

УДК 621.396.677.31

В.Ю. Куприц, Г.С. Шарыгин, В.Н. Школьный

## Повышение помехоустойчивости автономной системы навигации космических аппаратов

Рассмотрены методы повышения помехоустойчивости автономной системы навигации космических аппаратов, использующие пространственную селекцию принимаемых навигационных сигналов. Приведены результаты моделирования адаптивного алгоритма формирования диаграммы направленности цифровой антенной решетки, позволяющего подавлять когерентные и некогерентные помехи.

**Ключевые слова:** система автономной навигации, адаптивная антенная решетка, космические аппараты.

Для повышения точности и автономности навигационного обеспечения космических аппаратов (КА) в бортовом комплексе управления КА используется система автономной навигации (САН). В 1970–1974 гг. была разработана и внедрена в эксплуатацию одна из первых систем автономной навигации, реализованная на базе программного обеспечения, бортовой ЦВМ КА «Салют-3М», двух астровизирующих (по звездам) устройств и радиовысотомера [1]. В дальнейшем САН модифицировалась, а в 1980-е гг. начались работы по разработке нового типа систем спутниковой навигации, использующих сигналы спутниковых радионавигационных систем ГЛОНАСС и GPS. Структурная схема такой системы представлена на рис. 1 [1].

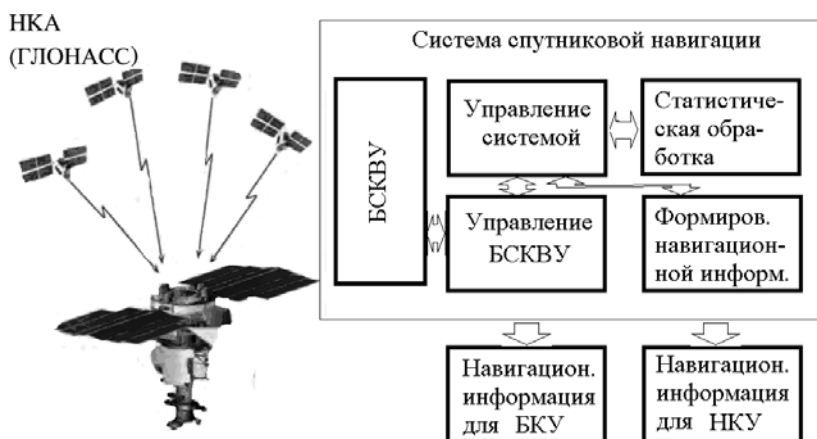


Рис. 1 Структурная схема спутниковой системы навигации: НКА – навигационный космический аппарат; БСКВУ – бортовое синхронизирующее координатно-временное устройство; БКУ – бортовой комплекс управления; НКУ – наземный комплекс управления

Высота орбит большинства навигационных космических аппаратов (НКА) современных спутниковых радионавигационных систем (СРНС) составляет примерно 20 тыс. км [2]. Диаграмма направленности антенн НКА, излучающих навигационные радиосигналы, ориентирована на Землю, а ее ширина соответствует угловым размерам земного диска. Таким образом, в зависимости от высоты КА возможны два варианта взаимного расположения КА и НКА. При расположении КА на высотах ниже группировки НКА условия навигации практически те же, как у наземного потребителя. Во втором варианте, при размещении КА выше группировки НКА, возможен прием сигналов только тех НКА, которые находятся в зоне радиовидимости – с противоположной стороны Земли. Варианты взаимного расположения КА и группировки СРНС показаны на рис. 1 в статье [3]. При расположении КА на высоких орбитах (высокоэллиптической или геостационарной) уровень и количество принимаемых сигналов НКА уменьшаются. При таких условиях существенно возрастают требования к помехозащищенности САН КА, так как точность измерения координат существенно зависит от отношения сигнал/помеха.

В общем случае помеха представляет собой сумму шумовых составляющих и сигналы от преднамеренных постановщиков помех, которые могут располагаться на других космических аппаратах либо непосредственно на поверхности Земли. Более вероятно использование прицельных специально наведенных помех (СНП), эквивалентных полезным сигналам, но со специально измененными

характеристиками. Источником этих помех могут быть генераторы навигационных сигналов, расположенные на борту космических аппаратов или на Земле (псевдоспутники). Сигналы таких помех полностью копируют формат полезных навигационных сигналов КА, при этом формователи сигналов помехи используют системную шкалу времени ГЛОНАСС и обеспечивают программное изменение задержки кодовой (дальномерной) псевдослучайной последовательности (ПСП) и доплеровского сдвига частоты навигационных сигналов от нескольких виртуальных КА, дополняя своими ложными сигналами сигналы реального рабочего созвездия КА ГЛОНАСС. Очевидно, что уровень излучаемой мощности псевдоспутников, расположенных на Земле, может быть значительно выше, чем мощность сигналов штатных навигационных КА.

Формирование в излученном помеховом сигнале навигационного сообщения, содержащего данные о текущих эфемеридах, частотно-временных поправках, альманахе системы и др., и управление изменением временной задержки модулирующих дальномерных ПСП и фазы высокочастотного сигнала могут выполняться независимо и не соответствовать друг другу. Прием сигналов такого ложного КА не позволит бортовому приемнику навигационного КА получить достоверную навигационную информацию.

Все принципы защиты аппаратуры радионавигации космического аппарата от помех сводятся к селекции и отбраковке помеховых сигналов. Для эффективного подавления естественных и преднамеренных помех необходимо обеспечить:

- пространственную селекцию, основанную на фактическом разнесении в пространстве источников навигационных сигналов и помех;
- использование различий в доплеровском смещении частоты и времени прихода навигационных сигналов и помех, источники которых фактически разнесены в пространстве;
- частотную селекцию;
- отбраковку специально наведенных помех, эквивалентных полезным сигналам.

В настоящей статье рассматриваются методы пространственной селекции сигналов с целью подавления коррелированных и некоррелированных помех. Для САН КА, расположенных на геостационарной орбите, обычно используют зеркальные приемные антенны, но такие антенны не позволяют осуществить пространственную селекцию. Поэтому перспективным направлением увеличения помехоустойчивости САН КА является использование многолучевых адаптивных цифровых антенных решеток (ЦАР). Основным достоинством такого решения являются увеличение отношения сигнал/помеха за счет:

- пространственной селекции сигналов НКА адаптивными методами, т.е. ориентации максимумов диаграммы направленности ЦАР непосредственно на навигационные спутники и формирования «нулей» диаграммы направленности в сторону постановщиков помех;
- когерентного и некогерентного накопления сигналов ЦАР с помощью цифровой обработки принятых сигналов.

Адаптивные алгоритмы, применяемые в цифровых антенных решетках, базируются на теории оптимальной винеровской фильтрации. Описание этой теории и основных разновидностей адаптивных алгоритмов можно найти в специализированных книгах [4–7]. К простым относятся разновидности градиентных адаптивных алгоритмов по критерию наименьших квадратов (Least Mean Square, LMS), а к сложным – разновидности рекурсивных алгоритмов по критерию наименьших квадратов (Recursive Least Squares, RLS), базирующихся на использовании леммы об обращении матрицы (Matrix Inversion Lemma, MIL) и QR-разложения [7].

Адаптивный алгоритм, применяемый при обработке сигналов многолучевой цифровой антенной решетки САН КА, должен обеспечивать:

- стабильность уровней навигационных сигналов, принимаемых с НКА;
- подавление коррелированных и некоррелированных помех.

В результате анализа перечисленных выше адаптивных методов для повышения помехозащищенности САН КА предлагается использовать линейно ограниченный адаптивный алгоритм по методу наименьших квадратов (Linearly Constrained Least Mean Square, LC LMS) [7]. Основное преимущество этого алгоритма по сравнению с другими заключается в возможности введения линейных ограничений, которые позволяют получить стабильный уровень полезных навигационных сигналов и подавить когерентные помехи (в том числе и отбракованные навигационные сигналы с «псевдоспутников»). Другим преимуществом является невысокая вычислительная сложность алгоритма. К недостаткам алгоритма LC LMS можно отнести медленную сходимость.

На рис. 2 представлена обобщенная структурная схема адаптивной ЦАР. Расстояние между элементами обычно равно  $0,5\lambda_0$ , где  $\lambda_0$  – длина волны. Если принять элемент с номером 1 (см. рис. 3) за опорный, то сигнал на выходе этого элемента будет равен  $s_1(t) = \text{Re}\{s(t)\}$ . На практике антенные элементы обладают конечной направленностью, что учитывается дополнительным множителем, являющимся функцией угла прихода  $\theta$  в выражении для  $s_1(t)$ . Этот множитель является масштабирующим, и его наличие не влияет на принципы адаптивной обработки сигналов [7].

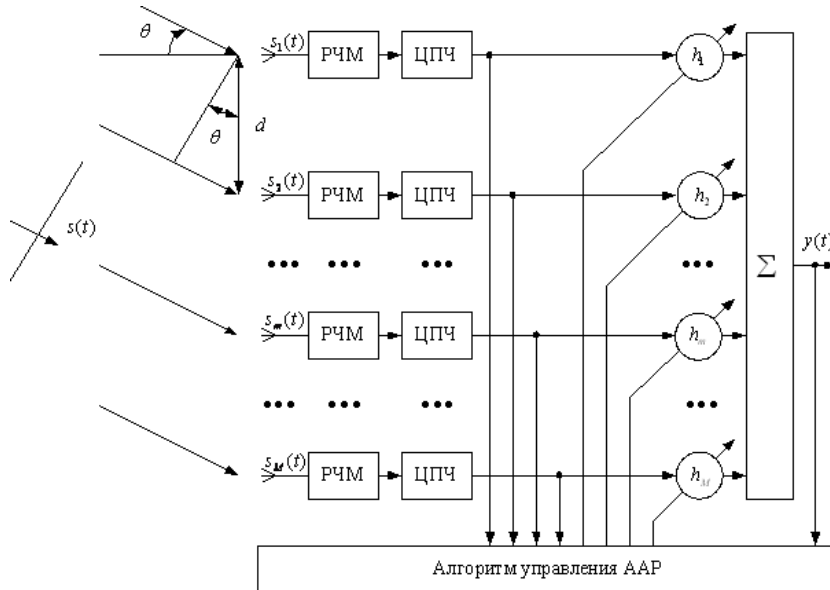


Рис. 2. Обобщенная структурная схема адаптивной ЦАР: РЧМ – радиочастотный модуль; ЦПЧ – цифровой преобразователь частоты;  $h_m$  – комплексные весовые коэффициенты

Сигнал на выходе  $m$ -го элемента ЦАР можно представить как [7]

$$s_m(t) = \text{Re}\{A(t + \tau_m)e^{i\omega_0(t + \tau_m)}\} = A_I(t + \tau_m)\cos[\omega_0(t + \tau_m)] - A_Q(t + \tau_m)\sin[\omega_0(t + \tau_m)], \quad (1)$$

где  $\tau_m$  – абсолютная задержка между сигналами на входе опорного и  $m$ -го антенного элементов;  $A_I$  – действительная часть модулирующего сигнала;  $A_Q$  – мнимая часть модулирующего сигнала;  $\omega_0 = 2\pi f_0$ ;  $f_0 = 1/\lambda_0$  – частота сигнала;  $t$  – текущее время.

В случае узкополосных сигналов, т.е. когда  $f_0 \gg \Delta f$ , где  $\Delta f$  – полоса сигнала,  $A_a(t + \tau_m) \approx A_a(t)$  и

$$s_m(t) = A_I(t)\cos[\omega_0(t + \tau_m)] - A_Q(t)\sin[\omega_0(t + \tau_m)]. \quad (2)$$

Если перед цифровой обработкой выполняется преобразование частоты, то сигнал на выходе преобразователя можно представить как [7]

$$x_{I,m}(t) = A_I(t)\cos(\omega_0\tau_m) - A_Q(t)\sin(\omega_0\tau_m) + z_{I,m}(t), \quad (3)$$

$$x_{Q,m}(t) = A_Q(t)\cos(\omega_0\tau_m) + A_I(t)\sin(\omega_0\tau_m) + z_{Q,m}(t), \quad (4)$$

где  $z_{I,m}(t)$  и  $z_{Q,m}(t)$  – аддитивный шум, обусловленный конечным подавлением фильтрами низкой частоты составляющих сигналов с частотой  $2\omega_0$ . Правые части уравнений (3) и (4) можно представить как действительную и мнимую части комплексной переменной [7]

$$x_m(t) = x_{I,m}(t) + ix_{Q,m}(t) = A(t)e^{i\omega_0\tau_m} + z_{I,m}(t) + iz_{Q,m}(t) = A(t)e^{i\omega_0\tau_m} + z_m(t). \quad (5)$$

При цифровой обработке отсчеты сигнала осуществляются на дискретных интервалах времени, равных интервалу дискретизации  $T_s = 1/f_s$ , где  $f_s$  – частота дискретизации сигналов. В этом случае сигнал можно представить в виде

$$x_m(k) = x_{I,m}(k) + ix_{Q,m}(k) = A(k)e^{i\omega_0\tau_m} + z_m(k), \quad (6)$$

где  $z_m(k)$  – шум, включающий в себя также эффекты квантования сигналов при аналого-цифровом преобразовании. Если в АР поступает  $J$  сигналов, то, согласно принципу суперпозиции [8], сигнал  $x_m(k)$  представляется как

$$x_m(k) = \sum_{j=1}^J x_m^{(j)}(k) = \left\{ \sum_{j=1}^J A^{(j)}(k)e^{i\omega_0\tau_m^{(j)}} \right\} + z_m(k), \quad (7)$$

где верхний индекс  $J$  указывает на параметры  $j$ -го сигнала.

Идея линейно ограниченного LC LMS алгоритма состоит в том, что поиск оптимальных комплексных коэффициентов  $h_m$  осуществляется при наличии линейных ограничений вида [7]:

$$\mathbf{C}_{MJ}^H \mathbf{h}_M^H = \mathbf{f}_J, \quad (8)$$

где  $\mathbf{f}_J$  – вектор  $J$  значений ограничиваемого параметра;  $\mathbf{C}_{MJ}^H$  – матрица  $J$  ограничений:

$$\mathbf{C}_M(\theta) = [C_1(\theta), \dots, C_m(\theta), \dots, C_M(\theta)]^T, \quad (9)$$

$$C_m(\theta) = e^{i(2\pi d(m-1)\sin\theta)/\lambda_0}, \quad (10)$$

а знаки  $H$  и  $*$  обозначают эрмитово и комплексное сопряжения соответственно;  $T$  – знак транспонирования вектора.

Обобщенный LS LMS алгоритм с линейными ограничениями представлен ниже в виде последовательности вычислений, исполняемых в течение  $K$  итераций:

$$\mathbf{f}_J = [1, 0, \dots, 0]^T, \mathbf{x}_M(0) = \mathbf{0}_M, \mathbf{h}_M(0) = \mathbf{C}_{MJ} (\mathbf{C}_{MJ}^H \mathbf{C}_{MJ})^{-1} \mathbf{f}_J, \quad (11)$$

$$\mathbf{P}_M = \mathbf{I}_M - \mathbf{C}_{MJ} (\mathbf{C}_{JM}^H \mathbf{C}_{MJ})^{-1} \mathbf{C}_{JM}^H, \quad (12)$$

$$\mathbf{x}_M(k) = [x_1(k), x_2(k), \dots, x_m(k), \dots, x_M(k)]^T, \quad (13)$$

$$e(k) = d(k) - \mathbf{h}_M^H(k-1) \mathbf{x}_M(k), \quad (14)$$

где  $d(k)$  – значение опорного сигнала.

$$\mathbf{h}_M(k) = \mathbf{P}_M \left\{ \mathbf{h}_M(k-1) + \mu \mathbf{x}_M(k) e^*(k) \right\} + \mathbf{C}_{MJ} (\mathbf{C}_{JM}^H \mathbf{C}_{MJ})^{-1} \mathbf{f}_J, \quad (15)$$

Шаг сходимости  $\mu$  рассмотренного алгоритма должен ограничиваться значениями [7]

$$0 < \mu < \frac{2}{3tr(\mathbf{R}_M)}, \quad (16)$$

где  $tr$  – след корреляционной матрицы  $\mathbf{R}_M$  сигналов на входе ЦАР  $x(n)$ ;  $tr(\mathbf{R}_M) = \sigma_x^2 M$ ;  $\sigma_x^2$  – дисперсия входных сигналов ЦАР.

На рис. 3 приведены результаты численного моделирования задачи подавления помех с помощью рассмотренного алгоритма с ЦАР в виде линейной антенной решетки с числом антенн  $N = 10$ .

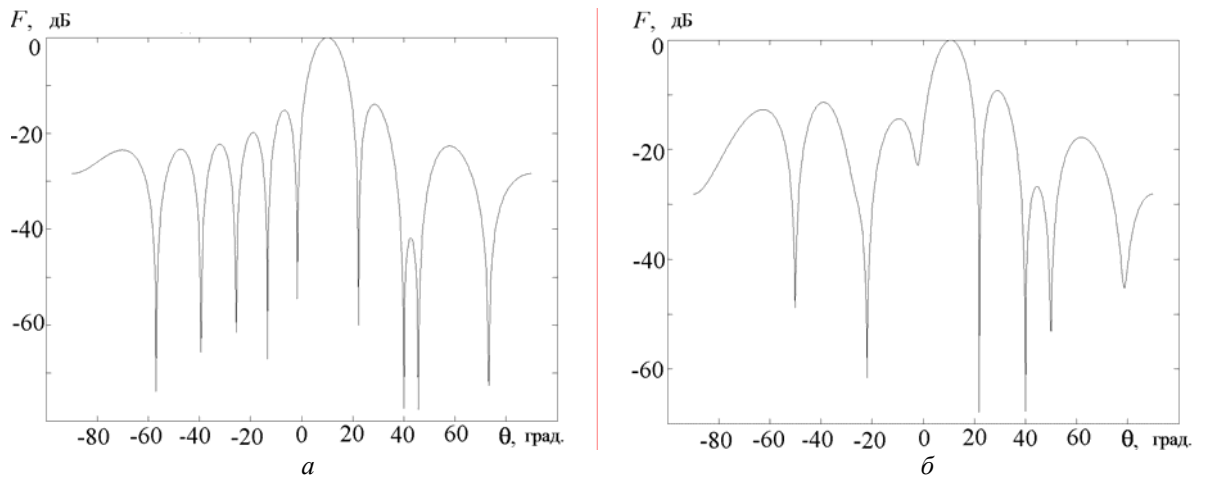


Рис. 3. Диаграмма направленности адаптивной ЦАР (10 элементов), использующей линейно ограниченный адаптивный алгоритм по методу наименьших квадратов LC LMS:  $a$  – на первой итерации;  $b$  – после завершения адаптации

При моделировании вводились два линейных ограничения на значение основного лепестка ДН (полезный навигационный сигнал) и на значение ДН в направлении коррелированной помехи. Основной лепесток ДН ориентирован в направлении  $\theta_s = 10^\circ$ . Источник коррелированной помехи располагается под углом  $\theta_{pc} = 40^\circ$  и две некоррелированные помехи под углами  $\theta_{p1} = -22^\circ$ ,  $\theta_{p2} = -50^\circ$ .

Как видно, благодаря использованию линейных ограничений в начале работы (на первой итерации) рассмотренного адаптивного алгоритма обеспечивается заданный уровень максимума ДН

ЦАР в направлении приема полезного навигационного сигнала и подавление коррелированной помехи, а после завершения адаптации – некоррелированных помех. Общее число подавляемых помех ограничено числом степени свободы антенной решетки  $M$  (числом элементов) и, например, при приеме полезного сигнала с одного направления оставшиеся  $M-1$  степеней свободы можно использовать для подавления  $M-1$  помех.

Таким образом, результаты моделирования подтверждают эффективность рассмотренного адаптивного LC LMS-алгоритма, с помощью которого поддерживается требуемый уровень основного лепестка ДН, исключается ориентирование максимума ДН ЦАР на коррелированные помехи (явление «захвата» коррелированной помехи), а также обеспечивается подавление коррелированных помех, принимаемых с известных направлений, и адаптивное подавление некоррелированных помех, принимаемых с неизвестных направлений.

Работа выполнена в рамках реализации Постановления Правительства РФ от 09.04.2010 г., № 218 и договора между ОАО «ИСС» и Минобрнауки РФ от 12.02.2013 г. № 02.G 25.31.0042.

#### *Литература*

1. Автономная навигация космических аппаратов / Г.П. Аншаков, А.Д. Голяков, В.Ф. Петрищев, В.А. Фурсов. – Самара: Изд-во ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс», 2011. – 569 с.
2. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А.И. Петрова, В.Н. Харисова. – 4-е изд. – М.: Радиотехника, 2010. – 800 с.
3. Крат Н.М. Контрольно-проверочная аппаратура системы автономной навигации космических аппаратов / Н.М. Крат, А.А. Савин, Г.С. Шарыгин // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2014. – № 1 (31). – С. 28–32.
4. Уидроу Б. Адаптивная обработка сигналов / Б. Уидроу, С.Д. Стирнз (пер. с англ. под ред. В.В. Шахгильдяна). – М.: Радио и связь, 1989. – 440 с.
5. Sayed A.H. Fundamentals of adaptive filtering / A.H. Sayed – NJ, Hoboken: John Wiley and Sons, Inc, 2008. – 820 p.
6. Diniz P.S.R. Adaptive filtering algorithms and practical implementation / P.S.R. Diniz. – Third edition. – New York: Springer Science + Business Media, 2008. – 636 p.
7. Джиган В.И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы / В.И. Джиган. – М.: Техносфера, 2013. – 528 с.
8. Хансен Р.С. Фазированные антенные решетки / Р.С. Хансен, А.И. Синани (пер. с англ., ред.). – 2-е изд. – М.: Техносфера, 2012. – 558 с.

---

#### **Куприц Владимир Юрьевич**

Канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник НИИ радиотехнических систем (РТС) ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-38-89

Эл. почта: tomskvlad@mail.ru

#### **Шарыгин Герман Сергеевич**

Д-р техн. наук, профессор, зав. каф. РТС ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-38-98

Эл. почта: gssh@mail.tomsknet.ru

#### **Школьный Вадим Николаевич**

Гл. конструктор ОАО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнёва,

г. Железногорск Красноярского края

Тел.: 8 (39197) 64006

Эл. почта: shkolniy@iss-reshetnev.ru

Kuprith V.Yu., Sharygin G.S., Shkolniy V.N.

#### **Improvement of noise stability in autonomous spacecraft navigation system**

The paper studies the methods of increasing the noise stability of an autonomous spacecraft navigation system by means of spatial selection of the received navigation signals. We discuss the results of an adaptive algorithm used to form the pattern of the digital antenna array modeling. The algorithm allows to suppress the coherent and incoherent interference.

**Keywords:** system of autonomous navigation, adaptive array, spacecrafts.