

SOS Аргыг Ашигласан Олон Замын Тархалттай Сувгийн Эмулятор

Э.Адъяабат
Монгол Улсын Их Сургууль
Электроник, Холбооны
Инженерчлэлийн тэнхим,
adiyabat0829@yahoo.com

М.Баярпүрэв
Монгол Улсын Их Сургууль
Электроник, Холбооны
Инженерчлэлийн тэнхим,
bayarpurev@num.edu.mn

Д.Бямбажав
Монгол Улсын Их Сургууль
Электроник, Холбооны
Инженерчлэлийн тэнхим,
byambajav@num.edu.mn

Хураангуй—Утасгүй холбоо хөгжсөөр байгаа орчин үед утасгүй төхөөрөмжийн ажиллагааг туршиж үзэх нь нилээд чухал үйл явц юм. Утасгүй төхөөрөмжийг бодит сувагт хэмжилт хийж туршиж үзэх нь зардлын хувьд их үнэтэй. Иймээс олон тархалттай сувгийн эмуляторыг хийх зайлшгүй шаардлагатай. Олон тархалттай сувгийн эмуляторыг хийснээр зардлын хувьд хэмнэх боломжтой бөгөөд туршилтын төхөөрөмжөө богино хугацаанд хялбараар туршиж үзэх боломжтой болж байгаа. Олон тархалттай сувгийн эмуляторыг хийхэд SOS-г хэрэглэн маш өргөнөөр загварчилдаг. Энэхүү судалгааны ажлаар олон замын тархалттай сувгийн эмуляторын загварыг гарган авч хардвер хэрэгжүүлэлт хийхийг зорилоо. Сувгийн загварыг гаргахдаа Sum-of-sinusoid-ийг ашигласан. Гауссын цагаан шуугианыг Бөкс-Мюллерийн хувиргалтыг ашиглан гаргаж харин шүүлтүүрийг SOS аргыг ашиглан гарган авсан. SOS аргаа MATLAB програм дээр симуляци хийж, үнэлгээ хийсэн. Мөн сувгийнхаа статистик шинж чанаруудыг харуулсан.

Түлхүүр үгс—SOS, Жейкс чадлын спектр, Олон замын тархалт, замхралттай(fading).

I. УДИРТГАЛ

Утасгүй холбоонд нэвтрүүлэгчээс, хүлээн авагч хооронд радио долгионыг дамжуулахад олон замын тархалттай сувгаар дамждаг. Нэвтрүүлэгчээс хүлээн авагч хооронд радио долгион дамжиж буй орчинг суваг гэдэг. Нэвтрүүлэгчээс радио долгионыг дамжуулахад олон замаар тархсан, янз бүрийн чадалтай радио долгионыг хүлээн авдаг. Олон замын тархалт нь хүлээн авагч дээр очихдоо барилга байгууламж, уул мод машин гэх мэт зүйлүүдээс болж гажилт, хугацааны хоцрогдол үүсч өөр өөр чадалтай болон очдог. Радио долгионы гажилтыг гурван параметр болох далайц, давтамж, фазын хувьд үнэлдэг. Хөдөлгөөнт радио сувгийг хийх гол шалтгаан нь шинэ төхөөрөмжийн ажиллагааг туршиж үзэхэд бодит суваг дээр хэмжилт хийх шаардлагатай болдог. Иймээс математик тооцооллыг хийж сувгийн загварчлалыг гаргаж хуурмагаар хийх нь бодит сувагт хийснээс илүү зардлыг хэмнэх чадна. Иймээс хөдөлгөөнт радио сувгийг хийх нь маш ач холбогдолтой юм. Утасгүй холбоонд Релейн замхралттай сувгийн симуляци нь маш сонирхолтой зүйл юм. Утасгүй холбооны системийн дизайн болон тестийг

амжилттай хийхэд радио долгион цацаргалтын орчны симуляцийг нарийвчлалтайгаар хийх шаардлагатай. Энэ симуляцийн загвар нь хөдөлгөөнт радио сувгийн статистик шинж чанаруудыг харуулсан байх ёстой. Худалдан авах боломжтой замхралттай(fading) сувгийн эмулятор нь овор ихтэй, өртөг өндөртэй байдаг. Эдгээр эмулятор нь ихэвчлэн бие даасан байдалтай байдаг бөгөөд аналог болон дижитал түүвэрлэлтээр сувгийг хангаж өгдөг. Илүү нарийн, өртөг багатай арга хэлбэр нь FPGA дээр бодит хугацаатай сувгийн эмуляторыг хэрэгжүүлэх юм. Олон замын тархалттай суваг нь ерөнхийдөө комплекс Gaussian wide-sense stationary(WSS)[6],[7],[10] процессоор загварчлагддаг. Комплекс GWSS нь $c(t) = c_i(t) + jc_q(t)$ [10] байна. Дараах томъёоны хувьд комплекс Гауссын процесс $c(t)$ нь бодит болон хуурмаг хэсгээр илэрхийлэгдсэн ба $c_i(t)$, $c_q(t)$ нь тэнцүү вариантай хоорондоо хамааралгүй, тэг дундажтай Гаусс байна. Өөрөөр хэлбэл хөвөө $c(t) = \sqrt{c_i^2(t) + c_q^2(t)}$ [10] нь байх ба үүнээс $f_{|c|} = \frac{c}{\sigma} e^{[-c^2/2\sigma^2]}$ [10] Релейн түгэлттэй болно. c_i болон c_q -н автокорреляцийн функц нь $J_0(2\pi f_D \tau)$ [14]-р илэрхийлэгдэнэ. f_D нь хамгийн их Допплерийн давтамж, τ хугацааны lag, харин $J_0()$ нь тэгдүгээр эрэмбийн Бесселийн функц юм. c_i болон c_q -н Жейкс чадлын спектртэй байна.

II. СУВГИЙН ЭМУЛЯТОРЫН ДИЗАЙН

Олон замын тархалттай утасгүй сувагт нэвтрүүлэгчээс хүлээн авагч хүртэл дохио нь ойх болон хугардаг бөгөөд хүлээн авагч дээр дохионуудыг нэмж хүлээн авдаг. Сувгийн респонсыг тодорхойлох нь хамгийн чухал зүйл юм. Дамжуулагч болон хүлээн авагч хоёрын хооронд маш олон саад байдаг бөгөөд тухайн саадыг урьдчилж мэдэх боломжгүй юм. Санамсаргүй процессоор хүлээн авсан дохиог тодорхойлдог. Энэ тохиолдолд SOS аргын эмулятор нь хүлээн авсан дохио нь санамсаргүй фазтай синусиодуудын нийлбэр байдаг. Ийм учраас SOS аргын олон тархалттай сувгийн эмуляторыг маш өргөнөөр ашигладаг[1],[4]. Релейн хавтгай(flat) замхралттай нарийн зурвасын дохионы зарим шинж чанаруудыг дурьдвал. Дамжуулагчаас хүлээн авагч хоорондын орчинд шууд LOS биш байдаг. Хүлээн авагч руу дамжуулсан зөөгчийн хөвөөний магадлалын нягтын

функцийн(PDF) илэрхийлэл нь Релейн түгэлттэй байдаг[3],[4],[5].

$$f_R(r) = re^{-r^2/2} \quad (1)$$

Фазын магадлалын нягтын функц(PDF) нь жигд түгэлттэй байна [1],[8],[12],[13]

$$f_\theta(\theta) = \frac{1}{2\pi}, \quad 0 \leq \theta < 2\pi \quad (2)$$

Хүлээн авсан дохионы автокорреляцийн функц нь дараах томъёогоор илэрхийлэгдэнэ [1],[8],[12],[13]

$$R_R(\tau) = \cos(\omega_c \tau) J_0(\omega \tau) \quad (3)$$

III. SOS АРГЫН ХӨДӨЛГӨӨНТ СУВГИЙН ЭМУЛЯТОР

Олон замын тархалттай сувагт дамжуулсан дохио нь объектоос ойх, хугарах гэх мэтээр хүлээн авагч дээр очих бөгөөд хүлээн авагч нь суперпозицийн зарчмаар долгионоо нэмж хүлээн авдаг. Олон замын тархалттай сувгийг хийхэд SOS аргыг ашиглана. Нэвтрүүлэгчээс цацсан долгионыг хүлээн авагч хүлээн авч суперпозицийн зарчмаар нэгтгэн дараах томъёогоор илэрхийлнэ[1],[5].

$$R_D = \text{Re}\{E_0 \sum_{n=1}^N C_n e^{j(w_m t \cos A_n + \phi_n)} e^{(i\omega_c t)}\}$$

$$= E_0 \sum_{n=1}^N C_n \cos(\omega_c t + w_m t \cos A_n + \phi_n) \quad (4)$$

E_0 нь нэвтрүүлсэн синусойд дохионы далайц, C_n нь санамсаргүй хувьсагч бөгөөд n тархалттай замын сулрал, A_n нь санамсаргүй хувьсагч n замын цацаргалтын хүлээн авах өнцгийг заах ба хүлээн авагчийн хөдөлгөөний чиглэлээс хамаарна, ϕ_n нь санамсаргүй хувьсагч бөгөөд n замын цацаргалтын фазыг шифт хийдэг. ω_c нь нэвтрүүлсэн синусан дохионы радиан давтамж $\omega_c = 2\pi\nu\cos(\alpha)/\lambda_c$ байна. ω_m нь maximum Doppler радиан давтамж $\omega_m = 2\pi\nu/\lambda_c$ байна. ν -нь хүлээн авагчийн хурд, λ_c нь нэвтрүүлсэн дохионы долгионы урт ба j нь комплекс тогтмол, $j^2 = -1$ байна. Санамсаргүй хувьсагч хэрэглэх бөгөөд өөрөөр хэлбэл хүлээн авсан замхралттай(fading) дохионы стохастик шинж чанар нь хамгийн чухал. $R_D(t)$ дохиог нормчилсон энэ нь нэгж чадалтай болох бөгөөд өөрөөр хэлбэл хүлээн авагч дээр нормчлогдсон дохиог хүлээж авна[5].

$$R(t) = \sqrt{2} \sum_{n=1}^N C_n \cos(\omega_c t + \omega_m t \cos A_n + \phi_n) \quad (5)$$

$R(t)$ – нормчлогдсон хүлээн авсан дохио юм. Стохастик дохио $R(t)$ нь C_n , A_n , ϕ_n гурвыг N -ээс хамааруулан тодорхойлж хавтгай(flat) замхралттай(fading) дохиог төлөөлдөг. C_n , A_n болон ϕ_n нь санамсаргүй хувьсагч хоорондоо хамааралгүй хувьсагчийн нийлбэр. Энэ ойлголт нь замхралттай үзэгдлийн физик шинж чанараас батлагддаг. (5)-р томъёог симуляци хийхэд Допплер давтамж $\Omega_n = \omega_m \cos A_n$ бүрд N low-frequency осцилляторын нэг нь байх шаардлагатай. Энэ эмуляторыг хэрэгжүүлэхэд (5)-р хавтгай(flat) замхралттай(fading)

дохиог үүсгэх хэрэгтэй бөгөөд үүний тулд багадавтамжтай(low-frequency) осцилляторын тоог багасгахыг зорьж Жейксийн зарим ойлголтыг мэдэх шаардлагатай. n замын сулрал нь[1],[5],[15]:

$$C_n = \frac{1}{\sqrt{N}}, n = 1, \dots, N \quad (6)$$

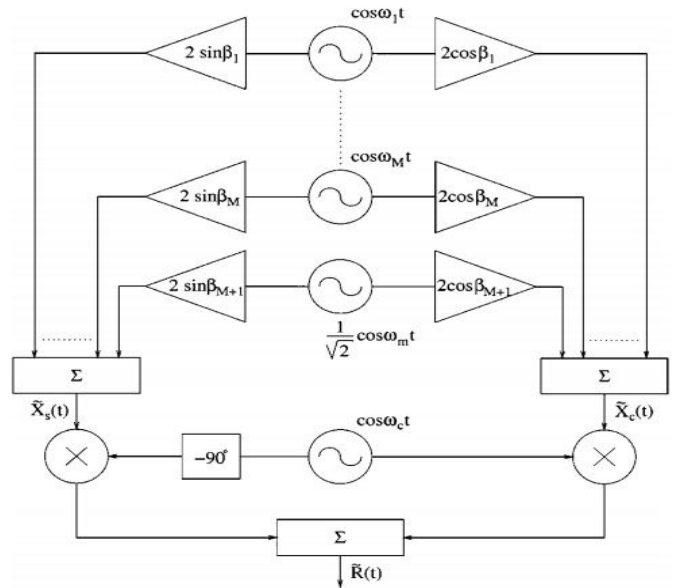
болон

$$A_n = \frac{2\pi m}{\sqrt{N}}, n = 1, \dots, N \quad (7)$$

Түүнчлэн эмуляторын N -н тоог сонгоно:

$$N = 4M + 2 \quad (8)$$

Иймээс өөр өөр Допплер давтамж шилжилтийн тоог N -ээс $M + 1$ рүү багасгана. Өөрөөр хэлбэл хавтгай(flat) замхралттай(fading) дохиог зөвхөн $M + 1$ low frequency oscillator-уудыг хэрэглэснээр гарган авч чадна. Эмуляторын блок диаграммыг дараах зурагт харуулав[3],[4],[5],[15]. Блок диаграммаас эмуляторын гаралтын дохиог амархан бичиж чадна[5],[15].



Зураг 1. Хөдөлгөөнт радио сувгийн эмулятор

Хөдөлгөөнт радио сувгийн эмуляторын гаралт нь[5],[15]:

$$\tilde{R}(t) = \tilde{X}_c(t) \cos \omega_c + \tilde{X}_s(t) \sin \omega_c \quad (9)$$

In-phase болон quadrature байгуулагчуудын илэрхийлэл:

$$\tilde{X}_c(t) = \frac{2}{\sqrt{N}}(\sqrt{2} \cos B_{M+1} \cos \omega_m t + 2 \sum_{n=1}^N \cos B_n \cos \omega_n t) \quad (10)$$

ба

$$\tilde{X}_s(t) = \frac{2}{\sqrt{N}}(\sqrt{2} \sin B_{M+1} \cos \omega_m t + 2 \sum_{n=1}^N \sin B_n \cos \omega_n t) \quad (11)$$

$\tilde{R}(t)$ нь $R(t)$ стохастик процессын хэрэгжилтийг багасгана. Дараагийн бүлэгт SOS аргын сувгийн эмуляторын статистик шинж чанарууд тодорхойлъя.

А. Хөдөлгөөнт радио сувгийн статистикууд

SOS-н автокорреляци функц нь Бесселийн функц гарах ёстой бөгөөд (5) дахь томъёо ёсоор SOS маань f_c гэсэн зөөгч давтамжаар зөөгдсөн байна. Иймээс үндсэн зурвас дээр авчирч автокорреляци функцийг бодож олно. $R(t)$ гэсэн замхралттай(fading) дохионы зөөгч өнцөг давтамж болон бодит, хуурмаг хэсгээр ялган бичвэл ийм хэлбэртэй болно.[14]

$$R(t) = \cos \omega_c(t) R_R(t) + \sin \omega_c(t) R_I(t) \quad (12)$$

Бодит хэсэг нь үндсэн давтамж дээр [14]:

$$R_R(t) = \sum_{n=1}^N \cos(\omega_m(t) \cos \frac{2\pi n}{N}) \quad (13)$$

$R_R(t)$ -н автокорреляци функц нь [14]:

$$R_R(t_1, t_2) = \sum_{n=1}^N \cos(\omega_m(t_1, t_2) \cos \alpha_n) \quad (14)$$

байна.

Автокорреляци функцийг ажигласнаар $R(t)$ замхралттай(fading) дохио нь WSS, эмуляторын хэрэгжүүлэлтэнд N болон $\alpha_n = (2\pi n/N)$ [11]-г тэгш тоогоор сонгож ихэвчлэн хэрэглэдэг. (14)-дэхь илэрхийллийг хялбарчилбал:

$$R_R(\tau) = \sum_{n=1}^N \cos(\omega_m(\tau) \cos \frac{2\pi n}{N}) \quad (15)$$

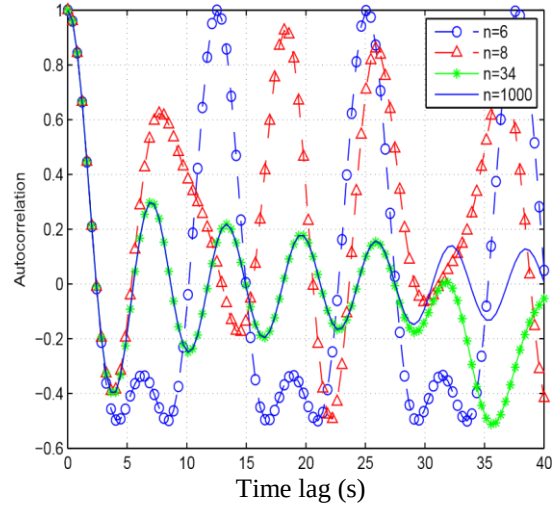
болно.

N -г их тоогоор авсан тохиолдолд Бесселийн функцийг илэрхийлэл рүү улам дөхөх болно.[0;2 π]-н хооронд $R(t)$ замхралттай(fading) дохионы автокорреляци функцийг бодож Бесселийн функцаар илэрхийлбэл доорх илэрхийлэл:

$$R_{RR}(t_1, t_2) = J_0[w_m(t_1 - t_2)] \quad (16)$$

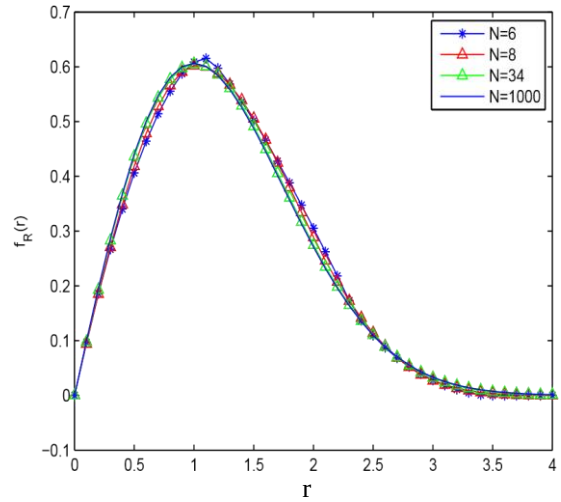
болно. $R(t)$ замхралттай(fading) дохионы хөвөөний магадлалын нягтын функцийг дараах томъёогоор[9],[10]:

$$f_R(r) = r \int_0^\infty J_0^N(q\sqrt{\frac{2}{N}}) J_0(rq) q dq, r \geq 0 \quad (17)$$



Зураг 2. SOS-н autocorrelation функц $w_m=1$ үед

болно. $N=6, 8$ болон 34 утгуудад бүгд ижил стандарт Релейн pdf-тэй. $R(t)$ -н хөвөөний магадлалын нягтын функц нь $N=6, 8$ болон $N=34$ гэсэн утгуудад ямар хамааралтайг дараах зурагт харуулав. Фазын магад-

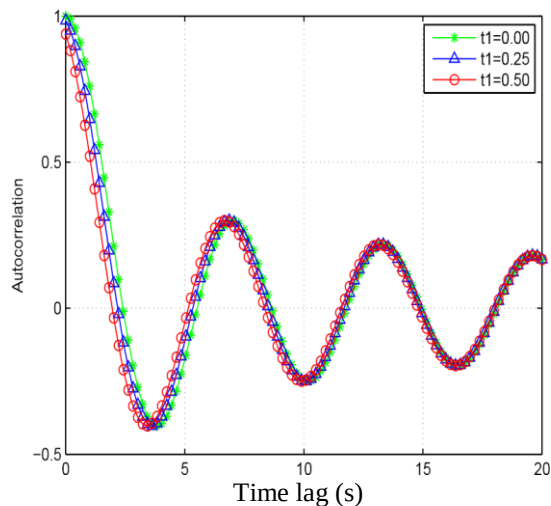


Зураг 3. $R(t)$ дохионы хөвөөний магадлалын нягтын функц

лалын нягтын функц нь:[2],[8],[12],[13]

$$f(\theta) = \frac{1}{2\pi}, 0 \leq \theta < 2\pi \quad (18)$$

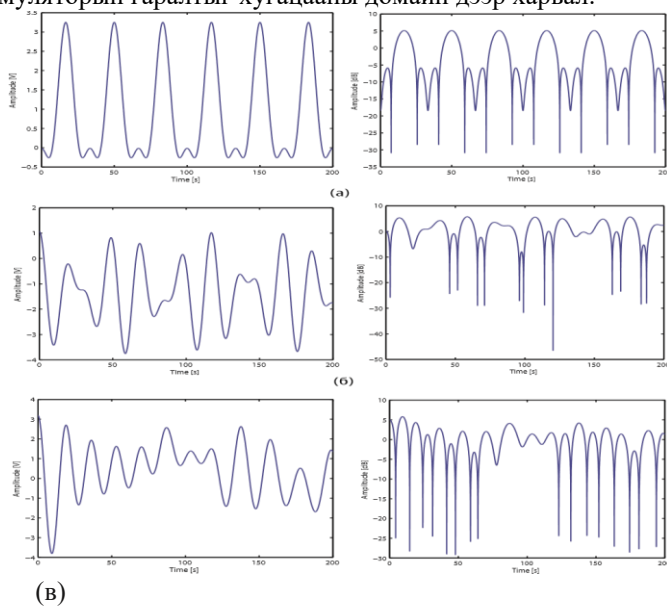
$R(t)$ дохионы автокорреляцийг $\omega_m = 1, M = 8, N = 34$ үед гурван хугацааны өөр агшинд харъя.



Зураг 4. $R(t)$ ACF-г $\omega_m=1, M=8, N=34$ үед t_1 хугацааны өөр өөр агшинд

IV. ТҮРШИЛТ, ҮР ДҮН

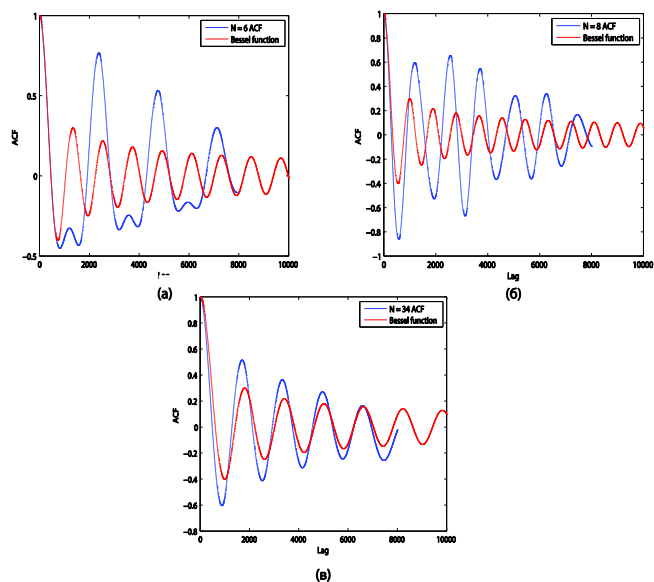
Хөдөлгөөнт радио сувгийн эмуляторын симуляцийг N -н хэд хэдэн утганд туршиж үзсэн. $N = 6, 8, 34$ үед сувгийн эмуляторын гаралтыг хугацааны домайн дээр харвал:



Зураг 5.

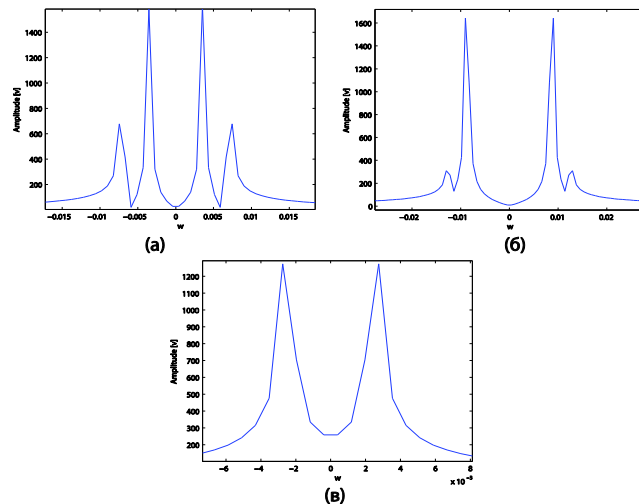
- (а) $N=6$ үед сувгийн гаралт болон түүний гаралтаас логарифм хуваарь авсан нь
- (б) $N=8$ үед сувгийн гаралт болон түүний гаралтаас логарифм хуваарь авсан нь
- (в) $N=34$ үед сувгийн гаралт болон түүний гаралтаас логарифм хуваарь авсан нь

N -н тоо ихсэх тусам SOS-н гаралт сайжирч байгаа бөгөөд энэ тохиодолд санах ойг ихээр ашиглана. $N = 6, 8, 34$ үед сувгийн эмуляторын гаралтын автокорреляцийн функцийг Бесселийн функцтэй харьцуулбал:



Зураг 6.

- (а) $N=6$ үед сувгийн эмуляторын автокорреляцийн функцийг Бесселийн функцтэй харьцуулбал
 - (б) $N=8$ үед сувгийн эмуляторын автокорреляцийн функцийг Бесселийн функцтэй харьцуулбал
 - (в) $N=34$ үед сувгийн эмуляторын автокорреляцийн функцийг Бесселийн функцтэй харьцуулбал
- $N=6, 8, 34$ автокорреляцийн функцийн Жейкс чадлын спектрийг харвал:



Зураг 7.

- (а) $N=6$ үед Жейкс чадлын спектр
- (б) $N=8$ үед Жейкс чадлын спектр

(в) $N=34$ үед Жейкс чадлын спектр

V. ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгааны ажлаар олон тархалттай сувгийн эмуляторыг SOS(Sum Of Sinusiod)-н аргыг ашиглан гүйцэтгэж MATLAB программ дээр үнэллээ. SOS-г генерацлах нийт осциллятор болох $(M+1)$ -н тоо ихсэх тусам SOS-н автокорреляци функц нь Бесселийн функц рүү дөхөж байна. Энэ нь Жейксийн спектрийг илүү нарийвчлалтай болгож байгаа юм. Хөдөлгөөнт олон тархалттай сувгийн эмулятораа үндсэн зурвас дээр хийсэн. Өөр өөр давтамжтай синусиодыг генерацлахад осциллятор шаардлагатай. Өөрөөр хэлбэл N -н утгыг хэд байхаас хамаарч $M+1$ ширхэг осциллятор хэрэгтэй болно. Давтамжууд нь хоорондоо ялгаатай осцилляторуудыг олныг хэрэглэх тусам нэмэгч хэрэглэх хэрэгтэй бөгөөд $2(M-1)+1$ нэмэгч ашиглана. Өөрөөр хэлбэл осцилляторын тоо ихсэх тусам олон нэмэгч ашиглах шаардлагатай болж байгаа. Хардверт хэрэгжүүлэхэд N -н утгыг хамгийн боломжтойгоор сонгож авах ёстой байсан бөгөөд тухайн FPGA хавтанд багтахар N -н утгыг сонгож авсан. Хамгийн боломжтой утга нь $N=34$ байна. Цаашид систем генератор дээр загварчлан FPGA хавтан дээр хэрэгжүүлнэ.

АШИГЛАСАН НОМ

- [1] [1] W.C Jakes, *Microwave Mobile Communication*. Piscatway, NJ:Press, 1994.
- [2] [2] *Multipath Fading Simulator*, Japan Radia Co., 2005
- [3] [3] *Wireless Channel Emulator*, Spirent Communications, 2006.
- [4] [4] M.Pätzold, U.Kilat, and F.Laue, "Statistical properties of Jakes' fading channel simulator," in Vehicular Technology Conf. Rec. (VTC'98), vol. II, Ottawa, ON, Canada, May 1998, pp.712-718.
- [5] Marius F.Pop and Norman C.Beraulieu, "Limitation of Sum-of-sinusiods Fading Channel Simulators", IEEE Trans.Comm., val 49, no. 4, april 2001.
- [6] Jamshiad Sarvar Malik, Ahmed Hemani, "On the Design of Doppler Filters for next Generation Radio Channel Simulators", 2009 International Conference on Signals, Circuit and Systems.
- [7] [7] *Wireless Channel Emulator*, Spirent Communications, 2006.
- [8] R. H. Clarke, "A statistical theory of mobile-radio reception," Bell System Technical Journal, vol. 47, pp. 957-1000, 1968.
- [9] M. Patzold, R. Garcia, and F. Laue, "Design of high-speed simulation models for mobile fading channels by using table lookup techniques," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 49, no. 4, pp. 1178-1190, July 2000.
- [10] Amirhossein Alimohammad, Saeed Fouladi Fard, Bruce F. Cockburn, Christian Schlege, "Improved SOS-based Fading Channel Emulator", IEEE 2007.
- [11] Cheng-Xiang Wang, Dongfeng Yuan, Senior Member, HsiaoHwa Chen, Wen Xu, "An Improved Deterministic SoS Channel Simulator for Multiple Uncorrelated Rayleigh Fading Channels", IEEE TRANSACTIONS ON WIRELESS COMMUNICATIONS, VOL. 7, NO. 9, SEPTEMBER 2008.
- [12] G.L. Stüb, *Principles of Mobile Communication*. Norwell, MA: Kluwer, 1996.
- [13] M.J.Gans "A power-spectral theory of propagation in the mobile radio environment," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. VT-21, pp. 27-28, Feb. 1972.
- [14] M.F.Pop, "Statistical Analysis of Sinusiods Fading Channel Simulators", M.Sc.thesis, Queen's Univ., Kingston, ON, Canada, 1999.
- [15] Willam C.Jakes Jr. "Microwave Mobile Communications". 1974.