

# Вопросы повышения помехоустойчивости GPS/INS навигационных систем авиасредств

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

<sup>1</sup>НИИ Министерства оборонной промышленности, Азербайджан

<sup>2</sup>НИИ Аэрокосмической информатики, Азербайджан

E-mail: [asadzade@rambler.ru](mailto:asadzade@rambler.ru)

Статья посвящена вопросам повышения помехоустойчивости GPS/INS навигационных систем. Изложен предлагаемый новый способ повышения помехоустойчивости GPS навигационных систем. Приведён сравнительный анализ методов повышения помехоустойчивости интегрированных GPS/Ins систем навигации. В качестве одного из основных показателей отношения сигнал-шум выделен модифицированный показатель, известный под названием эффективное отношение мощности несущего сигнала к мощности шумов. Сформулирована оптимизационная задача повышения среднеинтегрированного показателя “эффективная величина” отношения мощности и несущего сигнала к мощности шумового сигнала. Рассмотрена возможность оптимизации среднеинтегрированной величины рассматриваемого модифицированного показателя в случае применения в качестве шумового сигнала представителя достаточно широкого класса помеховых сигналов, характеризующихся наличием интегрального ограничения на амплитудно-частотный спектр. С учетом исходного целевого функционала и интегрального ограничительного условия, наложенного на шумовые сигналы, составлен целевой функционал безусловной вариационной оптимизации. Решение сформулированной оптимизационной задачи с применением условий уравнения Эйлера-Лагранжа позволило выработать рекомендацию по повышению помехоустойчивости GPS основанных навигационных систем для некоторого ограниченного класса используемых заглушающих помех. На основании полученных результатов составлена методика повышения помехоустойчивости GPS систем наведения в условиях применения заглушающей помехи рассмотренного класса.

*Ключевые слова:* помехоустойчивость; навигационные системы; функционал; отношение сигнал-шум; оптимизация; ограничительное условие

DOI: [10.20535/RADAP.2019.77.42-46](https://doi.org/10.20535/RADAP.2019.77.42-46)

## Введение

Как отмечается в работе [1], мощность принимаемых на Земле сигналов GPS приблизительно равна — 160 дБ·Вт. Такая малая величина мощности сигнала объясняется малой мощностью передатчиков спутников и большим затуханием радиочастотных сигналов. Всё это диктует необходимость принятия различных мер по усилению помехоустойчивости навигационных систем, включающих в себя GPS приёмники. Одной из таких мер является совместное использование GPS и инерциальных систем навигации (GPS/Ins систем). GPS и инерциальные системы навигации в некотором смысле взаимно дополняют друг друга, т.к. инерциальные системы точны за короткий интервал времени и характеризуются большой погрешностью на коротких временных интервалах.

Одной из важных задач обеспечения надёжной навигации различных движущихся объектов, осна-

щённых GPS/Ins системами, является помехоустойчивость последних.

Как отмечается в работе [2], влияние широкополосных и узкополосных сигналов подавляющей помехи существенно различно. В качестве примера, на рис. 1 а, б приведены графики зависимости показателя кругового вероятного отклонения (CED) от таких параметров, как мощность генератора подавляющей помехи, тип интеграции (жёсткая, глубокая), а также вид помехи (широкополосная, узкополосная).

Как видно из графиков, представленных на рис. 2, помехоустойчивость GPS/Ins навигационной системы зависит не только от мощности генератора подавляющей помехи, но и от расстояния между генератором помех и движущимся объектом.

Как видно из графиков, представленных на рис. 2, если за пороговую величину отношения помеха/сигнал ( $J/S$ ) взять 45, то при мощности помехи  $10^3$  Вт навигационное сопровождение возможно на расстоянии более 15 км между генератором поме-

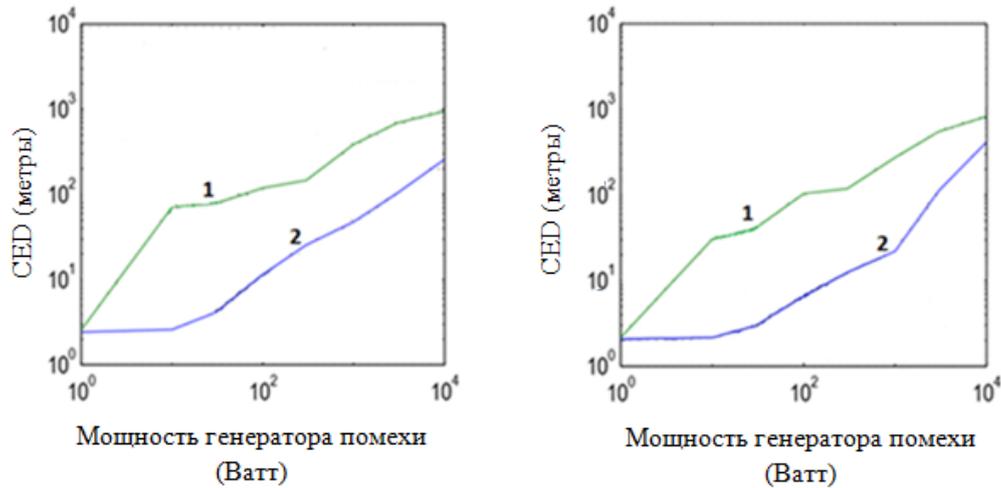


Рис. 1. Характеристики помехоустойчивости GPS/Ins навигационных систем с различной конфигурацией интеграции: а – для широкополосной помехи; б – для узкополосной помехи. Цифрами обозначены: 1 – «жесткая» интеграция, 2 – «глубокая» интеграция [2].

хи и GPS приёмником, а при мощности генератора 10<sup>4</sup>Вт указанное расстояние увеличивается до 50 км.

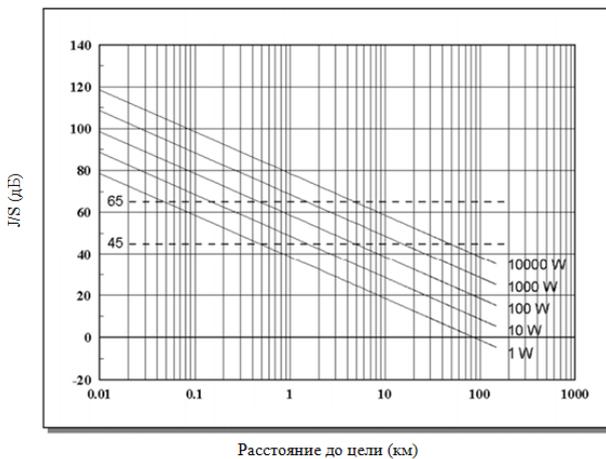


Рис. 2. Графики соотношения между показателями J/S, расстояние между генератором помехи и GPS приёмником и мощностью генератора помехи [3]

## 1 Постановка задачи

Таким образом, с учётом вышеизложенного, можно заключить, что поиск путей цифровой обработки зашумленных сигналов GPS/Ins навигационных систем является актуальной задачей. Вместе с тем, существует также другое направление повышения помехоустойчивости GPS навигационных систем, основанное на усовершенствовании антенного тракта и узлов фильтрации. Сюда можно отнести различные адаптивные методы многоантенного приёма [4, 5]. Что касается метода фильтрации, то здесь существуют некоторые дополнительные возможности фильтрации зашумленного GPS сигнала

при наличии априорных или апостериорных данных об энергочастотных характеристиках шумового сигнала.

Как отмечается в работе [6], для формирования необходимой статистики, позволяющей обнаружение подавляющего помехового сигнала может быть использован показатель  $J/N_0$ , т.е. отношение мощности несущего сигнала к мощности шумового сигнала, который при  $J = -160$  Дб·Вт и  $N_0 = -204$  Дб·Вт/Гц равна 44 Дб · Гц.

Отличие  $J/N_0$  от отношения сигнал/шум ( $S/N$ ) в том, что при вычислении  $S/N$  следует учесть ширину полосы приёмника / кода, равную, предположительно 4 МГц [7]. В этом случае, согласно [7],  $\frac{S}{N} = -22$ .

Следует отметить, что в работе [8] был введён несколько модифицированный показатель, названный эффективным отношением мощности несущего сигнала к мощности шумов,  $J/N_0|_{eff}$ , определяемый как

$$\frac{C}{N_0} |_{eff} = \frac{C}{N_0 + K_\alpha \cdot J} = \frac{C}{N_0} \cdot \left( \frac{1}{1 + K_\alpha \cdot \frac{J}{N_0}} \right), \quad (1)$$

где:  $J$  – мощность заглушающей помехи;

$\alpha$  – коэффициент спектрального разделения, характеризующий фильтрационную способность GPS приёмника в отношении шумового сигнала.

Далее, в настоящей статье мы рассмотрим возможность оптимизации среднеинтегрированного показателя  $\frac{C}{N_0} |_{eff}$  для случая применения в качестве шумового сигнала представителей достаточно широкого класса помеховых сигналов характеризующихся наличием интегрального ограничения на

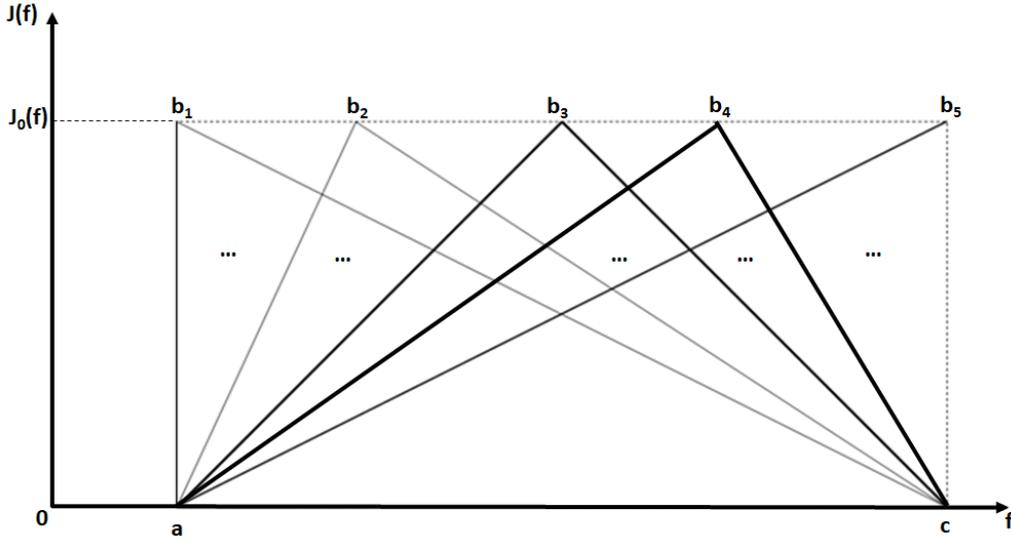


Рис. 3. Некоторые примеры помеховых сигналов, удовлетворяющих условию (2)

амплитудно-частотный спектр в виде

$$F_1 = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} J(f) df = C = \text{const.} \quad (2)$$

Геометрическая интерпретация условия (2) приведена на рис. 3.

Как видно из графиков, представленных на рис. 3, площади всех треугольников  $abc_i$ ,  $i = \overline{1, 5}$ , одинаковы, что указывает на выполнение ограничительного условия (2).

С учётом выражений (2) и (3) сформулируем полный функционал безусловной вариационной оптимизации

$$\begin{aligned} F_0 &= F_2 + \lambda \cdot F_1 = \\ &= \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \frac{C}{N} \left( \frac{1}{1 + K_\alpha(f) \cdot \frac{J(f)}{N_0}} \right) df + \\ &\quad + \lambda \left[ \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} K_\alpha(f) df - C \right], \quad (4) \end{aligned}$$

где:  $\lambda$  – множитель Лагранжа.

Согласно условиям уравнения Эйлера-Лагранжа [9] решение оптимизационной задачи вычисления оптимальной функции  $\alpha(f)$  должно удовлетворить условию

$$\frac{d \left\{ \frac{C}{N} \left( \frac{1}{1 + K_\alpha(f) \cdot \frac{J(f)}{N_0}} \right) + \lambda \cdot K_\alpha(f) \right\}}{dK_\alpha(f)} = 0. \quad (5)$$

## 2 Решение задачи

С учётом выражения (1) целевой функционал оптимизации сформулирован в виде

$$F_2 = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \frac{C}{N_0} \left( \frac{1}{1 + K_\alpha(f) \cdot \frac{J(f)}{N_0}} \right) df. \quad (3)$$

Из выражения (5) получим

$$-\frac{C}{N} \cdot \frac{\left( \frac{J(f)}{N_0} \right)}{\left( 1 + K_\alpha(f) \cdot \frac{J(f)}{N_0} \right)^2} + \lambda = 0. \quad (6)$$

Из (6) находим

$$K_\alpha(f) = \frac{N_0}{J(f)} \left[ \sqrt{\frac{C}{\lambda N} \left( \frac{J(f)}{N_0} \right)} - 1 \right]. \quad (7)$$

Очевидно, что с учётом выражений (2) и (7) можно получить выражение для вычисления  $\lambda$ . Для упрощения математической записи, примем, что указанное выражение получено и вычисленную по этому выражению величину  $\lambda$  обозначим как  $\lambda_0$ . В этом случае можно считать, что при

$$K_\alpha(f) = \frac{N_0}{J(f)} \left[ \sqrt{\frac{C}{\lambda_0 N} \left( \frac{J(f)}{N_0} \right)} - 1 \right]. \quad (8)$$

Функционал (4), а следовательно и  $F_2$ , достигает экстремума. Для определения типа экстремума следует проверить знак второй производной инте-

гранта в (4). Имеем

$$\begin{aligned} d^2 \left\{ \frac{C}{N} \left( \frac{1}{1+K_\alpha(f) \cdot \frac{J(f)}{N_0}} \right) + \lambda \cdot K_\alpha(f) \right\} &= \\ \frac{dK_\alpha(f)^2}{- \frac{C}{N} \cdot \left( -2 \left( 1 + K_\alpha(f) \frac{J(f)}{N_0} \right) \right)} &= \\ \left( 1 + K_\alpha(f) \cdot \frac{J(f)}{N_0} \right)^4 &. \quad (9) \end{aligned}$$

Как видно из выражения (9), оно всегда положительно. Следовательно, решение (8) определяет условие достижения минимальной величины  $F_1$ . С учётом выражения (1) минимум  $F_1$  означает наименьшую среднеинтегрированную способность фильтрации GPS приёмника в отношении помехи  $J(f)$ . Таким образом показано, что реализация фильтрационной способности GPS в виде функции (8) является наилучшим решением для задачи оптимизации в смысле достижения максимума среднеинтегрированной величины

$$C/N_0 \Big|_{eff}.$$

### 3 Заключение

С учётом вышеизложенного предлагается следующая простая методика повышения помехоустойчивости GPS систем наведения в условиях заглушающей помехи:

1. Исследуется заглушающий помеховый сигнал  $J(f)$ . Выясняется, выполняется ли условие (2) в полосе  $f_{min} - f_{max}$ .

2. Если условие (2) выполняется, то должны быть приняты меры, чтобы функция  $\alpha(f)$  максимально отличалась от функции (8).

3. Если условие (2) не выполняется, то требование по пункту 2 снимается.

3. На основании полученных результатов составлена методика повышения помехоустойчивости GPS систем в условиях применения заглушающей помехи

### References

- [1] Lakshmi M.S., Prasad N. (2012) GPS Receiver Protection Requirement for Unmanned Aerial Vehicle. *International Journal of Electrical, Electronics and Computer Engineering*, Vol. 1, No 2, pp. 55-59.
- [2] Schmidt G.T. and Phillips R.E. (2011) *INS/GPS Integration Architecture Performance Comparisons*, RTO-EN-SET-116(2011), 24 p.
- [3] Ohlmeyer E., Pepitone T., Miller B., Malyevac D., Bibel J., Evans A., Ohlmeyer E., Pepitone T., Miller B., Malyevac D., Bibel J. and Evans A. (1997) GPS-aided navigation system requirements for smart munitions and guided missiles. *Guidance, Navigation, and Control Conference*. DOI: 10.2514/6.1997-3683
- [4] Dabak O.C., Erdem F., Sonmez T., Alatan L. and Koc S.S. (2016) Interference suppression in a GPS receiver with 4 element array design and implementation of beamforming algorithms. *2016 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*. DOI: 10.1109/plans.2016.7479757
- [5] Daneshmand S., Sokhandan N., Zaeri-Amirani M. and Lachapelle G. (2014) Precise Calibration of a GNSS Antenna Array for Adaptive Beamforming Applications. *Sensors*, Vol. 14, Iss. 6, pp. 9669-9691. DOI: 10.3390/s140609669
- [6] Dimc F., Bažec M., Borio D., Gioia C., Baldini G. and Basso M. (2017) An Experimental Evaluation of Low-Cost GNSS Jamming Sensors. *Navigation*, Vol. 64, Iss. 1, pp. 93-109. DOI: 10.1002/navi.184
- [7] GPS Carrier-to-Noise density. Available at: <http://www.northwoodlabs.com/AN101.pdf>
- [8] Betz J.W. (2001) *Effect of Partial-Band Interference on Receiver Estimation of C/N0: Theory*. DOI: 10.21236/ada457817
- [9] El'sgol'ts L.E. (1974) *Differentsial'nye uravneniya i variatsionnoe ischislenie* [Differential Equations and Calculus of Variations]. Moscow, Nauka, 432 p.

### Питання підвищення завадостійкості GPS/INS навігаційних систем авіазакобів

Абдулов Р. Н., Асадов Х. Г.

Статтю присвячено питанням підвищення завадостійкості GPS/INS навігаційних систем, що включають в себе GPS та інерціальні навігаційні пристрої. Пошук ефективних шляхів цифрової обробки зашумлених сигналів навігаційних систем є актуальним завданням, разом з тим, існує також інший напрямок розвитку GPS навігаційних систем, що заснований на удосконаленні антенного тракту і кутів фільтрації. Сюди можна віднести різні адаптивні методи рознесенного прийому. Що стосується методу фільтрації, то тут існують деякі додаткові можливості фільтрації зашумленого GPS сигналу за наявності апріорних або апостеріорних даних про енергочастотні характеристики шумового сигналу. Наведено порівняльний аналіз методів підвищення завадостійкості інтегрованих GPS/INS систем навігації. Розглянуто можливість оптимізації середньоінтегрованої величини модифікованого показника, названого ефективним відношенням потужності сигналу до потужності шумів відносно до випадку застосування в якості шумового сигналу представників досить широкого класу сигналів завад та характеризуються наявністю інтегрального обмеження на амплітудно-частотний спектр. Сформульована оптимізаційна задача підвищення середньоінтегрованого показника "ефективна величина" відношення потужності сигналу до потужності шумового сигналу. Рішення сформульованої оптимізаційної задачі дозволило виробити рекомендації щодо підвищення завадостійкості GPS / INS заснованих навігаційних систем для деякого обмеженого класу використаних перешкод. Запропоновано методику підвищення завадостійкості GPS систем наведення в умовах застосування перешкод.

*Ключові слова:* навігаційна система; оптимізація; стійкість; завади; фільтрація

## Issues of Improving the Noise Immunity of GPS/INS Aircraft Navigation Systems

*Abdulov R. N., Asadov H. H.*

The paper is devoted to questions on increasing of noise immunity of GPS/INS navigation systems containing GPS and inertial navigation systems. Analysis of effectual methods for digital processing of noisy signals of GPS/INS navigation systems is actual task. At the same time there is another direction of development of GPS navigation systems, based on modification of aerial tract and filtration devices. Different adaptive methods of multi-aerial receipt can be stressed out as an example. As regards the filtration method, there are some additional possibilities for filtration of noisy GPS signals upon presence of a priori or a posteriori data on energy-frequency characteristics of noise signal. The comparative analysis of methods for increasing of noise immunity of integrated GPS/INS navigation

systems is carried out. The possibility for optimization of averaged integrated value of modified indicator, named as effective ratio of power of carrier signal on noise power regarding the case of utilization of noise signals pertaining to broad class of noise signals characterized by presence of integrated limitation condition imposed on amplitude-frequency spectrum. The optimization task on increase of averaged integrated parameter indicating the effective value of ratio of power of carrier signal on power of noise signal is formulated. Solution of formulated optimization task make it possible to formulate recommendations for increasing the noise immunity of GPS/INS based navigation systems for some limited class of utilized jamming noise. The methodic to increase noise immunity of GPS targeting systems in condition of jamming noise is suggested.

*Key words:* navigation system; optimization; noise immunity; noise; filtration