

Бесселийн Респонстой Шүүлтүүр Ашигласан Хөдөлгөөнт Радио Сувгийн Эмулятор

М.Доржжамц
Монгол Улсын Их Сургууль
Электроник, Холбооны
Инженерчлэлийн тэнхим
dorjjamts@num.edu.mn

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—Радио сувгийн эмулятор хийх нь зардал болон цаг хугацааг ихээр хэмнэж чаддаг. Энэхүү судалгааны ажлаар олон замын тархалтат хөдөлгөөнт Рэлей радио сувгийн загварыг гарган авч хэрэгжүүлэлт хийхийг зорилго. Сувгийн загварыг гаргахдаа tapped-delay-line загварыг ашигласан. Ингэхдээ сувгийн коэффициентийг Бесселийн импульсийн тодорхойлогчтой Жакес чадлын спектртэй шүүлтүүрээр Гаусс цагаан шуугианыг(ГЦШ) нэвтрүүлэх замаар гарган авлаа. Шүүлтүүрийг infinite impulse response (IIR) архитектураар гарган авсан. Шүүлтүүрийн коэффициентүүдийг MATLAB програмын iirprogm функцыг ашиглан гаргаж энэхүү програм дээр үнэлгээ хийсэн.

Түлхүүр үгс— Жакес спектр, IIR шүүлтүүр, Допплер давтамж.

I. УДИРТГАЛ

Хөдөлгөөнт холбоо нь хэрэгцээ шаардлага дагаад маш хурдацтай хөгжиж байна. Үүнийгээ дагаад шинэ технологи судалгааны ажлууд ихээр хийгдэж байна. Утасгүй холбоонд радио долгион нь хүлээн авагчид ирэхдээ анхны байдлаасаа гаждаг. Энэхүү гажилт нь хүлээн авагч мэдээллийг сэргээн авахад хүндрэл учруулдаг.

Дамжуулагчаас хүлээн авагч хүрэх орчинг радио суваг гэдэг. Радио долгионд сувгийн хүчин зүйлүүд ихээр нөлөөлдөг тухайлбал: цаг агаарын байдал, хүлээн авагч болон дамжуулагчийн хурд, орчны саад гэх мэт. . . Шинэ холбооны систем, модуляцийн техник, кодлолуудыг хэрэгжүүлж үнэлэхдээ суваг дээр туршилт хийх шаардлага гарч ирдэг. Бодит радио суваг дээр туршилт хийх нь зардал өндөртэй бөгөөд цаг хугацаа ихээр шаарддаг. Харин радио сувгийн загварыг математик болон статистик тооцооллын үндсэн дээр дуурайлган хийх нь зардал бага, цаг хугацаа хэмнэж мөн хүссэнээрээ сувгийн параметруудийг өөрчлөх боломжийг олгодог.

Хөдөлгөөнт олон замын тархалтат радио суваг нь комплекс Гауссын Wide Sense Stationary(WSS) процесс байдаг $c(t) = c_i(t) + jc_q(t)$ [1]-[3]. c_i болон c_q -н автокорреляцийн функц нь $R_{c_i, c_q}(\tau) = R_{c_i, c_i}(\tau) = J_0(2\pi f_D \tau)$ -р тодорхойлогдоно. f_D нь хамгийн их Допплерийн давтамж харин $J_0()$ нь тэг эрэмбийн нэгдүгээр зэргийн Бесселийн функц юм[3]. Харин c_i болон c_q -н Жакес[4] чадлын спектртэй байх ба үүнийг томъёо 1-т харууллаа:

$$S_i(f) = S_q(f) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi f_D \sqrt{1 - (\frac{f}{f_D})^2}} & , |f| < f_D \\ 0 & , |f| \geq f_D \end{cases} \quad (1)$$

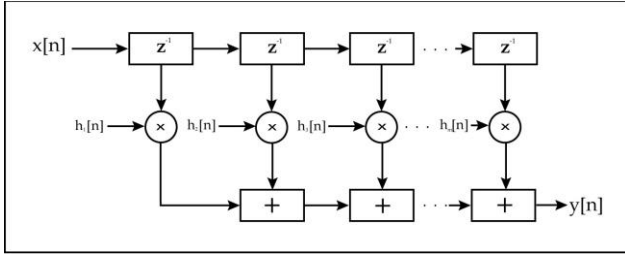
Хоёр төрлийн аргыг олон замын тархалтат хөдөлгөөнт радио сувгийн эмулятор хийхэд ихээр ашигладаг. Эхний арга нь sum-of-sinusoid(SOS) буюу Кларкийн арга юм[5]. Энэхүү арга нь сувгийн шинж чанараас хамаарч оролтын дохион дээр синусойдуудыг нэмж гаргадаг. Хоёр дахь арга нь шүүлтүүрт суурилсан tapped-delay-line-аар загварчлах арга юм.

Энэхүү судалгааны ажлаар радио сувгийг загварчлах олон арга байдгаас шүүлтүүрт суурилсан tapped-delay-line-ыг ашиглан утасгүй хөдөлгөөнт радио сувгийг загварчилсан[3]. Энэхүү арга нь төхөөрөмж дээрх хэрэгжүүлэлт хийхэд хялбар бөгөөд илүү хурдтай болох юм. Зураг 1-т tapped-delay-line загварыг харууллаа. Бесселийн импульс респонстой Жакес спектр бүхий дамжууллын функцтэй шүүлтүүрээр ГЦШ оруулах замаар Зураг(1)-н сувгийн коэффициентүүд болох $(h_1[n], h_2[n], \dots, h_m[n])$ -ийг гарган авна.

II. ОЛОН ЗАМЫН ТАРХАЛТАТ ХӨДӨЛГӨӨНТ СУВАГ

Тоон системд дамжууллын суваг нь Нэмэгдсэн Гаусс Цагаан Шуугиан(НГЦШ-AWGN)[3]тай байдаг. Харин утасгүй хөдөлгөөнт холбооны системд сувагт зөвхөн шуугиан нэмэгдээд зогсохгүй үржигдэн замхралт(fading) явагддаг. Учир нь хүлээн авагч дамжуулагчаас цацсан дохиог сувгийн саадаас хамаарч өөр өөр өнцгөөс ойн ирсэн олон дохионы нийлбэрийг хүлээн авдаг. Хугацааны хувьд өөрчлөлттэй олон замын тархалтат сувгаар ганц импульс илгээхэд хүлээн авагчид далайц нь өөр өөр импульсын цуваа мэтээр ирнэ.

Хэрэв хүлээн авагч дамжуулагч нь хөдөлж байвал энэ нь санамсаргүй процесс болох юм. Үүнээс гадна дохион дээр шуугиан болон зайнаас хамаарч чадлын алдагдал явагдана. Хөдөлгөөнт холбооны системд хоёр төрлийн замхралт байдаг гэж үздэг өргөн хүрээний замхралт(large-scale fading), жижиг хүрээний замхралт(small-scale fading).



Зураг 1. tapped-delay-line загвар

$$y(t) = \sum_{k=1}^K \alpha_k x(t - \tau_k) e^{j\omega D_k} + n(t) \quad (2)$$

$y(t)$ - хүлээн авагчийн дохио

a_k - k -р замын далайц

τ_k - k -р замын хугацааны хоцрогдол

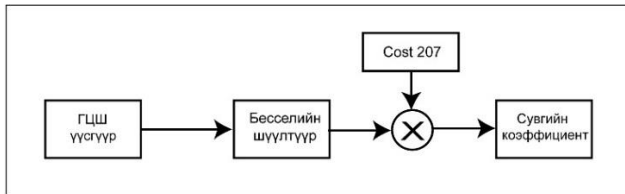
ωD_k - k -р замын Допплерийн шилжилт

K - долгион ойх замын тоо

$x(t)$ - дамжуулсан дохио

$n(t)$ - сувгийн шуугиан

Олон замын тархалтат хөдөлгөөнт сувгаар дамжсан дохиог томъёо (2)-г харууллаа[5]. Энэхүү сувгийн загварыг бид шүүлтүүрт суурилсан tapped-delay-line-р гарган авсан. Үүнийг зураг(2)-г харуулсан. Cost 207 -нь дундаж чадлын дилэй профайл (delay profile)[4] ба үүнийг томъёо(3)-г харууллаа.



Зураг 2. Сувгийн коэффициент

$$P_m(\tau) = \begin{cases} e^{-\tau}, & 0 < \tau < 7\mu s \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

Сувгийн коэффициентийг хэрхэн гаргаж авахыг зураг(2)-г харууллаа.

III. ШҮҮЛТҮҮРИЙН ДИЗАЙН

Жакес спектр бүхий шүүлтүүрийн импульс респонс нь Бесселийн функцаар тодорхойлогддог. Бид хэрэгжүүлэлтийг тоон систем ашиглан гүйцэтгэх учир функцүүдыг тасралттай утгаар илэрхийлэх хэрэгтэй. Бесселийн функцийг тасралттай утгаар хэрхэн илэрхийлснийг доор харууллаа:

$$\hat{J}[n] = J_0(2\pi f_D n T_s) \quad n \in Z \quad (4)$$

$$\hat{S}_i(\omega) = \hat{S}_q(\omega) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi\omega_D \sqrt{1 - (\frac{\omega}{\omega_D})^2}}, & |\omega| < \omega_D \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

Томъёо 4-г T_s нь түүвэрлэлт хийх хурд ($T_s = \frac{1}{f_s}$), Томъёо 5-н ω_D нь хамгийн их Допплерийн нормчилсон давтамж юм ($\omega_D = \frac{f_d 2\pi}{f_s}$).

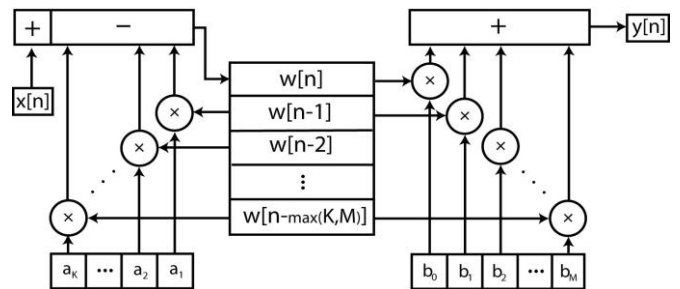
Энэхүү судалгааны ажлаар бид IIR шүүлтүүрийн аргаар хэрэгжүүлэлтийг хийсэн. IIR шүүлтүүрийн коэффициентүүдийг тохиромжтой утгаар сонгон авах нь чухал юм. Шүүлтүүрийн дамжууллын функц нь дараах байдлаар тодорхойлогддог

$$H(z) = \frac{\sum_{k=1}^M b_k z^{-k}}{1 - \sum_{l=1}^N a_l z^{-l}} \quad (6)$$

Томъёо 6-н хүртвэр хуваарийн гишүүд a, b -н утга болон харгалзан N, M нь бага байх нь хэрэгжүүлэлтийг хялбар бөгөөд хурдан байлгаж чадна гэвч алдаа их байх сул талтай юм. Иймээс хамгийн боломжит N, M -ийн утгыг үнэлэн олох нь чухал юм.

$$\min_{a,b} ||S(\omega) - H(\omega)||^2 \quad (7)$$

Бид шүүлтүүрийн a, b коэффициентийг MATLAB програмын `iirlpnorm`[7] функцийг ашиглан гаргасан. N, M -ийн боломжит утгыг сонгохдоо `iirlpnorm` функцийг боломжит бүхий л утгаар бодон үр дүнд нь анализ хийсний үндсэн дээр гарган авсан. Дизайныг хялбар хурдан болгох үүднээс IIR шүүлтүүрийн Direct form II[6] аргыг ашиглалаа. Direct form II-н загвар болон хэрэгжүүлэлтийн архитектурыг дараах зураг(3)-г харууллаа.

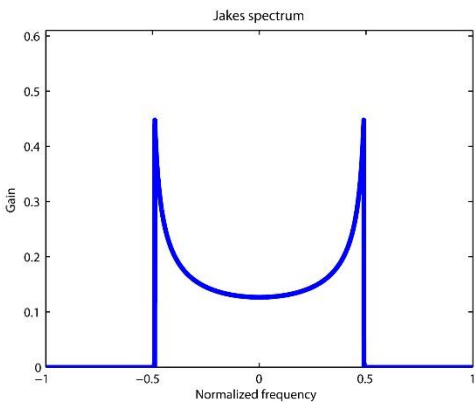


Зураг 3. IIR шүүлтүүрийн Direct form 2 архитектур

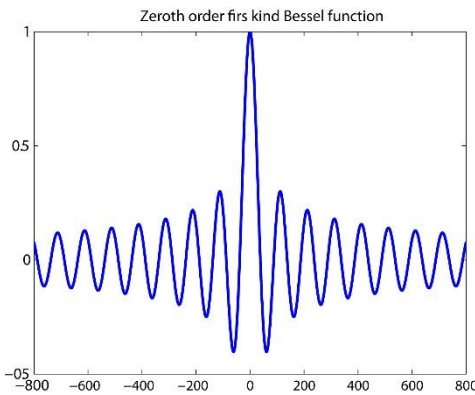
A. Бесселийн респонстой шүүлтүүрийн загвар

Хөдөлгөөнт радио сувгийн Допплерын давтамж нь түүвэрлэлтийн давтамжтай харьцуулахад харьцангуй бага байдаг. Жишээ нь үүрэн холбооны тоон систем болох DSC1800(GSM1800)[2]-д зөөгч давтамж $f_c = 1.8$ ГГц байдаг. Хэрэв хүлээн авагчийн дээд хурд нь 200 км/цаг гэж үзвэл хамгийн их Допплерийн давтамж

нь $f_D = \frac{vf_c}{c} = 333.3\text{Гц}[8]$ болно. Үүний $c = 300\text{Мм/сек}$ буюу гэрлийн хурд. Хэрэв түүвэрлэлтийн хурд нь $f_s = 20\text{МГц}$ байвал нормчилсон давтамжаар $f_{Dn} = \frac{f_D 2\pi}{f_s} = 0.000104$ болно. Энэ нь шүүлтүүрийн хэрэгжүүлэлт хийхэд хүндрэлтэй болох юм. Иймээс бид түүвэрлэлтийн хурдыг багаар сонгон авч шүүлтүүрийн коэффициентийг бодуулсны дараа түүвэрлэлтийн хурдыг дээш түүвэрлэлт(upsample) болон доош түүвэрлэлт(downsample) ашиглан нэмэгдүүлж интерполяциар бодит респонсыг гарган авч байгаа. Зураг (4)-т шүүлтүүрийн импульс респонс тэгдүгээр эрэмбийн нэгдүгээр төрлийн Бесселийн функц болон дамжууллын функц Жакес спектрийг харууллаа.



(a)

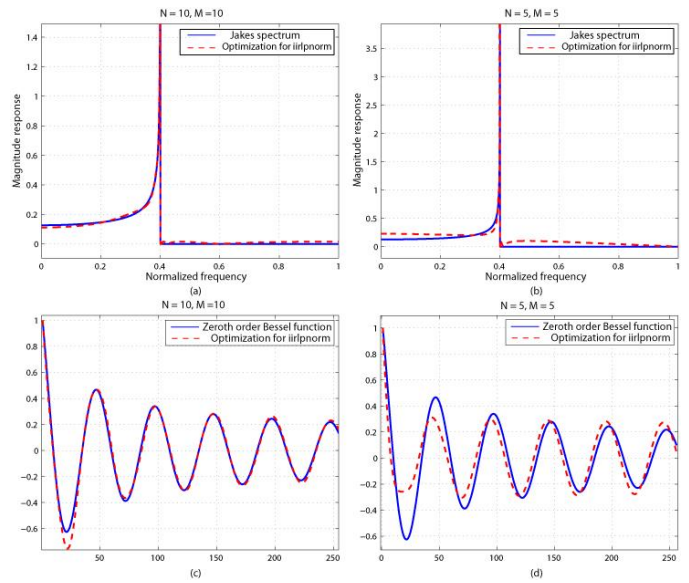


(b)

Зураг 4. (a) Тэг эрэмбийн нэгдүгээр төрлийн Бесселийн функц
(b) Жакес чадлын спектр

IV. ТУРШИЛТ, ҮР ДҮН

Бид судалгааны ажлын хүрээнд дараах туршилт үнэлгээнүүдийг үе шаттайгаар хэрэгжүүлсэн. ИР шүүлтүүрийн дамжууллын функц нь томъёо (6)-р тодорхойлогдоно. Шүүлтүүрийн хүртвэр хуваарь болох a, b - н утгыг хамгийн боломжит утгаар сонгож авах нь чухал юм. Үүнээс гадна хүртвэр хуваарийн хэмжээ N, M - г хамгийн боломжит утгаар сонгох хэрэгтэй. Зураг(6)-т шүүлтүүрийн коэффициентээс хамаарч респонс хэрхэн өөрчлөгдөж байгааг харуулах болно.



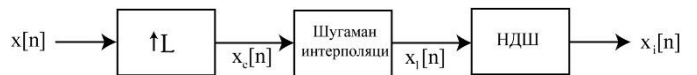
Зураг 6. (a) Шүүлтүүрийн коэффициент $N=10, M=10$ далайцын спектр
(b) далайцын спектр $N=5, M=5$ (c) Импульс респонс $N=10, M=10$
(d) Импульс респонс $N=10, M=10$

Хүссэн респонстой шүүлтүүрээ хэрхэн гарган авах талаар бүлэг (III)-т дурдсан. Түүвэрлэлтийн хурдыг нэмэгдүүлэхдээ интерполяцийн аргыг ашиглаж байна. Интерполяцийн аргыг зураг(5)-т харууллаа. Үүний $x_e[n]$ нь L -р дээш түүвэрлэлт хийгдсэн утга. x_r -нь $x_e[n]$ -ийг шугаман интерполяци хийсэн утга. Харин x_i -нь L дахин түүвэрлэлт нь нэмэгдсэн утга байна. Үүний Нам Давтамжийн Шүүлтүүр(НДШ) нь $f_c = \frac{\pi}{L}$ резонансын давтамжтай НДШ юм. Учир нь $x_e[n]$ -ийн спектр нь давтамжийн тэнхлэгийн дагуу L дахин багасна. Зураг(7)-т сувгийн коэффициентуудын автокореляцийн функц болон тэгдүгээр эрэмбийн Бесселийн функцтай харьцуулсан графикийг харууллаа. Харин Зураг(9)-т сувгийн коэффициентуудын хөвөөны түгэлтийг харууллаа. Энэхүү түгэлтийн функц нь Рэлея түгэлттэй байна.

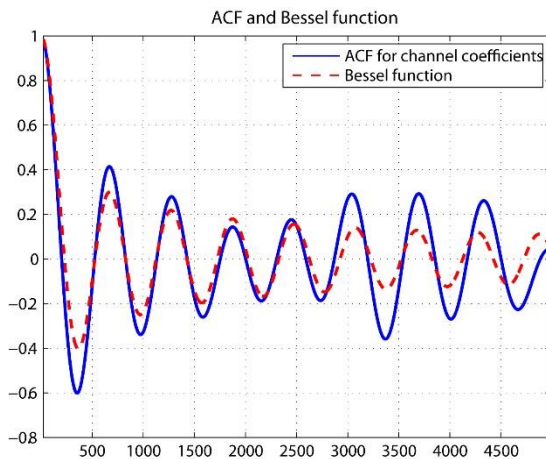
$$x_e = \begin{cases} x[n/L], n = 0, \pm L, \pm 2L, \dots \\ 0, \text{otherwise} \end{cases}$$

$$h_{in}[n] = \begin{cases} 1 - |n|/L, |n| \leq L \\ 0, \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

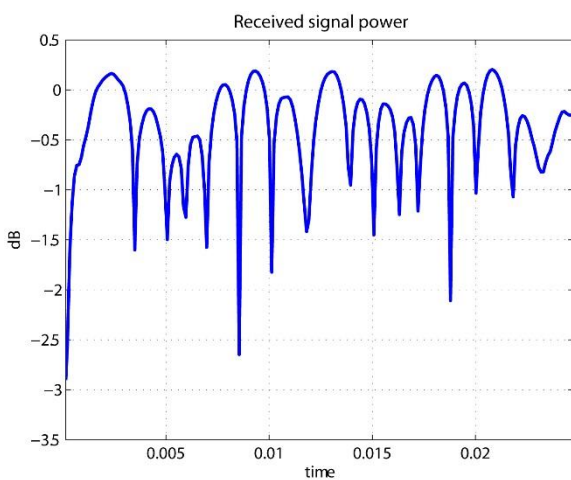
$$x_i[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x_e[k] h_{in}[n-k]$$



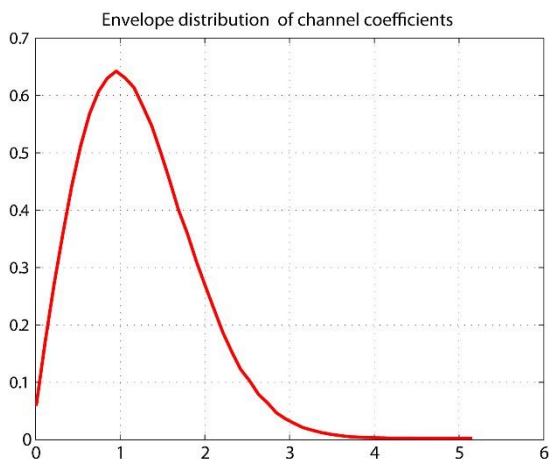
Зураг 5. Түүвэрлэлтийн хурд нь L дахин нэмэгдэх систем



Зураг 7 Сувгийн коэффициентийн автокореляцийн функц. 1000 угта.



Зураг 8. Хүлээн авагч тал дахь дохионы чадал



Зураг 9. Сувгийн коэффициентүүдийн хөвөөний түгэлт

V. ДҮГНЭЛТ

Хөдөлгөөнт радио сувгийн загварыг шүүлтүүрийн арганд суурилсан tapped-delay-line моделиг ашиглан загварчилж MATLAB програм ашиглан үнэлгээг хийлээ. Бодит болон хуурмаг оролтыг хоорондоо хамааралгүй хоёр загвараар гаргана. Түүвэрлэлтийн хурд болон хамгийн их Допплерын давтамжийн харьцаа бага гарч байгаа нь судалгааны ажлын явцад тулгарсан гол асуудлуудын нэг байлаа. Үүнийг интерполяцийн аргаар шийдэж өгснөөр шүүлтүүрийн коэффициентуудыг өөрчлөхгүйгээр респонсыг өөрчлөх давуу талтай болж байна. Хэрэгцээнээс хамаараад шүүлтүүрийн респонс болон тар-ийн тоог хүссэнээрээ өөрчлөх бөгөөд төрөл бүрийн судалгааны ажлын суурь болгох боломжтой юм .

Энэхүү судалгааны ажлыг өргөжүүлэн олон оролт олон гаралттай(Multiple-Input Multiple-Output(MIMO)) системийн сувгийг хийх боломжтой юм. Цаашлаад судалгааны үр дүнгээс хамааруулан төхөөрөмжийн хэрэгжүүлэлт хийх болно.

НОМ ЗҮЙ

- [1] P. Bello, "Characterization of randomly time-variant linear channels," IEEE Trans. Commun., vol. 11, no. 4, pp. 360–393, 1963.
- [2] Alimohammad, A Fard, S.F., Cockburn, B.F. Schlegel, C. "A Compact Single-FPGA Fading-Channel Simulator," IEEE Trans. Commun., vol. 00, no. 0, pp. 84–88, 2008.
- [3] J. G. Proakis, *Digital communication*. Piscataway, NJ: McGraw-Hill Press, 2001.
- [4] W. C. Jakes, *Microwave Mobile Communications*. Piscataway, NJ: Wiley-IEEE Press, 1994.
- [5] A. Alimohammad, S. F. Fard, B. F. Cockburn, and C. Schlegel, "An improved SOS-based fading channel emulator," in IEEE Veh. Tech. Conf., 2007.
- [6] A. V. Oppenheim and R.W.Schafer *Discrete-Time Signal Processing* NJ: Prentice Hall Press, 1999
- [7] Filter Design Toolbox For Use with Matlab, User's Guide, The Mathworks, 2005.
- [8] M.Patzold "Selected Topics in Mobile Fading Channel Modelling," in IEEE Conf