



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2017-0090096
(43) 공개일자 2017년08월07일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

H04B 17/391 (2014.01)

(52) CPC특허분류

H04B 17/391 (2015.01)

H04B 17/3911 (2015.01)

(21) 출원번호 10-2016-0010534

(22) 출원일자 2016년01월28일

심사청구일자 2016년01월28일

(71) 출원인

경희대학교 산학협력단

경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732 (서천동, 경희대학교 국제캠퍼스내)

(72) 발명자

신현동

경기도 수원시 영통구 청명북로 81, 404동 901호 (영통동, 청명마을주공아파트)

정영민

경기도 성남시 분당구 양현로 537, 313동 305호 (야탑동, 매화마을 아파트)

(74) 대리인

최영한, 지덕규

전체 청구항 수 : 총 11 항

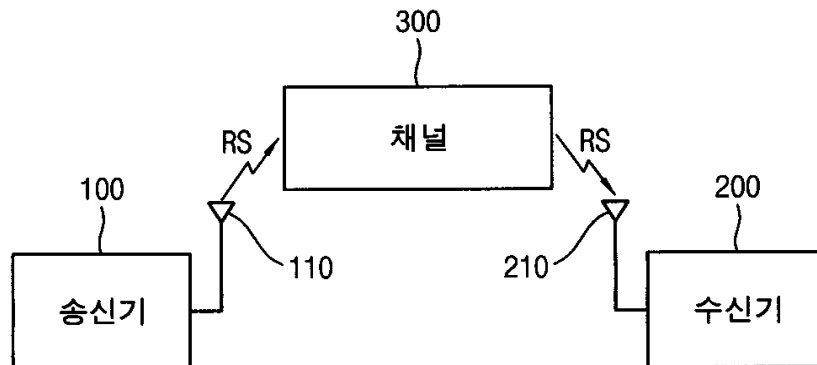
(54) 발명의 명칭 무선 통신 시스템 및 무선 통신 방법

(57) 요약

무선 통신 시스템은 송신기, 수신기 및 채널을 포함한다. 송신기는 제1 데이터를 나타내는 무선 신호를 송출한다. 수신기는 무선 신호를 수신하여 제1 데이터를 획득한다. 채널은 송신기와 수신기 사이에서 무선 신호의 전달 경로를 제공한다. 채널은 H-변환을 기초로 정의되는 폭스 H-변환을 이용하여 모델링된다. 폭스 H-변환을 이용하는 경우에, 다양한 페이딩들을 포괄할 수 있는 H-페이딩에 상응하도록 채널의 페이딩 포락선을 모델링할 수 있다.

대표도 - 도1

10



(52) CPC특허분류

H04B 17/3913 (2015.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 2013-R1A1A2-019963

부처명 미래창조과학부

연구관리전문기관 한국연구재단

연구사업명 일반연구자지원사업(모험연구)

연구과제명 분자 나노통신 핵심기술

기 여 율 70/100

주관기관 경희대학교 산학협력단

연구기간 2013.06.01 ~ 2016.05.31이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 2009-0083495

부처명 미래창조과학부

연구관리전문기관 한국연구재단

연구사업명 선도연구센터지원사업

연구과제명 지능형 자동차 IT 연구센터

기 여 율 30/100

주관기관 서울대학교 산학협력단

연구기간 2015.03.01 ~ 2016.02.29

명세서

청구범위

청구항 1

제1 데이터를 나타내는 무선 신호를 송출하는 송신기;

상기 무선 신호를 수신하여 상기 제1 데이터를 획득하는 수신기; 및

상기 송신기와 상기 수신기 사이에서 상기 무선 신호의 전달 경로를 제공하는 채널을 포함하고,

상기 채널은 H-변환(H-transform)을 기초로 정의되는 폭스 H-변량(Fox's H-variate)을 이용하여 모델링되는 무선 통신 시스템.

청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 채널은 상기 무선 신호의 파워가 균일하게 감쇄하는 동질의(homogeneous) 무선 전파(radio propagation) 조건을 만족하고, 다중 경로(multipath) 페이딩과 섀도우잉(shadowing)을 합성하여 모델링되는 것을 특징으로 하는 무선 통신 시스템.

청구항 3

제 1 항에 있어서,

오더 시퀀스(order sequence) $\mathbf{O} = (m, n, p, q)$ 와 파라미터 시퀀스(parameter sequence) $\mathbf{P} = (\kappa, c, \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{A}, \mathbf{B})$ 의 폭스 H-커널(Fox's H-kernel)에 기초한 함수 $f(t)$ 에 대한 상기 H-변환을 나타내는 $F(s)$ 는, 하기의 [수학식 1]로 정의되고, $\mathbb{H}_{p,q}^{m,n} \{f(t); \mathbf{P}\}(s)$ 로 표기되며,

음이 아닌 랜덤 변수 X 에 대한 상기 폭스 H-변량은, 상기 랜덤 변수 X 의 확률 밀도 함수가 상기 H-변환에 기초한 하기의 [수학식 2]를 만족하는 경우에, 상기 랜덤 변수 X 가 상기 오더 시퀀스와 상기 파라미터 시퀀스에 기초한 H-분포(H-distribution)를 가짐을 나타내며, $X \sim \mathcal{H}_{p,q}^{m,n}(\mathbf{P})$ 로 표기되는 것을 특징으로 하는 무선 통신 시스템.

[수학식 1]

$$F(s) = \kappa \int_0^\infty H_{p,q}^{m,n} \left[c s t \left| \begin{matrix} (\mathbf{a}, \mathbf{A}) \\ (\mathbf{b}, \mathbf{B}) \end{matrix} \right. \right] f(t) dt \quad (s > 0)$$

[수학식 2]

$$p_X(x) = \kappa H_{p,q}^{m,n} \left[c x \left| \begin{matrix} (\mathbf{a}, \mathbf{A}) \\ (\mathbf{b}, \mathbf{B}) \end{matrix} \right. \right] \quad (x \geq 0)$$

청구항 4

제 3 항에 있어서,

상기 채널 내의 다중 경로 페이딩을 나타내는 Z 에 대한 상기 폭스 H-변량인 $Z \sim \mathcal{H}_{p_1,q_1}^{m_1,n_1}(\mathbf{P}_1)$ 는 하기의 [수학식 3]을 만족하고,

상기 채널 내의 섀도우잉을 나타내는 X_ψ 에 대한 상기 폭스 H-변량인 $X_\psi \sim \mathcal{H}_{p_2,q_2}^{m_2,n_2}(\mathbf{P}_2|\Omega)$ 는 하기의 [수학식 4]를 만족하고,

식 4]를 만족하며,

상기 채널의 합성 페이딩 포락선(composite fading envelope)을 나타내는 S_ψ 는, 평균 파워가 $\Omega \in \mathbb{R}_{++}$ 이고
 웨도우잉 수치가 $\psi \in \mathbb{R}_+$ 이며 확률 밀도 함수가 하기의 [수학식 5]를 만족하는 H-페이딩(H-fading)에 상응하
 는 것을 특징으로 하는 무선 통신 시스템.

[수학식 3]

$$\mathbb{H}_{p_1, q_1}^{m_1, n_1} \{1; \langle 2 | \mathbf{P}_1 \rangle (1) = 1$$

[수학식 4]

$$\begin{cases} \mathbb{H}_{p_2, q_2}^{m_2, n_2} \{1; \langle 1 | \mathbf{P}_2 \rangle (1) = 1 \\ \mathbb{H}_{p_2, q_2}^{m_2, n_2} \{1; \langle 2 | \mathbf{P}_2 \rangle (1) = 1 + \psi \\ \mathbf{P}_2 = \mathbf{P}_\emptyset \text{ for } \psi = 0. \end{cases}$$

[수학식 5]

$$p_{S_\psi}(s) = \mathbb{H}_{p_1, q_1}^{m_1, n_1} \left\{ \frac{1}{t} H_{p_2, q_2}^{m_2, n_2} \left(t^{-1}; \langle 1, \frac{1}{2}, 1 | \mathbf{P}_2 \rangle; \mathbf{P}_1 \mid \sqrt{\Omega} \right) \right\} (s)$$

청구항 5

제1 데이터를 나타내는 무선 신호를 송출하는 송신기;

상기 무선 신호를 수신하여 상기 제1 데이터를 획득하는 수신기; 및

상기 송신기와 상기 수신기 사이에서 상기 무선 신호의 전달 경로를 제공하는 채널을 포함하고,

상기 채널은 H-변환(H-transform)을 기초로 정의되는 ζ -차수 불규칙 H-변량(degree- ζ irregular H-variate)을 이용하여 모델링되는 무선 통신 시스템.

청구항 6

제 5 항에 있어서,

상기 채널은 상기 무선 신호의 파워가 불균일하게 감쇄하는 반사(specular) 또는 비균질의(inhomogeneous) 무선 전파(radio propagation) 조건을 만족하는 것을 특징으로 하는 무선 통신 시스템.

청구항 7

제 5 항에 있어서,

오더 시퀀스(order sequence) $\mathbf{O} = (m, n, p, q)$ 와 파라미터 시퀀스(parameter sequence)

$\mathbf{P} = (\kappa, c, \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{A}, \mathbf{B})$ 의 폭스 H-커널(Fox's H-kernel)에 기초한 함수 $f(t)$ 에 대한 상기 H-변환을 나타내는

$F(s)$ 는, 하기의 [수학식 6]으로 정의되고, $\mathbb{H}_{p, q}^{m, n} \{f(t); \mathbf{P}\}(s)$ 로 표기되며,

음이 아닌 랜덤 변수 Y 에 대한 상기 ζ -차수 불규칙 H-변량은, 상기 랜덤 변수 Y 의 확률 밀도 함수가 상기 H-변
 환에 기초한 하기의 [수학식 7]을 만족하는 경우에, 상기 랜덤 변수 Y 가 ζ -차수 불규칙 H-분포(degree- ζ

irregular H-distribution)를 가짐을 나타내고, $Y \sim {}^{(\zeta)}\mathcal{H}_{p, q}^{m, n}(\mathbf{P}, \lambda)$ 로 표기되며,

상기 ζ -차수 불규칙 H-분포는 불규칙 지수가 $\lambda \in \mathbb{R}_{++}$ 이고 차수가 $\zeta \in \mathbb{R}_{++}$ 이며 상기 오더 시퀀스와 상기
 파라미터 시퀀스에 기초한 분포를 나타내는 것을 특징으로 하는 무선 통신 시스템.

[수학식 6]

$$F(s) = \kappa \int_0^\infty H_{p,q}^{m,n} \left[cst \left| \begin{matrix} (a, \mathcal{A}) \\ (b, \mathcal{B}) \end{matrix} \right. \right] f(t) dt \quad (s > 0)$$

[수학식 7]

$$p_Y(y) = \kappa e^{-\lambda y^\zeta} H_{p,q}^{m,n} \left[cy \left| \begin{matrix} (a, \mathcal{A}) \\ (b, \mathcal{B}) \end{matrix} \right. \right] \quad (y \geq 0)$$

청구항 8

제 7 항에 있어서,

상기 채널의 페이딩 포락선(fading envelope)을 나타내는 S_λ 에 대한 2-차수 불규칙 H-변량은 하기의 [수학식 8]로 표기되고,

상기 채널의 페이딩 포락선을 나타내는 S_λ 는, 평균 파워가 $\Omega \in \mathbb{R}_{++}$ 이고 상기 불규칙 지수가 $\lambda \in \mathbb{R}_{++}$ 이며 하기의 [수학식 9] 및 [수학식 10]을 만족하는 2-차수 불규칙 H-페이딩(H-fading)에 상응하는 것을 특징으로 하는 무선 통신 시스템.

[수학식 8]

$$S_\lambda \sim {}^{(2)}\mathcal{H}_{p,q}^{m,n} \left(\mathbf{P} \left| \sqrt{\frac{\Omega}{\lambda}} \right., \frac{\lambda}{\Omega} \right)$$

[수학식 9]

$$\begin{cases} H_{p+1,q}^{m,n+1} \left(1; \mathbf{P} \square \left\langle 1, \frac{1}{2}, 0 \right| \mathbf{P}_{\text{exp}} \right) = 2 \\ H_{p+1,q}^{m,n+1} \left(1; \mathbf{P} \square \left\langle 1, \frac{1}{2}, 2 \right| \mathbf{P}_{\text{exp}} \right) = 2\lambda \end{cases}$$

[수학식 10]

$$\begin{cases} \lambda \geq \frac{1 + \omega^*(\mathbf{P})}{2} \\ \varrho^*(\mathbf{P}) \geq 1/2 \end{cases}$$

상기의 [수학식 9]에서, $\square$ 는 멜린(Mellin) 연산을 나타냄.

청구항 9

제1 데이터를 나타내는 무선 신호를 송신기로부터 송출하는 단계; 및

상기 무선 신호를 수신기에서 수신하여 상기 제1 데이터를 획득하는 단계를 포함하고,

상기 송신기와 상기 수신기 사이에서 상기 무선 신호의 전달 경로를 제공하는 채널을 통해 상기 무선 신호가 전파되며,

상기 채널은 H-변환(H-transform)을 기초로 정의되는 폭스 H-변량(Fox's H-variate) 및 ζ -차수 불규칙 H-변량(degree- ζ irregular H-variate) 중 하나를 이용하여 모델링되는 무선 통신 방법.

청구항 10

제 9 항에 있어서,

상기 폭스 H-변량을 이용하여 상기 채널을 모델링하는 경우에,

상기 채널은 상기 무선 신호의 파워가 균일하게 감쇄하는 동질의(homogeneous) 무선 전파(radio propagation) 조건을 만족하고, 다중 경로(multipath) 페이딩과 섀도우잉(shadowing)을 합성하여 모델링되는 것을 특징으로 하는 무선 통신 방법.

청구항 11

제 9 항에 있어서,

상기 ζ -차수 불규칙 H-변량을 이용하여 상기 채널을 모델링하는 경우에,

상기 채널은 상기 무선 신호의 파워가 불균일하게 감쇄하는 반사(specular) 또는 비균질의(inhomogeneous) 무선 전파 조건을 만족하는 것을 특징으로 하는 무선 통신 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 통신 시스템에 관한 것으로서, 더욱 상세하게는 무선 통신 시스템 및 상기 무선 통신 시스템에서의 무선 통신 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 무선 통신 시스템은 전선과 같은 전기적 도체에 의하여 연결되지 않는 두 개 이상의 포인트들 사이에서 정보를 전달하는 시스템을 나타낸다. 무선 통신 시스템에서, 송신기와 수신기 사이의 정보 전달 경로를 채널이라고 부를 수 있다. 무선 통신 시스템의 성능을 향상시키기 위하여, 채널을 정확하게 모델링하고 정보 전달 용량 및 에러 확률 등을 정확하게 예측하는 것이 중요하다. 따라서, 무선 통신 시스템의 채널을 모델링하는 다양한 방식들이 연구되고 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0003] 본 발명의 일 목적은 향상된 채널 성능을 가질 수 있는 무선 통신 시스템을 제공하는 것이다.

[0004] 본 발명의 다른 목적은 향상된 채널 성능을 가질 수 있는 무선 통신 방법을 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

[0005] 상기 일 목적을 달성하기 위해, 본 발명의 실시예들에 따른 무선 통신 시스템은 송신기, 수신기 및 채널을 포함한다. 상기 송신기는 제1 데이터를 나타내는 무선 신호를 송출한다. 상기 수신기는 상기 무선 신호를 수신하여 상기 제1 데이터를 획득한다. 상기 채널은 상기 송신기와 상기 수신기 사이에서 상기 무선 신호의 전달 경로를 제공한다. 상기 채널은 H-변환(H-transform)을 기초로 정의되는 폭스 H-변량(Fox's H-variate)을 이용하여 모델링된다.

[0006] 일 실시예에서, 상기 채널은 상기 무선 신호의 파워가 균일하게 감쇄하는 동질의(homogeneous) 무선 전파(radio propagation) 조건을 만족하고, 다중 경로(multipath) 페이딩과 섀도우잉(shadowing)을 합성하여 모델링될 수 있다.

[0007] 일 실시예에서, 오더 시퀀스(order sequence) $\mathbf{O} = (m, n, p, q)$ 와 파라미터 시퀀스(parameter sequence) $\mathbf{P} = (\kappa, c, \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{A}, \mathbf{B})$ 의 폭스 H-커널(Fox's H-kernel)에 기초한 함수 $f(t)$ 에 대한 상기 H-변환을 나타내는 $F(s)$ 는, 하기의 [수학식 1]로 정의되고, $H_{p,q}^{m,n} \{f(t); \mathbf{P}\}(s)$ 로 표기될 수 있다. 음이 아닌 랜덤 변수 X 에 대한 상기 폭스 H-변량은, 상기 랜덤 변수 X 의 확률 밀도 함수가 상기 H-변환에 기초한 하기의 [수학식 2]를 만족하는 경우에, 상기 랜덤 변수 X 가 상기 오더 시퀀스와 상기 파라미터 시퀀스에 기초한 H-분포(H-distribution)를 가짐을 나타내며, $X \sim \mathcal{H}_{p,q}^{m,n}(\mathbf{P})$ 로 표기될 수 있다.

[0008] [수학식 1]

$$F(s) = \kappa \int_0^\infty H_{p,q}^{m,n} \left[c s t \left| \begin{matrix} (a, \mathcal{A}) \\ (b, \mathcal{B}) \end{matrix} \right. \right] f(t) dt \quad (s > 0)$$

[0009]

[0010] [수학식 2]

$$p_X(x) = \kappa H_{p,q}^{m,n} \left[c x \left| \begin{matrix} (a, \mathcal{A}) \\ (b, \mathcal{B}) \end{matrix} \right. \right] \quad (x \geq 0)$$

[0011]

[0012] 일 실시예에서, 상기 채널 내의 다중 경로 페이딩을 나타내는 Z에 대한 상기 폭스 H-변량인 $Z \sim \mathcal{H}_{p_1, q_1}^{m_1, n_1}(\mathbf{P}_1)$ 는 하기의 [수학식 3]을 만족할 수 있다. 상기 채널 내의 섀도우잉을 나타내는 X_ψ 에 대한 상기 폭스 H-변량인 $X_\psi \sim \mathcal{H}_{p_2, q_2}^{m_2, n_2}(\mathbf{P}_2 | \Omega)$ 는 하기의 [수학식 4]를 만족할 수 있다. 상기 채널의 합성 페이딩 포락선(composite fading envelope)을 나타내는 S_ψ 는, 평균 파워가 $\Omega \in \mathbb{R}_+$ 이고 섀도우잉 수치가 $\psi \in \mathbb{R}_+$ 이며 확률 밀도 함수가 하기의 [수학식 5]를 만족하는 H-페이딩(H-fading)에 상응할 수 있다.

[0013] [수학식 3]

$$\mathbb{H}_{p_1, q_1}^{m_1, n_1} \{1; \langle 2 | \mathbf{P}_1 \rangle (1) = 1$$

[0014]

[0015] [수학식 4]

$$\begin{cases} \mathbb{H}_{p_2, q_2}^{m_2, n_2} \{1; \langle 1 | \mathbf{P}_2 \rangle (1) = 1 \\ \mathbb{H}_{p_2, q_2}^{m_2, n_2} \{1; \langle 2 | \mathbf{P}_2 \rangle (1) = 1 + \psi \\ \mathbf{P}_2 = \mathbf{P}_\emptyset \text{ for } \psi = 0. \end{cases}$$

[0016]

[0017] [수학식 5]

$$p_{S_\psi}(s) = \mathbb{H}_{p_1, q_1}^{m_1, n_1} \left\{ \frac{1}{t} H_{p_2, q_2}^{m_2, n_2} \left(t^{-1}; \left\langle 1, \frac{1}{2}, 1 \right| \mathbf{P}_2 \right); \mathbf{P}_1 \left| \sqrt{\Omega} \right. \right\} (s)$$

[0018]

[0019] 상기 일 목적을 달성하기 위해, 본 발명의 실시예들에 따른 무선 통신 시스템은 송신기, 수신기 및 채널을 포함한다. 상기 송신기는 제1 데이터를 나타내는 무선 신호를 송출한다. 상기 수신기는 상기 무선 신호를 수신하여 상기 제1 데이터를 획득한다. 상기 채널은 상기 송신기와 상기 수신기 사이에서 상기 무선 신호의 전달 경로를 제공한다. 상기 채널은 H-변환(H-transform)을 기초로 정의되는 ζ -차수 불규칙 H-변량(degree- ζ irregular H-variate)을 이용하여 모델링된다.

[0020] 일 실시예에서, 상기 채널은 상기 무선 신호의 파워가 불균일하게 감쇄하는 반사(specular) 또는 비균질의(inhomogeneous) 무선 전파(radio propagation) 조건을 만족할 수 있다.

[0021] 일 실시예에서, 오더 시퀀스(order sequence) $\mathbf{O} = (m, n, p, q)$ 와 파라미터 시퀀스(parameter sequence) $\mathbf{P} = (\kappa, c, a, b, \mathcal{A}, \mathcal{B})$ 의 폭스 H-커널(Fox's H-kernel)에 기초한 함수 $f(t)$ 에 대한 상기 H-변환을 나타내는 $F(s)$ 는, 하기의 [수학식 6]으로 정의되고, $\mathbb{H}_{p,q}^{m,n} \{f(t); \mathbf{P}\}(s)$ 로 표기될 수 있다. 음이 아닌 랜덤 변수 Y에 대한 상기 ζ -차수 불규칙 H-변량은, 상기 랜덤 변수 Y의 확률 밀도 함수가 상기 H-변환에 기초한 하기의 [수학식 7]을 만족하는 경우에, 상기 랜덤 변수 Y가 ζ -차수 불규칙 H-분포(degree- ζ irregular H-distribution)를 가짐을 나타내고, $Y \sim {}^{(\zeta)}\mathcal{H}_{p,q}^{m,n}(\mathbf{P}, \lambda)$ 로 표기될 수 있다. 상기 ζ -차수 불규칙 H-분포는 불규칙 지수가 $\lambda \in \mathbb{R}_{++}$ 이고 차수가 $\zeta \in \mathbb{R}_{++}$ 이며 상기 오더 시퀀스와 상기 파라미터 시퀀스에 기초한 분포를 나타낼 수

있다.

[수학식 6]

$$F(s) = \kappa \int_0^\infty H_{p,q}^{m,n} \left[c s t \left| \begin{matrix} (a, \mathcal{A}) \\ (b, \mathcal{B}) \end{matrix} \right. \right] f(t) dt \quad (s > 0)$$

[수학식 7]

$$p_Y(y) = \kappa e^{-\lambda y^\zeta} H_{p,q}^{m,n} \left[c y \left| \begin{matrix} (a, \mathcal{A}) \\ (b, \mathcal{B}) \end{matrix} \right. \right] \quad (y \geq 0)$$

일 실시예에서, 상기 채널의 페이딩 포락선(fading envelope)을 나타내는 S_λ 에 대한 2-차수 불규칙 H-변량은 하기의 [수학식 8]로 표기될 수 있다. 상기 채널의 페이딩 포락선을 나타내는 S_λ 는, 평균 파워가 $\Omega \in \mathbb{R}_{++}$ 이고 상기 불규칙 지수가 $\lambda \in \mathbb{R}_{++}$ 이며 하기의 [수학식 9] 및 [수학식 10]을 만족하는 2-차수 불규칙 H-페이딩(H-fading)에 상응할 수 있다.

[수학식 8]

$$S_\lambda \sim {}^{(2)}\mathcal{H}_{p,q}^{m,n} \left(\mathbf{P} \left| \sqrt{\frac{\Omega}{\lambda}} \right., \frac{\lambda}{\Omega} \right)$$

[수학식 9]

$$\begin{cases} H_{p+1,q}^{m,n+1} \left(1; \mathbf{P} \left| \left\langle 1, \frac{1}{2}, 0 \right| \mathbf{P}_{\text{exp}} \right. \right) = 2 \\ H_{p+1,q}^{m,n+1} \left(1; \mathbf{P} \left| \left\langle 1, \frac{1}{2}, 2 \right| \mathbf{P}_{\text{exp}} \right. \right) = 2\lambda \end{cases}$$

[수학식 10]

$$\begin{cases} \lambda \geq \frac{1 + \omega^*(\mathbf{P})}{2} \\ \varrho^*(\mathbf{P}) \geq 1/2 \end{cases}$$

상기의 [수학식 9]에서, $\left| \cdot \right|$ 는 멜린(Mellin) 연산을 나타낼 수 있다.

상기 다른 목적을 달성하기 위해, 본 발명의 실시예들에 따른 무선 통신 방법에서, 제1 데이터를 나타내는 무선 신호를 송신기로부터 송출한다. 상기 무선 신호를 수신기에서 수신하여 상기 제1 데이터를 획득한다. 상기 송신기와 상기 수신기 사이에서 상기 무선 신호의 전달 경로를 제공하는 채널을 통해 상기 무선 신호가 전파된다. 상기 채널은 H-변환(H-transform)을 기초로 정의되는 폭스 H-변량(Fox's H-variate) 및 ζ -차수 불규칙 H-변량(degree- ζ irregular H-variate) 중 하나를 이용하여 모델링된다.

일 실시예에서, 상기 폭스 H-변량을 이용하여 상기 채널을 모델링하는 경우에, 상기 채널은 상기 무선 신호의 파워가 균일하게 감쇄하는 동질의(homogeneous) 무선 전파(radio propagation) 조건을 만족하고, 다중 경로(multipath) 페이딩과 섀도우잉(shadowing)을 합성하여 모델링될 수 있다.

일 실시예에서, 상기 ζ -차수 불규칙 H-변량을 이용하여 상기 채널을 모델링하는 경우에, 상기 채널은 상기 무선 신호의 파워가 불균일하게 감쇄하는 반사(specular) 또는 비균질의(inhomogeneous) 무선 전파 조건을 만족할 수 있다.

발명의 효과

상기와 같은 본 발명의 실시예들에 따른 무선 통신 시스템 및 무선 통신 방법에 따르면, 상기 H-변환을 기초로 정의되는 상기 폭스 H-변량 및 상기 ζ -차수 불규칙 H-변량 중 하나를 이용하여 상기 송신기와 상기 수신기 사이의 상기 채널이 모델링될 수 있다. 상기 폭스 H-변량 및 상기 ζ -차수 불규칙 H-변량을 이용하는 경우에, 다

양한 페이딩들을 포괄할 수 있는 표준 H-페이딩 및 표준 2-차수 불규칙 H-페이딩에 상응하도록 상기 채널의 페이딩 포락선을 모델링할 수 있으며, 상기 무선 통신 시스템의 채널 특성 및 채널 추정 성능이 향상될 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0038] 도 1은 본 발명의 실시예들에 따른 무선 통신 시스템을 나타내는 블록도이다.

도 2a 및 2b는 표준 H-페이딩의 특성을 설명하기 위한 도면들이다.

도 3a 및 3b는 표준 2-차수 불규칙 H-페이딩의 특성을 설명하기 위한 도면들이다.

도 4는 본 발명의 실시예들에 따라 모델링된 채널의 에러 확률을 설명하기 위한 도면이다.

도 5, 6, 7 및 8은 본 발명의 실시예들에 따라 모델링된 채널의 성능을 나타내는 도면들이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0039] 본문에 개시되어 있는 본 발명의 실시예들에 대해서, 특정한 구조적 내지 기능적 설명들은 단지 본 발명의 실시예를 설명하기 위한 목적으로 예시된 것으로, 본 발명의 실시예들은 다양한 형태로 실시될 수 있으며 본문에 설명된 실시예들에 한정되는 것으로 해석되어서는 아니 된다.

[0040] 본 발명은 다양한 변경을 가할 수 있고 여러 가지 형태를 가질 수 있는바, 특정 실시예들을 도면에 예시하고 본문에 상세하게 설명하고자 한다. 그러나 이는 본 발명을 특정한 개시 형태에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되는 모든 변경, 균등물 내지 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 한다.

[0041] 제1, 제2 등의 용어는 다양한 구성요소들을 설명하는데 사용될 수 있지만, 상기 구성요소들은 상기 용어들에 의해 한정되어서는 안 된다. 상기 용어들은 하나의 구성요소를 다른 구성요소로부터 구별하는 목적으로 사용될 수 있다. 예를 들어, 본 발명의 권리 범위로부터 이탈되지 않은 채 제1 구성요소는 제2 구성요소로 명명될 수 있고, 유사하게 제2 구성요소도 제1 구성요소로 명명될 수 있다.

[0042] 어떤 구성요소가 다른 구성요소에 "연결되어" 있다거나 "접속되어" 있다고 언급된 때에는, 그 다른 구성요소에 직접적으로 연결되어 있거나 또는 접속되어 있을 수도 있지만, 중간에 다른 구성요소가 존재할 수도 있다고 이해되어야 할 것이다. 반면에, 어떤 구성요소가 다른 구성요소에 "직접 연결되어" 있다거나 "직접 접속되어" 있다고 언급된 때에는, 중간에 다른 구성요소가 존재하지 않는 것으로 이해되어야 할 것이다. 구성요소들 간의 관계를 설명하는 다른 표현들, 즉 "~사이에"와 "바로 ~사이에" 또는 "~에 이웃하는"과 "~에 직접 이웃하는" 등도 마찬가지로 해석되어야 한다.

[0043] 본 출원에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시예를 설명하기 위해 사용된 것으로, 본 발명을 한정하려는 의도가 아니다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 출원에서, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 실시된 특징, 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부분품 또는 이들을 조합한 것이 존재함을 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징들이나 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부분품 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 미리 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.

[0044] 다르게 정의되지 않는 한, 기술적이거나 과학적인 용어를 포함해서 여기서 사용되는 모든 용어들은 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 일반적으로 이해되는 것과 동일한 의미이다. 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 것과 같은 용어들은 관련 기술의 문맥상 가지는 의미와 일치하는 의미인 것으로 해석되어야 하며, 본 출원에서 명백하게 정의하지 않는 한, 이상적이거나 과도하게 형식적인 의미로 해석되지 않는다.

[0045] 한편, 어떤 실시예가 달리 구현 가능한 경우에 특정 블록 내에 명기된 기능 또는 동작이 순서도에 명기된 순서와 다르게 일어날 수도 있다. 예를 들어, 연속하는 두 블록이 실제로는 실질적으로 동시에 수행될 수도 있고, 관련된 기능 또는 동작에 따라서는 상기 블록들이 거꾸로 수행될 수도 있다.

[0046] 이하, 첨부한 도면들을 참조하여, 본 발명의 바람직한 실시예를 보다 상세하게 설명하고자 한다. 도면상의 동일한 구성요소에 대해서는 동일한 참조부호를 사용하고 동일한 구성요소에 대해서 중복된 설명은 생략한다.

[0047] 도 1은 본 발명의 실시예들에 따른 무선 통신 시스템을 나타내는 블록도이다.

[0048] 도 1을 참조하면, 무선 통신 시스템(10)은 송신기(100), 수신기(200) 및 채널(300)을 포함한다.

[0049] 송신기(100)는 제1 데이터를 나타내는 무선 신호(RS)를 송출한다. 예를 들어, 송신기(100)는 송신 안테나(110)를 통해 무선 신호(RS)를 출력할 수 있다. 도시하지는 않았지만, 송신기(100)는 CPU(Central Processing Unit), AP(Application Processor) 등과 같은 프로세서, 휘발성 메모리, 비휘발성 메모리 등과 같은 저장부, 상기 제1 데이터에 대한 부호화 동작을 수행하는 부호화부, 무선 신호(RS)를 송출하기 위한 RF(Radio Frequency)부 등을 더 포함할 수 있다.

[0050] 수신기(200)는 무선 신호(RS)를 수신하여 상기 제1 데이터를 획득한다. 예를 들어, 수신기(200)는 수신 안테나(210)를 통해 무선 신호(RS)를 수신할 수 있다. 도시하지는 않았지만, 수신기(200)는 프로세서, 저장부, 복호화 동작을 수행하여 상기 제1 데이터를 획득하는 부호화부, 무선 신호(RS)를 수신하기 위한 RF부 등을 더 포함할 수 있다.

[0051] 채널(300)은 송신기(100)와 수신기(200) 사이에서 무선 신호(RS)의 전달 경로를 제공한다. 채널(300)은 무선 통신 시스템(10)을 둘러싼 환경에 의해 유도되는 다양한 효과를 나타낸다. 예를 들어, 무선 신호(RS)는 채널(300) 내에서 공기와 같은 매질을 통해 전파될 수 있으며, 이 때 무선 신호(RS)가 다양한 원인에 의해 왜곡될 수 있다.

[0052] 본 발명의 실시예들에 따른 무선 통신 시스템(10)에서, 채널(300)은 H-변환(H-transform)을 기초로 정의되는 폭스 H-변량(Fox's H-variate) 및 ζ -차수 불규칙 H-변량(degree- ζ irregular H-variate) 중 하나를 이용하여 모델링된다.

[0053] 일 실시예에서, 수신기(200)는 채널 추정부(미도시)를 더 포함할 수 있다. 상기 채널 추정부는 상기 폭스 H-변량 및 상기 ζ -차수 불규칙 H-변량 중 하나를 이용하여 모델링된 채널(300)을 통해 전송되는 무선 신호(RS)를 관측할 수 있고, 상기 관측 결과에 기초하여 채널(300)에 대한 다양한 정보들을 추정할 수 있다.

[0054] 이하에서는 채널(300)의 모델링과 관련하여, 먼저 상기 H-변환을 설명하고, 상기 H-변환에 기초한 상기 폭스 H-변량 및 상기 ζ -차수 불규칙 H-변량을 설명하고, 상기 폭스 H-변량 및 상기 ζ -차수 불규칙 H-변량에 기초한 채널(300)의 모델링을 설명하며, 모델링된 채널(300)의 성능을 설명하도록 한다.

[0055] 1. H-변환의 정의, 성질 및 정리

[0056] 일 실시예에서, 오더 시퀀스(order sequence) $\mathbf{O} = (m, n, p, q)$ 와 파라미터 시퀀스(parameter sequence) $\mathbf{P} = (\kappa, c, \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{A}, \mathbf{B})$ 의 폭스 H-커널(Fox's H-kernel)에 기초한 함수 $f(t)$ 에 대한 상기 H-변환을 나타내는 $F(s)$ 는, 하기의 [수학식 11]과 같이 정의될 수 있다.

[0057] [수학식 11]

$$F(s) = \kappa \int_0^\infty H_{p,q}^{m,n} \left[c s t \left| \begin{matrix} (\mathbf{a}, \mathbf{A}) \\ (\mathbf{b}, \mathbf{B}) \end{matrix} \right. \right] f(t) dt \quad (s > 0)$$

[0058]

[0059] 상기 파라미터 시퀀스 $\mathbf{P} = (\kappa, c, \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{A}, \mathbf{B})$ 는 하기의 [수학식 12] 내지 [수학식 16]을 만족할 수 있다.

[0060] [수학식 12]

$$\begin{cases} \mathbf{a} = (\dot{\mathbf{a}}, \ddot{\mathbf{a}}) \\ \mathbf{b} = (\dot{\mathbf{b}}, \ddot{\mathbf{b}}) \\ \mathbf{A} = (\dot{\mathbf{A}}, \ddot{\mathbf{A}}) \\ \mathbf{B} = (\dot{\mathbf{B}}, \ddot{\mathbf{B}}) \end{cases}$$

[0061]

[0062] [수학식 13]

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{a}} = (a_1, a_2, \dots, a_n) \\ \ddot{\mathbf{a}} = (a_{n+1}, a_{n+2}, \dots, a_p) \end{cases}$$

[0063]

[0064] [수학식 14]

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{b}} = (b_1, b_2, \dots, b_m) \\ \ddot{\mathbf{b}} = (b_{m+1}, b_{m+2}, \dots, b_q) \end{cases}$$

[0066] [수학식 15]

$$\begin{cases} \dot{\mathcal{A}} = (\mathcal{A}_1, \mathcal{A}_2, \dots, \mathcal{A}_n) \\ \ddot{\mathcal{A}} = (\mathcal{A}_{n+1}, \mathcal{A}_{n+2}, \dots, \mathcal{A}_p) \end{cases}$$

[0068] [수학식 16]

$$\begin{cases} \dot{\mathcal{B}} = (\mathcal{B}_1, \mathcal{B}_2, \dots, \mathcal{B}_m) \\ \ddot{\mathcal{B}} = (\mathcal{B}_{m+1}, \mathcal{B}_{m+2}, \dots, \mathcal{B}_q) \end{cases}$$

[0070] 표기(notation) $\mathbb{H}_{p,q}^{m,n} \{f(t); \mathbf{P}\}(s)$ 은 상기 함수 f(t)에 대한 상기 H-변환을 나타내는데 사용될 수 있다.

[0071] 상기 함수 f(t)와 관련된 널 시퀀스들(null sequences)을 $\mathbf{P}_\emptyset = (1, 1, -, -, -, -)$ 및 $\mathbf{O}_\emptyset = (0, 0, 0, 0)$ 이라고 하면, 상기 H-변환은 하기의 [수학식 17] 및 [수학식 18]을 만족할 수 있다.

[0072] [수학식 17]

$$H_{0,0}^{0,0}(t; \mathbf{P}_\emptyset) = \delta(t-1)$$

[0074] [수학식 18]

$$\mathbb{H}_{0,0}^{0,0} \{f(t); \mathbf{P}_\emptyset\}(s) = \frac{1}{s} f\left(\frac{1}{s}\right)$$

[0076] 상기 H-변환 $\mathbb{H}_{p,q}^{m,n} \{f(t); \mathbf{P}\}(s)$ 의 특별한 케이스로서, 라플라스(Laplace), 푸리에 사인 및 코사인(Fourier sine & cosine), 멜린(Mellin), 스텔체스(Stieltjes), 한켈(Hankel), 메이저(Meijer), 바르마(Varma), 스트루베(Struve), 웨버(Weber) 등과 같은 다양한 적분 변환(integral transform)들이 하기의 [표 1]과 같이 정리될 수 있다. 다시 말하면, 상기 H-변환은 다양한 적분 변환들을 포괄할 수 있는 다재다능한(versatility) 이점이 있을 수 있다.

[0077] [표 1]

Integral transform $\int_0^\infty K(s,t) f(t) dt$	Kernel function $K(s,t)$	Order sequence $\mathbf{O} = (m, n, p, q)$	Parameter sequence $\mathbf{P} = (\kappa, c, \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathcal{A}, \mathcal{B})$
Laplace	e^{-st}	(1, 0, 0, 1)	$(1, 1, -, 0, -, 1)$
Fourier sine	$\sqrt{\frac{2}{\pi}} \sin(st)$	(1, 0, 0, 2)	$(\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{2}, -, (\frac{1}{2}, 0), -, \frac{1}{2} \mathbf{1}_2)$
Fourier cosine	$\sqrt{\frac{2}{\pi}} \cos(st)$	(1, 0, 0, 2)	$(\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{2}, -, (0, \frac{1}{2}), -, \frac{1}{2} \mathbf{1}_2)$
Mellin	t^{s-1}	(1, 0, 1, 1)	$(1, \frac{1}{s}, s, s-1, 1, 1)$
Stieltjes	$(s+t)^{-1}$	(1, 1, 1, 1)	$(\frac{1}{s}, \frac{1}{s}, 0, 0, 1, 1)$
Hankel	$\sqrt{st} J_\nu(st)$	(1, 0, 0, 2)	$(\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{2}, -, (\frac{\nu}{2} + \frac{1}{4}, -\frac{\nu}{2} + \frac{1}{4}), -, \frac{1}{2} \mathbf{1}_2)$
Meijer	$\sqrt{st} K_\nu(st)$	(2, 0, 0, 2)	$(\frac{1}{2\sqrt{2}}, \frac{1}{2}, -, (\frac{\nu}{2} + \frac{1}{4}, -\frac{\nu}{2} + \frac{1}{4}), -, \frac{1}{2} \mathbf{1}_2)$
Varma	$(st)^{\mu-\frac{1}{2}} e^{-\frac{st}{2}} W_{\nu,\mu}(st)$	(2, 0, 1, 2)	$(1, 1, \mu-\nu+\frac{1}{2}, (2\mu, 0), 1, \mathbf{1}_2)$
Struve	$\sqrt{st} H_\nu(st)$	(1, 1, 1, 3)	$(\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{2}, \frac{\nu}{2} + \frac{3}{4}, (\frac{\nu}{2} + \frac{3}{4}, \frac{\nu}{2} + \frac{1}{4}, -\frac{\nu}{2} + \frac{1}{4}), \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \mathbf{1}_3)$
Weber	$\sqrt{st} Y_\nu(st)$	(2, 0, 1, 3)	$(\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{2}, -\frac{\nu}{2} - \frac{1}{4}, (-\frac{\nu}{2} + \frac{1}{4}, \frac{\nu}{2} + \frac{1}{4}, -\frac{\nu}{2} - \frac{1}{4}), \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \mathbf{1}_3)$

[0079] 상기 H-변환 $\mathbb{H}_{p,q}^{m,n} \{f(t); \mathbf{P}\}(s)$ 은 다양한 성질(property)을 만족할 수 있다. 기본적으로, 상기 H-변환의 성질은 H-함수(H-function)의 성질을 따르며, 하기의 [표 2]와 같이 정리된 폭스 H-함수(Fox's H-function) $f(t) = H_{p,q}^{m,n}(t; \mathbf{P})$ 의 항등식(또는 항등원)(identity)들을 포함할 수 있다.

[0080] [표 2]

Identity	Function	Order sequence	Parameter sequence
Reciprocity	$f\left(\frac{1}{t}\right)$	(n, m, q, p)	$(\kappa, \frac{1}{c}, 1_q - \mathbf{b}, 1_p - \mathbf{a}, \mathcal{B}, \mathcal{A})$
Modulation	$\frac{t^\gamma}{\beta} f(\alpha t^{1/\beta})$	(m, n, p, q)	$\left(\frac{\kappa}{(\alpha c)^{\beta\gamma}}, (\alpha c)^\beta, \mathbf{a} + \beta\gamma\mathcal{A}, \mathbf{b} + \beta\gamma\mathcal{B}, \beta\mathcal{A}, \beta\mathcal{B}\right)$
Differentiation	$(-1)^\ell \frac{d^\ell}{dt^\ell} f(t)$	$(m+1, n, p+1, q+1)$	$(\kappa c^\ell, c, (\mathbf{a} - \ell\mathcal{A}, -\ell), (0, \mathbf{b} - \ell\mathcal{B}), (\mathcal{A}, 1), (1, \mathcal{B}))$
(Note) $\alpha, \beta \in \mathbb{R}_{++}, \gamma \in \mathbb{C}, \ell \in \mathbb{N}$			

[0081]

[0082] 또한, 상기 H-변환의 성질은, (1) 커널 파라미터들의 쌍들(pairs of kernel parameters)인 $(a_1, \mathcal{A}_1), \dots, (a_n, \mathcal{A}_n); (a_{n+1}, \mathcal{A}_{n+1}), \dots, (a_p, \mathcal{A}_p); (\mathbf{b}_1, \mathcal{B}_1), \dots, (\mathbf{b}_m, \mathcal{B}_m);$ 및 $(\mathbf{b}_{m+1}, \mathcal{B}_{m+1}), \dots, (\mathbf{b}_q, \mathcal{B}_q)$ 에서 대칭(symmetry)인 제1 성질, (2) 하기의 [수학식 19] 및 [수학식 20]을 만족하는 스케일링 연산(scaling operation)과 관련된 제2 성질, (3) 하기의 [수학식 21] 및 [수학식 22]를 만족하는 공액(conjugacy)과 관련된 제3 성질, 및 (4) 하기의 [수학식 23] 및 [수학식 24]를 만족하는 미분 연산(differential operation)과 관련된 제4 성질을 포함할 수 있으며, (5) $f(t) = H_{p_2, q_2}^{m_2, n_2}(t; \mathbf{P}_2)$ 일 때 하기의 [수학식 25]를 만족하는 기본 연산(elementary operation)과 관련된 제5 성질, 및 (6) $f(t) = H_{p_2, q_2}^{m_2, n_2}(t; \mathbf{P}_2)$ 일 때 하기의 [수학식 26] 및 [수학식 27]을 만족하는 역 연산(inverse operation)과 관련된 제6 성질을 더 포함할 수 있다.

[0083] [수학식 19]

[0084]
$$\mathbb{H}_{p, q}^{m, n}\{f(\alpha t); \mathbf{P}\}(s) = \mathbb{H}_{p, q}^{m, n}\{f(t); \mathbf{P}|\alpha\}(s)$$

[0085] [수학식 20]

[0086]
$$\mathbf{P}|\alpha \triangleq \left(\frac{\kappa}{\alpha}, \frac{c}{\alpha}, \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathcal{A}, \mathcal{B}\right)$$

[0087] [수학식 21]

[0088]
$$\mathbb{H}_{p, q}^{m, n}\{s^\gamma f(t); \mathbf{P}\}(s) = \mathbb{H}_{p, q}^{m, n}\{t^{-\gamma} f(t); \langle 1, 1, \gamma | \mathbf{P} \rangle\}(s)$$

[0089] [수학식 22]

[0090]
$$\langle \alpha, \beta, \gamma | \mathbf{P} \triangleq \left(\frac{\kappa}{(\alpha c)^{\beta\gamma}}, (\alpha c)^\beta, \mathbf{a} + \beta\gamma\mathcal{A}, \mathbf{b} + \beta\gamma\mathcal{B}, \beta\mathcal{A}, \beta\mathcal{B}\right)$$

[0091] [수학식 23]

[0092]
$$(-1)^\ell \frac{\partial^\ell}{\partial s^\ell} \mathbb{H}_{p, q}^{m, n}\{f(t); \mathbf{P}\}(s) = \mathbb{H}_{p+1, q+1}^{m+1, n}\{t^\ell f(t); \partial^\ell \mathbf{P}\}(s)$$

[0093] [수학식 24]

[0094]
$$\partial^\ell \mathbf{P} \triangleq (\kappa c^\ell, c, (\mathbf{a} - \ell\mathcal{A}, -\ell), (0, \mathbf{b} - \ell\mathcal{B}), (\mathcal{A}, 1), (1, \mathcal{B}))$$

[0095] [수학식 25]

[0096]
$$\begin{aligned} & \mathbb{H}_{p_1, q_1}^{m_1, n_1}\left\{\frac{t^\gamma}{\beta} f\left(\alpha t^{1/\beta}\right); \mathbf{P}_1\right\}(s) \\ &= \mathbb{H}_{p_1, q_1}^{m_1, n_1}\left\{H_{p_2, q_2}^{m_2, n_2}(t; \langle \alpha, \beta, \gamma | \mathbf{P}_2 \rangle); \mathbf{P}_1\right\}(s) \end{aligned}$$

[0097] [수학식 26]

$$\mathbb{H}_{p_1, q_1}^{m_1, n_1} \left\{ f \left(t^{-1} \right); \mathbf{P}_1 \right\} (s) = \mathbb{H}_{p_1, q_1}^{m_1, n_1} \left\{ H_{q_2, p_2}^{n_2, m_2} \left(t; \mathbf{P}_2^{-1} \right); \mathbf{P}_1 \right\} (s)$$

[0098]

[0099] [수학식 27]

$$\mathbf{P}^{-1} \triangleq \left(\kappa, \frac{1}{c}, \mathbf{1}_q - \boldsymbol{\ell}, \mathbf{1}_p - \boldsymbol{a}, \boldsymbol{\mathcal{B}}, \boldsymbol{\mathcal{A}} \right)$$

[0100]

[0101] 본 명세서 전반에서, α, β 는 양의 실수(positive real number)일 수 있고(즉, $\alpha, \beta \in \mathbb{R}_{++}$, γ 는 복소수(complex number)일 수 있다(즉, $\gamma \in \mathbb{C}$). 상기의 [수학식 23] 및 [수학식 24]에서, 1은 자연수(natural number)일 수 있다(즉, $\ell \in \mathbb{N}$). 상기의 [수학식 19] 내지 [수학식 27]에서, $\mathbf{P}|\alpha\rangle$ 는 상기 파라미터 시퀀스 P에 대한 상기 스케일링 연산을 나타낼 수 있고, $\langle\alpha, \beta, \gamma|\mathbf{P}$ 는 상기 파라미터 시퀀스 P에 대한 상기 기본 연산을 나타낼 수 있고, $\partial^\ell \mathbf{P}$ 는 상기 파라미터 시퀀스 P에 대한 상기 미분 연산을 나타낼 수 있으며, $\mathbf{P}^{-1}$ 는 상기 파라미터 시퀀스 P에 대한 상기 역 연산을 나타낼 수 있다. 한편, 상기 기본 연산에서 $\alpha=\beta=1$ 인 경우를 $\langle\gamma|\mathbf{P} = \langle 1, 1, \gamma|\mathbf{P}$ 라 표기할 수 있으며, 이는 상기 파라미터 시퀀스 P에 대한 공액 연산(conjugate operation)을 나타낼 수 있다.

[0102] 상기 H-변환 $\mathbb{H}_{p, q}^{m, n} \{f(t); \mathbf{P}\}(s)$ 은 다양한 정리(proposition)를 만족할 수 있다. 상기 H-변환에 대한 정리는, (1) $f(t) = H_{p_2, q_2}^{m_2, n_2}(t; \mathbf{P}_2)$ 일 때 하기의 [수학식 28]을 만족하는 기본 이중성(elementary duality)과 관련된 제1 정리, 및 (2) $f(t) = H_{p_2, q_2}^{m_2, n_2}(t; \mathbf{P}_2)$ 일 때 하기의 [수학식 29]를 만족하는 역 이중성(inverse duality)과 관련된 제2 정리를 포함할 수 있다.

[0103] [수학식 28]

$$\begin{aligned} & \mathbb{H}_{p_1, q_1}^{m_1, n_1} \left\{ \frac{t^\gamma}{\beta} f \left(\alpha t^{1/\beta} \right) g(t); \mathbf{P}_1 \right\} (s^{-1}) \\ &= \mathbb{H}_{p_2, q_2}^{m_2, n_2} \left\{ g(st) H_{p_1, q_1}^{m_1, n_1}(t; \langle -1|\mathbf{P}_1); \langle \alpha, \beta, \gamma + 1|\mathbf{P}_2 \right\} (s) \end{aligned}$$

[0104]

[0105] [수학식 29]

$$\begin{aligned} & \mathbb{H}_{p_1, q_1}^{m_1, n_1} \left\{ t^\gamma f \left(t^{-1} \right); \mathbf{P}_1 \right\} (s^{-1}) \\ &= \mathbb{H}_{q_2, p_2}^{n_2, m_2} \left\{ H_{p_1, q_1}^{m_1, n_1}(t; \langle -1|\mathbf{P}_1); \langle \gamma + 1|\mathbf{P}_2^{-1} \right\} (s) \end{aligned}$$

[0106]

[0107] 또한, 상기 H-변환에 대한 정리는, $f(t) = g(t) H_{p_1, q_1}^{m_1, n_1}(t; \mathbf{P}_1)$ 이고 상기 파라미터 시퀀스 P에 대한 함수들이 하기의 [수학식 30] 내지 [수학식 33]과 같이 정의된 상태에서, (3) $q^*(\mathbf{P}) \geq 0$ 인 경우, 및 하기의 [수학식 34]와 같이 정의된 감마 함수 $\Gamma(b_{j^*} + s\mathcal{B}_{j^*})$ 의 $s = -b_{j^*}/\mathcal{B}_{j^*}$ 에서의 폴(pole)이 하기의 [수학식 35]를 만족하는 경우에, 0(zero) 근처의 함수 f(t)의 H-변환의 점근적 전개(asymptotic expansion)가 하기의 [수학식 36]을 만족하는 제3 정리를 포함할 수 있다. 상기 제3 정리는 대수적(algebraic) 점근적 전개와 관련된 정리일 수 있다.

[0108] [수학식 30]

$$\varrho^{\star}(\mathbf{P}) = \sum_{j=1}^q \mathcal{B}_j - \sum_{j=1}^p \mathcal{A}_j$$

[0109]

[0110] [수학식 31]

$$\omega^{\star}(\mathbf{P}) = \min_{1 \leq j \leq m} \left[\frac{\Re(b_j)}{\mathcal{B}_j} \right]$$

[0111]

[0112] [수학식 32]

$$\sigma^{\star}(\mathbf{P}) = \frac{1}{\mathcal{B}_{j^{\star}}} \frac{\prod_{j=1, j \neq j^{\star}}^m \Gamma(b_j - \omega^{\star}(\mathbf{P}) \mathcal{B}_j) \prod_{j=1}^n \Gamma(1 - a_j + \omega^{\star}(\mathbf{P}) \mathcal{A}_j)}{\prod_{j=n+1}^p \Gamma(a_j - \omega^{\star}(\mathbf{P}) \mathcal{A}_j) \prod_{j=m+1}^q \Gamma(1 - b_j + \omega^{\star}(\mathbf{P}) \mathcal{B}_j)}$$

[0113]

[0114] [수학식 33]

$$j^{\star} = \arg \min_{1 \leq j \leq m} [\Re(b_j) / \mathcal{B}_j]$$

[0115]

[0116] [수학식 34]

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-t} dt$$

[0117]

[0118] [수학식 35]

$$\mathcal{B}_{j^{\star}}(b_i + \ell) \neq \mathcal{B}_i b_{j^{\star}}, \quad 1 \leq i \neq j^{\star} \leq m, \quad \ell \in \mathbb{Z}_+$$

[0119]

[0120] [수학식 36]

$$\begin{aligned} & \mathbb{H}_{p,q}^{m,n} \{f(t); \mathbf{P}\}(s) \\ &= \kappa(cs)^{\omega^{\star}(\mathbf{P})} \sigma^{\star}(\mathbf{P}) \mathbb{H}_{p_1, q_1}^{m_1, n_1} \{g(t); \langle \omega^{\star}(\mathbf{P}) | \mathbf{P}_1 \rangle(1) + o(s^{\omega^{\star}(\mathbf{P})})\} \quad (s \rightarrow 0) \end{aligned}$$

[0121]

[0122] 상술한 바와 같이, 상기 H-변환과 관련된 다양한 단항 연산(unary operation)들이 제공되었으며, 이와 함께 상기 H-변환과 관련된 필수적인 두 개의 이항 연산(binary operation)들이 제공될 수 있다. 상기 두 개의 이항 연산들 중 하나는, (4) $f(t) = H_{p_2, q_2}^{m_2, n_2}(t; \mathbf{P}_2)$ 일 때 하기의 [수학식 37] 및 [수학식 38]을 만족하는 멜린 연산(Mellin operation)일 수 있다.

[0123] [수학식 37]

$$\mathbb{H}_{p_1, q_1}^{m_1, n_1} \{f(t); \mathbf{P}_1\}(s) = H_{p_1+q_2, q_1+p_2}^{m_1+n_2, n_1+m_2}(s; \mathbf{P}_1 \boxplus \mathbf{P}_2)$$

[0124]

[0125] [수학식 38]

$$\mathbf{P}_1 \boxplus \mathbf{P}_2 \triangleq \left(\frac{\kappa_1 \kappa_2}{c_2}, \frac{c_1}{c_2}, \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathcal{A}, \mathcal{B} \right)$$

[0126]

[0127] 상기의 [수학식 37] 및 [수학식 38]에서, 표기 $\mathbf{P}_1 \boxplus \mathbf{P}_2$ 는 파라미터 시퀀스들 $\mathbf{P}_1$ 및 $\mathbf{P}_2$ 에 대한 상기 멜린 연산을 나타낸다. 상기의 [수학식 38]은 [수학식 39] 내지 [수학식 41] 중 하나를 만족할 수 있다.

[0128] [수학식 39]

$$\begin{cases} \mathbf{a} = (\dot{\mathbf{a}}_1, \mathbf{1}_{m_2} - \dot{\mathbf{b}}_2 - \dot{\mathcal{B}}_2, \ddot{\mathbf{a}}_1, \mathbf{1}_{q_2-m_2} - \ddot{\mathbf{b}}_2 - \ddot{\mathcal{B}}_2) \\ \mathbf{b} = (\dot{\mathbf{b}}_1, \mathbf{1}_{n_2} - \dot{\mathbf{a}}_2 - \dot{\mathcal{A}}_2, \ddot{\mathbf{b}}_1, \mathbf{1}_{p_2-n_2} - \ddot{\mathbf{a}}_2 - \ddot{\mathcal{A}}_2) \\ \mathcal{A} = (\dot{\mathcal{A}}_1, \dot{\mathcal{B}}_2, \ddot{\mathcal{A}}_1, \ddot{\mathcal{B}}_2) \\ \mathcal{B} = (\dot{\mathcal{B}}_1, \dot{\mathcal{A}}_2, \ddot{\mathcal{B}}_1, \ddot{\mathcal{A}}_2) \end{cases}$$

[0129]

[0130] [수학식 40]

$$\begin{cases} \mathbf{a} = (\mathbf{1}_{m_2} - \dot{\mathbf{b}}_2 - \dot{\mathcal{B}}_2, \mathbf{a}_1, \mathbf{1}_{q_2-m_2} - \ddot{\mathbf{b}}_2 - \ddot{\mathcal{B}}_2) \\ \mathbf{b} = (\mathbf{1}_{n_2} - \dot{\mathbf{a}}_2 - \dot{\mathcal{A}}_2, \mathbf{b}_1, \mathbf{1}_{p_2-n_2} - \ddot{\mathbf{a}}_2 - \ddot{\mathcal{A}}_2) \\ \mathcal{A} = (\dot{\mathcal{B}}_2, \mathcal{A}_1, \ddot{\mathcal{B}}_2) \\ \mathcal{B} = (\dot{\mathcal{A}}_2, \mathcal{B}_1, \ddot{\mathcal{A}}_2) \end{cases}$$

[0131]

[0132] [수학식 41]

$$\begin{cases} \mathbf{a} = (\dot{\mathbf{a}}_1, \mathbf{1}_{q_2} - \dot{\mathbf{b}}_2 - \dot{\mathcal{B}}_2, \ddot{\mathbf{a}}_1) \\ \mathbf{b} = (\dot{\mathbf{b}}_1, \mathbf{1}_{p_2} - \dot{\mathbf{a}}_2 - \dot{\mathcal{A}}_2, \ddot{\mathbf{b}}_1) \\ \mathcal{A} = (\dot{\mathcal{A}}_1, \mathcal{B}_2, \ddot{\mathcal{A}}_1) \\ \mathcal{B} = (\dot{\mathcal{B}}_1, \mathcal{A}_2, \ddot{\mathcal{B}}_1) \end{cases}$$

[0133]

[0134] 상기 두 개의 이항 연산들 중 다른 하나는, (5) $f(t) = H_{p_2, q_2}^{m_2, n_2}(t; \mathbf{P}_2)$ 일 때 하기의 [수학식 42] 및 [수학식 43]을 만족하는 컨볼루션 연산(convolution operation)일 수 있다.

[0135] [수학식 42]

$$\mathbb{H}_{p_1, q_1}^{m_1, n_1} \left\{ \frac{1}{t} f(t^{-1}); \mathbf{P}_1 \right\} (s) = H_{p_1+p_2, q_1+q_2}^{m_1+m_2, n_1+n_2}(s; \mathbf{P}_1 \boxplus \mathbf{P}_2)$$

[0136]

[0137] [수학식 43]

$$\mathbf{P}_1 \boxplus \mathbf{P}_2 \triangleq (\kappa_1 \kappa_2, c_1 c_2, \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathcal{A}, \mathcal{B})$$

[0138]

[0139] 상기의 [수학식 42] 및 [수학식 43]에서, 표기 $\mathbf{P}_1 \boxplus \mathbf{P}_2$ 는 상기 파라미터 시퀀스들 $\mathbf{P}_1$ 및 $\mathbf{P}_2$ 에 대한 상기 컨볼루션 연산을 나타낸다. 상기의 [수학식 43]은 [수학식 44] 내지 [수학식 46] 중 하나를 만족할 수 있다.

[0140] [수학식 44]

$$\begin{cases} \mathbf{a} = (\dot{\mathbf{a}}_1, \dot{\mathbf{a}}_2, \ddot{\mathbf{a}}_1, \ddot{\mathbf{a}}_2) \\ \mathbf{b} = (\dot{\mathbf{b}}_1, \dot{\mathbf{b}}_2, \ddot{\mathbf{b}}_1, \ddot{\mathbf{b}}_2) \\ \mathcal{A} = (\dot{\mathcal{A}}_1, \dot{\mathcal{A}}_2, \ddot{\mathcal{A}}_1, \ddot{\mathcal{A}}_2) \\ \mathcal{B} = (\dot{\mathcal{B}}_1, \dot{\mathcal{B}}_2, \ddot{\mathcal{B}}_1, \ddot{\mathcal{B}}_2) \end{cases}$$

[0141]

[0142] [수학식 45]

$$\begin{cases} \mathbf{a} = (\dot{\mathbf{a}}_2, \mathbf{a}_1, \ddot{\mathbf{a}}_2) \\ \mathbf{b} = (\dot{\mathbf{b}}_2, \mathbf{b}_1, \ddot{\mathbf{b}}_2) \\ \mathcal{A} = (\dot{\mathcal{A}}_2, \mathcal{A}_1, \ddot{\mathcal{A}}_2) \\ \mathcal{B} = (\dot{\mathcal{B}}_2, \mathcal{B}_1, \ddot{\mathcal{B}}_2) \end{cases}$$

[0143]

[0144] [수학식 46]

$$\begin{cases} \mathbf{a} = (\dot{\mathbf{a}}_1, \mathbf{a}_2, \ddot{\mathbf{a}}_1) \\ \mathbf{b} = (\dot{\mathbf{b}}_1, \mathbf{b}_2, \ddot{\mathbf{b}}_1) \\ \mathbf{A} = (\dot{\mathbf{A}}_1, \mathbf{A}_2, \ddot{\mathbf{A}}_1) \\ \mathbf{B} = (\dot{\mathbf{B}}_1, \mathbf{B}_2, \ddot{\mathbf{B}}_1) \end{cases}$$

[0145]

[0146] 상기 H-변환에 대한 정리는, (4) 상기 멜린 연산과 관련된 제4 정리, 및 (5) 상기 컨볼루션 연산과 관련된 제5 정리를 더 포함할 수 있다.

[0147] 상기 H-변환의 성질은, (7) 하기의 [수학식 47]을 만족하는 합성(composition)과 관련된 제7 성질을 더 포함할 수 있다.

[0148] [수학식 47]

$$\begin{aligned} \mathbb{H}_{p_1, q_1}^{m_1, n_1} \left\{ \frac{1}{t} \mathbb{H}_{p_2, q_2}^{m_2, n_2} \{f(\tau); \mathbf{P}_2\} (t^{-1}); \mathbf{P}_1 \right\} (s) \\ = \mathbb{H}_{p_1 + p_2, q_1 + q_2}^{m_1 + m_2, n_1 + n_2} \{f(t); \mathbf{P}_1 \boxplus \mathbf{P}_2\} (s) \end{aligned}$$

[0149]

[0150] 상기과 같은 다양한 단항 및 다항 연산들이 하기의 [표 3]과 같이 정리될 수 있고, 상기과 같은 다양한 단항 및 다항 연산들에 대한 항등식(또는 항등원)(identity)들이 하기의 [표 4]와 같이 정리될 수 있으며, 상대적으로 자주 쓰이는 파라미터 시퀀스들이 하기의 [표 5]와 같이 정리될 수 있다.

[0151] [표 3]

Operation	Symbol	Order or parameter sequence
Scaling	$\mathbf{P} \alpha\rangle$	$\left(\frac{\kappa}{\alpha}, \frac{\ell}{\alpha}, \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{A}, \mathbf{B}\right)$
Conjugate	$\langle\gamma \mathbf{P}$	$\left(\frac{\kappa}{\gamma^2}, \epsilon, \mathbf{a} + \gamma\mathbf{A}, \mathbf{b} + \gamma\mathbf{B}, \mathbf{A}, \mathbf{B}\right)$
Elementary	$\langle\alpha, \beta, \gamma \mathbf{P}$	$\left(\frac{\kappa}{(\alpha\gamma)^{\beta\gamma}}, (\alpha\gamma)^{\beta}, \mathbf{a} + \beta\gamma\mathbf{A}, \mathbf{b} + \beta\gamma\mathbf{B}, \beta\mathbf{A}, \beta\mathbf{B}\right)$
Differential	$\partial^{\ell}\mathbf{O}$	$(m+1, n, p+1, q+1)$
	$\partial^{\ell}\mathbf{P}$	$(\kappa\ell^{\ell}, \epsilon, (\mathbf{a} - \ell\mathbf{A}, -\ell), (0, \mathbf{b} - \ell\mathbf{B}), (\mathbf{A}, 1), (1, \mathbf{B}))$
Inverse	$\mathbf{O}^{-1}$	(n, m, q, p)
	$\mathbf{P}^{-1}$	$(\kappa, \frac{1}{\epsilon}, \mathbf{1}_q - \mathbf{b}, \mathbf{1}_p - \mathbf{a}, \mathbf{B}, \mathbf{A})$
Mellin	$\mathbf{O}_1 \square \mathbf{O}_2$	$(m_1 + m_2, n_1 + m_2, p_1 + q_2, q_1 + p_2)$
	$\mathbf{P}_1 \square \mathbf{P}_2$	$\left(\frac{\kappa_1 \kappa_2}{\epsilon_2}, \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}, \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{A}, \mathbf{B}\right)$
		$\begin{cases} \mathbf{a} = (\mathbf{a}_1, \mathbf{1}_{q_2} - \mathbf{b}_2 - \mathbf{B}_2, \mathbf{a}_1) \\ \mathbf{b} = (\mathbf{b}_1, \mathbf{1}_{p_2} - \mathbf{a}_2 - \mathbf{A}_2, \mathbf{b}_1) \\ \mathbf{A} = (\mathbf{A}_1, \mathbf{B}_2, \mathbf{A}_1) \\ \mathbf{B} = (\mathbf{B}_1, \mathbf{A}_2, \mathbf{B}_1) \end{cases}$
Convolution	$\mathbf{O}_1 \boxplus \mathbf{O}_2$	$(m_1 + m_2, n_1 + m_2, p_1 + p_2, q_1 + q_2)$
	$\mathbf{P}_1 \boxplus \mathbf{P}_2$	$(\kappa_1 \kappa_2, \epsilon_1 \epsilon_2, \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{A}, \mathbf{B})$
		$\begin{cases} \mathbf{a} = (\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_1) \\ \mathbf{b} = (\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \mathbf{b}_1) \\ \mathbf{A} = (\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \mathbf{A}_1) \\ \mathbf{B} = (\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \mathbf{B}_1) \end{cases}$

[0152] (Note) $\alpha, \beta \in \mathbb{R}_{++}$, $\gamma \in \mathbb{C}$, $\ell \in \mathbb{N}$

[0153] [표 4]

Operation	Property
Scaling	$\mathbf{P} 1\rangle = \mathbf{P}$ $\mathbf{P} \alpha_1\rangle \alpha_2\rangle = \mathbf{P} \alpha_1 \alpha_2\rangle$
Conjugate	$\langle 0 \mathbf{P} = \mathbf{P}$ $\langle \gamma_2 \langle \gamma_1 \mathbf{P} = \langle \gamma_1 + \gamma_2 \mathbf{P}$
Elementary	$\langle 1, 1, 0 \mathbf{P} = \mathbf{P}$ $\langle \alpha, \beta, \gamma \mathbf{P}_\emptyset = \mathbf{P}_\emptyset$ $\langle 1, \beta_2, \gamma_2 \langle \alpha, \beta_1, \gamma_1 \mathbf{P} = \langle \alpha, \beta_1 \beta_2, \frac{\gamma_1}{\beta_2} + \gamma_2 \mathbf{P}$
Inverse	$\begin{cases} \mathbf{O}_\emptyset^{-1} = \mathbf{O}_\emptyset \\ \mathbf{P}_\emptyset^{-1} = \mathbf{P}_\emptyset \end{cases}$ $\begin{cases} (\mathbf{O}^{-1})^{-1} = \mathbf{O} \\ (\mathbf{P}^{-1})^{-1} = \mathbf{P} \end{cases}$ $\langle \alpha, \beta, \gamma \mathbf{P}^{-1} = \langle \alpha^{-1}, \beta, -\gamma \mathbf{P}^{-1}$
Mellin	$\begin{cases} \mathbf{O} \square \mathbf{O}_\emptyset = \mathbf{O} \\ \mathbf{P} \square \mathbf{P}_\emptyset = \mathbf{P} \end{cases}$ $\begin{cases} \mathbf{O}_\emptyset \square \mathbf{O} = \mathbf{O}^{-1} \\ \mathbf{P}_\emptyset \square \mathbf{P} = \langle -1 \mathbf{P}^{-1} \end{cases}$ $\begin{cases} \mathbf{O}_1 \square \mathbf{O}_2^{-1} = \mathbf{O}_2 \square \mathbf{O}_1^{-1} \\ \mathbf{P}_1 \square \langle -1 \mathbf{P}_2^{-1} = \mathbf{P}_2 \square \langle -1 \mathbf{P}_1^{-1} \end{cases}$ $\begin{cases} (\mathbf{O}_1 \square \mathbf{O}_2)^{-1} = \mathbf{O}_2 \square \mathbf{O}_1 \\ (\mathbf{P}_1 \square \mathbf{P}_2)^{-1} = \langle 1 \mathbf{P}_2 \square \langle -1 \mathbf{P}_1 \end{cases}$
Convolution	$\begin{cases} \mathbf{O} \boxplus \mathbf{O}_\emptyset = \mathbf{O}_\emptyset \boxplus \mathbf{O} = \mathbf{O} \\ \mathbf{P} \boxplus \mathbf{P}_\emptyset = \mathbf{P}_\emptyset \boxplus \mathbf{P} = \mathbf{P} \end{cases}$ $\begin{cases} \mathbf{O}_1 \boxplus \mathbf{O}_2 = \mathbf{O}_2 \boxplus \mathbf{O}_1 = \mathbf{O}_1 \square \mathbf{O}_2^{-1} \\ \mathbf{P}_1 \boxplus \mathbf{P}_2 = \mathbf{P}_2 \boxplus \mathbf{P}_1 = \mathbf{P}_1 \square \langle -1 \mathbf{P}_2^{-1} \end{cases}$ $\begin{cases} (\mathbf{O}_1 \boxplus \mathbf{O}_2)^{-1} = \mathbf{O}_2^{-1} \boxplus \mathbf{O}_1^{-1} = \mathbf{O}_2^{-1} \square \mathbf{O}_1 \\ (\mathbf{P}_1 \boxplus \mathbf{P}_2)^{-1} = \mathbf{P}_2^{-1} \boxplus \mathbf{P}_1^{-1} = \mathbf{P}_2^{-1} \square \langle -1 \mathbf{P}_1 \end{cases}$

[0154]

[0155] [표 5]

Symbol	Parameter sequence
$\mathbf{P}_{\text{pdf}}$	$(1, 1, (1, -), (-, 0), (1, -), (-, 1))$
$\mathbf{P}_{\text{exp}}$	$(1, 1, -, (0, -), -, (1, -))$
$\mathbf{P}_{\text{cap}}$	$(\frac{1}{\ln 2}, 1, (1_2, -), (1, 0), (1_2, -), (1, 1))$
$\mathbf{P}_{\text{log}}$	$(\frac{1}{\ln 2}, 1, (\mathbf{0}_2, -), (\mathbf{0}_2, -), (1_2, -), (1_2, -))$
$\mathbf{P}_{\text{gam}}^{(\nu)}$	$(\frac{\nu}{\Gamma(\nu)}, \nu, -, (\nu - 1, -), -, (1, -))$
$\mathbf{P}_{\text{pow}}^{(\nu)}$	$(\frac{1}{\Gamma(\nu)}, 1, (1 - \nu, -), (0, -), (1, -), (1, -))$

(Note) $\nu \in \mathbb{R}_{++}$

[0156]

[0157] 2. 폭스 H-변량 및 ζ -차수 불규칙 H-변량의 정의

[0158] 일 실시예에서, 음이 아닌 랜덤 변수(nonnegative random variable) X에 대한 상기 폭스 H-변량은, 상기 랜덤 변수 X의 확률 밀도 함수(PDF: probability density function)가 상기 H-변환에 기초한 하기의 [수학식 48]을 만족하는 경우에, 상기 랜덤 변수 X가 오더 시퀀스 $\mathbf{O} = (m, n, p, q)$ 와 파라미터 시퀀스 $\mathbf{P} = (\kappa, c, \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathcal{A}, \mathcal{B})$ 에 기초한 H-분포(H-distribution)를 가짐을 나타낼 수 있다. 상기 랜덤 변수 X에 대한 상기 폭스 H-변량은, $X \sim \mathcal{H}(\mathbf{O}, \mathbf{P})$ 또는 간단히 $X \sim \mathcal{H}_{p,q}^{m,n}(\mathbf{P})$ 로 표기될 수 있다.

[0159] [수학식 48]

$$p_X(x) = \kappa H_{p,q}^{m,n} \left[c x \left| \begin{matrix} \mathbf{a}, \mathcal{A} \\ \mathbf{b}, \mathcal{B} \end{matrix} \right. \right] \quad (x \geq 0)$$

[0160]

[0161] 상기의 [수학식 48]은, 음이 아닌 실수(nonnegative real number)인 x(즉, $x \in \mathbb{R}_+$) 모두에 대해 $p_X(x) \geq 0$ 이고 하기의 [수학식 49]와 관련하여 $\mathbb{H}_{p,q}^{m,n}\{1; \mathbf{P}\}(1) = 1$ 인 분배 구조(distributional

structure)를 만족하는 파라미터들의 세트(set of parameters)에 기초할 수 있다.

[수학식 49]

$$\mathbb{H}_{p,q}^{m,n}\{1; \mathbf{P}\}(1) = \frac{\kappa \prod_{j=1}^m \Gamma(b_j + \mathcal{B}_j) \prod_{j=1}^n \Gamma(1 - a_j - \mathcal{A}_j)}{c \prod_{j=n+1}^p \Gamma(a_j + \mathcal{A}_j) \prod_{j=m+1}^q \Gamma(1 - b_j - \mathcal{B}_j)}$$

상기 H-분포는, 감마(gamma), 와이불(Weibull), 맥스웰(Maxwell), 베타(beta), 반정규(half-normal), 지수(exponential), 카이제곱(chi-square), 레일리(Rayleigh), 일반 초기하(generalized hypergeometric), 반코시(half-Cauchy), F 분포 등과 같은 널리 알려진 다양한 분포들로 확장 적용될 수 있다.

또한, 상기 H-분포는, 하기의 [수학식 50]을 만족하는 경우에 독립적인(independent) H-변량들의 곱(product), 거듭제곱(power), 몫(quotient)의 다양한 조합들을 처리하기에 용이할 수 있다. 다시 말하면, 하기의 [수학식 50]을 만족하는 경우에 상기 H-분포는 다루기 쉬운(tractable)(즉, H-보존(H-preserving)) 성질을 가질 수 있으며, 하기의 [수학식 50]이 상기 H-분포의(즉, 상기 폭스 H-변량의) 필수 조건일 수 있다.

[수학식 50]

$$\begin{cases} a_j + \mathcal{A}_j < 1, \quad \forall j = 1, 2, \dots, n \\ -b_j/\mathcal{B}_j < 1, \quad \forall j = 1, 2, \dots, m \end{cases}$$

상기 폭스 H-변량과 관련하여, 인수분해 가능한(factorizable) 랜덤 변수를 정의할 수 있다. 구체적으로, 독립적인 랜덤 변수들인 X_1, X_2 와 상수들인 $r_1, r_2 \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$ 이 존재하고 하기의 [수학식 51]을 만족하는 경우에, 음이 아닌 랜덤 변수 X 가 인수분해 가능할 수 있다.

[수학식 51]

$$X_1^{r_1} X_2^{r_2} \stackrel{d}{=} X$$

인수분해 가능 조건(factorizability)과 관련하여, $X_\ell \sim \mathcal{H}(\mathbf{O}_\ell, \mathbf{P}_\ell)$, $r_\ell \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$ $\ell = 1, 2, \dots, L$ 이고 X 가 하기의 [수학식 52]를 만족하며 X_ℓ 들이 독립적일 때, 하기의 [수학식 53]을 만족하는 조건에서 $X \sim \mathcal{H}(\mathbf{O}, \mathbf{P})$ 일 수 있다. 다시 말하면, 상기 폭스 H-변량 $X \sim \mathcal{H}(\mathbf{O}, \mathbf{P})$ 는 인수분해 가능한 이점이 있을 수 있다.

[수학식 52]

$$X = \prod_{\ell=1}^L X_\ell^{r_\ell}$$

[수학식 53]

$$\begin{cases} \mathbf{O} = \boxplus_{\ell=1}^L \mathbf{O}_\ell^{\text{sgn}(r_\ell)} \\ \mathbf{P} = \boxplus_{\ell=1}^L \left(1, |r_\ell|, \frac{1}{r_\ell} - 1 \right) \mathbf{P}_\ell^{\text{sgn}(r_\ell)} \end{cases}$$

일 실시예에서, 음이 아닌 랜덤 변수 Y 에 대한 상기 ζ -차수 불규칙 H-변량은, 상기 랜덤 변수 Y 의 확률 밀도 함수가 상기 H-변환에 기초한 하기의 [수학식 54]를 만족하는 경우에, 상기 랜덤 변수 Y 가 ζ -차수 불규칙 H-분포(degree- ζ irregular H-distribution)를 가짐을 나타낼 수 있다. 상기 ζ -차수 불규칙 H-분포는 불규칙 지수(irregularity exponent)가 λ 이고 차수(degree)가 ζ 이며 오더 시퀀스 $\mathbf{O} = (m, n, p, q)$ 와 파라미터 시퀀스 $\mathbf{P} = (\kappa, c, \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{A}, \mathbf{B})$ 에 기초한 분포를 나타낼 수 있다. 상기 λ, ζ 는 양의 실수일 수 있다(즉,

$\lambda \in \mathbb{R}_{++}$, $\zeta \in \mathbb{R}_{++}$). 상기 랜덤 변수 Y 에 대한 상기 ζ -차수 불규칙 H-변량은, $Y \sim {}^{(\zeta)}\mathcal{H}(\mathbf{O}, \mathbf{P}, \lambda)$ 또는 간단히 $Y \sim {}^{(\zeta)}\mathcal{H}_{p,q}^{m,n}(\mathbf{P}, \lambda)$ 로 표기될 수 있다.

[수학식 54]

$$p_Y(y) = \kappa e^{-\lambda y^\zeta} H_{p,q}^{m,n} \left[cy \left| \begin{matrix} (a, \mathcal{A}) \\ (b, \mathcal{B}) \end{matrix} \right. \right] \quad (y \geq 0)$$

상기의 [수학식 54]는, 음이 아닌 실수인 y (즉, $y \in \mathbb{R}_+$) 모두에 대해 $p_Y(y) \geq 0$ 이고 하기의 [수학식 55]인 분배 구조를 만족하는 파라미터들의 세트에 기초할 수 있다.

[수학식 55]

$$H_{p+1,q}^{m,n+1} \left(1; \mathbf{P} \square \left\langle \lambda, \frac{1}{\zeta}, 0 \right| \mathbf{P}_{\text{exp}} \right) = \zeta$$

상기의 [수학식 55]에서 $\mathbf{P}_{\text{exp}}$ 는 상기의 [표 5]에 기재된 것처럼 하기의 [수학식 56]을 만족할 수 있다.

[수학식 56]

$$\mathbf{P}_{\text{exp}} = (1, 1, -, (0, -), -, (1, -))$$

상기 폭스 H-변량 $X \sim \mathcal{H}_{p,q}^{m,n}(\mathbf{P})$ 의 누적 분포 함수(CDF: cumulative distribution function), 적률 생성 함수(MGF: moment generating function) 및 적률(moment)이 하기의 [표 6]과 같이 정리될 수 있고, 상기 ζ -차수 불규칙 H-변량 $Y \sim {}^{(\zeta)}\mathcal{H}_{p,q}^{m,n}(\mathbf{P}, \lambda)$ 의 누적 분포 함수, 적률 생성 함수 및 적률이 하기의 [표 7]과 같이 정리될 수 있다.

[표 6]

Statistics	Symbol	Transform representation	Function representation
CDF	$F_X(x)$	$\mathcal{H}_{p,q}^{m,n} \left\{ \frac{1}{t} \mathbb{1}_{[0,1]}(t); \langle 1 \mathbf{P} \rangle(x) \right\}$	$H_{p+1,q+1}^{m,n+1}(x; \mathbf{P}_{\text{cdf}} \boxplus \langle 1 \mathbf{P} \rangle)$
MGF	$\phi_X(s)$	$\mathcal{H}_{0,1}^{1,0} \left\{ H_{p,q}^{m,n}(t; \mathbf{P}; \mathbf{P}_{\text{exp}}) \right\}(s)$	$H_{q,p+1}^{n+1,m}(s; \mathbf{P}_{\text{exp}} \square \mathbf{P})$
Moment	$\langle X \rangle_\ell$	$\mathcal{H}_{p,q}^{m,n} \{1; \langle \ell \mathbf{P} \rangle(1)\}$	$\frac{\kappa}{\epsilon^{\ell+1}} \frac{\prod_{j=1}^n \Gamma(\delta_j + (\ell+1)\beta_j) \prod_{j=1}^q \Gamma(1 - \alpha_j - (\ell+1)\beta_j)}{\prod_{j=n+1}^p \Gamma(\alpha_j + (\ell+1)\beta_j) \prod_{j=n+1}^q \Gamma(1 - \delta_j - (\ell+1)\beta_j)}$

[표 7]

Statistics	Symbol	Transform representation	Function representation
CDF	$F_Y(y)$	$\sum_{\ell=0}^{\infty} \frac{(-\lambda)^\ell}{\ell!} \mathcal{H}_{p,q}^{m,n} \left\{ \frac{1}{t} \mathbb{1}_{[0,1]}(t); \langle \ell \zeta + 1 \mathbf{P} \rangle(y) \right\}$	$\sum_{\ell=0}^{\infty} \frac{(-\lambda)^\ell}{\ell!} H_{p+1,q+1}^{m,n+1}(y; \mathbf{P}_{\text{cdf}} \boxplus \langle \ell \zeta + 1 \mathbf{P} \rangle)$
MGF	$\phi_Y(s)$	$\mathcal{H}_{0,1}^{1,0} \left\{ e^{-\lambda t^\zeta} H_{p,q}^{m,n}(t; \mathbf{P}; \mathbf{P}_{\text{exp}}) \right\}(s)$	$\begin{cases} H_{1,0;0,1;p,q}^{0,1;1,0;m,n} \left[\frac{1}{\zeta \lambda} s^\zeta \left \begin{matrix} \langle 1, \zeta, 0 \mathbf{P}_{\text{exp}} \frac{1}{\zeta} \rangle \\ \langle 1, \zeta, \frac{1}{\zeta} - 1 \mathbf{P} \lambda \rangle \end{matrix} \right. \right], & \text{if } \zeta \neq 1 \\ H_{q,p+1}^{n+1,m}(s + \lambda; \mathbf{P}_{\text{exp}} \square \mathbf{P}), & \text{if } \zeta = 1 \end{cases}$
Moment	$\langle Y \rangle_\ell$	$\mathcal{H}_{p,q}^{m,n} \left\{ e^{-\lambda t^\zeta}; \langle \ell \mathbf{P} \rangle(1) \right\}$	$\frac{1}{\zeta} H_{p+1,q}^{m,n+1} \left(1; \mathbf{P} \square \left\langle \lambda, \frac{1}{\zeta}, \ell \right \mathbf{P}_{\text{exp}} \right)$

3. 폭스 H-변량에 기초한 채널 모델링

일반적으로, 무선 통신 시스템(10)에서 수신된 무선 신호(RS)의 파워 또는 수신기(200)에서의 순간(instantaneous) SNR(signal-to-noise ratio)은, 단기/소규모 페이딩(small-scale fading) 및 장기/대규모 페이딩(large-scale fading)과 같은 무선 전파 특성을 설명하기 위해 필요할 수 있다. 상기 순간 SNR은 하기의 [수학식 57]을 만족할 수 있고, 정규화된 순간 SNR은 하기의 [수학식 58]을 만족할 수 있다.

[0192] [수학식 57]

$$\Gamma = \frac{E_s}{N_0} \prod_{\ell} Z_{\ell}$$

[0193]

[0194] [수학식 58]

$$\Gamma_{\text{norm}} = \Gamma / \langle \Gamma \rangle_1$$

[0196] 상기의 [수학식 57]에서, $Z_1, Z_2, \dots$ 등은 독립적인 음이 아닌 랜덤 변수들을 나타낼 수 있고, 다중 경로(multipath) 페이딩, 섀도우잉(shadowing)(또는 섀도우 페이딩(shadow fading)) 등과 같은 전파 효과를 설명할 수 있다. E_s 는 심볼마다의 에너지(energy per symbol)를 나타낼 수 있으며, N_0 는 AWGN(additive white Gaussian noise)의 파워 스펙트럼 밀도(power spectral density)를 나타낼 수 있다. 랜덤 전파 효과들인 $Z_1, Z_2, \dots$ 가 상기 H-변량으로 모델링되는 경우에, 상기 인수분해 가능 조건에 기초하여 상기 순간 SNR에 대해서도 상술한 H-변환의 성질 및 정리들이 적용 가능할 수 있다.

[0197] 일 실시예에서, 채널(300)은 상기 다중 경로 페이딩과 상기 섀도우잉을 합성하여 모델링될 수 있다.

[0198] 채널(300)의 합성 페이딩 포락선(composite fading envelope)을 S_{ψ} 라 할 때, S_{ψ} 의 로컬 평균 파워(local mean power)인 X_{ψ} 는 글로벌 평균(global mean)인 Ω 와 상기 섀도우잉에 의한 분산 대 평균 제곱비(variance-to-mean-square ratio)인 ψ 에 기초한 랜덤 변화(random variations) 특징을 나타낼 수 있다. ψ 는 $\sqrt{X_{\psi}}$ 의 페이딩 양(AF: amount of fading)과 동일할 수 있다. S_{ψ} 의 확률 밀도 함수는 하기의 [수학식 59] 내지 [수학식 61]을 만족할 수 있다.

[0199] [수학식 59]

$$p_{S_{\psi}}(s) = \int_0^{\infty} p_{S_{\psi}|X_{\psi}}(s|x) p_{X_{\psi}}(x) dx \quad (s \geq 0)$$

[0200]

[0201] [수학식 60]

$$\mathbb{E}\{S_{\psi}^2 | X_{\psi}\} = X_{\psi}$$

[0202]

[0203] [수학식 61]

$$\langle S_{\psi} \rangle_2 = \langle X_{\psi} \rangle_1 = \Omega$$

[0204]

[0205] 상기의 [수학식 60]에서, $\mathbb{E}\{\cdot\}$ 는 기대 연산자(expectation operator)를 나타낼 수 있다. 상기의 [수학식 61]에서, $\langle X \rangle_{\ell}$ 은 상기의 [표 6] 및 [표 7]에 기재된 것처럼 X 의 ℓ 번째 적분을 나타낼 수 있고, $\langle X \rangle_{\ell} = \mathbb{E}\{X^{\ell}\}$ 일 수 있다.

[0206] 상기 다중 경로 페이딩과 상기 섀도우잉이 통계적으로 독립적(statistically independent)일 때, 하기의 [수학식 62]와 같이 상기 합성 페이딩을 상기 다중 경로 페이딩과 상기 섀도우잉의 대수(algebra)로 표현할 수 있다.

[0207] [수학식 62]

$$S_{\psi} = Z \sqrt{X_{\psi}}$$

[0208]

[0209] 상기의 [수학식 62]에서, Z 는 X_{ψ} 와 독립적이고 $\mathbb{E}\{Z^2\} = 1$ 를 만족하는 상기 다중 경로 페이딩의 정규화된 버전을 나타낼 수 있다. 다시 말하면, Z 는 상기 다중 경로 페이딩을 나타낼 수 있고, X_{ψ} 는 상기 섀도우잉을 나타낼 수 있다. ψ 는 섀도우잉 수치(shadowing figure)라고 불릴 수 있다. 상기의 [수학식 62]에 기초하여 상기의

[수학식 59]가 획득될 수 있다.

[0210] 일 실시예에서, 채널(300)은 상기 H-변환을 기초로 정의되는 상기 폭스 H-변량을 이용하여 모델링된다. 이 경우, 채널(300)은 무선 전파(radio propagation)에 따라 무선 신호(RS)의 파워가 균일하게 감쇄하는 동질의(homogeneous)(이에 더하여, 분산(diffuse) 및 산란(scattering)의) 무선 전파 조건을 만족할 수 있다. 이 경우, 중심 극한 정리(central limit theorem)에 따라 채널(300) 내의 다중 경로 성분들이 0 평균(zero-mean) 및 비상관(uncorrelated)인 동상(in-phase) 및 직교(quadrature) 가우시안(Gaussian) 변수들의 특성을 따를 수 있고, 소규모의 다중 경로 페이딩이 대규모의 쉐도우잉에 중첩(superimposed)될 수 있다.

[0211] 일 실시예에서, 채널(300)이 상기 동질의 무선 전파 조건을 만족하고 상기 폭스 H-변량을 이용하여 모델링되는 경우에, 채널(300) 내의 상기 다중 경로 페이딩을 나타내는 Z에 대한 상기 폭스 H-변량인 $Z \sim \mathcal{H}_{p_1, q_1}^{m_1, n_1}(\mathbf{P}_1)$ 는 하기의 [수학식 63]을 만족할 수 있고, 채널(300) 내의 상기 쉐도우잉을 나타내는 X_ψ 에 대한 상기 폭스 H-변량인 $X_\psi \sim \mathcal{H}_{p_2, q_2}^{m_2, n_2}(\mathbf{P}_2 | \Omega)$ 는 하기의 [수학식 64]를 만족할 수 있다. 이 때, 채널(300)의 상기 합성 페이딩 포락선을 나타내는 S_ψ 는, 평균 파워(mean power)가 Ω 이고 쉐도우잉 수치가 ψ 이며 확률 밀도 함수가 하기의 [수학식 65]를 만족하는 H-페이딩(H-fading)에 상응할 수 있다. Ω 는 양의 실수일 수 있고, ψ 는 음이 아닌 실수일 수 있다(즉, $\Omega \in \mathbb{R}_{++}$, $\psi \in \mathbb{R}_+$). 예를 들어, 상기 H-페이딩은 불규칙성 없는 H-페이딩(H-fading without irregularity)일 수 있다.

[0212] [수학식 63]

[0213]
$$\mathbb{H}_{p_1, q_1}^{m_1, n_1} \{1; \langle 2 | \mathbf{P}_1 \rangle (1) = 1$$

[0214] [수학식 64]

[0215]
$$\begin{cases} \mathbb{H}_{p_2, q_2}^{m_2, n_2} \{1; \langle 1 | \mathbf{P}_2 \rangle (1) = 1 \\ \mathbb{H}_{p_2, q_2}^{m_2, n_2} \{1; \langle 2 | \mathbf{P}_2 \rangle (1) = 1 + \psi \\ \mathbf{P}_2 = \mathbf{P}_\emptyset \text{ for } \psi = 0. \end{cases}$$

[0216] [수학식 65]

[0217]
$$p_{S_\psi}(s) = \mathbb{H}_{p_1, q_1}^{m_1, n_1} \left\{ \frac{1}{t} H_{p_2, q_2}^{m_2, n_2} \left(t^{-1}; \left\langle 1, \frac{1}{2}, 1 \middle| \mathbf{P}_2 \right\rangle; \mathbf{P}_1 \middle| \sqrt{\Omega} \right) \right\} (s)$$

[0218] 일 실시예에서, 상기 H-페이딩에 상응하는 S_ψ 는 하기의 [수학식 66] 및 [수학식 67]과 같이 상기 폭스 H-변량으로 표기될 수 있다. 일 실시예에서, 상기 H-페이딩에 상응하는 S_ψ 의 페이딩 양은 하기의 [수학식 68]을 만족할 수 있다. 일 실시예에서, 상기 쉐도우잉이 없는 $\psi=0$ 인 경우에, 즉 $X_\psi \sim \mathcal{H}_{0,0}^{0,0}(\mathbf{P}_\emptyset | \Omega)$ 인 경우에, 상기 H-페이딩은 하기의 [수학식 69]와 같이 감소할 수 있다.

[0219] [수학식 66]

[0220]
$$S_\psi \sim \mathcal{H}_{p_1+p_2, q_1+q_2}^{m_1+m_2, n_1+n_2}(\mathbf{P}_{(S_\psi)} | \sqrt{\Omega})$$

[0221] [수학식 67]

[0222]
$$\mathbf{P}_{(S_\psi)} = \mathbf{P}_1 \boxplus \left\langle 1, \frac{1}{2}, 1 \middle| \mathbf{P}_2 \right\rangle$$

[0223] [수학식 68]

[0224]
$$\text{AF}_{S_\psi} = (1 + \psi) \mathbb{H}_{p_1, q_1}^{m_1, n_1} \{1; \langle 4 | \mathbf{P}_1 \rangle (1) - 1$$

[0225] [수학식 69]

[0226]
$$S_0 \sim \mathcal{H}_{p_1, q_1}^{m_1, n_1} \left(\mathbf{P}_1 \mid \sqrt{\Omega} \right)$$

[0227] 일 실시예에서, 상기 H-페이딩인 $S_\psi \sim \mathcal{H}_{p, q}^{m, n} \left(\mathbf{P} \mid \sqrt{\Omega} \right)$ 의 특별한 케이스로서, 다중 경로 페이딩 및 합성 페이딩에 대한 다양한 모델들이 하기의 [표 8]과 같이 정리될 수 있다.

[0228] [표 8]

Multipath	Shadowing	Shadowing figure ψ	Order sequence $\mathbf{O} = (m, n, p, q)$	Parameter sequence $\mathbf{P} = (\kappa, \epsilon, \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{A}, \mathbf{B})$
Rayleigh	—	0	(1, 0, 0, 1)	$(1, 1, -, \frac{1}{2}, -, \frac{1}{2})$
Nakagami-m	—	0	(1, 0, 0, 1)	$(\frac{\sqrt{m}}{\Gamma(m)}, \sqrt{m}, -, m - \frac{1}{2}, -, \frac{1}{2})$
Weibull	—	0	(1, 0, 0, 1)	$(\sqrt{\Gamma(1 + \frac{2}{\beta})}, \sqrt{\Gamma(1 + \frac{2}{\beta})}, -, 1 - \frac{1}{\beta}, -, \frac{1}{\beta})$
α - μ (Stacy)	—	0	(1, 0, 0, 1)	$(\frac{1}{\Gamma(\mu)} \sqrt{\frac{\Gamma(\mu+2/\alpha)}{\Gamma(\mu)}}, \sqrt{\frac{\Gamma(\mu+2/\alpha)}{\Gamma(\mu)}}, -, \mu - \frac{1}{\alpha}, -, \frac{1}{\alpha})$
N*Nakagami-m	—	0	(N, 0, 0, N)	$(\prod_{i=1}^N \frac{\sqrt{m_i}}{\Gamma(m_i)}, \prod_{i=1}^N \sqrt{m_i}, -, (m_1 - \frac{1}{2}, \dots, m_N - \frac{1}{2}), -, \frac{1}{2} \mathbf{1}_N)$
Rayleigh	Gamma ¹⁾	1/ ν	(2, 0, 0, 2)	$(\frac{\sqrt{\nu}}{\Gamma(\nu)}, \sqrt{\nu}, -, (\nu - \frac{1}{2}, \frac{1}{2}), -, \frac{1}{2} \mathbf{1}_2)$
Nakagami-m	Gamma ²⁾	1/ m_2	(2, 0, 0, 2)	$(\frac{\sqrt{m_1 m_2}}{\Gamma(m_1) \Gamma(m_2)}, \sqrt{m_1 m_2}, -, (m_1 - \frac{1}{2}, m_2 - \frac{1}{2}), -, \frac{1}{2} \mathbf{1}_2)$
Weibull	Gamma	1/ ν	(2, 0, 0, 2)	$(\frac{1}{\Gamma(\nu)} \sqrt{\nu \Gamma(1 + \frac{2}{\beta})}, \sqrt{\nu \Gamma(1 + \frac{2}{\beta})}, -, (\nu - \frac{1}{2}, 1 - \frac{1}{\beta}), -, (\frac{1}{2}, \frac{1}{\beta}))$

[0229] ¹⁾ K-fading, ²⁾ Generalized K-fading

[0230] 일 실시예에서, 상기 동질의 무선 전파 조건을 만족하고 상기 폭스 H-변량을 이용하여 모델링된 채널(300)에서, 상기 다중 경로 페이딩을 나타내는 Z 및 상기 섀도우잉을 나타내는 X_ψ 가 각각 오더 시퀀스 (1,0,0,1)의 폭스 H-변량인 경우에, 채널(300)의 상기 합성 페이딩 포락선인 S_ψ 는 표준 H-페이딩(standard H-fading)에 상응할 수 있으며, 하기의 [수학식 70] 내지 [수학식 75]와 같이 상기 폭스 H-변량으로 표기될 수 있다.

[0231] [수학식 70]

[0232]
$$S_\psi \sim \mathcal{H}_{0,2}^{2,0} \left(\bar{\mathbf{P}}_{(S_\psi)} \mid \sqrt{\Omega} \right)$$

[0233] [수학식 71]

[0234]
$$\bar{\mathbf{P}}_{(S_\psi)} = \left(\frac{\kappa_1 \kappa_2}{\sqrt{c_2}}, c_1 \sqrt{c_2}, -, (b_{11}, b_{21} + \frac{1}{2} B_{21}), -, (B_{11}, \frac{1}{2} B_{21}) \right)$$

[0235] [수학식 72]

[0236]
$$\begin{cases} \frac{\kappa_1}{c_1} \Gamma(b_{11} + B_{11}) = 1 \\ \frac{\kappa_1}{c_1^3} \Gamma(b_{11} + 3B_{11}) = 1 \end{cases}$$

[0237] [수학식 73]

[0238]
$$\begin{cases} \frac{\kappa_2}{c_2} \Gamma(b_{21} + B_{21}) = 1 \\ \frac{\kappa_2}{c_2^2} \Gamma(b_{21} + 2B_{21}) = 1 \\ \frac{\kappa_2}{c_2^3} \Gamma(b_{21} + 3B_{21}) = 1 + \psi \end{cases}$$

[0239] [수학식 74]

$$\begin{cases} \kappa_1 = \frac{1}{\Gamma(b_{11} + \mathcal{B}_{11})} \sqrt{\frac{\Gamma(b_{11} + 3\mathcal{B}_{11})}{\Gamma(b_{11} + \mathcal{B}_{11})}} \\ c_1 = \sqrt{\frac{\Gamma(b_{11} + 3\mathcal{B}_{11})}{\Gamma(b_{11} + \mathcal{B}_{11})}} \end{cases}$$

[0240]

[0241] [수학식 75]

$$\begin{cases} \kappa_2 = \frac{\Gamma(b_{21} + 2\mathcal{B}_{21})}{\Gamma(b_{21} + \mathcal{B}_{21})^2} \\ c_2 = \frac{\Gamma(b_{21} + 2\mathcal{B}_{21})}{\Gamma(b_{21} + \mathcal{B}_{21})} \\ \psi = \frac{\Gamma(b_{21} + \mathcal{B}_{21}) \Gamma(b_{21} + 3\mathcal{B}_{21})}{\Gamma(b_{21} + 2\mathcal{B}_{21})^2} - 1 \end{cases}$$

[0242]

[0243] 일 실시예에서, 상기 표준 H-페이딩에 상응하는 S_ψ 의 페이딩 양은 하기의 [수학식 76]을 만족할 수 있다.

[0244] [수학식 76]

$$AF_{S_\psi} = \frac{\kappa_1}{c_1^5} (1 + \psi) \Gamma(b_{11} + 5\mathcal{B}_{11}) - 1$$

[0245]

[0246] 도 2a 및 2b는 표준 H-페이딩의 특성을 설명하기 위한 도면들이다. 도 2a 및 2b는 $(b_{11}, \mathcal{B}_{11})$ 쌍의 함수로서, 상기의 [수학식 70] 내지 [수학식 76]을 참조하여 상술한 상기 표준 H-페이딩에 상응하는 S_ψ 의 페이딩 양을 나타내는 그래프들이다. 도 2a에서 선풍도우잉 수치인 $\psi=0$ 일 수 있고, 도 2b에서 $\psi=1.336$ 일 수 있다. 다시 말하면, 도 2a는 상기 선풍도우잉이 없고 상기 다중 경로 페이딩만 존재하는 환경을 나타낸다.

[0247] 도 2a를 참조하면, 상기 표준 H-페이딩은 레일리(Rayleigh) 페이딩, 나카가미-m(Nakagami-m) 페이딩, 와이불(Weibull) 페이딩 등과 같은 다양한 페이딩 모델들을 포괄할 수 있다. 도 2b를 참조하면, 상기 표준 H-페이딩은 K-페이딩, 일반화된(generalized) K-페이딩, 와이불/감마 페이딩 등과 같은 다양한 페이딩 모델들을 포괄할 수 있다.

[0248] 일 실시예에서, $\text{snr} = \Omega E_s / N_0$ 이 평균 수신 SNR일 때, 상기의 [수학식 63] 내지 [수학식 65]에 기초한 상기 H-페이딩에 상응하는 S_ψ 의 순간 SNR은 하기의 [수학식 77] 및 [수학식 78]과 같이 상기 폭스 H-변량으로 표기될 수 있다. 특히, 상기의 [수학식 70] 내지 [수학식 75]에 기초한 상기 표준 H-페이딩에 상응하는 S_ψ 의 순간 SNR은 하기의 [수학식 79] 및 [수학식 80]과 같이 상기 폭스 H-변량으로 표기될 수 있다. 하기의 [수학식 80]의 변수들은 상기의 [수학식 74] 및 [수학식 75]를 만족할 수 있다.

[0249] [수학식 77]

$$\Gamma_\psi \sim \mathcal{H}_{p_1+p_2, q_1+q_2}^{m_1+m_2, n_1+n_2} (\mathbf{P}_{(\Gamma_\psi)} | \text{snr})$$

[0250]

[0251] [수학식 78]

$$\mathbf{P}_{(\Gamma_\psi)} = \langle 1, 2, -\frac{1}{2} | \mathbf{P}_1 \boxplus \mathbf{P}_2$$

[0252]

[0253] [수학식 79]

$$\Gamma_\psi \sim \mathcal{H}_{0,2}^{2,0} (\bar{\mathbf{P}}_{(\Gamma_\psi)} | \text{snr})$$

[0254]

[0255] [수학식 80]

[0256]
$$\bar{\mathbf{P}}_{(\Gamma_\psi)} = (k_1 k_2 c_1, c_1^2 c_2, -, (b_{11} - \mathcal{B}_{11}, b_{21}), -, (2\mathcal{B}_{11}, \mathcal{B}_{21}))$$

[0257] 일 실시예에서, 상기의 [표 8]의 다양한 페이딩 모델들에 대한 순간 SNR인 $\Gamma_\psi \sim \mathcal{H}_{p,q}^{m,n}(\mathbf{P}|\text{snr})$ 이 하기의 [표 9]와 같이 정리될 수 있다.

[0258] [표 9]

Fading	Order sequence $\mathbf{O} = (m, n, p, q)$	Parameter sequence $\mathbf{P} = (k, c, \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{A}, \mathbf{B})$
Rayleigh	(1, 0, 0, 1)	(1, 1, -, 0, -, 1)
Nakagami- m	(1, 0, 0, 1)	$(\frac{m}{\Gamma(m)}, m, -, m-1, -, 1)$
Weibull	(1, 0, 0, 1)	$(\Gamma(1 + \frac{2}{\beta}), \Gamma(1 + \frac{2}{\beta}), -, 1 - \frac{2}{\beta}, -, \frac{2}{\beta})$
α - μ (Stacy)	(1, 0, 0, 1)	$(\frac{\Gamma(\mu+2/\alpha)}{\Gamma(\mu)^2}, \frac{\Gamma(\mu+2/\alpha)}{\Gamma(\mu)}, -, \mu - \frac{2}{\alpha}, -, \frac{2}{\alpha})$
N *Nakagami- m	(N , 0, 0, N)	$(\prod_{i=1}^N \frac{m_i}{\Gamma(m_i)}, \prod_{i=1}^N m_i, -, (m_1-1, \dots, m_N-1), -, \mathbf{1}_N)$
K -fading	(2, 0, 0, 2)	$(\frac{\nu}{\Gamma(\nu)}, \nu, -, (\nu-1, 0), -, \mathbf{1}_2)$
Generalized K -fading	(2, 0, 0, 2)	$(\frac{m_1 m_2}{\Gamma(m_1)\Gamma(m_2)}, m_1 m_2, -, (m_1-1, m_2-1), -, \mathbf{1}_2)$
Weibull/Gamma	(2, 0, 0, 2)	$(\frac{\nu\Gamma(1+2/\beta)}{\Gamma(\nu)}, \nu\Gamma(1 + \frac{2}{\beta}), -, (\nu-1, 1 - \frac{2}{\beta}), -, (1, \frac{2}{\beta}))$

[0259]

[0260] 4. ζ -차수 불규칙 H-변량에 기초한 채널 모델링

[0261] 일 실시예에서, 채널(300)은 상기 H-변환을 기초로 정의되는 상기 ζ -차수 불규칙 H-변량을 이용하여 모델링된다. 이 경우, 채널(300)은 무선 전파에 따라 무선 신호(RS)의 파워가 불균일하게 감쇄하는 반사(specular) 또는 비균질의(inhomogeneous) 무선 전파 조건을 만족할 수 있다. 이 경우, 채널(300) 내의 다중 경로 성분들이 서로 다른 파워(unequal-power) 또는 상관(correlated)인 동상 및 직교 파형들로 구성될 수 있고, 또한 강한(strong) 가시선(LOS: line of sight) 또는 반사 파형(specularly-reflected wave)으로 구성될 수 있다.

[0262] 일 실시예에서, $\zeta=2$ 일 수 있다. 다시 말하면, 채널(300)이 상기 반사 또는 비균질의 무선 전파 조건을 만족하고 2-차수 불규칙 H-변량을 이용하여 모델링되는 경우에, 채널(300)의 페이딩 포락선(fading envelope)을 나타내는 S_λ 에 대한 2-차수 불규칙 H-변량은 하기의 [수학식 81]로 표기될 수 있다.

[0263] [수학식 81]

$$S_\lambda \sim {}^{(2)}\mathcal{H}_{p,q}^{m,n}\left(\mathbf{P} \left| \sqrt{\frac{\Omega}{\lambda}} \right\rangle, \frac{\lambda}{\Omega}\right)$$

[0264]

[0265] 채널(300)의 상기 페이딩 포락선을 나타내는 S_λ 는, 평균 파워가 Ω 이고 상기 불규칙 지수가 λ 이며 하기의 [수학식 82] 및 [수학식 83]을 만족하는 2-차수 불규칙 H-페이딩(degree-2 irregular H-fading)에 상응할 수 있다. Ω, λ 는 양의 실수일 수 있다(즉, $\Omega \in \mathbb{R}_{++}, \lambda \in \mathbb{R}_{++}$).

[0266] [수학식 82]

$$\begin{cases} H_{p+1,q}^{m,n+1}(1; \mathbf{P} \square \langle 1, \frac{1}{2}, 0 | \mathbf{P}_{\text{exp}} \rangle = 2 \\ H_{p+1,q}^{m,n+1}(1; \mathbf{P} \square \langle 1, \frac{1}{2}, 2 | \mathbf{P}_{\text{exp}} \rangle = 2\lambda \end{cases}$$

[0267]

[0268] [수학식 83]

$$\begin{cases} \lambda \geq \frac{1 + \omega^*(\mathbf{P})}{2} \\ \varrho^*(\mathbf{P}) \geq 1/2 \end{cases}$$

[0269]

[0270] 다시 말하면, 상기 2-차수 불규칙 H-변량은 상기의 [수학식 82] 및 [수학식 83]을 만족하고 상기의 [수학식 3

5]의 조건이 유지되는 경우에 가시선 또는 비균질의 전파 조건을 설명할 수 있다. 상기의 [수학식 82]에서, $\square$ 는 상기 펠턴 연산을 나타낼 수 있고, P_{exp} 는 상기의 [표 5]에 기재된 것처럼 상기의 [수학식 56]을 만족할 수 있다. 상기의 [수학식 83]에서, $\varrho^*(\mathbf{P})$ 및 $\omega^*(\mathbf{P})$ 는 각각 상기의 [수학식 30] 및 [수학식 31]을 만족할 수 있다.

일 실시예에서, 상기 2-차수 불규칙 H-페이딩에 상응하는 S_λ 에 대한 불규칙성(irregularity)인 λ 의 하한(infimum)은 하기의 [수학식 84]를 만족할 수 있다. 일 실시예에서, 상기 2-차수 불규칙 H-페이딩에 상응하는 S_λ 의 페이딩 양은 하기의 [수학식 85]를 만족할 수 있다. 일 실시예에서, $\kappa\sigma^*(\mathbf{P})\epsilon^{\omega^*(\mathbf{P})} = \tau$ 이고 $\epsilon \rightarrow 0$ 으로 감소함에 따라, 상기 2-차수 불규칙 H-페이딩에 상응하는 S_λ 는 하기의 [수학식 86] 및 [수학식 87]과 같이 상기 표준 H-페이딩으로 감소할 수 있다.

[수학식 84]

$$\lambda_{\min}(S_\lambda) = \frac{1 + \omega^*(\mathbf{P})}{2}$$

[수학식 85]

$$\text{AF}_{S_\lambda} = \frac{1}{2\lambda^2} H_{p+1,q}^{m,n+1} \left(1; \mathbf{P} \square \left(1, \frac{1}{2}, 4 \mid \mathbf{P}_{\text{exp}} \right) - 1 \right)$$

[수학식 86]

$$S_\lambda \sim \mathcal{H}_{0,1}^{1,0} \left(\mathbf{P}_{(S_\lambda)}^* \mid \sqrt{\Omega} \right)$$

[수학식 87]

$$\mathbf{P}_{(S_\lambda)}^* = \left(\frac{\tau}{2} \sqrt{\lambda_{\min}(S_\lambda)}, \sqrt{\lambda_{\min}(S_\lambda)}, \right. \\ \left. -, \lambda_{\min}(S_\lambda) - \frac{1}{2}, -, \frac{1}{2} \right)$$

일 실시예에서, 상기 2-차수 불규칙 H-페이딩인 $S_\lambda \sim {}^{(2)}\mathcal{H}_{p,q}^{m,n}(\mathbf{P} \mid \sqrt{\Omega/\lambda}, \lambda/\Omega)$ 의 특별한 케이스로서, 상기 반사 또는 비균질의 전파 조건을 만족하는 다중 경로 페이딩 및 합성 페이딩에 대한 다양한 모델들이 하기의 [표 10]과 같이 정리될 수 있다.

[표 10]

Fading	Irregularity λ	Order sequence $\mathbf{O} = (m, n, p, q)$	Parameter sequence $\mathbf{P} = (\kappa, c, \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{A}, \mathbf{B})$
Rician	$1 + K$	$(1, 0, 1, 3)$	$\left(\frac{\pi e^{-K}}{\sqrt{K}}, \sqrt{K}, 1, \left(\frac{1}{2} \mathbf{1}_2, 1 \right), \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \mathbf{1}_3 \right)$
Nakagami- q	$\frac{(1+q^2)^2}{4q^2}$	$(1, 0, 1, 3)$	$\left(\pi \sqrt{\frac{2q^2}{1-q^2}}, \sqrt{\frac{1-q^2}{2}}, \frac{3}{4}, \left(\frac{1}{4} \mathbf{1}_2, \frac{3}{4} \right), \frac{1}{4}, \frac{1}{4} \mathbf{1}_3 \right)$
κ - μ	$\mu(1 + \kappa)$	$(1, 0, 1, 3)$	$\left(\frac{\pi e^{-\kappa\mu}}{(\kappa\mu)^{\mu-\frac{1}{2}}}, \sqrt{\kappa\mu}, \mu, \left(\mu - \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \mu \right), \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \mathbf{1}_3 \right)$
η - μ	$\frac{2\mu}{(1-\eta^2)}$	$(1, 0, 1, 3)$	$\left(\frac{\pi^{\frac{3}{2}}}{\Gamma(\mu)} \left(\frac{1-\eta^2}{\eta^2} \right)^{\mu} \sqrt{\frac{\eta}{2}}, \sqrt{\frac{\eta}{2}}, \mu + \frac{1}{4}, \left(\mu - \frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \mu + \frac{1}{4} \right), \frac{1}{4}, \frac{1}{4} \mathbf{1}_3 \right)$
Rician/LOS Gamma	$1 + K$	$(1, 1, 2, 3)$	$\left(\frac{\pi \nu^{\nu} (\nu + K)^{\frac{3}{2}-\nu}}{\Gamma(\nu) \sqrt{K}}, \sqrt{\frac{K}{\nu+K}}, \left(\frac{3}{2} - \nu, 1 \right), \left(\frac{1}{2} \mathbf{1}_2, 1 \right), \frac{1}{2} \mathbf{1}_2, \frac{1}{2} \mathbf{1}_3 \right)$
κ - μ /LOS Gamma	$\mu(1 + \kappa)$	$(1, 1, 2, 3)$	$\left(\frac{\pi \nu^{\nu} (\nu + \kappa\mu)^{\mu-\nu-\frac{1}{2}}}{\Gamma(\nu)(\kappa\mu)^{\mu-\frac{1}{2}}}, \sqrt{\frac{\kappa\mu}{\nu+\kappa\mu}}, \left(\mu - \nu + \frac{1}{2}, \mu \right), \left(\mu - \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \mu \right), \frac{1}{2} \mathbf{1}_2, \frac{1}{2} \mathbf{1}_3 \right)$

일 실시예에서, 상기 반사 또는 비균질의 무선 전파 조건을 만족하고 상기 2-차수 불규칙 H-변량을 이용하여 모델링된 채널(300)에서, 채널(300)의 상기 페이딩 포락선이 오더 시퀀스 $(1, 0, 1, 3)$ 의 2-차수 불규칙 H-변량인 경우에, 채널(300)의 상기 페이딩 포락선인 S_λ 는 표준 2-차수 불규칙 H-페이딩(standard degree-2 irregular H-fading)에 상응할 수 있고, 하기의 [수학식 88] 내지 [수학식 90]과 같이 상기 2-차수 불규칙 H-변량으로 표기될 수 있으며, 불규칙 조건(irregularity condition)은 하기의 [수학식 91]을 만족할 수 있다.

[0284] [수학식 88]

$$S_{\lambda} \sim {}^{(2)}\mathcal{H}_{1,3}^{1,0} \left(\bar{\mathbf{P}}_{(S_{\lambda})} \left| \sqrt{\frac{\Omega}{\lambda}} \right\rangle, \frac{\lambda}{\Omega} \right)$$

[0285]

[0286] [수학식 89]

$$\bar{\mathbf{P}}_{(S_{\lambda})} = (\kappa, c, a_1, (a_1 - \frac{1}{2}, \mathcal{A}_1, a_1), \mathcal{A}_1, \mathcal{A}_1 \mathbf{1}_3)$$

[0287]

[0288] [수학식 90]

$$\begin{cases} \kappa H_{2,3}^{1,1} \left[c \left| \begin{matrix} (\frac{1}{2}, \frac{1}{2}), (a_1, \mathcal{A}_1) \\ (a_1 - \frac{1}{2}, \mathcal{A}_1), (\mathcal{A}_1, \mathcal{A}_1), (a_1, \mathcal{A}_1) \end{matrix} \right. \right] = 2 \\ \kappa H_{2,3}^{1,1} \left[c \left| \begin{matrix} (-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}), (a_1, \mathcal{A}_1) \\ (a_1 - \frac{1}{2}, \mathcal{A}_1), (\mathcal{A}_1, \mathcal{A}_1), (a_1, \mathcal{A}_1) \end{matrix} \right. \right] = 2\lambda \end{cases}$$

[0289]

[0290] [수학식 91]

$$\begin{cases} \lambda \geq \frac{a_1}{2\mathcal{A}_1} - \frac{1}{4\mathcal{A}_1} + \frac{1}{2} \\ \mathcal{A}_1 \geq 1/4 \end{cases}$$

[0291]

[0292] 일 실시예에서, 상기 표준 2-차수 불규칙 H-페이딩에 상응하는 S_{λ} 의 페이딩 양은 하기의 [수학식 92] 및 [수학식 93]을 만족할 수 있다.

[0293] [수학식 92]

$$\text{AF}_{S_{\lambda}} = \frac{1}{2\lambda^2} H_{2,3}^{1,1}(1; \mathbf{P}_{\text{af}}) - 1$$

[0294]

[0295] [수학식 93]

$$\mathbf{P}_{\text{af}} = (\kappa, c, (-\frac{3}{2}, a_1), (a_1 - \frac{1}{2}, \mathcal{A}_1, a_1), (\frac{1}{2}, \mathcal{A}_1), \mathcal{A}_1 \mathbf{1}_3)$$

[0296]

[0297] 도 3a 및 3b는 표준 2-차수 불규칙 H-페이딩의 특성을 설명하기 위한 도면들이다. 도 3a 및 3b는 (a_1, λ) 쌍의 함수로서, 상기의 [수학식 88] 내지 [수학식 91]을 참조하여 상술한 상기 표준 2-차수 불규칙 H-페이딩에 상응하는 S_{λ} 의 페이딩 양을 나타내는 그래프들이다. 도 3a에서 $\mathcal{A}_1 = 1/2$ 일 수 있고, 도 3b에서 $\mathcal{A}_1 = 1/4$ 일 수 있다.

[0298] 도 3a를 참조하면, 상기 표준 2-차수 불규칙 H-페이딩은 레일리 페이딩, 나카가미-m 페이딩, 라이시안(Rician) 페이딩 등과 같은 다양한 페이딩 모델들을 포괄할 수 있다. 도 3b를 참조하면, 상기 표준 2-차수 불규칙 H-페이딩은 레일리 페이딩, 나카가미-m 페이딩, 나카가미-q(Nakagami-q) 페이딩 등과 같은 다양한 페이딩 모델들을 포괄할 수 있다.

[0299] 일 실시예에서, $\text{snr} = \Omega E_s / N_0$ 이 평균 수신 SNR일 때, 상기의 [수학식 81] 내지 [수학식 83]에 기초한 상기 2-차수 불규칙 H-페이딩에 상응하는 S_{λ} 의 순간 SNR은 하기의 [수학식 94] 및 [수학식 95]와 같이 상기 1-차수 불규칙 H-변량으로 표기될 수 있다. 특히, 상기의 [수학식 88] 내지 [수학식 91]에 기초한 상기 표준 2-차수 불규칙 H-페이딩에 상응하는 S_{λ} 의 순간 SNR은 하기의 [수학식 96] 및 [수학식 97]과 같이 상기 1-차수 불규칙 H-변량으로 표기될 수 있다. 하기의 [수학식 97]의 변수들은 상기의 [수학식 90]을 만족할 수 있다.

[0300] [수학식 94]

$$\Gamma_{\lambda} \sim {}^{(1)}\mathcal{H}_{p,q}^{m,n} \left(\mathbf{P}_{(\Gamma_{\lambda})} \left| \frac{\text{snr}}{\lambda} \right. \right), \frac{\lambda}{\text{snr}} \right)$$

[0301]

[0302] [수학식 95]

$$\mathbf{P}_{(\Gamma_{\lambda})} = \left\langle 1, 2, -\frac{1}{2} \middle| \mathbf{P} \right\rangle$$

[0303]

[0304] [수학식 96]

$$\Gamma_{\lambda} \sim {}^{(1)}\mathcal{H}_{1,3}^{1,0} \left(\bar{\mathbf{P}}_{(\Gamma_{\lambda})} \left| \frac{\text{snr}}{\lambda} \right. \right), \frac{\lambda}{\text{snr}} \right)$$

[0305]

[0306] [수학식 97]

$$\bar{\mathbf{P}}_{(\Gamma_{\lambda})} = \left(\kappa c, c^2, a_1 - \mathcal{A}_1, \right. \\ \left. (a_1 - \mathcal{A}_1 - \frac{1}{2}, 0, a_1 - \mathcal{A}_1), 2\mathcal{A}_1, 2\mathcal{A}_1 \mathbf{1}_3 \right)$$

[0307]

[0308] 일 실시예에서, 상기의 [표 10]의 다양한 페이딩 모델들에 대한 순간 SNR인 $\Gamma_{\lambda} \sim {}^{(1)}\mathcal{H}_{p,q}^{m,n} (\mathbf{P} | \text{snr}/\lambda), \lambda/\text{snr})$ 이 하기의 [표 11]과 같이 정리될 수 있다.

[0309] [표 11]

Fading	Order sequence $\mathbf{O} = (m, n, p, q)$	Parameter sequence $\mathbf{P} = (\kappa, c, \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{A}, \mathbf{B})$
Rician	(1, 0, 1, 3)	$(\pi e^{-K}, K, \frac{1}{2}, (\mathbf{0}_2, \frac{1}{2}), 1, \mathbf{1}_3)$
Nakagami- q	(1, 0, 1, 3)	$(\frac{\pi q}{1+q^2}, \frac{1}{2} \frac{1-q^2}{1+q^2}, \frac{1}{2}, (\mathbf{0}_2, \frac{1}{2}), \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \mathbf{1}_3)$
κ - μ	(1, 0, 1, 3)	$(\frac{\pi e^{-\kappa\mu}}{(\kappa\mu)^{\mu-1}}, \kappa\mu, \mu - \frac{1}{2}, (\mu - 1, 0, \mu - \frac{1}{2}), 1, \mathbf{1}_3)$
η - μ	(1, 0, 1, 3)	$(\frac{\pi^{3/2}}{\Gamma(\mu)} \left(\frac{1-\eta^2}{\eta^2} \right)^{\mu} \frac{\eta}{2}, \frac{\eta}{2}, \mu, (\mu - \frac{1}{2}, 0, \mu), \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \mathbf{1}_3)$
Rician/LOS Gamma	(1, 1, 2, 3)	$(\frac{\pi}{\Gamma(\nu)} \left(\frac{\nu}{\nu+K} \right)^{\nu}, \frac{K}{\nu+K}, (1 - \nu, \frac{1}{2}), (\mathbf{0}_2, 1), \mathbf{1}_2, \mathbf{1}_3)$
κ - μ /LOS Gamma	(1, 1, 2, 3)	$(\frac{\pi \nu^{\nu} (\nu + \kappa\mu)^{\mu - \nu - 1}}{\Gamma(\nu)(\kappa\mu)^{\mu - 1}}, \frac{\kappa\mu}{\nu + \kappa\mu}, (\mu - \nu, \mu - \frac{1}{2}), (\mu - 1, 0, \mu - \frac{1}{2}), \mathbf{1}_2, \mathbf{1}_3)$

[0310]

[0311] 5. 모델링된 채널의 성능

[0312] 도 4는 본 발명의 실시예들에 따라 모델링된 채널의 에러 확률을 설명하기 위한 도면이다. 도 4는 임의의 2차원 신호 성상도(constellation) $\mathcal{S} = \{s_1, s_2, \dots, s_M\}$ 에 대한 보로노이 다각형 결정 경계들(Voronoi polygonal decision boundaries)의 일 예를 나타낸다.

[0313] 도 1 및 4를 참조하면, 채널(300)의 성능을 나타내는 제1 지표인 에러 확률(error probability)과 관련하여, 2차원 신호 성상도 $\mathcal{S} = \{s_1, s_2, \dots, s_M\}$ 의 M진(M-ary) 신호들에 대한 동기 검출(coherent detection)을 고려할 수 있다.

[0314] 일 실시예에서, p_i 는 s_i 에 대한 선형적인 심볼 확률(priori symbol probability)이고, E_s 는 하기의 [수학식 98]을 만족하는 평균 심볼 에너지(average symbol energy)이며, 크레이그 접근법(Craig's approach)을 이용하였을 때, 상기 동기 검출의 평균 심볼 에러 확률(SEP: symbol error probability)은 하기의 [수학식 99]를 만족할 수 있다.

[0315] [수학식 98]

$$E_s = \sum_{i=1}^M p_i \|s_i\|^2$$

[0316]

[0317] [수학식 99]

$$P_e = \sum_{i=1}^M \sum_{j \in \mathcal{B}_i} \frac{p_i}{2\pi} \int_0^{\vartheta_{ij}} \mathbb{E} \left\{ \exp \left[-\frac{w_{ij}^2 \Gamma}{4 \sin^2(\theta + \varphi_{ij})} \right] \right\} d\theta$$

$$= \sum_{i=1}^M \sum_{j \in \mathcal{B}_i} \frac{p_i}{2\pi} \int_0^{\vartheta_{ij}} \mathbb{H}_{0,1}^{1,0} \{ p_{\Gamma_{\text{norm}}}(t); \mathbf{P}_{\text{exp}} \} \left(\frac{w_{ij}^2 \text{snr}}{4 \sin^2(\theta + \varphi_{ij})} \right) d\theta$$

[0318]

[0319] 상기의 [수학식 99]에서, $\mathcal{B}_i$ 는 s_i 와 결정 경계(decision boundary)를 공유하는 신호 포인트들에 대한 색인들의 세트(set of indices)를 나타낼 수 있고, 예를 들어 도 4에서 $\mathcal{B}_1 = \{2, 3, 4, 5\}$ 일 수 있다. $\vartheta_{ij}, \varphi_{ij}$ 는 s_i 에 대한 결정 영역(decision region)을 설명하기 위한 각도들을 나타낼 수 있으며, $w_{ij} = \|s_i - s_j\| / \sqrt{E_s}$ 는 s_i 와 s_j 사이의 정규화된 유클리드 거리(Euclidean distance)를 나타낼 수 있다.

[0320]

일 실시예에서, 상기 H-페이딩에 상응하는 S_ψ 의 순간 SNR이 상기의 [수학식 77] 및 [수학식 78]과 같이 표기되는 경우에(즉, 채널(300)이 상기 H-페이딩에 상응하도록 모델링된 경우에), 도 4의 보로노이 다각형 결정 경계들에 기초한 M진 신호들의 동기 검출에 대한 평균 심볼 에러 확률은 하기의 [수학식 100] 및 [수학식 101]을 만족할 수 있다. 일 실시예에서, 상기 2-차수 불규칙 H-페이딩에 상응하는 S_λ 의 순간 SNR이 상기의 [수학식 94] 및 [수학식 95]와 같이 표기되는 경우에(즉, 채널(300)이 상기 2-차수 불규칙 H-페이딩에 상응하도록 모델링된 경우에), 상기 평균 심볼 에러 확률은 하기의 [수학식 102] 및 [수학식 103]을 만족할 수 있다.

[0321]

[수학식 100]

$$P_e = \sum_{i=1}^M \sum_{j \in \mathcal{B}_i} \left\{ \frac{p_i}{2\pi} \times \int_0^{\vartheta_{ij}} H_{q_1+q_2, p_1+p_2+1}^{n_1+n_2+1, m_1+m_2} \left(\frac{w_{ij}^2 \text{snr}}{4 \sin^2(\theta + \varphi_{ij})}; \mathbf{P}_{\text{sep}} \right) d\theta \right\}$$

[0322]

[0323]

[수학식 101]

$$\mathbf{P}_{\text{sep}} = \mathbf{P}_{\text{exp}} \square \mathbf{P}_{(\Gamma_\psi)}$$

[0324]

[0325]

[수학식 102]

$$P_e = \sum_{i=1}^M \sum_{j \in \mathcal{B}_i} \left\{ \frac{p_i}{2\pi} \times \int_0^{\vartheta_{ij}} H_{q,p+1}^{n+1, m} \left(1 + \frac{w_{ij}^2 \text{snr}}{4\lambda \sin^2(\theta + \varphi_{ij})}; \mathbf{P}_{\text{sep}^2} \right) d\theta \right\}$$

[0326]

[0327]

[수학식 103]

$$\mathbf{P}_{\text{sep}^2} = \mathbf{P}_{\text{exp}} \square \mathbf{P}_{(\Gamma_\lambda)}$$

[0328]

[0329]

일 실시예에서, 채널(300)의 성능을 나타내는 제2 지표인 채널 용량(channel capacity)과 관련하여, 채널(300)의 에르고드 용량(ergodic capacity)은 bits/s/Hz의 단위로 나타낼 수 있고, 순간 SNR의 확률 밀도 함수의 H-변환의 형태로서 하기의 [수학식 104]와 같이 표기될 수 있다.

[0330] [수학식 104]

$$\begin{aligned} C(\text{snr}) &= \mathbb{E} \{ \log_2 (1 + \Gamma) \} \\ &= \mathbb{H}_{2,2}^{1,2} \{ p_{\Gamma_{\text{norm}}}(t); \mathbf{P}_{\text{cap}} \}(\text{snr}) \end{aligned}$$

[0331]

[0332] 상기의 [수학식 104]에서, $\mathbf{P}_{\text{cap}}$ 는 상기의 [표 5]에 기재된 것처럼 하기의 [수학식 105]를 만족할 수 있다.

[0333] [수학식 105]

$$\mathbf{P}_{\text{cap}} = \left(\frac{1}{\ln 2}, 1, (\mathbf{1}_2, -), (1, 0), (\mathbf{1}_2, -), (1, 1) \right)$$

[0334]

[0335] 일 실시예에서, 상기 H-페이딩에 상응하는 S_{Ψ} 의 순간 SNR이 상기의 [수학식 77] 및 [수학식 78]과 같이 표기되는 경우에(즉, 채널(300)이 상기 H-페이딩에 상응하도록 모델링된 경우에), 에르고드 용량은 하기의 [수학식 106] 및 [수학식 107]을 만족할 수 있다. 일 실시예에서, 상기 2-차수 불규칙 H-페이딩에 상응하는 S_{λ} 의 순간 SNR이 상기의 [수학식 94] 및 [수학식 95]와 같이 표기되는 경우에(즉, 채널(300)이 상기 2-차수 불규칙 H-페이딩에 상응하도록 모델링된 경우에), 상기 에르고드 용량은 하기의 [수학식 108]을 만족할 수 있다.

[0336] [수학식 106]

$$C(\text{snr}) = H_{q_1+q_2+2, p_1+p_2+2}^{n_1+m_2+1, m_1+m_2+2}(\text{snr}; \mathbf{P}_{\text{ec}})$$

[0337]

[0338] [수학식 107]

$$\mathbf{P}_{\text{ec}} = \mathbf{P}_{\text{cap}} \boxminus \mathbf{P}_{(\Gamma_{\Psi})}$$

[0339]

[0340] [수학식 108]

$$C(\text{snr}) = H_{1,0:2,2:p,q}^{0,1:1,2:m,n} \left[\begin{matrix} \frac{1}{\lambda} \text{snr} & \mathbf{P}_{\text{cap}} \\ 1 & \mathbf{P}_{(\Gamma_{\lambda})} \end{matrix} \right]$$

[0341]

[0342] 일 실시예에서, 채널(300)의 성능을 나타내는 제3 지표인 신뢰성 함수(reliability function) 또는 에러 지수(error exponent)는 하기의 [수학식 109]와 같이 정의될 수 있다.

[0343] [수학식 109]

$$E(R) = \limsup_{n \rightarrow \infty} \frac{-\log P_e^*(R, n)}{n}$$

[0344]

[0345] 상기의 [수학식 109]에서, $P_e^*(R, n)$ 는 길이 n 및 전송률 R의 최적의 블록 코드(optimal block code)에 대한 평균 에러 확률을 나타낼 수 있다.

[0346] 전송률(transmission rate) R bits/s/Hz의 가우시안 입력들(Gaussian inputs)에 대한 상기 신뢰성 함수의 전통적인 하계(classical lower bound)는 랜덤 코딩 에러 지수(random coding error exponent)라고 알려져 있으며, 하기의 [수학식 110]과 같이 정의될 수 있으며, 하기의 [수학식 111]을 만족할 수 있다.

[0347] [수학식 110]

$$E_r(R) = \max_{0 \leq \rho \leq 1} [E_0(\rho, \text{snr}) - \rho R]$$

[0348]

[0349] [수학식 111]

$$E_0(\rho, \text{snr}) = -\log_2 \mathbb{E} \left\{ \left(1 + \frac{\Gamma}{1+\rho} \right)^{-\rho} \right\} \\ = -\log_2 \left[\mathbb{H}_{1,1}^{1,1} \left\{ p\Gamma_{\text{norm}}(t); \mathbf{P}_{\text{pow}}^{(\rho)} \right\} \left(\frac{\text{snr}}{1+\rho} \right) \right]$$

[0350]

[0351] 상기의 [수학식 110] 및 [수학식 111]에서, $0 < \rho \leq 1$ 일 수 있고, $E_0(0, \text{snr}) = 0$ 일 수 있으며, $\mathbf{P}_{\text{pow}}^{(v)}$ 는 상기의 [표 5]에 기재된 것처럼 하기의 [수학식 112]를 만족할 수 있다.

[0352] [수학식 112]

$$\mathbf{P}_{\text{pow}}^{(v)} = \left(\frac{1}{\Gamma(v)}, 1, (1-v, -), (0, -), (1, -), (1, -) \right)$$

[0353]

[0354] 일 실시예에서, 상기 H-페이딩에 상응하는 S_ψ 의 순간 SNR이 상기의 [수학식 77] 및 [수학식 78]과 같이 표기되는 경우(즉, 채널(300)이 상기 H-페이딩에 상응하도록 모델링된 경우), $0 < \rho \leq 1$ 에 대한 랜덤 코딩 에러 지수는 하기의 [수학식 113] 및 [수학식 114]를 만족할 수 있다. 일 실시예에서, 상기 2-차수 불규칙 H-페이딩에 상응하는 S_λ 의 순간 SNR이 상기의 [수학식 94] 및 [수학식 95]와 같이 표기되는 경우(즉, 채널(300)이 상기 2-차수 불규칙 H-페이딩에 상응하도록 모델링된 경우), 상기 랜덤 코딩 에러 지수는 하기의 [수학식 115]를 만족할 수 있다.

[0355] [수학식 113]

$$E_0(\rho, \text{snr}) \\ = -\log_2 \left[H_{q_1+q_2+1, p_1+p_2+1}^{n_1+n_2+1, m_1+m_2+1} \left(\frac{\text{snr}}{1+\rho}; \mathbf{P}_{\text{ee}}^{(\rho)} \right) \right]$$

[0356]

[0357] [수학식 114]

$$\mathbf{P}_{\text{ee}}^{(\rho)} = \mathbf{P}_{\text{pow}}^{(\rho)} \boxtimes \mathbf{P}_{(\Gamma_\psi)}$$

[0358]

[0359] [수학식 115]

$$E_0(\rho, \text{snr}) \\ = -\log_2 \left(H_{1,0;1,1;p,q}^{0,1;1,1;m,n} \left[\frac{1}{\lambda(1+\rho)} \text{snr} \left| \frac{\mathbf{P}_{\text{pow}}^{(\rho)}}{\mathbf{P}_{(\Gamma_\lambda)}} \right| \right] \right)$$

[0360]

[0361] 도 5, 6, 7 및 8은 본 발명의 실시예들에 따라 모델링된 채널의 성능을 나타내는 도면들이다. 도 5 및 6은 채널(300)의 평균 심볼 에러 확률의 예를 나타내고, 도 7은 채널(300)의 에르고딕 용량의 예를 나타내며, 도 8은 채널(300)의 랜덤 코딩 에러 지수의 예를 나타낸다.

[0362] 도 5를 참조하면, $b_{11} = 1$, $\mathcal{B}_{11} = 1/2$ 및 $\psi=0$ 인 경우(즉, $\alpha=2$ 및 $\mu=1.5$ 인 $\alpha-\mu$ 페이딩인 경우)에, 상기 표준 H-페이딩에 대한 snr의 함수로서 8-PSK의 평균 심볼 에러 확률(P_e), 용량(C) 및 고-SNR 확장들(high-SNR expansions)을 나타낼 수 있다. 도 5에서, $G_a=1.5$, $G_c=7.610\text{dB}$, $L_\infty=1.597\text{dB}$ 일 수 있다.

[0363] 도 6을 참조하면, 감마 섀도우잉(gamma shadowing)에 기초한 $(\psi, b_{11}, \mathcal{B}_{11})$ 의 상기 표준 H-페이딩에 대한 snr의 함수로서 16-QAM의 평균 심볼 에러 확률(P_e)을 나타낼 수 있다. 도 6에서, 상기 감마 섀도우잉은 $b_{21} = 1/\psi - 1$, $\mathcal{B}_{21} = 1$ 인 경우를 나타낼 수 있고, $(\psi, 1, 1)$ 의 케이스들과 관련하여 $\psi=0, 0.236, 0.612$,

1.336인 경우(즉, 로그 정규 섀도우잉 확산(lognormal shadowing spread) $\sigma_{dB} = 0, 2, 3, 4$ dB인 경우)를 나타낼 수 있으며, $(0, b_{11}, 1/2)$ 의 케이스들과 관련하여 $b_{11} = 1/2, 1$ 인 경우를 나타낼 수 있다.

[0364] 도 7을 참조하면, $(\psi, b_{11}, B_{11}) = (0, 1, 1/2)$ 및 $(1.336, 1, 1)$ 인 경우에 감마 섀도우잉에 기초한 상기 표준 H-페이딩에 대한 snr의 함수로서 에르고드 용량(C(snr))을 나타낼 수 있다.

[0365] 도 8을 참조하면, snr=25dB에서 감마 섀도우잉에 기초한 (ψ, b_{11}, B_{11}) 의 상기 표준 H-페이딩에서의 전송률(R)의 함수로서 랜덤 코딩 에러 지수($E_r(R)$)를 나타낼 수 있다. 도 8에서, $(\psi, 1, 1)$ 의 케이스들과 관련하여 $\psi = 0, 0.612, 1.336$ 인 경우를 나타낼 수 있으며, $(0, b_{11}, 1/2)$ 의 케이스들과 관련하여 $b_{11} = 1/2, 1$ 인 경우를 나타낼 수 있다.

[0366] 이상, 도 5, 6, 7 및 8을 참조하여 상기 표준 H-페이딩과 관련된 채널 특성들을 설명하였으나, 상기 표준 2-차 수 불규칙 H-페이딩과 관련된 채널 특성들 또한 그래프들을 통해 설명될 수 있다.

[0367] 본 발명의 실시예들에 따른 무선 통신 시스템, 무선 통신 방법 및 채널 모델링 방법은 컴퓨터로 판독 가능한 매체에 저장된 컴퓨터로 판독 가능한 프로그램 코드를 포함하는 제품 등의 형태로 구현될 수 있다. 상기 컴퓨터로 판독 가능한 프로그램 코드는 판독 장치를 통해 다양한 컴퓨터 또는 다른 데이터 처리 장치의 프로세서로 제공될 수 있다. 컴퓨터로 판독 가능한 매체는 컴퓨터로 판독 가능한 신호 매체 또는 컴퓨터로 판독 가능한 기록 매체일 수 있다. 컴퓨터로 판독 가능한 기록 매체는 명령어 실행 시스템, 장비 또는 장치 내에 또는 이들과 접속되어 프로그램을 저장하거나 포함할 수 있는 임의의 유형적인 매체일 수 있다.

[0368] 본 발명의 실시예들에 따른 무선 통신 시스템, 무선 통신 방법 및 채널 모델링 방법은, 휴대폰(Mobile Phone), 스마트 폰(Smart Phone), 태블릿(Tablet) PC(Personal Computer), 노트북(Laptop Computer), 개인 정보 단말기(Personal Digital Assistant; PDA), 휴대형 멀티미디어 플레이어(Portable Multimedia Player; PMP), 디지털 카메라(Digital Camera), 음악 재생기(Music Player), 휴대용 게임 콘솔(Portable Game Console), 네비게이션(Navigation) 시스템 등과 같은 임의의 모바일 기기에 적용될 수도 있고, PC(Personal Computer), 서버 컴퓨터(Server Computer), 워크스테이션(Workstation), 디지털 TV(Digital Television), 셋-탑 박스(Set-Top Box) 등과 같은 임의의 컴퓨팅 시스템에 적용될 수도 있다. 상기 모바일 기기는 웨어러블(wearable) 기기, 사물 인터넷(Internet of Things: IoT) 기기, 만물 인터넷(Internet of Everything: IoE) 기기, e-북(e-book) 등을 더 포함할 수 있다.

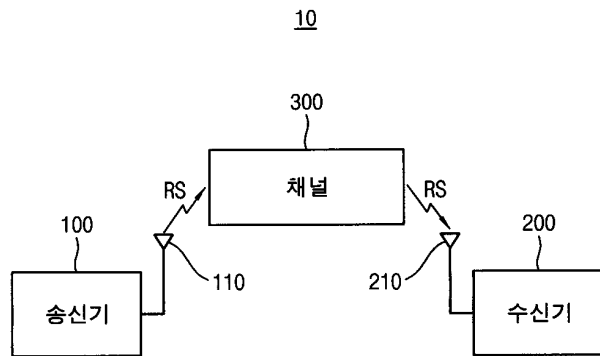
산업상 이용가능성

[0369] 본 발명은 다양한 무선 통신 장치 및 무선 통신 시스템에 적용될 수 있다. 따라서 본 발명은 휴대폰, 스마트폰, PDA, PMP, 디지털 카메라, 캠코더, PC, 서버 컴퓨터, 워크스테이션, 노트북, 디지털 TV, 셋-탑 박스, 음악 재생기, 휴대용 게임 콘솔, 네비게이션 시스템, 스마트 카드, 프린터 등과 같은 다양한 전자 기기에 유용하게 이용될 수 있다.

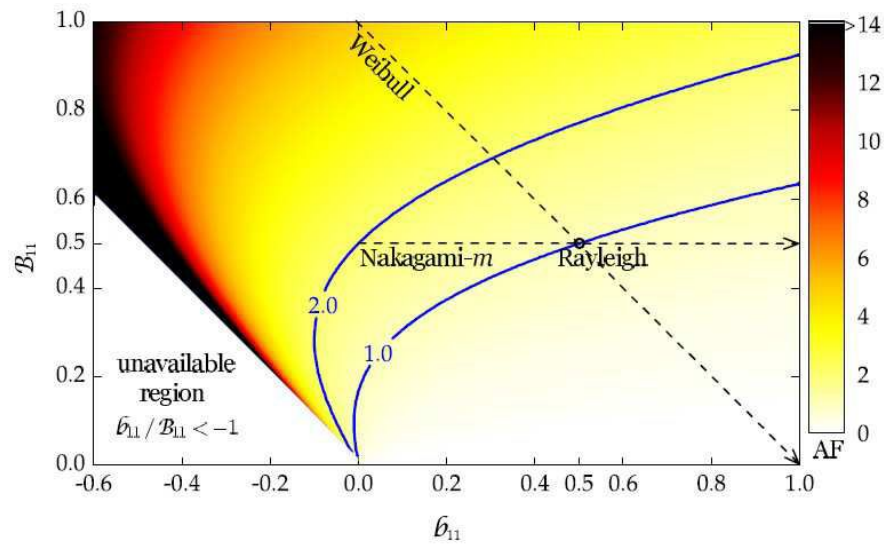
[0370] 상기에서는 본 발명의 바람직한 실시예를 참조하여 설명하였지만, 해당 기술분야의 숙련된 당업자는 하기의 특허청구범위에 기재된 본 발명의 사상 및 영역으로부터 벗어나지 않는 범위 내에서 본 발명을 다양하게 수정 및 변경시킬 수 있음을 이해할 것이다.

도면

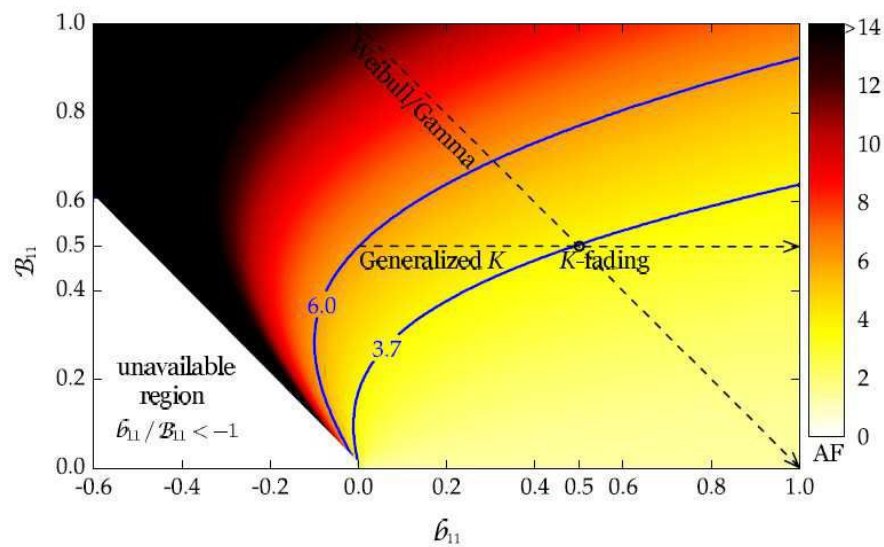
도면1



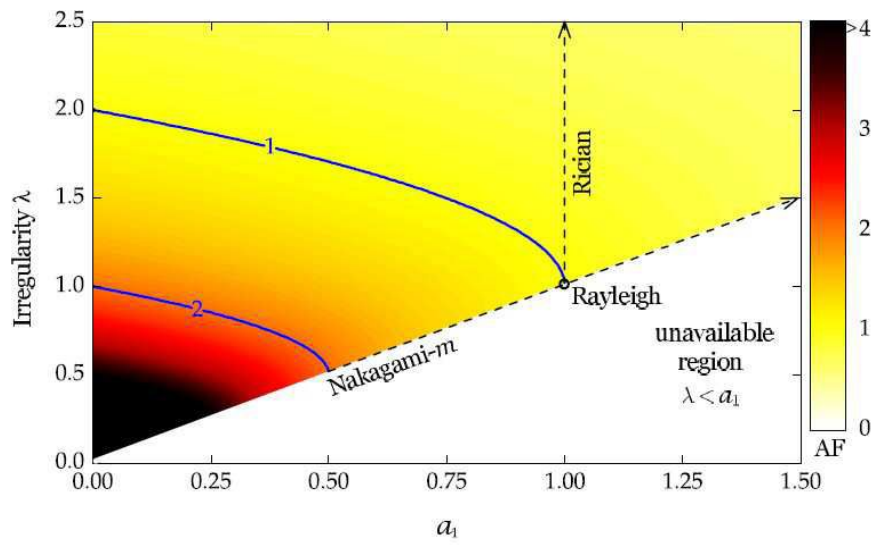
도면2a



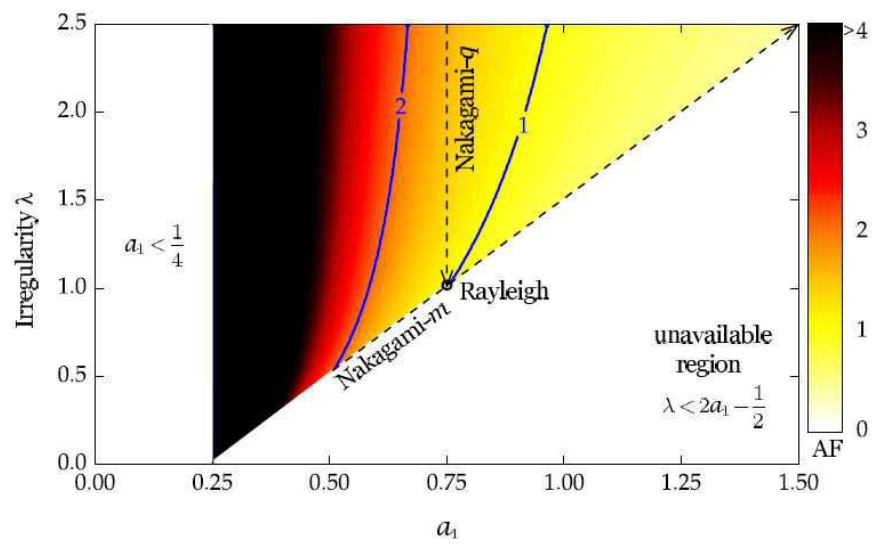
도면2b



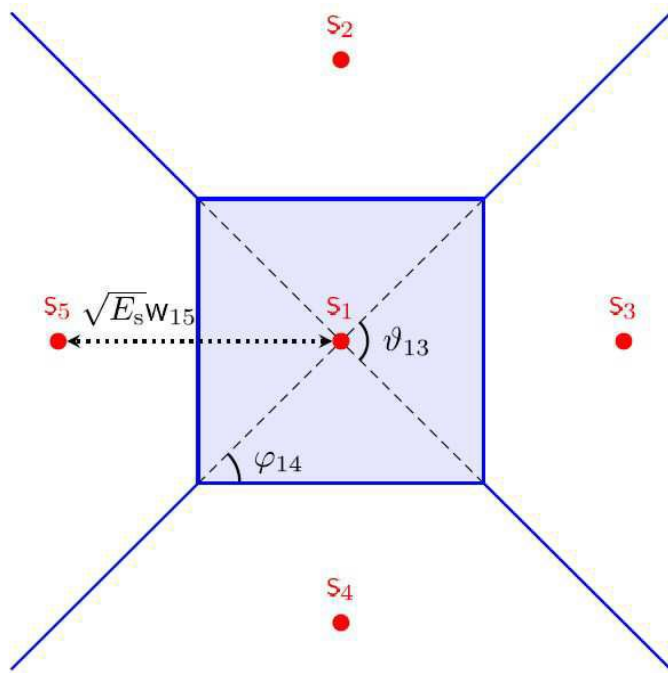
도면3a



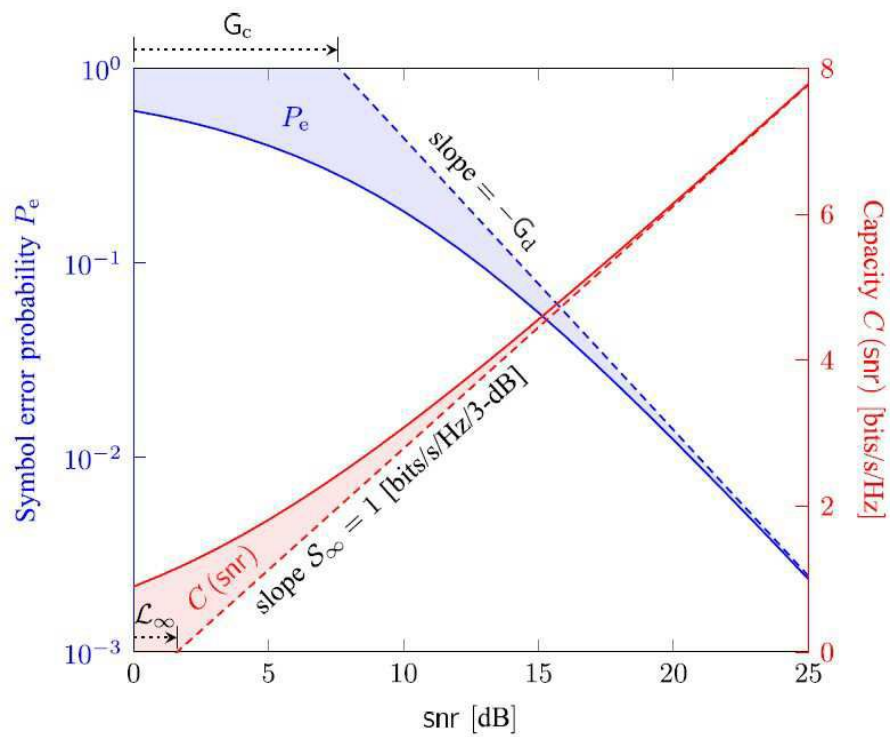
도면3b



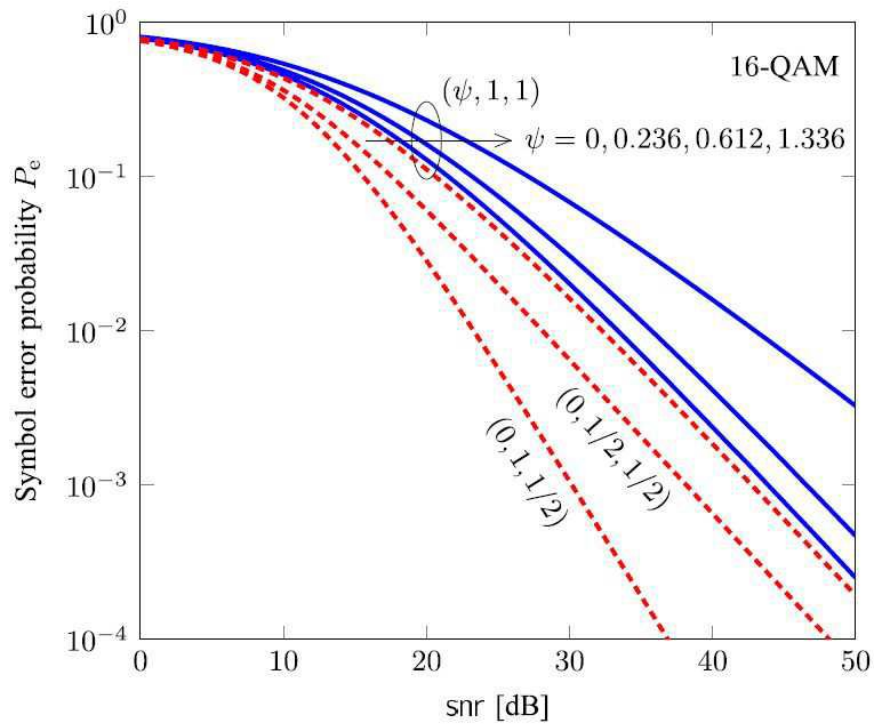
도면4



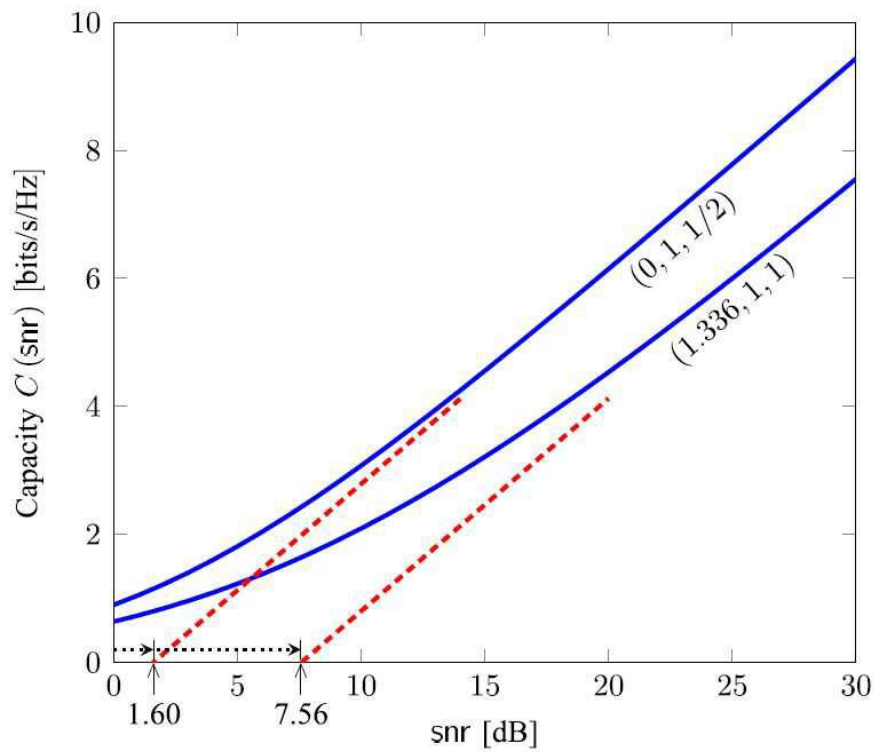
도면5



도면6



도면7



도면8

