

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **036815**

(13) **B1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента
2020.12.23

(21) Номер заявки
201991363

(22) Дата подачи заявки
2019.07.03

(51) Int. Cl. **G01C 21/20** (2006.01)
G01S 19/21 (2006.01)
H04B 17/309 (2006.01)

(54) **СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАКТА ИСКАЖЕНИЯ НАВИГАЦИОННОГО ПОЛЯ И ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОМЕХОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРИЕМНИК РОБОТИЗИРОВАННОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА**

(43) **2020.12.18**

(96) **2019000065 (RU) 2019.07.03**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ
АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ "СЕВЕРО-
КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ" (RU)**

(56) US-A1-20190187295
CN-A-107643088
CN-A-109358344
WO-A1-2019110331
US-B2-10054687
RU-C1-2586076
RU-C1-2671238

(72) Изобретатель:
**Линец Геннадий Иванович, Сагдеев
Константин Мингалеевич, Мельников
Сергей Владимирович, Исаев
Александр Михайлович, Исаев
Михаил Александрович, Миронов
Владимир Александрович (RU)**

(74) Представитель:
Лиховид А.А. (RU)

(57) Изобретение относится к области радионавигации и может быть использовано в комплексах, определяющих параметры движения беззапросным методом, в частности в навигационной аппаратуре потребителей глобальных навигационных спутниковых систем. Изобретение позволит расширить функциональные возможности навигационного приемника за счет определения с высокой достоверностью факта искажения навигационного поля и идентификации видов помехового воздействия без дополнительных аппаратных затрат. Сущность способа заключается в реализации новой методики обработки навигационных параметров, в которой на основании байесовского вероятностного подхода осуществляют обучение навигационного приемника достоверно оценивать текущее состояния навигационного поля по полученным координатам местоопределения РБЛА, а на основании критерия максимума апостериорной плотности вероятности определяют факт искажения навигационного поля и идентифицируют вид помехового воздействия путем сравнения текущих достоверных погрешностей местоопределения с пороговыми значениями, полученными с использованием дополнительных информационных параметров, извлекаемых из навигационного приемника.

036815 B1

036815 B1

Изобретение создано при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках ФЦП ИР 2014-2020, контракт от 20 декабря 2018 №075-02-2018-1907 (RFMEFI57818X0222).

Область техники

Предлагаемый способ относится к области радионавигации и может быть использован в комплексах, определяющих параметры движения беззапросным методом, в частности в навигационной аппаратуре потребителей глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС).

Его использование в навигационных приемниках позволит с высокой достоверностью определять факт искажения навигационного поля и идентифицировать виды помехового воздействия, что позволит повысить точность и достоверность определения параметров движения роботизированных беспилотных летательных аппаратов (РБЛА), будет способствовать созданию эффективных способов автономного управления РБЛА в условиях воздействия естественных и преднамеренных помех.

Уровень техники

Для РБЛА процедура определения навигационных параметров по сигналам ГНСС должна производиться с высокой степенью достоверности, которая может значительно снижаться под воздействием естественных или преднамеренных помех. По этой причине измеренные оценки навигационных параметров РБЛА будут значительно отличаться от своих истинных значений. Особенно опасны случаи, когда величина ошибки измеренных навигационных параметров превышает допустимые значения. Они могут рассматриваться как факты искажения или подавления (нарушения целостности) навигационного поля (НП). О возникновении таких фактов система управления РБЛА должна быть оперативно оповещена, причем до момента времени очередного обновления навигационных параметров, т.е. осуществляться в режиме реального времени.

Для повышения достоверности принимаемых навигационных параметров, разработаны системы контроля целостности НП, реализуемые различными методами, которые основаны на измерительной избыточности путем использования дополнительных источников измерений, получивших название функциональные дополнения.

Известны следующие методы контроля целостности НП:

внешний глобальный контроль целостности, реализуемый с помощью наземной подсистемы контроля и управления ГНСС, представляющей потребителям космические функциональные дополнения (SBAS);

внешний индивидуальный контроль на основе локальной дифференциальной коррекции, реализуемый с помощью опорной станции, имеющей контрольный навигационный приемник и канал связи с РБЛА, и представляющей потребителям наземные функциональные дополнения;

автономный контроль целостности, представляющий потребителям автономные функциональные дополнения только с помощью собственных средств, расположенных на борту РБЛА.

Первые два неавтономных метода контроля целостности НП ГНСС не приемлемы для РБЛА, поскольку они обладают рядом существенных недостатков, основными из которых являются низкая помехозащищенность;

значительные массогабаритные показатели;

ограниченный перечень видов обнаруживаемых нарушений целостности НП;

большое время, требуемое для принятия решения.

Автономные функциональные дополнения (ABAS) используют в качестве избыточных данных результаты измерений от других бортовых систем РБЛА таких, как барометрический высотомер, гироскопические датчики, акселерометры, магнитный компас. Для класса малогабаритных РБЛА, управляемых автоматически и реализуемых на базе бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС), данные ABAS являются не эффективными. Это объясняется тем, что используемые в БИНС МЭМС гироскопы и акселерометры (на основе микроэлектромеханических систем), характеризующиеся повышенной шумностью, обладают большой погрешностью измерений и по этой причине не могут обеспечить требуемую достоверность измерений.

Таким образом, существует изобретательская (неочевидная) задача, заключающаяся в разработке способа определения факта искажения навигационного поля и идентификации помехового воздействия на приемник РБЛА. Разрабатываемый способ должен базироваться на использовании дополнительной информации, получаемой в процессе обработки навигационных параметров в вычислителе навигационного приемника (НПР), не предусматривать дополнительных аппаратных затрат ввиду наличия ограничений на массогабаритные показатели РБЛА, т.е. реализовываться программными средствами НПР.

Характеристика аналогов технического решения

Известен способ обнаружения преднамеренных помех навигационной аппаратурой потребителя (НАП) глобальной навигационной спутниковой системы [описание изобретения к патенту РФ № 2671238 от 13.12.2017, МПК G01S 7/36, опубл. 30.10.2018 Бюл. № 31]. Достижимый технический результат - обнаружение преднамеренных помех НАП ГНСС за счет анализа полученных навигационных сигналов с разных источников. Указанный результат достигается за счет того, что в способе обнаружения преднамеренных НАП ГНСС на первой стадии выявляются помеховые сигналы, создаваемые генераторами

ложных навигационных сигналов (ГЛНС) в системе ГНСС. После этого проводится анализ направлений источников принятых сигналов и помех с целью выделения принятых сигналов, пришедших с одного направления и имеющих разные навигационные координаты, причисляя их к помеховым сигналам, пришедшим от ГЛНС. На второй стадии осуществляется анализ амплитуд (уровней) принимаемых сигналов и помех, с целью выделения сигналов, имеющих амплитуды, значительно отличающиеся от расчетной амплитуды полезного сигнала и причисления их к помеховым сигналам, пришедшим от ГЛНС. На третьей стадии проводится анализ содержания навигационных сообщений в принятых сигналах на принадлежность к доверительной группировке навигационных космических аппаратов (НКА) на основе априорных данных о принимаемых сигналах и помехах, выделяя сигналы, имеющие нарушения в структуре и содержании, причисляя их к помеховым сигналам, пришедшим от ГЛНС.

Недостатками данного способа являются

необходимость в наличии сложной антенной системы для определения пространственных направлений на источники принятых сигналов и помех, что не реализуемо в малогабаритных РБЛА;

невозможность обнаружения преднамеренных помех в реальном времени, что актуально для РБЛА, поскольку для анализа содержания навигационных сообщений в принятых сигналах на принадлежность к отечественной группировке НКА требуется неоперативная информация, содержащаяся в альманахах ГНСС;

невозможность идентификации видов помехового воздействия.

Известно устройство и способ контроля целостности в реальном времени спутниковой навигационной системы [описание изобретения к патенту РФ № 2501039 от 10.03.2009, МПК G01S 19/08, опубл. 20.04.2012 Бюл. № 11]. Технический результат способа заключается в решении проблемы оценки целостности спутниковой навигационной системы для событий, приводящих к нарушению целостности с очень низкой вероятностью, не более 10^{-7} .

Для осуществления контроля целостности спутниковой навигационной системы путем определения погрешностей местоположения с очень низкой вероятностью в реальном времени, реализуются следующие этапы: измерения данных, рассчитанных системой; расчета модели распределения погрешностей местоположения; определения статистических параметров, характеризующих модель распределения; моделирования в области вероятностей хвоста распределения вычислительным средством в зависимости от параметров, применяемых в теории экстремальных чисел; сравнения в реальном времени распределения погрешностей определения местоположения с порогом допуска, позволяющим представить индикацию целостности; передачи в реальном времени индикации целостности системы.

Данный способ при, казалось бы, похожем вероятностном подходе к определению целостности спутниковой навигационной системы, не применим для задачи определения факта искажения навигационного поля и идентификации видов помехового воздействия на навигационный приемник, установленный на борту РБЛА. Это вызвано следующими факторами:

наличие сложной системы, состоящей из космических, наземных и автономных функциональных дополнений, что невозможно реализовать в РБЛА, находящемся в режиме автономного полета;

используемый вероятностный подход, предназначен для статистической оценки остаточных погрешностей местоположения очень низкой вероятности, поэтому в способе моделируется только хвост вероятностного распределения, тогда как для определения факта искажения навигационного поля и идентификации видов помехового воздействия необходимо получать полное распределение;

невозможность идентификации видов помехового воздействия.

Характеристика выбранного прототипа

Наиболее близким к заявляемому изобретению по совокупности существенных признаков и сущности технического решения является способ обнаружения преднамеренного воздействия на точностные характеристики спутниковых радионавигационных систем (СРНС) в навигационной аппаратуре потребителя (НАП), установленной на борту движущегося объекта [прототип - описание изобретения к патенту РФ № 2586076 от 29.12.2014, МПК G01S 13/84, опубл. 10.06.2016 Бюл. № 16], состоящий в том, что после фильтрации и отбраковки аномальных выбросов, как в алгоритме автономного контроля целостности приемника (RAIM), производят на заданном временном интервале формирование массива достоверных измерений с последующим расчетом по ним коэффициентов аппроксимирующего полинома. На основании полученных коэффициентов полинома производится экстраполяция измерений на заданный интервал времени. После этого, текущие измерения сравниваются с экстраполированными значениями, и на основании принятого критерия принимается решение о наличии несанкционированного воздействия. При наличии несанкционированного воздействия фиксируется момент времени, на котором это воздействие обнаружено, и при невозможности компенсировать это воздействие, текущее измерение исключается из обработки. При отсутствии несанкционированного воздействия интервал интерполяции сдвигают по времени и повторяют операции по новому массиву достоверных измерений.

Достоинство данного способа (прототипа) заключается в обнаружении такого несанкционированного искажения навигационного сигнала от космических аппаратов глобальной навигационной космической системы, которое не может быть автономно обнаружено алгоритмами контроля достоверности, имеющимися в навигационной аппаратуре высокоточного оружия.

Вместе с тем данный способ, являющийся прототипом, обладает функциональной ограниченностью, поскольку не обладает возможностью по определению достоверности факта искажения навигационного поля и идентификации видов помехового воздействия.

Задача и технический результат изобретения

Изобретательская задача и технический результат заключаются в расширении функциональных возможностей навигационного приемника за счет определения с высокой достоверностью факта искажения навигационного поля и идентификации видов помехового воздействия без дополнительных аппаратных затрат, из-за наличия ограничений на массогабаритные показатели РБЛА.

Указанный технический результат достигается тем, что в известный способ, в котором формируют из вектора состояния потребителя обучающую выборку в виде массива достоверных оценок местоопределения, фильтруют и отбраковывают при наличии их аномальные выбросы, при этом формируют сигнал "Аномалия ГНСС", на основании данных из массива достоверных измерений рассчитывают коэффициенты аппроксимирующего полинома, с помощью коэффициентов которого производят экстраполяцию координаты местоопределения для следующего временного отсчета, текущее измерение координаты сравнивают с экстраполированным значением, при этом получают погрешность местоопределения, выполняют решающее правило для определения факта искажения навигационного поля путем сравнения погрешности местоопределения с вычисленным минимальным пороговым значением для нормального состояния навигационного поля, если это пороговое значение превышено принимают решение о наличии факта искажения, фиксируют этот момент времени и формируют сигнал "Искажение ГНСС", при отсутствии помехового воздействия повторяют операции по новому массиву достоверных измерений, введена совокупность отличительных признаков, с помощью которых после формирования обучающей выборки извлекают из памяти вычислителя навигационного приемника текущие дополнительные параметры, такие как: ошибка времени; геометрический фактор снижения точности по местоположению; отношения сигнал/помеха в измерительных каналах навигационного приемника, затем осуществляют статистическую оценку текущего состояния навигационного поля, для этого с помощью обучающей выборки данных подсчитывают априорную вероятность и рассчитывают выборочное среднее и выборочную среднеквадратичную погрешность местоопределения, которые используют для вычисления функции правдоподобия, с помощью которой определяют доверительную вероятность текущего состояния навигационного поля, при соблюдении условия, что доверительная вероятность больше или равна установленной величины формируют сигнал "Достоверность", в случае наличия факта искажения поля сравнивают текущие отношения сигнал/помеха в измерительных каналах приемника с нормативной величиной, соответствующей нормальному состоянию навигационного поля, выполняют решающее правило для идентификации видов помехового воздействия, для чего сравнивают погрешность местоопределения с пороговыми значениями для типовых состояний искаженного навигационного поля, выполняют решающее правило для идентификации активного спуфинга, принимают решение по установленному критерию о виде помехового воздействия, и формируют сигнал с указанием вида помехи, по окончании процедуры идентификации повторяют все операции по новому массиву достоверных измерений.

Достижение технического результата обеспечивается путем применения новой методики обработки навигационных параметров, при этом на основании байесовского вероятностного подхода осуществляют обучение навигационного приемника достоверно оценивать текущее состояние навигационного поля по полученным координатам местоопределения РБЛА, на основании критерия максимума апостериорной плотности определяют факт искажения поля и идентифицируют вид помехового воздействия путем сравнения текущих достоверных погрешностей местоопределения с пороговыми значениями, полученными с использованием дополнительных параметров, извлекаемых из навигационного приемника.

Таким образом, введение новых существенных признаков является неочевидным изобретательским решением, имеющим технический характер.

Сущность изобретения

Сущность заявляемого способа определения факта искажения навигационного поля и идентификации помехового воздействия на навигационный приемник РБЛА заключается в том, что формируют из вектора состояния потребителя обучающую выборку в виде массива достоверных оценок местоопределения, фильтруют и отбраковывают при наличии их аномальные выбросы, при этом формируют сигнал "Аномалия ГНСС", на основании данных из массива достоверных измерений рассчитывают коэффициенты аппроксимирующего полинома, с помощью коэффициентов которого производят экстраполяцию координаты местоопределения для следующего временного отсчета, текущее измерение координаты сравнивают с экстраполированным значением, при этом получают погрешность местоопределения, выполняют решающее правило для определения факта искажения навигационного поля путем сравнения погрешности местоопределения с вычисленным минимальным пороговым значением для нормального состояния навигационного поля, если это пороговое значение превышено принимают решение о наличии факта искажения, фиксируют этот момент времени и формируют сигнал "Искажение ГНСС", при отсутствии помехового воздействия повторяют операции по новому массиву достоверных измерений, при этом после формирования обучающей выборки извлекают из памяти вычислителя навигационного приемника текущие дополнительные параметры, такие как: ошибка времени; геометрический фактор сниже-

ния точности по местоположению; отношения сигнал/помеха в измерительных каналах навигационного приемника, затем осуществляют статистическую оценку текущего состояния навигационного поля, для этого с помощью обучающей выборки данных подсчитывают априорную вероятность и рассчитывают выборочное среднее и выборочную среднеквадратичную погрешность местоопределения; которые используют для вычисления функции правдоподобия, с помощью которой определяют доверительную вероятность текущего состояния навигационного поля, при соблюдении условия, что доверительная вероятность больше или равна установленной величины формируют сигнал "Достоверность", в случае наличия факта искажения поля сравнивают текущие отношения сигнал/помеха в измерительных каналах приемника с нормативной величиной, соответствующей нормальному состоянию навигационного поля, выполняют решающее правило для идентификации видов помехового воздействия, для чего сравнивают погрешность местоопределения с пороговыми значениями для типовых состояний искаженного навигационного поля, выполняют решающее правило для идентификации активного спуфинга, принимают решение по установленному критерию о виде помехового воздействия, и формируют сигнал с указанием вида помехи, по окончании процедуры идентификации повторяют все операции по новому массиву достоверных измерений.

Краткое описание чертежей

Предполагаемое изобретение поясняется чертежами, изображенными на фиг. 1-6. Данные фигуры помогут лучше понять реализованный в изобретении способ определения факта искажения навигационного поля и идентификации помехового воздействия.

На фиг. 1 показана возможность использовать погрешность местоопределения РБЛА для оценки состояния навигационного поля. На ней также демонстрируется процесс преобразования априорной плотности в апостериорную плотность с помощью функции правдоподобия.

На фиг. 2 представлен пример распределения погрешностей местоопределения РБЛА для так называемого "чистого неба", т.е. нормального состояния навигационного поля. Данные результаты получены при снижении точности местоопределения $P_{dop}=1$, отношениях сигнал/помеха в измерительных каналах - не менее 45 дБм/Гц, ошибки времени $\delta t=1 \dots 2$ нс.

На фиг. 3 представлен пример распределения погрешностей местоопределения РБЛА при нахождении навигационного приемника в незначительно искаженном поле, вызванном эффектом отражения навигационных сигналов и, как следствие, интерференционными замираниями. Данные результаты получены при $P_{dop}=1 \dots 1,5$, отношениях сигнал/помеха в измерительных каналах - 40 ... 33 дБм/Гц, ошибки времени $\delta t=2 \dots 4$ нс.

На фиг. 4 представлен пример распределения погрешностей местоопределения РБЛА при нахождении навигационного приемника в искаженном поле, вызванном ионосферными возмущениями. Данные результаты получены при $P_{dop}=1 \dots 2$, отношениях сигнал/помеха в измерительных каналах - 33 ... 28 дБм/Гц, ошибки времени $\delta t=2 \dots 5$ нс.

На фиг. 5 представлен пример распределения нарастающей погрешности местоопределения РБЛА при приближении навигационного приемника к источнику преднамеренной помехи. Данные результаты получены при $P_{dop}=1 \dots 2$, отношениях сигнал/помеха в измерительных каналах - 45 ... 25 дБм/Гц, ошибки времени $\delta t=2 \dots 6$ нс.

На фиг. 6, а) представлен пример распределения быстро нарастающей погрешности местоопределения РБЛА при резком попадании навигационного приемника в зону энергетического подавления. Данные результаты получены при $P_{dop}=1 \dots 3,5$, отношениях сигнал/помеха в измерительных каналах - 45 ... 10 дБм/Гц, ошибки времени $\delta t=2 \dots 23$ нс.

На фиг. 6, б) представлен пример распределения погрешности местоопределения РБЛА после полного энергетического подавления с последующим восстановлением навигационного поля. Данные результаты получены при $P_{dop}=1 \dots 3,5$, отношениях сигнал/помеха в измерительных каналах - сначала убывающих 45 ... -10 дБм/Гц, а затем возрастающих -10 ... 40 дБм/Гц, ошибки времени δt от 2 до 500 нс и от 500 до 5 нс.

Описание реализации способа

В основе заявляемого способа лежит следующая методика обработки навигационных параметров.

Навигационные сигналы, поступающие на вход НПП совместно с шумами и помехами различного вида, являются случайными величинами, распределенными по нормальному закону. Отсюда полученная в процессе приема радионавигационных сигналов, последовательность оценок погрешностей местоопределения (МО) РБЛА также представляет собой случайное распределение.

В условиях, когда отношения сигнал/помеха ($h=S/J$) на входе НПП превышает предусмотренную интерфейсным контрольным документом ГНСС нормативную величину, равную 45 дБм/Гц, тогда мешающим фактором, влияющим на точность оценки навигационных параметров, является только аддитивный шум на входе НПП. В этом случае средние значения оценок МО приблизительно совпадают с их истинными значениями, а незначительные погрешности попадают в заданный доверительный интервал. Данный факт является признаком, по которому определяется, что НП находится в нормальном (неискаженном) состоянии.

В то же время, при наличии дополнительных преднамеренных или непреднамеренных мешающих воздействий эти средние значения оценок МО оказываются отличными от истинных значений, и превышение их модулями некоторых пороговых значений интерпретируется как факт нарушения целостности НП. При этом выбор пороговых значений должен производиться с учетом необходимости обеспечения требуемого значения доверительной вероятности, а также позволять идентифицировать классы помехового воздействия.

В основу обнаружения несанкционированного воздействия на точностные характеристики космических навигационных систем положен подход, при котором на основании байесовского критерия минимального среднего риска происходит сравнение текущих результатов навигационных измерений с расчетными значениями, полученными экстраполированием некоторого участка, где измерения можно считать достоверными.

Данный подход предусматривает полиномиальную аппроксимацию некоторого массива из N достоверных измерений $R^*=(R^*_1, R^*_2, \dots, R^*_j, \dots, R^*_N)$, которыми являются оценки МО РБЛА, на интервале времени $t \in [t_0, t_a]$ с шагом τ , равным периоду поступления навигационных параметров.

Аппроксимация осуществляется полиномом m -й степени. Практические исследования показали, что для аппроксимации почти любой траектории движения РБЛА достаточно полинома 5 или 6-й степени.

Для расчета коэффициентов аппроксимации формируется матрица Ван-дермонда V размера $N \times (m+1)$, следующего вида:

$$V = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & t_1^2 & \dots & t_1^m \\ 1 & t_2 & t_2^2 & \dots & t_2^m \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & t_N & t_N^2 & \dots & t_N^m \end{bmatrix} \quad (1)$$

В результате для массива оцениваемых координат МО, представленного в виде матрицы-столбца R , получают следующую систему уравнений:

$$V^T \times V \times C = V^T \times R. \quad (2)$$

Тогда вектор C искомых коэффициентов полинома размерности $(m+1) \times 1$ находится решением уравнения:

$$C = (V^T \times V)^{-1} \times V^T \times R. \quad (3)$$

Таким образом, аппроксимирующая функция, совпадающая в $N+1$ точках с распределением достоверных измерений координат МО, имеет вид:

$$F(x) = \sum_{i=0}^m C_i \cdot x^i. \quad (4)$$

Для расчета следующей координаты МО производят процедуру экстраполяции. Подставляя в аппроксимирующей полином значения полученных коэффициентов, а вместо переменной x значения времени, равное $t_3 = t_a + \tau$, получают значение экстраполируемой функции для следующего отсчета координат на заданном временном интервале экстраполяции, т.е.

$$F(t_3) = \sum_{i=0}^m C_i \cdot t_3^i. \quad (5)$$

Если измерения R^* в матрице-столбце R некоррелированы и имеют дисперсию, описываемую вектором σ_R^2 , то корреляционная матрица ошибок коэффициентов полинома будет равна

$$K_C = (V^T \times V)^{-1} \times \sigma_R^2. \quad (6)$$

В результате задача обнаружения несанкционированного воздействия сводится к различению гипотез, т.е. к принятию решения: является ли отклонение оцениваемой координаты МО от расчетной координаты результатом ошибок измерений или имеется аномальное измерение, которое необходимо исключить из обработки.

В анализируемом известном способе [прототипе] в качестве решающего правила выбран байесовский критерий минимального среднего риска. Для применения данного критерия на практике необходимо иметь априорные вероятности появления каждой гипотезы, а также стоимости принятия правильного и ошибочного решений. Поскольку эти величины при решении задачи обнаружения несанкционированного воздействия не известны, то критерий минимального среднего риска сводится к критерию Неймана-Пирса. В результате теряется достоверность принятия решения.

Наиболее сложно обнаружить факт искажения НП, когда отношение сигнал/помеха $h=S/J$ на входе НПР уменьшается незначительно на 10 ... 20 дБм/Гц. Это возможно в двух случаях. Во-первых, при активном навязывании ложных координат МО для увода РБЛА с маршрута полета или принудительной посадки. Во-вторых, в результате помехового влияния среды распространения, которое может происходить из-за возмущений в ионосфере, замираний, вызванных многолучевыми переотражениями от окру-

жающих объектов. В этих случаях точностные характеристики МО будут искажены незначительно, что не позволит их легко обнаружить, поскольку средние значения оценок МО оказываются близкими к истинным значениям. Это накладывает достаточно высокие требования на чувствительность и достоверность алгоритмов обнаружения помехового воздействия.

В заявляемом способе используется байесовский вероятностный подход к решению задачи обнаружения факта искажения НП и идентификации помехового воздействия. При этом переменными, характеризующими состояние НП, являются оценки МО, т.е. пространственные координаты местоположения РБЛА, входящие в вектор состояния потребителя ГНСС.

Данный подход основан на вычислении условной вероятности появления такого события, как текущее состояние D_k НП при условии, что в результате измерений получен конкретный набор значений признаков R^* . В качестве идентификационных признаков выступают оценки МО $R^*=(R^*_1, R^*_2, \dots, R^*_j, \dots, R^*_N)$, при этом учитываются их среднее значение μ_k и σ_k среднеквадратические погрешности (СКП). Поскольку данные признаки являются случайными величинами, возможность появления конкретной реализации случайной величины R^*_j характеризуется вероятностью $P(R^*_j)$.

В свою очередь, НП в процессе полета РБЛА может находиться в одном из s состояний $D=(D_1, D_2, \dots, D_k, \dots, D_s)$. Эти состояния можно разделить на следующие типовые классы:

нормальное (неискаженное) состояние;

аномальное состояние, когда скачкообразно возникают аномально высокие ошибки в оценке МО по отдельным каналам НПП;

незначительно искаженное состояние, приводящее к медленному изменению МО, при этом возможна их оценка с допустимой погрешностью;

активный спуфинг, проявляющийся в подмене координат МО для плавного увода РБЛА с заданного маршрута движения;

энергетическое подавление, при котором отношение сигнал-помеха по всем каналам НПП резко уменьшается до величины, меньшей порога чувствительности - 13 ... 15 дБм/Гц, что приводит к скачкообразному и быстро изменяющемуся изменению МО.

Для вероятностной оценки состояния НП при использовании комплекса признаков по полученной выборке МО воспользуемся формулой Байеса:

$$p(D_k/R_j^*) = \frac{p(D_k) \cdot p(R_j^*/D_k)}{P(R^*)} = \frac{p(D_k) \cdot p(R_j^*/D_k)}{\int_D p(D) \cdot p(R_j^*/D) dD}. \quad (7)$$

где $p(D_k/R_j^*)$ - апостериорная плотность распределения нахождения НП в состоянии D_k при получении комплекса признаков R_j^* , т.е. это величина, которая определяется при использовании вероятностного подхода к решению задачи распознавания классов (в данном случае состояний НП).

Для применения байесовского подхода необходимо иметь $p(R_j^*/D_k)$ априорную плотность распределения случайной величины, заключающейся в появлении конкретной реализации комплекса признаков R_j^* при условии, что НП находится в состоянии D_k . Это плотность распределения, имеющая смысл функции правдоподобия, определяется путем статистической обработки выборки из N оцениваемых местоположений (координат). Поскольку принято считать, что погрешности оценки МО распределены по нормальному закону, то для определения правдоподобия с учетом заданного доверительного интервала (± 2 -сигма) необходимо иметь величины среднего значения μ_k и СКП σ_k вероятностного распределения МО, которые могут быть получены из выборочного среднего и выборочной дисперсии для конкретной реализации комплекса признаков R_j^* .

Таким образом, рассчитанная функция правдоподобия позволяет оценить, насколько правдоподобно получены значения конкретной реализации признаков R_j^* , содержащиеся в выборке из N элементов, при известном априорном состоянии навигационного поля D_k .

С целью обеспечения нормальности распределения объем выборки устанавливаются равной $N \geq 30$. Время формирования выборки такого объема при поступлении навигационных параметров с периодом 0,1 ... 0,5 с, составляет соответственно от 3 до 15 с. Поскольку это достаточно большое время, то такой объем приемлем для РБЛА вертолетного или мультироторного типа, т.к. они имеют техническую возможность зависать в одной точке. Для РБЛА самолетного типа объем выборки уменьшают до $N \leq 20$. В этом случае при определении доверительного интервала используют поправочные коэффициенты Стьюдента.

Появление конкретного состояния D_k НП в определенный момент времени случайно и определяется соответствующей априорной плотностью распределения $p(D_k)$. При этом априорная вероятность $P(D_k)$ определяется путем статистической обработки выборки из N оцениваемых МО, как частота такого события N_k , при котором оцениваемое МО входит в установленный доверительный интервал, соответствующий состоянию НП D_k , т.е. вычисляется как отношение

$$P(D_k) = \frac{N_k}{N}. \quad (8)$$

В знаменателе формулы (7) имеет место $P(R^*)$ априорная вероятность появления конкретной реали-

зации R^* комплекса признаков для всех возможных состояний НП. Данная вероятность носит смысл масштабирующего множителя, который для генеральной выборки равен 1.

Таким образом, применение байесовского подхода позволяет после статистической обработки признаков получить апостериорную плотность распределения возможных значений вероятности нахождения НП в одном из классов его состояний. Действительно, за счет применения формулы Байеса, априорная плотность распределения, установленная до анализа данных из принятой выборки признаков, превращается в апостериорную плотность распределения. Последнее позволяет оценить достоверность попадания состояния НП в зону, относящуюся к какому-либо определенному классу. При этом следует учитывать, что формулу (7) необходимо применять итерационно после поступления каждой новой порции данных. Тогда текущее распределение параметра считается априорным, а с поступлением новых данных получается апостериорное распределение, после чего, оно становится априорным для следующей итерации.

Для получения непосредственно достоверной апостериорной вероятности $P(D_k/R_j^*)$ следует воспользоваться методом максимизации апостериорной плотности, позволяющим найти точку, в которой она имеет максимальное значение. Для этого, прологарифмировав формулу Байеса, получаем

$$\ln(p(D_k/R_j^*)) = \ln(p(D_k)) + \ln(p(R_j^*/D_k)) - \ln(P(R^*)). \quad (9)$$

Тогда задача максимизации выражения (7) по параметру D_k примет вид:

$$L = \ln(p(R_j^*/D_k)) + \ln(p(D_k)) \rightarrow \max. \quad (10)$$

Как видно из выражения (10), данный метод максимизирует логарифмы правдоподобия и априорного распределения вероятности конкретного состояния НП. Второе слагаемое выступает в роли своеобразного регуляризатора машинного обучения, поскольку, чем больше вероятность $P(D_k)$, тем при меньшем объеме выборки можно получить более точное значение достоверной вероятности, и наоборот.

Применим методом максимизации апостериорной плотности для решения задачи обнаружения факта искажения НП. Оценка погрешности текущего МО РБЛА находится из уравнения

$$\Delta R_j^* = R_j^* - F(t_s), \quad (11)$$

где $F(t_s)$ - экстраполированное значение текущей координаты МО.

С учетом того, что погрешности МО распределены по нормальному закону, имеем

$$\begin{aligned} \ln(p(R_j^*/D_k)) &= \ln\left(\frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot \sigma_k^2}} \cdot \exp\left(-\frac{(R_j^* - F(t_s))^2}{2\sigma_k^2}\right)\right) = \\ &= -\frac{1}{2} \ln(2\pi \cdot \sigma_k^2) - \frac{(R_j^* - F(t_s))^2}{2\sigma_k^2}. \end{aligned} \quad (12)$$

Первое слагаемое в формуле (12) является постоянной величиной для текущего распределения, следовательно, максимизация логарифма правдоподобия осуществляется за счет минимизации второго слагаемого. В результате задача максимизации логарифма правдоподобия обучающей выборки сводится к минимизации квадратичной погрешности, то есть

$$(R_j^* - F(t_s))^2 \rightarrow \min.$$

Таким образом, установлено, что чем больше погрешность местоопределения, тем больше функция правдоподобия, указанная на фиг. 1 сплошной линией, уводит максимум апостериорной плотности, изображенной пунктирной линией, от максимума априорной плотности (точка-пунктирная линия). Это означает, что величины погрешностей МО можно использовать для оценки состояния НП, поскольку они существенно возрастают под воздействием помех. В результате между максимумами априорных и апостериорных плотностей появляется существенное различие, позволяющее ввести пороговое значение, по которому можно отнести принадлежность состояния НП к одному из классов.

Следовательно, для принятия решения о наличии факта искажения НП и идентификации видов помехового воздействия необходимо определить пороговые значения. С учетом нормальности распределения оценок МО, опираясь на метод максимального правдоподобия, установим предельную СКП, как удвоенное минимально возможное отклонение для текущего состояния НП. Данное предельное СКП, зависящее от отношения сигнал/помеха h_k на входе НПП, определяется выражением

$$\Delta_k = 2 \cdot Pdop \sqrt{(\delta t \cdot c)^2 + \frac{(c)^2}{2h_k \cdot F^2}}, \quad (13)$$

где $Pdop$ - геометрический фактор снижения точности координаты по местоположению; δt - ошибка времени НПП; F - эффективная (среднеквадратическая) ширина спектра навигационного сигнала; c - скорость света.

На основании анализа статистических данных и результатов практических исследований установлены следующие предельные значения СКП:

$\Delta_1 = 1,5 Pdop$ (метр) - нормальное (неискаженное) состояние НП при $h_s \geq 45$ дБм/Гц (см. фиг. 2, а);

$\Delta_2=5$ Pдор (метр) - незначительно искаженное состояние НП при $h_s=40 \dots 33$ дБм/Гц, вызванное эффектом отражения навигационных сигналов и, как следствие, интерференционными замираниями (см. фиг. 2, б и 3);

$\Delta_3=8$ Pдор (метр) - искаженное состояние НП при $h_s=33 \dots 28$ дБм/Гц, вызванное ионосферными возмущениями (см. фиг. 4);

$\Delta_4=30$ Pдор (метр) - нарастающая преднамеренная помеха при $h_s=28 \dots 15$ дБм/Гц (см. фиг. 5);

$\Delta_5=50$ Pдор (метр) - скачкообразное энергетическое подавление при $h_s=20 \dots 10$ дБм/Гц (см. фиг. 6).

Для построения решающего правила по критерию минимизации СКП воспользуемся следующим неравенством

$$\frac{1}{2} \ln(2\pi \cdot \sigma_k^2) + \frac{(R_j^* - F(t_s))^2}{2\sigma_k^2} \leq \Delta_k. \quad (14)$$

Тогда, согласно этому критерию для обнаружения факта искажения НП необходима проверка неравенства (15), а для идентификации видов помехового воздействия - проверка неравенств (16), т.е.

$$\Delta R_j^* \leq \theta_1 = \sqrt{2\sigma_k^2(\Delta_1 - 0,5 \ln(2\pi\sigma_k^2))}, \quad (15)$$

$$\Delta R_j^* > \theta_k = \sqrt{2\sigma_k^2(\Delta_k - 0,5 \ln(2\pi\sigma_k^2))}, \text{ где } k = \overline{2,5}. \quad (16)$$

Таким образом, если погрешность МО превосходит минимальное пороговое значение θ_1 , то налицо факт искажения НП. Дальнейшее сравнение погрешности МО с другими пороговыми значениями θ_k ($k=2 \dots 5$) позволяют идентифицировать вид помехового воздействия по принадлежности состояния НП к тому или иному классу.

Идентификацию активного спуфинга, когда состояние НП $D_k \in ED_{sp}$, предлагается осуществлять в процессе зависания РБЛА в текущей точке пространства. В этом случае, при наличии дополнительного условия $h_k \geq h_n = 45$ дБм/Гц, т.е. нормального состояния НП, погрешность МО будет непрерывно возрастать, при этом не будет выполняться неравенство (15), но будет выполняться одно из неравенств (16). Такую ситуацию следует идентифицировать как активное навязывание неправильных координат МО.

Математически это условие может быть записано следующим образом:

$$D_k \in D_{sp} \text{ if } h_k \geq h_n \cap \exists k = 2 \dots 5 \text{ } > \sqrt{2\sigma_k^2(\Delta_k - 0,5 \ln(2\pi\sigma_k^2))}. \quad (17)$$

Описание реализации изобретения с примерами конкретного выполнения

Для подтверждения практической реализуемости заявляемого способа представим его подробно в виде совокупности выполняемых в определенной последовательности приемов (операций, действий) с соблюдением определенных правил принятия решений.

Обобщенно способ определения факта искажения НП и идентификации помехового воздействия представляет собой совокупность приемов, алгоритмически объединенных в четыре циклически выполняемых этапа.

- 1) Этап подготовки обрабатываемых признаков НП.
- 2) Этап статистической оценки текущего состояния НП.
- 3) Этап определения факта искажения НП.
- 4) Этап идентификации видов помехового воздействия.

Этап подготовки обрабатываемых признаков НП.

На этом этапе для текущего временного отсчета выполняют следующие приемы (операции, действия):

формируют из вектора состояния потребителя обучающую выборку в виде массива из предыдущих N достоверных координат МО РБЛА

$$\{R_j^o(t_j), j \in [0, N]\}$$

извлекают из памяти вычислителя ННР текущие дополнительные параметры: ошибку времени δt ; геометрический фактора снижения точности по местоположению Pдор отношение сигнал/помеха h в измерительных каналах, по которым производится расчет навигационных параметров.

Этап статистической оценки текущего состояния.

НП На этом этапе с помощью байесовского вероятностного подхода осуществляют обучение вычислителя ННР оценивать текущее состояние НП по полученным признакам в виде эмпирического распределения координат МО РБЛА. При этом выполняют следующие приемы (операции, действия):

рассчитывают статистические параметры распределения, а именно: выборочное среднее μ_k , выборочную СКП σ_k координат МО;

вычисляют функцию правдоподобия $P(R_j^*/D_k)$ для доверительного интервала ± 2 -сигма с использованием при необходимости поправочного коэффициента Стьюдента, в случае если $N < 30$;

подсчитывают априорную вероятность $P(D_k)$, количественно оцениваемую частотой нахождения НП в текущем состоянии;

определяют доверительную вероятность $P(D_k/R_j^*)$ РСЛ нахождения НП в текущем состоянии D_k ; формируют сигнал "Достоверность" при условии, что доверительная вероятность больше или равна установленной величине.

Первоначальное обучение проводят в исходном местоположении РБЛА после перехода НПП в режим слежения при условии, что НП находится в нормальном состоянии D_n .

В результате процедуры первоначального обучения, производящейся в отсутствии помехового воздействия, с помощью вычислителя НПП устанавливают, что априорная вероятность $P(D_n)$ нормального состояния НП асимптотически устремляется к 1, а распределение погрешностей МО правдоподобно падает в требуемый доверительный интервал ± 2 -сигма с вероятностью 0,95. Это означает, что НП с доверительной вероятностью 0,95 находится в нормальном состоянии по результатам проведенной статистической оценки погрешностей МО. При нормальном состоянии НП функция правдоподобия совпадает с апостериорной плотностью, и ее максимум практически полностью сближается с максимумом априорной вероятности.

Время начального обучения, при поступлении навигационных параметров с периодом 0,1 ... 0,5 с, составляет соответственно от 3 до 15 с.

При получении вычислителем НПП следующей текущей координаты МО данные апостериорные вероятности становятся априорными и используются для определения новой доверительной вероятности.

На фиг. 2 приведен пример распределения погрешностей координат МО РБЛА для так называемого "чистого неба", т.е. нормального состояния НП. Данное распределение получено при следующих условиях: отличное геометрическое взаиморасположение созвездия спутников (PDOP=1), отношения сигнал/помеха в измерительных каналах не менее 45 дБм/Гц, ошибка времени НПП $\delta t = 1 \dots 2$ нс. Из распределения погрешностей, приведенного на фиг. 2, видно, что при данных условиях горизонтальная погрешность координаты не превышает 0,9 м, а рассчитанная предельная СКП Δ_1 составляет 1,3 м.

Процедуру переобучения производят после определения факта искажения НП при его переходе из одного состояния в другое. В этом случае доверительная вероятность нахождения НП в предыдущем состоянии существенным образом уменьшается, что приводит к снижению достоверности. При искаженном (подавленном) состоянии НП изменившаяся и сместившаяся по оси абсцисс функция правдоподобия существенно уводит максимум апостериорной плотности от максимума априорной плотности фиг. 1.

На фиг. 3 приведен пример распределения погрешностей МО РБЛА при нахождении НПП в незначительно искаженном поле. Видно, что НП переходит из нормального состояния, ограниченного радиусом 1,5 м, в искаженное состояние, затем на некоторое время возвращается в нормальное состояние, и после этого опять переходит в искаженное состояние. Поэтому переобучение также проводят после возвращения поля в нормальное состояние (по окончании искажающих эффектов или помехового воздействия).

Процедуру переобучения проводят в режиме зависания РБЛА, до тех пор, пока сформируется обучающая выборка, позволяющая определить, что НП находится в новом состоянии с доверительной вероятностью 0,95.

Этап определения факта искажения навигационного поля.

На этом этапе для текущего временного отсчета выполняют следующие приемы (операции, действия):

фильтруют и отбраковывают аномальные выбросы, т.е. кратковременные существенные погрешности местоопределения, возникающие в случайные моменты времени, данную операцию реализуют следующими процедурами:

а) выполняют рекуррентную фильтрацию средних значений μ_k и дисперсий σ_k^2 координат МО, т.е.

$$\mu_k(t) = \mu_k(t-1) + \frac{1}{N} (R_j^*(t) - \mu_k(t-1)),$$

$$\sigma_k^2(t) = \sigma_k^2(t-1) + \frac{1}{N} \left((\Delta R_j^*(t))^2 - \sigma_k^2(t-1) \right);$$

б) проверяют выполнение условия:

$$|\Delta R_j^*(t)| > \sigma_k(t);$$

в) считают текущую координату искаженной в случае выполнения условия п. б), и заменяют ее средним значением;

г) формируют сигнал "Аномалия ГНСС".

рассчитывают коэффициенты аппроксимирующего полинома

$$C_i \quad (i = \overline{0, m})$$

На основании данных из массива достоверных измерений; производят экстраполяцию измерений на следующий временной отсчет t_s с помощью полученных коэффициентов полинома m -й степени;

сравнивают текущее измерение координаты МО $R_j^*(t)$ с экстраполированным значением $F(t_s)$, полу-

чая погрешность МО $\Delta R_j^*(t)$;

выполняют решающее правило для определения факта искажения НП, для этого вычисляют минимальное пороговое значение θ_1 для нормального состояния НП и сравнивают его с погрешностью МО $\Delta R_j^*(t)$;

принимают решение о наличии факта искажения НП на основании установленного критерия, в том случае, если погрешность МО $\Delta R_j^*(t)$ превышает минимальное пороговое значение Δ_1 ;

фиксируют момент времени, на котором обнаружен факт искажения НП, и формируют сигнал "Искажение ГНСС";

при отсутствии помехового воздействия переходят к этапу подготовки обрабатываемых признаков НП.

Этап идентификации видов помехового воздействия.

Этот этап выполняется в случае наличия факта искажения НП, при этом выполняют следующие приемы (операции, действия):

вычисляют пороговые значения θ_k для типовых состояний искаженного НП;

сравнивают текущие отношения h_s сигнал/помеха в измерительных каналах НПП с нормативной величиной 45 дБм/Гц, соответствующей нормальному состоянию НП;

выполняют решающее правило для идентификации видов помехового воздействия, для чего сравнивают погрешность МО $\Delta R_j^*(t)$ с пороговыми значениями θ_k для типовых состояний искаженного НП;

выполняют решающее правило для идентификации активного спуфинга;

принимают решение по установленному критерию о виде помехового воздействия, и формируют сигнал с указанием вида помехи;

по окончании процедуры идентификации переходят к этапу подготовки обрабатываемых признаков НП для повтора операций по новому массиву достоверных измерений.

Таким образом, в результате выполнения последовательности действий, разделенной на четыре этапа, будут получены следующие результаты:

с вероятностью 0,95 произведена оценка текущего состояния НП по полученным координатам МО РБЛА;

принято достоверное решение, о наличии или отсутствия факта искажения НП, по критерию максимума апостериорной плотности;

при наличии факта искажения НП произведена идентификация вида помехового воздействия путем отнесения его к одному из типовых классов.

При изменении сигнально-помеховой обстановки данный способ на основании байесовского вероятностного подхода обеспечит в течение короткого времени переобучение НПП, после чего с заданной достоверностью будут получены перечисленные результаты.

Технический эффект

Проведенный анализ показал, что реализация способа-прототипа в навигационном приемнике РБЛА обеспечит только определение факта искажения навигационного поля в результате помехового воздействия без оценки достоверности этого события, что, безусловно, повысит эффективность работы РБЛА в автономном режиме.

С другой стороны, из сравнительного анализа заявляемого способа и способа-прототипа следует, что в заявляемом способе имеются новые существенные признаки, представляющие собой совокупность выполняемых в определенной последовательности приемов (операций, действий) с соблюдением определенных правил принятия решений.

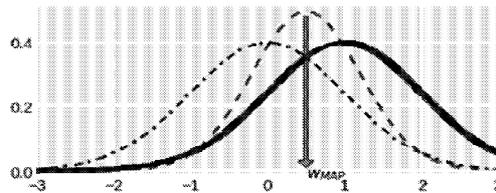
Наличие в заявляемом способе новых существенных признаков, введенных неочевидным образом путем нового технического решения, позволяет достичь технического результата - расширение функциональных возможностей навигационного приемника за счет определения с высокой достоверностью факта искажения навигационного поля и идентификации видов помехового воздействия без дополнительных аппаратных затрат из-за наличия ограничений на массогабаритные показатели РБЛА.

Таким образом, заявляемый способ обладает существенной технической эффективностью по сравнению со способом-прототипом. Его применение в навигационных приемниках позволит усовершенствовать алгоритмы управления РБЛА и, следовательно, расширить их функциональные возможности в автономном режиме работы.

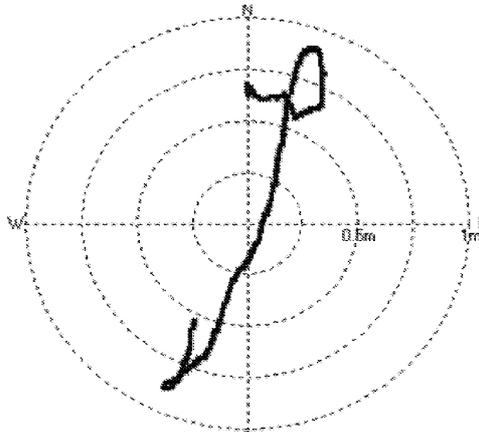
ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

Способ определения факта искажения навигационного поля и идентификации помехового воздействия на навигационный приемник, установленный на борту роботизированного беспилотного летательного аппарата, заключающийся в том, что формируют из вектора состояния потребителя обучающую выборку в виде массива достоверных оценок местопределения, фильтруют и отбраковывают при наличии их аномальные выбросы, при этом формируют сигнал "Аномалия ГНСС", на основании данных из массива достоверных измерений рассчитывают коэффициенты аппроксимирующего полинома, с помощью коэффициентов которого производят экстраполяцию координаты местопределения для следующей

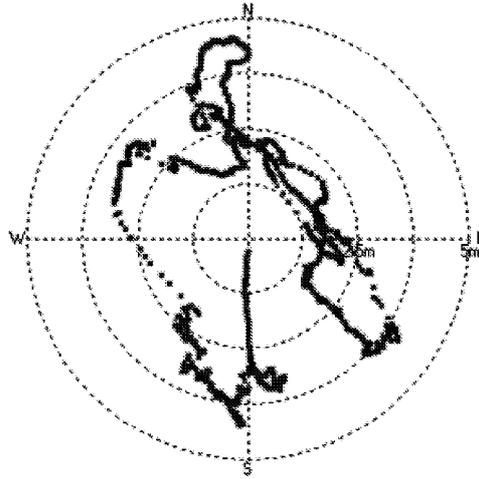
го временного отсчета, текущее измерение координаты сравнивают с экстраполированным значением, при этом получают погрешность местоопределения, выполняют решающее правило для определения факта искажения навигационного поля путем сравнения погрешности местоопределения с вычисленным минимальным пороговым значением для нормального состояния навигационного поля, если это пороговое значение превышено принимают решение о наличии факта искажения, фиксируют этот момент времени и формируют сигнал "Искажение ГНСС", при отсутствии помехового воздействия повторяют операции по новому массиву достоверных измерений, отличающийся тем, что после формирования обучающей выборки извлекают из памяти вычислителя навигационного приемника текущие дополнительные параметры, такие как: ошибка времени; геометрический фактор снижения точности по местоположению; отношения сигнал/помеха в измерительных каналах навигационного приемника, затем осуществляют статистическую оценку текущего состояния навигационного поля, для этого с помощью обучающей выборки данных подсчитывают априорную вероятность и рассчитывают выборочное среднее и выборочную среднеквадратичную погрешность местоопределения, которые используют для вычисления функции правдоподобия, с помощью которой определяют доверительную вероятность текущего состояния навигационного поля, при соблюдении условия, что доверительная вероятность больше или равна установленной величине, формируют сигнал "Достоверность", в случае наличия факта искажения навигационного поля сравнивают текущие отношения сигнал/помеха в измерительных каналах навигационного приемника с нормативной величиной, соответствующей нормальному состоянию навигационного поля, выполняют решающее правило для идентификации видов помехового воздействия, для чего сравнивают погрешность местоопределения с пороговыми значениями для типовых состояний искаженного навигационного поля, выполняют решающее правило для идентификации активного спуфинга, принимают решение по установленному критерию о виде помехового воздействия и формируют сигнал с указанием вида помехи, по окончании процедуры идентификации повторяют все операции по новому массиву достоверных измерений.



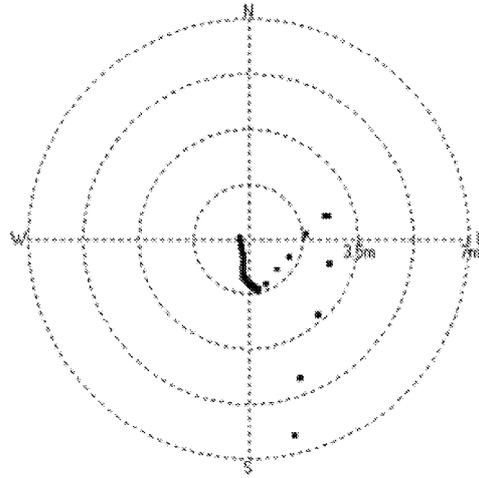
Фиг. 1



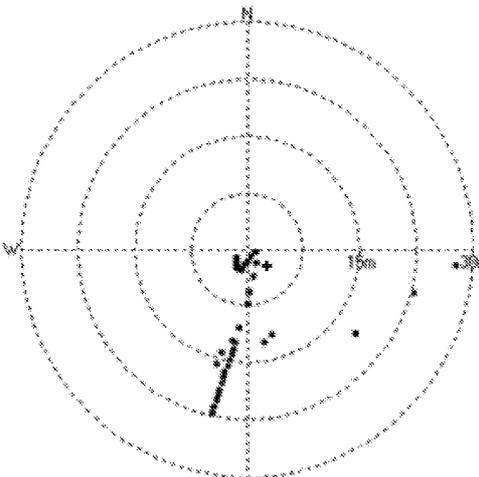
Фиг. 2



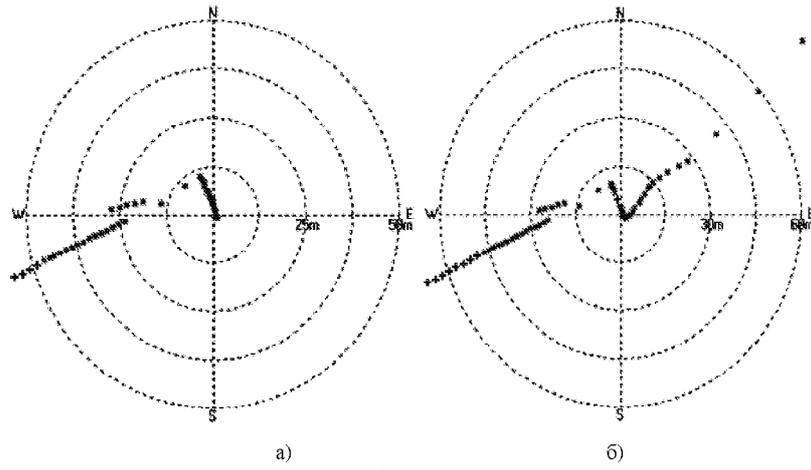
Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6

