

УДК 62.50
ББК Ж 30

ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ С АДАПТИВНЫМ КОДИРОВАНИЕМ МЕЖДУ КВАДРОКОПТЕРАМИ В ФОРМАЦИИ¹

Амелин К. С.^{b,2}, **Андриевский Б. Р.**^{a,b,c,3}

Томашевич С. И.^{a,c,4} **Фрадков А. Л.**^{a,b,c,5}

(ФГБУН Институт проблем машиноведения РАН)^a;
(ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный
университет»)^b;

(Университет ИТМО, Санкт-Петербург)^c

Представлена и численно исследована процедура адаптивного кодирования для передачи данных между движущимися в формации квадрокоптерами. Идентификация параметров квадрокоптера выполнена обработкой экспериментальных данных, полученных по цифровому каналу связи с ограниченной пропускной способностью. Проведено сравнение полученных результатов с теоретическими. Продемонстрирована эффективность процедуры адаптивного кодирования.

Ключевые слова: кооперативное управление, управление через сети связи, передача данных, квадрокоптер, оценивание.

¹ Работа выполнена в ИПМаш РАН при поддержке РФФ (грант 14-29-00142).

² Константин Сергеевич Амелин, кандидат физико-математических наук, стажер-исследователь (konstantinamelin@gmail.com).

³ Борис Ростиславич Андриевский, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник (boris.andrievsky@gmail.com).

⁴ Станислав Игоревич Томашевич, аспирант, стажер-исследователь (tomashevich.stanislav@gmail.com).

⁵ Александр Львович Фрадков, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией (fradkov@mail.ru).

Введение

В последние десятилетия возрастающее внимание уделяется задачам управления формациями подвижных агентов, которые могут автономно взаимодействовать между собой и с окружающей средой для выполнения разнообразных задач, выходящих за рамки возможностей отдельного агента. Интерес к исследованию многоагентных формаций связан с широкой областью различных потенциальных приложений в таких направлениях, как мобильная робототехника на производстве, автоматизация дорожного движения, мониторинг окружающей среды беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), и других. Большое внимание, в частности, уделено разработке протоколов обеспечения консенсуса для кооперативного взаимодействия сетевых систем [1, 7, 11, 12, 33, 36, 37, 43–46, 49].

Так как многоагентная формация представляет собой систему взаимосвязанных динамических объектов, модель ее динамики имеет высокий порядок, и обеспечение устойчивости и качества работы системы в целом является, в общем случае, сложной задачей. Условия устойчивости формации, состоящей из агентов с линейной инвариантной по времени динамикой, могут быть существенно упрощены, если агенты обладают идентичными динамическими свойствами. Известный результат такого рода получен в [24], где анализ устойчивости многоагентной формации сведен к проверке условия устойчивости отдельного агента с учетом спектра матрицы Лапласа, описывающей граф передачи информации между агентами. Ограниченность данного результата состоит в указанных выше предположениях о линейности и идентичности моделей динамики образующих формацию агентов. В ряде работ представлены подходы, позволяющие ослабить эти ограничения. Например, в [10] получен частотный критерий консенсуса в многоагентных системах с *неизвестными нелинейными* связями. Считается, что связи удовлетворяют секторным неравенствам либо их многомерным аналогам, а топология сети может быть неизвестной и меняться с течением времени. Ав-

торы [6, 27] рассмотрели задачу *адаптивной синхронизации* для сетей взаимосвязанных динамических подсистем, представленных в форме Лурье (динамическая линейная часть со статической нелинейностью в обратной связи). Методом скоростного градиента [3] в работе синтезированы децентрализованные алгоритмы адаптивного управления. На основе метода пассивификации и леммы Якубовича–Калмана [9, 25] получены условия синхронизируемости сети. В [17] метод пассивификации используется для построения системы управления агентами, имеющими существенно различные динамические свойства (вследствие вариаций параметров) с быстродействующими адаптивными регуляторами, обеспечивающими близость динамики замкнутых обратной связью локальных систем управления в широкой области значений параметров агентов. Поскольку, благодаря адаптации, обеспечиваются предписанные динамические свойства образующих формацию подсистем, то раскрывается возможность применения указанного выше критерия работы [24].

1. Постановка задачи

Весьма существенную роль в сетевых системах управления играет характер обмена информацией между агентами, так как ограничения по объему информации, циркулирующей между агентами, могут существенно ухудшить динамику системы в целом и даже привести к потере устойчивости, см., например, [2, 31, 32, 38, 42, 47]. В течение последних десятилетий ограничения возможностей оценивания и управления, вызванные конечностью полосы пропускания канала связи, широко рассмотрены в литературе по теории управления, см., например, [2, 4, 18, 19, 30, 39, 42]. В частности показано, что стабилизация линейных систем через канал связи с ограниченной скоростью передачи данных возможна только если пропускная способность канала связи превосходит скорость возрастания энтропии в системе в окрестности состояния равновесия [39–41]. Показано, что в «идеальном» случае (отсутствие возмущений, помех и искажений данных в канале связи) изменением чувствительности

квантователя («зуминг», англ. *zooming*) можно обеспечить асимптотическую стабилизацию системы при квантовании данных по уровню и по времени [20,48]. В ряде других работ рассматривается процедура *адаптивного зуминга*, в которой чувствительность квантователя изменяется в зависимости от текущей скорости изменения передаваемого по каналу процесса [14, 15, 26, 28, 30].

В настоящей работе рассматривается задача исследования динамики процесса управления группой квадрокоптеров, взаимодействующих через сеть связи с ограниченной пропускной способностью и при наличии обратных связей между агентами.

Статья организована следующим образом. В разделе 2 описано экспериментальное оборудование – группа квадрокоптеров с модулями обмена информацией. Для идентификации параметров модели квадрокоптера в разделе 3 используются экспериментальные данные, обработка которых выполнена методом наименьших квадратов. Результаты параметрической идентификации на основе полученных через канал связи данных приведены в разделе 4. Раздел 5 посвящен синтезу локального регулятора для управления высотой полета квадрокоптера. Протокол кодирования-декодирования данных при передаче по цифровому каналу связи описан в разделе 6. Результаты численного исследования поведения группы квадрокоптеров при квантовании данных в канале связи представлены в разделе 7. Заключительные замечания и направления дальнейших исследований приведены в разделе 8.

2. Экспериментальный комплекс «КвадРой»

Для реализации различных алгоритмов управления, идентификации, обмена данными и проведения экспериментальных исследований в ИПМаш РАН разработан исследовательский экспериментальный комплекс «КвадРой» (*QuadRoy*).

2.1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ КОМПЛЕКСА

Комплекс «КвадРой» содержит пять ультра-легких БПЛА – квадрокоптеров. Каждый квадрокоптер оборудован автопилотом

Ardupilot Mega 2.6,⁶ включающим инерциальную измерительную систему (ИИС) и *GPS*-приемник сигналов спутниковой навигации. Автопилот *Ardupilot Mega 2.6* построен на интегральных микросхемах *Atmel ATMEGA 2560*, имеет восемь входов и выходов для сигналов с широтно-импульсной модуляцией, три порта универсальной асинхронной приемо-передачи (*UART*), встроенный переходник *USB-FTDI*, восемь аналоговых входов, 4 Мб флеш-памяти для записи телеметрических данных. ИИС содержит блок *Invensense 6 DoF Accelerometer/Gyro MPU-6000* акселерометров и гироскопов, барометр *MS5611-01BA03* и четыре сонара *MB1260 XL-MaxSonar-EZL0*. Корпусом квадрокоптера служит рамка *DJI 450* с радиальными лучами 450 мм в диаметре. На конце каждого из четырех лучей установлен бесколлекторный двигатель с внешним ротором и контроллером. Основные характеристики квадрокоптера: скорость полета: 0–10 км/ч; мощность моторов: по 250 Вт; емкость источника питания – 2600 или 4000 мА·час (в зависимости от выбранной конфигурации). Фотография двух квадрокоптеров представлена на рис. 1.



Рис. 1. Фотография двух квадрокоптеров комплекса «КвадРой»

Для обмена данными между квадрокоптерами и оператором, а также взаимного обмена данными между квадрокоптерами, ис-

⁶ Подробные сведения об автопилоте можно найти на сайте <http://copter.ardupilot.com/>.

пользуются специализированные модули связи – *XBee*-модемы. *XBee* и *XBee-PRO* модули предназначены для работы в стандарте *IEEE 802.15.4* и имеют низкую стоимость, малое энергопотребление и обеспечивают беспроводное сетевое взаимодействие. Дальность передачи на открытой местности составляет до 1000 м. Скорость передачи – до 250 бит/с. Эти устройства используют интерфейс *UART* на основе *RS-232*. Дополнительно на квадрокоптерах размещены микрокомпьютеры *Raspberry Pi B+*, так что модули *XBee* подключены к *Raspberry Pi B+*, которые, в свою очередь, передают данные автопилоту *Arduino Mega*.

2.2. МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ КВАДРОКОПТЕРА

В литературе имеется большое число публикаций, в которых приводятся уравнения динамики квадрокоптера, например в [13, 21–23, 34]. В данной работе использована следующая модель динамики, полученная из уравнений Эйлера–Лагранжа в предположениях что конструкция квадрокоптера (включая рамку и лучи) жесткая, симметричная относительно вертикальной оси, центр масс лежит в начале связанной системы координат, а изгибом конструкции можно пренебречь:

$$(1) \quad \begin{cases} I_x \ddot{\gamma} = (I_y - I_z) \dot{\psi} \dot{\vartheta} + T_\gamma(t), \\ I_y \ddot{\vartheta} = (I_z - I_x) \dot{\psi} \dot{\gamma} + T_\vartheta(t), \\ I_z \ddot{\psi} = (I_x - I_y) \dot{\vartheta} \dot{\gamma} + T_\psi(t), \\ m \ddot{x} = (\sin \psi \cdot \sin \gamma + \cos \psi \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \gamma) F(t), \\ m \ddot{y} = \cos \vartheta \cdot \cos \gamma \cdot F(t) - mg, \\ m \ddot{z} = (\sin \psi \cdot \sin \vartheta \cos \gamma - \cos \psi \cdot \sin \gamma) F(t), \end{cases}$$

где γ, ϑ, ψ – углы Эйлера (крена, тангажа и рыскания соответственно); (x, y, z) – координаты центра масс квадрокоптера в нормальной Земной системе координат; I_x, I_y, I_z – моменты инерции квадрокоптера относительно осей связанной системы координат; $T_\gamma(t), T_\vartheta(t), T_\psi(t)$ – моменты внешних сил, действующих на квадрокоптер; m – его масса; g – ускорение свободного падения. Через $F(t)$ обозначена приложенная к квадрокоптеру сила

тяги, которая вычисляется как сумма

$$(2) \quad F(t) = f_1(t) + f_2(t) + f_3(t) + f_4(t),$$

где $f_i(t)$, $i = 1, \dots, 4$, – силы, приложенные со стороны вращающихся пропеллеров. Эти силы зависят от скорости вращения роторов и поведения воздушного потока вблизи квадрокоптера.

В данной работе рассматривается движение квадрокоптера по высоте $y(t)$ в предположении, что он ориентирован горизонтально. Поэтому углы γ , ϑ в (1) считаются нулевыми, а угол рыскания ψ не существен. Отсюда получаем следующую модель изолированного вертикального движения:

$$(3) \quad m\ddot{y} = F(t) - mg.$$

Уточним модель (3), учтя взаимодействие между вращающимися лопастями и окружающим воздухом. Это взаимодействие имеет сложный характер [34, 35]. Основываясь на работе [34] мы далее предполагаем, что это взаимодействие в вертикальном движении может быть представлено моделью вязкого трения. Тогда вместо (3) используем модель вида

$$(4) \quad m\ddot{y}(t) + K_{\dot{y}}\dot{y}(t) = K_{\Omega} \sum_{i=1}^4 \Omega_i(t) - mg,$$

в которой Ω_i ($i = 1, \dots, 4$) обозначают угловые скорости вращения пропеллеров, $K_{\dot{y}}$ – коэффициент вязкого трения, а параметр K_{Ω} может быть назван *коэффициентом эффективности пропеллеров*.

Далее, с учетом предположения о полете квадрокоптера без наклонов, считаем что $\Omega_1(t) = \dots = \Omega_4(t)$. Временно пренебрегая динамикой электродвигателей (которые обладают малой инерционностью по сравнению с самим квадрокоптером), получим следующую модель динамики вертикального движения:

$$(5) \quad \ddot{y}(t) + K\dot{y}(t) = K_u U_y(t) - g,$$

где $U_y = \sum_{i=1}^4 U_i$ – сигнал управления по высоте (сумма напряжений U_i , приложенных к двигателям), K , K_u приведенные параметры модели. Значения K , K_u зависят от многих факторов, и их сложно вычислить непосредственно. Для нахождения их значений используем идентификацию на основе обработки экспериментальных данных.

3. Идентификация параметров по результатам экспериментов

Значения высоты $y(t_k)$, вертикальной скорости $\dot{y}(t_k)$, ускорения $\ddot{y}(t_k)$ и сигнала управления $U_z(t_k)$ получены экспериментально с помощью бортовых датчиков автопилота в тестовом полете для дискретных моментов времени t_k , $t_k = kT_0$, $k = 0, 1, \dots, N$, N – число измерений, $T_0 = 0,01$ с – интервал квантования, и сохранены в памяти бортового компьютера в виде соответствующих массивов данных. К этим данным применена процедура идентификации по методу наименьших квадратов [8]. Для этого модель динамики (5) приведена к следующему уравнению регрессии:

$$(6) \quad \Phi\Theta = Y,$$

где $Y = [\dot{y}(1), \ddot{y}(2), \dots, \ddot{y}(N)]$, а матрица Φ имеет вид

$$(7) \quad \Phi = \begin{bmatrix} U_y(1) & 1 & \dot{y}(1) \\ U_y(2) & 1 & \dot{y}(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ U_y(k) & 1 & \dot{y}(N) \end{bmatrix},$$

где $k = 0, 1, \dots, N$, Θ – вектор неизвестных параметров модели. Исходя из (6), вектор Θ можно вычислить псевдообращением: $\Theta = \Phi^\dagger Y$, где Φ^\dagger – матрица, псевдообратная к Φ .

Применением описанной процедуры к результатам $N = 600$ измерений с интервалом $T_0 = 0,1$ с получены следующие оценки параметров модели (5): $\hat{K}_u = 0,021$ [м/(с²В)], $\hat{g} = 9,6$ [м/с²], $\hat{K} = 0,293$ [м/с], в результате чего (5) численно принимает вид

$$(8) \quad \ddot{y} + 0,293\dot{y} = 0,021U_y - 9,6.$$

Как видно из (8), оценка ускорения свободного падения $\hat{g} = 9,6 \text{ м/с}^2$ получилась близкой к его истинному значению, что косвенно свидетельствует о приемлемой точности полученных оценок.

4. Параметрическая идентификация при передаче данных по каналу связи

Рассмотрим теперь идентификацию параметров модели квадрокоптера на компьютере оператора в процессе полета по данным измерений, передаваемых через аппаратуру связи. В данном эксперименте квадрокоптер, как и ранее, управлялся оператором в ручном режиме, поэтому сигнал управления двигателями измерялся непосредственно на наземном оборудовании. Для осуществления идентификации требуются значения высоты полета $y(t)$, которая измеряется бортовыми датчиками. Данных с датчиков передавались по каналу связи через *XVee* модемы со скоростью $R = 250$ бит/с, а затем применялась процедура идентификации, описанная в разделе 3. В результате выполнения идентификации в течение 40 с полета численно получено следующее уравнение модели:

$$(9) \quad \ddot{y} + 0,267\dot{y} = 0,022U_y - 9,78.$$

Как видно, коэффициенты в (9) несколько отличаются от приведенных в (8), что может свидетельствовать о некотором искажении оценок при передаче данных с ограниченной пропускной способностью канала связи.

Чтобы проиллюстрировать полученные численные результаты, приведем графики измеренной высоты полета квадрокоптера вместе с графиками, полученными интегрированием уравнений (8), (9) при одном и том же управляющем сигнале и одинаковых (взятых из экспериментальных данных) начальных условиях. Графики представлены на рис. 2. Сплошной линией показан график «истинной» (измеренной по данным *GPS*) высоты полета, пунктирная линия получена по модели (8), штрих-пунктирная – по модели (9). С точки зрения авторов, обе модели демонстрируют достаточную для практики точность идентификации пара-

метров. Следует заметить, что процессы практически совпадают в течение 15 с от начального момента. Дальнейшее отклонение процессов естественно вследствие накопления ошибок в разомкнутом (по выходу) контуре.

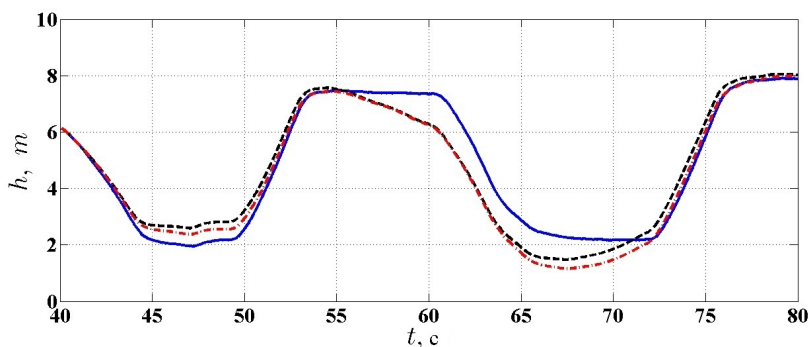


Рис. 2. Графики процессов изменения высоты полета. Сплошная линия – результат измерений, пунктирная линия – вычисление по модели (8), штрих-пунктирная – вычисление по модели (9)

Более детальная информация об отклонении выходов моделей (8), (9) и реальной высоты полета представлена на рис. 3, а об отклонениях процессов между выходами моделей (8) и (9) – на рис. 4. Видно, что в первом случае за первые 15 с ошибка по модулю не превосходит 0,75 м, т.е. 12 % от изменения высоты полета, а во втором – не превосходит 5 %.

5. Синтез алгоритма управления высотой полета

Предполагая, что динамика двигателя описывается моделью аperiодического звена первого порядка с малой постоянной времени $\tau = 0,05 s$

$$(10) \quad W_s(s) = \frac{1}{\tau s + 1},$$

используем следующий пропорционально-дифференциальный (ПД) регулятор в контуре управления вертикальной скоростью

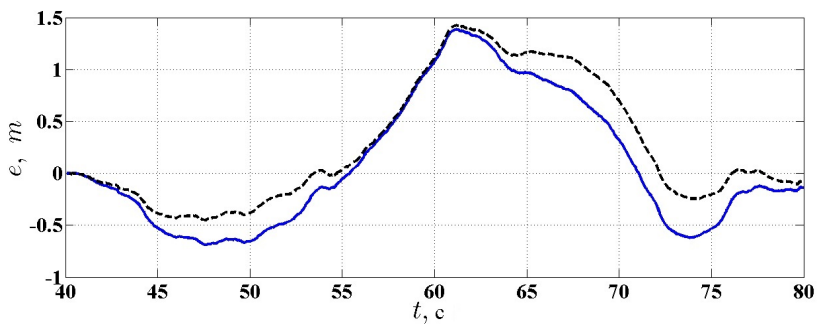


Рис. 3. Графики отклонений выходов моделей (8), (9) от реальной высоты полета

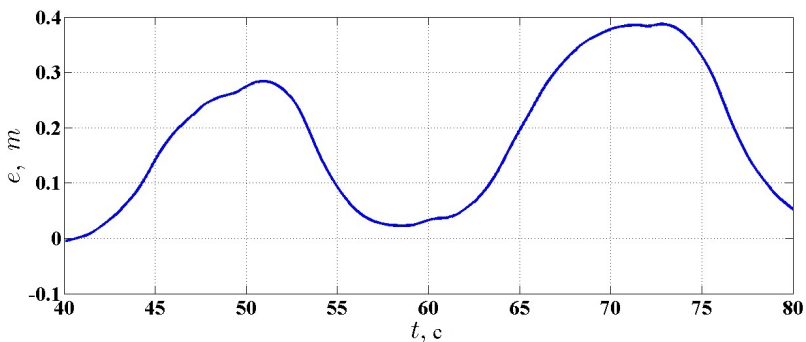


Рис. 4. График отклонений выходов моделей (8) и (9)

полета:

$$(11) \quad W_{PI}(s) = \frac{K_I}{s} + K_P = \frac{K_I(T_1s + 1)}{s},$$

где K_I, K_P – коэффициенты при интегральной и пропорциональной составляющих сигнала ошибки соответственно; постоянная времени $T_1 = K_P/K_I$.

Основываясь на изложенной в [5] методике, выберем $T_1 = K^{-1} = 3,41$ с. Тогда передаточная функция разомкнутой системы принимает вид

$$(12) \quad W(s) = \frac{K_I K_0}{s(0,05s + 1)},$$

где $K_0 = 0,071$. Теперь выберем K_I так, чтобы выполнить следующее условие (см. [5]):

$$(13) \quad K_I K_0 \tau \leq \frac{M^2 + M\sqrt{M^2 - 1}}{2},$$

где M – показатель колебательности (H_∞ -индекс), который рекомендуется устанавливать в диапазоне $M = 1,1-1,4$ [5]. Выберем $M = 1,2$. Тогда получим

$$(14) \quad K_I \leq 315.$$

Положим $K_I = 16$ с, откуда следует $K_P = K_I T_1 = 54,6$ и найденный ПИ-регулятор (11) имеет передаточную функцию

$$(15) \quad W_{PI}(s) = 54,58 + \frac{16}{s}.$$

Из-за наличия в контуре управления инерционного звена (10), передаточная функция разомкнутой системы принимает вид

$$(16) \quad W_a(s) = \frac{13,6s + 4}{s(s^3 + 20,3s^2 + 28,6s + 6,7)}.$$

6. Процедура кодирования-декодирования данных при передаче по каналу связи

В настоящей работе используется метод *адаптивного* изменения диапазона кодирования в зависимости от текущих данных. Этот метод, первоначально предложенный для кодера без памяти (статического квантователя) в [29], был далее развит для динамических кодеров (кодеры с памятью) [14, 15, 26, 28, 30]. Приведем его краткое описание.

Пусть $\sigma[k]$ – скалярный сигнал, подлежащий передаче по цифровому каналу связи в дискретные моменты времени $t_k = kT$, $k = 0, 1, \dots$ – номер такта передачи данных, $T_0 > 0$ – *интервал дискретности*. Используем следующий *бинарный статический квантователь*

$$(17) \quad q(\sigma, M) = M \operatorname{sign}(\sigma),$$

где параметр M можно назвать *диапазоном квантования*. Выход квантователя

$$(18) \quad \bar{\sigma}[k] = q(\sigma[k], M[k])$$

представляется *однобитовым символом выходного алфавита* и передается по каналу связи. (Тем самым скорость передачи данных по каналу R составляет $1/T$ бит/с.)

Параметр $M[k]$ изменяется согласно следующей процедуре *адаптивного зуминга*:

$$(19) \quad \begin{aligned} \lambda[k] &= (\bar{\sigma}[k] + \bar{\sigma}[k - 1] + \bar{\sigma}[k - 2])/3, \\ M[k + 1] &= m + \begin{cases} \rho M[k], & \text{если } |\lambda[k]| \leq 0,5, \\ M[k]/\rho & \text{иначе,} \end{cases} \\ \lambda[0] &= 0, \quad M[0] = M_0, \end{aligned}$$

где M_0 – начальное значение $M[k]$.

Процедура кодирования-декодирования *полного порядка* использует *встроенный наблюдатель*, построенный по модели источника (генератора) передаваемого сигнала. Основываясь на [16] используем следующую «кинематическую» модель источника:

$$(20) \quad \zeta[k + 1] = A\zeta[k], \quad \xi[k] = C\zeta[k], \quad k = 0, 1, \dots,$$

где $\zeta[k] \in \mathbb{R}^2$ – вектор состояния источника, а матрицы A , C имеют вид: $A = \begin{bmatrix} 1 & T_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, $C = [1, 0]$.

В дискретном времени наблюдатель для (20) описывается уравнениями:

$$(21) \quad \begin{cases} \hat{\zeta}_1[k+1] = \hat{\zeta}_1[k] + T_0 \hat{\zeta}_2[k] + l_1 \bar{\xi}[k], \\ \hat{\zeta}_2[k+1] = \hat{\zeta}_2[k] + l_2 \bar{\xi}[k], \end{cases}$$

где $\bar{\xi}[k] = q(\xi(t_k) - \hat{\xi}(t_k), M[k])$ – ошибка наблюдения; $\hat{\zeta}_2[k]$ – оценка скорости изменения $\zeta(t)$ в дискретные моменты времени $t_k = kT, k = 0, 1, \dots$; l_1, l_2 – компоненты вектора коэффициентов наблюдателя L . В силу наблюдаемости пары A, C , надлежащим выбором L можно обеспечить любое заданное расположение полюсов матрицы $A - LC$.

Окончательно, алгоритм кодирования с двоичным адаптивным кодером с памятью описывается выражениями (18), (19), (21).

7. Результаты численного исследования динамики формации квадрокоптеров с передачей данных по цифровому каналу

Обратимся теперь к вопросу устойчивости формации квадрокоптеров, динамика каждого из которых описывается передаточной функцией (16). С этой целью применим частотный критерий устойчивости формации работы [24]. В качестве примера рассмотрим граф информационных связей, представленный на рис. 5. Стрелками на графе показаны направления от источника к приемнику информации. Отобразим на комплексной плоскости кривую Найквиста для передаточной функции (16). Как видно из рис. 6, кривая Найквиста при изменении частоты ω от 0 до бесконечности *не охватывает* ни одно из собственных чисел лапласиана для графа связей рис. 5, что свидетельствует об устойчивости формации.

Исследуем теперь влияние процедуры кодирования-декодирования из раздела 6 на поведение формации. Сигнал, поступающий от лидера, квадрокоптера «1» (в рассматриваемом

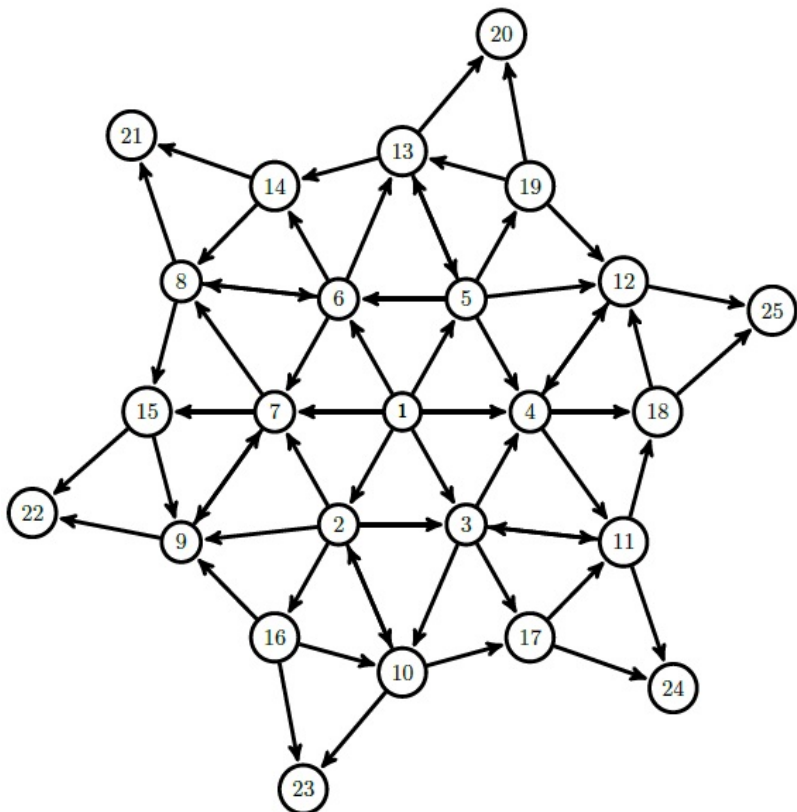


Рис. 5. Граф информационных связей формации из 25 квадрокоптеров

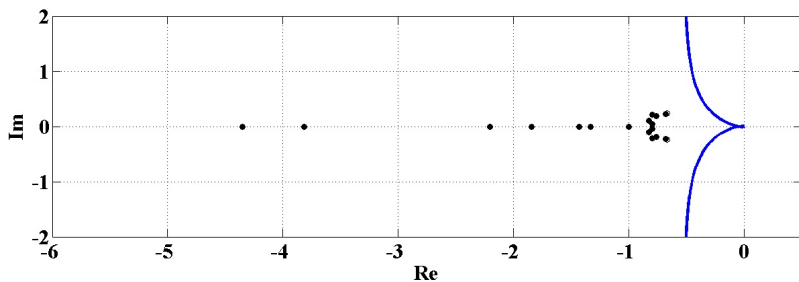


Рис. 6. Кривая Найквиста и собственные числа лапласиана графа информационных связей

случае это высота его полета) кодируется и передается по цифровому каналу связи ведомыми квадрокоптерами, которые обрабатывают этот сигнал, как задающее воздействие. Это соответствует координированному (по высоте) движению группы. Результаты моделирования для скорости передачи данных по каждому каналу $R = 20$ бит/с представлены на рис. 7–8.

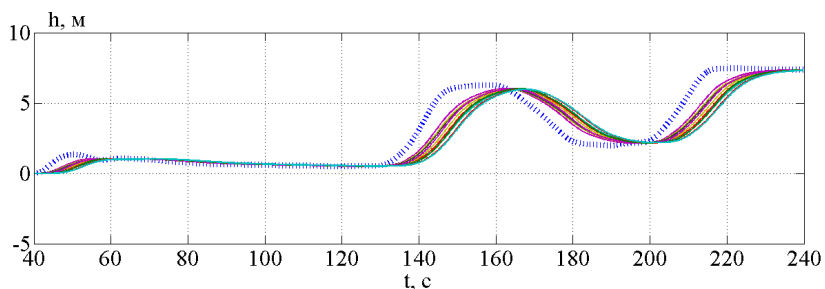


Рис. 7. Отслеживание высоты полета лидера группой квадрокоптеров. Высота полета лидера – пунктирная кривая

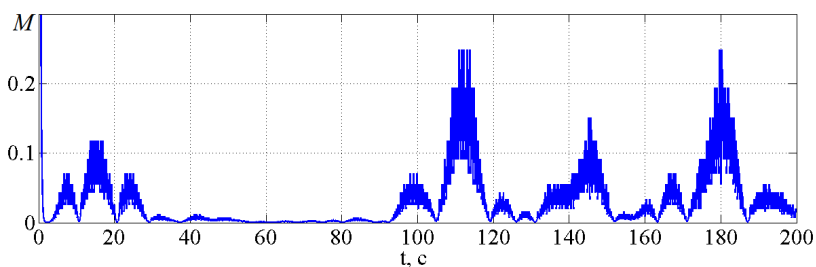


Рис. 8. Адаптивное изменение диапазона кодирования $M[k]$ в канале связи между квадрокоптерами «1» (лидер) и «2» (ведомый)

Работа адаптивного кодера иллюстрируется рис. 8, где в качестве примера показано изменение диапазона кодирования $M[k]$ в канале связи между квадрокоптерами «1» (лидер) и «2» (ведомый). Как видно из графика, диапазон кодирования возрастает на участках с относительно высоким темпом изменения передаваем-

мого сигнала, обеспечивая отслеживание его на стороне приемника, и убывает при медленном изменении сигнала, что позволяет повысить точность передачи.

Рис. 9, 10 позволяют сравнить влияние скорости передачи данных по каналу (в битах в секунду) на точность их воспроизведения декодирующим устройством. В качестве примера рассмотрена связь от агента «12» к агенту «25». Видно, что ошибка передачи пренебрежимо мала при $R = 20$ бит/с (рис. 9) и составляет доли метра при $R = 10$ бит/с (рис. 10). Поскольку модули *XBee* позволяют передавать данные со скоростью до $R_{XB} = 250$ бит/с, то для рассматриваемого класса систем указанный диапазон не является ограничительным.

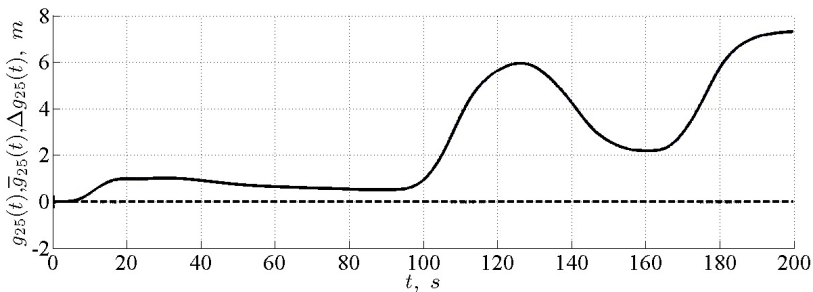


Рис. 9. Вход кодера, выход декодера и ошибка передачи при $R = 20$ bit/s

Согласно результатам работ [14, 15, 26], ошибка передачи данных обратно пропорциональна скорости передачи данных по каналу в битах в секунду R до определенного «порогового» значения, ниже которого она скачком возрастает и процесс передачи данных разрушается. Численно этот результат подтверждается рис. 11, где показана среднеквадратическая ошибка передачи данных от агента «12» к агенту «25» в зависимости от скорости передачи R . Составляющая ошибки процесса слежения, вызванная ошибкой передачи данных $\sigma_{\Delta h}$ в зависимости от R , показана на рис. 12. Данный график получен сравнением результатов моделирования движения ведомого квадрокоптера при точной («с

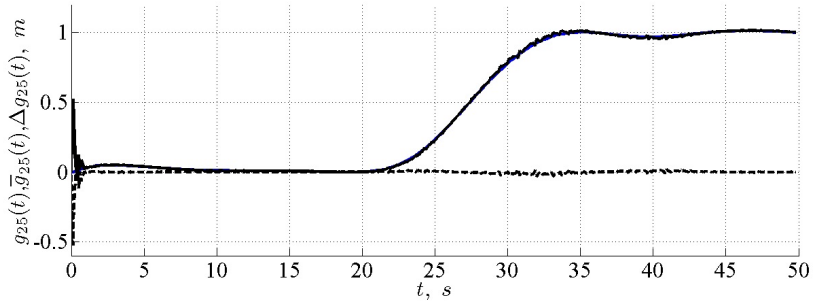


Рис. 10. Вход кодера, выход декодера и ошибка передачи при $R = 0 \text{ bit/s}$.

бесконечной полосой пропускания») передаче данных от ведущего квадрокоптера с движением ведомого при передаче данных через канал связи. Как видно из рисунка, этой величиной можно пренебречь во всем рассмотренном диапазоне R , что говорит о том, что для рассмотренных систем при разумном темпе передачи данных информационные ограничения не являются определяющими.

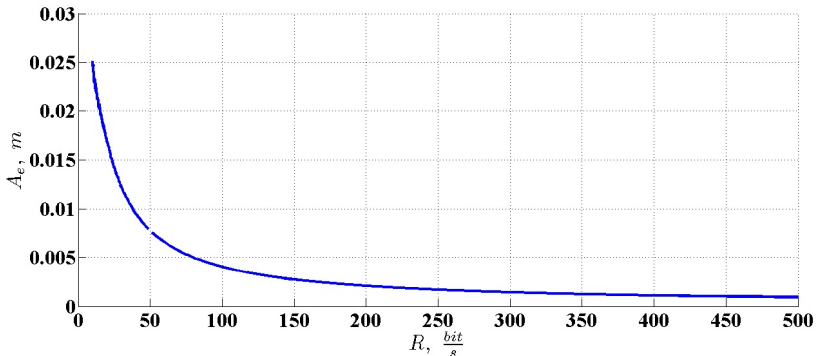


Рис. 11. Среднеквадратическая ошибка $\sigma_{\Delta h, tr}$ передачи данных от агента «12» к агенту «25» в зависимости от R

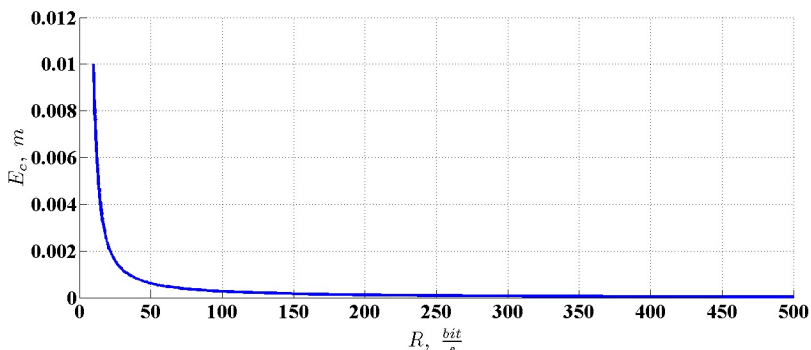


Рис. 12. Среднеквадратическая ошибка $\sigma_{\Delta h}$ отслеживания высоты полета h агентом «25», вызванная кодированием, в зависимости от R

8. Заключение

В статье приведены результаты исследования влияния процесса квантования данных по времени и по уровню на точность передачи данных между квадрокоптерами, движущимися в формации, а также составляющих ошибок слежения за требуемым положением, обусловленных квантованием. Проведена идентификация параметров движения по высоте для экспериментального квадрокоптера комплекса «КвадРой» при хранении результатов испытаний в памяти компьютера, а также при их передаче по цифровому каналу связи. Описана процедура адаптивного кодирования-декодирования данных с динамическим кодером второго порядка и продемонстрирована ее результативность при нестационарности передаваемых сигналов.

В дальнейшем планируется: реализовать адаптивные алгоритмы кодирования-декодирования данных на бортовой аппаратуре квадрокоптеров и провести полетные испытания по исследованию точности и динамики движения формации из четырех квадрокоптеров от пропускной способности канала связи; провести теоретические и экспериментальные исследования по влиянию искажений и потерь данных в каналах связи на характери-

стики движения квадрокоптеров в формации; исследовать возможность применения адаптивных локальных регуляторов для устранения параметрической неопределенности в модели динамики квадрокоптеров.

Литература

1. АМЕЛИНА Н. О. *Мультиагентные технологии, адаптация, самоорганизация, достижение консенсуса* // Стохаст. оптимизация в информатике. – 2011. – Т. 7, №1. – С. 149–185.
2. АНДРИЕВСКИЙ Б. Р., МАТВЕЕВ А. С., ФРАДКОВ А. Л. *Управление и оценивание при информационных ограничениях: к единой теории управления, вычислений и связи* // Автоматика и телемаханика. – 2010. – Т. 4. – С. 34–99.
3. АНДРИЕВСКИЙ Б. Р., СТОЦКИЙ А. А., ФРАДКОВ А. Л. *Алгоритмы скоростного градиента в задачах управления и адаптации* // Автоматика и телемаханика. – 1988. – Т. 12. – С. 3–39.
4. АНДРИЕВСКИЙ Б. Р., ФРАДКОВ А. Л. *Управление и наблюдение через каналы связи с ограниченной пропускной способностью* // Гироскопия и навигация. – 2009. – №4(67). – С. 103–114.
5. БЕСЕКЕРСКИЙ В. А., ПОПОВ Е. П. *Теория систем автоматического управления*. – СПб.: Профессия, 2003. – 752 с. Изд. 4-е, перераб. и доп.
6. ДЖУНУСОВ И. А., ФРАДКОВ А. Л. *Адаптивная синхронизация сети взаимосвязанных нелинейных систем Лурье* // Автоматика и телемаханика. – 2009. – Т. 7. – С. 111–126.
7. ДЖУНУСОВ И. А., ФРАДКОВ А. Л. *Синхронизация в сетях линейных агентов с обратными связями по выходам* // Автоматика и телемеханика. – 2011. – Т. 8. – С. 41–52.

8. ЛЬЮНГ Л. *Идентификация систем. Теория для пользователя.* – М.: Наука, 1991. – 432 с.
9. *Нелинейные системы. Частотные и матричные неравенства* / Под ред. А.Х. Гелига, Г.А. Леонова, А.Л. Фрадкова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 608 с.
10. ПРОСКУРНИКОВ А.В. *Частотные критерии консенсуса в многоагентных системах с нелинейными секторными связями* // Автоматика и телемахаика. – 2014. – №11. – С. 110–126.
11. ФУРТАТ И.Б. *Консенсусное управление линейной динамической сетью по выходу с компенсацией возмущений* // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. – №4. – С. 12–18.
12. ABDALLAH C., TANNER H. *Complex networked control systems: Introduction to the special section* // IEEE Control Syst. Mag. – 2007. – Vol. 27, No. 4. – P. 3–32.
13. ALTUG E., OSTROWSKI J., MAHONY R. *Control of a quadrotor helicopter using visual feedback* // Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. – Washington, DC, USA: IEEE Press, 2002. – May. – P. 72–76.
14. ANDRIEVSKY B. *Adaptive coding for transmission of position information over the limited-band communication channel* // Proc. 9th IFAC Workshop Adaptation and Learning in Control and Signal Processing (ALCOSP'2007). – Saint Petersburg: IFAC, 2007. – URL: www.ifac-paperonline.net/Detailed/30266.html.
15. ANDRIEVSKY B., FRADKOV A., PEAUCELLE D. *State estimation over the limited-band communication channel for pitch motion control of LAAS Helicopter benchmark* // Proc. 17th IFAC Symp. Aut. Contr. Aerospace (ACA'2007), Toulouse, France. – IFAC, 2007. – URL: <http://www.ifac-paperonline.net/Detailed/38673.html>.
16. ANDRIEVSKY B., FRADKOV A. L. *Adaptive Coding for Maneuvering UAV Tracking Over the Digital Communication*

- Channel* // Proc. 6th Int. Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT 2014). – St. Petersburg, Russia: IEEE Press, 2014. – October 6–8. – P. 325–330.
17. ANDRIEVSKY B., TOMASHEVICH S. *Passification based signal-parametric adaptive controller for agents in formation* // IFAC-PapersOnLine. – 2015. – Vol. 48, No. 11. – P. 222–226.
 18. BAZZI L., MITTER S. *Encoding complexity versus minimum distance* // IEEE Trans. Inform. Theory. – 2005. – Vol. 51, No. 6. – P. 2103–2112.
 19. BONDARKO V. *Stabilization of linear systems via a two-way channel under information constraints* // Cybernetics and Physics. – 2014. – Vol. 3, No. 4. – P. 157–160.
 20. BROCKETT R., LIBERZON D. *Quantized feedback stabilization of linear systems* // IEEE Trans. Automat. Contr. – 2000. – Vol. 45, No. 7. – P. 1279–1289.
 21. CASTILLO G. P., LOZANO R., DZUL A. E. *Modelling and Control of Mini-Flying Machines. Series: Advances in Industrial Control*. – Springer-Verlag Ltd., 2005.
 22. DAS A., SUBBARAO K., LEWIS F. *Dynamic Inversion of Quadrotor with Zero-Dynamics Stabilization* // Proc. 17th IEEE Int. Conf. on Control Applications, Part of 2008 IEEE Multi-conference on Systems and Control (MSC 2008). – San Antonio, USA: IEEE Press, 2008. – September 3–5.
 23. FANTONI I., LOZANO R. *Non-linear Control for Underactuated Mechanical Systems. Series: Communications and Control Engineering* / Ed. by E. Sontag, M. Thoma. – London: Springer-Verlag Ltd., 2002.
 24. FAX J., MURRAY R. *Information Flow and Cooperative Control of Vehicle Formations* // IEEE Trans. Automat. Contr. – 2004. – Vol. 8. – P. 1465–1476.
 25. FRADKOV A. *Passification of Nonsquare Linear Systems and Yakubovich-Kalman-Popov Lemma* // Eur. J. Control. – 2003. – Vol. 6. – P. 573–582.

26. FRADKOV A., ANDRIEVSKY B., PEAUCELLE D. *Estimation and control under information constraints for LAAS helicopter benchmark* // IEEE Trans. Contr. Syst. Technol. – 2010. – Vol. 18, No. 5. – P. 1180–1187.
27. FRADKOV A., JUNUSSOV I. *Synchronization of Networks of Linear Systems by Static Output Feedback* // Proc. 50th IEEE Conf. Dec. Contr. (CDC 2011). – Orlando: 2011. – P. 8188–8192.
28. GOMEZ-ESTERN F., CANUDAS DE WIT C., RUBIO F. *Adaptive delta modulation in networked controlled systems with bounded disturbances* // IEEE Trans. Automat. Contr. – 2011. – Vol. 56, No. 1. – P. 129–134.
29. GOODMAN D., GERSHO A. *Theory of an adaptive quantizer* // IEEE Trans. Commun. – 1974. – Vol. COM-22, No. 8. – P. 1037–1045.
30. GOODWIN G., LAU K., CEA M. *Control with communication constraints* // Proc. 12th Int. Conf. on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV 2012). – Guangzhou, PRC: IEEE, 2012. – P. 1–10.
31. GOODWIN G., HAIMOVICH H., QUEVEDO D., WELSH J. *A moving horizon approach to networked control system design* // IEEE Trans. Automat. Contr. – 2004. – Vol. 49, No. 9. – P. 1427–1445.
32. ISHII H., FRANCIS B. *Limited Data Rate in Control Systems With Networks*. – New York: Springer-Verlag, 2002. – 180 p.
33. JADBABAIE A., LIN J., MORSE A. S. *Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbour rules* // IEEE Trans. Automat. Contr. – 2003. – Vol. 48. – P. 988–1001.
34. JANUSZ W. C., CZYBA R., SZAFRAŃSKI G. *Model identification and data fusion for the purpose of the altitude control of the VTOL aerial robot* // Proc. 2nd IFAC Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED-UAS 2013). – Compiegne, France: IFAC, 2013. – P. 263–269.

35. LEISHMAN J. *Principles of Helicopter Aerodynamics*. 2nd ed. – New York: Cambridge University Press, 2006. – 864 p.
36. LEONARD N. E., FIORELLI E. *Virtual leaders, artificial potentials, and coordinated control of groups* // Proc. 40th IEEE Conf. Decision and Control (CDC 2001). – 2001. – P. 2968–2973.
37. LI Z., REN W., LIU X., FU M. *Distributed containment control of multi-agent systems with general linear dynamics in the presence of multiple leaders* // Int. J. Robust and Nonlinear Control. – 2013. – Vol. 23. – P. 534–547.
38. MATVEEV A., SAVKIN A. *Estimation and Control over Communication Networks*. – Boston: Birkhäuser, 2009. – 533 p.
39. NAIR G., EVANS R., MAREELS I., MORAN W. *Topological feedback entropy and nonlinear stabilization* // IEEE Trans. Automat. Contr. – 2004. – Vol. 49, No. 9. – P. 1585–1597.
40. NAIR G., EVANS R. *Exponential stabilisability of finite-dimensional linear systems with limited data rates* // Automatica. – 2003. – Vol. 39. – P. 585–593.
41. NAIR G., EVANS R., CAINES P. *Stabilising decentralised linear systems under data rate constraints* // Proc. 43rd IEEE Conference on Decision and Control. – Atlantis, Paradise Island, Bahamas: 2004. – P. 3992–3997.
42. NAIR G., FAGNANI F., ZAMPIERI S., EVANS R. *Feedback control under data rate constraints: an overview* // Proc. IEEE. – 2007. – Vol. 95, No. 1. – P. 108–137.
43. NI W., CHENG D. *Leader-following consensus of multi-agent systems under fixed and switching topologies* // Systems & Control Letters. – 2010. – Vol. 59, No. 3–4. – P. 209–217.
44. OLFATI-SABER R., FAX J. A., MURRAY R. M. *Consensus and cooperation in network multi-agent system* // Proceedings of the IEEE. – 2007. – Vol. 95. – P. 215–233.
45. PORFIRI M., ROBERSON D., STILWELL D. *Tracking and formation control of multiple autonomous agents: A two-level consensus approach* // Automatica. – 2007. – Vol. 43, No. 8. –

- P. 1318–1328.
46. REN W., BEARD R. W. *Distributed consensus in multi-vehicle cooperative control*. – London: Springer-Verlag, 2008. – 319 p.
 47. SAVKIN A., CHENG T. *Detectability and output feedback stabilizability of nonlinear networked control systems* // IEEE Trans. Automat. Contr. – 2007. – Vol. 52, No. 4. – P. 730–735.
 48. TATIKONDA S., MITTER S. *Control under communication constraints* // IEEE Trans. Automat. Contr. – 2004. – Vol. 49, No. 7. – P. 1056–1068.
 49. WU Z., GUAN Z., WU X., LI T. *Consensus Based Formation Control and Trajectory Tracing of Multi-Agent Robot Systems* // J. Intelligent and Robotic Systems. – 2007. – Vol. 48, No. 3. – P. 397–410.

DATA EXCHANGE WITH ADAPTIVE CODING BETWEEN QUADROTORS IN THE FORMATION

Konstantin Amelin, Saint Petersburg State University, Cand. Sci.,
Research Assistant (konstantinamelin@gmail.com).

Boris Andrievsky, Institute for Problems of Mechanical
Engineering of the RAS, Saint Petersburg, Doctor of Science,
Leading Research Fellow (boris.andrievsky@gmail.com).

Stanislav Tomashevich, ITMO University, Saint Petersburg, PhD
student, Research Assistant (tomashevich.stanislav@gmail.com).

Alexander L. Fradkov, Institute for Problems of Mechanical
Engineering of the RAS, Saint Petersburg, Doctor of Science,
Professor, Head of the Lab (fradkov@mail.ru).

Abstract: In this paper we study the control dynamics of a group of quadrotors interacting over a network with limited bandwidth and with feedbacks between agents. We investigate how the quantization process affects the accuracy of the data transfer between the quadrotors moving in formation. The parameters of altitude tracking for quadrotor "QuadSwarm" was experimentally identified based on two datasets: first where data records were stored onboard and second where data were transmitted via digital communication link. The adaptive coding procedure with second-order dynamical encoder is presented and numerically studied. The results obtained are compared with the theoretical predictions. The experiments showed the efficacy of the adaptive coding procedure in the case when the transmitted signals are nonstationary.

Keywords: cooperative control, control over communication networks, data transmission, quadrotor, estimation.

Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии П.В. Пакшиным.

Поступила в редакцию 17.11.2015.

Дата опубликования 31.07.2016.