

СПОСОБЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ЛОЖНЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ

С.А. Якушенко, канд. техн. наук, доцент, ст. науч. сотр. НИЦ

А.Н. Забело, канд. воен. наук, доцент

В.Е. Егрушев, канд. техн. наук, доцент

С.С. Веркин, канд. техн. наук, преподаватель

В.В. Антонов, преподаватель

Е.В. Чеканова, преподаватель

Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного
(Россия, г. Санкт-Петербург)

DOI:10.24412/2500-1000-2022-9-1-80-86

***Аннотация.** В работе исследованы вопросы ввода ложных сигналов и искусственных радионавигационных полей спутниковых радионавигационных систем в условиях информационного воздействия. Предложены способы их обнаружения на основе измерения параметров широкополосных сигналов и сигналоподобных помех в частотно-временной области линейного пространства Гильберта, прогнозирования данных альманаха и мониторинга целостности радионавигационного поля.*

***Ключевые слова:** ложные сигналы, искусственные радионавигационные поля, спутниковые радионавигационные системы, пропускная способность, информационное воздействие.*

В современных системах управления различных структур средства и комплексы навигационного обеспечения включены в информационный контур управления. Совместно с глобальной спутниковой связью они вносят неопределимый вклад в системы управления различных структур и позволяют многократно повысить их потенциал [1, с. 5].

Включение навигационной информации в контур управления является важным и в тоже время ответственным фактором, так как требует от нее надежного и достоверного обеспечения. Однако, радиолинии спутниковых радионавигационных систем (СРНС) крайне уязвимы к организованному информационному воздействию, что может привести к снижению эффективности навигационного обеспечения систем управления, что подтверждается в разных конфликтах. Поэтому исследование способов обнаружения ложных радионавигационных полей является актуальным вопросом.

Информационное воздействие на аппаратуру спутниковой навигации

Информационное воздействие на аппаратуру спутниковой навигации (АСН) пользователя возможно посредством ис-

кажения или уничтожения радионавигационной информации, радиоэлектронного подавления навигационных линий, а также введения ложной навигационной информации или создания искусственных радионавигационных полей. При этом средства информационного воздействия будут стремиться создавать оптимальную помеху при минимально возможных затратах мощности передатчика помех. Под оптимальной помехой будем понимать сигналоподобную помеху, которая по структуре максимально близка к структуре радионавигационного сигнала. В этом случае влияние помехи будет зависеть не только от энергетических соотношений сигнал/помеха на входе приемника АСН, но и от вида структуры помехи [1, 2, 3, с. 15].

Основной причиной эффективного воздействия на радиолинии является низкий уровень радионавигационного сигнала на входе приёмников и возможность создания передатчиком помех мощной помехи. Особенности информационного воздействия на АСН приведены на рис. 1. В систему информационного воздействия должны входить подсистемы мониторинга, формирования и постановки оптимальных помех. Воздействие осуществляется, как

правило, с летно-подъёмных средств одновременно всех радионавигационных ли-

ний, находящихся в зоне подавления.

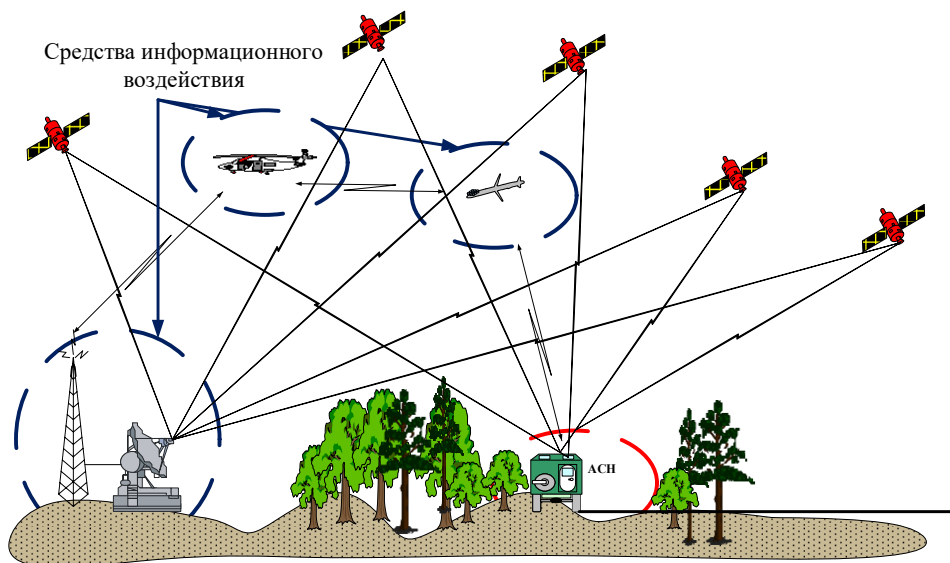


Рис. 1. Особенности информационного воздействия на аппаратуру спутниковой навигации

В качестве оптимальной помехи в работе рассматривается имитационная, так как по структуре она приближается к оптимальной. Имитационные помехи могут использоваться как ложные сигналы, а также для перегрузки каналов первичной обработки информации (блока поиска и захвата сигналов, следящие системы за параметрами навигационных сигналов) с целью нарушения функционирования навигационного приёмника. Оптимальная помеха должна формироваться процессом, сходным с навигационным сигналом (генераторным или ретрансляционным способом).

Способы обнаружения ложных радионавигационных сигналов и искусственных радионавигационных полей

Для защиты АСН от имитационных помех вначале необходимо их обнаружить. В

работе предложено три способа обнаружения имитационных сигналов, основанных на измерении параметров сигналоподобных помех в частотно-временной области линейного пространства Гильберта, на использовании данных альманаха и алгоритмов прогнозирования движения навигационных космических аппаратов (НКА), а также на контроле целостности радионавигационного поля.

Различимость структур радионавигационных сигналов и имитационных помех в частотно-временной области может быть определена в линейном пространстве Гильберта [1, 4]. В пространстве Гильберта радионавигационный сигнал $s(t)$ длительностью T можно представить в комплексной форме

$$s(t) = \underbrace{\sum_{k=0}^{\infty} [a_k \cos(\omega_k t) + b_k \sin(\omega_k t)]}_{s(t)} + j \underbrace{\sum_{k=0}^{\infty} [a_k \sin(\omega_k t) - b_k \cos(\omega_k t)]}_{s'(t)}. \quad (1)$$

В общем виде выражение (1) можно записать

$$\dot{s}(t) = s(t) + js'(t), \quad (2)$$

где $s'(t)$ – сигнал, сопряженный по Гильберту с сигналом $s(t)$;

$\omega_k = k\omega_0 = 2\pi k/T$ – частотные составляющие спектра сигнала;

$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \cos(\omega_k t) dt$; $b_k = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \sin(\omega_k t) dt$ – коэффициенты преобразования.

Сигнал, определенный в виде (1) и (2), где вещественная и мнимая части сопряжены по Гильберту, называется аналитическим. Мнимая часть отличается от вещественного фазового сдвига на $\pi/2$. Поэтому процедуру вычисления взаимосвязи пара-

метров сигналов и помех можно проводить на основе преобразования по Гильберту. Количественная оценка величины взаимосвязи в частотно-временной области может осуществляться с помощью коэффициента взаимного различия (КВР) [1, 4]:

$$\zeta_{rqi}^2 = L_0 \left\{ \left[\int_0^T s_{rq}(t) x_{pi}(t) dt \right]^2 + \left[\int_0^T s_{rq}(t) x'_{pi}(t) dt \right]^2 \right\}, \quad (3)$$

где $s_{rq}(t)$ – радионавигационный сигнал r -й структуры в радиолинии и принятый на q -ой частоте (канале) АСН, $r \in \{1, 2, \dots, R\}$, R – общее количество используемых структур сигналов, $q \in \{1, 2, \dots, Q\}$, Q – общее число каналов, используемых для приема сигнала, то есть $s_{rq}(t)$ – это функция, определяющая структуру передаваемого варианта сигнала в канале;

$x_{pi}(t)$ – некоторая детерминированная функция, характеризующая форму (структуру) i -й помехи на длительности T элемента полезного сигнала в q -м канале приема, $i \in \{1, 2, \dots, N\}$, N – общее количество вариантов (структур) сосредоточенных помех, действующее на входе приемника;

$x'_{pi}(t)$ – функция (помеха), сопряженная с $x_{pi}(t)$ по Гильберту;

L_0 – некоторая постоянная, не зависящая от структуры используемых сигналов и воздействующих помех, определяемая из условий нормирования КВР и удобства расчетов.

Таким образом, КВР безразмерная величина, которая определяет относительное перекрытие в частотно-временной области сигналов и помех. Чем меньше этот параметр, тем меньше взаимное влияние структур $s_{rq}(t)$ и $x_{pi}(t)$.

Значение КВР ζ_{rqi}^2 определяется огибающей двумерной функцией сигналов при $\Delta t_{rqi} \neq 0$ и $\Delta F_{rqi} \neq 0$ на длительности сигнала T . Влияние каждого из этих параметров можно установить как сечение по одномерной функции. В общем случае КВР для имитационной помех определяется при условии $\Delta t_{rqi} \neq 0$ и $\Delta F_{rqi} \neq 0$ для каждого конкретного типа сигналов и помех. Поэтому их можно рассматривать как независимые события.

Временное сечение одномерной функции имеет вид: $\Delta t_{rqi} \neq 0$, $\Delta F_{rqi} = 0$. Характер изменения нормированной функции ζ_{0rqi}^2 в зависимости от относительной временной (фазовой) расстройки $f_0 \Delta t_{rq}$ при $-T/2 \leq \Delta t_{rqi} \leq T/2$ и фиксированной базе сигнала показан на рисунке 2.

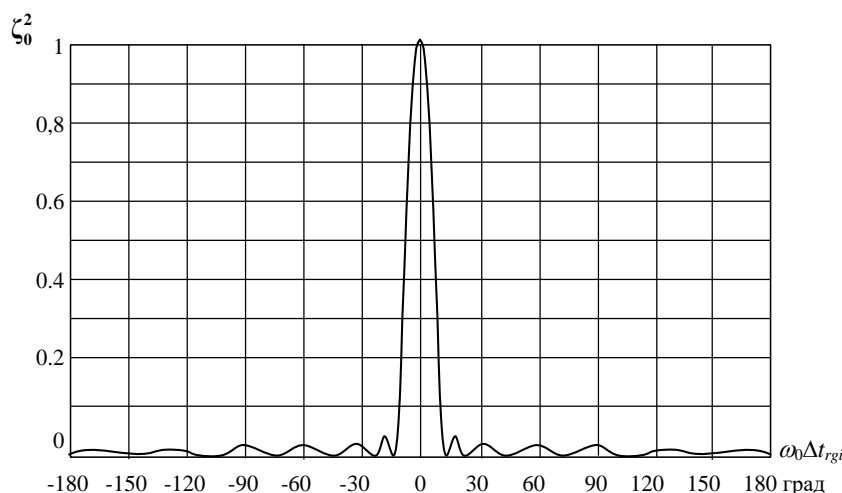


Рис. 2. Одномерная функция КВР во временной области

Функция $\zeta_{0\ rqi}^2$ имеет область сильной взаимосвязи при $|\Delta t_{rq}| < 1/F_{rq}$, т.е. при небольших задержках помехи относительно начала отсчета полезного сигнала. С увеличением широкополосности сигнала ($F_{rq}T \gg 1$) функция сужается, появляются максимумы и нули, которые зависят от кратности временной задержки помехи относительно сигнала. С увеличением полосы частот сигнала F_{rq} при постоянной скорости передачи полезного сигнала уменьшается ширина области сильной взаимосвязи сигнала и помехи и снижается уровень побочных максимумов. Наибольший из побочных максимумов соответствует $\Delta t_{rq} \approx \pm 3/2F_{rq}$. Его величина не пре-

вышает 4% от уровня максимального, а остальные максимумы имеют еще меньшую величину.

Влияние сдвига частот сигнала и помехи Δf_{rqi} на ζ_{rqi}^2 или $\zeta_{0\ rqi}^2$ наиболее просто можно установить по второму сечению $\Delta t_{rqi} = 0, \Delta F_{rqi} \neq 0$ двумерной функции. Характер изменения четной, непериодической функции $\zeta_{0\ rqi}^2$ от ΔF_{rqi} при $|\Delta F_{rqi}| < 2\pi/T$ показан на рис. 3. Для значений $|\Delta F_{rqi}| < 1/T$ имеет область сильной взаимосвязи структур сигнала и помехи. Также наблюдаются нули при $|\Delta F_{rqi}| = k/T$ и побочные максимумы при $|\Delta F_{rqi}| = (k+0,5)/T$.

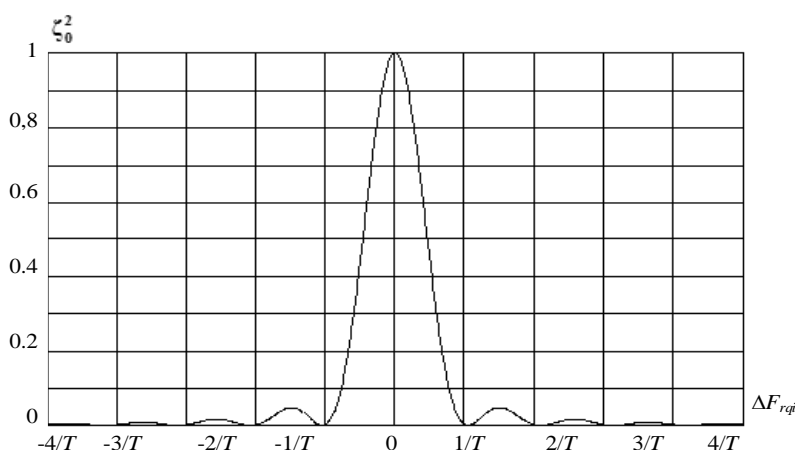


Рис. 3. Одномерная функция коэффициента взаимного различия в частотной области

Анализ параметров радионавигационных линии и линий радиоподавления показывает, что частотная расстройка сигнала и помехи является очень малой величи-

ной и поэтому КВР в частотной области стремится к 1. Временная задержка ретрансляционной помехи значительна, что снижает величину КВР.

В данном случае, термин «взаимное различие» сигналов и помех не имеет статистического смысла, а определяется в процессе приема. Поэтому КВР более содержателен, поскольку охватывает как случаи, когда сигнал и помеха различны по своей структуре, так и случаи, когда помеха является некоторой копией полезного сигнала (имитационная помеха), отличающейся от сигнала, например, задержкой во времени Δt , значением средней частоты ΔF и т. д.

Искусственное радионавигационное поле обнаруживается путем фиксирования имитационных помех в трех и более каналах приема, а АСН сигнализирует об этом пользователя световым и звуковым сигналом.

Способ обнаружения ложных радионавигационных сигналов на основе использования данных альманаха и алгоритмов прогнозирования движения НКА предполагает расчет времени моментов входа и выхода радионавигационных сигналов в шаровой сектор видимости НКА. Если НКА не входит в зону видимости, то принимается решение о воздействии или навязывании ложного радионавигационного сигнала. АПН принимает решение о ложном сигнале, который не используется в определении координат (частотный канал выключается).

Выделим задачи предлагаемого метода.

1. Для заданной зоны ввести геометрические характеристики топологии местности расположения АСН и произвести расчет угла маски:

$$\beta_m(\alpha) = \left| \arctg \left(\frac{H_{л}}{R_{л}} \cdot \sin \alpha \right) \right|. \quad (4)$$

где $H_{л}$ – высота леса; $R_{л}$ – расстояние от АСН до края леса; α – угол наблюдения НКА. Угол маски характеризует степень влияния препятствий и рельефа.

2. Провести имитационное моделирование движения НКА на интересующем периоде времени T и в заданном районе с помощью данных альманаха и специализированной программы для прогнозирования движения НКА в [1].

3. Вычислить для каждого НКА угол видимости $\beta\{НКА(n(t))\}$;

4. Сравнить расчетные и реальные параметры углов маски и углов видимости и принять решение о ложном источнике радионавигационного сигнала.

Таким образом, данный метод позволяет обнаружить ложные радионавигационные сигналы с помощью расчета угла маски, алгоритмов прогнозирования движения НКА и данных альманаха. Для защиты от воздействия ложного источника необходимо сформировать «0» диаграммы направленности приемной цифровой антенной решетки (ЦАР) в направлении предполагаемого источника.

Для идентификации имитационных по-

мех можно использовать процедуры контроля целостности навигационного поля, позволяющие зафиксировать ситуации, когда радиосигналам СРНС нельзя доверять. Надежным методом контроля целостности СРНС является пеленгационный метод, основанный на анализе направлений на источники навигационных сигналов, получаемых путем пеленгации с использованием, например, ЦАР. Существующие алгоритмы принятия решения предполагают использование для каждой наблюдаемой группировки НКА своего оптимального по критерию Неймана-Пирсона порога принятия решения. Реализация таких алгоритмов связана с большими вычислительными затратами. Поэтому экономичнее применять алгоритм принятия решения на основе фиксированного порога, не зависящего от вида наблюдаемой группировки НКА.

Пеленгация может производиться, например, интерферометрическим методом, основанном на измерении разностей фаз сигналов от НКА, принятых на разнесенные в пространстве элементы ЦАР. В этом случае в качестве дополнительных

измеряемых параметров рассматриваются оценки пеленгационных параметров НКА – азимут $\mu_{\text{изм}}$ и угол места $\beta_{\text{изм}}$, которые сравниваются с пеленгационными параметрами $\mu_{\text{расч}}$ и $\beta_{\text{расч}}$ рассчитанными на основе эфемероидных данных. В случае, когда по тем или иным причинам знание о взаимном положении НКА и АСН является неверным, т. е. при нарушении целостности навигационного поля, полученные при расчете пеленгационные параметры $\mu_{\text{расч}}$ и $\beta_{\text{расч}}$ значительно отличаются от измеренных $\mu_{\text{изм}}$ и $\beta_{\text{изм}}$.

Для решения навигационной задачи необходимо обрабатывать сигналы как минимум от четырех НКА. В реальных условиях количество радионавигационных сигналов определяется количеством види-

мых НКА в зоне расположения АСН (M – навигационных сигналов).

Для решения навигационной задачи и принятия решения о наличии или отсутствии целостности навигационного поля анализируются M – мерные выборки расчетных $\mu_{\text{расч}}^j$, $\beta_{\text{расч}}^j$ ($j = 1, \dots, M$) значений углов азимута и угла места для всех M -НКА и измеряемых $\mu_{\text{изм}}^j$, $\beta_{\text{изм}}^j$ значений тех же углов.

Когда нарушение целостности навигационного поля отсутствует (справедлива нулевая гипотеза H_0), оценки (x_0, y_0, z_0) координат АСН близки к своим истинным значениям (x_i, y_i, z_i) , а расчетные $\mu_{\text{расч}}^j$, $\beta_{\text{расч}}^j$ пеленгационные параметры близки к измеренным $\mu_{\text{изм}}^j$, $\beta_{\text{изм}}^j$, т.е. их математические ожидания совпадают:

$$m_1 \left\{ \mu_{\text{расч}}^{(j)} \right\} = m_1 \left\{ \mu_{\text{изм}}^{(j)} \right\} = \mu_0^{(j)}, \quad m_1 \left\{ \beta_{\text{расч}}^{(j)} \right\} = m_1 \left\{ \beta_{\text{изм}}^{(j)} \right\} = \beta_0^{(j)}, \quad (5)$$

где μ_0^j , β_0^j – истинные значения пеленгационных параметров j -го НКА относительно точки истинного положения.

При этом математические ожидания $m_1 \left\{ \mu_{\text{изм}}^{(j)} \right\}$, $m_1 \left\{ \beta_{\text{изм}}^{(j)} \right\}$ и $m_1 \left\{ \mu_{\text{изм}}^{(i)} \right\}$, $m_1 \left\{ \beta_{\text{изм}}^{(i)} \right\}$, $i, j = 1, \dots, M$, $i \neq j$ по различным

НКА значительно отличаются между собой.

В случае нарушения целостности навигационного поля (справедлива гипотеза H_1) значения математических ожиданий расчетных и измеряемых пеленгационных параметров для каждого НКА отличаются:

$$m_1 \left\{ \mu_{\text{расч}}^{(j)} \right\} = \mu_2^{(j)} \neq \mu_1^{(j)} = m_1 \left\{ \mu_{\text{изм}}^{(j)} \right\}, \quad m_1 \left\{ \beta_{\text{расч}}^{(j)} \right\} = \beta_2^{(j)} \neq \beta_1^{(j)} = m_1 \left\{ \beta_{\text{изм}}^{(j)} \right\}. \quad (6)$$

При этом значения математических ожиданий измеряемых пеленгационных параметров не зависят от номера НКА и равны одним и тем же значениям:

$$m_1 \left\{ \mu_{\text{изм}}^{(j)} \right\} = m_1 \left\{ \mu_{\text{изм}}^{(i)} \right\} = \mu_1, \quad m_1 \left\{ \beta_{\text{изм}}^{(j)} \right\} = m_1 \left\{ \beta_{\text{изм}}^{(i)} \right\} = \beta_1, \quad (i, j = 1, \dots, M),$$

где β_1 и μ_1 – пеленгационные параметры источника помех относительно точки истинного положения АСН, а $m_1 \left\{ \mu_{\text{расч}}^{(j)} \right\}$ и $m_1 \left\{ \beta_{\text{расч}}^{(j)} \right\}$ являются истинными значениями пеленгационных параметров j -го НКА относительно точки, координаты которой были получены в ходе решения навигационной задачи в условиях нарушения целостности навигационного поля.

Таким образом, используя данный способ можно обнаружить ложные радионавигационные поля. Данный способ позволяет определить ложное радионавигационное поле, когда источник имитирует сигналы всех видимых НКА, что является преимуществом по сравнению выше представленными методами.

Заключение

Проведенные в работе исследования являются одним из направлений обеспечения

навигационной безопасности систем управления различных структур. Результаты работы могут использоваться для проведения радиомониторинга ложных сигналов и полей в пунктах контроля радионавигационного поля и АСН при проектиро-

вания радионавигационных систем и ее элементов. Дальнейшим исследованием является оценка погрешности способов обнаружения имитационных помех и их эффективности.

Библиографический список

1. Снежко В.К., Якушенко С.А. Военные интегрированные системы навигации, связи и управления – ВАС. – Санкт-Петербург, 2013. – 456 с.
2. Снежко В. К., Якушенко С. А., Мальцев А. Д., Бондаренко С. А. Навигационная аппаратура потребителей спутниковых радионавигационных систем. Учеб. пособие. – СПб.: ВАС, 2011. – 216 с.
3. Якушенко С.А., Курманаева А.Ф. Анализ характеристик навигационной аппаратуры потребителя для полевых подвижных объектов. Международное научное издание // Сборник научных трудов SWorld. – Выпуск 4. Том 1 – Одесса: СВ, 2013.
4. Якушенко С.А. Снежко В.К. Коробков Е.С. Лянгузов Д.А. Доступность радионавигационной системы в зависимости от требуемой точности // Успехи современной радиоэлектроники. – 2017. – №12.

METHODS FOR DETECTING FALSE RADIONAVIGATION FIELDS

S.A. Yakushenko, *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher of National Research Center*

A.N. Zabelo, *Candidate of Military Sciences, Associate Professor*

V.E. Egrushev, *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor*

S.S. Verkin, *Candidate of Technical Sciences, Lecturer*

V.V. Antonov, *Lecturer*

E.V. Chekanova, *Lecturer*

Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union

S.M. Budyonny

(Russia, St. Petersburg)

Abstract. *The paper studies the issues of inputting false signals and artificial radio navigation fields of satellite radio navigation systems under conditions of information impact. Methods for their detection are proposed based on measuring the parameters of broadband signals and signal-like interference in the frequency-time domain of the linear Hilbert space, predicting almanac data and monitoring the integrity of the radio navigation field.*

Keywords: *false signals, artificial radio navigation fields, satellite radio navigation systems, capacity, information impact.*