УЧЕТ РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЭФФЕКТА

В УСТРОЙСТВАХ СИНХРОНИЗАЦИИ ВРЕМЕНИ

А. К. Светлов

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время волновой метод ОМП ЛЭП (определения места повреждения линий электропередачи) является одним из перспективных методов ОМП. Указанный метод основан на измерении времени между моментами достижения двух концов ЛЭП фронтами электромагнитных волн, возникающих в месте повреждения. Необходимым условием реализации метода является синхронный счет времени на двух концах ЛЭП с точностью до микросекунд [1], стр.6., поскольку погрешность синхронизации всего в одну микросекунду приводит к ошибке ОМП порядка трех сотен метров. Поэтому до недавнего времени реализация волнового ОМП представляла собой довольно сложную техническую задачу.

Ситуация существенно изменилась в связи с массовым внедрением систем ГНСС (глобальных навигационных спутниковых систем): ГЛОНАСС, GPS и др. Далее будем указывать просто «ГНС» - глобальная навигационная система (без указания, что эта система спутниковая, поскольку трудно себе представить современную ГНС без применения спутниковых систем и технологий).

Однако здесь выявились свои проблемы. Не будем на этом подробно останавливаться, описание этих проблем довольно хорошо рассмотрено в работе [2]. Поэтому в ряде случаев для решения задач ОМП оказалась более целесообразной идея построения своей «местной ГНС». Разумеется, такое название является весьма преувеличенным, поскольку эта система будет выполнять лишь функции синхронизации времени по обычному радиоканалу, определение навигационных параметров (позиционирования объекта и др.) здесь не требуется.

Задача в принципе решаема, все технические решения в настоящий момент времени изучены и отработаны. Однако при изучении данного материала невозможно было не обратить внимание на отдельные *загадочные* заявления из открытых источников, что в системах ГНС якобы производится учет ***релятивистского эффекта***. Конечно же механизм, как производится учет этого эффекта, найти не удалось. Изучение принципов работы конкретных ГНС также не дало никаких результатов, частности, в весьма подробном описании принципов работы GPS, представленном в работе [3] не обнаружено ни одного упоминания про релятивистский эффект.

Поскольку в указанной работе [3] рассматривается учет эффекта Доплера, разумно будет полагать, что релятивистский эффект в системах GPS либо вообще не учитывается, либо просто не предоставляется для публикации в открытых источниках.

Поэтому здесь возникает довольно интересный вопрос:

-Нужно ли производить учет релятивистского эффекта в устройствах синхронизации времени, работающих по радиоканалу? И если нужно, то как?

Вопрос не из легких, осложняется еще и тем, что охватывает две принципиально различные области науки и техники. Специалист в области ГНС, который смог бы дать грамотный исчерпывающий ответ, должен прекрасно знать физику, а если на его месте оказался бы ученый-физик, он должен тогда в совершенстве знать принципы работы ГНС. Такие специалисты (со всесторонним, или «академическим» образованием) встречаются в настоящее время крайне редко.

Поэтому потребовалась проработка материалов по основам СТО (специальной теории относительности) в рамках минимума университетской программы, чтобы можно было разделить вопрос на отдельные (профильные) составляющие и задать физикам чисто «физический» вопрос без привязки к конкретному приложению, в данном случае к ГНС. В процессе этих начинаний при рассмотрении одной из задач, связанных с релятивистским эффектом, а именно при изучении практического аспекта задачи, выявились отдельные противоречия, разрешение которых не представилось возможным. Появился вопрос более расширенного содержания, чем был поставлен изначально: ***как производить учет релятивистского эффекта в общем случае***?

Об этом и пойдет речь в данной работе.

ЗАДАЧА

Рассмотрим задачу, взятую из типового учебного пособия по физике за 1984 г. Отсканированная копия задачи представлена в Приложении. Название пособия не указывается, поскольку задача является классической, подобные задачи содержатся в каждом втором и третьем учебнике по физике.

Суть задачи в следующем:

Два звездолета движутся навстречу друг другу со скоростями 3/4 *c* (три четверти скорости света, или 0,75 *c*, здесь и далее символом «*c*» обозначается скорость света, если не указано иное, не путать с обозначением секунды) и -3/4 *c* относительно Земли (см. рис. 1). Какова их скорость сближения *u*?

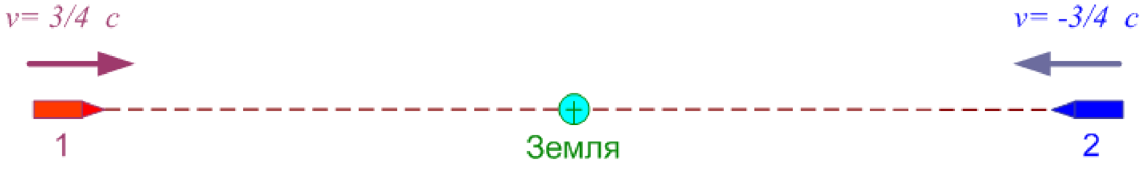

Рис.1

В задаче принимается один звездолет (обозначенный синим цветом под номером 2) за неподвижную систему отсчета, тогда Земля движется относительно него со скоростью *v*=3/4 *c*, а другой звездолет (обозначенный красным цветом под номером 1) движется относительно Земли со скоростью *u*'=3/4 *c* (см. рис. 2).

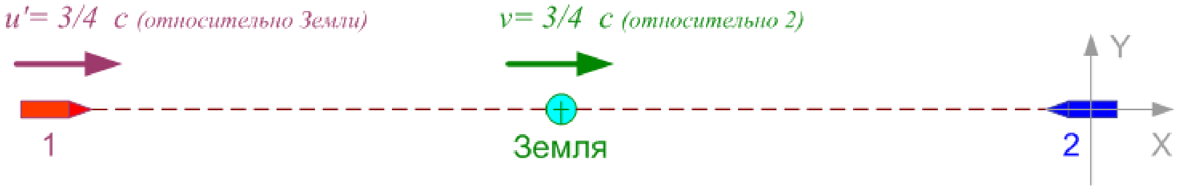

Рис.2 Введем для наглядности координатные оси X и Y. Поскольку движение происходит вдоль одной прямой, а именно – оси X, ось Y в принципе не нужна и показана только для того, чтобы было наглядно видно начало отсчета.

В задаче также отмечается (см. Приложение), что в соответствие с преобразованиями Галилея скорость сближения равна сумме скоростей $u=u'+v=6/4\ c$. Результат оказывается больше c.

СТО категорически запрещает скорости, превышающие скорости света в вакууме (это своего рода «табу»), поэтому задачу следует решать по формуле 17 (см. там же):

$$u = \frac{u' + v}{1 + u'v/c^2} = 0{,}96c < c \quad (1)$$

Получилось довольно хорошо, «табу» не нарушено, первое впечатление неплохое, теория представляется вполне работоспособной.

Однако далее мы увидим, что при попытке применить вышеуказанные рассуждения на практике, подставив в формулу (1) конкретные числовые значения, получается далеко не так гладко и изящно, как это декларируется в учебниках.

Для удобства присвоим первому звездолету название «Маяк», а второму – «Луч». Примем расстояния между каждым звездолетом и Землей одинаковыми и равными 1/2 световых года, см. рис.3 (далее световой год условимся обозначать «Св. год»).

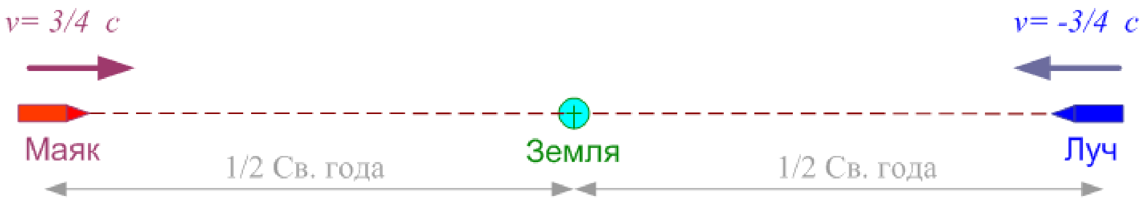

Рис.3

Определим время, которое необходимо звездолетам, чтобы долететь до Земли и время до их встречи друг с другом.

Поскольку расстояния от звездолетов до Земли одинаковы и скорости (по модулю) тоже одинаковы, очевидно, что время, которое необходимо звездолетам, чтобы долететь до Земли, будет также одинаково и численно равно:

(1/2 Св. года)/(3/4 c)=2/3 г.=0,667 г.=8 мес.

Также из условия равенства расстояний от звездолетов до Земли и равенства их скоростей очевидно, что время до встречи звездолетов будет равно времени полета звездолетов до Земли. И местом встречи (точкой встречи) звездолетов будет непосредственно сама Земля. Таким образом, астронавты встретятся через 8 месяцев (или 2/3 г.) на Земле.

Для понимания и проверки правильности вышеуказанных расчетов приводим следующий пример: расстояние до ближайшей звезды «Альфа Центавра» – четыре световых года. Свет, излучаемый этой звездой, идет до Земли четыре года. Если некий объект движется от этой звезды по направлению к Земле со скоростью 1/2 *c* (со скоростью, в 2 раза меньшей скорости света), этот объект достигнет Земли через время:

(4 Св. года)/(1/2 с)=8 лет.

Положим, что диаметрально противоположно по отношению к звезде «Альфа Центавра» находится космическая станция, причем также – на расстоянии четырех световых лет от Земли. Свет (или радиосигнал) от этой станции будет идти до Земли четыре года. Если некий объект движется от этой станции по направлению к Земле со скоростью 1/2 *c*), этот объект достигнет Земли через такое же время:

(4 Св. года)/(1/2 с)=8 лет.

Далее предлагается изложение материала в «художественном» стиле, подобно тому, как это сделано в [4] – в виде диалога капитанов двух звездных кораблей. Это сделано для более удобного понимания сути вопроса на случай, если читателями окажутся «члены Академии безусых»* – то есть те, кто еще только сидит за школьной партой и делает первые шаги в науку и технику.

*Примечание 1: во времена СССР издавался замечательный журнал под названием «Юный техник», пользующийся большой популярностью среди молодежи. В этом журнале была рубрика «Академия безусых», где публиковались различные достижения, новаторства и интересные идеи, предлагаемые юными изобретателями.

Итак, предлагаем вниманию читателя диалог (переговоры по каналам связи) капитанов кораблей «Луч» и «Маяк», готовящихся к встрече:

–Маяк, Маяк, я Луч, направляюсь к Земле со скоростью -3/4 *c*, дистанция 1/2 световых года.

–Луч, я Маяк, Вас понял, направляюсь к Земле со скоростью 3/4 *c*, дистанция также 1/2 световых года.

Дайте расчет времени встречи.

Пауза…

–Маяк, с расчетом возникли некоторые проблемы. На земле и вас и нас ждут ровно через 8 месяцев.

Признаться, если взять расстояние между нашими кораблями 1 световой год *(сумма расстояний: 1/2 Св. года + 1/2 Св. года)* и разделить на сумму наших скоростей 6/4 *c*=1,5 *c (3/4 c+3/4 c)* – получается все верно: 8 месяцев.

Но так нельзя, нарушается «табу», установленное СТО (скорость сближения не может быть больше с). Поэтому расчет скоростей сближения произведен по вышеуказанной формуле (1): u=0,96 *c*. Тогда время до встречи:

Тв=1 Св. год / 0,96 *c* =1,042 г.=12,5 мес.

Время до встречи получается довольно большим – больше чем на Земле. К моменту встречи коллеги на Земле постареют всего на 8 месяцев, а мы, получается, более чем на год. Это не соответствует «парадоксу» близнецов, когда старение в полете должно происходить медленнее, чем на Земле*. Что-то здесь не так…

*Примечание 2: «Парадокс» близнецов заключается в следующем. Когда некто в молодом возрасте улетает в межзвездное путешествие со скоростью, соизмеримой со скоростью света - по прибытии должно оказаться, что его сверстники уже должны стать пожилыми людьми, в то время, как для самого путешественника должно пройти всего лишь несколько лет.

Например, при скорости полета, отличной от скорости света на 0,5% (v=0,995 с), релятивистский множитель будет примерно равен 0,1. Таким образом, по истечении сорока лет на Земле для звездного путешественника должно пройти всего четыре года.

Такие выводы из теории относительности предлагаются практически во всех учебниках. На основе этих выводов во времена СССР был снят научно-фантастический фильм-сериал «Москва-Кассиопея» и «Отроки во вселенной».

–Луч, возможно ошибка в следующем: поскольку мы движемся со скоростью сближения u=0,96 c, нужно учесть релятивистское сокращение расстояния между кораблями.

Пауза…

–Маяк, релятивистское сокращение расстояния между кораблями учтено:

$$L_{сокр} = L * \sqrt{1-\beta^2} = 1 * \sqrt{1-0{,}96^2} = 0{,}28c * г, \text{ где } \beta = u/c$$

Время до встречи получилось Тв=0,28 с*г./ 0,96 c =0,29167 г.=3,5 мес.

Все было бы хорошо, но бортинженер решил посчитать разницу, во сколько раз будут отставать наши бортовые часы от часов на Земле. Эта разница равна отношению промежутка времени до встречи на Земле Тз=8 мес. к только что рассчитанному времени до встречи на борту Тв=3,5 мес. Бортовые часы должны были бы отставать от часов на Земле в Тз/Тв== 8/3,5=2,286 раз.

Однако СТО учит нас, что релятивистское замедление времени должно происходить в

$1/\sqrt{1-\beta^2} = 3{,}571$ раз, где $\beta = u/c = 0{,}96$, а не в 2,286 раз.

И если на Земле до встречи проходит 8 мес., согласно СТО на борту должно пройти до встречи:

$8\sqrt{1-\beta^2} = 2{,}2$ мес., где $\beta = u/c = 0{,}96$, а не 3,5 мес.

Что-то снова здесь не так…

–Луч, возможно ошибка теперь в следующем: ваш бортинженер решил посчитать разницу, во сколько раз будут отставать ваши бортовые часы от часов на Земле. Земля приближается к вам со скоростью v. Поэтому когда Вы делаете расчет релятивистского замедления времени в соответствие с СТО, логично предположить, что нужно в релятивистский множитель подставлять v, а не u.

–Маяк, коррекцию расчетов произвели, *противоречие* не устранилось, вот результат:

Релятивистское замедление времени получилось в

$1/\sqrt{1-\beta_1^2} = 1{,}512$ раз, где $\beta_1 = v/c$,

соответственно время до встречи:

$8\sqrt{1-\beta_1^2} = 5{,}3$ мес., где $\beta_1 = v/c$.

Команда звездолета обеспокоена. Не понятно, как бортовые часы будут отставать от часов на Земле: в 1,512; в 2,286 или в 3,571 раз. Но это еще не все, главный вопрос - через какой промежуток времени мы прилетим к точке встречи на Земле, через 2,2; 3,5 или 5,3 месяца?

Большая пауза…

–Луч, проблема принята, отправили запрос на Землю – ученым-физикам, пусть разбираются, а пока предложение такое… Ваш бортинженер может наладить синхронизацию бортовых часов с часами на Земле?

–Думаю, сможет… (*Этот инженер что-нибудь да выдумает!*)…

–Вот и хорошо! Занимайтесь по утвержденному плану, бортжурнал пока ведите по Земным часам. Конец связи…

От искушенного читателя наверняка не ускользнет небольшая техническая деталь переговоров: каким образом осуществляются последние при расстоянии между звездолетами в один световой год? Дело в том, что скорость передачи сообщения по радиоканалу также не может превышать скорость света, таким образом только на обмен приветствиями уйдет два года!

Но чтобы не отвлекаться от вопросов, поставленных в работе, будем пока полагать, что идут еще только приготовления к полету. «Маяк» и «Луч» находятся на Земле, недалеко друг от друга, и связь между ними осуществляется по обычной радиосвязи, поэтому задержкой распространения сигнала в данном случае пренебрегаем.

А вообще вопрос интересный, чтобы отправить-принять всего лишь одно сообщение до объекта, расположенного в районе ближайшей звезды «Альфа Центавра» (4 световых года от Земли), потребуется 8 лет! Какое же время потребуется для полноценного диалога?!

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

При попытке переноса задачи в область практической реализации (при подстановке конкретных числовых значений) возникли серьезные противоречия. Еще раз выделим эти противоречия.

Напомним задачу: Два звездолета движутся навстречу друг другу со скоростями 3/4 c и -3/4 c относительно Земли (см. рис. 1). Какова их скорость сближения u?

Скорость сближения определена по формуле (1), см. выше (а также см. Приложение). Принимаем расстояние между каждым звездолетом и Землей одинаковыми и равными 1/2 световых года.

Попробуем определить, через какое время с точки зрения астронавтов они встретятся и какова разница хода бортовых и Земных часов?

Очевидно, что если звездолеты находятся на одном и том же расстоянии от Земли (1/2 световых года) и мчатся к Земле с одной и той же скоростью (3/4 c), в центре управления полетами на Земле астронавтов ждут через:

Тз=(1/2 Св. года)/(3/4 c)=2/3 г.=0,667 г.=8 месяцев.

С точки зрения астронавтов время их встречи равно расстоянию между звездолетами, поделенному на скорость их сближения.

Согласно теории относительности Галилея (см. Приложение) время их встречи равно расстоянию между звездолетами в 1 световой год (1/2 Св. года + 1/2 Св. года), поделенному на сумму их скоростей 1,5 c (3/4 c+3/4 c) – в итоге получается также 8 месяцев. Однако поскольку мы имеем дело со скоростями, соизмеримыми со скоростью света c (тем более, что нарушено «табу» - скорость сближения получилась больше c !), переходим к СТО.

Теория относительности предлагает нам следующие концепции: во-первых – сложение скоростей должно производиться по формуле (1), во-вторых – время в полете (в частности в звездолете) должно отличаться от времени на Земле (должен иметь место эффект, который называется «парадоксом» часов).

Если просто поделить расстояние между звездолетами в 1 световой год (1/2 Св. года + 1/2 Св. года) не на сумму их скоростей 1,5 c (по Галилею), а на скорость их сближения 0,96 *c* (по СТО) по формуле (1), то полученное время до встречи (12,5 мес.) оказывается больше, чем на Земле (8 мес.):

Тв=1 Св. года / 0,96 *c* =1,042 г.=12,5 мес.

В этом случае результат будет противоречит «парадоксу близнецов», согласно которому старение в полете должно происходить медленнее, чем на Земле. Очевидно, что здесь нужно учесть релятивистское сокращение расстояния между кораблями:

$$L_{сокр} = L * \sqrt{1-\beta^2} = 1 * \sqrt{1-0{,}96^2} = 0{,}28 Св.года, \text{ где } \beta = u/c$$

Тогда время до встречи получается:

Тв = *Lсокр/u* = 0,28 Св. года/ 0,96 *c* = 0,292 г.= 3,5 мес. (2)

Определим, во сколько раз бортовые часы должны будут отставать от часов на Земле:

Тз/Тв== 8 мес./3,5 мес.=2,286 раз.

Получилось неплохо, но далее мы увидим, что полученный результат *противоречит* принципу замедления времени в СТО.

В любом учебнике мы найдем указание, что в системе координат, движущейся со скоростью *V*, следует производить учет замедления времени по отношению к покоящейся системе координат в соответствие с формулой:

$$T_{движ} = T_{покоящ} * \sqrt{1-\beta^2}, \text{ где } \beta = V/c \quad (3)$$

Таким образом, часы в системе координат, движущейся со скоростью *V*, должны будут отставать от часов в покоящейся системе координат на величину в

$T_{покоящ} / T_{движ} = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ раз,

где $\beta = V/c$

Подставляем численные значения в вышеуказанную формулу и получаем, что бортовые часы звездолета должны будут отставать от часов на Земле на величину в

$1/\sqrt{1-\beta_1^2} = 1{,}512$ раз, где $\beta_1 = v/c = 3/4$,

а не в **2,286** раз, как это мы посчитали ранее, см: **Тз/Тв**.

А также, если на Земле до встречи должно пройти 8 мес., согласно СТО на борту корабля до встречи должно пройти в соответствие с формулой (3):

$8\sqrt{1-\beta_1^2} = 5{,}3$ мес., где $\beta_1 = v/c = 3/4$,

а не **3,5** мес.

Здесь в релятивистский множитель было подставлено значение *v*, а не *u* (поскольку производится сравнение хода бортовых часов звездолета по отношению к часам на *Земле*, а Земля приближается к звездолету со скоростью *v*, см. рис.2).

Подстановка в данном случае в релятивистский множитель *u* будет некорректна. Тем не менее, сделаем такую подстановку, поскольку результат оказывается довольно привлекательным. В этом случае релятивистское замедление времени получается в

$1/\sqrt{1-\beta^2} = 3{,}571$ раз, где $\beta = u/c = 0{,}96$, а не в **2,286** раз,

соответственно время до встречи:

$8\sqrt{1-\beta^{2}} = 2{,}2$ мес., где $\beta = u/c = 0{,}96$,

а не **3,5** мес.

Для астронавтов это конечно самый «лучший» вариант ответа – ведь они быстрее встретятся, уже через 2,2 мес.! Результат привлекательный, но ***не верный!***

ВЫВОДЫ

Итак, рассмотрев возможные варианты решения задачи, в т.ч. и явно ошибочные, следует отметить, что поставленные в задаче вопросы остаются открытыми, а именно:

-Через какой промежуток времени астронавты встретятся?

-Во сколько раз бортовые часы должны будут отставать от часов на Земле?

Формула сложения скоростей СТО (1) не проходит проверку посредством формул (2) и (3), вытекающих из той же СТО.

Если предположить, что расчет по формуле (2) некорректен, спрашивается, зачем мы тогда вообще вычисляем скорость сближения по формуле (1), что это за таинственное значение u=0,96 c (полученное в данной задаче) и каким образом этим значением можно воспользоваться? Какую физическую величину или какой параметр можно определить, используя это значение (иными словами, какое практическое применение «релятивистской суммы» скоростей)?

Если же расчет по формуле (2) корректен, то как же быть с расчетом по формуле (3)? Релятивистский множитель замедления времени можно найти в любом учебнике, содержащем раздел по СТО!

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пока на поставленные вопросы нет однозначных ответов, можно сказать, что в данном случае имеет место «парадокс сложения скоростей», когда применение «релятивистской суммы» скоростей при практических расчетах приводит к противоречивым результатам.

В СТО уже известен «парадокс часов» (отставание часов в движущейся системе по отношению к ходу часов в покоящейся системе), «парадокс близнецов»* (см. Примечание 2 и Замечание, см. ниже), а также соответствующие выводы, вытекающие из этих «парадоксов». И если на эти парадоксы имеются хоть какие-то объяснения в известных источниках, то «парадокс сложения скоростей» представляет собой открытый вопрос, ответ на который хотелось бы услышать.

Понятно, что может быть еще весьма преждевременно поднимать эти вопросы, поскольку человечеству еще далеко до полетов с субсветовыми скоростями (если вообще когда-то достижимо), однако уже в настоящее время существует круг задач, где релятивистская поправка может оказать существенный вклад в точность работы тех или иных систем, в частности систем синхронизации времени...

***Замечание:** несколько слов о «парадоксе близнецов» (вопрос ученым-физикам, если они окажут любезность ознакомиться с настоящей публикацией). В отдельных учебных пособиях, в частности, см.

Приложение, объяснение «парадокса близнецов» сводится к следующему. Цитата: «*Представим, что один из двух близнецов улетает в длительный межзвездный полет, а другой остается на Земле… …Чтобы близнецы встретились, одна из систем отсчета должна испытывать ускорение, т.е. стать неинерциальной. В нашем примере это звездолет…*». Очень интересно, ***как же это так***, одна система отсчета (Земля) продолжает оставаться инерциальной, а система отсчета, связанная со звездолетом становится неинерциальной?

Когда морской корабль отплывает от берега [5] с ускорением, к примеру $a = 1м/с^2$ (один метр в секунду в квадрате, здесь символом *с* обозначена секунда, не путать с обозначением скорости света), берег также удаляется от корабля с таким же ускорением $a = 1м/с^2$! Когда корабль, взяв курс, начинает равномерное прямолинейное движение (с ускорением *а*=0), тогда и берег удаляется от корабля также равномерно и прямолинейно (с ускорением *а*=0)! Т.е. в первом случае система отсчета, связанная с кораблем является *неинерциальной* по отношению к системе отсчета, связанной с берегом, также и система отсчета, связанная с берегом, является *неинерциальной* по отношению к системе отсчета, связанной с кораблем. Во втором случае (когда ускорение а=0) система отсчета, связанная с кораблем является *инерциальной* по отношению к системе отсчета, связанной с берегом, также и система отсчета, связанная с берегом является *инерциальной* по отношению к системе отсчета, связанной с кораблем. Но так, чтобы одна система отсчета по отношению к другой оказалась неинерциальной, когда последняя к первой является инерциальной – это есть ***нарушение*** принципов той же теории относительности «о равноправности всех систем отсчета»! По всей видимости это тоже «парадокс»… И хотя авторы задачи в этом случае весьма изящным образом отсылают читателя к общей теории относительности (цитата из того же Приложения: …«парадокс близнецов» в рамках СТО неразрешим…), после ознакомления с данным материалом все же остаются непреодолимые сомнения: *что-то здесь не так…*

Однако вернемся к центральной теме настоящей работы (см. Введение), к заявлениям о том, что в системах ГНС якобы производится учет ***релятивистского эффекта***. В работе мы видим, что даже решение простых элементарных задач содержит в себе открытые вопросы, ответы на которые мы не найдем ни в одном учебнике. Кроме того, показано, что малейшая неточность в применении формул СТО или определении систем отсчета приводит к серьезным ошибкам. Спрашивается, как тогда можно производить учет релятивистского эффекта в более сложных технических задачах (в частности в ГНС), если еще нет четких и корректных решений простых примеров?

Итак, вопрос, поставленный в работе:

КАК СЛЕДУЕТ РЕШАТЬ ЭТУ ЗАДАЧУ?

остается ***открытым!..***

АВТОРСКИЕ ПРАВА

Автору не совсем нравится термин «автор», и по праву следовало бы здесь его употреблять в кавычках, поскольку все, что написано в настоящей работе, автор где-то слышал, когда-либо видел или где-нибудь прочитал. Но поскольку закон (ГК РФ) гласит, что *отказ от авторских прав ничтожен*, оставляем, как есть.

Поэтому, если в работе обнаружится нечто новое и оригинальное, то следует это почитать не иначе, как дар (нам всем) ***Свыше***.

Автор оставляет за собой право на некоторые неточности, недостаточно корректные выражения и может даже кому-то покажется – ошибки, которые однако не меняют сути данной статьи, которая по существу является всего лишь макетом для дальнейших исследований. А макет, как правило, не обязательно должен быть гладким и отшлифованным.

Отказ от ответственности: ни автор, ни компания НПП ЭнергоЭлектроника, любезно предоставившая возможность публикации данной статьи на сайте компании, не несет какой либо ответственности за материал настоящей работы. Последний предоставляется на условиях «*как есть*».

Компании НПП ЭнергоЭлектроника предоставляется право юридических действий, связанных с настоящей работой, если потребуются таковые.

На этом автор прощается с читателем (в надежде, что не навсегда). На все вопросы, если возникнут таковые, ответит руководитель компании НПП ЭнергоЭлектроника Аржанников А.В.

Александр Викторович имеет достаточную компетенцию по вопросам, рассмотренным в работе. Его тоже надо бы включить в число авторов (собственно его начинания и привели к созданию настоящей работы). Но поскольку он смотрит на это не более, чем как на «забаву» (несмотря на серьезность вопросов, поднимаемых в работе), оставляем, как есть…

30.08.2023 г.

г. Екатеринбург
E-mail:
svetlov@energyel.com

Лит:

1. Методы и приборы ОМП на ЛЭП. Е.А. Аржанников, А.М. Чухин, Москва, Библиотечка электротехника (приложение к журналу «Энергетик»), Вып. 3, 1998 г.
2. Уязвимость систем синхронизации, основанных на использовании ГНСС. Г.С. Нудельман и др., Москва, журнал «ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение», №3(18), 2013 г.
3. GNSS_Compendium_English(GPS-X-02007).pdf Essentials of Satellite Navigation (Основы спутниковой навигации) GPS-X-02007-C, Jean-Marie Zogg, Швейцария, 2007 г., 132 с., источник: www.u-blox.com
4. Теория относительности в задачах. В.В. Воробьев, Москва, «Наука», 1989 г., 176 с.
5. Галилео Галилей. А.Фантоли, Москва, «МИК», 1999 г., 424с.
6. Математика. Поиск Истины. М. Клайн, пер. с англ., Москва, «Мир», 1988 г., 296 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Типовая задача по сложению скоростей в СТО (скан-копия, учебное пособие по физике, 1984 г.)

Такой же результат получите сами, начав с интервала времени в неподвижной системе отсчета и помня, что координаты начала и конца данного события в подвижной системе отсчета различны ($x'_1 \neq x'_2$).

Следовательно, длительность события в движущейся системе отсчета увеличивается:

$$\Delta t' = \Delta t/\sqrt{1-\beta^2}. \qquad (16)$$

Именно этот эффект используют писатели-фантасты при описании межзвездных полетов: в звездолете время течет медленнее, чем на Земле.

Представим, что один из двух близнецов улетает в длительный межзвездный полет, а другой остается на Земле. Кто из них будет старше, когда они встретятся? Пока продолжается полет (для простоты, равномерный), обе системы отсчета равноправны (если забыть о некоторой неинерциальности Земли), все процессы в собственных системах отсчета протекают одинаково, а все процессы в другой системе протекают медленнее. Но так называемый «парадокс близнецов» неразрешим в рамках СТО. Чтобы близнецы встретились, одна из систем отсчета должна испытывать ускорение, т. е. стать неинерциальной. В нашем примере это, разумеется, звездолет. Общая теория относительности позволяет утверждать, что путешествующий близнец к моменту встречи будет более молодым, чем его земной брат.

Важно представить себе равноправность систем: каждый из наблюдателей «нормально» измеряет «свои» расстояния и времена, но подвижный наблюдатель видит все размеры в неподвижной системе укороченными в направлении движения и все часы в неподвижной системе – отстающими. Неподвижный наблюдатель видит все размеры в подвижной системе укороченными в направлении движения, и все часы подвижной системы – отстающими. И бессмысленным является вопрос: а как же на самом деле?

Именно на самом деле укорачиваются размеры в направлении движения и возрастает длительность событий при увеличении скорости движения системы отсчета, в которой рассматриваются объекты. Эти размеры и длительность относительны.

Закон сложения скоростей. Пусть материальная точка движется в некоторый момент времени вдоль оси x со скоростью $\mathbf{u}$ относительно неподвижной системы отсчета. Ее скорость в подвижной системе $\mathbf{u}'$, причем $u \overset{\text{1-I}}{=} \dfrac{dx}{dt}$, а

$$u' \overset{\text{1-I}}{=} \frac{dx'}{dt'}.$$

Следовательно,

$$u' \overset{9,11}{=} \frac{(dx - v\,dt)/\sqrt{1-\beta^2}}{(dt - v/c^2\,dx)/\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{dx - v\,dt}{dt - v/c^2\,dx} = $$

$$= \frac{dx/dt - v}{1 - v/c^2\,dx/dt} = \frac{u - v}{1 - vu/c^2}.$$

Мы получили закон сложения скоростей в виде:

$$u' = \frac{u - v}{1 - vu/c^2}. \qquad (17)$$

Легко видеть, что закон сложения скоростей по Галилею есть частный случай этого закона при $v \ll c$.

Выведите самостоятельную формулу для скорости u и убедитесь, что закон сложения скоростей инвариантен.

470

Рассмотрим соответствие закона сложения скоростей второму постулату Эйнштейна. Обозначим скорость света $u = c$ в неподвижной системе, относительно которой подвижная система движется с произвольной скоростью v. Скорость света в последней системе

$$u' \overset{17}{=} \frac{c - v}{1 - vc/c^2} = c\,\frac{c - v}{c - v} = c.$$

Пусть два звездолета движутся навстречу друг другу со скоростями 3/4 c и $-3/4$ c относительно Земли. Какова их скорость сближения u?

Примем один звездолет за неподвижную систему отсчета. Тогда Земля движется относительно него со скоростью $v = 3/4\ c$, а другой звездолет — относительно Земли со скоростью $u' = 3/4\ c$. Отметим, что по преобразованиям Галилея $u = u' + v = 6/4\ c > c$. На самом деле

$$u \overset{17}{=} \frac{u' + v}{1 + u'v/c^2} = 0{,}96\ c < c.$$

По всем формулам теории относительности видно, что релятивистские эффекты становятся заметными только при движении со скоростью, по порядку величины приближающейся к скорости света.

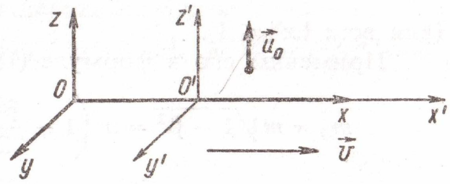

Рис. 462

Масса. Снова рассмотрим две инерциальные системы отсчета (рис. 462), причем подвижная движется относительно неподвижной со скоростью $v \sim c$.

Пусть материальная точка движется вдоль оси z в неподвижной системе отсчета со скоростью $u_0 \overset{1\text{-I}}{=} \frac{dz}{dt} \ll c$. Тогда масса точки практически равна ее *массе покоя* m_0, а импульс $\mathbf{p} = m_0\mathbf{u}_0$ (т. е. направлен вдоль оси z). В подвижной системе отсчета импульс той же материальной точки имеет другое значение и направление, но его проекция на ось z' $p_{z'} = mu'_{z'}$ равна проекции импульса $\mathbf{p}$ на ось z: $p_{z'} = p$.

Действительно в процессе установления скорости $\mathbf{v}$ должны были действовать силы, изменяющие импульс точки по второму закону Ньютона (34-I) только в направлении этой скорости, т. е. вдоль оси x'. Следовательно, составляющие импульса, перпендикулярные осям x и x', не изменялись: $m_0u_0 = mu'_{z'}$, где m — масса той же материальной точки в подвижной системе отсчета — ее *релятивистская масса*.

Проекция скорости материальной точки на ось z'

$$u'_{z'} \overset{1\text{-I}}{=} \frac{dz'}{dt'},$$

где $dz' = dz$ — перемещение вдоль оси z', перпендикулярной скорости движения системы, его величина не зависит от скорости $\mathbf{v}$. Время движения по этому отрезку $dt' \overset{16}{=} dt/\sqrt{1 - \beta^2}$, значит, скорости u_0 и $u'_{z'}$ неодинаковы.

Релятивистская масса

$$m = \frac{m_0 u_0}{u'_{z'}} = \frac{m_0\,dz/dt}{dz'/dt'} = \frac{m_0\,dt'}{dt} \overset{16}{=} \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

Таким образом, масса тела в движущейся системе отсчета

$$m = m_0/\sqrt{1 - \beta^2}, \qquad (18)$$