

УДК 621.396.933.2

## **МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ПО ВРЕМЕННЫМ ЗАПАЗДЫВАНИЯМ СИГНАЛОВ В МНОГОПОЗИЦИОННЫХ РАДИОДАЛЬНОМЕРНЫХ АЭРОНАВИГАЦИОННО-ПОСАДОЧНЫХ СИСТЕМАХ**

**Я.В. КОНДРАШОВ, Т.С. ФИАЛКИНА, А.П. РЯБЕЦ**

**Статья представлена доктором технических наук, профессором Логвиным А.И.**

Рассмотрены принципы функционирования радиодальномерных запросно-ответных систем в обеспечении навигационно-посадочных операций воздушных судов (ВС). Предложен прецизионный метод измерения временных запаздываний сигналов для определения местоположения ВС с повышенной точностью.

**Ключевые слова:** управление воздушным движением, бортовое оборудование.

### **Введение**

Задачи навигации, связи и наблюдения в международной гражданской авиации решаются такими системами, как VOR (VHF Omni-directional Radio Range), всенаправленные радиомаяки, радиодальномеры DME (Distance Measuring Equipment), ILS (Instrument Landing System) и вторичные радиолокаторы.

Эти системы стандартизированы документами международной организации гражданской авиации ИКАО для использования во всем мире. Перспективными для внедрения в эксплуатацию являются системы MLS (Microwave Landing System) и DME/P. Высокий уровень безопасности сегодняшней гражданской авиации является результатом надежности этого оборудования и грамотного его использования.

Однако наличие различных систем, используемых на разных этапах полета, не может быть оптимальным решением. Каждая система оказывается бесполезной на определенном этапе, однако увеличивает массу самолета и расходует энергию. Этого не происходит, если применяется объединенная система, использующая одни и те же элементы (передатчики, приемники, антенны) для многих функций и на многих этапах полета. Таким образом, общие масса, объем, потребляемая мощность и стоимость значительно снижаются. С точки зрения надежности, однако, основные элементы должны быть зарезервированы, чтобы предотвратить выход из строя системы при отказе одного элемента. Поэтому объединенная система должна иметь такую же или даже более высокую надежность, чем традиционные системы.

Преимущества объединенной системы выявляются, в частности, там, где международное стандартное оборудование не является обязательным. Это могут быть внутригосударственные линии, а также маршруты вертолетов, выполняющих полеты к нефтяным платформам, расположенным в открытом море, и при других специальных воздушных операциях.

### **Радидальномерная объединенная система навигации, связи и наблюдения**

Оборудование DME является очень перспективным. Его стандартные варианты DME и DME/P предполагается использовать и далее после 2015 г. Однако в большинстве применений его возможности используются лишь в небольшой степени. С помощью введения в формат сигнала дополнительных импульсов, которые закодированы определенной информацией, можно дополнить функции оборудования. Более того, дополнительная информация может быть получена из стандартного сигнала: это азимут и угол места принимаемого на земле запросного сигнала, который индицирует направление на самолет. Все эти дополнительные возможности могут быть достигнуты без потери совместимости со стандартным DME. При этом требования

к форме импульсов и радиочастотному спектру выдерживаются. Некоторые из этих дополнительных функций уже реализованы в оборудовании DLS и DAS.

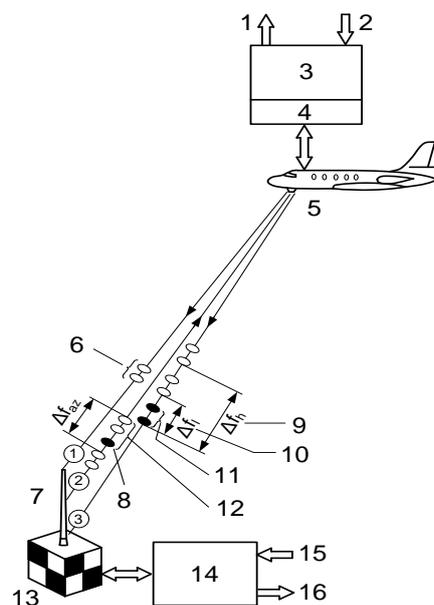
Два предлагаемых варианта объединенной системы навигации, связи и наблюдения (INCS) используют следующие элементы: сканирующий трехканальный DME (STW-DME) и трехпутный трехканальный DME (TTW-DME), представляющие собой усовершенствованные трехканальные DME (TW-DME); селективную линию передачи данных воздух-земля (A/G-SDL); селективную линию передачи данных земля-воздух (G/A-SDL) и радиовещательную линию передачи данных земля-воздух (G/A-BDL).

TW-DME представляет собой расширенный вариант стандартного DME и обеспечивает на борту и на земле информацию о наклонной дальности. Принцип действия TW-DME иллюстрирует рис. 1: 1 – наклонная дальность, азимут; 2 – высота, опознавание; 3 – оборудование трехканального DME и линий передачи данных; 4 – бортовое оборудование DME; 5 – антенна DME; 6 – запросный сигнал DME; 7 – антенна DME; 8 – маркирующий импульс; 9 – высота; 10 – опознавание; 11 – ответ бортовой аппаратуры; 12 – наземный запрос с маркированным ответом DME; 13 – наземный ответчик DME; 14 – оборудование трехканального DME и линии передачи данных; 15 – информация, получаемая на земле (азимут); 16 – опознавание, наклонная дальность, высота.

Бортовое оборудование DME посылает запросы на наземный ответчик (канал 1). Наземный ответчик передает пару ответных импульсов обратно на самолет (канал 2). Таким образом, время прохождения импульса, которое пропорционально наклонной дальности, может быть измерено на борту самолета. Это основная функция стандартного DME. В TW-DME ответная пара импульсов дополняется третьим так называемым маркерным импульсом. Одновременно на земле запускается счетчик времени. Когда бортовое оборудование принимает маркерный импульс, бортовой передатчик передает следующую пару импульсов (канал 3). После приема этой пары импульсов на наземной станции счетчик времени останавливается. Таким образом, на наземной станции получается информация о наклонной дальности. Для того чтобы различить пары импульсов каналов 1 и 3, используются интервалы между импульсами в паре. Ответный сигнал будет обеспечиваться только при стандартном, установленном ICAO интервале между импульсами канала 1, чем достигается совместимость со стандартным DME.

TW-DME использует передатчики, приемники и антенны стандартного бортового и наземного оборудования DME. Дополнительно необходимы только расширенная управляющая логика, счетчик времени и соответствующие периферийные устройства. С целью минимизации габаритов конструкции эти функции должны быть встроены в стандартное бортовое оборудование. Однако при работе с опытным оборудованием или с оборудованием невысокого качества предпочтительнее использовать дополнительные блоки.

Селективная линия передачи данных воздух-земля (A/G-SDL) предназначена для передачи информации от отдельных самолетов в наземный центр управления воздушным движением (УВД). Информация, которая должна быть передана, кодируется с помощью изменения интервала между дополнительными импульсами канала 3. Для кодирования положения пары импульсов используется ответный сигнал бортового ответчика TW-DME в качестве опорной метки времени.



После приема этой пары импульсов

**Рис. 1.** Принцип действия трехканального DME (TW-DME) с линиями передачи данных воздух-земля

Селективная линия передачи данных земля-воздух (G/A-SDL) предназначена для передачи информации из наземного центра УВД на отдельный самолет. По этой линии передается информация об азимуте самолета, рассчитываемая на основании сигнала от усовершенствованного оборудования DME (сканирующий трехканальный DME и трехпутный трехканальный DME). При необходимости объем передаваемой информации может быть расширен. Кодирование информации осуществляется с помощью пары дополнительных импульсов. Информацию об азимуте содержит временная задержка.

Радиовещательная линия передачи данных (G/A-BDL) обеспечивает все самолеты, обслуживаемые данным центром УВД, определенной информацией (направление и скорость ветра в аэропорту, код действующей взлетно-посадочной полосы (ВПП), статус навигационного оборудования, географические координаты наземной станции). Каждый элемент этой информации кодируется специальным словом. При использовании трех импульсов вместо двух эти импульсы могут легко идентифицироваться на самолете как элементы кодирования G/A-BDL. Любая передаваемая информация кодируется по двум направлениям: идентификация и содержание информации. Оба вида кодирования обеспечиваются положением трех импульсов.

Сканирующий трехканальный DME (STW-DME) представляет собой расширенный вариант трехканального DME, обеспечивающий полное определение местоположения самолета. Используется несколько (минимум две) наземных станций трехканального DME, расположенных на расстоянии друг от друга 10 км и более. Бортовое оборудование TW-DME перестраивается с одного частотного канала на другой, выполняя, таким образом, поочередный опрос наземных станций. Принцип действия STW-DME иллюстрирует рис. 2: 1 – первая вспомогательная станция TW-DME; 2 – вторая вспомогательная станция TW-DME; 3 – центральная наземная станция TW-DME; 4 – кабельные линии передачи данных.

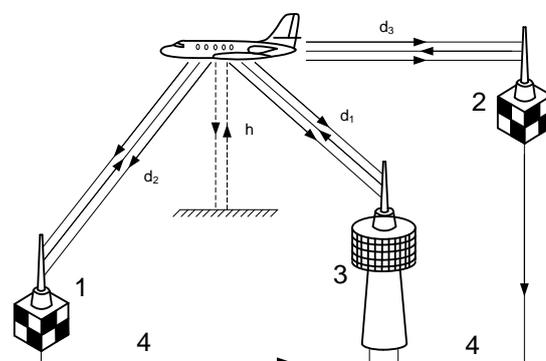


Рис. 2. Принцип действия сканирующего трехканального DME (STW-DME)

На борту замеры наклонной дальности до наземных станций могут быть обработаны бортовым вычислителем или системой оптимизации режимов полета для получения местоположения самолета также, как это осуществляется в известном сканирующем DME. Блок-схема бортового оборудования представлена на рис. 3: 1 – опознавание; 2 – барометрическая высота; 3 – сигналы управления; 4 – наклонные дальности; 5 – азимут; 6 – информация радиовещательной линии; 7 – бортовое оборудование трехканального DME и линии передачи данных; 8 – DME с режимом сканирования; 9 – система оптимизации режимов полета; 10 – индикатор.

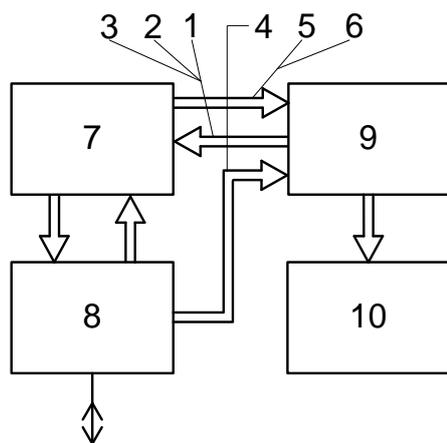


Рис. 3. Блок-схема бортового оборудования объединенной системы INCS

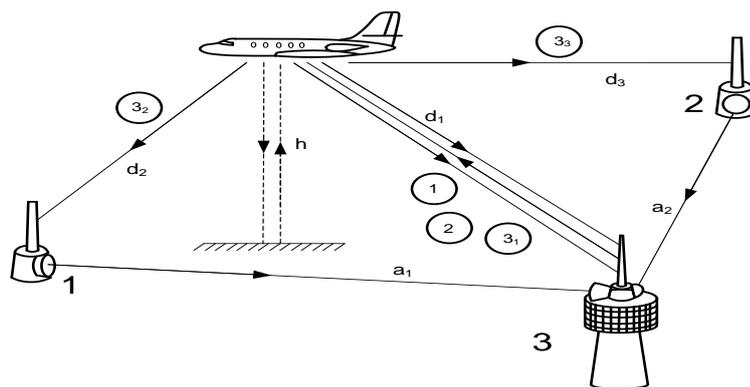
Высота рассчитывается на основании показаний бортового барометрического высотомера. Каждая наземная станция измеряет соответствующую наклонную дальность до самолета. Благодаря тому что в состав STW-DME входит линия передачи данных A/G-DME, на каждой наземной станции имеется информация опознавания самолета и сведения о его барометрической высоте.

Этот комплекс информации может быть передан на центральную станцию по телефонному кабелю. Здесь расчет местоположения самолета может быть выполнен таким же методом, что и на борту. Для STW-DME необходимы минимум две станции. Однако чем больше используется наземных станций,

тем выше точность рассчитываемого местоположения. С другой стороны, очевидно, что увеличение количества наземных станций увеличивает стоимость системы. При использовании только

двух станций необходимо устранять неоднозначность определения местоположения. Это возможно, если приблизительное местоположение известно из другого источника. Кроме того, точность определения местоположения будет мала в точке, близкой к базовой линии (ТТW-DME).

Трехпутный трехканальный DME (ТТW-DME) – другой усовершенствованный вариант ТW-DME предусматривает измерение наклонной дальности на земле из нескольких точек и таким образом обеспечивает полное определение местоположения самолета. Для этого используется только один канал DME. Длина базовой линии между вспомогательной наземной установкой и центральной станцией ограничивается прямой видимостью. Принцип действия ТТW-DME иллюстрирует рис. 4: 1 – первая наземная вспомогательная станция; 2 – вторая наземная вспомогательная станция; 3 – центральная наземная станция.



**Рис. 4.** Принцип действия трехпутного трехканального DME (ТТW-DME)

Самолет и центральная станция связаны между собой через ТW-DME. Каналы обозначены цифрами 1, 2 и 3. Две вспомогательные установки расположены на расстоянии  $a_1$  и  $a_2$  от центральной станции. Основной частью вспомогательных установок являются приемники DME, настроенные на канал 3 ТW-DME. Пара импульсов канала 3 формирует импульсы запуска на вспомогательных станциях. Эти импульсы по широкополосной радиовещательной линии передачи данных передаются на центральную станцию. Измеряется время прохождения импульсов по трем траекториям, определяются наклонные дальности самолета от всех трех наземных станций и рассчитывается его местоположение относительно центральной станции. Высота измеряется на борту и передается на землю по линии А/Г-SDL. Минимальное количество наземных станций – две: центральная и вспомогательная. При наличии трех вспомогательных станций значительно уменьшаются ошибки, обусловленные затенением наземной антенны и многопутностью распространения сигнала. В табл. 1 дается сравнение двух вариантов объединенной системы, включающей вышеописанные элементы.

**Таблица 1**

Характеристики вариантов объединенной системы

Характеристики	Вариант 1	Вариант 2
Состав системы	STW-DME, А/Г-SDL, G/A-BDL	ТТW-DME, А/Г-SDL, G/A-SDL, G/A-BDL
Информация, обеспечиваемая на самолете	Наклонная дальность “самолет – вспомогательная станция”	Азимут относительно центральной станции
	Наклонная дальность “самолет – центральная станция”	
Информация, обеспечиваемая на земле	Информация, передаваемая с земли по радиовещательному каналу	
	Наклонные дальности всех самолетов относительно центральной и вспомогательных наземных станций	Опознавание и барометрическая высота всех самолетов
Точность	Соответствующая точности базового DME	

### Радиодальномерная мобильная (переносная) многопозиционная запросно-ответная система, унифицированная для обеспечения навигационных и посадочных операций легкомоторных воздушных судов

Одним из вариантов навигационного ориентирования ВС в районах, например, на трассах и аэродромах местных воздушных линий (МВЛ), где по тем или иным причинам применение сложного и дорогостоящего стационарного навигационного оборудования нежелательно либо невозможно, является определение местоположения (МП) по методу трех и более дальностей [2], которые измеряются от ВС до малогабаритных (переносных) радиомаяков, расположение (позиции) которых известно, в том числе в координатах ВПП. Такая мобильная радиодальномерная запросно-ответная многопозиционная система посадки (МПСП) легких летательных аппаратов (ЛА) структурированная на основе сигналообразующих технологий DME, описана в [3], где обоснованы ее параметры.

Принцип действия МПСП в режиме посадки ЛА заключается в измерении на борту ЛА дальностей  $D_{1,2,3}$  до маяка-ответчика (МО) и ретрансляторов  $РТ_{1,2}$  с известным их расположением на земле относительно ВПП, и последующем вычислении на борту ЛА его МП представлен на рис. 5:  $РЛ_{1,2,3}$  – радиолинии;  $ХН_{1,2,МО}$  – характеристики направленности компонента наземного оборудования системы. Информация выдается пилоту в аналоговом виде, требуемом для ручного управления ЛА, и/или цифровом – для дальнейшей обработки в устройствах автоматического управления режимами полета [4].

Параметры, характеризующие МПСП: зона действия системы в режиме привода ЛА к ВПП (на высотах до 6000 м) – 75км по дальности и 360° по азимуту, в полете (на высотах более 6000 м) – 240 км (в соответствии с документами ICAO – DO 189).

Для систем такого функционального назначения, в том числе и для МПСП, точности определения МП ВС в режиме посадки в стандартном секторе должны быть достаточны для её выполнения по 1 категории (в соответствии с документами ICAO – RNP 0.02/40).

Индикация пилоту информации об отклонениях ВС от заданных курса и глиссады планирования ( $\Delta K$  и  $\Delta \Gamma$ ) может осуществляться курсовыми и глиссадными планками прибора навигационного планкового (например, ПНП-72-2М), который размещен на ряде ВС (например, Ан-28).

Информация о дальности (D) ВС до ВПП в режиме посадки может индицироваться прибором ИСД-1. Информация о боковом отклонении от оси ВПП (Z), продольном отклонении до торца ВПП (X), отклонениях  $\Delta K$ ,  $\Delta \Gamma$  может быть получена в результате обработки вычислительным устройством, размещаемым на борту ВС, информация о трех наклонных дальностях ( $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ ) до наземных маяков, измеряемых штатным дальномером DME/P [5].

Для вычисления указанных параметров (координат) необходимо использовать вычислительное устройство, обладающее достаточным быстродействием и соответствующим объемом памяти. Дальномер, используемый на ВС, должен обеспечивать вычисление наклонной дальности с минимальными погрешностями [2]. Алгоритм работы системы определяет как структуру размещения маяков-ответчиков, так и состав бортового оборудования.

Погрешность определения местоположения ВС в вертикальной плоскости (на некоторых участках глиссады) в ряде ситуаций неудовлетворительна [3]. Уменьшить погрешность измере-



Рис. 5. Принцип действия МПСП

ния высоты полета ВС в МПСП возможно введением информации о высоте полета ВС, получаемой от штатного баровысотомера (или радиовысотомера – на малых высотах), и её обработкой в вычислительном устройстве.

Для преобразования аналогового сигнала с потенциометрического выхода баровысотомера (ВЭМ-72-3А) в цифровой в бортовое оборудование должно быть введено устройство сопряжения (УС), осуществляющее аналого-цифровое преобразование сигнала.

Управление режимами работы и программами обработки информации бортовой аппаратурой и индикация ее готовности осуществляется пультом управления (ПУ).

Схема структурная бортового оборудования приведена на рис. 6.

В состав бортового оборудования входят: DME/P – радиодальномер; ВУ – вычислительное устройство; ПУ – пульт управления; ИСД – индикатор самолетный дальности; ИСА – индикатор самолетный азимута; ПНП – прибор навигационный планковый; БВ – баровысотомер; РВ – радиовысотомер; УС – устройство сопряжения.

На рис. 6 пунктиром обведена вновь вводимая, дополнительно к штатному, часть бортового оборудования ВС системы МПСП [4].

Блок DME/P [5] предназначен для измерения наклонной дальности между ВС и каждым наземным маяком-ответчиком при программной его перестройке на частоту и временные коды "ведущего" маяка и маяков ретрансляторов. Информация о каждой измеренной дальности выдается в бортовой вычислитель 32-разрядным последовательным биполярным кодом.

Указанный состав и характеристики бортового оборудования представлены в положении автономной работы МПСП.

Для настройки, контроля и испытаний указанного бортового оборудования может применяться наземная автоматизированная система контроля, например, унифицированный эксплуатационно-ремонтный комплекс – УЭРК [6].

### Прецизионный метод измерения временных запаздываний сигналов радиомаяков-ответчиков в разнесенных навигационно-посадочных аэростемах

В современных навигационно-посадочных системах, например, дальномерных, разностно-дальномерных или суммарно-дальномерных, в том числе показанных выше, при измерении временных запаздываний сигналов используются аналоговый старт-стопный метод или метод оцифровки временной шкалы, заполняющей неизвестный временной интервал. В старт-стопном методе временная шкала, заполняющая неизвестный временной интервал, образуется тактовым генератором импульсов с интервалом между ними, равным цене деления шкалы. В методе оцифровки временной шкалы временному интервалу цены деления присваивается текущий номер, который кодируется, и измерение неизвестного временного интервала сводится к сравнению кодов шкалы.

Описанный метод имеет существенный недостаток – ошибку в цену деления шкалы.

Свободным от этого недостатка является прецизионный многопозиционный метод измерения временных запаздываний сигналов, отличающийся от ранее используемых введением своеобразной системы памяти момента совпадения потенциала порога с потенциалом сигнала в начале и в конце временного интервала. Временная диаграмма, поясняющая метод, представлена на рис. 7.

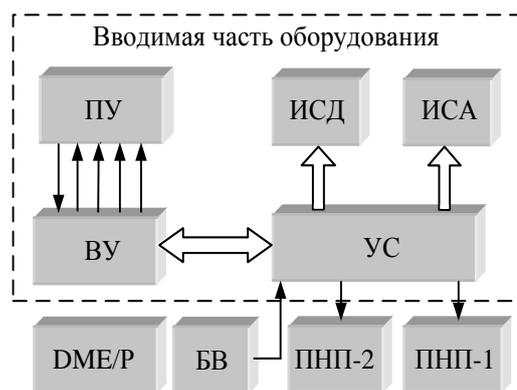


Рис. 6. Схема электрическая структурная бортового оборудования МПСП

Здесь напряжение запросного импульса (ЗИ) в процессе формирования сравнивается с напряжением порога и в момент сравнения фиксируются напряжения двух квадратурных составляющих колебания, определяющих собой вектор  $A$  (позиционную форму), повернутый на угол  $\varphi_1$ . Именно в момент сравнения производится запуск счетчика тактовых интервалов. Пришедший ответный импульс (ОИ) тоже сравнивается с напряжением порога и в этот момент также фиксируется напряжение двух квадратурных составляющих колебания, определяющих собой вектор  $A_1$ , повернутый на угол  $\varphi_2$ . В это же время производится останов счетчика тактовых интервалов. В процессе дальнейшей обработки к количеству тактовых интервалов, уместившихся в интервал  $\tau = t_2 - t_1$ , к подсчитанному количеству интервалов цены деления шкалы  $\tau = \frac{N}{2} \Delta t$  прибавляется временной интервал, равный разности фаз  $\varphi_2 - \varphi_1$ . Таким образом, неизвестному временному интервалу  $\tau^*$  ставится в соответствие известный временной интервал  $\tau = \frac{N}{2} \Delta t + (\varphi_2 - \varphi_1)$ , совпадающий с ним с точностью до разности фаз.

В соответствии с этим методом было разработано устройство. Испытания устройства измерения временных интервалов показали возможность снижения ошибок цены деления шкалы до 20 – 25 см независимо от ее первоначального значения, что более чем на порядок точнее характеристик стандартных дальномеров DME [5].

### Выводы

Применение устройства прецизионного измерения расстояния в уже использующихся измерителях парциальных дальностей в навигационно-посадочных системах позволит при всех прочих равных условиях повысить точность измерения координат ВС практически на порядок.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Объединенная система навигации, связи и наблюдения, выполненная на базе оборудования DME // Journal of Aircraft. – 1986. – V. 23. #5, - P. 406-414.
2. А.с. 1473842. Система определения местоположения самолетов / В.И. Кондрашов, М.Д. Максименко, Б.В. Чижский, А.Г. Шульман; заявл. 03.07.87, опубл. 08.01.89 г.
3. А.с. 1566948. Радиотехническая навигационно-посадочная система с активным запросом-ответом / В.И. Кондрашов, Е.А. Никонов, Б.В. Чижский, А.Г. Шульман; заявл. 21.03.88; 22.01.90.

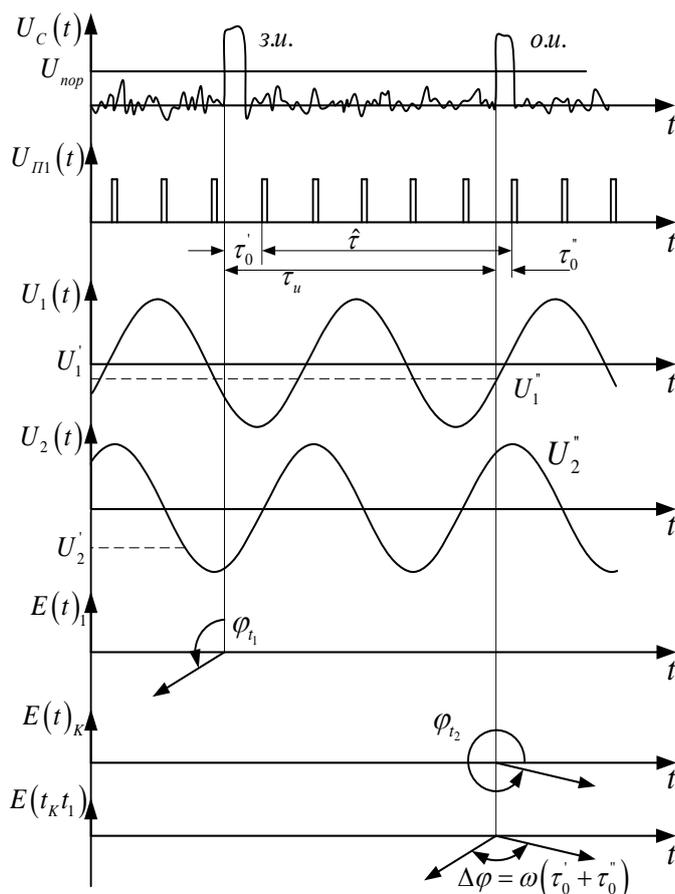


Рис. 7. Временные диаграммы метода измерения дальности: з.и. – запросный импульс; о.и. – ответный импульс

**4. Кондрашов В.И., Кондрашов Я.В.** Принципы и структуры мобильных, локальных, многопозиционных навигационно-посадочных систем наземного базирования // Научный Вестник МГТУ ГА, серия Радиофизика и радиотехника. - 2004. - № 76. - С. 84-92.

**5.** Дальномер ДМЕ/Р. Руководство по технической эксплуатации (1.247.275 РЭ). - Киев: Казенное предприятие «Радиоизмеритель», 1988.

**6. Кондрашов Я.В., Фиалкина Т.С., Фирсанов В.В.** Анализ методов технического обслуживания и ремонта авиационного навигационно-посадочного оборудования // Арсенал-XXI. - 2007. - № 3-4. - С. 29-31.

## **METHODS AND MEANS OF MEASURING THE COORDINATES OF AIRCRAFTS BY TIME DELAY OF SIGNALS IN MULTIPositionING RADIO RANGEFINDING AERONAVIGATION AND LANDING SYSTEMS**

**Kondrashov Ya.V., Fialkina T.S., Ryabets A.P.**

The principles of operation of radio range finding interrogation-reply system to provide navigational and landing operations of aircraft are considered. A precise method of measuring of time delays of signals for determining the location of aircraft with high accuracy is proposed.

**Key words:** ATM - Air Traffic Management, airboard equipment.

### **Сведения об авторах**

**Кондрашов Ярослав Викторович**, 1970 г.р., окончил МАИ (1993), кандидат технических наук, член-корреспондент Аэрокосмической Академии Украины, главный специалист Центра информационных технологий "Инфотех", автор более 100 научных работ, область научных интересов – радиолокация, радионавигация, управление воздушным движением, сигналообразующие технологии.

**Фиалкина Татьяна Станиславовна**, окончила НАУ (г. Киев, Украина) (2008), аспирантка НАУ, автор 15 научных работ, область научных интересов – навигация и управление воздушным движением, авиационные компьютерно-интегрированные комплексы.

**Рябец Александр Петрович**, 1989 г.р., окончил НАУ (г. Киев, Украина) (2011), аспирант НАУ, автор 9 научных работ, область научных интересов – навигация и управление воздушным движением, системы автоматического управления.