

# Применение метода роя частиц для обнаружения имитационных помех в навигационной аппаратуре потребителя

С. В. Барякшев\*, А. В. Назаров

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

\* serg.baryakshev@yandex.ru

**Аннотация.** В работе описано разложение взаимно корреляционной функции на составляющие компоненты на основе метода роя частиц. Данный метод позволяет обнаружить имитационные помехи на стадии первичной обработки.

**Ключевые слова:** навигационная аппаратура потребителя, имитационная помеха, метод роя частиц

## I. ВВЕДЕНИЕ

Навигационная аппаратура потребителя (НАП) глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) используется для определения местоположения, скорости, направления движения, а также для получения точного времени во всем мире. Однако они уязвимы к действию шумовых и имитационных помех. Шумовое подавление НАП осуществляется путем постановки шумовых помех, воздействие которых на приемник приводит к невозможности обнаружения НАП полезного сигнала. Имитационные помехи (спуфинг) – это помехи, которые по своим параметрам одинаковы с параметрами полезного сигнала, за исключением состава цифровой информации, что приводит к навязыванию НАП ложных значений координат и времени [1].

В настоящее время от достоверной и непрерывной работы ГНСС зависит бесперебойное функционирование многих критических инфраструктур, таких как энергетическая, банковская и транспортная. В связи с этим актуальной является разработка алгоритмов борьбы с имитационными помехами ГНСС.

Целью этой статьи является обнаружение воздействия имитационной помехи на НАП. В статье описан метод разложения взаимно корреляционной функции (ВКФ) на составляющие компоненты на основе метода роя частиц. Данный метод может обнаруживать спуфинг, когда истинный и ложный навигационные сигналы незначительно отличаются значениями задержки дальномерного кода и доплеровского сдвига частоты, что соответствует сложным сценариям постановки имитационных помех. Предложенный алгоритм позволяет идентифицировать помеху на стадии первичной обработки и не требует аппаратной модификации НАП.

## II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Сигнал навигационного космического аппарата (НКА) у поверхности Земли можно представить в следующем виде [2]:

$$S_i(t) = A_i(t) \cdot D_i(t) \cdot C_i(t) \cos[(2\pi(f_0 + F_{D_i}))(t - \tau_i) + \varphi_{si}], \quad (1)$$

где  $A_i(t)$  – амплитуда сигналов,  $D_i(t)$  – символы цифровой информации,  $C_i(t), C_{fi}(t)$  – символы дальномерного кода (ДК),  $f_0$  – частота несущей,  $F_{D_i}(t)$  – частота доплеровского сдвига,  $\tau_i(t)$  – задержка ДК.

Тогда на входе приёмника наблюдается реализация  $y(t)$  полезного сигнала  $S_i(t)$  и аддитивного белого гауссовского шума  $n(t)$ :

$$y(t) = S_i(t) + n(t). \quad (2)$$

Корреляционная функция дальномерного кода:

$$R(\square \tau) = \frac{1}{T} \int_0^T D(t - \tau) h_{dk}(t - \hat{\tau}) dt. \quad (3)$$

Тогда уравнение (1) можно записать в виде:

$$S(\hat{\tau}, F_{D_i}, \varphi) = AR(\square \tau) \text{sinc}[(\pi(F_{D_i} - F_D)T)] \exp(i\pi(F_{D_i} - F_D)T + \varphi - \varphi). \quad (4)$$

Обнаружение сигнала в приемниках осуществляется путем двумерного поиска последовательным перебором с определенной дискретностью величин задержек  $\tau$  и частот  $f$  в диапазоне их возможных значений.

При отсутствии имитационных помех ВКФ имеет вид, представленный на рис. 1.

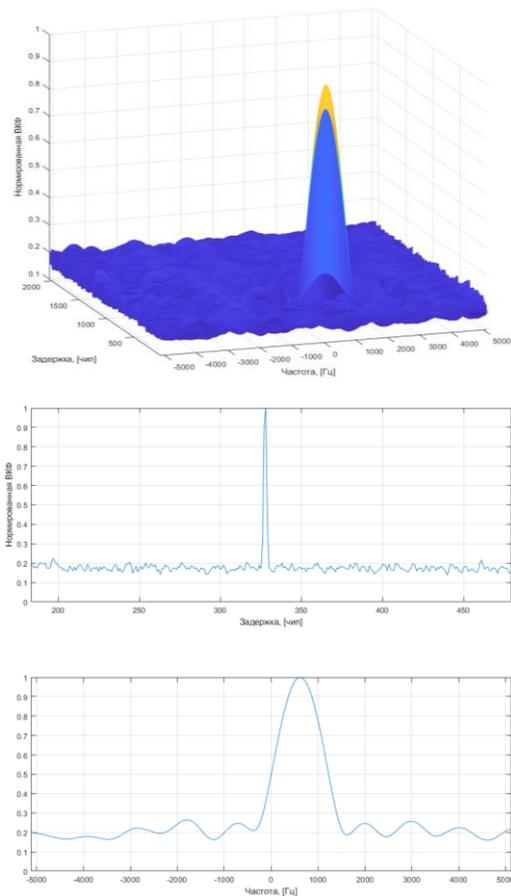


Рис. 1. ВКФ принятого сигнала

В случае воздействия на НАП имитационной помехи, не согласованной по кодовой задержке и доплеровской частоте с истинным сигналом, в пространстве поиска наблюдается два корреляционных пика, как показано на рис. 2а. Однако, если кодовые задержки и доплеровские частоты согласованы, два пика сливаются в один (рис. 2б). Стратегия навязывания ложных навигационных определений состоит в том, что в момент перезахвата кольцами слежения ложного навигационного сигнала, истинный и ложный сигнал идентичны по задержке и доплеровскому сдвигу частоты имеют отличные значения по мощности. После начала слежения за ложным сигналом происходит навязывание ложных навигационных определений, состоящее в изменении доплеровского сдвига частоты и задержки по законам изменения, отличающимся от истинного сигнала [3].

Предлагаемая идея состоит в том, чтобы разложить взаимно ВКФ сигналов на их составляющие параметры.

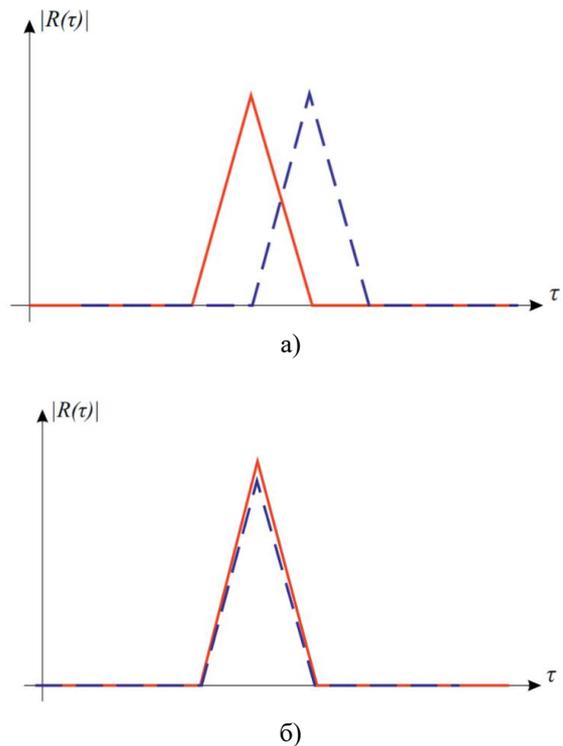


Рис. 2. ВКФ при воздействии имитационной помехи

В случае воздействия на НАП совокупности ложных сигналов на входе навигационного приёмника наблюдается реализация  $y(t)$  следующего вида:

$$y(t) = S_i(t) + S_{fi}(t) + v(t), \quad (5)$$

где  $S_{fi}(t) = A_{fi}(t) \cdot D_{fi}(t) \cdot C_{fi}(t) \cos[(2\pi(f_0 + F_{Dfi})(t - \tau_{fi}) + \varphi_{fsi})]$ , является ложным сигналом.

Тогда выражение (4) можно представить в виде:

$$S_N(\tau, F_D, \varphi) = \sum_{i=1}^2 \alpha_i R(\tau_i - \hat{\tau}) \text{sinc}[(\pi(F_{Di} - F_D)T] \exp(i\pi(F_{Di} - F_D)T + \varphi_i - \varphi).$$

Для разложения сигналов мы стремимся получить оценку параметров  $(\hat{\tau}, F_D)$ , которая минимизирует функцию стоимости:

$$J = \left\| S_N(\tau, F_D, \varphi) - S_N(\hat{\tau}, F_D, \varphi) \right\|^2. \quad (6)$$

Для минимизации функции (6) предлагается использовать метод глобальной оптимизации – метод роя частиц. Несмотря на множество методов оптимизации, применяемых в различных сферах деятельности, выбор в пользу метода роя частиц был сделан в силу его эффективности при оптимизации многоэкстремальных функций, позволяющей избежать преждевременной сходимости в локальных экстремумах [4]. Алгоритм МРЧ применяется для минимизации функции стоимости  $J$ , указанной в (6). Значения  $S_N(\hat{\tau}, f_D)$  сформированы на основе лучшего глобального решения алгоритма МРЧ.

В вычислительной технике оптимизация методом роя частиц (МРЧ) – это алгоритм оптимизации, который работает путем случайной генерации популяции «частиц»  $n$ , которые являются возможными решениями задачи [5]. Поведение частицы в пространстве поиска решения основано на изменении своей скорости  $V_i$  на основе собственного наилучшего известного положения  $p_i$  и наилучшего известного положения  $g$  всей популяции, как показано в (7) и (8):

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1), \quad (7)$$

$$v_i(t+1) = w \cdot v_i(t) + c_1 \cdot r_1 \cdot (p_i(t) - x_i(t)) + c_2 \cdot r_2 \cdot (b(t) - x_i(t)), \quad (8)$$

где  $r_1, r_2$  – равномерно распределенные случайные числа с  $N(\mu, \sigma^2)$ ,  $w$  – коэффициент инерции,  $c_1, c_2$  – коэффициенты ускорения,  $p_i(t)$  – наилучшее локальное положение,  $b(t)$  – наилучшее глобальное положение.

Когда частица находит лучшую позицию, в которой функция стоимости имеет меньшее значение, чем в предыдущей известной позиции,  $p_i$  обновляется на основе уравнения 9:

$$p_i(t+1) = \begin{cases} p_i(t) & f(p_i(t)) \leq f(x_i(t+1)) \\ x_i(t+1) & f(p_i(t)) > f(x_i(t+1)) \end{cases} \quad (9)$$

Если позиция этой частицы является лучшей среди всех других позиций частиц (минимизирует функцию стоимости),  $b$  обновляется на основе уравнения 10 и называется лучшим глобальным решением роя:

$$b(t+1) = \max \{f(p_i(t)), f(b(t))\}. \quad (10)$$

Для оценки возможностей алгоритма был проведен эксперимент по поиску радионавигационных сигналов при воздействии имитационных помех.

Схема проведения эксперимента представлена на рис. 3.

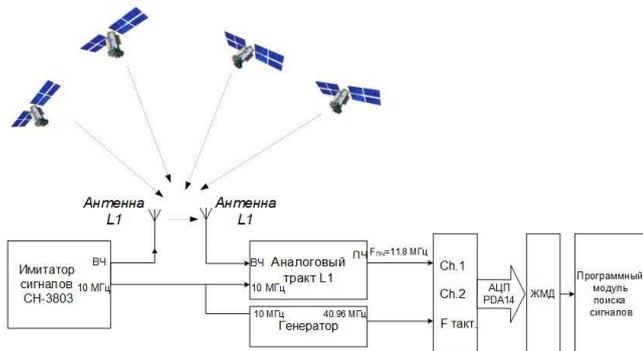


Рис. 3. Схема проведения эксперимента

В ходе эксперимента ложное навигационное поле в месте расположения приемной антенны НАП создавалось имитатором навигационных сигналов СН-3803. Навигационных сигналов в цифровом виде записывался на накопитель с тактовой частотой

40.96 МГц. Дальнейшая обработка осуществлялась в апостериорном режиме программными методами в среде программирования *Matlab*.

Интервал когерентного накопления – 1 мс, некогерентного – 10 мс. Шаг поиска по задержке – 0.5 чипа. Интервал поиска по частоте от –5 кГц до +5 кГц с шагом 50 Гц. Представлены результаты обнаружения сигнала от НКА GPS № 11.

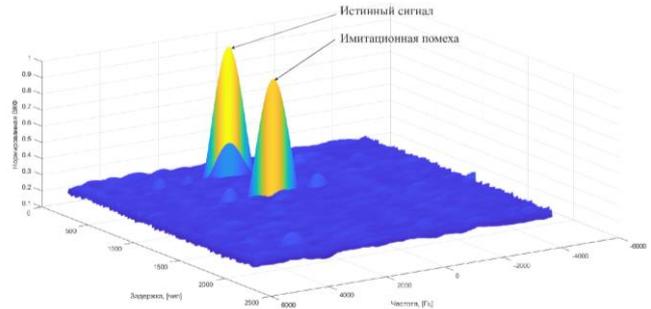


Рис. 4. ВКФ Истинного и ложного сигнала в пространстве поиска по частоте и задержке

В примере на вход приемника поступает два сигнала, в которых доплеровские частоты и кодовые задержки не согласованы в пространстве измерений. В условиях наблюдения в пространстве поиска по задержке и частоте стандартный алгоритм обнаруживает один пик, которому соответствует сигнал наибольшей мощности, что с учетом навязывания ложных навигационных определений приведет к неверному решению навигационной задачи. Предложенный алгоритм обнаруживает оба пика ВКФ, и оценённые им значения параметров сигнала близки к истинным параметрам, как показано в таблице примера 1.

ТАБЛИЦА I. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ АЛГОРИТМА

	Истинные параметры сигналов	Результаты работы стандартного алгоритма	Результаты работы алгоритма МРЧ
<b>1 пик</b>			
$R$	1	1	1
$\tau$ , чип	328	328	328
$F_D$ , Гц	640	640	640
<b>2 пик</b>			
$R$	0.808	-	0.8
$\tau$ , чип	814	-	814
$F_D$ , Гц	600	-	598

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложенный алгоритм позволяет осуществлять оценку параметров ложного и истинного сигналов в двумерном пространстве поиска в условиях, при которых стандартный алгоритм следит только за одним ложным сигналом. Разработанный алгоритм не требует аппаратных модификаций и может быть использован в НАП в качестве основы для построения алгоритмов (стратегий) восстановления достоверных навигационных определений в условиях воздействия имитационных помех.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Humphreys T., Psiaki M. GNSS Spoofing and Detection. Proc. Of IEEE, 2016. Vol. 104. Issue 6. P. 1258–1270.
- [2] Перов А.И., Харисов В.Н. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Изд. 4-е, перераб.и доп. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.
- [3] Christopher H., O'Hanlon B., Odeh A., Shallberg K. und Flake J., «Spoofing Detection in GNSS Receivers through CrossAmbiguity Function Monitoring» // Proceedings of the 32nd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2019), Miami, Florida, 2019.
- [4] Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. М.: Мир, 1985, 509 с.
- [5] Певнева А.Г., Калинкина М.Е. Методы оптимизации. СПб: Университет ИТМО, 2020. 64 с.