

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
ВСЕРОССИЙСКАЯ ГРУППА ТЕОРИИ ИНФОРМАЦИИ ИЕЕЕ  
АКАДЕМИЯ ИНФОРМАТИЗАЦИИ ОБРАЗОВАНИЯ  
ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ООО «ОТКРЫТЫЕ РЕШЕНИЯ»  
ОБЩЕСТВО «ЗНАНИЕ» РОССИИ  
ПРИВОЛЖСКИЙ ДОМ ЗНАНИЙ

*XXII Международная  
научно-техническая конференция*

**ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАТИКИ  
В ОБРАЗОВАНИИ, УПРАВЛЕНИИ,  
ЭКОНОМИКЕ И ТЕХНИКЕ**

*Сборник статей*

*Декабрь 2022 г.*

Пенза

УДК 004  
ББК 32.81я43+74.263.2+65.050.2я43  
П781

П781 **ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАТИКИ В ОБРАЗОВАНИИ,  
УПРАВЛЕНИИ, ЭКОНОМИКЕ И ТЕХНИКЕ :**  
сборник статей XXII Международной научно-технической  
конференции. – Пенза: Приволжский Дом знаний, 2022. – 356 с.

ISBN 978-5-8356-1800-2  
ISSN 2311-0406

**Под редакцией *В.И. Горбаченко***, доктора технических наук,  
профессора;  
***В.В. Дрождина***, кандидата технических наук,  
профессора

Информация об опубликованных статьях предоставлена в систему Рос-  
сийского индекса научного цитирования (РИНЦ) по договору  
№ 573-03/2014К от 18.03.2014.

ISBN 978-5-8356-1800-2  
ISSN 2311-0406

© Пензенский государственный  
университет, 2022  
© АННМО «Приволжский Дом знаний», 2022

*XXII International  
scientific and technical conference*

**PROBLEMS OF INFORMATICS  
IN EDUCATION, MANAGEMENT,  
ECONOMICS AND TECHNICS**

*December, 2022*

Penza

### Библиографический список

1. Башмаков А.И., Башмаков И.А. Разработка компьютерных учебников и обучающих систем. – М.: Информационно-издательский дом «Филинь», 2003. – 616 с.

2. Лебедев В.В., Неведомский А.Н. Повышения качества образования путём разработки современного лабораторного комплекса // Сборник статей XV Международной научной конференции «Прикладные и фундаментальные исследования» (30 апреля, 2018, Сент-Луис, Миссури, США): сб. науч. ст. – Сент-Луис, Миссури, США, 2018. – С. 58-60.

3. Лебедев В.В. Виртуальные лабораторные работы как метод повышения качества образования в высшей школе // Сборник материалов докладов заочной научно-практической конференции «Актуальные проблемы качества образования в высшей школе». Ч. 1. – Тверь, 2017. – С. 68-72.

**Тихонов Александр Дмитриевич**  
**Лебедев Владимир Владимирович**  
**Чернышев Олег Леонидович**  
Тверской государственный  
технический университет,  
г. Тверь, Россия

**Tihonov A. D.**  
**Lebedev V. V.**  
**Chernishev O. L.**  
Tver State Technical University,  
Tver, Russia

---

УДК 621.396.74

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ РАДИОКАНАЛА СИСТЕМ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ 4G И 5G**

Ю. В. Редькин, А. А. Тюфанова

## **PREDICTION OF THE RADIO CHANNEL STATE OF 4G AND 5G MOBILE COMMUNICATION SYSTEMS**

Yu. V. Redkin, A. A. Tyufanova

**Аннотация.** Новые мобильные сети 4G и 5G имеют адаптивные схемы передачи к контенту и условиям передачи. Однако, вследствие задержек обратной связи и временных затрат на обработку данных, полученные оценки условий передачи быстро теряют актуальность. Одним из решений данной проблемы является использование фильтра Калмана, позволяющего

прогнозировать состояние канала передачи. Рассмотрены применение этого фильтра, его достоинства и недостатки в реальных условиях передачи.

**Ключевые слова:** мобильная связь, телекоммуникационная система, фильтр Калмана, прогнозирование состояния.

**Abstract.** New 4G and 5G mobile networks feature adaptive transmission schemes to content and transmission conditions. However, due to feedback delays and time spent on data processing, the resulting estimates of transmission conditions quickly lose their relevance. One solution to this problem is to use a Kalman filter to predict the transmission channel state. The application of this filter, its advantages and disadvantages in real transmission conditions are considered.

**Key words:** mobile communication, telecommunication system, Kalman filter, state prediction.

В связи с ростом объемов потребляемого трафика в современных системах сотовой мобильной связи 4G (4th Generation) и 5G (5th Generation) актуальным является обеспечение их пропускной способности. С этой целью обслуживание абонентских станций (АС), подключенных к базовой станции (БС), осуществляется с использованием специальных алгоритмов управления ее радиоресурсов, называемых стратегиями. Стратегии призваны обеспечивать требуемое качество обслуживания при высоких скоростях передачи данных в условиях мобильности АС и изменяющихся условий окружающей среды. Для этого используется технология адаптивной подстройки схем модуляции и кодирования БС на основе индикаторов состояния радиоканала, получаемых от АС по линии обратной связи. Схема взаимодействия БС и АС для распределения имеющихся ресурсов представлена на рис. 1 [1].



Рис. 1. Схема взаимодействия БС и АС для распределения радиоресурсов

Для формирования индикаторов состояния радиоканала БС отправляет АС пилотные сигналы CSI (Channel State Information). Набор CSI включает в себя индикаторы качества радиоканала (Channel Quality Indicator, CQI), пилотных сигналов состояния радиоканала (Channel state information reference signal Resource Indicator, CRI) и другие пилотные сигналы. АС оценивает принятые пилотные сигналы и формирует индикаторы состояния радиоканала.

БС, после получения индикаторов по обратной связи информирует АС об итоговом выборе схемы модуляции и кодирования и варианта применения технологии MIMO (Multiple-Input-Multiple-Output) посредством управляющей информации нисходящего направления (Downlink Control Information, DCI) и производит передачу пакетов данных с учетом выбранной схемы модуляции и кодирования [1, 2].

По итогам оценки пилотных сигналов АС формирует индикатор CQI таким образом, чтобы позволить БС учитывать соотношение «сигнал/шум» при выборе схемы модуляции и кодирования для передачи пакетов данных. Однако, вследствие задержек обратной связи, затрат времени на обработку сигнала и переключение трактов передачи, индикаторы, полученные на стороне БС быстро теряют актуальность в условиях влияния быстрых замираний. Этот эффект называется CSI-Ageing или CSI-Outdating [3].

Для борьбы с ним используется ряд методов прогнозирования значений индикаторов CSI для будущих моментов времени. Из них наиболее эффективными считаются модификации метода наименьших квадратов, фильтра Калмана, а также методы, использующие искусственные нейронные сети [4].

При передаче пакетов данных по радиоканалу сигнал, принимаемый станцией, представляет собой сочетание радиоволн, отраженных, подвергнутых дифракции и рассеянию от разнообразных препятствий вдоль их трассы распространения. Кроме того, радиоканал обычно используется несколькими АС. Поэтому на входе приемника станции будет наблюдаться смесь прямых, отраженных и рассеянных сигналов, переданных от разных источников и принятых с разных направлений с разными путям распространения. Таким образом, реальный сигнал на входе приемника станции зависит от числа передающих в данный момент АС и меняющихся условий прохождения и переотражения радиосигналов от них и представляет собой сумму большого числа независимых случайных величин [5]. Когда отсутствует прямой луч (доминанта), можно предположить, что согласно центральной предельной теореме теории вероятностей сигнал на входе приемника будет представлять собой

Гауссовскую случайную величину. В этом случае оптимальным является прогнозирование состояния радиоканала с помощью методов, основанных на использовании фильтра Калмана или его модификаций, например, с помощью метода КЕМ.

Фильтр Калмана представляет собой эффективный рекурсивный фильтр, оценивающий вектор состояния динамической системы на основе неполных и зашумленных измерений. Фильтр Калмана позволяет сделать обоснованное предположение о том, что непрерывно изменяющаяся система будет делать дальше. Ему не нужно хранить историю, кроме предыдущего состояния, и он не требует значительных вычислительных ресурсов, благодаря чему хорошо подходит для решения задач реального времени и встраиваемых систем.

Применительно к радиоканалу систем мобильной связи метод прогнозирования состояния радиоканала с применением фильтра Калмана включает в себя два этапа: на первом выполняется прогноз измерений на основе модели, а на втором – обновления состояния фильтра в соответствии с результатами текущего измерения [3].

Современной модификацией метода прогнозирования состояния радиоканала является использование фильтра Калмана совместно с алгоритмом EM (Expectation Maximization) (рис. 2). Алгоритм EM используется в математической статистике для нахождения оценок максимального правдоподобия параметров вероятностных моделей, зависящих от скрытых переменных. В методе КЕМ (Kalman filter with Expectation-Maximization) такими переменными являются параметры фильтра Калмана, начальная оценка которых, полученная на основе пилотных символов, итеративно обновляется на основе обработки алгоритмом EM результатов, полученных в предшествующий момент времени. За счет этого минимизируется несоответствие между моделью фильтра Калмана и реальным состоянием радиоканала с замираниями [6].

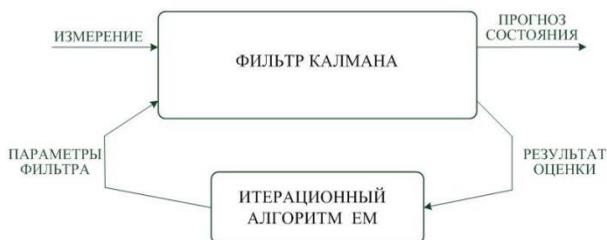


Рис. 2. Принцип работы метода КЕМ

При прогнозировании состояния радиоканала с помощью метода КЕМ после проведения инициализации параметров фильтра Калмана оценка максимального правдоподобия выполняется в два этапа: на первом этапе вычисляется ожидаемое значение функции правдоподобия, а на втором выполняется оценка. При этом прогноз, как и в базовом методе, выполняется с применением фильтра Калмана, параметризованного с помощью алгоритма ЕМ. Отметим, что сходимость метода КЕМ достигается за количество итераций не меньше 5 при значении «сигнал/шум» не меньше 10 дБ [4].

В заключение следует отметить, что рассмотренный подход прогнозирования состояния радиоканала с помощью фильтров типа Калмана успешно работает, когда система линейна, а шум на входе приемника не коррелирован и имеет Гауссовское (нормальное) распределение. Это является существенным недостатком методов на использовании фильтра Калмана, поскольку снижает их производительность в условиях реальной окружающей среды. Для устранения указанного недостатка необходимо использовать более гибкие прогнозирующие структуры, например, на основе искусственных нейронных сетей.

#### Библиографический список

1. Dahlman E., Parkvall S, Skold J. 4G, LTE-Advanced Pro and the Road to 5G. 3rd edition. // John Wiley & Sons Limited, 2016. – 616 p.
2. Huang H., Papadias C.B., Venkatesan S. MIMO Communications for Cellular Networks. – USA, Springer Science + Busyness Media LLC, 2012. – 314 p.
3. Aronsson, D. Channel Estimation and Prediction for MIMO OFDM Systems: Key Design and Performance Aspects of Kalman-based Algorithms. PhD Thesis / D. Aronsson // Uppsala University, Sweden. – 2011. – 245 p.
4. Константинов, А. С. Исследование эффективности нового метода прогнозирования состояния радиоканала 4G и 5G / А. С. Константинов, А. В. Пестряков // Электросвязь. – 2020. – № 6. – С. 18-23.
5. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю. Технологии в системах радиосвязи на пути к 5G. – М.: Горячая линия – Телеком, 2020. – 280 с.
6. Konstantinov A.S., Pestryakov A.V. Analysis of the Transmission Modes and Downlink Control Information in the LTE-Advanced/5G Network // Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow. – 2019. – P. 1-4.

**Редькин**

**Юрий Викторович**

Государственный морской  
университет им. адмирала  
Ф.Ф.Ушакова,

г. Новороссийск, Россия

**Тюфанова**

**Анастасия Александровна**

Государственный морской  
университет им. адмирала  
Ф.Ф.Ушакова,

г. Новороссийск, Россия

**Redkin Yu.V.**

Admiral Ushakov Maritime  
State University,  
Novorossiysk, Russia

**Tyufanova A.A.**

Admiral Ushakov Maritime  
State University,  
Novorossiysk, Russia