

Вопросы повышения помехоустойчивости GPS/INS навигационных систем

Issues of improving the noise immunity of GPS/INS navigation systems

Абдулов / Abdulov R.

Рауф Иусрат оглы

(rauf-abdulov@yandex.ru)

кандидат технических наук, доцент.

НИИ Министерства оборонной промышленности

Азербайджанской Республики,

зам. главного инженера.

г. Баку

Асадов / Asadov H.

Хикмет Гамид оглы

(asadzade@rambler.ru)

доктор технических наук, профессор.

НИИ Аэрокосмической информатики Национального

аэрокосмического агентства, начальник отдела.

г. Баку

Ключевые слова: навигационная система – navigation system; оптимизация – optimization; помехоустойчивость – interference immunity; помеха – interference; фильтрация – filtering.

Статья посвящена вопросам повышения помехоустойчивости GPS/INS навигационных систем. Приведён сравнительный анализ методов повышения помехоустойчивости интегрированных GPS/INS систем навигации. Сформулирована оптимизационная задача повышения среднеинтегрированного показателя «эффективная величина отношения мощности несущего сигнала к мощности шумового сигнала». Решение сформулированной оптимизационной задачи позволило выработать рекомендацию по повышению помехоустойчивости GPS-основанных навигационных систем при воздействии некоторого ограниченного класса используемых заглушающих помех.

The article is centered on the issues of improving the noise immunity of GPS/INS navigation systems. A comparative analysis of methods for enhancing interference immunity of integrated GPS/INS navigation systems is presented. The optimization problem of increasing the average integrated index "effective value of the ratio of the carrying signal power to the noise signal power" is formulated. The solution of the formulated optimization problem made it possible to develop a recommendation to improve the interference immunity of GPS-based navigation systems under the influence of a limited class of used jamming interferences.

Как отмечается в работе [1], в области военной авионики наиболее распространёнными являются создание управляемых ракет, систем навигации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), а также создание систем управления точной посадки самолётов. Следует отметить, что мощность принимаемых на Земле сигналов GPS приблизительно равна –160 дБВт. Такая малая величина мощности сигнала объясняется малой мощностью передатчиков спутников и большим затуханием разночастотных сигналов. Всё это диктует необходимость принятия различных мер

по усилению помехоустойчивости различных мер по усилению помехоустойчивости различных навигационных систем, включающих в себя GPS приёмники. Одним 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 больших временных интервалах. Согласно работе [2], системы GPS/INS навигации могут иметь две степени интеграции: «мягкую» и «жёсткую». Блок-схема GPS/INS с «мягкой» интеграцией приведена на рис. 1а, с «жёсткой» – на рис. 1б. В последнее время наиболее развитой считается метод «глубокой интеграции», в котором проблема интеграции формулируется в качестве задачи оценки, где оптимальное решение с минимальным отклонением отыскивается отдельно для каждой компоненты многомерного вектора состояния навигации [3].

Одной из не менее важных задач обеспечения надёжной навигации различных движущихся объектов, оснащённых GPS/INS системами, является помехоустойчивость последних.

Как отмечается в работе [4], влияние широкополосных и узкополосных сигналов подавляющей помехи существенно различно. В качестве примера, на рис. 2 приведены графики показателя кругового вероятного отклонения (CED) в зависимости 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. 3, если за пороговую величину отношения помеха/сигнал



Рис. 1а. GPS/INS система с «мягкой» интеграцией [2]. Цифрами обозначены: 1 – GPS приемник, 2 – узел обработки радиочастотного сигнала, 3 – узел слежения, 4 – фильтр Кальмана GPS, 5 – Фильтр Кальмана, 6 – узел Ins калибровки

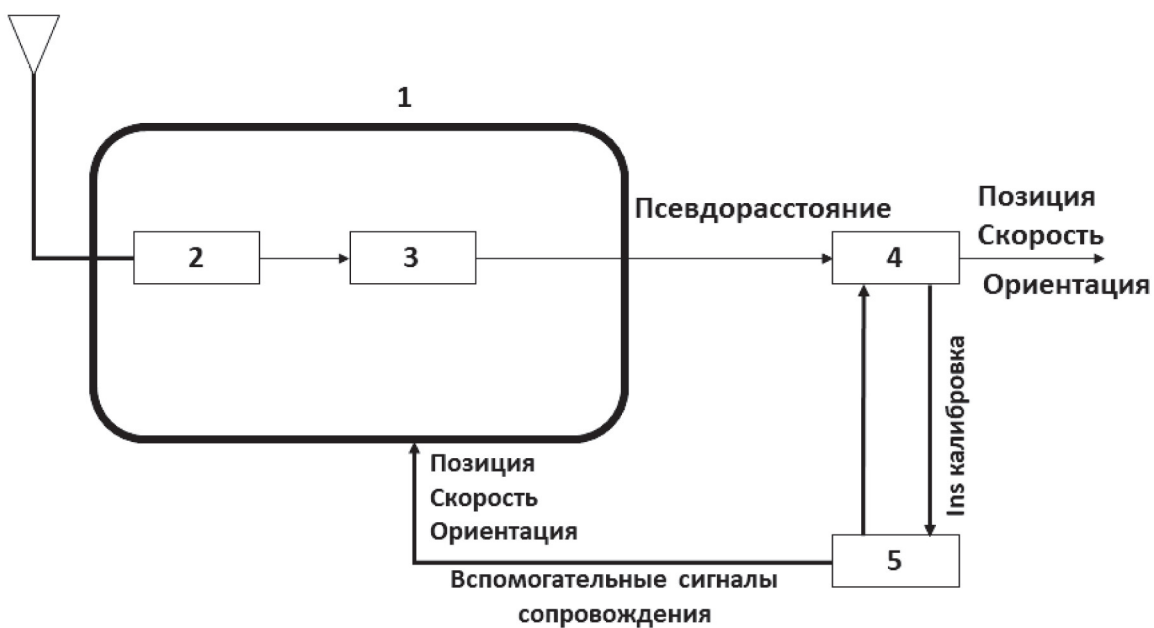


Рис. 1б. GPS/INS система с «жесткой» интеграцией [3]. Цифрами обозначены: 1 – GPS; 2 – узел обработки радиосигнала; 3 – узел слежения; 4 – фильтр Кальмана; 5 – инерциальная система навигации

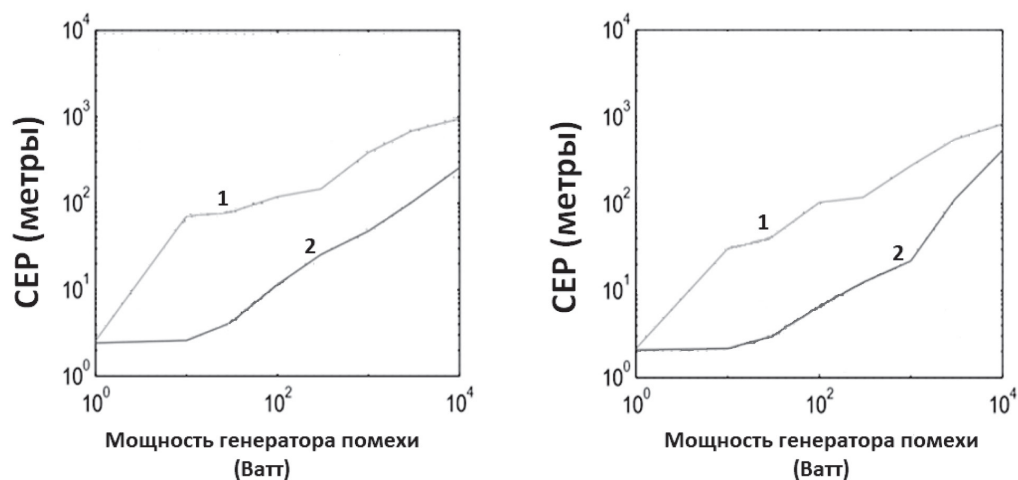


Рис. 2. Характеристики помехоустойчивости GPS/INS навигационных систем с различной конфигурацией интеграции: слева – для широкополосной помехи; справа – для узкополосной помехи. Цифрами обозначены: 1 – «жёсткая» интеграция, 2 – «глубокая» интеграция [4]

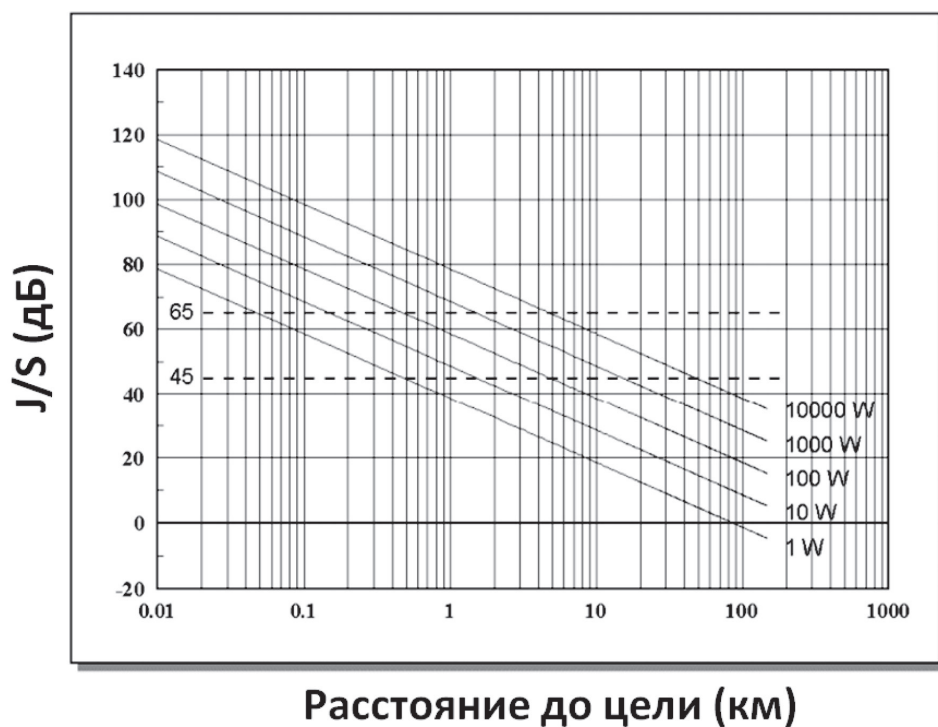


Рис. 3. Графики соотношения между показателями J/S, расстояние между генератором помехи и GPS приёмником и мощностью генератора помехи [5]

(J/S) взять 45, то при мощности помехи 103 Вт навигационное сопровождение возможно на расстоянии более 15 км между генератором помехи и GPS приёмником, а при мощности генератора 104 Вт указанное расстояние увеличивается до 50 км [км].

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 развития GPS навигационных систем, основанное на усовершенствовании антенного тракта и узлов фильтрации. Сюда можно отнести различные адаптивные методы многоантенного приёма [6,7]. 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 [8], для формирования необходимой статистики, позволяющей осуществить обнаружение подавляющего помехового сигнала, может быть использован показатель C/N_0 , стандартного GPS приемника. Согласно [9], показатель C/N_0 , т.е. отношение мощности несущего сигнала к мощности шумового сигнала при $C = -160$ Дб.Вт и $N_0 = -204$ Дб.Вт/Гц определится как

$$\frac{C}{N_0} = \frac{-160 \text{ Дб} \cdot \text{Вт}}{-204 \left(\frac{\text{Дб} \cdot \text{Вт}}{\text{Гц}} \right)} = 44 \text{ Дб} \cdot \text{Гц}$$

Отличие C/N_0 от отношения сигнал/шум (S/N) в том, что при вычислении S/N следует учесть ширину полосы приёмника C/A кода, равную, предположительно 4 МГц [9]. В этом случае

$$\frac{S}{N} = \frac{-160 \text{ Дб} \cdot \text{Вт}}{4 \cdot 10^6 \text{ Гц} \cdot \left(-204 \left(\frac{\text{Дб} \cdot \text{Вт}}{\text{Гц}} \right) \right)} = -22 \text{ Дб}$$

Следует отметить, что в работе [10] был введён несколько модифицированный показатель, названный эффективным отношением мощности несущего сигнала к мощности шумов, $C/N_{0\text{eff}}$, определяемый как

$$\left. \frac{C}{N_0} \right|_{\text{eff}} = \frac{C}{N_0 + K_a \cdot J} = \frac{C}{N_0} \cdot \left(\frac{1}{1 + K_a \cdot \frac{J}{N_0}} \right) \quad (1)$$

где: J – мощность заглушающей помехи;

K_a – коэффициент спектрального разделения, характеризующий фильтрационную способность GPS приёмника в отношении шумового сигнала.

Далее, в настоящей статье мы рассмотрим возможность оптимизации среднеинтегрированного показателя $\left. \frac{C}{N_0} \right|_{\text{eff}}$ применительно к случаю применения в качестве шумового сигнала представителей достаточно широкого класса помеховых сигналов характеризующихся наличием интегрального ограничения на 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. 4.

Как видно из графиков, представленных на рис. 4, площади всех треугольников $ab_i c$, $i = \overline{1,5}$, одинаковы, что указывает на выполнение ограничительного условия (2).

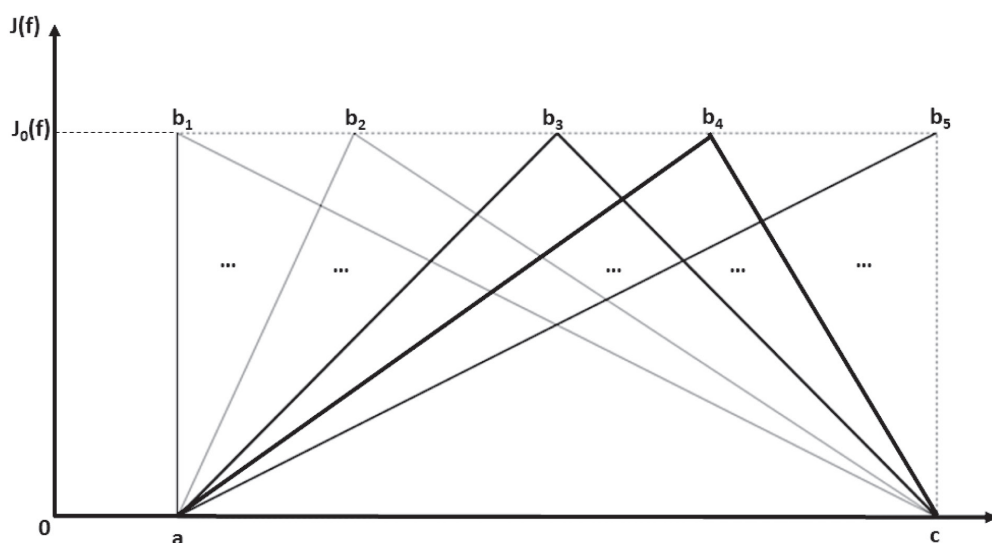


Рис. 4. Некоторые приметы помеховых сигналов, удовлетворяющих условию (2)

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

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

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

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

где: λ – множитель Лагранжа.

Согласно условиям уравнения Эйлера-Лагранжа [11], решение оптимизационной задачи вычисления оптимальной функции $K_\alpha(f)$ должно удовлетворить условию

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

Из выражения (5) получим

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

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 λ . Для упрощения математической записи примем, что указанное выражение получено, и вычисленную по этому выражению величину λ обозначим как λ_0 . В этом случае можно считать, что при

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

функционал (4), а следовательно и F_2 достигает экстремума. Для определения типа экстремума следует проверить знак второй производной интегранта в (4). Имеем

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

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 $C/N_0|_{eff}$. С учётом вышеизложенного предлагается следующая простая методика повышения помехоустойчивости GPS систем наведения в условиях загромождённой помехи:

1. Исследуется загромождающий 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 $K_\alpha(f)$ максимально отличалась от функции (8).

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

В заключение сформулируем основные выводы и положения проведённого исследования:

1. Приведён сравнительный анализ методов повышения помехоустойчивости интегрированных GPS/INS систем навигации.

2. Сформулирована оптимизационная задача повышения среднеинтегрированного показателя «эффективная величина отношения мощности и несущего сигнала к мощности шумового сигнала».

3. Решение сформулированной оптимизационной задачи позволило выработать рекомендацию по повышению помехоустойчивости GPS основанных навигационных систем для некоторого ограниченного класса используемых загромождающих помех.

Литература

1. Lakshmi, S. GPS Receiver Protection Requirement for Unmanned Aerial Vehicle / S. Lakshmi, N. Prasad // International

Journal of Electrical, Electronics and Computer Engineering. – 2012. – No. 1(2). – P. 55–59.

2. Schmidt, G. T. INS/GPS Technology Trends / G.T. Schmidt // RTO-EN-SET-116. – 2011. – P. 1–24.

3. A Nonlinear Code Tracking Filter for GPS-Based Navigation / D. Gustafson [et al.] // IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing. – 2009. – Vol. 3, No. 4. – P. 627–638.

4. Schmidt, G.T. INS/GPS Integration Architecture Performance Comparisons / G.T. Schmidt, R.E. Phillips // RTO-EN-SET-116. – 2011. – P. 6–24

5. GPS-aided navigation system requirements for smart munitions and guide missiles [Электронный ресурс] / E. Ohlmeyer [et al.]. – Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/267254675>, свободный. – Загл. с экрана.

6. Interference suppression in a GPS receiver with 4 Element Array Design and implementation of beamforming algorithms [Электронный ресурс] / O.C. Dabak [et al.]. – Режим доступа: <https://www.semanticscholar.org/paper/Interference-suppression-in-a-GPS-receiver-with-4-Dabak-Erdem/1d7978369587ec9e0a53a70caa2582e9a23942>, свободный. – Загл. с экрана.

7. Precise Calibration of a GNSS Antenna Array for Adaptive Beamforming Applications / S. Daneshmand // Sensors. – 2014. – No. 14. – P. 9669–9691.

8. Dimc, F. An experimental evaluation of low-cost GNSS jamming sensors / F. Dimc, M. Bazec // Navigation Journal of the Institute of Navigation. – 2017. – Vol. 64, No. 1. – P. 93–109.

9. GPS Carrier-to-Noise density [Электронный ресурс] / Northwood Labs LLC, 2003. – Режим доступа – <http://www.northwoodlabs.com/AN101.pdf>, свободный. – Загл. с экрана.

10. Betz, J. W. Effect of Partial-Band Interference on Receiver Estimation of C/N0: Theory / J. W. Betz // Proceedings of the National Technical Meeting of The Institute of Navigation. – Long Beach, CA, January 2001. – P. 817–828.

11. Эльсгольц, Л. Е. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление / Л.Е. Эльсгольц. – М.: Наука, 1974. – 432с.