

Семантическое сжатие информации мониторинга группой беспилотных летательных аппаратов

Аннотация. На примере аппаратуры дистанционного мониторинга поверхности Земли и окружающей атмосферы группой беспилотных летательных аппаратов (БЛА) с различными информационными каналами показана возможность и целесообразность семантического сжатия информации путем фильтрации ее по приоритетам важности и достоверности. Предлагается решить задачу сокращения передаваемой информации от измерительной части к наблюдателю на основе семантической продукционной модели.

Ключевые слова: мониторинг морской акватории, групповое использование беспилотных летательных аппаратов, многоканальная обработка информации, семантическое сжатие информации.

Введение

Рассматриваемый комплекс аппаратуры дистанционного наблюдения беспилотными аппаратами состоит из трех основных частей: измерительная (сенсорная), аппаратура линии связи и судовой программно-аппаратный комплекс (ПАК) автоматической или чаще автоматизированной обработки информации. С помощью ПАК на автоматизированных рабочих местах (АРМ) работают люди-операторы, решающие разнообразные задачи [1-9].

По мере увеличения объема получаемой информации и скорости ее обновления (увеличение зоны наблюдения, увеличение разрешающей способности и динамического диапазона измеряемых сигналов, использование одновременно датчиков различной физической природы и т.д.) пропускная способность линии связи не позволяет передавать всю информацию, получаемую датчиками.

Первичная информация, получаемая датчиками различной физической природы, представляется как относительное значение некоторой физической величины U , изменяющейся в координатах, например, X , Y , Z наблюдаемой площади или объема. Величиной U может быть интенсивность эхо-сигнала для активных оптических и радиолокационных датчиков, интен-

сивность теплового излучения или отражения дневного света и т.д.

Максимальный мгновенный объем информации M_k , получаемый одним датчиком, определяется мгновенным полем зрения $X_{ПЗ}$, $Y_{ПЗ}$, $Z_{ПЗ}$ датчика, максимальным значением наблюдаемого сигнала U_H и разрешающей способностью ΔX , ΔY , ΔZ и ΔU , т.е.

$$M_k = (X_{ПЗ} Y_{ПЗ} Z_{ПЗ} U_H) / (\Delta X \Delta Y \Delta Z \Delta U).$$

Объем информации, получаемый в одну секунду K датчиками с частотой обновления F_k

$$M_T = \sum_{k=1}^K M_k \cdot F_k.$$

Величина M_T для современных и перспективных комплексов аппаратуры наблюдения может достигать значений 10^{10} – 10^{12} байт и обновляться с частотой десятков и даже сотен Герц.

Информацию по одному признаку измеряемой физической величины можно представить как монохромное плоское или объемное изображение в зоне наблюдения. Если датчики измеряют не один, а три признака сигнала (например, интенсивность, длительность и поляризацию эхо сигнала) информацию можно представить в виде цветного RGB плоского или объемного изображения. Для сжатия подобной графической информации разработаны и разра-

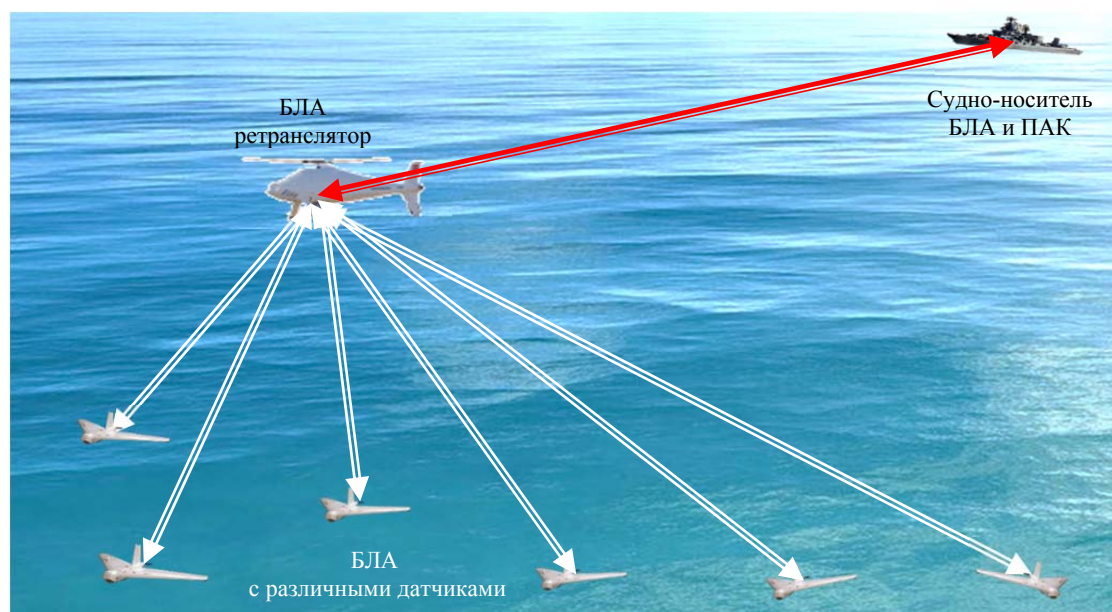


Рис. 1. Схема совместного мониторинга водной поверхности группой БЛА

батываются алгоритмические приемы, позволяющие с допустимой потерей качества изображения на порядок, а в некоторых случаях и более, снизить объем передаваемой информации. Хорошим примером служит популярный графический формат JPEG.

Другими техническими приемами сжатия передаваемой информации являются алгоритмы, получившие название программно-математическое обеспечение (ПМО) телеконференции. Здесь необходимо в один канал передачи и приема телевизионного изображения разместить 2–3 и более прямо-передающих каналов, работающих в реальном масштабе времени. В этом случае для передачи выбираются фрагменты кадров, в которых происходят изменения. Такие алгоритмические приемы позволяют поднять ещё на порядок практическую пропускную способность канала связи, или увеличить фактическую скорость передачи информации.

Если все известные алгоритмические приемы сжатия информации не удовлетворяют разработчиков комплексов аппаратуры наблюдения и канал связи не может пропускать информацию датчиков в реальном масштабе времени, остается возможность оперативного запоминания получаемой информации в измерительной части, и после окончания сеанса наблюдения транслировать ее с допустимой скоростью в ПАК. Такой путь исключает возможность непрерывного наблюдения и вносит

существенное запаздывание в получении результатов наблюдения, поэтому может иметь ограниченное применение.

Задача дистанционного наблюдения с атмосферным каналом связи осложняется тем, что передаваемая информация подвержена искажению под влиянием помех естественного и искусственного происхождения. Эта трудность преодолевается за счет сужения полосы пропускания канала связи, кодирования и повторения сообщений. Для каждого комплекса наблюдения выбирается пропускная способность канала, обеспечивающая помехозащищенную передачу необходимой информации. Таким образом, наблюдается тенденция увеличения объема и скорости обновления получаемой информации с одной стороны и ограничения пропускной способности линии связи, с другой.

Необходимость сжатия информации обостряется при мониторинге поверхности Земли группой БЛА (Рис.1). Естественным выходом из этого противоречия, является передача не первичной информации датчиков, а обработанной до уровня, необходимого потребителю. Например, потребителя не интересуют флуктуации перепадов плотности или прозрачности атмосферы, но очень интересует угроза тайфуна. Потребителя не интересуют уровни и другие признаки эхо-сигналов, но интересует наличие судна-нарушителя в запретной зоне.

Формально такой путь означает полную автоматизацию обработки результатов наблюде-

ний на месте размещения датчиков-измерителей. При наличии соответствующего ПМО современные вычислительные средства позволили бы в ряде случаев решить эту задачу. Однако отработка программно-математического обеспечения таких многофункциональных наблюдательных комплексов – сложная и длительная работа, требующая, особенно на первых этапах, постоянного вмешательства оператора.

Предлагается решить задачу сокращения передаваемой информации от измерительной части на пост наблюдения на основе семантической продукционной модели, как одного из вариантов системы с искусственным интеллектом [10-13].

Важно отметить, что выносимые решения являются многокритериальными и носят вероятностный характер. Предлагается решать задачу сокращения передаваемой информации от измерительной части на пост наблюдения на основе семантического отбора, где исходная информация датчиков физических полей проходит несколько этапов обработки в реальном масштабе времени с целью оперативного и качественного решения задач мониторинга.

1. Семантическая продукционная модель комплекса аппаратуры дистанционного наблюдения

Продукционная модель комплекса дистанционного наблюдения содержит следующие основные части [10]:

$$I; Q; P; A \Rightarrow B; N,$$

где: I – имя информационных данных, с помощью которого данная продукция выделяется из всего множества продукций; в рассматриваемой задаче на конечном этапе – это имя аномального явления (пожар, наводнение, концентрация вредного вещества и т.д.) и (или) измеряемого параметра с его числовой оценкой;

Q – признак значимости продукции: разложение получаемой информации по назначению – чрезвычайное происшествие (природное или техногенное), охрана, экология, научные исследования и т.д.);

P – условие применимости ядра продукции; когда P принимает истинное значение, ядро активизируется;

$A \Rightarrow B$ – ядро, основной элемент продукции, правило принятия решения о наличии продукции и ее числовой оценки; A показывает условия (детерминированные или стохастические), при которых возможно совершить действие B ; для рассматриваемой задачи B – условие целесообразности последующей обработки и комплексирования некоторой определенной части информации с информацией других каналов или передачи оператору.

Элементы N описывают постусловия продукции. Они активизируются только в том случае, если ядро продукции реализовалось. Постусловия описывают действия и процедуры, которые необходимо выполнить после реализации B .

В памяти аппаратуры БЛА и ретранслятора хранится набор наименований продукции. Они образуют систему продукции. В этой системе заданы процедуры управления продуктами (приоритеты, временные и количественные ограничения), с помощью которых происходит выбор для выполнения той или иной продукции из числа активизированных.

2. Система семантического сжатия передаваемой информации многоканального измерителя одного БЛА

Каждый из каналов, особенно использующих различные физические принципы индикации объектов мониторинга, имеет свои особенности обработки сигналов, оценку шумов, фона, признаков обнаружения и распознавания наблюдаемых объектов, свою тактовую частоту обновления информации. Рассмотрим приведенную модель на примере структурной схемы обработки информации многоканального наблюдателя-измерителя (Рис. 2). В качестве примера, позволяющего привести решающие правила принятия решений и проиллюстрировать их численные оценки, используем бортовой лазерный локатор [1], как типовой локационный канал мониторинга.

На Рис. 2 обозначены: $1_k - 4_k$ – блоки обработки информации каждого $k[1:K]$ – канала одного БЛА, $5_{\text{БЛА}} - 6_{\text{БЛА}}$ – блоки объединения информации всех датчиков одного БЛА, $5_p - 6_p$ – блоки объединения информации всех $s[1:S]$ БЛА, размещенные на БЛА-ретрансляторе.

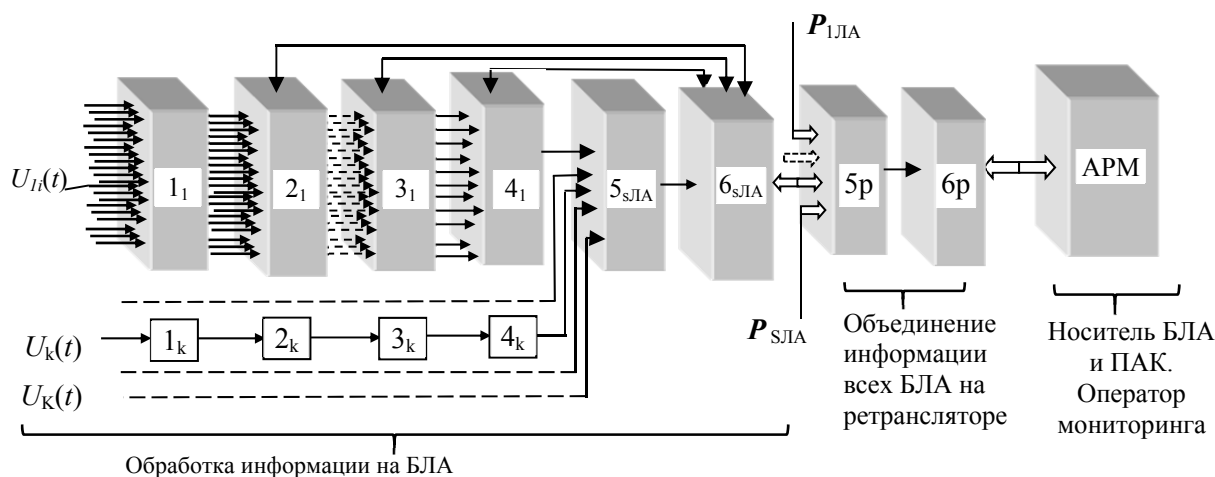


Рис. 2. Структурная схема обработки информации мониторинга

Блоки 1_k – преобразователи текущего значения физической величины в электрический сигнал $U_{ki}(t)$ каждого k -го канала. Это приемные устройства оптического или электромагнитного излучения с каждого i -го элемента разрешения наблюдаемой зоны, в координатах оптической или антенной системы k -го канала, например, в полярных координатах $\psi_{ki}, \nu_{ki}, R_{ki}$ – углы и дистанция.

Здесь обнаружением является принятие решения о наличии или отсутствии сигнала $U_{ki}(t)$ для его дальнейшего анализа в каждом разрешаемом объеме зоны поиска. При обнаружении допустимы только два решения: «сигнал есть» или «сигнала нет».

В реальных условиях параметры принимаемых сигналов являются величинами случайными, значения которых изменяются под воздействием многочисленных факторов, таких как дальность до наблюдаемого элемента поверхности Земли или объекта, отражательные или излучательные особенности среды и объекта, движение БЛА и т.д.

Порог U_{Π} первичного обнаружения наблюдаемого сигнала $U_c = U_{ki}(t)$ на входе каждого канала в соответствии с критерием Неймана-Пирсона устанавливается из соотношения:

$$\int_{U_{\Pi}}^{\infty} w_u(U) dU = P_{\text{ЛТ}},$$

где $w_u(U)$ – плотность распределения амплитуды шума приемника, фона окружающей среды и подстилающей поверхности k -го канала.

Исходя из заданной величины $P_{\text{ЛТ}}$, которая для различных измерительных каналов изменя-

ется в пределах от 10^{-2} до 10^{-6} , значение U_{Π} выставляется автоматически путем подсчета числа шумовых выбросов, превосходящих порог обнаружения. В процессе мониторинга оператор может менять величину $P_{\text{ЛТ}}$, увеличивая ее при отсутствии сигналов обнаружения и уменьшая при превышении числа обнаружений, оказавшимися помехами по результатам последующей обработки в блоках 2 – 4.

Оперативной оценкой продукции этого этапа наблюдения – качества обнаружения сигнала является отношение U_c / U_{Π} . Она дополняется геометрическими координатами $\psi_{ki}, \nu_{ki}, R_{ki}$ и временем обнаружения t_{ki} .

Продукцией этого этапа мониторинга является определение числа элементов пространства в направлении зондирования, в которых наблюдается отраженный сигнал, превышающий порог обнаружения с заданной малой вероятностью ложной тревоги.

Информацией I_{1k} блока 1_k является факт обнаружения или не обнаружения отраженного сигнала в каждом элементе пространственного разрешения $i(\psi_{ki}, \nu_{ki}, R_{ki})$. Наличие высокого уровня сигнала обратного рассеяния и порога обнаружения являются информацией, свидетельствующей о низком уровне достоверности этого информационного датчика.

Условием P применимости информации I_{1k} блока 1_k является качество q_k : «хорошее», «нормальное» или «плохое». Например:

если $U_{\text{сop}}/U_{\Pi} \leq 3$ & $N_{\text{ш}} \leq 3$, то «хорошее», $q_k=2$;
если $U_{\text{сop}}/U_{\Pi} \leq 3$ & $N_{\text{ш}} \leq 20$ | $U_{\text{сop}}/U_{\Pi} \leq 20$ & $N_{\text{ш}} \leq 3$, то «нормальное», $q_k=1$;
если $U_{\text{сop}}/U_{\Pi} \geq 20$ | $N_{\text{ш}} \geq 20$, то «плохое», $q_k=0$,

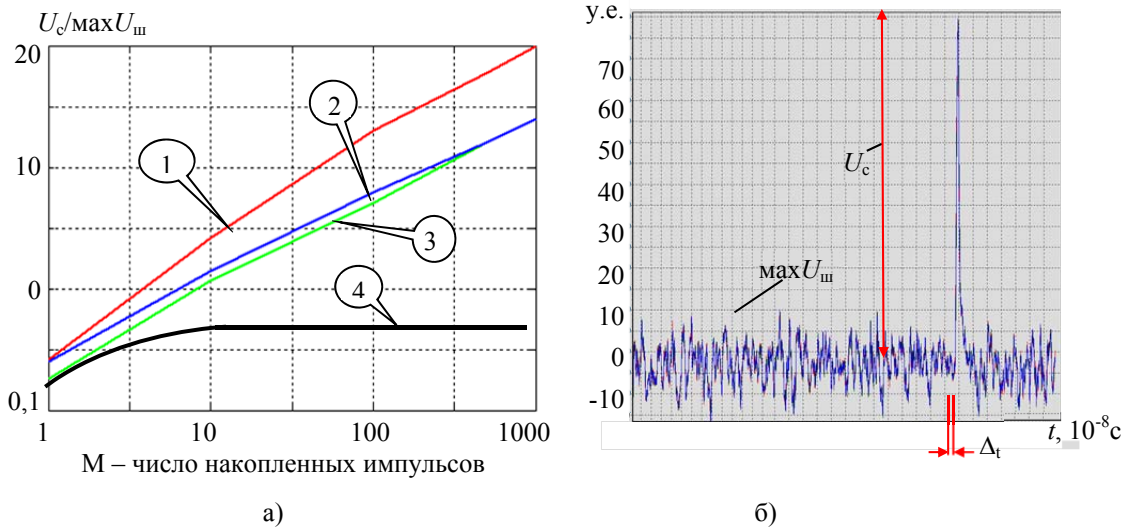


Рис. 3. Изменение отношения сигнал / шум от числа накапливаемых импульсов

где $U_{ср}$ – уровень сигнала обратного рассеяния, $U_{п}$ – порог обнаружения, $N_{ш}$ ($U_{ш}/U_{п}$) – число шумовых выбросов, превысивших порог обнаружения при одном зондирующем импульсе, $\&$, $|$ – знаки логического «и» и «или» соответственно. Значение q_k является составляющей Q_k – признака значимости продукции канала k .

При последующем этапе обработки сигналов в блоке 2_k решение о наличии сигнала и его классификационных признаках выносятся на основе наблюдения эхо-сигналов нескольких зондирующих сигналов с одного направления от соответствующих элементов разрешения по дистанции.

Блоки 2_k – накопители-сумматоры сигналов U_{kXYZi} в заданных координатах зоны наблюдения X, Y, Z (или географических координатах λ, φ, H). Важно отметить, что накопление информации целесообразно проводить для каждого элемента разрешения в заданных координатах зоны наблюдения, так как происходит изменение взаимного положения аппаратуры наблюдения и наблюдаемой зоны, что естественно для БЛА самолетного типа. Если сигнал от искомого объекта меньше уровня шумов приемника, используется накопление сигнала для повышения отношения сигнал/шум.

Собственный шум приемника можно наблюдать при закрытом объективе (антенне) приемника каждого k -го канала. С открытым объективом без включенного излучателя зондирующего сигнала шум приемника возрастает. Появляется постоянная составляющая шума и увеличивается диапазон изменения амплитуды

шумовых выбросов. При включении излучателя зондирующего сигнала шум на выходе приемника возрастает еще больше, что можно объяснить наличием отражений от неоднородной атмосферы, особенно при наличии в ней твердых и жидких фракций. Эти шумы имеют две составляющие, одна носит случайный характер, другая – систематический.

Для примера на Рис. 3, а показана зависимость изменения отношения сигнал / шум ($U_c / \max U_{ш}$) от числа накапливаемых импульсов отраженного сигнала, на фоне нормально распределенного белого шума $\sigma_{нкш}$ (коэффициент автокорреляции близок к 0), коррелированного шума $\sigma_{акш}$ (коэффициент автокорреляции близок к 1) и помехи $\sigma_{п}$ (электрические помехи по цепи электропитания, отражения от ближних слоев атмосферы и посторонних предметов) в полосе пропускания приемника с дискретностью измерения $\Delta_t = 66$ нс. За условную единицу (у.е.) измерения амплитуды шумовых выбросов и амплитуды сигнального импульса принято среднееквадратическое значение некоррелированного шума. Амплитуда накопленного сигнала U_c и максимальные значения шумовых выбросов $\max U_{ш}$ показаны на Рис. 3, б.

Накопление позволяет в статическом режиме наблюдения увеличить амплитуду сигнала пропорционально числу накопления M . При этом амплитуда шумов увеличивается примерно в $M^{0.5}$, что соответствует теории обнаружения сигналов на фоне шума [13].

Моделирование и экспериментальные исследования подтверждают, что накопление эф-

эффективно увеличивает отношение сигнал / шум для составляющих шума, некоррелированных с частотой излучения (белый шум и высокочастотный шум в полосе приемника с коэффициентом автокорреляции близким к 1).

Накопление неэффективно для увеличения отношения сигнал/шум, если значительной составляющей шума является сигнал помехи типа электрические наводки от работы силовых дискретных элементов по питанию, отражения от ближних слоев атмосферы и посторонних предметов. Эта шумовая составляющая синхронна с тактовой частотой зондирующих импульсов лазерного подсветчика. Для уменьшения влияния такой помехи целесообразно стробирование приемника по задержке относительно зондирующего сигнала, что затруднительно в условиях полуактивной локации.

Дополнительную трудность накопления создаёт движение цели, носителей излучателя и приёмника. Если скорость изменения суммарной дистанции от излучателя до цели и от цели до приемника V_{Σ} , время накопления $M/f_{\text{и}}$, длительность импульса $\tau_{\text{и}}$, то смещение отраженного сигнала по временной шкале приемника $V_{\Sigma}M/f_{\text{и}}c$, где c – скорость света, не должно быть больше $\tau_{\text{и}}$.

Максимально полезное число накопленных импульсов $M_{\text{max}} = \tau_{\text{и}} f_{\text{и}}c/V_{\Sigma}$. Например, при $V_{\Sigma} = 40$ м/с, $\tau_{\text{и}} = 10$ нс и $M_{\text{max}} > 375$ накопление не эффективно, при $\tau_{\text{и}} = 100$ нс, $M_{\text{max}} > 3750$. Эффективность накопления [при $U_{\Sigma} = \Sigma(U_1:U_m)$ эффективность 1] меняется от 1 до 0 при увеличении числа M от 1 до M_{max} . Если скорость V_{Σ} известна, то снижение эффективности накопления можно компенсировать, изменив частоту синхронизации приемного устройства на значение частоты Доплера $F_d = f_{\text{и}}V_{\Sigma}/c$.

Продукцией блока I_{2k} являются параметры (средние значения и дисперсия) отраженного сигнала: дистанция (время задержки отраженного сигнала относительно зондирующего), амплитуда, отношение сигнал / шум, форма (длительность по уровню 0,5, отношение длительности переднего и заднего фронтов), деполаризация (отношение, $U^{\perp} / U^{\parallel}$) и их изменение во времени (основная частота или ширина спектра флуктуации) численных значений этих признаков отраженного сигнала каждого обнаруженного объекта.

Координаты обнаруженных объектов как точечных целей из системы координат летательного аппарата (дальность до цели и углы визирования цели в вертикальной и горизонтальной плоскости БЛА) пересчитываются в стартовую систему координат (или географическую систему координат при мониторинге больших площадей, где необходимо учитывать кривизну земной поверхности).

Информация I_{2k} представляет $N2$ одномерных массивов Un , соответствующих $N2$ обнаруженным сигналам и $N1$ измеренным параметрам отраженного сигнала $Un[Dn, \vartheta_{\text{л}}, \psi_{\text{л}} n(1:N1)]$, где Dn – дистанция до отражающего элемента, $\vartheta_{\text{л}}, \psi_{\text{л}}$ – направление лазерного луча в вертикальной и горизонтальной плоскости, $n(1:N1)$ – численные значения измеренных параметров отраженного сигнала¹.

Прядок нумерации обнаруженных сигналов (сортировка) начинается с сигнала, полученного на меньшей дистанции, $Un(1)1$ – ближнего к БЛА, до $Un(N2)$ – дальнего от БЛА.

Измерение параметров наблюдаемых сигналов с одного направления не дает полного каталога признаков, используемых для распознавания (селекции и классификации) объектов.

Сильным классификационным признаком являются геометрические размеры наблюдаемых объектов. В нашем примере это требует для локатора с узким угловым полем зрения сканирования в пространстве, в результате чего обеспечивается возможность лучшего измерения геометрических размеров.

Блоки 3_k определяют признаки сигналов Un_{XYZi} для каждого элемента разрешения в заданных координатах. В простейшем случае - это пороговая обработка выделения полезного сигнала на фоне шума. В более сложных случаях - выделение вектора наблюдаемых признаков сигнала (амплитуда, длительность, их изменение во времени, дисперсия, частотный спектр и т.д.). Входные сигналы, обозначенные пунктирными стрелками, означают запаздывание и возможно меньшую частоту поступления, относительно входных сигналов предыдущего блока.

В блоке 3 заканчивается формирование вектора количественной оценки признаков обнаруженных объектов. Продукция этого блока I_{3k}

¹Число $N1$ признаков сигнала лазерного локатора может снизиться до 3 и увеличиться до 15, в зависимости от возможностей канала и целей мониторинга.

– правило объединения информации о численных значениях признаков, усредняя их по всем рядом стоящим элементам пространственного разрешения, в которых наблюдаются отраженные сигналы, превысившие порог обнаружения. Совокупность рядом расположенных элементов пространства, в которых обнаружен отраженный сигнал, или одиночный элемент, окруженный неотражающими элементами, принято называть обнаруженными объектами, обладающими рядом классификационных признаков и имеющими количественную оценку. Координаты обнаруженных объектов определяются по энергетическому или геометрическому центру отражений.

Выходная информация блока Z_k представляет $N3$ одномерных массивов U_n , соответствующая $N3$ обнаруженным объектам и $N1$, измеренным параметрам отраженного сигнала от объекта: $U3n[x_n, y_n, z_n, n(1:N1)]$, где x_n, y_n, z_n – координаты центра отражающих элементов объекта, $n(1:N1)$ – численные значения измеренных параметров отраженного сигнала от объекта.

В базе данных БЛА имеется каталог диапазона числовых значений параметров признаков сигналов, принадлежащих различным объектам мониторинга. Диапазон параметров признаков принадлежности наблюдаемого объекта к определенному классу определяется по различным критериям в зависимости от важности достижения цели мониторинга. В базе данных БЛА объекты располагаются по строкам в порядке важности их обнаружения для целей мониторинга. Схема каталога приведена в таблице, где по столбцам располагаются объекты в

порядке важности для целей мониторинга, а по строкам – интервалы параметров, измеряемых локатором признаков отраженных сигналов, принадлежащих объекту строки с заданной вероятностью, например, 0,9.

В рассматриваемом примере в блоке 4 используется процедура ступенчатой классификации. Сначала определяется класс каждого наблюдаемого из $N3$ объектов по геометрическому признаку (наиболее используемому для многих информационных каналов), например, $K1$ – «большие», $K2$ – «средние» и $K3$ – «малые». Затем среди объектов одного класса определяется тип объекта.

Решающее правило определения класса n -ого объекта:

если $L_{n2} < L_n < L_{n3} \mid S_{n2} < S_n < S_{n3}$, то $n(K1)$;

если $L_{n1} \leq L_n \leq L_{n2} \mid S_{n1} < S_n < S_{n2}$, то $n(K2)$;

если $0 < L_n < L_{n1} \mid 0 < S_n < S_{n1}$, то $n(K3)$,

где $L_{n1}=20$ м, $L_{n2}=50$ м, $L_{n3}=250$ м, $S_{n1}=200$ м², $S_{n2}=500$ м², $S_{n3}=3000$ м² – граничные значения длины и площади объектов трёх классов.

Как видно из таблицы в класс «большие» по признаку длина объекта $L=120$ м и площадь $S=1200$ м² попали 3 объекта: морское судно, дымовое образование и разлив нефтепродуктов на поверхности воды. Следующий геометрический признак H позволил однозначно выделить третий из них как нефтяное пятно.

Сравнение оставшихся двух объектов не позволили однозначно определить тип наблюдаемого объекта, пока не провели сравнение по коэффициенту деполяризации, где получен однозначный ответ, о принадлежности одного из двух наблюдаемых объектов к дымовому образованию.

Интервалы параметров, измеряемых локатором признаков отраженных сигналов, принадлежащих объекту мониторинга

№	Объекты	П1($L, \text{м}$)	П2($S, \text{м}^2$)	П3($H, \text{м}$)	П4($\sigma_A, \%$)	П5(σT)	П6(K_r)	...	П10($A^\perp/A^\parallel$)
1	Судно	100-250	1000-3000	10-20	0,1-0,3	0,05-0,2	0,3-0,4	-	0,1-0,2
2	Дымовое образование	50-150	500-1500	5-50	0,2-0,5	0,1-0,5	0,2-0,5	-	0,7-1
3	Разлив ГСМ	>50	>50	<1	0,2-0,4	0,1-0,2	0,3-0,4	-	0,1-0,2
:	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	Буксир	20-50	200-500	-	0,1-0,3	-	0,2-0,3	-	0-0,2
12	Разлив ГСМ	3-50	3-50	-	0,3-0,4	-	0,3-0,4	-	0,7-1
:	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	Надувн. плот	3-10	3-10	-	0,3-0,4	0,1-0,2	0,1-0,2	-	0-0,2
22	Шлюпка	3-5	3-5	-	0,3-0,4	0,1-0,2	0,1-0,2	-	0-0,2
23	«пловец»	<3	<3	-	0,4-0,6	-	-	-	-
:	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Классу средних объектов принадлежат 2 объекта, которые однозначно разделяются на «буксир» и «небольшое нефтяное пятно» по величине площади и коэффициенту деполяризации. В классе малых объектов по геометрическим размерам удастся выделить объект «пловец», а отделить шлюпку от надувного плота не удаётся, поскольку интервалы значений признаков совпадают или пересекаются. В частном случае, если измеренная площадь окажется в интервале $5 \text{ м}^2 < S < 10 \text{ м}^2$, то можно принять наблюдаемый объект за надувной плот.

В нашем примере номер объекта совпадает с важностью передачи факта его обнаружения и координат его местонахождения. В зависимости от целей мониторинга при составлении полетного задания оператор устанавливает список приоритетов признаков в блоках 3 и 4, например, по вероятности принятия ошибочного решения.

Решающее правило определения группы $n(K1)$ -го объекта по признаку Π_i , имеющему по каталогу значения в интервале от Π_{i1} до Π_{i2} :

если $\Pi_{i1} \leq \Pi(K1, \Pi_i) \leq \Pi_{i2}$, то $n(K1, 1)$,
иначе $n(K1, 0)$.

Для каждого объекта путем перебора по строкам, составляется матрица попаданий значений признаков в интервал объекта строки сравнения: попадание – 1, не попадание – 0. Строка с полным числом попаданий по всем столбцам определяет принадлежность n -ого к типу объекта классификатора. Таким образом, информация, сформированная в блоке 4, представляет собой массив из векторов, соответствующих числу обнаруженных $N3$ объектов и расположенных в порядке важности. Она является первой частью ядра A_k информации k -го канала:

$$U4n[N_{nk}, x_n, y_n, z_n, n(1:N2), q_k],$$

где N_{nk} – номер объекта по базе данных, соответствующий его значимости, малые номера соответствуют увеличению значимости объекта для задачи мониторинга; q_k – показатель качества продукции k -го канала, значение которого определено ранее в блоке 1.

Блок 4_к хранит информацию и пополняет ее по мере появления новых обнаруженных объектов. Он вырабатывает информацию, которая является продукцией верхнего уровня для измерительной части каждого k -ого канала. Содержащиеся здесь решающие правила являются ядром $A_k \Rightarrow B_k$.

В блок 5_{сЛА} из блока 4 передается сокращенный массив B_k из $N3$ векторов

$$S_k [N_{nk}, x_n, y_n, z_n, k, q_k], \quad (1)$$

формируемый из $U4n$ путем удаления информации признаков классификации, заменив их условным наименованием канала, соответствующим физическому принципу обнаружения.

Численно значимость продукции канала можно оценить показателем Q_k , например, соотношением $Q_k = q_k N_k / \sum(N_{nk})$, где q_k – оценка качества обнаружения, N_k – число обнаруженных объектов, $\sum(N_{nk})$ – сумма коэффициентов значимости (номеров в принятом примере) обнаруженных объектов.

В блок 5_{сЛА} поступает сформированная аналогично (1) информация каналов БЛА, использующих другие физические принципы обнаружения объектов, классификацию по другим признакам и другую оценку достоверности получаемой ими информации:

$$S_{k(1:K), n(1:Nk)} [N_{nk}, x_{nk}, y_{nk}, z_{nk}, k(1:K), q_k],$$

где $S_{k(1:K), n(1:Nk)} [\dots]$ – массив данных всех объектов, обнаруженных K каналами;

N_{nk} – номер по каталогу базы данных, присвоенный n -му объекту k -го канала;

x_{nk}, y_{nk}, z_{nk} – координаты n -го объекта k -го канала.

Для каждого канала используется своя база данных в части признаков и их параметров для классификации наблюдаемых объектов, но сохраняется порядок нумерации объектов в соответствии с их значимостью для целей мониторинга, установленный при составлении полетного задания. Последовательность может меняться оператором в процессе получения им результатов мониторинга или оперативного изменения задач мониторинга по указанию вышестоящего руководящего звена (операторы $Q(Q_1, Q_2, Q_3)$ на Рис. 4, где Q_1 – приоритетная последовательность объектов, установленная полетным заданием, Q_2 – оперативная корректировка приоритетной последовательности по результатам последовательности мониторинга, Q_3 – изменение параметров решающих правил в отдельных каналах по наблюдению текущих результатов мониторинга).

Блок 6_{сЛА} формирует пакет информации для передачи из главного уровня и более низких уровней, выбирая данные из блоков 4, 3, 2 и загружая ими пропускную способность канала

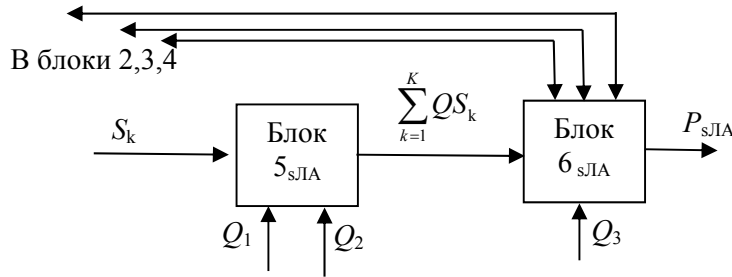


Рис. 4. Схема этапа отбора информации на ретрансляторе для передачи по линии связи

связи с ретранслятором. Таким образом, блоки $5_{с/ЛА}$ и $6_{с/ЛА}$ реализуют семантический отбор информации для передачи ретранслятору и далее возможно операторам. Они могут быть построены по принципу систем с искусственным интеллектом [11, 13]. Приведем один из возможных вариантов алгоритмов реализации блоков $5_{с/ЛА}$ и $6_{с/ЛА}$, схема которого приведена на Рис. 4.

При помощи оператора Q (Q_1, Q_2, Q_3) задается приоритетная последовательность всей возможной продукции I_m из общего их числа M . $Q_1 = [I_1 \dots I_m \dots I_M]$ устанавливает приоритет наименований продукции, $Q_2 = [k_1 \dots k_k \dots k_K]$ – определяет приоритет каналам получения информации, $Q_3 = [T_1 \dots T_m \dots T_M]$ – определяет интервалы времени T_m допустимой дискретности обновления данных. Последовательности Q_1 и Q_3 вводятся в постоянную память блока $5_{с/ЛА}$ и могут изменяться оператором по команде с поста управления. Начальная последовательность Q_2 также вводится оператором как среднестатистическая, а изменяется по информации достоверности каждого k -го канала. Например, при наличии значительной облачности или тумана нет доверия оптическим каналам, а при большом уровне радиотехнических помех снижается приоритет радиолокационного канала. Свою значимость в приоритете каждый канал корректирует автоматически, например, как показано ранее значением q_k или Q_k .

В соответствии с приоритетами Q_1 и Q_2 из $\sum_{k=1}^K S_k$ в блоке $5_{с/ЛА}$ формируется минимальная информация верхнего уровня о продукции измерителей $\sum_{k=1}^K Q S_k$ и направляется в блок $6_{с/ЛА}$.

Объединение информации всех каналов в блоке $5_{с/ЛА}$ происходит следующим образом.

Сортировка объектов по близости координат x_{nk}, y_{nk}, z_{nk} , например, по величине невязки:

$$\Delta_{ij} = |x_{nki}, y_{nki}, z_{nki}| - |x_{nkj}, y_{nkj}, z_{nkj}| < (\Delta_{ki} + \Delta_{kj}), \quad (2)$$

где Δ_{ij} – величина невязки, расстояние между векторами $[x_{nki}, y_{nki}, z_{nki}]$ и $[x_{nkj}, y_{nkj}, z_{nkj}]$ обнаруженных объектов; Δ_{ki}, Δ_{kj} – априорно известная ошибка определения координат обнаруженного объекта ki и kj каналов, введенная полетным заданием.

Если $\Delta_{ij} < (\Delta_{ki} + \Delta_{kj})$ & $N_{nki} = N_{nkj}$, то объект идентифицируется как один и присваивается индекс совпадения $c_{nk}=2$ и индекс качества q_k канала $ki | kj$, имеющего большее значение. Если $\Delta_{ij} < (\Delta_{ki} + \Delta_{kj})$ & $N_{nki} \neq N_{nkj}$, то объект идентифицируется как один и присваивается индекс совпадения $c_{nk}=1$ и индекс качества канала k с большим значением $q_k = \max(q_{ki}, q_{kj})$ и соответствующий ему номер объекта.

За счет близости координатной идентификации объектов, обнаруженных различными каналами, общее число обнаруженных объектов сокращается и принимает вид P_K – числа объектов обнаруженных одним БЛА с K информационными каналами.

$$P_K[N_{nk}, x_{nk}, y_{nk}, z_{nk}, k, q_{nk}, c_{nk}], \quad (3)$$

где N_{nk} – номер объекта, соответствующий заданной классификации важности объекта, $[x_{nk}, y_{nk}, z_{nk}]$ – координаты объекта, q_k и c_k – параметры, определяющие качество полученной информации.

Для исключения неопределенности в сортировке вводятся дополнительные решающие правила. Например, если число объектов, имеющих одинаковое значение N_{nk} – значимости для мониторинга, больше 1, то приоритет отдается объектам с большим числом c_{nk} , если более 2, то следующий приоритет – объектам с большим значением q_{nk} , и далее – объектам, расположенным на меньшей дистанции от БПЛА, далее – по близости к программному направлению полета.

Таким образом, в блоке $6_{\text{БЛА}}$ реализуется вторая фаза ядра $A_s \Rightarrow B_s$, и подготовка продукции P верхнего уровня БЛА. В нем происходит оценка требуемого времени для передачи информации верхнего уровня и сравнение ее с предоставленным ретранслятором временем для связи. Если число обнаруженных наименований и их параметры, представляющие верхний уровень значимости, больше пропускной способности канала связи, происходит ограничение путем исключения наименований продукции нижних уровней приоритетов.

Обнаружение одновременно в наблюдаемой зоне всеми K -измерителями всех $M_{\text{БД}}$ наименований продукции базы данных практически невозможно. Наиболее вероятная ситуация, когда в блок $6_{\text{БЛА}}$ поступает мало информации с одного или двух измерителей. В этом случае резерв пропускной способности канала связи заполняется информацией более низкого уровня с каналов, где активизировалось ядро $A_s \Rightarrow B_s$, т.е. с блоков 4, 3 и даже 2.

В случае отсутствия информации с блоков 4_k во всех каналах происходит последовательный съем информации и передача его по линии связи в ретранслятор с блоков 2 и 3 каждого k -го канала БЛА. Это происходит до тех пор, пока не активизируется ядро $A_s \Rightarrow B_s$ одного из каналов.

Таким образом, в блоке $6_{\text{БЛА}}$ реализуется последняя фаза ядра $A_s \Rightarrow B_s$ и окончательное формирование продукции $P_{\text{БЛА}}(t)$.

Элементы Q в блоке $6_{\text{БЛА}}$ описывают логику дальнейшего отбора информации после реализации последней фазы ядра $A_s \Rightarrow B_s$ (или его отсутствия за определенный период времени). Элементы Q могут корректировать приоритетную последовательность объектов и решающее правило отбора по командам с поста управления по результатам приема и оценки оператором продукции $P(t)$.

Отбор информации в ретрансляторе аналогичен отбору многоканальной информации на каждом БЛА. В блоке $5p$ происходит сортировка обнаруженных объектов всеми БЛА по приоритетам, установленных полетным заданием каждому БЛА аналогично (1). Отметим, задача существенно упрощается, когда приоритетная последовательность объектов одна для всех БЛА, как ранее она была одна для всех информационных каналов одного БЛА. Разные БЛА могут наблюдать один объект, что обнаруживается достаточной близостью координат (2) ме-

стонахождения. В этом случае объединение происходит с увеличением индекса s и принятия № объекта и q_k наибольшими из двух объединяемых $P_{\text{БЛА}}$.

В блоке $6p$ все массивы информации, поступившие со всех БЛА и отсортированные в блоке $5p$, оцениваются по объему памяти, занимаемой каждым объектом из массива:

$$P_{(1:S), (1:K), (1:N4)} [N_{\text{nks}}, x_{\text{nks}}, y_{\text{nks}}, z_{\text{nks}}, k_s, q_{\text{nks}}, c_{\text{nks}}, M_{\text{nks}}], \quad (4)$$

где N_{nks} – номер объекта, соответствующий заданной классификации важности объекта; $[x_{\text{nks}}, y_{\text{nks}}, z_{\text{nks}}]$ – координаты объекта; q_{nks} и c_{nks} – параметры, определяющие качество полученной информации; k_s – тип канала обнаружения; M_{nks} – объем информации единичного объекта, необходимый для передачи оператору.

Если в период, допустимый для мониторинга в реальном масштабе времени, канал связи может передать максимальный объем информации M_t , и $\sum M_{\text{nks}}[1:S, 1:K, 1:N4] > M_t$ то блок $6p$ передает целое число сообщений из массива (4) с минимальными значениями N_{nks} .

При помощи оператора Q_3 можно изменить правило отбора сообщений, например, следить за самыми малыми обнаруженными объектами на водной поверхности.

Заключение

Рассмотренный вариант семантического сжатия передаваемой информации можно трактовать как фильтрацию или отбор информации по приоритетам ценности информации и достоверности, которые априори закладывает оператор при составлении полетного задания БЛА. На основании анализа получаемой информации оператор может быстро изменять маршрут движения БЛА, особенно, если в группе работают БЛА с различным набором информационных каналов. Это позволяет наблюдать обнаруженный объект с разных ракурсов сенсорами, обладающими различными физическими принципами индикации, что существенно повышает качество мониторинга [15-19].

Практически линия связи оперативно загружается наиболее полезной информацией. Семантическое сжатие позволяет снизить объем передаваемой информации, облегчив работу линии связи и людей-операторов дистанционного наблюдения. При отсутствии обнаружения приоритетных и других значимых объектов ПАК

накапливает статистический материал по наблюдаемому фону поверхности и окружающей среды, что позволяет оптимизировать не только пороги обнаружения, решающие правила для селекции и классификации наблюдения объектов.

Комплексы мониторинга поверхности Земли создаются как многофункциональные, направленные на решение различных хозяйственных и транспортных задач, включая обеспечение жизнедеятельности в арктической зоне. Это требует пополнения и уточнения базы данных информационных признаков и их статистических характеристик для большого числа новых объектов и явлений природного и техногенного характера, использования активных и пассивных, оптических и радиоканалов в широком спектре частот. Для комплексирования их информации необходима разработка оптимальных решающих правил, направленных на достоверное решение задач мониторинга. Для каждой конкретной задачи мониторинга имеющимися в наличии информационными каналами БЛА и для различных внешних условий среды необходима разработка оптимальных алгоритмов отбора информации, что является предметом дальнейших исследований авторов.

Литература

1. Шаров С.Н. Локационные управляющие системы беспилотных летательных аппаратов. – СПб.: БГТУ «Военмех». 2009. – 312 с.
2. Tomashevich Stanislav, Andrievsky Boris. Stability and Performance of Networked Control of Quadcopters Formation Flight. 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 2014. pp. 338-342.
3. Zheng Y., Li S., Qiu H. Networked coordination-based distributed model predictive control for large-scale system," I IEEE Trans. Contr.Syst. Technol., vol. 21, no. 3, 2013. pp. 991–998.
4. Xiaofeng W., Hovakimyan N. Distributed control of uncertain networked systems: A decoupled design," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 58, no. 10, 2013. pp. 2536–2549.
5. Fradkov B., Peaucelle D. Estimation and control under information constraints for LAAS helicopter benchmark, IEEE Trans. Contr. Syst. Technol., vol. 18, no. 5, 2010. pp. 1180–1187.
6. Fax J., Murray R. Information flow and cooperative control of vehicle formations, IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 8, 2004. pp. 1465–1476.
7. Maza F., Caballero J., Capitan J. R., Martinez de Dios, Ollero A. A distributed architecture for a robotic platform with aerial sensor transportation and self-deployment capabilities, J. Field Robotics, vol. 28, no. 3, 2011. pp. 303–328.
8. Frew E. Combining area patrol, perimeter surveillance, and target tracking using ordered upwind methods, in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA '09), May 2009, pp. 3123–3128.
9. Acevedo J., Arrue B., Maza I. Cooperative perimeter surveillance using aerial robots and fixed ground stations, in Proc. 2nd IFAC Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED-UAS). Compiegne, France: IFAC, 2013, pp. 330–336.
10. Нариньяни А. С., Яхно Т. Г. Продукционные системы // Представление знаний в человеко-машинных и робототехнических системах. – М.: ВЦ АН СССР, ВИНТИ, 1984. – С. 136–177.
11. Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений. – М.: Логос, 2000. – 300 с.
12. Толмачев С.Г. Системы искусственного интеллекта. Нейросетевые модели. – СПб.: БГТУ «Военмех». 2011. – 132 с.
13. Шаров С.Н., Толмачев С.Г. Семантическое сжатие в системах мониторинга движением судов. XIII МНТК Кибернетика и высокие технологии XXI века. Воронеж, 2012, том 1. – С. 42 – 51.
14. Skolnik M.I. Radar handbook. Third Edition. The McGraw-Hill Companies. 2008. – 1352c.
15. Ailon, Arogeti S. Formation control strategies for autonomous quadrotor-type helicopters, in Proc. 2nd IFAC Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED-UAS). Compiegne, France: IFAC, 2013, pp. 324–329.
16. Ren W., Beard R. W. Trajectory Tracking for Unmanned Air Vehicles With Velocity and Heading Rate Constraints // IEEE Trans. Control Systems Technol. 2004. V. 12 (5). pp. 706–716.
17. Sasongko R.A., Sembiring J., Muhammad H., Mulyanto T. Path Following System of Small Unmanned Autonomous Vehicle for Surveillance Application // Proc. 8th Asian Control Conference (ASCC), 2011, Kaohsiung, Taiwan, May 15-18, 2011. P. 1259–1264.
18. Andrievsky B.R., Sharov S.N. Technological Ways for Ensuring of Unmanned Aerial Vehicle on a Ship. //World Maritime Technology Conference, WMTTC2012, May 29 – June 1, 2012, Saint-Petersburg, Russia. – С. 97 (RUS.pdf, 21c).
19. Chitsaz Hamidreza LaValle Steven M. Time-optimal paths for a Dubins airplane [Conference] // Decision and Control, 2007 46th IEEE Conference on. - 2007. - pp. 2379 - 2384.

Шаров Сергей Николаевич. Главный научный сотрудник ОАО «Концерн «Гранит-Электрон», профессор Балтийского государственного технического университета (ВОЕНМЕХ) им. Д.Ф. Устинова. Окончил ВОЕНМЕХ в 1962 году. Доктор технических наук. Автор более 300 печатных работ, 100 изобретений и 18 книг. Область научных интересов: системный анализ; нелинейные системы автоматического управления; системы с переменной структурой; нелинейные фильтры; информационные каналы и управление беспилотными летательными аппаратами. E-mail: cri-granit@peterlink.ru

Толмачев Сергей Геннадьевич. Начальник научно-исследовательской лаборатории ОАО «Концерн «Гранит-Электрон», доцент Балтийского государственного технического университета (ВОЕНМЕХ) им. Д.Ф. Устинова. Окончил Ленинградский электротехнический институт им. В.И. Ульянова (Ленина) в 1980 г. Кандидат технических наук. Автор более 50 печатных работ и трех книг. Область научных интересов: системный анализ, системы автоматического управления, искусственный интеллект и принятие решений. E-mail: cri-granit@peterlink.ru