

Радиочастотный метод измерения сверхмалых перемещений и вибраций

В.А. Жмудь, Д.О. Терешкин, А.В. Ляпидевский, А.В. Захаров
НГТУ, ОАО «НИПС»

Аннотация: Описано устройство измерительной техники, которое может использоваться в геодезии, строительстве, системах контроля состояния сложных инженерных сооружений: ГЭС, плотин, мостов и др. для выполнения высокоточных бесконтактных измерений.

Ключевые слова: измерения перемещений, измерения вибраций.

ВВЕДЕНИЕ

Для высокоточных бесконтактных измерений малых перемещений и вибраций применяют методы, основанные на известной скорости распространения оптических волн или радиоволн. Оптические устройства, чаще всего лазерные, характеризуются более высокой точностью, но требуют прямой видимости объекта и отсутствия помех оптического характера, включающих резкие перепады влажности или давления, создающие дифракционные неоднородности. Радиотехнические измерители характеризуются, как правило, меньшей точностью, но большей дальностью, а также чувствительностью к отражающим свойствам объекта и его форме и высокой зависимостью результатов от проводимости окружающих предметов. Анализ показал значительное преимущество радиочастотных измерителей для целей непрерывного мониторинга малых перемещений и вибраций в натуральных условиях, однако, эксперименты с первыми образцами таких устройств не позволили достичь желаемой точности измерений. В связи с этим предложены и анализируются усовершенствованные методы и аппаратура для измерения сверхмалых перемещений и вибраций радиотехническим путем вне помещений на расстояниях более 1 км.

1. ОБСУЖДЕНИЕ АНАЛОГОВ И ПРОТОТИПОВ

Измерительные устройства преобразуют измеряемое линейное расстояние во время задержки отраженного сигнала, которое затем измеряется специальными электронными

средствами – измерителями интервалов или фаз. Недостатком оптических измерительных устройств при их использовании вне помещений является зависимость точности измерений от метеоусловий, влияющих на скорость распространения оптических волн в воздухе, а также необходимость прямой оптической видимости между источником излучения и приемником излучения. Недостатком радиотехнических измерительных устройств является сложность конструирования источника узконаправленного излучения и отражателя радиоволн и сложность настройки таких устройств, а также возникновение помех от сторонних объектов, которые в некоторых случаях невозможно устранить.

Решение задачи непрерывного мониторинга состояния сложных инженерно-технических сооружений, например, плотин, может быть достигнуто одновременным использованием измерителей всех типов. При этом оптический измеритель можно использовать для контроля по оптическим путям, обеспеченным первоначальным проектированием и проходящим внутри самой конструкции.

Зависимость результата измерения от состояния атмосферы редко обсуждается в литературе, однако, этот недостаток является существенным для оптических измерителей. Рассмотрим, например, оптический измеритель линейных перемещений, схема которого приведена на *рис. 1* [1]. В этом измерителе излучение от источника оптического излучения через передающую оптическую схему поступает в среду распространения излучения, где распространяется до объекта и обратно к приемной оптической системе. Фотоприемник преобразует оптический сигнал в электрический, который поступает на средство обработки, где определяются соотношения фаз, частот или иных характеристик принятого сигнала, по которым вычислительное средство вычисляет расстояние от измерителя перемещений до объекта. На прохождение через среду в прямом и обратном направлениях оптическое излучение затрачивает некоторое время вследствие конечной скорости распространения света в этой

среде. Измерение этой задержки позволяет измерять расстояние до объекта. Для измерения этой задержки может использоваться сравнение с сигналом, поступающим на этот же или на дополнительный фотоприемник, минуя путь к объекту или обратно. Или же в сигнале, распространяющемся к объекту и обратно, могут содержаться несколько модуляционных частот. Одинаковая задержка по времени в

сигналах на различных частотах приводит к разным фазовым сдвигам в принимаемых сигналах, что позволяет вычислить величину задержки во времени. Это вычисление осуществляет средство обработки, а средство вычисления преобразует ее выходные сигналы в форму, удобную для восприятия человеком или регистрирующим устройством.

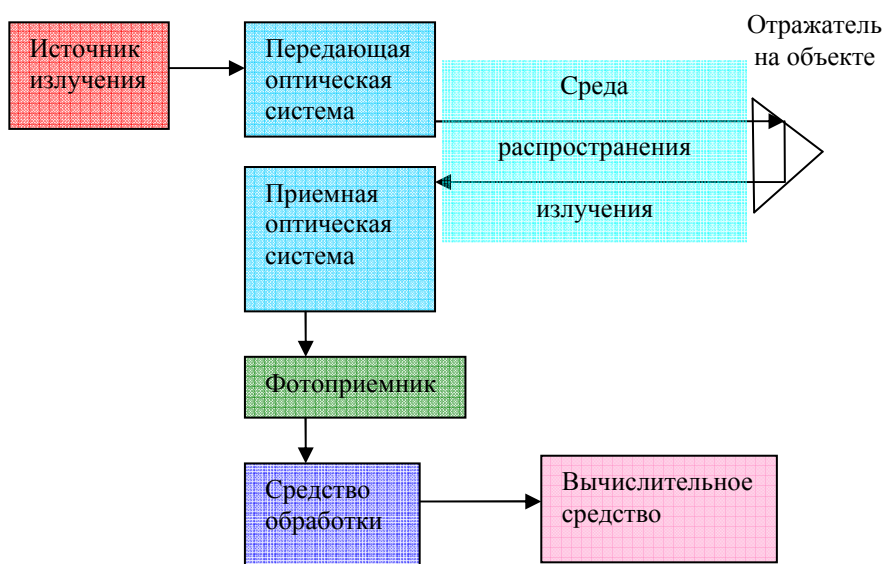


Рис. 1. Обобщенная схема оптического измерителя перемещений и вибраций [1]

Недостатком этого измерителя является зависимость результата измерения от метеоусловий, таких как давление и температура, изменяющих скорость света в среде, которой является воздух, что снижает точность измерений. Другим недостатком является необходимость прямой оптической видимости на всей измерительной длине между передающей и приемной системами.

Радиотехнический измеритель в идеале может быть прикреплен к контролируемым

частям конструкции и использоваться без дальнейших настроек в круглосуточном режиме работы. Такое изделие найдет широкое применение при обеспечении измерений с погрешностью менее 1 мм на расстояниях более 1 км. В этом случае оно превзойдет оптические устройства по техническим характеристикам и по удобству эксплуатации.

Рассмотрим, например, измеритель линейных перемещений, схема которого приведена на рис. 2 [2].

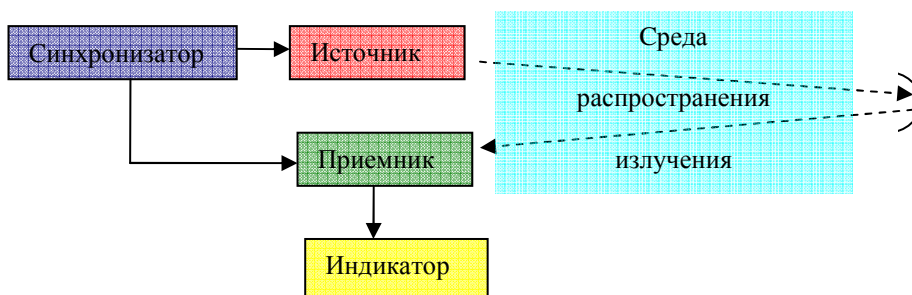


Рис. 2. Обобщенная схема радиотехнического измерителя перемещений [2]

Этот измеритель линейных перемещений

работает следующим образом. Синхронизатор

формирует связанные по времени сигналы на входы источника и приемника электромагнитных волн. Источник по сигналу синхронизатора со своей антенны посылает сигнал, часть которого отражается объектом и поступает на антенну приемника. Время поступления этого сигнала на приемник сравнивается со временем поступления сигнала от синхронизатора, и по запаздыванию во времени поступления отраженного сигнала по сравнению с сигналом синхронизатора ΔT определяется расстояние до объекта, равное произведению скорости распространения локационного сигнала V на запаздывание ΔT . Результат измерения отображается на индикаторе. Таким образом, определяется расстояние между местом размещения источника и приемника и объектом.

Недостатком этого устройства является

низкая точность измерений, обусловленная тем, что в нем используется сигнал радиотехнического диапазона, отраженный от объекта сложной формы, что вызывает искажение формы отраженного сигнала. Применение специального отражателя довольно сложно и при этом не достаточно эффективно в связи с противоречивостью требований его узконаправленного действия и малого искажения фазы.

На рис. 3 показана схема другого радиотехнического измерителя перемещений, разработанного и исследованного нами, который можно считать прототипом предлагаемого устройства [3]. Далее на рисунках среда распространения излучения не показывается, поскольку понятно, что она всегда присутствует.

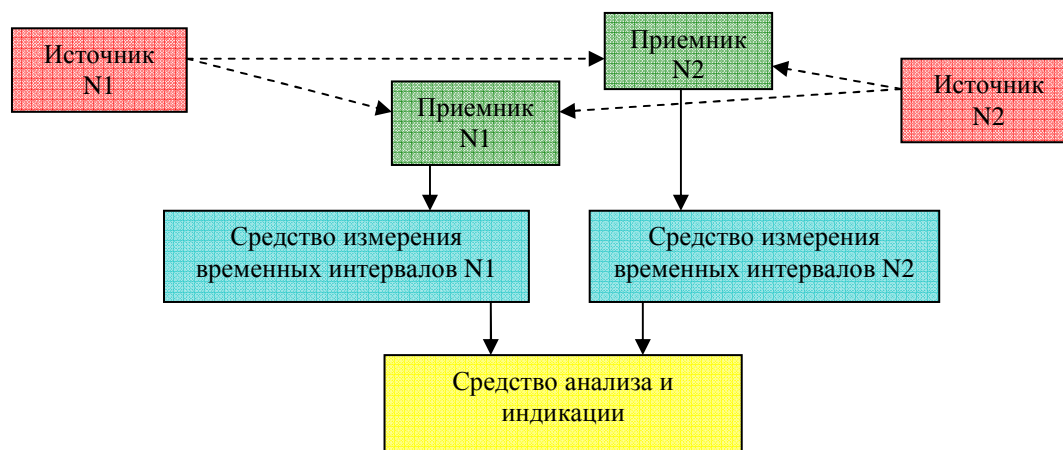


Рис.3. Радиотехнический измеритель перемещений [3]

Этот измеритель линейных перемещений работает следующим образом. Источники излучают радиосигналы, которые легко можно отличить и отделить друг от друга, причем каждый из таких сигналов содержит периодически появляющиеся признаки времени или фазы встроенного генератора или эталона времени. Каждый приемник воспримет сигнал каждого источника, различая их по характерным признакам. Предположительно, таким признаком отличия сигналов от разных передатчиков является различная несущая частота. Принятые сигналы вместе с содержащимися в них признаками времени поступают на средства измерения временных интервалов. Каждое из средств измерения временных интервалов определяет разность моментов этих признаков. Обозначим время обнаружения временного признака в сигнале от передатчика с номером N на приемнике с номером M как t_{NM} . Тогда, если приемники и источники выстроены в прямую

линию, начинающуюся первым источником, проходящую через первый приемник, затем через второй приемник и после этого через второй источник, то отличие разности моментов возникновения временных признаков $\Delta t = (t_{11} - t_{21}) - (t_{21} - t_{22})$ пропорционально расстоянию между приемниками.

Эта разница зависит только от искомого расстояния между приемниками, а также от скорости распространения радиоволны в среде. Это позволяет вычислить величину искомого расстояния, не используя отражатели сигнала.

Таким образом, устройство позволяет измерять расстояние между антеннами двух приемников. В устройстве не требуется отражатель электромагнитных волн радиочастотного диапазона, что упрощает его конструкцию и удешевляет, устраняет зависимость результата измерения от качества такого отражателя. Это позволяет повысить точность измерений. В результате достигается

упрощение системы и повышение точности измерений.

Второй источник выполняется в виде ретранслятора сигнала от первого источника, который работает на другой несущей частоте. В этом случае признаком времени каждого сигнала может служить любая метка одинаковой огибающей. При этом оба приемника содержат два селекторных каскада, два демодулятора и в качестве средства измерения временных интервалов содержат дифференциальный фазометр.

Недостатком прототипа является недостаточно высокая точность измерений вследствие

различного вклада разных приемных трактов приемников, поскольку каждый из приемников осуществляет прием двух сигналов на различных несущих частотах. По этой причине для приема сигналов от разных приемников применяются разные электронные аналоговые тракты, содержащие селекторные каскады, узкополосные фильтры, усилители или иные узлы, настраиваемые на различные частоты. Задержки сигналов в этих каскадах могут существенно отличаться, и эти отличия изменяются со временем, а также в зависимости от температуры и других внешних факторов.

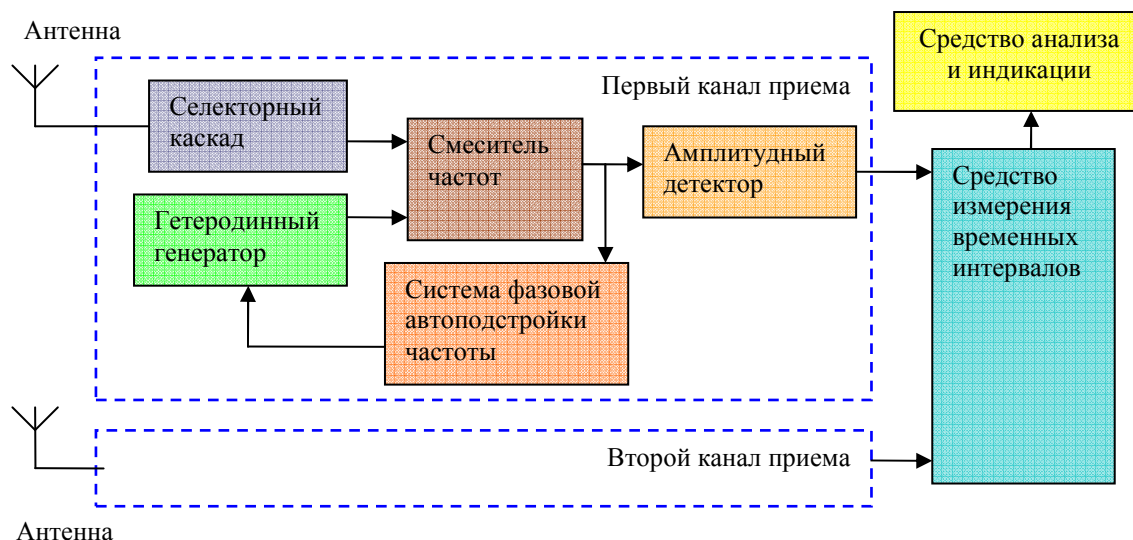


Рис.4. Пример радиоприемного тракта измерителя перемещений [3]

На рис. 4 показан пример радиоприемного тракта измерителя перемещений. Как правило, в таком тракте используется гетеродинный генератор, частота которого с помощью системы фазовой автоподстройки подстраивается к частоте принимаемого сигнала, что позволяет повысить чувствительность системы. При этом фаза обрабатываемого далее сигнала зависит не только от фазы принятого сигнала, но и от фазы гетеродинного генератора. Поскольку в каждом приемном тракте на различных несущих частотах используются разные гетеродинные генераторы, их фазы не совпадают, что вносит дополнительную ошибку в результат измерений. Таким образом, дальнейшее повышение точности требует устранения этого источника ошибки.

2. ПРЕДЛАГАЕМОЕ УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ЕГО ДЕЙСТВИЯ

Кардинально данная проблема может быть решена лишь в том случае, если для приема двух сигналов от двух разных передатчиков используется полностью один и тот же тракт,

что возможно лишь в случае использования одной и той же несущей частоты. Однако в этом случае затруднительно разделить сигналы от разных передатчиков. Для решения этой проблемы предлагается осуществлять такую модуляцию, которая сохраняет свои временные признаки даже при сложении различных сигналов.

Схема предлагаемого измерителя показана на рис. 5. Поставленная задача решается тем, что предлагается использовать одну и ту же несущую частоту в обоих передатчиках, а возможность отличия принятых сигналов обеспечить путем использования уникальных модулирующих функций в каждом из передатчиков.

Предлагаемый измеритель работает следующим образом. Источники излучают радиосигналы на одной и той же несущей частоте, но с различными модулирующими функциями. Каждая из двух модулирующих функций (МФ) формируется как функция времени на выходе соответствующего генератора. Каждая МФ содержит периодически появляющиеся признаки времени (ПВ) от

встроенного или внешнего генератора или эталона времени. Эти генераторы воздействуют на входы источников излучения, осуществляя разную и хорошо отличимую модуляцию передаваемых в эфир сигналов, чья несущая частота совпадает. Эти сигналы могут быть приняты приемниками только совместно в виде их суммы с коэффициентами и с задержками во времени, зависящими от расстояния между передатчиками и приемниками. В принимаемой смеси этих сигналов требуется отличить друг от друга их специфические признаки времени, для чего необходимы специальные методы, реализованные с помощью специализированных устройств, имеющих в каждом тракте обработки на выходе приемника. Предварительно сигнал, принятый приемником, преобразуется в цифровую последовательность

его значений с помощью аналого-цифрового преобразователя. Поскольку прием смеси сигналов осуществляется в каждом приемнике единственным трактом, то все вносимые этим трактом задержки одинаковы для обоих сигналов этой смеси. Поэтому никакие изменения запаздывания в этих трактах, включая задержки в аналого-цифровых преобразователях, не будут вносить вклада в изменение разности времени между характерными ПВ от разных источников. Дальнейшая обработка сигналов осуществляется цифровым путем, поэтому все вносимые задержки при обработке сигналов могут быть точно определены и учтены в вычислении окончательного результата разности времен поступления ПВ от первого и второго источников.



Рис. 5. Схема предлагаемого измерителя перемещений

Для этой цели используются средства распознавания ПВ, показанные на рис. 6. Эти средства распознавания ПВ выявляют по отдельности ПВ двух компонент. Они работают следующим образом. В каждом канале имеется генератор, формирующий выходной сигнал,

изменяющийся во времени, который является точной копией соответствующей модулирующей функции, но время запуска этого генератора может управляться внешним сигналом.

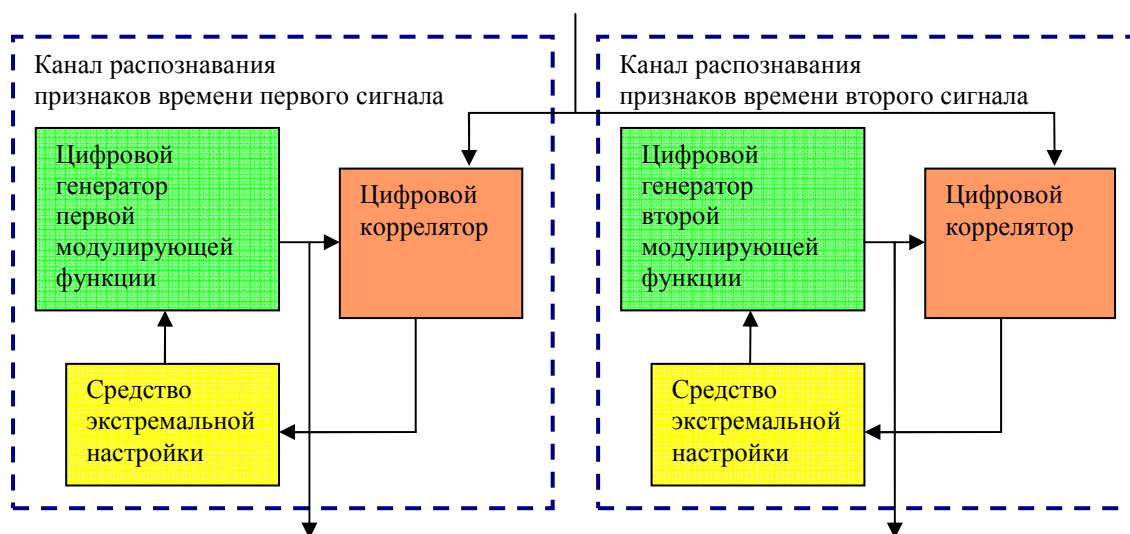


Рис. 6. Схема предлагаемого средства распознавания признаков времени

Выходной сигнал этого генератора поступает на один вход коррелятора, а на другой его вход поступает входной сигнал средства распознавания ПВ. Выходной сигнал коррелятора анализируется средством экстремальной настройки, которое на основе анализа этого сигнала изменяет время запуска генератора так, чтобы сигнал на выходе коррелятора был максимальный. В результате действия этого средства экстремальной настройки генератор оказывается настроенным синхронно компоненте с той же формой, которая имеется во входном сигнале средства распознавания ПВ. Поэтому выходной сигнал генератора может служить источником сигнала, содержащего признак времени, наилучшим образом настроенный на соответствующую компоненту в принятом приемником сигнале. Средство распознавания признаков времени может иметь один или два выхода. Если это средство имеет один выход, то какой-то заданный признак его выходного сигнала, например, передний фронт импульса, отмечает момент появления признака времени в сигнале от первого источника, а другой заданный признак, например, задний фронт импульса, отмечает момент появления признака времени в сигнале от второго источника. Также средство распознавания признаков времени может иметь два отдельных выхода, в этом случае на первом выходе определенный признак, например передний фронт импульса, отмечает момент появления признака времени в сигнале от первого источника, а на втором выходе такой же признак отмечает момент появления признака времени в сигнале от второго источника.

Практическая реализация этого устройства

может быть осуществлена на быстром микропроцессоре с соответствующей программой или на специализированном цифровом вычислительном устройстве на основе программируемых логических матриц. Средствами измерителей временных интервалов, как и в прототипе, могут служить счетчики времени или фазометры при условии обеспечения требуемой точности. Средством анализа и индикации, как и в прототипе, может служить персональный компьютер, оснащенный соответствующими средствами связи и программой для обработки сигналов. Источники сигналов могут быть выполнены как обычные радиопередатчики, использующие амплитудную, фазовую или иную модуляцию. При этом любой или каждый источник может содержать тракт автоматической подстройки несущей частоты к какой-либо внешней частоте или к ее кратной доле путем применения традиционной фазовой автоподстройки. Это позволяет обеспечить точное равенство несущих частот, что обеспечит точное равенство временных задержек, вносимых всеми аналоговыми элементами приемников. Генератор каждой МФ может быть выполнен, как последовательно включенные формирователь фиксированной цифровой последовательности и цифроаналоговый преобразователь.

Таким образом, за счет единственности тракта аналоговой обработки (от антенны приемника до выхода аналого-цифрового преобразователя) и применения цифровой обработки средством распознавания ПВ, исключается ошибка, порождаемая в прототипе за счет неодинаковости задержек различных аналоговых трактов обработки сигналов. В

результате точность измерений возрастает.

3. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПРЕДЛОЖЕННОГО УСТРОЙСТВА

На *рис. 7* показана функциональная схема каждого из приемников с последующим трактом обработки смеси радиосигналов. Для реализации этого устройства может быть использован серийный приемник, содержащий антенну с усилителем, квадратурно-балансный демодулятор, гетеродин, формирующий когерентную и квадратурную компоненты, АЦП и контур управления усилением и частотой гетеродина. Оригинальной программно-аппаратной частью является только средство обработки сигналов, содержащее устройство для распознавания двух признаков времени и цифровой фазометр.

Метод качественно разных огибающих. На *рис. 8* показан пример двух видов амплитудной модуляции сигналов, каждый из которых снабжает модулируемый сигнал признаками времени. Верхний сигнал имеет модуляцию треугольными импульсами, нижний – прямоугольными импульсами, длительности периодов модуляции соотносятся как взаимно простые или даже иррациональные числа,

несущая частота одна и та же. Наряду с использованием коррелятора или вместо него могут быть использованы иные методы обработки сигналов. Например, момент времени достижения минимума и максимума сигналом с треугольной модуляцией может быть определен, например, методом максимального правдоподобия. Это же относится к определению момента переднего и заднего фронтов сигнала с прямоугольной модуляцией.

На *рис. 9* показан результат суммирования сигналов, показанных на *рис. 8*, а также результаты детектирования этого сигнала по отдельности с когерентным и с квадратурным гетеродином, которые показаны разным цветом. Результат суммирования двух нижних сигналов показан на *рис. 10*. В этом сигнале можно усмотреть признаки каждого из исходных сигналов в раздельности. Момент резкого изменения амплитуды соответствует фронту или срезу модулирующего сигнала прямоугольных импульсов (т.е. несет временные признаки сигнала второго передатчика), момент излома огибающей несет признаки времени сигнала первого передатчика. Этот метод можно назвать методом качественно разных огибающих.

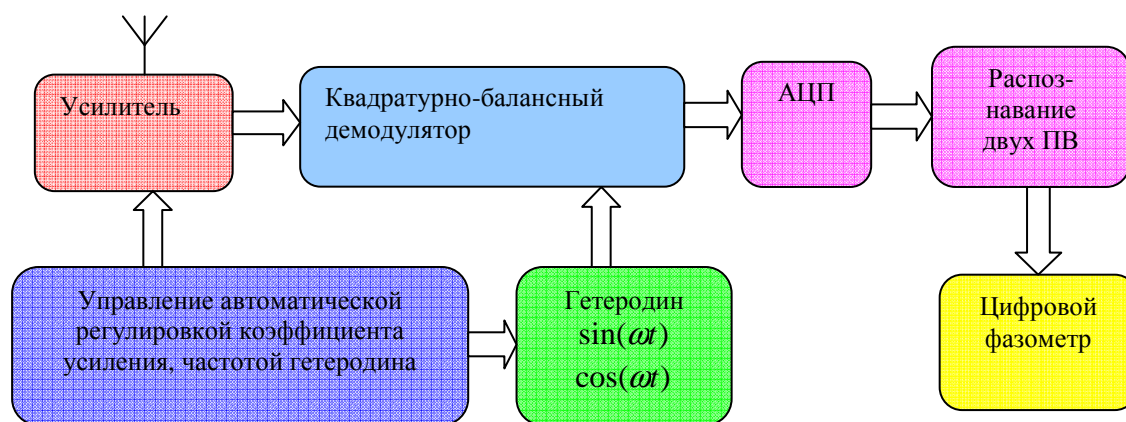


Рис 7. Функциональная схема приемника смеси радиосигналов

Метод поочередного молчания. На *рис. 11* показана пара сигналов, формируемых по методу, который можно назвать методом поочередного молчания. В этом случае периоды передачи чередуются с периодами пауз. При этом длительности передачи и длительности пауз от различных передатчиков таковы, что достоверно при любых постоянных сдвигах времени между этим сигналами сохраняются интервалы времени, на которых присутствует только сигнал от первого передатчика, и участки, на которых присутствует только сигнал

от второго передатчика. Это обеспечивается выбором периодов повторения, которые относятся в некотором некрatном соотношении, а также выбором длительностей сигналов. Некратное соотношение, например, число « π » или « e », позволяет обеспечивать повышение точности при увеличении времени усреднения и накопления статистического сигнала детектирования.

На *рис. 12* показаны сигналы, получаемые в результате квадратурной демодуляции суммы сигналов, показанных на *рис. 11*. Видно, что в

полученных сигналах можно указать интервалы, когда отсутствуют оба сигнала, а также интервалы, на которых присутствует, как минимум, один из сигналов. Очевидно, что, как правило, вначале появляется лишь один из сигналов, далее следует интервал, на котором присутствуют оба сигнала, на следующем

интервале присутствует лишь второй сигнал. Даже если такая последовательность время от времени нарушается, ситуация может легко распознаваться вследствие характерных, заранее известных и некратных длительностей первого и второго сигнала.

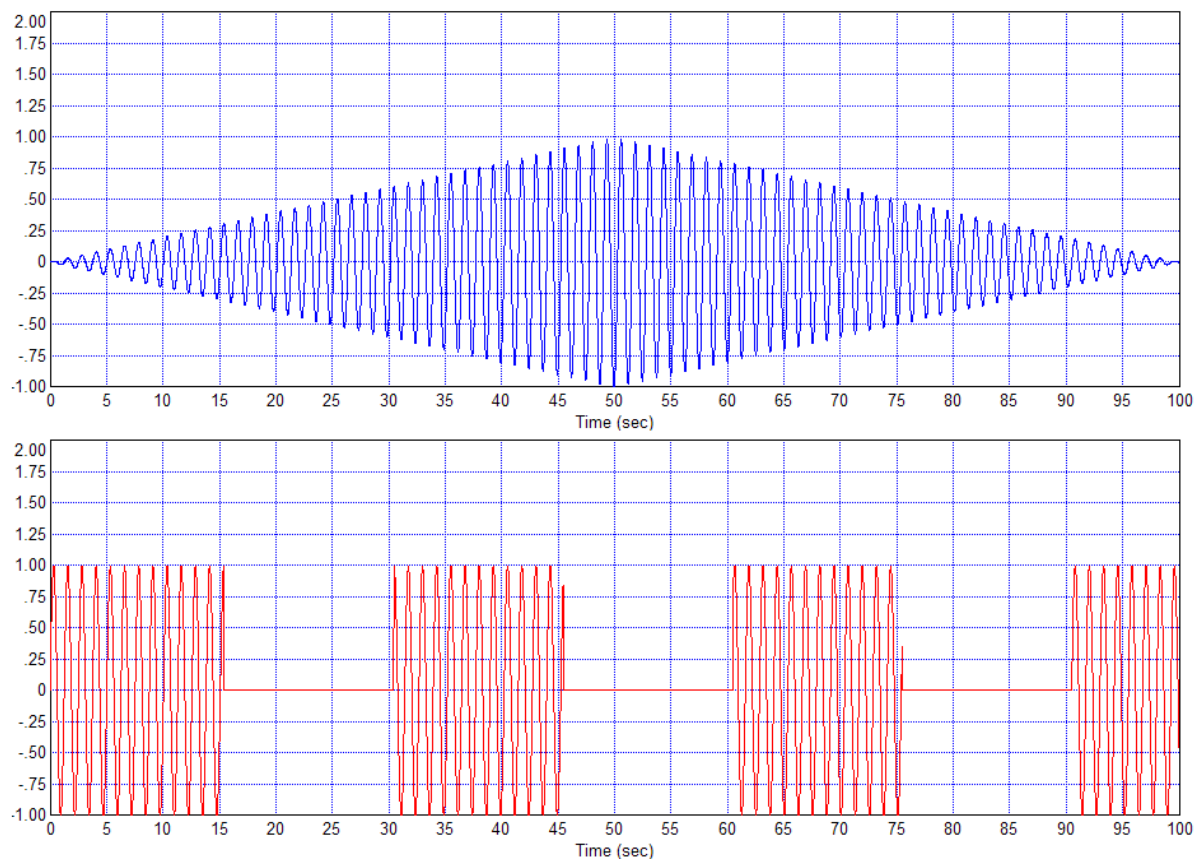


Рис. 8. Пример двух видов модуляции, снабжающих признаком времени

Метод периодического инвертирования фазы. Вместо периодического отключения сигнала может быть использовано периодическое инвертирование его фазы. На рис. 13 показаны соответствующие сигналы передатчика. Периодичность инверсии является характерным признаком данного передатчика, периоды инвертирования соотносятся как иррациональные числа. Фазометр определяет фазу получаемого сигнала, при этом измеренная

разность фаз изменяется скачками в различные моменты времени, соответствующие моментам изменения фаз на первом и на втором передатчиках. По характерному периоду каждого из скачков при вторичной обработке можно выявить признаки первого или второго передатчика, что может служить признаком времени (признаком запаздывания) от каждого передатчика в отдельности.

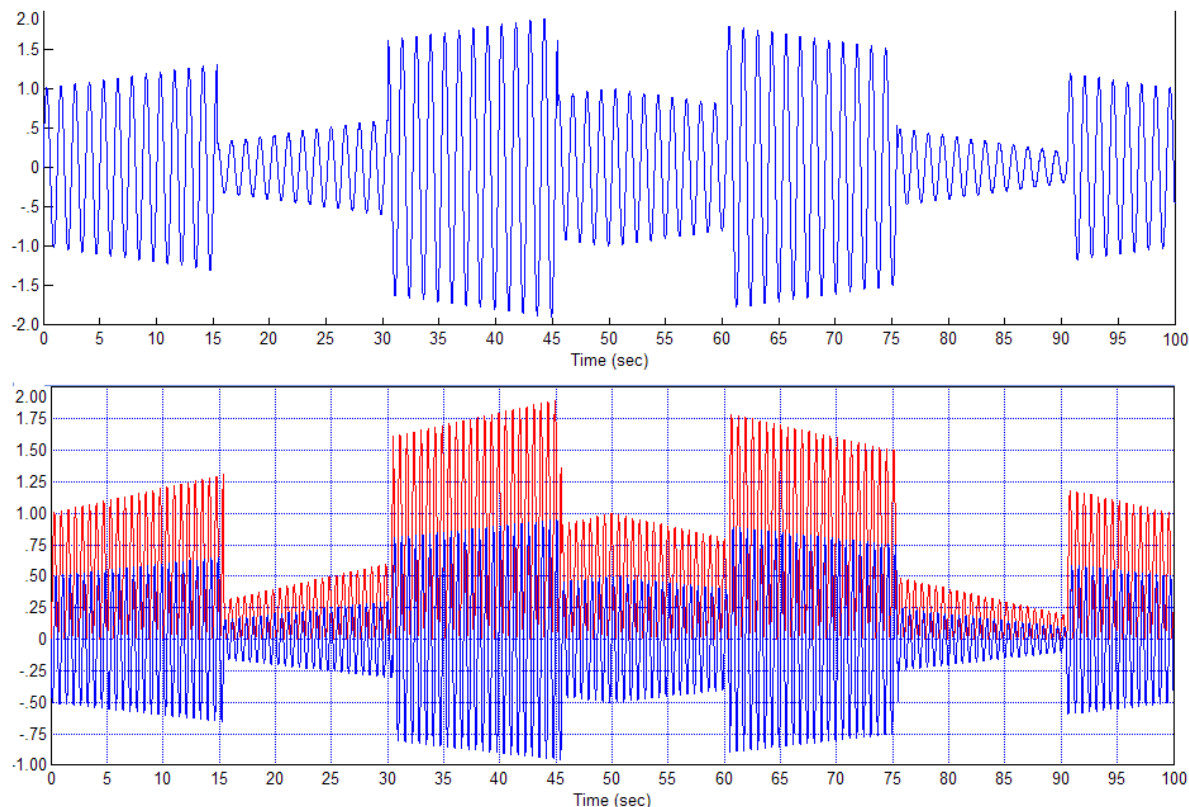


Рис. 9. Сигнал, являющийся суммой сигналов рис. 8, а также результаты детектирования этого сигнала

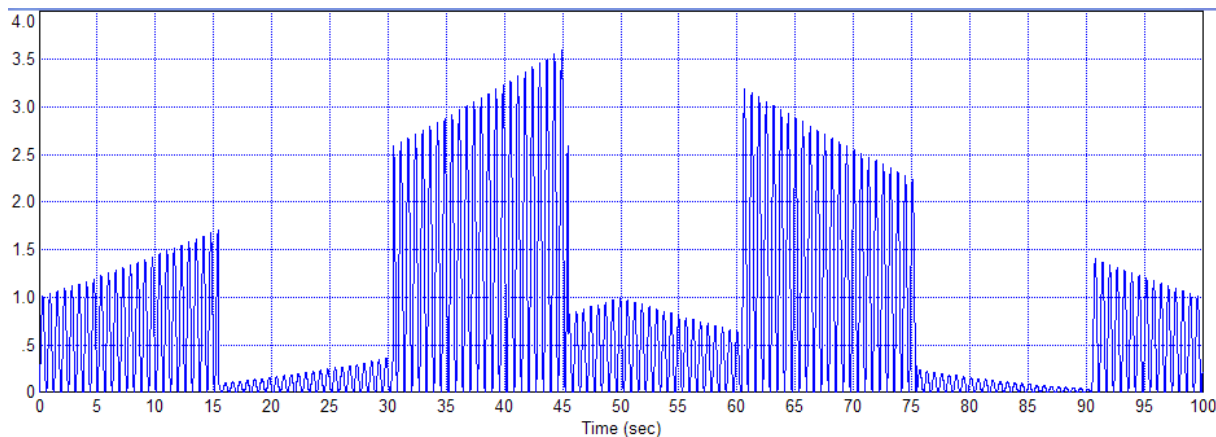


Рис. 10. Сумма двух нижних сигналов, показанных на рис. 9

Метод объединения видов модуляции.
 Суть этого метода состоит в комплексном использовании одновременно нескольких видов модуляции для более уверенного выделения ее признаков. Например, можно предложить для сигналов по методу качественно разных огибающих ввести дополнительно скачкообразную амплитудную и (или) фазовую

модуляцию для первого и (или) для второго сигналов. К примеру, сигнал с треугольной огибающей может в момент достижения нуля изменять фазу на 180 градусов, и при этом сигнал с прямоугольной огибающей после очередной паузы изменять фазу на 90 градусов. Также может быть использована модуляция фазы только для одного из указанных сигналов.

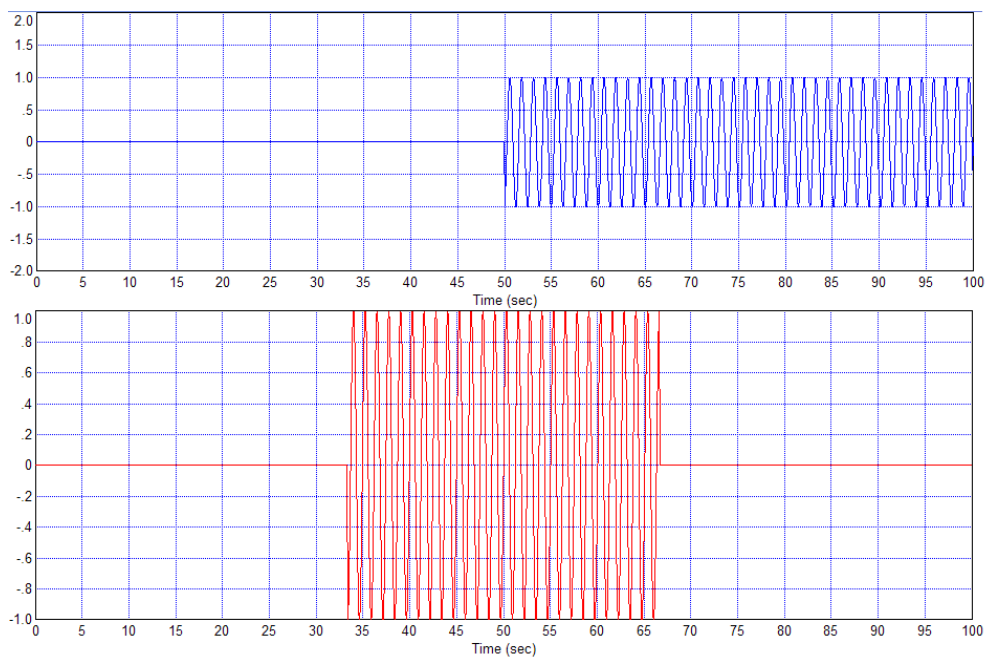


Рис. 11. Сигналы по методу поочередного молчания

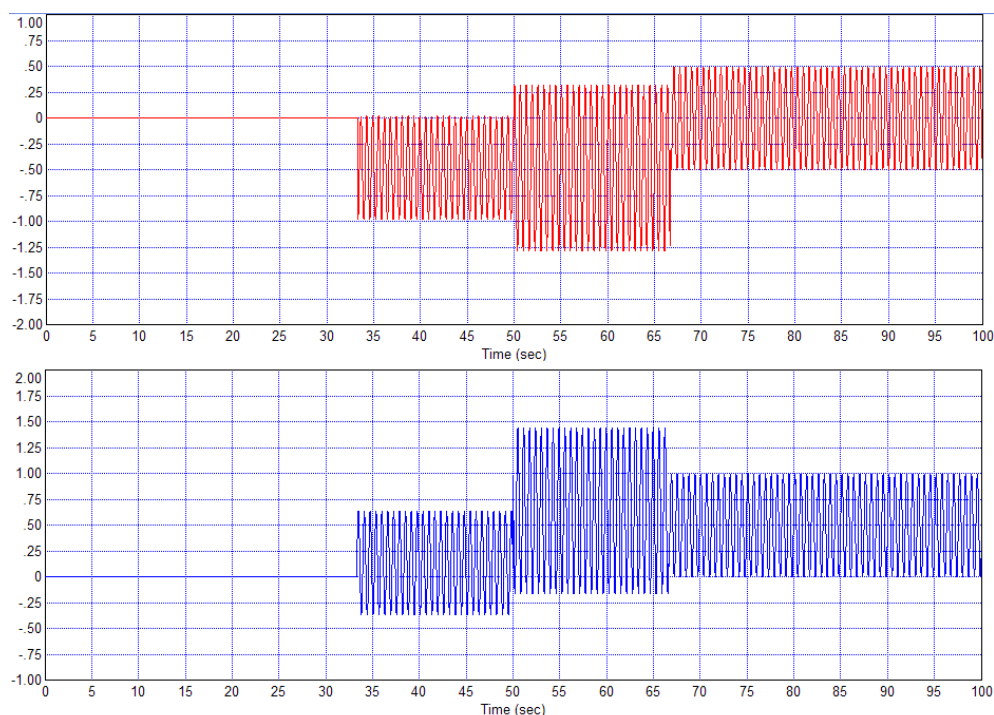


Рис. 12. Компоненты сигналов при детектировании (когерентная и квадратурная)

Итогом всех обсуждаемых технических решений является тот факт, что прием смеси сигналов от двух различных передатчиков, осуществляющих передачу сигналов на одной и той же несущей частоте, можно осуществлять одной антенной, одним трактом первичной обработки сигналов. В этом случае для обоих сигналов равны все виды задержек от антенны и от тракта обработки, включая случайные

девиации свойств фильтров и девиации фазы гетеродинного генератора. Получаемые разности фаз или разности временных признаков в групповом сигнале могут быть идентифицированы и отнесены к конкретным передатчикам. При этом разность времен поступления этих временных признаков несет информацию о различной дальности этих передатчиков по отношению к приемной антенне.

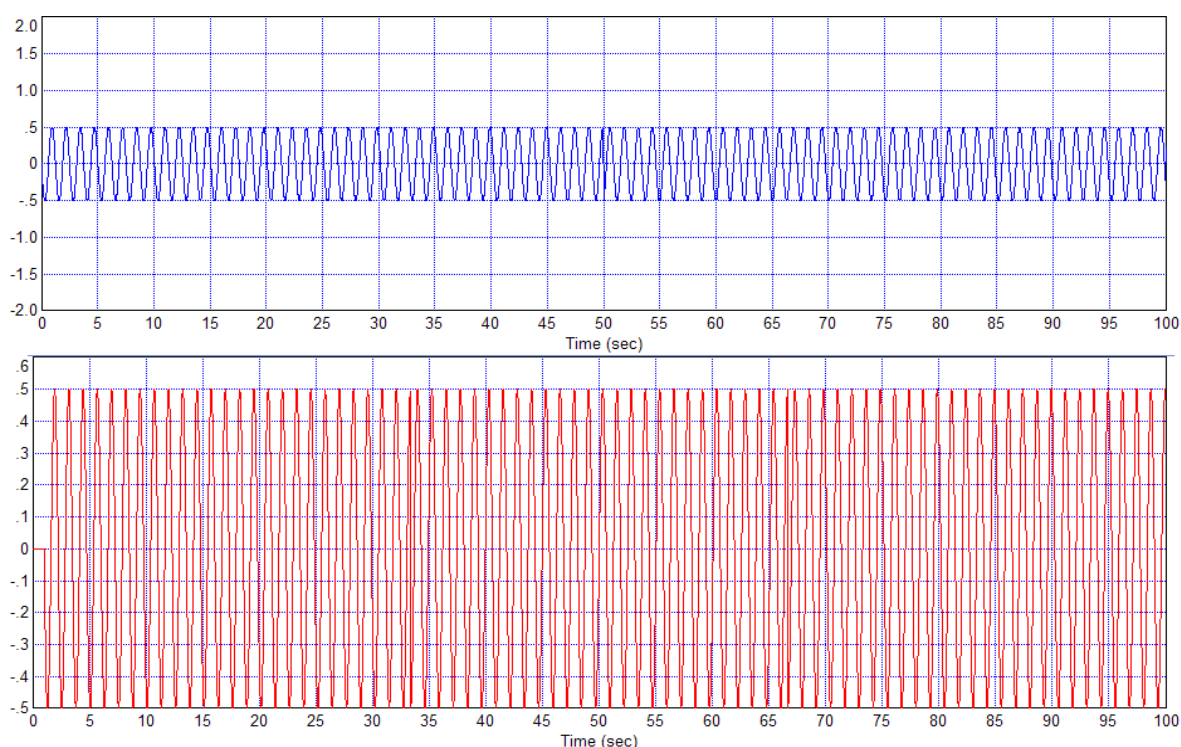


Рис. 13. Сигналы передатчиков по методу периодического инвертирования фазы

4. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СРЕДСТВА ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ НАСТРОЙКИ

Выбор метода модуляции способен повлиять на эффективность действия средства экстремальной настройки. Одна из причин недостаточной точности может состоять в высокой погрешности определения точных моментов поступления признаков времени.

Признак времени может содержаться в явном или неявном виде в форме огибающей функции сигнала, передаваемого каждым из передатчиков. Явным признаком времени может служить, например, фронт импульса или момент инвертирования фазы передаваемого сигнала. Неявным признаком может служить, например, точное значение гармонической огибающей функции, изменяющейся медленно в сравнении с несущей частотой. Трудность точного определения явного признака времени состоит в следующем. Во-первых, он является одним из видов быстрого изменения сигнала, и, следовательно, спектр сигнала, содержащего этот признак, очень широкий. При передаче по радиочастотному каналу, имеющему, как правило, не слишком широкую полосу, часть исходного спектра не проходит через приемопередающий тракт. Оставшийся сигнал приобретает искажения, вызывающие изменение точного момента определения характерного

признака времени, например, фронт импульса растягивается, а момент переключения фазы сглаживается соответствующим переходным процессом. Во-вторых, если применять, например, корреляционный метод отыскания признака времени, то алгоритм реализации этого метода чрезвычайно усложняется, поскольку зависимость корреляционной функции от ошибки настройки коррелятора существенно не плавная, поэтому производная этой функции по ошибке многократно изменяет знак. Это приводит к тому, что возможны ошибочные настройки на локальные экстремумы корреляционной функции. Трудность точного определения неявного признака связана с несущественным изменением сигнала ошибки настройки при небольшой ошибке, то есть с низкой чувствительностью метода.

Предлагаемое техническое решение направлено на повышение точности измерителя.

Поставленная задача решается тем, что предлагается использовать одновременно два признака времени, один из которых – неявный и служит для робастного (грубого, приближенного) отыскания признака времени и настройки на него, а второй – явный и служит для точного определения признака времени, например, путем настройки фазы собственного (гетеродинного) генератора на этот признак времени. С этой целью в устройство введены

генераторы гладкой модуляции и генераторы признаков времени на входах каждого передатчика. Также между выходом каждого приемника и входом каждого средства

измерения временных интервалов введены параллельно включенные два канала обработки сигналов.

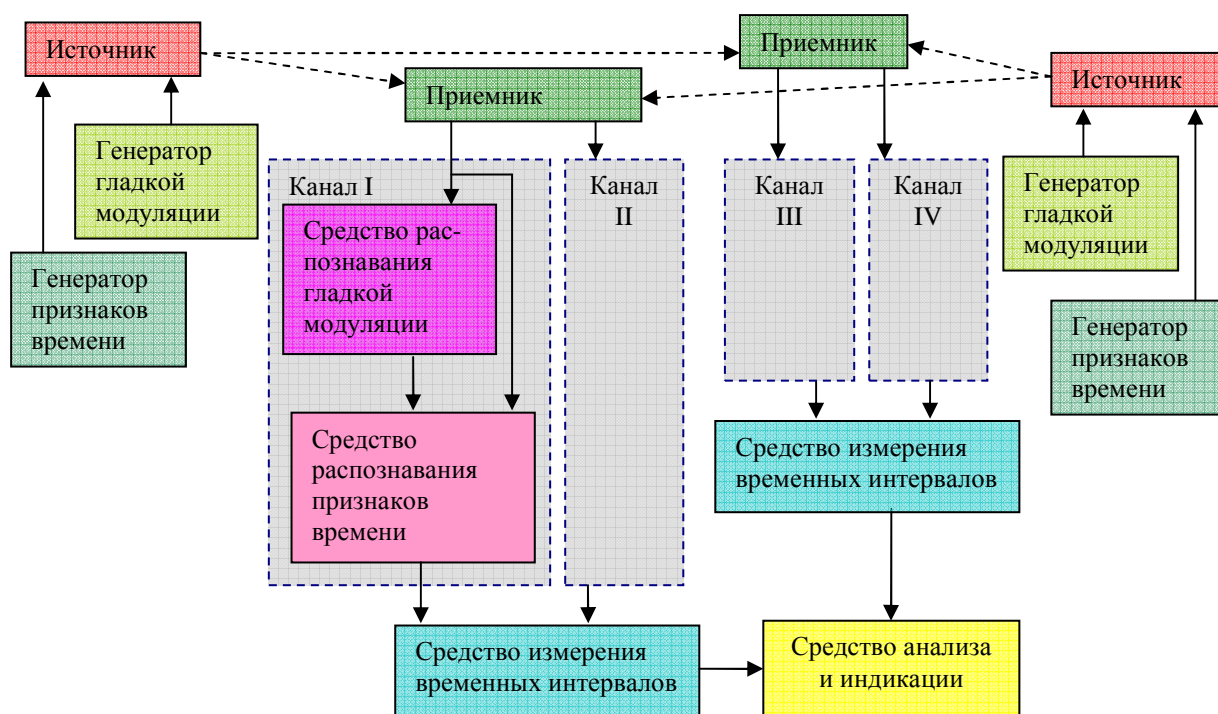


Рис. 14. Схема устройства с использованием двух видов модуляции

Схема этого измерителя приведена на рис. 14.

Источники радиосигналов снабжены двумя генераторами для модуляции передаваемых сигналов: генератором гладкой модулирующей функции и генератором признаков времени. Для возможности различения сигналов приемниками все указанные генераторы формируют сигналы, отличающиеся многими признаками, что должно обеспечить малую их взаимную корреляцию. Каждый из источников, таким образом, излучает сигналы с индивидуальными признаками. Каждый из двух передаваемых сигналов имеет два вида модуляции. Каждая модуляция осуществляется сигналами с выходов соответствующих генераторов. Генератор гладкой модуляции формирует сигнал, осуществляющий гладкую модуляцию. Эта модуляция содержит неявные признаки времени и служит для грубой (предварительной) настройки каналов обработки сигналов. Генератор признаков времени формирует сигналы, содержащие явные признаки времени. Эти сигналы служат для модуляции, которая используется для точного определения моментов поступления признаков времени. Разные виды модуляции могут вводиться путем

их суммирования или любым иным путем, например, одна модуляция может быть амплитудной, а другая – частотной. Каждый из приемников принимает сигнал каждого из источников в форме их смеси (суммы с коэффициентами). Принятые сигналы от каждого источника подаются на два индивидуальных канала обработки. Каждый из каналов обработки сначала путем распознавания гладкой модуляции для грубой, предварительной настройки определяет моменты поступления неявных признаков времени, содержащихся в гладкой модуляции. После этого путем распознавания признаков времени более точно определяет моменты поступления явных признаков времени, вводимых в передаваемые сигналы генераторами признаков времени. Результатом действия каналов обработки сигналов является точное определение моментов поступления явных признаков времени. Сигналы, отмечающие эти моменты, поступают на входы средств измерения временных интервалов, которые определяют разность времени поступления явных признаков времени от различных приемников. Результаты измерений поступают на средство анализа и индикации.

Это средство вычисляет разность этих результатов, которая пропорциональна расстоянию между приемниками, как описано выше.

Наличие в принятых сигналах гладкой модуляции позволяет легко осуществить грубую предварительную настройку, что исключает настройку на локальные экстремумы

и повышает надежность и быстродействие системы. Наличие в принятых сигналах явных признаков времени позволяет осуществлять более точную окончательную настройку, что повышает точность измерения.

Каждый из каналов обработки сигналов может быть, например, выполнен по схеме, показанной на *рис. 15*.

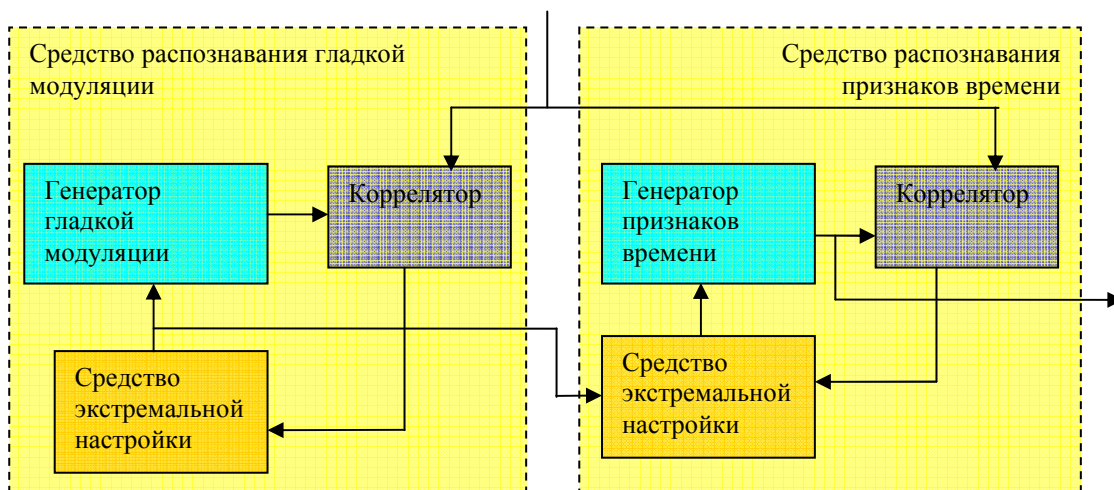


Рис. 15. Структура канала обработки сигналов

Каждый канал содержит средство распознавания гладкой модуляции и средство распознавания признаков времени, причем, входной сигнал каждого из этих каналов поступает на каждое из этих средств, и, кроме того, дополнительный сигнал грубой настройки поступает из средства распознавания гладкой модуляции на вход средства распознавания признаков времени. Этот сигнал позволяет более успешно (быстро и надежно) определять приближенное значение моментов поступления признаков времени.

Например, средство распознавания гладкой модуляции может содержать включенные петли генератор гладкой модуляции, коррелятор и средство экстремальной настройки. Генератор гладкой модуляции полностью идентичен соответствующему генератору, подключенному только к одному из передатчиков. Коррелятор сравнивает сигнал с выхода генератора гладкой модуляции с сигналом, поступающим на другой его вход с выхода приемника. Выходной сигнал корреляции характеризуется гладкой зависимостью от ошибки настройки, производная этого сигнала по ошибке плавно изменяет свою величину и редко изменяет свой знак. Это позволяет средству экстремальной настройки надежно и безошибочно настроить

фазу генератора гладкой модуляции, обеспечив близкое соответствие этой фазы фазе принятого сигнала. Сигнал автоподстройки с выхода средства экстремальной настройки используется средством распознавания признаков времени для предварительной настройки. Средство распознавания признаков времени может работать по такому же принципу и иметь аналогичную структуру, то есть содержать генератор признаков времени, идентичный такому генератору в передатчике, коррелятор и средство экстремальной настройки. Это средство экстремальной настройки использует информацию, поступающую с выхода средства распознавания гладкой модуляции для предварительной настройки генератора признаков времени. Это ускоряет процесс настройки и исключает настройку генератора признаков времени на локальный экстремум, следовательно, повышает точность определения моментов поступления признаков времени.

5. МОДЕЛЬНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ ПРЕДЛОЖЕННОГО МЕТОДА

Эффективность предложенного метода исследована путем моделирования в программе *VisSim*. Результаты моделирования показаны на *рис. 16–20*. Выходной сигнал коррелятора

имитируется конструкцией, содержащей перемножитель сигналов и низкочастотный фильтр на его выходе. Устройство запаздывания позволяет получать произвольный сдвиг фаз перемножаемых сигналов для исследования влияния этого сдвига на выходной сигнал коррелятора. При использовании только гармонического сигнала, как показано на *рис. 16*, изменения установившегося уровня выходного сигнала плавно зависят от относительного сдвига фаз перемножаемых

сигналов. Это позволяет относительно просто организовать поисковую процедуру для отыскания оптимальной настройки численными методами, которая соответствует максимальному значению выходного сигнала коррелятора. Наряду с этим достоинством, такой сигнал обладает существенным недостатком, состоящим в том, что при небольших изменениях величины запаздывания (при небольших ошибках настройки фаз) выходной сигнал коррелятора изменяется незначительно.

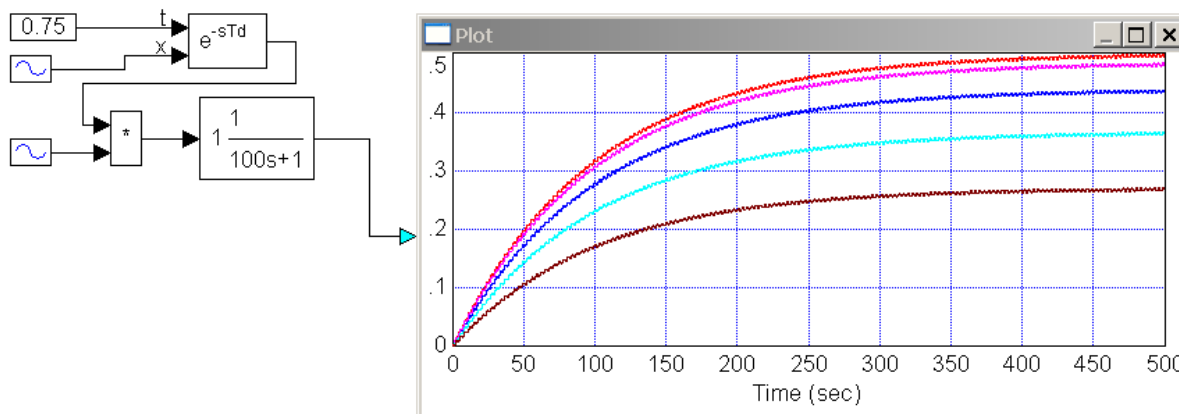


Рис. 16. Монотонная зависимость выходного сигнала коррелятора от запаздывания

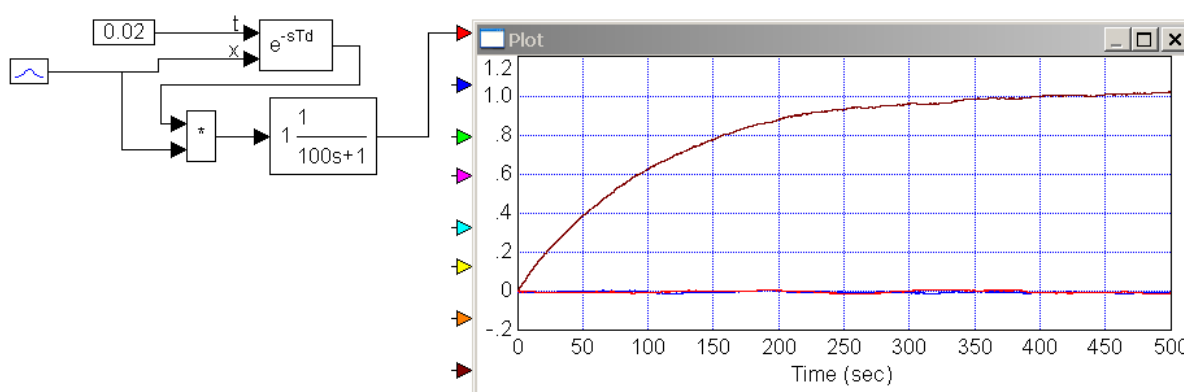


Рис. 17. Немонотонная зависимость выходного сигнала коррелятора от запаздывания

На *рис. 17* приведен пример использования псевдослучайного сигнала с той же целью, с которой ранее применялся генератор гармонического сигнала. Как видно из *рис. 17*, полное совпадение фаз перемножаемых сигналов вызывает резкое возрастание выходного сигнала коррелятора. На *рис. 18* показаны в укрупненном масштабе сигналы при различных значениях запаздывания, то есть при различной величине ошибки настройки фаз. По этим сигналам затруднительно сделать верное заключение о величине и/или знаке фазовой ошибки, поскольку отсутствует явная закономерность между знаком ошибки настройки фазы и знаком выходного сигнала

коррелятора. На *рис. 19* показан пример результата использования суммы двух сигналов, один из которых является псевдослучайным, а другой – гармонический. Результат сочетает оба достоинства и свободен от обоих недостатков, а именно: зависимость выходного сигнала коррелятора от ошибки относительно плавная с экстремумом в точке наиболее точной настройки, причем экстремум выражен весьма существенно, выходной сигнал возрастает в три раза в сравнении с сигналом при неточной настройке (на значение длительности шага интегрирования, установленного в программе моделирования).

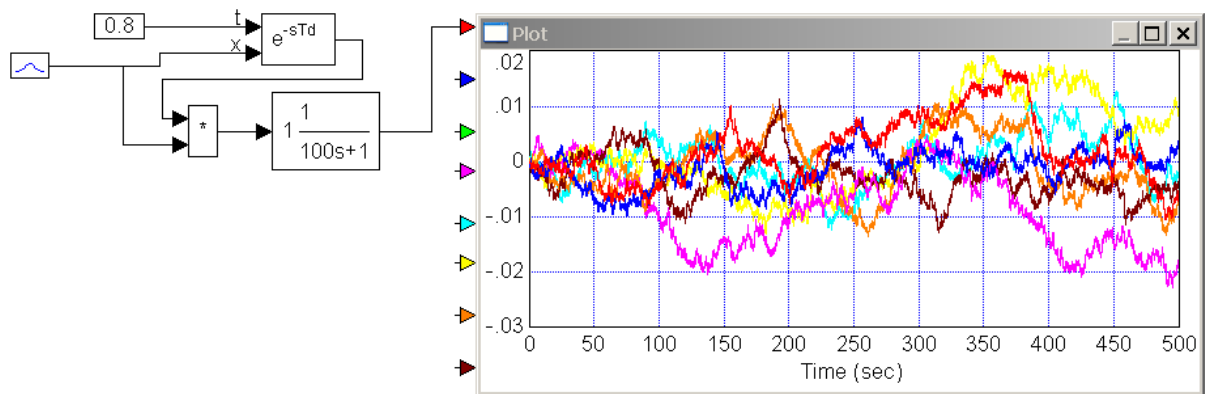


Рис. 18. То же, что на рис. 17, в крупном масштабе

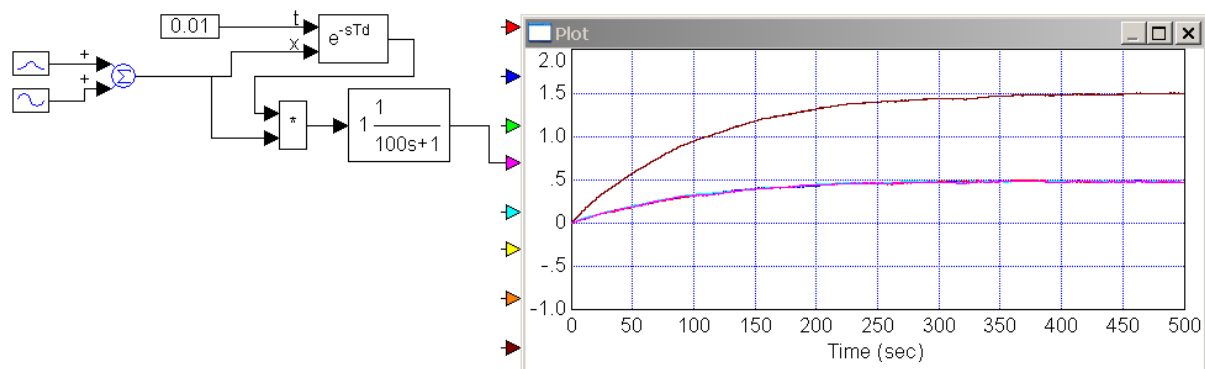


Рис. 19. Получение монотонной зависимости от запаздывания с резким пиком при полном совпадении фаз путем суммирования гармонического и псевдослучайного процессов (модель выходного сигнала коррелятора)

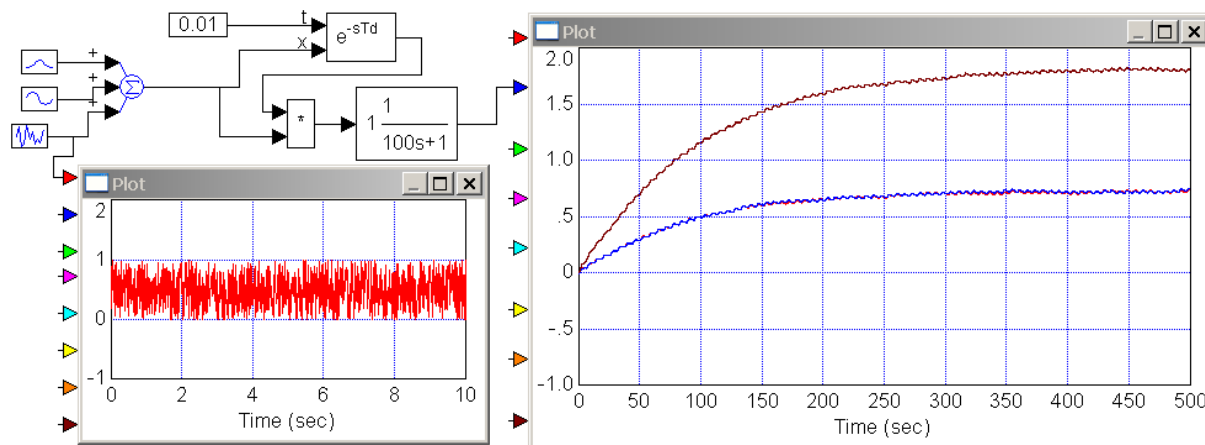


Рис. 20. Использование двух псевдослучайных сигналов и одного гармонического

На рис. 20 показан результат использования суммы двух псевдослучайных сигналов и одного гармонического сигнала. Результат получается аналогичным. На рис. 21 показан характерный вид такой зависимости в осях: ошибка по фазе (ось X, нулевая ошибка соответствует значению 8) – выходной сигнал коррелятора (ось Y).

Отметим отличительные особенности разработки. Все известные радиочастотные

измерители действуют на принципе отражения или рассеяния радиочастотного сигнала от объекта. Недостатком таких измерителей является сложность создания источника узконаправленного излучения и отражателя радиоволн и сложность настройки таких устройств, а также возникновение помех от сторонних объектов, которые невозможно устранить.

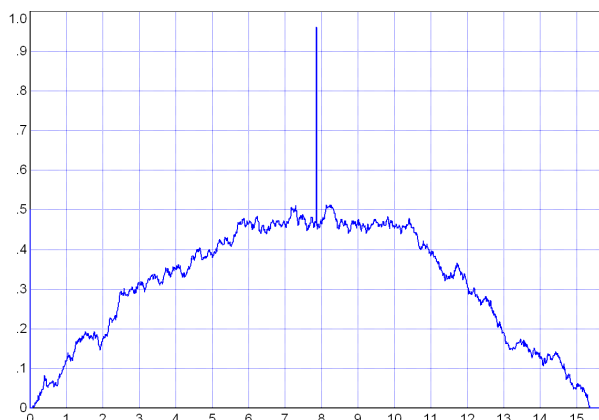


Рис. 21. Зависимость выходного сигнала коррелятора от настройки (условные единицы) фазы

В предложенной системе достигаются следующие преимущества:

1. Не требуется прямая видимость источников и приемников.

2. Не используется отражение или рассеяние сигналов.

3. Понижена зависимость точности от погодных изменений атмосферных характеристик по сравнению с оптическими устройствами.

Сделаем оценку потенциальных отличий по точности указанного метода и альтернативных радиотехнических схем. К ним отнесем устройства с отражением или рассеянием сигналов и устройства на основе космических систем (ГЛОНАСС, GPS). Схема расположения элементов измерительной системы при использовании отражения или рассеяния показана на рис. 22. Основная проблема такой схемы – практическая сложность создания плоского фронта волны методом отражения или рассеяния. Схема применения предложенного измерителя показана на рис. 23, а схема с использованием космических систем показана на рис. 24.

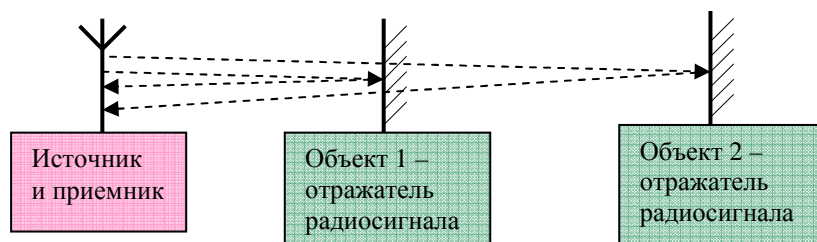


Рис. 22. Схема расположения элементов измерителя при использовании отражения или рассеяния

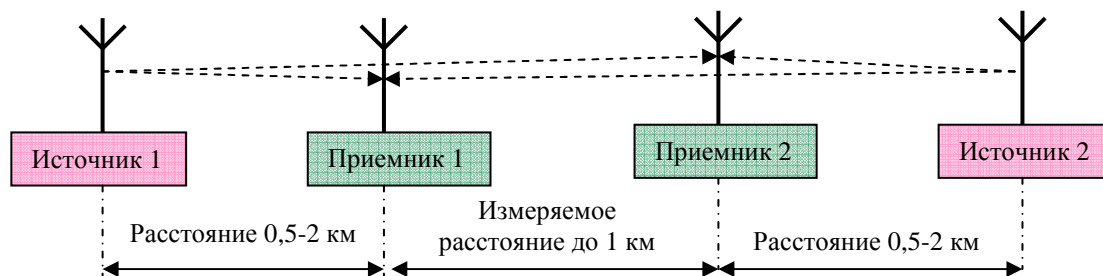


Рис. 23. Схема расположения элементов измерителя

Радиотехнический метод на основе космических систем принципиально характеризуется погрешностью в 30 раз большей. Однако наземные эксперименты с предложенными системами могут служить основой для развития подобной методики измерений с помощью космических систем.

Действительно, если наземными системами измеряются приращения на базе 1 км, то абсолютная погрешность в 1 мм соответствует относительной погрешности 10^{-6} . Если же измерения осуществляются космическими

системами, например, при высоте 20 км, дальность до спутника под углом 45° составляет примерно 30 км, поэтому при той же самой абсолютной погрешности требуется обеспечить относительную погрешность в 30 раз меньше, то есть $0,33 \cdot 10^{-7}$.

Таким образом, обоснование возможности использования этого метода в космических системах состоит в следующем: собственно конкретный измеритель – это система из двух приемников и средства обработки сигналов. Одни и те же сигналы от передатчиков могут

быть использованы для неограниченного количества измерителей. Система не требует «общения», обмена сигналами с передатчиками. Спутник не должен откликаться на запрос

каждой такой измерительной системы, достаточно лишь отправки стандартизованных уникальных сигналов. Такая система теоретически может быть внедрена в космосе.

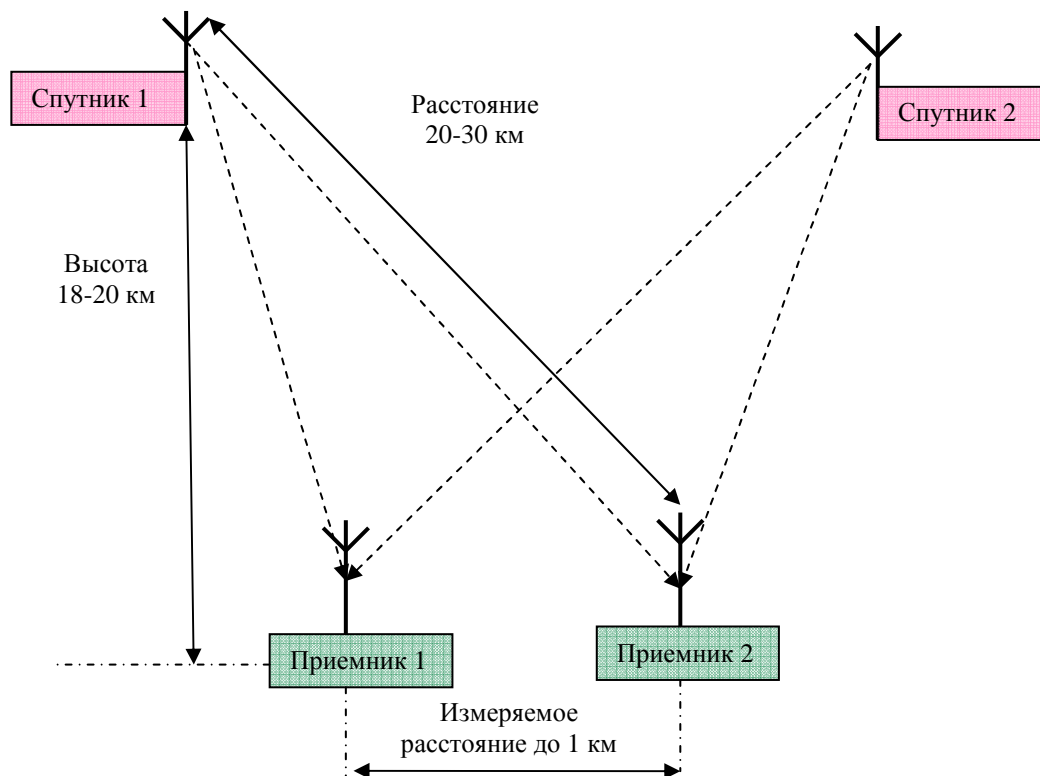


Рис. 24. Схема расположения элементов измерителя в случае использования космических систем

Поэтому разработанную методику измерений можно при необходимости привести в систему ГЛОНАСС, если она докажет высшую точность. При сохранении относительной погрешности такой перенос увеличит абсолютную погрешность в 20-30 раз. Аналогично, если методики, имеющиеся в системе ГЛОНАСС перенести на поверхность, то при сохранении относительной погрешности, абсолютная погрешность может быть снижена в 20-30 раз. Если учесть, что в космической системе имеется существенная неоднородность (плотности и температуры) атмосферы на протяжении трассы измерительных излучений, то отличие может превысить указанные расчетные отличия дополнительно еще в несколько раз.

Основная задача последующих исследований состоит в дальнейшем повышении точности измерений радиотехническим методом.

Таким образом, предложенный метод эффективно решает задачу обеспечения надежной работы средства экстремальной настройки, поскольку обеспечивает

одновременно и плавную зависимость выходного сигнала коррелятора от ошибки настройки и резкое увеличение этого сигнала при настройке с высокой точностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа поддержана грантом по проекту «Исследование предельных точностей оптических методов измерения параметров движения и мехатронных методов управления движением и разработка новых робототехнических и электромеханических систем», Темплан, проект № 7.559.2011 и при поддержке Министерства образования и науки в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., мероприятие 1.2.2, конкурс 630П, ГК № П 761 от 20.05.2010.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] М.И. Мусяков, И.Д. Миценко. Оптико-электронные системы ближней дальнометрии. Москва: Радио и связь. 1991. с.4.
- [2] А.П. Сиверс, Н.А. Сулов, В.И. Метельский. Основы

радиолокации. Ленинград: Судпромгиз. 1959 г. с.9.

[3] Измеритель линейных перемещений, патент на полезную модель № 87252, опубликовано 27.09.2009, Бюл. № 27.



Вадим Жмуд – заведующий кафедрой Автоматики в НГТУ, профессор, доктор технических наук, автор 200 научных статей. Область научных интересов и компетенций – теория автоматического управления, электроника, лазерные системы, оптимизация, измерительная техника.

E-mail: oaonips@bk.ru



Денис Терешкин, аспирант кафедры Автоматики НГТУ, автор 15 научных статей. Область научных интересов и компетенций – теория автоматического управления, лазерная физика, программные системы.

E-mail: todin.dirhle@gmail.com



Александр Ляпидевский, директор ОАО «НИПС», автор более 50 научных статей. Область научных интересов и компетенций – программные системы и средства, инновационные технологии.

E-mail: nips@nips.ru



Антон Захаров, аспирант кафедры Автоматики НГТУ, автор 10 научных статей. Область научных интересов и компетенций – программные системы и средства.

E-mail: zaharov_av@mail.ru