

# Обобщенные модели фединга в когнитивных радиосетях

В.А. Лесников<sup>1</sup>, Т.В. Наумович<sup>2</sup>, А.В. Частиков<sup>3</sup>, М.В. Кустенко<sup>4</sup>

Вятский государственный университет, г. Киров

<sup>1</sup> Vladislav.Lesnikov.ru@ieee.org, <sup>2</sup> ntv\_new@mail.ru, <sup>3</sup> alchast@mail.ru, <sup>4</sup> kustishka@mail.ru

**Аннотация** — В последние годы получены новые существенные результаты в изучении физических основ фединга, которые не учитываются в традиционных моделях. Возникла необходимость усложнения моделей фединга. Появились модели, учитывающие такие явления как нелинейность среды распространения радиоволн, эффекты рассеяния радиоволн, наличие доминантных компонент, кластерный характер многолучевого распространения, разбаланс квадратурных составляющих сигнала. В данной работе представлено структурированное описание нетрадиционных обобщенных моделей фединга, показана взаимосвязь между моделями.

**Ключевые слова** — фединг, обобщенные модели, однородная среда распространения сигнала, неоднородная среда распространения сигнала, кластерная структура путей распространения сигнала.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Применение технологий когнитивного радио является одним из путей преодоления дефицита частотных ресурсов. Важнейшим процессом функционирования систем когнитивного радио является спектральное восприятие (спектральный мониторинг, spectrum sensing), задачей которого является обнаружение в данный период времени незанятых участков спектра (white space, spectrum hole), может быть даже закрепленных за лицензированными первичными пользователями, а также обнаружение моментов возобновления работы первичных пользователей.

Решение задачи обнаружения осложняется существованием в канале связи явления замирания сигналов (фединга) [1] – [4]. Фединг – это искажения сигнала из-за неоднородности канала связи, многолучевого распространения радиоволн, относительного движения передатчика и приемника, затенения [5] – [7].

При описании процесса прохождения сигнала через канал связи принято описывать параметры сигнала случайными величинами. Традиционно для описания этих случайных величин используются такие распределения как распределение Рэлея, распределение Райса (Накагами-n), распределение Накагами-m, распределение Хойта, распределение Накагами-q, распределение Вейбулла, одностороннее гауссово распределение, отрицательное экспоненциальное.

В последние годы появилось значительное число публикаций, в которых представлены новые обобщенные модели канала связи с федингом. К ним относятся

такие модели как  $\kappa$ - $\mu$  [17],  $\eta$ - $\mu$  [17],  $\eta$ - $\kappa$  [14] – [16],  $\alpha$ - $\mu$  [13],  $\lambda$ - $\mu$  [18],  $\eta$ - $\lambda$ - $\mu$  [12],  $\alpha$ - $\kappa$ - $\mu$  [11],  $\alpha$ - $\eta$ - $\mu$  [11],  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$  [9], [10],  $\alpha$ - $\lambda$ - $\mu$ - $\eta$  [8].

Большое число публикаций в данной предметной области характеризуется отсутствием единого системного подхода, различием условных обозначений. Задача данной публикации дать системный анализ этих моделей, установить взаимосвязь между ними и между новыми и традиционными моделями. Работа ограничена рассмотрением только мелкомасштабного фединга.

## II. СИСТЕМНАЯ МОДЕЛЬ

### A. Обработываемый процесс

Решение задачи обнаружения основано на обработке вектора принятых комплексных отсчетов:

$$\mathbf{x} = [x_0 \ x_1 \ \dots \ x_{M-1}]^T, \quad (1)$$

где

$$x_k = \mathcal{G}s_k + w_k, \quad (2)$$

$s_k$  - отсчеты сигнала в случае его передачи,

$$\mathcal{G} = \begin{cases} 0, & \text{если сигнал отсутствует,} \\ 1, & \text{если сигнал был передан,} \end{cases} \quad (3)$$

$$s_k = s_k^i + js_k^q, \quad (4)$$

$s_k^i$ ,  $s_k^q$  - синфазная и квадратурная составляющие отсчета  $s_k$ ,  $w_k$  - отсчет шума.

### B. Анализируемые параметры $\Xi$

1) *Огибающая принятого сигнала (мгновенная амплитуда принятого сигнала)*

$$\Xi = R, \quad (5)$$

где

$$r = |s_k| = \sqrt{(s_k^i)^2 + (s_k^q)^2}. \quad (6)$$

2) *Нормализованная огибающая*

$$\Xi = P = r / \lambda, \quad (7)$$

где

$$\lambda = \sqrt{E(r^2)} \quad (8)$$

- среднее квадратичное значение (rms) огибающей,  $E(\bullet)$  - символ математического ожидания.

3) *Символьное отношение сигнал-шум (The SNR per symbol)*

$$\Xi = \rho, \quad (9)$$

где

$$\rho = \frac{|r|^2 E_s}{N_0}, \quad (10)$$

$E_s$  - энергия принимаемого канального символа,  $N_0$  - спектральная плотность шума.

4) *Нормализованная мощность*

$$\Xi = W, \quad (11)$$

где

$$W = r^2 / E(r^2). \quad (12)$$

### III. НОВЫЕ МОДЕЛИ ФЕДИНГА

#### A. Модель $\alpha$ - $\lambda$ - $\mu$ - $\eta$

Принимаемый сигнал представляет собой совокупность процессов, характеризующихся различными путями распространения от  $n$  кластеров:

$$x_k = \sum_{l=1}^n x_{k,l} = \sum_{l=1}^n (x_{k,l}^i + jx_{k,l}^q). \quad (13)$$

В каждом кластере волны имеют одинаковое время распространения, но их фазы случайны. Задержки распространения различных кластеров характеризуются сравнительно большими различиями. Синфазные и квадратурные компоненты сигналов имеют нулевое среднее значение, но разную дисперсию. Коэффициент корреляции между синфазными и квадратурными составляющими равен

$$\lambda = \frac{E(x_k^i x_k^q)}{\sqrt{\text{Var}(x_k^i) \text{Var}(x_k^q)}}. \quad (14)$$

Огибающая принимаемого процесса представляет собой нелинейную функцию модулей многолучевых компонент

$$R^\alpha = \sum_{i=1}^n r^\alpha = \sum_{l=1}^n \left( (x_{k,l}^i)^2 + (x_{k,l}^q)^2 \right). \quad (15)$$

Плотность вероятности огибающей и функция вероятности огибающей определяется соотношениями [8]:

$$\begin{aligned} f_{R,\alpha-\lambda-\mu-\eta}(\xi | \alpha, \eta, \lambda, n, \hat{r}) &= \\ &= \left( \frac{\eta}{1-\lambda^2} \right)^{n/2} \frac{\sqrt{\pi} \alpha n^{0.5(n+1)} (1+\eta^{-1})^{0.5(n+1)} \xi^{0.5\alpha(n+1)-1}}{2^{0.5(n+1)} (\hat{r}^\alpha)^{0.5(n+1)} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right) (\vartheta\varphi)^{0.5(n-1)}} \times \\ &\times \exp\left(-\frac{\vartheta\varphi}{\hat{r}^\alpha} \xi^\alpha\right) I_{0.5(n-1)}\left(\frac{n(1+\eta)\vartheta\varphi}{4\eta\hat{r}^\alpha} \xi^\alpha\right), \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} F_{R,\alpha-\lambda-\mu-\eta}(\xi | \alpha, \eta, \lambda, \mu, \hat{r}) &= \\ &= \left( \frac{\eta}{1-\lambda^2} \right)^\mu \frac{\sqrt{\pi} \eta^\mu (1+\eta)^{-2\mu} (1-\lambda^2)^\mu}{\Gamma(\mu)} \times \\ &\times \sum_{l=0}^{\infty} \left( \frac{\vartheta\varphi(1-\lambda^2)}{2(1+\eta)} \right)^{2l} \frac{1}{l! \Gamma\left(l + \mu + \frac{1}{2}\right)} \times \\ &\left( \Gamma(2(\mu+l)) - \gamma\left(2(\mu+l), \frac{\vartheta\varphi}{\hat{r}^\alpha} \xi^\alpha\right) \right), \end{aligned} \quad (17)$$

где

$$\alpha > 0, \quad 0 \leq \lambda \leq 1, \quad \mu > 0, \quad \eta \geq 0, \quad \hat{r} = \sqrt{E(r^\alpha)},$$

$I_\nu(\bullet)$  - модифицированная функция Бесселя первого рода вещественного порядка  $\nu$ ,

$$\eta = \frac{\text{Var}(x_k^i)}{\text{Var}(x_k^q)}, \quad (18)$$

$$\mu = \frac{E^2(R^\alpha)}{\text{Var}(R^\alpha)} \frac{\eta^2 + 1 + 4\eta\lambda^2}{(\eta+1)^2}, \quad (19)$$

$$\vartheta\varphi = \frac{\sqrt{(\eta-1)^2 + 4\eta\lambda^2}}{1-\lambda^2}, \quad (20)$$

$$\vartheta\varphi = \frac{\mu(\eta+1)^2}{2\eta(1-\lambda^2)}. \quad (21)$$

#### B. Модель $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$

Так же как и для модели  $\alpha$ - $\lambda$ - $\mu$ - $\eta$  пути распространения сигнала в нелинейной среде разбиваются на кластеры, причем количество кластеров для независимых синфазной  $\mu_x$  и квадратурной составляющих  $\mu_y$  сигнала различно, при этом мощности одного кластера равны, соответственно,  $\sigma_x^2$  и  $\sigma_y^2$ . Синфазная и квадратурная составляющие характеризуются наличием доминантных составляющих, мощности которых, соответственно, равны  $\lambda_x^2$  и  $\lambda_y^2$  [9], [10].

Плотность вероятности распределения огибающей равна [9]

$$f_{R,\alpha-\eta-\kappa-\mu}(\xi | \alpha, \mu, n) = \frac{\alpha \xi^{\alpha\mu-1} \sum_{l=0}^{\infty} l! c_l L_l^{\mu-1}(2\xi^\alpha)}{2^\mu \Gamma(\mu) \exp\left(\frac{\xi^\alpha}{2}\right) (\mu)_l^{0.5(n+1)}}, \quad (22)$$

где  $L_l(\bullet)$  - полином Лагерра,  $(\mu)_l = \Gamma(\mu+l)/\Gamma(\mu)$  - символ Похгаммера (Pochhammer),  $c_l$  - рекурсивно вычисляемые коэффициенты [9, (15), (30), (31)], зависящие от параметров

$$\mu = 0.5(\mu_x + \mu_y), \quad (23)$$

$$E(R^\alpha) = \mu_x \sigma_x^2 + \lambda_x^2 + \mu_y \sigma_y^2 + \lambda_y^2, \quad (24)$$

$$\eta = \frac{\mu_x \sigma_x^2}{\mu_y \sigma_y^2} \quad (25)$$

- отношения общих мощностей синфазной и квадратурных составляющих,

$$\kappa = \frac{\lambda_x^2 + \lambda_y^2}{\mu_x \sigma_x^2 + \mu_y \sigma_y^2} \quad (26)$$

- отношения мощности доминантных составляющих к общей мощности кластеров,

$$p = \frac{\mu_x}{\mu_y}, \quad (27)$$

$$q = \frac{\lambda_x^2 \mu_y \sigma_y^2}{\lambda_y^2 \mu_x \sigma_x^2}. \quad (28)$$

### C. Модель $\alpha$ - $\eta$ - $\mu$

Данная модель тоже характеризуется нелинейностью среды распространения с параметром нелинейности  $\alpha$ . Доминантные составляющие при этом отсутствуют [11]. Эта модель может быть получена из модели  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$  (рис. 1) [9], [10].



Рис. 1. Взаимосвязь распределений  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$  и  $\alpha$ - $\eta$ - $\mu$

Плотность вероятности нормализованной мощности равна [11]

$$f_{P,\alpha-\eta-\mu}(\xi | \alpha, \eta, \mu) = \frac{\alpha(\eta-1)^{0.5-\mu} (\eta+1)^{0.5+\mu} \xi^{\alpha(0.5+\mu)-1}}{\exp\left(\frac{(1+\eta)^2 \mu \xi^\alpha}{2\eta}\right) \sqrt{\eta} \Gamma(\mu)} \times \\ \times \sqrt{\pi} \mu^{0.5+\mu} I_{\mu-0.5}\left(\frac{(\eta^2-1)\mu \xi^\alpha}{2\eta}\right). \quad (29)$$

Параметр  $\eta$  оценивается как

$$\eta = \frac{\sigma_x^2}{\sigma_y^2}. \quad (30)$$

### D. Модель $\alpha$ - $\kappa$ - $\mu$

Данная модель характеризуется наличием доминантных составляющих, поэтому, в отличие от предыдущей модели, математические ожидания квадратурных составляющих соответственно равны  $\mu_x$  и  $\mu_y$  [11]. Плотность вероятности нормализованной мощности равна [11]

$$f_{P,\alpha-\kappa-\mu}(\xi | \alpha, \kappa, \mu) = \frac{\alpha \kappa^{0.5(1-\mu)} (\kappa+1)^{0.5(1+\mu)} \mu \xi^{0.5\alpha(1+\mu)-1}}{\exp(\mu(\kappa + \xi^\alpha + \kappa \xi^\alpha))} \times \\ \times I_{\mu-1}\left(2\sqrt{\kappa(1+\kappa)} \mu \xi^{0.5\alpha}\right), \quad (31)$$

где

$$\kappa = \frac{\mu_x^2}{\sigma_x^2} = \frac{\mu_y^2}{\sigma_y^2}. \quad (32)$$

Эта модель может быть получена из модели  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$  (рис. 2) [9], [10].



Рис. 2. Взаимосвязь распределений  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$  и  $\alpha$ - $\kappa$ - $\mu$

### E. Модель $\eta$ - $\lambda$ - $\mu$

В этой модели предполагается [12] наличие  $\mu$  кластеров путей распространения, нулевое математическое ожидание квадратурных составляющих с разной дисперсией  $\sigma_x^2$  и  $\sigma_y^2$  и коэффициентом корреляции  $\lambda$ .

Плотность вероятности огибающей равна [12]

$$f_{R,\eta-\lambda-\mu}(\xi | \eta, \lambda, \mu) = \frac{(2\sqrt{\eta(1-\lambda^2)} \vartheta)^{2\mu} \sqrt{\pi} \xi^{2\mu}}{2^{\mu-3/2} \hat{r}^{2\mu+1} \Gamma(\mu) \vartheta^{\mu-1/2}} \times \\ \times \exp\left(-\vartheta \frac{\xi^2}{\hat{r}^2}\right) I_{\mu-1/2}\left(\vartheta \frac{\xi^2}{\hat{r}^2}\right), \quad (33)$$

где

$$\eta = \frac{\sigma_x^2}{\sigma_y^2}, \quad (34)$$

$$\vartheta_{\alpha} = \frac{\mu(1+\eta)}{2\eta(1-\lambda^2)}, \quad (35)$$

$$\vartheta_{\sigma} = \frac{\mu(\eta+1)^2}{2\eta(1-\lambda^2)}, \quad (36)$$

$$\hat{r} = \sqrt{E(R^2)} = \sigma_x \sqrt{2\mu(1+\eta^{-1})}, \quad (37)$$

$$\vartheta_{\alpha} = \vartheta_{\sigma} \sqrt{(\eta-1)^2 + 4\eta\lambda^2}. \quad (38)$$

### F. Модель $\alpha$ - $\mu$

Эта модель описывает мелкомасштабный фединг и принимает во внимание нелинейность среды распространения [13].

Плотность распределения символического отношения сигнал-шум  $\Xi = \rho$  описывается как

$$f_{\rho,\alpha-\mu}(\xi | \alpha, \mu) = \frac{\alpha \mu^\mu h^\mu}{2\Gamma(\mu) \hat{r}^{0.5\alpha\mu}} \xi^{0.5\alpha\mu-1} \exp\left(-\mu \frac{\xi^{0.5\alpha}}{\hat{r}^{0.5\alpha\mu}}\right). \quad (39)$$

Плотность распределения огибающей  $\Xi = R$  равна [13]

$$f_{R,\alpha-\mu}(\xi | \alpha, \mu) = \frac{\alpha \mu^\mu}{\hat{r}^{\alpha\mu} \Gamma(\mu)} \xi^{\alpha\mu-1} \exp\left(-\mu \frac{\xi^\alpha}{\hat{r}^\alpha}\right). \quad (40)$$

Плотность распределения нормализованной огибающей  $\Xi = P$  равна [13]

$$f_{P,\alpha-\mu}(\xi | \alpha, \mu) = \frac{\alpha \mu^\mu}{\Gamma(\mu)} \xi^{\alpha\mu-1} \exp(-\mu \xi^\alpha). \quad (41)$$

Для данной модели

$$\mu = \frac{E^2(R^\alpha)}{\text{Var}(R^\alpha)}, \quad (42)$$

$$\hat{r} = \sqrt[\alpha]{E(R^\alpha)}. \quad (43)$$

Эта модель может быть получена из моделей  $\alpha-\lambda-\mu-\eta$  (рис. 3) [8] и  $\alpha-\eta-\kappa-\mu$  (рис. 4) [9], [10].

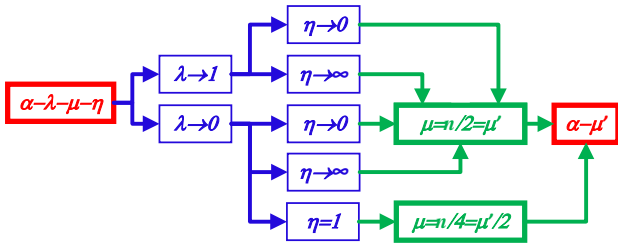


Рис. 3. Взаимосвязь распределений  $\alpha-\lambda-\mu-\eta$  и  $\alpha-\mu'$

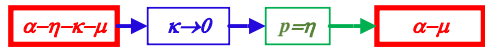


Рис. 4. Взаимосвязь распределений  $\alpha-\eta-\kappa-\mu$  и  $\alpha-\mu$

### G. Модель $\eta-\kappa$ (Beckmann)

Это распределение характеризуется наличием доминантных компонент в квадратурных составляющих сигнала, математические ожидания которых равны  $\mu_x$  и  $\mu_y$ , [14] – [16].

Нормализованная огибающая  $\Xi = P$  характеризуется плотностью вероятности [14]

$$f_{P,\eta-\kappa}(\xi | \eta, \kappa) = \frac{2\sqrt{h}(1+\kappa)}{\exp(k)} \xi \exp(-(1+\kappa)h\xi^2) M(u, v, \phi), \quad (44)$$

где

$$M(u, v, \phi) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp(u \cos \theta + v \cos(2(\theta + \phi))) d\theta, \quad (45)$$

$$u = 2\sqrt{h\kappa(1+\kappa)}\xi, \quad v = -H(1+\kappa)\xi^2, \quad (46)$$

$$\eta = \frac{\sigma_x^2 + \mu_x^2}{\sigma_y^2 + \mu_y^2}, \quad (47)$$

$$\kappa = \frac{\mu_x^2 + \mu_y^2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}, \quad (48)$$

$$h = \frac{2 + \eta + \eta^{-1}}{4}, \quad (49)$$

$$H = \frac{\eta^{-1} - \eta}{4}, \quad (50)$$

$$tg\phi = \sqrt{\eta}. \quad (51)$$

Эта модель может быть получена из модели  $\alpha-\eta-\kappa-\mu$  (рис. 5) [9], [10].

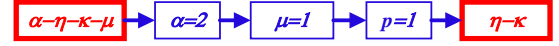


Рис. 5. Взаимосвязь распределений  $\alpha-\eta-\kappa-\mu$  и  $\eta-\kappa$

### H. Модель $\eta-\mu$

Данная модель предполагает отсутствие доминантных составляющих [17].

Нормализованная огибающая  $\Xi = R$  характеризуется плотностью вероятности [17]

$$f_{R,\eta-\mu}(\xi | \eta, \mu) = \frac{1}{\hat{r}} \frac{4\sqrt{\pi}\mu^{\mu+0.5}h^\mu}{\Gamma(\mu)H^{\mu-0.5}} \left(\frac{\xi}{\hat{r}}\right)^{2\mu} \exp\left(-2\mu h \left(\frac{\xi}{\hat{r}}\right)^2\right) I_{\mu-0.5}\left(2\mu H \left(\frac{\xi}{\hat{r}}\right)^2\right). \quad (52)$$

Для этой модели существуют два формата. Связь между  $\eta$ -параметрами этих форматов устанавливается соотношением

$$\eta_{Format2} = \frac{1 - \eta_{Format1}}{1 + \eta_{Format1}}, \quad 0 < \eta_{Format1} < \infty, \quad -1 < \eta_{Format1} < 1. \quad (53)$$

Для формата 1

$$h = \frac{2 + \eta_{Format1}^{-1} + \eta_{Format1}}{4}, \quad H = \frac{\eta_{Format1}^{-1} - \eta_{Format1}}{4}, \quad (54)$$

$$\eta_{Format1} = \frac{\sigma_x^2}{\sigma_y^2}. \quad (55)$$

Для формата 2  $E(x_k^i) = E(x_k^q) = 0$ ,  $Var(x_k^i) = Var(x_k^q) = \sigma^2$ ,

$$h = \frac{1}{1 - \eta_{Format2}^2}, \quad H = \frac{\eta_{Format2}}{1 - \eta_{Format2}^2}, \quad (56)$$

$$\eta_{Format2} = \frac{\text{Var}(x_k^i x_k^q)}{\sigma^2}, \quad (57)$$

$$\mu = \frac{1}{2\text{Var}(P^2)} \left(1 + \left(\frac{H}{h}\right)^2\right). \quad (58)$$

На рис. 6 – 9 показаны варианты получения данной модели из других.

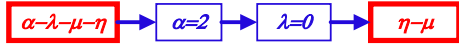


Рис. 6. Взаимосвязь распределений  $\alpha - \lambda - \mu - \eta$  и  $\eta - \mu$



Рис. 7. Взаимосвязь распределений  $\alpha - \eta - \kappa - \mu$  и  $\eta - \mu$

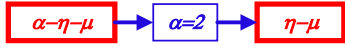


Рис. 8. Взаимосвязь распределений  $\alpha - \eta - \mu$  и  $\eta - \mu$

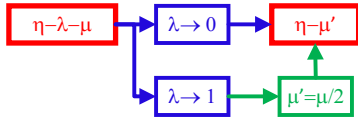


Рис. 9. Взаимосвязь распределений  $\eta - \lambda - \mu$  и  $\eta - \mu$

#### I. Модель $\kappa - \mu$

В этой модели предполагается [17] наличие  $n$  кластеров путей распространения,  $p_i$  и  $q_i$  - среднее квадратурных составляющих,  $Var(x_k^i) = Var(x_k^q) = \sigma^2$ .

Нормализованная огибающая  $\Xi = R$  характеризуется плотностью вероятности [17]

$$f_{R,\kappa-\mu}(\xi | \kappa, \mu) = \frac{1}{\hat{r}} \frac{2\mu(1+\kappa)^{0.5(\mu+1)} 4\sqrt{\pi}\mu h^\mu}{\kappa^{0.5(\mu-1)} \exp(\mu\kappa)} \left(\frac{\xi}{\hat{r}}\right)^\mu \times \exp\left(-\mu(1+\kappa)\left(\frac{\xi}{\hat{r}}\right)^2\right) I_{\mu-1}\left(2\mu\sqrt{\kappa(1+\kappa)}\left(\frac{\xi}{\hat{r}}\right)\right), \quad (59)$$

$$\mu = \frac{1}{Var(P^2)} \frac{1+2\kappa}{(1+\kappa)^2}, \quad (60)$$

$$\kappa = \frac{d^2}{2\pi\sigma^2}, \quad (61)$$

$$d^2 = \sum_{i=1}^n d_i^2, \quad (62)$$

$$d_i^2 = p_i^2 + q_i^2. \quad (63)$$

На рис. 10, 11 показаны варианты получения данной модели из других.

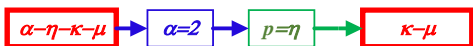


Рис. 10. Взаимосвязь распределений  $\alpha - \eta - \kappa - \mu$  и  $\kappa - \mu$

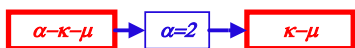


Рис. 11. Взаимосвязь распределений  $\alpha - \kappa - \mu$  и  $\kappa - \mu$

#### J. Модель $\lambda - \mu$

Модель предполагает однородную среду с наличием кластеров распространения сигнала [18]. Математическое ожидание квадратурных составляющих с разной дисперсией  $\sigma_x^2$  и  $\sigma_y^2$ , коэффициентом корреляции  $\lambda$ , равно нулю.

Нормализованная огибающая  $\Xi = R$  характеризуется плотностью вероятности [18]

$$f_{R,\lambda-\mu}(\xi | \lambda, \mu) = \frac{4 \exp\left(\frac{2\mu}{\lambda^2-1} \xi^2\right) \mu^{\mu+0.5} \sqrt{\pi}}{\lambda^{\mu-0.5} \sqrt{1-\lambda^2} \Gamma(\mu)} \xi^{2\mu} I_{\mu-0.5}\left(\frac{2\mu\lambda}{1-\lambda^2} \xi^2\right), \quad (64)$$

$$\mu = \frac{E^2(R^2)}{Var(R^2)} \frac{1+\lambda^2}{2}. \quad (65)$$

На рис. 12, 13 показаны варианты получения данной модели из других.

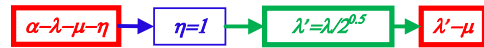


Рис. 12. Взаимосвязь распределений  $\alpha - \lambda - \mu - \eta$  и  $\lambda - \mu$

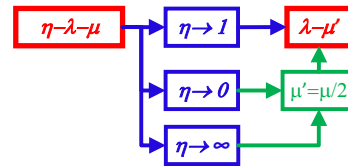


Рис. 13. Взаимосвязь распределений  $\eta - \lambda - \mu$  и  $\lambda - \mu$

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены разработанные в последние годы обобщенные модели канала связи с федингом. Эти модели используют новые существенные результаты в изучении физических основ фединга. Эти модели, учитывают такие явления как нелинейность среды распространения радиоволн, эффекты рассеяния радиоволн, наличие доминантных компонент, кластерный характер многолучевого распространения. Систематизированы знания об этих моделях. Предпринята попытка привести информацию об этих моделях к единому подходу, однообразному описанию. Работа ограничилась рассмотрением только мелкомасштабного фединга. Продолжение работы будет заключаться в установлении связи с традиционными моделями, расширить исследования на другие типы фединга. В дальнейшем предполагается использовать эти результаты для проектирования подсистем обнаружения сигналов в когнитивных сетях.

#### ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при поддержке РФФИ - грант 18-07-00986а.

- [1] Wei-Ho Chung, "Spectrum sensing in cognitive radio: Aspects of fading and cooperation," in *Cognitive Radio and Interference Management: Technology and Strategy (Advances in Wireless Technologies and Telecommunication)*, Meng-Lin Ku, Jia-Chin Lin, Eds. IGI Global, 2013.
- [2] F. F. Digham, A. H. Tewfik, and M.-S. Alouini, "Detection of known and unknown signals, over fading channels," 2003 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2003), San Francisco, CA, USA, 1-5 Dec. 2003, vol.3, pp. 1756 - 1760.
- [3] F. Digham, M. Alouini, and M. Simon, "On the energy detection of unknown signals over fading channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 55, no. 1, pp. 21-24, 2007.
- [4] I. E. Atawi, O. S. Badarneh, M. S. Aloqlah, and R. Mesleh, "Energy-detection based spectrum-sensing in cognitive radio networks over multipath/shadowed fading channels," 2015 Wireless Telecommunications Symposium (WTS-2015), New York, NY, USA, 15-17 April 2015, 6 p.
- [5] M. K. Simon, and M.-S. Alouini, *Digital Communication over Fading Channels*, 2nd ed., Wiley-IEEE Press, 2004.
- [6] P. M. Shankar, *Fading and Shadowing in Wireless Systems*, 2nd ed., Springer, 2017.
- [7] S. Panic, M. Stefanovic, J. Anastasov, and P. Spalevic, *Fading and Interference Mitigation in Wireless Communications*, Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Inc., 2013.
- [8] Papazafeiropoulos A. K., Kotsopoulos S. A., Zevgolis D. The alpha-lambda-mu-eta: A general fading distribution // 2009 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Budapest, Hungary, 5-8 April 2009, 6 p. DOI: 10.1109/WCNC.2009.4917981.
- [9] Yacoub M. D. The  $\alpha - \eta - \kappa - \mu$  fading model // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2016. Vol. 64. Issue 8. Pp. 3597 – 3610. DOI: 10.1109/TAP.2016.2570235.
- [10] Li X., Chen X., Zhang J., Liang Y., Liu Y. Capacity analysis of  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$  fading channels // IEEE Communications Letters. 2017. Vol. 21. Issue 6. Pp. 1449 – 1452. DOI: 10.1109/LCOMM.2017.2672960.
- [11] Fraidenraich G., Yacoub M. D. The  $\alpha$ - $\eta$ - $\mu$  and  $\alpha$ - $\kappa$ - $\mu$  fading distributions // 9th IEEE International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications, Manaus-Amazon, Brazil, 28-31 Aug. 2006. Pp. 16 – 20. DOI: 10.1109/ISSSTA.2006.311725.
- [12] Papazafeiropoulos A. K., Kotsopoulos S. A. The  $\eta$ - $\lambda$ - $\mu$ : A general fading distribution // 2009 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM-2009), Honolulu, HI, USA, 30 Nov.-4 Dec. 2009, 5 p.
- [13] Yacoub M. D. The  $\alpha$ - $\mu$  distribution: A physical fading model for the Stacy distribution // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2007. Vol. 56. Issue 1. Pp. 27 – 34. DOI: 10.1109/TVT.2006.883753.
- [14] Yacoub M. D., Fraidenraich G., Tercius H. B., Martins F.C. The asymmetrical  $\eta$ - $\kappa$  distribution // Journal of Communication and Information Systems. 2005. Vol. 20. No. 3. Pp. 182 – 187. DOI: 10.14209/jcis.2005.25.
- [15] Yacoub M. D., Fraidenraich G., Tercius H. B., Martins F.C. The symmetrical  $\eta$ - $\kappa$  distribution // 15th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2004). 5-8 Sept. 2004. Barcelona, Spain. 2004. Vol 4. Pp. 2426 – 2430. DOI: 10.1109/PIMRC.2004.1368755.
- [16] Yacoub M. D., Fraidenraich G., Tercius H. B., Martins F.C. The symmetrical  $\eta$ - $\kappa$  distribution: A general fading distribution // IEEE Transactions on Broadcasting. 2005. Vol. 51. Issue 4. Pp. 504 – 511.
- [17] Yacoub M. D. The  $\kappa$ - $\mu$  distribution and the  $\eta$ - $\mu$  distribution // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2007. Vol. 49. Issue 1. Pp. 68 – 81. DOI: 10.1109/MAP.2007.370983.
- [18] Fraidenraich G., Yacoub M. D. The  $\square\square\square$  general fading distribution // SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC-2003). Foz do Iguacu, Brazil. 20-23 Sept. 2003. Pp. 49 – 54. DOI: 10.1109/IMOC.2003.1244830.

## Generalized Fading Models in Cognitive Radio Networks

V.A. Lesnikov<sup>1</sup>, T.V. Naumovich<sup>2</sup>, A.V. Chastikov<sup>3</sup>, M.V. Kustenکو<sup>4</sup>

Vyatka State University, Kirov

<sup>1</sup> Vladislav.Lesnikov.ru@ieee.org, <sup>2</sup> ntv\_new@mail.ru, <sup>3</sup> alchast@mail.ru, <sup>4</sup> kustishka@mail.ru

**Abstract** — Fading is the signal distortion due to the heterogeneity of the communication channel, multipath propagation of radio waves, the relative motion of the transmitter and receiver, shading. Traditionally, such distributions as the Rayleigh distribution, the rice distribution (Nakagami-n), the Nakagami-m distribution, the Hoyt distribution, the Nakagami-q distribution, the Weibull distribution, the one-side Gaussian distribution, the negative exponential distribution, the lognormal distribution used to describe fading. In recent years, significant new results have been obtained in the study of the physical basis of fading. Traditional fading models do not take into account new results. There was a need to complicate fading models. There appeared models that took into account such phenomena as the nonlinearity of the propagation medium, the effects of scattering of radio waves, the presence

of principal components, the clustered nature of multipath propagation, the unbalance of the quadrature components of the signal. In this paper, structured description of non-traditional generalized fading models is presented, and the relationship between models is shown.

**Keywords** — fading, generalized models, homogeneous signal propagation medium, inhomogeneous signal propagation medium, cluster structure of propagation paths.

### REFERENCES

- [1] Wei-Ho Chung, "Spectrum sensing in cognitive radio: Aspects of fading and cooperation," in *Cognitive Radio and Interference Management: Technology and Strategy*

- (Advances in Wireless Technologies and Telecommunication), Meng-Lin Ku, Jia-Chin Lin, Eds. IGI Global, 2013.
- [2] F. F. Digham, A. H. Tewfik, and M.-S. Alouini, "Detection of known and unknown signals, over fading channels," 2003 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2003), San Francisco, CA, USA, 1-5 Dec. 2003, vol.3, pp. 1756 - 1760.
- [3] F. Digham, M. Alouini, and M. Simon, "On the energy detection of unknown signals over fading channels," IEEE Trans. Commun., vol. 55, no. 1, pp. 21–24, 2007.
- [4] I. E. Atawi, O. S. Badarneh, M. S. Aloqlah, and R. Mesleh, "Energy-detection based spectrum-sensing in cognitive radio networks over multipath/shadowed fading channels," 2015 Wireless Telecommunications Symposium (WTS-2015), New York, NY, USA, 15-17 April 2015, 6 p.
- [5] M. K. Simon, and M.-S. Alouini, Digital Communication over Fading Channels, 2nd ed., Wiley-IEEE Press, 2004.
- [6] P. M. Shankar, Fading and Shadowing in Wireless Systems, 2nd ed., Springer, 2017.
- [7] S. Panic, M. Stefanovic, J. Anastasov, and P. Spalevic, Fading and Interference Mitigation in Wireless Communications, Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Inc., 2013.
- [8] Papazafeiropoulos A. K., Kotsopoulos S. A., Zevgolis D. The alpha-lambda-mu-eta: A general fading distribution // 2009 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Budapest, Hungary, 5-8 April 2009, 6 p. DOI: 10.1109/WCNC.2009.4917981.
- [9] Yacoub M. D. The  $\alpha - \eta - \kappa - \mu$  fading model // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2016. Vol. 64. Issue 8. Pp. 3597 – 3610. DOI: 10.1109/TAP.2016.2570235.
- [10] Li X., Chen X., Zhang J., Liang Y., Liu Y. Capacity analysis of  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$  fading channels // IEEE Communications Letters. 2017. Vol. 21. Issue 6. Pp. 1449 – 1452. DOI: 10.1109/LCOMM.2017.2672960.
- [11] Fraidenraich G., Yacoub M. D. The  $\alpha$ - $\eta$ - $\mu$  and  $\alpha$ - $\kappa$ - $\mu$  fading distributions // 9<sup>th</sup> IEEE International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications, Manaus-Amazon, Brazil, 28-31 Aug. 2006. Pp. 16 – 20. DOI: 10.1109/ISSSTA.2006.311725.
- [12] Papazafeiropoulos A. K., Kotsopoulos S. A. The  $\eta$ - $\lambda$ - $\mu$ : A general fading distribution // 2009 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM-2009), Honolulu, HI, USA, 30 Nov.-4 Dec. 2009, 5 p.
- [13] Yacoub M. D. The  $\alpha$ - $\mu$  distribution: A physical fading model for the stacy distribution // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2007. Vol. 56. Issue 1. Pp. 27 – 34. DOI: 10.1109/TVT.2006.883753.
- [14] Yacoub M. D., Fraidenraich G., Tercius H. B., Martins F.C. The asymmetrical  $\eta$ - $\kappa$  distribution // Journal of Communication and Information Systems. 2005. Vol. 20. No. 3. Pp. 182 – 187. DOI: 10.14209/jcis.2005.25.
- [15] Yacoub M. D., Fraidenraich G., Tercius H. B., Martins F.C. The symmetrical  $\eta$ - $\kappa$  distribution // 15th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2004). 5-8 Sept. 2004. Barcelona, Spain. 2004. Vol 4. Pp. 2426 – 2430. DOI: 10.1109/PIMRC.2004.1368755.
- [16] Yacoub M. D., Fraidenraich G., Tercius H. B., Martins F.C. The symmetrical  $\eta$ - $\kappa$  distribution: A general fading distribution // IEEE Transactions on Broadcasting. 2005. Vol. 51. Issue 4. Pp. 504 – 511.
- [17] Yacoub M. D. The  $\kappa$ - $\mu$  distribution and the  $\eta$ - $\mu$  distribution // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2007. Vol. 49. Issue 1. Pp. 68 – 81. DOI: 10.1109/MAP.2007.370983.
- [18] Fraidenraich G., Yacoub M. D. The  $\lambda$ - $\mu$  general fading distribution // SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC-2003). Foz do Iguacu, Brazil. 20-23 Sept. 2003. Pp. 49 – 54. DOI: 10.1109/IMOC.2003.1244830.