

## Эффект Саньяка в системе GPS

Исследуя движение встречных лучей во вращающемся замкнутом контуре, **Саньяк** сравнивал пройденные лучами расстояния с помощью интерферометра и был уверен, что доказал существование эфира. Несмотря на то, что позже гипотеза эфира была признана ошибочной, в настоящее время эффект Саньяка широко используется в лазерных оптоволоконных **гироскопах**. Этот эффект возникает и учитывается **в системе GPS**, где приёмник сигнала вместе с Землёй и атмосферой вращается относительно инерциальной системы, в которой на спутнике движется источник. Игнорирование эффекта Саньяка приведет к ошибке позиционирования порядка нескольких десятков метров [1,2].

Релятивисты утверждают, что эффект Саньяка — это релятивистский эффект. С 1921 года, когда Ланжевэн дал первое релятивистское объяснение эффекта Саньяка, было предложено множество объяснений на основе как специальной, так и общей теории относительности [5]. Тем не менее эффект до сих пор не имеет общепризнанного объяснения и о нём высказывается больше противоречивых мнений, чем о любом другом релятивистском эффекте. Одни авторы говорят, что эффект Саньяка несовместим со специальной теорией относительности, так как скорости лучей во вращающейся системе изменяются, другие предполагают, что скорость света не изменяется, если принять во внимание замедление времени во вращающейся системе [6]. В 2004 году был проведен эксперимент с вращающимся волоконно-оптическим гироскопом, который, как утверждают авторы, является обобщением эффекта Саньяка на поступательное движение, а сам эффект Саньяка является лишь частным случаем их открытия [7]. Утверждается также, что волоконно-оптический конвейер должен реагировать на вращение Земли и даже может быть использован для решающего эксперимента по проверке релятивистского постулата постоянства скорости света. В 2012 году в статье «Analysis of the Phase Difference in a Fiber-Optical Conveyor» мы показали, что авторы ошибочно объяснили свой широко рекламируемый эксперимент и этот эксперимент не является «обобщением» эффекта Саньяка и реагировать на вращение Земли не будет [8].

В данной статье мы показываем, что эффект Саньяка не является релятивистским, и объясняем его на основе чисто классических представлений.

В предыдущей нашей работе [9] мы, используя принцип Ферма, объяснили эффект Саньяка на основе классических представлений, сделав при этом следующие два предположения:

- во вращающемся контуре **фотоны** между отражениями от зеркал **движутся относительно инерциальной системы прямолинейно**,
- **точка пространства**, из которой фотоны в данный момент излучаются, за время, пока первый фронт фотонов движется до следующего зеркала, **остаётся неподвижной, то есть источник света рассматривается как неподвижный относительно инерциальной системы**.

Эти два условия позволили объяснить эффект Саньяка без использования гипотезы эфира или релятивистских эффектов и сделать вывод, что относительно вращающегося контура лучи идут **по криволинейным траекториям** и **с одинаковой скоростью  $C/n$  проходят разные расстояния**: луч, идущий навстречу вращению, **относительно контура** проходит меньший путь, чем луч, идущий в направлении вращения.

Эти же условия позволили нам объяснить эффект Саньяка в **оптоволоконных гироскопах**, где эффект Саньяка значительно усиливается за счёт многократного обхода контура и пути лучей также сравниваются по линиям интерференции [10].

**В системе GPS** эффект Саньяка объясняется значительно проще, чем в интерферометре Саньяка или в лазерном гироскопе, где два встречных луча, многократно отражаясь, идут по замкнутому контуру и пройденные расстояния сравниваются по линиям интерференции. В системе GPS сигнал идёт по разомкнутой траектории без промежуточных отражений. И самое важное отличие состоит в том, что можно рассматривать только один сигнал, не сравнивая его со вторым. Последнее стало возможным благодаря использованию в системе GPS современных сверхточных атомных часов: вместо интерферометрического сравнения двух лучей стало возможным непосредственно измерять время, за которое один луч приходит от спутника к приёмнику на вращающейся Земле. Ещё одно отличие заключается в том, что источник сигнала не вращается вместе с приёмником, а с постоянной скоростью движется по неподвижной относительно инерциальной системы орбите.

Принцип построения траектории и определения пройденного сигналом расстояния остаётся тем же: **относительно инерциальной системы** фотоны со скоростью  $C/n$  движутся по прямой, соединяющей точку, в которой источник находился в момент излучения, с точкой, в которой оказывается приёмник в момент прихода к нему сигнала, и **пройденное расстояние** определяется длиной этой прямой. **Относительно вращающейся системы** фотоны движутся по криволинейной траектории и проходят относительно неё такое же расстояние. Время, за которое сигнал приходит к приёмнику, определяется делением расстояния на скорость движения  $C/n$ .

### **Предположения, принятые при анализе траекторий сигналов**

Прежде чем анализировать траектории сигнала от спутника к приёмнику на Земле, несколько подробнее рассмотрим названные выше условия о **прямолинейности движения** фотонов относительно инерциальной системы и **неподвижности точки**, в которой они были излучены.

Фотоны в пустоте движутся от источника S к приёмнику R прямолинейно со скоростью  $C$ . Если перпендикулярно линии SR со скоростью  $V$  движется какая-то прозрачная среда (например, стеклянная пластинка или облако газа), фотоны переизлучаются этой средой и идут относительно неё со скоростью  $C/n$ . Но до того, как скорость фотонов становится равной  $C/n$ , происходит следующее.

Фотон приближается к движущейся стеклянной пластинке со скоростью  $C$  и с первым переизлучающим атомом встречается в точке K (Рис.1). Но так как пластинка движется со скоростью  $V$ , с переизлучающим атомом фотон встречается со скоростью, равной векторной сумме  $\vec{C} + \vec{V}$  и направленной, как показано пунктиром, вдоль линии S1- K. Атом поглощает фотон и после некоторой задержки излучает его с несколько большей частотой в том же направлении со скоростью, равной  $C$ . В этом направлении фотон идёт к следующему атому, переизлучается им и со средней скоростью  $C/n$  идёт в стекле дальше. Движущийся со стеклом наблюдатель видит, что свет идёт к нему не с реального направления на источник S, а с кажущегося направления на источник S1, то есть видит, что свет идёт под углом аберрации (которую Бродлей обнаружил при наблюдении звёзд).

Последний переизлучающий атом движущейся стеклянной пластинки излучает фотон со скоростью  $C$ . Но так как пластинка движется со скоростью  $V$ , скорость фотона уменьшается до скорости, равной векторной разности  $\vec{C} - \vec{V}$  и направленной точно в сторону приёмника. С такой скоростью фотон движется до переизлучения атомом реальной разреженной среды и переизлучается (и частота соответственно уменьшается до прежнего значения).

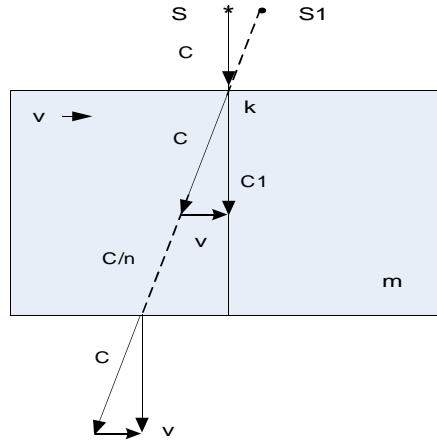


Рис.1

Нас во всём этом процессе интересует только то, что после взаимодействия фотонов с движущейся средой **направление** их движения **не изменяется**.

На Рис.2 на простом примере показано, как используется второе условие — неподвижность точки, из которой излучены фотоны первого волнового фронта.

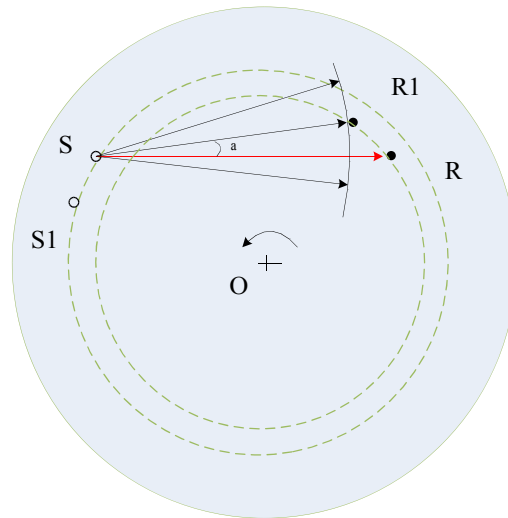


Рис.2

Если источник  $S$  и приёмник  $R$  неподвижны относительно атмосферы, сигнал идёт по прямой  $S-R$  и приходит к приёмнику за время  $SR/C$ . Приёмник видит фотоны, излученные точно в его направлении.

Как изменится время прохождения сигнала, если источник и приёмник движутся, например, по орбитам вокруг Земли? За время, пока сигнал идёт к приёмнику, источник и приёмник

смещаются с тех мест, где они находились в момент излучения сигнала.

Так как приёмник движется с другой скоростью, расстояние до источника и момент прихода сигнала очевидно зависят от его движения. Сигнал встречается с приёмником в той точке, в которую приёмник приходит за время движения сигнала.

Но так же очевидно и то, что движение источника никак не влияет на момент прихода сигнала к приёмнику: после того, как в момент  $t=0$  источник посылает сигнал, фотоны первого волнового фронта идут со скоростью  $C$  в направлении к приёмнику и ни их скорость, ни направление их движения не зависят от того, что после момента  $t=0$  происходит с источником. Фотоны первого фронта идут точно так, как они шли бы от неподвижного источника. Таким образом, начало траектории сигнала спутника оказывается в точке  $S$ . И что особенно важно для правильного представления об эффекте Саньяка, к приёмнику приходят не те фотоны, которые источник излучил в направлении приёмника, а те, которые приёмник излучил под некоторым углом к направлению, в котором приёмник находится в момент  $t=0$ . Поэтому в момент излучения сигнала приёмник видит, что сигнал идёт не прямо к нему, а под углом « $\alpha$ » к направлению, где в момент излучения находится спутник с источником сигнала (Рис.2).

Таким образом, задача сводится к определению расстояния между той точкой пространства, откуда фотоны были излучены, и той точкой, в которую приходит приёмник за время, пока к нему приходят фотоны первого волнового фронта.

### Анализ траекторий сигналов в системе GPS

Орбиты спутников GPS движутся вместе с Землёй по орбите вокруг Солнца, сохраняя независимо от вращения Земли ориентацию относительно инерциальной системы. Спутники одновременно посылают сигналы, которые в зависимости от расположения приёмника относительно спутников приходят к нему не одновременно, что позволяет определить координаты приёмника относительно известных координат спутников. Из-за того, что приёмник вращается вместе с Землёй, возникает эффект Саньяка и моменты прихода сигналов к приёмнику изменяются, что приводит к появлению дополнительных ошибки позиционирования.

Приведенный ниже анализ эффекта Саньяка на примере системы GPS показывает, что этот эффект, так же как гравитационное смещение частоты, скоростное смещение частоты и другие «релятивистские» эффекты, имеет простое классическое объяснение.

На Рис.3

в условном масштабе показано распространение сигналов GPS от двух спутников: от спутника  $S_w$ , находящегося западнее приёмника  $R$ , и от спутника  $S_e$ , находящегося на таком же расстоянии восточнее приёмника  $R$ . Траектории сигналов никак не связаны между собой и их можно рассматривать в отдельности. Мы рассматриваем одновременно две траектории только с целью большей наглядности. Распространение сигналов с момента излучения сигнала спутником до момента прихода сигнала к приёмнику  $R$  анализируется относительно инерциальной системы.

Если представить, что Земля не вращается, сигналы от спутников должны идти со скоростью  $C/n$  по прямым  $S_w-R$  и  $S_e-R$  и расстояния  $(S_w-R)=(S_e-R)$  проходить за одинаковое время  $t_0$ . В этом случае траектории фотонов очевидно должны быть прямыми линиями не только относительно инерциальной системы, но и относительно Земли.

В реальной ситуации в момент излучения сигналов спутники Sw и Se находятся на одинаковом расстоянии от приёмника R. За время, пока сигнал идёт к приёмнику, Земля поворачивается на некоторый угол и приёмник из начального положения 1 смещается на восток - в положение 2 для спутника Sw (Рис.3,а) и в положение 3 для спутника Se (Рис.3б).

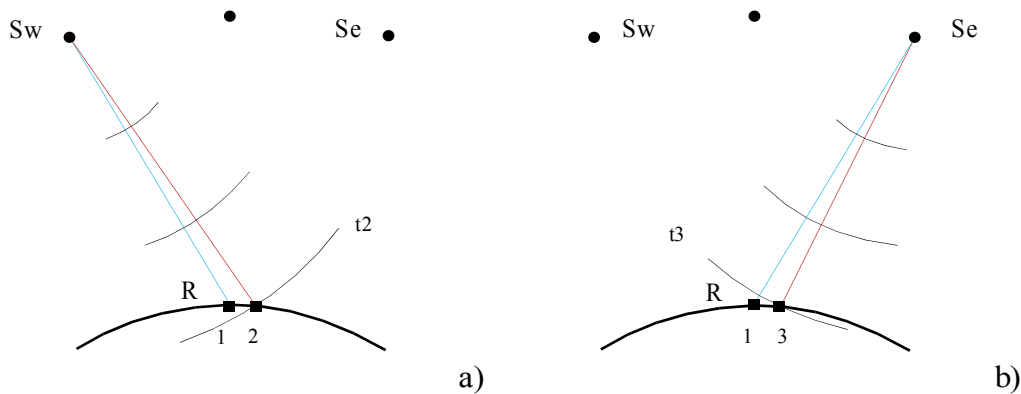


Рис.3

В инерциальной системе фотоны выходят из точки, в которой спутник находился в момент излучения, и приходят не в точку 1, где в этот момент находился приёмник, а в новую точку (соответственно 2 или 3). Так как относительно инерциальной системы фотоны всегда движутся прямолинейно, траектории Sw-2 и Se-3 оказываются прямыми линиями. Расстояние Sw-2 оказывается больше, чем расстояние Sw-1, а расстояние Se-3 оказывается меньше, чем расстояние Se-1.

Таким образом, из-за эффекта Саньяка: сигнал от спутника Sw, находящегося западнее приёмника R, проходит **большее** расстояние и поэтому приходит к приёмнику позже, сигнал от спутника Se, находящегося восточнее приёмника R, проходит **меньшее** расстояние и поэтому приходит к приёмнику раньше, и в обоих случаях возникают ошибки позиционирования в направлении **на восток**.

Однако относительно вращающейся системы, в которой находится приёмник R, траектории оказываются криволинейными. Объяснить это можно следующим образом.

Опять представим, что Земля не вращается и со спутника в направлении приёмника сигнал посылается в виде очень узкого лазерного луча. Сигнал приходит к приёмнику R только в том случае, если лазер направлен точно вдоль линии Sw-1 (Рис.3,а).

В реальной ситуации из-за вращения Земли приёмник R смещается из точки 1 и поэтому такой луч очевидно не придёт к приёмнику R, а попадёт в точку западнее его. Чтобы сигнал пришёл точно к приёмнику R, лазер надо направить не вдоль линии Sw-1, а вдоль линии Sw-2, то есть с некоторым упреждением, отклонив лазер от истинного направления на угол 1-Sw-2. В этом случае приёмник увидит, что сначала луч идёт не прямо к нему, а отклонён на восток, а затем изменяет направление и приходит к нему. Луч, направленный под углом к истинному направлению, приходит в точку 2, что с точки зрения наблюдателя на Земле означает, что луч идёт не прямолинейно, а по некоторой кривой.

**Примечание:** Избавиться от принятой у релятивистов «точки зрения наблюдателя» можно, если вернуться к реальной физике процесса. Ведь на самом деле спутник посылает в направлении к приёмнику не узкий луч (как в случае с очень узким лучом лазера, который надо поворачивать на некоторый угол, чтобы попасть в приёмник), а непрерывный фронт, в котором все фотоны имеют одинаковую фазу, но каждый из них движется относительно инерциальной системы по собственной прямолинейной траектории, выходящей из точки, из которой этот фронт был излучен. Когда приёмник находится в не вращающейся системе, к нему приходят те фотоны, которые оказались излученными строго в его направлении (Sw-1 или Se-1). Но в случае вращающейся системы к приёмнику приходят **не эти** фотоны, а **другие**, излученные в **другом** направлении (Sw-2 на Рис.1,а или Se-3 на Рис.1,б). И эти «другие» фотоны движутся относительно инерциальной системы так же по прямолинейным, но другим траекториям.

Проходимые сигналами расстояния Sw-2 и Se-3 мы определили графически, построив в Visio-7 траектории сигналов в масштабе (Рис.4).

Угол, под которым приёмник видит спутник, выбран произвольно и равен (как и на Рис.1) 30 град (от вертикали).

Если не учитывать эффект Саньяка, сигналы должны идти по траекториям Sw -1 и Se -1. При высоте орбиты 20 180 км расстояния Sw и Se оказываются равными 20 860 км.

Большую часть этих расстояний сигналы проходят в сильно разреженной атмосфере со скоростью, практически равной  $C=299792,458$  км/сек. В плотных слоях атмосферы (на последних 50-100 км, где показатель преломления увеличивается до 1.0003) скорость света уменьшается приблизительно до 299700 км/сек.

Изменение скорости в плотных слоях атмосферы принципиально не влияет на характер приведенных ниже вычислений. Поэтому для упрощения анализа мы предполагаем, что весь путь сигнал проходит со скоростью  $C = 299\ 792\ 458$  м/сек.

### Сигнал от спутника Sw

На Рис.4 траектории сигналов представлены в Visio 7 в масштабе 10 км / 1 деление. То есть, траектории Sw-1 (длина 20 860 км) соответствует отрезок линии длиной 2086 делений.

Если представить, что Земля не вращается и поэтому эффект Саньяка отсутствует, сигнал от спутника Sw к приёмнику R должен прийти за время

$$t_0(Sw-1) = 20860 / 299792.458 = 0.069\ 581\ 470\ 258\ 334\ \text{сек}$$

( 0.069 581 470 258 334 517 541 465 302 639 47 )

Но так как на самом деле Земля вращается, сигнал идёт по траектории Sw-2 и через промежуток времени  $t(Sw-2)$  приходит к приёмнику R, который в этот момент оказывается в точке 2.

Величина смещения L1-2 приёмника определяется длительностью промежутка времени  $t_0(Sw-2)$ , за которое сигнал приходит от спутника Sw в точку 2, и скоростью V, с которой приёмник движется:  $V t_0(Sw-2)$ .

Скорость движения приёмника от точки 1 инерциальной системы к точке 2 определяется широтой, на которой расположен приёмник. На экваторе эта скорость равна 460 м/сек. В качестве примера мы рассматриваем случай, когда приёмник расположен на широте, где его скорость V равна 300 м/сек.

Вместо времени  $t_0(S_{w-2})$  с ничтожно малой погрешностью может быть использовано очень близкое по величине известное время  $t_0(S_{w-1})$ . За такой промежуток времени движущийся со скоростью  $V = 300$  м/сек приёмник смещается в восточном направлении на расстояние

$$L_{1-2} = V t_0(S_{w-1}) = 20.87 \text{ м} \quad (0.020874441077500355262439590791841 \text{ км})$$

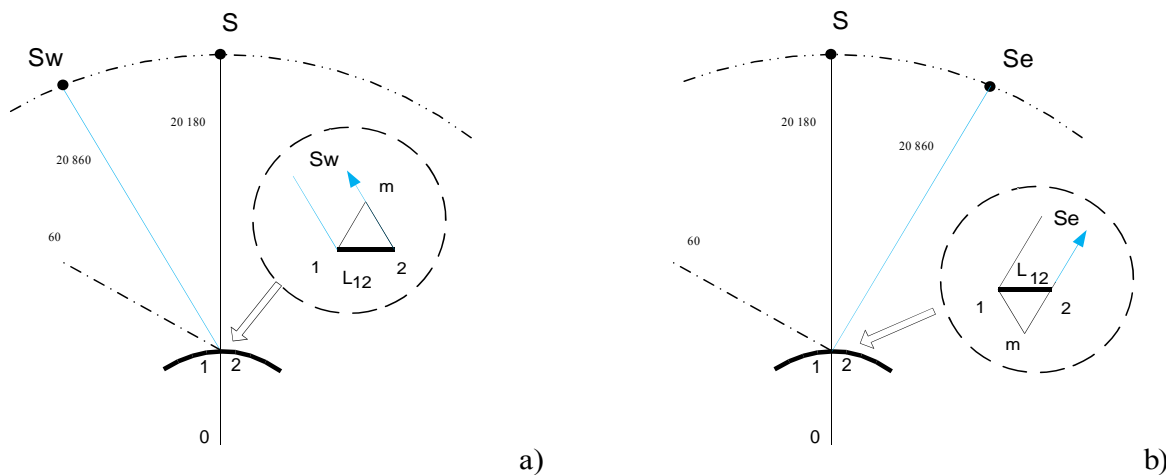


Рис.4

В треугольнике 1-m-2, изображённом на Рис.4,а в увеличенном масштабе, отрезок 1-2 практически является прямой линией и линия 1-m перпендикулярна траектории  $S_{w-1}$ . Отрезок 2-m определяет разность расстояний  $t_0(S_{w-2}) - t_0(S_{w-1})$ . Длина отрезка 2-m в данном случае оказывается практически равной смещению  $L_{1-2}$  (отрезок 2-2):  $L_{2-m} = 0.02087 \text{ км}$

Это расстояние 20.87 м сигнал проходит за время 0.00000069 сек

$$(0.0000006962964050783544148545455)$$

Таким образом, сигнал от спутника  $S_w$  идёт по траектории  $S_{w-2}$ , длина которой оказывается на 20,874 м больше и равна 20860.020874 км,

к приёмнику приходит за время 0.069581539887975 сек, (0.06958153988797502537690678809402)

большее на 0.00000069629640 сек (0.0000006962964050783544148545455)

и ошибка позиционирования оказывается равной  $L_{1-2} = 20.87 \text{ м}$

Для спутника  $S_e$ ,

расположенного западнее приёмника и видимого приёмником под таким же углом 30 град, погрешность позиционирования определена по Рис.4,б и по величине оказывается практически такой же. Сигнал идёт по траектории, длина которой оказывается меньше и равна 20859.97912 км, и приходит к приёмнику за время 0.069581400630165 сек

Для спутника, находящегося над приёмником, расстояние до приёмника равно 20180 км и сигнал приходит за время 0.067313234410987 сек. Ошибка позиционирования оказывается меньше и равна 20,19 м

Ошибка позиционирования значительно возрастает для спутников, видимых под большим углом,

Так, например, для **спутника, видимого под углом 60 град**, расстояние до приёмника равно 22 730 км, сигнал приходит за время 0.077 486 314 530 721 сек и ошибка позиционирования увеличивается до **58.15 м**

Таким образом, **из-за эффекта Саньяка** для спутников, находящихся западнее приёмника, длина траектории увеличивается и сигнал приходит позже, а для спутников, находящихся восточнее приёмника, длина траектории уменьшается и сигнал приходит раньше, но в обоих случаях ошибки позиционирования оказываются направленными в одну сторону: в обоих случаях, если не введена поправка на этот эффект, координата приёмника, определённая по сигналам спутников, смещается на несколько десятков метров на восток. Эта ошибка оказывается тем больше, чем ближе к экватору расположен приёмник и чем больше угол, под которым приёмник видит спутник GPS. К сожалению, сравнить вычисленные нами ошибки позиционирования с действительно наблюдаемыми мы не смогли, так как в опубликованных статьях почему-то говорят только то, что эти ошибки «досигают десятков метров», но конкретные цифры нигде не приводятся. Может быть, из-за непонимания сущности эффекта Саньяка и лишь «релятивистского» его объяснения?

### Ссылки:

1. The Sagnac Effect in the Global Positioning System, Neil Ashby [https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-94-017-0528-8\\_3](https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-94-017-0528-8_3)
2. Relativity in the Global Positioning System, Neil Ashby <https://link.springer.com/article/10.12942/lrr-2003-1>
3. Sagnac effect, [https://en.wikipedia.org/wiki/Sagnac\\_effect](https://en.wikipedia.org/wiki/Sagnac_effect)
4. Relativity and GPS, Ronald R. Hatch [http://www.naturalphilosophy.org/pdf/abstracts/abstracts\\_1785.pdf](http://www.naturalphilosophy.org/pdf/abstracts/abstracts_1785.pdf)
5. Sagnac effect and its interpretation by Paul Langevin <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631070517300907#:~:text=These%20systems%20operate%20on%20the%20principle%20of%20the,of%20the%20aether%20discarded%20by%20the%20Einsteinian%20relativity.>
6. The Sagnac Effect: Does it Contradict Relativity? <http://www.conspiracyoflight.com/SagnacRel/SagnacandRel.html>
7. Generalized Sagnac Effect Ruyong Wang, Yi Zheng, and Aiping Yao <https://arxiv.org/ftp/physics/papers/0609/0609235.pdf>
8. Analysis of the Phase Difference in a Fiber-Optical Conveyor Vitali Sokolov, Gennadiy Sokolov <https://www.gsjournal.net/Science-Journals/Research%20Papers-Mechanics%20/%20Electrodynamics/Download/4387>
9. The Sagnac Effect Gennadiy Sokolov, Vitali Sokolov <https://www.gsjournal.net/Science-Journals/Research%20Papers-Mechanics%20/%20Electrodynamics/Download/5319>
10. The Sagnac Effect ( A n A d d i t i o n ) Gennadiy Sokolov, Vitali Sokolov <https://www.gsjournal.net/Science-Journals/Research%20Papers-Mechanics%20/%20Electrodynamics/Download/5342>