

УДК 621.391

**Р.Н. Абдулов<sup>1</sup>, Х.Г. Асадов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>НИИ Министерства оборонной промышленности Азербайджанской Республики, Баку, Азербайджанская Республика

<sup>2</sup>НИИ Аэрокосмической информатики Национального аэрокосмического агентства, Баку, Азербайджанская Республика

## **НОВЫЙ МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ GPS НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Статья посвящена разработанному новому методу ослабления влияния специально сформированного мешающего сигнала на работу GPS навигационных систем. Рассматривается воздействие мешающего сигнала типа помехи (jamming), излучаемого техническими средствами противника. При генерации помехового сигнала соответствующей частоты и достаточной мощности противником ставится цель достичь невозможности приема GPS-сигналов. Предлагаемый метод основан на базовом уравнении теории антенн, каковым является уравнение Фриса. Согласно уравнению Фриса может быть вычислена мощность, принимаемая антенной одной из сторон, с определенным коэффициентом усиления при излучении сигнала с другой антенны известным коэффициентом усиления. Предложен новый показатель, вычисляемый путем интегрирования по пройденному пути формулы Фриса в предположении статичности позиции источника помехи. На основе исследования введенного показателя, представляющего собой интегрированное по пройденной объектом трассе выражение формулы Фриса, сформирован функционал цели проводимой оптимизации с учетом неподвижности позиции генератора помехи. При этом допускается неизменность направленности объекта к цели, содержащей генератор помехи. Также учитываются возможные стратегии изменения мощности помехи при передвижении объекта по трассе. Показано, что предлагаемый показатель имеет экстремальный характер при прямой или инверсной идентичности коэффициентов усиления антенн объекта и генератора помехи: при прямой идентичности вновь введенный показатель достигает минимума, а при инверсной идентичности – максимума. С учетом экстремальных свойств предложенного нового показателя разработаны метод и алгоритм ослабления влияния помехи на работу GPS навигационных систем различных технических устройств.

**Ключевые слова:** уравнение Фриса, антенна, атмосфера, погрешность, навигационная система, оптимизация, функционал.

R.N. Abdulov<sup>1</sup>, H.H. Asadov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Research Institute of Ministry of Defense Industry of Azerbaijan Republic, Baku, Azerbaijan Republic

<sup>2</sup>Research Institute of Aerospace Informatics of National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan Republic

## NEW METHOD FOR INCREASE OF ANTI-JAMMING STABILITY OF GPS NAVIGATION SYSTEMS

The paper is devoted to the developed new method for decrease of effect of specially formed hindering signals on functioning of GPS navigation system. The effect of hindering signal of jamming type irradiated by technical means of adversary side is considered. Generation of hindering signal of relevant frequency and sufficient power by adversary is carried out by the aim to reach the condition of non-possibility of receipt of GPS signals. The suggested method is based on basic equation of aerial theory, that is Fresnel's equation. According to Fresnel's equation the power of signal receipt by antenna of one of sides with suggested gain coefficient can be calculated upon irradiation of signal from other antenna with known gain coefficient. The new parameter calculated by integration of Fresnel's formula on passed route supposing static character of jamming source position is suggested. On the basis of research of suggested parameter that is an integrated on passed route Fresnel's formula the target functional is formed taking into account the motionless position of jamming signal of generator and non-changeable direction of object toward target containing jamming signal generator. The possible strategies for changing the jamming signal power on transition of object on route are also taken into account. It is shown that suggested parameter is of extremum feature upon direct or inverse identity of gain coefficient of antennas of object and jamming signal generator: upon direct identity the suggested parameter reaches the minimum and upon inverse identity maximum. Taking into account the extremum feature of suggested parameter the method and algorithm for decrease of effect of jamming signal on functioning of GPS navigation systems of various technical constructions are developed.

**Keywords:** Fresnel's equation, antenna, atmosphere, error, navigation system, optimization, functional.

Как отмечено в работе [1], одним из фундаментальных уравнений теории антенн является уравнение Фриса. Уравнение передачи Фриса позволяет вычислить мощность, принимаемую первой антенной, с коэффициентом усиления  $G_1$  при передаче сигнала со второй антенны с коэффициентом усиления  $G_2$ . При этом расстояние между антеннами равно  $R$ , а излучение осуществляется на длине волны  $\lambda$  частотой  $f$  (рис. 1).

Согласно закону Фриса мощность принятого сигнала может быть определена как

$$P_R = \frac{P_T \cdot G_T \cdot G_R \cdot \lambda^2}{(4\pi R^2)}, \quad (1)$$

где:  $P_T$  – мощность передаваемого сигнала;  $P_R$  – мощность принятого сигнала;  $G_T$  – коэффициент усиления передающей антенны;  $G_R$  – коэффициент усиления приемной антенны.

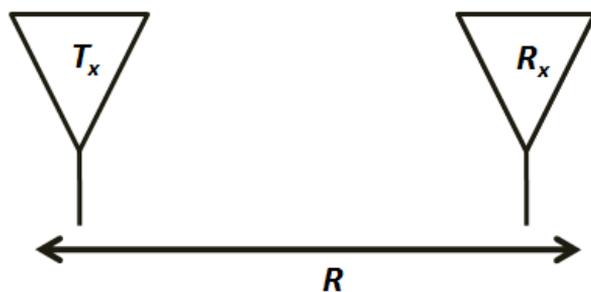


Рис. 1. Передающая  $T_x$  и приемная  $R_x$  антенны, находящиеся на расстоянии  $R$  друг от друга

Заметим что формула (1) является в некоторой степени упрощенной, так как здесь влияние атмосферного затухания не учитывается. Более совершенная формула для вычисления  $P_R$  с учетом атмосферного затухания приведена в [2–4]:

$$P_R = P_T + G_T(\theta_T, \alpha_T) + G_R(\theta_R, \alpha_R) + \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 \cdot (1 - |\Gamma_T|^2) \cdot (1 - |\Gamma_R|^2) \cdot |a_T \cdot a_R|^2 \cdot e^{-\alpha R}, \quad (2)$$

где  $\theta_T, \varphi_T$  – направление излучения передающей антенны;  $\theta_R, \varphi_R$  – направление приема приемной антенны;  $\Gamma_T$  – коэффициент отражения передающей антенны;  $\Gamma_R$  – коэффициент отражения приемной антенны;  $a_T, a_R$  – поляризационные векторы передающей и приемной антенн соответственно;  $\alpha$  – коэффициент ослабления атмосферы.

Согласно [2] различные технические комплексы и системы, зависящие от GPS, потенциально подвержены влиянию различных электромагнитных воздействий (атак). Разделяют воздействие мешающего сигнала типа помехи (jamming) и воздействие ложного управляющего сигнала (spoofing), сформированного противником. В первом случае ставится цель достичь невозможности приема GPS-сигналов путем генерации сигналов соответствующей частоты и достаточной мощности. Во втором случае цель – формирование ложного управляющего сигнала, неотличимого от настоящего. Например, в 2011 г. технические службы Ирана заставили осуществить управляемый спуск дрона RQ-170 Sentinel, сформировав соответствующий сигнал управления [2]. В качестве примера на рис. 2 приведена зависимость погрешности GPS систем при разных мощностях частотной помехи.

С появлением систем спутниковой навигации (Navstar GPS, Glonass, EU Galileo) эти средства стали использоваться с целью навигационного

управления различными техническими средствами. В отличие от инерциальных технических средств навигации спутниковые средства не аккумулируют погрешность позиции во времени, и совместное использование спутниковых и инерциальных средств позволяет периодически корректировать показания инерциальных средств навигации [5, 6].

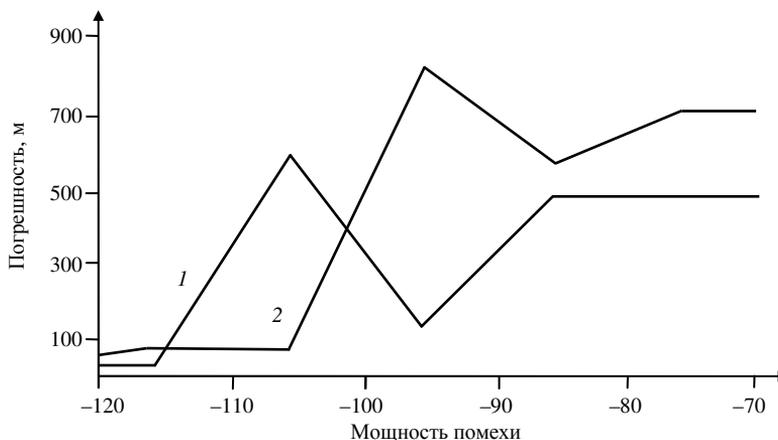


Рис. 2. Увеличение погрешности GPS-системы до 700 м при угле наклона между антеннами  $0^\circ$  (кривая 2) и при угле  $6^\circ$  (кривая 1), когда погрешность увеличивается до 500 м [2]

Следует отметить, что интегрированные навигационные системы типа GPS/INS обычно имеют две конфигурации в виде слабосвязанной и сильносвязанной системы [7–11]. Структурные схемы таких систем показаны на рис. 3, а, б соответственно.

Как видно из рис. 3, а, в слабосвязанной системе GPS имеет свой внутренний фильтр Кальмана для обработки данных спутниковых псевдоранговых и дельта-измерений. На основе этих данных формируются значения позиций и скоростей в координатах WGS-84. Эти данные сравниваются с аналогичными данными INS-системы, и разностный сигнал подается на навигационный фильтр Кальмана, который формирует корректировочные сигналы для INS-системы.

Недостаток такой структуры – наличие двух фильтров, что может создать проблемы стабильности в работе навигационного фильтра при высокодинамичных ситуациях.

В сильносвязанных структурах данный фильтр Кальмана формирует корректирующие сигналы GPS, предварительно сформировав

оценки дрейфов и смещений в системе. Предсказанные псевдоранговые и дельта-ранговые данные INS-системы сравниваются с данными GPS, разностные сигналы подаются на вход навигационного фильтра.

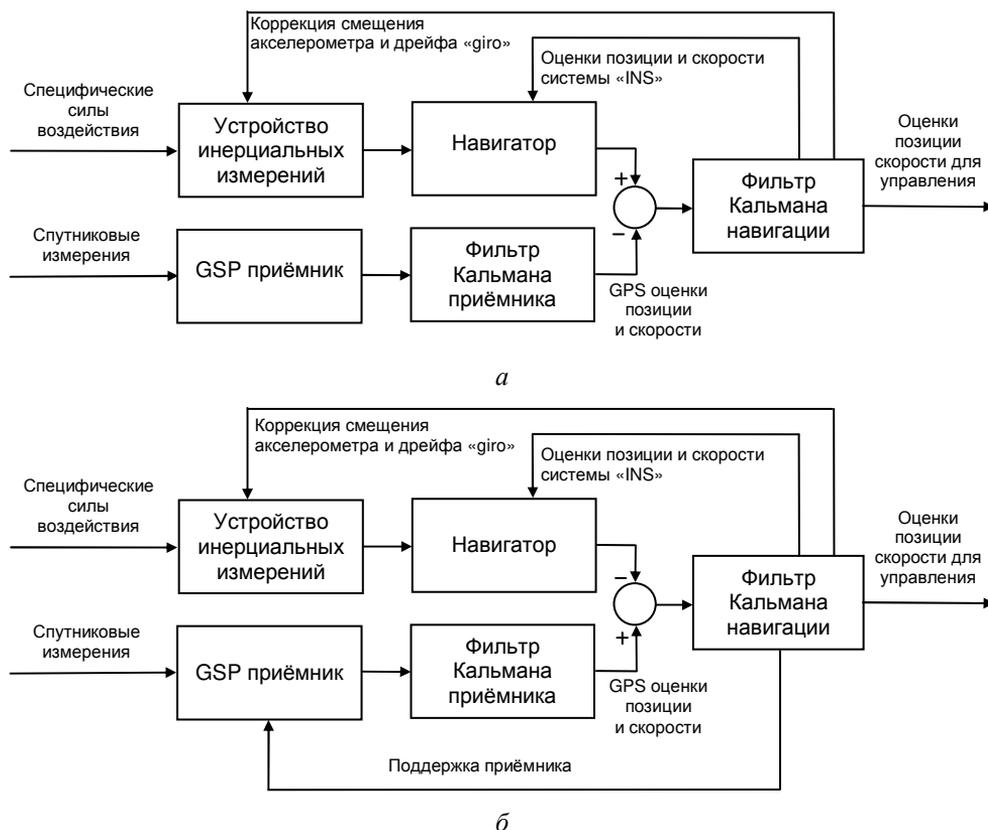


Рис. 3. Структурные схемы: а – слабовязанной GPS/INS навигационной системы; б – сильновязанной GPS/INS навигационной системы

Согласно [12–13] помехоустойчивость и точность навигации в сильносвязанных GPS/INS-системах выше, чем у слабовязанных.

На рис.4, а, б приведены графики зависимости погрешности навигации в метрах от мощности широкополосного и узкополосного помехового сигнала для слабовязанных и сильносвязанных систем [12].

Как отмечается в работе [7], на помехоустойчивость GPS/INS навигационных систем также влияют антенны. В качестве примера на рис. 5 приведены графики зависимости расстояния до источника помех, когда навигационная система все еще устойчиво работает от типа приемной антенны и мощности помехи. Как видно из графиков,

представленных на рис. 5, полусферическая антенна с углом среза  $8^\circ$  обеспечивает более устойчивую работу навигационной системы, чем сферическая антенна.

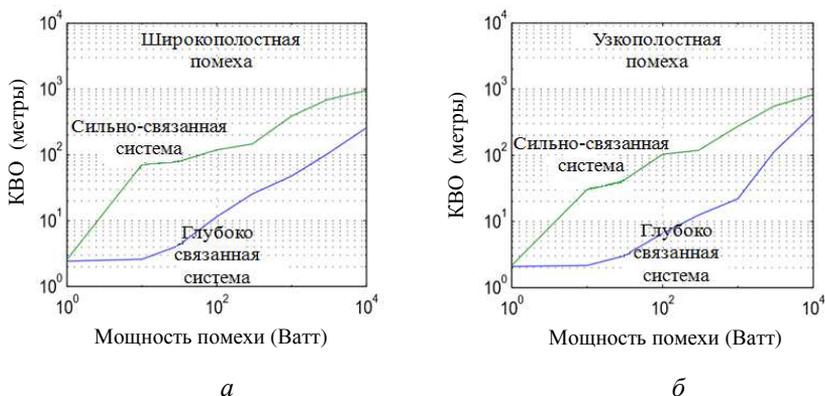


Рис. 4. Графики зависимости погрешности навигации от мощности широкополосного (а) и узкополосного (б) помехового сигнала разной мощности [12]

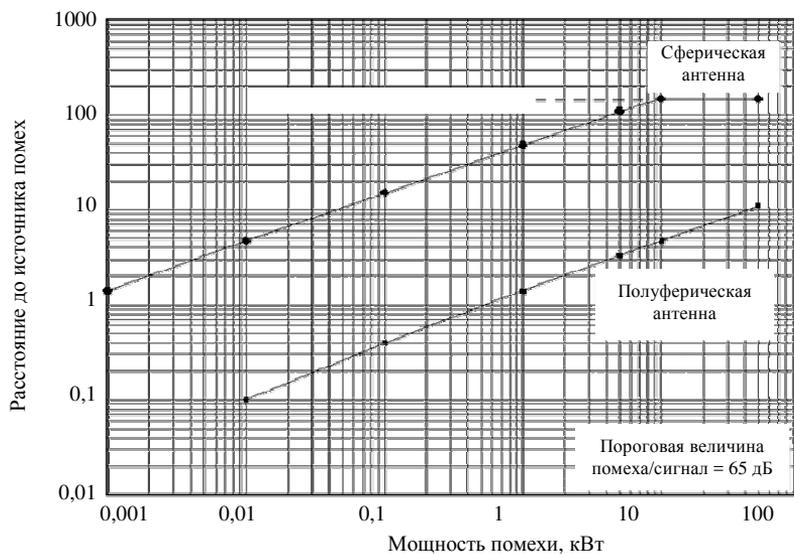


Рис. 5. Графики зависимости расстояния до источника помех, где навигационная GPS/INS система все еще устойчиво работает от типа антенны и мощности помехи [7]

Аналогичные по смыслу графики способности противостоять помеховому сигналу GPS/INS системы в зависимости от мощности генератора до него показаны на рис. 6 [14].

Как отмечается в работах [15–16], навигационная система GPS основана на приеме сигналов, находящихся на высоте 20 000 км, что обуславливает достаточно малую мощность принимаемых сигналов. По этой причине приемники GPS сильно подвержены влиянию различных помех. Если отношение помехи к сигналу превышает 25 дБ, то GPS не способен принять (C/A) код, а при 55 дБ теряется код (P) точности наведения [17–18]. Для повышения помехоустойчивости навигационных систем предложены такие методы, как мультичастотная система (GPS, GALILEO, GLONAS), фильтрации на единой частоте; метод адаптивных антенн путем использования линейки антенн с максимальным усилением в направлении спутников и минимальным усилением в направлении генератора помехи [15, 19–20].

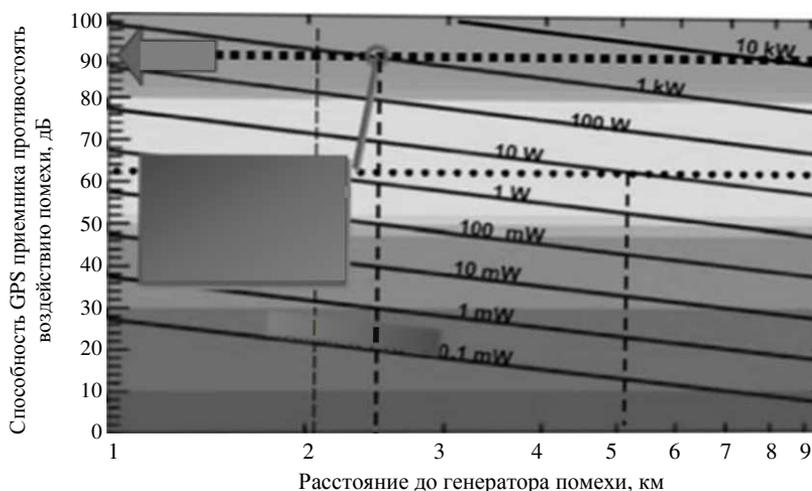


Рис. 6. Графики зависимости способности противостоять воздействию помехи различной мощности при различных расстояниях до генератора помех [14]

Далее в настоящей системе излагаются теоретические основы предлагаемого нового метода повышения помехоустойчивости GPS навигационных систем, основанного на использовании адаптивно управляемых антенн. Воспользуемся формулой Фриса (1), которую запишем как

$$P_R = \frac{A \cdot G_T \cdot G_R}{R^2}, \quad (3)$$

где

$$A = \frac{P_T \cdot \lambda^2}{16\pi^2} = C_1 \text{const.} \quad (4)$$

Далее рассматриваем ситуацию, когда  $G_T = f(R)$ , а расстояние  $R$  между приемником и генератором помехи является изменяющейся величиной. Введем на рассмотрение интегральный показатель:

$$R\chi_1 = \int_0^{R_M} P_R dR = \int_0^{R_M} \frac{A \cdot G_T \cdot G_R}{R^2} dR, \quad (5)$$

где  $R_M$  – максимальная длина трассы.

Физический смысл показателя  $\chi$  заключается в следующем: допустим, имеется двигающийся объект, оснащенный GPS/INS навигационной системой, и неподвижный генератор помех, установленный у цели, которую должен достичь двигающийся объект (например, управляемая авиабомба). В выражении (5)  $R$  является расстоянием, определяемым как  $R = R_o - R_x$ ; где  $R_o$  – исходное расстояние между целью (а следовательно, генератором помех) и двигающимся объектом;  $R_x$  – текущее расстояние между ними.

Считается, что показатель  $G_R$  подлежит управлению по  $R$ , при этом закон управления  $G_T$  не известен, однако может быть обнаружен и вычислен по мере приближения объекта к цели. Рассматриваются два варианта адаптивного изменения  $G_R$  в зависимости от  $G_T$ :

$$1) G_R = G_T, \quad (6)$$

$$2) G_R = G_1 - G_T, G_1 = \text{const}. \quad (7)$$

Далее предполагаем, что целью генератора помех является создание максимально эффективных мешающих сигналов в пределах энерговооруженности соответствующего генератора. Так как генерация помех осуществляется во всем диапазоне изменения  $R$  от нуля до  $R_M$  в пределах ограниченного энергозапаса для вариации коэффициента усиления антенны, то разумно определить второй интегральный показатель:

$$\chi_1 = \int_0^{R_M} G_T(R) dR = C_2, \quad (8)$$

где  $C_2 = \text{const}$ .

С учетом выражений (5) и (8) составим уравнение безусловной вариационной оптимизации:

$$\chi_1 = \chi_1 + \lambda \cdot \chi_2 = \int_0^{R_M} \frac{A \cdot G_T(R) \cdot G_R(R)}{R^2} dR + \lambda \left[ \int_0^{R_M} G_T(R) dR - C_2 \right]. \quad (9)$$

Требуется выбрать одно из выражений (6) и (7), такое, при котором  $\chi_3$  достиг бы минимального значения. Согласно уравнению Эйлера-Лагранжа оптимальное выражение  $G_R(R)$  должно удовлетворить условию:

$$\frac{d\left\{\frac{A \cdot G_T(R) \cdot G_R(R)}{R^2} + \lambda \cdot G_T(R)\right\}}{dG_T(R)} = 0. \quad (10)$$

Из условия (10) с учетом выражения (6) получим:

$$\frac{2AG_T(R)}{R^2} + \lambda = 0. \quad (11)$$

Из (11) получим:

$$G_T(R) = \frac{-\lambda \cdot R^2}{-2A}. \quad (12)$$

С учетом выражений (8) и (12) получим:

$$\chi_2 = -\int_0^{R_m} \frac{\lambda \cdot R^2}{2A} dR = \frac{-\lambda \cdot R_m^3}{6A} = C_2. \quad (13)$$

Из выражения (13) находим:

$$\lambda = -\frac{6AC_2}{R_m^3}. \quad (14)$$

Из выражений (11) и (14) получим:

$$\frac{2A \cdot G_T(R)}{R^2} = \frac{6A \cdot C_2}{R_m^3}. \quad (15)$$

Из выражения (15) окончательно получаем:

$$G_T(R) = \frac{3C_2 \cdot R^2}{R_m^3}. \quad (16)$$

Таким образом, при условии (16) целевой функционал (9) достигает экстремума. Для проверки типа экстремума достаточно вычислить вторую производную интегранта (9) по  $G_T(R)$  и убедиться, что она положительна, т.е. экстремум является минимумом.

Теперь исследуем экстремум функционала (9) с учетом условия (7). С учетом (7) функционал (9) имеет следующий вид:

$$\chi_3 = \int_0^{R_m} \frac{A \cdot G_T(R) \cdot [C_1 - G_T(R)]}{R^2} dR + \lambda \left[ \int_0^{R_m} G_T(R) dR - C_2 \right]. \quad (17)$$

Согласно условию Эйлера–Лагранжа функционал (17) достигает экстремума при функции  $G_T(R)$ , удовлетворяющей условию:

$$\frac{d \left\{ \frac{A \cdot G_T(R) [C_1 - G_T(R)]}{R^2} + \lambda \cdot G_T(R) \right\}}{dG_T(R)} = 0. \quad (18)$$

Из условия (18) получим:

$$\frac{AC_1 - 2AG_T(R)}{R^2} + \lambda = 0. \quad (19)$$

Из выражения (19) находим:

$$G_T(R) = \frac{\lambda \cdot R^2 + AC_1}{2A}. \quad (20)$$

С учетом выражений (8) и (20) получим:

$$\int_0^{R_m} \left[ \frac{\lambda R^2 + AC_1}{2A} \right] dR = C_2. \quad (21)$$

Из выражения (21) находим:

$$\lambda = \frac{\left( C_2 - \frac{C_1}{2} R_m \right) \cdot 6A}{R_m^3}. \quad (22)$$

Из выражений (19) и (22) получим:

$$\frac{AC_1 - 2A \cdot G_T(R)}{R^2} = \frac{\left( \frac{C_1 \cdot R_m}{2} - C_2 \right) \cdot 6A}{R_m^3}. \quad (23)$$

Из выражения (23) получим:

$$G_T(R) = \frac{C_1}{2} - \frac{3R^2}{R_m^3} \left( \frac{C_1 R_m}{2} - C_2 \right). \quad (24)$$

Таким образом, при (24) целевой функционал (17) достигает экстремума. Для определения типа экстремума достаточно вычислить вторую производную интегранта в (17) и убедиться, что она имеет отрицательный знак, т.е. целевой функционал достигает максимума.

С учетом вышеизложенного ниже предлагается метод повышения помехоустойчивости систем со встроенной GPS навигационной системой. Согласно предлагаемому методу защищаемая от помех система, оснащенная GPS-системой навигации, снабжается двумя антеннами, усиления которых определяются как:

$$G_{R_1}(R) = G_R(R), \tag{25}$$

$$G_{R_2}(R) = C_1 - G_R(R). \tag{26}$$

При этом антенна с усилением  $G_{R_2}$  предназначена для совместной работы с антенной генератора помехи. Целью такой совместной работы является адаптивная перестройка  $G_{R_2}(R)$  таким образом, чтобы достичь максимума целевого функционала

$$\chi_4 = \int_0^{R_m} \frac{P_T \cdot G_{R_2}(R) \cdot G_T(R) \cdot \lambda^2}{(\pi R)^2} dR + \left[ \int_0^{R_m} G_T(R) dR - C_2 \right] \tag{27}$$

Максимум функционала (27) достигается путем адаптивного изменения  $G_{R_2}(R)$ , исследуя динамику  $C_2$  временного изменения  $G_T(R)$  и обеспечивая инверсную динамику изменения  $G_{R_2}(R)$ .

Как было показано выше, в этом случае влияние генератора помех на антенну с усилением  $G_{R_2}(R)$  будет максимальным, а на антенну с усилением  $G_{R_1}(R)$  будет минимальным. Блок-схема алгоритма реализации предполагаемого метода показана на рис. 7.

Следует отметить, что на первый взгляд алгоритм, показанный на рис. 7, имеет некоторую избыточность, так как вроде можно сократить антенну  $G_{R_2}(R)$  и осуществить адаптивное изменение  $G_{R_1}(R)$ , достигая минимума влияния помехи на антенну  $G_{R_1}(R)$ . Однако реализация предлагаемого метода с контролем минимума величины соответствующего функционала при достаточно низком сигнале по уровню чревата существенным ослаблением всего полезного эффекта метода.

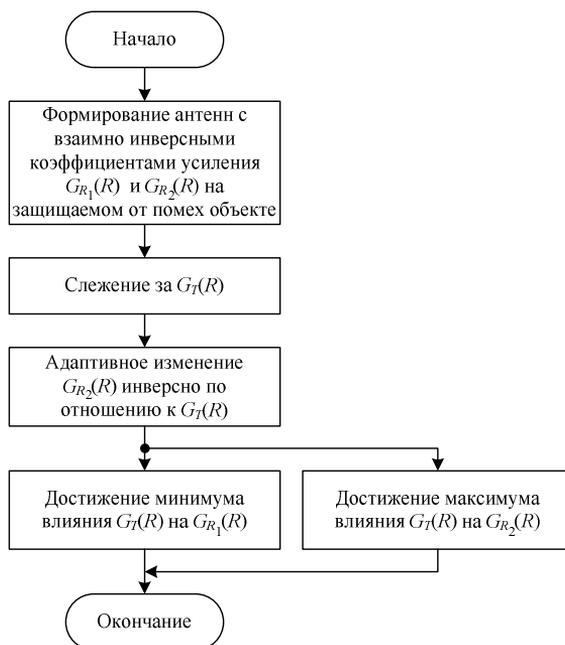


Рис. 7. Блок-схема алгоритма предполагаемого метода ослабления влияния сигнала помехи на работу устройства GPS-навигации

Что касается достоверности ограничения (8), налагаемого на коэффициент усиления антенны генератора помехи, графическая интерпретация этого условия, показанная на рис. 8, позволяет интерпретировать условие (8) в виде трех стратегий организации разнопомехового воздействия:

- следует генерировать максимальную помеху в начале цикла отслеживания движущегося объекта (например, управляемой авиабомбы) при максимальном расстоянии между объектом и генератором помехи (кривая 1, см. рис. 8);
- следует генерировать максимальную помеху в середине цикла отслеживания движущегося объекта при среднем расстоянии между объектом и генератором помехи (кривая 2 на рис. 8);
- следует генерировать максимальную помеху в конце отслеживания объекта при минимально возможном расстоянии между объектом и генератором (кривая 3, см. рис. 8).

Таким образом, предлагаемый метод в некотором смысле имеет вероятностный характер и предполагает равные вероятности выбора вышеуказанных стратегий со стороны пользователя генератора помех.

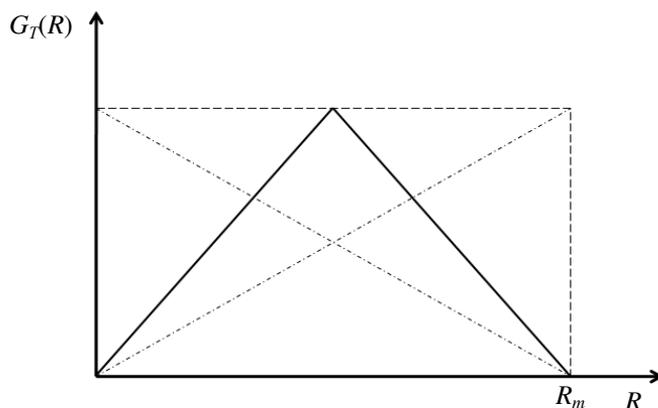


Рис. 8. Возможные кривые изменения  $G_T(R)$  на дистанции  $0 - R_m$  в соответствии с принятой стратегией создания помехового сигнала

Сформулируем основные выводы и положения проведенного исследования:

1. На основе исследования введенного показателя, представляющего собой интегрированное по пройденной объектом трассе выражение формулы Фриис с учетом неподвижности позиции генератора помехи и направленности объекта в сторону цели, снабженной генератором помехи, а также возможных стратегий изменения мощности помехового сигнала по мере передвижения объекта по трассе показан экстремальный характер этого показателя при достижении прямой или инверсной идентичности коэффициентов усиления антенн объекта и генератора помехи. При этом обнаружено, что при прямой идентичности вновь введенный показатель достигает минимума, а при инверсной идентичности – максимума.

2. На основе экстремальных свойств вновь введенного показателя разработаны метод и алгоритм ослабления влияния помехового сигнала на работу GPS навигационной системы различных технических устройств.

### Библиографический список

1. The Friis Equation. RF & Microwave Knowledge Base. – URL: <https://www.markimicrowave.com/blog/engineering/resources/rf-and-microwave-knowledge-base/>

2. Faria L.A., Silvestre C.A.M., Correia M.A.F. GPS-dependent systems: Vulnerabilities to Electromagnetic Attacks // *Journal of Aerospace Technology Management*. – 2016. – Vol. 8, № 4. – P. 423–430.
3. Lakshmi S., Prasad N. GPS Receiver Protection Requirement for Unmanned Aerial Vehicle // *International Journal of Electrical, Electronics and Computer Engineering*. – 2012. – 1(2). – P. 55–59.
4. Schmidt G.T. INS/GPS Technology Trends. RTO-EN-SET-116. – 2011. – P. 1–24. – URL: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a581015.pdf>
5. Military technology. Modern satellite navigation aided weapons. *Defence Today*. – URL: <https://www.ausairpower.net/SP/DT-GPS-Weps-Mar-2010.pdf>
6. GPS-aided navigation system requirements for smart munitions and guide missiles / E.J. Ohlmeyer, Th.R. Pepitone, B.L. Miller, D.S. Malyevac, J.E. Bibel, A.G. Evans. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/252397780>
7. GPS-aided navigation system requirements smart munitions and guided missiles / E.J. Ohlmeyer, Th.R. Pepitone, B.L. Miller, D.S. Malyevac, J.E. Bibel, A.G. Evans. – URL: <ftp://labattmot.ele.ita.br/ele/jacques/CursoNaveg/ohlmeyer.pdf>
8. A Nonlinear Code Tracking Filter for GPS-Based Navigation / D. Gustafson [et. al.] // *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*. – August 2009. – Vol. 3, № 4. – P. 627–638.
9. Precise Calibration of a GNSS Antenna Array for Adaptive Beamforming Applications / S. Daneshmand, N. Sokhandan, M. Zaeri-Amirani, G. Lachapelle // *Sensors*, 2014. – Vol. 14. – № 6. – P. 9669–9691.
10. Susceptibility of GPS – dependent Complex Systems to Spoofing / L.A. Faria, C.A.M. Silvestre, M.A.F. Correia, N.A. Roso // *Journal of Aerospace Technology Management*. – 2018. – Vol. 10. DOI: 10.5028/jatm.V.10.839
11. Dimc F., Bazec M. An experimental evaluation of low-cost GNSS gaming sensors // *Navigation Journal of the Institute of Navigation*. – 2017. – Vol. 64. – № 1. – P. 93–109.
12. Schmidt G.T., Philips R.E. INS/GPS integration Architecture Performance Comparisons. RTO-EN-SET-116. – 2011.
13. Betz J.W. Effect of Partial-Band Interference on Receiver Estimation of  $C/N_0$ : Theory // *Proceedings of the National Technical Meeting of The Institute of Navigation*. – Long Beach, CA. – January 2001. – P. 817–828.

14. McCall G.H. GPS vulnerability: Options and Alternatives. – URL: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a266083.pdf>
15. GPS Carrier-to-Noise density. – URL: <http://www.northwood-labs.com/AN101.pdf>.
16. Interference Supression in a GPS receiver with 4 element Array design and implementation of beamforming algorithms / O.C. Dabak, F. Fradem, T. Sonmer, L. Alatan, S. Senger Koc, A.S. Havelsan. – URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Interference-suppression-in-a-GPS-receiver-with-4-Dabak-Erdem/1d7978369587ecee9e0a53a70caa2582e9a23942>
17. Sh.Sh. Jan, Ch.Ch. Sun. Signal existence verification (SEV) for GPS low received power signal detection using the time-frequency approach // Sensors. – 2010. – Vol. 10. – Iss. 5. – P. 4717–4738.
18. Bamford William, Winternitz Luke, Hay Curtis. GPS World, Innovation. Autonomous navigation at high Earth orbits. – URL: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20060012296>
19. Ruiz J.I., Frey Ch.H. Geosynchronous satellite use of GPS // ION GNSS 18th International Technical Meeting of the Satellite Division; 13–16 September, 2005, – Long Beach, Ca. – P. 1227–1232.
20. Hauschild Andre, Markgraf Markus, Montenbruck Oliver. The navigation and occultation experiment. GPS receiver performance on board a LEO satellite // Inside GNSS. – July/August 2014. – P. 49–58. – URL: [www.insidegnss.com](http://www.insidegnss.com)

### References

1. The Friis Equation. RF & Microwave Knowledge Base, available at: <https://www.markimicrowave.com/blog/engineering/resources/rf-and-microwave-knowledge-base/>
2. Faria L.A., Silvestre C.A.M., Correia M.A.F. GPS - dependent systems: Vulnerabilities to Electromagnetic Attacks. *Journal of Aerospace Technology Management*, 2016, vol. 8, no. 4, pp. 423-430.
3. Lakshmi S., Prasad N. GPS Receiver Protection Requirement for Unmanned Aerial Vehicle. *International Journal of Electrical, Electronics and Computer Engineering*, 2012, 1(2), pp. 55-59.
4. Schmidt G.T. INS/GPS Technology Trends. RTO-EN-SET-116, 2011, pp. 1-24, available at: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a581015.pdf>
5. Military technology. Modern satellite navigation aided weapons. Defence Today, available at: <https://www.ausairpower.net/SP/DT-GPS-Weps-Mar-2010.pdf>

6. Ohlmeyer E.J., Pepitone Th.R., Miller B.L., Malyevac D.S., Bibel J.E., Evans A.G. GPS-aided navigation system requirements for smart munitions and guide missiles, available at: <https://www.researchgate.net/publication/252397780>

7. Ohlmeyer E.J., Pepitone Th.R., Miller B.L., Malyevac D.S., Bibel J.E., Evans A.G. GPS-aided navigation system requirements smart munitions and guided missiles, available at: <ftp://labattmot.ele.ita.br/ele/jacques/CursoNaveg/ohlmeyer.pdf>

8. Gustafson D. et. al. A Nonlinear Code Tracking Filter for GPS-Based Navigation. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*. August 2009, vol. 3, no. 4, pp. 627-638.

9. Daneshmand S., Sokhandan N., Zaeri-Amirani M., Lachapelle G. Precise Calibration of a GNSS Antenna Array for Adaptive Beamforming Applications. *Sensors*, 2014, vol. 14, no. 6, pp. 9669-9691.

10. Faria L.A., Silvestre C.A.M., Correia M.A.F., Roso N.A. Susceptibility of GPS – dependent Complex Systems to Spoofing. *Journal of Aerospace Technology Management*, 2018, vol. 10. DOI: 10.5028/jatm.V.10.839

11. Dimc F., Bazec M. An experimental evaluation of low-cost GNSS jamming sensors. *Navigation Journal of the Institute of Navigation*, 2017, vol. 64, no. 1, pp. 93-109.

12. Schmidt G.T., Philips R.E. INS/GPS integration Architecture Performance Comparisons. RTO-EN-SET-116, 2011.

13. Betz J.W. Effect of Partial-Band Interference on Receiver Estimation of  $C/N_0$ : Theory. *Proceedings of the National Technical Meeting of The Institute of Navigation*. Long Beach, CA. January 2001, pp. 817-828.

14. McCall G.H. GPS vulnerability: Options and Alternatives, available at: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a266083.pdf>

15. GPS Carrier-to-Noise density, available at: <http://www.northwoodlabs.com/AN101.pdf>.

16. Dabak O.C., Fradem F., Sonmer T., Alatan L., Senger Koc S., Havelsan A.S. Interference Suppression in a GPS receiver with 4 element Array design and implementation of beamforming algorithms, available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Interference-suppression-in-a-GPS-receiver-with-4-Dabak-Erdem/1d7978369587ecee9e0a53a70caa2582e9a23942>

17. Sh.Sh. Jan, Ch.Ch. Sun. Signal existence verification (SEV) for GPS low received power signal detection using the time-frequency approach. *Sensors*, 2010, vol. 10, iss. 5, pp. 4717-4738.

18. William Bamford, Luke Winternitz, Curtis Hay. GPS World, Innovation. Autonomous navigation at high Earth orbits, available at: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20060012296>

19. Ruiz J.I., Frey Ch.H. Geosynchronous satellite use of GPS. *ION GNSS 18th International Technical Meeting of the Satellite Division*, 13-16 September, 2005, Long Beach, Ca, pp. 1227-1232.

20. Hauschild Andre, Markgraf Markus, Montenbruck Oliver. The navigation and occultation experiment. GPS receiver performance on board a LEO satellite. *Inside GNSS*. July/August 2014, pp. 49-58, available at: [www.insidegnss.com](http://www.insidegnss.com).

### Сведения об авторах

**Абдуллаев Рауф Нусратоглы** (Баку, Азербайджанская Республика) – кандидат технических наук, заместитель главного инженера НИИ Министерства оборонной промышленности Азербайджанской Республики (AZ1123, Баку, ул. Г. Мамедова, 23, e-mail: [rauf-abdulov@yandex.ru](mailto:rauf-abdulov@yandex.ru)).

**Асадов Хикмет Гамидоглы** (Баку, Азербайджанская Республика) – доктор технических наук, профессор, начальник отдела Национального аэрокосмического агентства, НИИ аэрокосмической информатики (AZ1145, Баку, ул. С.С. Ахундова, 9, e-mail: [asadzade@rambler.ru](mailto:asadzade@rambler.ru)).

### About the authors

**Abdullayev Rauf Nusratoglu** (Baku, Azerbaijan Republic) is a Ph.D. in Technical Sciences, Deputy chief engineer, Research Institute of Ministry of Defence Industry of Azerbaijan Republic (AZ1123, Baku, 23, G. Mamedov str., e-mail: [rauf-abdulov@yandex.ru](mailto:rauf-abdulov@yandex.ru)).

**Asadov Hikmat Hamidoglu** (Baku, Azerbaijan Republic) is a Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department, National Aerospace Agency, Research Institute of Aerospace Informatics (AZ1145, Baku, 9, S.S. Akhundov str., e-mail: [asadzade@rambler.ru](mailto:asadzade@rambler.ru)).

Получено 17.01.2019