

Навигация в городе по стационарным источникам радиоизлучения

Е. Старовойтов, к. т. н.¹, Е. Скиба²

УДК 621.37 | ВАК 2.2.11

Оцениваются возможности обнаружения в городе источников радиоизлучения с постоянными координатами радиосканером, разрабатываемым АО «НИИМА «Прогресс» и предназначенным для навигации беспилотных транспортных средств при отсутствии информации от других датчиков.

Использование глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) ограничено условиями приема сигналов навигационных спутников и становится невозможным в отсутствие их видимости. Спутниковые группировки типа Starlink, находящиеся на низкой околоземной орбите, в настоящее время не являются полноценной альтернативой ГНСС по следующим причинам [1]:

- спутники данного типа («низколетящие» на техническом жаргоне) не всегда передают свои эфемериды;
- большая величина ошибки синхронизации между спутниками, которая не передается потребителю;
- нестандартный формат сигнала, требующий использования специального навигационного приемника.

Используя отечественную электронную компонентную базу, АО «НИИМА «Прогресс» разрабатывает комплексированную навигационную систему услуг навигации («КОНСУЛ»), которая должна стать основой программно-аппаратной платформы системы интеллектуальной навигации, позволяющей определять координаты потребителя в плотной городской застройке, складках местности и при наличии источников помех. В систему «КОНСУЛ» также входит локальная система навигации (ЛСН), предназначенная для формирования в заданном районе радионавигационного поля, создаваемого наземными опорными станциями [2].

В силу физических ограничений распространения радиосигнала, для ЛСН остается актуальной проблема устойчивого приема потребителем, находящимся в плотной городской застройке. Эта проблема особенно актуальна для подвижных объектов, особенно для беспилотных транспортных средств (БТС). Ее решением является

комплексирование абонентского терминала ЛСН с чувствительными датчиками разных типов.

Применение в городе радиоизлучающих систем, осуществляющих зондирование окружающей среды, ограничено требованиями безопасности для населения и электромагнитной совместимости с находящимися поблизости техническими средствами. В то же время городская среда является очень неоднородной в различных диапазонах радиоизлучения, что позволяет использовать ее для навигации.

Источники радиоизлучения, излучающие на частотах гражданских средств связи и телекоммуникационных сетей, формируют характерное поле – так называемую «радиомаску» города. Обнаружение и слежение за этими источниками радиоизлучения выполняет сканирующий радиоприемник (радиосканер), комплексирование которого со средствами обработки данных, а также инерциальными и оптическими датчиками, может быть использовано для непрерывной навигации движущегося БТС.

Цель данной работы – оценка возможностей радиосканера по обнаружению источников радиоизлучения с постоянными координатами для навигации БТС в условиях города при отсутствии информации от других датчиков.

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ В ГОРОДЕ

Электромагнитная обстановка (ЭМО) в городе создается большим числом источников радиоизлучения, используемых для связи, радио- и телевизионного вещания, передачи информации и др. Характерным для городской среды является плотное заполнение частотных диапазонов, большое число используемых каналов, наличие передающих антенн на специальных вышках, крышах зданий и элементах транспортной инфраструктуры. Диапазоны рабочих частот основных источников радиоизлучения, используемых в городе, перечислены в табл. 1.

¹ АО «НИИМА «Прогресс», заместитель начальника отдела разработки смешанных СВЧ-модулей.

² АО «НИИМА «Прогресс», начальник отдела главного конструктора.

Кроме источников радиоизлучения, весомый вклад в ЭМО вносят низкочастотные поля, создаваемые линиями электропередачи, транспортом и бытовой техникой.

Традиционно исследования ЭМО в городе выполнялись с точки зрения защиты населения от радиоизлучения [3–5] и обеспечения электромагнитной совместимости совместно функционирующих радиоэлектронных средств [6–8].

В настоящее время в городах имеется тенденция к еще большему росту числа источников радиоизлучения и более плотному заполнению частотной сетки с дальнейшим увеличением мощности радиопередающих устройств. Результаты исследований показывают, что в ЭМО городской среды значительный вклад вносят базовые станции (БС) сотовой связи, излучающие в диапазоне частот 900–2600 МГц.

Для надежной навигации потребуется предварительная разработка актуальной и периодически обновляемой модели «радиомаски» города, в котором планируется эксплуатация комплексированной с радиосканером системы интеллектуальной навигации. Создание такой модели не должно потребовать чрезмерных ресурсов.

При этом необходимо принимать во внимание изменчивость ЭМО во времени: в зависимости от времени суток меняется активность БС, нагрузка на электросети и т. д.

Таблица 1. Диапазоны частот основных источников радиоизлучения в городе

| Диапазон частот | Примечания | Ширина канала | Мощность передатчика |
|-----------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| 725–770 МГц | 4G | 40 МГц | 5–20 Вт |
| 790–830 МГц | | | |
| 850–894 МГц | 3G, 4G | 10 МГц 40 МГц | 5–20 Вт |
| 890–915 МГц | GSM900 | 200 кГц | 300 Вт |
| 935–960 МГц | | | |
| 1,71–1,88 ГГц | GSM1800 | 200 кГц | 30 Вт |
| 2,11–2,17 ГГц | 3G | 10 МГц | 5–20 Вт |
| 2,4–2,5 ГГц | WiFi, Bluetooth | 20/40 МГц 1 МГц | 100 мВт |
| 2,5–2,7 ГГц | 4G | 40 МГц | 5–20 Вт |
| 4,9–5,5 ГГц | WiFi | 22 МГц | 100 мВт |
| 5,5–6,1 ГГц | | | |

Прямые измерения уровней электромагнитных полей являются трудоемкими и представляют собой технически сложную задачу. Расчет и моделирование ЭМО с использованием ЭВМ требует учета рельефа городской застройки, влияния метеоусловий, фактических параметров источников радиоизлучения.

Обнаружение и слежение за источниками радиоизлучения в городе имеет следующие особенности [9]:

- многолучевое распространение радиосигнала;
- отсутствие прямой видимости на трассе распространения радиосигнала;
- при движении радиосканера наблюдается изменяющаяся интерференционная картина;
- рост количества интерференционных искажений с увеличением частоты радиосигнала.

При этом частота чередования минимумов и максимумов в наблюдаемой интерференционной картине пропорциональна скорости движения радиосканера, а их амплитуда зависит от рельефа и характеристик объектов, находящихся на трассе распространения радиосигнала.

Принимая во внимание неоднородность и изменчивость ЭМО в городе, для навигации целесообразно использовать стационарные источники радиоизлучения с заранее определенным диапазоном изменения мощности передающих устройств.

Этим критериям наиболее полно удовлетворяют БС сотовой связи, излучающие радиосигналы стандартов GSM/LTE. В используемых ими частотных диапазонах наблюдается низкий уровень промышленных помех, а плотность размещения БС в городских агломерациях достаточно высокая.

ИСПЫТАНИЕ МАКЕТА РАДИОСКАНЕРА

Реализация радиосканера предполагается на базе технологии программно-определяемых радиосистем (Software-Defined Radio – SDR), упрощающей цифровую обработку принятых сигналов, а также позволяющей создавать компактные многоканальные радиоприемные устройства на кристалле, имеющие постоянную аппаратную конфигурацию, высокую скорость перестройки частоты, простую и недорогую конструкцию.

Для оценки возможностей в лабораторных условиях были проведены эксперименты по приему тестовых радиосигналов GSM/LTE макетным образцом радиосканера, выполненным на базе устройства USRP B210 (Ettus Research, США).

Плата USRP B210 включает в себя микросхему приемопередатчика с непрерывным частотным диапазоном от 70 МГц до 6 ГГц с полосой 56 МГц, ПЛИС Xilinx Spartan 6, интегрированный радиотракт, интерфейс скоростного подключения USB 3.0 и систему синхронизации. Используется по два канала приема и передачи, питание осуществляется от внешнего источника. USRP B210 является



Рис. 1. Макет радиосканера

компактной и недорогой аппаратной платформой для работы с радиосигналами, используемыми в гражданских системах связи и телекоммуникации (FM-радио, ТВ-вещание, сотовая связь, Wi-Fi и др.).

Макет радиосканера (рис. 1) включал два приемных тракта, позволяющих одновременно производить сканирование и мониторинг ЭМО в частотном диапазоне от 80 МГц до 2,5 ГГц. Обработка сигнала осуществлялась ПЭВМ со специализированным программным обеспечением, разработанным в пакете прикладных программ для математического моделирования.

В качестве источника радиосигналов GSM / LTE использовался комплект для тестирования средств беспроводной связи E7515A UXM Keysight Technologies. Характеристики передаваемых радиосигналов LTE и GSM в табл. 2.

Для приема и передачи использовались всенаправленные антенны, работающие в диапазоне 900–2400 МГц. Расстояние между передающей и приемной антеннами составляло около 0,5 м.

Полученные спектры радиосигналов показаны на рис. 2 и 3.

Результаты показывают, что макет радиосканера успешно обнаруживает радиосигналы LTE/GSM в диапазоне частот 462–2240 МГц. Для дальнейших экспериментальных проверок планируется поднять верхнюю границу диапазона рабочих частот до 6,1 ГГц.

Таблица 2. Характеристики передаваемых радиосигналов LTE и GSM

| Тип радиосигнала | Частота, МГц | Ширина полосы, МГц | Мощность, дБм |
|------------------|--------------|--------------------|---------------|
| LTE | 2 240,00 | 5,0 | -26 |
| LTE | 2 240,00 | 10,0 | -26 |
| LTE | 2 240,00 | 20,0 | -26 |
| GSM 450 | 462,80 | 0,2 | -10 |
| GSM 480 | 489,80 | 0,2 | -10 |
| GSM 750 | 749,60 | 0,2 | -10 |
| GSM 850 | 837,60 | 0,2 | -10 |

ТРЕБОВАНИЯ К РАДИОСКАНЕРУ

Основные технические требования к радиосканеру можно разделить на три группы: по назначению, конструктивные и в части радиоэлектронной защиты.

- Радиосканер должен одновременно осуществлять сканирование и мониторинг электромагнитного излучения в диапазоне от 80 МГц до 6,1 ГГц с дискретностью 5 Гц. Амплитудные, частотные, временные характеристики полученных спектрограмм должны позволить осуществлять навигацию при отсутствии других источников информации и наличии источников радиоизлучения в данном диапазоне частот.
- Конструкция радиосканера должна позволить размещение его на борту БТС. В первую очередь это требование относится к размещаемым снаружи антенно-фидерным устройствам. При этом базовое БТС

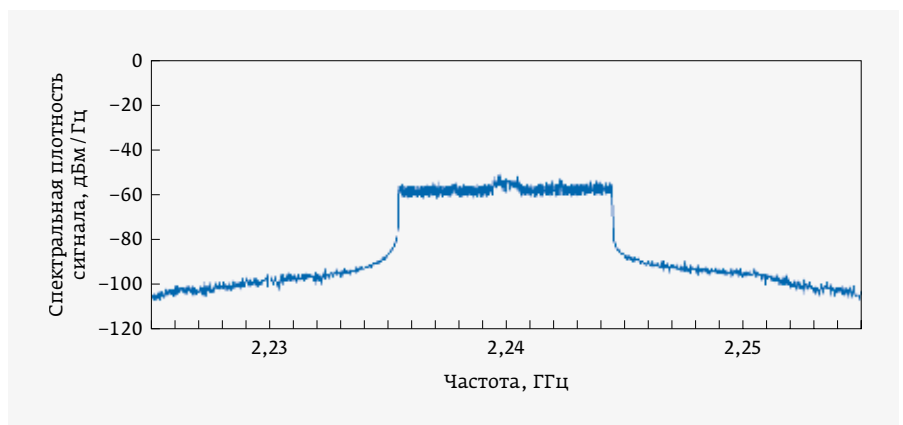


Рис. 2. Спектр радиосигнала LTE 2240 МГц, ширина полосы 10 МГц

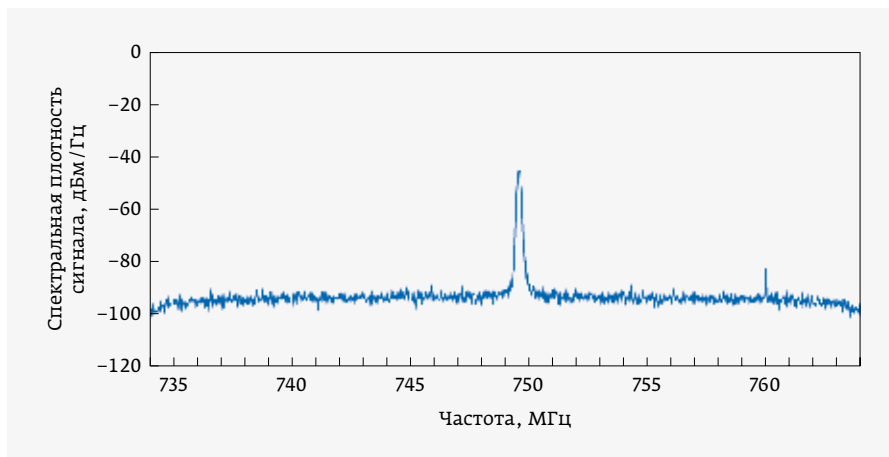


Рис. 3. Спектр радиосигнала GSM 750 МГц, ширина полосы 200 кГц

может относиться к различным классам, использоваться для перевозки как людей, так и грузов, также возможны варианты с установкой специального оборудования (строительного, дорожного и т. д.).

- Требования в части радиоэлектронной защиты – радиосканер должен совместно работать с оборудованием БТС, а также сохранять работоспособность при воздействии любых постоянно присутствующих в городе источников радиоизлучения, формирующих его ЭМО.

Последнее требование означает, что на работу радиосканера не должны оказывать влияние бортовые радиоэлектронные приборы, цепи зажигания и электродвигатели базового БТС, а также другие находящиеся поблизости транспортные средства.

Отдельно необходимо выделить воздействие радиолокационных датчиков для автотранспорта (автомобильных радаров), которые широко применяются в системах адаптивного круиз-контроля автомобилей, а в перспективе

станут одними из основных датчиков внешней информации для БТС.

В автомобильных радарх в основном используется частотный диапазон 40–300 ГГц, излучение осуществляется в импульсном режиме (доплеровский импульс) либо непрерывно с незатухающей гармонической волной (с частотной модуляцией или с рассеянным спектром^{*}). Средняя мощность зондирующего сигнала ограничена значением 100 мВт [10]. В США и Евросоюзе стандартизованы диапазоны частот 22–29 ГГц для автомобильных радаров малой/средней дальности и 76–81 ГГц – для радаров большой дальности [11].

Радары, комплексированные со средствами видеофиксации, также используются в системах дорожного мониторинга, установленных рядом с дорожным полотном.

Основные характеристики радаров этих двух типов представлены в табл. 3.

Радиосканер должен устойчиво работать как при постоянном облучении радаром встречных транспортных средств в дорожном потоке, так и во время работы собственных радаров БТС, на котором он установлен.

При движении или стоянке БТС рядом со строительной площадкой или участком, где выполняются сварочные работы, возможно влияние со стороны аппаратов дуговой сварки, создающих помехи в областях

* При излучении в рассеянном спектре сигналы передаются в некоторой полосе частот, что позволяет избежать проблем, возникающих при локации на одной частоте. Доступные частоты разделены на каналы, или интервалы.

Таблица 3. Основные характеристики радаров для систем дорожного мониторинга и автотранспорта [10–14]

| Назначение | Частотный диапазон, ГГц | Ширина диагр. по азимуту | Режим изл. | Ширина полосы частот | Длина импульса | Ср. мощн., мВт | Пик. мощн., Вт |
|-------------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------|----------------------|--------------------|----------------|----------------|
| Системы дорожного мониторинга | 24,05–24,25 | 16° | Непрерывное | 200 МГц | – | 100 | – |
| Автотранспорт | 22–29 | 120° | Непрерывное | 200 МГц | – | 100 | – |
| Автотранспорт | 76–81 | 30° | Импульсное | 1 ГГц [*] | 100 нс ... 100 мкс | – | 316,2 |
| | | | Непрерывное | 4 ГГц ^{**} | – | 100 | – |

* Для поддиапазона частот 76–77 ГГц.

** Для поддиапазона частот 77–81 ГГц.

Таблица 4. Основные комплектующие, выпускаемые российской промышленностью, предназначенные для использования в опытном образце радиосканера

| Название | Тип | Назначение | Разработчик |
|------------|---|--|----------------------|
| K5200MX014 | Микросхема | Универсальный радиочастотный приемо-передающий тракт | АО «НИИМА «Прогресс» |
| K1917BC024 | Микросхема | Универсальный микроконтроллер | АО «НИИМА «Прогресс» |
| ГК360М-ТС | Ультразрецизионный термостатированный кварцевый генератор | Генератор опорной частоты | АО «Морион» |
| ПРО-04 | Модуль навигационный | Приемник сигналов ГНСС | АО «НИИМА «Прогресс» |

частот 750 кГц, 3 и 20 МГц [8]. Это воздействие носит непредсказуемый характер и не должно приводить к нарушению работоспособности радиосканера.

Для снижения уровня помех и предотвращения несанкционированного мониторинга ведомственных каналов целесообразно ограничить диапазон частот радиосканера. С учетом того, что для формирования навигационного поля используется излучение радиостанций, телевизионных станций, БС сотовой связи, сетевое оборудование (Wi-Fi-роутеры, iBeacon и т. д.), сканирование можно ограничить частотными полосами 80–2500 МГц, 2412–2472 МГц, 5160–5825 МГц и 5955–7115 МГц.

В целях обеспечения непрерывной навигации при наличии отказов сопряженных датчиков, а также для автономного применения радиосканера в качестве функционально законченного изделия, в его состав целесообразно включить собственный приемник ГНСС. Опытный образец радиосканера планируется изготовить с использованием комплектующих, выпускаемых российской промышленностью (табл. 4).

* * *

Анализ показывает, что ЭМО городской среды в диапазоне частот от 80 МГц до 7,1 ГГц позволяет сформировать «радиомаску», по которой может осуществляться навигация с использованием радиосканера на базе SDR-технологии. Основным источником навигационных данных будут являться радиосигналы LTE/GSM в диапазоне частот 462–2240 МГц, излучаемые БС сотовой связи.

Известные к настоящему времени сложности при слежении за источниками радиоизлучения в городе предъявляют повышенные требования к программному обеспечению системы интеллектуальной навигации, которое должно обеспечивать:

- формирование признаков достоверности навигационных данных, одновременно формируемых датчиками нескольких типов;

- анализ соответствия полученных радиосканером спектрограмм с ранее загруженной «радиомаской»;
- определение координат БТС с погрешностью не более 10 м;
- автоматическое обновление и сохранение «радиомаски»;
- определение координат источников радиоизлучения;
- передачу навигационных данных на основной сервер.

Для комплексирования с абонентским терминалом ЛСН требуется оценка производительности вычислительных средств, достаточной для обработки полученных спектрограмм, а также скорости перестройки частоты радиосканера. Эти два параметра предполагается уточнить экспериментально в условиях города, с использованием мобильной лаборатории на базе автомашины, оснащенной автоматизированными рабочими местами и сервером для обработки данных.

Испытания на подвижном объекте позволяют исследовать влияние скоростного режима на погрешность определения координат и протестировать алгоритм учета динамически изменяющейся в пространстве базы при определении местоположения источников радиоизлучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Kassas Z., Neinavaie M., Khalife J., Khairallah N., Haidar-Ahmad J., Kozhaya S., Shadram Z.** Enter LEO on the GNSS Stage: Navigation with Starlink Satellites. Inside GNSS. 2021. December. PP. 42–51.
2. **Корнеев И. Л., Кузнецов А. С., Королев В. С.** Режимы работы локальной системы навигации в проекте «КОНСУЛ». Потребители системы «КОНСУЛ» // НАНОИНДУСТРИЯ. Спецвыпуск. 2021. 7с. Т. 14 (107). С. 57–59.
3. **Моисеенко О. А., Чернецкая Л. А., Касьянова О. В., Денисов Д. Н.** Электромагнитная обстановка в местах раз-

- мещения объектов подвижной радиосвязи // Здоровье. Медицинская экология. Наука. 2010. № 1–2 (41–42). С. 90–91.
4. **Стаценко Л. Г., Агеева А. А.** Электромагнитная обстановка при формировании городской застройки // Вестник инженерной школы ДВФУ. 2018. № 4 (37). С. 119–127.
 5. **Жмакина И. Д., Стаценко Л. Г.** Оценка уровня электромагнитного фона, создаваемого базовыми станциями // Информационные технологии. Проблемы и решения. 2021. № 3 (16). С. 65–70.
 6. **Шваб А.** Электромагнитная совместимость / Пер. с нем. М.: Энергоатомиздат, 1995. 480 с.
 7. **Бабкин А. Н., Шерстюков С. А.** Исследование электромагнитной совместимости радиотехнических средств, расположенных в непосредственной близости друг от друга // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 6. С. 14–16.
 8. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. Сост. Д.Р.Ж. Уайт. Вып. 1. Общие вопросы ЭМС. Межсистемные помехи / Пер. с англ. М.: Советское радио, 1977. 352 с.
 9. **Ашихмин А. В., Жуков А. А., Козьмин В. А., Шадрин И. А.** Локализация источников радиоизлучения и измерение напряженности поля с помощью мобильной станции радиоконтроля // Специальная техника. 2003. № 1. С. 15–33.
 10. **Сысоева С.** Актуальные технологии и применения датчиков автомобильных систем активной безопасности // Компоненты и технологии. 2007. № 3. С. 67–76.
 11. **Енокян Г. К., Айвазян М. Ц.** Автомобильные радары гигагерцового диапазона // Вестник НПУА: Информационные технологии, электроника, радиотехника. 2017. № 1. С. 89–96.
 12. **Бирюков М.** Радары для автотранспорта и дорожной инфраструктуры с применением процессоров АО «ПКК Миландр» // ЭЛЕКТРОНИКА. Наука, Технология, Бизнес. 2021. № 7 (00208). С. 110–116. DOI: 10.22184/1992-4178.2021.208.7.110.116.
 13. Рекомендация МСЭ-R M.1452-2 (05/2012). Автомобильные радары для предотвращения столкновений и системы радиосвязи диапазона миллиметровых волн для применений интеллектуальных транспортных систем. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1452-2-201205-I!!PDF-R.pdf.
 14. Cognitive Pilot. Универсальный радар для задач автоматизации транспорта и промышленных применений. Детальное описание – WP_CPRR24. URL: https://cognitivedriller.com/WP_CPRR24.pdf.

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



МЕТОДЫ СПУТНИКОВОГО И НАЗЕМНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Под ред. Д. Дардари, Э. Фалетти, М. Луизе

М.: ТЕХНОСФЕРА,
2012. – 528 с.,
ISBN 978-5-94836-338-7

Цена 975 руб.

Книга содержит обзор последних результатов научных исследований в области обработки сигналов для определения местоположения и навигации, в ней впервые объединены спутниковое и наземное позиционирование. В обзоре рассматриваются как «классические» технологии позиционирования с помощью спутниковых систем, так и новые темы: нахождение конечных пределов точности систем позиционирования, прямое позиционирование, методы оптимального сочетания измерений на основе радиосигналов и сигналов с различных датчиков, суперточная дальнометрия в закрытых помещениях с использованием сигналов с ультраширокой полосой пропускания и т. д. Книга написана на основе работ, проводимых в европейской сети передового научного опыта в области беспроводной связи NEWCOM++.

Книга послужит справочным пособием для всех, кого интересуют позиционирование и навигация, и вызовет значительный научный и технический интерес ученых и инженеров, работающих в данной области.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; knigi@technosphaera.ru, sales@technosphaera.ru