

# Метод расчета погрешности привязки шкал времени потребителя в коротковолновом диапазоне

С. В. Никифоров<sup>1</sup>, Т. О. Мысливцев<sup>2</sup>, Р. Г. Никитин<sup>3</sup>  
 Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского  
<sup>1</sup>uncleserega@yandex.ru, <sup>2</sup>tim33@list.ru, <sup>3</sup>nikitin\_rg@mail.ru

**Аннотация.** A method is proposed for calculating the error of binding the consumer time scale using data on the state of the signal propagation medium at the point of reflection of the radio wave from the ionosphere. An example of estimating the magnitude of errors in the binding of the consumer time scale based on the signals of the RWM station, which differ significantly from the calculated values during the day.

**Ключевые слова:** signal delay; ionosphere; station of vertical sounding; angle of incidence of the radio waves

Эталонные сигналы частоты и времени (ЭСЧВ) являются средством передачи размеров единиц и шкал времени (ШВ) и представляют собой несущие колебания, содержащие в своем составе временные метки и другую дополнительную информацию. Для передачи ЭСЧВ Государственная служба времени частоты и определения параметров вращения Земли использует разветвленную сеть средств передачи [1].

Для передачи ЭСЧВ в коротковолновом (КВ) диапазоне используется специализированная радиостанция РМВ (RWM), излучающая сигналы на трех частотах ( $f_1=4996$  кГц,  $f_2=9996$  кГц и  $f_3=14996$  кГц). Такие сигналы способны распространяться посредством ионосферных волн на сверхдальние расстояния при относительно небольших мощностях передатчика (10 кВт).

Сезонные, суточные и случайные изменения ионосферы приводят к значительным флуктуациям высоты отражения радиосигналов. Такой механизм распространения радиоволн ограничивает точность синхронизации мер времени погрешностью до 0,3-2 мс и сравнения частот - погрешностью  $(1-10) \cdot 10^{-8}$  [1].

Задержка радиосигналов КВ диапазона прогнозируется (в мс) с помощью эмпирической формулы [1]:

$$t_p = 0,9 + 3,25 \cdot L / 1000 \quad (1)$$

где  $L$  – расстояние между передатчиком и приемником, вычисленное по дуге большого круга Земли (км), которое определяется как  $L = Z \cdot 1,852$ , здесь  $Z$  – центральный угол в угловых минутах, соответствующий дуге большого круга между пунктами. Ширина колонок 8,89 см.

Центральный угол рассчитывается по формуле:

$$Z = \arccos(\sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos \Delta\lambda),$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – широты пунктов передачи и приема (с точностью до угловой минуты);  $\Delta\lambda$  – разность долгот (с точностью до угловой минуты).

Для расстояний 500–5000 км погрешность определения не превышает 1–2 мс. При использовании месячных прогнозов распространения радиоволн эта погрешность может быть уменьшена до 0,3–0,5 мс [2].

Эмпирическая формула (1) учитывает лишь расстояние  $L$  и оценивает поправку без учета состояния среды распространения сигнала (ионосферы и тропосферы). Данная поправка одинакова для сигналов на всех трех излучаемых частотах, что в действительности не так. Повышение точности синхронизации мер времени потребителя в данном случае можно обеспечить за счет учета влияния среды распространения радиоволн.

В статье предложен метод расчета погрешности привязки шкал времени на основе положения теоремы Брайта-Тьюва. Данная теорема гласит, что время распространения  $t_p$  сигнала на частоте  $f$  при прохождении им пути  $QBP$  (рис. 1) равно времени необходимому радиоволне для прохождения со скоростью света в вакууме пути  $QCP$  (где  $Q$  – положение передатчика,  $P$  – положение приемника, а нормаль, проведенная из точки  $C$ , делит отрезок  $QP$  пополам) [3].

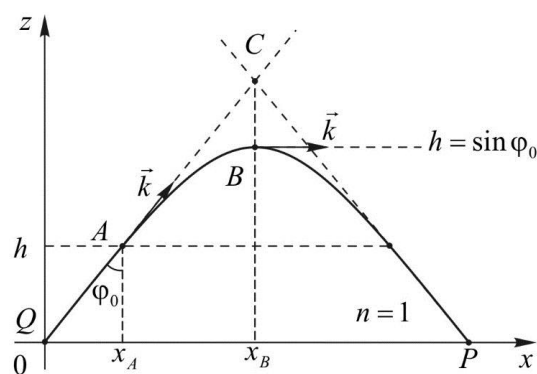


Рис. 1. К определению теоремы Брайта-Тьюва

Таким образом, время распространения сигнала будет оцениваться выражением:

$$t_p = (QC + CP) / c = QP / (c \cdot \cos \varphi_0) \quad (2)$$

где  $QP$  – известное расстояние между передатчиком и приемником,  $c$  – скорость света,  $\varphi_0$  – угол падения радиоволны;  $\vec{k}$  – волновой вектор.

Для того, чтобы радиоволна с частотой  $f$  попала от передатчика  $Q$  к приемнику  $P$  угол падения  $\varphi_0$  может иметь лишь единственное значение, которое может быть рассчитано из выражения

$$\cos \varphi_0 = f_{кр} / f \quad (3)$$

где  $f$  – частота радиоволны,  $f_{кр}$  – критическая частота, на которой происходит отражение радиоволны от ионосферы при вертикальном зондировании.

Таким образом, используя соотношения 2 и 3, запаздывание сигнала на частоте  $f$  можно будет оценить выражением

$$t_p = QP \cdot f / (c \cdot f_{кр}) \quad (4)$$

Значение критической частоты  $f_{кр}$  в точке отражения радиоволны от ионосферы (середина между передатчиком и приемником) может быть получено:

- на основе данных базы прогнозных карт критических частот;
- путем измерения с помощью вертикального зондирования;
- расчетом с использованием моделей ионосферы: IRI-Plas [<http://ftp.izmiran.ru/pub/izmiran/SPIM/>] и др [4].

Для демонстрации предлагаемого метода представлены расчеты задержки сигнала радиостанции РМВ для частот  $f_1, f_2$  и  $f_3$  на трассе Москва – Лурье. Трасса распространения сигнала выбиралась из расчета того, чтобы ее длина была порядка 3000 км, а ее середина (точка отражения радиоволн) находилась над станцией вертикального зондирования (ВЗ). Передатчик РМВ расположен близ Москвы [56°с.ш., 37°в.д.]. Приемник находится близ города Лурье (Франция) [43°с.ш., 0,1°в.д.]. Точка отражения сигнала приходится в район действия станции ВЗ PQ052 [50°с.ш., 14,6°в.д.] (г. Прага).

Ниже приведены зависимости задержки сигнала станции РМВ для трех рассматриваемых частот, полученные в течение суток (2 мая 2010 года). Дата моделирования выбрана для «спокойной» ионосферы и исходя из полноты данных от станций ВЗ. На рис. 2 прямая линия (Prog) на уровне 0,01 с соответствует расчетным значениям задержки сигналов на частотах  $f_1, f_2$  и  $f_3$  в соответствии с выражением 1. Пунктирными

линиями (IRI-Plas) обозначены задержки сигнала, полученные с использованием критических частот в точке отражения радиоволны, рассчитанных с использованием модели ионосферы IRI-Plas. Сплошными линиями (VZ) обозначены задержки сигнала, полученные по данным станции ВЗ PQ052 [[www.iono.noa.gr/DIAS](http://www.iono.noa.gr/DIAS)], расположенной в точке отражения.

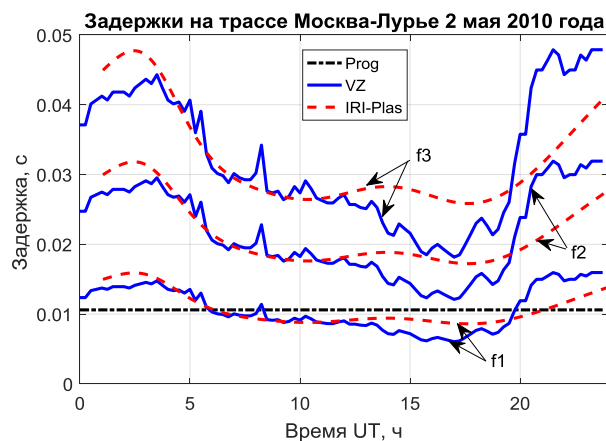


Рис. 2. Суточные изменения задержки сигнала станции РМВ

Стоит отметить, что данный метод не учитывает боковые градиенты, возникающие при распространении КВ сигнала, и применен для однокачковой трассы.

Таким образом, предложенный метод позволяет:

- рассчитать величины погрешностей привязки ШВ потребителя, которые в течение суток существенным образом отличаются от расчетных значений (формула 1);
- оценить вероятность осуществления передачи сигнала на однокачковой трассе при заданных частотах;
- осуществлять прогноз величин погрешностей привязки ШВ потребителя с ошибкой менее 10-15%.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Бюллетень В 14. Эталонные сигналы частоты и времени. М: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2013.
- [2] Палий Г.Н., Артемьева Е.В. Синхронизация высокочастотных мер времени и частоты // Изд-во стандартов, 1976. С. 47-83.
- [3] Иванов В.Ф., Мысливцев Т.О., Ткачев Е.А., Троицкий Б.В. Ионосферное обеспечение средств локации, навигации и связи: учеб. пособие. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2011. 235 с.
- [4] Bilitza D. Ionospheric Models for Radio Propagation Studies, in: Review of Radio Science 1999-2002 Ed. by W. Ross Stone. IEEE Press, 2002.