

Хронометрический метод определения координат

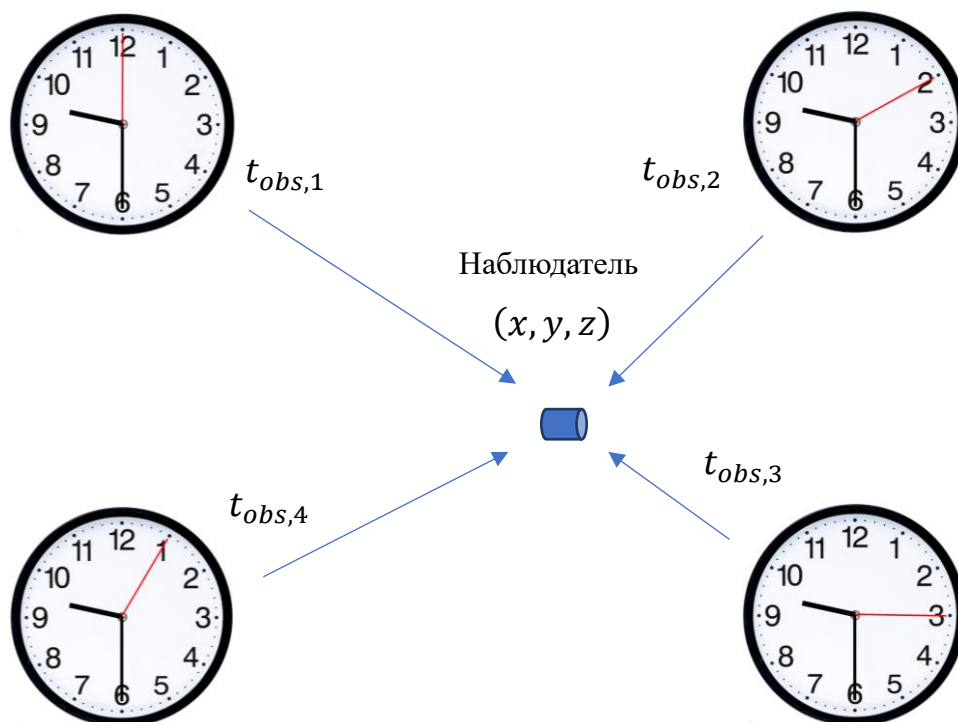
д.т.н. Плясовских Александр Петрович

Аннотация. Представлен принципиально новый хронометрический метод определения координат движущегося объекта (космического аппарата, воздушного судна, транспортного средства), ближайшим аналогом которого является псевдодальномерный метод. Преимуществом хронометрического метода по сравнению с аналогами является то, что он обеспечивает возможность определения координат объекта при асинхронных (неодновременных) импульсных сигналах, излучаемых неподвижными или движущимися маяками. Потенциальная точность хронометрического метода имеет порядок миллиметра. Хронометрический метод может применяться для разработки разнообразных высокоточных радиотехнических средств наблюдения, навигации и посадки в авиации и космонавтике.

Работа предназначена для научных работников, инженеров, преподавателей, аспирантов и студентов вузов, изучающих дисциплины «Навигация и управление воздушным движением», «Аэронавигация», «Радиолокация и радионавигация», «Инновационные технологии в аэрокосмической деятельности», а также для разработчиков авиационных и космических радиотехнических систем.

Графическая аннотация

Хронометрический метод определения координат



По наблюдаемым показаниям четырех часов определяют координаты наблюдателя и момент времени измерения координат

Об авторе

Александр Петрович Плясовских – доктор технических наук, специалист в области навигации и управления воздушным движением (УВД), радиолокации и радионавигации. Профессиональные интересы: разработка средств авиационного наблюдения, средств организации воздушного движения, автоматизированных систем УВД, тренажеров для тренировки диспетчерского состава УВД.



Фото: 2012 г.

Научные результаты автора опубликованы в российских изданиях ВАК, а также за рубежом (в том числе в издательстве Springer). Автор более 130 научных работ, нескольких монографий и учебных пособий, изобретений. Является научным руководителем аспирантов и докторантов, членом диссертационного совета.

Наиболее значимые работы автора:

1. Плясовских, А. П. Хронометрический метод определения четырехмерных координат движущегося объекта с использованием радиовещательных маяков / А. П. Плясовских // Электросвязь. – 2025. – № 12. – С. 34-42. – DOI 10.34832/ELSV.2025.74.12.005.

В работе, основанной на теории аберрации величин движущихся тел, представлен принципиально новый хронометрический метод определения координат движущегося объекта (космического аппарата, воздушного судна, транспортного средства). Хронометрический метод обладает рядом преимуществ по сравнению с псевдодальномерным методом определения координат.

2. Плясовских А. П. Теория аберрации. Первая теория, альтернативная специальной теории относительности [Электронный ресурс]. — М.: Знание-М, 2023. — 503 с. — ISBN 978-5-00187-483-6. <https://www.litres.ru/book/a-p-plyasovskikh/teoriya-aberracii-pervaya-teoriya-alternativnaya-specialno-69424369/>

3. Plyasovskikh A.P. Eshmuradov D.E. Theory of aberration – an alternative to the special theory of relativity. – T.: «Fan va texnologiyalar mashriyot-matbaa uyi» 2024, 432 p. – ISBN: 978-9910-748-53-0.

4. Плясовских А. П. Закон абберрации и его приложения в навигации и управлении воздушным движением. — М.: Знание-М, 2022. — 70 с. — ISBN 978-5-00187-223-8. <https://www.litres.ru/a-p-plyasovskih/zakon-aberracii-i-ego-prilozheniya-v-navigacii-i-67775394/>

В работах представлена разработанная автором теория абберрации величин движущихся тел, представляющая собой альтернативу специальной теории относительности. Теория абберрации подтверждена двумя экспериментами.

5. Плясовских А. П. и другие. Эксперимент по измерению наблюдаемого темпа хода движущихся часов //Автоматика и программная инженерия. 2022, №4(42) URL: <http://www.jurnal.nips.ru/sites/default/files/AaSI-4-2022-4.pdf>

Это уникальная работа, написанная в соавторстве 100 человек (включая 8 докторов наук, 24 кандидата наук и 20 аспирантов). В работе изложены результаты эксперимента, подтверждающие закон абберрации величин движущегося тела, представленный в настоящей работе. Автор участвовал в эксперименте в качестве научного руководителя.

6. Плясовских А. П. Идеальная синхронизация множества движущихся с релятивистскими скоростями часов / А. П. Плясовских // Вестник метролога. – 2025. – № 4. – С. 3-8.

В работе представлена теория идеальной синхронизации множества движущихся с релятивистскими скоростями часов. До опубликования этой работы считалось, что такая синхронизация в принципе невозможна.

7. Плясовских А. П. Закон воспринимаемой опасности авиационных событий на примере управления воздушным движением / А. П. Плясовских, Ю. Ю. Михальчевский // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. – 2024. – № 2(43). – С. 40-56.

8. Плясовских А. П. Подтверждение закона воспринимаемой опасности авиационных событий / А. П. Плясовских, Ю. Ю. Михальчевский // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. – 2024. – № 3(44). – С. 56-69.

9. Плясовских А. П. Главная проблема безопасности полетов и ее решение // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. – 2025. – № 3. – С. 14-31.

В работах представлена теория опасности полетов, впервые предложена количественная величина для количественного измерения опасности полетов воздушных судов. Значимость перехода к количественному измерению опасности полетов сравнима со значимостью перехода от качественной величины измерения температуры тела со значениями: «нормальная», «высокая», «жар», к количественному ее измерению с помощью термометра.

Должность: главный конструктор средств организации воздушного движения АО «НПО Северо-Западный региональный центр Концерна ВКО «Алмаз-Антей» - Обуховский завод», г. Санкт-Петербург; профессор кафедры №22 «Организация и управление в транспортных системах» ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова».

Этапы жизненного пути:

Родился в 1960 г.

1980 – окончил УАЦ ДОСААФ, офицер запаса.

Типы воздушных судов (ВС), на которых летал: Л-29, УТИ МиГ-15, МиГ-17.

1985 – Актюбинское высшее летное училище гражданской авиации (АВЛУГА), ленинский стипендиат. Специальность – эксплуатация воздушного транспорта, квалификация – инженер-пилот.

Типы ВС: Як-18Т, Як-40.

1985-1992 – Архангельский объединенный авиаотряд, Ленинградский объединенный авиаотряд.

Типы ВС: Ту-134А.

1990 – окончил аспирантуру ордена Ленина Академии гражданской авиации (ОЛАГА), направление подготовки – инженер-исследователь.

1991 – защитил кандидатскую диссертацию, кандидат технических наук, специальность: 05.22.13 Навигация и УВД.

1997-2007 – Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, доцент, профессор кафедры 22, заместитель начальника тренажерного центра.

2006 – защитил докторскую диссертацию, доктор технических наук, специальность: 05.22.13 Навигация и УВД.

2007-2024 – АО «Ордена Трудового Красного Знамени Всероссийский научно-исследовательский институт радиоаппаратуры» (АО «ВНИИРА»), г. Санкт-Петербург.

Должность: главный конструктор Научно-технического центра «Организация воздушного движения»,

2024 – настоящее время: Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Северо-Западный региональный центр Концерна ВКО «Алмаз-Антей» - Обуховский завод», главный конструктор средств организации воздушного движения,

профессор кафедры № 22 «Организация и управление в транспортных системах» ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова».

Область научных интересов: навигация и управление воздушным движением, безопасность полетов, аэронавигация, радиолокация, радионавигация, физика (кинематика околосветовых скоростей), математика (четырёхмерное пространство-время для описания движения материальных объектов).

E-mail: al.plyasovskih@yandex.ru

Введение

В работе представлен **принципиально новый метод радионавигации**: хронометрический метод определения координат движущегося объекта (космического аппарата, воздушного судна, транспортного средства) [1]. Этот метод разработан автором на основе закона абберации величин движущегося тела, который также открыт автором [2-4].

Представленный хронометрический метод:

- открывает новые возможности для написания широкого круга докторских и кандидатских диссертаций по специальностям 2.9.6 Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники, 2.2.16 Радиолокация и радионавигация и другим;

- открывает новые возможности написания широкого круга научных статей, что необходимо аспирантам, докторантам, их научным руководителям и консультантам, научно-педагогическому составу;

- обеспечивает возможность разработки принципиально новых (основанных на хронометрическом методе) разнообразных высокоточных радиотехнических средств наблюдения, навигации и посадки в авиации и космонавтике;

- обеспечивает дальнейшее развитие такой науки, как радионавигация, основной задачей которой является определение местоположения движущихся и неподвижных объектов.

Одной из основных задач аэронавигации и радионавигации является определение координат движущихся объектов (космических аппаратов, воздушных судов, транспортных средств).

О названии метода. Хронометрический метод определения координат объекта представляет собой метод определения местоположения объекта в декартовой системе координат [1], который принципиально отличается от известных аналогичных методов.

Слово «хронометрический» происходит от двух древнегреческих слов: χρόνος (chronos) – «*время*» и μέτρον (metron) – «*мера*», «*измерение*».

Таким образом, дословно «хронометрический метод» – это метод, основанный на точном измерении наблюдаемого времени.

Следует **различать математическую суть** (математическую составляющую) метода и его использование в прикладных целях, для измерения координат объекта на практике. Задача этой работы заключается в том, чтобы изложить только математическую суть хронометрического метода, не касаясь особенностей его прикладного практического использования.

Аналогами хронометрического метода являются псевдодальномерный метод (ближайший аналог), дальномерный и разностно-дальномерный методы.

Хронометрический метод *отличается* от аналогов тем, что измеряемым навигационным параметром в нем является *наблюдаемое время* часов, координаты которых известны. В псевдодальномерном методе навигационным параметром является псевдодальность до навигационного спутника, в дальномерном методе навигационным параметром является дальность до некоторой радионавигационной точки, в разностно-дальномерном методе навигационным параметром является разность расстояний между объектом и двумя радионавигационными точками.

Наблюдаемое время часов – это относительно новый термин, впервые введенный в *теории аберрации величин движущегося тела* (эта теория является первой теорией, альтернативной специальной теории относительности; достоверность теории аберрации подтверждена экспериментально) [2-4].

Понятия и определения

В настоящей работе будем использовать следующие понятия и определения.

Время часов (или просто время). Показание часов.

Наблюдаемое время часов – это показание часов, наблюдаемое удаленным от них наблюдателем. Если, например, наблюдатель в какой-то момент сфотографирует циферблат наблюдаемых им часов, то на фотоснимке будут запечатлено наблюдаемое показание часов в момент съемки.

Истинное время часов – это показание часов, наблюдаемое неподвижным наблюдателем, находящимся в непосредственной близости от часов.

Наблюдаемое время часов **отличается** от *истинного времени* этих часов на величину задержки, которая требуется свету для того, чтобы от циферблата часов дойти до наблюдателя.

Истинное и наблюдаемое время часов *текут*. Скорость течения наблюдаемого времени отличается от скорости течения истинного времени при движении часов и наблюдателя друг относительно друга. Другими словами, наблюдаемый темп хода часов отличается от истинного темпа хода этих часов при относительном движении часов и наблюдателя.

Темп (скорость) хода часов. Быстрота изменения показаний часов. Темп хода часов со стрелочным циферблатом характеризует угловую скорость вращения стрелок на циферблате, а также линейную скорость движения концов стрелок по окружности циферблата. Чем больше темп хода часов, тем быстрее стрелки этих часов движутся по циферблату. В настоящей работе будем считать, что темп хода часов является равномерным, и не имеет случайной составляющей. Однако темп хода разных часов может быть разным. Это может быть причиной рассинхронизации часов.

Благодарность. Пользуясь случаем, выражаем благодарность всем коллегам, с которыми проводилось обсуждение различных аспектов этой книги, а также Плясовских Галине Алексеевне за редактирование работы.

Выражаем особую благодарность Ивановскому Николаю Николаевичу за поддержку в издании этой книги.

1. Хронометрический метод определения координат

Физическая суть хронометрического метода

Физическую суть хронометрического метода можно проиллюстрировать на следующем примере.

Пусть в декартовой системе координат $OXYZ$, в точках с известными координатами (x_i, y_i, z_i) расположены синхронизированные между собой неподвижные часы, где i – номер часов, $i = \overline{1,4}$. В точке с неизвестными координатами (x, y, z) , которые требуется определить, находится наблюдатель. Гипотетически наблюдателем может быть человек, наблюдающий за показаниями часов с использованием оптических приборов. На практике в качестве наблюдателя может служить аппаратура, позволяющая методом косвенных измерений определять наблюдаемые показания часов в тот или иной момент времени.

Пусть в некоторый момент времени наблюдатель одновременно фиксирует наблюдаемые показания $t_{obs,i}$ всех четырех i -х часов. В обозначении $t_{obs,i}$ нижний индекс «*obs*» – от англ. *observe*, *наблюдать*.

Для наглядной иллюстрации гипотетически можно представить, что в некоторый момент наблюдатель с помощью панорамного фотоаппарата одновременно делает фотоснимки всех четырех часов, на которых запечатлены их наблюдаемые показания $t_{obs,i}$.

Наблюдаемые показания i -х часов являются измеряемым навигационным параметром при решении задачи определения местоположения наблюдателя хронометрическим методом.

Если расстояния $d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}$ между наблюдателем и различными часами в момент наблюдения являются разными, то и наблюдаемые показания $t_{obs,i}$ i -х часов также будут отличаться друг от друга.

Для практического использования хронометрического метода в авиационных навигационных системах наблюдаемое время нужно измерять с точностью до наносекунд (10^{-9} с) или пикосекунд (10^{-12} с).

Базовая задача хронометрического метода

Базовая задача хронометрического метода заключается в том, чтобы определить координаты наблюдателя (x, y, z) и момент времени

их измерения t_m (рис. 1.1). В обозначении t_m нижний индекс « m » – от англ. *measure*, измерять.

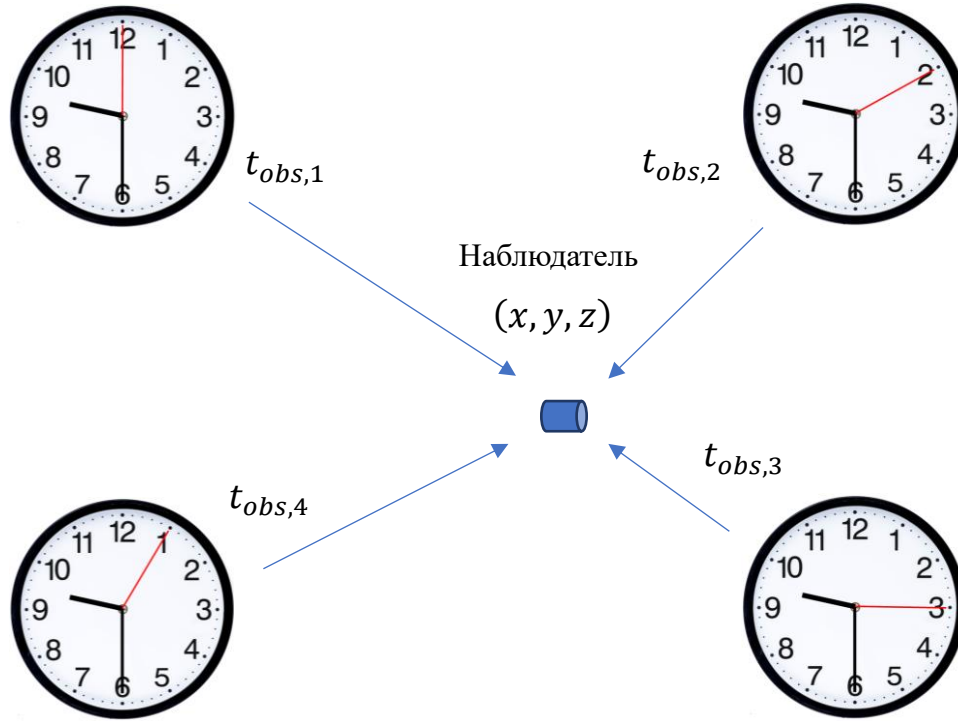


Рис. 1.1. Базовая задача хронометрического метода: по наблюдаемым показаниям четырех часов с известными координатами определяют координаты наблюдателя (x, y, z) и момент времени измерения координат

Для решения базовой задачи составляют систему из четырех уравнений с четырьмя неизвестными

$$t_m - t_{obs,i} = \frac{1}{c} \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}, \quad i = \overline{1,4},$$

или

$$\begin{cases} t_m - t_{obs,1} = \frac{1}{c} \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} \\ t_m - t_{obs,2} = \frac{1}{c} \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2} \\ t_m - t_{obs,3} = \frac{1}{c} \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2} \\ t_m - t_{obs,4} = \frac{1}{c} \sqrt{(x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2} \end{cases}$$

где c – скорость света.

Если z – высота наблюдателя, то ограничением является неравенство $z \geq 0$, в соответствии с которым высота наблюдателя не может быть отрицательной.

Решая эту систему известными методами, находят координаты наблюдателя (x, y, z) и момент времени измерения координат t_m .

Процесс определения координат объекта с использованием хронометрического метода представлен на рис. 1.2.

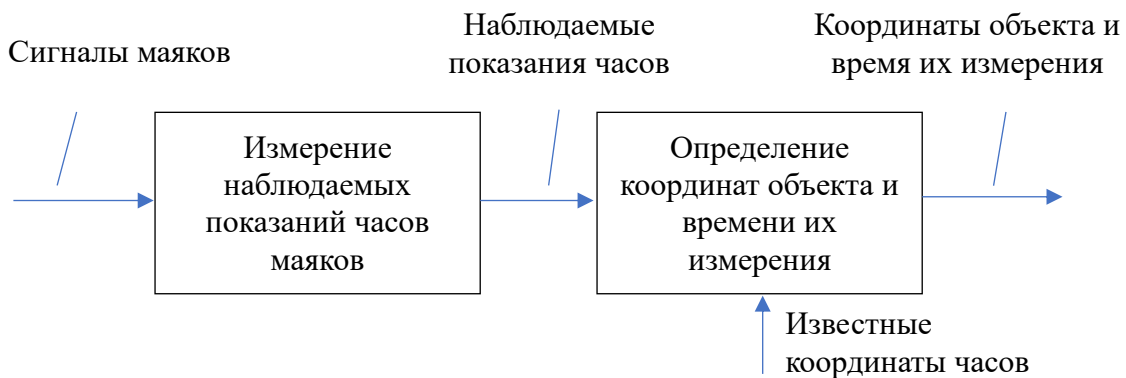


Рис. 1.2. Процесс определения координат объекта с использованием хронометрического метода

При решении практических задач определения координат объекта (например, летательного аппарата, ЛА) с использованием наземных радиомаяков, на борту ЛА наблюдаемые показания часов маяков вычисляют методом **косвенных измерений**, используя для этой цели передаваемые в сигналах маяков метки времени и бортовой измеритель интервалов времени (секундомер).

Измерение наблюдаемых показаний часов с использованием передаваемых маяками сигналов с метками времени

Измерение наблюдаемых показаний часов с использованием импульсных сигналов радиовещательных маяков осуществляется следующим образом.

Пусть маяк передает импульсный сигнал с меткой времени. Метка времени $t_{ts,i}$ – это высокоточное время передачи сигнала по часам, расположенным на i -м маяке. Нижний индекс «ts» в этом обозначении от англ. *timestamp*, *метка времени*.

На объекте в момент измерения его координат с помощью измерителя интервалов времени измеряют интервал времени Δt_i от момента приема сигнала до момента измерения координат.

Наблюдаемое показание часов i -го маяка в момент t_m измерения координат рассчитывают по формуле

$$t_{obs,i} = t_{ts,i} + \left(1 - \frac{v_{rad,i}}{c}\right) \cdot \Delta t_i,$$

где $v_{rad,i}$ – радиальная скорость объекта относительно i -го маяка, которую измеряют на объекте, например, с использованием эффекта Доплера.

Преимущества. Преимуществом хронометрического метода по сравнению с аналогами является возможность определения координат летательного аппарата при асинхронных (неодновременных) импульсных сигналах маяков.

Практическая значимость. Хронометрический метод может применяться для разработки разнообразных высокоточных радиотехнических средств наблюдения, навигации и посадки в авиации и космонавтике.

Например, хронометрический метод **позволяет** разработать локальную многопозиционную навигационную систему сантиметровой точности с использованием наземных маяков, передающих асинхронные импульсные сигналы.

Кроме того, хронометрический метод **позволяет** разработать навигационную низкоорбитальную спутниковую систему, в которой используются асинхронные импульсные сигналы. В существующих глобальных навигационных системах ГЛОНАСС, GPS и других используются непрерывные сигналы.

Точность хронометрического метода

В метрологии *потенциальной точностью* измерений называют предельно достижимую точность на современном этапе развития научных знаний, техники и технологий. Потенциальная точность технически может быть не реализована на данном этапе развития технологии производства.

Следует различать потенциальную и предельную точность измерений. Под *предельной точностью* измерений понимают предельно достижимую точность, с которой может быть выполнено

измерение физической величины на данном этапе развития науки и техники [7]. Другими словами, предельная точность измерений – это наивысшая точность, достигнутая в настоящее время.

Потенциальная точность измерений ограничена законами физики, которые нарушить невозможно, предельная точность измерений ограничена характеристиками измерительных приборов и их компонентов, которые разработаны на современном этапе развития науки, техники и технологий производства.

При использовании хронометрического метода в локальной многопозиционной навигационной системе, основанной на передаче импульсных сигналов наземными маяками, среднеквадратическую погрешность определения местоположения воздушного судна (ВС) в горизонтальной плоскости можно определить по формуле

$$\sigma_{xy} = \sigma_{Tobs} \times c \times HDOP, \quad (1.1)$$

где σ_{Tobs} – среднеквадратическая погрешность определения наблюдаемых показаний (наблюдаемого времени) часов маяка многопозиционной системы на борту ВС;

HDOP – геометрический фактор точности определения местоположения ВС по горизонтали;

c – скорость света.

Среднеквадратическая погрешность определения местоположения ВС в вертикальной плоскости определяется по аналогичной формуле

$$\sigma_z = \sigma_{Tobs} \times c \times VDOP, \quad (1.2)$$

где VDOP – геометрический фактор точности определения местоположения ВС по вертикали.

Математическая точность хронометрического метода является абсолютной. Другими словами, математическая погрешность хронометрического метода равна нулю.

Потенциальная точность хронометрического метода определяется потенциальной точностью определения наблюдаемых показаний (наблюдаемого времени) часов маяка многопозиционной системы на борту ВС. Теоретически в настоящее время наблюдаемые показания часов маяка с помощью фазового метода могут быть измерены с погрешностью до пикосекунды. При этом в соответствии с

(1.1) и (1.2) потенциальная погрешность хронометрического метода имеет порядок миллиметра.

Предельная точность локальной многопозиционной навигационной системы – это предельно достижимая точность, которую можно обеспечить с использованием самой совершенной элементной базы и технических устройств (компонентов системы) с наилучшими характеристиками, которые доступны для разработки системы. Предельная погрешность определения наблюдаемых показаний часов имеет порядок десятка пикосекунд. Соответственно предельная погрешность хронометрического метода имеет порядок сантиметра.

Заключение

В работе представлен разработанный автором принципиально новый хронометрический метод определения координат объекта (космического аппарата, воздушного судна, транспортного средства). Потенциальная точность хронометрического метода составляет миллиметры. Преимущество хронометрического метода по сравнению с аналогами заключается в том, что он обеспечивает возможность определения координат объекта при асинхронных (неодновременных) импульсных сигналах, излучаемых неподвижными или движущимися маяками. Хронометрический метод может использоваться для разработки разнообразных высокоточных радиотехнических средств наблюдения, навигации и посадки в авиации и космонавтике.

Хронометрический метод разработан с использованием закона абберации величин движущегося тела, открытого автором. По сути, хронометрический метод является практическим приложением этого закона, наряду с другими приложениями, представленными в работе [3].

Замечания и предложения по представленной работе направляйте по почте.

E-mail: al.plyasovskih@yandex.ru

д.т.н. Плясовских Александр Петрович

Источники информации

1. Плясовских, А. П. Хронометрический метод определения четырехмерных координат движущегося объекта с использованием радиовещательных маяков / А. П. Плясовских // Электросвязь. – 2025. – № 12. – С. 34-42. – DOI 10.34832/ELSV.2025.74.12.005.
2. Плясовских А. П. Теория аберрации. Первая теория, альтернативная специальной теории относительности [Электронный ресурс]. — М.: Знание-М, 2023. — 503 с. — ISBN 978-5-00187-483-6. <https://www.litres.ru/book/a-p-plyasovskih/teoriya-aberracii-pervaya-teoriya-alternativnaya-specialno-69424369/>
3. Плясовских А. П. Закон аберрации и его приложения в навигации и управлении воздушным движением. — М.: Знание-М, 2022. — 70 с. — ISBN 978-5-00187-223-8. <https://www.litres.ru/a-p-plyasovskih/zakon-aberracii-i-ego-prilozheniya-v-navigacii-i-67775394/>
4. Plyasovskikh A.P. Eshmuradov D.E. Theory of aberration – an alternative to the special theory of relativity. – Т.: «Fan va texnologiyalar mashriyot-matbaa uyi», 2024. – 432 p. – ISBN: 978-9910-748-53-0.
5. Плясовских А. П. Идеальная синхронизация множества движущихся с релятивистскими скоростями часов / А. П. Плясовских // Вестник метролога. – 2025. – № 4. – С. 3-8.
6. Старжинский В. М., Теоретическая механика. Учебник: Краткий курс по полной программе втузов. — М.: Главная редакция физико-математической литературы, 1980. — 464 с. С. 256-258.
7. Потенциальная точность измерений: Науч. издание – Учебн. пособие / Под ред. В.А. Слаева – С.Пб.: АНО НПО «Профессионал», 2005 — 104 с.: ил.
8. Болотовский Б. М., Малыкин Г. Б. Видимая форма движущихся тел // Успехи физических наук. 2019. Т. 189. № 10. С. 1084-1103.
9. Плясовских А. П. и другие. Эксперимент по измерению наблюдаемого темпа хода движущихся часов //Автоматика и

программная инженерия. 2022, №4(42) URL:
<http://www.jurnal.nips.ru/sites/default/files/AaSI-4-2022-4.pdf>

10. Plyasovskikh A. P. Eshmuradov D. E. Experiment on measuring the observed rate of a moving clock // International Scientific Journal "Science and Innovation". Series A. Volume 2 Issue 3. 24.03.2023. — P. 169-188. URL:
<http://scientists.uz/view.php?id=4089>
<https://doi.org/10.5281/zenodo.776773>