

ПРЕДЕЛЬНОЕ РАЗРЕШЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СИГНАЛОВ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ АЛГОРИТМА КЕЙПОНА

Шарко В. П.

ООО «Софтум», г. Киев, ул. Московская 8Е

Email: vadim.sharko@softheme.com

Capon Ultimate Resolution of Navigation Satellite Spatial Signals

The use of phase front measurements in the processing of spatiotemporal signals of global satellite navigation systems gives the possibility to determine navigation satellite's coordinates relatively to a navigation object and then determine the navigation object's coordinates. Signals of at least two navigation satellites are to be processed with the purpose of determining three coordinates and a precise time. A solution for Capon ultimate resolution of spatial signals received from two navigation satellites is investigated in this work.

Для измерения расстояний между навигационным объектом (НО) и навигационными спутниками (НС) в спутниковых навигационных системах (СНС) используются комбинации кодового и фазового псевдодальностных методов (ПМ), в основе которых лежат измерения времени распространения сигнала от НС к НО и фазы принятого сигнала относительно излучаемого [1]. Полученные значения расстояний применяются для решения системы как минимум трёх навигационных уравнений (НУ), если значение рассогласования t_D времени приёмника НО и передатчика НС равно нулю, или как минимум четырёх НУ, если $t_D \neq 0$.

Минимальное число НУ может быть уменьшено до двух или одного при неизвестном или известном t_D соответственно, если дополнительно к временным измерениям проводятся измерения фазового фронта (ФФ) принимаемого пространственного сигнала (ПС) НС. В работе [2] предложено и проведено исследование теоретической возможности таких измерений на основе использования известных алгоритмов согласованной пространственной обработки ПС и показано, что потенциальная эффективность такого подхода сравнима с эффективностью алгоритмов на основе комбинаций ПМ, используемых в СНС.

Поскольку для решения системы НУ, в которых координаты измеряются по ФФ принимаемого ПС, в общем случае требуются измерения ПС от двух НС [1], вполне очевидна необходимость исследования предельной разрешающей способности (ПРС) алгоритма обработки в зависимости от способа размещения антенных элементов (АЭ), размеров антенной системы (АС), координат НС и

мощности принимаемого сигнала. Пространственная часть корреляционной матрицы (КМ), в которую входят два входных ПС с одинаковой мощностью и некоррелированный шум, может быть представлена в виде

$$\dot{\mathbf{K}} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{a}}^{(1)} & \dot{\mathbf{a}}^{(2)} \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{a}}^{(1)} & \dot{\mathbf{a}}^{(2)} \end{bmatrix}^H + P_0 \mathbf{I},$$

где $\dot{\mathbf{a}}^{(k)}$ - вектор-столбец k -го НС, элемент которого в случае эквидистантной антенной решётки

$$\dot{a}_i^{(k)} = U_m e^{-j\beta b i \sin \gamma_k}$$

$k = 1, 2$ - номер НС, $i = 0 \dots N - 1$ - номер АЭ, N - число АЭ, b - шаг решётки, γ_k - угловая координата k -го НС, U_m - амплитуда ПС, $P = U_m^2$ - мощность каждого из сигналов, P_0 - спектральная плотность мощности шума в одном канале, \mathbf{I} - единичная матрица. Решающая функция (РФ) $Y(g)$ алгоритма Кейпона $\square(g)$, записываемого в виде [3, 4]

$$Y(\gamma) = \left[\dot{\mathbf{a}}(\gamma)^H \dot{\mathbf{K}}^{-1} \dot{\mathbf{a}}(\gamma) \right]^{-1},$$

где $\dot{\mathbf{a}}(\gamma)$ - вектор-столбец опорного сигнала, элемент которого равен

$$\dot{a}_i(\gamma) = e^{-j\beta b i \sin \gamma},$$

g - ожидаемое направление НС, получена для приведенных выше условий в виде

$$Y(g) = \frac{1}{P_0} N - \frac{q}{G^2 - H^2} \left[G \left(f_1(g)^2 + f_2(g)^2 \right) - 2H f_1(g) f_2(g) \right],$$

где $f_k(g) = \sin \frac{N j_k(g)}{2} / \sin \frac{j_k(g)}{2}$, $j_k(g) = j(g) - j^{(k)}$, $j(g) = b b \sin g$, $j^{(k)} = b b \sin \gamma_k$, $G = qN + 1$

$H = q f_{12}$, $f_{12} = \sin \frac{N j_{12}}{2} / \sin \frac{j_{12}}{2}$, $j_{12} = b b (\sin \gamma_1 - \sin \gamma_2)$, $q = P/P_0$ - отношение сигнал/шум

в одном канале (ОСШ). ПРС алгоритма была найдена как значение $Dg = |g_1 - g_2|$, обращающее в ноль вторую производную РФ в точке $g_{mid} = \arcsin \left[(\sin \gamma_1 + \sin \gamma_2) / 2 \right]$, т.е. как решение трансцендентного уравнения

$$\left. \frac{d^2 Y(g, Dg)}{d^2 g} \right|_{g=g_{mid}} = 0,$$

где

$$\left. \frac{d^2 Y(g, Dg)}{dg^2} \right|_{g=g_{mid}} = -b^2 b^2 \cos^2 g_{mid} \frac{qf^2}{P_0(G^2 - H^2)} - N^2 \left[(G+H) \operatorname{ctg}^2(Nf) + 2G \operatorname{ctg}^2 f - 2N \operatorname{ctg}(Nf) \operatorname{ctg}(f) \right] + (G-H) \frac{1}{\sin^2 f} - N^2,$$

где обозначено $f = \sin(Nf) / \sin(f)$, $f = (\operatorname{sing}_2 - \operatorname{sing}_1) / 4$.

ПРС рассчитывалась для двух видов АС: «малая» АС (МАС) и «большая» АС (БАС). Число АЭ и расстояния между ними в МАС выбирались таким образом, чтобы предусмотреть возможность размещения всей АС на мобильном устройстве-коммуникаторе (например, на смартфоне с размером несколько сантиметров). Предполагалось, что БАС имеет размер несколько десятков сантиметров. Значения ПРС при неизменном ОСШ 20dB составили около 10..15° и около 1° для МАС и БАС соответственно. Учитывая размещение НС в орбитальной космической группировке ГЛОНАСС и GPS с минимальным угловым расстоянием между двумя соседними НС 15°..20° вне зависимости от орбитальной плоскости их размещения, был сделан вывод о том, что ПРС алгоритма Кейпона в применении к МАС очевидно практически недостаточна, что требует поиска других алгоритмов. В ближайшем будущем мы планируем исследование таких сверхразрешающих алгоритмов, как метод теплового шума и поиск зависимостей ПРС от степени обратной корреляционной матрицы, проекционного алгоритма, а также некоторых других.

При тех же условиях ПРС БАС имеет приемлемые значения с точки зрения различения двух любых НС.

Литература

1. Соловьёв Ю. А. Системы спутниковой навигации. – М.: Эко-Трендз, 2000. – 267 с.
2. Шарко В. П. Методика определения навигационных параметров движущихся объектов по волновому фронту сигналов радионавигационных систем: дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук / Шарко Вадим Павлович. – Киев, 2012. – 150 с.
3. Петров В. П. Алгоритмы оценки пространственного спектра в адаптивных цифровых антенных решётках. Вестник СибГУТИ, №4, 2014. – с. 60-70.
4. Бондаренко Б. Ф., Сащук И. Н., Тимчук В. Ю. Качество обнаружения и предельное разрешение коррелированных сигналов в обнаружителях на основе алгоритма Кейпона. – Радиоэлектроника (Изв. Вузов). – К.: НТУУ «КПИ», 2004. - №7. – с. 51-60.