

Литература

- [1] Организация производства и управления предприятием / О.Г. Туровец, М.И. Бухалков, В.Б. Родинов и [др]. 2-е изд. М.: ИНФРА-М, 2009. 544 с.
- [2] Липсиц И.В., Коссов В.В. Экономический анализ реальных инвестиций. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Эксмо, 2004. 347 с
- [3] Котеров Д.В., Симдянов И.В. PHP 7. СПб.: БХВ-Петербург, 2016. 1088 с.
- [4] Дакетт Д. HTML и CSS. Разработка и дизайн веб-сайтов / пер. с англ. М.А. Райтмана. М.: Эксмо, 2013. 480 с.
- [5] Флэнаган Д. JavaScript. Подробное руководство. СПб: Символ-Плюс, 2008. 992 с.
- [6] How to use \$.ajax(). URL: <https://dev.to/williamragstad/how-to-use-ajax-3b5e> (дата обращения 19.10.2020).
- [7] Сергушкин В.В., Бодров О.А. Использование формата данных JSON для взаимодействий с пользователем при разработке программного обеспечения аппаратуры передачи данных // Современные технологии в науке и образовании – 2018: матер. Междунар. науч.-технич. форума. В 10 т. Рязань, 28 февраля – 2 марта 2018, Рязан. гос. радиотехн. ун-т. Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2018. Т. 5. С. 217–220.
- [8] Котельников И.А., Чеботаев П.З. LaTeX по-русски. Новосибирск: Сибирский хронограф, 2004. 489 с.
- [9] XML Tutorial. Volume 8: The XSLT Stylesheet and XPath. URL: <http://www.xmlmaster.org/en/article/d01/c08/> (дата обращения 19.10.2020).
- [10] Очков В.Ф. Mathcad 14 для студентов и инженеров: русская версия. СПб.: БХВ-Петербург, 2009. 512 с.
- [11] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021617133. Программа для конвертации файлов из XMCD в DOCX MathEssence / В.М. Мамедов. Заявка № 2021616315. Дата поступления 27 апреля 2021 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 11 мая 2021 г.
- [12] Официальное руководство по PHP. URL: <https://www.php.net/manual/ru/> (дата обращения 19.10.2020).

УДК 681.513

Компенсация отраженных сигналов спутниковой навигационной системы

Масленников Андрей Леонидович
МГТУ им. Н.Э. Баумана

amas@bmmstu.ru

Рассмотрены факторы, вызывающие погрешности навигационной информации при работе спутниковых навигационных систем. Исследованы погрешности, обусловленные многолучевой интерференцией. Представлены способы компенсации погрешностей спутниковой навигационной системы, позволяющие компенсировать влияние возмущающих факторов, в частности погрешностей, вызванных радиосигналами, отраженными от препятствий. Предложено построить модели отраженных сигналов с помощью эволюционных алгоритмов.

Ключевые слова: спутниковая навигационная система, многолучевая интерференция, компенсация погрешностей, алгоритмы построения моделей, систематическая составляющая погрешности, параметрическая идентификация

Управление различными динамическими объектами предполагает определение их параметров навигации и ориентации [1, 2]. При управлении летательными аппаратами, беспилотными автомобилями, объектами водного транспорта хорошо зарекомендовали себя системы инерциальной навигации [3, 4]. Эти системы отличаются достаточно высокой точностью и помехозащищенностью. Однако с течением времени работы погрешности инерциальных систем увеличиваются и использовать их для навигации динамических объектов не представляется возможным. Повышение точности навигационных определений достигается с помощью комплексирования инерциальных систем с системами, работающими на других физических принципах [5, 6]. Наиболее перспективными системами являются спутниковые навигационные системы (СНС): ГЛОНАСС, GPS, Beidou и др.

Цель настоящей статьи — рассмотреть факторы, вызывающие погрешности навигационной информации при работе спутниковых навигационных систем и исследовать погрешности, обусловленные многолучевой интерференцией.

Европейский проект EGNOS, использующий сигналы обеих систем, дает точность определения координат на территории Европы на уровне 1,5...3 м.

Спутниковые навигационные системы обладают достаточно высокой точностью, но слабой помехозащищенностью. В идеальном случае предполагается, что сигнал распространяется с непрерывной скоростью, которая равна скорости света. Однако на практике все гораздо сложнее. Прохождение радиосигнала от спутников через ионосферу и тропосферу приводит к его задержке, что приводит к ошибкам в измерениях дальности. Помимо этого также возможны ошибки в определении местоположения вызванные рассинхронизацией временной шкалы приемника и передатчика. В современных СНС приемниках используют всевозможные алгоритмы устранения этих задержек в том числе на основе различных моделей.

Многолучевая интерференция радиосигналов СНС также может служить причиной возникновения ошибок в определении местоположения с помощью СНС. Причиной этого является отражение радиосигнала от объектов, расположенных на земной поверхности, что в результате создается интерференция с сигналами приходящими непосредственно со спутников. Другими словами приемник СНС детектирует несколько радиосигналов от одного спутника, но с разным временем прихода. В результате этого процесс определения навигационной информации затрудняется. Специальные аппаратные и алгоритмические решения обработки сигнала позволяют снизить влияние данной помехи, но не исключить его полностью. При этом в современных системах погрешности навигационных определений, вызванные многолучевой интерференцией, достигают значительных величин.

Рассмотрим один из доминирующих возмущающих факторов, влияющих на точность навигационных определений — многолучевую интерференцию, обусловленную многопутностью распространения радиосигнала. Особая актуальность исследования этого возмущающего фактора проявляется при движении беспилотной машины или летательного аппарата в городских условиях [7, 8]. Решение задачи компенсации ошибок определения координат и скоростей объекта, вызванных многолучевой интерференцией радиосигналов от СНС необходимо для формирования управления беспилотного транспорта в черте города. Эффект многолучевой интерференции проявляется в результате вторичных отражений сигнала спутника от крупных препятствий, расположенных в непосредственной близости от приемника СНС. При этом возникает

явление интерференции, и измеренное расстояние оказывается больше действительного. Отметим также, что данный эффект может проявляться и при отражении радиосигналов и от водной поверхности.

Итоговые ошибки определения координат и скоростей подвижного объекта могут достигать десятков метров и в общем случае содержат как систематическую, так и не-систематическую составляющие. Получить математическую модель данной погрешности в аналитическом виде достаточно трудно, наилучшим способом борьбы с ней считается рациональное размещение антенны приемника относительно препятствий.

При движении объекта — носителя приемника СНС — по заранее неизвестному маршруту редко удается сохранить и поддерживать в динамике удачное расположение антенны. Поэтому для компенсации погрешности СНС в схеме комплексирования инерциальной системы с СНС используют описание ошибок вызванных многолучевой интерференцией (также как и других ошибок) в виде случайного процесса типа белый шум.

Такое представление ошибок измерения является универсальным и широко используется на практике. Однако в случае движения в условиях городской застройки или аналогичных условиях с обилием отражающих поверхностей, когда ошибки многолучевой интерференции являются доминирующими, целесообразно использовать более точное представление этой погрешности. Например, представить погрешность, вызванную многолучевой интерференцией в виде математической модели, описывающей систематическую составляющую погрешности СНС.

Такую модель можно представить в виде набора некоторых базисных функций, которыми, например, могут выступать полиномиальные функции. В этом случае в процессе работы системы необходимо либо выбирать лучшую математическую модель из нескольких, что может быть решено с использованием различных критериев и применением, например федеративного фильтра Калмана. Данный вариант наиболее полно подойдет для систематических составляющих, вызванных, например достаточно большими препятствиями на пути радиосигнала.

Альтернативным подходом можно считать построение математической модели в процессе функционирования системы. Данный подход может более точно определить составляющую ошибки от многолучевой интерференции, вызванную, достаточно небольшими препятствиями, которые нарушают прямую видимость навигационных спутников не короткий промежуток времени. В общем случае можно использовать комбинацию этих подходов.

В качестве еще одного подхода можно выделить ограниченное множество моделей с различной структурой, например, полиномы различного порядка, а также полиномы с перекрестными нелинейными компонентами, и неизвестными параметрами — коэффициентами. Определение коэффициентов в этих полиномах в совокупности с идеей выбора наиболее адекватной модели, описывающей систематическую модель погрешностей СНС, вызванную многолучевой интерференцией, возможно осуществить с использованием методов рекурсивной параметрической идентификацией. Для решения этой задачи бортовой вычислитель должен обладать достаточным быстродействием.

Для построения подобных моделей можно использовать различные подходы. Например, эволюционные алгоритмы хорошо отработаны на практике и позволяют строить модели с высокой точностью. Самыми распространенными эволюционными алгоритмами являются алгоритмы самоорганизации [9, 10], нейронные сети [11] и генетические алгоритмы [12]. Использование алгоритмов самоорганизации основано на селекции моделей-претендентов.

Адекватность выбранной математической модели определяется по минимуму критериев селекции. Использование критериев, каждый из которых осуществляет многозначный выбор модели, усложняет реализацию алгоритмов. Таким образом, методом самоорганизации может быть получена математическая модель отраженного от препятствия сигнала, которая в дальнейшем используется для коррекции навигационных определений динамического объекта. Наиболее популярным алгоритмом самоорганизации является метод группового учета аргументов [13, 14].

Литература

- [1] Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Власов С.В. Алгоритмические способы повышения точности автономных навигационных систем // Труды ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы управления. 2010. № 3. С. 68–74.
- [2] Джанджгава Г. И., Бабиченко А.В., Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Селезнева М.С. Навигационный комплекс с повышенными характеристиками наблюдаемости и управляемости // Авиакосмическое приборостроение. 2016. № 6. С. 18–24.
- [3] Неусыпин К.А., Логинова И.В. Вопросы теории и реализации интеллектуальных систем. М.: Сигнал МПУ, 1999. 202 с.
- [4] Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Цибизова Т.Ю. Системы управления летательными аппаратами и алгоритмы обработки информации. М.: Изд-во МГОУ, 2006. 219 с.
- [5] Шэнь К., Пролетарский А.В., Неусыпин К.А. Исследование алгоритмов коррекции навигационных систем летательных аппаратов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2016. № 2 (107). С. 28–39. DOI: 10.18698/0236-3933-2016-2-28-39
- [6] Пупков К.А., Неусыпин К.А. Вопросы теории и реализации систем управления и навигации. М.: Биоинформ, 1997. 363 с.
- [7] Яковлев К.С., Макаров Д.А., Баскин Е.С. Метод автоматического планирования траектории беспилотного летательного аппарата в условиях ограничений на динамику полета // Искусственный интеллект и принятие решений. 2014. № 4. С. 3–17.
- [8] Поспелов П.И., Косцов А.В., Мартяхин Д.С., Мартяхин К.Ю. Применение беспилотных летательных аппаратов при исследовании режимов движения автомобилей // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2018. № 2. С. 93–98.
- [9] Ивахненко Г.А. Алгоритм комплексирования аналогов для самоорганизации дважды многоуровневых нейронных сетей // УСИМ: Управляющие системы и машины. 2003. № 2. С. 100–106.
- [10] Фам С.Ф., Неусыпин К.А., Селезнева М.С. Разработка компактного алгоритма самоорганизации // Международная научно-практическая конференция «Наука сегодня: проблемы и пути решения»: сб. трудов. Вологда, 30 марта 2016 г., научный центр «Диспут». Вологда: Маркер, 2016. № 2. С. 64–65.
- [11] Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. 224 с.
- [12] Гладков Л., Курейчик В., Курейчик В. Генетические алгоритмы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 368 с.
- [13] Степашко В.С., Булгакова А.С. Обобщенный итерационный алгоритм метода группового учета аргументов // Управляющие системы и машины. 2013. № 2. С. 5–17. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/USM_2013_2_3 (дата обращения 26.06.2021).
- [14] Фам С.Ч., Неусыпин К.А., Селезнева М.С. Исследование системы маршрутной коррекции навигационной системы БЛА // XXVII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Санкт-Петербург, 25 мая – 5 июня 2020 г., ГНЦ РФ АО «Концерн “ЦНИИ “Электрон”». СПб., 2020. С. 346–348.