ТОЧНОСТЬ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ АППАРАТУРЫ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ

Носов М. М.[1], Перова Н. К.[2], Куракин А. С.[3], Якушенко С. А.[4]

DOI:10.21681/3034-4050-2026-6-24-32

Ключевые слова: *псевдодальность, геометрический фактор, энергетическое отношение, временная задержка, доплеровское смещение, срыв слежения, корреляционный приёмник, контроль целостности, многосистемный приём, инерциальное комплексирование.*

Аннотация

Цель работы: *разработать последовательность совместной оценки координатного результата при постепенном ухудшении дальномерных измерений и последующем исключении спутниковых каналов.*

Метод исследования: *использованы зависимость погрешности положения от геометрического фактора и погрешности псевдодальности, а также модель совместной оценки временной задержки и доплеровского смещения частоты. Расчёт выполнен для базы сигнала 10^4 и среднеквадратической погрешности частотной оценки один герц.*

Результаты исследования: *снижение энергетического отношения с 50 до 40 и 30 децибел увеличивает шумовую погрешность псевдодальности с 0,3 до 3 и 30 метров. До срыва слежения ухудшение проявляется ростом дисперсии измерений; после исключения каналов координатная ошибка дополнительно определяется геометрией оставшегося созвездия. При сопровождении менее четырёх сигналов трёхмерное решение не формируется. Для сигналоподобного воздействия вместо одной среднеквадратической характеристики требуется оценивать систематическое смещение и риск необнаруженного ложного решения.*

Научная новизна: *состоит в согласовании энергетического, измерительного и координатного уровней оценки с фактическим состоянием каналов и в выделении подмены сигнала в самостоятельную ветвь контроля целостности.*

Практическая значимость: *предложенная последовательность задаёт состав показателей для стендовых испытаний: энергетическое отношение и погрешность псевдодальности до порога, геометрический фактор и доступность после потери каналов, смещение и время предупреждения при подмене.*

Введение

Аппаратура спутниковой навигации перестаёт выдавать координаты не сразу после появления помехового сигнала. Сначала ухудшается качество отдельных псевдодальномерных измерений, затем часть каналов теряет слежение, и только после этого навигационный вычислитель может оказаться без минимально необходимого набора данных. В работе В. К. Снежко с соавторами помехозащищённость оценивается через вероятность нормального функционирования одного канала и многоканального приёмника в целом [1]. Такой подход удобен для оценки доступности решения, однако он не показывает, как меняется координатная погрешность до момента полного отказа.

Результат зависит не только от мощности помехи, но и от построения входного тракта. Эксперимент Р. О. Арефьева, О. Н. Скрыпника и М. А. Межетова показал, что узкополосное воздействие в одном диапазоне способно нарушить работу другой спутниковой системы, если в многосистемном приёмнике имеются общие радиочастотные элементы [2]. Поэтому одинаковое отношение мощностей на входе двух приёмников не обязательно приводит к одинаковой ошибке: один образец продолжает формировать решение с увеличенной дисперсией, другой исключает часть сигналов, третий блокируется из-за нелинейного режима общего усилителя или преобразователя частоты.

Для сигналоподобного воздействия характерна иная картина. В испытаниях на основе программно-определяемого радио вероятность и время захвата ложного навигационного поля определялись отношением мощностей, рассогласованием координат и сдвигом передаваемой шкалы времени [3]. При этом выходное решение может сохраняться и выглядеть правдоподобно. Следовательно, среднеквадратическая

1 ***Носов Максим Михайлович***, адъюнкт Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного. г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: majororca@yandex.ru

2 ***Перова Наталья Константиновна***, научный сотрудник ООО «Специальный Технологический Центр». г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: perovanatalia@list.ru

3 ***Куракин Александр Сергеевич***, заместитель директора по разработке специальных средств – генеральный конструктор систем и комплексов криптографической защиты информации ООО «Специальный Технологический Центр». г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: nirt@mail.ru

4 ***Якушенко Сергей Алексеевич***, доктор технических наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра Военной академии связи им. С. М. Буденного. Санкт-Петербург, Российская Федерация. E-mail: was16@mail.ru

погрешность является достаточной характеристикой только для маскирующего воздействия, вызывающего рост случайной составляющей; при подмене сигнала необходимо дополнительно контролировать систематическое смещение и целостность.

Современные исследования всё чаще переносят оценку с уровня коррелятора на уровень измерений и координат. Д. Борио и К. Джойя сравнили пять способов подавления помех и установили, что алгоритм обработки способен изменять не только отношение сигнал/шум, но и смещение псевдодальностей [4]. Ф. Димц, П. Павловчич-Прешерен и М. Бажек получили различную реакцию геодезических и недорогих приёмников на один и тот же ЛЧМ-сигнал помехи [5]. Повторные лабораторные испытания трёх серийных модулей, выполненные А. Блатником и Б. Батагелем, выявили заметный разброс реакции встроенного программного обеспечения даже при воспроизведении одинакового сценария [6]. Эти результаты ограничивают применимость единственного расчётного порога без проверки конкретного образца.

Вторая составляющая координатной ошибки связана с геометрией. Для базовой группировки ГЛОНАСС при угле маски 30° среднее значение пространственного геометрического фактора по расчётной сетке достигало 8,45, а доля рабочей зоны по критериям «не менее четырёх спутников» и «пространственный геометрический фактор не более 6» составляла 0,23 [7]. Потеря ещё одного-двух каналов в такой обстановке может оказаться значимее умеренного роста шума в оставшихся измерениях. Автономный контроль целостности, рассматриваемый Н. В. Леонидовым, позволяет обнаруживать и исключать аномальные измерения, но цена такого решения – сокращение доступного созвездия и возможное ухудшение геометрии [8].

В настоящей работе эти два механизма рассматриваются последовательно. Сначала оценивается увеличение шумовой составляющей псевдодальности при снижении энергетического отношения. Затем, после применения критерия захвата или слежения, формируется фактически используемый набор спутников и заново определяется геометрическая составляющая координатной ошибки. Отдельно выделяется режим подмены, для которого дисперсионная оценка дополняется показателями смещения и времени предупреждения. Исследование имеет расчётный характер и не подменяет испытания конкретного приёмника.

Формирование погрешности координатного решения

В каждый момент времени навигационный вычислитель обрабатывает набор псевдодальностей до сопровождаемых космических аппаратов. При одинаковой дисперсии измерений и отсутствии их взаимной корреляции среднеквадратическую погрешность положения можно представить как произведение погрешности псевдодальности и геометрического фактора:

$$\sigma_r = K_{\mathrm{DOP}}\sigma_{\rho\Sigma},\ \sigma_{\rho\Sigma} = \left(\sum_{i=1}^{L}\sigma_{\rho,i}^2\right)^{1/2}, \quad (1)$$

где σ_r – среднеквадратическая погрешность положения, м; K_{DOP} – геометрический фактор снижения точности; $\sigma_{\rho\Sigma}$ – суммарная среднеквадратическая погрешность псевдодальности, м; $\sigma_{\rho,i}$ – i-я независимая составляющая погрешности псевдодальности, м; L – число учитываемых составляющих. В $\sigma_{\rho\Sigma}$ входят остаточные ионосферная и тропосферная погрешности, шум приёмника, многолучёвость, ошибки эфемерид и частотно-временных поправок.

Выражение (1) используется здесь как пояснительная модель. Если дисперсии спутниковых измерений неодинаковы, а часть ошибок коррелирована, координатную ковариацию следует рассчитывать по матрице геометрии и ковариационной матрице измерений. Это особенно важно при общем помеховом воздействии на радиочастотный тракт: ошибки разных каналов уже нельзя считать статистически независимыми.

Помеха изменяет обе части выражения (1), но не обязательно одновременно. Пока все каналы сохраняют захват, прежде всего растёт $\sigma_{\rho\Sigma}$. После исключения одного или нескольких измерений меняется матрица геометрии и, следовательно, K_{DOP}. Поэтому число видимых космических аппаратов и число измерений, реально использованных в решении, не являются взаимозаменяемыми показателями.

Для практического анализа рассчитывают горизонтальный, вертикальный и пространственный геометрические факторы – соответственно HDOP, VDOP и PDOP. Их значения относятся к конкретному набору спутников и текущей точке потребителя. Потеря высоко расположенного или геометрически выгодного космического аппарата способна заметно увеличить вертикальную либо пространственную составляющую ошибки, хотя общее число наблюдаемых сигналов ещё остаётся достаточным [7].

Шумовая точность одновременной оценки временной задержки и доплеровского смещения

частоты определяется энергетикой и частотно-временной базой принятого сигнала. В модели белого гауссовского шума используется соотношение[5]:

$$\sigma_\tau \sigma_f = \frac{1}{q^2 B}, \quad (2)$$

где σ_τ – среднеквадратическая погрешность оценки временной задержки принятого навигационного сигнала, с; σ_f – среднеквадратическая погрешность оценки доплеровского смещения частоты, Гц; q^2 – энергетическое отношение полезного сигнала к суммарному шуму и помехе после накопления; $B = f_{эф}\tau_{эф}$ – база сигнала; $f_{эф}$ – эффективная ширина спектра, Гц; $\tau_{эф}$ – эффективная длительность наблюдения, с.

Формула (2) задаёт потенциальную оценку. Она не учитывает насыщение усилителей, ограничение аналого-цифрового преобразователя, ошибки автоматической регулировки усиления, динамику объекта и конкретную структуру следящих контуров. При нарушении линейного режима увеличение мощности помехи нельзя свести только к уменьшению q^2.

Временная ошибка преобразуется в дальномерную через скорость распространения электромагнитной волны:

$$\sigma_\rho = c\sigma_\tau, \quad (3)$$

где σ_ρ – среднеквадратическая погрешность псевдодальности, м; c – скорость распространения электромагнитной волны, м/с.

Для базы $B = 10^4$ и фиксированной $\sigma_f = 1$ Гц из выражений (2) и (3) получены значения, приведённые в таблице 1. При $q^2 = 40$ дБ временная погрешность равна 10^{-8} с, или 0,01 мкс; соответствующая дальномерная погрешность составляет около 3 м. Значение 0,1 мкс в данном случае было бы эквивалентно уже 30 м, поэтому размерность при переходе от времени к расстоянию должна контролироваться отдельно.

Таблица 1.

Расчётная зависимость шумовой среднеквадратической погрешности псевдодальности от q^2 при $B = 10^4$ и $\sigma_f = 1$ Гц

q^2, дБ	q^2, отн. ед.	σ_τ	σ_ρ, м
50	10^5	1 нс	0,30
40	10^4	10 нс	3,00
30	10^3	100 нс	30,0
20	10^2	1 мкс	300

5 Снежко В. К., Якушенко С. А. Военные интегрированные системы навигации, связи и управления. Санкт-Петербург: Военная академия связи, 2014. – С. 324–327.

При принятых условиях уменьшение q^2 на 10 дБ увеличивает шумовую составляющую псевдодальности в десять раз. На участке от 40 до 30 дБ расчётная величина переходит от единиц к десяткам метров ещё до учёта геометрического фактора, атмосферных ошибок и многолучёвости.

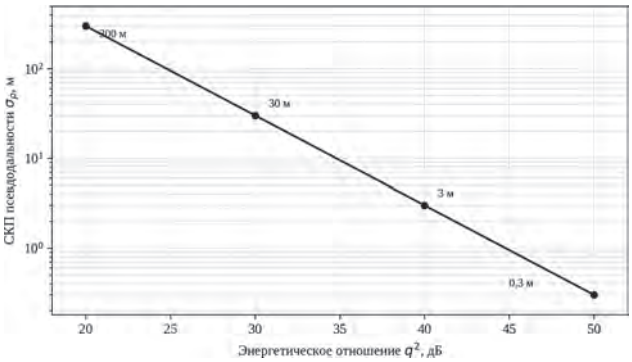

Рис. 1. Расчётная зависимость σ_ρ от q^2 при $B = 10^4$ и $\sigma_f = 1$ Гц

График на рисунке 1 не является характеристикой конкретного серийного приёмника. Он показывает нижнюю расчётную границу, полученную при фиксированной ошибке частотной оценки. В реальной аппаратуре ширина полос следящих систем и время накопления изменяются, а встроенные алгоритмы могут удерживать решение, переинициализировать отдельные каналы или переключать рабочую систему. Эти особенности необходимо определять экспериментально [5, 6].

Режимы деградации измерительных каналов

По механизму воздействия целесообразно различать маскирующие и сигналоподобные помехи. К маскирующим относятся широкополосные шумовые и узкополосные гармонические сигналы. Первые повышают фон во всей полосе обработки, вторые воздействуют на отдельные участки спектра и способны вызывать биения, рост ошибок фазового слежения и перегрузку общих элементов тракта. Сигналоподобное воздействие формирует корреляционные максимумы, согласованные со структурой навигационного сигнала, и поэтому может не сопровождаться немедленным исчезновением координат.

В линейном режиме радиочастотного тракта влияние маскирующей помехи удобно представлять через эффективное энергетическое отношение:

$$q_J^2 = \frac{P_s}{P_n + P_{J,\text{eq}}}, \quad (4)$$

где P_s – мощность полезного сигнала в эквивалентной полосе измерения, Вт; P_n – мощность собственного шума, Вт; $P_{J,\mathrm{eq}}$ – эквивалентная мощность помехи после учёта её спектрального перекрытия с полезным сигналом и передаточной характеристики приёмного тракта, Вт.

Такая запись допустима, пока усилители, смесители и аналого-цифровой преобразователь работают линейно. При перегрузке общего входного каскада помеха в одном диапазоне может изменить условия обработки сигналов другой системы. Именно такой эффект наблюдался в исследовании мультисистемного приёмника: переход нелинейных элементов в режим ограничения сопровождался взаимным влиянием каналов ГЛОНАСС и GPS [2]. В этой области q_J^2 перестаёт быть достаточным описанием, а в протокол испытаний необходимо включать коэффициент усиления, состояние автоматической регулировки и долю ограниченных отсчётов.

В исходной методике оценки канала обнаружения мощность помехи $1{,}64 \cdot 10^{-14}$ Вт, что соответствует –137,9 дБВт, снижала вероятность правильного обнаружения до 0,5. Это значение характеризует конкретные исходные данные и критерий принятия решения; переносить его на другой приёмник без пересчёта времени накопления, полосы и порога обнаружителя нельзя.[6]

С точки зрения выходного результата удобно выделить три режима. В допороговом режиме захват и слежение сохраняются, но дисперсия псевдодальности растёт. В пороговом режиме один или несколько каналов исключаются, после чего меняются геометрия и доступность решения. В имитирующем режиме приёмник может продолжать выдачу координат, однако они содержат систематическое смещение. Различия между режимами приведены в таблице 2.

Порог перехода между первыми двумя режимами не является постоянной характеристикой всей аппаратуры. Он зависит от типа помехи, динамики, выбранного созвездия и внутренней логики программного обеспечения. Поэтому испытания устойчивости должны включать повторение каждого сценария и статистическую обработку времени потери решения, величины ошибки и времени восстановления. Методика с управляемым источником широкополосной помехи предложена Д. Змысловским, М. Крыком и Я. Кельнером [9], а необходимость многократного воспроизведения одинакового входного воздействия подтверждена в работе А. Блатника и Б. Батагеля [6].

Факт наличия помехи также не следует определять по одному признаку. Снижение отношения несущей к спектральной плотности шума, рост автоматической регулировки усиления, увеличение невязок псевдодальности и одновременная потеря нескольких спутников имеют разную диагностическую ценность. В работе А. Реды и Т. Меккави показано, что совместное использование информативных признаков повышает достоверность классификации непрерывных и ЛЧМ-помех [10]. Для бортовой аппаратуры такой детектор должен рассматриваться как вспомогательный элемент контроля, а не как замена проверки целостности координатного решения.

Порядок совместной оценки точности и доступности

Совместная оценка строится не как умножение двух заранее заданных коэффициентов, а как последовательное воспроизведение работы приёмника. Для каждого уровня воздействия должны использоваться именно те измерения,

6 Снежко В. К., Якушенко С. А. Военные интегрированные системы навигации, связи и управления. Санкт-Петербург: Военная академия связи, 2014. – С. 362–366.

Таблица 2.

Показатели оценки для различных режимов воздействия

Режим	Состояние приёмника	Контролируемые показатели	Результат оценки
Допороговый	Захват и слежение сохраняются	q_J^2, отношение несущей к спектральной плотности шума, σ_τ, σ_ρ, невязки измерений	Рост погрешности координат без потери доступности
Пороговый	Один или несколько каналов исключены из решения	Число и идентификаторы каналов, HDOP, VDOP, PDOP, ковариация координат	Ухудшение геометрии либо потеря трёхмерного решения
Имитирующий	Слежение может сохраняться по ложному сигналу	Смещение координат, скорость дрейфа, вероятность необнаруженного ложного решения, время предупреждения	Правдоподобное, но недостоверное координатное решение

которые навигационный вычислитель признал пригодными. В противном случае геометрический фактор будет рассчитан по видимым спутникам, хотя часть из них уже не участвует в решении.

Предлагаемый порядок включает пять операций.

1. Для штатного режима фиксируются мощности полезных сигналов, оценка собственного шума, состав рабочего созвездия, значения HDOP, VDOP и PDOP, остатки псевдодальностей и среднеквадратическая ошибка координат. Эти данные образуют исходный уровень, с которым сравниваются последующие состояния.
2. Мощность помехи изменяется ступенчато. Пока приёмный тракт остаётся линейным, по формуле (4) определяется q_f^2, а по формулам (2) и (3) – ожидаемая шумовая составляющая псевдодальности. Одновременно регистрируются фактические остатки измерений; расхождение расчётной и наблюдаемой дисперсий указывает на действие неучтённого механизма.
3. Для каждого уровня воздействия формируется перечень каналов, сохранивших захват, слежение и допуск к навигационному решению. Критерий должен быть задан заранее: превышение порога обнаружителя, допустимая невязка, значение отношения несущей к спектральной плотности шума либо комбинация признаков.
4. По фактически принятому набору измерений повторно вычисляются геометрические факторы и ковариация координат. При наличии менее четырёх независимых псевдодальностей трёхмерное решение и поправка шкалы времени не определяются; состояние должно классифицироваться как потеря доступности, а не как координатная ошибка бесконечной величины.
5. Для сигналоподобного воздействия дополнительно определяются смещение координат относительно контрольной траектории, скорость его нарастания, вероятность необнаруженного ложного решения и время от начала воздействия до предупреждения. Эти показатели не сворачиваются в среднеквадратическую ошибку, поскольку устойчивое смещение может иметь малую дисперсию.

Схема выполнения расчёта и принятия решения показана на рисунке 2. Её принципиальное отличие от упрощённой оценки состоит в том, что после потери каждого канала геометрия пересчитывается, а режим подмены выводится в отдельную ветвь контроля целостности.

Элемент научной новизны работы состоит в согласовании трёх уровней оценки – энергетического, измерительного и координатного – с фактическим состоянием каналов. Вводить отдельный «универсальный коэффициент деградации» не требуется: произведение относительного изменения псевдодальномерной ошибки и геометрического фактора непосредственно



Рис. 2. Последовательность совместной оценки точности и доступности координатного решения

следует из выражения (1) и не несёт самостоятельного физического содержания. Практический результат даёт именно порядок смены показателей при переходе через порог слежения.

Сопоставление расчётных оценок с результатами опубликованных исследований

Полученные значения 0,3; 3; 30 и 300 м относятся только к шумовой составляющей в принятой модели. Они не должны интерпретироваться как готовый прогноз для любой аппаратуры. Это видно при сопоставлении с экспериментом Р. О. Арефьева с соавторами. При воздействии узкополосной помехи на общий тракт ATGM336H наблюдались не только рост координатной ошибки, но и взаимное блокирование сигналов разных систем; в отдельных режимах среднеквадратическая ошибка высоты достигала 72,2 м, широты – 27 м, долготы – 24 м [2]. После выбора менее поражённой системы ошибка уменьшалась. Следовательно, состав используемых измерений и нелинейность тракта оказываются не менее значимыми, чем расчётная шумовая дисперсия.

Эксперимент с ложным навигационным полем также подтверждает необходимость отдельной ветви оценки. Для Garmin Nuvi 710 низкая вероятность захвата ложного поля обеспечивалась при отношении мощности истинного сигнала к мощности помехи не менее –15 дБ; при более сильной помехе время захвата зависело от рассогласования координат и шкалы времени [3]. Здесь основным результатом является не рост случайной ошибки, а переход к другому устойчивому решению.

Оценка способов подавления помех должна выполняться на том же уровне, на котором используется результат. Д. Борио и К. Джойя показали, что робастные методы обработки не вносили заметного смещения в псевдодальности и координаты, тогда как адаптивный режекторный фильтр создавал задержку псевдодальностей; её общий характер уменьшал влияние на одноточечное решение, но не устранял сам измерительный эффект [4]. Поэтому увеличение отношения сигнал/помеха на выходе фильтра ещё не доказывает сохранение метрологических характеристик.

Наконец, пороговые испытания необходимо повторять. В контролируемой среде А. Блатник и Б. Батагель выполняли по 50 реализаций каждого сценария и получили различающиеся реакции приёмника на идентичные входные данные [6]. Для заявляемого порога следует приводить не единичное значение, а медиану или математическое ожидание, разброс, число повторов и правило классификации отказа. В противном случае различия между двумя уровнями помехи могут отражать внутреннее состояние программного обеспечения, а не устойчивую закономерность.

Таким образом, расчётная модель выполняет две функции: задаёт ожидаемое направление изменения шумовой погрешности и определяет перечень величин, которые следует измерять на стенде. Она не заменяет аппаратный эксперимент, но позволяет отличить рост дисперсии от потери геометрии и от необнаруженной подмены.

Меры сохранения работоспособности

Защитные меры следует выбирать по тому механизму, который установлен в ходе оценки. Если ограничение возникает во входном тракте, первоочередными являются запас линейности малошумящего усилителя, селективность фильтров, корректная работа автоматической регулировки усиления и контроль насыщения аналого-цифрового преобразователя. Разнесение радиочастотных каналов разных систем снижает риск взаимного блокирования; программное переключение на менее поражённое созвездие эффективно только тогда, когда общие каскады не находятся в режиме ограничения [2].

Пространственная обработка позволяет формировать провалы диаграммы направленности в направлениях на источники помех. Однако повышение отношения сигнал/помеха не должно сопровождаться искажением фазовых измерений. Я. Ван показал, что обычная пространственно-временная обработка по критерию инверсии мощности способна вносить смещения несущей фазы вплоть до срывов цикла, тогда как дополнительные ограничения на весовые коэффициенты устраняют этот эффект [11]. Для высокоточных применений антенный алгоритм поэтому проверяется одновременно по глубине подавления, смещению кода и смещению фазы.

На уровне цифровой обработки применяются режекторные и робастные фильтры, ограничители импульсных выбросов, контроль корреляционной функции и анализ временно-частотных признаков. По результатам [4] эффективность такого алгоритма должна оцениваться не только на выходе коррелятора, но и по псевдодальностям и координатам. Детектор [10] может использоваться для раннего распознавания режима воздействия, однако окончательное решение об исключении измерения должно опираться на невязки и критерии целостности.

Многосистемный приём повышает число доступных измерений, но сам по себе не гарантирует устойчивость. Если системы используют общий

усилитель, смеситель или генератор, помеха может распространяться между каналами [2]. Поэтому для приёмника необходимы раздельный контроль качества по созвездиям, возможность исключения поражённой системы и повторный расчёт геометрии. Алгоритмы автономного контроля целостности обеспечивают обнаружение несовместимых измерений, но требуют избыточности и тем самым напрямую связаны с доступностью [8].

После потери спутникового решения кратковременную непрерывность обеспечивает комплексирование с инерциальной навигационной системой, одометром и ограничениями динамики объекта. Такая поддержка не устраняет накопление инерциальной ошибки, поэтому время автономной экстраполяции должно быть ограничено. Анализ системы «Навстар» как объекта радиоэлектронного подавления также показывает, что условия отказа меняются при интеграции приёмника с инерциальными модулями и внешними дополнениями [12]. Для испытаний это означает необходимость задавать не только момент потери спутникового решения, но и допустимое время работы резервного контура.

Ни одна из перечисленных мер не перекрывает все режимы. Рациональная структура включает контроль входного тракта, обнаружение и локализацию воздействия, защитную обработку сигналов, контроль целостности и резервный источник навигационной информации. Состав комплекса выбирается по результатам совместной оценки, показанной на рисунке 2.

Заключение

Расчёт показал, что при базе сигнала 10^4 и фиксированной среднеквадратической погрешности частотной оценки 1 Гц уменьшение энергетического отношения на 10 дБ увеличивает шумовую составляющую псевдодальности в десять раз. Для уровней 50, 40 и 30 дБ получены соответственно 0,3; 3 и 30 м. Эти значения характеризуют потенциальную ошибку измерения задержки, а не полную координатную погрешность конкретного приёмника.

После исключения каналов оценка должна продолжаться по фактически используемому созвездию. Изменение HDOP, VDOP и PDOP может усилить координатную ошибку даже при неизменном качестве оставшихся псевдодальностей; при числе пригодных сигналов менее четырёх трёхмерное решение теряет доступность.

Для сигналоподобного воздействия среднеквадратической погрешности недостаточно. В состав контролируемых показателей необходимо включать систематическое смещение, скорость его изменения, вероятность необнаруженного ложного решения и время до предупреждения. Такое разделение исключает смешение трёх разных состояний: зашумлённого, недоступного и ложного решения.

Практическая значимость предложенного порядка состоит в формировании программы стендовых испытаний, где каждому этапу соответствует собственный набор регистрируемых величин. До порога слежения оцениваются энергетическое отношение и ошибки псевдодальности, после потери каналов – геометрия и доступность, при подмене – смещение и целостность.

Предложенный порядок не заменяет проверку конкретного образца, а задаёт воспроизводимую последовательность её проведения и интерпретации результатов. Его применение позволяет отделить ухудшение измерений от изменения геометрии и тем самым обоснованно выбирать меры защиты аппаратуры.

Литература

1. Снежко В. К., Якушенко С. А., Бурлаков С. О., Егрушев В. Е., Веркин С. С., Чеканова Е. В. Помехозащищённость навигационной аппаратуры спутниковых радионавигационных систем // International Journal of Humanities and Natural Sciences. – 2024. – № 5-4 (92). – С. 61–64. – DOI: 10.24412/2500-1000-2024-5-4-61-64.
2. Арефьев Р. О., Скрыпник О. Н., Межетов М. А. Исследование помехоустойчивости мультисистемного GNSS-приёмника // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. – 2023. – № 2 (37). – С. 28–42. – DOI: 10.51955/2312-1327_2023_2_28.
3. Фомин А. В., Святкин С. А., Леонтьев С. П. Применение SDR-технологии для оценки помехоустойчивости навигационных приёмников // Вопросы оборонной техники. – 2021. – № 11–12. – С. 165–172. – DOI: 10.53816/23061456_2021_11-12_165.
4. Borio D., Gioia C. GNSS interference mitigation: A measurement and position domain assessment // NAVIGATION. – 2021. – V. 68. – No. 1. – Pp. 93–114. – DOI: 10.1002/navi.391.
5. Dimc F., Pavlovčič-Prešeren P., Bažec M. Robustness against Chirp Signal Interference of On-Board Vehicle Geodetic and Low-Cost GNSS Receivers // Sensors. – 2021. – V. 21. – No. 16. – Art. 5257. – DOI: 10.3390/s21165257.
6. Blatnik A., Batagelj B. Evaluating GNSS Receiver Resilience: A Study on Simulation Environment Repeatability // Electronics. – 2025. – V. 14. – No. 9. – Art. 1797. – DOI: 10.3390/electronics14091797.
7. Плыкин К. Р., Валиханов М. М., Верещагин А. Н., Пустошилов А. С., Волошко Ю. Б., Ружилова О. В. Исследование низкоорбитального дополнения на высоте 2000 км для системы ГЛОНАСС с возможностью полного

покрытия Земли при различных вариантах ширины диаграммы направленности антенн космического аппарата // Вестник СибГУТИ. – 2025. – Т. 19. – № 3. – С. 38–51. – DOI: 10.55648/1998-6920-2025-19-3-38-51.
8. Леонидов Н. В. Автономные алгоритмы контроля целостности навигационного поля применительно к ГНСС ГЛОНАСС // Космические аппараты и технологии. – 2021. – Т. 5. – № 1. – С. 44–50. – DOI: 10.26732/j.st.2021.1.05.
9. Zmysłowski D., Kryk M., Kelner J. Testing GNSS Receiver Robustness for Jamming // Aviation and Security Issues. – 2023. – V. 4. – No. 2. – Pp. 139–155. – DOI: 10.55676/asi.v4i2.64.
10. Reda A., Mekkawy T. GNSS jamming detection using attention-based mutual information feature selection // Discover Applied Sciences. – 2024. – V. 6. – Art. 163. – DOI: 10.1007/s42452-024-05792-7.
11. Wang Y. Distortion-less carrier phase tracking space-time adaptive processor based on power inversion criterion for GNSS anti-jamming receiver // IET Radar, Sonar & Navigation. – 2024. – V. 18. – No. 5. – Pp. 754–764. – DOI: 10.1049/rsn2.12515.
12. Ануфриев А. А., Чиркин П. М., Шипунов В. А. Анализ спутниковой радионавигационной системы США «Навстар» как объекта радиоэлектронной борьбы // Телекоммуникации и связь. – 2025. – № 1 (04). – С. 20–33. – DOI: 10.21681/3034-4050-2025-1-20-33.

ACCURACY OF POSITIONING OF SATELLITE NAVIGATION EQUIPMENT UNDER THE INFLUENCE OF DELIBERATE INTERFERENCE

Nosov M. M.[7], Perova N. K.[8], Kurakin A. S.[9], Yakushenko S. A.[10]

Keywords: *pseudorange, geometric factor, energy ratio, time delay, Doppler shift, tracking failure, correlation receiver, integrity control, multisystem reception, inertial complexation.*

Abstract

The aim of the work *is to develop a sequence of joint assessment of the coordinate result in case of gradual deterioration of rangefinder measurements and subsequent exclusion of satellite channels.*

Research method: *the dependence of the position error on the geometric factor and the pseudorange error were used, as well as a model of the joint estimation of time delay and Doppler frequency shift. The calculation was performed for the signal base of 10^4 and the root mean square error of the frequency estimate of one hertz.*

Results of the study: *a decrease in the energy ratio from 50 to 40 and 30 decibels increases the noise error of the pseudorange from 0.3 to 3 and 30 meters. Before the failure of tracking, the deterioration is manifested by an increase in the dispersion of measurements; after the exclusion of channels, the coordinate error is additionally determined by the geometry of the remaining constellation. If less than four signals are accompanied, a three-dimensional solution is not formed.*

Scientific novelty: *consists in the coordination of the energy, measurement and coordinate levels of assessment with the actual state of the channels and in the separation of signal substitution into an independent branch of integrity control.*

Practical significance: *the proposed sequence defines the composition of indicators for bench tests: energy ratio and pseudorange error to the threshold, geometric factor and availability after channel loss, displacement and warning time during substitution.*

References

1. Snezhko V. K., Yakushenko S. A., Burlakov S. O., Egrushev V. E., Verkin S. S., Chekanova E. V. Pomekhozashchishchyonnost' navigacionnoj apparatury sputnikovyh radionavigacionnyh sistem // International Journal of Humanities and Natural Sciences. – 2024. – No. 5-4 (92). – Pp. 61–64. – DOI: 10.24412/2500-1000-2024-5-4-61-64.
2. Aref'ev R. O., Skrypnik O. N., Mezhetov M. A. Issledovanie pomekhoustojchivosti mul'tisistemnogo GNSS-priyomnika // Crede Experto: transport, obshchestvo, obrazovanie, yazyk. – 2023. – No. 2 (37). – Pp. 28–42. – DOI: 10.51955/ 2312-1327_2023_2_28.
3. Fomin A. V., Svyatkin S. A., Leont'ev S. P. Primenenie SDR-tekhnologii dlya ocenki pomekhoustojchivosti navigacionnyh priyomnikov // Voprosy oboronnoj tekhniki. – 2021. – No. 11–12. – Pp. 165–172. – DOI: 10.53816/23061456_2021_11-12_165.
4. Borio D., Gioia C. GNSS interference mitigation: A measurement and position domain assessment // NAVIGATION. – 2021. – V. 68. – No. 1. – Pp. 93–114. – DOI: 10.1002/navi.391.

7 ***Maxim M. Nosov***, adjunct of the Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny, St. Petersburg, Russia. E-mail: majororca@yandex.ru
8 ***Natalia K. Perova***, Researcher, Special Technology Center LLC. St. Petersburg, Russia. E-mail: perovanatalia@list.ru
9 ***Alexander S. Kurakin***, Deputy Director for the Development of Special Tools – General Designer of Systems and Complexes for Cryptographic Information Protection, Special Technology Center LLC. St. Petersburg, Russia. E-mail: nirt@mail.ru
10 ***Sergey A. Yakushenko***, Dr.Sc. of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher of the Research Center of the Military Academy of Communications named after S. M. Budenny. St. Petersburg, Russia. E-mail: was16@mail.ru

5. Dimc F., Pavlovčič-Prešeren P., Bažec M. Robustness against Chirp Signal Interference of On-Board Vehicle Geodetic and Low-Cost GNSS Receivers // Sensors. – 2021. – V. 21. – No. 16. – Art. 5257. – DOI: 10.3390/s21165257.
6. Blatnik A., Batagelj B. Evaluating GNSS Receiver Resilience: A Study on Simulation Environment Repeatability // Electronics. – 2025. – V. 14. – No. 9. – Art. 1797. – DOI: 10.3390/electronics14091797.
7. Plykin K. R., Valihanov M. M., Vereshchagin A. N., Pustoshilov A. S., Voloshko Yu. B., Ruzhilova O. V. Issledovanie nizkoorbital'nogo dopolneniya na vysote 2000 km dlya sistemy GLONASS s vozmozhnost'yu polnogo pokrytiya Zemli pri razlichnyh variantah shiriny diagrammy napravlennosti antenn kosmicheskogo apparata // Vestnik SibGUTI. – 2025. – V. 19. – No. 3. – Pp. 38–51. – DOI: 10.55648/1998-6920-2025-19-3-38-51.
8. Leonidov N. V. Avtonomnye algoritmy kontrolya celostnosti navigacionnogo polya primenitel'no k GNSS GLONASS // Kosmicheskie apparaty i tekhnologii. – 2021. – V. 5. – No. 1. – Pp. 44–50. – DOI: 10.26732/j.st.2021.1.05.
9. Zmysłowski D., Kryk M., Kelner J. Testing GNSS Receiver Robustness for Jamming // Aviation and Security Issues. – 2023. – V. 4. – No. 2. – Pp. 139–155. – DOI: 10.55676/asi.v4i2.64.
10. Reda A., Mekkawy T. GNSS jamming detection using attention-based mutual information feature selection // Discover Applied Sciences. – 2024. – V. 6. – Art. 163. – DOI: 10.1007/s42452-024-05792-7.
11. Wang Y. Distortion-less carrier phase tracking space-time adaptive processor based on power inversion criterion for GNSS anti-jamming receiver // IET Radar, Sonar & Navigation. – 2024. – V. 18. – No. 5. – Pp. 754–764. – DOI: 10.1049/rsn2.12515.
12. Anufriev A. A., Chirkin P. M., Shipunov V. A. Analiz sputnikovoj radionavigacionnoj sistemy SSHA «Navstar» kak ob"ekta radioehlektronnoj bor'by // Telekommunikacii i svyaz'. – 2025. – No. 1 (04). – Pp. 20–33. – DOI: 10.21681/3034-4050-2025-1-20-33.