

DOI 10.30898/1684-1719.2020.4.5

УДК 621.396.677

АЛГОРИТМ НАВЕДЕНИЯ НА НАЗЕМНУЮ СТАНЦИЮ ЛУЧА ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ РЕТРАНСЛЯТОРА СВЯЗИ НА БЕСПИЛОТНОМ ЛЕТАТЕЛЬНОМ АППАРАТЕ ВЕРТОЛЕТНОГО ТИПА

А. Ю. Сивов, М. Г. Алешин

Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации,
302015, г. Орёл, ул. Приборостроительная, д. 35

Статья поступила в редакцию 19 марта 2020 г.

Аннотация. В статье рассмотрен алгоритм наведения луча фазированной антенной решеткой (ФАР) на наземную станцию в условиях нестабильности беспилотного летательного аппарата (БПЛА). В алгоритме реализован метод поиска с запоминанием экстремума целевой функции, позволяющий максимизировать среднее отношение сигнал-шум на входе приемника ретранслятора связи. Угловая нестабильность пространственного положения БПЛА, параметры наведения луча и синтеза фазового распределения в элементах ФАР заданы в кватернионной форме. Увеличение шага поиска достигнуто за счет применения треугольной координатной сетки, заданной на поле Эйзенштейновых целых чисел, позволяющих представить поиск в виде сложения комплексных чисел.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, фазированная антенная решетка, параметры наведения, кватернион, треугольная координатная сетка.

Abstract. The algorithm for pointing to a ground station of a phased array antenna beam in conditions of instability of an unmanned aerial vehicle is described. The search method with storing the extremum of the objective function allows maximizing the average signal-to-noise ratio at the receiver input. The angular instability, beam guidance parameters and the phase distribution in the phased array antenna elements are specified in a quaternion form. A triangular grid defined on the Eisenstein integers allows to increase the search step.

Key words: unmanned aerial vehicle, phased array antenna, guidance parameters, quaternion, triangular grid.

Введение

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) вертолетного типа способны зависать в одной точке пространства (переходить на режим «висения»), что позволяет их применять в качестве транспортной платформы для размещения ретрансляторов связи (РС) систем широкополосного беспроводного доступа. Способность БПЛА свободно перемещаться в пространстве позволяет выбирать оптимальную позицию с точки зрения обеспечения максимальной дальности связи или максимальной скорости передачи в радиоканале. Основным преимуществом БПЛА является возможность увеличения дальности прямой видимости до 60 км на один интервал. Применение РС на БПЛА позволит в отдельных случаях отказаться на первоначальном этапе от антенно-мачтовых устройств и, тем самым, сократить время развертывания системы связи, что актуально в условиях чрезвычайных ситуаций.

Задачи обоснования основных характеристик антенной системы (АС) РС на БПЛА вертолетного типа в условиях нестабильности его пространственного положения решены в [1]. Предложено в качестве АС РС использовать фазированную антенную решетку (ФАР), а параметры наведения формировать по показаниям бортового навигационного комплекса (БНК) и отношению сигнал-шум (ОСШ) на входе приемника РС [2]. В виду дискретности выдачи показаний БНК необходимо решить задачу прогнозирования движения БПЛА.

С целью описания угловой нестабильности БПЛА, параметров установки АС и синтеза фазового распределения в элементах ФАР, обеспечивающего наведение луча диаграммы направленности в направлении наземной станции (НС), обосновано применение математического аппарата кватернионов, компонентами которых выступают параметры Родрига–Гамильтона [3, 4].

Прикладные вопросы управления полетом БПЛА вертолетного типа на режиме «висения» подробно рассмотрены в монографии [5] и в проведенном

исследовании вынесены в ограничения.

1. Определение параметров наведения луча ФАР

Кватернион наведения луча ФАР при известных параметрах наведения АС Q_{AC} , направления на НС Q_{HC} и отклонения БПЛА $\Delta Q_{ЛА}$ определяется выражением [3]:

$$Q_{ФАР} = \bar{Q}_{AC} \circ \Delta \bar{Q}_{AC} \circ Q_{HC}, \tag{1}$$

где \circ – знак кватернионного произведения; \bar{Q}_{AC} и $\Delta \bar{Q}_{AC}$ – кватернионы, сопряженные Q_{AC} и $\Delta Q_{ЛА}$ соответственно.

Геометрическая интерпретация решения задачи (1) представлена на рис. 1, в которой применена теорема Эйлера–Даламбера и основные свойства кватернионов [6].

Последовательность решения задачи:
а) сложение поворотов в соответствии с теоремой Эйлера–Даламбера:

$$\text{arc } Q_{AC} + \text{arc } \Delta Q_{AC} = \text{arc } Q_{HC} + \text{arc } \Delta Q_{HC};$$

б) представление сложения поворотов в виде произведения кватернионов в обратном порядке:

$$\Delta Q_{AC} \circ Q_{AC} = \Delta Q_{HC} \circ Q_{HC};$$

в) кватернион отклонения АС:

$$\Delta Q_{AC} = \Delta \bar{Q}_{ЛА} \circ Q_{HC} \circ \bar{Q}_{AC};$$

г) преобразование в систему координат АС ($OX'Y'Z'$):

$$Q_{ФАР} = \bar{Q}_{AC} \circ \Delta \bar{Q}_{AC} \circ Q_{AC}.$$

Направление на НС после отклонения БПЛА

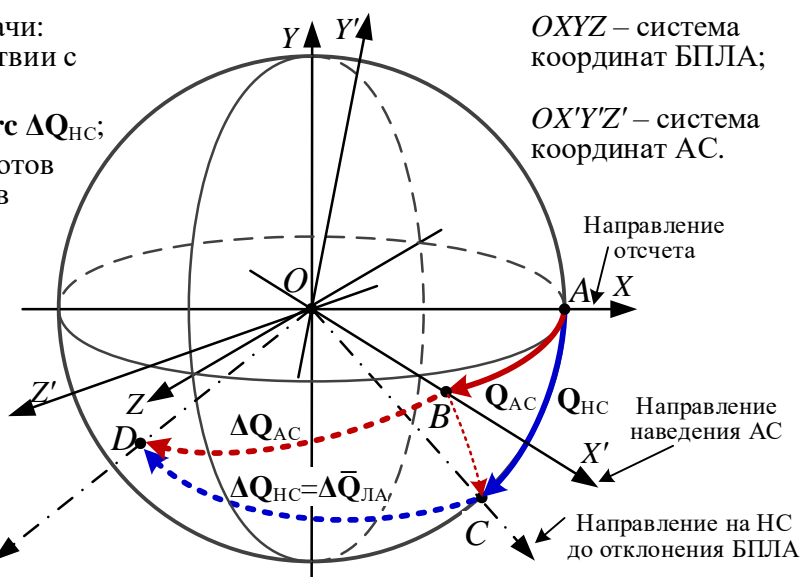


Рис 1. Решение задачи нахождения кватерниона наведения луча ФАР.

Управление лучом ФАР на БПЛА содержит следующие этапы:

- 1) оценка положения БПЛА в пространстве по показаниям БНК на основе прогнозирования динамики углового движения на режиме «висения»;

2) синтез фазового распределение в элементах ФАР, обеспечивающее синфазное сложение сигнала в направлении НС;

3) уточнение параметров наведения на НС по среднему ОСШ на входе приемника РС.

2. Прогнозирование динамики углового движения БПЛА

Прогнозирование динамики углового движения БПЛА по показаниям БНК осуществляется за счет определения ориентации твердого тела по измеренному вектору угловой скорости [2]. Решение задачи основано на интегрировании дифференциальных кинематических уравнений в параметрах Родрига–Гамильтона, связывающих проекции вектора абсолютной угловой скорости твердого тела на связанные с ним координатные оси с компонентами кватерниона и его первыми производными [6].

Решение кинематических уравнений углового движения БПЛА в пространстве по показаниям БНК по общей рекуррентной схеме имеет в кватернионной записи следующий вид [6, 7]:

$$\Delta \mathbf{Q}_{\text{ЛА}}(\tau_k + \tau_l) = \Delta \mathbf{Q}_{\text{ЛА}}(\tau_k + \tau_{l-1}) \circ d\mathbf{Q}_{\text{ЛА}}^*(\tau_l), \quad (2)$$

где $\Delta \mathbf{Q}_{\text{ЛА}}(\tau_k + \tau_l)$ и $\Delta \mathbf{Q}_{\text{ЛА}}(\tau_k + \tau_{l-1})$ – значения кватернионов на границах участка интегрирования; $d\mathbf{Q}_{\text{ЛА}}^*(\tau_l)$ – кватернион изменения текущего положения БПЛА на участке интегрирования.

Начальные условия интегрирования $\Delta \mathbf{Q}_{\text{ЛА}}(\tau_k + \tau_0)$ определяются из показаний БНК в момент τ_k преобразованием углов Крылова в компоненты кватерниона, а также в компоненты вектора абсолютной угловой скорости [6]. Интегрирование осуществляется методом средней скорости, обладающем достаточной точностью при малом шаге интегрирования.

Интегрирование невозможно без оценки динамики изменения вектора абсолютных угловых скоростей на интервале интегрирования, для чего осуществляется его прогнозирование с помощью полиномов Ньютона.

3. Синтез фазового распределения в элементах ФАР

Задача синтеза фазового распределения в элементах ФАР, обеспечивающего синфазное сложение сигнала в направлении, заданном кватернионом $Q_{\text{ФАР}}$ наведения луча ФАР, решена через преобразование координат элементов ФАР из системы координат АС в систему координат, задаваемую $Q_{\text{ФАР}}$ (см. рис. 2).

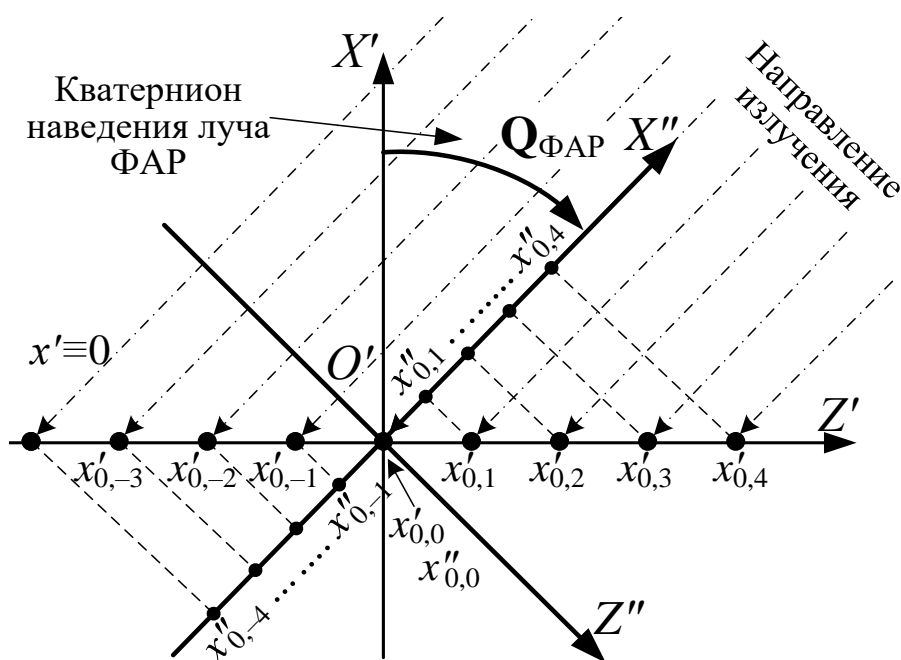


Рис 2. Геометрическая интерпретация определения фазового распределения.

Преобразование координат позволяет определить отклонение пути, пройденного электромагнитной волной до элемента ФАР, относительно фазового центра, а умножение результатов преобразования на волновое число – необходимый фазовый сдвиг.

В [4] получено выражение, позволяющее определить значение фазового сдвига в элементах ФАР, заданных на прямоугольной сетке:

$$\psi_{m,n} = \frac{4\pi}{\lambda} [(q_0q_2 - q_1q_3)md_{\Gamma} + (q_1q_2 + q_0q_3)md_{\text{В}}],$$

где q_0, q_1, q_2, q_3 – компоненты кватерниона наведения луча $Q_{\text{ФАР}}$; m, n – координаты элемента ФАР; $d_{\Gamma}, d_{\text{В}}$ – межэлементное расстояние; λ – длина волны.

4. Алгоритм нахождения уточненных параметров наведения на НС

Алгоритм направленного поиска параметров наведения луча ФАР, размещенной на БПЛА, предназначен для определения кватерниона $\mathbf{Q}_{НС}$ наведения на НС, в направлении которого обеспечивается максимальное среднее ОСШ на входе приемника РС [7]. Ошибка наведения луча ФАР обусловлена возможными размещением НС в другой позиции, рефракцией при распространении сигналов вдоль земной поверхности или магнитным склонением. В качестве функции качества, позволяющей оценить работу алгоритма, выступает среднее ОСШ на входе приемника РС.

Задача направленного поиска сводится к нахождению таких значений кватернионов наведения на НС $\mathbf{Q}_{НС}$, находящихся в заданной области допустимых значений $\mathbf{Q}_{НС}^*$, при которых среднее ОСШ на входе приемника РС максимально. Формальная постановка задачи на разработку алгоритма уточнения параметров наведения на НС:

$$\bar{h}_{\text{прм РС}}^2 \xrightarrow{\mathbf{Q}_{НС} \in \mathbf{Q}_{НС}^*} \max. \quad (3)$$

Алгоритм нахождения уточненных параметров наведения может быть разработан при использовании методов поисковой оптимизации. Процесс поиска разбивается на следующие этапы [8]:

- 1) сбор информации о среднем ОСШ на входе приемника при текущих параметрах наведения на НС \mathbf{Q}_t ;
- 2) на базе имеющейся в памяти $(\mathbf{Q}_{t-1}, \mathbf{Q}_{t-2}, \dots)$ и полученной информации о среднем ОСШ принимается решение о выборе нового кватерниона наведения на НС \mathbf{Q}_{t+1} , который предполагается оптимальным;
- 3) в параметрах наведения устанавливается новое значение \mathbf{Q}_{t+1} ;
- 4) в соответствии с алгоритмом адаптации и самообучения (при наличии) в памяти сохраняются сведения, которые могут быть использованы на следующих этапах.

При наведении АС с механическим сканированием для уточнения параметров наведения обычно используются метод конического сканирования. Но так как ФАР позволяет обеспечить безынерционное сканирование, то направления поиска могут выбираться произвольным образом из заданного набора ограничений. В связи с этим могут быть использованы поисковые алгоритмы, основанные или на регулярных или на статистических методах поиска, например, на алгоритмах:

- Гаусса–Зайделя;
- градиентного (наискорейшего) спуска;
- спуска при оценке градиента не по всем координатным осям (усеченный градиентный спуск);
- случайного спуска;
- по статистической оценке градиента;
- переорганизованного градиента и др.

5. Организация поиска на треугольной координатной сетке

При разработке алгоритма предлагается использовать метод случайного спуска, в котором, вместо прямоугольной сетки задания параметров наведения используется треугольная. Выбор данной сетки объясняется меньшим значением максимальной ошибки наведения (рис. 3), что позволяет увеличивать шаг поиска.

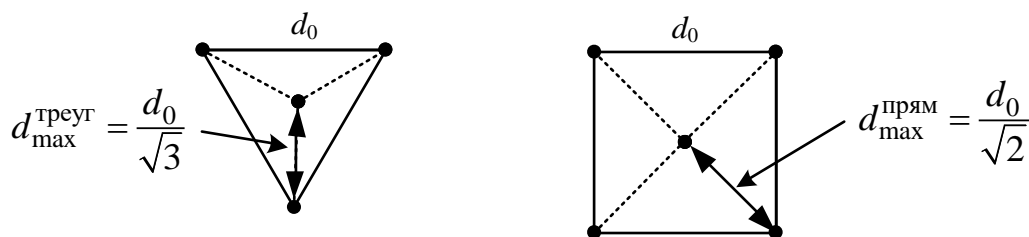


Рис 3. Максимальный остаток между узлами решетки для треугольной и прямоугольной сетки.

Минимальный шаг поиска определяется половиной ширины луча ФАР и должен быть не меньше максимального остатка между узлами решетки.

Применение треугольной сетки для поиска позволит увеличить шаг поиска

в $\sqrt{\frac{3}{2}} = 1,22$ раза.

Существует множество алгоритмов случайного спуска [9–11]:

- поиск с возвратом;
- поиск с пересчетом;
- поиск с линейным пересчетом;
- поиск с «наказанием случайностью»;
- улучшенный поиск с «наказанием случайностью»;
- поиск с запоминанием экстремума.

В результате сравнительного анализа по времени поиска экстремума установлено [10], что минимальным временем поиска обладает метод с запоминанием экстремума, сущность которого заключается в следующем:

- 1) делается шаг в случайном направлении, при этом в случае удачи движение повторяется в том же направлении;
- 2) после неудачи делается шаг назад и осуществляется поиск другого направления, выбор которого определяется последовательностью поворотов.

Так как в качестве оптимизируемого параметра выступает кватернион наведения $Q_{НС}$, то исходя из физической сущности параметров Родрига–Гамильтона, предлагается следующая схема поиска. На поле Эйзенштейновых целых чисел ε задается треугольная сетка [12], каждая точка которой определяет направление на НС:

$$\varepsilon = a + b\omega \quad (4)$$

где a и b – целые числа, $\omega = -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}i$, i – мнимая единица.

Эйзенштейновы целые числа позволяют представить переходы между узлами сетки в виде сложения комплексных целых чисел [12], при этом треугольная сетка позволяет увеличить на 22 % шаг перемещения.

На треугольной сетке переход из любой точки в соседнюю возможен по одному из шести направлений (рис. 4, *a*). Например, для перехода из точки «0»

в «1» необходимо к текущим координатам прибавить $d\varepsilon_0 = 1 + 0\omega$, а для перехода в точку «5» – прибавить $d\varepsilon_4 = -1 - 1\omega$. Все переходы могут быть представлены в виде матрицы из шести эйзенштейновых целых чисел ε_k , $k \in 0..5$, каждое из которых определяет направление движения. В случае успеха (ОСШ увеличивается) направление перехода не меняется, как и $d\varepsilon_k$.

В случае неудачи (ОСШ уменьшилось) для изменения направления движения (рис. 4, б) достаточно взять следующий элемент из матрицы переходов, то есть изменить значение индекса k . Изменение направления представляется в виде сложения по модулю 6 индекса элемента из матрицы переходов с числом, характеризующим необходимый поворот. Важной задачей является выбор направления поиска в случае неудачного шага, то есть выбор последовательности поворотов.

В работе для выбора направлений поиска используется следующая последовательность поворотов $m = \{0; 2; 4; 1; 5; 3\}$ (рис. 4, б).

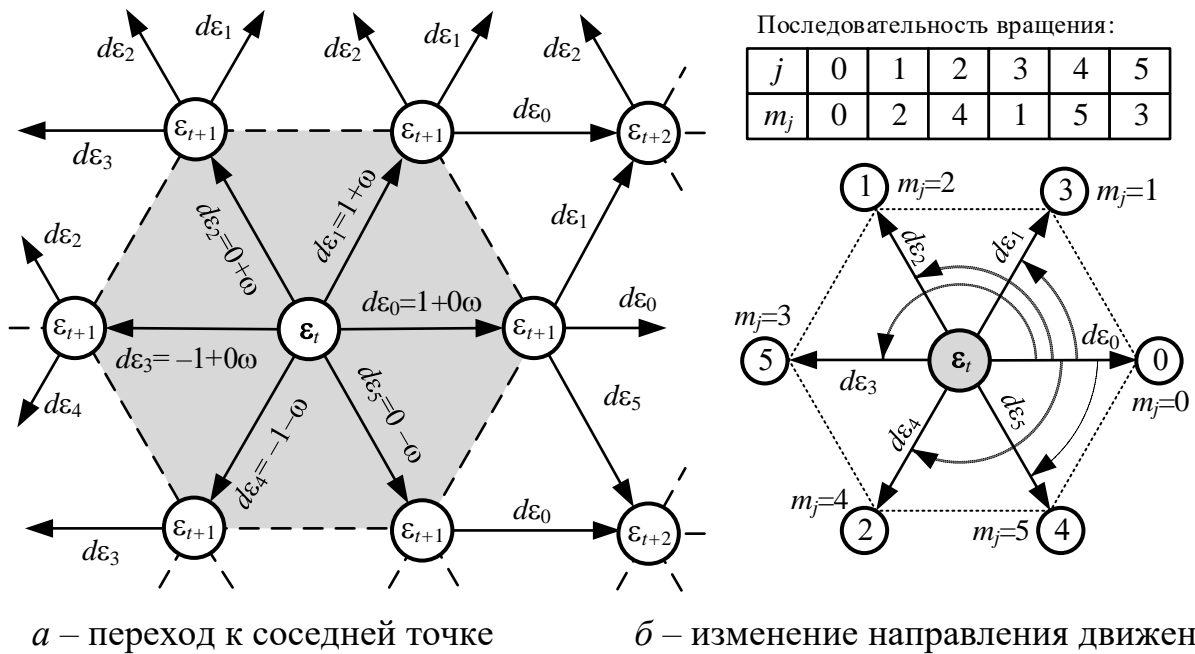


Рис. 4. Определение следующей точки поиска на треугольной сетке.

В кватернионе, компонентами которого являются параметры Родрига–Гамильтона, действительная часть определяет косинус угла поворота, а мнимая часть – произведение синуса угла поворота на вектор, вокруг которого осуществляется вращение.

Кватернион перехода к следующей точке определяется выражением:

$$d\mathbf{Q}_k = \cos d_0 + \vec{\xi}_k \sin d_0; \quad (5)$$

где k – номер направления поиска ($k = 0 \dots 5$), d – угол на который осуществляется переход (шаг поиска); $\vec{\xi}_k$ – вектор, вокруг которого осуществляется вращение при переходе к следующей точке поиска (табл. 1).

Возможность представления сложения поворотов в виде произведения кватернионов в обратном порядке позволяет представить переход к следующему шагу поиска выражением:

$$\mathbf{Q}_{t+1} = d\mathbf{Q}_k \circ \mathbf{Q}_t. \quad (6)$$

Таблица 1. Направления перехода на поле Эйзенштейновых целых чисел

№ направления k	Эйзенштейново целое число $d\varepsilon_k = a + \omega b$	Вектор перехода в прямоугольной системе координат $\vec{\xi}_k$			Кватернион перехода $d\mathbf{Q}_k = \cos d_0 + \vec{\xi}_k \sin d_0$
		x	y	z	
0	$1+0\omega$	0	1	0	$\cos d_0 + (0i_1 + 1i_2 + 0i_3) \sin d_0$
1	$1+1\omega$	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\cos d_0 + \left(0i_1 + \frac{1}{2}i_2 + \frac{\sqrt{3}}{2}i_3 \right) \sin d_0$
2	$0+1\omega$	0	$-\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\cos d_0 + \left(0i_1 - \frac{1}{2}i_2 + \frac{\sqrt{3}}{2}i_3 \right) \sin d_0$
3	$-1+0\omega$	0	-1	0	$\cos d_0 + (0i_1 - 1i_2 + 0i_3) \sin d_0$
4	$-1-0\omega$	0	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\cos d_0 + \left(0i_1 - \frac{1}{2}i_2 + \frac{\sqrt{3}}{2}i_3 \right) \sin d_0$
5	$0-1\omega$	0	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\cos d_0 + \left(0i_1 - \frac{1}{2}i_2 - \frac{\sqrt{3}}{2}i_3 \right) \sin d_0$

Таким образом, на каждом этапе поиска необходимо выбрать номера направления перехода k к следующей точке. Исходя из выбранного алгоритма поиска, в случае неудачного направления движения $F(\mathbf{Q}_{t+1}) \leq F(\mathbf{Q}_t)$ необходимо вернуться назад и выбрать новое направление поиска.

Исходным положением является точка «1». В результате поиска выбирается направление, которым обеспечивается улучшение функции качества, и продолжается движение в данном направлении до того, как качество станет ухудшаться. После чего осуществляется возврат в предыдущую точку «2», в которой осуществляется поиск направления, в котором будет улучшение функции качества и т.д. Если из текущей точки (точка «4») во всех направления нет улучшения сигнала, то принимается решение об остановке и выводу результатов поиска. При этом новый поиск может быть продолжен с меньшим шагом, что позволит повысить точность наведения.

Схема алгоритма уточнения параметров наведения АС РС на БПЛА в направлении НС, обеспечивающего максимизацию среднего ОСШ на входе приемника РС, представлена на рис. 5.

Исходные данные, необходимые для работы алгоритма: кватернион наведения на НС $\mathbf{Q}_{НС}$; среднее ОСШ $\bar{h}_{\text{прм РС}}^2$; начальный шаг поиска d_0 (угол на который осуществляется изменение направления на НС); границы поиска d_{max} (максимальное отклонение направления); матрица, задающая кватернионы отдельных шагов; псевдослучайная последовательность поворотов.

Задание начальных условий поиска:

- текущее значение направления поиска $\mathbf{Q}_t = \mathbf{Q}_{НС}$;
- значение функции качества $F_t = F(\mathbf{Q}_t)$;
- начальный шаг поиска d_0 ;
- первоначальное направление k поиска выбирается случайно от 0 до 5;
- первоначальное направление поворота $j = 0$.

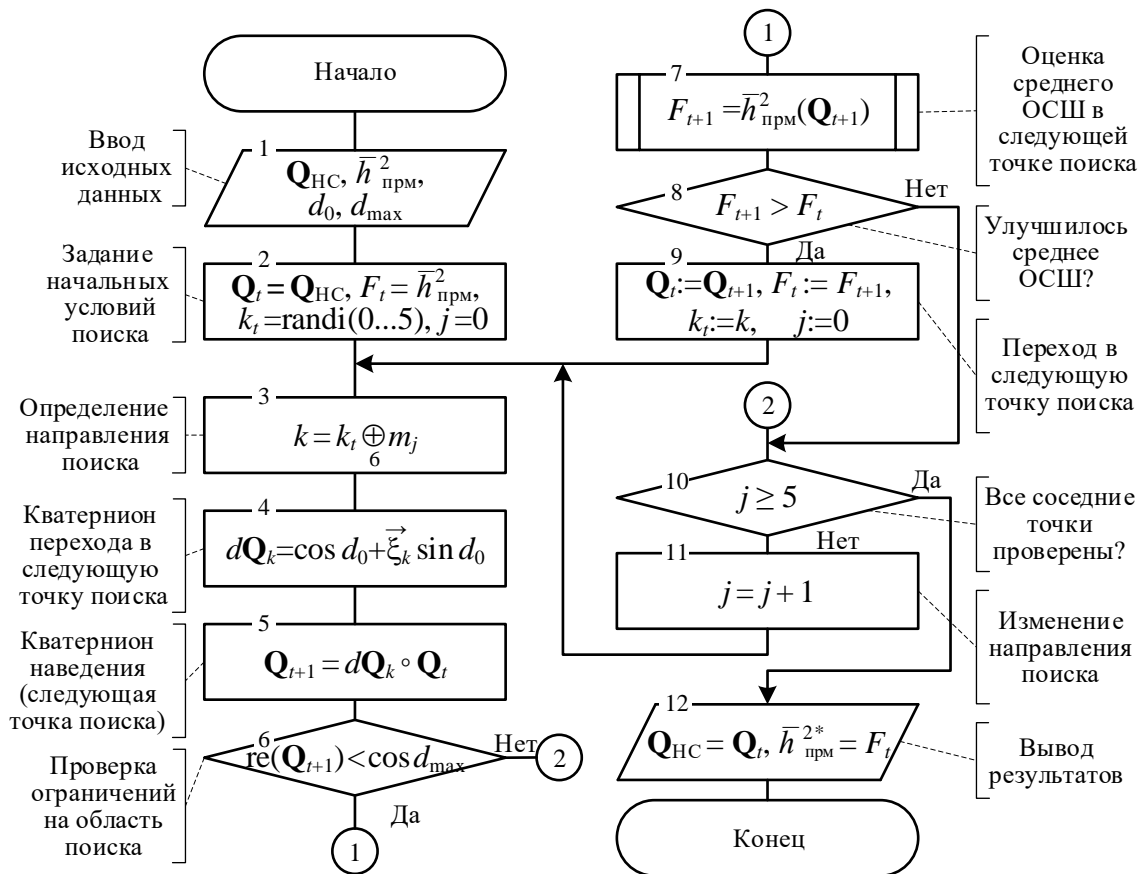


Рис. 5. Блок-схема алгоритма уточнения параметров наведения.

Последовательность поворотов m_j задается соответствующей матрицей изменением индекса j от 0 до 5 (см. рис. 3, б). Направление поиска определяется из направления k_t и поворота m_j сложением по модулю шесть:

$$k = k_t \oplus_6 m_j. \tag{7}$$

Определяется следующий шаг поиска, задаваемый текущим направлением поиска k в соответствии с выражением (7). Выполняется проверка ограничений на область поиска. Если угол поиска превышает допустимое значение, то необходимо выбрать новое направление поиска. Так как действительная часть кватерниона определяет косинус угла поворота, то проверка условия может быть проведена как взятие действительной части кватерниона:

$$\text{re}(\mathbf{Q}_{t+1}) < \cos d_{\max}. \tag{8}$$

В случае выхода за ограничения выполняется выбор нового направления. Если очередная точка находится в пределах сектора уточнения параметров

наведения (8), то делается шаг в направлении \mathbf{Q}_{t+1} . Выполняется установка кватерниона наведения луча $\mathbf{Q}_{\text{НС}} = \mathbf{Q}_{t+1}$ и осуществляется проверка функции качества F_{t+1} (среднее ОСШ на входе приемника).

Если произошло улучшение функции качества $F(\mathbf{Q}_{t+1}) > F(\mathbf{Q}_t)$, то осуществляется переход в данную точку и выполняются следующие присвоения: $\mathbf{Q}_t = \mathbf{Q}_{t+1}$; $F_t = F_{t+1}$; $k_t = k$; $j = 1$. Выбор направления поворота $j = 0$ означает, что движение будет продолжаться в направлении k без изменения. Далее повторяется расчет очередного шага \mathbf{Q}_{t+1} и выполняется работа алгоритма с текущими условиями. Если при проверке ограничений на зону поиска или функцию качества были получены отрицательные результаты, то осуществляется выбор нового направления поиска, но при этом делается проверка о том, что все ли направления были проверены. Так как номера направлений задаются от 0 до 5, если текущее значение $j = 5$, то принимается решение об остановке.

Если не все направления были проверены ($j < 5$), то выбирается следующий поворот $j = j + 1$, рассчитывается новое направление согласно (5) и делается шаг. Таким образом, если из текущего положения во всех направлениях поиска не происходит улучшения функции качества, то может быть принято решение об уменьшении шага поиска с целью более точного определения параметров наведения. Если шаг поиска минимален (d_{min}), то принимается решение об останове и выводе текущих результатов поиска:

– кватернион направления на НС $\mathbf{Q}_{\text{НС}} = \mathbf{Q}_t$, в котором обеспечивается максимизация ОСШ;

– максимальное среднее ОСШ в данном направлении $\bar{h}_{\text{ПРМ РС}}^2 := F_t$.

С целью пояснения принципа работы разработанного алгоритма направленного поиска на рис. 5 представлена графическая интерпретация переходов на треугольной сетке. Последовательности переходов и соответствующие им Эйзенштейновы целые числа представлены в табл. 2.

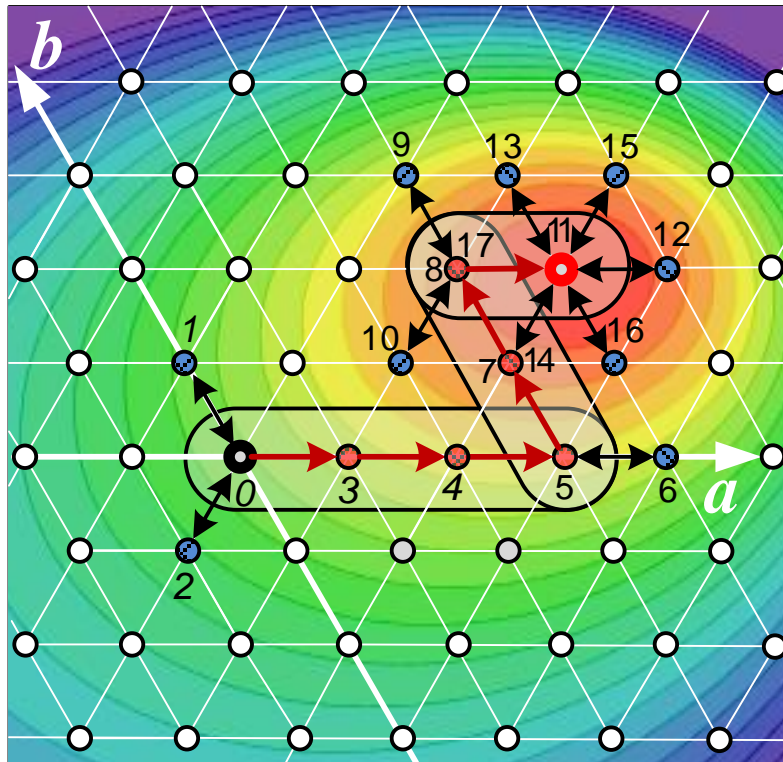


Рис. 5. Графическая интерпретация алгоритма поиска (пример).

Таблица 2. Последовательности переходов при работе алгоритма (пример)

№ п/п	k	j	m_j	$k \oplus m_j$	Шаг $d\varepsilon$	Текущая позиция ε_{t+1}	ОСШ	Предыдущая позиция ε_t
Исходное положение:						0+0ω	–	–
1	2	0	0	2	0+1 ω	0+1 ω	h² ↓	0+0 ω
2	2	1	2	4	-1-1 ω	-1-1 ω	h² ↓	0+0 ω
3	2	2	4	0	1+0 ω	1+0ω	h² ↑	1+0ω
4	0	0	0	0	1+0 ω	2+0ω	h² ↑	2+0ω
5	0	0	0	0	1+0 ω	3+0ω	h² ↑	3+0ω
6	0	0	0	0	1+0 ω	4+0 ω	h² ↓	3+0 ω
7	0	1	2	2	0+1 ω	3+1ω	h² ↑	3+1ω
8	2	0	0	2	0+1 ω	3+2ω	h² ↑	3+2ω
9	2	0	0	2	0+1 ω	3+3 ω	h² ↓	3+2 ω
10	2	1	2	4	-1-1 ω	2+2 ω	h² ↓	3+2 ω
11	2	2	4	0	1+0 ω	4+2ω	h² ↑	4+2ω
12	0	0	0	2	1+0 ω	5+2 ω	h² ↓	4+2 ω
13	0	1	2	2	0+1 ω	4+3 ω	h² ↓	4+2 ω
14	0	2	4	4	-1-1 ω	3+1 ω	h² ↓	4+2 ω
15	0	3	1	1	1+1 ω	5+3 ω	h² ↓	4+2 ω
16	0	4	5	5	0-1 ω	4+1 ω	h² ↓	4+2 ω
17	0	5	3	3	-1+0 ω	3+2 ω	h² ↓	4+2 ω
Конечное положение:						4+2ω	–	–

Из анализа схемы алгоритма синтеза фазового распределения (рис. 4) следует, что данный алгоритм составлен из четких, однозначных действий, строго отделенных друг от друга. Из данного высказывания можно сделать вывод об удовлетворении требованиям дискретности и детерминированности. Массовость разработанного алгоритма уточнения параметров наведения обеспечивается его способностью функционировать при различных значениях исходных данных, что обеспечивает его пригодность к решению целого класса задач подобного типа.

Алгоритм уточнения параметров наведения луча ФАР РС на БПЛА позволяет определить истинный кватернион направления на НС ($Q_{НС}$), при котором обеспечивается максимальное значение среднего ОСШ на входе приемника РС. Ограничение на зону уточнения параметров наведения на НС задается в виде допустимого сектора сканирования ФАР.

Заключение

Разработанный алгоритм поиска параметров наведения луча ФАР РС на БПЛА вертолетного типа отличается от известных тем, что в нем в кватернионной форме на поле Эйзенштейновых целых чисел реализован метод поиска с запоминанием экстремума целевой функции, позволяющий максимизировать среднее ОСШ на входе приемника. Применение треугольной сетки координат позволило увеличить размер шага на 22 % по сравнению с прямоугольной сеткой при сохранении неизменной ошибки наведения.

Литература

1. Алешин М.Г., Дьяконов С.В., Сивов А.Ю. Обоснование основных характеристик антенной системы и параметров управления мощностью передатчика ретранслятора связи на беспилотном летательном аппарате // Журнал радиоэлектроники. 2011. № 12. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/dec11/11/text.html>.

2. Алешин М.Г. Управление наведением антенной системы ретранслятора связи на беспилотном летательном аппарате // Телекоммуникации. 2012. № 2. С. 23–29.
3. Алешин М.Г., Сивов А.Ю. Применение кватернионов в задачах наведения антенной системы ретранслятора связи на беспилотном летательном аппарате // Омский научный вестник: Серия «Приборы, машины и технологии». 2012. № 1(107). С. 310–313.
4. Алешин М.Г., Сивов А.Ю. Применение математического аппарата кватернионов для расчета фазового распределения в элементах фазированной антенной решетки // Перспективы развития информационных технологий / Под общ. ред. С.С. Чернова. Новосибирск: Издательство «СИБПРИНТ». 2012. С. 197—202.
5. Моисеев В.В. Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами: монография. Казань: ГБУ «Республиканский центр мониторинга качества образования» (Серия «Современная прикладная математика и информатика»). 2013. 768 с.
6. Челноков Ю.Н. Кватернионные модели и методы динамики, навигации и управления движением. М.: ФИЗМАТЛИБ. 2011. 560 с.
7. Алешин М.Г., Сивов А.Ю. Алгоритм наведения антенной системы ретранслятора связи на беспилотном летательном аппарате по навигационным показаниям // Техника радиосвязи: Научно-технический сборник. Омск. 2012. Выпуск 17. С. 62–72.
8. Кузовков Н.Т., Салычев О.С. Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация. М.: Машиностроение. 1982. 216 с.
9. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию. М.: Радиосвязь. 1986. 448 с.
10. Растрингин Л.А. и др. Теория и применение случайного поиска. Рига: «Зинатне». 1969. – 305 с.
11. Растрингин Л.А. Современные принципы управления сложными объектами. М.: Сов. радио. 1980. 232 с.

12. Конвей Дж., Смит Д. О кватернионах и октавах, об их геометрии, арифметике и симметриях : пер. с англ. С. М. Львовского. М.: МЦНМО. 2009. 184 с.

Для цитирования:

Сивов А.Ю., Алешин М.Г. Алгоритм наведения луча фазированной антенной решетки на беспилотном летательном аппарате вертолетного типа. Журнал радиоэлектроники. 2020. № 4. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/apr20/5/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2020.4.5