

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н. Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра системного анализа и автоматического управления

**ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ КОГНИТИВНОЙ
РАДИОСЕТИ**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 271 группы
направления 09.04.01 — Информатика и вычислительная техника
факультета КНиИТ
Веденеева Александра Александровича

Научный руководитель
доцент, к. ф.-м. н.

Е. П. Станкевич

Заведующий кафедрой
к. ф.-м. н., доцент

И. Е. Тананко

Саратов 2023

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. С развитием беспроводных технологий передачи данных становится трудно представить процесс технологических исследований, обмен информацией по всему миру и всю информационную сферу в целом. Однако, с ростом числа потребителей частотных диапазонов, необходимо организовывать гетерогенность в местах использования технологий. Это поможет разделять пользователей на сети доступа, при этом функциональное назначение может быть одинаковым, а методы кодирования, маршрутизации и авторизации - будут разные. Следовательно, развитие новых беспроводных технологий и создание новых протоколов пользования требует всё больше внимания с течением развития отрасли в целом. По мере популяризации беспроводной связи увеличивается спрос на радиочастотный спектр (РЧС), который в свою очередь является ограниченным ресурсом, а значит его использование должно быть рационально и эффективно.

В условиях изменчивости текущего рынка информационных услуг, существует необходимость адаптироваться под условия и реконфигурировать беспроводную сеть под новые требования. Применение технологий когнитивного радио является одним из путей преодоления дефицита частотных ресурсов, позволяет существенным образом повысить эффективность использования спектра с помощью механизма динамического управления спектром, согласно которому вторичным пользователям (не закрепленным за данным частотным диапазоном) предоставляется возможность использовать диапазоны первичных пользователей (закрепленных за данным диапазоном) на время, пока этот диапазон не используется первичным пользователем.

Устройства когнитивного радио (КР) изменяют свои параметры на основе получения информации об электромагнитной и географической обстановке, распознают образы сигналов всех первичных радиоэлектронных средств (РЭС) и используют частоты, когда первичные РЭС не работают. Они автоматически перенастраиваются на свободные диапазоны, поддерживая устойчивое соединение.

Таким образом, с развитием и популяризацией беспроводной передачи данных, необходимо динамически управлять РЧС, повышая эффективность его использования и сокращая время обслуживания конечных пользователей. Учитывая, что беспроводные сети являются масштабируемыми системами, то

рациональность и принцип использования РЧС является одной из важных задач по мере увеличения создаваемой системы.

Цель магистерской работы — изучить и исследовать математическую модель системы когнитивной радиосети.

В соответствии с поставленной целью определены **следующие задачи**:

- изучение математической модели системы когнитивной радиосети и методов ее анализа;
- разработка программы для анализа модели системы когнитивной радиосети;
- исследование зависимости стационарных характеристик от изменения различных параметров модели.

Методологические основы исследования модели системы когнитивной радиосети представлены в работах В. Драгиева, А. Белова, В. Лесникова, Э. Китчера, А. Присяжнюк, С. Присяжнюк [1-6].

Практическая значимость магистерской работы. В ходе выполнения выпускной квалификационной работы был разработан алгоритм метода анализа модели системы когнитивного радио и на его основе разработана программа для подсчета стационарных характеристик системы.

Структура и объем работы. Магистерской работа состоит из введения, 5 разделов, заключения, списка использованных источников и приложения. Общий объем работы — 58 страниц, из них 45 страниц — основное содержание, включая 10 рисунков и 1 таблицу, список использованных источников информации — 20 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первый раздел «Когнитивные радиосети» посвящен описанию основных понятий когнитивного радио и рассмотрению подходов для рационального использования радиочастотного спектра. В подразделе 1.1 рассматриваются различные существующие модели когнитивной радиосети. Подраздел 1.2 дает определение для когнитивного радио, определяет необходимый функционал и подчеркивает отличительные особенности. В подразделе 1.3 представлена классификация когнитивных радиосистем по различным критериям. Подраздел 1.4 содержит описание общей архитектуры когнитивной

радиосети. В подразделе 1.5 описан принцип функционирования когнитивной радиосистемы в виде модели и описание каждого шага процесса. Подраздел 1.6 содержит общую структуру ядра когнитивной радиосети. В подразделе 1.7 рассматривается программно-программируемое радио и главные особенности технологии. Подраздел 1.8 описывает рациональное и эффективное использование радиочастотного спектра, а так же задачи регулировки использования радиочастотного ресурса [7-10]. В подразделе 1.9 приводится описание доступа к динамическому спектру когнитивной радиосети. Подраздел 1.10 содержит информацию о качестве обслуживания в системах радиосвязи.

Второй раздел «Модель системы когнитивной радиосистемы с конечным числом вторичных пользователей» посвящен описанию модели массового обслуживания с одним обслуживающим прибором и орбитой, обслуживающий два типа клиентов и вывод формул для стационарного распределения состояний прибора.

В подразделе 2.1 приводится детальное описание модели системы массового обслуживания. Данная модель обслуживает два типа клиентов: первичные пользователи (PU), которые поступают как пуассоновский поток с интенсивностью λ_2 и конечное число N вторичных пользователей (SU). Каждый из SU приходит в систему с интенсивностью λ_1 и должен определить канал перед его использованием. Таким образом, предполагается, что перед обращением к прибору SU должен выйти на орбиту за экспоненциально распределенное время со средним значением $1/\mu$. По истечении этого времени, если прибор простаивает, его сразу же занимает SU, в противном случае SU снова выходит на орбиту и повторяет попытку обслуживания до тех пор, пока прибор не освободится. Обслуживание PU начинается без какого-либо простоя и ожидания прибора. Если прибор занят SU, этот SU вытесняется вновь прибывшим PU и отправляется на орбиту, откуда повторяет попытки обслуживания через то же экспоненциально распределенное время (со средним значением $1/\mu$), что и другие пользователи на орбите. В противном случае, если прибор занят PU, вновь поступивший PU будет потерян. Время обслуживания вторичного и основного пользователей соответствует двум различным произвольным распределениям с функциями распределения $B_i(x)$, функции оценки опасности $b_i(x) = B_i'(x)/(1 - B_i(x))$, преобразование

Лапласа-Стилтьеса $\beta_i(s)$ и математические ожидания $1/\nu_i$, $i = 1, 2$ соответственно. После обслуживания каждый SU переходит в свободное состояние и с интенсивность λ_1 может сгенерироваться новое требование.

В подразделе 2.2 приведены формулы для вычисления основных макрохарактеристик рассматриваемой системы обслуживания и теоремы для вычисления совместного распределения состояния сервера и размера орбиты.

Теорема 1. *Стационарное совместное распределение состояния прибора и размера орбиты может быть рассчитано по следующим формулам:*

$$p_{i,n}(x) = e^{-\delta_{i,1}\lambda_2 x} \times \sum_{k=N-n-\delta_{i,1}}^{N-\delta_{i,1}} (-1)^{k-(N-n-\delta_{i,1})} \binom{k}{N-n-\delta_{i,1}} \bar{q}_{i,k} (1 - B_i(x)) e^{-k\lambda_i x}, \quad (9)$$

$$p_{i,n} = \int_0^{\infty} p_{i,n}(x) dx =$$

$$\sum_{k=N-n-\delta_{i,1}}^{N-\delta_{i,1}} (-1)^{k-(N-n-\delta_{i,1})} \binom{k}{N-n-\delta_{i,1}} \bar{q}_{i,k} \frac{1 - \bar{\beta}_{i,k}}{k\lambda_i + \delta_{i,1}\lambda_2}, \quad (10)$$

$$i = 1, 2, n = 0, \dots, N - \delta_{i,1},$$

$$\begin{aligned} \left[(N-n)\lambda_1 + \lambda_2 + n\mu \right] p_{0,n} &= p_{0,n-1} (N-n+1)\lambda_1 + \\ & \sum_{k=N-n}^N (-1)^{k-(N-n)} \binom{k}{N-n} \bar{q}_{2,k} \bar{\beta}_{2,k} + \\ & (1 - \delta_{n,N}) \sum_{k=N-n-1}^{N-1} (-1)^{k-(N-n-1)} \binom{k}{N-n-1} \bar{q}_{1,k} \bar{\beta}_{1,k}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$n = 0, \dots, N, p_{0,-1} = 0, \text{ где}$$

$$\bar{\beta}_{i,k} = \beta_i(k\lambda_i + \delta_{i,1}\lambda_2), \frac{1 - \bar{\beta}_{2,k}}{k\lambda_2} = \frac{1}{\nu_2} \quad (12)$$

для $k = 0$.

Величины $\bar{q}_{1,k}$, $\bar{q}_{2,k}$ и $\bar{p}_{0,n}$ связаны линейными уравнениями

$$\left[N\lambda_1 + \lambda_2(1 - \bar{\beta}_{2,N}) \right] \bar{q}_{2,N} = \lambda_2 \bar{q}_{1,N-1} \bar{\beta}_{1,N-1}, \quad (13)$$

$$\sum_{k=N-n}^N (-1)^{k-(N-n)} \binom{k}{N-n} \bar{q}_{2,k} = \lambda_2 \sum_{k=N-n}^{N-1} (-1)^{k-(N-n)} \binom{k}{N-n} \left(\frac{1}{n\mu} + \frac{1 - \bar{\beta}_{1,k}}{k\lambda_1 + \lambda_2} \right) \bar{q}_{1,k}, \quad (14)$$

$n = 1, \dots, N$,

$$\bar{q}_{1,N-n-2} \bar{\beta}_{1,N-n-2} = \sum_{k=N-n-1}^N (-1)^{k-(N-n)} \binom{k}{N-n-1} \bar{q}_{2,k} \bar{\beta}_{2,k} -$$

$$p_{0,n}(N-n)\lambda_1 + \sum_{k=N-n-1}^{N-1} (-1)^{k-(N-n)} \left[\binom{k}{N-n-2} \bar{\beta}_{1,k} + \binom{k}{N-n-1} \frac{(N-n-1)\lambda_1 + \lambda_2}{(n+1)\mu} + 1 \right] \bar{q}_{1,k}, \quad (15)$$

для $n = 0, \dots, N-2$,

$$(\lambda_2 + N\mu) \sum_{k=0}^{N-1} (-1)^k \bar{q}_{1,k} = N\mu \left(p_{0,N-1}\lambda_1 + \sum_{k=0}^N (-1)^k \bar{q}_{2,k} \bar{\beta}_{2,k} \right), \quad (16)$$

для $n = N-1$.

- Распределение состояния сервера, $P_i, i=0, 1, 2$;
- Средний размер орбиты,

$$E[R] = \lim_{t \rightarrow \infty} E[R(t)] = E_0 + E_1 + E_2,$$

$$E_i = \sum_{n=0}^{N-\delta_{i,1}} np_{i,n}, \quad i = 0, 1, 2;$$

- Средняя скорость генерации SU ,

$$A = (N - E[R] - P_1)\lambda_1;$$

— Среднее время ожидания SU на орбите,

$$E[W] = A^{-1}E[R].$$

Третий раздел «Алгоритм метода анализа модели системы когнитивного радио» содержит описание алгоритма состоящего из 6 блоков, выполняемых последовательно.

Блок 1. Входные данные:

N – количество вторичных пользователей,

λ_1 – интенсивность поступления вторичных пользователей,

λ_2 – интенсивность поступления первичных пользователей,

$\frac{1}{\mu}$ – математическое ожидание длительности пребывания SU на орбите,

$1/\nu_1$ – математическое ожидание длительности обслуживания SU ,

$1/\nu_2$ – математическое ожидание длительности обслуживания PU .

Блок 2. Вычисляется преобразование Лапласа-Стилтьеса:

$$\beta_1(s) = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + s},$$

$$\beta_2(s) = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 + s}.$$

Блок 3. Вычисление $\bar{q}_{1,k}, \bar{q}_{2,k}$ по формулам

$$\bar{q}_{1,N-1} = \frac{[N\lambda_1 + \lambda_2(1 - \bar{\beta}_{2,N})]}{\lambda_2\bar{\beta}_{1,N-1}}\bar{q}_{2,N},$$

$$\begin{aligned} q_{2,N-n} = \lambda_2 \sum_{k=N-n}^{N-1} (-1)^{k-(N-n)} \binom{k}{N-n} \left(\frac{1}{n\mu} + \frac{1 - \bar{\beta}_{1,k}}{k\lambda_1 + \lambda_2} \right) \bar{q}_{1,k} - \\ \sum_{k=N-n+1}^N (-1)^{k-(N-n)} \binom{k}{N-n} \bar{q}_{2,k}, \end{aligned}$$

$$\bar{q}_{2,0} = \left(\frac{(\lambda_2 + N\mu) \sum_{k=0}^{N-1} (-1)^k \bar{q}_{1,k}}{N\mu} - p_{0,N-1} \lambda_1 - \sum_{k=1}^N (-1)^k \bar{q}_{2,k} \bar{\beta}_{2,k} \right) \frac{1}{\bar{\beta}_{2,0}},$$

где

$$p_{0,n} = (p_{0,n-1}(N-n+1)\lambda_1 + \sum_{k=N-n}^N (-1)^{k-(N-n)} \binom{k}{N-n} \bar{q}_{2,k} \bar{\beta}_{2,k} + (1 - \delta_{n,N}) \sum_{k=N-n-1}^{N-1} (-1)^{k-(N-n-1)} \binom{k}{N-n-1} \bar{q}_{1,k} \bar{\beta}_{1,k}) * \frac{1}{(N-n)\lambda_1 + \lambda_2 + n\mu}.$$

Блок 4. Вычисление совместного стационарного распределения вероятностей состояний прибора и размера орбиты по теореме 1.

Блок 5. Вычисление стационарных характеристик модели.

Распределение вероятностей состояния прибора:

$$P_i = \sum_{k=0}^N p_{i,k}, i = 0, 1, 2.$$

Средний размер орбиты:

$$E[R] = \lim_{t \rightarrow \infty} E[R(t)] = E_0 + E_1 + E_2,$$

$$E_i = \sum_{n=0}^{N-\delta_{i,1}} np_{i,n}, i = 0, 1, 2.$$

Средняя скорость генерации SU :

$$A = (N - E[R] - P_1)\lambda_1.$$

Среднее время ожидания SU на орбите:

$$E[W] = A^{-1}E[R].$$

Блок 6. Вывод результатов

На данном шаге происходит вывод стационарных характеристик системы, найденных в предыдущем блоке в рабочее окно программы.

Четвертый раздел «Описание программы» содержит информацию о разработанном приложении, затрагивая, как внутренние компоненты программы в виде переменных и методов, так и внешние в виде интерфейса и примера работы программы.

Подраздел 4.1 содержит информацию о написанном приложении, которое позволяет при указании параметров системы вычислить ее стационарные вероятности и характеристики, к которым относятся: распределение состояний прибора ($P_i, i = 0, 1, 2$), средний размер орбиты ($E[R]$), средняя скорость генерации SU (λ_1), среднее время ожидания SU на орбите ($E[W]$).

В подразделе 4.2 приведена таблица с переменными и методами, использующиеся в программе.

Подраздел 4.3 описывает начальную организацию работы с программой (рис. 1), а именно ввод параметров системы, к которым относятся: количество вторичных пользователей (N), интенсивность поступления вторичных пользователей (λ_1), длительности SU на орбите (μ), длительность обслуживания SU (ν_1), длительность обслуживания PU (ν_2).

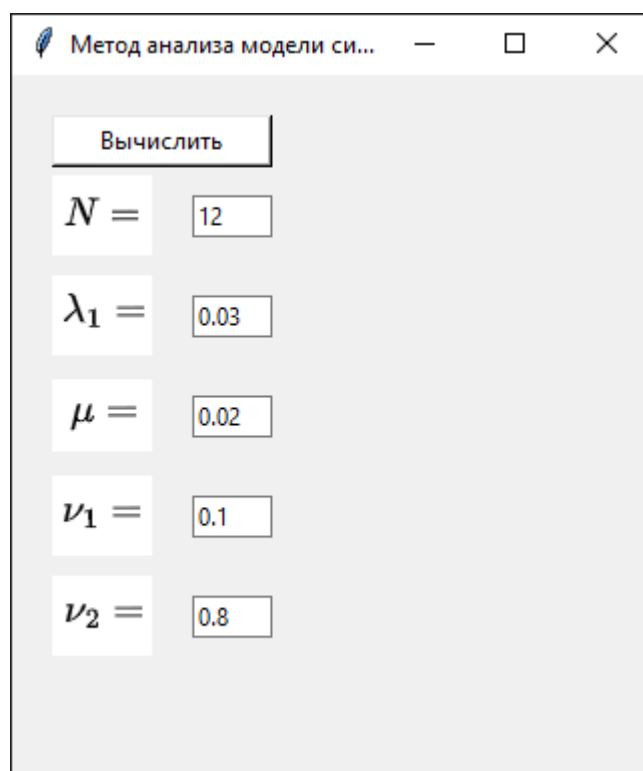


Рисунок 1 – Интерфейс программы

В подразделе 4.4 представлен результат работы программы, а так же описание функционала по обработке введения некорректных значений и масштабирования.

Пятый раздел «Результаты исследования одноприборной системы массового обслуживания с конечным числом вторичных пользователей» содержит информацию о двух экспериментах с различными

входными параметрами. Было проведено два эксперимента. Входные параметры первого эксперимента равны: $N=12$, $\lambda_1=0.03$, $\mu=0.02$, $\nu_1=0.1$, $\nu_2=0.8$. Второй эксперимент имел следующие параметры: $N=18$, $\lambda_1=0.06$, $\mu=0.04$, $\nu_1=0.3$, $\nu_2=0.9$. На рис. 2 и рис. 3 приведена зависимость основных макрохарактеристик производительности системы от интенсивности поступления РУ. Из рисунков видно, что с повышением входных параметров вид зависимости от параметров сохраняется. Максимальный размер орбиты во втором эксперименте увеличился на 203 процента по сравнению с первым. Интенсивность генерации вторичного пользователя уменьшается при увеличении интенсивности поступления первичных пользователей, так как новые пользователи будут генерироваться, как только вторичный пользователь обслужится на приборе. Вероятность простоя прибора снижается при увеличении интенсивности поступления первичных пользователей. Вероятность занятости прибора первичным пользователем повышается, если интенсивность их поступления постоянно увеличивается, так как вторичные пользователи идут на орбиту и занятость прибора вторичным пользователем будет снижаться.

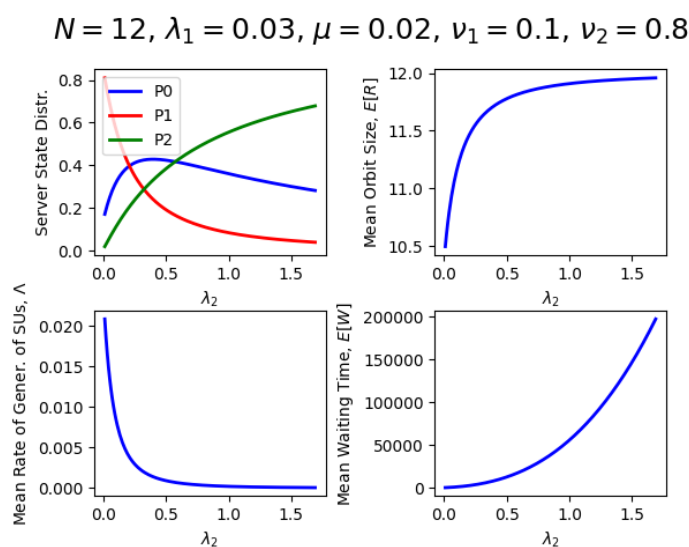


Рисунок 2 – Основные макрохарактеристики производительности в зависимости от интенсивности РУ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе была изучена математическая модель когнитивной радиосети. Был разработан алгоритм метода анализа модели системы когнитивного радио. На основании указанного алгоритма была разработана программа на

$$N = 18, \lambda_1 = 0.06, \mu = 0.04, \nu_1 = 0.3, \nu_2 = 0.9$$

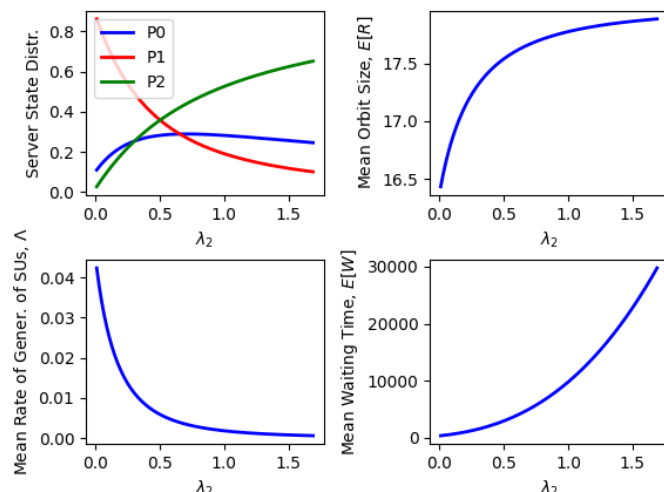


Рисунок 3 – Основные макрохарактеристики производительности в зависимости от интенсивности PU

языке *Python* с помощью интегрированной среды разработки Visual Studio. Программа обладает графическим интерфейсом, функцией построения и сохранения графиков, на основании входных параметров системы, для подсчета стационарных характеристик системы, а так же функцией при введении не корректных значений и их последующая реинициализация.

С использованием программы были проведены эксперименты и исследованы зависимости стационарных характеристик от изменения различных параметров системы. Данные изменения характеристик изучены, по ним сделаны соответствующие выводы.

Отдельные части магистерской работы докладывались на конференции:

Исследование модели системы когнитивной радиосети, Студенческая научная конференция факультета КНиИТ, Саратов, 4 мая 2023 г.

Основные источники информации:

1. Dragieva, V. Queueing Analysis of Cognitive Radio Networks with Finite Number of Secondary Users / V. Dragieva, T. Phung-Duc // Analytical and Stochastic Modelling Techniques and Applications, Springer Nature Switzerland AG - 2020. - P. 1-15.
2. Белов, А. В. Модель когнитивной радиосети на основе теории стохастического сетевого исчисления / А. В. Белов, В. А. Липатников, И. В. Федоров // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке

- и образовании : сборник научных статей: в 4х томах, Санкт-Петербург, 24–25 февраля 2021 года / Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. Том 1. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2021. – С. 86-90.
3. Лесников, В. А. Обобщенная системная модель обнаружения в подсистемах спектрального восприятия когнитивных радиосетей / В. А. Лесников, Т. В. Наумович, А. В. Частиков, Д. В. Дубовцев // Общество. Наука. Инновации (НПК-2017) : сборник статей. Всероссийская ежегодная научно-практическая конференция, Киров, 01–29 апреля 2017 года / Вятский государственный университет. – Киров: Вятский государственный университет, 2017. – С. 1461-1466.
 4. Китчер, Э. Методы и алгоритмы принятия решения для технологии "когнитивного радио". Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Э. Китчер. – Владимир, 2013. – С. 142.
 5. Присяжнюк, А. С. Модель управления когнитивной декаметровая радиосетью / А. С. Присяжнюк, С. П. Присяжнюк // Информация и космос. – 2018. – № 4. – С. 44-48.
 6. Лесников, В. А. Обобщенные модели фединга в когнитивных радиосетях / В. А. Лесников, Т. В. Наумович, А. В. Частиков, М. В. Кустенко // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2018. – № 4. – С. 112-118.
 7. Вишневецкий, В. П. Энциклопедия WiMax путь к 4G / В. Вишневецкий, С. Л. Портной, И. В. Шахнович // Москва: Техносфера. 2009. - С. 472.
 8. Бузов, А.Л. Управление радиочастотным спектром и электромагнитная совместимость радиосистем / А.Л. Бузов, М.А. Быховский, Н.В. Васеко, Ю.В. Волкова // Учебное пособие. ЭКОТRENДЗ. Москва. 2006. - С. 432.
 9. Барнс, Дж. Электронное конструирование: Методы борьбы с помехами / Дж. Барнс // Пер. с англ. под ред. Файзулаева. Б.Н. — М.: Мир. 1990. - С. 238.
 10. Бутенко, В. В. Техническая политика в области радиосвязи и вещания / В. В. Бутенко // «Электросвязь», - 2009. - С. 13-15.