

Уточнение ППН-параметра γ из обработки РСДБ-наблюдений

© С. Л. Курдубов, С. М. Миронова

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Статья посвящена оценке параметра параметризованного постньютоновского (ППН) формализма γ из обработки РСДБ-наблюдений за период 1979–2016 гг., выполненных по астрометрическим и геодезическим программам. Сделан обзор работ других авторов, посвященных определению γ по РСДБ-наблюдениям. Оценка произведена с использованием полной производной по γ с учетом гравитационной и геометрической частей задержки. Рассмотрено влияние на оценку ППН-параметра γ различных редуцированных моделей. Показано, что наибольшее влияние на оценку γ оказывают модели, вызывающие внутрисуточные квазипериодические вариации задержки, такие как приливные вариации параметров вращения Земли и океанические нагрузки. Показано отсутствие значительных корреляций между параметром γ и другими параметрами глобального уравнивания.

Ключевые слова: ППН-формализм, радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами, РСДБ-наблюдения.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.47.43-52>

Введение

Для сравнения между собой гравитационных теорий традиционно используется параметризованный постньютоновский (ППН) формализм [1]. ППН-формализм позволяет привести общую теорию относительности и альтернативные теории гравитации к единой форме. При этом в уравнениях движения и распространения света появляется ряд параметров, величины которых показывают, приближением какой из возможных теорий гравитации является используемая постньютоновская модель. РСДБ-наблюдения чувствительны к ППН-параметру γ , определяющему пространственную кривизну, создаваемую единицей массы покоя.

Определению параметра γ по отклонению света в гравитационном поле посвящен целый ряд работ. В работах [2–8] γ оценивается из обработки РСДБ-наблюдений. В своей первой статье [4] Робертсон получил оценку γ на основе серий геодезических РСДБ-наблюдений по программам MERIT, POLARIS, IRIS, в которых 3 радиоисточника оказались расположенными около эклиптики. В следующей работе Робертсона [5] использовались данные программ POLARIS, IRIS, CDP, в которых было получено 214 задержек для радиоисточников в пределах трех градусов от Солнца. Работа Лебаха посвящена определению γ из наблюдений радиоисточников 3C273B и 3C279. Оценка γ в работе [8] была найдена на основе глобального решения NASA GSFC 1102g. Работы Ламберта [2–3] также связаны с глобальным уравниванием РСДБ-наблюдений, и в статье

подробно рассмотрены детали его стратегии уравнивания в сравнении с той, которая использовалась в настоящей работе. Оценки γ разных лет собраны в табл. 1.

Таблица 1

Оценка ППН-параметра γ по РСДБ

γ	Год	Автор	Количество задержек
1.008 ± 0.005	1984	Робертсон [4]	$4.1 \cdot 10^4$
1.0002 ± 0.002	1991	Робертсон [5]	$3.4 \cdot 10^5$
0.9996 ± 0.0017	1995	Лебах [6]	$2.0 \cdot 10^4$
0.99983 ± 0.0004	2004	Шапиро [8]	$1.7 \cdot 10^6$
1.00031 ± 0.00035	2009	Ламберт [2]	$4.4 \cdot 10^6$
0.99992 ± 0.00012	2011	Ламберт [3]	$7.3 \cdot 10^6$
0.99972 ± 0.00009	2018	Титов [7]	$12.6 \cdot 10^6$

Производная задержки по ППН-параметру γ

Параметр γ и другие параметры глобальной модели РСДБ-наблюдений определяются с использованием обобщенного метода наименьших квадратов. Важное значение имеет вид формулы, используемой для релятивистской задержки, и то, как были вычислены частные производные. В нашей работе использовалась рекомендованная в IERS Conventions 2010 [9] формула для задержки:

$$\tau_v = \frac{T_{grav} - (\mathbf{ub})g - (\mathbf{v}_\oplus \mathbf{b}) \frac{1 + \frac{\mathbf{uv}_\oplus}{c}}{2c}}{1 + \frac{\mathbf{uv}_\oplus + \mathbf{uw}_2}{c}}, \quad (1)$$

где

$$g = 1 - (1 + \gamma) \frac{GM_\odot}{|\mathbf{x}_\odot| c^2} - \frac{|\mathbf{v}_\oplus|^2}{2c^2} - \frac{\mathbf{v}_\oplus \mathbf{w}_2}{c^2},$$

$$T_{grav} = \sum_{A=M,\odot,J,H} (1 + \gamma) \frac{GM_A}{c^2} \ln \frac{|\mathbf{R}_{1A}| + \mathbf{uR}_{1A}}{|\mathbf{R}_{2A}| + \mathbf{uR}_{2A}} + (1 + \gamma) \frac{GM_\oplus}{c^2} \ln \frac{|\mathbf{x}_1| + \mathbf{ux}_1}{|\mathbf{x}_2| + \mathbf{ux}_2} +$$

$$+ \sum_{A=M,\odot,J,H} ((1 + \gamma) \frac{GM_A}{c^2})^2 \frac{\mathbf{b} \frac{\mathbf{R}_{1A}}{|\mathbf{R}_{1A}|} + \mathbf{bu}}{(|\mathbf{R}_{1A}| + \mathbf{uR}_{1A})^2},$$

и \mathbf{b} — вектор базы; \mathbf{u} — единичный вектор в направлении на источник; $\mathbf{x}_M, \mathbf{x}_\odot, \mathbf{x}_J, \mathbf{x}_H, \mathbf{x}_\oplus$ — барицентрические радиус-векторы Луны, Солнца, Юпитера, Сатурна, Земли в небесной системе отсчета (НСО); \mathbf{v}_\oplus — барицентрическая скорость Земли в НСО; $\mathbf{x}_{1,2}, \mathbf{w}_{1,2}$ — геоцентрические радиус-векторы и скорости

станций 1, 2 в НСО; \mathbf{R}_{iA} — вектор от гравитирующего тела А к i -ой станции; M_A — масса гравитирующего тела; \odot, J, H, \oplus — индекс гравитирующего тела: Луна, Солнце, Юпитер, Сатурн, Земля соответственно.

Дифференцируя (1) по γ , получаем:

$$\frac{\partial \tau_y}{\partial \gamma} = \frac{\frac{\partial T_{grav}}{\partial \gamma} + (ub) \frac{GM_{\odot}}{|x_{\odot}|c^2}}{1 + \frac{uv_{\oplus} + uw_2}{c}},$$

$$\frac{\partial T_{grav}}{\partial \gamma} = \sum_{A=M, \odot, J, H} \frac{GM_A}{c^2} \ln \frac{|\mathbf{R}_{1A}| + u\mathbf{R}_{1A}}{|\mathbf{R}_{2A}| + u\mathbf{R}_{2A}} + \frac{GM_{\oplus}}{c^2} \ln \frac{|x_1| + ux_1}{|x_2| + ux_2}$$

$$+ \sum_{A=M, \odot, J, H} (2 + 2\gamma) \left(\frac{GM_A}{c^2} \right)^2 \frac{b \frac{|\mathbf{R}_{1A}|}{|\mathbf{R}_{1A}|} + bu}{(|\mathbf{R}_{1A}| + u\mathbf{R}_{1A})^2}.$$

В более ранних работах использовалась формула для производной, учитывающая только гравитационное отклонение света в поле тяготения Солнца. Например, в работе Ламберта [2] приводится формула

$$\frac{\partial \tau_g}{\partial \gamma} = \frac{GM_{\odot}}{c^3} \ln \left(\frac{|r_1| + r_1 k}{|r_2| + r_2 k} \right),$$

где r_i — положение i -й станции, k — единичный вектор в направлении на источник; оба относятся к центру масс гравитирующего тела.

В отличие от предыдущих работ, в работе формула для производной включает в себя члены, соответствующие большим планетам, и геометрическую часть, возникающую при преобразовании из геоцентрической в барицентрическую систему координат.

Сравнение гравитационной и геометрической частей производной приведено на рис. 1. Графики построены для экваториальной базы длиной в один радиус Земли. На левом графике показано изменение гравитационной задержки

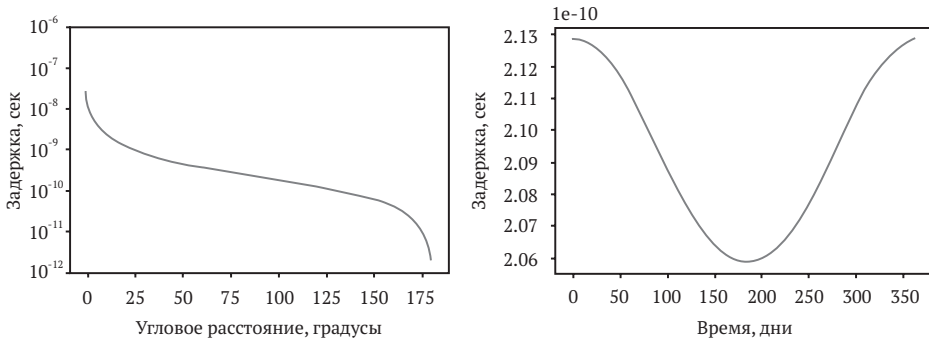


Рис. 1. Зависимость гравитационной части производной от углового расстояния между радиостанцией и Солнцем (слева). Геометрическая часть производной в зависимости от дня года (справа)

от Солнца в зависимости от углового расстояния между направлением на радиисточник и направлением на Солнце. На правом графике представлено изменение геометрической задержки сигнала в зависимости от дня года (для 2017-ого года).

Обработка РСДБ-наблюдений

РСДБ-наблюдения по астрометрическим и геодезическим программам представляют собой измеренные задержки прихода радиосигнала на радиотелескопы международных сетей станций VLBA, EVN, IVS, а также отечественной сети «Квazar-КВО» [10]. В процессе обработки наблюдений производится предвычисление измеренных задержек с использованием всех редуцированных моделей, рекомендованных IERS Conventions 2010 [9]. Затем составляется параметрическая модель, параметры которой могут быть оценены с помощью модификаций метода наименьших квадратов. Часть параметров оценивается индивидуально для каждой сессии; это параметры вращения Земли (ПВЗ), тропосферные и инструментальные параметры. Из совместной обработки наблюдений на длительном интервале времени в процессе так называемого глобального уравнивания находят координаты квазаров и положения принимающих сигналы антенн.

В качестве исходных данных взяты РСДБ-наблюдения в период 1979–2016 гг. За основу был взят список сессий, рекомендованный рабочей группой по третьей реализации Международной небесной системы координат (ICRF — International Celestial Reference Frame). Часть сессий из списка была отброшена на различных этапах обработки. Причины для удаления могли быть различными: часть не поддавалась одиночной обработке, некоторые ухудшали результат глобального уравнивания, отдельные сессии отсутствовали в доступных базах данных. Сессии, в которых было измерено больше 15 000 задержек, были разделены на несколько меньших.

Обработка проводилась с помощью программного комплекса QUASAR с использованием метода среднеквадратической колокации (СКК) [11].

В базовом решении перевзвешивание или отбрасывание наблюдений на низких углах возвышения не производились. Был использован рекомендованный международной службой IVS список величин антенных выносов. Координаты станций оценивались как глобальные параметры, а закрепление земной системы координат осуществлялось с помощью наложения условий отсутствия вращения и сдвига (NNT/NNR) на координаты и скорости ограниченного набора из 21 станции. В этот набор включались станции с наиболее длительной историей наблюдений и отсутствием смещений координат вследствие ремонтов или землетрясений.

Рассмотрим детали конфигурации глобального уравнивания в сравнении с решением Ламберта [3]. Основные численные характеристики решений приведены в табл. 2. Так, в данном решении количество обрабатываемых задержек увеличилось до 9.4 млн. В решении Ламберта координаты станций оценивались независимо в каждой сессии, при этом почти все станции включались в уравнения NNT/NNR условий.

Таблица 2

Сравнение основных характеристик базового глобального решения с решением Ламберта [3]

	Ламберт	Настоящая работа
Период наблюдений	1979–2010	1979–2016
Число наблюдений	7.3 млн	9.4 млн
Пакет обработки	Calc 10.0/Solve 2010.05.21	QUASAR
Перевзвешивание наблюдений вследствие малого угла возвышения	$< 5^\circ$	нет
NNR/NNT	все кроме 4	21 станция
Антенные выносы	оценивались как глобальные	по данным IVS
Океаническая нагрузка	FES2004	GOT00.2
Всего радиоисточников	3414	3825
Априорный каталог	ICRF2	ICRF2+rfc_2016

Параметры вращения Земли оценивались как суточные параметры, а координаты радиоисточников как глобальные. При этом в решении Ламберта ПВЗ определялись вместе с линейным трендом.

Тропосферная задержка в зените разделяется на «сухую» составляющую, которая хорошо моделируется, и «влажную», которая определяется из наблюдений. В нашем решении «влажная» составляющая тропосферной задержки определялась в виде линейного тренда на суточном интервале совместно со стохастическим сигналом, а в решении Ламберта оценивалась как кусочно-линейная функция на получасовых интервалах. Асимметрия тропосферной задержки моделировалась с помощью оценивания тропосферных градиентов в ортогональных направлениях север и восток. В нашем решении градиенты оценивались один раз за сутки, в решении Ламберта они определялись в виде шестичасовой кусочно-линейной функции. Для распространения зенитной тропосферной задержки на другие углы возвышения использовалась Венская картирующая функция VMF1 [12] в обоих решениях.

Априорные координаты источников были взяты из каталога ICRF2, недостающие источники были скопированы из каталога rfc_2016c [13]. Координаты не найденных в обоих каталогах радиоисточников брались из файлов наблюдений.

Влияние редуционных моделей на определение параметра γ

В более ранних работах не было достаточно полного анализа влияния редуционных моделей и схемы уравнивания на оценку γ по РСДБ-наблюдениям. Основной задачей данной работы было показать, какое влияние оказывают различные редуционные модели и варианты параметризации на оценку параметра γ . Для оценки этих факторов было получено 24 тестовых решения, в каждом из которых варьировался один из редуционных параметров или изменялась конфигурация оценивания. Краткие описания тестовых решений и полученные в них значения γ приведены в табл. 3. Среднеквадратические значения невязок (СКО), характеризующие представление наблюдений, представлены в последнем столбце таблицы.

Таблица 3

Значения γ , полученные в тестовых решениях

Тест	$(\gamma - 1) \cdot 10^3$	СКО, мм
1. Базовое решение (априорный ряд ПВЗ IERS finals, модель нутации IAU2000, квадратичная интерполяция опорного ряда ПВЗ на каждый момент наблюдений)	0.089	13.58
2. Отключение модели суточных и полусуточных вариаций ПВЗ	-1.076	13.75
3. Оценивание 8 гармоник внутрисуточных вариаций ПВЗ	0.048	13.58
4. Ряд ПВЗ C04 с моделью нутации IAU2000	0.028	13.61
5. Ряд ПВЗ C04 с моделью нутации IAU1980	0.039	13.61
6. Ряд ПВЗ finals с моделью нутации IAU1980	0.100	13.58
7. Линейная интерполяция ПВЗ	0.079	13.58
8. Кубическая интерполяция ПВЗ	0.099	13.58
9. Априорная модель влажной задержки в зените: NMF1 [12]	0.068	13.57
10. Априорная модель влажной задержки в зените: Davis et al. [14]	0.096	13.58
11. Априорная модель влажной задержки в зените: Петров [15]	0.139	13.59
12. Перевзвешивание наблюдений, у которых $Z > 75^\circ$	0.005	15.81
13. Оценивание линейного тренда тропосферных градиентов	0.031	13.62
14. Картирующая функция для тропосферных градиентов (Davis et al.) [16]	0.099	13.58
15. Картирующая функция для тропосферной задержки (Niell) [17]	0.097	13.59
16. Картирующая функция для тропосферной задержки (Herring) [9]	-0.090	13.59
17. Океанические нагрузки: HAMTIDE	0.154	13.58
18. Океанические нагрузки: TRX08	0.256	13.58
19. Океанические нагрузки: FES2014b	0.248	13.58
20. Океанические нагрузки: EOT11a	0.178	13.58
21. Оценивание атмосферных нагрузок	0.073	13.58
22. Оценивание антенных выносов всех станций	0.098	13.58
23. Добавление к формальным ошибкам всех наблюдений 1 см	0.264	13.70
24. Добавление к формальным ошибкам всех наблюдений 5 см	0.921	17.10

Первая группа тестов была посвящена использованию различных априорных моделей ПВЗ. При отключении модели внутрисуточных вариаций ПВЗ, осуществленном в решении 2, можно наблюдать существенное изменение оценки γ . В следующем эксперименте 3, при отключенной модели вариаций, производилось оценивание коэффициентов при 8 основных приливных гармониках, таким образом, модель внутрисуточных вариаций ПВЗ получалась непосредственно из глобального уравнивания наблюдений. Оценка γ при этом незначительно уменьшилась. Эксперименты 4, 5, 6 показывают, что изменение модели нутации с IAU2000 на IAU1980 незначительно влияет на оценку γ , тогда как замена опорного ряда с IERS finals на IERS C04 приводит к некоторому уменьшению оценок. Изменение модели интерполяции в тестах 7, 8 не оказывает существенного влияния на γ .

Следующая группа тестов посвящена моделированию тропосферной задержки сигнала. Эксперименты 9, 10, 11 показывают, что применение различных априорных моделей влажной составляющей тропосферной задержки не оказывает существенного влияния на γ , однако применение модели Петрова [15] приводит к увеличению оценки. Применение картирующих функций Девиса [14] (тест 14) или Нила [17] (тест 15) практически не изменяет оценку по сравнению с базовой численной моделью VMF1. Однако модель тропосферной задержки на низких углах, по видимому, важна для оценки γ , так как перевзвешивание наблюдений на малых углах возвышения путем умножения ошибки на секанс зенитного расстояния в тесте 12 приводит к существенному уменьшению оценки γ . Оценка тропосферных градиентов в виде линейного тренда в тесте 13 также приводит к некоторому уменьшению оценки.

Серия экспериментов 17–20 с различными моделями океанических нагрузок показывает, что применение последних моделей океанических нагрузок, таких как HAMTIDE, TRXO8, FES2014b, EOT11a, увеличивает оценку γ . Наиболее близкий к единице результат получается при использовании модели GOT00.2.

В эксперименте 21 уточняются регрессионные коэффициенты для смещений станций вследствие атмосферной нагрузки, а в 22 — антенные выносы для всех станций. Это приводит к незначительному уменьшению невязок после уравнивания по сравнению с базовым решением, однако на оценку γ существенного влияния не оказало.

Перевзвешивание наблюдений, произведенное в последних экспериментах 23 и 24, показывает увеличение невязок. По-видимому, вычисляемые коррелятором формальные ошибки задержек являются в среднем корректными.

Изменение настроек решения увеличивает СКО для большинства тестов. Незначительное уменьшение невязок достигалось в экспериментах, в которых оценивались атмосферные нагрузки и антенные выносы.

Корреляция между параметром γ и другими параметрами модели РСДБ-наблюдений

Для оценивания связи параметра γ с другими глобальными параметрами были найдены корреляции из ковариационной матрицы базового решения. Оказалось, что корреляции между γ и координатами станций не превышают 0.36 %, скоростями станций — 0.29 %, координатами радиисточников — 3.7 %.

Чтобы определить корреляцию оценки γ с вариациями ПВЗ, были найдены корреляции по тесту χ^2 , в котором оценивались 8 главных гармоник внутрисуточных вариаций ПВЗ. Наибольшая корреляция, равная 7.9 %, оказалась с полусуточной гармоникой S2.

Заключение

Рассмотрено влияние на оценку ППН-параметра γ различных редуцированных моделей. Показано, что наибольшее влияние на оценку γ оказывают модели, вызывающие внутрисуточные квазипериодические вариации задержки, такие как приливные вариации ПВЗ и океанические нагрузки.

Показано, что геометрическая часть производной по γ , обусловленная преобразованием систем координат, несмотря на значительную абсолютную величину, слабо меняется и не оказывает существенного влияния на оценку γ из обработки РСДБ-наблюдений.

Наиболее близкая к единице оценка $\gamma = 1.000048 \pm 0.000149$ получена в решении с совместным оцениванием внутрисуточных вариаций ПВЗ. Среди полученных оценок затруднительно указать наилучшую, т. к. многие различаются в пределах формальной ошибки, показывая что вариация моделей оказывает влияние на оценки параметра γ на уровне 10^{-4} .

Не выявлено значительных корреляций между параметром γ и другими параметрами глобального уравнивания.

Литература

1. Will C. M. The Confrontation between General Relativity and Experiment // Living Reviews in Relativity. — 2014. — Vol. 17. — P. 4.
2. Lambert S. B., Le Poncin-Lafitte C. Determining the relativistic parameter γ using very long baseline interferometry // Astron. Astrophys. — 2009. — Vol. 499 — P. 331–335.
3. Lambert S. B., Poncin-Lafitte C. Le. Improved determination of γ by VLBI // Astron. Astrophys. — 2011. — Vol. 529. — P. A70.
4. Robertson D. S., Carter W. E. Relativistic deflection of radio signals in the solar gravitational field measured with VLBI // Nature. — Vol. 310. — 1984 — P. 572–574.
5. Robertson D. S., Carter W. E., Dillinger W. H. New measurement of solar gravitational deflection of radio signals using VLBI // Nature. — 1991. — Vol. 349. — P. 768–770.
6. Lebach D. E., Corey B. E., Shapiro I. I., Ratner M. I., Webber J. C., Rogers A. E. E., Davi J. L., Herring T. A. Measurement of the Solar Gravitational Deflection of Radio Waves Using Very-Long-Baseline Interferometry // Physical Review Letters. — 1995. — Vol. 75. — P. 1439–1442.
7. Titov O., Girdiuk A., Lambert S., Lovell J., McCallum J., Shabala S., McCallum L., Mayer D., Schartner M., de Witt A., Shu F., Melnikov A., Ivanov D., Mikhailov A., Yi S., Soja B., Xia B., Jiang T. Testing General Relativity with geodetic VLBI: what profit from a single, specially designed experiment? // Astron. Astrophys. — Vol. 618 — 2018. — doi: 10.1051/0004-6361/201833459.
8. Shapiro S. S., Davis J. L., Lebach D. E., Gregory J. S. Measurement of the Solar Gravitational Deflection of Radio Waves using Geodetic Very-Long-Baseline Interferometry Data, 1979–1999 // Physical Review Letters. — Vol. 92. no. 12. — 2004. — doi: 10.1103/PhysRevLett.92.121101.
9. Petit G., Luzum B. IERS Conventions 2010 (IERS Technical Note no. 36) — Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie — 2010. — 179 P.
10. Финкельштейн А. М., Гаязов И. С., Курдубов С. Л., Скурихина Е. А., Суркис И. Ф.,

Ипатов А. В., Смоленцев С. Г., Дьяков А. А., Рахимов И. А., Сергеев Р. Ю. Определение ПВЗ из наблюдений на РСДБ-сети «КВАЗАР-КВО» / Сборник тезисов КВНО–2009. — СПб.: ИПА РАН, 2009. — Р. 67–71.

11. Курдубов С. Л., Губанов В. С. Основные результаты глобального уравнивания РСДБ-наблюдений // Письма в астрономический журнал. — 2011. — Т. 37, №4. — Р. 294–302.

12. Boehm J., Schuh H. Vienna mapping functions in vlbi analyses // Geophysical Research Letters. — 2004. — Vol. 31. — Р. 603. — doi: 10.1029/2003GLO18984.

13. Radio Fundamental Catalog [Электронный ресурс]. — <http://astrogeo.org/rfc/>.

14. Davis J. L., Elgered G., Niell A. E., Shapiro I. I. Horizontal Gradients in the “Wet” Atmospheric Propagation Delay” // Refraction of Transatmoapheric Signals in Geodesy, Proc. of the Symp., Hague, The Netherlands, May 19–22, 1992 / ed. by De Munck J. C, Spoelstra T. A. Th. — 1992. — Р. 25–28.

15. Петров Л. Ю. Вторичная обработка геодезических РСДБ-наблюдений. II. Модель редукции // Сообщения ИПА РАН №75. — 1995. — Р. 12.

16. Davis J. L. et al. Geodesy by Radio Interferometry: Effects of Atmospheric Modeling Errors on Estimates of Baseline Length // Radio Science. — 1985. — Vol. 20, no. 6. — Р. 1593–1607.

17. Niell A. Global Mapping Functions for the Atmospheric Delay of Radio Wave lengths // J. Geophys. Res. — 1996. — Vol. 101. — Р. 3227–3246.

Estimating PPN Parameter γ from Processing VLBI Series

S. L. Kurdubov, S. M. Mironova

The article is devoted to the estimation of the parameter γ of the parameterized post-Newton (PPN) formalism from the VLBI observations processing, carried out from 1979 to 2016. We make a short review of previous articles on estimations by light deflection. The calculations has been done using full partial with respect to γ , we take into account gravitational delay from main Solar system bodies and geometric part from transformation to barycentre. In order to show connection between γ and other model parameters we perform number of solutions with different parametrisations and a priory data. It was shown that intraday variations of EOP and ocean loading models mostly affect estimations. There are no significant correlations between γ and other global solution parameters.

Keywords: PPN formalism, VLBI observations.