УДК 629.3.05

Методы повышения точности и помехозащищенности навигационного обеспечения транспортного средства

Антонов Д.А.[1*], Жарков М.В.[1], Кузнецов И.М.[1***], Чернодубов А.Ю.[2****]**

[1]*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

[2]*КТ - Беспилотные системы, проспект Малый В.О., 54, Санкт-Петербург, 199178, Россия*

**e-mail: oxface@yandex.ru*

***e-mail: mv_zharkov@mai.ru.*

****e-mail: im_kuznetsov@mai.ru*

*****e-mail: andy.g.tch@gmail.com*

Аннотация

В статье приводится анализ требований к применению автомобильных навигационных систем в составе интеллектуальных транспортных систем (ИТС). Определяются функциональные ограничения, накладываемые особенностями эксплуатации в городских условиях. Приводятся методы борьбы с явлением многолучевости, возникающим в условиях плотной городской застройки.

Ключевые слова: интеллектуальная транспортная система, инерциальная навигационная система, микромеханические инерциальные датчики, спутниковая навигационная система, многолучевость, оптимальная обработка информации, интегрированная навигационная система.

Постановка задачи

Основным источником навигационной информации в большинстве известных проектов ИТС, включая ИТС Москвы, является бортовой приемник спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС-GPS. Принципиальным недостатком спутниковых навигационных систем является снижение точности и помехозащищенности навигационного решения в условиях движения в плотной городской застройке, в связи с затенением и переотражением сигналов спутниковых радионавигационных систем, а также наличием широкого спектра радиотехнических помех. Под помехозащищенностью в данном случае будет пониматься устойчивость навигационного обеспечения к искажениям сигналов навигационных космических аппаратов (НКА) вследствие влияния многолучевости.

На сегодняшний день существует большое число в разной степени проработанных и доведенных до технической реализации подходов к повышению уровня точности и помехозащищенности спутниковых навигационных систем при использовании в ИТС. При этом одним из наиболее перспективных подходов является построение бортовой навигационной системы транспортного средства (ТС), функционирующего в условиях ИТС, как комплексной навигационной системы с применением современных методов совместной обработки информации от приёмника спутниковой навигационной системы, инерциальных датчиков, одометрических измерений и других датчиков и систем ТС. Преимуществом такого подхода является не только повышение точности определения параметров движения ТС, но и возможность повышения помехозащищенности за счет своевременного обнаружения и исключения аномальных измерений из навигационного решения, которые часто присутствуют в условиях плотной застройки в мегаполисе.

В статье приводится описание методов повышения точности и помехозащищенности навигационного обеспечения ТС алгоритмическими и аппаратно-программными способами, включая алгоритмы комплексной обработки информации. На основе текущих и перспективных требований к точности навигационного обеспечения ТС, а также на основе анализа существующих методов повышения точности и помехозащищенности формулируются рекомендации в части проектирования помехозащищенной комплексной навигационной системы ТС.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Москвы в рамках научного проекта № 15-38-70055 «мол_а_мос». Выработка рекомендации в части проектирования помехозащищенной комплексной навигационной системы ТС являлась важным этапом проекта и должна позволить осуществить разработку системы с заявленными характеристиками на следующем этапе работы с учетом существующего мирового опыта в этой области исследований.

Анализ требований к навигационной системе ИТС

Основной проблемой городской транспортной системы мегаполиса является несоответствие пропускной способности улично-дорожной сети реальному спросу на транспортные услуги [1]. Интеллектуальная транспортная система (ИТС) предназначена для решения существующих транспортных проблем и улучшения условий дорожного движения. Мировой опыт создания ИТС указывает на единственный возможный путь решения подобных проблем путем достижения транспортного баланса между спросом на движение и реальной пропускной способностью улично-дорожной сети за счет сочетания мер по совершенствованию

дорожной сети и управления движением с мерами по созданию приоритета движению общественного транспорта над личным. На текущем этапе развития ИТС Москвы определены структура, состав (рисунок 1) и задачи, которые необходимо решать с ее помощью. Так, среди ключевых задач, определенных на сегодняшний день в качестве приоритетных выделены следующие [1]:

- введение платных парковок и ограничение на въезд в определенные зоны города;

- формирование полосы для приоритетного движения общественного транспорта;

- оптимизация алгоритмов управления светофорной сигнализацией;

- введение средств автоматической фиксации нарушения Правил дорожного движения;

- ведение мониторинга условий движения в реальном масштабе времени;

- развитие функций информирования участников движения о дорожных условиях, о графиках движения общественного транспорта, о наличии свободных мест на парковках и т.д.

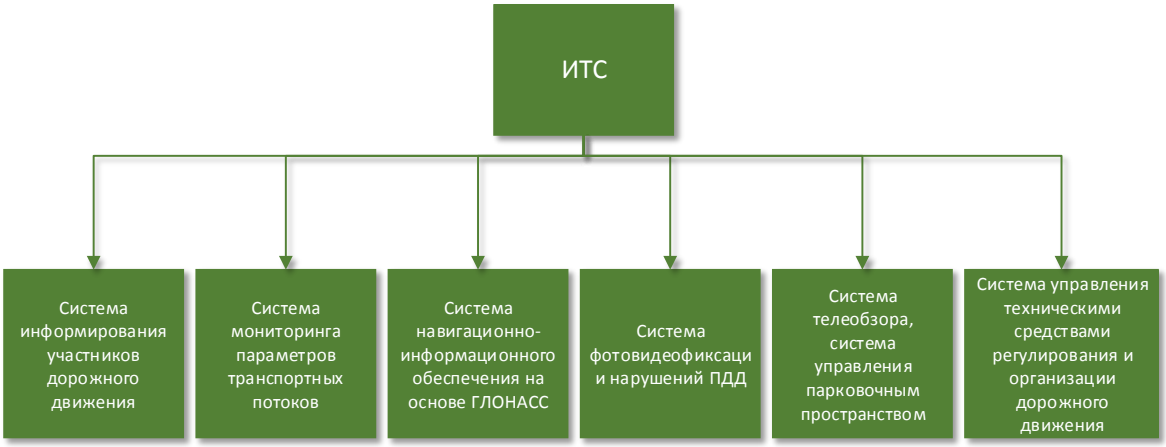

Рисунок 1 – Состав ИТС города Москвы

Управление в транспортном комплексе одного из крупнейших мегаполисов мира – сложный и многофункциональный процесс. Создание ИТС в этих условиях – это непрерывное наращивание функциональных возможностей и расширение зоны действия.

Одной из существующих подсистем ИТС является система ЭРА-ГЛОНАСС, которая предполагает оснащение ТС навигационно-коммуникационными устройствами, определяющими местоположение ТС по сигналам глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) и передающими информацию службам экстренного реагирования о дорожно-транспортных происшествиях (ДТП) и других чрезвычайных ситуациях [2, 3]. Система является аналогом Европейского проекта eCall [4], бразильского SIMRAV [5] и американского OnStar [6], которые, в свою очередь, также структурно входят в региональные ИТС. Анализ разработанных стандартов на систему ЭРА-ГЛОНАСС позволяет сделать вывод о требованиях к ее навигационному обеспечению [7]. Перечень требований представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Требования к навигационному приемнику ГНСС

Предельные погрешности ($2\boldsymbol{\sigma}$)	
Плановые координаты (м)	15
Высота (м)	20
Вектор скорости (м/с)	0,1

При этом указанные требования по точности должны обеспечиваться:

- в диапазоне скоростей от 0 до 250 км/ч;

- в диапазоне линейных ускорений от 0 до 2 g;

- при наличии краткосрочных вертикальных ускорений от 0 до 5 g.

- при значениях пространственного геометрического фактора не более 4.

Однако, проведенные лабораторией 3010 Информационно-аналитического центра координатно-временного обеспечения ФГУП ЦНИИмаш (ИАЦ КВНО) натурные испытания навигационной аппаратуры потребителя (НАП) с использованием мобильной измерительно-диагностической лаборатории (МИДЛ) в условиях плотной городской застройки показали уровни погрешностей, значительно превышающие допустимые в ряде случаев [8]. По результатам испытаний были сформулированы рекомендации:

- использовать навигационную аппаратуру, работающую как минимум по сигналам двух ГНСС – ГЛОНАСС и GPS;

- использовать современную помехозащищенную навигационную аппаратуру, имеющую подтвержденные точностные характеристики;

- важным фактором, позволяющим повысить точность местоопределений в городских условиях, является использование интегрированных навигационных систем.

В существующем радионавигационном плане РФ [56] от 28 июля 2015 г. в п. 2.2.5 приводятся требования к таким характеристикам навигационного обеспечения наземных ТС, как точность, доступность, целостность и непрерывность. Требования разделяются на типовые требования к точностным характеристикам навигационного обеспечения транспорта и основные перспективные операционно-технические требования для систем управления автотранспорта и приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2 – Типовые требования к точностным характеристикам (СКП) навигационного обеспечения транспорта (м)

Условия движения наземного транспорта	Автономное метоопределение	Диспетчерское управление
Общегородские и пригородные перевозки	7…10	7…50
Проводка автомобиля по центру города	7…10	1,5…15
Транзитные перевозки между городами	50…250	12…150

Таблица 3 – Основные перспективные операционно-технические требования для систем управления автотранспорта

Характеристики	Системы управления городским автотранс-портом	Системы управления региональны-ми перевозками	Системы управления междунаро-дными перевозками	Системы управления для индивидуального автотранспорта
1. Инструментальная емкость системы. Число одновременно обслуживаемых автомобилей.	500-1000	500	1000*)	-
2. Средний темп обмена, с	Т = 30 с Т = 10 с для спецтранс-порта	Т = 60…90 с	900…7200	-
3. Точность (СКП) навигации, м	В центре 2,5 на автотрассе 15	2,5…10	2,5…15	2,5…20
4. Доступность навигационного обеспечения	0,99*)	0,95	0,95	0,90
5. Целостность (надежность) обеспечения навигационными данными и связью	0,98 0,99 для спецсистем	0,97	0,97	-

6. Совместимость систем	Единые стандарты на интерфейсы, используемые для выхода на радиолинии	-

Анализ представленных требований позволяет сделать вывод о требуемых точностях навигационного обеспечения в условиях города, так для задач диспетчерского управления с целью проводки автомобиля по центру города нижний порог точности составляет 1,5 м (СКП), а в системах управления городским автотранспортом уровень точности навигации в тех же условиях передвижения ТС составляет 2,5 м (СКП).

Для более дальних планов развития ИТС (высокоточная навигация/переход к роботизированным ТС) не сформулировано четких и однозначных требований к навигационному обеспечению. Однако по имеющимся исследованиям, открытым публикациям и экспертным мнениям можно оценить перспективные требования к навигационному обеспечению.

Одним из направлений развития ИТС является повышение уровня безопасности участников дорожного движения [9]. Для этого необходимо, в том числе, минимизировать влияние человеческого фактора на работу системы в целом [10], что возможно при автоматизации процесса управления ТС, т.е. при внедрении в структуру ИТС так называемых «беспилотных ТС». Это, в свою очередь, накладывает более жесткие требования к точности навигационного обеспечения таких ТС. Так, анализ разрабатываемых нормативных документов для обеспечения автоматизации движения позволяет сделать вывод о перспективной точности определения координат как субметрового [11-15], так и субсантиметрового уровня [16]. Например, система обеспечения движения по выделенной полосе, как

структурный элемент ИТС [17], предполагает поддержку водителя в управлении ТС в границах текущей полосы движения, что в свою очередь накладывает ограничения по точности выдерживания этих границ на уровне 50 см в поперечном направлении [18].

Текущие разработки подтверждают внедрение беспилотных ТС в структуру ИТС в ближайшее время [19, 20]. Небезызвестный самоуправляемый автомобиль компании Google [21] успешно проходит испытания на западном побережье США в Калифорнии, и по заверениям компании в автономном режиме проехал уже свыше 2,5 млн. километров [22]. Компания Tesla планирует выпустить обновление программного обеспечения выпускаемых автомобилей в ближайшее время, которое позволит переключаться в режим автопилота [23]. 6 мая 2015 года первый беспилотный грузовик компании Daimler появился на дороге Невады, США [24]. Известны также успехи отечественной компании «КамАЗ» в этом направлении. Начавшиеся в прошлом году полигонные испытания завершатся в 2017 году. После них должно начаться испытание беспилотных КамАЗов в условиях реального дорожного движения на автомобильных дорогах Татарстана. В случае удачного тестирования с 2020 года возможен серийный выпуск подобных машин. Тестирование беспилотных КамАЗов в условиях реальной дорожной обстановки планируется начать и на трассе Москва-Санкт-Петербург. Они должны окончиться в 2018 году [25]. В целом, разработки беспилотных ТС начались уже давно, и в обозримом будущем такие ТС будут передвигаться по дорогам наряду с обычными. Ниже приводятся лишь некоторые оценки времени появления беспилотных ТС на дорогах общего пользования [26].

По информации Morgan Stanley, полностью автономное функционирование будет возможным к 2020 году, а к 2026 году за ним последует массовое проникновение на рынок, а ещё через 20 лет автомобили, которые существуют сегодня, полностью исчезнут.

Navigant Research: «К 2035 году продажи беспилотных автомобилей достигнут 95,4 миллионов устройств в год, что составит 75% всех продаж легковых автомобилей».

IHS Automotive: «К 2035 году во всём мире будет около 54 миллионов беспилотных автомобилей».

ABI Research: «К 2032 году около половины всех автомобилей в Северной Америке будут беспилотными».

Nissan: «Это будет настоящая революция. 2020 год будет первым годом, когда технология беспилотного вождения начнёт на самом деле появляться в автомобилях».

Если объединить вместе все эти оценки, то можно сделать предположение, что массовое внедрение автоматизированных беспилотных ТС начнётся в интервале 2020 - 2030 годов.

О появлении беспилотных ТС в РФ в ближайшем будущем также свидетельствует факт утверждения дорожной карты “AutoNET” [27], в которой основным вопросом является автоматизация транспортной системы и внедрение беспилотных ТС в структуру ИТС.

Для реализации беспилотного режима движения ТС сегодня используются сочетания различных датчиков и систем. Пример обобщенной потенциальной

структуры навигационной системы беспилотного ТС приводится на рисунке 2 [28]. Обширный состав оборудования обусловлен, в том числе, проблемой выдерживания заданной точности и помехозащищенности определения координат в условиях плотной городской застройки мегаполиса [56].

Рисунок 2 – Потенциальные компоненты навигационной системы ТС, использующей общедоступное оборудование и датчики с низкой себестоимостью

Основные факторы, влияющие на точность позиционирования

На сегодняшний день основным источником навигационной информации на борту ТС является приёмник ГНСС. Появление приемников ГНСС, обладающих высокой чувствительностью, а также наличие нескольких спутниковых созвездий (ГЛОНАСС, GPS, GALILEO и т.д.) позволили значительно улучшить доступность ГНСС сигнала в условиях плотной городской застройки. Однако, прием сигналов

ГНСС в городских условиях связан с двумя ключевыми проблемами. Во-первых, существует возможность блокировки сигнала значительного количества НКА, зданиями и другими препятствиями, такими, как общественный транспорт. Блокировка сигналов НКА в поперечном направлении относительно движения ТС зданиями приводит к использованию лишь тех сигналов, которые возможно принять по направлению вдоль улиц, что, в свою очередь, приводит к ухудшению геометрического фактора (ГФ), и, как следствие, более низкой точности определения координат [29, 30].

ГФ до определенной степени может быть улучшен при помощи использования информации о высоте рельефа, содержащейся в базах данных (БД) [31]. Что, как показано, приводит к улучшению точности определения горизонтальных координат до 35%. Более того, решение навигационной задачи с субметровой точностью может быть достигнуто с использованием технологии сопоставления затенений [32-34]. В основе технологии лежит использование моделей затенений сигнала на основе сравнения видимых НКА ГНСС с предсказанными по 3D модели городской застройки.

Второй ключевой проблемой определения координат в городских условиях является наличие множества плоских поверхностей, отражающих сигналы ГНСС. Особенно сильными отражателями являются современные стеклянные и металлические здания, причем покрытие их водой вследствие дождя лишь улучшает характеристики отражения радиоволн. Прием таких сигналов вследствие многолучевости приводит к существенным ошибкам определения координат [60].

При определении понятия многолучевости часто объединяют следующие компоненты (рисунок 3):

- прием переотраженных сигналов (ППС);

- интерференцию прямых и переотраженных сигналов (ИППС).

Тем не менее, две указанные составляющие многолучевости в действительности являются ошибками различной природы.

ППС возникает в случае, если прямой сигнал блокируется, и приемник использует только переотраженный сигнал. Эта ошибка всегда положительна в абсолютном выражении, обычно составляет десятки метров, и максимальное ее значение потенциально не ограничено. Мощность сигналов от НКА, находящихся не в прямой видимости значительно варьируется. Такие сигналы могут быть как очень слабыми, так и практически не отличимыми по мощности от прямых сигналов. Поскольку высокочувствительные приемники могут воспринимать гораздо более слабые сигналы, их использование может значительно увеличить число принятых сигналов от НКА, находящихся не в прямой видимости.

ИППС возникает в результате приема как переотраженных, так и прямых сигналов. Наибольшими по величине являются ошибки кодовых измерений и достигают уровня 150 м для GPS кода C/A. Ошибки по фазовым измерениям ограничены четвертью длины волны (принимая во внимание тот факт, что прямой сигнал обладает большей мощностью, чем переотраженный) и принимают наибольшие значения при небольших задержках переотраженных сигналов (при переотражении от близкорасположенных препятствий).

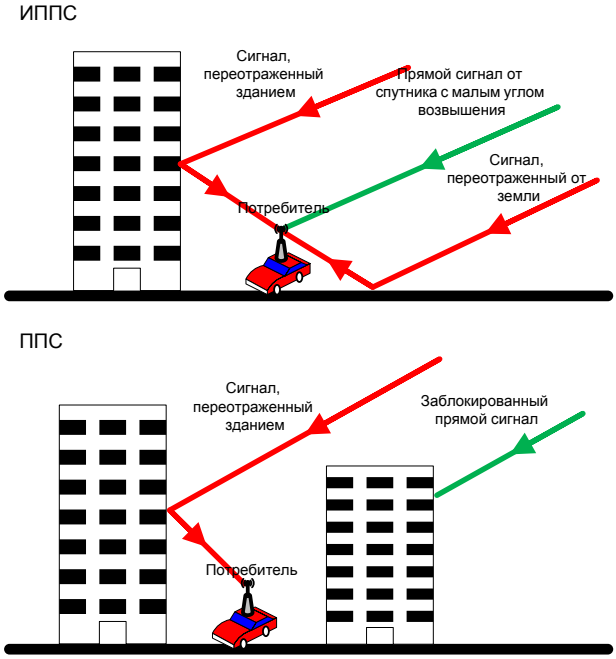

Рисунок 3 – Две компоненты многолучевости

В случае, если сигнал частично блокируется препятствием, возникает явление дифракции и его мощность существенно уменьшается. Понижение мощности сигнала наблюдается при углах дифракции до 5 град [35]. Сигналы, подверженные дифракции, приводят к ошибкам, обычно соответствующим уровню в несколько дециметров. Тем не менее, такие сигналы могут быть использованы для низкоточного определения координат. Обычно такой сигнал принимается вместо прямого, но также может быть воспринят и вместе с прямым сигналом.

Обзор методов снижения влияния многолучевости

На сегодняшний день известно несколько подходов к повышению точности и помехозащищенности навигационного решения в условиях плотной городской застройки.

1) Метод выбора НКА с использованием информации о соотношении сигнал/шум

Метод [31] основывается на предположении о том, что низкое соотношение сигнал/шум может служить индикатором ППС или ИППС. Использование такого предположения позволяет исключить измерения с низким соотношением сигнал/шум, уменьшая тем самым влияние обеих компонент многолучевости, однако не позволяет исключить их полностью. К недостаткам нужно отнести возможность исключения сигналов НКА, затенённых листвой деревьев, перекрытых корпусом объекта, или, наоборот, использование сигналов НКА, отраженных от стекла, металла и мокрых поверхностей, поскольку такие сигналы могут иметь аналогичную прямым сигналам мощность.

2) Метод определения многолучевости на основе сравнения соотношения сигнал/шум на разных частотах [36]

Сравнение соотношения сигнал/шум сигналов, передающихся на разных частотах, могут быть использованы в качестве индикатора уровня интерференции от многолучевости. Метод является относительно надежным для статических приложений. Может быть использован только для многочастотных приемников.

3) Метод выбора НКА на основе информации об угле возвышения

Влияние многолучевости может быть уменьшено выбором сигналов от НКА с наивысшими углами возвышения на основе предположения о том, что чем выше спутник, тем меньше вероятность того, что сигнал будет заблокирован или отражен зданием. Однако, НКА с большими углами возвышения по-прежнему могут быть вне зоны прямой видимости, особенно если рядом находится высокое здание. С

другой стороны, сигналы от НКА с малым углом возвышения могут быть прямыми, поскольку в условиях города блокируются не все направления. Выбор только сигналов от спутников с большими углами возвышений также отрицательно влияет на ГФ. Таким образом, этот метод не гарантирует повышение точности в условиях городской застройки, его использование может приводить к снижению точности и непрерывности навигационного решения [31].

4) Метод сглаживания измерений

За счет высокой пространственной вариации ошибок от многолучевости возможен подход, реализующий сглаживание кодовых измерений для осреднения ошибок, возникающих под воздействием многолучевости. Сглаживание может быть реализовано с использованием, например, фильтра Хэтча [42]. Этот метод не уменьшает влияния ППС.

5) Метод контроля целостности на основе сигналов ГНСС

Метод основан на предположении, что измерения от НКА, содержащие погрешность многолучевости, дают менее точное навигационное решение. Этот метод является аналогом метода обнаружения отказов в алгоритме контроля целостности (Receiver autonomous integrity monitoring (RAIM) – алгоритм автономного контроля целостности) с той разницей, что перебор осуществляется не для всех НКА рабочего созвездия, а только для тех, что не соответствуют установленному уровню соотношения сигнал/шум (см. выше пп. 1, 2). Использование соотношения сигнал/шум, как критерия выбора НКА для перебора, позволяет снизить вероятность ложного срабатывания и значительно снизить объём вычислений в случае наличия большого числа НКА, сигналы которых содержат

мнгоголучевость, по сравнению с алгоритмом RAIM [37]. Это обусловлено, прежде всего, назначением алгоритма RAIM, уровнями обнаруживаемых ошибок, порогами принятия решений об исключении и базовыми предположениями о количестве единовременных “сбойных” НКА (один/два для различных реализаций RAIM). Поэтому, хотя, например, наличие алгоритма RAIM присутствует в требованиях к навигационному приёмнику в системе ЭРА-ГЛОНАСС [7] представляется более предпочтительным использование специализированных методов (алгоритмов) контроля целостности для задач повышения точности и помехозащищенности в городе [37].

6) Контроль измерений, содержащих многолучевость

Определение координат движущегося ТС в городе с меняющейся вдоль траектории плотностью и этажностью застройки, при наличии различных источников помех, выбор порогов принятия решения об исключении сигналов НКА представляются нетривиальными задачами. В [31] было показано, что включение некоторых ранее исключенных сигналов, содержащих многолучевость, в навигационное решение может улучшить точность определения координат. Повышение точности достигается в том случае, когда эффект от улучшения геометрического фактора в результате включения в решение сигналов от НКА, содержащих многолучевость, превышает эффект от исключения таких сигналов даже за счет снижения точности определения дальностей до НКА. Таким образом, при разработке алгоритмов повышения точности и помехозащищенности для движения ТС в городе представляется необходимым не только обнаруживать искаженные измерения и исключать их из решения, но и контролировать величину

искажений. Использование такого подхода предоставляет возможность повысить не только точность, но и непрерывность определения координат.

7) Контроль измерений с использованием обновляющей последовательности

Одним из подходов контроля измерений на предмет наличия искажений является использование рекуррентных оценивателей [41]. Разница между предсказанными и измеренными значениями псевдодальности и псевдоскорости называется обновляющей последовательностью или невязкой. На основе гипотезы о виде модели и анализа статистических характеристик невязок можно построить алгоритм выявления искаженных сигналов НКА. Однако, при использовании в такого рода оценивателе только сигналов ГНСС возникает проблема необходимости достаточного количества неискаженных сигналов, а также, сложности (невозможности) обнаружения медленно нарастающих искажений, что для движения ТС в городе является актуальной проблемой. Медленно нарастающая погрешность в определении псевдодальности в силу использования рекуррентного алгоритма, кроме того, может приводить к накоплению погрешности в определении координат ТС, а также к ложному исключению из решения измерений от других НКА рабочего созвездия. Способами борьбы с такого вида искажениями является реализация группы параллельных фильтров, каждый из которых будет воспринимать различные измерения [44], или применение дополнительных источников данных, прежде всего систем счисления координат – одометрических и инерциальных [38]. Еще одним способом выявления искажений в сигналах является совместное использование при описании ошибок псевдодальности и псевдоскорости двух видов моделей возмущений – типа шума и волновой структуры сигнала [57].

Это позволяет получить более полное описание реального возмущения. Шумовые возмущения наилучшим образом могут быть охарактеризованы в терминах их статистических свойств, таких как математическое ожидание, интенсивность, дисперсия, спектральная плотность и т.д. Таким образом, шумовые возмущения можно описать с использованием теории случайных процессов, используя понятия "белый шум", "цветной шум". У возмущений, обладающих волновой структурой (рисунок 4), хотя бы на коротких интервалах времени видны различные волновые формы. Возмущения волновой структуры могут быть математически представлены с помощью полудетерминированных аналитических выражений вида:

$$\omega(t) = c_1 \cdot f_1(t) + c_2 \cdot f_2(t) + \cdots + c_n \cdot f_n(t), \qquad (1)$$

где $f_1(t), f_2(t) \dots f_n(t)$ – известные базовые функции; $c_1, c_2, \dots, c_n$ – кусочно-постоянные неизвестные весовые коэффициенты, которые могут скачкообразно менять свои значения.

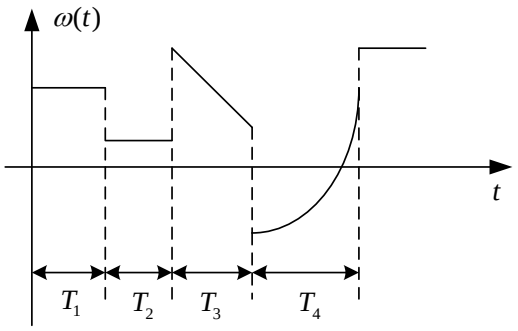

Рисунок 4 – Возмущения волновой структуры

Для волновых процессов, представленных на рисунке 4, математическое описание их изменения можно представить в виде:

T_1: $\omega_1(t) = c_1$,

T_2: $\omega_2(t) = c_2$,

T_3: $\omega_3(t) = c_3 + c_4 \cdot t,$ (2)

T_4: $\omega_4(t) = c_5 + c_6 \cdot exp(\beta \cdot t),$

где T_1, T_2, T_3, T_4 – периоды действия возмущения соответствующего вида.

Волновое описание можно рассматривать как представление неопределённого возмущения $\omega(t)$ в момент времени t некоторой взвешенной линейной комбинацией известных функций $f_i, i = \overline{1,n}$, имеющих неизвестные весовые коэффициенты c_i, $i = \overline{1,n}$. Весовые коэффициенты c_i могут время от времени скачком изменять свои значения случайным кусочно-постоянным образом. Приведенная математическая модель погрешностей определения псевдодальностей и псевдоскоростей на базе стохастического и волнового подходов для использования в оценке параметров многолучевости позволяет более полно описать соответствующие возмущения, и, тем самым, повысить точность и помехозащищенность определения параметров ориентации и навигации ТС.

Отсюда представляется целесообразным применение в алгоритмах контроля измерений рекуррентных оценивателей на основе волнового и стохастического представления искажений сигналов НКА с использованием дополнительной информации от одометрических и инерциальных датчиков. Ввиду значительного прогресса в развитии технологии создания микромеханических инерциальных датчиков их применение в качестве дополнительных источников измерений наиболее предпочтительно с точки зрения стоимости, энергопотребления и массогабаритных характеристик.

8) Интеграция с камерой, ориентированной на небосвод

Камера с панорамными линзами и линией визирования, направленной вверх, или массив таких камер могут быть использованы для получения изображения небосвода и преград (затенений) для сигналов НКА. По информации об угле маскирования, углах азимута и возвышения НКА рабочего созвездия, распознанных границах препятствий и угловой ориентации камеры относительно направления на север и местного горизонта возможно исключить из решения сигналы НКА перекрытых препятствиями [39, 40]. В качестве источника угла истинного курса может выступать магнитный датчик с картой магнитных склонений. Вертикаль места может строиться по показаниям микромеханических акселерометров. Возможно упрощение системы, когда источником информации о направлении на север является путевой угол от ГНСС приёмника, а углы поворота линии визирования камеры относительно местного горизонта принимаются константой. Однако, такие допущения при малых скоростях движения ТС могут приводить к значительным погрешностям при отбраковке “рабочих” НКА, вплоть до отказа системы в целом. К минусам следует отнести необходимость обработки видеосигналов камеры, а также невозможность таким методом распознать ИППС.

9) Кодовый детектор

Для уменьшения влияния ИППС со средней величиной ошибки было разработано большое число методов, использующих увеличение разрешения кодового детектора. Некоторые из этих методов также требуют использования дополнительных корреляционных каналов внутри приемника. Исследования метода представлено в [41]. Устойчивое к многолучевости кодовое детектирование уже является стандартной опцией высокоточных профессиональных ГНСС приемников.

Однако, реализация подхода в приемниках с низкой стоимостью на сегодняшний день затруднительна.

10) Векторное отслеживание

Метод объединяет отслеживание сигналов и определение позиции в единый процесс [41]. Уменьшение влияния эффектов многолучевости аналогично тому, что наблюдается при реализации метода сглаживания несущей. Использование этого метода также позволяет снизить ошибки определения координат в результате приема сигналов от НКА, находящихся вне зоны прямой видимости относительно приемника, предотвращая блокирование таких сигналов [43]. Тем не менее, реализация этого метода требует внесения изменений в программно-аппаратный состав приемника ГНСС.

11) Определение сигналов, находящихся вне зоны прямой видимости относительно приемника, с использованием 3D модели городской застройки

В случае, если известно местоположение пользователя, для определения заблокированных сигналов достаточно сравнить линии визирования прямых сигналов с 3D моделью городской застройки. Такие сигналы затем исключаются из решения [45, 46]. Однако, местоположение объекта часто известно с некоторой ошибкой в пределах от единиц до сотен метров. Такое происходит в случае, если местоположение определено с использованием сигналов, содержащих многолучевость. Поэтому необходимо рассмотривать блокировку сигналов в нескольких точках, что в конечном счете выражается в решении двух проблем:

- вычислении затенений ГНСС сигналов зданиями на различных позициях в реальном времени;

- определение сигналов, находящихся вне зоны прямой видимости относительно приемника в случае, когда точное местоположение пользователя неизвестно.

Несколько исследований по этим вопросам представлено в [30]. 3D модель городской застройки также потенциально может быть использована для коррекции распространения ошибок таких сигналов [47] и для определения интерференции от многолучевости [48]. И в том, и в другом случае требуются большие вычислительные ресурсы.

12) Аппаратные методы уменьшения влияния многолучевости

В данную условную группу можно отнести методы, требующие изменений в существующих, либо добавления новых, аппаратных решений, как правило, приводящих к существенному увеличению их конечной стоимости, габаритов и энергопотребления, а также относящихся к специализированным областям применения. К числу таких методов относятся:

- использование антенн с повышенной чувствительностью к поляризации сигнала [49, 50];

- использование антенн импедансными структурами (Choke Rings) [36];

- использование антенн с управляемой диаграммой направленности (CRPA) [51];

- использование массива антенн для измерения угла приема сигнала [52];

- использование нескольких антенн и приемников (применимо на больших ТС) [36];

- использование антенн с двойной поляризацией [36];

- контроль допплеровского сдвига [53-55];

- сравнение выходов коррелятора приемника [58, 59].

Таким образом, существует достаточно большое количество методов борьбы с многолучевостью на ТС в условиях городской застройки. Тем не менее, ни один из них в отдельности не позволяет гарантировать наличие решения с точностью, соответствующей даже существующим требованиям, не говоря о перспективных. Одним из вариантов решения проблемы получения более высокой точности является объединение части рассмотренных подходов. Например, так называемый “Пакетный подход”, предложенный в [36].

Заключение

Существующая структура и состав ИТС подразумевает решение транспортных проблем и улучшения условий дорожного движения путем достижения транспортного баланса между спросом на движение и реальной пропускной способностью улично-дорожной сети. Указанные проблемы предлагается решать за счет сочетания мер по совершенствованию дорожной сети и управления движением с мерами по созданию приоритета движению общественного транспорта над личным. Причем действующий проект ИТС в основном ориентирован на информирование участников движения, выделяя при этом человека как основной элемент управления процессами, происходящими внутри ИТС. Такой подход со временем (в результате смещения вышеуказанного баланса) приведет к необходимости минимизировать влияние человека на процессы управления в целях повышения или по крайней мере сохранения уровня безопасности дорожного

движения в рамках ИТС. В этой связи, текущее навигационное обеспечение ТС, передвигающихся в условиях города, требует существенных доработок в силу возникающих проблем, рассмотренных в данной статье.

Рассмотренные методы снижения влияния многолучевости имеют как преимущества, так и недостатки, и не могут по отдельности обеспечить требования современных ИТС. Поэтому при формировании концепции построения, состава и структуры навигационного обеспечения ТС ИТС целесообразно предусмотреть возможность объединения этих подходов с целью не только повышения точности и помехозащищенности навигационного решения, но и устранения недостатков каждого из них. Это позволит в том числе обеспечить выполнение перспективных требований в части навигационного обеспечения ТС, функционирующего в рамках ИТС.

При невозможности внесения изменений в аппаратный и программный состав неспециализированного приёмника ГНСС наиболее целесообразным представляется синтез комплексного алгоритма обнаружения и контроля искажений в сигналах псевдодальности и псевдоскорости на основе рекуррентного стохастического оценивателя. При этом:

- погрешности псевдодальности и псевдоскорости должны представляться в виде комбинации волновой и стохастических моделей;

- в алгоритме должна использоваться информация от одометрических и инерциальных датчиков;

- необходимо не только обнаруживать искажение, но и оценивать и контролировать величину погрешности измерения;

- необходимо осуществлять контроль величины погрешности псевдодальности и псевдоскорости для ранее исключенных НКА с целью возможного включения этих измерений в решение;

- необходимо формировать прогноз точности определения не только навигационных параметров, но и измерений на основе всей совокупности поступающей информации.

Библиографический список

1. Создание интеллектуальной транспортной системы города Москвы, 2016, URL: http://www.gucodd.ru/index.php/component/content/article/58

2. Международные аспекты развития проекта «ЭРА-ГЛОНАСС» // Вестник ГЛОНАСС, 2016, URL: http://vestnik-glonass.ru/stati/mezhdunarodnye_aspekty_razvitiya_proekta_era_glonass/

3. Основная информация – ЭРА-ГЛОНАСС. Некоммерческое партнерство «Содействие развитию и использованию навигационных технологий», 2016, URL: http://glonassunion.ru/era-glonass

4. eCall: Time saved = lives saved. European Comission, URL: https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/ecall-time-saved-lives-saved

5. SIMRAV, URL: http://www.hbatecnologia.com.br/forumlogistico/pdf/SIMRAV.pdf

6. OnStar, URL: https://www.onstar.com/us/en/home.html

7. «Глобальная навигационная спутниковая система. Система экстренного реагирования при авариях. Автомобильная система/устройство вызова экстренных

оперативных служб. Общие технические требования» ГОСТ Р 54620-2011, URL: http://docs.cntd.ru/document/gost-r-54620-2011

8. ПРОТОКОЛ № 1/2015 натурных испытаний НАП с использованием мобильной измерительно-диагностической лаборатории (МИДЛ), URL: https://www.glonass-iac.ru/GLONASS/midlReports2/Report2015_1.pdf

9. Directive 2010/40/EU of the European parliament and of the council, URL: http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32010L0040

10. Development plan for assessment technology of advanced safety vehicle, URL: http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/pdf/ESV/esv22/22ESV-000311.pdf

11. Recommendations of the DG eCall for the introduction of the pan-European eCall, URL: http://www.ecall.fi/Position_papers_DG_eCall_v2.pdf

12. Position Paper – PSAP expert working group on PSAP eCall requirements, URL: http://www.ecall.fi/Appendixes/Appendix_8.pdf

13. Böhm M., Scheider T. Requirements on vehicle positioning and map referencing for co-operative systems – coopers, ITS World Congress, 2012, 12 p.

14. E. Arpin V., Shankwitz C., Donath M. A High Accuracy Vehicle Positioning System Implemented in a Lane Assistance System when GPS Is Unavailable, Final report, 2011, URL: http://conservancy.umn.edu/bitstream/handle/11299/149405/CTS11-18.pdf?sequence=1&isAllowed=y

15. Vehicle Safety Communications – Applications (VSC-A), URL: http://www.nhtsa.gov/DOT/NHTSA/NVS/Crash%20Avoidance/Technical%20Publications/2011/811492A.pdf

16. Precise Positioning – Automated Driving & Safety Communications, URL: http://www.gps.gov/governance/advisory/meetings/2013-12/shields.pdf

17. ISO 11270:2014. Интеллектуальные транспортные системы. Системы обеспечения движения по выделенной полосе. Требования к рабочим характеристикам и методы испытания, URL: http://www.iso.org/iso/ru/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=50347

18. A lane keeping assist system for passenger cars - design aspects of the user interface, URL: http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/pdf/esv/esv18/CD/proceed/00136.pdf

19. Autonomous Vehicle Implementation Predictions, URL: http://www.vtpi.org/avip.pdf

20. ГЛОНАССМОБИЛЬ // Межотраслевой журнал Вестник ГЛОНАСС, 2016, URL: http://vestnik-glonass.ru/stati/glonassmobil/

21. Google Self-Driving Car Project, URL: https://www.google.com/selfdrivingcar/

22. Google Self-Driving Car Project Monthly Report (June 2016), URL: https://static.googleusercontent.com/media/www.google.com/lt//selfdrivingcar/files/reports/report-0616.pdf

23. Model S Software Version 7.0, URL: https://www.tesla.com/presskit/autopilot

24. Driving autonomously through Nevada, URL: https://www.daimler.com/innovation/autonomous-driving/freightliner-inspiration-truck.html

25. Беспилотные грузовики в России, URL: http://transler.ru/articles/tehnologija/bespilotnie_gruzoviki_v_rossii.html

26. Беспилотные грузовики ударят по нам не хуже обычных, URL: https://thatsmart.ru/2015/06/self-driving-trucks-are-going-to-hit-us-like-a-human-driven-truck/

27. Аннотация к плану мероприятий («дорожной карте») по развитию рынка АвтоНэт Национальной технологической инициативы, URL: https://asi.ru/nti/docs/AutoNet.pdf

28. Groves P.D., Wang L., Walter D., Martin H., Voutsis K., Jiang Z. The Four Key Challenges of Advanced Multisensor Navigation and Positioning, Proc. IEEE/ION PLANS 2014, pp. 773-792

29. Wang L., Groves P.D., and M.K. Ziebart. Multi-Constellation GNSS Performance Evaluation for Urban Canyons Using Large Virtual Reality City Models, Journal of Navigation, Vol. 65, No. 3, 2012, pp. 459-476.

30. Groves, P.D., Jiang Z., Wang L., Ziebart M. Intelligent Urban Positioning using Multi-Constellation GNSS with 3D Mapping and NLOS Signal Detection, Proc. ION GNSS 2012, pp. 458 – 472.

31. Groves P.D., Jiang Z., Height Aiding, C/N0 Weighting and Consistency Checking for GNSS NLOS and Multipath Mitigation in Urban Areas, Journal of Navigation, Vol. 66, No. 5, 2013, pp. 653-659.

32. Groves P.D. Shadow Matching: A New GNSS Positioning Technique for Urban Canyons, Journal of Navigation, Vol. 64, 2011, pp. 95–105.

33. Wang L., Groves P.D., Ziebart M.K. GNSS Shadow Matching: Improving Urban Positioning Accuracy Using a 3D City Model with Optimized Visibility Prediction Scoring, Proc. ION GNSS 2012, pp. 423 – 437.

34. Wang L., Groves P.D., Ziebart M.K. Urban Positioning on a Smartphone: Real-time Shadow Matching Using GNSS and 3D City Models, Proc. ION GNSS+ 2013, pp. 1606 – 1619.

35. Bradbury J. Prediction of Urban GNSS Availability and Signal Degradation Using Virtual Reality City Models, Proc. ION GNSS 2007, Fort Worth, TX, September 2007, pp. 2696-2706.

36. Groves P.D., Jiang Z., Rudi M., Strode P. A Portfolio Approach to NLOS and Multipath Mitigation in Dense Urban Areas, Proc. ION GNSS+ 2013, pp. 3231 - 3247

37. Jiang Z., Groves P., Ochieng W.Y., Feng S., Milner C.D., Mattos P.G. Multi-Constellation GNSS Multipath Mitigation Using Consistency Checking, Proc. ION GNSS 2011, pp. 3889 – 3902.

38. Iwase T., Suzuki N., Watanabe Y. Estimation and exclusion of multipath range error for robust positioning, GPS Solutions, January 2013, Volume 17, Issue 1, pp 53–62, DOI 10.1007s/10291-012-0260-1.

39. Marais J., Berbineau M., Heddebaut M. Land Mobile GNSS Availability and Multipath evaluation Tool, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 54, No. 5, 2005, pp. 1697-1704.

40. Meguro J., et al. GPS Multipath Mitigation for Urban Area Using Omnidirectional Infrared Camera, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 10, No. 1, 2009, pp. 22-30.

41. Groves P.D. Principles of GNSS, Inertial and Multisensor Integrated Navigation Systems, Second Edition, Artech House, 2013, ISBN-13: 978-1608070053, 800 P.

42. Bahrami M., Ziebart M. Instantaneous Doppler-Aided RTK Positioning with Single-Frequency Receivers, Proc. IEEE/ION PLANS 2010, Indian Wells, CA, May 2010, pp. 70-78.

43. Hsu L.-T., Groves P.D., Jan S.-S. Assessment of the Multipath Mitigation Effect of Vector Tracking in an Urban Environment, Proc ION Pacific PNT, 2013, pp. 498 – 509.

44. Spangenberg M., et al. Detection of Variance Changes and Mean Value Jumps in Measurement Noise for Multipath Mitigation in Urban Navigation, Navigation: JION, Vol. 57, No. 1, pp. 35 – 52.

45. Obst M., Bauer S., Wanielik G., Urban Multipath Detection and mitigation with Dynamic 3D Maps for Reliable Land Vehicle Localization, Proc. IEEE/ION PLANS 2012, pp. 685 – 691.

46. Peyraud S., et al. About Non-Line-Of-Sight Satellite Detection and Exclusion in a 3D Map-Aided Localization Algorithm, Sensors, Vol. 13, 2013, pp. 829-847.

47. Bourdeau A., Sahmoudi M., Tourneret J.-Y. Tight Integration of GNSS and a 3D City Model for Robust Positioning in Urban Canyons, Proc. ION GNSS 2012, pp. 1263 – 1269.

48. Bradbury J., Ziebart M., Cross P., Boulton P., Read A. Code Multipath Modelling in the Urban Environment Using Large Virtual Reality City Models: Determining the Local Environment, Journal of Navigation, Vol. 60, 2007, pp. 95–105.

49. Braasch M.S. Multipath Effects, In Global Positioning System: Theory and Applications Volume I, Parkinson, B. W. and Spilker, J. J., Jr (eds), Washington, DC: AIAA, 1996, pp. 547–568.

50. Leisten O., Knobe V. Optimizing Small Antennas for Body-Loading Applications, GPS World, September 2012, URL: http://gpsworld.com/optimizing-small-antennas-for-body-loading-applications/

51. Brown A., Gerein N. Test Results from a Digital P(Y) Code Beamsteering Receiver for Multipath Minimization, Proc. ION 57th AM, Albuquerque, NM, June 2001, pp. 872–878.

52. Keshvadi M.H., Broumandan A., Lachapelle G. Analysis of GNSS Beamforming and Angle of arrival Estimation in Multipath Environments, Proc ION ITM, San Diego, CA, January 2011, pp. 427-435.

53. Soloviev A., van Graas F. Utilizing Multipath Reflections in Deeply Integrated GPS/INS Architecture for Navigation in Urban Environments, Proc. IEEE/ION PLANS, Monterey, CA, May 2008, p. 383-393.

54. Xie P., Petovello M.G., Basnayake C. Multipath Signal Assessment in the High Sensitivity Receivers for Vehicular Applications, Proc. ION GNSS 2011, Portland, OR, pp. 1764-1776.

55. Groves P.D., et al. Context Detection, Categorization and Connectivity for Advanced Adaptive Integrated Navigation, Proc. IONGNSS+ 2013, pp. 1039 – 1056.

56. Радионавигационный план РФ, URL: http://www.internavigation.ru/documents/RF-Plan2015.pdf

57. Леондес К.Т. Фильтрация и стохастическое управление в динамических системах. – М.: Мир, 1980, - 408 с.

58. Mubarak O.M., Dempster A.G. Analysis of Early Late Phase in Single- and Dual-Frequency GPS Receivers for Multipath Detection, GPS Solutions, Vol. 14, No. 4, 2010, pp. 381-388.

59. Mattos P.G. Multipath indicator to enhance RAIM and FDE in GPS/GNSS Systems, Patent Application No. 11112819.5, Filed July 2011.

60. Валайтите А. А., Никитин Д. П., Садовская Е. В. Исследование влияния ошибки многолучевости на точность определения параметров сигналов ГНСС (глобальных навигационных спутниковых систем) при помощи имитатора навигационного поля // Труды МАИ, 2014, №77: http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=52928