

Лесников Владислав Алексеевич,

канд. техн. наук, доцент;

Наумович Татьяна Викторовна,

старший преподаватель,

Частиков Александр Вениаминович,

д-р технических наук, профессор,

Кустенко Марина Вячеславовна,

студентка магистратуры,

кафедра радиоэлектронных средств (РЭС),

ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет»,

г. Киров, Россия

ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ КЛАССИЧЕСКИМИ МОДЕЛЯМИ КАНАЛА СВЯЗИ С ФЕДИНГОМ

Решение задачи обнаружения осложняется существованием в канале связи явления замирания сигналов (фединга). Фединг – это искажения сигнала из-за неоднородности канала связи, многолучевого распространения радиоволн, относительного движения передатчика и приемника, затенения. 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 Рэля, распределение Райса (Накагами-n), распределение Накагами-m, распределение Хойта, распределение Накагами-q, распределение Вейбулла, одностороннее гауссовское распределение, отрицательное экспоненциальное распределение. 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.

Ключевые слова: канал связи, фединг, многолучевое распространение радиоволн, модель Рэля, модель Райса, модель Накагами-m, модель Накагами-n, модель Накагами-q, модель Вейбулла, модель Хойта, одностороннее гауссовское распределение.

Vladislav A. Lesnikov,

PhD, associate professor;

Tatiana V. Naumovich,

Senior lecturer;

Alexander V. Chastikov,

DSc, professor;

Marina V. Kustenko,

graduate student,

Vyatka State University,

Kirov, Russia

INTERRELATION BETWEEN CLASSICAL FADING CHANNEL MODELS

The solution of the detection problem is complicated by the existence in the communication channel of the signal fading phenomenon (fading). Fading is a signal distortion due to the heterogeneity of the communication channel, multipath propagation of radio waves, relative motion of the transmitter and receiver, shading. When describing the process of passing a signal through a communication channel, it is customary to describe the signal parameters by random variables. Traditionally, such distributions as Rayleigh distribution, Rice distribution (Nakagami-n), Nakagami-m distribution, Hoyt distribution, Nakagami-q distribution, Weibull distribution, one-way Gaussian distribution, negative exponential distribution are used to describe these random variables. A large number of publications in this subject area is characterized by the absence of a unified system approach, the distinction of conventional symbols. The task of this publication is to provide a system analysis of these models, to establish a relationship between them and between new and traditional models. The work is limited to considering only small-scale fading.

Keywords: communication channel, fading, multipath propagation of radio waves, Rayleigh model, Rice model, Nakagami-m model, Nakagami-n model, Nakagami-q model, Weibull model, Hoyt model, one-sided Gaussian distribution.

Перспективным путем решения проблемы дефицита частотных ресурсов является интеллектуальное динамическое распределение спектра с использованием принципов когнитивного радио. Важнейшей задачей, решаемой средствами когнитивного радио, является спектральное восприятие

(Spectrum Sensing) [1; 2], позволяющее обнаруживать участки спектра, незанятые на данном интервале времени (white space, spectrum hole), может быть даже закрепленные за обладающим лицензией на этот спектр – так называемым первичным – пользователем.

Наиболее часто в системах когнитивного радио используется метод энергетического обнаружения и его модификации. Расчет порога для энергетического обнаружителя осуществляется при использовании принципа Неймана-Пирсона по величине вероятности ложной тревоги, а для расчета рабочих характеристик обнаружителя и его других метрик необходимо знать закон распределения сигнала [3-5]. При этом необходимо учитывать, что канал связи характеризуется замираниями (федингом) из-за многолучевого распространения радиоволн и затенения [6; 7].

Мгновенную амплитуду (магнитуду) R сигнала в условиях кратковременного фединга (short-term fading) принято описывать распределением Рэля (Rayleigh).

Плотность вероятности и функция вероятности распределения Рэля случайной переменной Ξ имеют вид:

$$f_{\Xi, Rayleigh}(\xi | \beta) = \frac{\xi}{\beta^2} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2\beta^2}\right) \quad (1)$$

и

$$F_{\Xi, Rayleigh}(\xi | \beta) = 1 - \exp\left(-\frac{\xi^2}{2\beta^2}\right), \quad (2)$$

соответственно [7-10], где $0 < \xi < \infty$, β – параметр распределения.

В случае описания канала связи с кратковременным федингом:

$$\Xi = R, \quad (3)$$

$$\beta^2 = \sigma^2 \quad (4)$$

- дисперсия квадратурных составляющих сигнала

$$x_k = x_k^i + jx_k^q, \quad (5)$$

$$x_k^i = \operatorname{Re}(x_k) \quad (6)$$

- синфазная составляющая комплексного сигнала x_k ,

$$x_k^q = \operatorname{Im}(x_k) \quad (7)$$

- квадратурная составляющая комплексного сигнала x_k .

Плотность вероятности и функция вероятности распределения Райса случайной переменной P имеют вид [7-10]:

$$f_{\Xi, \text{Rice}}(\xi | k, \beta) = \frac{\xi}{\beta^2} \exp\left(-\frac{\xi^2 + k^2}{2\beta^2}\right) I_0\left(\frac{\xi k}{\beta^2}\right), \quad (8)$$

$$F_{\Xi, \text{Rice}}(\xi | k, \beta) = 1 - Q_1\left(\frac{k}{\beta}, \frac{\xi}{\beta}\right) \quad (9)$$

k и β – параметры распределения Райса, $Q_1(\bullet, \bullet)$ – Q-функция Маркума:

$$Q_M(a, b) = \exp\left(-\frac{a^2 + b^2}{2}\right) \sum_{k=1-M}^{\infty} \left(\frac{a}{b}\right)^k I_k(ab). \quad (10)$$

При $k = 0$

$$f_{\Xi, \text{Rayleigh}}(\xi | \beta) = f_{\Xi, \text{Rice}}(\xi | 0, \beta). \quad (11)$$

При $a = k / \beta$, $b = \xi / \beta$ и $k = 0$

$$Q_1\left(0, \frac{\xi}{\beta}\right) = \exp\left(-\frac{\xi^2}{2\beta^2}\right) \sum_{k=0}^{\infty} (0)^k I_k(0) = \exp\left(-\frac{\xi^2}{2\beta^2}\right). \quad (12)$$

Поэтому

$$F_{\Xi, \text{Rayleigh}}(\xi | \beta) = F_{\Xi, \text{Rice}}(\xi | 0, \beta). \quad (13)$$

Таким образом, распределение Райса при $k = 0$ совпадает с распределением Рэлея.

Плотность вероятности и функция вероятности распределения Вейбулла случайной переменной P имеют вид [7-10]:

$$f_{\Xi, Weibull}(\xi | \Omega, \alpha) = \frac{\alpha}{\Omega} \left(\frac{\xi}{\Omega}\right)^{\alpha-1} \exp\left(-\left(\frac{\xi}{\Omega}\right)^\alpha\right) \quad (14)$$

и

$$F_{\Xi, Weibull}(\xi | \Omega, \alpha) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\xi}{\Omega}\right)^\alpha\right). \quad (15)$$

При $\alpha = 2$ и $\Omega = \sqrt{2}\beta$

$$f_{\Xi, Rayleigh}(\xi | \beta) = f_{\Xi, Weibull}(\xi | \sqrt{2}\beta, 2), \quad (16)$$

$$F_{\Xi, Rayleigh}(\xi | \beta) = F_{\Xi, Weibull}(\xi | \sqrt{2}\beta, 2), \quad (17)$$

и распределение Вейбулла совпадает с распределением Рэлея.

Плотность вероятности распределения Хойта выражается следующим образом [9]:

$$f_{\Xi, Hoyt}(\xi | b, \Omega) = \frac{2}{\sqrt{1-b^2}} \frac{1}{\Omega^2} \xi \exp\left(-\frac{1}{1-b^2} \left(\frac{1}{\Omega}\right)^2 \xi^2\right) I_0\left(\frac{b}{1-b^2} \left(\frac{1}{\Omega}\right)^2 \xi^2\right). \quad (18)$$

При

$$b = 0, \beta^2 = \frac{\Omega^2}{2} \quad (19)$$

распределение Хойта переходит в распределение Рэлея.

Распределение Накагами- q характеризуется плотностью вероятности:

$$f_{\Xi, Nakagami-q}(\xi | q, \Omega) = \frac{1+q^2}{q} \frac{1}{\Omega^2} \xi \exp\left(-\frac{(1+q^2)^2}{4q^2} \frac{1}{\Omega^2} \xi^2\right) I_0\left(\frac{1-q^4}{4q^2} \frac{1}{\Omega^2} \xi^2\right) \quad (20)$$

В распределение Рэлея при:

$$q = 1, \beta^2 = \frac{\Omega^2}{2} \quad (21)$$

переходит также распределение Накагами- q

$$f_{\Xi, Nakagami-q}(\xi | 1, \Omega) = \frac{2}{\Omega^2} \xi \exp\left(-\frac{1}{\Omega^2} \xi^2\right) = \frac{\xi}{\beta^2} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2\beta^2}\right) = f_{\Xi, Rayleigh}(\xi | \beta) \quad (22)$$

Распределения Хойта и Накагами-q – это различные представления одного и того же распределения. В литературе часто можно встретить такие наименования этого распределения, как Nakagami-q (Hoyt) или Nakagami-Hoyt.

$$f_{\Xi, Nakagami-m}(\xi | m, \Omega) = \frac{2m^m}{\Gamma(m)\Omega^m} \xi^{2m-1} \exp\left(-\frac{m}{\Omega} \xi^2\right) \quad (23)$$

$$F_{\Xi, Nakagami-m}(\xi | m, \Omega) = \frac{\gamma\left(m, \frac{m}{\Omega} \xi^2\right)}{\Gamma(m)} \quad (24)$$

где $\Gamma(m)$ полная гамма-функция (complete Gamma function).

Распределение Накагами-m при:

$$m=1, \beta^2 = \frac{\Omega}{2} \quad (25)$$

переходит в распределение Рэлея:

$$f_{\Xi, Nakagami-m}(\xi | 1, \omega) = \frac{2}{\Omega} \xi \exp\left(-\frac{1}{\Omega} \xi^2\right) = \frac{\xi}{\beta^2} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2\beta^2}\right) = f_{\Xi, Rayleigh}(\xi | \beta) \quad (26)$$

$$F_{\Xi, Nakagami-m}(\xi | 1, \Omega) = \frac{\gamma\left(m, \frac{m}{\Omega} \xi^2\right)}{\Gamma(m)} = \frac{\gamma\left(1, \frac{1}{\Omega} \xi^2\right)}{\Gamma(1)} = \gamma\left(1, \frac{1}{\Omega} \xi^2\right) \quad (27)$$

Распределение Накагами-m при $m=1/2, \Omega = \sigma^2$ (31) переходит в одностороннее распределение Гаусса (one-sided Gauss distribution, half-normal distribution):

$$f_{\Xi, Nakagami-m}(\xi | 0.5, \Omega) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}\sqrt{\Omega}} \exp\left(-\frac{1}{2\Omega} \xi^2\right) = \frac{\sqrt{2}}{\sigma\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \xi^2\right) = f_{\Xi, onesidedGauss}(\xi | \sigma) \quad (28)$$

Распределение Вейбулла при:

$$\alpha=1, \mu = \frac{1}{\nu} \quad (29)$$

переходит в отрицательное экспоненциальное (negative exponential) распределение Рэля:

$$f_{\Xi, Weibull}(\xi | \nu, 1) = \frac{1}{\nu} \exp\left(-\frac{\xi}{\nu}\right) = \exp(-\mu\xi) = f_{\Xi, neg \exp}(\xi | \mu) \quad (30)$$

$$F_{\Xi, Weibull}(\xi | \Omega, 1) = 1 - \exp\left(-\frac{\xi}{\Omega}\right) = 1 - \exp(-\mu\xi) = F_{\Xi, neg \exp}(\xi | \mu) \quad (31)$$

На рис. 1 представлены связи между законами распределения.

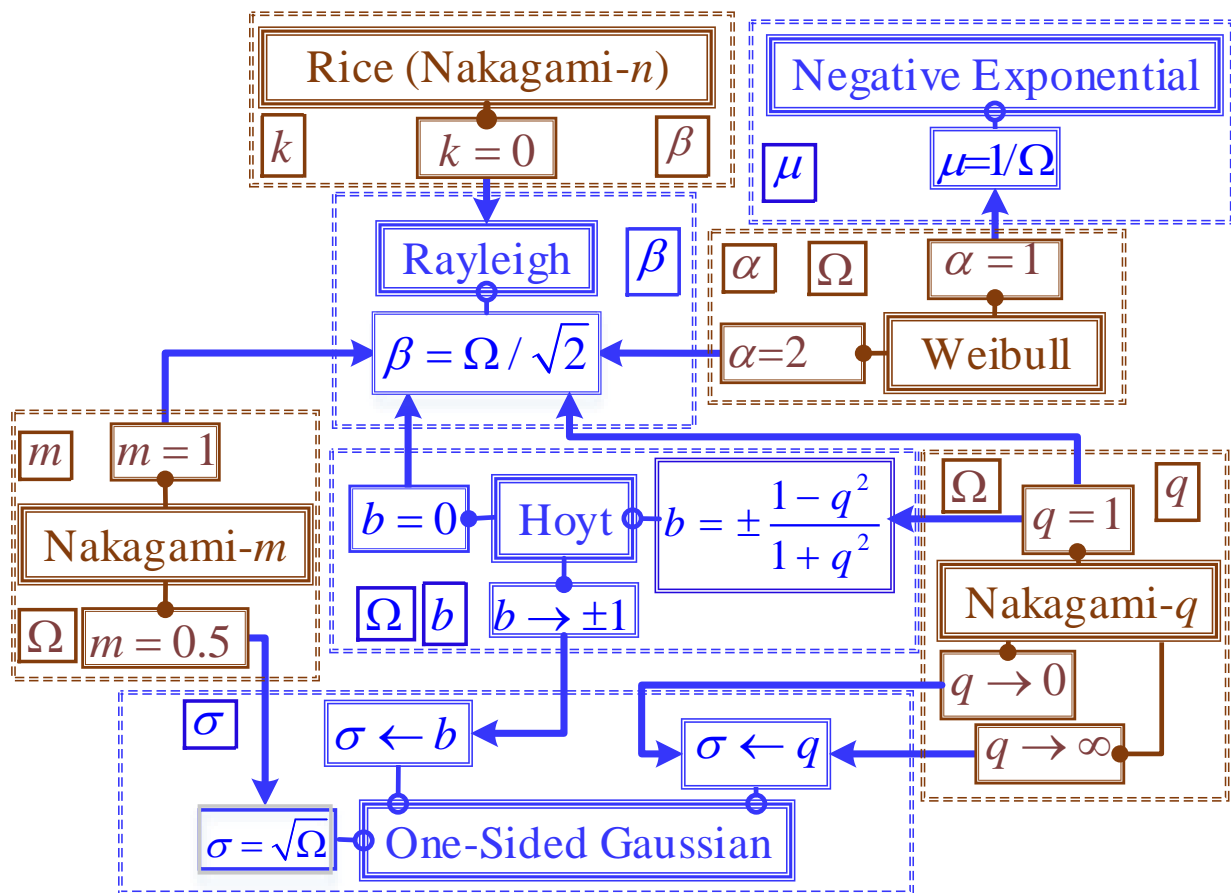


Рисунок 1 – Взаимосвязь между параметрами распределений

Заключение

Результаты, полученные в данной работе, показывают взаимосвязь между параметрами различных распределений, используемых для описания канала связи с мелкомасштабным федингом. Эти результаты будут использованы для разработки программных моделей для исследования работы когнитивных радиосетей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Спектральное восприятие сигналов когнитивного радио / В.А. Лесников, А.В. Частиков и др. / Под ред. А.В. Частикова и В.А. Лесникова. – Киров: О-краткое, 2016. – 272 с.*
2. *Стек протоколов когнитивных ad-hoc сетей / В.А. Лесников, С.В. Романов, А.В. Частиков, Д.В. Дубовцев // Научное обозрение. – 2013. – № 2. – С. 103-109.*
3. *Lesnikov V., Naumovich T., Chastikov A., Dubovcev D. Approximation of the central chi-squared distribution for on-line computation of the threshold for energy detector // Proceedings of 2016 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTs-2016. – Yerevan, Armenia. 14-17 Oct. 2016.*
4. *Lesnikov V., Naumovich T., Chastikov A. Computation of the energy detector threshold for various approximations of noise power distribution // Proceedings of 2017 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTs-2017. – Novi Sad, Serbia. 29 Sept.-2 Oct. 2017.*
5. *Аппроксимация центрального распределения хи-квадрат для оперативного расчета вероятности ложной тревоги энергетического обнаружителя / В.А. Лесников, А.В. Частиков, Т.В. Наумович, Д.В. Дубовцев // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2016. – № 1. – С. 230-235.*
6. *Marvin K.S., Alouini M.-S. Digital communication over fading channels : a unified approach to performance analysis (Wiley series in telecommunications and signal processing). – New York, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto: A Wiley-Interscience Publication. John Wiley & Sons, 2000. – 565 p.*
7. *Shankar P.M. Fading and shadowing in wireless systems. 2nd ed. – Springer International Publishing AG, 2017. – 827 p.*
8. *Forbes C., Evans M., Hastings N., Peacock B. Statistical Distributions. 4th ed. – Wiley, 2011. – 230 p.*
9. *Johnson N.L., Kotz S., Balakrishnan N. Continuous Univariate Distributions. Vol. 1, 2nd ed. – Wiley-Interscience, 1994. – 784 p.*
10. *Johnson N.L., Kotz S., Balakrishnan N. Continuous Univariate Distributions. Vol. 2, 2nd ed. – Wiley-Interscience, 1995. – 752 p.*