

УДК 629.7.058.53

ОПТИМИЗАЦИЯ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ В СОСТАВЕ ЛОКАЛЬНОЙ СЕТИ

В.С. Верба

АО «Концерн «Вега»

Россия, 121170, Москва, Кутузовский проспект, д. 34

E-mail: mail@vega.su

В.И. Меркулов

АО «Концерн «Вега»

Россия, 121170, Москва, Кутузовский проспект, д.34

E-mail: from_fn@mail.ru

В.А. Михеев

АО «Концерн «Вега»

Россия, 121170, Москва, Кутузовский проспект, д.34

E-mail: mail@vega.su

Ключевые слова: теория оптимального управления, локальная оптимизация, групповое управление, пространственная топология, информационная сеть.

Аннотация: Синтезирован закон согласованного группового управления объектами, обеспечивающий, наряду с решением основной задачи полета по заданной траектории сбор группы с построением требуемой пространственной топологии участников. Получены общие решения процедуры синтеза согласованного группового управления в постановке Летова-Калмана на основе метода динамического программирования Беллмана и в рамках локальной оптимизации. Рассмотрен пример реализации.

1. Введение

Решение целого ряда хозяйственных и военных задач возможно только при использовании достаточно больших групп совместного управляемых объектов. К таким задачам относятся: мобильный мониторинг больших объемов воздушного пространства и земной поверхности; ликвидация последствий различного рода катастроф; преодоление ПВО противника, разминирование больших площадей территории; совместное траление моря группами рыболовецких судов и т.д.

Следует отметить, что эффективность решения таких задач во многом зависит не только от выбранного направления движения группы, но и от взаимного расположения участников. Однако в таких ситуациях возникает необходимость решения задачи синтеза согласованного управления участниками группы, которая значительно сложнее, чем управление одиночным объектом.

Цель статьи – разработать упрощенные варианты синтеза группового управления с длительным сохранением заданной топологии участников со сниженными требованиями

ми к вычислительной производительности.

Снижение размерности решаемой задачи можно обеспечить за счет ее декомпозиции, основанной на синтезе управления для отдельного участника с учетом пространственного положения других участников.

2. Постановка и решение задачи

Решение задачи синтеза управления отдельными объектами с учетом состояния всех участников будет выполняться на основе математического аппарата статистической теории оптимального управления в модифицированном варианте решения задачи Летова-Калмана, позволяющем снизить требования к вычислительной производительности системы управления.

При этом будем полагать, что выполняются следующие допущения:

- каждый объект самостоятельно формирует свое управление для текущей ситуации на основе информации о цели, стоящей перед группой, о своем состоянии и состоянии других объектов;
- в качестве оптимального понимается такое управление каждым объектом в текущей ситуации, которое вносит максимально возможный вклад в достижение общей цели, т.е. обеспечивает максимальное приращение общего функционала при переходе группы из текущего состояния в конечное;
- в оптимизируемом функционале должны учитываться как требования целевого назначения группы, так и требования обеспечения заданной топологии участников;
- информационный обмен между участниками осуществляется в составе локальной сети по принципу «каждый с каждым»;
- математический аппарат оптимизации должен быть максимально простым и не требовать больших вычислительных затрат.

В математическом плане задача формулируется следующим образом.

Для группы, состоящей из N однотипных объектов, каждый из которых определяется моделью состояния

$$(1) \quad \dot{\mathbf{x}}_i(t) = \mathbf{F}_i \mathbf{x}_i(t) + \mathbf{B}_i \mathbf{u}_i(t) + \xi_{xi}(t), i = \overline{1, N},$$

где

$$(2) \quad \mathbf{x}_i = \left[\mathbf{x}_{Ti}^T \mathbf{x}_{yi}^T \right]^T$$

составной вектор, в котором n -мерный вектор

$$(3) \quad \dot{\mathbf{x}}_T(t) = \mathbf{F}_{Ti} \mathbf{x}_{Ti}(t) + \xi_{Ti}(t)$$

определяет требуемые координаты состояния (программу действий), а n -мерный вектор

$$(4) \quad \dot{\mathbf{x}}_{yi}(t) = \mathbf{F}_{yi} \mathbf{x}_i(t) + \mathbf{B}_{yi} \mathbf{u}_i(t) + \xi_{yi}(t)$$

отображает текущее (управляемое) состояние объекта, при наличии измерений

$$(5) \quad \mathbf{z}_i(t) = \mathbf{H}_i \mathbf{x}_i(t) + \xi_{ui}(t)$$

необходимо найти r -мерный ($r \leq n$) вектор \mathbf{u}_i сигналов управления, оптимальных по минимуму функционала

$$(6) \quad I = M_y \left\{ \int_0^{t_k} \left[\mathbf{x}_i^T(t) \mathbf{L}_{i1} \mathbf{x}_i(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^N \Delta \mathbf{x}_{ij}^T(t) \mathbf{M}_{j1} \Delta \mathbf{x}_{ij}(t) + \mathbf{u}_i^T(t) \mathbf{K}_i \mathbf{u}_i(t) \right] dt + \right.$$

$$+\mathbf{x}_i^T(t_k)\mathbf{Q}_{i1}\mathbf{x}_i(t_k)+\left.\sum_{j=1, j \neq i}^N \Delta \mathbf{x}_{ij}^T(t_k)\mathbf{G}_{j1}\Delta \mathbf{x}_{ij}(t_k)\right\},$$

где $\Delta \mathbf{x}_{ij} = \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j$, $j = \overline{1, N}$, $j \neq i$.

В (1)-(6): \mathbf{F}_{Ti} и \mathbf{F}_{yi} – динамические матрицы, учитывающие внутренние связи процессов (3) и (4); \mathbf{B}_{yi} – матрица эффективности сигналов управления \mathbf{u}_i ; \mathbf{z} – m -мерный ($m \leq 2n$) вектор измерений; \mathbf{H}_i – матрица связи \mathbf{x}_i и \mathbf{z}_i ; ξ_{Ti} , ξ_{yi} и ξ_{ui} – центрированные гауссовские шумы состояния и измерений с известными матрицами спектральных плотностей; \mathbf{x}_j , $j = \overline{1, N}$, $j \neq i$ – векторы состояния других объектов группы; \mathbf{K}_i – положительно определенная матрица размером $r \times r$ штрафов за величину сигналов управления; M_y – знак условного математического ожидания;

$$(7) \quad \mathbf{F}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{Ti} & \mathbf{O}_1 \\ \mathbf{O}_2 & \mathbf{F}_{yi} \end{bmatrix}, \mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_3 \\ \mathbf{B}_{yi} \end{bmatrix}, \xi_{xi} = \begin{bmatrix} \xi_{Ti} \\ \xi_{yi} \end{bmatrix}, \mathbf{L}_{i1} = \begin{bmatrix} \mathbf{L} & -\mathbf{L} \\ -\mathbf{L} & \mathbf{L} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{M}_{j1} = \begin{bmatrix} \mathbf{M} & -\mathbf{M} \\ -\mathbf{M} & \mathbf{M} \end{bmatrix}, \mathbf{Q}_{i1} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q} & -\mathbf{Q} \\ -\mathbf{Q} & \mathbf{Q} \end{bmatrix}, \mathbf{G}_{j1} = \begin{bmatrix} \mathbf{G} & -\mathbf{G} \\ -\mathbf{G} & \mathbf{G} \end{bmatrix},$$

где $\mathbf{O}_1, \mathbf{O}_2, \mathbf{O}_3$ – нулевые матрицы соответствующих размеров, \mathbf{L} и \mathbf{Q} – матрицы размером $n \times n$ штрафов за точность приближения \mathbf{x}_{yi} к \mathbf{x}_{Ti} в текущий момент времени t и конечный момент времени t_k , \mathbf{M} и \mathbf{G} – матрицы размером $n \times n$ штрафов за нарушение требуемого соотношения между \mathbf{x}_i и \mathbf{x}_j в текущий и конечный моменты времени.

Спецификой функционала (6) является то, что в рамках решения общей задачи он учитывает и требования к формированию желаемой фазовой траектории и требования обеспечения заданной топологии группы.

Поскольку исходные модели (1)-(5) линейные, функционал качества – квадратичный, а возмущения – гауссовские, то в соответствии с теоремой разделения задачи синтеза управления и фильтрации могут решаться отдельно. При этом синтез управления может выполняться в детерминированной постановке ($\xi_{xi} = 0$) при условии, что в полученном алгоритме координаты состояния \mathbf{x}_i и \mathbf{x}_j будут заменены их оптимальными оценками $\hat{\mathbf{x}}_i$ и $\hat{\mathbf{x}}_j$.

Решая уравнение Беллмана с учетом теоремы статистической эквивалентности и с использованием (1)-(3) и (7), получим

$$(8) \quad \mathbf{u}_i = -\mathbf{K}_i^{-1}\mathbf{B}_i^T \left(\mathbf{R}_{i1}\hat{\mathbf{x}}_i + \sum_{j=1, j \neq i}^N \mathbf{P}_{j1}\Delta \hat{\mathbf{x}}_{ij} \right).$$

$$(9) \quad \dot{\mathbf{R}}_{i1} = -\mathbf{L}_{i1} - \mathbf{F}_i^T \mathbf{R}_{i1} - \mathbf{R}_{i1} \mathbf{F}_i^T + \mathbf{R}_{i1} \mathbf{B}_i \mathbf{K}_i^{-1} \mathbf{B}_i^T \mathbf{R}_{i1}, \quad \mathbf{R}_{i1}(t_k) = \mathbf{Q}_{i1},$$

$$(10) \quad \dot{\mathbf{P}}_{j1} = -\mathbf{M}_{j1} + \sum_{j=1, j \neq i}^N \mathbf{P}_{j1} \mathbf{B}_i \mathbf{K}_i^{-1} \mathbf{B}_i^T \mathbf{P}_{j1}, \quad \mathbf{P}_{j1}(t_k) = \mathbf{G}_{j1}.$$

Спецификой полученного алгоритма является необходимость решения двухточечной краевой задачи, суть которой состоит в том, что матрицы \mathbf{R}_{i1} и \mathbf{P}_{j1} рассчитываются в обратном времени от t_k к t , тогда как управление (8) для объекта формируется в прямом от t к t_k .

Необходимо, однако, отметить, что при использовании большого числа управляемых объектов реализация полученного управления также становится проблематичной.

Между тем, процедуру коллективного управления можно существенно упростить, если использовать оптимизацию по минимуму локального функционала качества, при которой в (6) $\mathbf{L}_{i1} = 0, \mathbf{M}_{j1} = 0$, а каждый момент времени рассматривается как момент возможного окончания управления, т.е. $t_k = t$. Тогда из (6) и (9), (10) следует:

$$(11) \quad I = M_y \left\{ \mathbf{x}_i^T(t) \mathbf{Q}_{i1} \mathbf{x}_i(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^N \Delta \mathbf{x}_{ij}^T(t) \mathbf{G}_{j1} \Delta \mathbf{x}_{ij}(t) + \int_0^t \mathbf{u}_i^T(t) \mathbf{K} \mathbf{u}_i(t) dt \right\},$$

$$(12) \quad \mathbf{R}_{i1}(t) = \mathbf{Q}_{i1}, \mathbf{P}_{j1}(t) = \mathbf{G}_{j1}.$$

Используя (7) и (12) в (8) можно получить:

$$(13) \quad \mathbf{u}_i = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{B}_i^T \left\{ \mathbf{Q}(\hat{\mathbf{x}}_{Ti} - \hat{\mathbf{x}}_{yi}) + \sum_{j=1, j \neq i}^N \mathbf{G}(\Delta \hat{\mathbf{x}}_{Tij} - \Delta \hat{\mathbf{x}}_{yij}) \right\},$$

где $\Delta \hat{\mathbf{x}}_{Tij} = \hat{\mathbf{x}}_{Ti} - \hat{\mathbf{x}}_{Tj}$, $\Delta \hat{\mathbf{x}}_{yij} = \hat{\mathbf{x}}_{yi} - \hat{\mathbf{x}}_{yj}$, $j = \overline{1, N}$, $j \neq i$.

Несомненным преимуществом (13) является возможность формирования сигнала группового управления без решения в обратном времени высокоразмерной двухточечной краевой задачи.

Кроме того, полученная система коллективного управления характеризуется наличием отрицательных обратных связей по всем координатам в каждом объекте. Это свидетельствует о ее высокой устойчивости и низкой чувствительности к точности выдерживания параметров. При этом, сигнал управления в ней зависит от ошибок управления $\hat{\mathbf{x}}_{Ti} - \hat{\mathbf{x}}_{yi}$ и $\Delta \hat{\mathbf{x}}_{Tij} - \Delta \hat{\mathbf{x}}_{yij}$. Эта особенность позволяет в два раза снизить требования к пропускной способности линий передач, поскольку достаточно обмениваться только ошибками $\Delta \hat{\mathbf{x}}_{Tij}$ и $\Delta \hat{\mathbf{x}}_{yij}$.

Более того, из (13) отчетливо прослеживается его возможность обеспечить не только движение каждого объекта по требуемой траектории за счет учета $\hat{\mathbf{x}}_{Ti} - \hat{\mathbf{x}}_{yi}$, но и предотвращать их взаимные столкновения за счет учета $\Delta \hat{\mathbf{x}}_{Tij} - \Delta \hat{\mathbf{x}}_{yij}$.

Таким образом, предложенный вариант сетевого управления позволяет реализовать совместное функционирование объектов, обеспечивающее движение по заданным траекториям и предотвращение столкновений между ними при минимальных требованиях к вычислительной производительности ЦВМ. Ниже приводятся результаты исследования эффективности рассмотренного способа синтеза группового управления.

3. Пример

Проверка работоспособности предложенного способа оптимизации группового управления выполнялась на примере синтеза совместного управления группой из трех произвольно расположенных в пространстве беспилотных летательных аппаратов (БЛА) в процессе их совместного полета с заданными интервалами как по прямолинейным, так и по сложным, криволинейным траекториям.

При расчете сигналов управления были использованы модели состояния (3), (4) в виде кинематических уравнений:

$$(14) \quad \dot{\varphi}_{\Gamma i} = \omega_{\Gamma i} + \frac{j_{\Gamma i}}{D_i}, \varphi_{\Gamma i}(0) = \varphi_{\Gamma i}, \quad \dot{\omega}_{\Gamma i} = -\frac{2\dot{D}_i}{D_i} \omega_{\Gamma i} - \frac{j_{\Gamma i}}{D_i}, \omega_{\Gamma i}(0) = \omega_{\Gamma i}$$

при условии, что

$$(15) \quad \dot{\varphi}_{Ti} = 0, \varphi_{Ti}(0) = 30^\circ, 60^\circ, 45^\circ; \quad \dot{\omega}_{Ti} = 0, \omega_{Ti}(0) = 0,$$

где φ_{Ti} и $\varphi_{\Gamma i}$ – требуемый и текущий пеленги желаемых точек А, В, С выхода БЛА на требуемый маршрут в горизонтальной плоскости; ω_{Ti} и $\omega_{\Gamma i}$ – требуемая и текущая угловые скорости линий визирования этих точек с БЛА, $j_{\Gamma i}$ – мгновенное поперечное ускорение (сигнал управления), D_i – дальность до требуемой точки, а \dot{D}_i – скорость ее изменения.

Используя (14), (15) в (13), получим законы управления для каждого БЛА. Пример такого управления для БЛА №1, определяется соотношением

$$(16) \quad j_{\Gamma T1} = \left[\frac{q_{\varphi 1}}{k_1 \dot{D}_1} (\hat{\varphi}_{T1} - \hat{\varphi}_{y1}) + \frac{q_{\omega 1}}{k_1 \dot{D}_1} \hat{\omega}_1 \right] + \left\{ \frac{g_{\varphi 2}}{k_2 \dot{D}_2} (\Delta \hat{\varphi}_{T12} - \Delta \hat{\varphi}_{y12}) + \frac{g_{\omega 2}}{k_2 \dot{D}_2} \hat{\omega}_2 + \right. \\ \left. + \frac{g_{\varphi 3}}{k_3 \dot{D}_3} (\Delta \hat{\varphi}_{T13} - \Delta \hat{\varphi}_{y13}) + \frac{g_{\omega 3}}{k_3 \dot{D}_3} \hat{\omega}_3 \right\}.$$

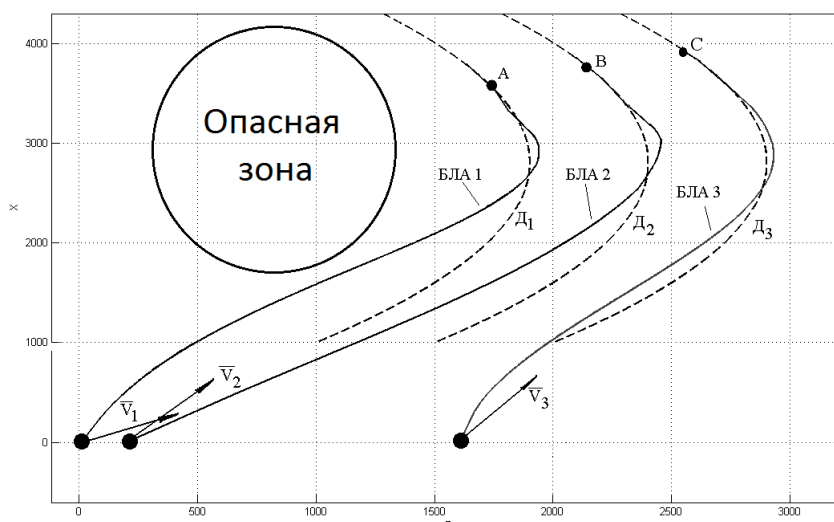


Рис. 1. Групповой полет БЛА по криволинейным траекториям.

Результаты исследования законов группового управления типа (16) при движении по сложным траекториям трех БЛА приведены на рис. 1, на котором показаны траектории полета группы при обходе опасной зоны. На этом рисунке пунктирные линии соответствуют требуемым траекториям, а сплошные – реализуемым.

4. Заключение

По итогам работы можно сделать следующие выводы:

- в общем случае, в систему группового управления с сетевым информационным обменом должны входить: оптимальные регуляторы, реализующие для каждого объекта сигналы управления (16); оптимальные фильтры, формирующие оценки \hat{x}_i и \hat{x}_j , $\Delta \hat{x}_{ij}$, $j = \overline{1, N}$, $j \neq i$, и система обмена оценками координат состояния каждого

объекта;

- синтезированный алгоритм коллективного управления обеспечивает адекватное управление группой как по линейным, так и по угловым координатам при минимальных вычислительных затратах, реализуя высокую безопасность совместного движения, в том числе и при использовании сложных траекторий;
- обмен ошибками $\Delta \hat{x}_{Tij}, \Delta \hat{x}_{yij}$ между объектами позволяет сохранять требуемую топологию в течение всего полета;
- отсутствие учета в (13) второго слагаемого может привести к столкновению БЛА в полете.

Следует отметить, что предложенный вариант группового управления на основе (16) обладает высокой универсальностью. На его основе, как частные случаи, можно реализовать и другие виды группового управления. При централизованном управлении достаточно использовать из (16) для каждого объекта слагаемые, заключенные в квадратные скобки. При использовании управления с лидером для него достаточно использовать слагаемые в квадратных скобках, в то время как для всех остальных – слагаемые в фигурных скобках.

В целом, проведенные исследования позволяют заключить, что рассмотренный алгоритм не накладывает принципиальных ограничений на возможность его реализации.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (18-08-01083а).