

**СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЙ СИГНАЛ И КАНАЛ ПРЯМОЙ ВИДИМОСТИ
В ЗАДАЧАХ ВЫСОКОТОЧНОГО СЛИЧЕНИЯ ШКАЛ ВРЕМЕНИ**

Решение прикладных задач радиолокации, связи, радиоастрономии и др. требует наличия высокоточных вторичных средств хранения времени (частоты). Автономность таких средств предполагает постоянство величины сдвига их шкал во времени по отношению к первичным (эталонным). Проблема состоит в улучшении точностных характеристик данных о величинах и знаках необходимых корректирующих поправок. Синхронизация, таким образом, возможна только после получения результатов измерения величин взаимных расхождений шкал времени (разностей фаз опорных колебаний) первичных и вторичных хранителей. Необходимый темп поступления измерительной информации об этих расхождениях определяется величиной относительной нестабильности хода шкал времени (частоты) синхронизируемых хранителей (порядка $10^{-8} \dots 10^{-11}$), в то время как достигнутая в настоящее время относительная погрешность воспроизведения эталонов составляет порядок $10^{-13} \dots 10^{-15}$ и имеет тенденцию к дальнейшему снижению. Поэтому каналы сличения (синхронизации) должны удовлетворять системе требований, направленных на существенное снижение погрешностей при реализации этих процессов. Всегда актуальной остается задача улучшения метрологических характеристик процессов формирования, хранения, измерения взаимных расхождений и корректного доведения до потребителей различного уровня шкал времени (частоты), формируемых прецизионными хранителями [1, 2].

Исследования и разработки в направлении усовершенствования систем высокоточного доведения эталонных сигналов времени (частоты) до потребителей различного уровня ведутся постоянно на протяжении многих десятков лет. Государственные и ведомственные программы [3-5] в различных областях науки и техники, в частности, в областях телекоммуникаций, исследованиях ближнего и дальнего космоса, военного дела, и т.д. тесным образом связаны с задачами сличения и синхронизации автономных средств хранения времени и частоты. Важное значение имеет возможность взаимного метрологического контроля хранителей времени и высокоточных навигационных систем, используемых при передаче сигналов времени [6].

В Харьковском национальном университете радиоэлектроники на протяжении многих лет проводятся теоретические и экспериментальные исследования, направленные на повышение точностных характеристик методов и средств высокоточных сличений шкал времени разнесенных в пространстве хранителей по радиометеорному каналу [5, 7-10]. Их результаты опубликованы в ряде изданий и обобщены в фундаментальной работе [2]. Достигнутая к настоящему времени погрешность сличения при использовании радиометеорного канала составляет единицы наносекунд при работе по огибающим радиоимпульсов и доли наносекунды – при работе по их высокочастотному заполнению [10]. Использование сложных широкополосных сигналов и специальные алгоритмы их обработки позволили решить проблему совместного проведения процедур высокоточного сличения и обмена измерительной информацией [7].

Вместе с тем, для реализации высокоточных сличений актуальны исследования возможностей и свойств каналов прямой видимости при использовании сигналов, аппаратуры, методов и информационно-энергетического потенциала уже хорошо изученных каналов, в частности, метеорного [11]. На последующих этапах исследований изучалась возможность использования сверхширокополосных (СШП) сигналов типа ультракоротких видео- и радиоимпульсов в канале с прямой видимостью [12] и без таковой. Создание общегосударственной сети СШП ретрансляторов, объединенных каналами прямой видимости, может явиться весомой альтернативой существующим ныне высокоточным системам [13, 14].

Спутниковые системы навигации и передачи сигналов времени (GPS, НАВСТАР и др.) базируются на использовании методов и средств, не являющихся собственностью Украины, и не могут относиться к категории высоконадежных систем, обеспечивающих функциониро-

вание государственных служб. Поэтому необходимы альтернативные методы и средства, которые обеспечивают надежное автономное высокоточное сличение. В свою очередь, такие альтернативные системы хранения – сличения позволят производить метрологический контроль и мониторинг уже существующих систем (телевизионные, спутниковые, ПКЧ).

До последнего времени автономными средствами передачи сигналов времени были кабельные, телевизионные (ТВ), радиометеорные (РМ) системы и перевозимые 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 [14, 15] метода и экологических проблем метода РМ (необходимость излучения в эфир сигналов с высокой энергией) возникли задачи поиска альтернативных автономных методов и средств высокоточных сличений.

Предлагаемые к рассмотрению «симбиоз» канала прямой видимости (КПВ) и применение широкополосных и сверхширокополосных сигналов – переносчиков данных о физическом значении расхождения сличаемых шкал времени и тезис о возможном синтезе «искусственного» КПВ с использованием специальной сверхширокополосной ретрансляционной аппаратуры позволяют решить задачу обеспечения дальнейшего снижения погрешностей сличений.

До настоящего времени в вопросах измерения физической величины – времени и связанных с ними задачах сличения шкал времени использовались традиционные радиотехнические системы (РТС), функционирующие в узкой относительной ширине полосы частот [2]. В качестве несущего колебания для передачи измерительной информации использовались квазигармонические сигналы. Узкополосность таких радиотехнических систем служит основным методом разделения информационных каналов; ширина полосы частот большинства радиотехнических систем намного меньше их несущей частоты. Поскольку

$$\sigma_t = \frac{1}{\Delta F_{\text{эфф}} \sqrt{q}}, \quad (1)$$

где σ_t – СКО при измерении параметра задержки; $q = 2E/N_0$ – соотношение «сигнал/шум»; $\Delta F_{\text{эфф}}$ – эффективная ширина спектра сигнала [16-18], то очевидно, что для снижения случайной составляющей погрешности при фиксированном соотношении «сигнал/шум» необходимо расширять эффективную ширину полосы частот сигнала. Из изложенного, а также с точки зрения получивших в последние годы широкое распространение подходов в области применения широкополосных [19] и сверхширокополосных сигналов [20–22] в областях радиолокации и связи представляется возможным и актуальным использование сверхширокополосных сигналов в областях высокоточных измерений времени.

Предпосылкой для возникновения идеи использования сверхширокополосных сигналов в системе высокоточных сличений шкал времени явились метеорные комплексы аппаратуры сличения шкал времени “МЕТКА”. Они успешно функционировали на трассах ГСВЧ СССР, были аттестованы и обеспечивали сличение ШВ с погрешностью менее 20 нс [2]. Достигнутая и экспериментально обоснованная суммарная аппаратурно-канальная погрешность комплекса “МЕТКА-11” составила в “совмещенном” радиолокационном режиме при фазовых измерениях доли наносекунды. Такой “совмещенный” канал при нулевом сдвиге шкал времени полукомплектов комплекса теоретически является потенциально высокостабильным и обратимым. Проводимые параллельно исследования свойств метеорного радиоканала [2] показали возможность передачи по нему сигналов с шириной спектра (5...10) МГц на несущих частотах (30...60) МГц, т.е. он является широкополосным.

В задачах сличения шкал времени перспективно использование свойств КПВ, обеспечивающего передачу времени непосредственно близкорасположенным потребителям, либо потребителям, находящимся в пределах прямой радиовидимости (ретрансляторы, летательные, космические аппараты и ряд иных потребителей). Эта возможность основывается на экспериментальных работах, связанных с оценкой стабильности и взаимности УКВ радиоканала прямой видимости. Такие работы проводились на трассе ННЦ “Институт метрологии” – ХНУРЭ

(г. Харьков) с использованием аппаратуры “МЕТКА-5” и “МЕТКА-6”. Исследования проводились в амплитудном (по огибающим сигналам) режиме в период с 15.01.1995 г. по 16.02.1995 г. при воздействии максимально возможного имитируемого набора дестабилизирующих факторов в ширине полосы используемых радиочастот порядка 1 МГц при $\eta=0.017$. Обработка результатов измерений проводилась по ГОСТ 8.009-84. Достигнутый результат – погрешность порядка 15 нс с вероятностью 0.8. Измерения с улучшенным аппаратурным и алгоритмическим обеспечением, повторно проведенные на той же трассе, показали снижение погрешности более чем в 3 раза. В Украине и странах СНГ такой результат был получен впервые.

К сожалению, автономные альтернативные системы высокоточного сличения ШВ, использующие радиочастотные каналы, такие, как радиометеорный и КПВ, в настоящее время не используются, хотя и способны решать эти задачи при низких уровнях погрешности и стоимости. Весьма малый коэффициент затухания в этих каналах позволяет работать при высоких отношениях «сигнал/шум», когда для обеспечения снижения погрешностей сличений уже становятся существенными аппаратурные и каналные нестабильности времени задержки распространения сигналов.

Рассмотрим подробнее «сверхширокополосный сигнал» и его преимущества в задачах сличения шкал времени. Термин «сверхширокополосный» для сигналов и систем был введен Управлением перспективных исследовательских программ Министерства обороны США (DARPA) в 1990 году. К сверхширокополосным были отнесены системы и сигналы, для которых относительная полоса частот η

$$\eta = \frac{f_{\text{верх}} - f_{\text{нижн}}}{f_{\text{верх}} + f_{\text{нижн}}}, \quad (2)$$

где $f_{\text{нижн}}$ и $f_{\text{верх}}$ – нижняя и верхняя границы частотного диапазона ширины полосы частот в спектре сигнала, лежит в пределах $0.25 < \eta \leq 1$. Это определение в настоящее время используется весьма широко [17,19].

Анализ работ, связанных с построением сверхширокополосных радиотехнических систем, показывает, что далеко не все сигналы, подпадающие под указанное определение, обладают свойствами сверхширокополосных. В то же время, эти свойства проявляются всегда, когда пространственная протяженность сигнала ct (c – скорость распространения в среде, $t=1/\Delta f$ – длительность простого сигнала или ширина его автокорреляционной функции, Δf – ширина спектра сигнала) становится намного меньше L – размера излучающей (приемной) апертуры антенны или размера объекта, отражающего сигнал. При выполнении условия $L \gg ct$ возникают эффекты, приводящие к снижению коэффициента η . Так, в одном из наших экспериментов был обнаружен эффект появления частотно-временной дисперсии СШП сигнала при его прохождении через логопериодическую антенну (ЛПА) с размерами $L > ct$.

Для изучения возможности использования ЛПА для передачи и приема СШП сигналов была собрана установка блок – схема которой приведена на рис. 1.

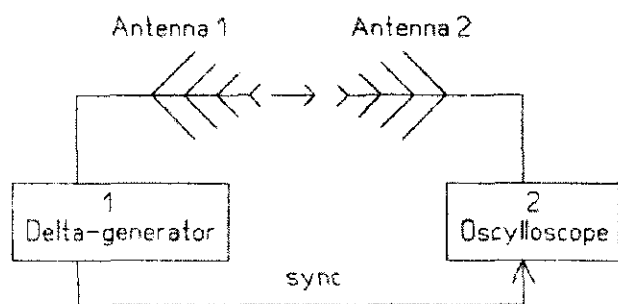


Рис. 1

Излучающая антенна (Antenna 1) подключена к выходу генератора периодической последовательности ультракоротких импульсов, собранного на лавинном транзисторе. Приемная антенна (Antenna 2) ко входу высокочастотного осциллографа С1-97. Антенны располагались в одной плоскости коаксиально на расстоянии 3 м. Расстояние между антеннами было ограничено размерами помещения, где располагалась экспериментальная установка.

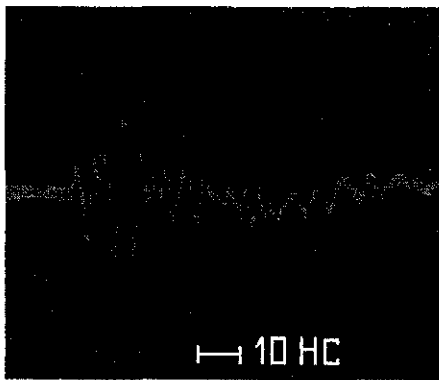


Рис. 2

Формируемый генератором сигнал представлял собой последовательность импульсов с длительностью переднего фронта порядка 2 нс и длительностью по основанию $5-7 \text{ нс}$.

На экране осциллографа наблюдалась импульсная характеристика системы из двух однотипных антенн (рис. 2), при работе одной – на излучение, другой – на прием.

По форме осциллограммы можно предположить, что искажение формы сигнала произошло вследствие дисперсионных свойств использованных антенн.

Продолжением исследований может стать изучение возможности применения средств согласованной фильтрации при передаче-приеме СШП сигналов для компенсации дисперсии частотно-временных характеристик СШП антенн.

В основе метода сличения шкал разнесенных хранителей времени лежат высокая стабильность и обратимость задержки сигналов в радиоканалах. К сожалению, в них, так же, как и в ряде других каналов, может иметь место факт многолучевого распространения радиоволн. Стандартные методы измерения параметра задержки сигнала, например, метод «плавающего порога» [23] приводят в этом случае к отсутствию возможности измерения истинного временного положения сигнала. Это обусловлено одновременным воздействием на измеритель временного положения сигнала суммы пришедших с различными задержками сигналов.

В случае использования сверхширокополосных сигналов время задержки в канале будет различным для различных путей распространения и минимальным для единственного (минимально протяженного) пути распространения радиоволн R_{\min} (рис. 3).

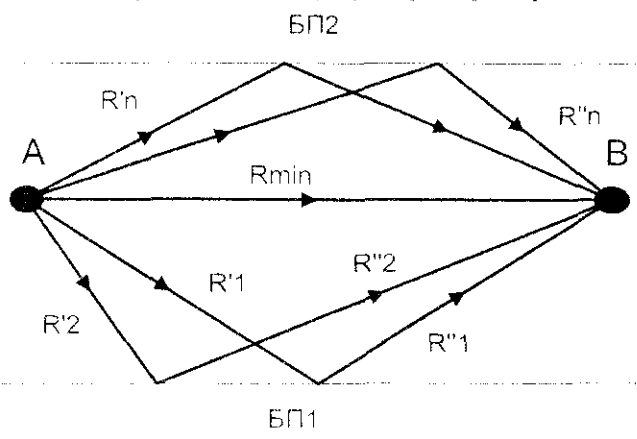


Рис. 3

В этом случае информация об «истинном» временном положении сигнала содержится в переднем фронте (переломе) принятого сверхширокополосного сигнала. Применяя даже самый простой (однопороговый) метод измерения истинного временного положения сигнала, в этом случае можно исключить погрешности, обусловленные многолучевым распространением радиоволн, поскольку всегда при этом сначала измеряется задержка сигнала, пришедшего на приемник по самому короткому пути.

Погрешность измерения момента прихода сигнала в этом случае зависит от отношения «сигнал/шум» q на переднем фронте импульса и не зависит от длительности импульса. Следовательно, чтобы снизить погрешность измерения момента «прибытия», нужно увеличивать крутизну фронта (стремиться к уменьшению его длительности) при неизменности энергии. Такая форма сигнала соответствует ультракоротким СШП импульсам.

Важной отличительной чертой новых сверхширокополосных радиотехнических систем при решении задач прецизионных дистанционных время-частотных измерений является принципиальная необходимость их оснащения сверхвысокоскоростными приборами измерения временных интервалов с пикосекундным временным разрешением. Измерения величин сдвига шкал, проводимые в каналах прямой видимости, наиболее полно используют точностные свойства сверхширокополосных сигналов; при этом погрешность сличений шкал времени может снижаться до единиц-долей наносекунд.

К сожалению, реализация канала прямой видимости между конкретными абонентами не всегда возможна, особенно – в городских условиях. Нами была поставлена задача разре-

ния этого противоречия. При ее решении был разработан принцип построения системы сличений шкал времени, использующий основные свойства сверхширокополосных сигналов, канала прямой видимости, некоторые особенности техники высокоточных сличений шкал времени и экспериментально проверена его реализуемость. Для этого в канал «без прямой видимости» вводится необходимое число сверхширокополосных ретрансляторов таким образом, чтобы обеспечивалась прямая видимость в системе «абонент – ретрансляторы – абонент». Основное требование к таким ретрансляторам – обратимость задержек в обоих пространственных направлениях трансляции. Канал при этом может состоять из участков различной структуры (проводной, волноводный, оптический, свободно-пространственный) и диапазона длин волн. При этом цель – обеспечение низких погрешностей достигается за счет высокой энергетики и ширины полосы пропускания канала.

Выводы

Построение системы высокоточных сличений шкал времени, использующей рассматриваемый канал передачи информации о метках времени, возможно и реализуемо. Нестабильность времени задержки в канале прямой видимости определяется нестабильностями канала минимальной задержки в случае использования сверхширокополосных радиотехнических систем. Эффекты нестабильности распространения радиоволн за счет многолучевости при организации высокоточных сличений шкал времени в канале прямой видимости могут быть снижены путем применения сверхширокополосных сигналов и соответствующих алгоритмов измерения временного положения сигнала. Применение сверхширокополосных сигналов вида скачка тока субнаносекундного – пикосекундного диапазона времени перепада при $\eta=(1.0\dots 1.9)$ может обеспечить существенное снижение влияния многолучевости за счет использования канала с кратчайшей трассой распространения. Высокая степень локализации характерных точек этих сигналов на оси времени и возможность проведения измерений параметра их задержки при высоких отношениях «сигнал/помеха» обеспечивают подавление эффектов многолучевости и решение проблем электромагнитной совместимости. Вопросы излучения, приема и обработки СШП сигналов в задачах сличения требуют проведения дальнейших исследований.

Список литературы: 1. П.Н. Агалецкий, В.А. Бойко, Р.С. Дадашев и др. Актуальные проблемы метрологии в радиоэлектронике / Под ред. В.К. Коробова. М.: Изд-во стандартов, 1985. 296с. 2. 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. 219-305. 3. Указ Президента України від 10 червня 2005 року № 933/2005 “Про заходи щодо дальшого розвитку космічної галузі України”. 4. Письмо Государственного комитета Украины по вопросам технического регулирования и потребительской политики (Держспоживстандарт України) №7195-3-4/17 от 15.08.2006г. 5. Коваль Ю.А., Антипов И.Е., Крючкова Л.П., Кундюков С.Г., Нестеренко Г.В. Радиометеорный метод синхронизации в сетях электросвязи // Сб. науч. трудов ИГА Украины №11.Т.2. Днепропетровск, 2001. С.53-57. 6. Бавыкина В.В., Коваль Ю.А., Ткачук А.А., Трамбовецкий С.В. и др. Исследование погрешности синхронизации мер времени и частоты с применением спутниковой радионавигационной системы GPS // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2002. Вып. 122. С. 95-105. 7. Патент России №4888990, МКИ5 G04C11/02. Способ синхронизации пространственно разнесенных шкал времени при передаче дополнительной информации и устройство для его осуществления / В.И. Горбач, Б.Л. Кашеев, Г.В. Нестеренко, Л.Я. Белов, А.В. Попович. Опубл. 7.04.93. Бюл. №13. 8. Патент України 37929 А, G04G7/02. Спосіб зв'язання просторо-рознесених еталонів часу та частоти / Ю.О. Коваль, І.С. Антипов, Г.В. Нестеренко, О.Л. Трошкін. Опубл. 15.02.2001. Бюл. №4. 9. Патент України 20380 А, МКИ5 G04C11/02. Спосіб обробки сигналів при зв'язанні шкал часу та пристрій для його реалізації/Коваль Ю.А., Нестеренко Г.В. и др. Опубл. 27.02.1998. Бюл. №1. 10. Кашеев Б.Л., Коваль Ю.А., Кундюков С.Г. Фазовая радиометеорная аппаратура сличения шкал времени // Измерительная техника. 1998. №5. С. 27-30. 11. Антипов И.Е., Бондарь Е.Ю., Коваль Ю.А., Нестеренко Г.В., Ткачук А.А. Исследование стабильности канала прямой видимости в городских условиях // 7-я Междунар. науч.-практ. конф. “Современные информационные и электронные технологии”. Одесса, 2006. Т.1, С. 14. 12. Bondar E. Y., Nesterenko G. V. The using of Ultrawideband canal in problem of time scale compari-

son // The Third International Conference Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals "UWBUSIS'06", Sevastopol, 2006, p.376-378. 13. *Бондарь Е.Ю., Нестеренко Г.В., Ткачук А.А.* О возможности применения сверхширокополосных ретрансляторов в задачах высокоточного сличения шкал времени // 5 Междунар. науч.-техн. конференция «Метрология и измерительная техника (МЕТРОЛОГИЯ-2006)», Харьков, 2006. Т.1. С.128-130. 14. *Синхронизация* высокоточных мер времени и частоты / Палий Г.Н., Артемьев Е.В., Изд-во стандартов, 1976, 168 с. 15. *Шполянский В.А.* Хронометрические системы. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение. 1980. 584 с. 16. *Спилкер Дж.* Цифровая спутниковая связь: Пер. с англ. / Под ред. В.В. Маркова. М.: Связь, 1979. 592с. 17. *Метеоры сегодня* / Б.Л. Кашеев, Ю.А. Коваль, В. И. Горбач, Б.Г. Бондарь. К.: Техника, 1996. 196 с. 18. *Кук Ч., Берндфельд М.* Радиолокационные сигналы: Пер. с англ. под ред. В.С. Кельзона. М. Сов. радио, 1971. 568 с. 19. *Варакин Л.Е.* Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с. 20. *Хармут Х.Ф.* Несинусоидальные волны в радиолокации и радиосвязи: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1985. 379с. 21. *Астахин Л.Ю., Костылев А.А.* Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений. М.: Радио и связь, 1989. 192 с. 22. *Иммореев И.Я.* Сверхширокополосная локация: основные особенности и отличия от традиционной радиолокации // *Электромагнитные волны и электронные системы.* 1997. Т.2. №1. С.81-88. 23. *Моисеев В.П., Нестеренко Г.В.* Обнаружитель сигналов заданной формы // *Радиотехника.* 1984. Вып. 68. С.23-25.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 20.11.2007