



рожные ситуации предполагают выполнение действий, регламентированных правилами дорожного движения (ПДД). Разработаны правила людьми, людям присуща мораль, аморальность ПДД не установлена. Более того, соблюдение правил обязательно с точки зрения закона, нарушение которого влечет вполне определенные последствия.

Литература

- [1] *Проблема вагонетки* (2016), URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Проблема_вагонетки (дата обращения 21 января 2017).
- [2] Friesdorf, R., Conway, P., & Gawronski, B. *Gender differences in responses to moral dilemmas*, *Personality and Social Psychology Bulletin*, 41, 2015, pp. 696-713.

В.В. Днепров

АНАЛИЗ ДИСКРИМИНАТОРА УГЛОВ В ОДНОЭТАПНОМ АЛГОРИТМЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВОЙ ОРИЕНТАЦИИ ОБЪЕКТА ПО СИГНАЛАМ СРНС

(Национальный исследовательский университет Московский энергетический институт, инженер, аспирант)

Спутниковые радионавигационные системы (СРНС) решают не только свою основную задачу – определение координат и времени потребителя, но и оказываются полезны в ряде других приложений. Так известно [1], что с помощью СРНС можно определять угловую ориентацию объекта, будь то автомобиль, самолетили часть объекта (сеялка, плуг и т.п.). Для решения задачи применяют относительные измерения фаз сигналов, принимаемых несколькими разнесенными антеннами. Определение ориентации традиционно выполняется в два этапа [1, 2]. На первом этапе измеряются разности фаз, разрешается фазовая неоднозначность. На втором этапе производится расчет параметров, характеризующих ориентацию антенн относительно опорной системы координат. По аналогии с решением задачи позиционирования, можно попробовать применить одноэтапный подход к определению ориентации [1]. Одноэтапная обработка позволяет повысить точность и помехоустойчивость аппаратуры по сравнению с аппаратурой с двухэтапной обработкой [1].

В данной работе анализируются характеристики дискриминатора углов одноэтапного алгоритма [3], непосредственно формирующего оценки углов ориентации по сигналам разнесенных в пространстве антенн.

Под углами ориентации объекта будем понимать углы Эйлера: угол крена r (roll), угол тангажа p (pitch), угол рыскания y (yaw). Объединим их в вектор $\alpha = |r \quad p \quad y|^T$. Эти углы характеризуют взаимную ориентацию связанной с



объектом системы координат (ССК или RPY) и некоторой опорной системы координат (ОСК), например, локальной север-восток-низ (NED).

Из-за пространственного разнесения антенн, радионавигационные сигналы в приемных точках $m = \overline{2, M}$ имеют фазовый сдвиг относительно первой приемной антенны равный

$$\psi_{m,n}(\mathbf{a}) = \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{k}_n^T \mathbf{U}_{ССК}^{ОСК}(\mathbf{a}) \mathbf{I}_m^{ССК} = \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{k}_n^T \mathbf{I}_m^{ОСК}(\mathbf{a}),$$

где λ – длина волны навигационного радиосигнала; \mathbf{k}_n^T – орт линии визирования на n -ый космический аппарат (КА) $n = \overline{1, N}$; $\mathbf{U}_{ССК}^{ОСК}(\mathbf{a})$ – матрица преобразования координат из ССК в ОСК; $\mathbf{I}_m^{ССК}$ – радиус-вектор, задающий ориентацию m -ой антенны в ССК.

В работе [3] проведен синтез углового дискриминатора, обрабатывающего сигналы от трех антенн. Обобщение результата на произвольное число приемных точек и видимых КА приводит к следующему результату. Одноэтапный алгоритм определения угловой ориентации использует три угловых дискриминатора – крена, тангажа, рыскания. При этом каждый из них является суммой частных дискриминаторов соответствующих углов по каждой базе и каждому спутнику.

$$\begin{aligned} u_r &= \sum_{m=2}^M \sum_{n=1}^N u_{r,m,n} = \sum_{m=2}^M \sum_{n=1}^N \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{k}_n^T \mathbf{L}_{r,m}(\tilde{\mathbf{a}}) u_{\psi,m,n}, \\ u_p &= \sum_{m=2}^M \sum_{n=1}^N u_{p,m,n} = \sum_{m=2}^M \sum_{n=1}^N \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{k}_n^T \mathbf{L}_{p,m}(\tilde{\mathbf{a}}) u_{\psi,m,n}, \\ u_y &= \sum_{m=2}^M \sum_{n=1}^N u_{y,m,n} = \sum_{m=2}^M \sum_{n=1}^N \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{k}_n^T \mathbf{L}_{y,m}(\tilde{\mathbf{a}}) u_{\psi,m,n}, \end{aligned}$$

где $u_{\psi,m,n}$ – дискриминатор разности фаз (ДРФ), синтез и анализ которого приведен, например, в [4];

$\mathbf{L}_{r(p,y),m}(\tilde{\mathbf{a}}) = \frac{\partial}{\partial r(p,y)} \mathbf{U}_{ОСК}^{ССК}(\tilde{\mathbf{a}}) \mathbf{I}_m^{ССК}$ – соответствующий каждому углу множитель, рассчитанный в точке экстраполированных значений углов $\tilde{\mathbf{a}}$.

При анализе помехоустойчивости и реализации следящих систем в аппаратуре определения угловой ориентации требуется знать такие характеристики дискриминаторов, как апертуру дискриминационной характеристики (ДХ), и ее крутизну [5].

Общая дискриминационная характеристика для дискриминатора угла крена, тангажа или рыскания является суммой дискриминационных характеристик частных дискриминаторов. Например, ДХ частных дискриминаторов угла крена (roll) определяется выражением:



$$U_{r,m,n}(r; \tilde{\alpha}) = \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{k}_n^T \mathbf{L}_{r,m}(\tilde{\alpha}) E[u_{\psi,m,n}] = \\ = \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{k}_n^T \mathbf{L}_{r,m}(\tilde{\alpha}) S_{\psi} \sin(\psi_{m,n}(r, \tilde{p}, \tilde{y}) - \psi_{m,n}(\tilde{\alpha})),$$

где $S_{\psi} = \left(\frac{AL}{2}\right)^2$ – крутизна ДХ ДРФ;

Аналогично определяются ДХ для дискриминаторов оставшихся углов. Крутизна дискриминационной характеристики определяется как сумма отдельных крутизн ДХ частных дискриминаторов для m -ой приемной антенны и n -го спутника. Крутизну дискриминационной характеристики можно представить в виде:

$$S_r = \sum_{m=2}^M \sum_{n=1}^N S_{r,m,n} = \sum_{m=2}^M \sum_{n=1}^N \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 S_{\psi} \left(\mathbf{k}_n^T \mathbf{L}_{r,m}(\tilde{\alpha})\right)^2.$$

Аналогично записываются выражения для крутизны ДХ дискриминатора тангажа и рыскания.

С возрастанием крутизны частного дискриминатора уменьшается дисперсия его эквивалентных наблюдений.

$$D_{\alpha,m,n} = \frac{S_{\psi}}{S_{\alpha}} \frac{1}{q_{c/n0} T} \left(1 + \frac{1}{2q_{c/n0} T}\right)$$

Результаты моделирования

На первом этапе для простоты и наглядности рассмотрим «плоскую» задачу, когда одна базовая линия вращается в плоскости NOD (изменяется только угол тангажа), и в той же плоскости лежит линия визирования единственного спутника. Расстояние между антеннами 1.5 м., длина волны $\lambda \approx 19$ см. В таком случае, характеристики дискриминатора определяются углом между радиус-вектором базовой линии и линией визирования на спутник. На рисунке 1 представлены ДХ и прямые вида $y = S_D(p - \tilde{p})$ для нескольких значений этого угла. Отметим, что различное взаимное расположение базовой линии и НС приводит к разной апертуре и крутизне ДХ. Так, когда базовая линия и линия визирования НС практически коллинеарны, крутизна ДХ стремится к нулю – малое изменение ориентации практически не находит отклика в изменении разности фаз. Следовательно, вклад такого частного дискриминатора в общую сумму будет наименьшим, а шумы его эквивалентных наблюдений – максимальны.

Полный дискриминатор угла ориентации является суммой отдельных частных дискриминаторов. В типичных практических приложениях можно ожидать сложения нескольких десятков частных дискриминаторов, при этом основной вклад будут вносить дискриминаторы с большей крутизной.

На рисунке 2 представлены нормированные на крутизну ДХ полного дискриминатора угла тангажа для 10000 всевозможных случайных ориентаций антенной системы из 3 антенн. Более темный цвет отражает большую плотность



реализаций. Антенны расположены в вершинах правильного треугольника с длиной ребра 1 м. Принимаются сигналы 8 видимых НС. По результатам моделирования отмечена обратная зависимость между крутизной и шириной апертуры. Рассчитана гистограмма ширины апертуры ДХ. Минимальное значение ширины апертуры в выборке составляет 13 градусов, максимальное – 90 градусов. В интервале от 13 до 32 градусов содержится 95% реализаций, что соответствует прогнозам, полученным выше при анализе характеристик частных дискриминаторов. При увеличении длины базы до двух метров характер зависимостей сохраняется, 95%-й реализаций ширины апертуры находится в интервале от 7 до 16 градусов.

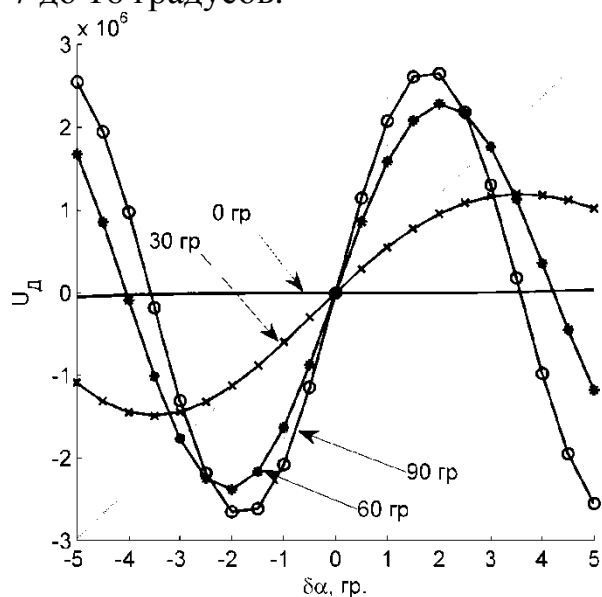


Рисунок 1

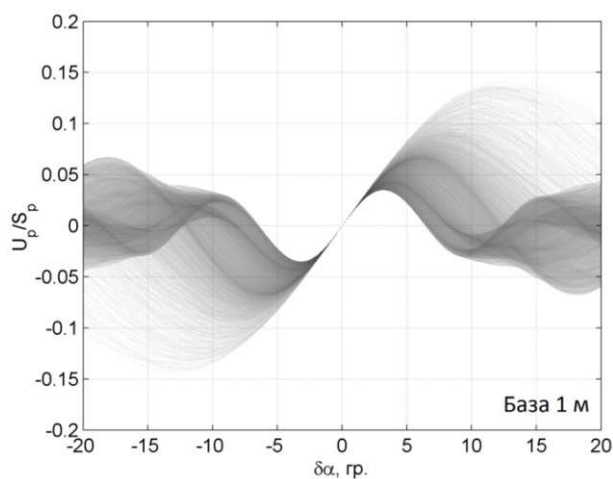


Рисунок 2

Литература

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под. ред. Перова А.И., Харисова В.Н. — изд. 4-е, перераб. и доп.. — М.: Радиотехника, 2010. — 800 с.
2. Фатеев Ю.Л. Определение пространственной ориентации объектов по сигналам радионавигационных систем ГЛОНАСС/GPS. Электронный журнал "Исследовано в России", 2004 г, 72, стр. 792-801, <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/071.pdf>.
3. Перов А. И. Одноэтапный когерентно-некогерентный алгоритм определения угловой ориентации объекта по сигналам спутниковой радионавигационной системы // Радиотехника. 2014. № 9. С. 97-105.
4. Корогодин, И. В., Перов, А. И. Синтез и анализ дискриминаторов разностей фаз сигналов, принимаемых на множестве пространственно разнесенных точек // Радиотехника. 2010. № 7. С. 84-92.
5. Перов А. И., Замолодчиков В. Н., Чиликин В. М. Радиоавтоматика — М.: Радиотехника, 2014. — 320 с.