](#)
- ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

ЖУРНАЛ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ, ISSN 1684-1719, №7, 2021

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.7.10>
УДК 621.396.96

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕОРАДАРА НА БЕСПИЛОТНОМ НОСИТЕЛЕ ДЛЯ ПОИСКА ВОДОНОСНОГО СЛОЯ В ЗАСУШЛИВЫХ РАЙОНАХ

А. И. Баскаков¹, Б. Одуурэн², А. А. Комаров¹, Г. Туваевоорж²¹Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14²Институт физики и технологий Монгольской Академии Наук, Монголия,
13330, г. Улан-Батор, проспект Мира, 546

Статья поступила в редакцию 12 июля 2021 г.

Аннотация. В данной работе рассматривается расчет потенциала георадара, находящегося на борту беспилотного летательного аппарата, предназначенного для поиска подземных вод в засушливых и пустынных районах Монголии. В качестве грунтов как среды распространения радиоволн взяты типы почв, главенствующих в исследуемых районах. Особенностью почв засушливых и пустынных районов является то, что они имеют почти одинаковую диэлектрическую проницаемость лишь с небольшим отличием удельного затухания из-за малого содержания воды. Рассмотрены грунты с возможными типичными моделями изменения диэлектрической проницаемости грунта по глубине.

Ключевые слова: георадар, беспилотный летательный аппарат, грунт засушливых районов, поиск подземных вод, электрофизические характеристики грунта, требуемый потенциал георадара.

Abstract. In this paper we consider the calculation of the potential of a georadar on board an unmanned aerial vehicle designed to search for groundwater in arid and desert regions of Mongolia. The soil types prevailing in the regions under study were taken as soils as a medium for the propagation of radio waves. A feature of soils in arid and deserted regions is that they have almost the same dielectric constant, with only a slight difference in specific attenuation due to low water content. Soils with

1

ЖУРНАЛ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ, ISSN 1684-1719, №7, 2021

possible typical models of changes in the dielectric constant of the soil along the depth are considered.

Key words: georadar, unmanned aerial vehicle, soil of arid regions, search for underground waters, electrophysical characteristics of soil, required potential of georadar.

Введение

Подземные воды – это ценные ископаемые ресурсы, особенно в засушливых районах Земного шара. Монголия – страна Центральной и Восточной Азии, в которой стоит проблема нехватки питьевой воды, особенно в её южных пустынных районах. Масштабные исследования подземных водных ресурсов Монголии проводились периодически в 1960-х, 1970-х, 1980-х, 1996 и самые последние исследования и поиски были проведены в 2011 году. Основываясь на этих исследованиях на территории Монголии известно 207 источников подземных вод. Однако, интенсивное развитие экономики и природопользования требуют проведения современного полномасштабного исследования по определению объема и мощности водных ресурсов, что свидетельствует об актуальности предлагаемой темы [1, 2]. По сведениям ранее проведенных поисково-исследовательских работ были обнаружены подземные водные ресурсы в различных тектонических породах (рис. 1).

Нас особенно интересует поиск подземных водных ресурсов в южных засушливых и пустынных местностях страны, в которых, во-первых, наземные водные ресурсы очень малы, во-вторых, именно из-за структуры почвы, в которых преобладают слабо уплотненные песчаники, пески, рыхлые и плотные конгломераты, угли, алевролиты, аргиллиты и глинистые сланцы, имеющие малое значение удельного затухания для радиоволн.

В районах 3б, 3в и 3г водоносные слои ожидается обнаружить на глубине нескольких метров, что позволит использовать метод подповерхностного радиолокационного зондирования для поиска водоносных горизонтов [3]. Поскольку предстоит обследовать протяженные территории, предполагается установить георадар на беспилотном летательном аппарате (БПЛА).

2

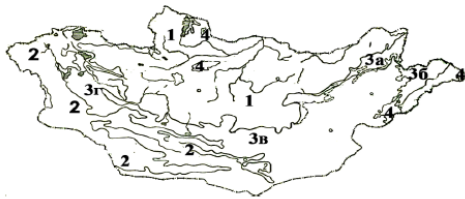


Рис.1. Схема гидрогеологического районирования Монголии. Гидрогеологические районы: 1 – распространения грунтовых вод Хангайско-Хэнтэйской горной области; 2 - распространения грунтовых вод Монгольско-Алтайской и Гоби-Тянь-Шаньской горной области, распространения артезианских вод межгорных котловин с участками развития грунтовых вод на положительных межкотловинных структурах; 3а – Чойбалсанский, 3б – Тамцагский, 3в – Гобийский, 3г – котловины Больших озер; 4 – наложенных структур кайнозойских плато-базальтов.

По данной тематике можно отметить ряд международных научных публикаций [4-7]. В основном эти публикации были, посвящены зондированию ледяных покровов. Ледяные покровы в пределах разрешающей способности локатора можно рассматривать как однородную среду с малым изменением диэлектрической проницаемости, также ледники имеют слоистую структуру из-за многолетних накоплений, но при этом их электрофизические свойства, в том числе диэлектрические свойства, почти постоянны, и близки по значению к сухому почвогрунту. Поэтому можно ожидать, что возможно обнаружение водоносных горизонтов в пустынных и засушливых местах с помощью георадара, установленного на БПЛА

1. Среда распространения зондирующего сигнала

Пласты земли, изобилующие пустотами и служащие для скопления воды, называются водоносными пластами. Смотря по характеру пустот, в которых образуются, собирается и движется подземная вода, гидрогеологические и другие свойства водоносных пластов бывают различны.

Можно различать следующие категории водоносных пластов [8]:

Относительное сильное сопротивление течению грунтовой воды в водоносном пласте отражается также и на форме зеркала грунтовых вод. Под влиянием сопротивления водоносного грунта зеркало грунтовой воды образует довольно правильные поверхности, формы которых подвергаются только очень незначительным изменениям.

В подземных водотоках их водные зеркала ничем не отличаются от зеркал водотоков поверхностных. Необходимо подчеркнуть, что канал А может быть частично или полностью заполнен водотоками.

Учитывая выше сказанное, возможные типичные равновесные модели изменения диэлектрической проницаемости грунта, в котором на определенной глубине находится зеркало грунтовой воды, показанные на рис 3.



Рис. 3. Возможные типичные равновесные модели изменения диэлектрической проницаемости грунта: А – модель грунта с неполным водотоком канала, В – модель грунта с полным водотоком канала, С – модель с грунтовой водой.

На рис. 3 сплошной линией показано возможное изменение диэлектрической проницаемости. Точка 1 принадлежит поверхности Земли и для сухих грунтов различного типа диэлектрическая проницаемость почти всегда одинакова и равна 2 – 3.

Изменение диэлектрической проницаемости с глубиной зависит от типа пород, составляющих грунт, от сезона, температуры и т.п. На рис. 3 показано условное изменение диэлектрической проницаемости с глубиной и в точке 2

1. Пустоты рыхлых обломочных или зернистых пород. Промежутки между отдельными зернами таких пород образуют как бы систему сосудов, и собирающаяся в них вода представляет собой не одно общее сплошное капельно-жидкое тело, а массу отдельных водяных нитей или струй, которые находятся в гидродинамической связи между собой. Пустоты, заключенные в зернистой массе водоносного пласта, называются порами, а образующаяся в такой пористой массе подземная вода называется грунтовой водой.

2. Пустоты в твердых сплошных горных породах представляют собой трещины, провалы и пещеры и служат бассейнами для подводной воды. В таких бассейнах подземная вода представляет собой одно сплошное капельно-жидкое тело, подобное поверхностным водотокам, и называются они подземными водотоками.

Разница между грунтовыми и подземными водотоками иллюстрируется рис. 2. Если все сечение канала А наполнено только водой, и канал этот лежит под землей, то мы имеем подземный водоток. Если сечение канала В наполнено песком, гравием или галькой, в которых движется подземная вода (см. рис.2), то это грунтовая вода.

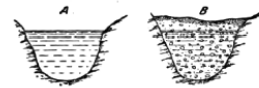


Рис. 2. Схематическое изображение разницы между подземным водотоком и грунтовой водой.

Если вода в обоих каналах находится в движении, то не трудно понять, что гидравлические процессы в потоках А и В различны. В потоке А трение, испытываемое водой при движении, ограничивается только трением воды о стенки каналов, в то время как в потоке В к этим наружным сопротивлениям прибавляются еще сопротивления внутренние, обусловливаемые массой зернистого материала, наполняющего канал и задерживающего движение воды.

находится зеркало грунтовой воды и значение диэлектрической проницаемости составляет примерно 80.

Когда сечение канала В на рис. 2 частично заполнено водой, то между зеркалом водотока и водоупорным твердым грунтом возникает пустота, в которой значение диэлектрической проницаемости близко к 1.

Как было указано выше, значение диэлектрической проницаемости сухих грунтов почти одинаково, поэтому в засушливых районах грунт можно считать однородным почти до уровня воды. Эту ситуацию можно было бы ожидать для большей части промежуточной зоны в грунте после длительного периода без дождя в засушливых районах. При этом профиль содержания влаги, который непосредственно оказывает влияние на значение диэлектрической проницаемости однородной почвы, будет находиться выше уровня воды.

Для песчаной почвы на участке кривой с малой влажностью («сухая область» кривой) можно отметить почти постоянное низкое содержание влаги, связанное с крутым участком кривой, см. рис.3 В. Однако характеристика влажности для почвы, имеющей более высокое содержание глины, может не иметь такой крутой характеристики, и изменяться более плавно, см. рис.3 А, поэтому будет принят сигнал, отраженный только от водоупорного слоя. Протяженный по глубине переходный слой, насыщенный влагой до зеркала воды является согласующим, его диэлектрическая проницаемость плавно меняется и отраженный сигнал будет слабым, например, рис.3 С. Плавные переходы между слоями грунта оказывают согласующее действие, что приводит к уменьшению отражений на границах [9].

Таким образом, наличие достаточно толстого переходного экспоненциального (по изменению диэлектрической проницаемости) слоя приводит к потере информации о внутреннем строении рассматриваемой структуры. Также, наоборот, если существует весьма тонкий переходный слой, отражение радиоволн от рассматриваемой системы должно быть практически таким же, как и при отсутствии переходного слоя.

Рассмотрим влияние влажности на электрофизические характеристики грунта. В [10] приведены результаты измерения электрофизических свойств различного грунта на разных частотах в условиях изменения температуры и влажности. Из этих данных, очевидно, что при изменении влажности от 0 до 30-35% реальная часть комплексной диэлектрической проницаемости грунта почти линейно растет, а мнимая часть меняется слабо, рис.4 и рис.5. Но при дальнейшем увеличении влажности имеется резкий рост значений как реальной, так и мнимой части диэлектрической проницаемости, и особенно для грунта глинистого типа.

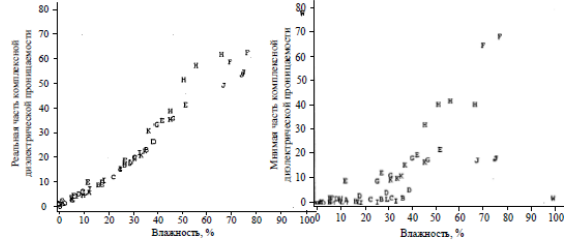


Рис. 4. Зависимость реальной части комплексной диэлектрической проницаемости различных грунтов от влажности при частоте 78МГц и температуре 20°С.

Рис. 5. Зависимость мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости различных грунтов от влажности при частоте 78МГц и температуре 20°С.

*Обозначения буквами на рисунках 4 и 5 соответствуют данным табл. 1

В таблице 1 приведена информация о грунтах, значения комплексной диэлектрической проницаемости которых показаны на рис.4 и 5.

засушливой и пустынной местности для зондирующего сигнала примерно однородным даже, если почва состоит из нескольких слоев. Но, если целью зондирования является подповерхностный водоносный слой, то будет иметь место плавный переходной слой грунта из-за связанных вод, которые будут над водоносным горизонтом.

Анализ энергетических характеристик принимаемого сигнала для различных условий функционирования радиолокатора подповерхностного зондирования является важным этапом проектирования и во многом определяет как выбор параметров георадара, так и значения его характеристик и показателей качества.

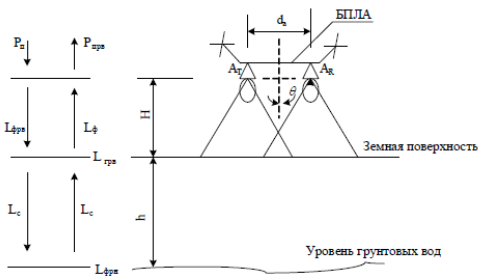


Рис. 6. Геометрическая постановка задачи.

Для расчета энергетических характеристик георадара рассмотрим геометрическую постановку задачи дистанционного зондирования, приведенную на рис. 6 и пусть этот случай соответствует модели А на рис. 3. При этом считаем, что передающая и приемная антенны отстоят друг от друга в горизонтальной плоскости на минимальное расстояние d_a и находятся на высоте H над поверхностью грунта. В качестве «цели» дистанционного зондирования будем рассматривать, расположенную на глубине h относительно

Таблица 1. Описание грунтов (см. рис. 4 и рис. 5).

Обозначение грунта	Тип грунта	Процент по весу		
		Песк а	Ила	Глинны
A	Глина, светло-серый	2	22	76
B	Песок, светло-серый	98	2	0
C	Илистый песок, Бурый	88	8	4
D	Илистый песок, красновато-коричневый	77	9	14
E	Илистая глина, Бурая	-	93	7
F	Глина, серая	1	48	51
G	Глинистый песок, Темно-коричневый	55	32	13
H	Глина, серая	2	64	34
I	Песок, белый	100	0	0
J	Ил, белый	0	46	54
K	Илистая глина, Бурая со следами песка	4	89	17
L	Песок, коричневый	99	1	0

Поэтому считаем, что модели, приведенные на рис. 3, соответствуют действительности и для них проведём расчет энергетического потенциала георадара.

2. Энергетический потенциал, требуемый от георадара

В геолокации, кроме значительного затухания сигнала в грунте, существует проблема априорной неопределённости электрофизических характеристик среды распространения. Но в случае сухого грунта, его диэлектрическая проницаемость почти для всех видов грунта является примерно одинаковой. Это обстоятельство позволяет нам считать грунт

верхней границы грунта: шероховатую границу раздела двух слоев с известными электрофизическими характеристиками.

Радиолокационное уравнение для подповерхностного зондирования учитывает всевозможные потери, которые могут возникать при распространении сигнала в грунте, такие как потери за счет расхождения фронта волны при зондировании с высоты H , потери на границах, потери в среде, потери из-за дефокусировки и т.д.

Применительно к рассматриваемому случаю дистанционного зондирования в диэлектрической среде с потерями уравнение радиолокации может быть записано в следующем виде:

$$P_R = P_T \cdot G_{A1} \cdot g_1 \cdot \bar{L}_{A1} \cdot \frac{\bar{L}_{A1} \bar{L}_{B1} \bar{L}_{A1}}{4\pi R_1^2} \cdot L_R \cdot \bar{L}_{Rg} \cdot \frac{\bar{L}_{R2} \bar{L}_{B2} \bar{L}_{R2}}{4\pi R_2^2} \cdot \frac{\lambda^2 G_{A2}}{4\pi} \cdot g_2 \cdot \bar{L}_{A2} \cdot L_{dR} \quad (1)$$

где P_T и P_R соответственно мощность передатчика и принимаемая мощность; G_{A1}, G_{A2} - коэффициенты направленного действия и передающей антенны, а g_1, g_2 - нормированные диаграммы направленности антенн (ДНА); $\bar{L}_A = \bar{L}_{A1} \cdot \bar{L}_{A2}$ - потери в передающем и приемном антенно-фидерных трактах георадара; $\bar{L}_1 = \bar{L}_{11} \cdot \bar{L}_{12}$ - потери при распространении через слой воздуха; $\bar{L}_2 = \bar{L}_{21} \cdot \bar{L}_{22}$ - потери, связанные с отражением от границы раздела воздух - грунт - воздух и грунт-подземный водоносный отражающий слой; $\bar{L}_4 = \bar{L}_{41} \cdot \bar{L}_{42}$ - потери при распространении электромагнитной волны в грунте; \bar{L}_{Rg} - потери, связанные с отражением зондирующего сигнала от границы водораздела двух слоев при дистанционном зондировании; L_R - выигрыш из-за фокусировки при переходе границы раздела воздух-грунт; L_{dR} - потери из-за дефокусировки при переходе границы раздела грунт-воздух.

Наклонные дальности в первом приближении считаем равными $R_1(\theta, \varphi) \approx R_2(\theta, \varphi) \approx H$.

Потенциалом георадара принято называть

$$p[\text{дБ}] = 10 \lg \left(\frac{P_T}{P_{T_{\text{мин}}}} \right) = L_A + L_I + L_B + L_n - L_R + L_{\text{эф}} + L_{Tz}. \quad (2)$$

Если уравнение радиолокации представить в логарифмической форме, то просуммарные потери в канале дистанционного зондирования выражаются в децибелах (дБ) [11, 12]:

- потери в антенно-фидерном тракте георадара

$$L_A = L_{A1} + L_{A2}, \quad (3)$$

- потери распространения

$$L_I = 10 \lg \left(\frac{(4\pi)^3 \cdot R_T^2 R_G^2}{G_{A1} \cdot \lambda^2 \cdot G_{A2} \cdot g_1 g_2} \right) \approx 10 \lg \left(\frac{(4\pi)^3 \cdot H^4}{G_{A1} \cdot \lambda^2 \cdot G_{A2} \cdot g_1 g_2} \right), \quad (4)$$

- потери, связанные с отражением от границы раздела воздух-грунт-воздух (Вз-Гр) и грунт-подземный водоносный отражающий слой (Гр-Ос):

$$L_{B1} = -20 \lg R_{Bz-Gp}, \quad (5)$$

$$L_{B2} = -20 \lg R_{Gp-Oc} - 20 \lg |1 - R_{Bz-Gp}^2|, \quad (6)$$

где R_{Bz-Gp} - коэффициент отражения воздух-грунт; R_{Gp-Oc} - коэффициент отражения грунт-подземный отражающий слой; L_n - потери из-за затухания электромагнитной волны при распространении в среде с потерями на расстоянии h

$$L_n = 10 \lg \left(8.686 \cdot h \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{\epsilon'(h)}{2} (\sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta} - 1)} \right) \quad (7)$$

где ϵ' - вещественная часть диэлектрической проницаемости грунта, $\text{tg} \delta$ - тангенс угла диэлектрических потерь грунта,

L_R - выигрыш из-за фокусировки при переходе границы раздела воздух-грунт

$$L_R = 20 \lg \left(\frac{H+h}{H+h/\text{Re}\sqrt{\epsilon}} \right) \quad (8)$$

служить более твердые породы или даже скалистый слой, в котором существует подземный водоток и вода находится в движении. Расчет требуемого потенциала для данной модели среды представлен на рис. 6а и рис. 6б.

В переходном слое происходит рост диэлектрической проницаемости и скорость или крутизна этого роста сильнее всего сказывается в случае, когда в грунте содержится песок, поэтому за счет этого явления требуемый потенциал резко возрастает при достижении поверхности вод.

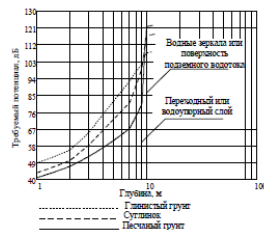


Рис. 6а. Требуемый от георадара потенциал для обнаружения водоносного слоя на разделе двух сред при толщине согласующего слоя $h = 0,3\text{м}$ на частоте 75 МГц. При этом считаем, что влажность в согласующем слое резко растет от 30 до 80-90 процентов и соответственно, комплексная диэлектрическая проницаемость растет (см.рис. 4).

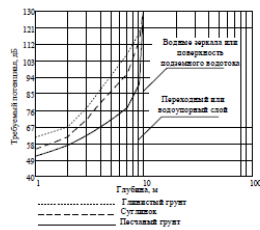


Рис. 6б. Требуемый от георадара потенциал для обнаружения водоносного слоя на разделе двух сред при толщине согласующего слоя $h = 0,3\text{м}$ на частоте 200 МГц. При этом считаем, что влажность в согласующем слое резко растет от 30 до 80-90 процентов и соответственно, комплексная диэлектрическая проницаемость растет. (см.рис. 4).

Рассмотрим модель В грунта на рис. 3, где промежуточным слоем является, воздушный зазор между водоупорным твердым (скальным) грунтом и поверхностью подземного водотока, см. рис.7. В этом случае часть сигнала, которая проникает (точка 1) в грунт, частично отражается от границы «грунт-

$L_{\text{эф}}$ - потери из-за дефокусировки при переходе границы раздела грунт-воздух

$$L_{\text{эф}} = 20 \lg \left(\frac{H+h}{h+H \cdot \text{Re}\sqrt{\epsilon}} \right) \quad (9)$$

Поскольку целью георадара является подземный отражающий слой - поверхность подземного водотока, то потери, связанные с отражением зондирующего сигнала учитываются потерями на границах.

Разработанные методики и программное обеспечение позволяют рассчитывать базовые энергетические характеристики георадара подповерхностного зондирования: мощность на входе приемника сигнала, отраженного от подповерхностных аномалий, энергетический потенциал и отношение сигнал-шум, мощность сигнала от верхней границы грунта и т.п. На основе этих характеристик рассчитывается максимальная глубина зондирования, которая может быть представлена, как функция различных переменных (энергетического потенциала радара, затухания в грунте, электрофизических характеристик грунта и т.д.).

Рассмотрим пример расчета потенциала георадара по обнаружению водоносных слоев для трех моделей, приведенных на рис.3.

Хорошо известно, что глубина зондирования радиолокационного сигнала увеличивается с уменьшением его несущей частоты, но с другой стороны, разрешающая способность по глубине зависит от ширины спектра сигнала и, кроме этого, с уменьшением частоты размер антенны увеличивается. Это нежелательно, поскольку георадар находится на борту БПЛА. Для расчетов выбираем широкополосный зондирующий сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) при двух возможных значениях:

- 1) $f_0 = 75\text{МГц}$, $\Delta f_c = 60\text{МГц}$;
- 2) $f_0 = 200\text{МГц}$, $\Delta f_c = 160\text{МГц}$.

Для модели А на рис.3, до согласующего переходного слоя даже слоистый грунт можно считать однородным, потому что диэлектрические проницаемости слоёв близки по значению. Переходным или водоупорным слоем могут

воздушный зазор» и распространяется к поверхности (точка 2), другая часть сигнала распространяется ниже до поверхности подземного водотока и отражается от нее. При распространении вверх эта часть отраженного от поверхности подземного водотока сигнала отражается от границ слоев и выходит наружу (в точке 3). Таким образом, для этой модели получается многократное отражение и для расчета потерь, на границах слоев эти отражения необходимо учитывать. Пунктирной линией на рис.7 показаны сигналы вторичного отражения.

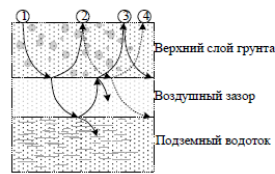


Рис. 7. Пути распространения сигнала в многослойном грунте.

Коэффициент отражения такой среды может быть записан следующим образом [12]:

$$\dot{R} = \frac{\dot{R}_{Bz-G} + \dot{R}_3 \exp(-2\gamma_2 h_2)}{1 + \dot{R}_{Bz-G} \cdot \dot{R}_3 \exp(-2\gamma_2 h_2)}, \quad (9)$$

где $\dot{R}_3 = \frac{\dot{R}_{G-B} + \dot{R}_{Bz-Вода} \exp(-2\gamma_3 h_3)}{1 + \dot{R}_{G-B} \cdot \dot{R}_{Bz-Вода} \exp(-2\gamma_3 h_3)}$, γ - постоянная распространения, h_2 - толщина грунта, h_3 - толщина воздушного зазора.

Кроме того, в данном случае целью георадарного поиска будет не граница раздела слоев, а поверхность подземного водотока. На рис. 8 глубина состоит из толщины слоя грунта и толщины воздушного зазора. Слой грунта состоит из начального песчаного грунта и водоупорного скального грунта, имеющего близкие электрофизические характеристики.

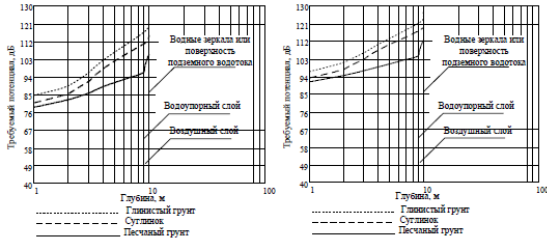


Рис. 8а. Требуемый от георадара потенциал для обнаружения водоносного слоя на раздле двух сред при толщине воздушного слоя $h = 1.0\text{м}$ на частоте 75 МГц/

Рис. 8б. Требуемый от георадара потенциал для обнаружения водоносного слоя на раздле двух сред при толщине воздушного слоя $h = 1.0\text{м}$ на частоте 200 МГц/

На требуемый потенциал георадара значительное влияние оказывает толщина и электрофизические параметры согласующего слоя с повышенным содержанием связанных и свободных вод. Очевидно, что с ростом толщины согласующего слоя требуемый потенциал растет, но при уменьшении согласующего слоя влияют, главным образом, потери в верхнем слое.

Рассмотрим третий случай, модель С грунта на рис. 3, когда не существует водоупорного грунта, а подземна вода находится в виде пористой грунтовой массы называемой грунтовой водой. При этом считаем, что диэлектрическая проницаемость грунта растет линейно за счет капиллярных вод и тогда весь слой является согласующим и от георадара требуется существенно больший потенциал.

В реальности раздел между средой грунта и водой может быть не плоским, а шероховатым, тогда эффективная площадь рассеяния зависит от степени шероховатости. Пока неровности не слишком велики, как и для гладкой поверхности, волна формируется областью, приблизительно соответствующей первой зоне Френеля. Для нормального закона распределения ординат

раздела с водоносным слоем будет присутствовать, то это также повлияет на потенциал георадара.

Так как антенны, применяемые при подповерхностном зондировании, характеризуются низкой направленностью, то при зондировании поверхности с повышенной шероховатостью в метровом диапазоне возможны интенсивные паразитные отражения от поверхности, превышающей первую зону Френеля, рис. 10. Отражения от элементов шероховатого рельефа маскируют более слабые отражения от подповерхностных слоев. Разрешающая способность георадара по продольным координатам определяется шириной луча, который в свою очередь зависит от эффективной площади антенны, определяемой ее апертурой. Возможность увеличения апертуры увеличением геометрических размеров антенны для георадаров на БПЛА сильно ограничены, поэтому применяются методы синтеза апертуры, основанные на обработке отраженных сигналов, полученных при движении носителя радара над поверхностью вдоль трассы зондирования, рис. 10.

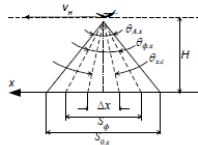


Рис. 10. Геометрия задачи синтеза апертуры антенны вдоль координаты x при зондировании в надир.

На рис.10 показаны три характерных зоны на земной поверхности: $S_{0,x}$ – пятно облучения, определяемое шириной диаграммы $\theta_{A,x}$, формируемой антенной радара; S_F – зона Френеля, от которой в основном принимаются отраженные сигналы, диаметр зоны Френеля $S_F = \sqrt{\lambda \cdot H}$; Δx – собственно элемент разрешения по координате x , формируемый синтезированной диаграммой антенны $\theta_{c,x}$. Конечно, под поверхностью все эти диаграммы

неровностей поверхности среднееквадратическое значение коэффициента отражения при угле падения θ определяется формулой [13]:

$$\overline{R_s^2}(\theta) = R(\theta) \cdot \exp\left(-2 \cdot \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \sigma_h \cdot \cos\theta\right)^2\right), \quad (10)$$

где $R(\theta)$ – модуль коэффициента отражения Френеля для гладкой поверхности, σ_h – среднееквадратическое значение ординат неровностей.

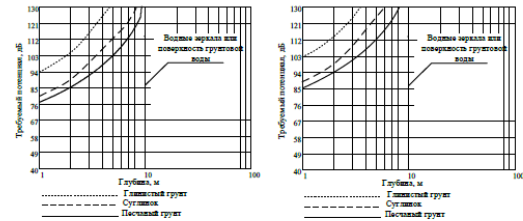


Рис. 9а. Требуемый от георадара потенциал для обнаружения уровня грунтовой воды на частоте 75 МГц

Рис. 9б. Требуемый от георадара потенциал для обнаружения уровня грунтовой воды частоте 200 МГц

Граница между областями применения закономерностей для гладких и шероховатых поверхностей определяется критерием Релея. Допустимые среднееквадратичные ординаты неровностей граничного слоя поверхности должна отвечать условию

$$\sigma_{hmax} \leq \lambda_c / 16 \cos\theta, \quad (11)$$

где длина волны в грунте зависит от его электрофизических характеристик и рассчитывается по формуле $\lambda_c = \lambda / \text{Re}\sqrt{\epsilon}$. При этом высота неровностей, с которой границу раздела можно считать шероховатой, должна быть больше 0,14м и 0,05м например, для сухой песчаной почвы и для частот 75МГц и 200МГц, соответственно. Если шероховатость такого порядка на границе

несколько искажаются из-за эффектов фокусировки и расфокусировки в подповерхностных слоях, однако, в первом приближении этими эффектами можно пренебречь.

Для организации георадара на борту БПЛА хорошо подходит алгоритм доплеровской фильтрации отраженных сигналов [14]. Влияние паразитных отражений от рельефа можно уменьшить фильтрацией нулевых доплеровских частот. Принцип сужения диаграммы ясен из рис. 11.



Рис. 11. Геометрия задачи синтеза узкой диаграммы направленности антенны по координатам x, y .

Задача может быть упрощена, если выполнять съемку и обработку сигналов отдельно по координатам x и y . При этом обследование территории производится в два этапа по оси x , затем по оси y . Трассы обследования по x должны выбираться так, чтобы элементы разрешения (заштрихованная область) соприкасались по элементам Δy , соответственно трассы обследования по y выбирается так, чтобы элементы разрешения по x соприкасались. Для успешной работы трассы обследования должны привязываться к координатам поверхности и контролироваться. Для этого существует современные достаточно точные системы местоопределения.

На рис. 12 показаны график изменения доплеровской частоты по одной координате и частотная характеристика фильтра нулевой доплеровской частоты.

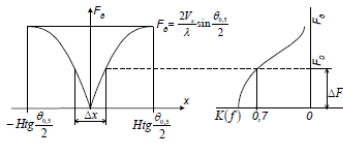


Рис. 12. График изменения F_0 и полоса доплеровского фильтра.

Фильтрация несущей принимаемых сигналов, осуществляемая доплеровским фильтром с полосой пропускания $\Delta F \approx F_0$, ограничивает область приема сигналов, отраженных поверхностью зондируемой среды вдоль оси x , участков Δx . Это эквивалентно сужению диаграммы направленности используемой антенной системы в плоскости ZOX до значения

$$\theta_{\phi} = 2 \arctg \frac{\Delta x}{2H} \approx \Delta x \cdot H, \quad (12)$$

где H – высота зондирования. В частности, если Δx выбирается равным диаметру первой зоны Френеля $\Delta x = \sqrt{H\lambda_0}$, то $F_0 = V_x / \sqrt{\lambda_0 H}$. Разрешение Δx_n по нижней границе слоя (считая верхней границей поверхности) изменяется на некоторую величину $\delta \Delta x = \Delta x_n / \Delta x$, которая зависит от ϵ грунта и от отношения h/H .

Заключение

В данной работе рассчитан требуемый энергетический потенциал георадара для поиска водоносных слоев в засушливых районах с борта БПЛА. В этих районах характерны сухие грунты, а водоносный горизонт и грунт разделяется в основном слоем влажной глины и базальта. В статье рассмотрены три типичные модели водоносных слоев в грунте и для них проведены расчеты требуемого потенциала георадара для поиска грунтовых вод. Для селекции отражений от элементов шероховатого рельефа маскирующих более слабые отражения от подповерхностных слоев предлагается применение алгоритма

7. Bauder A., Mazzotti G., Berger C., Langhammer L., Griessinger N., Jonas T. Winter Accumulation Measurements on Alpine Glaciers using Ground Penetrating Radar. *17-th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*. 18-21 June 2018. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2018.8441559>
8. Всеволожский В.А. *Основы гидрогеологии*. Москва, Издательство МГУ. 2007. 448 с.
9. Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М., Шульгина Е.М. О возможности определения характеристик поверхностного слоя почвы по его тепловому радионизлучению. *Доклады АН СССР*. 1970. Т.94. №6. С.1313–1315.
10. Curtis J.O., Weiss C.A., Everett J. B. Effect of Soil Composition on Complex Dielectric Properties. *US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station*. 1995. Technical Report EL-95-34.
11. Daniels D.J. *Ground Penetrating Radar*. The Institution of Engineering and Technology. 2004. 752 p.
12. Финкельштейн М.И., Карпунин В.И., Кутев В.А., Метелкин В.Н. *Подповерхностная радиолокация*. Москва, Радио и связь. 1994. 216 с.
13. Финкельштейн М.И., Мендельсон В.Л., Кутев В.А. *Радиолокация слоистых земных покровов*. Москва, Советское радио. 1977. 216 с.
14. Финкельштейн М.И., Кутев В.А., Золотарев В.П. *Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии*. Москва, Недра. 1986. 128 с.

Для цитирования:

Баскаков А.Н., Ожурин Б., Комаров А.А., Тувдендорж Г. Энергетические характеристики георадара на беспилотном носителе для поиска водоносного слоя в засушливых районах. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2021. №.7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.7.10>

доплеровской фильтрации отраженных сигналов, полученных при движении БПЛА с георадаром над поверхностью земли вдоль трассы зондирования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Министерством культуры, образования, науки и спорта Монголии в рамках научного проекта № 19-57-44001.

Литература

1. Цыренова Т.Б. Политико-правовые аспекты охраны водных ресурсов в Монголии. *Власть*. 2010. №12. С.169-172.
2. Цыренова Т.Б. О системе управления водными ресурсами в Монголии. *Власть*. 2011. №7. С.97-100.
3. Маринов Н.А., Попов В.Н. *Гидрогеология Монгольской народной республики*. Москва, Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы. 1963. 431 с.
4. Church G.J., Bauder A., Grab M., Hellmann S., Maurer H. High-resolution helicopter-borne ground penetrating radar survey to determine glacier base topography and the outlook of a proglacial lake. *17-th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*. 18-21 June 2018. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2018.8441598>
5. Grab M., Bauder A., Ammann F., Langhammer L., Hellmann S., Church G.J., Schmid L., Rabenstein L., Maurer H.R. Ice volume estimates of Swiss glaciers using helicopter-borne GPR — an example from the Glacier de la Plaine Morte. *17-th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*. 18-21 June 2018. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2018.8441613>
6. Langhammer L., Rabenstein L., Bauder A., Schmid L., Grab M., Schaefer P., Maurer H.R. Development of a novel dual-polarization helicopter-borne GPR system. *17-th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*. 18-21 June 2018. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2018.8441574>

Influence of a Priori Uncertainty of Dielectric Permittivity and Electromagnetic Model of Soil Structure on Measurement Errors in Ground Penetrating Radar

Publisher: IEEE

Cite This

PDF

Alexander Baskakov ; Aleksey Komarov ; Galbaatar Tuvdendorj ; Bukhtsooj Odsuren [All Authors](#)

1

Paper
Citation

52

Full
Text Views



Abstract
Document Sections
1. Introduction
2. Electromagnetic Models of Changes in Soil Structure in Depth
3. Conclusion
Authors
Figures
References
Citations

Abstract:
In recent years, ground penetrating radar (GPR) has become an important tool for remote sensing of the earth's covers. It is known that a priori uncertainty in the electrophysical characteristics of the soil can lead to errors in determining the depth of objects during sounding. The vertical and spatial inhomogeneity of the dielectric permittivity of the soil ϵ , as well as its frequency, seasonal and geographic dependence, lead to great difficulties in solving the GPR problem. The purpose of this work: to show the significant influence of the prior uncertainty of the dielectric permittivity and the electromagnetic model of the soil structure, i.e. vertical distribution ϵ in depth for the error in determining the depth of objects in the ground. In a real environment, the value of the profile distribution of ϵ is influenced not only by the composition of the substance, but also by climatic conditions, soil heterogeneity, etc.

Published in: 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS

Date of Conference: 11-16 July 2021 **DOI:** 10.1109/IGARSS47720.2021.9554443

Date Added to IEEE Xplore: 12 October 2021 **Publisher:** IEEE

► ISBN Information: **Conference Location:** Brussels, Belgium

INFLUENCE OF A PRIORI UNCERTAINTY OF DIELECTRIC PERMITTIVITY AND ELECTROMAGNETIC MODEL OF SOIL STRUCTURE ON MEASUREMENT ERRORS IN GROUND PENETRATING RADAR

Alexander Baskakov¹, Aleksey Komarov¹,
Galbaatar Tuvdendorj², Bukhtsooj Odsuren²

1. Department of Radio Engineering
Devices and Antenna Systems, National
Research University "Moscow Power
Engineering Institute", Moscow, 111250,
Russian Federation
2. Advanced Technology Laboratory,
Institute of Physics and Technology,
Ulaanbaatar, 210651, Mongolia

ABSTRACT

In recent years, ground penetrating radar (GPR) has become an important tool for remote sensing of the earth's covers. It is known that a priori uncertainty in the electrophysical characteristics of the soil can lead to errors in determining the depth of objects during sounding. The vertical and spatial inhomogeneity of the dielectric permittivity of the soil ϵ , as well as its frequency, seasonal and geographic dependence, lead to great difficulties in solving the GPR problem. The purpose of this work: to show the significant influence of the prior uncertainty of the dielectric permittivity and the electromagnetic model of the soil structure, i.e. vertical distribution ϵ in depth for the error in determining the depth of objects in the ground. In a real environment, the value of the profile distribution of ϵ is influenced not only by the composition of the substance, but also by climatic conditions, soil heterogeneity, etc.

Index Terms— Ground Penetrating Radar, Soil Structure, Electrophysical Characteristics, Remote Sensing

1. INTRODUCTION

The depth of sounding of the GPR is limited and this is due to the electrical conductivity and dielectric permittivity of materials, the central operating frequency, dispersion distortions due to the frequency dependence of the propagation velocity and the power of the radar. With an increase in the conductivity of materials, the penetration depth decreases, this is due to the rapid dissipation of electromagnetic energy in conductive materials, this energy is converted into heat, which heats the soil, as a result of which the received signal power decreases.

One of the key factors affecting the depth of sounding is the heterogeneity and layering of the soil. Inhomogeneities caused by different dielectric constants of soils lead to strong signal scattering and, as a consequence, to a high level of interference at the receiving antenna.

In the radiofrequency range, all types of earth covers are dielectrics, therefore, in GPR, the soil is considered as a dielectric with a complex dielectric permittivity ϵ [1]. Earth's soil is a multicomponent medium with a dielectric constant that depends on its structure. To solve the problem of detecting subsurface objects and various layers in the soil, it is necessary to take into account the vertical distribution ϵ of the electromagnetic soil model [2].

Currently, the GPR uses ultra-wideband (UWB) short video pulses or signals of complex shape with frequency modulation. Polyphase signals with a zero autocorrelation zone based on p-pairs D-code are promising for use in GPR [3]. The use of continuous UWB signals with chirp (linear frequency modulation) in GPR for relatively shallow sounding up to 3 ... 4 m provides a simpler formation (with no need for a powerful transmitter) and a correlation-filter method for optimal signal processing (subject to side-lobe correction of an autocorrelation function).

In this work, the required potential of a GPR versus depth was calculated for various soils and objects in the ground (in order to determine the level of groundwater, search for underground structures and communications, study railway and automobile road surfaces, etc.) using a continuous sounding chirp signal $f_1 = 300$ MHz, $f_2 = 900$ MHz, width spectrum $\Delta f = 600$ MHz, modulation frequency $F = 1$ kHz. GPR is located directly near the Earth's surface. As a result of the calculation, it is shown that with a small thickness of the upper soil layer, the potential of the GPR depends mainly on the dielectric permittivity of the soil and the EPC of the probed object and its radar cross-section, and with increasing depth, the potential required from the GPR is determined by the signal attenuation in the soil.

To calculate the maximum depth of the GPR, the following equation was used, taking into account all losses during signal propagation [4]

$$P_{AOS} = P_{Tx} \frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 (h^2 + (d_0/2)^2)^2} \eta_{Loss}, \quad (1)$$

where P_{AOS} is a minimum detectable signal strength, P_{Tx} is a transmitter power, G is the antenna gain of identical TX-RX antennas, d_0 is the distance between two antennas, h is the desired depth from the ground, η_{Loss} is the loss coefficient taking into account losses in the antenna-feeder path, atmosphere, at the boundaries of the layer, in the ground and radar cross-section of the object, respectively.

Assuming that the GPR antennas are located almost on the surface, the required energy potential is from 40 to 110 dB, depending on the type of soil. To detect objects at depths of up to 3 meters, the GPR must emit a signal with

a power of about 30 dBm. However, for wet clay, such an energy potential will allow detecting objects at a depth of 0.3 to 0.5 m.

2. ELECTROMAGNETIC MODELS OF CHANGES IN SOIL STRUCTURE IN DEPTH

In the chirp GPR, the depth of the object or the thickness of the layer is determined by the method of spectral analysis. The beat frequency F_{beat} , according to which the depth of the object or the thickness of the layer, depends on the vertical distribution of dielectric permittivity ϵ , i.e. electromagnetic model of the soil structure. In Fig. 1 the most frequently encountered and used soil models are given.

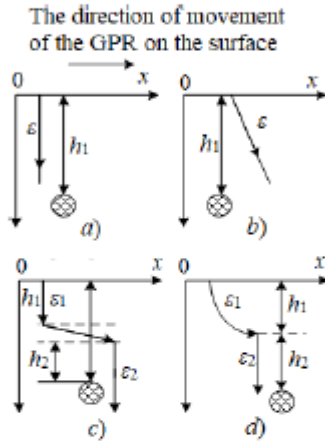


Figure 1: Some possible options for the dependence of the permittivity of the soil with depth: a) constant, b) linear, c) stepwise, d) exponential

If the model of the soil is medium with constant permittivity (Fig. 1a), i.e. homogeneous medium, then the beat frequency

$$F_{beat} = \frac{4\Delta f F}{c} h \operatorname{Re}(\sqrt{\epsilon}). \quad (2)$$

For a soil model as a medium with a permittivity varying linearly with depth (Fig. 1b), the beat frequency

$$F_{beat} = \frac{4\Delta f F}{c} h \operatorname{Re}(\sqrt{(\alpha h + \beta)^m}), \quad (3)$$

where α and β can be both real and complex quantities; α determines the rate of change, β is the initial value at $h = 0$. At $m = 1$, the model becomes linear $\epsilon(h) = \alpha h + \beta = \epsilon'(h) + j\epsilon''(h)$ (Fig. 1b).

If the dielectric permittivity of the soil is described by piecewise function (Fig. 1c), then there will be reflection from both the layer and the object

$$F_{beat1} = \frac{4\Delta f F}{c} h_1 \operatorname{Re}(\sqrt{\epsilon_1}),$$

$$F_{beat2} = \frac{4\Delta f F}{c} [h_1 \operatorname{Re}(\sqrt{\epsilon_1}) + h_2 \operatorname{Re}(\sqrt{\epsilon_2})]. \quad (4)$$

For many media, the law of change in dielectric permittivity with depth in many cases is approximated by the equation $\epsilon(h) = \beta e^{-2\alpha h}$ (exponential model of change in soil DP, Fig. 1d)

$$F_{beat1} = \frac{4\Delta f F}{c} h_1 \operatorname{Re}(\sqrt{\beta e^{-2\alpha h}}),$$

$$F_{beat2} = \frac{4\Delta f F}{c} [h_1 \operatorname{Re}(\sqrt{\beta e^{-2\alpha h}}) + h_2 \operatorname{Re}(\sqrt{\epsilon_2})]. \quad (5)$$

The difficulty lies in the a priori unknown of the electromagnetic model of the soil and its electrophysical characteristics. The value of dielectric permittivity ϵ at a given measurement frequency is influenced by a fairly large number of parameters, such as moisture, temperature, dispersion, salinity, mineralogical composition and density of the soil, as well as seasonal and daily variability. In [4] it is shown that in the frequency range from 300 to 900 MHz for different soils, the dispersion of the dielectric permittivity is almost not observed.

Due to the indicated a priori unknown of the soil characteristics, when measuring the depth of the object, an error occurs and the reconstruction of the profile of the layered medium can be carried out with an error. What will be the error in determining the depth, it is easy to show with an example. We take the sand, as an example of calculation, which has $\epsilon_{true} = 5 - j0.075$, $W = 4\%$ (true meaning); $\epsilon_{chosen} = 10.7 - j0.3$, $W = 12\%$ (the value chosen due to the a priori unknown), W is the humidity in%:

$$F_{beat1} = \frac{4\Delta f F}{c} H_a + \frac{4\Delta f F}{c} h_1 \operatorname{Re}(\sqrt{\epsilon_{true}}),$$

$$F_{beat2} = \frac{4\Delta f F}{c} H_a + \frac{4\Delta f F}{c} h_2 \operatorname{Re}(\sqrt{\epsilon_{chosen}})$$

where H_a is the height from the antenna to the ground:

The spectra of reflected signals from the lower boundaries of the soil and without taking into account the attenuation in the soil at $h_1 = h_2 = 1$ m (for clarity) are shown in Fig. 2.

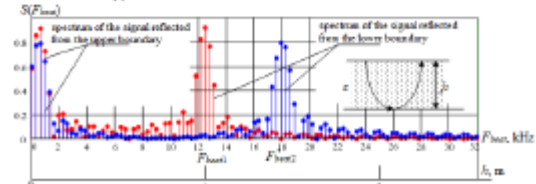


Figure 2: Spectra of signals reflected from the lower boundaries of the layer with different ϵ

In this case, a significant error in depth once again confirms the idea that a priori data on the electrophysical characteristics of the soil are needed to improve the

operation of the GPR. The use of a priori information about the environment allows to reduce the error in determining the depth coordinate in multilayer environments. There is no rigorous solution for the electrophysical characteristics of the soil, but if we determine the electrophysical characteristics using radiophysical methods with a certain permissible error, then it becomes possible to improve the results of measuring the depth of objects and the thickness of layers.

Taking into account the almost complete absence of reflections when the thickness of the transition layer exceeds half the wavelength and setting Δh about the order ΔR , we find the value of the permissible error by reconstruction dielectric permittivity ϵ (see Table 1, where Δh and $\Delta \epsilon$ are calculated for a homogeneous electromagnetic model).

Parameter	0.8ϵ	True Value of ϵ	1.2ϵ
$\epsilon_1 = \Delta\epsilon_1$	$4 - j0.06$ $\text{Re}\sqrt{\epsilon} = 1.9$	$5 - j0.075$, $\overline{W}=4\%$, $\Delta\epsilon_1 = 0$, $\text{Re}\sqrt{\epsilon} = 2.2$	$6 - j0.09$ $\text{Re}\sqrt{\epsilon} = 2.4$
$h = \Delta h$	1.118 m	1 m, $\Delta h = 0$	0.913 m
$\epsilon_2 = \Delta\epsilon_2$	$4.1 - j0.31$ $\text{Re}\sqrt{\epsilon} = 2$	$5.1 - j0.39$, $\overline{W}=10\%$ $\Delta\epsilon_2 = 0$, $\text{Re}\sqrt{\epsilon} = 2.3$	$6.1 - j0.468$ $\text{Re}\sqrt{\epsilon} = 2.5$
$h = \Delta h$	1.104 m	1 m, $\Delta h = 0$	0.904 m
$\epsilon_3 = \Delta\epsilon_3$	$6 - j1.918$ $\text{Re}\sqrt{\epsilon} = 2.5$	$7.5 - j2.39$, $\overline{W}=8\%$ $\Delta\epsilon_3 = 0$, $\text{Re}\sqrt{\epsilon} = 2.8$	$9 - j2.878$ $\text{Re}\sqrt{\epsilon} = 3$
$h = \Delta h$	1.118 m	1 m, $\Delta h = 0$	0.913 m
$\epsilon_4 = \Delta\epsilon_4$	$8.56 - j0.24$ $\text{Re}\sqrt{\epsilon} = 2.9$	$10.7 - j0.3$, $\overline{W}=12\%$ $\Delta\epsilon_4 = 0$, $\text{Re}\sqrt{\epsilon} = 3.3$	$12.8 - j0.36$ $\text{Re}\sqrt{\epsilon} = 3.5$
$h = \Delta h$	1.108 m	1 m, $\Delta h = 0$	0.91 m

Table 1: Dependence of the error in determining the depth of the object on the change in the values of the complex dielectric permittivity

The true value of ϵ for each soil type corresponds to column 2, and in columns 1, 3 are the monotonically varied relative to the true values ϵ ; ϵ_1 is sand $\overline{W} = 4\%$, ϵ_2 is loam $\overline{W} = 10\%$, ϵ_3 is clay $\overline{W} = 8\%$, ϵ_4 is sand $\overline{W} = 12\%$

Table 1 shows that when the value of the real part ϵ changes by $\pm 20\%$, the error Δh in determining the thickness of the soil layer does not exceed the permissible value, i.e. 8 ... 11 cm, while the imaginary part ϵ insignificantly affects the speed of propagation of an electromagnetic wave in soils $c/\text{Re}(\sqrt{\epsilon})$.

3. CONCLUSION

It is known that the radio-thermal radiation of the soil depends on the electromagnetic state and the EPC of soils. Therefore, in the next report [5], it is proposed to combine the active chirp GPR with a radiometer to increase the

information content and accuracy of the measurement results during the operation of the GPR.

The depth tolerance Δh can be set based on the signal resolution in the ground ΔR . A functional diagram of a GPR with a chirp signal operating in the frequency range from 300 to 900 MHz was developed and its element base was selected, and a broadband "bow-tie" antenna for a chirp GPR was implemented on the basis of the self-complement principle [6]. Moreover, ΔR in soils is 8 ... 11 cm.

The required estimation accuracy in determining the layer thickness or the depth of the objects may vary depending on the task and the type of objects being detected. The integration of a chirp GPR with a radiometer will increase the information content and accuracy of the measurement results

4. ACKNOWLEDGMENT

The reported study was funded by RFBR and MCESSM according to the research project № 19-57-44001 and by MSTF according to the research project ShuGH/OHU/-2019/22.

5. REFERENCES

- [1] Persico, R., *Introduction to Ground Penetrating Radar: Inverse Scattering and Data Processing*, Wiley-IEEE Press, 2014
- [2] Z. Huang and J. Zhang, "Determination of Parameters of Subsurface Layers Using GPR Spectral Inversion Method," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 52, no. 12, pp. 7527-7533, Dec. 2014, doi: 10.1109/TGRS.2014.2313603.
- [3] Ipanov, R. N. "Polyphase radar signals with ZACZ based on p-pairs D-code sequences and their compression algorithm," *Infocommunications Journal* 11.3 (2019): 21-27.
- [4] *Ground Penetrating Radar (Radar, Sonar and Navigation)* 2nd Edition. by David J. Daniels (Editor), IEE, 2004, 752 pages
- [5] A.I. Baskakov *et al.*, "Integration of a GPR with a radiometer to increase information content and accuracy in subsurface sounding," *IGARSS 2021 - 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Brussels, Belgium, 2021
- [6] Y. Nishioka, O. Maeshima, T. Uno and S. Adachi, "FDTD analysis of resistor-loaded bow-tie antennas covered with ferrite-coated conducting cavity for subsurface radar," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 47, no. 6, pp. 970-977, June 1999, doi: 10.1109/8.777119.

Integration of a Ground Penetrating Radar with a Radiometer to Increase Information Content and Accuracy in Subsurface Sounding

Publisher: IEEE

Cite This

PDF

Alexander Baskakov ; Aleksey Komarov ; Bukhtsooj Odsuren ; Galbaatar Tuvdendorj [All Authors](#)

1
Paper
Citation

46
Full
Text Views



Abstract

Document Sections

1. Introduction
2. Method for Determining the Structure of an Electromagnetic Soil Model to Clarify the Depth of Objects
3. Conclusion

Abstract:
The relationship between the radio brightness temperature and the electrophysical characteristics of the soil is known, which implies the possibility of solving inverse problems, namely: determining the electrophysical characteristics of the soil and its state by the measured parameters of its radio-thermal radiation [1]. The comparison of L-band radiometer and off-ground ultra-wideband ground penetrating radar (GPR) to map surface soil moisture at the field scale over bare soil was firstly performed in [2], [3]. In this work, the integration of an active chirp GPR with a radiometer is proposed, i.e. combining various sensors into a single complex, which has higher characteristics in terms of accuracy, information content and reliability in comparison with individual instruments.

Published in: 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS

Authors

Figures

References

Citations

Date of Conference: 11-16 July 2021

INSPEC Accession Number: 21227390

Date Added to IEEE Xplore: 12 October 2021

DOI: 10.1109/IGARSS47720.2021.9554043

► ISBN Information:

Publisher: IEEE

► ISSN Information:

Conference Location: Brussels, Belgium

INTEGRATION OF A GROUND PENETRATING RADAR WITH A RADIOMETER TO INCREASE INFORMATION CONTENT AND ACCURACY IN SUBSURFACE SOUNDING

Alexander Baskakov¹, Aleksey Komarov¹, Bukhtsooj Odsuren², Galbaatar Tuvdendorj²

1. Department of Radio Engineering Devices and Antenna Systems, Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250, Russian Federation
 2. Advanced Technology Laboratory, Institute of Physics and Technology, Ulaanbaatar, Mongolia
- ABSTRACT**

The relationship between the radio brightness temperature and the electrophysical characteristics of the soil is known, which implies the possibility of solving inverse problems, namely: determining the electrophysical characteristics of the soil and its state by the measured parameters of its radio-thermal radiation [1]. The comparison of L-band radiometer and off-ground ultra-wideband ground penetrating radar (GPR) to map surface soil moisture at the field scale over bare soil was firstly performed in [2, 3].

In this work, the integration of an active chirp GPR with a radiometer is proposed, i.e. combining various sensors into a single complex, which has higher characteristics in terms of accuracy, information content and reliability in comparison with individual instruments.

Index Terms— Ground Penetrating Radar, Soil Structure, Electrophysical Characteristics, Remote Sensing, Radiometer

1. INTRODUCTION

In [4] it is shown that a strict solution to the problem of remotely determining the electrophysical characteristics of the soil is possible only when specifying a soil model configuration [5]–[7].

However, if using radiometry to estimate the values of the real part of ϵ by at least $\pm 20\%$, then the error Δh in determining the thickness of the soil layer to the object will not exceed the resolution of the probing signal in the ground ΔR . In this case, an increase in information content consists, for example, in determining the moisture content of the soil and clarifying its dielectric permittivity ϵ . Soil

moisture measurement using radiometry is now widely used as the state-of-art remote sensing approach [8]–[11].

In a real environment, the value of the profile distribution ϵ is influenced not only by the composition of the substance, but also by climatic conditions, soil heterogeneity, etc. Radio-thermal radiation is formed in the thickness of the layer, and the earth's cover can consist of several layers with different ϵ .

With a correctly selected radio wavelength, the passive method can detect subsurface objects, for example, groundwater deposits (see Fig. 1).

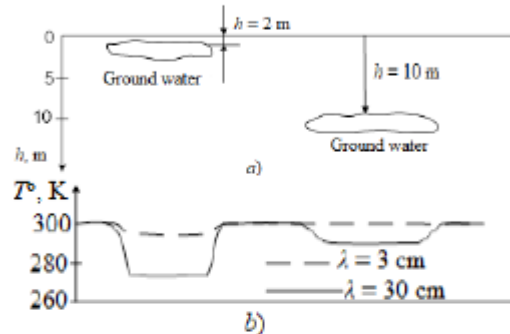


Figure 1: a) Location of anomalous zones and b) approximate dependences of variations in the brightness temperature at waves of decimeter and centimeter ranges at different depths of groundwater in the arid region of Central Asia [1]

In radiometry, to obtain a high temperature sensitivity, a wide frequency band of input low-noise amplifiers (LNA) is required, and the use of ultra-wideband signals in GPRs also requires broadband amplifiers, which makes it possible to connect the microwave part of the radiometer and the receiving path of the GPR without significant changes.

The temperature radio brightness contrast ΔT with a change in the value of ϵ by $\pm 20\%$ for different soils (see Table 1) ranges from 6 ... 11 ° K, whence the sensitivity of the radiometer should be about 0.8 ... 1 ° K.

2. METHOD FOR DETERMINING THE STRUCTURE OF AN ELECTROMAGNETIC SOIL MODEL TO CLARIFY THE DEPTH OF OBJECTS

The sensitivity of the radiometer is expressed by the equation

$$\delta T_{Amin} = m_r \alpha (T_A + T_N) \sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta f}}, \quad (1)$$

where the coefficient m_f is selected in accordance with the required detection probabilities; α is a coefficient, the value of which for different schemes varies within 1 ... 5; Δf is bandwidth of the input linear part of the receiver; ΔF is bandwidth of the output integrator; T_A is antenna temperature, T_N is noise temperature.

For the selected parameters of the radiometer $m_f = 5$, $\alpha = 2.6$, $\Delta f = 600$ MHz, $T_A = 300^\circ$ K, $T_N = 423^\circ$ K (LNA - WL1008, noise factor is 1.5 dB), $\delta T_{Amin} = 1^\circ$ K the integrator bandwidth is determined to be 4.3 Hz. Accordingly, the integration time is 0.23 s

The operation cycle of the integrated system is shown in Fig. 2.

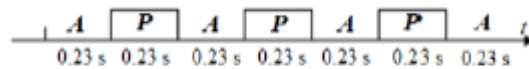


Figure 2: Cyclogram of the GPR integrated with the radiometer: A - active mode, P - passive mode

The radiometer can be calibrated by measuring the power of the leaky signal from the transmitter in the active GPR mode with continuous monitoring of the power of the probing signal. Alternatively, you can calibrate using a metal sheet and measure the temperature of the input circuits, taking into account the dielectric permittivity of the antenna substrate. With the selected modern element base, the expected temperature fluctuations due to the instability of the transmission coefficient of the radiometer channel do not exceed 0.1 ... 0.2° K.

It is proposed to use parallel multichannel reception of radio-thermal radiation (see Fig. 3) to obtain a temperature gradient along the depth, which increases the information content.

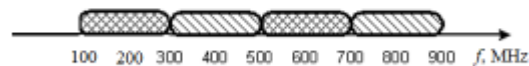


Figure 3: Multichannel reception of radio-thermal radiation

By measuring the dynamics of temperature change, it is possible to establish the nature of the change in moisture content, which has a strong effect on the value of the dielectric permittivity of the soil. The dependence of the temperature radio brightness contrast on soil moisture ΔW has a character close to linear, and without taking into account the shielding effect of the vegetation cover (for different types of soils) is characterized by the equation [12, 13]

$$\frac{\Delta T}{\Delta W} \approx (2-3) \text{ [K/\%]}. \quad (2)$$

The effectively radiating layer has a thickness h_{eff} determined by the following relationship [14]

$$h_{eff} = \frac{8.65}{\Gamma}, \text{ [m]} \quad (3)$$

where Γ (dB/m) is the specific attenuation of the signal in the medium.

It is clearly seen from Table 1 that the signal attenuation in the ground depends on the frequency and reflects the dynamics of changes in humidity, which confirms the nature of the change in the dielectric permittivity with depth.

Electrophysical characteristics of sandy soils				
f, MHz	Humidity, %	ϵ	Γ , dB/m	h_{eff} , m
333	4	4.9	1.4	5
	8	6.9	5.7	1.5
	12	10.9	7.1	1.2
	16	14.9	10.0	0.8
1000	4	5.1	5.7	1.5
	8	7.1	11.4	0.7
	12	10.6	17.2	0.5
	16	14.0	22.0	0.39
Electrophysical characteristics of clayey soils				
f, MHz	Humidity, %	ϵ	Γ , dB/m	h_{eff} , m
333	4	5.1	20	0.43
	8	8.0	40	0.2
	12	12.6	60	0.14
	16	18.0	80	0.1
1000	4	5.1	40	0.2
	8	7.1	80	0.1
	12	12.0	120	0.08
	16	18.0	150	0.06

Table 1: Electrophysical characteristics of various soils

In the integrated GPR system, it is proposed to use four reception channels to obtain radio-thermal radiation from different depths, which will allow estimating the nature of the change in dielectric permittivity with depth. Further, comparing it with the results of active sounding in the form of a radar profile with an indication of the interfaces between the media, one can select a suitable electromagnetic model of the soil structure for calculating the electrophysical characteristics of the medium. The method for choosing an electromagnetic soil model is shown in Fig. 4.

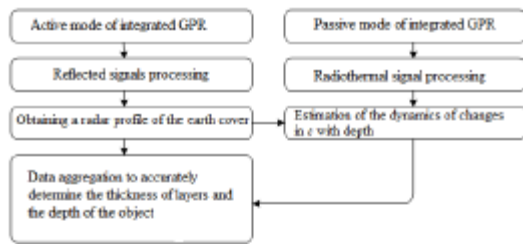


Figure 4: Method for determining the structure of an electromagnetic soil model to clarify the depth of objects in the soil

The integration of an active GPR with a radiometer is shown in Fig. 5.

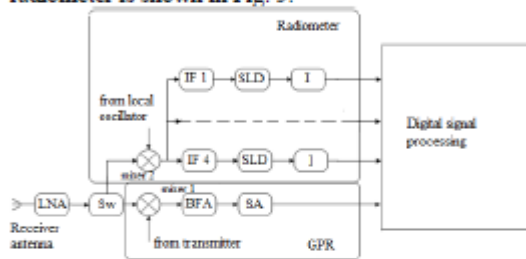


Figure 5: Modification of the GPR receiving path by switching on an additional four-channel radiometer: LNA - low-noise amplifier, Sw - switch, BFA - beat frequency amplifier, SA - spectrum analyzer, IF 1... 4 - intermediate frequency amplifiers, differ only in frequency setting, SLD - square-law detector, I - integrator (narrowband video amplifier)

The frequency band of each radiometer channel is 200 MHz, the central frequencies of the channels are 200, 400, 600, and 800 MHz, respectively.

3. CONCLUSION

A method is proposed for determining the structures of an electromagnetic soil model using the interaction of an active and passive GPR system to clarify the depth of objects in the soil. The main parameter that determines the value of the dielectric permittivity is the bulk soil moisture, and the dynamics of change depends on the change in moisture. To establish the dynamics of changes in soil moisture with depth (since the distribution of moisture can be uneven), a multichannel reception of radio-thermal radiation is proposed.

A functional diagram of an integrated GPR operating in conjunction with a radiometric receiver has been developed. The broadband input of the receiving path of the chirp of the GPR made it

possible to integrate the GPR with the radiometer without significant changes.

4. ACKNOWLEDGMENT

The reported study was funded by RFBR and MCESSM according to the research project № 19-57-44001 and by MSTF according to the research project ShuGH/OHU/-2019/22.

The authors would like to thank anonymous reviewers for their constructive comments.

5. REFERENCES

- [1] N.A. Armand, A.E. Basharinov, and A.M. Shutko "Use of Radiophysical Methods in Environmental Studies. Survey," *Radiophysics and Quantum Electronics*, 20(6), pp. 557-581, June 1977.
- [2] F. Jonard, L. Weibermüller, M. Schwank, H. Vereecken and S. Lambot, "Soil moisture retrieval using L-band radiometer and ground-penetrating radar," *2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2011, pp. 3093-3096, doi: 10.1109/IGARSS.2011.6049872.
- [3] F. Jonard, L. Weibermüller, K. Z. Jadoon, M. Schwank, H. Vereecken and S. Lambot, "Mapping Field-Scale Soil Moisture With L-Band Radiometer and Ground-Penetrating Radar Over Bare Soil," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 49, no. 8, pp. 2863-2875, Aug. 2011, doi: 10.1109/TGRS.2011.2114890.
- [4] A.I. Baskakov *et al.*, "Influence of a priori Uncertainty of Dielectric Permittivity and Electromagnetic Model of Soil Structure on Measurement Errors in Ground Penetrating Radar," *IGARSS 2021 - 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Brussels, Belgium, 2021.
- [5] S. Lambot, E. C. Slob, I. van den Bosch, B. Stockbroeckx and M. Vanclooster, "Modeling of ground-penetrating Radar for accurate characterization of subsurface electric properties," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 42, no. 11, pp. 2555-2568, Nov. 2004, doi: 10.1109/TGRS.2004.834800.
- [6] A. P. Tran, F. Wiaux and S. Lambot, "Soil moisture estimation using full-wave inversion of near- and far-field ground-penetrating radar data: A comparative evaluation," *2012 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*, 2012, pp. 296-300, doi: 10.1109/ICGPR.2012.6254877.
- [7] F. Jonard, F. André, N. Pinel, C. Warren, H. Vereecken and S. Lambot, "Modeling of Multilayered Media Green's Functions With Rough Interfaces," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 57, no. 10, pp. 7671-7681, Oct. 2019, doi: 10.1109/TGRS.2019.2915676.
- [8] F. Jonard, L. Weibermüller, M. Schwank, K. Z. Jadoon, H. Vereecken and S. Lambot, "Estimation of Hydraulic Properties of a Sandy Soil Using Ground-Based Active and Passive Microwave Remote Sensing," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 53, no. 6, pp. 3095-3109, June 2015, doi: 10.1109/TGRS.2014.2368831.