

УДК 621.396

DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-5-43-49

АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В АППАРАТУРЕ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОГО ЗАХОДА НА ПОСАДКУ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАДИОПОМЕХ

Г.В. КРИНИЦКИЙ¹

¹Московское конструкторское бюро «Компас», г. Москва, Россия

В настоящее время в ряде стран мира широко внедрены системы посадки самолетов по сигналам спутниковых радионавигационных систем (СРНС), обеспечивающие заход на посадку по категории I, и активно ведутся исследования и разработки в области их совершенствования для обеспечения захода на посадку по категориям II и III, предъявляющим более высокие требования по точностным и надежностным характеристикам. Заход на посадку и посадка являются крайне ответственными этапами полета, поэтому необходима высокая надежность систем посадки по сигналам СРНС. В связи с тем, что помехоустойчивость аппаратуры потребителей СРНС (АП СРНС), в которой отсутствуют специальные меры для защиты от помех и обеспечения работы при пониженных уровнях принимаемых сигналов, крайне низка, навигационная аппаратура становится доступной мишенью для террористических, диверсионных и хулиганских действий ввиду простоты и компактности устройств постановки помех для СРНС. Кроме того, в связи с постоянным расширением применения различных средств радиосвязи, возрастает риск возникновения радиопомех для АП СРНС, вызванных побочными излучениями средств радиосвязи при их работе или в результате возникновения неисправности в них. Предложен алгоритм обработки сигналов в наземной и бортовой радионавигационной аппаратуре, предназначенной для обеспечения точного захода на посадку по сигналам СРНС. Проведено математическое моделирование работы алгоритма в условиях многолучевого распространения сигналов.

Ключевые слова: спутниковая радионавигационная система, заход на посадку, помехозащита, многолучевость, адаптивная антенная решетка.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее важных направлений совершенствования систем обеспечения захода на посадку по сигналам СРНС является повышение точностных и надежностных характеристик бортовой и наземной АП СРНС в условиях воздействия организованных и непреднамеренных радиопомех [1, 2].

Для обеспечения этого в условиях воздействия организованных и непреднамеренных радиопомех следует рассмотреть ряд следующих технических мер: применение адаптивных антенных решеток (ААР) в АП СРНС, применение в АП СРНС алгоритмов поиска и сопровождения принимаемых навигационных сигналов, обеспечивающих работу при предельно низком соотношении сигнал – шум.

Применение адаптивных антенных решеток, обеспечивающих формирование минимумов диаграммы направленности (ДН) антенны в направлении помех и максимумов в направлении полезных сигналов в составе как бортовой навигационной аппаратуры, так и в составе опорных навигационных приемников наземной контрольно-корректирующей станции позволяет значительно ослабить воздействие помехи, предотвращая ухудшение соотношения сигнал – шум, приводящее к неработоспособности АП СРНС, а также повысить его в отсутствии помехи.

В настоящее время исследования в области создания адаптивных алгоритмов работы АП СРНС с ААР, обеспечивающих формирование минимумов ДН в направлении помех и максимумов ДН в направлении полезных сигналов, активно проводятся во многих странах мира. Опубликовано множество научных работ в этой области, как в России [1, 8], так и за рубежом [5, 7].

Все представленные алгоритмы имеют сходный принцип действия. Формируется такой вектор комплексных весовых коэффициентов, чтобы принимаемый сигнал [9, 10] навигационного космического аппарата (НКА) с наилучшим соотношением сигнал – шум S мог быть получен как

$$S = W^H X, \quad (1)$$

где W – вектор весовых коэффициентов, X – вектор-столбец, состоящий из отсчетов сигналов на выходах элементов антенной решетки, надстрочным индексом H обозначается эрмитово-сопряженная (сопряженно-транспонированная) матрица.

Основное различие предлагаемых многими авторами алгоритмов заключено в методах определения весового вектора.

ПРЕДЛАГАЕМЫЙ АЛГОРИТМ

Многие из опубликованных алгоритмов предполагают разделение обработки сигналов на 2 этапа: подавление мощных помех путем формирования нулей ДН приемной антенны АП СРНС и прием сигнала НКА с наилучшим соотношением сигнал – шум путем формирования максимума ДН в его направлении.

Этап 1. Подавление мощных помех

В предлагаемом алгоритме используется метод, аналогичный представленному в ряде работ [5, 7]. Данный метод основан на том, что мощность помех существенно превышает уровень шумов приемных трактов, а мощность полезных сигналов ниже уровня шумов. И, следовательно, будет наблюдаться высокая корреляция помех в выходных сигналах антенной решетки.

На первом этапе вначале производится дополнение полученных с N аналого-цифровых преобразователей (АЦП) сигналов $X_{(1..N)}$ их задержанными копиями, что увеличивает размерность пространства сигналов. Использование пространственно-временной обработки сигналов позволяет подавлять отражения помех, которые без ее использования воспринимались бы как независимые помехи.

Далее рассчитывается ковариационная матрица

$$R_x = X^H X, \quad (2)$$

где X – матрица, состоящая из N столбцов, содержащих текущие отсчеты входного сигнала, и M столбцов, содержащих задержанные отсчеты входного на $1..M$ тактов.

Затем определяются собственные векторы и собственные значения матрицы R_x .

$$R_x = V_x \Lambda_x V_x^H, \quad (3)$$

где V_x – матрица, состоящая из собственных векторов, Λ_x – диагональная матрица собственных значений. Сравнение с порогом собственных значений матрицы R_x позволяет разделить все сигналы, присутствующие на входе антенной решетки, на мощные сигналы – помехи (выше порога), и слабые – сигналы НКА и шумы приемных трактов (ниже порога). Уровень порога выбирается исходя из уровня шумов приемных трактов, так как мощность принимаемых сигналов НКА ниже мощности шумов приемного тракта в полосе приема. При этом любой сигнал, мощность которого превышает мощность шумов приемных трактов, считается помехой.

Каждой из групп ставится в соответствие набор собственных векторов $\dot{\Lambda}_x$ – для сигналов и шумов и $\ddot{\Lambda}_x$ для мощных помех.

Вычисляется матрица весовых коэффициентов помехоподавления

$$W_x = \dot{\Lambda}_x \dot{\Lambda}_x^H. \quad (4)$$

После чего формируется набор сигналов, очищенных от помех

$$X_n = W^H X. \quad (5)$$

Этап 2. Прием сигнала НКА с наилучшим соотношением сигнал – шум

Улучшение соотношения сигнал – шум достигается путем формирования отдельной диаграммы направленности для приема каждого сигнала НКА с максимумом в его направлении.

Максимально достижимое улучшение соотношения сигнал – шум (ССШ) зависит от конфигурации антенной решетки и количества антенных элементов в ней. Так, при применении одного из самых распространенных вариантов используемой в АП СРНС антенной решетки из семи элементов с изотропной ДН, соотношение сигнал-шум может быть улучшено на 8,45 дБ путем формирования максимума ДН в направлении на НКА. Такое повышение ССШ существенно снижает составляющие погрешностей измерения радионавигационных параметров, обусловленные уровнем шумов.

При известной конфигурации решетки, диаграмме направленности антенных элементов и известном направлении на НКА вектор весовых коэффициентов может быть вычислен на основе этих данных. В реальных условиях применения АП СРНС диаграммы направленности элементов ААР могут быть искажены в результате влияния элементов конструкции объекта, на котором она размещена. При работе на подвижных объектах часто затруднительно точно определить пространственную ориентацию антенны в каждый момент времени. Кроме того, в начале работы АП СРНС могут отсутствовать необходимые данные для определения направлений прихода сигналов НКА.

При использовании в АП СРНС адаптивных алгоритмов подавления мощных помех путем формирования минимумов диаграммы направленности в их направлениях, может существенно измениться распределение фаз и амплитуд сигналов НКА на выходах подавителя помех.

Для определения весового вектора в отсутствие априорных данных АП СРНС оснащается многовходовым коррелятором, который позволяет определить комплексные значения корреляции принимаемого сигнала навигационного космического аппарата (НКА) с опорной псевдослучайной последовательностью (ПСП) для каждого элемента антенной решетки. Далее на основе этих данных формируется оценка весового вектора. В ряде работ представлены два различных подхода: измерение фаз сигнала НКА, приходящего на антенные элементы при помощи набора следящих фильтров [8] и оценка распределения фаз и амплитуд сигнала НКА путем анализа свойств ковариационной матрицы принятых сигналов [7].

В АП СРНС, используемой на самолете в условиях воздействия радиопомех, предпочтительнее применять второй подход, так как в условиях низкого соотношения сигнал – шум и высокой динамики движения измерение фаз становится очень сложной задачей. Кроме того, СКО погрешностей измерений фаз сигналов могут существенно различаться в связи с неравенством соотношения сигнал – шум на выходах антенных элементов или выходах подавителя помех. Это приводит к увеличению погрешности оценки весового вектора, а следовательно, снижает эффективность алгоритма формирования максимума ДН на принимаемый сигнал НКА.

Предлагаемый алгоритм основан на том, что уровень полезного сигнала на выходе коррелятора всегда выше уровня шумов и помех, так как прием сигнала в других случаях вообще невозможен. Сигналы, очищенные от помех (при наличии мощных помех в эфире) или сигналы с выходов антенной решетки (при отсутствии помех) переносятся в область нулевых частот, затем сигналы поступают на многовходовый коррелятор, после чего производится расчет ковариационной матрицы выборки его выходных сигналов

$$R_p = X_p^H X_p, \quad (6)$$

где X_p – матрица размера N на m , последовательность m значений корреляции 1.. N -го сигнала с ПСП НКА.

Затем вычисляются собственные векторы и собственные значения ковариационной матрицы. В результате получается матрица собственных векторов V_p и диагональная матрица собственных значений Λ_p , такие, что

$$R_p = V_p \Lambda_p V_p^H. \quad (7)$$

Уровень полезного сигнала на выходе коррелятора выше уровня шумов и помех, следовательно, необходимо выделить наиболее мощный компонент сигнала – сигнал от НКА. Выделим из матрицы V_p столбец $\overline{V_p(\lambda_{max})}$, соответствующий максимальному собственному числу из Λ . Этот столбец является весовым вектором W_p , формирующим максимум ДН в направлении прихода сигнала НКА.

Сформированный сигнал с наилучшим соотношением сигнал – шум

$$X_R = W_p^H X_p \quad (8)$$

поступает на вход частотного дискриминатора для обеспечения сопровождения принимаемого сигнала по частоте и дополнительной поддержки сопровождения по дальности в условиях наилучшего соотношения сигнал – шум. Для обеспечения устойчивой работы АП СРНС при низких соотношениях сигнал – шум следует использовать частотный дискриминатор, предложенный в работе [11]. Отклонение частоты принимаемого сигнала определяется как

$$\widehat{\Delta f} = \frac{|S_H| - |S_L|}{|S_H| + |S_L|}, \quad (9)$$

где S_H – уровень сигнала на частоте выше, S_L – уровень сигнала на частоте ниже оцениваемой.

Совместно с предлагаемым алгоритмом формирования максимума ДН приемной антенны на сигнал НКА могут использоваться дискриминаторы по дальности различных типов. Для упрощения изложения на схеме приведен пример применения наиболее простого дискриминатора раньше-позже.

Для обеспечения сопровождения сигнала по дальности необходимо сформировать с учетом ранее полученной оценки весового вектора входные сигналы для дискриминатора по дальности

$$X_D = W_p^H X_n, \quad (10)$$

где X_n – сигналы, очищенные от помех (при наличии мощных помех в эфире) или сигналы с выходов антенной решетки (при отсутствии помех); W_p – весовой вектор.

Полученный сигнал X_D умножается на ПСП, сдвинутые по времени на $\frac{1}{2}$ элемента. Производится когерентное накопление сигнала и оценка отклонения по дальности в условиях наилучшего соотношения сигнал – шум. Частота следования опорного ПСП и его сдвиг корректируется следящим фильтром на основе полученной оценки отклонения по дальности и поддержки по скорости от кольца сопровождения по частоте. Применение такого подхода обеспечивает снижение вероятности срыва сопровождения сигнала НКА при снижении соотношения сигнал – шум.

Проведено математическое моделирование влияния работы алгоритма формирования максимума ДН в направлении на каждый НКА на уровни погрешностей измерения радионавигационных параметров, вызванные отражением сигналов НКА от местных предметов. Расчет проведен для случая присутствия четырех приходящих с разных направлений на приемную антенну АП СРНС отраженных сигналов каждого НКА с мощностью от 15 до 5 % полезного сигнала, задержанных по времени на 0,1–0,2 $\tau_{ПСП}$.

На рис. 1 приведено сравнение формы корреляционной функции (КФ) сигнала ГЛОНАСС ПТ, искаженной воздействием отраженных сигналов (пунктир), с формой КФ после формирования ДН (сплошная линия). Уровень искажений КФ при формировании максимума ДН на полезный сигнал существенно ниже, чем при приеме на антенну с изотропной ДН.

Следует отметить, что в случае прихода отраженного сигнала с направления, близкого к направлению прихода полезного сигнала, эффективность пространственного подавления многолучевости существенно снижается.

Для более точной оценки эффективности подавления отраженных сигналов проведен расчет погрешности кодовых измерений псевдодальности дискриминатором раньше-позже и стробовым дискриминатором в соответствии с [6] с шириной строба $0,1\tau_{\text{ПСП}}$.

Значения погрешностей при воздействии отраженных сигналов приведены в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Значения погрешностей при воздействии отраженных сигналов
Values of errors at influence of the reflected signals

Вид дискриминатора	Изотропная ДН	Адаптивное формирование максимума ДН в направлении сигнала
Раньше-позже	> 30 м	3,5 м
Строб $0,1\tau_{\text{ПСП}}$	14,4 м	1,09 м

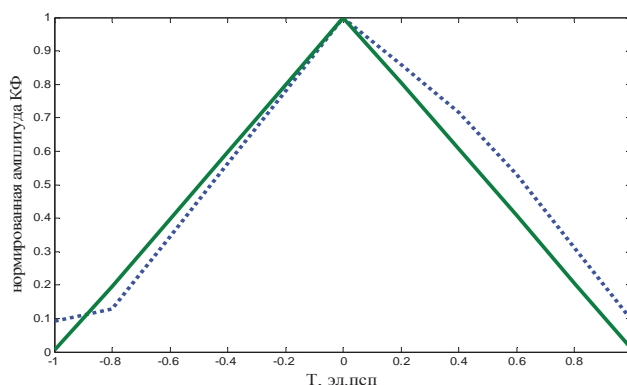


Рис. 1. Сравнение формы корреляционной функции (КФ) сигнала ГЛОНАСС ПТ, искаженной воздействием отраженных сигналов с формой КФ после формирования ДН

Fig. 1. Comparison of the shape of the GLONASS PT signal correlation function (CF), distorted by echo impact with the shape of the CF after beamforming

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный алгоритм позволяет обеспечить улучшение соотношения сигнал – шум на величину до 8 дБ как при сопровождении сигналов, так и при поиске. Это возможно благодаря тому, что оценка частоты, задержки и отношения сигнал – шум производится после формирования оценки вектора весовых коэффициентов, которая не требует точной предварительной синхронизации с полезным сигналом.

Применение в АП СРНС предложенного алгоритма позволяет не только обеспечить ее функционирование при воздействии мощных помех и снизить погрешности измерений псевдодальности и псевдоскорости путем улучшения соотношения сигнал – шум, но и снизить погрешности, обусловленные влиянием многолучевого распространения сигналов НКА. Данная проблема является особенно актуальной при обеспечении категорированной посадки самолета по сигналам СРНС в соответствии с требованиями ИКАО [3]. Это обусловлено тем, что составляющая погрешности, связанная с многолучевостью навигационных сигналов, в бортовой аппаратуре независима от аналогичной составляющей погрешности опорных приемников локальной контрольно-корректирующей станции и не может быть устранена за счет использования дифференциального режима навигации [1, 2].

Применение предложенного алгоритма позволяет повысить точностные и надежностные характеристики бортовой и наземной АП СРНС при заходе на посадку в условиях воздействия радиопомех.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.
2. **Kaplan E.D., Hegarty C.J.** Understanding GPS. Principles and Applications, ARTECH HOUSE, 2006, 703 p.
3. **Соловьев Ю.А.** Системы спутниковой навигации. М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 2000. 270 с.
4. **Sgammini M., Antreich F., Kurz L., Meurer M., Noll T.G.** Blind Adaptive Beamformer Based on Orthogonal Projections for GNSS. 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, Nashville TN, September 17–21, 2012, p. 925–936.
5. **Ying Chieh (Jay) Chuang, Inder J. Gupta.** Two stage beamformer for GNSS receiver antenna arrays. Proceedings of the 27th International Technical Meeting of the ION Satellite Division. ION GNSS+ 2014. Tampa. Florida. September 8–12. 2014, p. 2277–2285.
6. **Parkinson B.W., Spilker J.J.** (Eds.). Global Positioning System: Theory and Applications. Volume I and II. Published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. 370 L'Enfant Promenade, SW, Washington, DC 20024-2518. 1996.
7. **Hattich C., Cuntz M., Konovaltsev A., Kappen G., Meurer M.** Robust Multi-Antenna Acquisition in Time, Frequency and Space for a Digital Beamforming Receiver. 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation. September 19–23, 2011, p. 724–731.
8. **Ефименко В.С., Харисов В.Н.** Адаптивные формирователи лучей для повышения помехоустойчивости приемников СРНС // Радиотехника. 2008. № 7. С. 45–50.
9. **Монзинго Р.А., Миллер Т.У.** Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1986. 448 с.
10. **Harry L. Van Trees.** Optimum Array Processing. Part IV of Detection, Estimation and Modulation Theory. Wiley-Interscience, 2002, 1443 p.
11. **Карпинский К.Ю., Огнев В.А.** Результаты сравнения различных вариантов построения НАП для высокодинамичных объектов при низких соотношениях «сигнал/шум» // Новости навигации. 2017. № 2. С. 11–16.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Криницкий Георгий Викторович, начальник отдела разработок АО «МКБ «Компас», KrinitskiGV@mail.ru.

THE SIGNALS TREATMENT ALGORITHM FOR SATELLITE RADIO NAVIGATIONAL EQUIPMENT CONSUMERS INTENDED TO PROVIDE A PRECISION APPROACH TO THE RUNWAY IN CONDITIONS OF RADIO INTERFERENCE IMMUNITY

Georgy V. Krinitskiy¹

¹*Moscow Design Bureau “Compass”, Moscow, Russia*

ABSTRACT

Currently, a number of countries widely implemented the landing aircraft system according to the signals of satellite navigation systems (SNS), providing the approach for category I, and the research and development in the area of improvement to ensure the approach categories II and III are actively conducted, they impose higher requirements on such characteris-

tics as accuracy and reliability. An approach to the runway and landing are very crucial stages of flight, therefore, the necessity of high reliability landing systems are required with the help of SNS signals. Due to the fact that the SNS consumer equipment interference immunity (SNS CE), in which there are no special measures for protection from noise and the provision of maintenance at low levels of the received signals is extremely low, so the navigational equipment is becoming easy targets for terrorist, sabotage and vandalism actions due to its simplicity and compactness of the device jamming for SNS. In addition, due to the continuous expansion of the use of various radio communication facilities, the risk of emergence of the interference immunity of the SNS consumer equipment increases, caused by spurious emissions of radio communication means during their operation or as a result of their disfunction. The algorithm of signals' treatment in ground and onboard radio navigational equipment designed to ensure a precise landing approach with the help of SNS signals is suggested. The mathematical modeling of the algorithm during the conditions of signals multipath distribution was held.

Key words: satellite navigation system, approach, interference immunity protection, multipath, adaptive antenna system.

REFERENCES

1. **Perov A.I., Harisov V.N.** *GLONASS. Printsipy postroyeniya i funktsionirovaniya* [GLONASS. Principles of construction and operation]. ed. 4th, revised. and additional. Moscow, Radiotekhnika, 2010, 800 p. (in Russian)
2. **Kaplan E.D., Hegarty C.J.** *Understanding GPS. Principles and Applications*, ARTECH HOUSE, 2006, 703 p.
3. **Solov'yev Yu.A.** *Sistemy sputnikovoy navigatsii* [Satellite navigation systems]. Moscow, ECO-TRENDS, 2000, 270 p. (in Russian)
4. **Matteo Sgammini, Felix Antreich, Lothar Kurz, Michael Meurer, Tobias G. Noll.** Blind Adaptive Beamformer Based on Orthogonal Projections for GNSS. 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, Nashville TN, September 17–21, 2012, pp. 925–936.
5. **Ying Chieh (Jay) Chuang, Inder J. Gupta.** Two stage beamformer for GNSS receiver antenna arrays. Proceedings of the 27th International Technical Meeting of the ION Satellite Division. ION GNSS+ 2014. Tampa. Florida. September 8–12. 2014, pp. 2277–2285.
6. **Parkinson B.W., Spilker J.J.** (Eds.). *Global Positioning System: Theory and Applications*. Volume I and II. Published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. 370 L'Enfant Promenade, SW, Washington, DC 20024-2518. 1996.
7. **Hattich C., Cuntz M., Konovaltsev A., Kappen G., Meurer M.** Robust Multi-Antenna Acquisition in Time, Frequency and Space for a Digital Beamforming Receiver. 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation. September 19–23, 2011, pp. 724–731.
8. **Yefimenko V.S., Kharisov V.N.** *Adaptivnyye formirovateli luchey dlya povysheniya pomekhoustoychivosti priyemnikov SRNS* [Adaptive beam formers for improving the noise immunity of SRNS receivers]. Radiotekhnika, 2008, № 7, pp. 45–50.
9. **Harry L. Van Trees.** *Optimum Array Processing. Part IV of Detection, Estimation and Modulation Theory*. Wiley-Interscience, 2002, 1443 p.
10. **Karpinskiy K.Yu., Ognev V.A.** *Rezultaty sravneniya razlichnykh variantov postroyeniya NAP dlya vysokodinamichnykh ob"yektov pri nizkikh sootnosheniyakh «signal/shum»* [Results of comparison of variants of navigation equipment architectures for highly dynamic objects at low signal-to-noise ratios]. *Novosti navigatsii*, 2017, № 2, pp. 11–16.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Georgy V. Krinitskiy, Head of Development Department of JSC “MDB Kompas”.
KrinitskiGV@mail.ru.

Поступила в редакцию 01.09.2017
Принята в печать 20.09.2017

Received 01.09.2017
Accepted for publication 20.09.2017