

Рисунок 3 – Пассивное движение в течение двух лет с нулевыми начальными условиями

УДК 629.78

Белоконов И.В., Агафонова С.Е.

**ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
АДАПТИВНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ ПРИЕМНИКОВ СПУТНИКОВЫХ
НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ GPS/ГЛОНАСС ПРИМЕНИТЕЛЬНО К
КОСМИЧЕСКИМ АППАРАТАМ ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

1. Общая характеристика проблемы

В настоящее время наиболее перспективные навигационные технологии основываются на получении и использовании информации от спутниковых радионавигационных систем второго поколения типа ГЛОНАСС и GPS. Для них разработано большое количество типов приемной аппаратуры, позволяющей с высокой точностью определять координаты и ско-

рость различных наземных и околоземных потребителей навигационной информации, а также решать для них разнообразные сервисные задачи.

На современном этапе разработки навигационных средств наблюдается тенденция к использованию спутниковой радионавигации не в качестве вспомогательной, а как базовой навигационной системы, обеспечивающей решение всего круга задач потребителя на всем интервале его функционирования. Это связано с тем, что в спутниковых радионавигационных системах наиболее полно выполняются такие важнейшие требования к навигационному обеспечению как глобальность, оперативность, точность и всепогодность.

Однако изучение потребностей различных пользователей навигационной информации показало, что применение спутниковых радионавигационных систем в интересах различных потребителей кроме перечисленных выше требований, определяемых их первоначальным целевым назначением, выдвигает и новые более высокие требования, вытекающие из необходимости обеспечения безопасности и экономичности движения, а также решения специальных задач (наблюдение, аэрофотосъемка, поиск полезных ископаемых, поиск и спасение терпящих бедствие транспортных средств и людей).

При этом актуальным становится повышение качества навигационной информации различных потребителей. Под качеством навигационной информации понимаются конечные показатели эффективности функционирования потребителей навигационной информации, выраженные через погрешности определения координат, скорости и времени.

Так например, для космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (КАДЗЗ) ошибки знания параметров движения центра масс должны быть ограничены из условия достижения требуемой точности решения задач зондирования. Для решения большинства функциональных задач зондирования необходимо знание положения центра масс космического аппарата в абсолютной геоцентрической системе координат, либо в геоцентрической гринвичской системе координат на момент зондирования. Это дает возможность осуществлять зондирование заранее определенных объектов (площадей и маршрутов) с требуемым перекрытием и привязывать результаты зондирования к карте Земли.

Повышать качество навигационной информации можно как по пути развития аппаратного обеспечения, так и за счет совершенствования навигационных алгоритмов. Существующие навигационные приемники имеют жесткую структуру алгоритмического обеспечения, настроенную либо на узкий класс потребителей, либо являющуюся универсальной для различных потребителей и построенную по обобщенным оценкам точности навигации.

Навигационная система должна обеспечивать выполнение основных задач функционирования потребителей и, следовательно, как решение задачи навигации, так и ее планирование целесообразно проводить по конечным показателям функционирования космического аппарата.

Так, для КАДЗЗ основными показателями эффективности, связанными с результатами решения задачи навигации, являются качество информации зондирования (векторный показатель, включающий линейное разрешение на местности и сдвиг изображения точек на местности) и информационная производительность, характеризуемая полезной площадью сфотографированной земной поверхности или количеством фотопленки, затраченной на фотографирование целевых объектов на поверхности Земли. КАДЗЗ решают свою целевую задачу на протяжении большей части времени своего активного существования. В силу ряда специальных ограничений в ряде случаев невозможно с большой частотой выполнять навигационные определения. Поэтому между сеансами измерений вектор состояния и матрицу погрешностей вектора состояния необходимо пересчитывать, используя математические модели движения, что приводит к возрастанию погрешности местоопределения и к ухудшению показателей эффективности КАДЗЗ. В этой связи целесообразно использовать оценки показателей эффективности с учетом интервала прогнозирования. При этом наибольшее влияние оказывают составляющие погрешности местоопределения и скорости в плоскости орбиты КАДЗЗ. Учет этой особенности при планировании сеанса навигационных измерений в навигационном приемнике позволяет использовать дополнительные резервы повышения качества навигации.

Предметом исследований в настоящей работе является оптимальное планирование сеанса навигационных измерений за счет выбора оптимальной совокупности опрашиваемых навигационных спутников (НС) - оптимального рабочего созвездия в меняющихся условиях функционирования изменения количества видимых НС, погрешностей измерений, расположения НС относительно потребителя навигационной информации, задач потребителя, а также числа работающих каналов навигационного приемника.

Проблема выбора оптимальных созвездий НС рассматривалась в работах ряда авторов [1-5]. В большинстве работ задача решалась для небольшого числа одновременно опрашиваемых НС (соответствующего необходимому числу измерений) и при использовании в качестве критерия оптимальности геометрических характеристик корреляционного эллипсоида вектора состояния потребителя. При этом вопросы выбора оптимальных рабочих созвездий (ОРС) НС с учетом конечных показателей эффективности функционирования потребителей в меняющихся условиях их функционирования исследовались неполно.

Выбор ОРС в меняющихся условиях функционирования выдвигает проблему, связанную с решением этой задачи в реальном времени, которая также является мало исследованной. Следует отметить, что выбор ОРС в реальном масштабе времени не ограничивается скоростью вычислений, так как скорость вычислений определяет среднее время на выполнение каждой операции, т.е. производительность, тогда как реальное время на первый план выдвигает другое требование – предсказуемость поведения, т.е. гарантию того, что каждая из операций будет запущена и завершена в строгом соответствии с временными ограничениями. Таким образом, выбор ОРС в реальном времени должен осуществляться на основе хорошо определенного алгоритма так, чтобы процесс планирования во времени было понятным, предсказуемым и управляемым.

Во многих работах описывается стратегия уменьшения количества рассматриваемых вариантов созвездий при выборе четырех НС, основанная на выборе такого созвездия, при котором один НС находится по отношению к потребителю в зените, а три остальных НС равномерно расположены в горизонтальной плоскости. Однако указанное созвездие чаще всего не будет наблюдаться, и выбор близкого к нему рабочего созвездия остается нерешенной задачей из-за отсутствия формализованных правил выбора такого созвездия.

В работе [4] предложен ряд способов поиска ОРС, обеспечивающих упрощение вычислительных процедур, с доказательством эффективности предлагаемой стратегии навигационных определений на основе моделирования навигационной задачи. Однако в качестве критерия оптимального выбора рабочего созвездия учитывались только факторы геометрического расположения НС относительно потребителя. Поэтому неодинаковая точность навигационных измерений относительно различных НС, априорные значения или необходимость определения различных компонент вектора состояния потребителя с различной точностью приводит к тому, что предложенная выше стратегия выбора ОРС не является оптимальной.

Большое многообразие возможных ситуаций выбора ОРС заставляет отнести рассматриваемую задачу к проблеме адаптивного выбора вариантов или к проблеме определения наилучшей стратегии выбора вариантов в условиях априорной неопределенности. При небольшом количестве возможных ситуаций выбора существует принципиальная возможность заранее для каждой ситуации точно определить оптимальный вариант, в противном случае выбор ОРС за ограниченное время возможен лишь на основе применения адаптивного подхода, который заключается в надлежащем использовании текущей информации об условиях функционирования и получении тем более качественного решения, чем больше времени отпускается на выбор ОРС.

Задача адаптивного выбора вариантов является одной из важнейших задач теории адаптивных систем, предмет изучения которой составляют разнообразные адаптивные алгоритмы, позволяющие оптимизировать функционирование систем в условиях априорной неопределенности. Суть этих алгоритмов состоит в том, что они указывают как следует реагировать на текущую информацию и в результате ее обработки воздействовать на работу системы, изменяя режим или вариант ее функционирования, чтобы обеспечить достижение заданной цели. В рассматриваемой задаче адаптивного выбора вариантов созвездий НС такой текущей информацией являются: количество видимых НС, погрешности измерений по различным НС, расположение НС относительно потребителя, решаемая потребителем задача, количество работающих каналов навигационного приемника, а также время, отпущаемое на планирование сеанса навигационных измерений.

Данная работа посвящена разработке адаптивного алгоритма выбора ОРС навигационных спутников в меняющихся условиях функционирования за ограниченное время с целью повышения качества и снижение трудоемкости решения задачи навигации на основе применения адаптивного подхода при планировании сеанса навигационных измерений.

2. Постановка задачи адаптивного выбора оптимального рабочего созвездия навигационных спутников

Пусть вектор состояния потребителя X записывается в блочном виде и содержит вектор координат по положению X_P и вектор проекций скорости X_C : $X = [X_P^T \quad X_C^T]^T$. Векторы X_P и X_C включают три пространственные проекции соответственно по положению и по скорости.

Эволюция вектора состояния записывается в виде суммы априорных значений \bar{X}_P , \bar{X}_C и линейных поправок к ним соответственно ΔX_P , ΔX_C :

$$\bar{X}_P = \bar{X}_P + \Delta X_P, \quad \bar{X}_C = \bar{X}_C + \Delta X_C, \quad (1)$$

где \bar{X}_P и \bar{X}_C - оценки векторов X_P и X_C .

Получение априорных значений \bar{X}_P и \bar{X}_C здесь не рассматривается, а относительно способа их получения предполагается, что они могут быть получены путем прогнозирования, или передачи с наземных станций слежения, или могут определяться самим навигационным приемником с помощью специального прямого алгоритма навигационных определений (воз-

можно также использование информации от другой системы навигации, например, инерциальной). Линейные поправки ΔX_{Π} и ΔX_C вычисляются по измерениям дальности и радиальной скорости псевдодальномерным и псевдораздальномерным методами.

Уравнения измерений записываются в виде линеаризованных соотношений, связывающих вектор измерений с вектором линейных поправок:

$$\Delta D = \mathbf{U} \mathbf{H} \Delta \mathbf{X}_{\Pi} + \eta_D, \quad \Delta \dot{D} = \mathbf{U} \mathbf{H} \Delta \mathbf{X}_C + \eta_{\dot{D}}, \quad (2)$$

где $\mathbf{X}_{\Pi} = [X_{\Pi} \quad D']$; $\mathbf{X}_C = [X_C \quad \dot{D}']$; D' - погрешность измерения дальности, обусловленная сдвигом шкалы времени (ШВ) потребителя относительно ШВ системы НС; \dot{D}' - погрешность измерения радиальной скорости, обусловленная смещением частоты сигнала НС относительно частоты опорного генератора потребителя; $\Delta D = D(\mathbf{X}_{\Pi}) - D(\bar{X}_{\Pi}, \bar{D}'_0)$; $\Delta \dot{D} = \dot{D}(\mathbf{X}_C) - \dot{D}(\bar{X}_C, \bar{\dot{D}}'_0)$; $D(\mathbf{X}_{\Pi})$, $\dot{D}(\mathbf{X}_C)$ - векторы измерения псевдодальностей и радиальных псевдоскоростей размерностью $(ixN_{НС})$; \bar{D}'_0 , $\bar{\dot{D}}'_0$ - начальные приближения D' и \dot{D}' ; $\mathbf{H} = (\mathbf{H} \quad \mathbf{I})$; $\mathbf{H} = [\partial D(\bar{X}_{\Pi}) / \partial X_{\Pi}] = [\partial \dot{D}(\bar{X}_C) / \partial X_C]$ - градиентная матрица, строками которой являются градиенты видимых НС; $\mathbf{U} = \text{diag}\{u_j\} (j=1, \overline{N_{НС}})$ - диагональная матрица управления, компонентами которой являются 0 (если по j -ому НС измерение не проводится) или 1 (если по j -му НС измерение проводится); η_D и $\eta_{\dot{D}}$ - погрешности измерений, относительно которых предполагается, что они статистически не зависимы между собой и распределены по нормальному закону с нулевыми математическими ожиданиями и диагональными матрицами вторых моментов K_{η} и $K_{\dot{\eta}}$; $N_{НС}$ - количество видимых НС.

Количество видимых НС определяется в результате проверки следующих ограничений на видимость: целостности навигационного поля на больших высотах, затенения НС Землей, конструкцией КАДЗЗ, а также возможного влияния противодействующих систем, которые могут преднамеренно затенять НС и тем самым уменьшать количество видимых НС. При формировании градиентной матрицы видимых НС влияние перечисленных ограничений учитывается умножением градиентной матрицы всех НС, входящих в систему НС, G_{Σ} на специальные матрицы $\Gamma_{СРНС}$, Γ_Z , $\Gamma_{КА}$ и $\Gamma_{ПС}$: $\mathbf{H} = \Gamma_{ПС} \Gamma_{КА} \Gamma_Z \Gamma_{СРНС} G_{\Sigma}$.

Для оценки вектора состояния обычно используется рекуррентная форма метода наименьших квадратов, апостериорные ковариационные матрицы по положению и по скорости при этом записываются следующим образом:

$$K_{X_H} = \{\bar{K}_{X_H}^{-1} + \mathbf{H}^T \mathbf{U}^T K_{\eta}^{-1} \mathbf{U} \mathbf{H}\}^{-1}, K_{X_C} = \{\bar{K}_{X_C}^{-1} + \mathbf{H}^T \mathbf{U}^T K_{\eta}^{-1} \mathbf{U} \mathbf{H}\}^{-1}, \quad (3)$$

где \bar{K}_{X_H} , \bar{K}_{X_C} - априорные погрешности вектора состояния по положению и по скорости.

Матрицы погрешностей измерений представляются диагональными матрицами:

$$K_{\eta} = \text{diag}\{\sigma_{HC}^2 + \sigma_a^2 + \sigma_{HP}^2\}, K_{\dot{\eta}} = \text{diag}\{\dot{\sigma}_{HC}^2 + \dot{\sigma}_a^2 + \dot{\sigma}_{HP}^2\} \quad (4)$$

в виде суммы погрешностей эфемерид НС (σ_{HC} и $\dot{\sigma}_{HC}$), атмосферных искажений (σ_a и $\dot{\sigma}_a$) и погрешностей навигационного приемника (σ_{HP} и $\dot{\sigma}_{HP}$).

Задача адаптивного выбора созвездия НС заключается в выборе такой конфигурации НС, задаваемой матрицей управления \mathbf{U}^* , которая обеспечивает минимальное значение критерия оптимальности $J = \text{tr}\{\Lambda \bar{K}_{X_H}\}$:

$$\mathbf{U}^* = \text{argmin} J \quad (5)$$

при выполнении ограничений на: условия видимости НС, задаваемые матрицами Γ_{CPHC} , Γ_a , Γ_{KA} и Γ_{PC} , количество опрашиваемых НС: $\text{tr}(\mathbf{U}) \leq m^*$ (m^* - число каналов навигационного приемника) и время выбора ОРС: $T \leq T^*$.

Решение сформулированной задачи предлагается разделить на следующие этапы.

1. Решение исходной задачи в неадаптивной постановке, которая характеризуется как комбинаторная задача оптимизации, относящаяся к классу задач нелинейной дискретной оптимизации. Регуляризация задачи (переход к соответствующей непрерывной задаче) позволяет дать ее геометрическую интерпретацию и на ее основе разработать методику построения ОРС в непрерывной постановке, которые называются идеальными оптимальными созвездиями (ИОС) [6].
2. Разработка алгоритмов выбора ОРС на основе комплексного применения геометрической интерпретации задачи, методики построения ИОС, методов дискретной оптимизации. Производится программная реализация разработанных алгоритмов [7].
3. Параметрический анализ областей использования разработанных алгоритмов и формирование логики управляющего алгоритма, позволяющего для конкретных условий функционирования выбрать наилучший алгоритм поиска ОРС и оптимальный вектор его параметров [8].

3. Выбор оптимальных рабочих созвездий НС в непрерывной восстановке

С использованием теорем матричного анализа условие оптимальности $v(\Delta K) \rightarrow \min$ преобразуется к эквивалентному условию:

$$\cos(b_H, \bar{b}_\Lambda) \det[H^T U \bar{K}_n^{-1} H] \rightarrow \max, \quad (6)$$

где $b_H = b_{H_1} \bar{\zeta}_1 + b_{H_2} \bar{\zeta}_2 + b_{H_3} \bar{\zeta}_3$; $\bar{b}_\Lambda = b_{\Lambda_1} \bar{\zeta}_1 + b_{\Lambda_2} \bar{\zeta}_2 + b_{\Lambda_3} \bar{\zeta}_3$; $b_{H_1}, b_{H_2}, b_{H_3}$ - собственные числа матрицы $(H^T U \bar{K}_n^{-1} H)$; $b_{\Lambda_1}, b_{\Lambda_2}, b_{\Lambda_3}$ - собственные числа матрицы $(\bar{K}_{x_n} \Lambda \bar{K}_{x_n}^{-1})$; $\bar{\zeta}_1, \bar{\zeta}_2, \bar{\zeta}_3$ - собственные векторы матриц $(H^T U \bar{K}_n^{-1} H)$ и $(\bar{K}_{x_n} \Lambda \bar{K}_{x_n}^{-1})$; $\bar{K}_n = K_n + U H \bar{K}_{x_n}^{-1} H^T U$. Строками матрицы H в выражении (6) являются разности дальномерных градиентов, полученные вычитанием одного из дальномерных градиентов из остальных дальномерных градиентов.

Первый множитель в условии (6) определяет степень подобия эллипсоидов $x^T (H^T U \bar{K}_n^{-1} H) x = 1$ и $x^T (\bar{K}_{x_n} \Lambda \bar{K}_{x_n}^{-1}) x = 1$ и достигает максимума, когда их главные оси соосны и пропорциональны. Это условие в дальнейшем называется *первым правилом выбора ОРС*.

Второй множитель представляется в виде квадратичной формы, составленной из объемов всевозможных треугольных пирамид, построенных на градиентах измерений.

$$\det[H^T U \bar{K}_n^{-1} U H] = v^T C^3 (U \bar{K}_n^{-1} U) v, \quad (7)$$

где $C^3 (U \bar{K}_n^{-1} U)$ - ассоциированная матрица третьего порядка для матрицы $(U \bar{K}_n^{-1} U)$:

$$C^3 (U \bar{K}_n^{-1} U) = \begin{bmatrix} h_{n1} h_{n2} h_{n3} \\ h_{n1}^2 h_{n2} h_{n3} \\ h_{n1} h_{n2}^2 h_{n3} \\ h_{n1} h_{n2} h_{n3}^2 \end{bmatrix} \text{ - миноры матрицы } H \text{ (} i = \overline{1, C_{N_{НС}} - 1} \text{)}.$$

Таким образом, из (6) с учетом (7) следует *второе правило выбора ОРС*: квадратичная форма (7) должна быть максимальной.

Так как рассмотренные множители в условии (6) являются взаимозависимыми, то ОРС определяется как компромиссное решение на основе применения сформулированных правил.

Задача нахождения максимума квадратичной формы (7) сначала формулируется как задача квадратичного программирования при условиях, что градиенты измерений непрерывно покрывают градиентную сферу, и ошибки измерений являются одинаковыми для всех НС.

Затем в силу особенности математической формулировки задача сводится к задаче линейного программирования, решением которой являются правильные выпуклые многогранники. Эллипсоид $x^T (H^T U \bar{K}_n^{-1} H) x = 1$ вырождается в сферу с радиусом равным $\sqrt{m/3} \sigma_n$, где σ_n - погрешность измерения дальности. В силу одинаковости информационных свойств измерений дальности и ее радиальной скорости корреляционный эллипсоид, описывающий погрешности определения скорости, также вырождается в сферу с радиусом $\sqrt{m/3} \dot{\sigma}_n$, где $\dot{\sigma}_n$ - погрешность измерения радиальной скорости.

В работе [6] доказано утверждение, на основе которого разработана методика построения ОРС в непрерывном случае - идеальные оптимальные созвездия. Согласно разработанной методике ИОС ищутся в классе трансформированных правильных многогранников: $H_{ИОС} = H^* T^*$, где $H_{ИОС}$ - градиентная матрица ИОС; H^* - матрица градиентов, направленных в вершины правильных выпуклых многогранников; T^* - матрица оптимальной трансформации, которая находится из условия:

$$T^* = \arg \max_T \cos(\bar{b}_N, \bar{b}_A) \det [T^T H^{*T} K_n^{-1} H^* T]. \quad (8)$$

Применение этой универсальной методики для КАДЗЗ проиллюстрировано на примере критериев, определяющих качество навигационной информации и информационную производительность. Особенность этих критериев заключается в том, что они полностью определяются погрешностями определения вектора состояния КАДЗЗ в проекции на плоскость его орбиты. Это обстоятельство позволяет решать задачу в пространстве меньшей размерности (на плоскости). Правильные выпуклые многогранники вырождаются в правильные многоугольники, а матрица трансформации записывается следующим образом: $T = \text{diag}[1, k]$, где k - коэффициент трансформации, оптимальное значение которого находится из условия $k^* = \arg \min [\sigma_k^2(k) + p \sigma_r^2(k)]$; $p = \lambda_{22} / \lambda_{11}$; $\lambda_{11}, \lambda_{22}$ - диагональные элементы матрицы критерияльного базиса Λ ; σ_r, σ_k - погрешности определения координат КАДЗЗ соответственно по радиусу-вектору и вдоль орбиты. Для низкоорбитальных КАДЗЗ, движущихся по круговым орбитам с высотой 300..500 км, значение параметра p для критериев, характеризующих среднееинтервальное ухудшение показателей эффективности, составляет примерно 10, а для критериев, определяющих максимальное ухудшение показателей эффективности на интервале решения целевой задачи, равняется примерно 100.

Для 4, 6, 8, 10 и 12 опрашиваемых НС получены степенные и полиномиальные аппроксимации $k^*(p)$ для широкого диапазона изменения параметра p : от 1 до 1000.

Сильная зависимость показателей эффективности КАДЗЗ от погрешности навигационных определений вдоль орбиты приводит к тому, что оптимальные структуры созвездий НС получаются вытянутыми вдоль траектории движения КАДЗЗ.

На основе анализа получаемых ИОС получена формула взаимозависимости углового расположения вершин ИОС:

$$\operatorname{tg}\beta_i = k^* \frac{\operatorname{tg}\beta_1 + k^* \operatorname{tg}(2\pi(i-1)/m)}{k^* - \operatorname{tg}\beta_1 \operatorname{tg}(2\pi(i-1)/m)} \quad (i = \overline{2, m}), \quad (9)$$

где m – количество опрашиваемых НС, β_i ($i = \overline{1, m}$) – углы вершин ИОС, которые отсчитываются в плоскости орбиты КАДЗЗ от оси, связанной с ним и направленной вдоль его движения, причем положение первой вершины может задаваться произвольно.

На рис. 1 показаны графики взаимозависимости градиентов для $m=6$ (a – для средних значений показателей эффективности на витке, b – для максимальных значений показателей эффективности на витке). Из графиков видно, что существуют «устойчивые» оптимальные направления (на рис. 1 они соответствуют горизонтальным участкам графиков), вдоль которых располагаются градиенты ИОС. Причем, при изменении положения одного из НС, входящих в ИОС, изменяется положение НС с противоположным градиентом, а положение остальных НС почти не изменяется. При переходе β_1 через величину $\pi\ell/2$ ($\ell = 1, 3, 5, \dots$) значения остальных β_i ($i = \overline{2, m}$) изменяются почти скачком, особенно при больших значениях параметра p , однако они снова располагаются вдоль устойчивых оптимальных направлений. Таким образом, происходит циклическая перестановка градиентов НС, в результате которой взаимное расположение НС (2, 3, ..., m) практически не изменяется

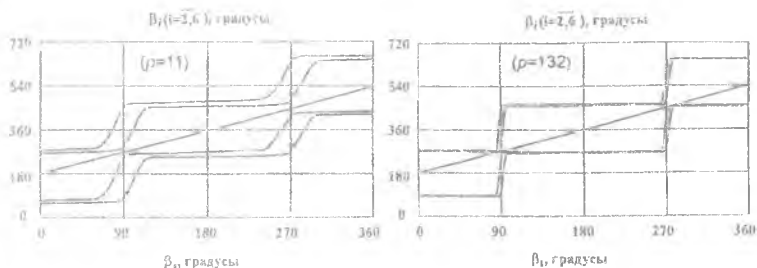


Рис. 1

4. Выбор оптимальных рабочих созвездий НС в дискретной постановке

На втором этапе задача адаптивного выбора созвездий решается в дискретной постановке, но со снятыми ограничениями по времени выбора ОРС. Разработан следующий набор алгоритмов поиска ОРС, использующих разные методики перебора НС:

- эталонный алгоритм,
- алгоритм последовательного выбора комбинаций НС ОРС,
- алгоритм локального перебора НС в окрестности ИОС,
- алгоритм выбора ОРС на основе решающего правила,
- эмпирический алгоритмы

Все алгоритмы выбора ОРС имеют одинаковую часть входных и выходных данных и дополнительные параметры. Одинаковыми входными данными являются: исходные данные - m , $\bar{K}_{X_{II}}$, \bar{K}_{X_C} , Λ и текущие условия функционирования - $N_{НС}$, H , K_{η} , $K_{\dot{\eta}}$. Одинаковыми выходными данными являются характеристики полученного ОРС: минимальное значение целевой функции J_{min} , множество номеров НС ОРС N^{opt} , градиентная матрица НС ОРС H^{opt} , погрешности измерений дальности и ее радиальной скорости при использовании НС ОРС соответственно K_{η}^{opt} и $K_{\dot{\eta}}^{opt}$, апостериорные ковариационные матрицы по положению и по скорости $\bar{K}_{X_{II}}^{opt}$ и $\bar{K}_{X_C}^{opt}$. Дополнительные параметры зависят от используемой методики перебора НС при поиске ОРС и могут варьироваться в зависимости от текущих условий функционирования.

Для каждого из алгоритмов выбора ОРС дается теоретическое обоснование и описание используемой методики перебора НС, оцениваются затраты времени T_i на выбор ОРС: $T_i = t_{вып} N_i$, где i - номер алгоритма; $t_{вып}$ - время, затрачиваемое на расчет одного варианта

созвездия (для процессора Pentium-166 составляет порядка 0.15 мс); N_i - количество рассматриваемых вариантов созвездий. За исключением эталонного алгоритма все используемые методики перебора основаны на результатах геометрической интерпретации задачи и направлены на уменьшение количества рассматриваемых вариантов.

Эталонный алгоритм основан на полном переборе всех вариантов созвездий и используется в основном на этапе разработки адаптивного алгоритма для сравнительной оценки качества навигационной информации, получаемого по другим алгоритмам выбора ОРС. Количество рассматриваемых вариантов созвездий определяется количеством комбинаций из $N_{НС}$ по m с одновременным выбором в созвездии разностного НС:

$$N_1 = \frac{N_{НС}!}{(m-1)!(N_{НС} - m)!} \quad (10)$$

В алгоритме последовательного выбора комбинаций НС в ОРС выбираются последовательно комбинациями с количеством НС не меньше 2-х и не меньше 4-х для первой комбинации. Используемый метод основан на закономерности построения ИОС: все правильные многогранники можно получить срезанием частей у правильного икосаэдра, при этом они являются вписанными друг в друга. Также обоснованием этого алгоритма являются результаты многочисленных расчетов по эталонному алгоритму (например, при сравнении четырехугольных ОРС с шестиугольными ОРС количество совпадений составляет 3...4 НС). Дополнительным входным параметром алгоритма является последовательность $\bar{m} = \{\bar{m}_j\} (\sum \bar{m}_j \leq m)$, задающая количество НС \bar{m}_j в каждой комбинации. При выборе каждой комбинации учитываются предыдущие выбранные НС и используется метод полного перебора. Количество рассматриваемых вариантов созвездий вычисляется по формуле:

$$N_2 = \sum_j \frac{(N_{НС} - \sum_1^{j-1} \bar{m}_i)!}{(\bar{m}_j - 1)!(N_{НС} - \bar{m}_j)!} \quad (11)$$

В алгоритме локального перебора НС, полученные в результате геометрической оптимизации ИОС, используются как начальные приближения расположения градиентов ОРС и определяют центры окрестностей на градиентной сфере, в которых ищутся градиенты НС. Дополнительными входными параметрами алгоритма являются: N_δ - количество окрестностей ИОС; H^* - матрица размером $(N_\delta \times 3)$, задающая идеально-оптимальные направления; $n_\delta^{(i)}$ ($i = \overline{1, N_\delta}$) - количество рассматриваемых НС в i -ой окрестности; $m_\delta^{(i)}$ ($i = \overline{1, N_\delta}$) - коли-

чество выбираемых НС в i -ой окрестности; $M_i (i = \overline{1, N_g})$ - способ задания i -го идеально-оптимального направления (1-градиент, 2-плоскость, 3-коническая поверхность). Количество рассматриваемых вариантов созвездий вычисляется по формуле:

$$N_3 = m \prod_{i=1}^{N_g} C(m_i, n_g^{(i)}), \quad (12)$$

где $C(m_i, n_g^{(i)})$ - количество комбинаций из $n_g^{(i)}$ по m_i .

В алгоритме выбора ОРС на основе решающего правила производится последовательный выбор НС в ОРС на основе использования методики построения ИОС и взаимосвязи углового расположения вершин ИОС. Используется частичный перебор вариантов созвездий, связанный с произвольным выбором первой вершины ИОС и различной величиной проекций градиентов НС на плоскость орбиты КАДЗЗ. Количество рассматриваемых вариантов созвездий вычисляется по следующей формуле:

$$N_4 = m \left(\sum_{k=1}^{N_{HC}} k + 1 \right). \quad (13)$$

В эмпирическом алгоритме используются ИОС и эмпирические данные о выбираемых ОРС. В окрестностях идеально-оптимальных направлений отбираются НС, отклонения градиентов которых от ИОС попадают в подинтервалы, выбранные случайным образом, с учетом их плотности распределения. Если их количество больше количества m опрашиваемых НС, то ОРС находится в результате перебора возможных комбинаций по m из числа отобранных. Дополнительные входные параметры алгоритма такие же, как и в алгоритме локального перебора, и, кроме того, для каждой i -ой окрестности задается кусочно-ступенчатая аппроксимация $P_i(k_j^\delta)$ плотности распределения значений коэффициента близости градиентов ОРС $k_j^\delta (j = \overline{1, k_{инт}})$ к i -му идеально-оптимальному направлению; $k_{инт} = \log_2 n_{выб} + 1$ - количество интервалов, на которые разбивается весь диапазон значений коэффициентов близости, $n_{выб}$ - объем выборки (количество оптимальных градиентов в накопленной информации о выбираемых ОРС), который зависит от продолжительности навигационного интервала и количества опрашиваемых НС. На рис.2 показана зависимость количества интервалов от этих параметров. На рис.3 представлена кусочно-ступенчатая аппроксимация $P_i(k_j^\delta)$ для КАДЗЗ при использовании критерия максимального ухудшения резкости изображения на витке. В этом случае идеально-оптимальные направления задаются плоскостью орбиты

КАДЗЗ, а коэффициент близости k_j^δ представляет собой величину проекций градиентов НС на плоскость орбиты КАДЗЗ.



Рис.2

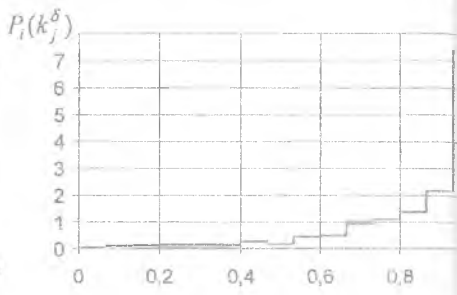


Рис.3

Количество вариантов рассматриваемых созвездий в эмпирическом алгоритме вычисляется также, как и в алгоритме локального перебора по формуле (12).

В комплект алгоритмов включен также алгоритм, использующий методику построения ИОС с учетом возможных ошибок измерений и позволяющий для заданных высоты потребителя, количества каналов навигационного приемника и матрицы критериального базиса получать верхнюю и нижнюю оценки качества навигационных определений. Результаты работы алгоритма применяются для быстрой проверки корректности работы алгоритмов выбора ОРС.

Параметры получаемых ОРС используются для сравнительной оценки качества решения задачи навигации и точности поиска ОРС при работе того или иного алгоритма выбора ОРС, при этом используются следующие виды оценок.

1. Оценка ухудшения качества решения задачи навигации $\Delta J^{(i)}$. Значение критерия оптимальности $J^{(i)}$, полученное в результате работы i -го алгоритма выбора ОРС, сравнивается с его значением $J^{\text{ЭА}}$ при использовании эталонного алгоритма в тех же условиях функционирования:

$$\Delta J^{(i)} = \frac{J^{(i)} - J^{\text{ЭА}}}{J^{\text{ЭА}}} \cdot 100\% . \quad (14)$$

Ухудшение критериев оптимальности при использовании разработанных алгоритмов, полученное по формуле (14), в зависимости от отпущаемого времени на выбор ОРС может изменяться от 0 до 300 %. Следует отметить, что в силу дискретного характера задачи замена

одного из НС в ОРС на близко расположенный к нему может приводить к ухудшению качества в среднем от 30 до 100 %. Поэтому по такой оценке качества нельзя судить о точности работы алгоритмов, а также нельзя оценить выигрыш от их использования.

2 Оценка улучшения качества решения задачи навигации $\Delta \bar{J}^{(i)}$. Значение критерия оптимальности $J^{(i)}$, полученное в результате работы i -го алгоритма выбора ОРС, сравнивается с его значением J^{cm} при использовании стандартного навигационного алгоритма, работающего по критерию минимума сферической ошибки по положению:

$$\Delta \bar{J}^{(i)} = \frac{J^{cm} - J^{(i)}}{J^{cm}} \cdot 100\%. \quad (15)$$

Расчеты по формуле (15) показали, что при использовании разработанных алгоритмов значения показателей эффективности решения задачи навигации повышается от 30 до 100 %.

3. Оценка погрешности поиска ОРС $\Delta_{\text{ош}}^{(i)}$. По величине значения критерия оптимальности для ОРС $J^{(i)}$, полученного в результате работы i -го алгоритма, находится его порядковый номер $N_{\text{ОРС}}^{(i)}$ в отсортированном по возрастанию множестве возможных значений этого критерия для всех N возможных вариантов созвездий и оценивается близость полученного варианта ОРС к первому варианту, который является ОРС при использовании эталонного алгоритма:

$$\Delta_{\text{ош}}^{(i)} = \frac{N_{\text{ОРС}}^{(i)} - 1}{N} \cdot 100\%. \quad (16)$$

Анализ ОРС по формуле (16) показал, что погрешность поиска ОРС при использовании разработанных алгоритмов варьируется от 0 до 4 % в зависимости от ограничений на время решения задачи навигации.

5. Концепция построения интеллектуального планировщика адаптивного алгоритма выбора НС

Дискретный характер задачи и большое количество факторов, влияющих на оценку качества, приводит к тому, что априорно определять качество решения задачи навигации или точность поиска ОРС при работе того или иного алгоритма поиска ОРС во всех возможных ситуациях выбора ОРС не представляется возможным. Поэтому необходима разработка управляющего алгоритма, который должен обеспечивать компромиссный выбор алгоритма поиска ОРС, исходя из требований по качеству и оперативности навигационных определений и информации о качестве решения задачи навигации и затратах времени на ее планирование.

При использовании различных алгоритмов, анализируются статистические данные, полученные при похожих условиях функционирования. Для космических потребителей в случае штатного развертывания орбитальной группировки НС такие статистические данные можно получить, если рассматривать движение КАДЗЗ на круговых орбитах заданной высоты при фиксированном количестве опрашиваемых НС.

На основе статистических данных для каждого алгоритма выбора ОРС находятся функции распределения вероятности оценок (14)-(16), соответственно, $P(\Delta J^{(i)} \leq \Delta J)$, $P(\Delta \bar{J}^{(i)} \geq \Delta \bar{J})$ и $P(\Delta_{anz}^{(i)} \leq \Delta_{anz})$ при изменении ΔJ , $\Delta \bar{J}$ и Δ_{anz} в пределах, обусловленных максимальным значением вероятности 1. При этом вводится понятие надежности получения оценок ΔJ , $\Delta \bar{J}$ и Δ_{anz} как вероятности их значений не хуже заданного уровня: $P^* = P(\Delta J \leq \Delta J^*)$, $P^* = P(\Delta \bar{J}^{(i)} \geq \Delta \bar{J}^*)$ и $P^* = P(\Delta_{anz}^{(i)} \leq \Delta_{anz}^*)$.

Таким образом, для работы управляющего алгоритма требования по выбору ОРС задаются следующими параметрами: 1) – уровнем качества решения задачи навигации (ΔJ^* или $\Delta \bar{J}^*$) или точности поиска ОРС (Δ_{anz}^*); 2) – надежностью P^* получения заданного уровня качества решения задачи навигации или точности поиска ОРС; 3) – ограничением на время выбора ОРС T^* . Результатом работы управляющего алгоритма являются наилучшие для текущих условий функционирования алгоритм выбора ОРС и вектор его входных параметров.

Для реализации адаптивного алгоритма выбора ОРС предложена концепция построения интеллектуального планировщика. Использование методов искусственного интеллекта позволяет легко перенастраивать навигационный приемник при изменении как типа потребителя навигационной информации, так и целей его функционирования за счет добавления, замены или удаления критериев оптимальности, вспомогательных процедур, алгоритмов выбора ОРС, а также оценок качества навигационной информации при изменении диапазонов условий функционирования навигационного приемника. Применение искусственного интеллекта при реализации интеллектуального планировщика рассматривается в двух аспектах. Первый касается использования технологии создания экспертных систем, второй – использования интеллектуального программирования. В состав интеллектуального планировщика включены следующие основные блоки: база данных, база алгоритмов, база знаний, машина логического вывода и супервизор. База данных содержит текущие значения исходных данных, входных и выходных параметров алгоритмов и вспомогательных процедур, а также значения их признаков инициализации. База алгоритмов содержит программно-реализованные

вспомогательные процедуры, алгоритмы выбора ОРС и представляется набором исполняемых файлов. База знаний представляется совокупностью связанных таблиц, в которых дается описание содержащихся в базе данных параметров, описание процедур и функций базы алгоритмов, их входных и выходных параметров, а также содержатся вероятностные оценки качества решения задачи навигации. Машина логического вывода реализована в виде программы с использованием интеллектуального программирования, которое заключается в применении дедуктивного метода для синтеза программы поиска ОРС для текущих условий функционирования из готовых программных модулей, исходя из сведений, размещенных в базе знаний и базе данных. Супервизор обеспечивает выбор одного из режимов работы интеллектуального планировщика: интерфейс с пользователем, обучение или собственно его функционирование.

Выбор наилучшего алгоритма поиска ОРС осуществляется специальной процедурой, реализующей логику управляющего алгоритма на основе вероятностных оценок качества и точности поиска ОРС. Описание вероятностных оценок в базе знаний организовано следующим образом. Для каждого алгоритма выбора ОРС формируются таблицы-указатели, в которых в зависимости от номера критерия оптимальности и высоты потребителя указываются имена таблиц с вариантами входных параметров алгоритма выбора ОРС и вероятностными оценками для них качества решения задачи навигации и точности поиска ОРС, полученными по формулам (14), (15) и (16). Строки таблиц с вариантами входных параметров содержат возможные для заданной высоты и критерия оптимальности комбинации значений входных параметров алгоритма, строки таблиц с вероятностными оценками содержат соответствующие им вероятности получения значений ΔI , ΔJ и $\Delta_{\text{ош}}$ с шагом соответственно 5 %, 5 % и 0.05 %.

На рис.4 показаны вероятностные значения трех видов оценок (14)-(16), полученные для КАДЗЗ, при использовании критерия максимального ухудшения резкости изображения на одном витке круговой орбиты высотой 300 км. Цифрами отмечены доступные варианты работы алгоритмов для 10-канального навигационного приемника при количестве видимых НС – 17 и ограничении на время поиска ОРС – 180 с. На диаграмме, изображенной на рис.4, представлены затраты времени на поиск ОРС для доступных вариантов работы алгоритмов

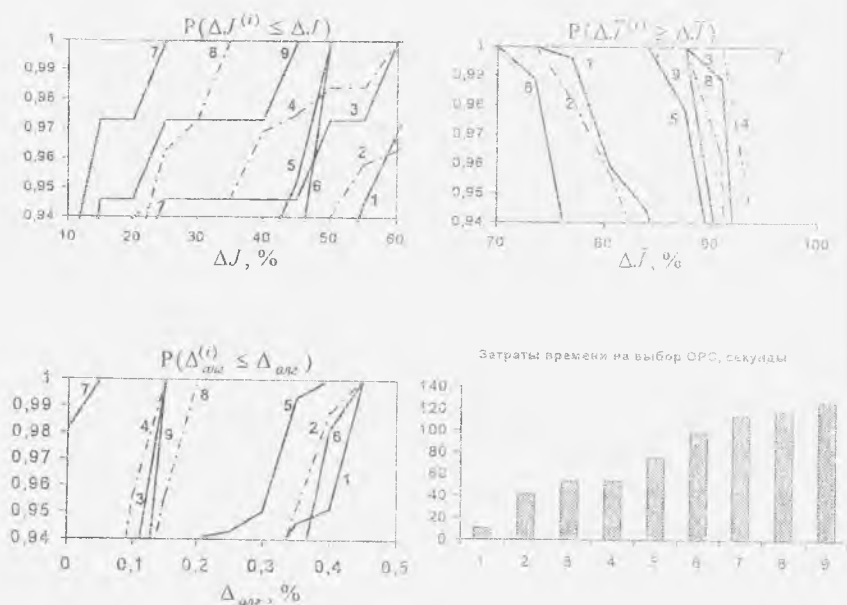


Рис 4

Графики 1, 2, 4 и 9 соответствуют использованию эмпирического алгоритма при переборе НС вблизи плоскости орбиты КАДЗЗ ($N_{\delta} = 1, M_{\delta} = 2$) при следующих значениях дополнительных параметров: $n_{\delta} = 9, m_{\delta} = 8$; $n_{\delta} = 8, m_{\delta} = 4$; $n_{\delta} = 10, m_{\delta} = 8$ и $n_{\delta} = 9, m_{\delta} = 6$. Графики 3, 5 и 6 относятся к алгоритму локального перебора также вблизи плоскости орбиты КАДЗЗ и получены при следующих значениях дополнительных параметров: $n_{\delta} = 10, m_{\delta} = 8$; $n_{\delta} = 9, m_{\delta} = 6$ и $n_{\delta} = 12, m_{\delta} = 10$. Графики 7 и 8 относятся к алгоритму выбора ОРС на основе решающего правила при количестве опрашиваемых НС, равном соответственно 10 и 8. Из графиков видно, что, например, при заданном уровне ухудшения качества $\Delta J = 30\%$ могут использоваться варианты алгоритмов 3, 4, 7, 8 и 9 однако наилучшим является вариант 7 (алгоритм выбора по решающему правилу при количестве опрашиваемых НС, равном 10), так как он имеет наибольшую надежность получения заданного уровня качества при текущих условиях функционирования. Если требования к качеству задаются минималь-

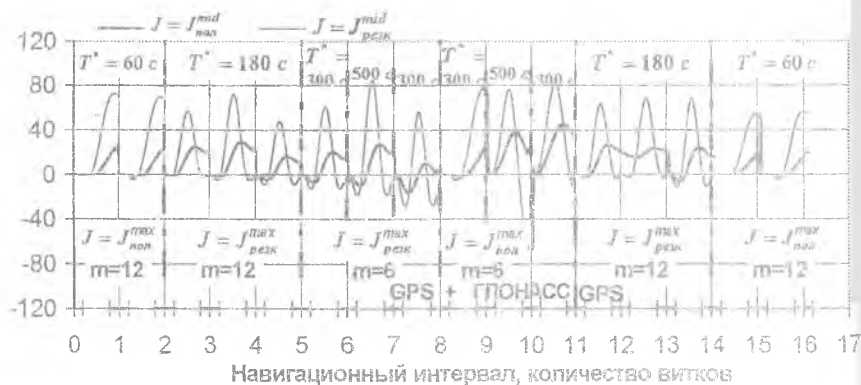
ным уровнем улучшения относительно типового навигационного алгоритма, например, значением $\Delta\bar{J} = 80\%$, то могут быть использованы варианты алгоритмов 3, 4, 5, 7, 8 и 9, однако наиболее надежным также является вариант 7. Этот алгоритм также имеет в рассматриваемом случае и наименьшую погрешность поиска ОРС (меньше 0.05%). Поэтому в рассмотренных условиях функционирования алгоритм выбора по решающему правилу при количестве опрашиваемых НС, равном 10, является наиболее предпочтительным как по качеству навигационной информации, так и по точности поиска ОРС, а также является приемлемым по времени поиска ОРС.

- Оценка эффективности предложенного подхода

Многочисленные расчеты, проведенные с помощью интеллектуального планировщика, показали, что разработанный комплект алгоритмов по выбору ОРС вместе с возможностью варьирования их входных параметров позволяет производить выбор ОРС с требуемым качеством решения задачи навигации и оперативностью при варьировании условий функционирования навигационного приемника в классе адаптации поставленной задачи.

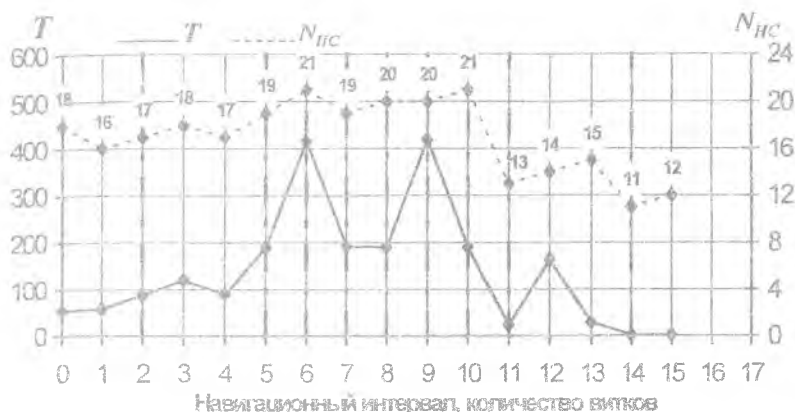
На рис. 5 а показано улучшение критериев оптимальности КАДЗЗ ΔJ в процентах при использовании адаптивного алгоритма в 12-канальном навигационном приемнике, расположенном на борту КАДЗЗ, движущегося по круговой орбите высотой 300 км на протяжении 16 витков. При оценке критериев сравнивались два сценария полета КАДЗЗ: с использованием стандартного алгоритма выбора рабочего созвездия и с использованием разработанного адаптивного алгоритма. Предполагалось, что сеанс навигационных измерений проводится на витке один раз в зоне затенения КАДЗЗ Землей, а между сеансами производится прогнозирование с использованием линеаризованных моделей движения, описывающих влияния малых погрешностей начальных условий движения на отклонения траекторных параметров от номинальной круговой орбиты. Интервал движения был разбит на подинтервалы с разными условиями функционирования (рис. 5 а), которые задаются используемой системой НС, числом работающих каналов приемника – m , критерием оптимальности – J и ограничением на время поиска ОРС – T^* . В качестве критериев оптимальности использовались интервальные критерии $J_{\text{пол}}^{\text{max}}$ и $J_{\text{рез}}^{\text{max}}$, представляющие собой максимальные на витке соответственно сферическую ошибку по положению и ухудшение резкости изображения в фокальной плоскости объектива аппаратуры зондирования КАДЗЗ.

На рис. 5 а тонкими линиями показано улучшение критериев $J_{\text{пол}}^{\text{max}}$ и $J_{\text{резк}}^{\text{max}}$, а угловыми – улучшение осредненных на витке одноименных критериев: $J_{\text{пол}}^{\text{mid}}$ и $J_{\text{резк}}^{\text{mid}}$. Из графиков видно, что улучшение критериев $J_{\text{пол}}^{\text{max}}$ и $J_{\text{резк}}^{\text{max}}$ составляет от 40 % до 80 %, кроме того улучшаются и их осредненные значения $J_{\text{пол}}^{\text{mid}}$ и $J_{\text{резк}}^{\text{mid}}$ (от 10 % до 40 %), хотя выбор ОРС производился по критериям $J_{\text{пол}}^{\text{max}}$ и $J_{\text{резк}}^{\text{max}}$. На рис. 5 б для каждого сеанса измерений показаны время поиска ОРС – T (сплошные линии) и количество видимых НС – $N_{\text{НС}}$ (пунктирные линии). При работе адаптивного алгоритма использовались следующие алгоритмы поиска ОРС: на 1, 9 и 11 витках – эмпирический алгоритм при значениях дополнительных параметров соответственно: $n_{\delta} = 10$, $m_{\delta} = 8$; $n_{\delta} = 10$, $m_{\delta} = 6$ и $n_{\delta} = 10$, $m_{delta} = 6$, на 2-5 и 14 витках – алгоритм выбора по решающему правилу при опросе 12 НС; на 6-8 и 10 витках – алгоритм локального перебора при следующих значениях параметров соответственно: $n_{\delta} = 10$, $m_{\delta} = 6$; $n_{\delta} = 11$, $m_{\delta} = 6$; $n_{\delta} = 10$, $m_{\delta} = 6$ и $n_{\delta} = 11$, $m_{\delta} = 6$; на 12-13 и 15-16 витках – эталонный алгоритм при опросе соответственно 12, 12, 11 и 12 НС.



а)

Рис 5



б)

Рис. 5

Таким образом, использование специальных критериев оптимальности и адаптивного подхода при планировании сеансов навигационных измерений позволяет перераспределять нужным образом точность определения компонент вектора состояния, что повышает конечные показатели функционирования потребителя навигационной информации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сетевые спутниковые радионавигационные системы/Под ред. Шебшаевича В.С. - М.: Радио и связь, 1993. - 408с
2. Бортовые устройства спутниковой радионавигации/ И.В. Кудрявцев, И.Н. Мищенко, А.И. Вольянкин и др.; Под ред. В.С. Шебшаевича.-М.:Транспорт,1988.-201с.
3. Огарков В.И., Бакулин Ю.И. Уточнение параметров движения орбитального КА с помощью навигационных спутников//Космические исследования -1982.-Т. XX.-Вып.1.-С.41-47.
4. Романов Л.М., Шведов А.К. Моделирование спутниковой радионавигации системы НАВСТАР. - Зарубежная радиотехника, 1987, № 12, с. 31 - 47.
5. Космические навигационные системы/ Под ред. Романова Л.М. - МО РФ, 1994.-632с.

6. Белоконов И. В., Агафонова С. Е. Методика построения каталога идеальных созвездий навигационных спутников применительно к функциональному назначению потребителя // Международная научно-техническая конференция «К. Э. Циолковский – 140 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиозлектроника. Геоинформатика.» : Тез. докл. / Рязанская государственная радиотехническая академия. – Рязань, 1997. – С. 41-43.
7. Белоконов И. В., Агафонова С. Е. Алгоритмы выбора рабочих созвездий навигационных спутников для космических аппаратов наблюдения // Тезисы докладов XXXIII Научных чтений К. Э. Циолковского / ИИЕТ РАН – М., 1998. – С. 72-73.
8. Belokonov I. V., Agafonova S. E. Intelligent Navigational Receivers – Possible Trend in Improving Efficiency and Reliability of Space Operations. 8th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigational Systems, 2001, Abstracts, p.281.

УДК 629.7.05

Белоконов И.В., Боровков В.А.

ОПТИМИЗАЦИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ ОТ СПУТНИКОВОГО РАДИОНАВИГАЦИОННОГО ПРИЕМНИКА В ИНТЕРЕСАХ КОНЕЧНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Эффективность решения целевой задачи для любого потребителя навигационной информации можно повысить за счет использования его индивидуального критерияльного базиса при создании адаптивного алгоритма планирования и обработки навигационных определений, поступающих от приемника сигналов спутниковой радионавигационной системы (СРНС). Рассмотрим эту проблему применительно к космическому аппарату дистанционного зондирования Земли (КАДЗЗ).

В практике разработки и эксплуатации навигационно-баллистического обеспечения (НБО) КАДЗЗ утвердилась традиционная схема снабжения потребителей навигационной информацией, при которой система управления движением (СУД), система управления аппаратурой ДЗЗ, наземный комплекс управления (НКУ) и наземный заказчик информации ДЗЗ используют единую навигационную информацию.