

В. М. Чертков*

кандидат технических наук, заведующий кафедрой технологий программирования

Е. Р. Адамовский*

аспирант кафедры вычислительных систем и сетей

Р. П. Богуш*

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой вычислительных систем и сетей

*Полоцкий государственный университет

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ КАРТЫ РАДИОСРЕДЫ ДЛЯ КОГНИТИВНОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ НА БАЗЕ LTE

В работе рассмотрены методы формирования карты радиосреды, которая представляет собой пространственно-временную базу данных всех активностей пользователей в сети и позволяет выявлять доступные частоты для использования вторичными пользователями в заданное время. Представлена оценка качества формирования карты радиосреды с большим разрешением с применением интерполяционных методов.

Ключевые слова: когнитивное радио, динамический доступ к спектру, системы сотовой связи, кригинг.

Стремительное развитие и внедрение телекоммуникационных систем приводит к возникновению проблемы нехватки частотного ресурса из-за неэффективного и не всегда рационального его использования [1]. Следует отметить, что практически все системы связи в конкретный момент времени не задействуют полностью выделенный им диапазон частот, поскольку проектирование таких систем осуществляется с определенным запасом пропускной способности. Таким образом, часть времени отдельные фрагменты лицензированного спектра никем не используются. Следовательно, использование уже занятых частотных диапазонов, но свободных в конкретный момент времени, т.е. применение технологии динамического доступа к радиочастотному спектру, является актуальной задачей развития современных систем связи [2, 3, 4].

Практическая реализация динамического доступа к радиочастотному спектру основывается на концепции когнитивного радио (КР) [5]. Основная задача КР заключается в обнаружении «белых пятен» в радиочастотном спектре, которые используются для передачи данных [6]. Для принятия решения о наличии свободного частотного ресурса в данный момент КР использует карту радиосреды (REM), представляющей актуальную карту всех радиоактивностей в сети [7].

Несмотря на то, что карта радиосреды может иметь различные реализации в зависимости от особенностей задействованных систем связи, основные принципы построения REM и ее структуру возможно свести к общим базовым компонентам: модуль хранения и сбора данных, менеджер REM и измерительные устройства [1]. Модуль хранения и сбора данных обменивается данными по интересам связи с измерительными устройствами. Этот модуль собирает исходные данные, а также выполняет их обработку и осуществляет формирование различных слоев REM. Менеджер REM представляет собой интеллектуальный модуль, который отвечает за коммуникацию с другими объектами REM.

В зависимости от типа используемых измерительных устройств построение REM реализуется тремя основными методами [1, 4]. Прямой метод использует пространственную статистику. При этом выполняется одновременное сканирование спектра из разных положений в пространстве и на основе полученных данных оценивается значение для произвольной точки с помощью интерполяции. Косвенный метод реализуется на основе информации о местоположении передатчиков. Следовательно, на первом шаге выполняется оценка местоположения передатчиков и их параметров, а затем определяется уровень сигнала в заданной области на основе построенной модели его распространения. Гибридный метод формирования REM сочетает в себе подходы прямого и косвенного. Как правило, вначале создается предварительная карта радиосреды с помощью численного моделирования распространения сигналов, которое на последующих этапах корректируется в соответствии с имеющимися измерениями с помощью интерполяции.

Выбор наиболее подходящего метода формирования REM зависит от специфики решаемой задачи с использованием REM. Применение косвенного метода требует набора входных данных о местоположении передатчиков, мощности передачи и информацию об его активности. Этот метод в основном применяют для прогнозирования дальности связи беспроводных систем или для распределения частотного ресурса для конкретных сценариев прогнозируемой передачи данных. С помощью косвенного метода можно получить более точную REM, но требуется большой объем вычислений. Прямой метод применяется для систем контроля за использованием спектра и занятости частотного ресурса. По сравнению с косвенным методом обладает умеренными вычислительными затратами, но требует большого числа приемных устройств. Гибридный метод сочетает в себе прямой и косвенный методы с целью достижения более высокой точности REM. Этот метод использует результаты измерений приемников, развернутых в реальной среде, а также результаты расчетов на основе модели распространения радиосигналов. Основная идея метода заключается в использовании небольшого количества датчиков, обеспечивающих корректную работу модели распространения радиосигналов. С помощью которой определяют уровни сигналов в недостающих точках пространственных координат для использования методов интерполяции и формирования REM с большим разрешением.

Таким образом, все рассмотренные подходы с целью уменьшения вычислительных затрат применяют интерполяцию по полученным данным измерений радиосигнала для формирования REM с большим разрешением. В качестве методов интерполяции могут переменяться следующие: обратных взвешенных расстояний (IDW), ближайшие соседи (NN), сплайн интерполяция (spline), метод градиента плюс обратный квадрат расстояния (GIDS) и кригинг (kriging).

Для анализа методов формирования и оценки качества REM когнитивной системы связи на базе LTE использовалась имитационная модель, задача которой заключалась в формировании выходных данных, содержащих информацию о динамике занятости частотного ресурса в виде карты REM. Показатели качества сформированной REM количественно оценивались по среднеквадратической ошибке (RMSE), вычисляемой в каждой точке сетки, как разность значений мощности всего сигнала или опорных символов между рассчитанными и истинными уровнями карты REM. Проведено множество серий тестов, в которых количество базовых станций LTE и количество абонентских устройств было одинаковым. Отличия заключались в расположении абонентских устройств и сценариев их активности по передачи данных.

Результаты экспериментов позволили определить основные достоинства и недостатки применяемых методов интерполяции для формирования REM с большим разрешением для когнитивной системы связи на базе LTE (табл. 1).

Таблица 1

Достоинства и недостатки применяемых методов интерполяции для формирования REM с большим разрешением для когнитивной системы связи на базе LTE

| Наименование метода интерполяции | Достоинства | Недостатки |
|----------------------------------|--|--|
| IDW | Относительно высокое быстродействие | Чувствителен к ошибочным измерениям; проблемы с неравномерно распределенными измерениями; заранее не найти лучшего значения весового коэффициента |
| NN | Высокое быстродействие | Заполнение небольшого количества пропущенных значений сигнала; делает резкие переходы между зонами карты радиосреды |
| Spline | Хорошо подходит для сглаживания выбросов измерений; хорошая экстраполяция за пределы установленных значений измерений | Чувствителен к ошибочным измерениям; не работает, когда последовательности с резкими перепадами измерений сигналов |
| GIDS | Может учитывать градиенты уровня сигнала и высоты местности | Требуется указывать окрестности интерполированной локализации; может не учитывать значимые измерения при малой окрестности локализации; – вносит шум, при больших окрестностях локализации |
| Kriging | Умеренное быстродействие; минимизирует общую дисперсию оценки; лучшие результаты среди прямых методов; высокая точность при большом количестве измерений | Большие вычислительные затраты; для максимальной производительности требуется предварительная конфигурация |

Проведенная оценка качества формирования REM с большим разрешением представлена в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение интерполяционных методов для формирования REM

| Номер теста | Значение RMSE для каждого метода интерполяции | | |
|-------------|---|-------|------|
| | Kriging | NN | IDW |
| Тест 1 | 6,29 | 8,50 | 8,63 |
| Тест 2 | 7,83 | 10,26 | 9,17 |
| Тест 3 | 6,72 | 8,60 | 8,48 |
| Тест 4 | 8,02 | 9,24 | 8,81 |
| Тест 5 | 6,50 | 8,21 | 6,64 |
| Итого | 7,07 | 8,96 | 8,34 |

Полученные результаты оценки качества при формировании REM для систем на базе LTE соотносятся с результатами, представленными в работах [1, 4, 8] для систем связи, использующих другие технологии. Для данной задачи гибридный метод является предпочтительным для формирования REM, а для этапа интерполяции наилучшие результаты продемонстрировал метод кригинга, так как имеет умеренную вычислительную сложность и самое низкое значение среднеквадратичной ошибки.

Библиографический список

1. Radio Environment Maps: The Survey of Construction Method / M. Pesko [et al.] // KSII Transactions on Internet and Information Systems. 2014. № 8(11). P. 3789-3809.
2. Косичкина Т. П., Иванов Г. Н., Евдокимов В. О. Исследование моделей помех в системах когнитивного радио // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2018. Т. 18. № 4. С. 965–970.
3. Dwarakanath R., Naranjo J., Ravanshid A. Modeling of Interference Maps for Licensed Shared Access in LTE-Advanced Networks Supporting Carrier Aggregation // IEEE IFIP Wireless Days. Valencia. 2013.
4. Alfattani S., Yongacoglu A. Indirect Methods for Constructing Radio Environment Map // IEEE Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering (CCECE). Quebec. 2018.
5. Мирошникова Н. Е. Обзор систем когнитивного радио // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2013. Т. 7. № 9. С. 108–111.
6. Beibei W., Ray Liu K. J. Advances in Cognitive Radio Networks: A Survey // IEEE Journal of selected topics in signal processing. 2011. V. 5, № 1. P. 5–23.
7. Каретников И. С. Построение карты радиосреды с применением алгоритма кригинга // Цифровая обработка сигналов и ее применение DSPA. Москва. 2020. С. 223–227.
8. Yilmaz H. B., Tugcu T. Location estimation-based radio environment map construction in fading channels // Wireless Communications and Mobile Computing. 2015. V. 15. P. 561–570.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ



МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И МОДЕЛИ
В ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ – 2021

Международный форум
10–11 ноября 2021 г.

Сборник докладов

УДК 519.7
ББК 22.18
М34

М34 Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве – 2021:
Междунар. форум (СПб., 10–11 ноября 2021 г.): сб. докл. – СПб.: ГУАП, 2021. – 328 с.
ISBN 978-5-8088-1682-4

В сборнике представлены доклады участников Международного форума «Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве – 2021», проведенного в Санкт-Петербургском государственном университете аэрокосмического приборостроения как сателлитное мероприятие XXIX Международного конгресса математиков (Санкт-Петербург, июль 2022 г.). Представленные работы отражают все многообразие существующих математических методов и моделей и их актуальность.

Предназначен для научных работников, аспирантов, докторантов и студентов образовательных организаций высшего образования, научно-исследовательских институтов и высокотехнологичных предприятий.

Оргкомитет форума

Председатель оргкомитета:

Ю. А. Антохина – доктор экономических наук, профессор, ректор ГУАП

Сопредседатель оргкомитета:

Е. А. Фролова – доктор технических наук, доцент

Заместитель председателя оргкомитета:

А. О. Смирнов – доктор физико-математических наук, доцент

Члены оргкомитета:

А. А. Оводенко – доктор технических наук, профессор (г. Санкт-Петербург)

В. Герджиков – доктор физико-математических наук, профессор (г. София, Болгария)

С. Г. Ехилевский – доктор технических наук (г. Новополоцк, Республика Беларусь)

О. В. Голубева – кандидат физико-математических наук (г. Новополоцк, Республика Беларусь)

В. Г. Фарафонов – доктор физико-математических наук, профессор (г. Санкт-Петербург)

А. В. Копыльцов – доктор технических наук, профессор (г. Санкт-Петербург)

УДК 519.7
ББК 22.18

ISBN 978-5-8088-1682-4

© Санкт-Петербургский государственный
университет аэрокосмического
приборостроения, 2021