

## Влияние ионосферы на результаты GPS-измерений

© Кошелев А.В., 2010

ГОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия», г. Новосибирск

*Показано, что фазовая и групповая скорости волн наиболее часто используются для исследования физических процессов и явлений в дисперсионных средах. Отмечено, что различия, существующие между фазовой скоростью идеальных монохроматических и реальных немонхроматических волн, входят в конфликт с их физической интерпретацией, и это иногда вносит некоторые дополнительные ошибки в теоретические исследования и результаты физических измерений. Сформированные в начале прошлого века эти понятия не получили должной оценки и сейчас они нуждаются в уточнениях.*

*Диспергирующая среда, ионосфера, показатель преломления, фазовая и групповая скорости волн.*

*Dispersion media, ionosphere, refraction index, phase and group velocities of waves.*

В существующих методах GPS-измерений учет влияния ионосферы на результаты измерений расстояний между GPS-спутниками и двухчастотными приемниками осуществляется дисперсионными методами. Для этих целей выполняются серии одновременных кодовых и фазовых измерений на несущих частотах  $f_1$  и  $f_2$ . Считается, что при кодовых измерениях радиоволны распространяются с групповой скоростью  $v_g$ , а при фазовых измерениях расстояний на несущих частотах  $f_1 = 1\,575,42$  МГц и  $f_2 = 1\,227,60$  МГц – с фазовой скоростью  $v_p$  [1, 5].

Формулы групповой и фазовой скорости имеют вид:  $v_g = c/n_g$  и  $v_p = c/n_p$ , где  $c$  – скорость света в вакууме;  $n_g$  и  $n_p$  – соответственно групповой и фазовый показатели преломления.

Показатели преломления  $n_g$  и  $n_p$  для радиоволн в ионосфере определяют по формулам:

$$\begin{aligned} n_g &= 1 + \frac{40,3 N_e}{f^2}; \\ n_p &= 1 - \frac{40,3 N_e}{f^2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $f$  – частота, в герцах;  $N_e$  – плотность электронов в ионосфере.

Из уравнения (1) следует, что фазовая скорость превышает скорость света в вакууме. Это явление получило название фазового опережения. В свою очередь, такое утверждение находится в противоречии с основным законом теории относительности, согласно которому никакая волна или сигнал

не могут распространяться со скоростью, превышающей скорость света в вакууме.

Физические теории существования сверхсветовых скоростей основаны на использовании фазовых скоростей в диспергирующих средах. В современных научной литературе эти вопросы активно обсуждаются и используются как для теоретического обоснования, так и для интерпретации результатов физических экспериментов. Однако существуют основополагающие физические работы, в которых отрицается существование фазовых скоростей в диспергирующих средах. Например, известные ученые М. Борн и Э. Вольф в своей фундаментальной книге [2] пишут: «...фазовая скорость не может соответствовать скорости распространения сигнала. В самом деле, легко видеть, что фазовую скорость нельзя определить экспериментально, и поэтому следует считать ее лишенной какого-либо прямого физического смысла». По мнению автора [3], использование в настоящее время теорий, основанных на применении фазовых скоростей, может служить также источником дополнительных погрешностей прецизионных геодезических измерений как для оптических волн в тропосфере при выполнении светодальномерных измерений, так и для радиоволн в ионосфере в процессе GPS-измерений.

В сложившейся ситуации единственным критерием истины в обсуждаемых вопросах могут быть экспериментальные исследования, подтверждающие или опровергающие существование фазовых скоростей в диспергирующих средах. В данной работе автором выполнена экспериментальная проверка обсуждаемых положений. Для этих целей использовались результаты реальных двухчастотных фазовых GPS-измерений расстояний, включающих прохождение радиоволн через ионосферу. Относительная стабильность несущих частот  $f_1$  и  $f_2$  в системах GPS оценивается величиной порядка  $10^{-13} - 10^{-14}$ . Такие измерения в настоящее время характеризуются наивысшей достижимой точностью для измерения расстояний в десятки тысяч километров.

Кодовые измерения расстояний в GPS выполняются на частоте модуляции  $f_p = 10,23$  МГц с использованием несущих частот  $f_1 = 1\,575,42$  МГц и  $f_2 = 1\,227,60$  МГц. Результаты кодовых измерений расстояний на частотах  $f_1$  и  $f_2$  обозначены символами  $P_1$  и  $P_2$ . Модулированные кодами радиоволны в ионосфере заведомо распространяются с групповыми скоростями. Для фазовых измерений расстояний  $L_1$  и  $L_2$  используются сигналы несущих частот  $f_1$  и  $f_2$ . В данной работе по результатам сравнений кодовых  $P_1, P_2$  и фазовых  $L_1, L_2$  измерений расстояний путем использования групповой и фазовой скоростей для определения поправок за ионосферу в результаты фазовых измерений  $L_1$  и  $L_2$  ставилась задача определить с фазовой или групповой скоростью распространяются в ионосфере несущие радиоволны на частотах  $f_1$  и  $f_2$ .

Результаты одновременных измерений дальностей в ионосфере для кодовых  $P_1, P_2$  и фазовых  $L_1, L_2$  наблюдений на частотах  $f_1$  и  $f_2$  можно представить в виде двух пар уравнений [1]:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= P\bar{n}_{g1} = P + \frac{40,3TEC}{f_1^2} = P + \Delta P_1; \\ P_2 &= P\bar{n}_{g2} = P + \frac{40,3TEC}{f_2^2} = P + \Delta P_2; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

и

$$\left. \begin{aligned} L_1 &= L\bar{n}_{g1} = L + \frac{40,3TEC}{f_1^2} = L + \Delta L_1; \\ L_2 &= L\bar{n}_{g2} = L + \frac{40,3TEC}{f_2^2} = L + \Delta L_2, \end{aligned} \right\}$$

где  $\bar{n}_{g1}$  и  $\bar{n}_{g2}$  – групповые среднеинтегральные показатели преломления радиоволн для частот  $f_1$  и  $f_2$ ;  $P$  и  $L$  – расстояния не искаженные ионосферой;  $\Delta P_1$ ,  $\Delta P_2$  и  $\Delta L_1$ ,  $\Delta L_2$  – поправки в кодовые и фазовые измерения расстояний на частотах  $f_1$  и  $f_2$ ;  $TEC = \int_0^P N(x)dx$  – общее количество электронов на пути прохождения радиоволн.

Введем обозначения для параметров, пропорциональных интегральному значению концентрации электронов в ионосфере для кодовых и фазовых измерений:  $A_K = 40,3TEC$  и  $A_P = 40,3TEC$ . Тогда неизвестные коэффициенты  $A_K$  и  $A_P$  можно вычислить из соответствующих пар кодовых или фазовых измерений с помощью уравнений [1]:

$$A_K = \frac{\Delta P(f_1^2 f_2^2)}{(f_1^2 - f_2^2)};$$

$$A_P = \frac{\Delta L(f_1^2 f_2^2)}{(f_1^2 - f_2^2)},$$

где  $\Delta P = P_2 - P_1$ ;  $\Delta L = L_2 - L_1$ .

Затем по найденным значениям  $A_K$  и  $A_P$  вычислим поправки в измеренные дальности по следующим формулам [1]:

$$\Delta P_1 = \frac{A_K}{f_1^2} = \frac{\Delta P f_2^2}{(f_1^2 - f_2^2)}; \quad \Delta P_2 = \frac{A_K}{f_2^2} = \frac{\Delta P f_1^2}{(f_1^2 - f_2^2)};$$

(3)

$$\Delta L_1 = \frac{A_P}{f_1^2} = \frac{\Delta L f_2^2}{(f_1^2 - f_2^2)}; \quad \Delta L_2 = \frac{A_P}{f_2^2} = \frac{\Delta L f_1^2}{(f_1^2 - f_2^2)}.$$

Значения отношений частот, применяемых в формулах (3), следующие:

$$\frac{f_1^2}{(f_1^2 - f_2^2)} = 2,54572778; \quad \frac{f_2^2}{(f_1^2 - f_2^2)} = 1,54572778.$$

Тогда с помощью уравнений (2) и (3) получим расстояния  $P$  и  $L$  до спутника, исправленные за показатель преломления ионосферы.

Для выполнения исследований автором использовались результаты измерений GPS, взятые из протоколов RINEX, представленных в Internet [4]. Наблюдения проводились в Новосибирске по Международной программе приемником фирмы Торсон. Значения расстояний  $P_1, P_2$  и  $L_1, L_2$  до двух спутников с номерами G 19 и G 28, полученные GPS-приемником, представлены в табл. 1. Результаты фазовых измерений расстояний  $L_1, L_2$  получены путем умножения числа фазовых циклов на длины волн в вакууме, соответствующие частотам  $f_1$  и  $f_2$ .

Таблица 1

**Значения расстояний, полученных GPS-приемником**

Дата и время (по Гринвичу)	Номер спутника	Измерения, м			
		Кодовые		Фазовые	
		$P_1$	$P_2$	$L_1$	$L_2$
23.07.09 13 h 08 м 10 s	G 19	23 237 001,686	23 237 004,303	23 237 002,978	23 237 006,591
23.07.09 13 h 08 м 10 s	G 28	20 922 182,332	20 922 184,775	20 922 183,098	20 922 187,252

Вначале рассмотрим гипотезу 1 в предположении, что расстояния определяются из фазовых измерений при распространении радиоволн в ионосфере с групповыми скоростями. В этом случае расчетные формулы для вычисления исправленных за ионосферу расстояний  $P$  и  $L$  представим в виде:  $P' = P_1 - \Delta P_1$ ;  $L' = L_1 - \Delta L_1$  – на частоте  $f_1$  и  $P'' = P_2 - \Delta P_2$ ;  $L'' = L_2 - \Delta L_2$  – на частоте  $f_2$ . Результаты расчета поправок в измеренные расстояния представлены ниже:

**Поправки в измеренные расстояния**

Номер спутника	$\Delta P$ , м	$\Delta L$ , м	$\Delta P_1$ , м	$\Delta P_2$ , м	$\Delta L_1$ , м	$\Delta L_2$ , м
G 19	2,617	3,613	4,045	6,662	5,585	9,198
G 28	2,443	4,154	3,776	6,219	6,421	10,575

Для гипотезы 2 предположим, что измерения длин  $L_1$  и  $L_2$  выполнялись с фазовой скоростью, для которой, согласно уравнению (1), знак поправки должен измениться на противоположный. Тогда уравнения расстояний, измеренных с фазовой скоростью, примут в вид:

$$L_1 = L\bar{n}_{p1} = L - \frac{A_p}{f_1^2}; \quad (4)$$

$$L_2 = L\bar{n}_{p2} = L - \frac{A_p}{f_2^2}, \quad (5)$$

где  $\bar{n}_{p1}$  и  $\bar{n}_{p2}$  - среднеинтегральные фазовые показатели преломления ионосферы на частотах  $f_1$  и  $f_2$ .

Из уравнений (4) и (5) следует, что для фазовых измерений (см. табл. 1) должно соблюдаться неравенство  $L_1 > L_2$  поскольку частота  $f_1 > f_2$ . В действительности этого не наблюдается. Следовательно, при выполнении фазовых измерений волны распространяются с групповой скоростью, как и при кодовых наблюдениях.

Сводная ведомость исправленных расстояний для групповой и фазовой скоростей представлена в **табл. 2**.

Таблица 2

**Исправленные расстояния для групповой и фазовой скоростей**

Номер спутника	Кодовые измерения расстояний $P$ , м	Фазовые измерения длин $L$ , м		
		Скорость		
	Групповая скорость $P$ $P' = P''$	Групповая ( <i>гипотеза 1</i> )		Фазовая ( <i>гипотеза 2</i> )
$L'$		$L''$	Поскольку $L_1 < L_2$ , то фазовых скоростей в ионосфере не существует.	
G 19	23 236 997,641	23 236 997,393		23 236 997,393
G 28	20 922 178,556	20 922 176,677		20 922 176,677

В результате можно сделать вывод, что для исправленных за ионосферу длин с использованием группового показателя преломления (*гипотеза 1*) результаты  $L'$  и  $L''$  на частотах  $f_1$  и  $f_2$  полностью совпадают (см. табл. 2). Однако использование фазовой скорости (*гипотеза 2*) приводит к отрицанию существования фазовой скорости по результатам экспериментальных измерений.

Здесь важно отметить, что для результатов измерений (см. табл. 1), соответствующих групповым скоростями, использование формул (4) и (5), предполагающих фазовые скорости, недопустимо. Поскольку это может служить источником дополнительных погрешностей и применению некорректного отрицательного значения коэффициента  $A_p$ . Коэффициент  $A_p$  пропорциональный концентрации электронов в ионосфере не может быть отрицательным. Следовательно, применение фазовой скорости в ионосфере искажает измеренные расстояния и может служить источником дополнительных погрешностей GPS-измерений.

Таким образом, использование фазовой скорости в ионосфере, рекомендуемое в литературе [1, 5] для обработки GPS-измерений, негативно влияет на результаты определения абсолютных координат и в меньшей сте-

пени ухудшает дифференциальные измерения, поскольку для одновременных измерений при вычислении приращений координат эти погрешности носят систематический характер и, в основном, взаимно компенсируются.

Это позволяет сделать следующие выводы:

экспериментально установлено, что фазовой скорости в диспергирующих средах не существует, а радиоволны распространяются в ионосфере с групповой скоростью;

использование только групповой скорости для обработки фазовых GPS-измерений дает возможность повысить точность определения координат и расстояний GPS-приемниками, особенно в абсолютном режиме;

в средах с аномальной дисперсией при использовании групповой скорости не нарушается основное положение теории относительности, о том, что скорость переноса амплитуды, мощности и энергии волн не превышает скорости света в вакууме.

Следовательно, утверждение о фазовом опережении и сверхсветовых скоростях волн в диспергирующих средах с аномальной дисперсией не соответствует действительности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. – В 2 томах. – Т. 1 – М.: Картгеоцентр, 2005. – 333 с.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1970. – 39 с.
3. Кошелев А. В. К определению показателя преломления атмосферы для высокоточных геодезических измерений // Геодезия и картография. – 2010. – № 3. – С. 23–27.
4. [Electronics resource] – Англ. – Режим доступа: <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov>.
5. Zebhauser B. Zur Entwicklung eines GPS-Program systems fur Lehre und Tests unter besonderer Berucksichtigung der Ambiguity Function Methode. Munchen. – 1999. – P. 123.

### *Summary*

*Phase and group velocities of waves are most frequently used in the research of physical processes and phenomena in dispersion media. The difference existing between phase velocities of ideal harmonic waves and real non-monochromatic waves comes into conflict with their physical interpretation, that sometimes brings some additional errors both in theoretical investigations and the results of physical measurements. The concepts developed at the beginning of the last century have not been properly estimated and now they need to be specified.*