

## КОМПЕНСАЦИЯ МНОГОЛУЧЕВОСТИ СИГНАЛА ОБЩЕГО ИСТОЧНИКА В ПАССИВНОЙ СИСТЕМЕ СИНХРОНИЗАЦИИ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

### Введение и постановка задачи

Практически ни одна из существующих и вновь создаваемых систем передачи и извлечения информации, измерений, контроля и управления любыми процессами не может обойтись без учета и измерения времени и частоты. Прямо или косвенно частотно-временные методы используются для исследования космоса, мирового океана и земной коры; при создании современных навигационных, локационных и связных систем, высокоточного оружия и другой военной техники; для обеспечения измерений при проведении исследований и др. [1 – 3]. При этом на соответствующие межгосударственные и государственные службы возложена задача обеспечения единства измерения времени и частоты. В настоящее время наиболее распространенной в использовании технической системой, позволяющей проводить высокоточные частотно-временные сличения, является глобальная спутниковая навигационная система GPS-GLONASS. Хотя это две системы, отличающиеся по принципу извлечения сигнальной информации, но прием и обработка их сигналов, как правило, выполняется в совмещенных приемных устройствах. В [3] показано, что для обеспечения достоверности частотно-временных сличений в поверочной схеме одновременно должны работать не менее трех разнотипных и равноточных измерительных систем. Поэтому в Харьковском национальном университете радиоэлектроники (ХНУРЭ) проводятся исследования по разработке альтернативных систем синхронизации времени и частоты.

Отличительной особенностью предлагаемой пассивной системы синхронизации (рис. 1, б) является разделение функции излучения сигнала и его частотно-временной модуляции в первичном источнике синхросигналов [4]. Для этого функция частотно-временной модуляции (привязки) передается «своему» объекту (пункту), а функцию излучателя сигнала при этом может выполнять любой произвольный источник, являющийся радиовидимым для синхронизируемых пунктов. В роли «своего» ведущего (головного) пункта может выступать государственный, первичный, ведомственные и другие эталоны, которые участвуют в реализации такой многопозиционной системы. Задача ведущего пункта – принять сигнал общего источника (ОИ) и «привязать» его к шкале своего эталона, который является источником системного времени. В ведомых пунктах также принимается сигнал ОИ и фиксируется относительно шкал своих эталонов. Поскольку функция частотно-временной модуляции сигнала стороннего источника (ССИ) переносится в пункт А (рис. 1, б), то информация о положении ССИ относительно шкалы системного времени должна быть передана в синхронизируемые пункты. Для этого вводятся информационные каналы с произвольной задержкой для обмена информацией о временном положении идентичных фрагментов ССИ между ведущим и ведомым пунктами. Эти каналы могут быть как однонаправленными (от ведущего к ведомым), так и двунаправленными, в зависимости от особенностей функционирования системы. Такой метод сличения назван пассивным методом общего охвата (ПМОО).

Многопозиционная пассивная система синхронизации (МПСС) с использованием сигналов наземных или космических сторонних источников обладает рядом достоинств, обусловленных отсутствием радиоизлучения в синхронизируемых пунктах. Поэтому автоматически решается задача электромагнитной совместимости и скрытности работы такой системы, биологической и экологической безопасности. Также предлагаемая система синхронизации времени и частоты система является более экономичной, так как нет необходимости в разработке, изготовлении и эксплуатации радиопередающих устройств, которые являются наиболее энерго- и материалозатратными элементами радиотехнической системы.

Основным параметром, отражающим качество работы МПСС, является значение погрешности частотно-временных сличений (ЧВС). Истинное и измеренное значение разности времени запаздывания сигналов, а следовательно, погрешность синхронизации может изменяться под воздействием внешних и внутренних дестабилизирующих факторов:

- трассовые флуктуации времени распространения радиоволн (РРВ);
- воздействие искусственных и естественных помех;
- многолучевость РРВ;
- флуктуации аппаратурных задержек;
- алгоритмические (вычислительные) погрешности;
- взаимный уход шкал эталонов.

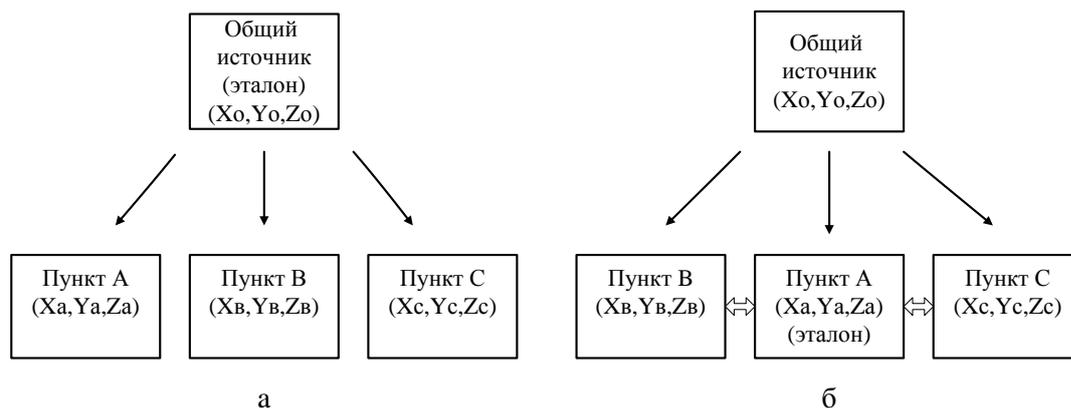


Рис. 1. Структурная схема полуактивной (а) и пассивной (б) систем синхронизации

В данной статье рассматривается повышение точности ЧВС за счет устранения (компенсации) такого источника погрешности как многолучевость РРВ. В [5] показано, что многолучевость (многопутность) РРВ вызывает появление дополнительных пиков ВКФ принятых сигналов, что снижает вероятность верного сличения. Кроме того многолучевость вносит погрешность в результат сличения. Борьба с многолучевостью является актуальной и для задач ГНСС-позиционирования. Рекомендациями Международного союза электросвязи [6] предусмотрена необходимость принятия мер к компенсации влияния многолучевости РРВ.

Реализация ПМОО следует из функциональной модели МПСС (рис. 2), в соответствии с которой в состав системы входят два идентичных по структуре приемных пункта – А (ведущий) и В (ведомый).

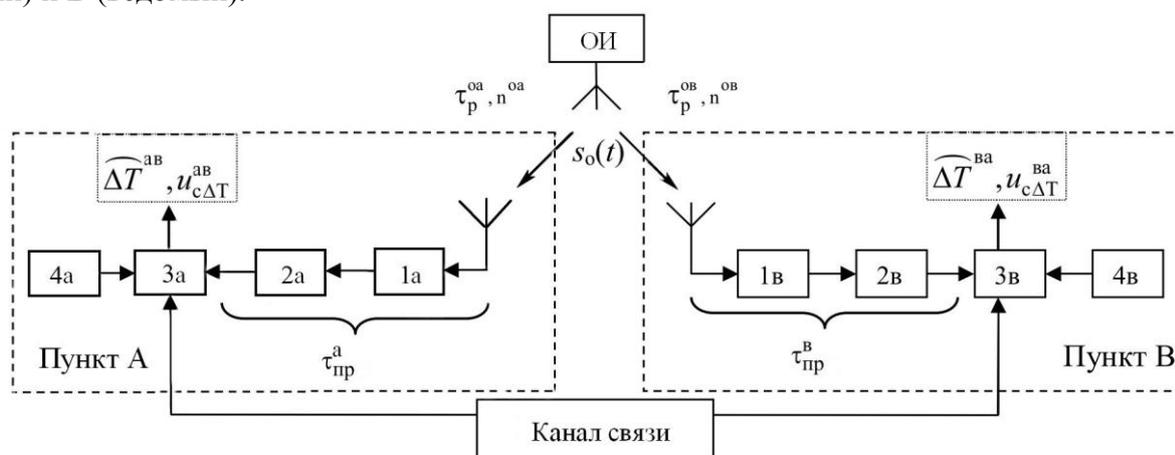


Рис. 2. Функциональная модель МПСС на основе ПМОО:

ОИ – источник общего сигнала; 1 – приемные устройства; 2 – устройства оценки временного положения сигналов; 3 – устройства, реализующие алгоритм измерений и методы обработки результатов; 4 – сличаемые эталоны

Взаимный сдвиг шкал времени определяется из соотношения:

$$\Delta T^{AB} = (\tau_p^{oa} - \tau_p^{ob}) + (\Delta T^{AO} - \Delta T^{BO}) + (\tau_{np}^a - \tau_{np}^b) + (\delta_t^a - \delta_t^b), \quad (1)$$

где  $\tau_p^{oa}, \tau_p^{ob}$  – погрешности определения задержки сигнала ОИ на соответствующих трассах;  $\Delta T^{AO}, \Delta T^{BO}, \Delta T^{AB} = -\Delta T^{BA}$  – погрешности определения соответствующих сдвигов шкал;  $\tau_{np}^a, \tau_{np}^b$  – погрешности определения задержек сигналов в приемных трактах пунктов;  $\delta_t^a, \delta_t^b$  – погрешности измерения временного положения сигналов в пунктах.

Как следует из (1), в результирующую погрешность сличения шкал времени входят не полные составляющие погрешностей, а их парные разности по отношению к ведущему и ведомому пунктам.

### Теоретическое обоснование и разработка алгоритма компенсации многолучевости сигнала общего источника

Исключение влияния многолучевости прежде всего предполагает выявление факта ее наличия. Здесь следует исходить из предположения о том, что многолучевость не может одновременно присутствовать во всех синхронизируемых пунктах, а поэтому ее наличие можно определить из сравнения попарных ВКФ выборок сигнала ОИ, записанных в синхронизируемых пунктах. Присутствие в одной или нескольких ВКФ боковых лепестков будет свидетельствовать о наличии дополнительного сигнала, находящегося в пределах интервала временной корреляции. Представляет интерес выделение такого сигнала – выполнение задачи временного разрешения, а за тем уже компенсация его влияния. Таким образом, алгоритм сличения шкал времени пространственно разнесенных мер по сравнению с предложенным в [4] несколько усложняется – добавляется процедура проверки принятых сигналов на наличие многолучевости, которую можно выполнять параллельно с операцией сличения эталонов, и при выявлении таковой принимать меры по устранению ее влияния на точность синхронизации.

Для произвольного ССИ величина сдвига шкал времени определяется по результатам взаимокорреляционной обработки  $m$  сигнальных выборок, в каждой из которых содержится по  $i$  отсчетов. То есть анализу подлежит диагональная матрица взаимокорреляционных функций размерностью ( $m \times m$ ):

$$\mathbf{B}^{AB}[\tau] = M\{\mathbf{X}_m^A[i + \tau]\mathbf{X}_m^{B*T}[i]\} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{11}^{AB} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \mathbf{B}_{mm}^{AB} \end{bmatrix},$$

то есть в формировании ВКФ участвуют только идентичные фрагменты сигнала ОИ, поэтому все элементы данной матрицы кроме диагональных равны нулю. Для каждой из ВКФ  $\mathbf{B}_{mm}^{AB}$  находится временное положение ее максимума, которое далее участвует в статистической обработке результатов измерений и формировании результирующей оценки сличения шкал времени эталонов. Полагаем, что при приеме сигнала ОИ в пункте  $\mathbf{B}$  наблюдается эффект многолучевости. В этом случае такой сигнал можно представить в виде

$$X^B[i] = x^B[i] + \sum_{j=1}^k b_j x^B[i - \tau_j] + n^B[i],$$

где  $b_j$  – коэффициент ослабления отдельного дополнительного луча;  $\tau_j$  – временное запаздывание луча;  $k$  – количество принимаемых дополнительных лучей.

При  $\tau_j < \tau_{кор}$  ВКФ  $\mathbf{B}_{mm}^{AB}$  содержит дополнительные выбросы, отстоящие от главного лепестка на  $\tau_j$ . Поскольку в вычислении данной ВКФ участвуют идентичные фрагменты сигнала ОИ, то есть  $x^A[i] \approx x^B[i]$  с точностью до фазы, то вычитая из  $X^B[i]$  значения  $X^A[i]$ , получаем помеховую составляющую сигнала в пункте  $\mathbf{B}$ :

$$X_n^B[i] = X^B[i] - X^A[i] = x^B[i] + \sum_{j=1}^k b_j x^B[i - \tau_j] + n^B[i] - x^A[i] - n^A[i] = \sum_{j=1}^k b_j x^B[i - \tau_j] + n^B[i] - n^A[i]. \quad (2)$$

Полученную помеховую составляющую теперь можно вычесть из принятого в пункте В сигнала ОИ

$$X^B[i] - X_n^B[i] = x^B[i] + n^A[i]. \quad (3)$$

Математическую модель устройства, реализующего операции (2) и (3), можно представить в упрощенном виде (рис. 3). Сигнал, в котором многолучевая помеха отсутствует, на рис. 3 обозначен как «опорный сигнал». Наличие аттенюаторов в схеме учитывает разные уровни сигналов. Задержка в помеховых каналах может быть неизвестной. Выделение помехового сигнала с целью его последующей компенсации возможно при известной разнице времени запаздывания сигнала ОИ до синхронизируемых пунктов и выравнивании амплитуд основных сигналов. Выходным сигналом устройства является выходной сигнал левого по схеме сумматора.

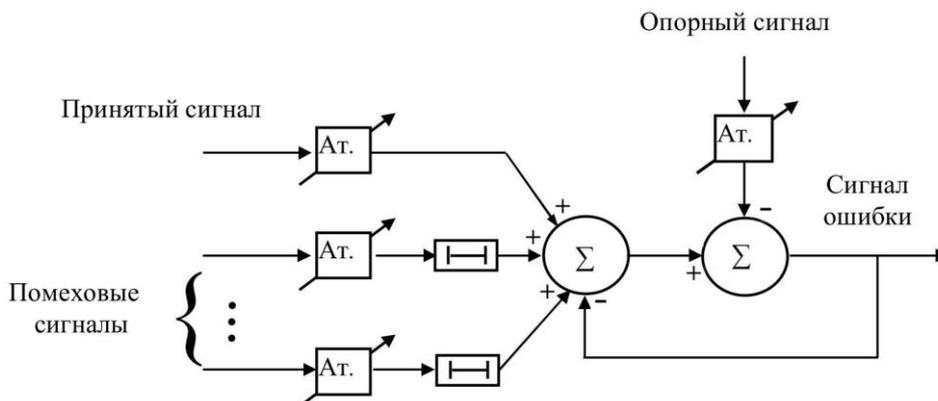


Рис. 3. Математическая модель устройства компенсации многолучевой помехи

Таким образом, для расчета ВКФ сигналов ОИ, принятых в пространственно разнесенных пунктах будут использоваться сигналы, свободные от многолучевой помехи.

Анализ ВКФ позволяет определить как временной сдвиг каждого из дополнительных лучей, так и его уровень по отношению к основному сигналу. Поскольку мешающий сигнал является смещенной во времени выборкой сигнала ОИ, то представляется возможным, записав в другом, свободном от помехи, пункте выборку с необходимым временным смещением, после инвертирования и выравнивания амплитуды осуществить компенсацию помехи. В этом случае необходимо выполнить условие:

$$X_n^B[i] = \sum_{j=1}^k b_j x^A[i - \tau_j] = \sum_{j=1}^k b_j x^B[i - \tau_j]. \quad (4)$$

В этом случае результирующий сигнал пункта В, который будет использоваться для вычисления ВКФ

$$X^B[i] - X_n^B[i] = x^B[i] - n^A[i] + n^B[i], \quad (5)$$

то есть получается сигнал, в котором многолучевая помеха скомпенсирована.

Операции в соответствии с выражениями (4) и (5) выполняет модель, упрощенная схема которой показана на рис. 4. Чтобы не загромождать рисунок, не показаны обратные связи в каналах компенсации каждого из лучей помехи. Данное устройство существенно сложнее приведенного на рис. 3, поскольку является многоканальным.

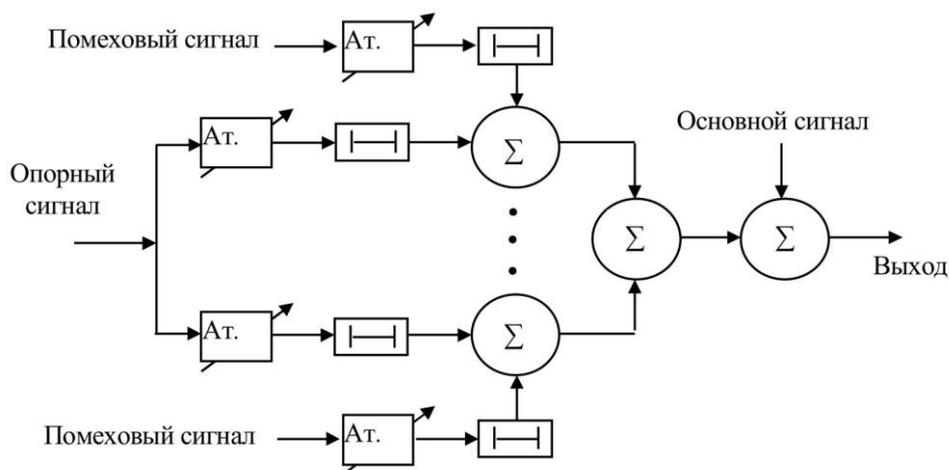


Рис. 4. Математическая модель многоканального устройства компенсации многолучевой помехи

Особенностью работы высокоточной многопозиционной пассивной системы синхронизации времени и частоты является то, что сличение шкал пространственно разнесенных эталонов выполняется в режиме пост-обработки, что предполагает информационный обмен между пунктами приема сигнала ОИ и совместную обработку сигнальных выборок, записанных в синхронизируемых пунктах. Поэтому, в отличие от систем реального времени, требования к быстродействию вычислений, а также ограничения по ресурсу «машинного» времени здесь не столь жесткие.

### Выводы

В ходе выполненных теоретических исследований обоснована возможность компенсации многолучевости сигнала общего источника при ее отсутствии в одном из синхронизируемых пунктов. При этом реализован модифицированный принцип «когерентной» компенсации. Модификация стала возможной при разнесенном приеме за счет выделения полезного сигнала, свободного от многолучевости, с последующим выделением помеховой составляющей, обусловленной многолучевым приемом. Также рассмотрен вариант многоканального построения компенсатора.

Использование предложенных принципов возможно и в других многопозиционных системах, принимающих идентичные полезные сигналы, если в одном из приемных пунктов помеха отсутствует.

В ходе дальнейших исследований планируется проверка теоретических результатов путем моделирования, а также проведение экспериментальных исследований в условиях реальной помеховой обстановки.

**Список литературы:** 1. *Державна програма розвитку еталонної бази на 2006–2010 роки*. Затверджено постановою Кабінету Міністрів України № 228 від 1.03.2006 р. [Електронний ресурс] – Режим доступу до документу: [portal.rada.gov.ua / zakon.rada.gov.ua](http://portal.rada.gov.ua/zakon.rada.gov.ua/). 2. *Розпорядження Кабінету Міністрів України №874-р від 25 червня 2008 р. Про схвалення концепції розвитку державної метрологічної системи на період до 2015 року*. [Електронний ресурс] – Режим доступу до документу: <http://www.gdo.kiev.ua/files/db.php?st=15458&god=2008>. 3. *Клейман, А. С.* Метрологическое обеспечение время-частотных измерений в Украине [текст] / А. С. Клейман, А. И. Левенберг, В. С. Соловьев [та ін.] // Укр. метрологічний журнал. – 2003. – № 2. – С. 10–19. 4. *Должиков, В.В.* Исследования макета пассивной системы синхронизации по фазе несущей частоты аналогового телевизионного сигнала / В.В. Должиков, А. А. Костыря, В.Н. Науменко, С.А. Плехно, С.И. Ушаков // Радиотехника. – 2014. – Вып. 178. – С. 111 – 118. 5. *Уидроу, Б., Стирнз, С.* Адаптивная обработка сигналов : пер. с англ. – М. : Радио и связь, 1989. – 440 с. 6. *Рекомендація МСЭ-R F.1093-2 Влияние многолучевости распространения радиоволн на проектирование и работу цифровых систем фиксированной беспроводной связи прямой видимости*. [Електронний ресурс] – Режим доступу до документу: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/f/R-REC-F.1093-2-200604-I!!PDF-R.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/f/R-REC-F.1093-2-200604-I!!PDF-R.pdf)

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 23.10.2015