

УДК 004. 5

В. Г. Пуятин, В. А. Додонов

Институт проблем регистрации информации НАН Украины
ул. Н. Шпака, 2, 03113 Киев, Украина

Об одной задаче высокоточных траекторных измерений оптическими средствами

Рассмотрены вопросы организации высокоточных траекторных измерений оптическими средствами при полигонных испытаниях образцов радиолокационной техники и методика сбора, регистрации и обработки измерительной информации для оценки точностных характеристик испытываемых образцов радиолокационных станций с использованием воздушных объектов с эталонными отражательными характеристиками.

Ключевые слова: оценка, траектория, измерения, полигон, испытания, обработка, кинотеодолит.

1. Введение

При разработке авиационной, ракетно-космической и радиолокационной техники, включая радиолокационные станции (РЛС) обнаружения и целеуказания, из-за невозможности получения необходимого теоретического описания до 40 % всех возникающих проблем решаются при помощи большого количества разнообразных по сложности и характеру испытаний, в том числе и самые сложные и дорогостоящие — натурные испытания [1–3], по результатам которых вырабатываются ответственные решения о качестве и пригодности разрабатываемых или модернизируемых РЛС.

Исследование функционирования РЛС, испытания и оценка их тактико-технических характеристик (ТТХ) на стадии разработки (или модернизации) представляют сложную научно-техническую задачу, а их результаты используют для принятия решения о продолжении опытно-конструкторских работ, совершенствования аппаратуры и технологии ее изготовления. Одним из основных методов исследования опытных образцов РЛС является метод натурных испытаний, который реализуется в полигонных условиях [4].

Контроль за местоположением летательных объектов (ЛО) или аппаратов (ЛА) в пространстве и параметрами их движения — сфера ответственности полигонных измерительных комплексов, в состав которых входят средства внешнетраекторных измерений (СВТИ). Для измерения параметров движения ЛО (самолетов,

вертолетов, ракет, снарядов) используются радиотехнические, оптические, электронно-оптические и оптико-электронные средства. В последние годы для этой цели также находят применение методы и средства, основанные на использовании систем спутниковой навигации [5].

Для достоверного анализа ТТХ испытываемых образцов РЛС и соответствия реально получаемых ТТХ образцов предъявляемым требованиям необходимо иметь высокоточные траекторные измерения, позволяющие: выявлять отклонения реальной траектории от заданной (эталонной); оценивать эффективность функционирования испытываемых образцов; определять причины, вызвавшие несоответствие технических характеристик предъявляемым требованиям.

Траекторные измерения проводятся для определения эталонных траекторий движения ЛО (ЛА), привлекаемых к испытаниям с целью оценки возможностей и основных тактических характеристик РЛС [3, 4]. Под траекторными измерениями понимают [6] определение параметров движения (например, координат и составляющих вектора скорости) различных объектов (ракет, артиллерийских снарядов, самолетов, космических аппаратов и др.) в атмосфере и космическом пространстве. Траекторные измерения — это процесс измерения первичных параметров положения, движения объекта и обработки полученных данных для определения траектории полета объекта на интервале измерений с прогнозированием, по возможности, его последующего движения на некотором отрезке времени. Отличительной чертой траекторных измерений является исключительно высокая требуемая точность и тесная взаимосвязь процессов измерений и обработки информации.

Целью настоящей статьи является рассмотрение некоторых вопросов организации высокоточных внешнетраекторных измерений с применением оптических средств и методики сбора, регистрации и обработки данных измерений для оценки точностных характеристик РЛС.

Под точностными характеристиками РЛС понимаются средние квадратические отклонения величин измеряемых объектов: азимута α_i , угла места β_i , наклонной дальности D_i , курсового угла K_i и скорости V_i .

2. Анализ публикаций

В статье [5] предлагается способ обработки измерительной информации с использованием результатов относительных измерений оптических траекторных средств, работающих в условиях неопределенности ориентации относительно местных меридиана и горизонта, а также при наличии в измерениях неучтенных постоянных погрешностей или в случае присутствия обоих факторов. В современных условиях при ограниченных затратах средств и времени на организацию измерений предлагаемый в статье способ является весьма актуальным и обеспечивает оптимальный вариант решения задачи по определению движения объекта наблюдения. В работе [7] рассмотрен метод траекторных измерений, использующий совместную обработку измерительной информации, полученной от полигонных СВТИ и специальной бортовой измерительной аппаратуры при натурных испытаниях сложных информационно-управляющих систем на местах их постоянной дислокации. В работе [8] рассмотрены методы уравнивания угловых измере-

ний по способу наименьших квадратов: метод уравнивания угловых измерений отдельно в каждом временном сечении, предполагающий нулевое математическое ожидание случайных ошибок измерений, и метод уравнивания избыточных оптических измерений с подавлением их постоянных систематических ошибок в предположении засоренности измерений как случайными, так и неизвестными по величине и знаку систематическими погрешностями. В работе [9] рассматривается задача измерений параметров движения летательного аппарата оптическими методами и предлагается подход к ее решению, основанный на использовании электронных методов получения и обработки изображений на основе применения концепции виртуальных приборов и систем, который позволяет существенно повысить оперативность обработки результатов измерений и довести ее практически до темпа реального времени. В статье [10] рассмотрен измерительный комплекс, состоящий из двух цифровых теодолитов, оснащенных тепловизионными каналами наблюдения. В работах [11, 12] рассмотрены вопросы повышения точности определения траекторных параметров (положения и движения) любого ЛО путем осуществления последовательной реализации временной (адаптивный алгоритм сглаживания) и пространственной (обобщенный метод) избыточности данных траекторной информации, полученных с несинхронизированных средств измерений (РЛС и кинотеодолитных станций). Поставленная цель достигается путем последовательной реализации пространственной и временной избыточности траекторной информации наземных измерительных средств. В работе [13] рассматривается способ определения движения ЛА по относительным траекторным измерениям с учетом ориентации оптических средств: опорных точек (геодезических вех, звезд), на которые с точки стояния оптического средства с высокой точностью известны их угловые координаты (азимут и угол места). Предлагаемый способ может быть эффективно использован в условиях неопределенной ориентации (или грубой ориентации) траекторных средств относительно меридиана и горизонта, а также при наличии в измерениях неучтенных постоянных погрешностей или в случае присутствия обоих факторов.

3. Основной материал

Цель проведения траекторных измерений заключается в определении параметров движения различных объектов: ракет, артиллеристских снарядов, летательных аппаратов, в том числе беспилотных. Для подобного рода измерений зачастую применяются оптические измерительные средства, интегрированные в комплекс.

Основу траекторных измерительных средств комплекса СВТИ составляют:

— оптические (кинотеодолиты, теодолиты высокоточные и оптоэлектронные теодолитные системы для внешних траекторных измерений; фоторегистрирующие средства), обладающие высокой точностью измерений и применяемые при оценке взлетно-посадочных характеристик самолетов, аппаратуры слепой посадки и т.п.;

— радиотехнические (фазовые пеленгаторы, измерительные радиолокаторы), которые, уступая оптическим средствам по точности измерений, имеют ряд достоинств и, в первую очередь, независимость от метеоусловий.

В настоящее время оптические средства измерений не потеряли своей актуальности и продолжают оставаться, наряду с радиотехническими, электронно-оптическими и оптико-электронными средствами, одними из основных источников получения данных о траекторных параметрах ЛО (ЛА) с высокой точностью, в том числе и на необорудованных трассах. Оптические средства имеют высокую точность, существенно проще и дешевле радиотехнических средств, обладают незначительным потреблением энергии и не имеют проблем с электромагнитной совместимостью, ибо ничего не излучают, кроме того, они позволяют получать визуальное изображение летательного объекта.

Оптические измерения основаны на свойстве прямолинейности распространения света в однородной среде и позволяют определить параметры, характеризующие положение и ориентацию объекта в пространстве. На практике применяют оптические установки двух основных видов: с подвижной оптической частью и узким полем зрения объектива; с неподвижной оптической частью и широким полем зрения объектива. К первому виду оптических установок относятся кинотеодолиты, кинотелескопы и космические секстанты, ко второму — широкоугольные баллистические камеры или фототеодолиты. Кинотеодолиты и кинотелескопы представляют собой углоизмерительные средства, предназначенные для визуального слежения за летательными объектами. В процессе слежения осуществляется непрерывное фотографирование объекта с регистрацией углов азимута ($0 \leq \alpha \leq 360^\circ$) и места ($0 \leq \beta \leq 90^\circ$) оптической оси установки. Кинотелескопы в отличие от кинотеодолитов имеют большее фокусное расстояние объектива. Это позволяет получить на пленке крупномасштабное изображение ЛО (ЛА) и определить не только его угловое положение, но и в ряде случаев также ориентацию его осей относительно принятой системы координат.

Кинотеодолиты имеют ряд положительных свойств: высокую точность измерения углов; возможность получения наглядной картины (в виде фильма) протекающего процесса; возможность выполнения измерений в воздушном пространстве почти без ограничения.

Процесс получения полигонной измерительной информации для оценки точностных характеристик РЛС состоит из последовательности операций измерения, регистрации, преобразования и обработки первичных данных о параметрах испытываемой станции. Специальные измерения, проводимые при полигонных испытаниях РЛС, по своему назначению подразделяют на следующие основные виды: внутриванционные, внешнетраекторные, телеметрические [3].

Внешнетраекторные измерения [1–3] предназначаются для определения: параметров траекторий ЛА и ЛО (координат, вектора скорости, углового положения в пространстве и др.); параметров траекторного движения — координат и вектора скорости центра масс и в некоторых случаях для измерения углового положения ЛА (ЛО) относительно принятой системы координат; параметров траекторного движения летательного объекта или определения относительных траекторий двух или нескольких летательных объектов.

Аппаратура ВТИ, в основном, основана на радиотехническом и оптическом принципах действия и расположена в пределах Земли на стационарных (на суше), корабельных или самолетных измерительных пунктах. Обычно для траекторных измерений применяются оптические и радиотехнические измерительные средств-

ва, устанавливаемые на Земле в одном или нескольких территориально разнесенных пунктах и образующие единый командно-измерительный комплекс. Оптические средства ВТИ представляют собой угломерные средства, предназначенные для визуального слежения за движущимся летательным объектом (аппаратом). Для них характерна высокая точность и наглядность получаемых результатов. Для проведения измерений параметров движения летательного объекта оптическими средствами измерений применяется кинотеодолитный метод, который реализует пеленгационный способ измерений и состоит в том, что с двух (или трех) кинотеодолитных постов (КТП) одновременно ведут слежение за движением одного объекта, фотографируют его и определяют его координаты в функции времени.

Кинотеодолитная станция (КТС) служит для съемки на пленку ЛО в период его полета на заданном участке. Поскольку пространственная ориентация оси объектива кинотеодолита в период слежения за ЛО непрерывно фиксируется, расшифровка киноплёнки со снимками позволяет определить многие параметры траектории полета летательного объекта. На научно-исследовательских испытательных полигонах устанавливается сеть КТС, работу которых синхронизирует служба единого времени. Кинотеодолитные станции служат для более точных измерений параметров движения летательного объекта. Они работают на гораздо меньших дальностях и только в условиях хорошей видимости. Как правило, в КТС входят три поста слежения. Один из них выполняет вспомогательную функцию и может быть использован для контроля определения координат объекта. Кроме того, одновременное слежение с трех КТС позволяет исключить случайные погрешности измерений при засечке объекта под острыми углами, а также при фотографировании против солнца. Для получения параметров траектории ЛО необходима трудоемкая послеполетная обработка данных, зафиксированных на киноплёнке. При этом траектория будет получена, если есть информация не менее чем от двух приборов. Но все это окупается высокой точностью как определения местоположения, так и параметров движения летательного объекта, скорости, ускорений по осям и взаимного положения двух физических тел.

Оптические средства ВТИ обладают высокой точностью, и хотя применение их ограничено метеоусловиями, они широко используются. На практике, высокоточные внешнетраекторные измерения проводятся для определения эталонных траекторий движения ЛА, привлекаемых к испытаниям с целью оценки возможностей и основных тактических характеристик РЛС [3,4]. Под эталонной траекторией понимается траектория объекта, определенная по измерениям оптических средств.

На практике контроль за местоположением летательного объекта в пространстве, параметрами его движения — сфера ответственности полигонного комплекса траекторных измерений. Основа комплекса — траекторные РЛС типа «Кама-Н» и средства оптических измерений. РЛС «Кама-Н» предназначена для измерения текущих координат траекторий летательных объектов (спутников, ракет, снарядов, шаров и так далее) как в составе измерительных комплексов, так и при автономной работе. РЛС «Кама-Н» отслеживает объект на дальностях до 140 км в любых метеоусловиях, но точность измерений невысока. Дальность действия, км: по отраженному сигналу по объекту с эффективной поверхностью рассеивания 1 м^2 , дальность — 50 км. Суммарная среднеквадратическая инструментальная по-

грешность (ошибка) измерения параметров траектории сопровождаемого ЛА: дальность по ответному сигналу — не более 15 метров; дальность по отраженному сигналу — не более 8 метров. Суммарная среднеквадратическая инструментальная погрешность измерения дальности обеспечивается при: радиальной скорости — не более 11000 м/с, радиальном ускорении — не более 300 м/с². Суммарная среднеквадратическая инструментальная погрешность измерения азимута обеспечивается при: скорости изменения азимута — не более 18 град/с, угловом ускорении — 3 град/с². Суммарная среднеквадратическая инструментальная погрешность измерения угла места обеспечивается при: скорости изменения угла места — не более 9 град/с, угловом ускорении — 3 град/с². Достоинством данного способа является возможность определения траектории испытуемого изделия одной станцией, а также выдача результатов в реальном масштабе времени.

Кинотеодолитные станции и скоростные кинотелескопы служат для более точных измерений параметров движения. Они работают на гораздо меньших дальностях и только в условиях хорошей видимости. Для получения данных траектории необходима трудоемкая послеполетная обработка данных, зафиксированных на киноплёнке. При этом траектория будет получена, если есть информация не менее чем от 2-х приборов. Но все это окупается высокой точностью как определения местоположения, так и параметров движения ЛО, скорости, ускорений по осям и взаимного положения двух физических тел. Последнее необходимо при измерении промаха зенитных ракет и ракет класса «воздух-воздух» относительно воздушных мишеней.

Регистрация движения летательных объектов предусматривает, прежде всего, определение параметров их траектории (геометрической траектории, скорости и ускорения в любой точке траектории), относящихся к определенному моменту времени. В полигонных измерениях используются, в основном, наземные средства ВТИ. Оптическая аппаратура для ВТИ, несмотря на очевидный недостаток по сравнению с радиотехнической — невозможность измерений в любое время суток и в любую погоду — широко применяется для целей оценки точностных характеристик РЛС благодаря весьма высокой точности.

Широкое применение на полигонах находят различные оптико-электронные средства: кинотеодолиты, кинотелескопы, кино- и фотоаппараты, астроустановки, электронно-оптические системы. Наиболее распространенным типом аппаратуры, применяемой на полигонах для ВТИ, являются кинотеодолиты [4, 5]. Это объясняется следующими причинами: возможностью выполнения измерений на большом участке траектории полета объекта благодаря отслеживанию в режимах ручного, полуавтоматического или автоматического сопровождения; высокой точностью измерения координат; высокой частотой измерений; использованием кинотеодолитов совместно с радиотехнической измерительной аппаратурой; менее трудоемкой обработкой результатов измерений в сравнении с астрометодом и т.д.

При размещении измерительных пунктов и измерительных средств на траектории измерительной трассы следует руководствоваться следующими соображениями:

— расположение кинотеодолитов должно предусматривать прямую видимость всей зоны взлетно-посадочной полосы (ВПП) для обеспечения траекторных

измерений во время взлетов и посадок летательных аппаратов, когда летательный аппарат летает вдоль ВПП, служащей ему ориентиром;

— кинотеодолиты располагают по обе стороны ВПП (желательно на равных расстояниях) с целью уменьшения методических погрешностей;

— угловые скорости перемещения летательного объекта (аппарата) относительно измерительного пункта не должны превышать допустимых угловых скоростей отслеживания летательного объекта кинотеодолитами или фазовыми пеленгаторами, гарантируемых заводом-изготовителем этих измерительных средств;

— длины измерительной базы (B_{ij}) при реализации пеленгационного метода для достижения возможно высокой точности траекторных измерений должны находиться в соответствующем соотношении с высотами полета летательного объекта (аппарата);

— расстановка оптических измерительных средств должна учитывать положение солнца (против солнца съемку делать нельзя) в часы, когда необходимо их использование.

Работа оптических измерительных средств в значительной мере зависит от оптических характеристик измерительной трассы, тщательности юстировки и фокусировки кинотеодолитов, правильности экспонирования, типа фотоматериала и его фотохимической обработки. При этом следует учитывать, что при определении параметров движения (координат и составляющих вектора скорости) летательного аппарата (объекта наблюдения) все задействованные в работе оптические траекторные средства должны быть обеспечены в геодезическом плане [8]. Имеется в виду, что для каждого оптического средства должны быть определены геодезические координаты (например, широта, долгота и высота) точек их стояния, а также параметры ориентации измерительных осей относительно «своих» местных меридиана и горизонта. Только тогда после измерений может быть проведена совместная их обработка [7] с целью определения параметров движения летательного аппарата (объекта).

Параметры ориентации каждого оптического средства, как правило, определяются регистрацией, так называемых опорных точек (геодезических вех, реперов), на которые с точки стояния оптического средства с высокой точностью известны их угловые координаты (азимут и угол места). Геодезическая веха (bearing picket) — представляет собой шест, раскрашиваемый контрастными полосами определенной длины (для визирования и провешивания линий на местности). Репер (франц. *repère* — метка, знак, исходная точка) в геодезии, знак, закрепляющий точку земной поверхности, высота которой относительно исходной уровенной поверхности определена путем нивелирования. Соответствующая обработка результатов регистрации опорных точек в итоге позволяет оценить параметры ориентации данного оптического средства. Следует отметить, что установка опорных точек типа геодезических вех или реперов и поддержание их в «рабочем» состоянии требует значительных материальных затрат и усилий. Оценка параметров ориентации каждого оптического средства является весьма важной операцией при организации измерений, от которой зависят итоговые оценки точности определения параметров движения летательного аппарата (объекта).

В системах ВТИ с использованием оптических средств измерений применяется пеленгационный метод определения местоположения объекта. На этом мето-

де основаны, например, кинотеодолитные измерения. Пеленгационный метод ВТИ основан на измерении направления линии визирования ЛА (ЛО) двумя средствами, удаленными друг от друга на расстояние, называемое базой; реализуется кинотеодолитами или фазовыми пеленгаторами. Относительно высокая точность измерения траектории кинотеодолитами (порядка нескольких секунд) позволяет отнести их к приборам, которые можно использовать для целей полигонных траекторных измерений. Основным недостатком пеленгационного метода является существенное падение точности измерения угловых координат объекта при его значительном удалении от измерительных средств (на дальности свыше 100 км).

При пеленгационном методе производятся одновременные (синхронные) измерения направлений на объект с двух измерительных кинотеодолитных постов (станций), находящихся на расстоянии B друг от друга, называемом базой. Координаты постов и длина базы B определяются геодезическими методами с необходимой точностью. На каждом из постов измеряются направления по азимуту (β_1 и β_2) и углу места (ε_1 и ε_2). Основными достоинствами пеленгационного метода являются относительно высокая точность при проведении полигонных измерений, простота вторичной обработки результатов и возможность получения результатов в реальном масштабе времени. К общим недостаткам относится необходимость двух постов и координация их работы, зависимость точности от величины углов β и ε , т.е. от расположения объекта относительно базы B .

Как правило, в кинотеодолитную станцию входят три поста слежения (измерения). Один из них выполняет вспомогательную функцию и может быть использован для контроля определения координат объекта. Кроме того, одновременное слежение с трех кинотеодолитных станций позволяет исключить случайные погрешности измерений при засечке объекта под острыми углами, а также при фотографировании против солнца.

Точность определения параметров траектории объекта средствами ВТИ зависит от инструментальной погрешности измерения первичных параметров, методов измерения траектории и от положения летательного объекта относительно измерительных средств. Погрешность измерений координат составляет от одного до нескольких метров, а погрешность измерений скорости — от долей до несколько м/с.

Кинотеодолиты являются основными приборами, реализующими пеленгационный метод измерений. Кинотеодолит предназначен для измерения в заданные моменты времени направлений на движущийся в пространстве объект с целью определения параметров его траектории, причем в процессе измерений производится автоматическая регистрация результатов измерений фотографическим, телевизионным, фотоэлектрическим и другими способами. Кинотеодолит аналогично теодолиту имеет два лимба (азимутальный и угол места), соответствующие направлению визирной оси камеры. Направления β и ε на двух постах должны быть измерены строго одновременно (с допустимой ошибкой). Это требование одновременности относится, прежде всего, к синхронизации измерений основных направлений, т.е. регистрации показаний лимбов, на обоих постах.

При использовании кинотеодолитов необходимо соблюдение следующих условий:

— прямая видимость летательного аппарата с измерительного пункта во всей необходимой зоне полета летательного аппарата;

— перекрытие измерительных зон кинотеодолитами с соседних измерительных пунктов для получения непрерывных измерений траектории летательного аппарата;

— минимум методической погрешности, то есть выбор трассы полета перпендикулярно измерительной базе на таком расстоянии от измерительного пункта, чтобы угловые скорости и ускорения при отслеживании кинотеодолитами летательного объекта (аппарата) не превышали допустимых для кинотеодолита величин.

Для уменьшения влияния атмосферной рефракции кинотеодолиты обычно устанавливаются на башнях высотой ~5 м. Геодезическая привязка точек установки кинотеодолитов проводится с погрешностями, не превышающими 30 см.

Измерение траектории предусматривает решение следующих основных задач:

а) последовательное определение координат летательного аппарата (объекта) в пространстве и построение по ним траектории его полета;

б) определение скорости и ускорения движения летательного аппарата (объекта) на любом участке траектории. Для решения первой задачи моменты регистрации (измерения) направлений на объект не обязательно привязывать к единой системе времени. Важно только, чтобы в заданные моменты времени, соответствующие темпу (частоте) съемки, все кинотеодолиты станции регистрировали направления на объект одновременно.

Для решения второй задачи (определения скорости и ускорения движения объекта на траектории) необходимо точно знать интервалы времени между отдельными моментами регистрации направлений, для чего моменты регистрации направлений должны быть привязаны к единой для данной съемки системе времени.

Кинотеодолитные измерительные комплексы имеют, как правило, автономную службу единого времени, которая кроме функции синхронизации регистрации выполняет функцию управления всем процессом съемки, осуществляющимся автоматически.

3.1. Источники получаемой информации

Исходные данные для программ обработки результатов ВТИ обычно получают от следующих источников:

— протоколов первичной обработки данных оптических измерений, проводимых с помощью кинофототеодолитных постов (например, КФТ10/20, кинотелескопа КТ-50, КТС, высокоточного кинотеодолита «Висмутин», мобильного теодолита «Велюр», кинотеодолита «Вика»);

— формуляров автоматических цифрорпечатающих устройств (АЦПУ), входящих в состав штатной аппаратуры испытываемой РЛС, или формуляров сопровождаемых отметок, полученных со знакового табло (ЗТ) и пульта инженера станции-индикатора кругового обзора (ИКО) с помощью аппаратуры фоторегистрации типа АКС (авиационной кинокамеры АКС-1; АКС-2, АКС-4); СКС (киносъемочных камер скоростных СКС-1М); авиационных фотоаппаратов АФА (аэрофо-

тосъемочных аппаратов АФА-27-Т1 или АФА-27Т-49), устройств (специальных фотоаппаратов) для фотографирования экрана РЛС типа РФК-1, РФК-5, ФАРМ-1; ФАРМ-2; регистрирующей станции ФРС-4 «Редан», ПАУ-70 и др.

Съем измерительной информации для составления протокола первичной обработки данных производится в процессе компараторной обработки киноплёнки от КФТ-постов с помощью компаратора. Отснятая киноплёнка заключает в себе всю основную информацию о движении объекта, записанную автоматически в процессе слежения. На каждом кадре киноплёнки фиксируется условный индекс кинотеодолита, с помощью которого ведется наблюдение, указывается номер кадра для привязки его ко времени, координатная сетка (или перекрестие), определяющая положение оптической оси главного телескопа, изображение объекта и угломерные шкалы с зафиксированными значениями азимута и угла места, определяющими направление оптической оси главного телескопа. Съем информации с компаратора производится с точностью 30" (угловых секунд). Каждый кадр киноплёнки привязывается к системе единого времени (СЕВ). Диапазон измерения параметров: азимута α : 0–180°; угла места β : 10–80°; дальности D : 0–30 км.

Вид протокола первичной обработки данных измерений, полученных от КФТ-постов, приведен в табл. 1.

Таблица 1. Дата: число, месяц, год. Тип цели: самолет, вертолет, ракета, снаряд

| № п/п | Текущее время t_i | Координаты цели от КФТ-1 | | Координаты цели от КФТ-2 | | Координаты цели от КФТ-3 | | Примечание |
|-------|---------------------|--------------------------|-----------|--------------------------|-----------|--------------------------|-----------|------------|
| | | α_1 | β_1 | α_2 | β_2 | α_3 | β_3 | |
| 1 | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |

Из приведенных в табл. 1 трех массивов данных измерений в полигонную ЭВМ на обработку вводятся только два массива, определяемые вручную оператором первичной (компараторной) обработки данных.

В формуляре сопровождаемой РЛС отметки, выдаваемой из АЦПУ РЛС, для обработки используется следующая информация: N_i — номер сопровождаемой отметки; T_i — время выдачи координат; D_i — наклонная дальность; α_i — азимут; β_i — угол места; K_i — курсовой угол; V_i — скорость; F_i — тип цели (самолет/вертолет/ракета/снаряд).

Точность выдаваемых данных не хуже:

по времени — 10 мс;

по наклонной дальности — 0,5 м;

по азимуту — 0,5' (угловых минут);

по углу места — 0,5' (угловых минут);

по скорости — 1 м/с (диапазон 1–1000 м/с); по курсовому углу — 5'–10' (диапазон 0–360 градусов).

Информация, полученная путем фотографирования (фоторегистрации) из ЗТ (ИКО), по точностям и диапазонам изменения выдаваемых координат аналогична информации, выдаваемой на АЦПУ. Вид протокола, заполняемого при фоторегистрации данных из ЗТ (ИКО), приведен в табл. 2.

Таблица 2. Дата: число, месяц, год. Тип цели: самолет, вертолет, ракета, снаряд

| № п/п | Текущее время, t_i | Наклонная дальность, $D_{ци}$ | Азимут, $\alpha_{ци}$ | Угол места, $\beta_{ци}$ | Примечание |
|-------|----------------------|-------------------------------|-----------------------|--------------------------|------------|
| 1 | ... | ... | ... | ... | ... |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... |

3.2. Состав комплекса программ обработки внешнетраекторных измерений и оценки точностных характеристик РЛС

Комплекс программного обеспечения обработки данных внешнетраекторных измерений включает в себя следующие программы:

— программы формирования массивов сопровождаемых отметок, получаемых от КФТ-постов (эталон) и РЛС (испытываемой);

— управляющую программу, обеспечивающую выбор участка траектории для сглаживания, выбор метода сглаживания участка траектории, корректировку массива сопровождаемых отметок от КФТ и РЛС;

— программу пересчета координат сопровождаемых отметок от КФТ-постов в систему координат (геометрическому месту) антенной системы РЛС или центру привязки РЛС;

— программу сглаживания траекторий сопровождаемых отметок от КФТ (или от РЛС) для эталонных траекторий;

— программу оценки точностных характеристик испытываемой РЛС (оценки математического ожидания, дисперсии и среднеквадратической ошибки);

— программу документирования и отображения результатов обработки траекторной измерительной информации с распечаткой результатов в формате, удобном для приложения к протоколам испытаний.

Программа формирования массивов сопровождаемых отметок формирует следующие массивы: массивы первичной обработки данных измерений от КФТ-постов, вводимые в ЭВМ из табл. 1; массивы координат траекторий, сопровождаемых испытываемой РЛС, вводимые в ЭВМ из формуляров АЦПУ и протоколов фоторегистрации знакового табло (из табл. 2).

Максимально возможная длина одного массива, вводимого из табл. 1 и АЦПУ — 1350 строк, а из табл. 2 — 1450 строк (определяется числом кадров в одной киноплёнке КФТ и ФАРМ-2). В программе предусмотрена возможность оперативного вывода массивов данных на АЦПУ в форматах табл. 1 и 2 для контроля правильности записи их в память ЭВМ и последующей корректировки. При необходимости экономии машинного времени ввод массивов данных может производиться с магнитной ленты.

3.3. Пересчет координат КФТ-постов к центру антенной системы РЛС

Для пересчета координат объектов, полученных от КФТ-постов, в систему координат антенной системы РЛС в качестве исходной информации используются массивы первичной обработки измерений от КФТ-постов, сформированные программой формирования массивов сопровождаемых отметок, и следующие значения координат взаимной привязки на местности КФТ-постов и геометрического центра антенной системы РЛС (см. рисунок).

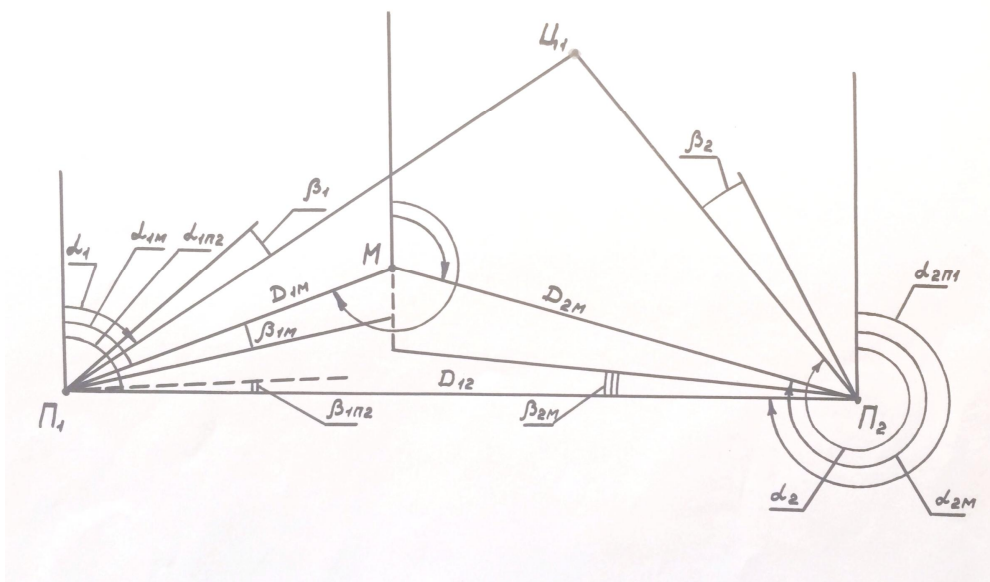


Схема привязки на местности КФТ-постов
и геометрического центра антенной системы РЛС

На рисунке приняты следующие обозначения:

$\alpha_{1П2}$ — азимут поста КФТ-2 относительно поста КФТ-1;

$\alpha_{2П1}$ — азимут поста КФТ-1 относительно поста КФТ-2;

$\alpha_{1М}$ — азимут центра антенной системы РЛС относительно поста КФТ-1;

$\alpha_{2М}$ — азимут центра антенной системы РЛС относительно поста КФТ-2;

v — наклонная дальность между постами КФТ-1 и КФТ-2;

a — наклонная дальность между центром антенной системы РЛС и постом КФТ-1;

c — наклонная дальность между центром антенной системы и постом КФТ-2;

h_1 — высота центра антенной системы РЛС относительно поста КФТ-1 (разность высот над уровнем моря);

h_2 — высота центра антенной системы РЛС относительно поста КФТ-2 (разность высот над уровнем моря).

В программе реализованы следующие соотношения:

$$c' = \sqrt{c^2 - h_1^2},$$

$$a' = \sqrt{a^2 - (h_2 - h_1)^2},$$

$$v' = \sqrt{v^2 - h_2^2},$$

$$\gamma_1 = \alpha_{2П1} - \alpha_1 + 180^\circ,$$

$$\gamma_1 = \alpha_{1П2} - \alpha_1,$$

$$\gamma_2 = \alpha_2 - \alpha_{2П1},$$

$$\gamma_2 = \alpha_2 - \alpha_{1П2} + 180^\circ,$$

$$\begin{aligned}
 \gamma_3 &= 180^\circ - (\gamma_1 + \gamma_2), \\
 \gamma_4 &= \alpha_{1m} - \alpha_1, \\
 \chi &= \frac{\alpha' \cdot \sin \gamma_2}{\sin \gamma_3}, \\
 \nu &= \frac{\alpha' \cdot \sin \gamma_1}{\sin \gamma_3}, \\
 \chi_5 &= 90^\circ - \frac{1}{2} \gamma_4 - \operatorname{arctg} \left(\frac{\chi - c'}{\chi + c'} \operatorname{ctg} \frac{\gamma_4}{2} \right), \\
 z &= \frac{c' \sin \gamma_4}{\sin \gamma_5}, \\
 \gamma_6 &= 180^\circ - (\gamma_4 + \gamma_5), \\
 \gamma_m &= \gamma_6 + \alpha_{1m} - 180^\circ, \\
 H_m &= \chi \cdot \operatorname{tg} \beta_1 - h_1, \\
 H_m &= \nu \cdot \operatorname{tg} \beta_2 - h_2, \\
 \beta_m &= \operatorname{arctg} \frac{H_m}{Z}, \\
 D_m &= \sqrt{Z^2 + H_m}.
 \end{aligned}$$

При необходимости перехода от системы координат с привязкой к геометрическому центру антенной системы РЛС к системе координат РЛС (если эти центры не будут совпадать) производится пересчет координат с помощью следующих выражений:

а) переход от полярных к прямоугольным координатам:

$$Z = D_m \sin \beta_m,$$

$$\chi = D_m \cos \beta_m,$$

$$\nu = D_m \cos \beta_m \sin \alpha_m;$$

б) поворот осей относительно вертикальной оси z на угол $\Delta\alpha$:

$$Z' = Z,$$

$$\chi' = D_m \cos \beta_m \cos(\alpha_m + \Delta\alpha),$$

$$\nu' = D_m \cos \beta_m \sin(\alpha_m + \Delta\alpha);$$

в) параллельный перенос осей, где $\Delta z, \Delta\chi, \Delta\nu$ — координаты нового начала в старых координатах:

$$Z'' = Z' - \Delta Z,$$

$$\chi'' = \chi' - \Delta\chi,$$

$$\nu'' = \nu' - \Delta\nu;$$

г) переход от прямоугольных к полярным координатам:

$$D'_m = \sqrt{(\chi'')^2 + (\nu'')^2 + (z'')^2},$$

$$\alpha'_m = \operatorname{arctg} \frac{\nu''}{\chi''},$$

$$\beta'_m = \operatorname{arctg} \frac{z''}{\sqrt{(\chi'')^2 + (\nu'')^2}}.$$

Координаты взаимной привязки КФТ-постов и центра антенной системы РЛС определяется [14] после установки и геодезической привязки КФТ-постов (топопривязки).

Выходной информацией программы является таблица пересчета угловых координат объекта (отметки) от постов КФТ-1 и КФТ-2 в систему координат РЛС (табл. 3).

Таблица 3. Дата: число, месяц, год. Тип цели: самолет, вертолет, ракета, снаряд

| № п/п | Текущее время, $t_{изм}$ | КФТ-1 | | КФТ-2 | | Координаты относительно целей РЛС | | | Примечание |
|-------|--------------------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------------------------|----------------|---------------|------------|
| | | $\alpha_{1изм}$ | $\beta_{1изм}$ | $\alpha_{2изм}$ | $\beta_{2изм}$ | $D_{изм}$ | $\alpha_{изм}$ | $\beta_{изм}$ | |
| 1 | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |

Табл. 3 используется для построения графиков сопровождения объекта КФТ-постами и РЛС (испытываемой), которые являются приложениями к протоколам предварительных и государственных испытаний РЛС.

3.4. Сглаживание координат сопровождаемых отметок

Для сглаживания координат сопровождаемых отметок используется метод наименьших квадратов (МНК), который реализован для двух гипотез — линейной и квадратичной [15].

При сглаживании траекторий сопровождаемых объектов от КФТ-постов или испытываемой РЛС (в случае работы при $D > 30$ км) для определения эталонных траекторий в качестве исходной информации используются следующие массивы данных:

- а) измеренных значений точек траектории от средств ВТИ, пересчитанные к центру координат испытываемой РЛС (табл. 3);
- б) измеренных значений параметров движения от испытываемой РЛС (табл. 2).

Программа сглаживает измеренные кривые а) и б) и строит эталонные траектории по наклонной дальности $D_э$, азимуту $\alpha_э$, углу места $\beta_э$, курсовому углу $K_э$ и скорости $V_э$. Для этого использован МНК [15], для реализации которого применяются линейная и квадратичная гипотезы.

Для проведения сглаживания измеренные значения точек траектории от КФТ (и РЛС при работе без эталона), полученные в полярных координатах, пересчитываются в прямоугольные координаты по формулам, приведенным при описании программы пересчета координат КФТ-постов к центру антенной системы РЛС.

В случае линейной гипотезы сглаживание координат производится по формулам:

$$\begin{aligned}
 T_1 &= \sum_{i=1}^n t_{узм}, & T_2 &= \sum_{i=1}^n t_{узм}^2, \\
 \chi_0 &= \sum_{i=1}^n \chi_{узм}, & \chi_1 &= \sum_{i=1}^n \chi_{узм} t_{узм}, \\
 \beta_\chi &= \frac{\chi_1 n T_2 - \chi_0 T_1 T_2}{n T_2^2 - T_1^2 T_2}, \\
 c_\chi &= \frac{\chi_1 T_1 - \chi_0 T_2}{T_1^2 - n T_2}.
 \end{aligned}$$

Аналогично реализуются формулы для координат y, z и определяются b_y, c_y, c_z .
 В случае квадратичной гипотезы используются следующие формулы:

$$\begin{aligned}
 T_1 &= \sum_{i=1}^n t_{узм}, & T_2 &= \sum_{i=1}^n t_{узм}^2, \\
 T_3 &= \sum_{i=1}^n t_{узм}^3, & T_4 &= \sum_{i=1}^n t_{узм}^4, \\
 \chi_0 &= \sum_{i=1}^n \chi_{узм}, & \chi_1 &= \sum_{i=1}^n \chi_{узм} t_{узм}, \\
 \chi_2 &= \sum_{i=1}^n \chi_{узм} t_{узм}^2, \\
 \alpha_\chi &= \frac{\chi_0 (T_1 T_2 - T_2^2) + \chi_1 (T_1 T_2 - n T_3) + \chi_2 (n T_2 - T_1^2)}{2 T_1 T_2 T_3 + n (T_2 T_4 - T_3^2) - T_2^3 - T_4 T_1^2}, \\
 \beta_\chi &= \frac{\chi_0 (T_2 T_3 - T_1 T_4) + \chi_1 (T_4 n - T_2^2) + \chi_2 (T_1 T_3 - n T_3)}{2 T_1 T_2 T_3 + n (T_2 T_4 - T_3^2) - T_2^3 - T_4 T_1^2}, \\
 c_\chi &= \frac{\chi_0 (T_4 T_2 - T_3^2) + \chi_1 (T_2 T_3 - T_4 T_1) + \chi_2 (T_1 T_3 - T_2^2)}{2 T_1 T_2 T_3 + n (T_2 T_4 - T_3^2) - T_2^3 - T_4 T_1^2},
 \end{aligned}$$

где

$t_{узм}$ — время измерения (время прихода отметки от сопровождаемого объекта);

$\chi_{узм}$ — измеренное (вычисленное) значение траекторной отметки от объекта по координате x .

Аналогично определяются параметры эталонной траектории по координатам y и z : $a_y, b_y, c_y; a_z, b_z, c_z$.

Сглаженная (эталонная) траектория, полученная в прямоугольной (декартовой) системе координат, преобразуется к полярной системе координат по формулам программы пересчета координат.

3.5. Оценка точностных характеристик РЛС

Для оценки точностных характеристик РЛС вычисляются математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение ошибок сопровождения объекта по дальности, углу места, азимуту, курсовому углу и скорости, которые реализуются двумя способами:

— путем сравнения координат сопровождаемой отметки, выдаваемой из РЛС и, принимаемых за истинные (эталонные), координат сопровождения объекта и сглаживания параметров движения объекта от средств ВТИ;

— методом сглаженного графика, когда за истинное значение координат сопровождаемого объекта принимаются средние значения, получаемые путем сглаживания измеренных значений $D_{изм}$, $\alpha_{изм}$, $\beta_{изм}$ (в прямоугольной системе координат), выдаваемые РЛС.

Метод сглаженного графика используется при экспресс-анализе, а также при отсутствии данных от средств ВТИ.

При реализации первого способа математические ожидания и среднеквадратические ошибки параметров вычисляются по формулам:

$$M_D = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta D_i}{n-1}, \quad \sigma_D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta D_i - M_D)^2}{n-1}},$$

$$M_\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta \alpha_i}{n}, \quad \sigma_\alpha = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta \alpha_i - M_\alpha)^2}{n-1}},$$

$$M_\beta = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta \beta_i}{n}, \quad \sigma_\beta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta \beta_i - M_\beta)^2}{n-1}},$$

$$\Delta D_i = D_{цi} - D_{эi}, \quad \Delta \alpha_i = \alpha_{цi} - \alpha_{эi}, \quad \Delta \beta_i = \beta_{цi} - \beta_{эi},$$

где

M_D, M_α, M_β — математическое ожидание ошибок по дальности, азимуту и углу места;

$\sigma_D, \sigma_\alpha, \sigma_\beta$ — среднеквадратические отклонения ошибок измерения дальности, азимута и угла места РЛС;

n — количество отсчетов; $D_{цi}, \alpha_{цi}, \beta_{цi}$ — измеренные значения дальности, азимута и угла места цели на выходе РЛС;

$D_{эi}, \alpha_{эi}, \beta_{эi}$ — истинные (эталонные) значения дальности, азимута и угла места, полученные путем сглаживания данных от средств ВТИ, которые получают путем пересчета прямоугольных координат в полярные по формулам программы сглаживания траекторий сопровождаемых отметок.

Эталонные значения отметок от объекта в прямоугольных координатах вычисляются по формулам:

а) *линейная гипотеза*:

$$x_{эi} = v_x t_i + c_x; \quad y_{эi} = v_y t_i + c_y; \quad z_{эi} = v_z t_i + c_z; \quad (1)$$

б) квадратичная гипотеза:

$$\chi_{zi} = a_{\chi} t_i^2 + c_{\chi i} + c_{\chi}; \quad v_{zi} = a_v t_i^2 + b_{vii} + c_v; \quad z_{zi} = a_z t_i^2 + c_{zii} + c_z. \quad (2)$$

При реализации второго способа (метода сглаженного графика) среднеквадратические ошибки параметров вычисляются по формулам:

$$\sigma_D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta D_i)^2}{n-1}}; \quad \sigma_{\alpha} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta \alpha_i)^2}{n-1}}; \quad \sigma_{\beta} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta \beta_i)^2}{n-1}};$$

$$\Delta D_i = D_{\psi i} - D_{\varepsilon i}; \quad \Delta \alpha_i = \alpha_{\psi i} - \alpha_{\varepsilon i}; \quad \Delta \beta_i = \beta_{\psi i} - \beta_{\varepsilon i},$$

где n — количество отсчетов;

$D_{\psi i}, \alpha_{\psi i}, \beta_{\psi i}$ — измеренные значения дальности, азимута и угла места сопровождаемого объекта на выходе РЛС;

$D_{\varepsilon i}, \alpha_{\varepsilon i}, \beta_{\varepsilon i}$ — истинные (эталонные) значения дальности, азимута и угла места, полученные методом сглаженного графика по формулам (1) и (2).

3.6. Документирование и отображение данных

Программа отображения результатов обработки и документирования данных выдает выходную информацию в виде табл. 3–5.

Таблица 4. Дата: число, месяц, год. Тип цели: самолет, вертолет, ракета, снаряд

| № п/п | Текущее время t_i | Дальность измерения $D_{\psi i}$ | Дальность истинная $D_{\varepsilon i}$ | Азимут измеренный $\alpha_{\psi i}$ | Азимут истинный $\alpha_{\varepsilon i}$ | Угол места измеренный $\beta_{\psi i}$ | Угол места истинный $\beta_{\varepsilon i}$ | Примечание |
|-------|---------------------|----------------------------------|--|-------------------------------------|--|--|---|------------|
| 1 | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |

$$M_D = \quad M_{\alpha} = \quad M_{\beta} =$$

$$\sigma_D = \quad \sigma_{\alpha} = \quad \sigma_{\beta} =$$

Таблица 5. Дата: число, месяц, год. Тип цели: самолет, вертолет, ракета, снаряд

| № п/п | Текущее время t_i | Дальность измерения $D_{\psi i}$ | СКО ΔD_i | Азимут истинный $\alpha_{\varepsilon i}$ | СКО $\Delta \alpha_i$ | Угол места истинный $\beta_{\varepsilon i}$ | СКО $\Delta \beta_i$ | Примечание |
|-------|---------------------|----------------------------------|------------------|--|-----------------------|---|----------------------|------------|
| 1 | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |

$$M_D = \quad M_{\alpha} = \quad M_{\beta} =$$

$$\sigma_D = \quad \sigma_{\alpha} = \quad \sigma_{\beta} =$$

Табл. 4 используется для построения графиков сопровождения объектов и построения измеренных и истинных траекторий. Графики сопровождения объектов используются как приложения для протоколов испытаний РЛС.

Точность данных, выдаваемых в табл. 3–5, не ниже: по времени — 0,01 с; по дальности — 0,5 м; по азимуту — 0,5' (угловых минут); по углу места — 0,5' (угловых минут).

Диапазон изменения выдаваемых параметров: по времени — 0–24 час; по дальности — 0–300 км; по азимуту — 0–180°; по углу места — 10–80°.

Выводы

Методика отражает процесс сбора, регистрации и обработки данных, получаемых от полигонных оптических средств ВТИ, и оценки точностных характеристик РЛС по следующим параметрам: дальности обнаружения D , азимуту α , углу места β , курсовому углу K и скорости V . По значениям углов азимута и места, сглаженным с помощью МНК, и при известной базе B (расстоянию между кинотеодолитами) могут быть рассчитаны значения координат $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$. Составляющие скорости движения ЛО по осям координат OX , OY , OZ находятся численным дифференцированием.

Программно-алгоритмическое обеспечение обработки измерительных данных может эксплуатироваться как в условиях информационно-вычислительного центра лабораторно-испытательной базы полигона, так и в условиях информационно-вычислительного центра разработчика РЛС.

1. Додонов А.Г., Путятин В.Г., Валетчик В.А. Построение информационно-аналитической системы научно-исследовательского испытательного полигона. *Управляющие системы и машины*. 2006. № 4. С. 3–11.

2. Шаракшанэ А.С. Железнов А.С. Испытания сложных систем. Москва: Высшая школа, 1974. 182 с.

3. Дубас В.Н., Иванов В.А., Путятин В.Г. Полигонные испытания радиолокационных станций слежения на стадии их разработки. Киев: Институт новых физических и прикладных проблем АН Украины., 1993. 132 с.

4. Додонов А.Г., Путятин В.Г. Организация полигонных испытаний сложных организационно-технических систем. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*: зб. наук. праць за матеріалами Щорічної підсумкової наукової конференції (26–27 травня 2015 року, м. Київ). НАН України. Інститут проблем реєстрації інформації; відпов. ред. В.В.Петров. Київ: ІППІ НАН України, 2015. С. 124–127.

5. Волоотов Е.М. Митрофанов И.В. Сравнительный анализ средств траекторных измерений на базе спутниковых навигационных систем, применяемых при испытаниях авиационной техники и вооружения. Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». 2015. Т. 1. С. 338–342.

6. EdwART. Толковый Военно-морской Словарь. 2010. URL: <http://dic.academic.ru/dic>

7. Додонов А.Г., Путятин В.Г., Валетчик В.А. Совместная обработка траекторной измерительной информации при испытаниях сложных информационно-управляющих систем. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*. 2005. 7. № 4. С. 58–65.

8. Додонов А.Г., Путятин В.Г., Валетчик В.А. Обработка оптических измерений траектории летательных объектов. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*. 2004. Т. 6. № 4. С. 38–52.

9. Мацыкин С.В., Осипов В.В., Савилкин С.В. Применение концепции виртуальных систем для решения задач оптических траекторных измерений. *Труды НИИСИ РАН*. 2012. Т. 2. № 2. С. 77–79.

10. Червоный Д.И., Мильштейн А.В., Паслен В.В. Проблемы внешнетраекторных измерений и их решение. Человек и космос – 2010. Матеріали XII науково-технічної конференції молодих учених та студентів. Днепропетровск, 2010.

11. Мотылев К.И., Паслен В.В. Метод повышения точности обработки данных траекторных измерений. III Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь». ИРЭ РАН (26–30 окт. 2009 г.). 2009. С. 712–715.

12. Мотылев К.И., Михайлов М.В., Паслен В.В. Обработка избыточной траекторной информации в измерительно-вычислительных системах. *Информационно-управляющие комплексы и системы*. С. 112–115.

13. Истомина В.В., Королев М.Р., Якушин С.М. Способ определения движения летательного аппарата по относительным траекторным измерениям. ЭНТИ. *Наука и образование*. 2011. № 10.

14. Плотников В.С. Геодезические приборы. Москва: Недра, 1987. 396 с.

15. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. Москва: Физматгиз, 1962. 349 с.

Поступила в редакцию 05.05.2017