

Анализ алгоритмов детектирования ГНСС-спуфинга

The analysis of the detecting algorithms of GNSS-spoofing

Larisa Dobryakova¹, Łukasz Lemieszewski², Evgeny Ochinn²

¹ West Pomeranian University of Technology, Faculty of Computer Science and Information Technology
71-210 Szczecin, ul. Żołnierska 49, e-mail: ldobryakova@wi.zut.edu.pl

² Maritime University of Szczecin, Faculty of Navigation
70-500 Szczecin, ul. Waly Chrobrego 1–2, e-mail: e.ochinn@am.szczecin.pl

Ключевые слова: Спуфер, спуфинг, GNSS, NAVSTAR GPS, GLONASS, GALILEO, BEJDOU-2

Резюме

В статье рассматриваются новые алгоритмы детектирования ГНСС-спуфинга, основанные на сравнении результатов измерения псевдодальностей до навигационных спутников и вычисления координат пары ГНСС-приёмников в двух режимах: в режиме нормальной ГНСС-навигации и в режиме спуфинга. Теоретические исследования показали, что в режиме одноантенного спуфинга при определённых условиях измеренные псевдодальности являются одинаковыми. Вычисленное расстояние между антеннами двух ГНСС-приёмников равно нулю. В режиме нормальной ГНСС-навигации вычисленное расстояние между антеннами двух ГНСС-приёмников превышает истинное расстояние на единицы-десятки метров. Эти различия используются в качестве основных параметров детектирования спуфинга.

Key words: spoofer, spoofing, GNSS, NAVSTAR GPS, GLONASS, GALILEO, BEJDOU-2

Abstract

The article discusses the new algorithms for detect of GNSS-spoofing based on a comparison of the pseudorange measurements results of navigation satellites and calculate the coordinates of a pair of GNSS-receivers in two modes: the normal GNSS-navigation and mode of the spoofing. The theoretical studies have shown that a single-antenna mode spoofing under certain conditions gives us the same measured pseudoranges. The calculated distance between the two antennas of GNSS-receivers gives us zero. In a mode of the normal GNSS-navigation computed distance between the antennas of the two GNSS-receivers exceeds the true distance to the tens of meters. These differences are used as the basic detection spoofing parameters.

Обозначения

ГНСС – Глобальная Навигационная Спутниковая Система (NAVSTAR GPS, GLONASS, GALILEO, BEJDOU-2).

ТС – Транспортное Средство (судно, автомобиль, самолёт).

НКА_{*i*} – Навигационный Космический Аппарат № *i*, имеющий на борту аппаратуру, предназначенную для формирования и излучения навигационных сигналов ГНСС, необходимых ГНСС-приёмникам для определения пространственных координат, составляющих вектора скорости движения, поправки

показаний часов и скорости изменения этой поправки; $i = \overline{1, N}$, N – количество НКА.

(x_i, y_i, z_i) , $i = \overline{1, N}$ – истинные известные координаты НКА с учетом их перемещения за время распространения сигнала от НКА до МПВ ТС.

МПВ_{*j*} – Модуль Приемо-Вычислительный (ГНСС-приёмник) № *j* систем GPS / ГЛОНАСС / ГАЛИЛЕО, предназначенный для измерения параметров навигационных сигналов ГНСС и выделения навигационных сообщений с целью определения пространственных координат, составляющих вектора

скорости движения, поправки показаний часов потребителя ГНСС и скорости изменения этой поправки. В рамках данной статьи наряду с сокращением МПВ будем использовать словосочетание ГНСС-приёмник.

$\rho_i, i = \overline{1, N}$ – истинные (точные) расстояния от ГНСС-приёмника до НКА_{*i*} (для статических объектов могут быть известны, однако в общем случае являются неизвестными величинами).

$\hat{\rho}_i, i = \overline{1, N}$ – псевдодальность от ГНСС-приёмника до НКА_{*i*}, равная разности между моментом приема фрагмента навигационного сигнала ГНСС, отсчитанным по шкале времени ГНСС-приемника и моментом излучения его навигационным космическим аппаратом ГНСС, отсчитанным по шкале времени навигационного космического аппарата ГНСС, умноженная на значение скорости света.

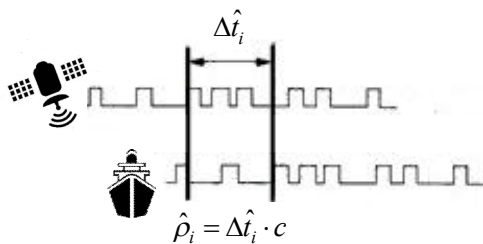


Рис. 1. Псевдодальность $\hat{\rho}_i$ от ГНСС-приёмника до НКА_{*i*}: Δt_i – разность между моментом приема фрагмента навигационного сигнала ГНСС, отсчитанным по шкале времени ГНСС-приемника и моментом излучения его навигационным космическим аппаратом ГНСС, отсчитанным по шкале времени навигационного космического аппарата ГНСС (смещение временной шкалы потребителя относительно системного времени); c – скорость света в вакууме

$\Delta \rho_i = \rho_i - \hat{\rho}_i, i = \overline{1, N}$ – погрешность навигационного определения, представляющая собой статистическую характеристику разности между измеренным и истинным местоположениями ГНСС-приёмника (может быть определена для статических объектов с известными координатами).

Дополнительные обозначения для пары ГНСС-приёмников

$\hat{\rho}_{1,i}, i = \overline{1, N}$ – псевдодальность от МПВ₁ до НКА_{*i*};

$\hat{\rho}_{2,i}, i = \overline{1, N}$ – псевдодальность от МПВ₂ до НКА_{*i*};

$(\hat{x}_1, \hat{y}_1, \hat{z}_1)$ – измеренные координаты МПВ₁;

$(\hat{x}_2, \hat{y}_2, \hat{z}_2)$ – измеренные координаты МПВ₂;

$(\tilde{x}_0, \tilde{y}_0, \tilde{z}_0)$ – ложные координаты МПВ₀;

$(\tilde{x}_1, \tilde{y}_1, \tilde{z}_1)$ – ложные координаты МПВ₁;

$(\tilde{x}_2, \tilde{y}_2, \tilde{z}_2)$ – ложные координаты МПВ₂;

D_{1-2} – истинное расстояние между МПВ₁ и МПВ₂;

$\hat{D}_{1-2} = \sqrt{(\hat{x}_1 - \hat{x}_2)^2 + (\hat{y}_1 - \hat{y}_2)^2 + (\hat{z}_1 - \hat{z}_2)^2} + c\tau$ – измеренное расстояние между МПВ₁ и МПВ₂;

τ – смещение временной шкалы потребителя относительно системного времени;

ДС – Детектор Спуфинга.

Введение

Техника навигационных определений положения транспортного средства (судно, автомобиль, самолёт, далее ТС) по сигналам навигационных космических аппаратов (НКА) стала обрабатываться с момента запуска первого искусственного спутника Земли (ИСЗ) в 1957 г. Была экспериментально подтверждена возможность определения параметров движения ИСЗ по результатам измерений доплеровского сдвига частоты сигнала, передаваемого с ИСЗ, в точке приёма с известными координатами.

Обратная задача была очевидной: по измерениям того же доплеровского сдвига частоты сигнала при известных координатах ИСЗ найти координаты пункта наблюдения (объекта).

Стандартный режим определения координат применяется для получения координат местоположения судна (транспортного средства) при плавании в открытом море и в прибрежной зоне. Точность автономного позиционирования в стандартном режиме оценивается с учетом основных помехообразующих факторов – погрешностей эфемерид спутников, привязки навигационного сигнала к бортовой шкале времени, инструментальных погрешностей аппаратуры и влияния внешней среды на распространение сигналов. Применение стандартного режима определения текущих координат осуществляется с учетом возможных значений погрешностей определения в зависимости от используемой ГНСС. Без использования кодов высокой точности погрешность определений координат для доверительной вероятности $P = 0,95$ составляет:

- 26 м по системе GPS;
- 40 м по системе ГЛОНАСС;
- 15 м в совмещенном режиме ГЛОНАСС/GPS;

- 15 м по системе ГАЛИЛЕО для одночастотных приемников L1;
- 10 м по системе ГАЛИЛЕО для двухчастотных приемников, работающих на частотах L1 и E5a или L1 и E5b.

Измеряемыми радионавигационными параметрами являются псевдодальности. **Псевдодальность** вычисляется как разность момента излучения сигнала НКА по системной шкале времени¹ и момента приёма данного сигнала ГНСС-приёмником, умноженная на скорость распространения радиосигнала в пространстве, приблизительно равную скорости света, с учётом возмущающих факторов, влияющих на передачу, распространение и приём навигационного сигнала [1, 2].

Предположим, что координаты (x_0, y_0, z_0) ГНСС-приёмника МПВ₀ являются известными (рис. 1). В этом случае можно вычислить истинные (точные) расстояния от ГНСС-приёмника до НКА_{*i*} как

$$\rho_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}, \quad i = \overline{1, N} \quad (1)$$

где (x_i, y_i, z_i) – известные координаты *i*-го навигационного спутника.

В действительности координаты (x_0, y_0, z_0) являются неизвестными, поэтому в принципе истинные (точные) расстояния от ГНСС-приёмника до НКА_{*i*} можно было бы измерить как

$$\rho_i = \Delta t_i \cdot c \quad (2)$$

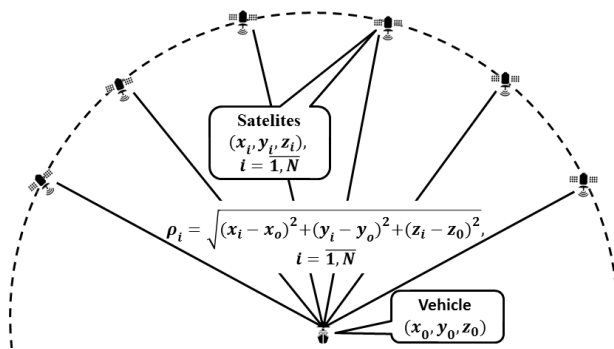


Рис. 2. Вычисление истинных (точных) расстояний от ГНСС-приёмника до НКА_{*i*}: МПВ₀ – ГНСС-приёмник (Vehicle) с известными координатами

¹ Шкала времени ГНСС – непрерывная последовательность интервалов времени определенной длительности, отсчитываемая от начального момента. Для шкалы времени устанавливают условный нуль, единицу величины и порядок корректировки. Системная шкала времени ГНСС – шкала времени, предназначенная для временной привязки основных процессов во всех подсистемах ГНСС.

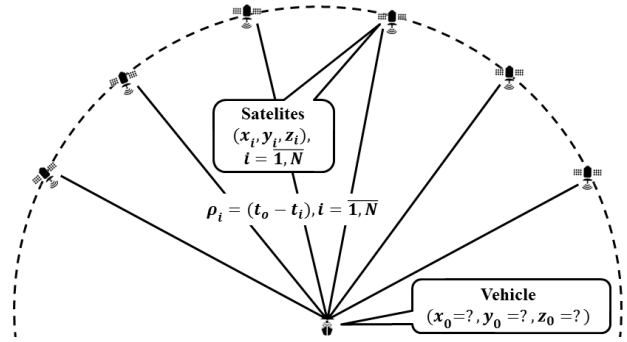


Рис. 3. Вычисление псевдодальностей ГНСС-приёмника: $t_{\text{НКА}}$ – момент передачи сигнала навигационным космическим аппаратом; $t_{\text{МПВ}}$ – момента приёма сигнала ГНСС-приёмником (МПВ₀); МПВ₀ – ГНСС-приёмник (Vehicle) с неизвестными координатами

где $\Delta t_i = t_0 - t_i$ – разность момента приёма сигнала МПВ₀ t_0 и момента передачи сигнала навигационным космическим аппаратом t_i ; c – скорость света. Однако сделать это невозможно, так как существует множество причин, из-за которых точное измерение Δt_i невозможно, поэтому запишем Δt_i как

$$\Delta t_i = t_0 - t_i + \varepsilon_i \quad (3)$$

где ε_i – неизвестная истинная ошибка измерения времени прохождения сигнала от НКА_{*i*} до МПВ₀. Таким образом, МПВ₀ измеряет времена прохождения сигнала от НКА_{*i*} до МПВ₀ приближённо

$$\Delta \hat{t}_i \cong t_{\text{МПВ}} - t_i \quad (4)$$

Соответственно, приближённо вычисляются и расстояния от НКА_{*i*} до МПВ₀ (псевдодальности)

$$\hat{\rho}_i \cong \Delta \hat{t}_i \cdot c \quad (5)$$

поэтому задача нахождения истинных координат МПВ₀ (x_0, y_0, z_0) формулируется как задача вычисления приближения к истинному значению, то есть как **задача итерационного вычисления псевдодальности**

$$\left\{ \Delta \hat{t}_i \cdot c \cong \sqrt{(x_i - \hat{x}_0)^2 + (y_i - \hat{y}_0)^2 + (z_i - \hat{z}_0)^2} \right\} \Rightarrow \Rightarrow \boxed{A \Downarrow} \Rightarrow (\hat{x}_0, \hat{y}_0, \hat{z}_0) \quad (6a)$$

где $\boxed{A \Downarrow}$ – итерационный алгоритм вычисления координат ТС по его псевдодальностям $\Delta \hat{t}_i \cdot c$.

Обратный алгоритм $\boxed{A \Uparrow}$ вычисления псевдодальностей $\Delta t_i \cdot c$ по известным координатам ТС (x_0, y_0, z_0) допускает бесконечное множество решений. Одним из множества алгоритмов решения обратной задачи по ложным координатам

транспортного средства $(\tilde{x}_0, \tilde{y}_0, \tilde{z}_0)$, применяемым в спуфинге, является алгоритм использования координат подмножества видимых НКА на момент спуфинга НКА с преднамеренным внесением искажений в псевдодальности:

$$\left\{ \Delta t_i \cdot c \cong \sqrt{(x_i - \tilde{x}_0)^2 + (y_i - \tilde{y}_0)^2 + (z_i - \tilde{z}_0)^2} \right\} \Leftarrow \Leftarrow \boxed{A \uparrow} \Leftarrow (\tilde{x}_0, \tilde{y}_0, \tilde{z}_0) \quad (6b)$$

Одноантенный спуфер

Одноантенный спуфер² в действительности имеет две антенны: приёмную и передающую. Допустим, что спуфер измеряет свои координаты как $(\hat{x}_S, \hat{y}_S, \hat{z}_S)$:

$$\left\{ \Delta \hat{t}_i \cdot c \cong \sqrt{(x_i - \hat{x}_S)^2 + (y_i - \hat{y}_S)^2 + (z_i - \hat{z}_S)^2} \right\} \Rightarrow \Rightarrow \boxed{A \downarrow} \Rightarrow (\hat{x}_S, \hat{y}_S, \hat{z}_S) \quad (7a)$$

и, не внося каких-либо изменений в принятый сигнал, транслирует его (рис. 4).

Допустим также, что ТС находится в точке $(\hat{x}_1, \hat{y}_1, \hat{z}_1)$, отстоящей от спуфера на расстоянии

$$\Delta \rho = \sqrt{(x_i - \hat{x}_S)^2 + (y_i - \hat{y}_S)^2 + (z_i - \hat{z}_S)^2} \quad (7b)$$

то есть в любой точке сферы с центром в точке $(\hat{x}_S, \hat{y}_S, \hat{z}_S)$ радиуса $\Delta \rho$ (рис. 3), при этом ТС измеряет свои координаты по сигналам спуфера:

$$\left\{ \Delta \hat{t}_i \cdot c + \Delta \rho \cong \sqrt{(x_i - \hat{x}_1)^2 + (y_i - \hat{y}_1)^2 + (z_i - \hat{z}_1)^2} \right\} \Rightarrow \Rightarrow \boxed{A \downarrow} \Rightarrow (\tilde{x}_1, \tilde{y}_1, \tilde{z}_1) \quad (7c)$$

Если переписать правую часть уравнения (7c) как:

$$\Delta \hat{t}_i \cdot c + \Delta \rho = \left(\Delta \hat{t}_i + \frac{\Delta \rho}{c} \right) \cdot c \quad (7d)$$

то $\Delta \rho/c$ можно интерпретировать как дополнительное смещение временной шкалы ТС относительно системного времени. Это означает, что все ТС, находящиеся в зоне действия спуфера, будут иметь одинаковые результаты измерения своих координат в соответствии с алгоритмом (7c):

$$\left\{ \Delta \hat{t}_i \cdot c + \Delta \rho \cong \sqrt{(x_i - \hat{x}_1)^2 + (y_i - \hat{y}_1)^2 + (z_i - \hat{z}_1)^2} \right\} \Rightarrow \Rightarrow \boxed{A \downarrow} \Rightarrow (\tilde{x}_1 \cong \hat{x}_S, \tilde{y}_1 \cong \hat{y}_S, \tilde{z}_1 \cong \hat{z}_S) \quad (7e)$$

² Термин одноантенный относится к количеству передающих антенн. *K*-антенный спуфер имеет одну приёмную антенну и *K* передающих антенн. Одноантенный спуфер может быть изготовлен на основе эмулятора ГНСС-сигналов.

Следовательно, можно записать, что координаты (x, y, z) двух транспортных средств ТС₁ и ТС₂ будут равны, то есть $\tilde{x}_1 = \tilde{x}_2$, $\tilde{y}_1 = \tilde{y}_2$, $\tilde{z}_1 = \tilde{z}_2$.

Принимая ГНСС-сигналы, спуфер вносит искусственные задержки³ в сигналы с целью преднамеренного искажения результатов вычисления координат ТС:

$$\left\{ (\Delta \hat{t}_i + e_i) \cdot c + \Delta \rho \cong \sqrt{(x_i - \hat{x}_0)^2 + (y_i - \hat{y}_0)^2 + (z_i - \hat{z}_0)^2} \right\} \Rightarrow \Rightarrow \boxed{A \downarrow} \Rightarrow (\tilde{x}_0, \tilde{y}_0, \tilde{z}_0) \quad (7f)$$

где e_i , $i = \overline{1, N}$ – искусственные задержки, вносимые спуфером; $\tilde{x}_0, \tilde{y}_0, \tilde{z}_0$ – координаты ТС, искажённые спуфером.

Результат вычислений координат (x, y, z) (7f) целиком определяет спуфер, то есть (7f) не зависит от местонахождения ТС, так как в основном сигнал в двух точках пространства различается задержкой во времени из-за разности расстояний этих точек до спуфера:

$$\left\{ \left\{ (\Delta \hat{t}_i + e_i) \cdot c + D_1 \right\} \Rightarrow \Rightarrow \boxed{A \downarrow} \Rightarrow \tilde{x}_1, \tilde{y}_1, \tilde{z}_1 \right\} \left\{ \left\{ (\Delta \hat{t}_i + e_i) \cdot c + D_2 \right\} \Rightarrow \Rightarrow \boxed{A \downarrow} \Rightarrow \tilde{x}_2, \tilde{y}_2, \tilde{z}_2 \right\} \quad (7g)$$

где D_1 и D_2 – расстояния ТС₁ и ТС₂ до спуфера. Следовательно, можно записать

$$\vec{\tilde{x}}_1, \vec{\tilde{y}}_1, \vec{\tilde{z}}_1 = \vec{\tilde{x}}_2, \vec{\tilde{y}}_2, \vec{\tilde{z}}_2 \quad (7h)$$

Двухантенный детектор спуфинга

На детекторе спуфинга (ДС) установим два приёмно-вычислительных модуля МПВ₁ и МПВ₂ на расстоянии между их антеннами D_{1-2} (рис. 4).

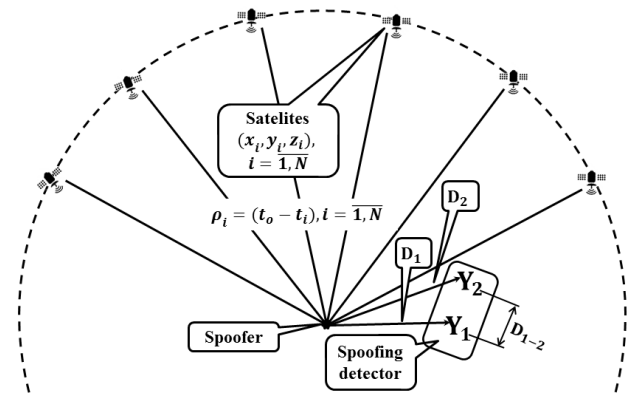


Рис. 4. Одноантенный спуфер и двухантенный детектор спуфинга (ДС): Y_1 и Y_2 – антенны ДС; D_1 и D_2 расстояния от антенны спуфера до антенн ДС, D_{1-2} – расстояние между антеннами МПВ

³ Создает matched-GNSS-signal введением задержек или синтезирует „новый альманах“, если это возможно. Для алгоритма детектирования спуфинга, рассматриваемого в данной статье, это не имеет значения.

Измерение расстояния между антеннами в режиме нормальной навигации

Два МПВ детектора спуфинга независимо друг от друга измеряют координаты антенн Y_1 и Y_2 :

$$\begin{cases} \text{МПВ}_1 \Rightarrow (\hat{x}_1, \hat{y}_1, \hat{z}_1) \\ \text{МПВ}_2 \Rightarrow (\hat{x}_2, \hat{y}_2, \hat{z}_2) \end{cases} \quad (8)$$

Результаты измерений отличаются на некоторые неизвестные, но существенно различающиеся величины и, соответственно, оценка расстояния \hat{D}_{1-2} между антеннами будет порядка величины D_{1-2} :

$$\hat{D}_{1-2} = \sqrt{(\hat{x}_1 - \hat{x}_2)^2 + (\hat{y}_1 - \hat{y}_2)^2 + (\hat{z}_1 - \hat{z}_2)^2} \geq D_{1-2} \quad (9)$$

Измерение расстояния между антеннами режиме спуфинга

С учётом свойства (7h) расстояние между антеннами МПВ₁ и МПВ₂ определяется как

$$\hat{D}_{1-2} = \sqrt{(\hat{x}_1 - \hat{x}_2)^2 + (\hat{y}_1 - \hat{y}_2)^2 + (\hat{z}_1 - \hat{z}_2)^2} \cong 0 \quad (10)$$

Решающее правило принятия решения 1

Сравнивая (9) и (10) можно записать решающее правило детектирования спуфинга

$$\text{if } \hat{D}_{1-2} \leq \tilde{D} \text{ then } \langle \text{Spoofing} \rangle \text{ else } \langle \text{GNSS} \rangle \quad (11)$$

где \tilde{D} – дискриминанта, определяемая на основе статистических исследований на этапе проектирования реальной системы детектирования.

Алгоритм детектирования спуфинга с помощью оценки дисперсии разности псевдодальностей двух МПВ

В режиме нормальной навигации псевдодальности МПВ₁ и МПВ₂ отличаются друг от друга на некоторые неизвестные, но существенно различающиеся величины

$$\Delta \hat{\rho}_i = (\hat{\rho}_{1,i} - \hat{\rho}_{2,i}) \quad (12)$$

поэтому средне-квадратическое отклонение (СКО) разностей псевдодальностей МПВ₁ и МПВ₂ будет существенно отличаться от нуля:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{GNSS}} &= \\ &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{\rho}_{1,i} - \hat{\rho}_{2,i})^2}{N-1} - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N (\hat{\rho}_{1,i} - \hat{\rho}_{2,i}) \right)^2} > 0 \end{aligned} \quad (13)$$

В режиме спуфинга псевдодальности МПВ₁ и МПВ₂ отличаются друг от друга на некоторую постоянную величину (7с), равную $D_1 - D_2$.

В этом случае СКО разностей псевдодальностей МПВ₁ и МПВ₂ практически равно нулю, то есть

$$\sigma_s = 0 \quad (14)$$

Решающее правило принятия решения 2

Сравнивая (13) и (14) можно записать решающее правило детектирования спуфинга

$$\text{if } \sigma < \frac{\sigma_{\text{GNSS}} - \sigma_s}{2} \text{ then } \langle \text{Spoofing} \rangle \text{ else } \langle \text{GNSS} \rangle \quad (15)$$

где σ – СКО разностей псевдодальностей МПВ₁ и МПВ₂ в режиме детектирования спуфинга.

Решающие правила на основе статистических исследований результатов измерений

Рассмотрим алгоритмы детектирования спуфинга на основе статистических исследований результатов экспериментальных исследований. Осуществим построение гистограммы распределения \hat{D}_{1-2} в режиме „СПУФИНГ” и в режиме „ГНСС” (пример построения гистограммы показан на рис. 5–6).

Выполним аппроксимацию гистограмм распределением Релея⁴, представляющим собой распределение вероятностей случайной величины \hat{D}_{1-2} с плотностью

$$f(\hat{D}_{1-2}; \sigma) = \frac{\hat{D}_{1-2}}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{\hat{D}_{1-2}^2}{2\sigma^2}\right), \hat{D}_{1-2} \geq 0, \sigma > 0 \quad (16)$$

где σ – параметр масштаба, смысл которого показан на рис. 7.

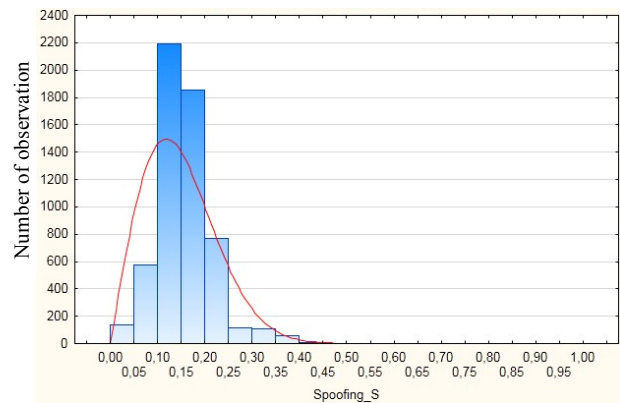


Рис. 5. Гистограмма \hat{D}_{1-2} и результат её аппроксимации функцией Релея в режиме „СПУФИНГ”; $\sigma_s = 0,12$ (результат моделирования спуфинга)

⁴ По мнению авторов функция распределения Релея хорошо согласуется с физическим смыслом понятия „расстояние между двумя МРВ”.

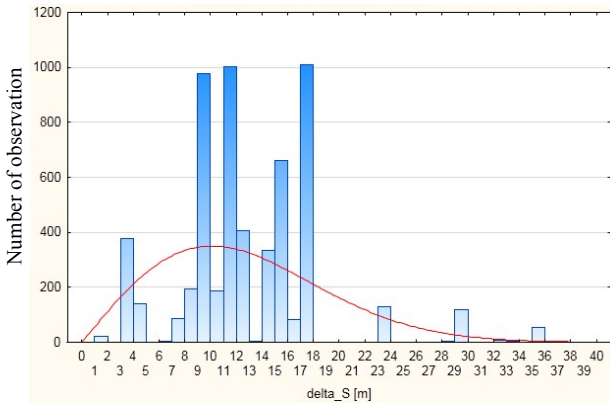


Рис. 6. Гистограмма \hat{D}_{1-2} и результат её аппроксимации функцией Релея в режиме „ГНСС”; $\sigma_S = 10,06$ (реальные данные)

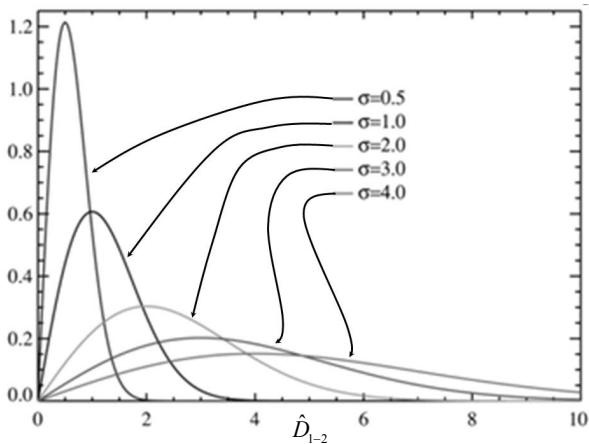


Рис. 7. Распределения Релея случайной величины \hat{D}_{1-2} с различными параметрами масштаба σ

Выполняя аппроксимацию гистограмм случайной величины \hat{D}_{1-2} функцией распределения Релея, получаем параметры масштаба для режима „СПУФИНГ” σ_S и для режима „ГНСС” σ_{GNSS} .

В режиме „Детектирование спуфинга” ДС осуществляет непрерывную серию измерений расстояния между антеннами МПВ₁ и МПВ₂ (9)

$$\hat{D}_1, \hat{D}_2, \dots, \hat{D}_j, \dots, \hat{D}_\infty \quad (17)$$

и формирует скользящую выборку из K измерений

$$\vec{D}_j = \hat{D}_{j-1}, \hat{D}_{j-2}, \dots, \hat{D}_{j-k}, \dots, \hat{D}_{j-K}, k = \overline{1, K} \quad (18)$$

где K – размер скользящего окна выборки.

На основе (18) вычисляется гистограмма распределения и её аппроксимация функцией распределения Релея. В результате получаем параметр масштаба σ_j скользящей выборки из K измерений (рис. 5–6).

Решающее правило принятия решения 3

$$\text{if } \sigma_j \leq \frac{\sigma_{GNSS} - \sigma_S}{2} \text{ then } \langle \text{Spoofing} \rangle \text{ else } \langle \text{GNSS} \rangle \quad (19)$$

Так, например, на рис. 7 показаны две гистограммы \hat{D}_{1-2} и их аппроксимации функциями распределения Релея для спуфинга (слева) и для режима нормальной навигации (рис. 5 и 6). В качестве границы σ разделения результатов измерений \hat{D}_{1-2} на два класса можно принять $\sigma = (10,06 + 0,12) / 2 \cong 5$.

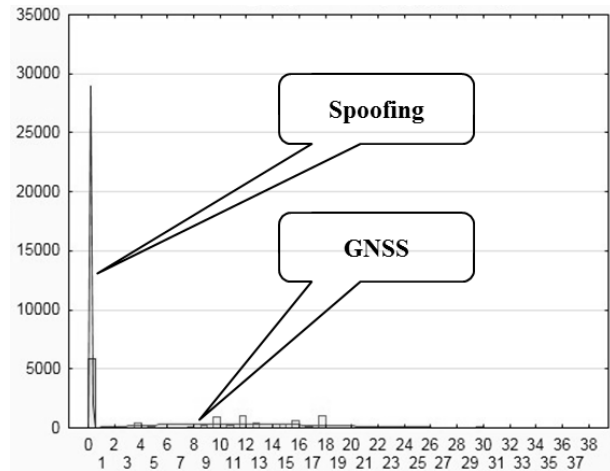


Рис. 8. Гистограммы \hat{D}_{1-2} и их аппроксимации функциями распределения Релея для спуфинга (слева) и для режима нормальной навигации (рис. 5 и 6)

Подобным образом определяются параметры масштаба для дисперсии разностей псевдодальностей МПВ₁ и МПВ₂ (7b). В режиме „Детектирование спуфинга” ДС осуществляет непрерывную серию вычислений СКО разностей псевдодальностей МПВ₁ и МПВ₂

$$\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_j, \dots, \sigma_\infty \quad (20)$$

и формирует скользящую выборку из K измерений

$$\vec{\sigma}_j = \overrightarrow{\sigma_{j-1}, \sigma_{j-2}, \dots, \sigma_{j-k}, \dots, \sigma_{j-K}} \quad (21)$$

на основе которой вычисляется гистограмма распределения и её аппроксимация функцией распределения Релея. В результате получаем параметр масштаба σ_j скользящей выборки из N измерений.

Решающее правило принятия решения 4

$$\text{if } \sigma_j \leq \frac{\sigma_{GNSS} - \sigma_S}{2} \text{ then } \langle \text{Spoofing} \rangle \text{ else } \langle \text{GNSS} \rangle \quad (22)$$

Обсуждение четырёх решающих правил принятия решения 1÷4

Детектор спуфинга может быть спроектирован на основе одного из решающих правил 1÷4 или на основе любого сочетания из двух, трёх или четырёх правил принятия решения. В любом случае необходимо рассчитывать вероятности событий „Ложная тревога”⁵ и „Пропуск цели”⁶ (табл. 1).

Табл. 1. Ошибки принятия решения первого рода (*Ложная тревога*) и второго рода (*Пропуск цели*)

Решающее правило (1÷4) или сочетание из двух, трёх или четырёх правил принятия решения		Действительный режим	
		ГНСС	СПУФИНГ
Решение Детектора Спуфинга	ГНСС	Решение верное	<i>Пропуск цели</i>
	СПУФИНГ	<i>Ложная тревога</i>	Решение верное

Вопросы оптимального проектирования и выбора граничных условий с целью минимизации вероятностей „ложной тревоги” и „пропуска цели” выходят за рамки данной статьи. Здесь лишь отметим, что одним из широко распространённых приёмов является применение теоремы Байеса (или формулы Байеса) [8].

Заключение

Данный подход к построению алгоритмов детектирования ГНСС-спуфинга описан впервые и позволяет приступить к инженерному проектированию реальных систем детектирования спуфинга. Технология экспериментальных исследований в режиме нормальной навигации частично описана в [6], однако для экспериментальных исследований в режиме спуфинга авторам не удалось найти доступ к специальному оборудованию, создающему физическую модель спуфера. Тем не менее авторы прилагают значительные усилия для приобретения спуфера или для временной эксплуатации такого оборудования в какой-либо польской или зарубежной организации и предлагают сотрудничество и объединение усилий для развития этого сравнительно нового научного направления.

Литература

1. GPS Standard Positioning Service (SPS) Performance Standard, 4th Edition (now in effect), September 2008.
2. Глобальные навигационные спутниковые системы. Судовая многосистемная, многоканальная аппаратура потребителей ГНСС ГЛОНАСС/GPS/ ГАЛИЛЕО. Технические характеристики, методы и требуемые результаты испытаний. Национальный Стандарт Российской Федерации, ГОСТ Р 54119-2010.
3. Specht C.: System GPS. Biblioteka Nawigacji nr 1, Wydawnictwo Bernardinum, Pelplin 2007.
4. Montgomery P.Y., Humphreys T.E., Ledvina B.M.: Receiver-Autonomous Spoofing Detection: Experimental Results of a Multi-antenna Receiver Defense Against a Portable Civil GPS Spoofer ION 2009 International Technical Meeting, 2009.
5. Cocard M.: High precision GPS processing in kinematic mode. Schweizerischen Geodätischen Kommission, Zweiundfünfzigster Band, Voleum 52, 1995.
6. Ochin E., Dobryakova L., Lemieszewski Ł.: Antiterrorism – design and analysis of GNSS antispoofing algorithms. Scientific Journals Maritime University of Szczecin, 2012, 30(102), 93–101.
7. Статистические методы. Вероятность и основы статистики. Термины и определения. Национальный Стандарт Российской Федерации, ГОСТ Р 50779.10-2000.
8. Перов А.И.: Статистическая теория радиотехнических систем. Радиотехника, 2003.

Благодарность

Авторы выражают искреннюю благодарность д.т.н. проф. капитану дальнего плавания Е.М. Лушникову (luszniakow@am.szczecin.pl) за многочасовые дискуссии о проблемах морской метрологии, безопасности плавания на море и практической значимости ГНСС-навигации на море, продолжавшиеся ежедневно с 04 по 16 июля 2013 г. За эти две недели изменилась не только методика изложения материала, но и содержание статьи.

⁵ false positives

⁶ false negatives