

# Бороон дахь микродолгионы унтралын шинж төрх

М. Батпүрэв<sup>1</sup>, Ж. Нямжав<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Физикийн тэнхим, Шинжлэх Ухааны Сургууль, Монгол Улсын Их Сургууль, Улаанбаатар, Монгол Улс

<sup>2</sup>Электроник, холбооны инженерчлэлийн тэнхим, Хэрэгээний шинжлэх ухаан, Инженерчлэлийн сургууль, Монгол Улсын их Сургууль, Улаанбаатар, Монгол Улс

Сансарын болон газрын холбооны системд ашиглаж байгаа микродолгионыг унтраадаг сөрөг хүчин зүйлсийн нэг нь бороо юм. Бороо нь микродолгионы хувьд 0.1-ээс 7 хүртэлх мм диаметртэй, орон зайд тархан байрласан усны дуслууд юм. Микродолгионы мужид долгионы урт нь борооны дуслын хэмжээтэй жишихүйц болж ирдэг бөгөөд 30 мм болон түүнээс бага долгионы урттай микродолгионы унтралт мэдэгдэхүйц их, өөрөөр хэлбэл холбооны системийн ажиллагаанд муугаар нөлөөлөхүйц болдог. Бид микродолгионы уртын 3-30 мм (давтамжийн 10-100 ГГц) мужид микродолгионы унтралыг үүсгэж байгаа борооны дуслын сарнил болон шингээлтийг дуслын хэмжээ болон долгионы уртаас хэрхэн хамаарч байгааг Мигийн онолын хүрээнд тооцоо хийж судлав.

## I. ОРШИЛ

Микродолгион саадыг тойрон тархах чадвар муу учир түүнийг ашигладаг радио холбооны станцуудыг шууд бие биеэ харахаар байршуулдаг бөгөөд энэ тохиолдолд радио холбооны тасралтгүй найдвартай ажиллагаа цас, бороо, манан, мөндөр, өтгөн үүлшилт, шороон шуурга гэх мэт цаг агаарын үзэгдлээс ихээхэн хамаардаг. Борооны дуслууд шингэн, дуслын хэмжээ нь микродолгионы урттай жишихүйц тул бусад цаг агаарын үзэгдэлтэй харьцуулахад микродолгионыг илүү унтраадаг [1]. Иймд микродолгионы радио холбооны системийн найдвартай тасралтгүй ажиллагааг хангахын тулд микродолгионд борооны үүсгэх унтралыг (цаашид борооны унтрал гэнэ) зайлшгүй тооцох шаардлагатай болдог. Ихэнхи судлаачид микродолгионы борооны унтралын онолын тооцоо хийхдээ сарнил болон шингээлт хоёрын нийлбэрээр илэрхийлэгддэг унтралыг шууд бодсон байдаг [1]. Иймд бид микродолгионы унтралын шинж төрхийг улам тодруулах үүднээс түүний бүрдүүлэгч хэсэг болох борооны дуслын сарнил болон шингээлийг тус тусад нь Мигийн онолоор бодож борооны дуслын хэмжээ болон микродолгионы уртаас хэрхэн хамаарч байгааг судлав.

## II. МИКРОДОЛГИОНЫ ТАРХАЛТАНД БОРООНЫ ДУСАЛ НӨЛӨӨЛӨХ НЬ

Бороо нь радио долгионы хувьд агаарт тархан байрласан 0.1-ээс 7 мм хүртэлх диаметртэй усны унаж байгаа дуслууд юм. Унаж байгаа тул агаарын эсэргүүцлийн улмаас дуслын хэмжээ ихсэх тусам хэлбэр нь бөмбөрцөгөөс гажиж

хэвтээ зуйван болдог. Үүнээс гадна дуслууд дусал хоорондын мөргөлдөөн болон салхины нөлөөгөөр хэлбэлзэх хөдөлгөөнд ордог тул нэг ижил эзэлхүүнтэй борооны дуслууд өөр өөр хэлбэртэй болдог [3]. Микродолгионы борооны унтралд маш олон тооны борооны дуслууд оролцдог тул борооны нэг дуслын үүсгэх унтралыг тооцоолохдоо нэг ижил эзэлхүүнтэй дуслын дундаж хэлбэрийг авч үзэхэд хангалттай бөгөөд энэ хэлбэр нь бөмбөрцөгт ойрхон байдаг [4]. Борооны нийт унтрал борооны дусал бүрийн унтрал ба борооны дуслын хэмжээний түгэлтээс хамаардаг. Бид энэ ажлын хүрээнд зөвхөн борооны дуслын унтралыг авч үзлээ. Борооны дуслын үүсгэх микродолгионы унтралын шинж төрхийг судлахдаа борооны дуслыг бөмбөрцөг хэлбэртэй гэж үзэн Мигийн онолыг ашиглав. Борооны дуслууд микродолгионыг тархалтын чиглэлээс нь өөр зүгт сарниулахын зэрэгцээ өөртөө шингээж унтрал үүсгэдэг. Долгионы сарнилын онолд нэг дуслын унтралыг унтралын огтлол гэдэг хэмжигдэхүүнээр илэрхийлдэг бөгөөд энэ нь нэг дуслын унтраасан чадлыг түүнд туссан долгионы эрчимд харьцуулсан харьцаатай тэнцүү байна. Нэг дуслын унтралын огтлолыг дуслын геометр хөндлөн огтлолын талбайд хуваасныг дуслын унтраах чадвар гэдэг. Яг үүнтэй адилаар дуслын сарниулах ба шингээх чадварыг тодорхойлдог бөгөөд эдгээрийн нийлбэр унтраах чадвартай тэнцүү байна. [1,2]

## III. БОРООНЫ ДУСЛЫН САРНИЛ

Борооны дусал микродолгионыг зүг бүрт тараан сарниулах ба энэ нь  $\theta$  сарнилын өнцөгөөс хэрхэн хамаарч байгааг сарнилын

\* Electronic address: nyamjav@seas.num.edu.mn

диаграммаар илэрхийлдэг. Сарнилын диаграммыг сарнилын хавтгай (сарнилын өнцөгийг агуулсан) болон түүнд перпендикуляр хавтгай дээр байгуулдаг бөгөөд энэ нь сарнилын далайцын функц гэж нэрлэгддэг  $S_2(\theta)$  ба  $S_1(\theta)$ -ийн квадратаар харгалзан илэрхийлэгдэнэ. Эдгээр сарнилын функц дараах хэлбэртэй байна [2]

$$S_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n+1)}{n(n+1)} \left\{ a_n \frac{P_n(\cos(\theta))}{\sin(\theta)} + b_n \frac{dP_n(\cos(\theta))}{d\theta} \right\} \quad (1)$$

$$S_2(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n+1)}{n(n+1)} \left\{ a_n \frac{dP_n(\cos(\theta))}{d\theta} + b_n \frac{P_n(\cos(\theta))}{\sin(\theta)} \right\}$$

энд  $\theta$ – сарнилын өнцөг.  $P_n$ – Лежандрин өргөтгөсөн олон гишүүнт ба  $a_n, b_n$ –Мигийн коэффициент бөгөөд үүнийг Matlab орчинд програмчлахад дөхөмтэй, матриц байдлаар

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_{n-1}(q) & -\psi_n(q) \\ \zeta_{n-1}(q) & -\zeta_n(q) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ n + m\xi_n & n + \frac{\xi_n}{m} \\ q & q \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$a_n = \frac{a_{11}}{a_{21}}; \quad b_n = \frac{a_{12}}{a_{22}}$$

гэж бичиж болно. Энд  $\psi_n$  ба  $\zeta_n$ – харгалзан Риккати-Бесселийн ба Риккати-Нейманы функц,  $m$ - усны хугарлын илтгэгч,  $q = \pi D / \lambda$  – борооны дуслын хэмжээний параметр,  $D$ – борооны дуслын диаметр ба  $\lambda$ – микродолгионы урт,  $\xi_n = \psi_n'(mq) / \psi_n(mq)$  болно.

Микродолгионы мужид усны хугарлын илтгэгчийг илэрхийлдэг хэд хэдэн загвар байдаг бөгөөд бид Рейгийн загварыг ашиглав [5].

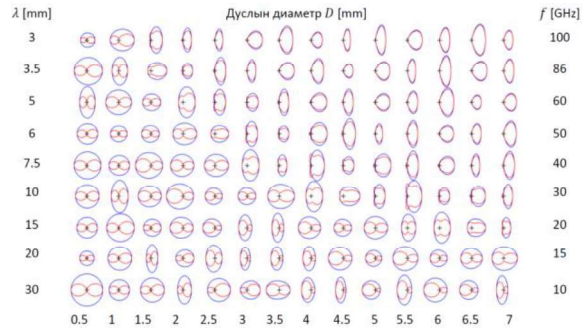
$$m = \sqrt{\varepsilon(\lambda, t^0)}; \quad \varepsilon(\lambda, t^0) = \varepsilon_0 + \frac{\varepsilon_s(t^0) - \varepsilon_0}{1 + i \frac{c}{\lambda \tau(t^0)}} \quad (3)$$

$$\varepsilon_0 = 5.5$$

$$\varepsilon_s(t^0) = 88.2 - 0.408 t^0 + 0.0008 t^{0^2}$$

$$\tau(t^0) = 8.395 + 0.4632 t^0 + 0.0051708 t^{0^2}$$

Бид борооны дуслын сарнилын диаграммыг 3-30 мм (100-10 ГГц давтамжийн) долгионы уртын мужид бодож Зураг 1-д харуулав. Сарнилын хавтгай дээрх сарнилын диаграммыг улаан өнгөөр, түүнд перпендикуляр хавтгай дээрх сарнилын диаграммыг хөх өнгөөр харуулав. Сарнилын хавтгайд хэвтээ наймын тоотой төстэй түүнд перпендикуляр хавтгайд дугуй хэлбэртэй сарнилын диаграмм нь Релейн буюу диполийн сарнил болохыг харуулдаг.



Зураг 1. Борооны дуслын сарнилын диаграмм.

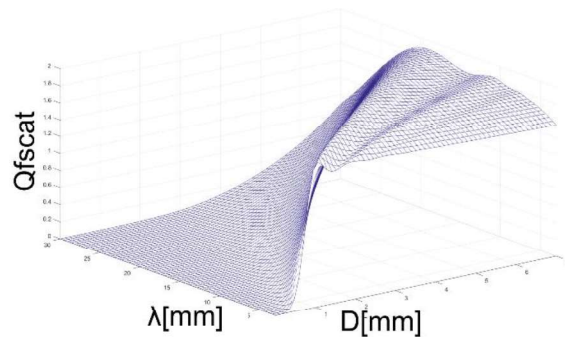
Зураг 1-ээс харахад дуслын хэмжээ долгионы уртаас олон дахин бага ( $D < 1$  мм) мужид цэвэр диполийн буюу Релейн сарнил болж байгаа нь харагдаж байна. Долгионы уртын  $15 < \lambda < 30$  мм мужид дуслын хэмжээ томрох тусам сарнилын диаграмм эхлээд гэдрэг чиглэлд (тархалтын эсрэг чиглэлд) дараа нь шууд чиглэлд илүү цүлхийж байна. Гэдрэг чиглэлд цүлхийсэн хэсэгт диэлектрик резонансийн шингээлт ажиглагдаж байгаа нь дуслын шингээх чадварын тооцооноос харагдсан болно. Харин долгионы урт үүнээс цааш бага болох  $10 > \lambda > 3$  мм мужид дуслын хэмжээ томрох тусам туссан долгион шууд чиглэлдээ сарних нь ихсэж улмаар хоёр хавтгай дээрх долгионы сарнил адилхан болж байна. Үүнийг Мигийн үзэгдэл гэж нэрлэдэг.

Сарнилын өнцөгийн  $0^\circ$  (шууд) болон  $180^\circ$  (гэдрэг) чиглэл дэх дуслын сарниулах чадварыг

$$Q_{\text{шүүд}} = \frac{2}{q^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (4)$$

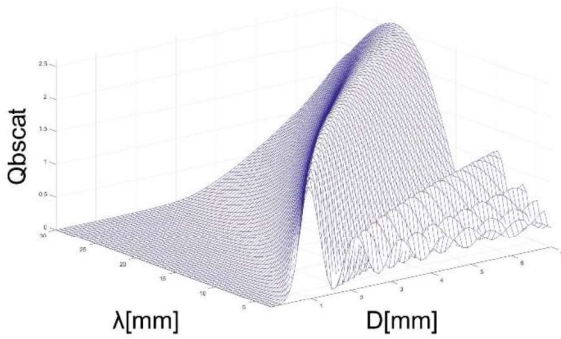
$$Q_{\text{гэдрэг}} = \frac{1}{q^2} \left| \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (-1)^n (a_n - b_n) \right|^2$$

томъёогоор бодож зураг 2 ба 3-д харуулав.



Зураг 2. Борооны дусал микродолгионыг шууд чиглэлд сарниулах чадвар.

Эндээс харахад борооны дуслын шууд чиглэлд сарниулах чадвар долгионы урт бага байх тусам дуслын хэмжээнээс хамаарч хурдан өсч тогтворжсон утгадаа бага зэрэг хэлбэлзэн дөхөж байна.



Зураг 3. Борооны дусал микродолгионыг гэдрэг чиглэлд сарниулах чадвар.

Харин борооны дусал микродолгионыг гэдрэг чиглэлд сарниулах чадвар долгионы урт бага байх тусам дуслын хэмжээнээс хамаарч маш хурдан өсөөд эргээд хурдан буурч хэлбэлзэж байна. Өөрөөр хэлбэл борооны гэдрэг сарнил борооны дуслыг хэмжээг сонгож ‘хардаг’ байна. Иймд радарын мэдээллээс борооны дуслын хэмжээг үнэлэхдээ үүнийг зайлшгүй тооцоо шаардлагатай.

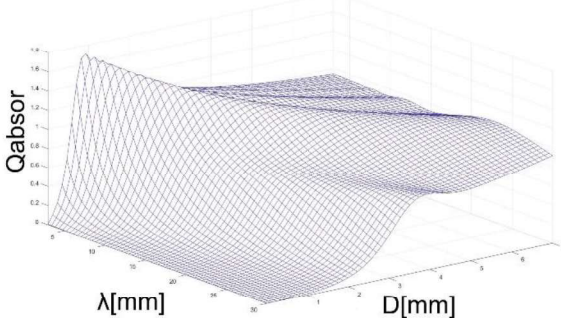
#### IV. БОРООНЫ ДУСЛЫН ШИНГЭЭЛТ

Борооны дуслын микродолгионыг шингээх чадварыг унтраах чадвараас сарниулах чадварыг хасаж олж болно.[2] Дуслын унтраах чадварыг

$$Q_{\text{yml}} = \frac{2}{q^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n) \quad (5)$$

$$Q_{\text{untr}} = Q_{\text{yml}} - Q_{\text{сарн}}$$

Борооны дуслын микродолгионыг шингээх чадварыг 3-30 мм (100-10 ГГц давтамжийн) долгионы уртын мужид дуслын хэмжээнээс хамааруулан бодож Зураг 4-д харуулав.



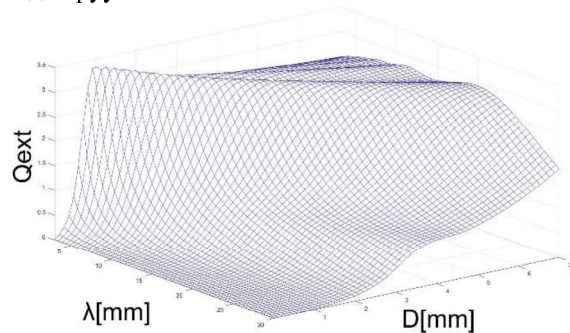
Зураг 4. Борооны дусал микродолгионыг шингээх чадвар.

Энд долгионы уртын (15-30) мм буюу усны хугарлын илтгэгчийн бодит хэсэг их байх мужид диэлектрик резонансийн шингээлт илэрч байна. Энэ мужид борооны дусал доторхи дотоод бүрэн ойлтын коэффициент их болж улмаар  $q \cdot \text{Re}\{m\} = \pi$  буюу  $D = \lambda \pi \text{Re}\{m\}$  нөхцлийг хангах диаметртэй дуслын дотор микродолгионы зогсонги долгион үүсэх нөхцөл бүрдэж дусалд долгион

шингээгдэнэ. Хэрэв хугарлын илтгэгч цэвэр бодит бол зогсонги долгион огт унтрахгүй маш хүчтэй резонансын шингээлт үүсгэдэг. Харин усны хувьд түүний дамжууллаас (хугарлын илтгэгчийн хуурмаг хэсгээс) болж зогсонги долгион унтарсанаар резонансын шингээлт хүчтэй биш илэрч байна. Ерөнхийдээ микродолгионы урт багасах тусам дуслын хэмжээнээс хамааран хурдан өсч хамгийн их утгадаа хүрээд бууран бага зэрэг хэлбэлзээд тогтворжиж байна.

#### V. БОРООНЫ ДУСЛЫН УНТРАЛ

Борооны дуслын микродолгионыг унтраах чадвар шууд сарниулах ба шингээх чадварын нийлбэртэй тэнцүү байдаг бөгөөд түүнийг Зураг 5-д харуулав.



Зураг 5. Борооны дусал микродолгионыг унтраах чадвар.

Борооны унтрал бага байгаа мужид Релейн сарнил ( $q \ll 1$ ), харин унтрал их байх мужид Гюйгенс-Кирхгофын дифракцийн сарнил ( $q \gg 1$ ) ажиглагдаж байна. Унтрал өсч байгаа завсрын мужид Мигийн сарнил байна. Долгионы уртын 3-30 мм буюу давтамжийн 10-100 ГГц царанд борооны дуслын хэмжээний параметр  $q$  нь 0.02-7.33 хооронд байх учир радиодолгион борооны дулаас сарних бодлогыг (4, 5) томъёогоор бодохоос өөр аргагүй юм. Энэ нийлбэр хугарлын илтгэгчтэй комплекс байх тохиолдолд удаан нийлдэг учир үүнийг бодохдоо ядаж  $q$  хүртэлх эрэмбийн гишүүдээр нийлбэр авах шаардлагатай [1,2]. Бид 20 гишүүнээр нийлбэр авсан болно.

#### VI. ДҮГНЭЛТ

Борооны дусал микродолгионы унтралыг үүсгэх үндсэн гурван механизм ажиглагдаж байна. Үүнд:

1.  $q < 0.25$  байхад нийт унтрал зөвхөн шингээлтээс үүсэх ба долгионы уртаас бараг хамаарахгүй бага байна. Энэ мужид Мигийн коэффициентээс  $a_1$  буюу цахилгаан диполийн цацаргалтын далайцыг илэрхийлдэг коэффициент

- хамгийн их утгатай болж унтраах чадварыг дангаараа илэрхийлдэг байна. Энэ нь Релейн сарнилийн муж юм.
2.  $0.25 < q < 0.5$  байхад сарнилийн нөлөө ихсэж байгаа боловч диэлектрик резонансын шингээлт давамгайлж байна. Энэ мужид Мигийн коэффициентээс  $b_1$  буюу соронзон диполийн цацаргалтын далайцыг илэрхийлдэг коэффициент хамгийн их утгатай болж унтраах чадварыг дангаараа илэрхийлдэг. Энэ мужид мөн диэлектрик резонанс ажиглагдана.
3.  $q > 0.5$  мужид сарнилийн унтралд оруулах хувь нэмэр ихсэж  $q=1$  орчимд сарнил шингээлт хоёр тэнцэж ирээд түүнээс цааш сарнил давамгайлах болж байна. Энэ мужид унтралын огтлолд Мигийн дээд эрэмбийн коэффициентуудын оруулах хувь нэмэр ихсэх учир энэ Мигийн сарнилын муж болно.

## VII. НОМ ЗҮЙ

- [1] Medeiros Filho, F., S., Cole, R., S., Sarma, A., D., “Millimetre Wave Rain Induced Attenuation: Theory and Experiments”, IEEE Proc., 1986, 133, (4) pp 308-314.
- [2] Van De Hust, H.C. “Light Scattering by Small Particles” New York, Wiley. 1957.
- [3] Kenneth V. Beard, V.N. Bringib, M. Thurai “A new understanding of raindrop shape” Atmospheric Research, Volume 97, Issue 4, September 2010, Pages 396–415
- [4] Miklós Szakall, Subir K. Mitra, Karoline Diehl, Stephan Borrmann. “Shapes and oscillations of falling raindrops - A review”, Atmospheric Research, Volume 97, Issue 4, September 2010, Pages 416–425.
- [5] Liebe, H.J., G.A. Hufford and T. Manabe. “A model for the complex permittivity of water at frequencies below 1 THz.” Int. J. IR & MM, V.12, pp659-674, 1991.