

УДК 621.396

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ КООРДИНАТ И ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ РЕТРАНСЛЯЦИИ НАВИГАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ GPS

Пряничников В.В.¹, магистрант гр. 345241

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники¹
г. Минск, Республика Беларусь

Козлов С.В. – д-р. техн. наук, профессор

Аннотация. Компьютерная модель разрабатывается в интересах оценки точности предложенного в [1] способа оценивания координат и параметров движения мобильных объектов на основе ретрансляции сигналов GPS, а также в интересах обоснования способов обработки сигналов при решении указанной задачи. В статье отражена структура компьютерной модели, основные задачи составляющих ее частей, принципы моделирования взаимного перемещения навигационных спутников (НС), мобильного объекта (МО) и наземного приемного пункта (НПП), алгоритм формирования ретранслированного мобильным объектом сигнала и его обработки.

Ключевые слова. Компьютерная модель, мобильный объект, оценивание координат, глобальные навигационные спутниковые системы, навигационный сигнал.

Введение

В [1] предложен способ оценивания координат и параметров движения мобильных объектов на основе ретрансляции сигналов GPS. Показано, что предложенный способ позволяет компенсировать недостатки традиционного решения исходной задачи и обеспечить возможность оценивания координат мобильного объекта в реальном масштабе времени без постобработки со средними квадратическими ошибками порядка 2,5..4 м.

Способ предусматривает ретрансляцию мобильным объектом сигнала L_1 GPS на произвольную (свободную) частоту, прием прямого и ретранслированного навигационных сигналов наземным приемным пунктом с известными координатами, определение местоположения МО суммарно-дальномерным способом с коррекцией измеряемых навигационных параметров по прямому навигационному сигналу и фильтрацию траектории объекта в соответствии с выбранной моделью движения. Основой для предлагаемого способа является способ оценивания полного электронного содержания в ионосфере на основе ретрансляции навигационных сигналов GPS [2].

Примером актуальности исходной задачи являются задачи высокоточного определения координат сельскохозяйственной техники и беспилотных летательных аппаратов при точном земледелии [3,4] и определение координат БЛА с бортовым радиолокатором с синтезированной апертурой для гуманитарного разминирования [5].

Компьютерная модель позволяет учесть особенности расположения и взаимного перемещения элементов системы, изменения, которым подвергаются сигналы на трассах распространения, технические особенности аппаратуры передачи, приема и обработки сигналов.

Структурно компьютерную модель можно разделить на четыре части: кинематическую модель взаимного перемещения навигационных спутников, мобильного объекта и наземного приемного пункта, математическую модель сигналов, модель обработки сигналов, принимаемых на наземном приемном пункте, и модель оценивания координат и параметров движения мобильного объекта.

Кинематическая модель решает следующие задачи:

- расчет координат и параметров движения элементов системы;
- определение признака видимости навигационного спутника с наземного приемного пункта в заданный момент времени;
- аппроксимация дальности между элементами системы в заданный момент времени на интервале до единиц секунд.

С помощью математической модели сигналов можно воспроизвести временную структуру следующих сигналов:

- излучаемых навигационными спутниками;
- принимаемых мобильным объектом;
- ретранслируемого мобильным объектом;
- принимаемых наземным пунктом приема.

Полученные реализации сигналов позволяют обосновать способы и алгоритмы их обработки.

Обработка сигналов происходит на НПП. В результате обработки из сигналов выделяется полезная информация – навигационное сообщение и суммарная дальность. Эти данные передаются в модель оценивания координат и параметров движения объекта для решения исходной задачи.

Кинематическая модель

Моделирование взаимного перемещения элементов системы осуществляется с использованием бортовых эфемерид навигационных спутников, географических координат наземного приемного пункта и географических координат и скоростей их изменения для мобильного объекта. Результаты моделирования используются для определения признаков видимости, а также для аппроксимации истинных дальностей между элементами системы при моделировании принимаемых на НПП сигналов.

Координаты навигационных спутников рассчитываются в системе координат *LLA* (*Latitude*, *Longitude*, *Altitude* – широта, долгота, высота). Расчет координат осуществляется на основании бортовых эфемерид с использованием стандартных алгоритмов [6]. Наземный приемный пункт имеет заданные координаты в системе *LLA*, которые не изменяются с течением времени. Начальные координаты мобильного объекта также задаются в системе *LLA*. Объект движется из заданной точки с постоянной скоростью по широте, долготе и высоте.

Для расчета дальности между элементами системы координаты из системы *LLA* пересчитываются в декартовую геоцентрическую систему координат с учетом сплюснутости Земли. Дальности в системе меняются нелинейно. Расчет истинной дальности в каждый момент времени на интервале моделирования сигнала требует значительных вычислительных и временных затрат. Поэтому целесообразно закон изменения истинной дальности заменить на аппроксимированный.

Для относительно коротких временных интервалов для аппроксимации составляющих суммарной дальности может быть принята модель вида

$$r(t) = r_0 + V_{0r}(t-t_0) + \frac{1}{2}a_r(t-t_0)^2 + \frac{1}{6}a_r''(t-t_0)^3 + \frac{1}{24}a_r'''(t-t_0)^4 + \dots, \quad (1)$$

где $r_0 = R(t_0)$ – начальная дальность; $V_{0r} = \left. \frac{d}{dr} R(t) \right|_{t=t_0}$ – начальная радиальная скорость;

$a_r = \left. \frac{d^2}{dr^2} R(t) \right|_{t=t_0}$ – начальное радиальное ускорение; $a_r^{(n)} = \left. \frac{d^{n-2}}{dr^{n-2}} R(t) \right|_{t=t_0}$ – n -я производная

радиального ускорения; $R(t)$ – закон изменения дальности между двумя точками.

Для определения степени полинома, которым будет аппроксимирован закон изменения истинной дальности, были рассмотрены временные интервалы длительностью 200 мс, равные времени когерентного накопления ретранслированного с МО сигнала [1], когда скорость изменения радиального ускорения НС – МО и МО – НПП максимальна. Моделирование показало, что на рассмотренных интервалах радиальное ускорение между МО и НПП может составлять единицы м/с², а между НС и МО – порядка 0,5 м/с². При этом ошибка аппроксимации не превышает 10% от длины волны ретранслированного сигнала, и, следовательно, ошибка аппроксимации дальности не окажет влияние на процесс когерентного накопления ретранслированного сигнала. Отметим, что рассматривалась минимальная длина волны ретранслированного сигнала, рассчитанная исходя из указанных в [1] возможных диапазонов частот для ретранслированного сигнала в Республике Беларусь.

Исходная задача – оценивание координат и параметров движения мобильного объекта – решается путем обработки принятых на наземном приемном пункте сигналов с навигационных спутников и мобильного объекта и анализа полученных данных. Ретранслируемый с мобильного объекта на НПП сигнал формируется за счет принятых на мобильном объекте сигналов навигационных спутников. На наземном приемном пункте должны быть приняты и обработаны как ретранслированный сигнал, так и сигналы с НС, которые были использованы при формировании ретранслированного сигнала. Предполагается, что МО будет находиться на небольшом расстоянии от НПП – около 10 км. Тогда можно полагать, что в заданный момент времени и наземный приемный пункт, и мобильный объект принимают сигналы от одних и тех же навигационных спутников.

Сформируем признак видимости навигационного спутника с Земли.

$$\gamma > 90^\circ + \gamma_{\text{закр}}, \quad (2)$$

где γ – угол между вектором, соединяющим наземный приемный пункт и центр Земли, и вектором, соединяющим наземный приемный пункт и навигационный спутник; $\gamma_{\text{закр}}$ – угол закрытия, обусловленный рельефом местности и местными предметами.

Таким образом, разработанная кинематическая модель позволяет в заданный момент времени определить координаты элементов системы и дальности между ними, а также созвездие спутников, сигналы которых могут быть приняты на Земле. Показано, что для аппроксимации дальности в

контексте решаемой задачи достаточно использовать полиномы второй степени. Параметры указанных полиномов представляют собой радиальные скорости и ускорения.

Моделирование ретранслированного сигнала и его обработки

Реализация модели принимаемого на НПП сигнала необходима для обоснования способов и алгоритмов его обработки.

Формирование ретранслированного сигнала включает в себя следующие этапы:

- расчет аппроксимаций дальностей на трассах НС – МО и МО – НПП;
 - расчет амплитуды принимаемого от НС сигнала, законов изменения времени задержки и фазы;
 - воспроизведение законов модуляции и временной структуры сигналов от одного НС с учетом изменения времени задержки и фазы;
 - суммирование сигналов от всех видимых НС.
- Принимаемый на НПП ретранслированный сигнал:

$$\dot{U}_{\text{рет}} = \sum_i \dot{U}_{\text{рет}i} + \dot{U}_{\text{ш}} \quad (3)$$

где $\dot{U}_{\text{рет}i}$ – сигнал от i -го НС в составе принимаемого ретранслированного сигнала; $\dot{U}_{\text{ш}}$ – внутренний шум приемника НПП, а суммирование ведется по всем видимым НС.

Сигнал от i -го НС в составе принимаемого ретранслированного сигнала представим в виде

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{рет}i} &= \dot{U}_{\text{НС}i} \cdot \dot{U}_{\text{м}} \left(\frac{r_1(t)}{c} - \frac{r_2(t)}{c} \right) e^{-j2\pi f_1 \frac{r_1(t)}{c}} e^{j2\pi f_p \left(t - \frac{r_2(t)}{c} \right)} \approx \\ &\approx D_{\text{НС}i}(t) \dot{U}_{\text{м}} \left(\frac{r_{01} + r_1(t)}{c} - \frac{r_{02} + r_2(t)}{c} \right) e^{-j2\pi f_1 \frac{r_{01} + r_1(t)}{c}} e^{j2\pi f_p \left(t - \frac{r_{02} + r_2(t)}{c} \right)} \times \\ &\times e^{-j \frac{2\pi}{\lambda_p} \left(\left(\frac{\lambda_p}{\lambda_1} V_{r1} + V_{r2} \right) t + \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda_p}{\lambda_1} a_{r1} + a_{r2} \right) t^2 \right)} e^{j2\pi f_p t}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\dot{U}_{\text{НС}i}$ – закон внутриимпульсной модуляции (дальномерный код) навигационного сигнала i -го НС;

A_i – амплитуда сигнала; $\lambda_1 = c / f_1 = 0,19$ м; $\lambda_p = c / f_p$ – длина волны навигационного и ретранслированного сигналов; $r_1(t), r_2(t)$ – законы изменения дальности между i -м НС – МО и МО – НПП, которые аппроксимируются полиномом второй степени, параметрами которого являются радиальная скорость и радиальное ускорение между НС и МО и МО и НПП соответственно.

Алгоритм обработки сигнала:

- перенести сигнал на нулевую частоту;
- перевести сигнал в цифровую форму с частотой дискретизации > 1 МГц;
- провести демодуляцию по навигационному сообщению;
- осуществить внутрипериодное накопление на длительности навигационного сигнала, равной 1 мс;
- полученные последовательности отсчетов на выходе ВПО разделить по периодам повторения и сформировать матрицу отсчетов сигналов по периодам повторения;
- скорректировать временные положения сигналов в каждом периоде повторения с использованием интерполяции;
- над полученной матрицей выполнить операцию ДПФ «по строкам» и вычислить квадраты модулей отсчетов ДПФ с формированием матрицы «дальность-скорость»;
- по отсчетам матрицы провести обнаружение ретранслированного сигнала и измерить суммарную дальность по собственным часам приемной аппаратуры.

По измеренным и скорректированным значениям суммарных дальностей по ретранслированному сигналу для соответствующего числа видимых НС необходимо решить навигационную задачу и определить декартовы координаты $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ объекта.

Полученные значения используются для фильтрации координат с использованием расширенного фильтра Калмана [7]. По результатам фильтрации оценивается вектор состояния объекта

$$\theta = (x, \dot{x}, y, \dot{y}, z, \dot{z})^T$$

(5)

где $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ – составляющие скорости по осям координат; $\delta \dot{x}, \delta \dot{y}, \delta \dot{z}$ – приращения скорости.

Таким образом, компьютерная модель позволяет смоделировать сигналы, принимаемые на НПП, а также дальнейшую их обработку и непосредственно оценивание координат и параметров движения МО. Полученные результаты можно сравнить с данными моделирования движения мобильного объекта и сделать вывод об эффективности предлагаемого способа.

Список использованных источников:

1. Пряничников В.В. Оценивание координат мобильных объектов на основе ретрансляции навигационных сигналов GPS / В.В. Пряничников, С.В. Козлов // Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2024 : материалы открытой республиканской науч.-практ. интернет-конф., Минск, 21–22 ноября 2024 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск : БГУИР, 2024. – С. 172–178.
2. Способ оценивания полного электронного содержания в ионосфере на основе ретрансляции сигналов глобальной навигационной спутниковой системы GPS / И. В. Белоконов [и др.] // Информатика. – 2023. – Т. 20, № 2. – С. 7–27. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-2-7-27>.
3. Liu, Y.; Ma, X.; Shu, L.; Hancke, G.P.; Abu-Mahfouz, A.M. From Industry 4.0 to Agriculture 4.0: Current Status, Enabling Technologies, and Research Challenges. *IEEE Trans. Ind. Inform.* 2021, 17, 4322–4334.
4. Chen, P.; Ouyang, F.; Zhang, Y.; Lan, Y. Preliminary Evaluation of Spraying Quality of Multi-Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Close Formation Spraying. *Agriculture* 2022, 12, 1149.
5. Киевский А.М. Облик бортового радиолокатора с синтезированием апертуры на беспилотном летательном аппарате для гуманитарного разминирования / А.М. Киевский, Д.Н. Понедько, Х.Х. Науен, С.В. Козлов // Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2024 : материалы открытой республиканской науч.-практ. интернет-конф., Минск, 21–22 ноября 2024 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск : БГУИР, 2024. – С. 167–171.
6. Конин, В. В. Системы спутниковой радионавигации / В. В. Конин, В.П. Харченко. – Киев : Холтех, 2010. – 520 с.
7. Singer, R.A. Оценка характеристик оптимального фильтра для слежения за пилотируемой целью / Singer, R.A. / Зарубежная радиоэлектроника. – М.: Сов. радио, № 8, 1971.

UDC 621.396

A COMPUTER SIMULATION MODEL FOR ESTIMATING THE COORDINATES AND MOTION PARAMETERS OF MOBILE OBJECTS BASED ON GPS SIGNALS RETRANSMISSION

Pranichnikau V.V.¹

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics¹, Minsk, Republic of Belarus

Kozlov S.V. – Dr of Technical Sciences, Professor

Annotation. The computer model is being developed to assess the accuracy of the method proposed in [1] for estimating the coordinates and motion parameters of mobile objects based on GPS signal retransmission, as well as to justify signal processing methods for solving the specified problem. The article presents the structure of the computer model, the main tasks of its components, the principles of simulating the relative motion of navigation satellites, the mobile object, and the ground receiving station, as well as the algorithm for generating the signal retransmitted by the mobile object and its subsequent processing.

Keywords. Computer model, mobile object, estimating the coordinates, global navigation satellite systems, navigation signal.