

MIMO Системийн Эквалайзеруудын Чадамжийн Харьцуулалт

Б.Золбоо

Электроник, Холбооны
Инженерчлэлийн Тэнхим
Хэрэглээний Шинжлэх Ухаан,
Инженерчлэлийн Сургууль
Монгол Улсын Их Сургууль
b.zolboo@num.edu.mn

Д.Бямбажав

Электроник, Холбооны
Инженерчлэлийн Тэнхим
Хэрэглээний Шинжлэх Ухаан,
Инженерчлэлийн Сургууль
Монгол Улсын Их Сургууль
byambajav@num.edu.mn

М.Баярпүрэв

Электроник, Холбооны
Инженерчлэлийн Тэнхим
Хэрэглээний Шинжлэх Ухаан,
Инженерчлэлийн Сургууль
Монгол Улсын Их Сургууль
bayarpurev@num.edu.mn

Хураангуй— Олон-Оролт Олон-Гаралттай (MIMO) холбооны систем нь дохио шуугианы харьцаа (SNR)-г өсгөх бөгөөд сувгийн багтаамжийг ихэсгэнээр зурвасын ашиглалтыг сайжруулдаг. Хүлээн авсан дохионууд хоорондын орон-зайн интерференцийг арилгах, мэдээллийг сэргээхэд эквалайзер ашигладаг. MIMO хүлээн авагчид зориулсан хэд хэдэн эквалайзерууд байдаг. Тухайлбал шугаман эквалайзерууд (zero-forcing (ZF), minimum mean square error (MMSE)), интерференц дарагч V-Blast, бага оворын Maximum Likelihood илрүүлэгч QRM-MLD г.м. Энэхүү судалгааны ажлаар бид MIMO системийг дээрх эквалайзеруудын хамт MATLAB програм ашиглан чадамжуудыг харьцуулсан.

Турхуур үз— FPGA, MIMO, Zero-forcing, MMSE, V-Blast, QRM-MLD

I. УДИРТГАЛ

Утасгүй холбооны технологи нь хүн төрөлхтний хамгийн чухал нээлтүүдийн нэг билээ. Сүүлийн арван жилд гэхэд хүн бүрийн өдөр тутмын хэрэглээний зайлшгүй нэгэн хэсэг болж чадсан. 3G технологи нэвтэрснээш хойш текстэн болон яриан мэдээллээс гадна мультимедиа дохионууд дамжигдах шаардлагатай болсон. Энэ нь өгөгдөл дамжуулах хурд нөгөө талаас их хэмжээний зурвасын өргөн шаарддаг. Харамсалтай нь утасгүй холбоонд ашиглах зурвасын өргөн нь хязгаарлагдмал нөөц юм. Гэсэн хэдий ч тодорхой зурвасын өргөнөөр MIMO системийг ашиглан өгөгдөл дамжуулан нь сувгийн ашиглалтыг сайжруулах боломжтой юм. Өөрөөр хэлбэл дамжуулагч болох хүлээн авагчийн антенны тоог ихэсгэнээр дохио шуугианы харьцаа сайжирдаг. Бодит амьдрал дээр нэг-оролт нэг-гаралттай буюу нэг антеннаар дохиог дамжуулахад цахилгаан соронзон долгион нь олон замаар тархан хүлээн авагчид ирдэг. Энэ нь тэмдэгт хоорондын интерференцийг ISI үзүүлдэг бөгөөд OFDM систем ашигласнаар дарж чаддаг. Харин олон-оролт олон-гаралттай системийг ашиглахад антенн хоорондын буюу орон-зайн интерференцид ордог бөгөөд тэрхүү нөлөөг арилгахын тулд хүлээн авагч дээр эквалайзер ашигладаг. Энэхүү судалгааны ажлаар

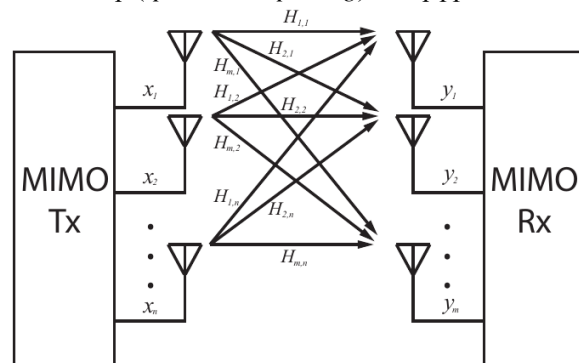
шугаман болон холимог бүтэцтэй эквалайзеруудын чадамжийг харьцуулах болно.

II. MIMO СУВГИЙН ЗАГВАРЧЛАЛ

MIMO системд зориулсан үр ашигтай холбооны системийн дизайн гаргах, чадамжийн хязгаарыг мэдэхэд байгалийн MIMO сувгийг судлах нь чухал ач холбогдолтой. M_T нэвтрүүлэх антенн ба M_R хүлээн авах антеннтай системийн хувьд ашиглах зурвасдаа *frequency-flat fading* гэж үзвэл агшин зуурын суваг нь $M_R \times M_T$ хэмжээтэй матрицаар илэрхийлэгднэ.

$$H = \begin{bmatrix} H_{1,1} & H_{1,2} & \cdots & H_{1,M_T} \\ H_{2,1} & H_{2,2} & \cdots & H_{2,M_T} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{M_R,1} & H_{M_R,2} & \cdots & H_{M_R,M_T} \end{bmatrix} \quad (1)$$

энд, $H_{m,n}$ бол n -дэх нэвтрүүлэх болон m -дэх хүлээн авагч антеннууд хоорондын (нэг-оролт нэг-гаралттай) сувгийн өсгөлт юм. H матрицын n -дэх багана нь n -дэх нэвтрүүлэгч антенны хүлээн авагч антенн бүр дээрх үйлчлэх орон зайн нөлөөллийг илтгэнэ. Дээрх орон зайн нөлөөллийн геометр хамаарал нь хүлээн авагч дээр нэвтрүүлэх антенн болгоны мэдээллийг ялгахад тусладаг. Орон-зайн сэлгэлтээр (*spatial multiplexing*) нэвтрүүлэх антенн



Зураг 1. MIMO сувгийн загварчлал

бүрээр хоорондоо хамааралгүй мэдээллийг дамжуулдаг бөгөөд энэ үед сувгийн матрицыг мэдэх нь чухал ач холбогдолтой байдаг.

MIMO сувгийн нэг-оролттой нэг-гаралттай сувгийг бүрдүүлж буй сувгийн өсгөлтүүдийг тэгдундажтай тэгш хэмтэй комплекс Гауссын түгэлттэй санамсаргүй хувьсагч гэж үзэх нь нийтлэг байдаг. Түүнчлэн, $|H_{m,n}|$ далайцууд нь Рэлейн түгэлттэй санамсаргүй хувьсагч болох ба $|H_{m,n}|^2$ чадлууд нь экспоненциал түгэлтэнд захирагдна [1].

III. MIMO-OFDM СИСТЕМИЙН ЗАГВАРЧЛАЛ

MIMO-OFDM системийн оролт-гаралтын хамаарлыг тэгшитгэл (2)-д харуулав.

$$y = Hx + n \quad (2)$$

энд, n бол $N_0/2$ вариациятай, орон зай болон хугацааны хувьд тэг дундажтай тэгш хэмтэй комплекс Гауссын шуугианы вектор болно. x -н Maximum Likelihood (ML) илрүүлэлт нь нормын квадратыг x -ийн бүх боломжит утгаас хамааруулж минимумчилах шаардлагатай.

$$\hat{x} = \underset{x}{\operatorname{argmin}} \|y - Hx\|_F^2 = \underset{x}{\operatorname{argmin}} \left| \sum_{i=1}^{M_R} \left| y_i - \sum_{j=1}^{M_T} h_{i,j} x_j \right|^2 \right| \quad (3)$$

энд, $h_{i,j}$ бол сувгийн H матрицын (i,j) -дэх коэффициент бөгөөд тэгшитгэлийн баруун гар талаас x -н утга бүр дээр $M_R \times M_T$ нийлбэр хийх шаардлагатай нь харагдаж байна. x вектор нь $M_R \times 1$ хэмжээтэй ба 2^{QM_T} боломжит утгатай байж болох бөгөөд 2^Q нь ашиглагдсан модуляцын хэмжээ, Q нь нэгж дохион дахь битийн тоо юм. Эдгээр нь тэгшитгэл (3)-дахь нормын тооцооллын тоо бөгөөд Q, M_T хэмжээнээс хамаарч ML хүлээн авагч дахь тооцооллын хэмжээ экспоненциалаар өсдөг. Дээрх асуудлаас болж цөөхөн антеннаар нэвтрүүлэх эсвэл тэмдэгтийн тоог багаар сонгодог. Гэвч ML-тэй адилхан чадамжтай мөн хэмжээ багатай илрүүлэгчийн алгоритмууд байдаг [1].

IV. MIMO ХҮЛЭЭН АВАГЧИЙН ЭКВАЛАЙЗЕРУУД

MIMO системийн хүлээн авагчийн хэд хэдэн эквалайзерын дизайн байдаг. Эквалайзеруудын алгоритмаас хамаарч хэмжээ, хурд болон алдааны магадлалууд нь өөр өөр байна.

A. Шугаман эквалайзер

Хүлээн авсан дохиог дараах байдлаар шугаман боловсруулалт хийнэ:

$$\tilde{x} \triangleq Wy = WHx + Wn \quad (4)$$

энд сувгийн матриц WH нь диагональ матрицруу дөхсөн байх ба энэ нь x -н нэгж тус бүрийг тусд нь илрүүлэх боломж олгоно. Боловсруулалт хийх W матриц нь WH матрицын диагональ бусад элементүүдийг тэг болгох ба ZF хүлээн авагчийн үед:

$$W = H^\dagger = (H^H H)^{-1} H^H \quad (5)$$

(H^\dagger бол H -н Moore-Penrose хуурмаг урвуу матриц) эсвэл шүүгдсэн шуугиан Wn болон WH матрицын диагональ бусад элементүүдийн бусаддаа үзүүлэх нөлөөг минимумчилах (дундаж квадратлаг алдаагаараа хамгийн бага байдаг шугаман хүлээн авагч LMMSE):

$$W = (H^H H + \frac{N_0}{E} I)^{-1} H^H \quad (6)$$

энд E нь x векторын нэг бүрэлдэхүүн хэсгийн дундаж энерги, N_0 нь шуугианы вариация, I бол $M_T \times M_R$ хэмжээтэй нэгж матриц. Шугаман эквалайзерууд хялбархан ба хэмжээ бага боловч чадамжийн хувьд сайн байж чададгүй [2], [3].

B. Гэдрэг-холбоот эквалайзер (QRМ-MLD)

Сувгийн H матрицыг доорх байдлаар үржвэрт задалж болно [4]:

$$H = QR \quad (7)$$

$M_R \geq M_T$ тохиолдолд $Q^H Q = I_{M_T}$ ба R матриц нь $M_T \times M_T$ хэмжээтэй дээд гурвалжин матриц байна [5]. Дээрх аргыг ашиглан хүлээн авсан векторыг Q^H матрицаар үйлчилвэл:

$$\tilde{y} = Q^H y = Rx + Q^H n = Rx + \tilde{n} \quad (8)$$

дээрх хувиргалтанд үүсэх $\tilde{n} = Q^H n$ шуугианы вектор нь анхны n шуугианы шинж чанарыг хадгалж үлднэ. Эндээс $m(x) \triangleq \|y - Hx\|_F^2$ зайн хамгийн багыг бодох нь доорх байдлаар бодогдох нь харагдаж байна.

$$\tilde{m}(x) \triangleq \|\tilde{y} - Rx\|_F^2 \quad (9)$$

R матриц нь дараах илрүүлэлт хийх боломж олгоно:

Эхэнд $|\tilde{y}_{M_T} - r_{M_T, M_T} x_{M_T}|^2$ -г минимумчилснаар буюу Maximum Likelihood аргаар x_{M_T} -г илрүүлнэ. Дараа нь илрүүлсэн \hat{x}_{M_T} -г ашиглан, $|\tilde{y}_{M_T-1} - r_{M_T-1, M_T-1} x_{M_T-1} - r_{M_T-1, M_T} \hat{x}_{M_T}|^2 + |\tilde{y}_{M_T} - r_{M_T, M_T} \hat{x}_{M_T}|^2$ -г мөн адилхан минимумчилснаар x_{M_T-1} -г илрүүлж олно. Дээрх зарчмаар хүлээн авагч антенны тоогоор давтаж хийнэ. Энэ алгоритмыг ашиглах үед тодорхой x -г илрүүлэх үед алдаа гарвал түүнээс хойшхи бүх элементийг алдаатай илрүүлдэг сул талтай.

C. V-Blast

Дэд-оптимал хүлээн авагчдын нэг V-Blast нь 3 ерөнхий үйлдэл дээр суурилсан.

1) *Орон-зайн интерференцийг арилгах.* Бүх i - н хувьд y_i утгуудыг шугаман үйлдэл хийж \tilde{y}_i гаргаж авах.

2) *Орон-зайн интерференцийг үл тооцох.* Доор үзүүлсэн байдлаар функцийг энгийн хэлбэрт оруулна.

$$f(\tilde{y}|x_i, x_{i+1}, \dots, x_{M_T}) \approx f(\tilde{y}|x_i, \hat{x}_{i+1}, \dots, \hat{x}_{M_T}) \quad (10)$$

3) *Эрэмблэх.* SNR-н хэмжээгээр нь антеннуудаа эрэмбэлэн дээрх 2 үйлдлийг сонгож хийнэ [6], [7].

a. Zero-forcing V-Blast:

V-Blast илрүүлэгчийн хэд хэдэн төрөл бий. Zero-forcing V-Blast нь сувгийн H матрицыг тэгшитгэл (7)-д харуулснаар QR задаргаанд оуулна:

$$W(H) = Q^\dagger \quad (11)$$

тиймээс,

$$W(H)y = Rx + Q^\dagger \quad (12)$$

R бол дээд гурвалжин матриц, $j = 1, \dots, t$ байх x_j -д зөвхөн $i = 1, \dots, \min\{M_T, M_R\}$ байх бүх \tilde{y}_i нөлөө үзүүлнэ. Илрүүлэх алгоритмын анхны болон нэг удаагийн тооцооллыг доор харуулав.

$$\hat{x}_{M_T} = \underset{x}{\operatorname{argmax}} f(\tilde{y}_{M_T}|x_{M_T}) \quad (13)$$

$$\hat{x}_i = \underset{x}{\operatorname{argmax}} f(\tilde{y}_i|x_i, \hat{x}_{i+1}, \dots, \hat{x}_{M_T}) \quad (14)$$

Үүнд, $i = M_T - 1, \dots, 1$ байх ба дээрх үйлдлийг M_T удаа давтаж хийнэ.

b. LMMSE V-Blast:

Доор үзүүлсэн квадратлаг алдааны дунджыг минимумчилснаар LMMSE V-Blast аргыг хэрэгжүүлдэг. (Үүнд, G болон \hat{R} үл мэдэгдэх матрицууд ба \hat{R} матриц дээд гурвалжин матриц байна, өөрөөр хэлбэл $i \leq j$ байхад $R_{i,j} = 0$ байна.)

$$\varepsilon^2(G, \hat{R}) \triangleq \mathcal{E}[\|Gy - \hat{R}x - x\|_F^2] \quad (15)$$

$$= \mathcal{E}[\|(GH - \hat{R} - I)x + Gn\|_F^2] \quad (16)$$

$$= \mathcal{E}[\|(GH - \hat{R} - I)\|_F^2 + N_0\|G\|_F^2] \quad (17)$$

Оптимальн матрицуудыг олохын тулд эхлээд Холецкийн задаргаа хийх хэрэгтэй [7].

$$H^\dagger H + \delta_S I_t = S^\dagger S \quad (18)$$

Энд, S бол дээд гурвалжин матриц бөгөөд G болон \hat{R} матрицууд дараах байдлаар олдоно.

$$\begin{cases} G = \operatorname{diag}^{-1}(S)(S^\dagger)^{-1}H^\dagger \\ \hat{R} = \operatorname{diag}^{-1}(S)S - I \end{cases} \quad (19)$$

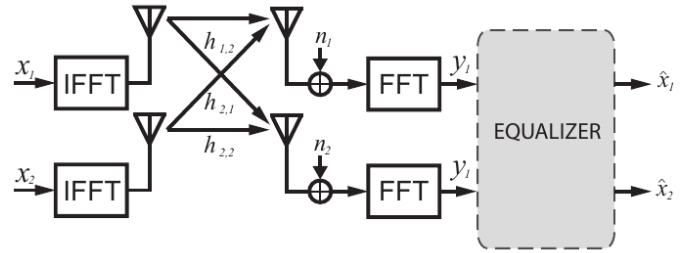
MMSE V-Blast-н ерөнхий матриц нь дараах байдлаар бичигднэ:

$$A(H) = G \quad (20)$$

Илрүүлэх алгоритм нь $R = I + \hat{R}$ үеийн ZF V-Blast алгоритмтай адилхан ажиллана [6]. Дохио-шуугианы харьцааг ашигласнаар MMSE V-Blast нь ZF V-Blast-с илүү чадамжтай байдаг.

V. 2x2 MIMO-OFDM СИСТЕМИЙН ХЭРЭГЖҮҮЛЭЛТ

Нэвтрүүлэгч болон хүлээн авагчийн антенны тоо ижил 2 бөгөөд ерөнхий схемийг блок диаграмаар Зураг 2-д харуулав.



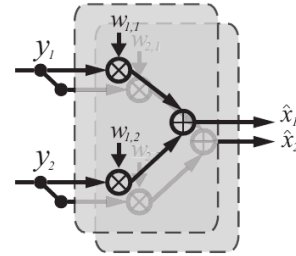
Зураг 2. MIMO-OFDM системийн хүлээн авагчийн ерөнхий схем

A. Шугаман эквалайзерын хэрэгжүүлэлт

Шугаман төрлийн хүлээн авагчдын ерөнхий тэгшитгэлийг (21)-д, хэрэгжүүлэлтийн дотоод бүтцийг Зураг 3-д харуулав.

$$\hat{x} = Wy = \begin{bmatrix} w_{1,1} & w_{1,2} \\ w_{2,1} & w_{2,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Энд, эквалайзерын W матриц нь ZF үед тэгшитгэл (5)-н, квадратлаг алдааны дунджаар хамгийн бага байлгах үед тэгшитгэл 6-н дагуу байна.

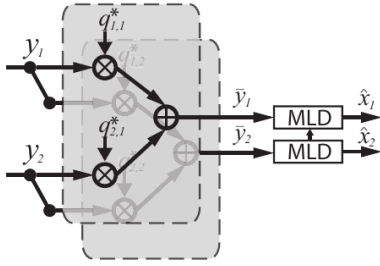


Зураг 3. Шугаман эквалайзерын ерөнхий схем

B. QRM-MLD хэрэгжүүлэлт

Тэгшитгэл (7)-д заасны дагуу сувгийн H матрицыг QR хэлбэрт задална. Ингэхдээ Грам-Шмидтийн процедурын дагуу ортогоналчилах үйлдлийг хийнэ.

$$Q^H = \begin{bmatrix} q_{1,1}^* & q_{2,1}^* \\ q_{1,2}^* & q_{2,2}^* \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} \\ 0 & r_{2,2} \end{bmatrix} \quad (22)$$

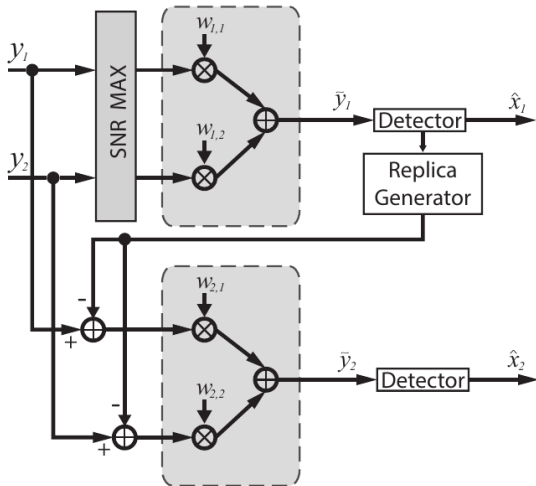


Зураг 4. QRM-MLD эквалайзерын блок диаграм

Зураг 4-д $\tilde{y}_2 = r_{2,2}x_2 + \tilde{n}_2$ байх ба MLD аргаар \hat{x}_2 -г илрүүлнэ. Харин $\tilde{y}_1 = r_{1,1}x_1 + r_{1,2}x_2 + \tilde{n}_1$ байх ба өмнө нь илрүүлсэн \hat{x}_2 -г ашиглан орон-зайн интерференцийг арилгаснаар \hat{x}_1 -г илрүүлнэ.

C. V-Blast хүлээн авагчийн хэрэгжүүлэлт

Хүлээн авсан антенн болгоны дохио-шуугианыхарьцааг харьцуулж тухайн тохиолдолд аль их SNR-тай байгааг бусдаас нь түрүүлж илрүүлнэ. Дараачийн хүлээн авагч антенны мэдээллийг өмнө нь илрүүлсэн гэмдэгтийн хасч илрүүлнэ. Хэрэгжүүлэлт хийсэн загварыг Зураг 5-д харуулав. Үүнд, Replica Generator блок нь илрүүлсэн гэмдэгтийг H матрицаас хамаарч бусад антеннууддаа үзүүлэх нөлөөгөөр үржинэ. Давталт болгоны сүүлчийн илрүүлэгчийн төрөл ямар байгаагаас хамаарч ZF эсвэл MMSE болно.



Зураг 5. V-Blast хүлээн авагчийн блок диаграм

VI. ҮР ДҮН

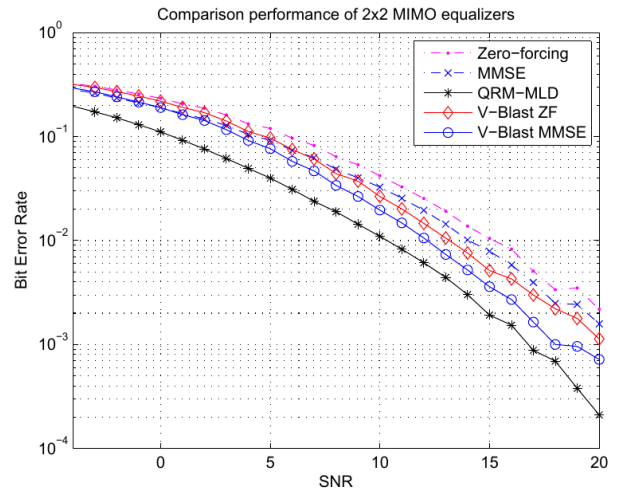
Төрөл бүрийн эквалайзер болон хүлээн авагчид нь өөр өөрсдийн давуу болон сул талтай. Утасгүй холбо оны систем нь олон замын тархалттай болон шуугиант сувгийн хязгаарлагдмал зурвасаар өгөгдлийг хурдтай алдаа багатай, буюу спектрийн үр ашигтайгаар ашиглахыг эрмэлздэг. Зураг 6-д энэхүү судалгааны ажлаар хэрэгжүүлсэн дээр

дурьдсан эквалайзеруудын техникуудын алдааны магадлалыг харьцуулж харуулсан болно. Харин доорх хүснэгтэд тэдгээрийн овор хэмжээ болон чадамжуудыг харьцуулж харуулав.

	Schemes	Performance	Complexity
Linear	ZF MMSE	Low	Low
Hybrid	V-BLAST QRM-MLD	Medium	Medium
Non-Linear	MLD	High	High

VII. ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгааны ажлаар MIMO-OFDM системийн шугаман болон шугаман-бус эквалайзеруудыг хэрэгжүүлж дохио-шуугианы-харьцаанаас хамааруулан алдааны хурдуудыг харьцуулан судаллаа. Үүнд, шугаман алгоритмууд хэдийгээр хэрэгжүүлэхэд хялбар ба энгийн бүтэцтэй боловч алдааг төдийлөн сайн дарж чадахгүй байна. Харин шугаман бус эквалайзерууд тэр дундаа QRM-MLD болон V-Blast алгоритмууд ML илрүүлэгчийн чадамжтай нилээн дөхсөн нь харагдаж байна. Гэвч дээрх алгоритмуудыг хэрэгжүүлэхэд тооцооллын хувьд шугаман эквалайзеруудаас хавьгүй их байна. Цаашид MIMO-OFDM системийг FPGA хавтан дээр програмчлах бөгөөд ингэснээр илүү бодит хэмжилт хийх боломжийг олгоно.



Зураг 6. 2x2 MIMO-OFDM системийн эквалайзеруудын харьцуулалт

НОМ ЗҮЙ

- [1] E. Biglieri, R. Calderbank, A. Constantinides, A. Goldsmith, A. Paulraj, and H. Vincent Poor, "MIMO Wireless Communications," Cambridge University Press, New York, 2007.
- [2] E. Biglieri, G. Tarrico, and A. Tulino, "Performance of spacetime codes for a large number of antennas," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 48, no. 7, pp. 1794-1803, July 2002.

- [3] [3] A. Paulraj, R.Nabar, and D.Gore, "*Introduction to Space-Time Wireless Communications*," Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [4] [4] R. A. Horn and C.R.Johnson, "*Matrix Analysis*," Cambridge: Cambridge University Press, 1991.
- [5] [5] M. O. Damen, H. El Gamal, and G. Caire, "*On maximumlikelihood detection and the search for the closest lattice point*," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 49, no. 10, pp. 2389-2402, Oct. 2003.
- [6] [6] S. Baro, "*Iterative Detection for Coded MIMO Systems*," Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 10, Nr. 752. Dusseldorf: VDI Verlag, 2005.
- [7] [7] E.Biglieri, G.Taricco, and A.Tulino, "*Decoding space-time codes with BLAST architectures*," IEEE Trans. Signal Processing, vol. 50, no. 10, pp. 2547-2552, Oct. 2002.