

УДК 621.396.96

АНАЛИЗ ВРЕМЕНИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МЕТРОВЫХ ВОЛН В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ ДЛЯ ЗАДАЧ ВЫСОКОТОЧНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

Рассмотрены вопросы, связанные с распространением радиоволн в приземном слое. Разработанная и описанная в статье модель может быть использована для прогнозирования временной задержки, которая возникает при распространении радиосигналов в приземном слое тропосферы, и позволяет получить ее численные оценки для дальнейшего учета и компенсации погрешности, обусловленной нестабильностью времени задержки

И. Е. Антипов

Доктор технических наук, профессор*

Е. Ю. Бондарь

Младший научный сотрудник*

А. А. Костыря

Кандидат технических наук, доцент*

Е. А. Иванова

Младший научный сотрудник*

Кафедра «Основы радиотехники»

*Харьковский национальный университет радиоэлектроники

пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61011

Контактный тел.: (057) 700-22-84

E-mail: sekort@kture.kharkov.ua

Синхронность (сравнение, сличение или привязка) территориально разнесенных стандартов (в частности эталонов) времени и частоты – основа для реализации современных частотно-временных методов, позволяющих решать актуальные научно-технические и оборонные задачи в системах координатно-временного обеспечения, метрологии времени и частоты, радиоастрономии, радиолокации, радиопеленгации, цифровой синхронной связи. Успешное решение таких задач определяется как стабильностью эталонов времени и частоты, так и погрешностью их сравнения. Высокие темпы совершенствования эталонов (относительная нестабильность современных эталонов составляет 10-13...10-14, а в перспективе – 10-15...10-16) определяют актуальность задачи

повышения точности за счет учета и компенсации погрешностей, связанных с распространением радиоволн в приземном слое тропосферы.

В развитых странах мира проблеме постоянного совершенствования научно-технической базы и организационной структуры систем синхронизации времени и частоты (ССВЧ) уделяется постоянное внимание. Ведущими странами в области измерений времени и частоты являются США, Англия, Германия, Япония [1]. На высоком уровне поддерживались службы времени и частоты в СССР [2]. Основой для создания Государственной службы единого времени и эталонных частот (ГСВЧ) Украины явились ряд организаций и предприятий Украины, входящих в прошлом в состав ГСВЧ СССР [3 - 5].

До последнего времени автономными средствами передачи сигналов времени были кабельные, телевизионные (ТВ), радиометеорные (РМ) системы и переносимые квантовые часы (ПКЧ). Они имели значения методических погрешностей, лежащие в пределах от сотен (ТВ) до единиц (РМ, ПКЧ) наносекунд. В силу дороговизны метода ПКЧ, высокой погрешности ТВ метода [6, 7] и экологических проблем метода РМ (необходимость излучения в эфир сигналов с высокой энергией) задача высокоточной синхронизации времени и частоты остается актуальной. В настоящее время для этих целей в основном используются глобальные спутниковые навигационные системы (GPS, ГЛОНАСС).

Но вышеназванные системы базируются на использовании средств, не являющихся собственностью Украины, и не могут относиться к категории высоконадежных систем, обеспечивающих функционирование государственных служб. Поэтому необходимы альтернативные средства, которые обеспечивают надежное автономное высокоточное сличение и синхронизацию. В свою очередь, такие альтернативные системы хранения - сличения позволят производить метрологический контроль и мониторинг уже существующих систем (телевизионные, спутниковые, ПКЧ).

Среди существующих радиотехнических алгоритмов синхронизации (встречный, опроно-ретрансляционный, метод общего охвата и др.) [8] наиболее простым и доступным является односторонний алгоритм, поскольку он не предполагает двустороннюю передачу радиосигнала. К сожалению, по этой же причине, он является наименее точным: радиосигнал доставляет в синхронизируемый пункт информацию о времени с задержкой, обусловленной временем его распространения по трассе. Это задержка не может быть вычислена или исключена при данном алгоритме [9], а когда речь идет о требованиях к погрешности синхронизации в единицы наносекунд, время распространения в атмосфере нельзя считать равным скорости света в вакууме. Более того, его нельзя считать постоянным – оно может зависеть от состояния атмосферы и других факторов.

Таким образом, существует задача оценки времени распространения радиоволн в приземном слое атмосферы и его возможной нестабильности для снижения погрешности синхронизации с использованием одностороннего алгоритма. Решению этой задачи посвящена данная статья.

Задача учёта и компенсации тропосферной составляющей погрешности, неизбежно возникающей при распространении радиоволн, решается в навигационной спутниковой системе GPS.

При решении навигационной задачи в GPS необходимо найти разность расстояний между спутниками, которая вычисляется с учётом времени распространения сигнала вдоль его геометрического пути. В этот путь входит отрезок, проходящий через слой тропосферы, условия распространения в котором зависят от метеословий.

Задержка сигнала, которая возникает при прохождении тропосферы, может вызывать погрешность определения координат в десятки метров, что соответствует сотням наносекунд. Причины погрешности

заключаются в неизвестности параметров тропосферы. Для определения этих параметров используются модели тропосферы, в которых учитываются метеорологические данные, в частности, модель Хопфилда, модель Саастмойнена и др. [10]. Следует заметить, что указанные модели достаточно точно описывают поведение радиоволн в тропосфере при сравнительно больших углах места. Практически считается, что спутники, находящиеся менее чем на 15 градусах от горизонта не могут быть надёжными источниками навигационного сигнала, т.к. их сигнал проходит тропосферу по слишком длинному пути, и погрешность времени распространения становится недопустимо большой.

Особенностью нашей задачи является то, что весь путь распространения радиосигнала проходит именно в приземном слое, т. е. на высотах от единиц до сотни (сотен) метров.

Рассмотрим модель приземного слоя атмосферы с точки зрения его влияния на распространение радиоволн. Заметим, что в многочисленных публикациях на эту тему, начиная от учебников по распространению радиоволн и заканчивая научными публикациями [11], основное внимание уделяется напряжённости поля принимаемого сигнала, а время распространения практически никого не интересовало.

При разработке модели за основу возьмём известные физические соотношения, описывающие распространение радиоволн в среде, диэлектрическая проницаемость которой отличается от единицы.

Влияние нейтральной (неионизированной составляющей) атмосферы обозначается как тропосферная рефракция или задержка, обусловленная распространением в тропосфере (тропосферная задержка).

В нейтральной атмосфере, которая является недисперсионной средой для радиоволн вплоть до частоты 15 ГГц, распространение радиосигнала не зависит от частоты [10]. Тропосферная задержка определяется формулой

$$\Delta^{Тропо} = \int (n-1) ds \quad . \quad (1)$$

Используем приближенное интегрирование вдоль геометрического пути распространения сигнала. Обычно вместо коэффициента преломления тропосферы n используют индекс преломления N , связанным с n соотношением

$$N^{Тропо} = 10^6 (n-1) \quad , \quad (2)$$

следовательно, формулу (1) можно записать в виде:

$$\Delta^{Тропо} = 10^{-6} \int N^{Тропо} ds \quad . \quad (3)$$

Величину $N^{Тропо}$ можно разделить на сухую и влажную составляющие, используя аддитивную формулу

$$N^{Тропо} = N_c^{Тропо} + N_b^{Тропо} \quad , \quad (4)$$

где $N_c^{Тропо}$ - сухая составляющая, возникающая в результате влияния сухой атмосферы, $N_b^{Тропо}$ - влажная составляющая, обусловленная присутствием в воздухе водяных паров.

Приблизительно 90% в величину тропосферной рефракции вносит сухая составляющая, а остальные 10% - влажная. На практике в уравнении (1) используются модели индекса преломления, а интегрирование выполняется при помощи численных или аналитических методов после преобразования подынтегрального выражения в ряд.

Экспериментальные данные показывают, что сухая составляющая для индекса коэффициента преломления вычисляется как

$$N_{c,0}^{Тропо} = c_1 \frac{p}{T}, \tag{5}$$

где $c_1 = 77,64$ К/мбар, p – атмосферное давление, мбар (1 мбар = 100 Па), T – температура, °К.

Влажная составляющая описывается формулой

$$N_{в,0}^{Тропо} = c_2 \frac{e}{T} + c_3 \frac{e}{T^2}, \tag{6}$$

где e – удельное давление насыщенных паров воды (влажность воздуха), мбар, T – температура, °К, $c_2 = -12,96$ К/мбар, $c_3 = 3,718 \cdot 10^5$ К²/мбар.

Формулы (1), (5) и (6) представляют собой упрощённую модель распространения радиоволн в тропосфере. Значения величин c_1 , c_2 , c_3 , определяются эмпирически. Это обстоятельство является одним из источников погрешности.

Но основным источником погрешности определения времени распространения радиоволн в тропосфере является неизвестность параметров T , p и e . Для уточнения значения этих величин необходимо измерять метеорологические данные не только в пунктах наблюдений, но и по всей трассе. Тогда T , p и e будут функциями S . Результирующая формула будет иметь вид

$$\Delta^{Тропо}(p,T,e) = 10^{-6} \int_S \left(77,64 \frac{p(S)}{T(S)} - 12,96 \frac{e(S)}{T(S)} + 3,718 \cdot 10^5 \frac{e(S)}{T^2(S)} \right) dS \tag{7}$$

Эта формула и является уточнённой моделью распространения радиоволн в приземном слое тропосферы.

Выполним расчёт значения индекса преломления N для синхронизируемых пунктов и определим соответствующие им временные задержки. Для расчётов выберем две трассы:

- первая: Харьков, Харьковский национальный университет радиоэлектроники (ХНУРЭ) – Харьков, научный центр «Метрология» (ННЦ «Метрология»);
- вторая: Харьков, ХНУРЭ – Балаклейский научно-исследовательский полигон (БНИП), являющийся Национальным достоянием Украины.

Длина этих трасс составляет 1,2 км и 85 км, соответственно. Для экспериментальной проверки имеются средства для измерения этих расстояний с погрешностью не хуже 1 метра.

В качестве параметров p , T , e , соответствующих индексу 0 в (5, 6), которые характеризуют свойства «нормальной тропосферы», были приняты следующие значения: среднегодовое значение температуры над уровнем моря $T = 15^\circ\text{C} = 288^\circ\text{K}$; среднегодовое значение относительной влажности $E_S = 60\%$, что со-

ответствует влажности $e = 10,22$ мбар; среднегодовое значение атмосферного давление над уровнем моря $p = 1013,25$ мбар. После подстановок получаем:

$$N^{Тропо} = N_{c,0}^{Тропо} + N_{в,0}^{Тропо} = 318.$$

Прогнозируемое приращение задержки времени распространения сигнала в приземном слое тропосферы при «нормальных» условиях по сравнению с геометрической длиной трассы для пунктов ХНУРЭ-БНИП составят 27,06 м, что приведет к дополнительной задержке по времени, равной 90,26 нс, и на трассе ХНУРЭ-ННЦ «Метрология» 0,41 м, что соответствует приращению временной задержки в 1,38 нс.

Результаты моделирования зависимости полной тропосферной задержки в метрах и соответствующих временных задержек в наносекундах от расстояния между пунктами приведены в табл. 1.

Далее рассмотрим влияние погодных факторов на распространение радиоволн. Используя метеорологические данные о состоянии тропосферы в г.Харькове были вычислены сезонные вариации величин задержек на протяжении нескольких лет для трасс Харьков, ХНУРЭ – Харьков, ННЦ «Метрология» и Харьков, ХНУРЭ – Балаклея, БНИП. Результаты вычислений для 2000 года приведены в табл. 2.

Таблица 1

Расстояние, км	$\Delta^{Тропо}$, м	Время, нс
1	0,32	1,06
5	1,59	5,31
10	3,19	10,62
50	15,93	53,12
100	31,85	106,24

Таблица 2

п/п		N	ХНУРЭ – БНИП		ХНУРЭ – ННЦ «Метрология»	
			$\Delta^{Тропо}$, м	Δt , нс	$\Delta^{Тропо}$, м	Δt , нс
1	Январь	312	26,523	88,472	0,404	1,349
2	Февраль	315	26,763	89,272	0,408	1,361
3	Март	313	26,573	88,64	0,405	1,351
4	Апрель	317	26,947	89,885	0,411	1,37
5	Май	310	26,359	87,925	0,402	1,34
6	Июнь	326	27,734	92,51	0,423	1,41
7	Июль	337	28,637	95,522	0,437	1,456
8	Август	326	27,716	92,452	0,422	1,409
9	Сентябрь	322	27,364	91,276	0,417	1,391
10	Октябрь	317	26,916	89,781	0,41	1,369
11	Ноябрь	315	26,744	89,208	0,408	1,36
12	Декабрь	316	26,863	89,607	0,408	1,366

Проанализировав полученные результаты вычислительного эксперимента можно сделать вывод о несущественности разброса и самой величины тропо-

сферной задержки на малых расстояниях (в частности, 1,2 км.)

Для больших расстояний (85 км) и задержку, и её вариации необходимо учитывать при проведении измерений с требованиями к погрешности синхронизации в единицы - десятки наносекунд.

Разброс расчетных величин задержек (Δt , нс), которые возникают при прохождении радиосигналов в тропосфере, в диапазоне от максимальных до минимальных значений месячных температур 2000 года для синхронизируемых пунктов ХНУРЭ и БНИП графически представлены на рис.1.

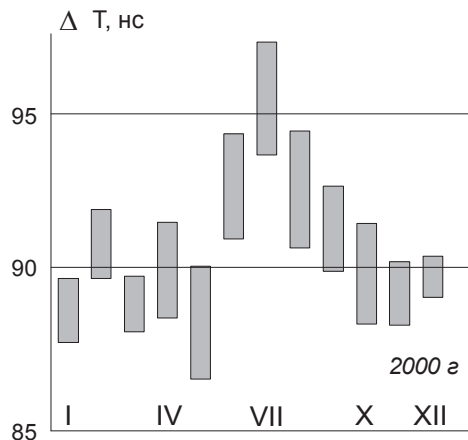


Рисунок 1.

Вариации разницы изменения времени распространения в течение года в зависимости от сезонных изменений погоды распределяются следующим образом: для весеннего сезона она составляет 5 нс, для зимнего 3 нс и для осеннего 8 нс.

Результаты моделирования могут быть проверены экспериментально, например, с использованием метода общего охвата, где в качестве общего источника могут быть использованы телевизионные или радиовещательные сигналы.

Литература

1. Мангелл А. Дж. Национальные эталоны времени и частоты // ТИИЭР. –1986. -Т.74, № 1.
2. Болотов И.М., Геворкян А.Г. Развитие научно-технических основ СЕВ. //Радионавигация и время. – 1992. - № 1. – с. 50 – 52.
3. Величко О. М., Миронов М.Т., Сидоренко Г.С. та ін. Державна програма створення та розвитку Державної служби єдиного часу і еталонних частот. //Український метрологічний журнал. –1996, вип. 4. – С. 13–16. 4. – С. 13–16.
4. Клейман. О.С., Оголюк В.П., Сидоренко Г.С. та ін. Державний первинний еталон одиниць часу і частоти// Український метрологічний журнал. –1997, вип. 3. – С. 18–23.
5. Глобальна система визначення Клейман. О.С., Оголюк В.П., Сидоренко Г.С. та ін. Державний первинний еталон одиниць часу і частоти//Український метрологічний журнал. –1997, вип. 3. – С. 18–23.
6. Синхронизация высокоточных мер времени и частоты. Палий Г.Н., Артемьев Е.В., Изд-во стандартов, 1976, 168 с.
7. Шполянский В.А. Хронометрические системы. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение. 1980. – 584 с.
8. Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли // под ред. Кашеева Б.Л., Лагутина М.Ф., Прошкина Е.Г. Харьков, Бизнес информ, 2002. – 418 С. – с. 219-305.
9. Антипов И.Е., Коваль Ю.А., Обельченко В.В. Развитие теории и совершенствование радиометеорологических систем связи и синхронизации. Харьков: Коллегиум, 2006. 308 с.
10. Глобальна система визначення місцеположення (GPS). Теорія і практика / Б. Гофман – Велленгоф, Г. Ліхтенгергер, Д. Коллінз; Пер. з англ. третього вид. під ред. Я.С. Яцківа. – Київ: Наук. думка, 1995. – 380 с.
11. М.П. Долуханов Распространение радиоволн– 2-е изд. – М.: Изд-во Связь, 1965. – 399 с.