



В.Б. Цеханский, К.Н. Ловцов, Н.С. Сухов

ОБНАРУЖЕНИЕ ЭФФЕКТА ГРАВИТАЦИОННОГО КРАСНОГО СМЕЩЕНИЯ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СРЕДЕ

(Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет))

Одним из важнейших параметров телекоммуникационной среды является скорость передачи информации. Специальная теория относительности постулирует существование предела для скорости распространения электромагнитной волны, являющегося основной физической причиной временных задержек сигнала [1]. Существуют и другие физические ограничения, вносящие вклад в сетевую задержку. Одно из таких ограничений – эффект гравитационного красного смещения, являющийся следствием общей теории относительности. Но этот эффект очень трудно обнаружить ввиду того, что его влияние в земных условиях очень мало.

Так же существует и телекоммуникационная задержка, ее природа связана с тем, что пакеты, поступающие на сетевой уровень, обрабатываются сетевым оборудованием на маршруте следования. Описание задержек на телекоммуникационном уровне осуществляется при помощи теории массового обслуживания. Ее основы изложены в учебнике Клейнрока [2].

Экспериментальные подтверждения постулатов общей теории относительности получить довольно тяжело. Например, классические эксперименты по расчету сдвига перигелия орбиты Меркурия и отклонению светового луча вблизи Солнца требуют точных наблюдений за движениями небесных тел на больших расстояниях от нашей планеты [3]. Хафеле и Китинг проводили эксперимент, доказывающий разность хода времени в часах, находящихся на борту самолета и на земле [4]. Паунд и Ребке провели эксперименты, подтверждающие наличие гравитационного красного смещения спектральных линий в земных условиях [5]. Использование современных телекоммуникационных технологий позволяет провести экспериментальную проверку с большей точностью. Результаты подобных исследований также смогут содействовать развитию технологий при проектировании телекоммуникационных сетей, возможностью сократить задержки сигнала, к которым приводит данный эффект.

Теоретические предпосылки

Эффект гравитационного красного смещения проявляется в изменении частоты фотона с изменением внешнего гравитационного потенциала. Вследствие того, что показатель преломления является функцией от длины волны, изменяется скорость распространения электромагнитной волны при движении ее в изменяющемся гравитационном поле [6]. Рассчитаем разницу временной задержки при следующих положениях оптоволоконного кабеля длиной L (Рис. 1):



- а) Кабель находится в горизонтальном положении, т.е. на всем его протяжении величина гравитационного потенциала будет постоянной.
 б) Кабель находится в наклонном положении относительно поверхности земли.

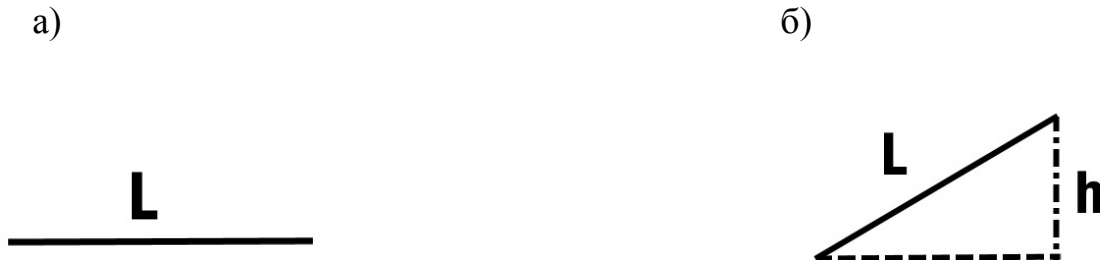


Рис. 1. Расположение оптоволоконного кабеля

Временная задержка доставки пакетов в первом случае (Рис 1. а), составит:

$$T_1 = \int_0^L \frac{n_1 dl}{c} = \frac{n_1 L}{c} \quad (1)$$

где n_1 - показатель преломления на уровне горизонтального кабеля.

В силу эффекта гравитационного красного смещения, при изменении высоты изменяется показатель преломления с величины n_1 до n_2 . Время доставки составит T_2 :

$$T_2 = \int_0^L \left[\frac{1}{c(n)_1} + \alpha l \right] dl = T_1 + \frac{(n_2 - n_1)L}{2c}, \quad (2)$$

где $\alpha = \frac{n_2 - n_1}{L}$ в случае равномерного подъема оптоволоконного кабеля.

Оценим значение $\Delta T = T_2 - T_1$, используя постоянную z_G гравитационного красного смещения

$$z_G = \frac{gh}{c^2} \quad (3)$$

где R - радиус Земли, g - ускорение свободного падения у поверхности земли.

Используя величину дисперсии $\frac{\partial n}{\partial \lambda}$, получим ΔT :

$$\Delta T = \frac{k z_G L}{2c}, \quad (4)$$

где $k = \frac{\partial n}{\partial \lambda} \lambda$. Если в качестве среды взять стекло, то $k \approx 0.05$ [7].

Оценим значение ΔT . Высоту подъема кабеля примем равной 2 км, а длину оптоволоконного кабеля 50 км

$$\Delta T \approx 8.2^* \quad (5)$$

На данном этапе уровень развития глобального позиционирования GPS/Glonass позволяет измерить ΔT только с точностью до десятка микросекунд () [8]. Чтобы обнаружить и численно измерить действие эффекта, необходимо спланировать специальный эксперимент.



Схема эксперимента

Расчеты (5) показывают, что схема расположения оптоволоконного кабеля, показанная на Рис. 1, не позволит обнаружить действие эффекта гравитационного красного смещения.

Для его обнаружения необходимо продумать схему эксперимента таким образом, чтобы повысить порог обнаружения эффекта. Из уравнения (4) видно, что этого можно добиться увеличением величин h и L . Но в силу ограничения, обусловленного затуханием сигнала при прохождении его по оптоволоконному кабелю, его длина без промежуточных усилителей не может превышать 50 км [9]. Также при планировании реального эксперимента без возникновения дополнительных трудностей, высоту подъема линии связи не стоит делать более, чем на 2 км.

Учитывая данные ограничения, наиболее оптимальным вариантом будет выбор кольцевой структуры линии связи. Для обнаружения эффекта гравитационного красного смещения необходимо выбрать профиль таким образом, чтобы разница в прохождении сигнала была обусловлена разной длиной кабеля, при одинаковой высоте подъема. Схема расположения может выглядеть следующим образом:

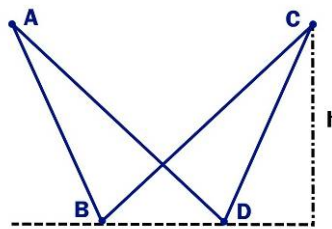


Рис. 2. Схема кольцевой структуры линии связи
(размеры $AD = BC = L_2$, $AB = CD = L_1$)

При использовании данной схемы, рассчитаем временную задержку за один кольцевой проход при одновременном запуске двух пакетов в противоположных направлениях (один по маршруту ABCDA, другой BADCBA), согласно формуле (4).

Суммарная разница во времени прохождения для одного кольцевого прохода будет равна:

$$\Delta T = \frac{2kgh[(L)_2 - L_1]}{c^3} \quad (6)$$

При каждом дополнительном проходе, расстояние между пакетами будет увеличиваться. Следует отметить, что применение флуоресцентных методов обнаружения точки встречи позволяет обнаружить отклонение порядка $d = 10$ м. Посчитаем число проходов N , необходимых для выполнения данного условия:

$$d = \frac{Nc\Delta T}{n_1} \quad (7)$$



Отсюда при использовании условия (6), получим число проходов равное:

$$N = \frac{\ln_1 c^2}{2kg\kappa(L_2 - L_1)} \quad (8)$$

При условии, что разница $L_2 - L_1$ принята в 15 км, $k = 0.05$, $n_1 = 1.5$.

На проведение эксперимента потребуется время равное:

$$T = \frac{cn_1^2 d(L_2 + L_1)}{kg\kappa(L_2 - L_1)} \approx 158 \text{ суток} \quad (9)$$

Где сумма $L_2 + L_1$ принята равной 30 км. Расчеты были проведены без учета задержек, являющихся следствием телекоммуникационной составляющей, связанных с обслуживанием пакетов и теорией массового обслуживания.

При планировании реально эксперимента нужно сосредоточиться на поиске кабелей с высоким дисперсионным соотношением и низким затуханием, а также необходимо совершенствовать методику обнаружения точки встречи сигналов, идущих в разных направлениях. Это позволит значительно сократить время проведения экспериментов.

Литература

1. Carbone L. et al. The spectrum of internet performance //Passive and Active Measurements (PAM2003). – 2003.
2. Kleinrock L. Queueing systems, volume 1: theory. – 1975.
3. Брагинский В. Б., Руденко В. Н. Релятивистские гравитационные эксперименты //Успехи физических наук. – 1970. – Т. 100. – №. 3. – С. 395-424.
4. Guinot V. Time scales in the context of general relativity //Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2011. – Т. 369. – №. 1953. – С. 4131-4142.
5. Паунд Г. В. 1960 г. Декабрь Т. LXXII, вып. УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК. – 1960.
6. Окунь Л. Б., Селиванов К. Г., Телегди В. Гравитация, фотоны, часы //Успехи физических наук. – 1999. – Т. 169. – №. 10. – С. 1141-1147.
7. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. 4 Оптика. – 1979. – С. 330-340.
8. Топкачев Г., Фарбер В. Е. Определение затухания радиоволн в атмосфере мощными РЛС миллиметрового диапазона.
9. Савиных В. П., Цветков В. Я. Геоинформационный анализ данных дистанционного зондирования. – 2001.