



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ГЕОДЕЗИИ И КАРТОГРАФИИ  
«МИИГАиК»

XIV Международная научно-практическая конференции  
«Геодезия. Маркшейдерия. Аэросъёмка. Навигация»

ДОКЛАД  
на тему:

«Основные положения разработки и научного  
исследования принципов совершенствования методов  
обработки результатов фазовых измерений  
спутниковыми приемниками»

Докладчик:  
к.т.н, доцент кафедры Геодезия

Кравчук И.М.

Москва

## Спутниковый приёмник

Спутниковый приёмник станет самым дешёвым геодезическим прибором, выполняя роль современной космической рулетки.

Самый востребованный геодезический прибор, который обязан обеспечивать единство масштаба линейных измерений на всей территории страны, должен быть подвергнут самому тщательному теоретическому анализу.

# Алгоритм обработки фазовых измерений

Описание алгоритма обработки фазовых измерений во всех изданиях практически одинаково и публикуется без изменений как таблица умножения.

Утверждается, что спутниковый приёмник регистрирует фазу сигнала, но для измерения и регистрации фазы достаточно затратить малые доли секунды, в то время как на практике приёмник выполняет измерения в течение нескольких десятков минут и более.

Какую реальную величину можно вычислить по результатам регистрации числа фазовых циклов?

# Принцип измерения и алгоритм обработки результатов фазовых измерений

$$e = E \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (1)$$

где  $E$  – амплитуда электрической составляющей поля;  
 $\omega$  – круговая частота;  
 $t$  – время,  
 $\varphi_0$  – начальная фаза.

$$\Delta\varphi = 2\pi f \Delta t$$

$$\Delta t = \frac{\Delta\varphi}{2\pi f} = n\tau + \Delta\tau, \quad (2)$$

где  $n$  – целое число периодов,  
 $\Delta\tau$  – дробная часть периода.

$$S = C\Delta t = Cn\tau = n\lambda + \Delta\lambda \quad (3)$$

где  $n$  – целое число длин волн  $\lambda$ , укладываемые в измеряемом расстоянии;  
 $\tau$  – период, время совершения одного полного колебания;  
 $\Delta\lambda$  – дробная часть длины волны.

# Текущая фаза и разность фаз

---

$$\varphi(t) = \omega t + \varphi_0. \quad (4)$$

Пройдя расстояние длиной  $S$ , фаза сигнала (4) изменится пропорционально времени задержки на дистанции  $S$  и приобретёт вид:

$$\varphi'(t) = \omega \left( t - \frac{S}{V} \right) + \varphi_0, \quad (5)$$

где  $V$  – средняя скорость распространения радиоволн в среде.

Для нахождения искомым величин рассматривают разность фаз:

$$\delta\varphi = \varphi(t) - \varphi'(t) = \omega \frac{S}{V}. \quad (6)$$

Соблюдение одновременности выполнения регистрации фазовых измерений от всех спутников, находящихся в поле их радиовидимости в начале и в конце сеанса измерений.

Однако в алгоритме обработки результатов фазовых измерений не нашлось места условию одновременности измерений.

# Методика измерений и обработки результатов полевых измерений не имеют строгого теоретического обоснования, последовательность теоретических исследований плохо корреспондируется с методикой полевых измерений

Это порождает ряд принципиальных вопросов, на которые нет ответов:

- координаты каких пунктов и с какой целью их необходимо знать при выполнении полевых измерений?
- в какой системе координат необходимо знать координаты пунктов?
- с какой точностью целесообразно знать координаты пунктов?
- найти математическое описание условию одновременности приёма сигналов навигационных спутников;
- доказать возможность и целесообразность использования неискажённой длины волны в расчётных формулах;
- какую реально существующую величину можно вычислить по числу зарегистрированных фазовых циклов и какую дополнительную информацию для этого необходимо знать?
- какая была допущена роковая ошибка в логике построения алгоритма обработки результатов фазовых измерений, которая привела к убеждению в необходимости выполнения сложной процедуры разрешения неоднозначности?
- является ли единственно возможным метод разрешения неоднозначности только “в начальной точке отслеживаемой траектории наблюдаемого спутника ...” и при каких условиях его полезно применять?

# Преобразование координат

---

Процедура обработки результатов фазовых измерений заканчивается преобразованием координат из системы координат, принятой в спутниковой навигационной системе в систему координат, которая используется в районе выполнения спутниковых измерений. В 2018 году мной, совместно с соавторами опубликована статья «Особенности преобразования декартовых координат в эллипсоидальные»\* в которой были приведены убедительные доказательства того, что широко разрекламированный метод преобразования координат заимствованный из математики не следует применять в геодезии. В статье приведены простые способы преобразования координат, которые целесообразно применять геодезистам.

\* Ключин Е.Б., Кравчук И.М., Гагаева Х.Р. Особенности преобразования декартовых координат в эллипсоидальные. // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка. № 2, М.: МИИГАиК, 2018. С. 132-135. DOI:10.30533/0536-101X-2018-62-2-132-135.



# Цель исследования и поставленные задачи для достижения поставленной цели


**Целью** исследования является разработка и исследование основных принципов совершенствования методов обработки результатов фазовых измерений спутниковыми приёмниками.

## **Задачи:**

1. исследование современной методики измерений и обработки результатов полевых измерений;
2. разработка теоретического обоснования алгоритму обработки результатов фазовых измерений спутниковыми приёмниками;
3. разработка объективной методики оценки точности вычисления искомых величин при рассмотрении основных источников ошибок фазовых измерений спутниковыми приёмниками, поиск снижения их влияния и обоснование пути дальнейшего совершенствования как метода измерений, так и спутникового приёмника;
4. разработка рекомендаций по повышению точности обработки результатов фазовых измерений спутниковыми приёмниками и снижению ошибок отдельных узлов фазового приёмника.

Первая в мире радионавигационная система МПЩ (**гиперболическая**) с целью определения разностей координат пунктов была предложена советскими учёными академиками Мандельштамом Л.И. и Папалекси М.Д. совместно с профессором Щеголевым Е.Я. в 1930-1934 гг.

Длина  
волны  $\lambda$



Основные принципы заложенные в радионавигационную систему МПЩ образца 1936 года:

**первый**

должно быть несколько одновременно работающих передатчиков и приемник

**второй**

координаты фазовых центров антенн передатчиков должны быть известны

**третий**

должны изменяться расстояния между приёмником и передатчиками

**четвертый**

одновременность начала и конца счёта числа периодов

**пятый**

высокая частота, излучаемая передатчиком, обеспечивающая высокую точность определения

**шестой**

наличие дополнительного пункта с известными координатами

# В научной и технической литературе рекомендуется вычислять длины волн и длины отрезков расстояний выраженных в длинах волн, что не позволило математически описать условие одновременности регистрации фазовых циклов

Введя в уравнения (7) параметры времени, удалось впервые составить важное для понимания процесса измерений условие одновременности регистрации фазовых циклов.

$$\left. \begin{aligned} T_{1,0} + \frac{S_{1,5}}{\vartheta_{1,5}} &= T_5 \\ T_{2,0} + \frac{S_{2,5}}{\vartheta_{2,5}} &= T_5 \\ T_{3,0} + \frac{S_{3,5}}{\vartheta_{3,5}} &= T_5 \\ T_{4,0} + \frac{S_{4,5}}{\vartheta_{4,5}} &= T_5 \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где  $T_{1,0}, T_{2,0}, T_{3,0}$  и  $T_{4,0}$  – время начала сеанса измерений по часам передатчиков на опорном пункте 5;  
 $S_{1,5}, S_{2,5}, S_{3,5}$  и  $S_{4,5}$  – расстояния между приёмником на точке 5 и фазовыми центрами антенн радиопередающих устройств;  
 $\vartheta_{1,5}, \vartheta_{2,5}, \vartheta_{3,5}$  и  $\vartheta_{4,5}$  – средние значения скорости распространения электромагнитных волн на пути от радиопередатчиков до приёмника на пункте 5;  
 $T_5$  – время начала регистрации фазовых циклов сеанса измерений,

# По результатам фазовых измерений можно и необходимо вычислять длительность сеанса измерений по часам спутников

$$\left. \begin{aligned} \frac{S_{1,6}}{\vartheta_{1,6}} - \frac{S_{1,5}}{\vartheta_{1,5}} + n_1 \tau_1 &= T_6 - T_5 = \Delta T \\ \frac{S_{2,6}}{\vartheta_{2,6}} - \frac{S_{2,5}}{\vartheta_{2,5}} + n_2 \tau_2 &= T_6 - T_5 = \Delta T \\ \frac{S_{3,6}}{\vartheta_{3,6}} - \frac{S_{3,5}}{\vartheta_{3,5}} + n_3 \tau_3 &= T_6 - T_5 = \Delta T \\ \frac{S_{4,6}}{\vartheta_{4,6}} - \frac{S_{4,5}}{\vartheta_{4,5}} + n_4 \tau_4 &= T_6 - T_5 = \Delta T \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

где  $S_{1,6}$ ,  $S_{2,6}$ ,  $S_{3,6}$  и  $S_{4,6}$  – расстояния между приёмником на определяемом пункте 6 и фазовыми центрами антенн радиопередающих устройств;

$\vartheta_{1,6}$ ,  $\vartheta_{2,6}$ ,  $\vartheta_{3,6}$  и  $\vartheta_{4,6}$  – средние значения скорости распространения электромагнитных волн на пути от радиопередатчиков до приёмника на определяемом пункте 6;

$n_1 \tau_1$ ,  $n_2 \tau_2$ ,  $n_3 \tau_3$  и  $n_4 \tau_4$  – интервалы времени, которые потребовались генераторам спутников на излучение данного числа периодов, поступивших на антенну приёмника за время сеанса измерений;

$T_6$  – время завершения регистрации фазовых циклов на определяемом пункте 6;

$\Delta T = T_6 - T_5$  длительность сеанса измерений.

В технической литературе система уравнений представлена не через временные величины, а через линейные величины

$$\left. \begin{aligned} S_{1,6} \cdot k_{1,6} - S_{1,5} \cdot k_{1,5} + n_1 \lambda_1 &= \Delta T \cdot C \\ S_{2,6} \cdot k_{2,6} - S_{2,5} \cdot k_{2,5} + n_2 \lambda_2 &= \Delta T \cdot C \\ S_{3,6} \cdot k_{3,6} - S_{3,5} \cdot k_{3,5} + n_3 \lambda_3 &= \Delta T \cdot C \\ S_{4,6} \cdot k_{4,6} - S_{4,5} \cdot k_{4,5} + n_4 \lambda_4 &= \Delta T \cdot C \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

где  $k = C / \vartheta$  – средние значения показателя преломления среды на пути от радиопередатчиков до пунктов 5 и 6;

$\lambda_i$  – длины волн (см. формулу (3));

$S_i \cdot k_i$  – оптические длины путей радиоволн.

$$\left. \begin{aligned} S_{2,6} \cdot k_{2,6} - S_{2,5} \cdot k_{2,5} - S_{1,6} \cdot k_{1,6} + S_{1,5} \cdot k_{1,5} + n_2 \lambda_2 - n_1 \lambda_1 &= 0 \\ S_{3,6} \cdot k_{3,6} - S_{3,5} \cdot k_{3,5} - S_{1,6} \cdot k_{1,6} + S_{1,5} \cdot k_{1,5} + n_3 \lambda_3 - n_1 \lambda_1 &= 0 \\ S_{4,6} \cdot k_{4,6} - S_{4,5} \cdot k_{4,5} - S_{1,6} \cdot k_{1,6} + S_{1,5} \cdot k_{1,5} + n_4 \lambda_4 - n_1 \lambda_1 &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

В результате получена хорошо известная система уравнений (10), которая отличается следующими важными характеристиками:

- системы уравнений (9) и (10) получены путём строгих последовательных математических преобразований;
- показана целесообразность регистрации длительности сеанса измерений  $\Delta T$ , при этом возможно сокращение минимального числа уравнений до трех и целесообразность использования полного числа фазовых циклов  $n$  пришедших на антенну приёмника (до преобразования сигнала методом гетеродинирования);
- получено обоснование использования в формулах (9) и (10) длин волн вычисленных путём умножения длительностей периодов стабильных радиочастот на скорость света в вакууме (путём математических преобразований), а не тех длин волн, которые поступили на антенну приёмника.
- в данном примере было сделано допущение что фазометр регистрирует все фазовые циклы, поступившие на антенну приёмника. С целью повышения точности фазовых измерений в существующих приёмниках реализуется приём снижения частоты сигнала поступающих на фазометр методом гетеродинирования. В результате на фазометр поступает разность двух частот: частота принятого от спутника сигнала минус частота вспомогательного сигнала (гетеродина).

В технической литературе встречаются три основных метода фазовых измерений с использованием спутниковых навигационных систем:

---

- дифференциальный;
- относительный (метод относительных измерений);
- позиционирование высокой точности (PPP),

без подробного объяснения принципиальных различий между ними. Каждый из методов имеет собственное название и собственную программу обработки результатов фазовых измерений. В действительности принципиальных различий в них мало.

Важно отметить, что при любом методе измерений реализуется один и тот же алгоритм обработки результатов фазовых измерений.

Основными источниками ошибок, влияющих на точность определения искомых величин при фазовых измерениях, принято считать:

---

ошибки эфемерид спутников приводящих к неточному вычислению координат спутников на момент измерений;

---

изменение скорости распространения электромагнитных волн в тропосфере и ионосфере, а также и короткопериодические изменения скорости распространения радиоволн (флуктуации);

---

изменение фазы принимаемого сигнала, вызванное приёмом волн, отражённых от окружающих предметов;

---

отклонением длин волн несущих частот от номинального значения;

---

шумы электронных блоков приёмников.





## Учёта тропосферы и ионосферы

Анализ методов учёта тропосферы и ионосферы показал высокую эффективность существующих технологий. Известные методы учёта их влияния обеспечивают необходимую точность вычисления искомых величин. Приведены доказательства незначительного влияния тропосферы и ионосферы на разность координат между опорным и определяемым пунктом.

# Результаты разработок и научного исследования:

1. В результате тщательного научно обоснованного исследования найдены убедительные ответы на все научные вопросы, поставленные в исследовании. Выполненные исследования позволили разработать строгое и логичное обоснование методу фазовых измерений спутниковыми приёмниками. Это позволило привести примеры детального анализа точности фазового метода измерений и обосновать пути дальнейшего совершенствования как метода измерений, так и спутникового приёмника.
2. Сформулированы общие принципы построения современных спутниковых радионавигационных систем, что позволило существенно упростить разработку строго обоснованной теории фазового метода определения координат спутникового приёмника.
3. Впервые записано условие одновременности регистрации фазовых циклов спутниковым приёмником от нескольких спутников, что позволило установить математические зависимости между измеренными и искомыми величинами выраженных в единицах времени.
4. Доказана возможность вычисления длительности сеанса измерений по числу периодов, поступивших на антенну приёмника  $n_i \tau_i$  (интервал времени, который потребовался спутнику на излучение числа периодов, поступивших на антенну приёмника за время сеанса измерений). Это позволило составить систему уравнений, характеризующих одновременность окончания регистрации фазовых циклов от всех наблюдаемых спутников в величинах, выраженных в единицах времени.

# Результаты разработок и научного исследования:

5. Впервые показано, что измерение величины длительности интервала времени регистрации фазы сигналов  $\Delta T$  может способствовать повышению точности определения искомых величин, а также сокращению длительности сеанса измерений.
6. Впервые показано, что при образовании разности между спутниками исключается из уравнений сразу две неизвестные: длительность сеанса измерений  $\Delta T$  и число периодов исключённых при гетеродинировании сигнала.
7. Впервые удалось полностью показать алгоритм обработки результатов фазовых измерений, начиная от составления исходных уравнений и заканчивая вычислением разностей координат между базовой станцией и ровером.
8. Показано, что величины ошибок координат спутников и ошибок координат приёмника базовой станции в 3–5 метров не препятствуют вычислению разностей координат с миллиметровыми точностями, в свою очередь это позволило доказать, что проблема разрешения неоднозначности ошибочно включена в алгоритм обработки результатов фазовых измерений.
9. Разработана методика вычисления реального значения несущей частоты спутника на момент выполнения фазовых измерений. При обработке результатов фазовых измерений целесообразно использовать реальное значение несущей частоты спутника на момент выполнения фазовых измерений.

# Результаты разработок и научного исследования:

10. Детальный анализ влияния различных источников ошибок позволил впервые показать специфику их компенсации при образовании разностей между приёмниками и спутниками. Выполненный анализ нестабильностей несущих частот спутников показал, что их влияние на результаты фазовых измерений незначительно. Доказано и объяснена причина возможности появления значительных искажений результатов фазовых измерений несинхронностью работы приёмников (базового и ровера), особенно в периоды компенсации ошибок часов приёмников.
11. Приведены рекомендации по повышению точности обработки результатов фазовых измерений спутниковыми приёмниками. Рекомендуется изменить программу введения поправок в часы приёмников с целью обеспечения высокой синхронности фазовых измерений приёмниками. Повышению точности и повышению быстродействия приёмников могут послужить измерение длительности сеанса измерений по часам приёмника, а также восстановление числа фазовых циклов, которые были исключены из сигнала пришедшего на антенну приёмника при гетеродинировании. Восстановленное число фазовых циклов позволит составить дополнительное уравнение связи между измеренными величинами и искомыми координатами пунктов, в результате повысится информативность системы уравнений, составленная по результатам полевых измерений.
12. Выполненные разработки позволили изучить особенности фазовых измерений с использованием спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС и рекомендовать методику формирования частот гетеродина, при которой практически полностью исключается влияние ошибок кварцевого генератора приёмника.



***Благодарю  
за внимание!***