

**Отчет по проекту РНФ № 22-69-00231 «Принципы
функционирования беспроводных нодальных сейсмических
систем под управлением группы беспилотных воздушных
средств на труднодоступных территориях со сложным
рельефом местности» за 2022 г.**

1 Анализ современного состояния исследований в области использования результатов полной векторной декомпозиции (Векторной сейсморазведки) в задачах разведки и контроля разработки месторождений нефти и газа.

При проведении сейсмических работ используется, как правило, регулярное покрытие исследуемого участка сейсмическими источниками и приемниками. Связанно это, прежде всего, с методами последующей обработки, которые в основном ориентированы на построение миграционных изображений среды. Основу этого направления положил метод общей глубинной точки (ОГТ), предложенный в 1956 году В. Майне [Mayne W.H., 1956, Seismic Surveying. U.S. Patent. No. 2.732.906.]. В основе метода лежит слоисто однородная модель среды с горизонтальными границами, в рамках которой отражение возбужденной волны происходит ровно посередине между источником и приемником. Если изменять расстояние между источником и приемником, но не менять положение этой центральной точки, можно получить многократные исследования одной и той же позиции в пространстве. Такая позиция называется общей глубинной (или средней) точкой, а количество исследований на разных расстояниях между источником и приемником («удалениях») называется «кратностью». При дальнейшей обработке, записи, относящиеся к одной и той же глубинной точке, особым образом суммируются, благодаря чему усиливается полезный сигнал и подавляются помехи. Кроме того, форма годографа отраженной волны на записи общей глубинной точки используется для определения средней скорости волны. Таким образом, чем больше кратность, тем больше усиливается полезный сигнал и подавляются помехи и тем точнее скоростной анализ. Также, на точность скоростного анализа влияет наличие большого спектра удалений, чтобы годограф волны был наиболее полно представлен на записи. Методы построения систем наблюдения 3D, таким образом, сложились с учетом требований метода ОГТ – равномерного покрытия площади достаточной кратностью и наличия широкого спектра удалений (а зачастую, и азимутов направлений источник-приемник) по всей площади, а также экономической целесообразности. В целях экономии расстояние между

приемными линиями и между линиями источников делаются большими, чем расстояния внутри линий. Типичная 3D-съемка имеет расстояние внутри линии 50 м, а между линиями 300 м. При этом сетка элементарных площадок («бинов») ОГТ размером 25 на 25 м покрывается равномерно. Регулярность расположения источников и приемников диктуется многими факторами – от удобства топографической разметки до удобства дальнейшей обработки данных. Более того, даже при возникновении нерегулярности при выносах источников, например, вследствие пересечения рек или других труднодоступных участков, при обработке применяются специальные процедуры регуляризации, которые приводят съемку к регулярной схеме.

Эта система наблюдения сложилась десятки лет назад и удовлетворяла требованиям обработки для большинства методов, ориентированных на построение изображения среды с использованием сильных отраженных волн и плоскостной модели среды.

Однако в последние 20 лет в нефтеразведке стали уделять большое внимание, так называемым, нетрадиционным месторождениям углеводородов, приуроченных не классическим структурным ловушкам, а к неструктурным залежам, типа разломом, трещинным ловушкам и пр. Традиционные методы обработки ОГТ для этих залежей оказались неэффективными. Возникло новое направление - дифракционная сейсмика, алгоритмы в котором призваны отсеивать сильные отраженные волны и выделять слабые дифракционные волны, обусловленные структурными нарушениями, трещиноватостью и пр. [Landa E., Shtivelman V., Gelchinsky B. A method for detection of diffracted waves on common-offset sections //Geophysical prospecting. – 1987. – Т. 35. – №. 4. – С. 359-373.], [Khaidukov V., Landa E., Moser T. J. Diffraction imaging by focusing-defocusing: An outlook on seismic superresolution //Geophysics. – 2004. – Т. 69. – №. 6. – С. 1478-1490.], [Zhu X., Wu R. S. Imaging diffraction points using the local image matrix in prestack migration //2008 SEG Annual Meeting. – OnePetro, 2008.], [Moser T. J., Howard C. B. Diffraction imaging in depth //Geophysical Prospecting. – 2008. – Т. 56. – №. 5. – С. 627-641.], [Kremlev, A. N., Erokhin, G. N., Starikov, L. E., & Rodin, S. V. Fracture and cavernous reservoirs prospecting by the CSP prestack migration method //73rd EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2011. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2011. – С. ср-238-00052.], [Popovici A. M., Sturzu I., Moser T. J. High resolution diffraction imaging of small scale fractures in shale and carbonate reservoirs //SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference. – OnePetro, 2015.]. В этой связи широкое распространение получили исследования, основанные на фильтрации сейсмических данных в некоторых расширенных пространствах параметров. Формально такую трансформацию данных называют декомпозицией исходных сейсмических данных. Ниже мы дадим обзор

подходов по декомпозиции данных многомерной сейсморазведки с точки зрения формального отображения исходных сейсмических данных в данные с расширенными параметрами, которые удобны в дальнейшем при построении сейсмических атрибутов. Эффективность декомпозиции мы продемонстрируем на примере решения одной из самых актуальных задач нефтеразведки - выявления зон естественной трещиноватости в нефтяных сланцах.

1.1 Особенности векторной декомпозиция данных сейсморазведки в задачах выявления зон естественной трещиноватости

Вопросы декомпозиции сейсмических данных, то есть перевода из одного вида данных в другой, как минимум эквивалентный, а чаще всего и в данные с расширенными параметрами представляет собой ключевой момент в обработке сейсмической информации. Особую актуальность эта процедура приобрела с появлением методов декомпозиции общей точки изображения (Common Image Gathers - CIG). Исследование угловых зависимостей рассеяния и анализ поведения векторов нормали к волновым фронтам является предметом сейсмических технологий, основанных на угловых сейсмограммах общей точки изображения - Angle Domain CIG. Такие векторно-ориентированные сейсмические методы обработки данных можно кратко охарактеризовать как методы векторной сейсморазведки (vector-based seismic). Важное место в этом ряду занимают декомпозиции, связанные с обращением волнового фронта во времени. Математически обращение основано на решении сопряженных постановок и на анализе векторных характеристик двух волновых полей: опорного волнового поля и обращенного во времени сейсмического поля. Оказалось, что в векторной сейсморазведке удобно весь процесс обработки данных разделить формально на два этапа: этап подготовки исходных данных - декомпозицию и этап оценки сейсмических атрибутов - синтез. В данной отчете анализируются современные направления в области первого этапа обработки данных - декомпозиции. Вводится понятие специального случая декомпозиции сейсмических данных – векторной декомпозиции. Используется единый системный подход анализа формального отображения исходных сейсмических данных в некоторые более информативные расширенные пространства данных.

1.1.1 Волновое обращение и декомпозиция данных

Математически, обращение волны во времени тесно связано с сопряженными уравнениями, возникающими при интегрировании по частям в некоторых гильбертовых пространствах [Anikonov Y. E., Bubnov B. A., Erokhin G. N. Inverse and ill-posed sources problems //Inverse and Ill-Posed Sources Problems. – De Gruyter, 2013.]. Действительно, техника интегрирования по

частям лежит в основе важнейших математических подходов, таких как определение сопряженных операторов Лагранжа, формулы Байеса, постановок сопряженных задач для дифференциальных уравнений и т. д. [Alekseev A. S., Erokhin G. N. Integration in geophysical inverse problems (Integrated Geophysics) //USSR Academy of Sciences Proceedings. – 1989. – Т. 308. – №. 6. – С. 1327-1331.]. Как оказалось, в физике сопряженные процессы также лежат в основе ряда известных физических эффектов, реализованных в практические технологии, такие как технологию обращающего во времени зеркала для лазерного луча [Zel'dovich B.Ya, Popovichev V.I., Ragulsky V.V., Faizullov F.S. On the connection between wavefronts of reflected and exciting light in stimulated scattering of Mandelstam-Brüllen. Letters to ZhETF. – 1972. – Т. 15, – №. 3 – С. 160-164], технологию акустического воздействия в медицине [Fink M. Time reversal in acoustics //Contemporary Physics. – 1996. – Т. 37. – №. 2. – С. 95-109.] и пр. В методе полноволновой инверсии FWI (Full Wave Inversion) сопряженная математическая формулировка используется для вычисления производной Фреше при минимизации функционала невязки [Tarantola A. Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation: Geophysics. – 1984.], [Plessix R. E. A review of the adjoint-state method for computing the gradient of a functional with geophysical applications //Geophysical Journal International. – 2006. – Т. 167. – №. 2. – С. 495-503.], [Virieux J., Operto S. An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics //Geophysics. – 2009. – Т. 74. – №. 6. – С. WCC1-WCC26.]. В работе [Alekseev A. S., Erokhin G. N. Integration in geophysical inverse problems (Integrated Geophysics) //USSR Academy of Sciences Proceedings. – 1989. – Т. 308. – №. 6. – С. 1327-1331.] впервые было отмечена тесная связь между сущностью предложенного ими решения задачи интегральной геофизики (Simultaneous Joint Inversion -SJI), основанного на сопряженных уравнениях математической геофизики, обобщающего подход FWI на случай многодисциплинарности и сущностью обращения во времени лазерного луча на основе «обращающего зеркала». В этой же работе конструктивно доказана сходимость оптимизационного решения задачи SJI на некотором слабо компактном множестве и повышение устойчивости решения на нем в случае комплексирования методов различной физической природы.

Исследования по декомпозиции данных с последующей их фильтрацией тесно связаны с работами в области сейсмического рассеяния, которые широко проводились в последние 20 лет в связи с построением методов разделения отраженной и дифракционной составляющих волнового поля [Landa E., Shtivelman V., Gelchinsky B. A method for detection of diffracted waves on common-offset sections //Geophysical prospecting. – 1987. – Т. 35. – №. 4. – С. 359-373.], [Khaidukov V., Landa E., Moser T. J. Diffraction imaging by focusing-defocusing: An outlook on seismic superresolution //Geophysics. – 2004. – Т. 69. –

№. 6. – С. 1478-1490.], [Zhu X., Wu R. S. Imaging diffraction points using the local image matrix in prestack migration //2008 SEG Annual Meeting. – OnePetro, 2008.], [Moser T. J., Howard C. B. Diffraction imaging in depth //Geophysical Prospecting. – 2008. – Т. 56. – №. 5. – С. 627-641.], [Kremlev, A. N., Erokhin, G. N., Starikov, L. E., & Rodin, S. V. Fracture and cavernous reservoirs prospecting by the CSP prestack migration method //73rd EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2011. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2011. – С. ср-238-00052.]. Дифракционное рассеяние чаще всего связывается с нетрадиционными трещинно-кавернозными коллекторами нефти и газа. Создаваемые методы в этой области основываются в основном на модернизации алгоритмов временной и глубинной миграции с точки зрения выделения малых амплитуд дифракторов.

В сейсморазведке сопряженные формулировки для волнового уравнения лежат в основе известного метода Reverse Time Migration (RTM) [Baysal E., Kosloff D. D., Sherwood J. W. C. Reverse time migration //Geophysics. – 1983. – Т. 48. – №. 11. – С. 1514-1524.], [Whitmore N. D. Iterative depth migration by backward time propagation //SEG Technical Program Expanded Abstracts 1983. – Society of Exploration Geophysicists, 1983. – С. 382-385.], [McMechan G. A. Migration by extrapolation of time-dependent boundary values //Geophysical prospecting. – 1983. – Т. 31. – №. 3. – С. 413-420.]. Математическая постановка прямой задачи в нем имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{1}{c^2(x)} p^f_{tt} - \Delta p^f &= r(t) \delta(x - x_s), (x, t) \in \mathbb{R}^n \times (0, T), n = 2, 3 \\ p^f|_{t=0} &= 0, p^f_t|_{t=0} = 0, \\ x_s \in \Gamma &= \{x \in \mathbb{R}^n | x^n = 0, n = 2, 3\}, \\ p_0(x, t; x_s) &= p^f(x, t; x_s), (x, t) \in \Gamma \times [0, T] \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $p^f(x, t; x_s)$ – давление, $r(t) \delta(x - x_s)$ – источник, сосредоточенный на границе в точке $x_s \in \Gamma = \{x \in \mathbb{R}^n | x^n = 0, n = 2, 3\}$ (δ – функция Дирака, r – некоторая функция источника, T – время наблюдения).

Пусть $p_0 = p^f|_{[\Gamma \times 0, T]}$ измеренное на поверхности давление, $c = c(x)$ – известная скорость среды. Тогда сопряженная к (1) постановка в обратном времени имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{1}{c^2(x)} p^b_{tt} - \Delta p^b &= \delta_\Gamma p_0(x, t; x_s), (x, t) \in \mathbb{R}^n \times (0, T), n = 2, 3 \\ p^b|_{t=T} &= 0, p^b_t|_{t=T} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $p^b(x, t; x_s)$ – давление в обращенном времени.

На рисунке 1 схематически представлено поведение решений (1) и (2) в окрестности некоторой точки среды.

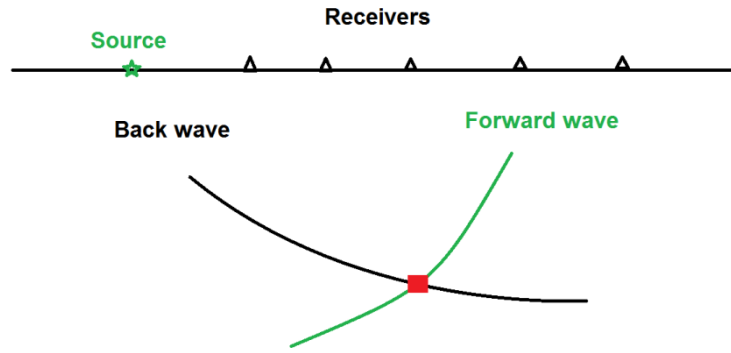


Рисунок 1 – Схема расчета в общей точке изображения по RTM

Другими словами, решение уравнений (1) и (2) отображает исходный набор данных, полученный, например, системой сбора CDP (Common Depth Point) 3D, вида:

$$A(p, x_r, t, x_s) \subset R^6, \quad (3)$$

где $p \in R^1$, $t \in R^1$, $x_r \in R^2$, $x_s \in R^2$

в некоторый расширенный набор данных:

$$G(p^f, p^b, x, t, x_s) \subset R^8, \quad (4)$$

где $p^f \in R^1$, $p^b \in R^1$, $t \in R^1$, $x \in R^3$, $x_s \in R^2$.

Решение задач (1) и (2) в постановке RTM, можно кратко записать как действие некоторого оператора D , который осуществляет такую декомпозицию:

$$D: A \Rightarrow G \quad (5)$$

Дальнейшее развитие метода RTM в подходах Angle Domain Common Image Gathers (ADCIG) RTM привело к использованию наряду с давлениями также и угла между падающим и рассеянным волновым полем $\gamma = (\alpha - \beta)/2$, где α – угол падения волны, β – угол рассеяния. Углы рассчитываются с использованием, например, вектора Умова-Пойнтинга [Yoon K., Marfurt K. J. Reverse-time migration using the Poynting vector //Exploration Geophysics. – 2006. – Т. 37. – №. 1. – С. 102-107.], [Alkhalifah T. Scattering-angle based filtering of the waveform inversion gradients //Geophysical Journal International. – 2014. – Т. 200. – №. 1. – С. 363-373.] который усредняется по времени. В этом случае оператор D осуществляет векторную декомпозицию и отображает исходные стандартные данные (3) в данные из пространства еще большей размерности, чем (4):

$$G(p^f, p^b, \gamma, x, t, x_s) \subset R^9, \quad (6)$$

где $\gamma \in R^1$.

На рисунке 2 приведена схема взаимодействия волн для ADCIG декомпозиции

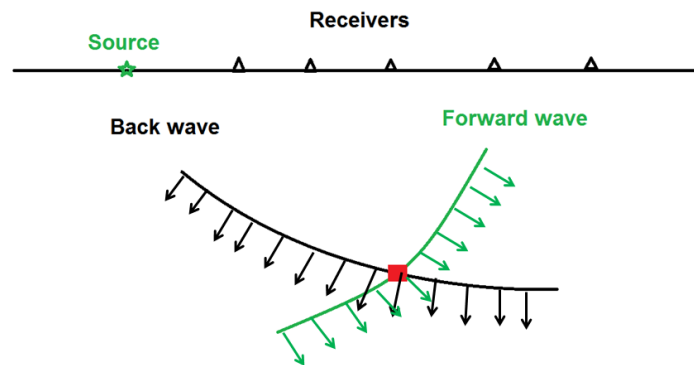


Рисунок 2 – Схема расчета в общей точке изображения по ADCIG

Введение нового параметра γ позволяет осуществлять по нему некоторую дополнительную фильтрацию. Так скалярное произведение векторов падающего и рассеянного поля используется в работах [Alkhalifah T. Scattering-angle based filtering of the waveform inversion gradients //Geophysical Journal International. – 2014. – Т. 200. – №. 1. – С. 363-373.], [Whitmore N. D., Crawley S. Applications of RTM inverse scattering imaging conditions //2012 SEG Annual Meeting. – OnePetro, 2012.]. Такие угловые зависимости рассеяния традиционно статичны во времени [Biondi B. L. 3D seismic imaging. – Society of Exploration Geophysicists, 2006.], [Koren Z., Ravve I. Full-azimuth subsurface angle domain wavefield decomposition and imaging Part I: Directional and reflection image gathers //Geophysics. – 2011. – Т. 76. – №. 1. – С. S1-S13.], [Ren L. et al. Suppressing artifacts in 2D RTM using the Poynting vector //Near Surface Geophysics Asia Pacific Conference, Beijing, China 17-19 July 2013. – Society of Exploration Geophysicists, Australian Society of Exploration Geophysicists, Chinese Geophysical Society, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists, and Society of Exploration Geophysicists of Japan, 2013. – С. 484-487.], [Xie X. B. An angle-domain wavenumber filter for multi-scale full-waveform inversion //2015 SEG Annual Meeting. – OnePetro, 2015.]. Фильтрация по углам (α, β) используется также в работах [Xie X. B., Wu R. S. Extracting angle domain information from migrated wavefield //SEG technical program expanded abstracts 2002. – Society of Exploration Geophysicists, 2002. – С. 1360-1363.], [Yan R., Xie X. B. A new angle-domain condition for prestack reverse-time migration. //79nd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts. – 2009. – С. 2784-2788], которая называется фильтрацией матрицы локальных изображений (local image matrix). Данные вида (6) в этом случае будут вида:

$$G(p^f, p^b, \alpha, \beta, x, t, x_s) \subset R^{10} \quad (7)$$

где $\alpha \in R^1, \beta \in R^1$.

Дальнейшее развитие идей векторной декомпозиции получило в методе RTH (Reverse Time Holography) [Erokhin G. et al. Interconnected vector pairs image conditions: New possibilities for visualization of acoustical media //2017 SEG International Exposition and Annual Meeting. – OnePetro, 2017.], [Erokhin G. Reverse time holography approach based on the vector domain common image gathers //SEG International Exposition and Annual Meeting. – OnePetro, 2019.]. В нем детально анализируется поведение уже не пары статичных во времени для выбранной точки пространства пары векторов нормали к волновому полю, а пары взаимосвязанных векторов скорости (b, f) в каждый момент времени для каждого источника. Здесь b – вектор скорости в обращенном времени, f – вектор скорости в опорной волне и являются решением уравнений акустики в первых производных для давлений и скоростей [Erokhin G., Danilin A., Kozlov M. Extension of the common image gathers by VPRTM method //2018 SEG International Exposition and Annual Meeting. – OnePetro, 2018.]. Векторы характеризуются собственными амплитудами, фазами, частотами, изменяющимися во времени и зависящими от координат источников. Поведение вектора обратного рассеяния в каждой точке акустического пространства зависит в первую очередь от свойств среды в окрестности этой точки. Результат векторной декомпозиции в RTH - множество G , аналогично виду (4) или (6)-(7) формируется оператором D вида (5) на множестве стандартных данных CDP 3D вида (3), но принадлежат уже расширенному пространству размерности 12:

$$G(f, b, x, t, x_s) \subset R^{12} \quad (8)$$

Результат векторной декомпозиции данных в RTH вида (8) носит название Vector Domain Common Image Gathers (VDCIG) [Erokhin G. Reverse time holography approach based on the vector domain common image gathers //SEG International Exposition and Annual Meeting. – OnePetro, 2019.]. В дальнейшем, на этапе оценки сейсмических атрибутов, данные (8) могут быть представлены в более подходящем для этого виде, например:

$$G(|f|, |b|, \alpha, \beta, \varphi, \theta, x, t, x_s) \subset R^{12} \quad (9)$$

где углы φ – азимутальный, θ – зенитный.

Таким образом, размерности пространств параметров сейсмических данных после декомпозиции, всегда больше размерности исходных данных. Так для CDP 3D размерность исходных данных равняется 6 - (3), а размерность информации после RTH декомпозиции уже больше на 2 параметра - (4). Для векторной декомпозиции пространство исходных данных (3) переводится формальным оператором A в пространства еще большей размерности – (6) - (8).

На основе предлагаемого декомпозиционного подхода к анализу методов обработки данных, можно спрогнозировать их дальнейшее перспективное направление развития. Очевидно, что если рассмотреть постановки, аналогичные (1) и (2) для упругости в скоростях и напряжениях, то расширенное пространство, аналогичное (9) будет иметь вид:

$$G(\sigma_f, \sigma_b, x, t, x_s) \subset R^{18}$$

где σ_f – тензор напряжений в опорной волне, σ_b – тензор напряжений в рассеянной волне. Метод, осуществляющий такую тензорную декомпозицию, носит название TRTH. Метод позволяет получать, наряду с атрибутами RTH, дополнительно множество новых атрибутов, присущих только упругим средам.

1.1.2 Оценка сейсмических атрибутов

Вторым, не менее важным этапом, чем декомпозиция исходных сейсмических данных, является этап оценки атрибутов или этап синтеза атрибутов. В векторной сейморазведке он осуществляется на основе сейсмических данных принадлежащих расширенным пространствам G вида (4), (6), (7), (8) или (9) путем их отображения в пространство размерностью R^1 для каждой точки исследуемой среды. Формально этот этап представляет собой отображение данных G в сейсмические атрибуты B неким оператором C :

$$C: G \Rightarrow B \quad (10)$$

$$B(I, x) \subset R^4 \quad (11)$$

Где $I \in R^1, x \in R^3$.

Величина I характеризует некоторую интегральную характеристику сейсмического атрибута в заданной точке среды. В методе RTM оператор C , носит название «Условие Изображения» (Imaging Condition) и имеет вид [Symes W. W. Reverse time migration with optimal checkpointing //Geophysics. – 2007. – Т. 72. – №. 5. – С. SM213-SM221.], [Whitmore N. D. Iterative depth migration by backward time propagation //SEG Technical Program Expanded Abstracts 1983. – Society of Exploration Geophysicists, 1983. – С. 382-385.], [McMechan G. A. Migration by extrapolation of time-dependent boundary values //Geophysical prospecting. – 1983. – Т. 31. – №. 3. – С. 413-420.]:

$$I(x) = \sum_s \int_0^T p^f(x, t; x_s) p^b(x, t; x_s) dt \quad (12)$$

Для методов ADCIG-RTM помимо интенсивности I на этапе синтеза сейсмических атрибутов по данным (6) также оцениваются и углы раскрытия [Koren Z., Ravve I. Full-azimuth subsurface angle domain wavefield decomposition

and imaging Part I: Directional and reflection image gathers //Geophysics. – 2011. – Т. 76. – №. 1. – С. S1-S13.], [Ren L. et al. Suppressing artifacts in 2D RTM using the Poynting vector //Near Surface Geophysics Asia Pacific Conference, Beijing, China 17-19 July 2013. – Society of Exploration Geophysicists, Australian Society of Exploration Geophysicists, Chinese Geophysical Society, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists, and Society of Exploration Geophysicists of Japan, 2013. – С. 484-487.], [Xie X. B. An angle-domain wavenumber filter for multi-scale full-waveform inversion //2015 SEG Annual Meeting. – OnePetro, 2015.]:

$$B(I, \gamma, x) \subset R^5 \quad (13)$$

где $I \in R^1, \gamma \in R^1, x \in R^3$.

Несколько замечаний касательно формирования атрибута RTM (11), который рассчитывается на основе Imaging Condition (12). В формуле (12) используется произведение двух функций давления: прямого - решение задачи (1) и обратного - решение сопряженной задачи (2). Прямая волна в данном случае служит в первую очередь для автоматической локализации первого вступления в обратной рассеянной волне для заданной нами начальной скоростной модели. Надежды на то, что такое умножение будет усиливать также и все остальные виды, так называемых «кратных волн», на практике, как правило, не оправдываются. Это объясняется тем, что изначально мы не знаем саму начально-скоростную модель среды с необходимой детальностью. Этот очевидный факт отмечается в ряде работ [Yilmaz O. Seismic data analysis: Society of exploration geophysicists //Vol. I. – 2001.], [Chopra S., Marfurt K. Seismic Attributes—a promising aid for geologic prediction //CSEG recorder. – 2006. – Т. 31. – №. 5. – С. 110-120.], [Sava P., Fomel S. Time-shift imaging condition in seismic migration //Geophysics. – 2006. – Т. 71. – №. 6. – С. S209-S217.], [Zhang Q., McMechan G. A. Direct vector-field method to obtain angle-domain common-image gathers from isotropic acoustic and elastic reverse time migration //Geophysics. – 2011. – Т. 76. – №. 5. – С. WB135-WB149.], [Yan R. et al. Acquisition aperture correction in the angle domain toward true-reflection reverse time migration //Geophysics. – 2014. – Т. 79. – №. 6. – С. S241-S250.]. В результате такой неопределенности сформировалось мнение, которое мы разделяем, что метод RTM и его расширения ADCIG при использовании на практике генерируют значительные артефакты и, в то же время, являются более затратными в вычислительном отношении, чем традиционные методы глубинной миграции Кирхгофа [Vyas M., Nichols D., Mobley E. Efficient RTM angle gathers using source directions //2011 SEG Annual Meeting. – OnePetro, 2011.], [Guan H. et al. Angle-domain common-image gathers extracted from pre-stack RTM images //2013 SEG Annual Meeting. – OnePetro, 2013.]. В связи с этим, все попытки улучшить RTM на основе модернизации условия

изображения (3), без предварительного детального знания начально-скоростной модели среды, нам представляются также бесперспективными. Выход из такой ситуации только один – пытаться на первом шаге быстро оценить начально-скоростную модель, с необходимой детальностью, а затем уже строить сейсмические атрибуты.

В настоящее время традиционно для этой цели используются два подхода: метод FWI [Tarantola A. Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation: *Geophysics*. – 1984.], [Virieux J., Operto S. An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics // *Geophysics*. – 2009. – Т. 74. – №. 6. – С. WCC1-WCC26.] и метод Migration Velocity Analysis - MVA [Biondi B., Sava P. Wave-equation migration velocity analysis // *SEG Technical Program Expanded Abstracts 1999*. – Society of Exploration Geophysicists, 1999. – С. 1723-1726.], [Sava P. C., Biondi B., Etgen J. Wave-equation migration velocity analysis by focusing diffractions and reflections // *Geophysics*. – 2005. – Т. 70. – №. 3. – С. U19-U27.], [Albertin U. et al. Adjoint wave-equation velocity analysis // *2006 SEG Annual Meeting*. – OnePetro, 2006.], [Alali A., Tanushev N., Tsingas C. Depth Velocity Model Building on Blended Data Via Beam Tomography // *83rd EAGE Annual Conference & Exhibition*. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2022. – Т. 2022. – №. 1. – С. 1-5.]. Однако первый подход весьма вычислительно-емкий и неустойчивый из-за проблемы “cycle-skipping”, а второй - достаточно трудоемкий и интерактивный. В последние годы получает распространение метод построения глубинной скоростной модели на основе сверхбыстрой миграции (Fast Beam Migration-FBM) в Гауссовых пучках [Tanushev N., Popovici A. M., Hardesty S. Fast, high-resolution beam tomography and velocity-model building // *The leading edge*. – 2017. – Т. 36. – №. 2. – С. 140-145.], [Alali A., Tanushev N., Tsingas C. Depth Velocity Model Building on Blended Data Via Beam Tomography // *83rd EAGE Annual Conference & Exhibition*. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2022. – Т. 2022. – №. 1. – С. 1-5.].

В идейном плане последний подход наиболее близок к оценке скорости в методе RTH, где изначально, чтобы избежать артефактов, присущих RTM, используются начально-скоростные модели из класса непрерывных функций с положительным градиентом [Erokhin G., Bryksin V. High-resolution velocity model estimation by the RTH method // *SEG International Exposition and Annual Meeting*. – OnePetro, 2020.]. Тем самым исключаются из рассмотрения кратные волны. Оценка атрибутов в RTH осуществляется в некоторой малой временной окрестности момента первых вступлений в обращенной волне [Erokhin G. Time-Dependent Scattering in Reverse Time Holography Method // *83rd EAGE Annual Conference & Exhibition*. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2022. – Т. 2022. – №. 1. – С. 1-5.]. Для точного определения этого момента принимается гипотеза об энергетической

значимости первых вступлений. В каждой точке среды, с учетом этой гипотезы, определяется невязка времен прихода цугов двух волн - прямой и обратной, аналогично подходу на основе FBM [Tanushev N., Popovici A. M., Hardesty S. Fast, high-resolution beam tomography and velocity-model building //The leading edge. – 2017. – Т. 36. – №. 2. – С. 140-145.]. После определения временной невязки оцениваются все атрибуты только в окрестности истинных моментов прихода обращенных во времени волн, то есть при скорректированной скоростной модели среды. Временная невязка определяет новое, так называемое локальное время, которое может изменяться от отрицательных значений (начальная скоростная модель в данной точке среды занижена по отношению к реальной скорости) до положительных значений (начальная скоростная модель в данной точке среды завышена относительно реальной). Момент локального времени, равный нулю, соответствует совпадению предсказанной и реальной скоростей волн. Фактически это характеризует временную зависимость рассеяния в данной точке среды и приводит к возможности работы в средах, в которых индикатриса рассеяния может зависеть не только от пространственных углов, но и меняться со временем или частотой (time-dependent scattering).

После оценки скорости, на этапе оценки (синтезе) других сейсмических атрибутов в методе RTH, в отличие от RTM, появляется дополнительная возможность построения, как стандартных атрибутов типа глубинной RTM миграции, так и новых, ранее не встречавшихся:

$$B(I_1, I_2, \dots, I_n, x) \subset R^{n+3}, \quad (14)$$

где $I_k \in R^1, x \in R^3, k = 1, \dots, n$.

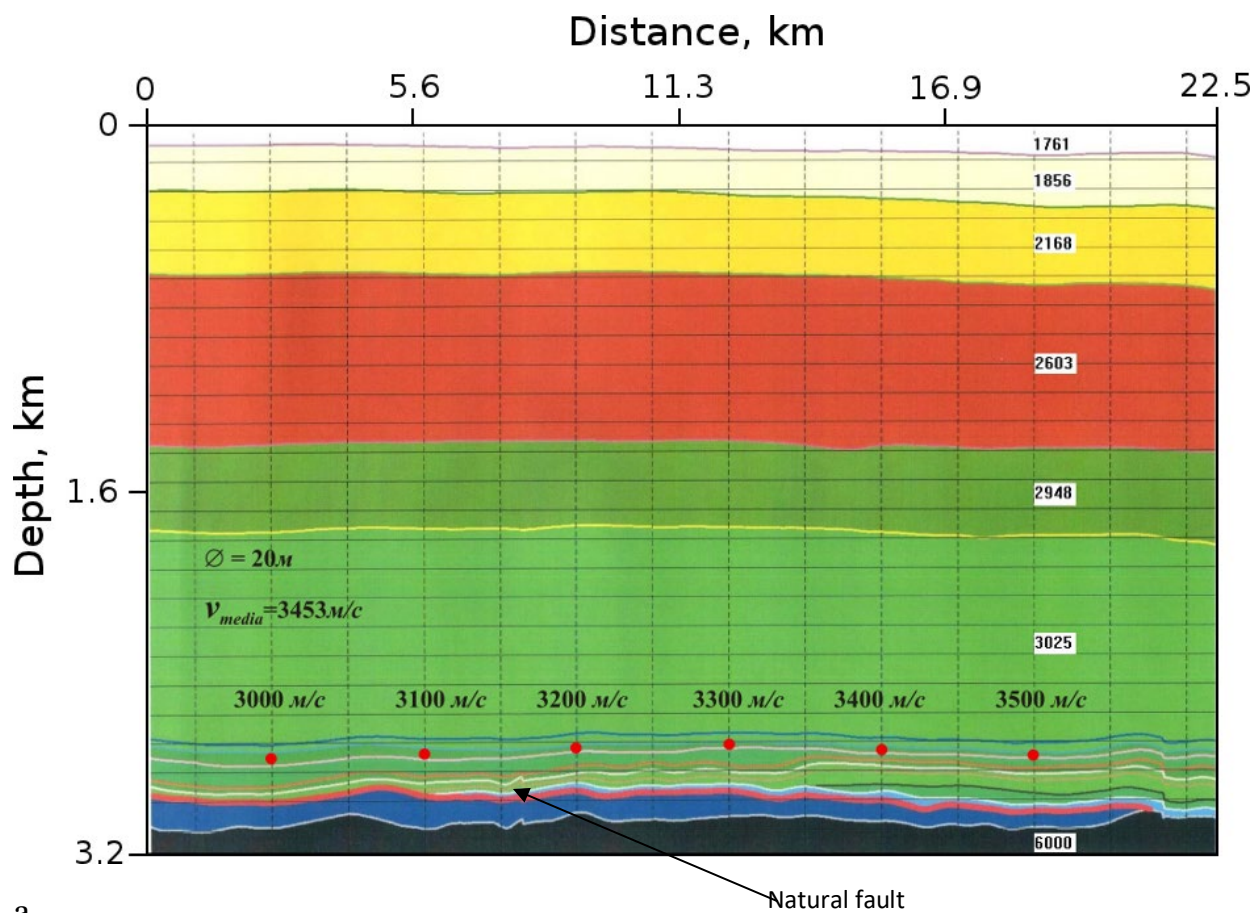
В методе RTH в качестве формальных условий визуализации реализующих действие оператора $C: G \Rightarrow B$ (10)-(11), (14) используются методы статистического оценки параметров многомерного случайного распределения, размерностью, согласно (8)-(9), равной 12. С учетом возможности разбиения на подмножества и фильтрации на практике их стоит считать значительно больше - нескольких десятков.

1.2 Задача визуализация дифракторов

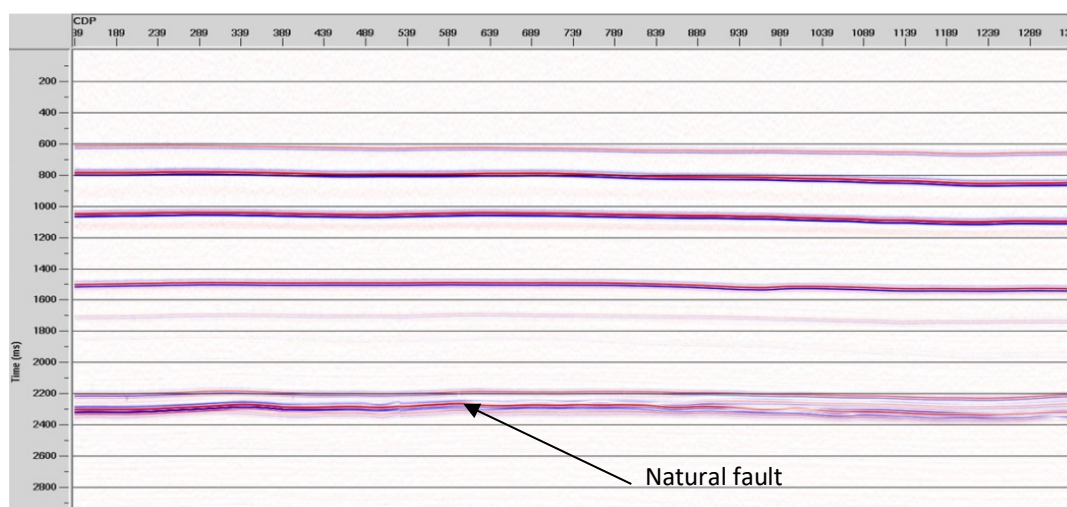
Важной задачей для RTM-подобных миграционных методов является обнаружение дифракторов на фоне сильных отражений [Landa E., Shtivelman V., Gelchinsky B. A method for detection of diffracted waves on common-offset sections //Geophysical prospecting. – 1987. – Т. 35. – №. 4. – С. 359-373.], [Khaidukov V., Landa E., Moser T. J. Diffraction imaging by focusing-defocusing: An outlook on seismic superresolution //Geophysics. – 2004. – Т. 69. – №. 6. – С. 1478-1490.], [Zhu X., Wu R. S. Imaging diffraction points using the local image matrix in prestack migration //2008 SEG Annual Meeting. – OnePetro, 2008.],

[Kremlev, A. N., Erokhin, G. N., Starikov, L. E., & Rodin, S. V. Fracture and cavernous reservoirs prospecting by the CSP prestack migration method //73rd EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2011. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2011. – С. cp-238-00052.], [Popovici A. M., Sturzu I., Moser T. J. High resolution diffraction imaging of small scale fractures in shale and carbonate reservoirs //SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference. – OnePetro, 2015.], [Whitmore N. D., Crawley S. Applications of RTM inverse scattering imaging conditions //2012 SEG Annual Meeting. – OnePetro, 2012.], [Erokhin G. N. et al. CSP-method prospecting of fracture-cavernous reservoirs in the Bazhen formation of the Salym oilfield //74th EAGE Conference and Exhibition incorporating EUROPEC 2012. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2012. – С. cp-293-00827.], [Erokhin G., Danilin A., Kozlov M. Visualization of ultra-weak diffractors based on vector pair RTM //80th EAGE Conference and Exhibition 2018. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2018. – Т. 2018. – №. 1. – С. 1-5.], [Danilin A. et al. The Use of Parallel Technologies in the Solution of a Problem of Geophysics Concerned with the Detection of Weakly Scattering Objects //International Conference on Parallel Computational Technologies. – Springer, Cham, 2019. – С. 185-196.]. Это связано с важной проблемой нефтяной сейсморазведки – поиске трещинно-поровых коллекторов сланцевой нефти. Для исследования возможностей разных методов нами сформирован тестовый пример, близкий к реальной ситуации. Была взята типовая модель сланцевой нефтяной залежи нефти в баженовской свите Западной Сибири (Рисунок 3а). В плотном нефтяном пласте сланцев смоделировано шесть круглых включений диаметром 20 метров (нумерация включений слева направо от 1 до 6). Глубина нефтяного пласта 2600 м. Фоновая скорость в пласте 3453 м/с. Скорости включений меняются от 3000 м/с до 3500 м/с (слева направо). Расстояние между включениями 5000 м. Между включениями №2 и №3 (чуть ниже) имеется естественный разлом. Расчетные параметры тестирования: шаг расчетной сетки 10 м; шаг по времени 0.4 мс; количество источников 354; шаг по источникам 50 м; расчетная область для одного источника 4800x3200 м; количество приемников 97; интервал по приемникам 50 м; доминирующая частота импульса Рикера 40Hz .

Расчитанные сейсмические данные для этой эталонной модели находятся в свободном доступе по ссылке (www.4dprm.com). Рисунок 3б демонстрирует результат традиционной обработки PSTM. Плотный нефтяной слой – второй слой снизу.



a



b

Рисунок 3 – Типовая модель залежи сланцевой нефти с шестью включениями (a) результат традиционной временной миграции (b)

На рисунке 4 показаны результаты специальной обработки для обнаружения дифракторов двумя методами. Первый метод называется CSP [Erokhin G. N. et al. CSP-method prospecting of fracture-cavernous reservoirs in the Bazhen formation of the Salym oilfield //74th EAGE Conference and Exhibition incorporating EUROPEC 2012. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2012. – С. сp-293-00827.] и использует многомерную спектральную

фильтрацию (рисунок 4а). Второй метод называется Diffraction Imaging [Moser T. J., Howard C. B. Diffraction imaging in depth //Geophysical Prospecting. – 2008. – Т. 56. – №. 5. – С. 627-641.]. Результат полноазимутальной угловой декомпозиции, в лучевом приближении [Koren Z., Ravve I. Full-azimuth subsurface angle domain wavefield decomposition and imaging Part I: Directional and reflection image gathers //Geophysics. – 2011. – Т. 76. – №. 1. – С. S1-S13.] представлен на рисунке 4б. Атрибут RTH Diffractor представлен на рисунке 5.

Кроме амплитудных атрибутов импедансного типа, как в методах CSP и Diffraction Imaging, в методе RTH трещиноватость можно оценить также по угловым характеристикам рассеянного на неоднородностях волнового поля, частотным особенностям рассеяния и скоростным характеристикам аномалий. На рисунке 6 приведены характеристики пространственной анизотропии рассеяния – атрибуты RTH Dip Angle вблизи включений. Атрибуты угловой анизотропии рассеяния - RTH AVO представлены на рисунке 7: Poisson coefficient (рисунок 7а) и Fluid Factor (рисунок 7б).

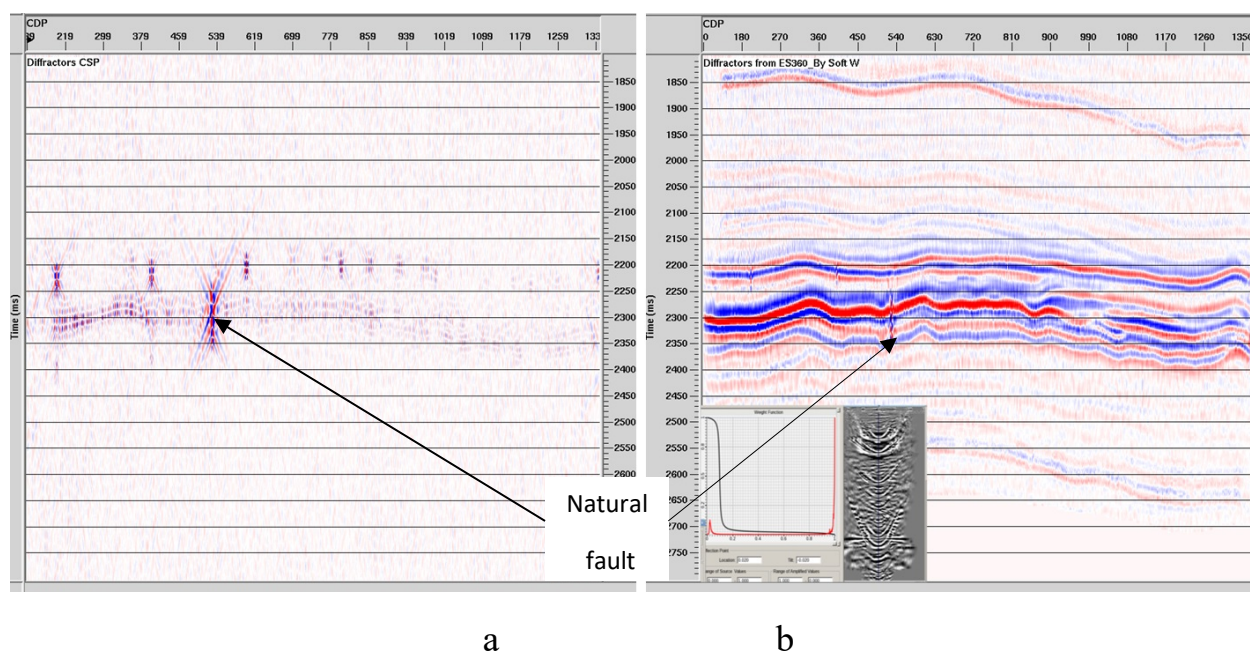


Рисунок 4 – Результат обработки методом CSP (а) методом Diffraction Imaging (b)

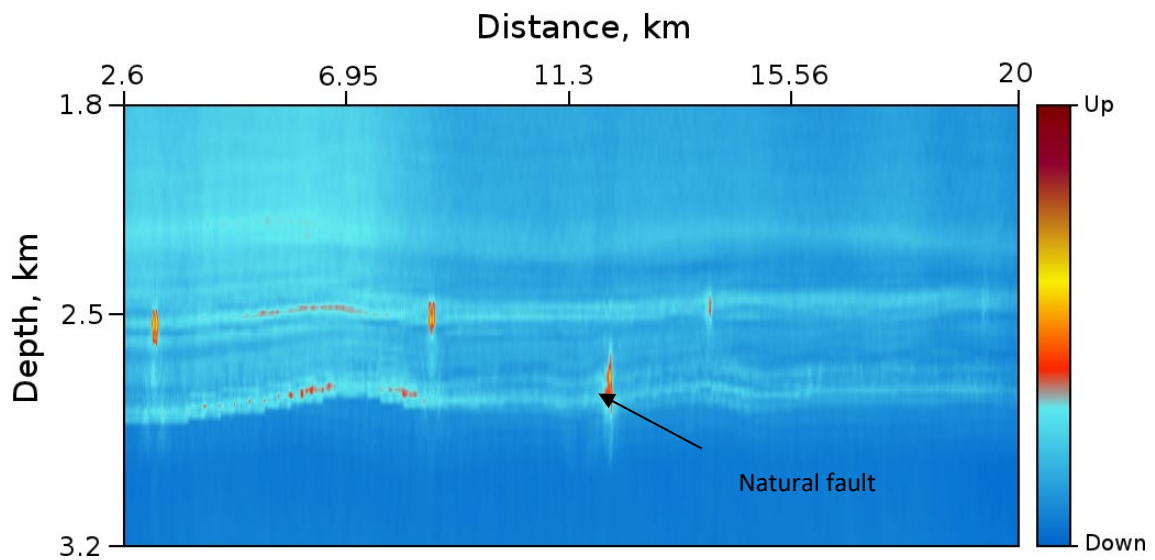


Рисунок 5 – Результат фильтрации синфазного рассеяния методом RTH

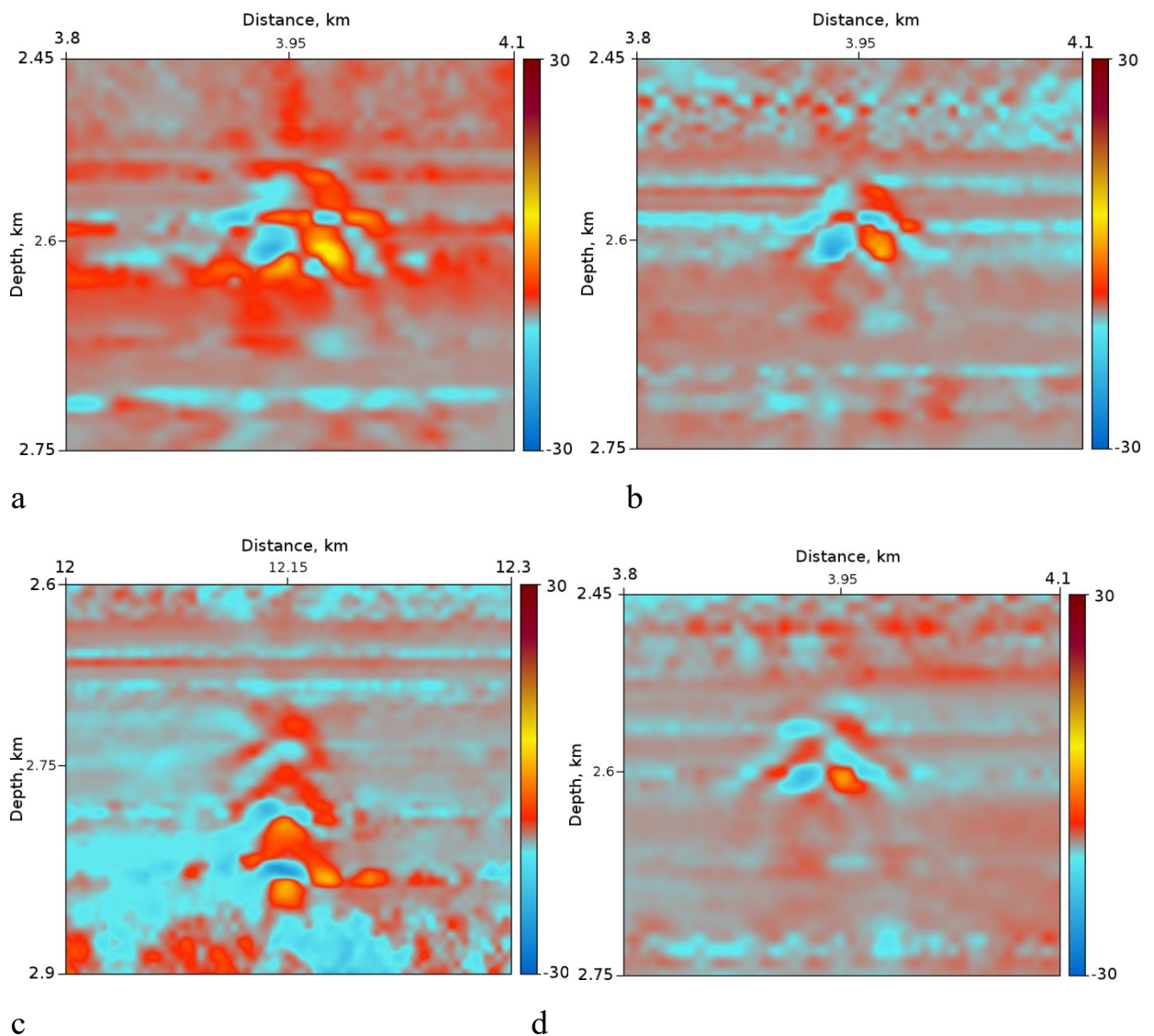


Рисунок 6 – Результат оценки углов наклона методом RTH вблизи включения №1 (a), включения №2 (b), естественного разлома (c) включения №3 (d)

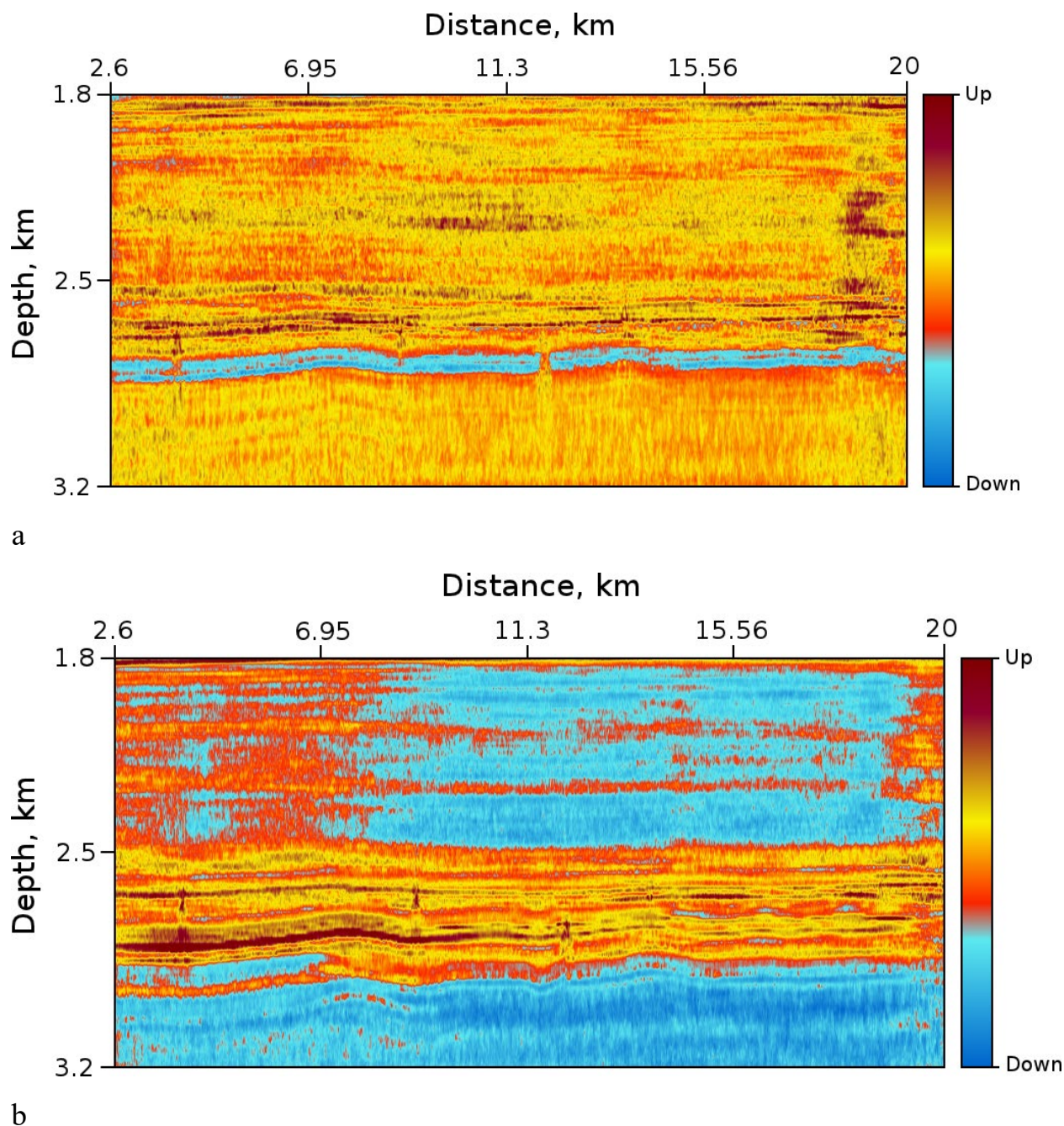


Рисунок 7 – Результат обработки методом RTH AVO. Коэффициент Пуассона (a) Флюид фактор (b)

Сравнение результатов тестирования на данных, моделирующих естественную трещиноватость в сланцах, демонстрирует новые, гибкие возможности фильтрации данных, в расширенных пространствах, полученных на основе векторной RTH декомпозиции исходных сейсмических данных.

Разделение графа обработки сейсмических данных на два этапа для методов, использующих двухлучевую векторную декомпозицию на базе обращенных во времени решений уравнений акустики, позволяет системно выделять различие в существующих подходах построения сейсмических атрибутов уже на этапе декомпозиции данных и прогнозировать дальнейшие

перспективные направления развития методов обработки сейсмической информации. Многообразие глубинных сейсмических атрибутов, получаемых в методе RTH на основе декомпозиции исходных сейсмических данных в пространства большей размерности (8), (9), (14) позволяет решать широкий круг задач поиска и разработки месторождений углеводородов на новом качественном уровне. Метод RTH включает, как частный случай, метод PPre Stack Depth Migration (PSDM), Amplitude versus Angle(AVO), Acoustic Inversion (AI) , является альтернативой методам Migration Velocity Analysis(MVA), Full Wave Inversion (FWI), а также методу построения скоростной модели на основе Fast Beam Migration (FBM) . Отмечена тесная связь техники обращения волнового фронта во времени в сейсмике с аналогичным обращением в оптике и акустике. Показаны перспективы использования новой технологии полноволновой сейсмической голографии в обращенном времени RTH в решении практических задач выявления зон естественной трещиноватости в нефтяных сланцах.

На основе приведенного исследования рекомендуется развитие данного направления для более сложных моделей среды, в частности, для модели упругой среды, в которой постановки, аналогичные (1) и (2) рекомендуется рассмотреть в скоростях и напряжениях (см. раздел 2.1.1).

Проведенный анализ современного состояния исследований в области использования результатов полной векторной декомпозиции (векторной сейсморазведки) в задачах разведки и контроля разработки месторождений нефти и газа показывает несомненную перспективность использования дополнительной угловой информации в новых методах обработки сейсмической информации. Последние же, в свою очередь, будут формулировать новые требования на систему сбора полевой информации – на размещение приемников и источников на поверхности. Это важно для планирования и проведения расстановок сенсоров с помощью с беспилотных летательных аппаратов, что является заявленной темой данного проекта.

2 Анализ и разработка спецификации требований к нодальной высококомобильной сейсмической системе с беспроводными каналами передачи данных с учетом заявленных целей проекта

2.1 Анализ требований к нодальной высококомобильной сейсмической системе с беспроводными каналами передачи данных

Оптимизация технологии выполнения сейсморазведочных работ непосредственно связана с задачей оптимизации сейсморегистрирующей аппаратуры.

Разнообразие задач, решаемых в ходе проведения сейсморазведочных работ, предполагает разные технические средства. Поэтому существенный интерес представляет анализ современного состояния и тенденций развития требований к нодальной высококомобильной сейсмической системе.

В соответствии с характером района проведения сейсморазведочных работ, используемые при этом сейсморегистрирующие системы можно разделить на:

- сейсморегистрирующие системы, предназначенные для выполнения работ на суше и в транзитных зонах;
- сейсморегистрирующие системы, предназначенные для выполнения работ на водных акваториях, в том числе:
- Морские сейсморегистрирующие системы со стримерами;
- Донные морские сейсморегистрирующие системы с блоками сбора данных, размещаемыми на дне акватории.

Мы рассмотрим сейсморегистрирующие системы, предназначенные для выполнения работ на суши в транзитных зонах, которые, в свою очередь, можно разделить на два класса:

- Сейсморегистрирующие системы, в которых аналоговые сигналы с сейсмодатчиков поступают в центральный регистрирующий комплекс (ЦРК) по многожильному кабелю.
- Нодальные сейсморегистрирующие системы, (НСС) которые, в свою очередь, подразделяются на:
- нодальные сейсморегистрирующие системы с последовательной передачей в процессе регистрации кодированной сейсмической и служебной информации от полевых модулей (нодов) в ЦРК по кабелю либо по радиоканалу;

- нодальные сейсморегистрирующие системы с записью сейсмической и служебной информации в память непосредственно в нодах с последующей передачей данных в ЦРК либо по радиоканалу, либо путем сбора полевых модулей и перезаписью их содержимого на те или иные носители записи. Как правило, эта операция осуществляется в процессе зарядки внутренних аккумуляторов полевых модулей.

В последнее десятилетие, с появлением ряда технологических достижений в области телекоммуникационной связи, компактных и чрезвычайно емких устройств хранения данных, литиево-ионных источников питания, высокочувствительных и малопотребляющих приемников сейсмосигнала появилась возможность создания бескабельных нодальных систем нового типа.

Возможны следующие варианты выполнения сейсмического наблюдения с их использованием:

- Выполнение сейсмического наблюдения с мониторингом процесса регистрации сейсмоданных и технического состояния отдельных нодов путем пересылки данных об уровне шума на профиле, зарегистрированных сейсмоданных, данных о результатах тестирования полевых модулей в ЦРК в реальном времени. Техническая реализация таких систем требует использования сетевых беспроводных технологий передачи данных. В данных системах могут быть использованы различные сетевые топологии:
- Сотовая топология сети (cellular topology) [Mayne W.H., 1956, Seismic Surveying. U.S. Patent. No. 2.732.906.], в которой модули объединяются в ячейки и взаимодействуют только с узлом ячейки. Обмен информацией между ячейками и центральным устройством (хабом) осуществляется только через приемо-передающее устройство узла ячейки;
- Ячеистая топология сети (mesh network topology) [Landa E., Shtivelman V., Gelchinsky B. A method for detection of diffracted waves on common-offset sections //Geophysical prospecting. – 1987. – Т. 35. – №. 4. – С. 359-373.], в которой к любому узлу сети ведут не менее двух маршрутов;
- Топология типа гирлянда (daisy chain topology) [Khaidukov V., Landa E., Moser T. J. Diffraction imaging by focusing-defocusing: An outlook on seismic superresolution //Geophysics. – 2004. – Т. 69. – №. 6. – С. 1478-1490.], при которой узлы связываются в цепочку двухточечными соединениями;

- и т.д..
- Выполнение сейсмического наблюдения с мониторингом процесса регистрации сейсмоданных и технического состояния полевых модулей путем пересылки в ЦРК в режимах, отличных от реального времени, только основных атрибутов выбранных трасс и данных оценки результатов тестирования полевых модулей, используемых для оценки функционирования расстановки. Каждый полевой модуль имеет независимую, двунаправленную связь с ЦРК. «полуавтономные» системы. В основе сети наблюдения, реализуемой данными системами, лежит звездообразная сетевая топология (star topology) [Zhu X., Wu R. S. Imaging diffraction points using the local image matrix in prestack migration //2008 SEG Annual Meeting. – OnePetro, 2008.].
- Выполнение сейсмического наблюдения без мониторинга процесса регистрации сейсмоданных и технического состояния полевых модулей со стороны ЦРК. Так называемая «слепая регистрация», «автономные» системы.
- В свою очередь автономные сейсмические системы, могут отличаться способами формирования временных меток для разделения трасс и формирования информации о пространственном положении нода:
- В первой подгруппе нодальных сейсмических систем приемник GPS может устанавливаться в каждом полевом модуле (ноде) и использоваться для локализации модуля на местности и/или, по крайней мере, для обеспечения временной синхронизации.
- Во второй подгруппе НСС может быть использован альтернативный подход, не требующий установки дорогих GPS приемников в каждый модуль и обеспечения контроля их работоспособности. Этот подход предполагает использование одного GPS приемника, встроенного в радиопередатчик, передающего информацию о времени для всех полевых модулей одновременно. При этом в каждом из модулей должен иметься радиоприемник. Полевые модули НСС размещаются на профиле рабочим, имеющим GPS приемник и устройство хранения информации о координатах положения модулей на профиле, которые впоследствии переносятся в базу данных системы. Таким образом, структура полевых модулей существенно упрощается, снижается их стоимость и потребление энергии. В этом случае обслуживание требуется всего лишь для нескольких GPS приемников, а однонаправленный радиоканал может быть использован, в случае необходимости, для перевода полевых модулей в режим экономии энергии.

Необходимо отметить, что и это разделение достаточно условное, поскольку возможны и другие варианты позиционирования полевых модулей с установкой GPS лишь в несколько модулей [Moser T. J., Howard C. B. Diffraction imaging in depth //Geophysical Prospecting. – 2008. – Т. 56. – №. 5. – С. 627-641.],[Kremlev A. N. et al. Fracture and cavernous reservoirs prospecting by the CSP prestack migration method //73rd EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2011. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2011. – С. cp-238-00052.].

Рассмотрим технические характеристики некоторых современных бескабельных телеметрических сейсморегистрирующих систем зарубежного и отечественного производства.

НСС «SIGMA» разработана компанией iSeis, [Popovici A. M., Sturzu I., Moser T. J. High resolution diffraction imaging of small scale fractures in shale and carbonate reservoirs //SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference. – OnePetro, 2015.] основанной специально для создания нового типа наземной сейсморегистрирующей системы. Основателем компании iSeis является компания Seismic Source Company (SSC), известный разработчик и поставщик различного оборудования и программных продуктов, используемых для управления источниками возбуждения и контроля качества. НСС «SIGMA» может работать в одном из 4-х режимов регистрации сейсмоданных:

- Автономный режим регистрации;
- Режим работы в сети с узловой структурой (Mesh Radio Network);
- Режим беспроводной связи в стандарте Wi-Fi с полным возвратом данных в ЦРК;
- Смешанный режим.

Автономный режим регистрации сейсмоданных.

Обеспечение в каждом полевом блоке сбора данных точного отсчета времени позволяет выполнять операции по сбору сейсмоданных «вслепую». Широкий выбор периода квантования, установок предусилителя, встроенная память емкостью до 32 Гбайт и внешний источник питания обеспечивают НСС «SIGMA» широкие функциональные возможности даже в этом простейшем режиме регистрации сейсмоданных.

Режим работы в сети на основе Mesh технологии.

Обеспечив одному или нескольким блокам сбора данных системы возможность работы в режиме узловой радиосвязи, можно вывести систему на новый уровень работы. Активные блоки сбора данных теперь могут

контролироваться из ЦРК. Оператор может получать информацию о техническом состоянии активных блоков, GPS информацию, данные о состоянии аккумуляторов и объеме загруженной памяти, результаты тестирования геофонов. Особенно данный режим полезен для получения в ЦРК информации о шуме на профиле. Активные блоки могут быть использованы в качестве ретрансляторов данных для активных блоков, испытывающих трудности с прохождением радиосигналов.

Режим Wi-Fi с возвратом данных в ЦРК в процессе их регистрации.

При обеспечении автономным блокам возможности работы в режиме беспроводной связи в стандарте Wi-Fi (не лицензируемый диапазон радиочастот) в ЦРК передается вся регистрируемая блоками сейсмическая информация. Для увеличения дальности связи можно использовать блоки Wi-Fi ретрансляторов.

Смешанный режим.

Для достижения оптимальной производительности и высокого качества регистрируемой сейсмической информации используется смешанный режим (автономный, узловая радиосвязь, режим Wi-Fi) работы блоков сбора данных в сейсмической расстановке.

В системе обеспечена возможность «горячей» замены батарей, а также включения, при необходимости, блоков сбора данных в режим экономного потребления энергии (в режиме узловой радиосвязи).

В НСС «SIGMA» предусмотрено несколько способов съема информации из блоков сбора данных:

- Съем информации с помощью Wi-Fi связи. Данные могут быть считаны из блоков сбора данных и переданы в ЦРК при наличии связи Wi-Fi. В случае необходимости могут быть использованы блоки-ретрансляторы. Если связь в этом диапазоне не стабильная, то можно считывать данные, находясь в непосредственной близости от блоков.
- Съем данных с помощью компьютера путем подключения его непосредственно к блоку. Эта операция может быть выполнена даже в процессе регистрации данных.
- При использовании в блоках связи Wi-Fi для съема данных, не переданных в ЦРК, может быть использован мини-транспортёр. В этом случае данные и результаты контроля качества не контролируются.
- Данные могут быть считаны с помощью устройства, установленного на автомобиле, при перемещении блоков на профиле.

- При необходимости съема данных с большого числа блоков (от тысячи и выше) может быть использовано специальное оборудование, установленное в кунге автомобиля или в офисе. При этом формируются файлы данных и обеспечивается полный контроль качества зарегистрированных данных.

Технические параметры НСС «SIGMA» приведены в таблице 1.

Таблица 1. Технические параметры НСС «SIGMA»

Наименование параметра	Значение параметра
1	2
Общие характеристики системы	
Максимальное число каналов	50000 каналов
Режимы работы	Автономный В реальном времени Смешанный
Длительность записи	30 дней непрерывной записи/3 канала/2 мс
Выходной формат записи	SEG-Y, SEG-D
Блок сбора данных	
Число каналов в блоке	3 канала
АЦП	24 разряда
Внутренняя память	16 Гбайт (FAT16)– стандарт или 32 Гбайт (FAT32) по заказу
Внешняя батарея	12 В
Точность временной синхронизации	± 1 мкс для всех шагов квантования
Макс. входной сигнал	3,58 В р-р
Входное сопротивление	100 кОм
Частотный диапазон	0 – 15 кГц
Общий динамический диапазон	144 дБ
Потребляемая мощность (регистрация)	3,48 Вт
Потребляемая мощность (спящий режим)	0,012 Вт
Вес с внутренней батареей	5,7 кг
Встроенные тесты	
- системные тесты	Точность усиления Реакция на импульс Уровень шума Динамический диапазон Взаимные влияния КНИ
- тесты геофона	Сопротивление Собственная частота Коэффициент затухания
Индикация технического состояния блока	Двухцветные светодиоды
Тип используемых датчиков	Геофоны, гидрофоны

НСС «wirelessSeismic» является продуктом деятельности компании Wireless Seismic Inc. (США), созданной в 2006 г. с целью разработки новой бескабельной сейсморегистрирующей системы. При создании новой НСС разработчики компании руководствовались следующими принципами

[Anikonov Y. E., Bubnov B. A., Erokhin G. N. Inverse and ill-posed sources problems //Inverse and Ill-Posed Sources Problems. – De Gruyter, 2013.]:

- сейсмические исследования без использования кабелей обеспечивают снижение численности партий и упрощение операций, связанных с перемещением оборудования;
- передача сейсмической информации в реальном времени обеспечивает отказ от сбора полевых блоков для съема с них информации;
- отказ от принципа сохранения информации в полевых блоках обеспечивает устранение ситуаций, при которых может быть потеряны данные из-за потери блока или неисправности оборудования;
- отказ от перезаписи информации из блоков обеспечивает своевременное получение данных;
- бескабельное и легкое оборудование обеспечивает минимальное воздействие на окружающую среду и безопасные условия труда;
- возможность свободного размещения датчиков обеспечивает адаптивную геометрию сейсмических наблюдений;
- широкий набор встроенных тестов обеспечивает полный контроль работоспособности оборудования;
- использование радиодиапазона 2.4 ГГц обеспечивает снижение мощности радиопередатчиков и отсутствие проблем с лицензированием;
- использование перезаряжаемых литиево-ионных батарей с возможностью их «горячей» замены обеспечивает увеличение длительности периода нахождения блока на профиле, снижение веса оборудования.

В результате была создана НСС каждый полевой модуль, которой содержит, помимо аналоговой схемотехники и 24-разрядного АЦП, микропроцессор и радиостанцию, работающую в диапазоне 2.4 ГГц. Помимо полевых блоков сбора данных, в состав полевого оборудования входят базовые станции, обеспечивающие обмен информацией с полевыми блоками по радиоканалу и между собой и компьютером центральной системы по оптоволоконному кабелю.

Технические параметры СНСС «wirelessSeismic» представлены в таблице 2.

Таблица 2. Технические параметры СНСС «wirelessSeismic»

Наименование параметра	Значение параметра
1	2
Число каналов в блоке сбора данных	1 или 3 в зависимости от модели блока
АЦП	24 разряда
Нелинейность	$\pm 0,001$ %
Максимальный входной сигнал	$\pm 5,2; 2,5; 1,25; 0,625; 0,3125; 0,15625; 0,078$ В, в зависимости от усиления предусилителя
Вход предусилителя	Дифференциальный
Входное сопротивление	5 кОм
Запуск регистрации	По радио, замыкание/размыкание контактов, сигналом геофона
Питание базовой станции	12 В перезаряжаемая батарея
Максимальное число блоков сбора данных на одну базовую станцию	От 50 до 100 блоков
Максимальное расстояние между блоками сбора данных	> 100 м в пределах прямой видимости
Используемый радиодиапазон	2,4 ГГц
Диагностика и тесты	Контроль микросейсм, напряжение батареи, шум, КНИ, работоспособность геофона

НСС «GSR» [Alekseev A. S., Erokhin G. N. Integation in geophysical inverse problems (Integrated Geophysics) //USSR Academy of Sciences Proceedings. – 1989. – Т. 308. – №. 6. – С. 1327-1331.] создана компанией OYO GEOSPACE (США) в 2007 г. НСС «GSR» является автономной бескабельной системой сбора и хранения сейсмоданных. Система включает:

- Систему управления данными GSR GeoRes-ХТС;
- Полевые ноды сбора данных GSR;
- Модуль переноса данных DTM.

Отличительными особенностями системы являются:

- 24-разрядная оцифровка сейсмических сигналов;
- Встроенные GPS и синхронизируемые часы;
- Встроенный генератор тест-сигналов с высоким разрешением;
- Флэш-память;
- Возможность наращивания системы до 50000 и более каналов;
- Непрерывная запись в течение 30 суток и более;
- Светодиодный индикатор, сообщающий о состоянии прибора и его готовности к работе;

- Радиочастотный идентификатор-транспондер для ускорения обнаружения прибора на местности и на складе;
- Прием сигналов от стандартных аналоговых датчиков.

Полевой модуль GSR спроектирован для записи сейсмоданных без использования кабелей и радиоканала. Автономный полевой блок включает в себя от одного до 4-х каналов с 24-разрядной оцифровкой, встроенный высокочувствительный GPS-приемник, тактовый генератор, встроенный генератор тест-сигналов, энергонезависимую память емкостью до 4 Гбайт на канал и высокоскоростной порт для передачи данных. При потере сигнала GPS тактовый генератор может сохранять точное время в течение нескольких часов. В одноканальном варианте полевой модуль может иметь встроенный высокочувствительный геофон, вместо обычного использования 6 геофонов и суммирования их выходных сигналов.

НСС «GSR» может выполнять тестирование работоспособности цепи каждого сейсмического канала и геофонов. Пользователь может на свой выбор задать программу тестирования – частичную или полную. По желанию пользователя можно вывести либо все результаты тестирования, либо только данные о неполадках. Собираемые и используемые для анализа данные записываются во флэш-память полевого блока GSP. При проведении тестов программа автоматически управляет переключателем входов каналов и параметрами генератора тест-сигналов. Все тесты проводятся с использованием текущих заданных значений частоты дискретизации и коэффициента усиления предварительного усилителя.

Перечень возможных тестов включает:

- КНИ;
- Реакция на импульс;
- Эквивалентный входной шум;
- Шум геофона;
- Мгновенный динамический диапазон;
- Амплитудная неидентичность;
- Подавление синфазного сигнала;
- Полное сопротивление и суммарные гармонические искажения геофонов;
- Омическое сопротивление геофонов.

Технические параметры блока сбора данных GSR приведены в таблице 3.

Таблица 3. Технические параметры блока сбора данных GSR

Наименование параметра	Значение параметра
1	2
Общие характеристики системы	
Режим регистрации сейсмоданных	Автономный
Максимальное число каналов в системе	> 50000 каналов
Длительность записи	Непрерывная в течение >30 суток
Выходной формат данных	SEG-D или SEG-2
Блок сбора данных	
Число каналов	1, 2, 3 или 4 канала
АЦП	24 разряда
Частотный диапазон	0 – 1600 Гц
Отклонение от стандартного времени	< 1 мксек
Емкость внутренней флэш-памяти	До 4 Гбайт на канал
Полный динамический диапазон	140 дБ
Временной стандарт	< 1 мкс
Внешняя батарея питания	12 В
Рабочий температурный диапазон	-40°C - +85°C
Влажность	0 – 100 %
Вес	0.9 кг
Габариты	89 x 76.2 x 169.4 мм

НСС «Z Land» [Fink M. Time-reversed acoustics //Scientific American. – 1999. – Т. 281. – №. 5. – С. 91-97.] создана и выпускается компанией Fairfield Industries (США) с 2008 г. Система «Z Land» является сухопутным вариантом сейсморегистрирующих систем Z-3000 и Z-700, разработанных компанией Fairfield Industries для реализации, так называемой, Z-узловой технологии сбора сейсмоданных, реализуемой с помощью автономных блоков сбора сейсмоданных, размещаемых на дне любого водоема - как на большой глубине (океан, море), так и на незначительной глубине (шельф, мелководье, озера, реки, транзитные зоны и т.д.). По мнению специалистов компании Fairfield Industries новым технологиям проведения сейсморазведочных работ в наибольшей степени отвечают НСС с полностью автономными блоками сбора данных, включающие: датчик (обычно геофон), батарею, систему управления и контроля, АЦП, фильтр, память и высокоточные часы. Не имея необходимости связи с ЦРК, эти НСС должны иметь в своем составе полевые блоки сбора данных, контейнер для полевых блоков, координатор источника возбуждения, блок съема данных и сортировщик данных.

По мнению специалистов компании Fairfield Industries следующее поколение сухопутных сейсморегистрирующих систем должно отвечать следующим требованиям:

- Полностью автономные узлы сбора данных, свободные от кабелей и разъемов;
- Технические параметры аналоговой части должны соответствовать или превосходить параметры существующих сейсморегистрирующих систем;
- Время непрерывной автономной работы должно быть не менее 288 часов;
- Допустимая интенсивность отказов полевого оборудования должна составлять не более 6 отказов в день для 10000 канальной расстановки;
- Связь блока сбора данных с грунтом должна быть не хуже связи с грунтом обычного геофона.

Технические параметры НСС «Z Land» представлены в таблице 4.

Таблица 4. Технические параметры НСС «Z Land»

Наименование параметра	Значение параметра
1	2
Полевой блок сбора данных ARU	
Число каналов в автономном блоке (ARU)	1 канал
АЦП	24 разряда
Точность отчета времени	± 100 мкс, синхронизировано с GPS
Емкость внутренней флэш-памяти	2 Гбайта
Интерфейс обмена данными	
- при размещении на профиле	RS232
- при съеме сейсмоданных	Высокоскоростной, последовательный, собственной разработки
Состояния блока, отображаемые светодиодами	Питание включено, Регистрация, Ошибка
Питание	Литиево-ионная батарея На 288 часов непрерывной работы блока Время заряда не более 5 часов 300 циклов заряда
Габаритные размеры	
- высота	15,2 см
- диаметр	12,7 см
Штырь	12,7 см
Вес	2,0 кг

НСС «РОСА-А» [Tarantola A. Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation: Geophysics. – 1984.] (АР «РОСА-А» разработана и выпускается ФГУП «СНИИГГиМС» (Россия). Система является автономной бескабельной нодальной системой сбора и хранения сейсмоданных и имеет следующие функциональные возможности:

- Возможность организации сейсмического мониторинга;

- Практически неограниченное число сейсмических каналов;
- Экономичность, отсутствие необходимости в аналого-цифровых кабелях;
- Многоуровневое защищенное хранение и высокая скорость передачи больших объемов информации на основе файловой системы FAT16;
- Высокоточная внешняя синхронизация по сигналам системы GPS;
- Оперативный многооперационный контроль системы регистрации сейсмических данных в полевых условиях с документированием результатов в виде файлов во встроенной Флэш-памяти;
- Широкий частотный диапазон регистрации: до 3,2 кГц при шаге квантования 0,125 мс;
- Возможность использования цифровых акселерометров, выполненных по MEMS-технологии;
- Возможность работы в особо сложных условиях эксплуатации.

В состав автономного полевого нода системы АР «РОСА-А», структурная схема которого приведена на рисунке 8, входят следующие основные функциональные блоки:

- Четырехканальный 24-разрядный АЦП;
- Устройство управления;
- Блок внутреннего контроля;
- Генератор тестовых сигналов;
- Твердотельная Флэш-память;
- GPS-приемник;
- Высокостабильный термостатированный тактовый генератор;
- USB интерфейс.

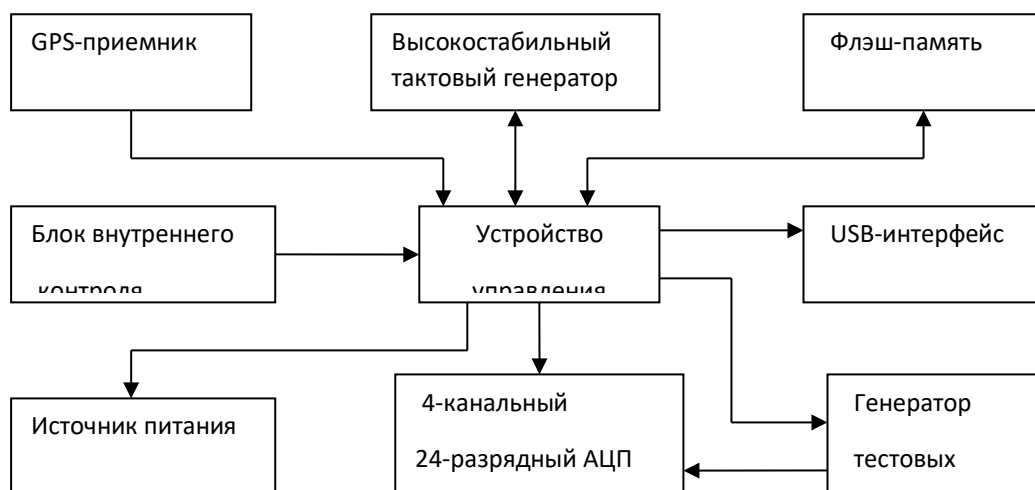


Рисунок 8 – Структурная схема АР «РОСА-А»

Конструктивно 4-канальный автономный модуль реализован на двух печатных платах. Устройство управления выполняет следующие основные функции:

- настройка АЦП в соответствии с выбранным режимом регистрации;
- синхронизация внутренних часов модуля;
- управление режимами энергосбережения и регистрации;
- мониторинг технического состояния модуля.

Внутреннее программное обеспечение модуля хранится в перезаписываемой Флэш-памяти, объем которой достаточен для возможных расширений и модернизаций.

При программировании режима работы АЦП, помимо задания частоты квантования и коэффициента усиления, возможно конфигурирование входов АЦП на работу с внутренним генератором тестовых сигналов для диагностики параметров канала регистрации без использования дополнительных приборов.

В ноде реализовано два варианта синхронизации внутреннего времени: с использованием GPS-приемника и, при нестабильном приеме радиосигналов, при помощи встроенного высокостабильного тактового генератора.

Источник питания модуля (внешний аккумулятор 12 В, 30 Ач) обеспечивает питанием самый энергоемкий непрерывный режим регистрации в течение 10 суток.

В качестве энергонезависимой памяти используются промышленные флэш-карты, с возможностью их замены и считывания отдельно от устройства. Для записи информации на карту используется стандартная

файловая система FAT16, которая обеспечивает многоуровневое защищенное хранение и высокую скорость переноса на другие носители больших объемов информации.

Конфигурирование модуля, а также съем служебной и зарегистрированной сейсмической информации осуществляются путем подключения компьютера к USB интерфейсу модуля. При этом модуль представляется пользователю как жесткий диск, на который, используя соответствующие программные средства, можно занести информацию о предстоящих сеансах работы, считать тестовую информацию о состоянии модуля, GPS, данные о проведенных сеансах наблюдений и т.п., а также файлы с сейсмическими данными для последующего просмотра, обработки и хранения.

Технические параметры АР «РОСА-А» приведены в таблице 5.

Таблица 5. Технические параметры АР «РОСА-А»

Наименование параметра	Значение параметра
Число каналов	4
АЦП	24 разряда
Частотный диапазон	0 – 3200 Гц
Потребляемая мощность в рабочем режиме	< 1,7 Вт/канал
Источник питания	Внешний аккумулятор (12 В, 30 Ач)
Габариты	245x105x70 мм
Рабочий температурный диапазон	-40°С до +60°С
Погрешность синхронизации GPS	< 0,1 мкс
Объем энергонезависимой памяти	До 4 Гб
Время автономной работы	Не менее 10 суток

Анализ технического уровня нодальных сейсмических систем с беспроводными каналами передачи данных.

Анализ данных, приведенных в таблицах 1–5 данных показывает, что технические параметры тракта регистрации сейсмоданных у всех рассмотренных НСС отличаются столь незначительно, что нагляднее было бы рассмотреть и сравнить их функциональные возможности.

Результаты сравнения функциональных возможностей различных НСС представлены в таблице 6.

Таблица 6. Результаты сравнения функциональных возможностей различных НСС

Функциональные возможности	SIGMA	wireless Seismic	GSR	Z Land	POCA A
1	3	4	7	8	9
Передача всех данных в ЦРК в режиме реального времени	√	√	X	X	X
Передача данных контроля состояния профиля в ЦРК	√	√	X	X	X
Передача данных контроля качества сейсмической информации в процессе регистрации в ЦРК	√	X	X	X	X
Контроль технического состояния полевого модуля	√	√	√	√	√
Передача данных контроля технического состояния полевого модуля в ЦРК	√	√	X	X	X
Работа в автономном режиме	√	X	√	√	√
Наличие встроенной GPS	√	X	√	√	√
Использование аналоговых геофонов	√	√	√	√	√
Наличие внутренней батареи	√	√	X	√	X
Возможность подключения внешней батареи	√	√	√	X	√
Съем сохраненных в модулях данных в поле	√	X	X	X	√
Съем сохраненных в модулях данных на базе партии	√	X	√	√	√

√ – данная функциональная возможность реализована

X – данная функциональная возможность не реализована

Анализ данных, представленных в таблицах 1–5 и таблице 6 показывает, что все рассмотренные НСС можно разделить на следующие группы:

- НСС SIGMA и wireSystem являются сетевыми НСС;
- НСС GSR, Z Land и POCA-A являются автономными НСС.

Анализ сетевых архитектур, реализованных в НСС первой группы, показывает следующее:

- в НСС SIGMA реализована классическая иерархическая структура сети наблюдения (сотовая топология сети), приспособленная для синхронного сбора данных, с использованием технологий радиопередачи данных на короткие и длинные расстояния, что обеспечивает возможность передачи данных от полевых модулей в ЦРК в режиме реального времени. Наличие полуавтономного и автономного режимов регистрации существенно повышает устойчивость системы к неблагоприятным условиям передачи данных по радиоканалу и расширяет ее функциональные возможности.
- в НСС wirelessSeismic сеть функционирует в мостовом режиме. При этом полевые модули линий наблюдения объединены в подсети, выполненные с использованием топологии типа гирлянда. В свою очередь, подсети и ЦРК объединены в общую сеть оптоволоконным кабелем. Естественно, что данная НСС имеет меньшие возможности в реализации различных сейсмических расстановок по сравнению с SIGMA, поскольку скорость передачи данных по оптоволоконному кабелю ограничена.

Фактически НСС находятся в начале своего развития, однако уже сейчас можно наметить следующие основные направления, по которым, развиваются и, по-видимому, будут развиваться ТСС данного типа:

- Обеспечение максимальной канальности системы.
- Обеспечение максимальной длительности регистрации.
- Обеспечение максимальной надежности работы полевого оборудования.
- Обеспечение максимальной производительности.

Для автономных НСС достаточно остро встает вопрос контроля состояния профиля в процессе регистрации, контроля технического состояния полевого оборудования и, соответственно, его надежности, а также контроля качества зарегистрированной информации.

Обеспечение максимальной длительности регистрации особенно необходимо для НСС, используемых для мониторинга месторождений. Этот параметр определяется объемом встроенной памяти, потреблением энергии электроникой НСС, организацией оптимального режима регистрации, емкостью используемых батарей питания (внутренней и внешней), возможностью «горячей» замены внешней батареи.

Проблема обеспечения высокой надежности работы оборудования особенно важна для автономных НСС, не имеющих обратной связи с ЦРК в

реальном времени. При этом технические параметры полевых блоков данных НСС должны обеспечивать возможность автономной работы не менее 288 часов или 24 дня при 12-часовой загрузке в день. Блоки должны иметь чрезвычайно высокую надежность работы.

Наиболее важными факторами, влияющими на производительность НСС, являются:

- Вес оборудования;
- Энергия, потребляемая наземной электроникой;
- Используемые батареи питания и управление системой питания;

Сравнение отдельных узлов наиболее известных на рынке нодальных высококомобильных сейсмических систем приведено в таблице 7.

Таблица 7. Сравнение отдельных узлов наиболее известных на рынке нодальных высококомобильных сейсмических

Производитель	Тип датчика	Автономность	Вес	Возможность самотестирования нода	Объем памяти	Разрядность АЦП	Размеры	Полоса
Sercell WiNG DFU [1]	MEMS акселерометр	1200ч	830 г	есть	Нет данных	24бит	112х137х118	от 3 Гц
GTI NuSeis NRU 1C [2]	геофон	600ч	690 г	есть	8-64 Гб	24бит	54х209	от 5 Гц
Geospace GCR [3]	геофон	1440ч	1260г	есть	32/64 Гб	24бит	140х110х178	от 10 Гц
Inova Quantum [4]	геофон	1200ч	650 г	нет	8/16 Гб	24бит	109х98х107	от 5 Гц
DTCC SmartSolo IGU-16(HR) [5]	геофон	600ч	1100г	нет	8-32 Гб	24бит	95х103х1118	от 5 Гц
Stryde/BP Nimble node [6,7]	Пьезо акселерометр	672ч	150 г	нет	нет данных	нет данных	130х40	от 10 Гц
Wireless Seismic RT3 [8]	геофон	648ч	1000г	нет	8 Гб	24/32 бит	Нет данных	от 10 Гц

1 – [Xie X. B., Wu R. S. Extracting angle domain information from migrated wavefield //SEG technical program expanded abstracts 2002. – Society of Exploration Geophysicists, 2002. – С. 1360-1363.]

- 2 – [’t Root T. J. P. M. O., Stolk C. C., Maarten V. Linearized inverse scattering based on seismic reverse time migration //Journal de mathématiques pures et appliquées. – 2012. – Т. 98. – №. 2. – С. 211-238.]
- 3 – [Xie X. B. An angle-domain wavenumber filter for multi-scale full-waveform inversion //2015 SEG Annual Meeting. – OnePetro, 2015.]
- 4 – [Whitmore N. D., Crawley S. Applications of RTM inverse scattering imaging conditions //2012 SEG Annual Meeting. – OnePetro, 2012.]
- 5 – [Alkhalifah T. Scattering-angle based filtering of the waveform inversion gradients //Geophysical Journal International. – 2014. – Т. 200. – №. 1. – С. 363-373.]
- 6 – [Biondi B. L. 3D seismic imaging. – Society of Exploration Geophysicists, 2006.]
- 7 – [Koren Z., Ravve I. Full-azimuth subsurface angle domain wavefield decomposition and imaging Part I: Directional and reflection image gathers //Geophysics. – 2011. – Т. 76. – №. 1. – С. S1-S13.]
- 8 – [Ren L. et al. Suppressing artifacts in 2D RTM using the Poynting vector //Near Surface Geophysics Asia Pacific Conference, Beijing, China 17-19 July 2013. – Society of Exploration Geophysicists, Australian Society of Exploration Geophysicists, Chinese Geophysical Society, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists, and Society of Exploration Geophysicists of Japan, 2013. – С. 484-487.]

На рисунке 9 представлено сравнение внешнего вида и габаритов отдельных узлов.



Рисунок 9 – Слева направо: верхний ряд - SmartSolo IGU-16, NuSeis NRU-1C, Quantum, GCR; нижний ряд – WiNG DFU, RT3, Nimble node

2.2 Разработка спецификации требований к нодальной высокоомобильной сейсмической системе с беспроводными каналами передачи данных

Анализ данных, приведенных выше, показывает, что современные нодальные сейсморегирующие системы, должны отвечать следующим основным требованиям:

Отдельные измерительные модули, ноды:

Технические характеристики должны отвечать следующим требованиям:

- широкий частотный диапазон – от единиц Гц до нескольких сотен Гц;
- разрядность АЦП – 24 разряда;
- динамический диапазон – не менее 120 дБ;
- наличие в тракте записи или в тракте воспроизведения фильтров ФНЧ, ФВЧ и РФ с широким набором частот среза;
- скорость передачи данных по беспроводному каналу - не хуже 50 кБит/сек;
- наличие интерфейса связи с внешним компьютером;
- наличие внутренней памяти большой емкости, предназначенной для хранения зарегистрированных данных, с возможностью ее расширения;
- возможность перепрошивки микропрограмм;
- развитое программное обеспечение, обеспечивающее широкий набор возможностей получения сейсмической информации высокого качества;
- широкий набор средств диагностики, как технического состояния аппаратуры самой сейсмостанции, так и геофонов в расстановке.
- непрерывная регистрация, мониторинг с GPS синхронизацией;
- надежное и гибкое полевое оборудование, обеспечивающее: непрерывную регистрацию или регистрацию только по запуску; «горячую» замену аккумуляторных батарей; корреляцию и накопление данных непосредственно в полевом модуле, либо передачу необработанных данных в компьютер системы;
- развитое программное обеспечение, обеспечивающее широкий набор возможностей получения сейсмической информации высокого качества;

Технические характеристики современных нодальных сейсморегистрирующих систем, должны отвечать следующим требованиям:

- обеспечение высокой производительности разведочных работ;
- возможность реализации сейсмической расстановки с большим числом каналов;
- широкий частотный диапазон (от единиц Гц до нескольких сотен Гц) регистрируемых сейсмических сигналов;
- разрядность АЦП – 24 разряда;
- обеспечение в сетевых НСС возможности передачи данных от полевых модулей в ЦРК в режиме реального времени, со скоростями не менее 50 кБит/сек;
- наличие в сетевых НСС полуавтономного и автономного режимов регистрации;
- обеспечение длительности регистрации не менее 24 суток при 12-часовой загрузке в день;
- наличие внутренней батареи с большой энергоемкостью;
- низкий уровень энергопотребления полевыми блоками;
- обеспечение максимальной надежности работы полевого оборудования;
- обеспечение в сетевых НСС возможности контроля качества сейсмической информации в процессе ее регистрации и передачи результатов контроля в ЦРК;
- обеспечение контроля и визуальной индикации технического состояния полевых модулей;
- обеспечение в сетевых НСС возможности передачи данных контроля технического состояния полевых модулей в ЦРК;
- обеспечение синхронизации внутреннего тактового генератора сигналами GPS;
- обеспечение возможности регистрации трехкомпонентных данных;
- обеспечение возможности съема сохраненных в модулях данных в поле;
- обеспечение возможности съема, сортировки и временной привязки сохраненных в модулях данных;

- обеспечение доступной стоимости оборудования;
- обеспечение низких затрат на работу с оборудованием в поле;
- снижение степени воздействия на окружающую среду;
- полное удовлетворение требований охраны труда и техники безопасности в процессе выполнения полевых работ.

3 Разработка модели механической конструкции

высокомобильного малогабаритного цифрового сейсмического модуля, обладающего возможностью по беспроводной передаче данных в условиях динамически изменяющегося внешнего окружения.

Моделирование высокомобильного малогабаритного цифрового сейсмического модуля разрабатывалась с использованием средств современного проектирования SolidWorks, широко применяемым в производстве. САПР позволяет создавать модель объекта максимально схожего с оригиналом, учитывая материалы элементов и их соединения между собой. Это позволяет обнаруживать проблемы на ранней стадии и снижать количество технических изменений на дальнейших этапах проекта.

По трехмерной модели система позволяет определить ее физические характеристики: габаритные размеры, объем, координаты центра тяжести, массу и т.д.

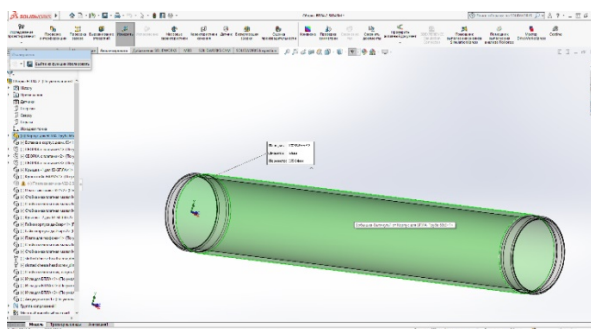
При разработке высокомобильного малогабаритного цифрового сейсмического модуля для использования его в наземных сейсмических системах при расстановке с помощью БПЛА учитывалось, что он должен состоять из следующих элементов:

- блок, содержащий 3 взаимно ортогональных сейсмических датчика, работоспособных в диапазоне от 0 до 180 градусов по отношению к вертикали
- блок цифровой электроники, обеспечивающий автономную регистрацию и включающий режим беспроводной передачи данных
- батарейный отсек, обеспечивающий автономную работу сейсмического модуля
- устройство для крепления сейсмического модуля на БПЛА и спуска его на грунт
- устройство для извлечения модуля из грунтов
- конструктивные элементы для размещения модуля на различных грунтах.

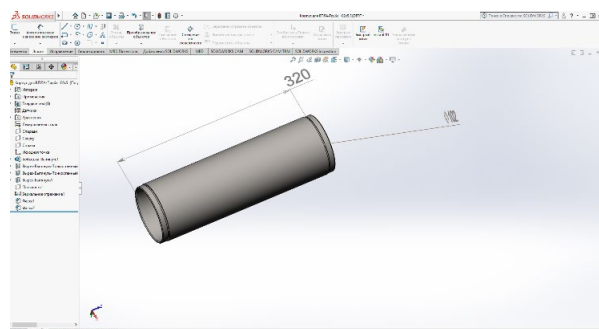
Модель высокомобильного малогабаритного цифрового сейсмического модуля на данном этапе разработана в двух исполнениях:

- в цилиндрическом корпусе из нержавеющей стали диаметром 63 мм, показанном на рисунке 10 а.

- в цилиндрическом корпусе из нержавеющей стали диаметром 102 мм, показанном на рисунке 10 б.



а



б

Рисунок 10 – 3D модель корпусов сейсмического модуля: а – исполнение корпуса диаметром 63 мм.; б – исполнение корпуса диаметром 102 мм

Диаметры данных корпусов были выбраны исходя из следующих критериев. Для каждого корпуса был определен свой цифровой блок. Так для корпуса диаметром 63 мм выбрана цифровая плата с 14-битным АЦП и имеющая габаритные размеры: длина 100 мм, ширина 43 мм, толщина (расстояние между максимально выступающими радиоэлементами) 20 мм. Для корпуса с диаметром 102 мм блок цифровой электроники, содержащий 24-битный АЦП и состоящий из 2 печатных плат с габаритными размерами: длина 90 мм, ширина 80 мм, толщина (расстояние между максимально выступающими радиоэлементами) 33 мм. Для корпуса диаметром 63 мм этот размер является минимальным для установки одного сейсмического датчика без сопутствующей электроники с осью чувствительности параллельной торцу корпуса. Размеры сейсмодатчика, модель которого показана на рисунке 11, соответственно 48xD31 мм.

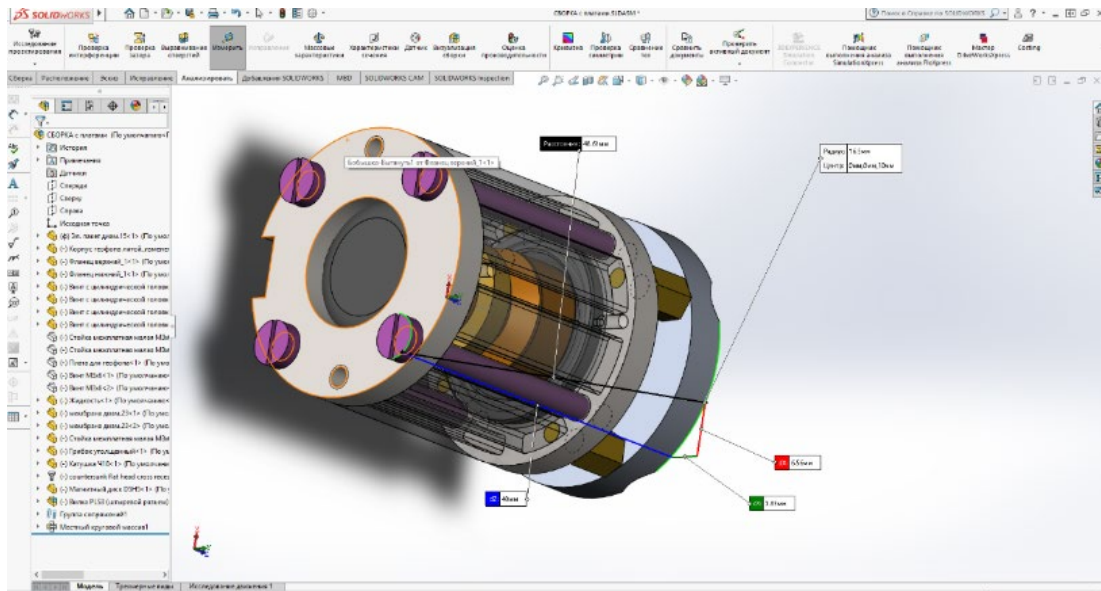


Рисунок 11 – 3D модель сейсмического датчика.

Габаритные размеры: длина 48 мм, диаметр 31 мм

Для корпуса 102 мм этот размер является минимальным для установки блока цифровой электроники, состоящей из двух печатных плат в корпус с сопутствующими разъемами и выступающими радиоэлементами, смонтированными на плату. 3D модель блока цифровой электроники показана на рисунке 12 и имеет габаритные размеры: длина 90 мм, ширина 80 мм, толщина (расстояние между максимально выступающими элементами) 33 мм.

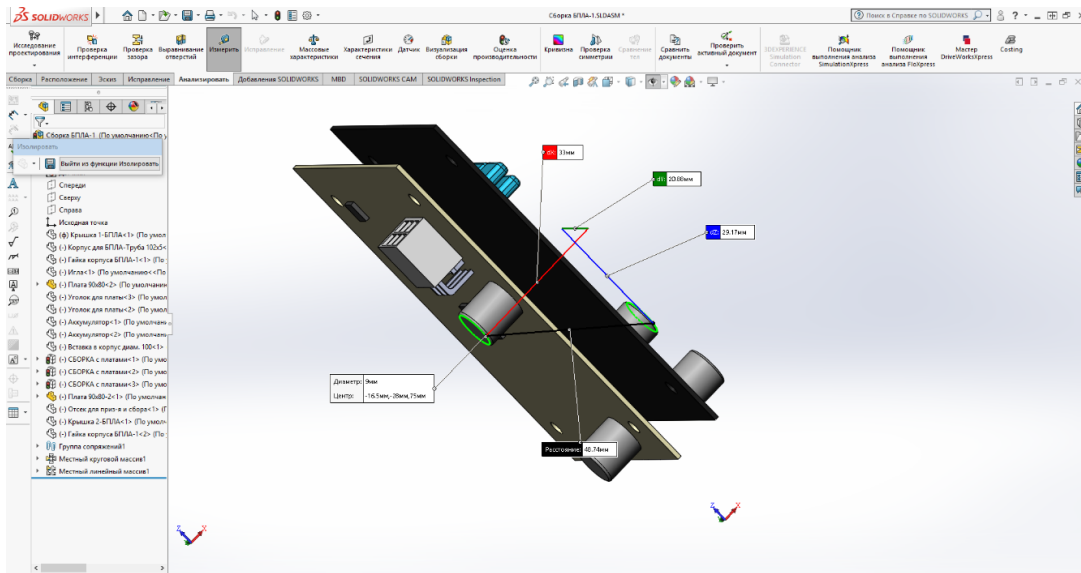


Рисунок 12 – 3D модель блока цифровой электроники с 24 битным АЦП.

Габаритные размеры: длина 90 мм, ширина 80 мм, толщина (расстояние между максимально выступающими элементами) 33 мм

Выбор материала связан с повышенными требованиями к механическим нагрузкам, в том числе ударным, которые возможны при установке или сбросе сейсмического модуля на твердые грунты. Также нержавеющая сталь

устойчива к коррозии в атмосферной и агрессивных средах, что особенно важно при работе в заболоченной местности и прибрежных районах. Термостойкость материала обеспечивает прочность и герметичность корпуса при использовании модуля в экстремальных климатических условиях. Торцевые крышки корпуса с резьбовым соединением и установленными резиновыми уплотнительными кольцами в канавки обеспечивают герметичность корпуса при погружении корпуса до 10 м. Такой способ удобен своей простотой и доступной ремонтоспособностью в процессе эксплуатации, в сравнении с неразъемной герметизацией.

На верхней крышке возможно расположение световых индикаторов работы сейсмического модуля такие как индикатор питания, поиска координат GPS, режим беспроводной передачи данных.

В обоих исполнениях сейсмический модуль содержит 3 ортогонально расположенных сейсмических датчика MTSS 1001 производства ООО «Р-Сенсорс», показанных на рисунке 11. Основной особенностью данных датчиков является их работоспособность в любой ориентации относительно вертикали. Все компоненты устанавливаются в единый цилиндрический блок, содержащий специальные ортогональные отверстия для крепления сейсмических датчиков. Данный блок обеспечивает надежное крепление датчиков в корпусе и не допускает паразитные резонансные колебания. Для модели с корпусом диаметром 102 мм датчики устанавливаются в блок вместе с электроникой, что показано на рисунке 13. Для модели с корпусом диаметра 63 мм электроника выносится на торцевую сторону блока для сохранения минимального диаметра, что показано на рисунке 14.

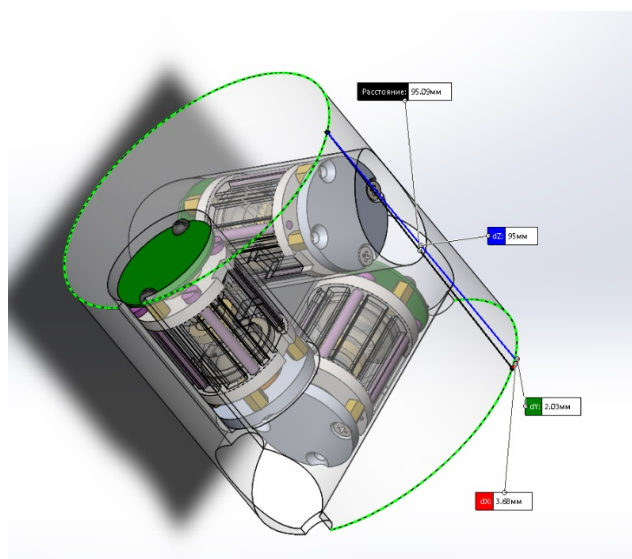


Рисунок 13 – 3D модель блока для сейсмического модуля с диаметром корпуса 102 мм, содержащего 3 ортогонально направленных сейсмических датчика вместе с сопутствующей электроникой

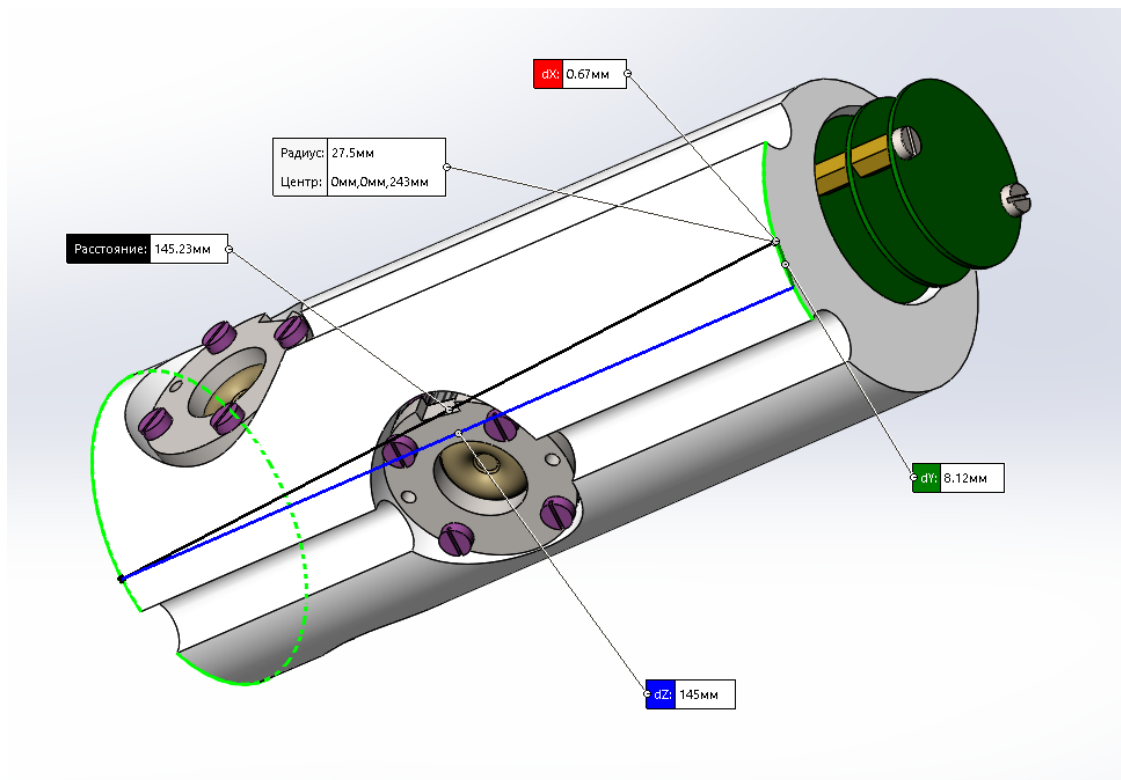


Рисунок 14 – 3D модель блока для сейсмического модуля с диаметром корпуса 63 мм, содержащего 3 ортогонально направленных сейсмических датчика, где сопутствующая электроника вынесена на торцевую сторону

Батарейный отсек содержит набор аккумуляторных батарей, обеспечивающих автономную работу сейсмического модуля. Форм фактор и емкость аккумуляторов будет определены на дальнейших этапах проекта.

Блок цифровой электроники, обеспечивающий автономную регистрацию и имеющий режим беспроводной передачи данных, представляет собой электронную плату прямоугольной формы. Для исполнения в корпусе 102 мм устанавливается в батарейный отсек, что уменьшает внешние габариты сейсмического модуля. Цифровой блок и батарейный отсек устанавливаются на нижнюю крышку сейсмического модуля, как показано на рисунке 15.

Для исполнения в корпусе 62 мм цифровая плата устанавливается в верхнюю крышку сейсмического модуля, как показано на рисунке 16.

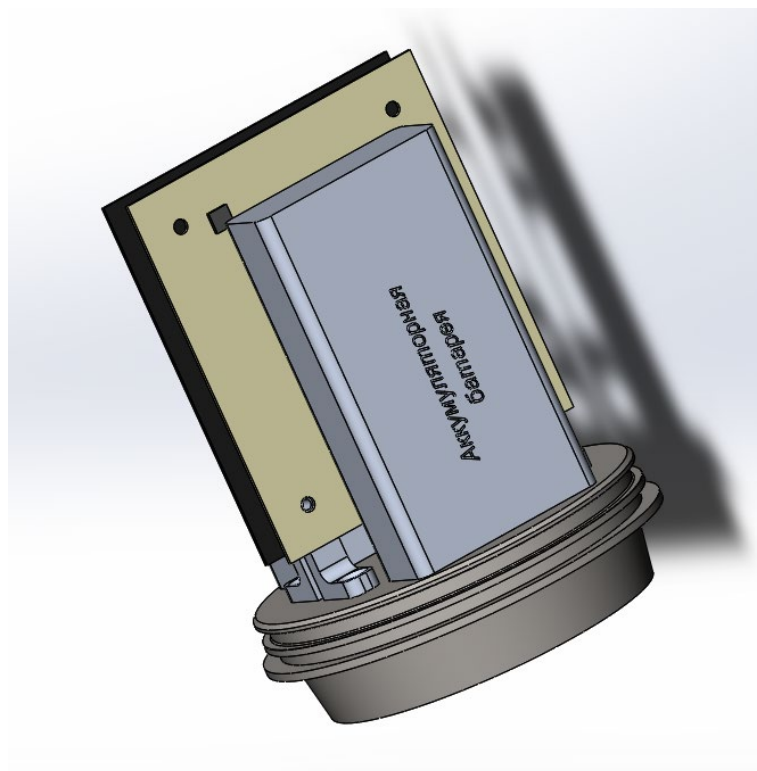


Рисунок 15 – 3D модель батарейного отсека вместе с цифровым блоком сейсмического модуля с диаметром корпуса 102 мм

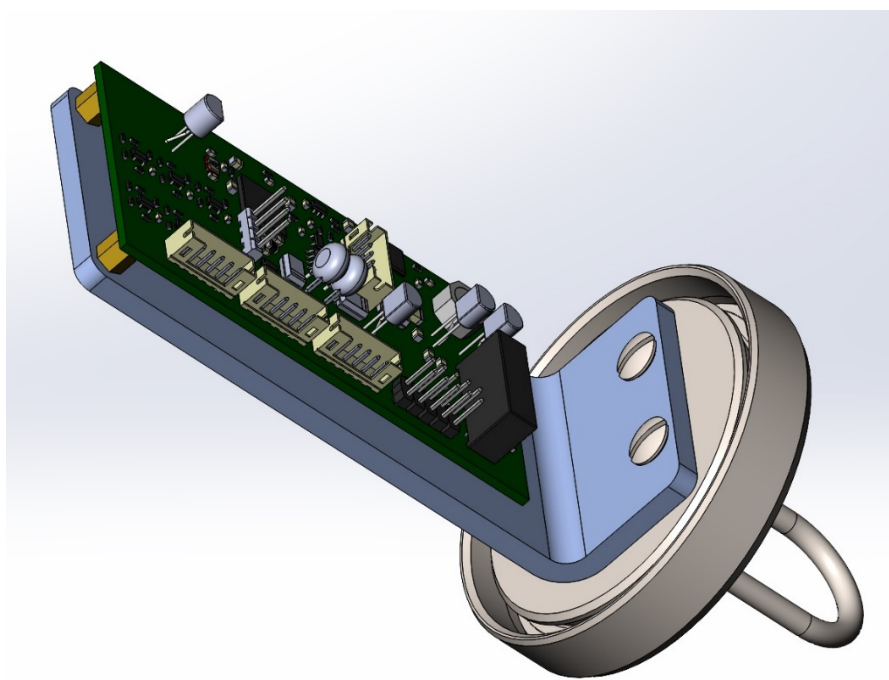


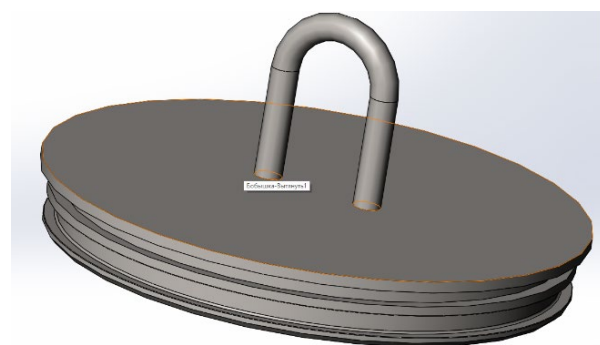
Рисунок 16 – 3D модель батарейного отсека вместе с цифровым блоком сейсмического модуля с диаметром корпуса 102 мм

Устройство для крепления сейсмического модуля на БПЛА, спуска его на грунт и извлечения его из грунта расположены на верхней крышке и в верхней части корпуса и включает:

- скоба для крепления сейсмического модуля на БПЛА. На рисунке 2.8 а показана верхняя крышка для корпуса диаметром 63 мм, на рисунке 17б показана верхняя крышка для корпуса диаметром 102 мм. На дальнейших этапах проекта крепление может изменяться для лучшей совместимости с системой крепления грузов БПЛА. Она же предназначена для снятия модуля с грунта.
- для корпуса в исполнении 102 мм отсек для устройств приземления: парашютная система. Отсек имеет габаритные размеры: длина 100 мм, диаметр 92 мм. На дальнейших этапах размеры могут изменяться под определенную модель парашютной системы. Для корпуса в исполнении 62 мм такая система на данном этапе проекта не предусмотрена.



а



б

Рисунок 17 – 3D модель верхней крышки для сейсмического модуля с диаметром корпуса 63 мм (а) и 102 мм (б)

Для установки сейсмических модулей на грунт планируется использовать несколько видов установочных ног для различных грунтов, показанные на рисунке 18:

- для сыпучих грунтов (рисунок 18а), обеспечивающих глубокое проникновение.

- для мягких грунтов рис. 18б, обеспечивающих уплотнение мягких грунтов в месте проникновения.
- для твердых грунтов рис. 18в, обеспечивающих установку на твердых грунтах с минимальной высотой опоры.

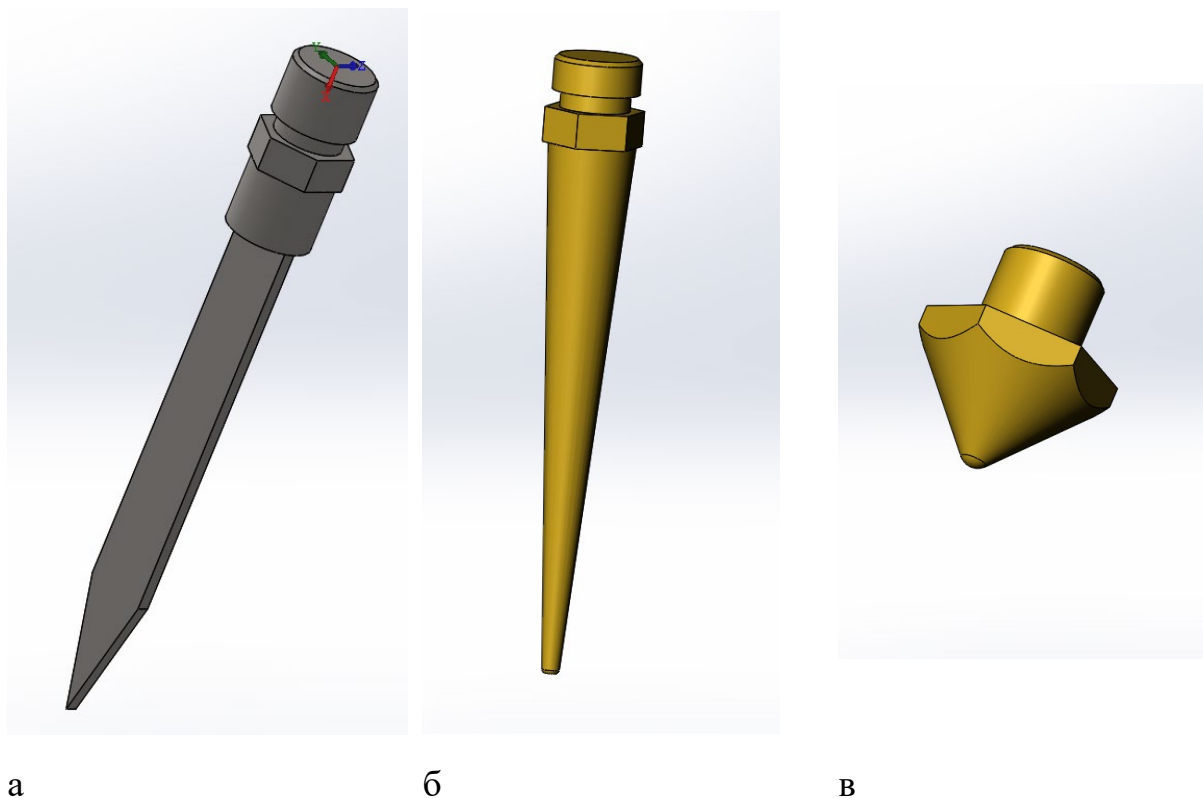


Рисунок 18 – 3D модели установочных ног для различных грунтов:
 (а) – для сыпучих грунтов, (б) – для мягких грунтов, (в) – для твердых грунтов

Все ноги выполнены из стальных сплавов, что обеспечивает их прочность в процессе эксплуатации. Для обеспечения прочности крепления ног при ударных нагрузках установки на грунт методом сброса модуля с БПЛА нижняя крышка имеет толщину обеспечивающую необходимую глубину резьбовых отверстий для установки. Так же для предотвращения самоотвинчивания при установке ног используется резьбовой фиксатор (адгезив), который имеет минимальный процент уменьшения предварительной затяжки по методу Юнкера в процессе эксплуатации.

Сборка модулей представлена для корпуса 102 мм на рисунке 19, для корпуса 63 мм представлена на рисунке 20. Для стабильности сейсмического модуля при установке в нижней части располагается батарейный отсек. В нижней крышке модуля располагается системы установки модуля на грунт. Блок сейсмических датчиков располагается в средней части модуля. В верхней

части модуля располагается системы крепления на БПЛА, индикаторы работы модуля, парашютная система для модуля в корпусе 102 мм.

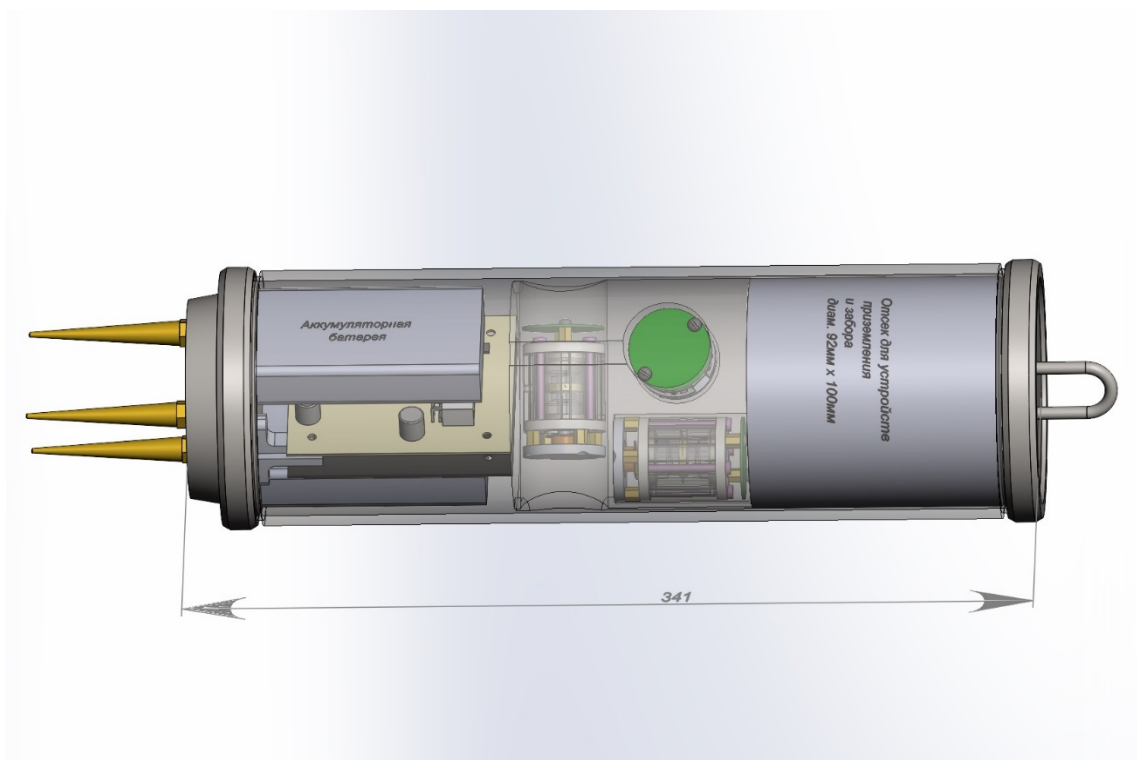


Рисунок 19 – 3D модель высококомобильного малогабаритного цифрового сейсмического модуля в корпусе диаметром 102 мм

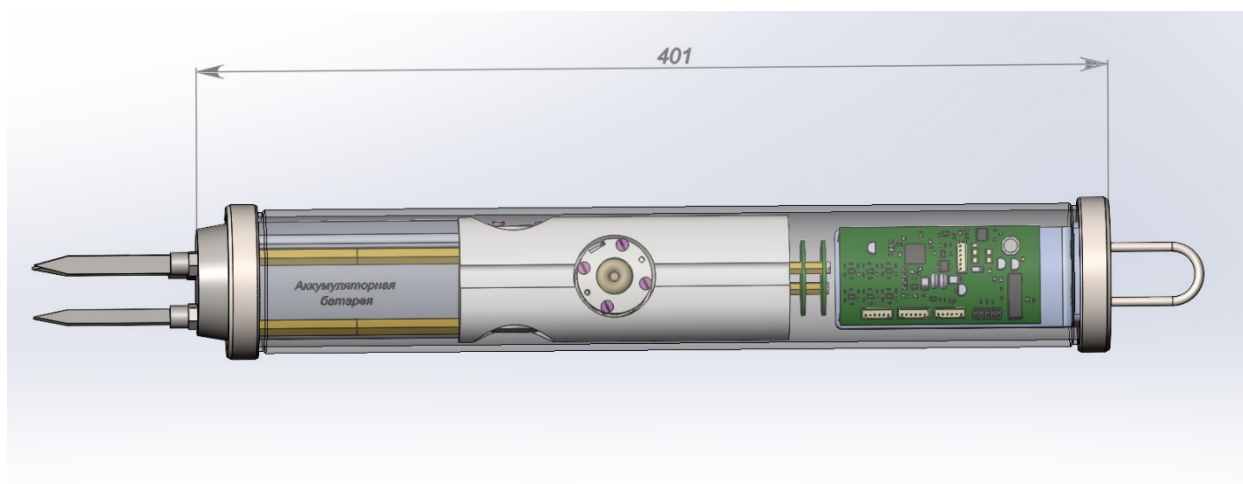


Рисунок 20 – 3D модель высококомобильного малогабаритного цифрового сейсмического модуля в корпусе диаметром 63мм

Каждый из представленных корпусов имеет свои особенности. Так сейсмический модуль в корпусе диаметром 102 мм:

- имеет минимальную высоту, с учетом того, что габариты отсека содержащий парашютную систему в дальнейшем могут быть оптимизированы. Учитывая отношение высота/диаметр данный

модуль более устойчив на неровных поверхностях, чем модуль в корпусе диаметром 63 мм

- содержит цифровой блок, который имеет 24 битный АЦП, что обеспечивает большее разрешение по отношению сигнал/шум, по сравнению с 14 битным АЦП в модуле в корпусе 63 мм.

Сейсмический модуль в корпусе с диаметром 63 мм:

- содержит цифровой блок с 14 битным АЦП, которая имеет существенно меньшую стоимость по сравнению с 24 битным АЦП
- в данном исполнении имеет вес 3,5 кг по сравнению с исполнением в корпусе с диаметром 102 мм, вес которого в данном исполнении имеет 6,5 кг, что влияет на возможности роя БПЛА разносить большее количество сейсмических модулей.

3D модели высококомобильного малогабаритного цифрового сейсмического модуля в обоих исполнениях представлены в файлах SolidWorks с размерами в натуральную величину. Все материалы в файлах указаны согласно разделу разработки данных сейсмических модулей.

4 Разработка функциональной схемы высокомобильного малогабаритного цифрового сейсмического модуля, обладающего возможностью по беспроводной передаче данных в условиях динамически изменяющегося внешнего окружения

В данном разделе отчета описывается функциональная схема высокомобильного малогабаритного цифрового сейсмического модуля, обладающего возможностью по беспроводной передаче данных в условиях динамически изменяющегося внешнего окружения.

Основными режимами работы сейсмического модуля являются:

- режим автономной регистрации;
- режим передачи данных для контроля качества;
- режим считывания блоков данных;
- режим развертывания и завершения регистрации.

На данном этапе предложено 2 исполнения сейсмического модуля, основным отличием является использование различных цифровых блоков:

- для корпуса диаметром 63 мм используется цифровой блок аналогичный трехканальному адаптеру ОИС003 производства ООО «НПЦ «БАУ-Мониторинг» с разрядностью АЦП 14 бит
- для корпуса диаметром 102 мм используется цифровой блок аналогичный модулю регистратора сейсмических сигналов NDAS-8224 с разрядностью АЦП 24 бита.

С момента крепления сейсмического модуля на БПЛА до момента установки на грунт сейсмический модуль запущен в режиме энергосбережения. Это должно быть реализовано в виду того, что сейсмические датчики во время больших внешних сигналов, которые могут присутствовать в полете, имеют повышенное (до 5 раз) потребление. В этом режиме сейсмический модуль принимает необходимые команды с БПЛА. К таким относятся:

- команда включения/выключения для полноценной работы;
- присвоение необходимых параметров для записи координат пункта установки модуля;
- управление режимом беспроводного соединения Wi-Fi;
- поиск сейсмического модуля по радиомаяку.

На рисунке 21 представлена функциональная схема работы сейсмического модуля в обоих исполнениях в режиме автономной регистрации.

В обоих исполнениях питание от батареи 5–12 В подается на цифровой блок. Преобразователь напряжения формирует однополярное питание для цифровой части +5 В и биполярное питание блока сейсмических датчиков ± 12 В.

Основным элементом, определяющим логику функционирования блока цифровой электроники в различных режимах работы сейсмического модуля, является центральный процессор. В его микропрограмме содержится полный набор инструкций, необходимых для функционирования в каждом из режимов. В зависимости от текущего состояния модуля и присланных на него команд, процессор задействует необходимую периферию, выдает управляющие команды и сигналы, а также организует сбор, хранение и передачу собранной информации.

В режиме регистрации сейсмические данные с трех каналов X, Y и Z блока сейсмических датчиков поступают на вход аналогово-цифрового преобразователя (АЦП). Полученные в результате преобразования цифровые отсчеты сигнала передаются в процессор и далее сохраняются в ПЗУ с разбиением на блоки необходимого размера. Для синхронизации отсчетов в систему от процессора поступают импульсы точного времени PPS от приёмника GPS.

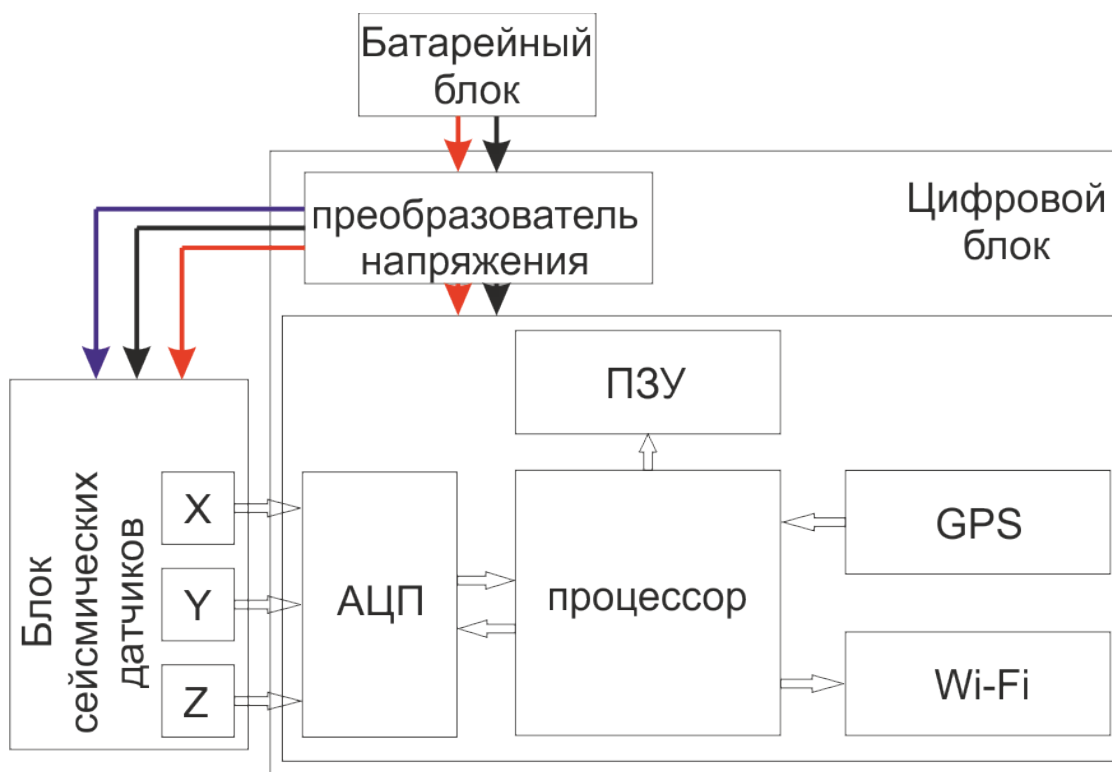


Рисунок 21 – Функциональная схема работы сейсмического модуля

В режиме передачи данных для контроля качества формируется блок данных отклика сейсмодатчиков в определенное время с привязанными к этому времени событиями. К ним могут относиться:

- данные отклика сейсмических датчиков на определенные сейсмические события с привязкой ко времени;
- данные отклика сейсмических датчиков на определенные команды с БПЛА.

На рисунке 22 представлена функциональная схема работы сейсмического модуля в режиме передачи данных для контроля качества.

Блоки с цифровыми данными контроля качества передаются по беспроводному соединению типа Wi-Fi с помощью FTP сервера на БПЛА, который в свою очередь передает данные на центральный компьютер для оценки качества.

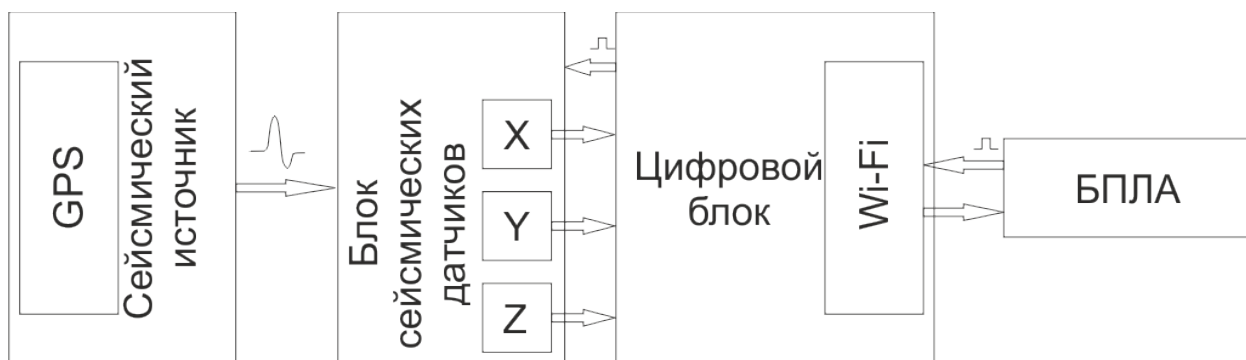


Рисунок 22 – Функциональная схема работы сейсмического модуля в режиме передачи данных для контроля качества

Так же для контроля качества и работоспособности сейсмического модуля может быть реализован контроль таких параметров как давление, влажность и температура внутри корпуса, уровень заряда батареи. Для контроля уровня влажности внутри модуля может использоваться интегральный датчик влажности типа HTS221. Контроль температуры внутри модуля может осуществляться с помощью интегрального датчика влажности термометром, а измерение давления может осуществляться интегральным датчиком давления BMP180 с цифровым выходом.

Для определения ориентации модуля в трех координатах возможно измерение ориентации модуля относительно вертикали (угол наклона) и магнитного меридиана (азимута). Для измерения указанных параметров может применяться интегральный наклономер-магнитометр e-Compass LSM303DLHC [User Manual – ZLand, Nodal System, Fairfield. 2022.].

Полученные телеметрические данные о состоянии сейсмического модуля позволят на ранних этапах выявить и устранить неполадки возникшие в процессе эксплуатации.

Функциональная схема передачи телеметрических данных на БПЛА показана на рисунке 23. При необходимости телеметрические данные могут записываться в ПЗУ для установки точного времени неисправности и причины его возникновения.

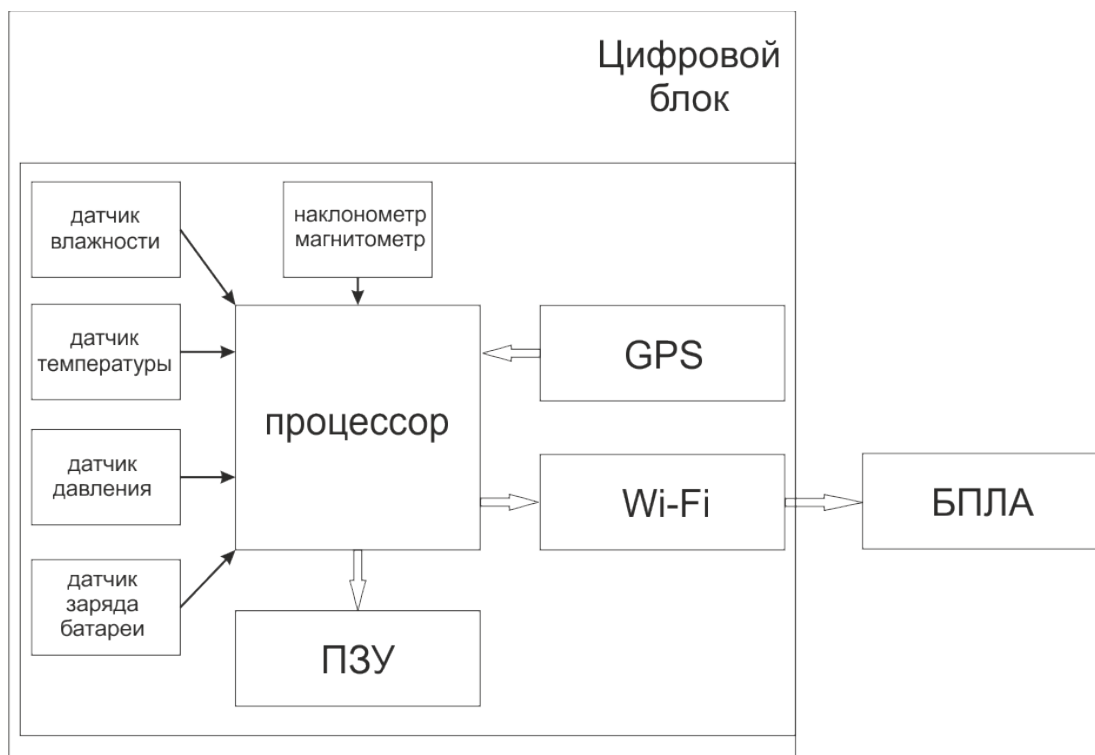


Рисунок 23 – Функциональная схема работы сейсмического модуля в режиме передачи данных для контроля качества

Режим считывания данных можно реализовать по запросу команды с БПЛА или при обнаружении БПЛА в зоне распространения сигнала Wi-Fi сейсмического модуля. Для сокращения времени сбора цифровых данных с сейсмического модуля сбор данных может осуществляться с определенными временными метками. Для этого запись оцифрованных данных с сейсмодатчиков разбивается на файлы необходимым размером.

В режиме развертывания сейсмического модуля на него записываются необходимые для его корректной работы данные: место положение, номер пункта приема на линии и т.д. Так же в режиме развертывания с него считываются данные с телеметрических датчиков для оценки корректности его работы.

Завершение регистрации происходит по команде БПЛА или по календарю, прописанному в цифровой модуль. При этом Сейсмический модуль должен переходить в режим энергосбережения.

В настоящем разделе приведено описание и функциональная схема работы сейсмического высококомобильного малогабаритного цифрового сейсмического модуля в различных режимах работы. При описании схем приведены типы ключевых элементов, которые могут использоваться при реализации. Выделены ключевые параметры их использования. Разработанная схема обеспечивает функционирование сейсмического блока в различных режимах работы.

5 Разработка подхода к проведению аэромониторинга местности группой БВС с целью формирования актуальной карты местности для последующей разметки зон установки сейсмических модулей.

В современном мире малые (до 100 кг) беспилотные воздушные суда (БВС) приобретают все большую популярность в качестве легких и недорогих инструментов для исследования участков земли, разведки территории, воздушных съемок. В России ведутся разработки по внедрению БВС в областях экологической и сельскохозяйственной деятельности, а также при решении различных задач аэромониторинга местности [Трубников Г. В. Применение беспилотных летательных аппаратов в гражданских целях // UAV. RU. Беспилотная авиация [Электронный ресурс. URL: http://www.uav.ru/articles/civil_uav_th.pdf. – 2017.]. Одно из главных достоинств БВС — исключение человеческого фактора при выполнении поставленной задачи, что является преимуществом использования БВС в трудоёмких и опасных для жизни человека задачах.

Комплекс БВС для мониторинга местности часто состоит из одного БВС и наземной станции управления (НСУ). Иногда используют несколько комплексов, при этом каждый БВС привязан к своей НСУ. Обмен информацией между комплексами происходит только на земле, между НСУ. Такую структуру взаимодействия можно представить, как двухуровневую систему управления. Верхний уровень управления осуществляется НСУ посредством оператора БВС. На данном уровне определяется глобальная задача для БВС, задается высота полета, скорость полета, маршрут, точки сбора информации и т.д. Нижний уровень управления реализуется автопилотом БВС, который действует по записанной на него программе с НСУ и управляет исполнительными механизмами.

Использование группы БВС для выполнения общей задачи, в частности мониторинга обширной местности, характеризуются наличием больших массивов данных в отношении исследуемой территории, подлежащих сбору, а также необходимостью в обеспечении возможности по оперативному принятию решений по изменению сценария выполнения поставленной задачи. Например, при появлении нового источника ценной информации, выходе из строя части имеющихся ресурсов, изменении критериев принятия решений и пр. Для решения подобных задач применяются мультиагентные технологии. Применение мультиагентных технологий заключается в создании группы БВС, способных передавать данные о местоположении между собой и обмениваться данными с НСУ или с сетью НСУ.

Для реализации мультиагентного подхода в настоящем исследовании предлагается добавить промежуточный средний уровень, который

реализуется за счет дополнительного микрокомпьютера, установленного в БВС [Амелин К.С., Антал Е.И., Васильев В.И., Граничина Н.О. Адаптивное управление автономной группой беспилотных летательных аппаратов // Стохастическая оптимизация в информатике. Вып. 5. 2009. С. 157-166.], и позволит реализовать требуемую структуру взаимодействия агентов группы.

Для описания подхода к проведению аэромониторинга местности группой БВС необходимо определить состав группы, характеристики и функционал каждого БВС в группе.

При описании подхода используется понятие группы БВС. Определим основные характеристики разрабатываемых экспериментальных образцов, реализующих предлагаемый подход и обеспечивающих полное решение задач, поставленных в проекте. За единицу группы планируется использовать легкий БВС типа квадрокоптер, сделанный из композитных материалов. На БВС установлены 4 бесколлекторных двигателя с регуляторами скорости вращения, микрокомпьютер и полетный контроллер, датчики высоты и скорости, гироскопы, акселерометры, спутниковая навигация, приёмник радиосигнала с наземной станции управления (телеметрия), стабилизатор для камеры и сама камера с высоким разрешением. Питание такого экспериментального образца БВС производится за счет двух параллельно подсоединенных литий-полимерных (Li-PO) аккумуляторов. Один БВС с установленной на борту камерой весит от 12 до 13 кг. Данные БВС обладают следующими летными характеристиками: время полета вместе с камерой до 25 мин, максимальная дальность полета 8 км, максимальная высота полета 1,5 км, максимальная горизонтальная скорость 70 км/ч.

На верхнем уровне предлагаемого подхода к проведению аэромониторинга местности находится вычислительное устройство под управлением человека – наземная станция управления. Её задачи: определение глобальной миссии для группы БВС-агентов (например, параметры исследования, задание способов исследования, целевая высота полёта и т. д.); разбиение глобальной задачи на части для каждого БВС-агента; обмен информацией с БВС-агентами; сбор и обработка информации от группы; формирование новой глобальной миссии группе в зависимости от поступающей на базовую станцию информации в процессе исполнения миссии.

На среднем уровне управления БВС-агента находится бортовой микрокомпьютер. Бортовой микрокомпьютер – головное устройство системы управления БВС. Он выполняет пять основных функций: генерация обновлений к программе полета для автопилота; обработка данных навигационного оборудования и телеметрии; работа с дополнительным оборудованием(камера); общение с микрокомпьютерами других БВС;

отправка данных на НСУ и получение от нее новых заданий. Связь между микрокомпьютерами осуществляется за счет радиоприемника с частотой 2,4 GHz (Wi-Fi). Связь с НСУ осуществляется через телеметрию мощностью 1 Вт Holybro P900. На нижнем уровне управления остается базовый полетный контроллер с автопилотом БВС-агента.

Подход основан на синхронизации работы БВС друг с другом, позволяющий получать БВС новую дополнительную информация для корректировки функционирования автопилота на полетном контроллере. Работа связки «полетный контроллер - микрокомпьютер» одного агента группы БВС заключается в решении четырех основных задач:

1. определения своего местоположения и степени выполнения поставленной задачи. В данном контексте задача представляется в виде набора путевых точек, в совокупности представляющих спланированную траекторию полета БВС. Степень выполнения задачи выражается в процентном соотношении посещенных БВС путевых точек ко всем путевым точкам;
2. отправка данных (местоположение; текущая путевая точка, где находится БВС; следующая путевая точка, куда движется БВС; процент заряда аккумулятора; степень выполнения задачи; наличие накопленных ошибок на датчиках) другим агентам;
3. получение данных от других агентов;
4. корректировка действий для возврата к выполнению задачи.

Полетный контроллер в БВС отвечает за функции низкого и высокого уровня управления. Низкоуровневая система управление отвечает за работу датчиков, двигателей, стабилизатора. Система управления высокого уровня отвечает за устойчивый полет, выравнивание БВС, направление полета БВС, корректировку и поддержание определенного курса аппарата, а также в целом за выполнение поставленной задачи. Микрокомпьютер на борту БВС отвечает за приём и обработку данных от других агентов группы, решение возникших конфликтных ситуаций, также микрокомпьютер может выполнять функцию хранилища собираемых данных. Управление оператором ограничивается определением “глобальных” команд (взлет, посадка, выбор участка мониторинга). Наземная станция управления, с которой осуществляется задание команд оператором, отвечает за декомпозицию участка выбранной местности на сегменты, назначение каждому БВС своего сегмента и построение траектории покрытия на каждом сегменте.

В ряде работ авторы предлагают разные методики разбиения рабочей области на сектора для построения траектории покрытия. В частности, в

работе [Cabreira T. M., Brisolara L. B., Paulo R F. J. Survey on coverage path planning with unmanned aerial vehicles //Drones. – 2019. – Т. 3. – №. 1. – С. 4.] авторы провели исследование в поисках эффективного алгоритма разбиения рабочего пространства на сектора и сравнили различия между отсутствием декомпозиции, точными и приближенными методами клеточной декомпозиции. В случае методов точной декомпозиции свободное рабочее пространство подразделяется на ячейки целевого масштаба, при этом центр каждой полученной ячейки рассматривается в качестве путевой точки на графе смежности. Задача полного покрытия в таком случае решается путем поиска по графу для определения порядка прохождения ячеек [Valente, J.; Sanz, D.; Del Cerro, J.; Barrientos, A.; de Frutos, M.A. Near-optimal coverage trajectories for image mosaicing using amini quad-rotor over irregular-shaped fields. Prec. Agric. 2013, 14, 115–132.]. Приближенная декомпозиция, в свою очередь, предполагает разбиение заданной местности в зависимости от зарегистрированных на ней препятствий, или же хаотичное разбиение на выпуклые многоугольники, если местность представляет собой невыпуклый многоугольник. После разбиения местности планировщик строит покрывающие траектории на каждой полученной области, используя известные паттерны движения, такие как возвратно-поступательное движение и спираль [Torres M. et al. Coverage path planning with unmanned aerial vehicles for 3D terrain reconstruction //Expert Systems with Applications. – 2016. – Т. 55. – С. 441-451.] [Pham T. H., Bestaoui Y., Mammari S. Aerial robot coverage path planning approach with concave obstacles in precision agriculture //2017 Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED-UAS). – IEEE, 2017. – С. 43-48.]. Данный вид декомпозиции местности часто используется в многоагентных системах, где каждому агенту назначается его собственная область функционирования [Muñoz Mendi J. et al. Multi UAV coverage path planning in urban environments. – 2021.][Albani D., Nardi D., Trianni V. Field coverage and weed mapping by UAV swarms //2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – Ieee, 2017. – С. 4319-4325.]. В отсутствие декомпозиции исследуемая область не делится на подобласти, а сама траектория строится по принципу поступательного или возвратно-поступательного движения [Avellar G. S. C. et al. Multi-UAV routing for area coverage and remote sensing with minimum time //Sensors. – 2015. – Т. 15. – №. 11. – С. 27783-27803.], [Huang W. H. Optimal line-sweep-based decompositions for coverage algorithms //Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 01CH37164). – IEEE, 2001. – Т. 1. – С. 27-32.], обеспечивая покрытие площади всей рабочей области. Ключевым преимуществом таких подходов является их более низкая вычислительная сложность, позволяющая осуществлять расчет траектории для группы БВС в режиме реального времени. Основным недостатком при этом является неспособность подобных методов к превентивному учету

статических препятствий в процессе построения траектории, который может быть нивелирован применением методов динамического распознавания препятствий и методов корректировки локальной траектории БВС на основе данных бортового сенсорного оборудования [Gao J. et al. Fast Path Planning for Firefighting UAV Based on A-Star algorithm //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Т. 2029. – №. 1. – С. 012103.].

В рамках проекта в качестве алгоритмической основы предлагаемого подхода к аэромониторингу местности с целью разметки зон установки сейсмических модулей предлагается использовать метод планирования траектории покрытия, основанный на паттерне возвратно-поступательного движения в сочетании с алгоритмами локального планирования траекторий агентов для уклонения от препятствий. Далее, рассмотрим предложенный метод планирования траектории покрытия для группы БВС более подробно.

Данный метод планирования траектории покрытия предназначен для реализации мониторинга заданной местности посредством группы БВС с целью выявления и идентификации зон пригодных для установки сейсмических сенсоров. При аэромониторинге местности БВС должен следовать вдоль непрерывной и плавной траектории, равномерно покрывающей исследуемую местность, и одновременно избегать не представляющих интереса областей и зон, доступ в которые ограничен. Во время движения БВС вдоль соответствующей траектории осуществляется непрерывный сбор фотоматериала. Последовательные изображения должны иметь заданный процент перекрытия. Чем больше степень перекрытия, тем выше будет точность результирующей карты местности.

Качество карты местности также будет выше, если снимки смежных участков местности будут сделаны в одно и то же время. Данное требование к проведению аэрофотосъемки дополнительно увеличивает потребность в использовании группы БВС для решения задачи по аэромониторингу обширных территорий. В противном случае возрастает риск появления некоррелированных теней или явных визуальных различий, что приведет к усложнению процесса реконструкции местности и снижению качества конечных результатов аэромониторинга [Xiao S., Tan X., Wang J. A simulated annealing algorithm and grid map-based UAV coverage path planning method for 3D reconstruction //Electronics. – 2021. – Т. 10. – №. 7. – С. 853.]. Аэромониторинг обычно выполняется в яркие, солнечные, безоблачные дни. При проведении съемки следует выбирать направление запад-восток. Это требование обусловлено, в частности, исключением паразитного влияния солнечного света [Михеева А. А., Ялтыхов В. В., Парадня П. Ф. Аэросъемка с беспилотного летательного аппарата //Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2018. – №. 16. –

С. 135-142.// Митрофанов Е. П. Применение данных аэрофотосъемки в системе точного земледелия //Форум молодых ученых. – 2018. – №. 12-3. – С. 348-354.]. Обычно съемку начинают не ранее чем через 2 ч после восхода Солнца и заканчивают за 3 часа до его захода. В большинстве случаев аэрофотосъемочное время дня ограничивается тремя-четырьмя часами [Захарова П. В. Применение Беспилотных Летательных Аппаратов Для Топографической Съемки //Инновационная Траектория Развития Современных Наук О Земле: Становление, Задачи, Прогнозы. – 2020. – С. 99-106.]. Прямым ограничением для проведения съемок является наличие сильного дождя, снега, грозových явлений, либо резких порывов ветра с горизонтальной скоростью более 12-15 м/с и вертикальными порывами более 3 м/с [Курбанов Р. К., Захарова О. М. Рекомендации по предполетной подготовке БПЛА //Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2020. – Т. 67. – №. 1. – С. 93-98.].

В используемом методе построения траектории покрытия не используется точная декомпозиция рабочего пространства на сектора. Отсутствие точной декомпозиции позволяет сократить время расчета глобальной траектории, а также использовать полученный результат для формирования целевых траекторий движения каждого из задействованных агентов. Ключевая особенность используемого метода заключается в том, что глобальная траектория, построенная на основе паттерна возвратно-поступательного движения, разделяется на непересекающиеся участки, где каждому из участков назначается отдельный агент. При этом расстояние между формируемыми участками зависит от параметров установленных на борту сенсоров и заданного процента перекрытия. Другими словами, декомпозиции подвергается не вся рабочая область, а только сгенерированная глобальная траектория. Данный шаг позволяет существенно сократить время расчета индивидуальных траекторий БВС, что критически необходимо в задачах планирования и распределения маршрутов между агентами в режиме приближенному к реальному времени.

Опишем решаемую задачу по построению покрывающей траектории для группы БВС. Существует группа из k БВС мультироторного типа, покрывающая многоугольную выпуклую область в пространстве R^2 , определяемую набором точек P . Для того, чтобы обеспечить сопоставимость результатов аэрофотосъемки внутри сканируемой многоугольной области, все БВС должны достигать одинаковой рабочей высоты, а расстояние между рядами траектории покрытия должно быть постоянным. Для предотвращения столкновений при выходе на рабочие позиции каждому БВС назначается отличающаяся высота взлета, перехода к начальной точке миссии и возврата к точке запуска (*return to launch RTL*), как показано на рисунке 24.

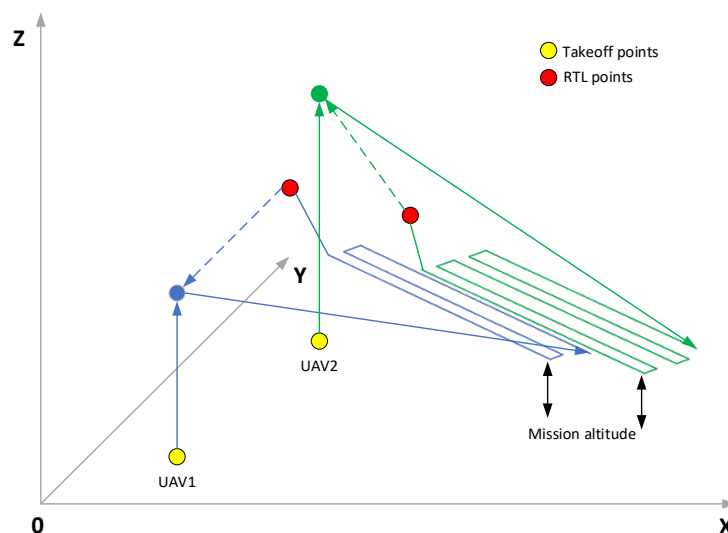


Рисунок 24 – Иллюстрация общей схемы миссии

Согласно общей схеме миссии (рисунок 24), каждый задействованный БВС выходит на *заданную индивидуальную высоту*, после чего осуществляет переход к начальной точке миссии и выполняет движение вдоль участка глобальной траектории, последним этапом происходит возвращение к точке запуска миссии. Как было упомянуто ранее, назначенные пути каждого БВС являются непрерывными. Предполагается, что каждый задействованный БВС оснащен идентичными бортовыми сенсорами (камера глубины, RGB камера, УЗ датчики или лидар), ориентированными перпендикулярно горизонтальной плоскости XY. Таким образом, предлагаемый метод планирования траектории покрытия при выполнении группой БВС аэромониторинга местности состоит из следующих ключевых этапов:

1. Расчет траектории покрытия для всей исследуемой области на основе паттерна возвратно-поступательного движения;
2. Декомпозиция глобальной покрывающей траектории на связанные наборы путевых точек (участки траектории), распределенные между агентами группы в зависимости от текущего положения агентов и характеристик БВС.

На первом этапе для создания глобальной возвратно-поступательной траектории необходимо определить требуемое расстояние d между двумя соседними рядами. Расчет данного расстояния зависит от необходимой степени перекрытия изображений и параметров, установленных на БВС бортовых сенсоров. Пусть v характеризует степень перекрытия кадров по вертикали, а w будет соответствовать ширине кадра камеры на целевой высоте полета БВС. В таком случае искомое расстояние между соседними рядами, обозначенное как d , является (вертикальным) расстоянием между двумя

кадрами. С учетом требуемой степени вертикального перекрытия кадров расстояние d может быть вычислено следующим образом:

$$d = w \cdot (1 - v)$$

Количество поворотов n , которое необходимо выполнить в исследуемой области, зависит от значений d , w и l_s , где l_s – длина направления развертки [Huang W. H. Optimal line-sweep-based decompositions for coverage algorithms //Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 01CH37164). – IEEE, 2001. – Т. 1. – С. 27-32.], см. рисунок 25. Определим промежуточное значение $z = l_s - w/2$, где $w/2$ представляет половину ширины зоны охвата камеры БВС.

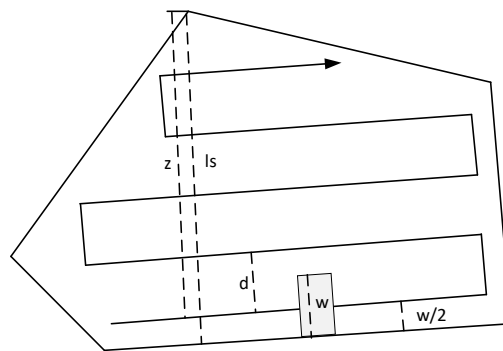


Рисунок 25 – Схематичная иллюстрация параметров, необходимых для расчета числа поворотов в рамках глобальной траектории покрытия

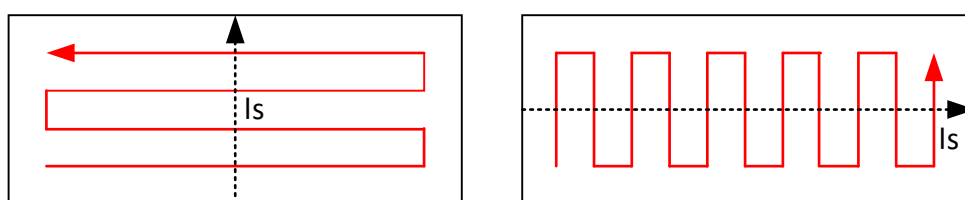
Поскольку параметр d характеризует расстояние, разделяющее ряды глобальной траектории, соответственно величина, равная отношению z к d будет обозначать количество рядов, необходимых для покрытия исследуемой многоугольной области с использованием возвратно-поступательного паттерна. Тем не менее, если расстояние между нижним рядом и верхней вершиной области ($z \bmod d$) больше, чем $w/2$, то рассматриваемый полигон не будет полностью покрыт числом рядов, равным z/d , и соответственно корректное число рядов в траектории будет равно $z/d+1$. Каждому сегменту полученной глобальной траектории соответствует ровно две точки поворота, таким образом, общее число поворотов в рамках глобальной траектории покрытия может быть определено согласно следующему выражению:

$$n = \begin{cases} 2z \setminus d, & \text{если } z \bmod d \leq w/2 \\ 2(z \setminus d + 1), & \text{если } z \bmod d > w/2 \end{cases}$$

Как можно заметить, количество поворотов на траектории зависит строго от значения величины z , поскольку расстояние d задается при постановке задачи и остается неизменным в ходе выполнения миссии. Параметр z , в свою очередь, зависит от длины l_s и от значения величины w .

Отсюда следует вывод, что при неизменной целевой рабочей высоте БВС, количество витков на траектории определяется исключительно длиной l_s и для уменьшения количества поворотов (манёвров) длина l_s должна быть минимизирована. Иными словами, необходимо определить оптимальное направление развертки линии. Расчет оптимального направления развертки линии является хорошо известной задачей и может быть выполнен согласно алгоритму, представленному в [Huang W. H. Optimal line-sweep-based decompositions for coverage algorithms //Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 01CH37164). – IEEE, 2001. – Т. 1. – С. 27-32.]

Рассмотрим алгоритм расчета оптимальной развертки подробнее. При работе с выпуклым многоугольником оптимальное направление развертки линии рассчитывается, следующим образом: первоначально строится отрезок l_s от каждого края многоугольника до самой дальней вершины и измеряется его длина. Отрезок l_s с наименьшей длиной указывает на направление оптимальной развертки (т.е. в этом направлении будет меньше поворотов на траектории покрытия). Направление линии указывает на соответствующую вершину. Рисунок 26 показывает оптимальное (с минимальной длиной) и неоптимальное направление развертки линии.



а)

б)

Рисунок 26 – Оптимальное (а) и неоптимальное (б) направление развертки

Как только оптимальное направление развертки линии получено, имеется четыре варианта покрытия для создания возвратно-поступательной траектории. Вариант покрытия определяется в соответствии с двумя критериями. Первый – учёт текущего направление развертки линии или противоположного; а второй – способ построения пути покрытия: по часовой стрелке (первый поворот производится вправо) или против часовой стрелки (первый поворот производится влево). Все варианты покрытия содержат одинаковое и минимальное количество поворотов, т.к. они построены на основе одной и той же развертки линии. Поэтому необходимо решить задачу нахождения варианта покрытия, который минимизирует общую длину траектории, которая рассчитывается как сумма длин всех траекторий:

$$D = d1 + d2 + d3,$$

где $d1$ – длина траектории от точки старта до участка обследования, $d2$ – длина траектории от участка обследования до точки посадки и $d3$ – длина возвратно-поступательной траектории.

В результате построение траектории покрытия осуществляется за счет применения паттерна возвратно-поступательного движения вдоль направления оптимальной развертки [Nam L. H. et al. An approach for coverage path planning for UAVs //2016 IEEE 14th international workshop on advanced motion control (AMC). – IEEE, 2016. – С. 411-416.], [Wang C. et al. The adaptive vortex search algorithm of optimal path planning for forest fire rescue UAV //2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). – IEEE, 2018. – С. 400-403.], после чего найденная траектория сглаживается методом кубической интерполяции. Полученная траектория представляет собой граф смежности, состоящий из массива координат путевых точек с рассчитанным ранее расстоянием друг от друга. Таким образом, по результатам первого этапа описанного метода формируется оптимальная возвратно-поступательная траектория покрытия исследуемой местности.

На следующем этапе разработанного метода осуществляется декомпозиция глобальной покрывающей траектории на связанные наборы путевых точек (участки траектории), распределенные между агентами группы с учетом текущих параметров БВС, расстояний до сформированных участков, а также общего ожидаемого времени исполнения миссии. Для выполнения соответствующей операции в работе за решение задач маршрутизации и распределения траекторий между агентами группы отвечает алгоритм BINPAT (bin packing trajectory planner) [Luna M. A. et al. Fast Multi-UAV Path Planning for Optimal Area Coverage in Aerial Sensing Applications //Sensors. – 2022. – Т. 22. – №. 6. – С. 2297.]. Данный алгоритм позволяет успешно формировать наборы путевых точек и распределять их между агентами в зависимости от расстояния до области покрытия, а также назначенной высоты полёта и характеристик БВС. Рассмотрим алгоритм BINPAT подробнее.

Алгоритм BINPAT имеет два этапа: упаковка траекторий и назначение траекторий каждому БВС. Предполагая постоянную среднюю скорость для каждого БВС, суммарное время миссии T_k по покрытию рабочей области для группы из k БВС можно смоделировать следующим образом [Luna M. A. et al. Fast Multi-UAV Path Planning for Optimal Area Coverage in Aerial Sensing Applications //Sensors. – 2022. – Т. 22. – №. 6. – С. 2297.]:

$$T_k = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{D_{ij}}{v_{ij}^k} M_{ij}^k + Hd^k, \text{ где } Hd^k = \frac{h_m^k + \Delta h^k}{v_a^k} + \frac{h_m^k + \Delta h^k}{v_d^k}.$$

В рамках представленного выше выражения, D_{ij} представляет собой стоимость расстояния полета между двумя узлами, V_{ij}^k представляет скорость полета БВС. Двоичная переменная M_{ij}^k определяет, перемещается ли k -й БВС из точки i в j . Hd^k – задержка, вызванная наличием различными индивидуальными высотами взлёта для БВС. Значение Hd^k зависит от заданной высоты миссии (h_m^k), скорости подъема (V_a^k), скорости спуска (V_d^k), и разницы между назначенными индивидуальными высотами взлёта и высотой миссии (Δh^k) у задействованных агентов. Общее время миссии будет равняться максимальному времени работы k -го БВС с учетом ограничений, связанных с непрерывностью траекторий каждого из агентов.

С учетом приведенных выше выражений распределение траекторий будет выполняться путем минимизации стоимости миссии покрытия на основе расстояния, то есть:

$$C^k = \sum_i \sum_j D_{ij} M_{ij}^k + Hd^k$$

Суммируя все выражения, ниже представлен псевдокод Алгоритма 1 для распределения траекторий для группы из k БВС.

Псевдокод Алгоритма 1

Входные данные: $P(x_p, y_p)$, $W(w_k)$, $L(x_k, y_k)$, $F(a, b)$, Mh

Выходные данные: $WPT(UAV_k, x_m, y_n)$, $C(c_k)$

$WptSet(x_{wpt}, y_{wpt}) = Back\&Forth(P, F)$

$PathDistArray(n, l) = GetDist(WptSet)$

$D', M = BinPack(PathDistArray, W)$

for each UAV do

$$C'_{ki} = \sum_i \sum_j D'_{ij} M_{ij}^k$$

End

$$AP = \min \sum_k \sum_i C'_{ki} L_{ki}$$

$$H^k = AssignH(C', Mh)$$

$$C^k = C'^k + Hd^k$$

$$WPT_{k,m,n} = WptGen(AP, WptSet)$$

Входными данными в алгоритме 1 являются набор путевых точек траектории (P), параметры БВС (W), набор с координатами местоположения

БВС (L), параметрами камеры (F) и высота миссии по покрытию участка (Mh). Вектор параметров БВС представляет собой характеристики, которые могут повлиять на выполнение миссии (процент заряда аккумулятора, средняя скорость полета); эти параметры одинаковые, если группа состоит из одинаковых БВС. Выходными данными являются вектор стоимости C миссии покрытия и тензор WPT размерностью 3, определяющий соответствие между набором путевых точек и определённым БВС. На первом этапе алгоритма набор путевых точек формируется в результате работы возвратно-поступательного алгоритма (функция `Back&Forth`); затем путевые точки декомпозируются на отдельные отрезки и вычисляется длина каждого отрезка (функция `GetDist`). На этапе упаковки траекторий используется алгоритм упаковки (функция `СВinPack`) на вход которого поступает набор путевых точек, D' — это расстояние, на которое должен переместиться БВС в зависимости от его начального местоположения, а M представляет собой условия движения (назначен ли путь БВС или нет). В результате получается матрица назначения высот (Hk) пропорционально первой матрице затрат (C'), т. е. БВС с более высокими энергетическими затратами для осуществления полета, вызванными переносимой нагрузкой, будут назначаться меньшие высоты взлета. Затем рассчитывается итоговая стоимость миссии (C), с учетом стоимости задержки из-за разных высот (Hdk).

Функция `СВinPack` представлена в псевдокоде алгоритма 2. Данный алгоритм решает задачу упаковки, в которой набор элементов должен быть назначен набору БВС. В алгоритме 2 Wk представляет собой оценку общей стоимости полета. Элементы (путевые точки) итеративно назначаются каждому БВС до тех пор, пока количество элементов не превысит максимально возможное значение, определяемое параметрами БВС (W). Добавление нового элемента к БВС не должно превышать его возможности полета, т.е. невозможно назначить точек больше, чем может посетить БВС в связи с ограниченностью его энергетического ресурса и расстояния от участка обследования. В результате рассчитывается дальность полета и путевые точки, которые должен пройти каждый БВС.

Псевдокод Алгоритма 2

Входные данные: P_n

Выходные данные: D'_{ij}, M_k

$W'_k = W * \sum_{i=1}^n P_i$

$m=0$

$w=0$

$BinSize = W'_m$

$prevRes = BinSize$

for each $w_n \in P$ *do*

$w' = w_n + w$

$Res = |BinSize - w'|$

if $Res > prevRes$ *then*

$m = m + 1$

$BinSize = W'_m$

$w' = w$

end

$D'_{mn} = w$

$M_{mn} = N$

end

В результате, все этапы подхода для осуществления мониторинга территории группой БВС можно отобразить в виде следующей структурной схемы, рисунок 27:

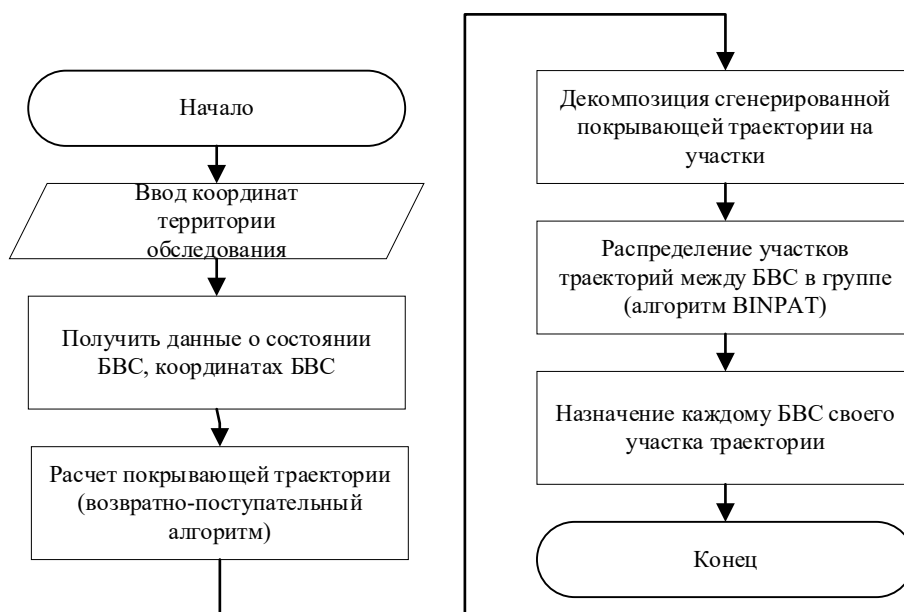


Рисунок 27 – Структурная схема этапов разработанного подхода

Таким образом, при помощи опорного метода осуществляется построение покрывающих траекторий, минимизирующих общее время исполнения миссии с учетом текущих параметров и положения задействованных БВС, что потенциально позволяет эффективно решать проблему построения высокоточных трехмерных карт обширных территорий группой БВС. Данный метод лежит в основе разработанного подхода к проведению аэромониторинга местности группой БВС с целью формирования актуальной карты местности для последующей разметки зон установки сейсмических модулей.

6 Разработка теоретико-множественных и/или онтологических моделей для систематизации и формализации визуальных признаков участков местности, пригодных к установке сейсмических модулей.

Онтологические модели являются удобным способом представления признаков классов поверхностей, пригодных для установки сейсмодатчиков. В рамках данной работы для различения поверхностей рассматриваются различные яркостные и спектральные индексы, основанные на интенсивности отражения от поверхности электромагнитного диапазона той или иной длины волны. Данные признаки могут быть получены из мульти- и гиперспектральных спутниковых и аэрофотоснимков и могут рассматриваться как самодостаточные для определения того или иного класса поверхностей. В литературе приводится описание соотношений интервалов различных спектральных признаков для ограниченного множества типов поверхностей [Алтынов А. Е. и др. метрирование ландшафтов.//Учебное пособие для студентов М.: Изд. МИИ-ГАиК. УПП «Репрография», 2010 г., 120 с.]. Однако, на практике определенные в литературе диапазоны требуют дополнительного уточнения, т.к. конкретные значения индексов для поверхностей той или иной местности могут зависеть от множества дополнительных факторов: пространственного разрешения аэрофотоснимков, освещенности участка местности, дополнительных атмосферных влияний, неоднородности поверхностей, принадлежащих определенному классу, наличие дополнительных факторов, определяющих класс поверхности и т.д. Кроме того, для довольно широкого класса поверхностей диапазоны значений спектральных индексов заранее не определены. Таким образом остро встает проблема уточнения диапазонов значений спектральных индексов для тех поверхностей, о которых имеется предварительная информация в литературе и определение диапазонов значений спектральных индексов для тех поверхностей, о которых информации нет.

Вследствие того, что диапазоны значений индексов для различных классов поверхностей заранее не определены, в рамках данной работы рассматривается целый ряд распространенных признаков, которые могут отражать различные свойства поверхностей:

1. NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) [Dalezios N. R. et al. Cotton yield estimation based on NOAA/AVHRR produced NDVI //Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere. – 2001. – Т. 26. – №. 3. – С. 247-251.] – нормализованный разностный вегетационный индекс

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

где NIR – значения ближнего инфракрасного диапазона длин волн от 800 до 820 нм, RED – значения из диапазона длин волн, принадлежащих красному цвету от 650 до 700 нм.

2. NDWI (Normalized Difference Water Index) [Chouari W. Contributions of multispectral images to the study of land cover in wet depressions of eastern Tunisia //The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science. – 2021. – Т. 24. – №. 3. – С. 443-451.] – нормализованный разностный индекс воды:

$$NDWI = \frac{GREEN - RED}{GREEN + RED}$$

где NIR – значение длины волны ближнего инфракрасного диапазона длин волн, равное 850 нм, GREEN – значение длины волны, принадлежащей зеленому цвету и равное 550 нм.

3. NDBI (Normalized Difference Building Index) [Chen X. L. et al. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes //Remote sensing of environment. – 2006. – Т. 104. – №. 2. – С. 133-146.] – нормализованный разностный индекс застройки:

$$NDBI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR}$$

где NIR – значения ближнего инфракрасного диапазона длин волн от 760 до 900 нм, SWIR – значение длины волны коротковолнового инфракрасного диапазона от 1550 до 1750 нм.

4. SAVI – Soil Adjusted Vegetation Index [Qi J., Kerr Y., Chehbouni A. External factor consideration in vegetation index development //CNES, proceedings of 6th international symposium on physical measurements and signatures in remote sensing. – 1994.] – почвенный растительный индекс:

$$SAVI = \frac{(NIR - RED)(1 + L)}{NIR + RED + L}$$

где $L \in [0, 1]$ – константа, обычно принимаемая равной 0.5, NIR – значения ближнего инфракрасного диапазона длин волн от 800 до 820 нм, RED – значения из диапазона длин волн, принадлежащих красному цвету от 650 до 700 нм.

5. NDMI (Normalized Difference Moisture Index) [Wilson E. H., Sader S. A. Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery //Remote Sensing of Environment. – 2002. – Т. 80. – №. 3. – С. 385-396.] – нормализованный индекс содержания влаги в почве

$$NDMI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

где NIR – значения длины волны ближнего инфракрасного диапазона от 760 до 900 нм, SWIR – значение длины волны коротковолнового инфракрасного диапазона от 1550 до 1750 нм.

6. Коэффициент спектральной яркости (КСЯ) гиперспектрального снимка местности, выражающийся в интенсивности яркости длин волн из диапазона от 400 до 2500 с шагом 50 нм.

В данной работе для построения онтологической модели используется фреймворк описания ресурсов (Resource Description Framework – RDF [Resource Description Framework. URL: <https://www.w3.org/RDF/> (дата обращения ноябрь 2022)]), в котором выражаются отношения или связи между понятиями (классами) объектов и их свойствами или признаками посредством упорядоченных множеств или кортежей-триплетов унифицированного вида: $\langle O, A, V \rangle$ Объект-Атрибут-Значение (Object-Attribute-Value – OAV), где O – класс объектов или отдельный объект, A – определенное свойство, связывающее класс объектов или объект с его значением; V – значение, которое атрибут принимает для класса объектов или отдельных объектов.

RDF свойствоцентричен, что позволяет произвольно соединять классы онтологии друг с другом посредством определенных в этой онтологии свойств. Это позволяет группировать классы вокруг свойств, а не наоборот, как реализовано в объектной модели данных. Этот принцип обеспечивает гибкость и адаптивность в организации представления знаний, что в итоге позволяет наиболее полным образом отразить все специфические свойства каждого класса объектов, включенных в онтологию. Важным преимуществом RDF является его распространенность, стандартизированность, наличие поддерживаемых сообществом языков описания и программных средств реализации. В данном исследовании для построения онтологической модели был использован Ontology Web Language (OWL) [Resource Description Framework. URL: <https://www.w3.org/OWL/> (дата обращения ноябрь 2022)], который поддерживает принципы RDF, а также свободно распространяемая в открытом исходном коде среда Protégé [Protégé. URL: <https://protege.stanford.edu/> (дата обращения ноябрь 2022)].

В данном случае имеется лишь общетеоретическое представление о классах поверхностей и составе визуальных признаков представлений, которые должны определять каждый из классов. Уточнение состава этих представлений является предметом дальнейших исследований.

6.1 Описание классов поверхностей, пригодных для установки сейсмодатчиков

1. **Общий класс «Пригодность поверхности».** Этот класс отражает свойство возможности установки датчика на поверхность. Данный класс подразделяется на два взаимоисключающих:
 - a. **Класс Пригодная поверхность.** К данному классу относятся те поверхности, на которые возможно установить датчики. Поверхность данного типа определяется экспертами в ходе оценки реальных спутниковых и аэрофотоснимков местности, а также учета дополнительных параметров, таких как уклон поверхности и предварительные данные GIS об этой местности.
 - b. **Класс непригодная поверхность.** К данному классу относятся те поверхности, на которые невозможно установить датчики. Поверхность данного типа определяется экспертами в ходе оценки реальных спутниковых и аэрофотоснимков местности, а также учета дополнительных параметров, таких как уклон поверхности и предварительные данные GIS об этой местности.
2. **Общий класс «Поверхность».** Данный класс содержит все виды подстилающих поверхностей, которые рассматриваются в рамках данной работы. При этом поверхность каждого из рассматриваемых классов может быть, как пригодной, так и непригодной для установки датчиков. В рамках данной работы рассматриваются следующие типы поверхностей:
 - a. **Класс «Почва».** К данному классу относятся все виды почв, включая суглинок, песок, супесь, грунт, чернозём
 - b. **Класс «Скальная поверхность».** К данному классу относятся выступающие на поверхность твердые породы, включая гранит, известняк, песчаник, кварц, доломит и др.
 - c. **Класс «Заболоченная местность»**, куда включены участки местности разной степени заболоченности
 - d. **Класс «Поверхность, покрытая льдом».** К этому классу относятся участки местности, покрытые льдом, такие как ледники, наледи, покрытые льдом водоемы и т.д.
 - e. **Класс «Заснеженная поверхность».** К этому классу относятся заснеженные участки, включая наст, крупнозернистый снег, мелкозернистый снег.

- f. Класс «Водные поверхности». Сюда включены участки речной, морской, озерной водной глади, а также искусственные водоемы. Данный класс поверхностей однозначно относится к непригодным.

6.2 Описание отношений между классами.

В рамках данной онтологии рассматриваются следующие отношения, выражающие свойства классов:

1. Является, принадлежит классу (A Kind Of – АКО). Данное отношение выражает наследования свойств более общих классов классами менее общими и более специфичными
2. Дополнительная информация, определяющая пригодность или непригодность местности для установки датчика. Эта информация предоставляется непосредственно экспертами перед проведением аэромониторинга местности. В рамках данной работы рассматриваются следующие виды такой информации:
 - a. GIS данные, напрямую показывающие принадлежность участка местности к тому или иному классу, характеризующему возможность установки датчиков (как правило, доступна информация в отношении зон однозначно непригодных для размещения сейсмических сенсоров);
 - b. Рельефная информация, отражающая уклон рельефа в каждой точке местности. Данная информация может быть использована в качестве дополнительного признака при проведении оценки пригодности некоторой зоны для установки датчиков.
3. Спектральный индекс. Данные отношения выражают диапазоны значений в действительных числах, которые принимают соответствующие индексы для того или иного класса. Отношения этого вида принадлежат всем подклассам общего класса «Поверхность» и различаются диапазонами значений, которые необходимо будет конкретизировать в ходе дальнейшего исследования.
 - a. NDVI
 - b. NDWI
 - c. NDBI
 - d. SAVI
 - e. NDMI
 - f. Коэффициент спектральной яркости (КСЯ)

Полная онтология, отражающая все классы, находящиеся во всех представленных отношениях приведены на рисунке 28.

Результирующая онтология отражает самые общие теоретические отношения между классами предметной области. Это выражается в неопределенности областей допустимых значений. Для устранения этой неопределенности в рамках дальнейшей работы будет выполнено исследование, направленное на выявление точных границ областей допустимых значений обозначенных выше признаков на основе анализа мульти- и гиперспектральных снимков реальной местности, на которой расположены поверхности, принадлежащие к обозначенным выше классам.

Для выяснения областей определения соответствия рассматриваемых индексов для каждого класса поверхности предлагается методика, состоящая из следующих шагов:

1. Сбор выборки мульти- и гиперспектральных данных спутниковых и аэрофотоснимков, содержащих сегменты поверхностей интересующих нас классов, представленных в онтологической модели. При этом каждый сегмент поверхности представляет собой упорядоченное множество рассматриваемых спектральных признаков:

$$X = \langle F_{X1}, F_{X2}, \dots, F_{XN} \rangle$$

где $F_{X1} - F_{XN}$ – множества рассматриваемых спектральных признаков, для определенного сегмента поверхности. При этом множество всех возможных признаков во всех возможных сегментах X может быть выражено как:

$$F = \langle F_1, F_2, \dots, F_N \rangle$$

где каждому множеству признаков $F_1 - F_N$ соответствует свой интервал, включающий все возможные допустимые значения: $F_i \in [F_{min}, F_{max}]$; N – количество рассматриваемых спектральных признаков.

2. Ручная разметка экспертами сегментов поверхностей на аэрофотоснимках, принадлежащих обозначенным в онтологии классам поверхностей. Этот этап необходим для определения эталонных областей, однозначно относимых к тому или иному классу поверхностей. В результате получается выборка, содержащая упорядоченные пары:

$$S = X \times Y = \{ \langle X_1, Y_1 \rangle, \langle X_1, Y_1 \rangle, \dots, \langle X_K, Y_K \rangle \}$$

где $X = \{X_1, X_2, \dots, X_K\}$ – множество сегментов; $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_K\}$ – множество классов сегментов; K – количество экземпляров в выборке

3. Балансировка выборки по количеству классов и ее рандомизация, что необходимо для обеспечения возможности статистического сравнения и уменьшения влияния случайных факторов на результат последующего статистического анализа;

4. Анализ выделенных спектральных признаков, выявляющий статистически значимые различия спектральных признаков для представленных в онтологии классов поверхностей, а также определяющий интервалы областей значения спектральных признаков для каждого класса. Формально, это выражается в построении специальной функции f , отображающей пространство признаков F в пространство классов Y :

$$f: F \rightarrow Y$$

В результате применения методики будут выделены статистически значимые признаки для того или иного класса поверхностей и отброшены незначимые, что позволит, тем самым, обоснованно сократить признаковое пространство. Полученные в результате использования методики интервалы значений для каждого класса позволят конкретизировать рассматриваемую онтологическую модель статистически обоснованными значениями. Конкретизированная онтологическая модель будет являться формализованным представлением предметной области поверхностей, запечатленных на спутниковых и аэрофотоснимках, пригодных для установки сейсмодатчиков, а также будет содержать классификационные правила для определения пригодности поверхности для установки сейсмодатчиков по значениям спектральных признаков.

7 Разработка сценарных моделей возникновения внештатных ситуаций при выполнении группой БВС полетных задач. Разработка специализированных алгоритмов реагирования и переопределения траекторий движения группы БВС.

В связи с тем, что группа БВС, выполняющая аэромониторинг на обширной территории, является открытой системой, взаимодействующая с изменчивой средой, возможно возникновение незапланированных или внештатных ситуаций. В общем случае под внештатными ситуациями понимаются случаи, когда режим автономного управления невозможно реализовать в полном объеме. Выявление невозможности выполнения задания на этапе первичного планирования траектории покрытия и распределения участков траектории, например, в связи с отсутствием достаточных энергетических ресурсов, не является внештатной ситуацией. Определим набор возможных внештатных ситуаций:

1. Внештатные ситуации, вызванные потенциальным столкновением с объектами (коллизией):
 - 1.1 БВС с препятствием природного характера (дерево, земля, холм, птица) или сооружением (труба ТЭЦ, трасса ЛЭП, здание);
 - 1.2 БВС с другим БВС или другим движущимся объектом;
2. Внештатные ситуации, связанные с потерей радиосвязи БВС с наземной станцией;
3. Внештатные ситуации, вызванные исчерпанием энергетического ресурса;
4. Техническая неисправность БВС, выявленная в процессе полета (сбой GPS, акселерометра, магнитометра, поломка двигателя);
5. Внештатные ситуации, вызванные погодными возмущениями (на всей исследуемой местности, на участке исследуемой местности)

Рассмотрим алгоритмы реагирования на указанные выше внештатные ситуации, а также определим порядок действий БВС при возникновении внештатных ситуаций в процессе выполнения полетной задачи.

7.1 Порядок действий при потенциальном столкновении БВС с объектами.

При выполнении полетной задачи группой БВС необходимо задействовать алгоритмы перепланирования траекторий в связи с возникновением препятствий. Препятствия могут быть двух типов:

статические и динамические. Для разных типов препятствий необходимы различные алгоритмы реагирования. Для обхода статических препятствий требуется алгоритм обхода препятствия, а также алгоритм планирования локальной траектории в средах с высокой плотностью препятствий (в случае движения группы БВС на высотах до 50 м). Для обхода динамических препятствий требуется алгоритм оценки модели движения препятствия (его скорость и вектор движения), алгоритм оценки вероятности столкновения и реакционный планировщик локальной траектории. Обобщенный алгоритм реагирования при возникновении препятствий представлен на рисунке 29.

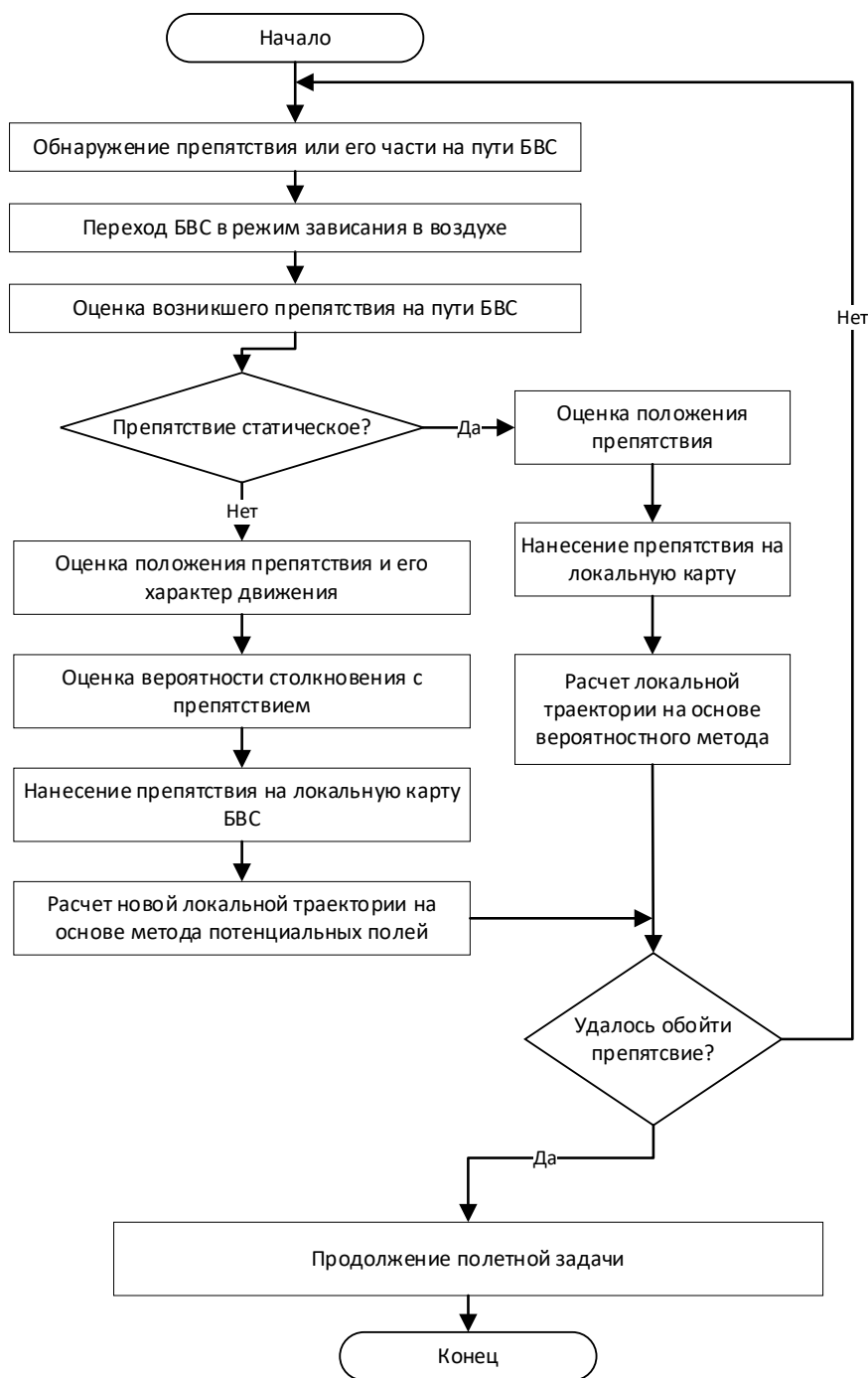


Рисунок 29 – Порядок действий БВС при возникновении препятствие на его пути

На борту БВС работает сразу два планировщика траектории: глобальный и локальный. Глобальный планировщик необходим при генерировании траектории полета для выполнения полетной задачи. Он работает только в момент создания полетной задачи и учитывает только известные статические препятствия, которые были заранее нанесены на карту местности. Локальный планировщик отвечает за перепланирование траектории из-за возникших препятствий. Локальный планировщик генерирует локальные траектории, основываясь на данных с сенсорных систем БВС (лазерные или ультразвуковые дальномеры, камеры). Поэтому для построения локальной траектории в обход препятствия необходимо обнаружить само препятствие, а также проанализировать, что за препятствие возникло на пути БВС. Далее на основе данных с датчиков строится локальная карта, на которой БВС ищет траекторию обхода. В зависимости от типа препятствия предлагается использовать два алгоритма для быстрого и эффективного планирования локальной траектории в обход препятствия: алгоритм на основе метода потенциальных полей для динамических препятствий и алгоритм на основе вероятностного метода для появившихся статических препятствий, которые не были заранее известны. Поскольку глобальная траектория для БВС генерируется заранее с учетом известных препятствий, глобальная траектория всегда будет свободна от столкновений с препятствиями. Так как глобальная траектория состоит из набора точек, то каждая следующая точка будет являться новой локальной целью для БВС и к этой локальной точке необходимо построить локальную траекторию, с учётом обнаруженных препятствий.

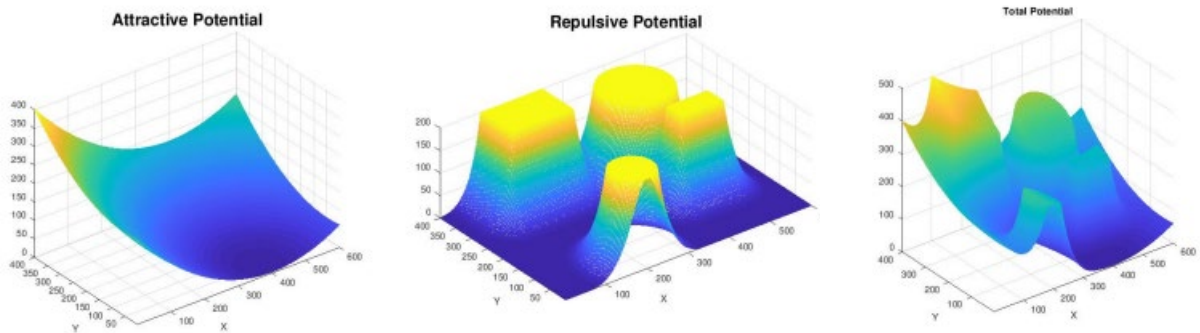
Оценка вероятности столкновения заключается в итеративном сравнении расстояния от БВС до приближающегося препятствия. Критическое расстояние задается оператором при настройке полетного задания. Если расстояние от БВС до приближающегося препятствия меньше критического, то столкновение неизбежно. Если расстояние много больше критического, то БВС может перейти в режим зависания в точке и сгенерировать новую локальную траекторию обхода препятствия.

Локальный планировщик движения на основе искусственных потенциальных полей [Isiwanto I. et al. Artificial potential field algorithm implementation for quadrotor path planning //International Journal of Advanced Computer Science and Applications. – 2019. – Т. 10. – №. 8.] позволяет корректировать положение БВС, предотвращая столкновения с динамическими препятствиями. Основная идея алгоритма состоит в построении функции конфигурационного пространства БВС, которая имеет максимум, когда БВС находится рядом с препятствием, и минимум, когда БВС находится дальше. Если такая функция построена, ее градиент можно использовать для направления робота в желаемое положение. Обычно эта

функция состоит из двух компонентов: притягивающего и отталкивающего. Потенциальная функция притяжения $U_a(x, y)$ может быть построена с учетом расстояния между текущим положением БВС, $p = [x, y]^T$, и желаемым положением локальной цели, $p_g = [x_g, y_g]^T$, следующим образом:

$$U_a(x, y) = \xi \|p - p_g\|^2,$$

где ξ — постоянный параметр масштабирования. Искусственные потенциалы могут влиять на движение БВС. Для двумерной карты потенциальные функции можно визуализировать в виде поверхностей, рисунок 30.



(a) $U_a(x, y)$

(б) $U_r(x, y)$

(в) $U(x, y) = U_a + U_r$

Рисунок 30 – Функции искусственного потенциала

Потенциальная функция отталкивания на плоскости $U_r(x, y)$ может быть построена на основе расстояния $\rho(x, y)$ до ближайшего препятствия из заданной точки $[x, y]$ в конфигурационном пространстве и имеет следующий вид:

$$U_r(x, y) = \begin{cases} \eta \left(\frac{1}{\rho(x, y)} - \frac{1}{d_0} \right)^2, & \text{если } \rho(x, y) < d_0 \\ 0, & \text{если } \rho(x, y) \geq d_0 \end{cases}$$

где η — постоянный параметр масштабирования, а d_0 — параметр, контролирующий влияние потенциала отталкивания.

После построения комбинированного потенциала $U(x, y) = U_a(x, y) + U_r(x, y)$, рисунок 30в, желаемая скорость БВС может быть оценена как $v \propto \nabla U(x, y)$. На рисунке 31 представлен график градиентов, где каждая стрелка определяет локальное направление движения и величину скорости. Таким образом, выявление препятствий на локальной карте приводит к корректировке локальных траекторий БВС, рисунок 31.

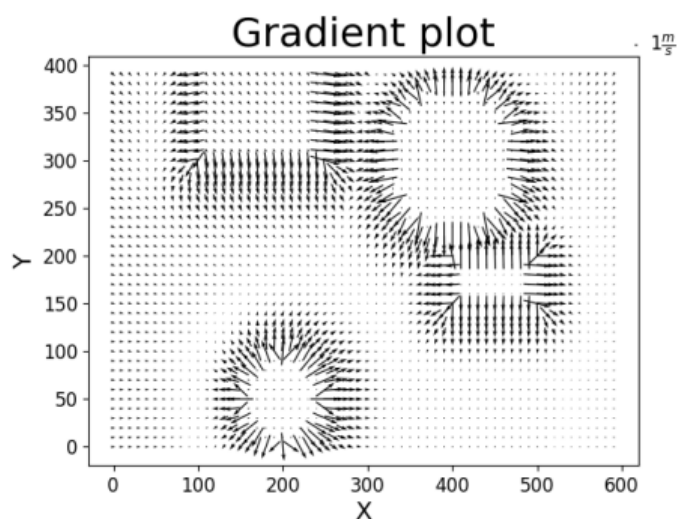


Рисунок 31 – Градиент комбинированной потенциальной функции

Каждый БВС и препятствие на карте обладает своим локальным потенциалом, вносящим свой вклад в глобальное поле. Эти искусственные потенциалы определяют силы взаимодействия между соседними БВС и препятствиями. На рисунке 32 этой силы представлены внутри формирования четырех БВС, изображенных в виде точек. Этот график градиента визуализируется для БВС, изображенного зеленой точкой. Других агентов в группе он распознает как препятствия, а его желаемое положение (одна из вершин формации ромб) является для него точкой притяжения.

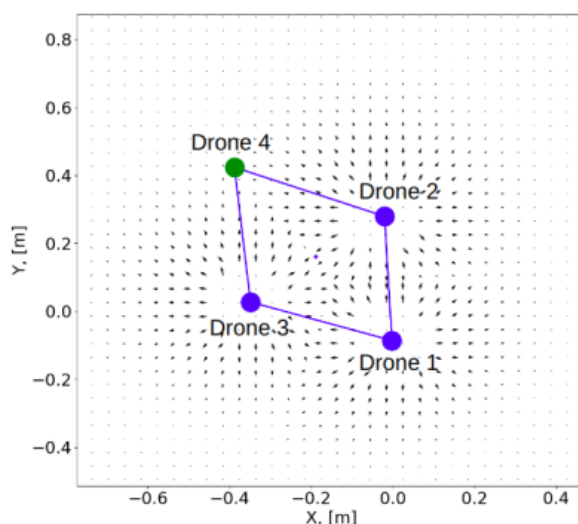


Рисунок 32 – Стратегия предотвращения столкновений между агентами, основанная на методе потенциального поля. Рисунок показывает, как целевой БВС (обозначен зеленым цветом) распознает 3 других БВС (обозначенных синим цветом) на карте градиента

Таким образом, группа БВС способна избежать столкновения с препятствиями, а также между собой, исходя из актуального положения статических, так и динамических препятствий. Благодаря интерактивному

характеру метода уклонения от препятствий в потенциальном поле можно предотвратить столкновения БВС с другими движущимися объектами в режиме реального времени. Последовательность рисунка 33 демонстрирует, как два БВС одновременно избегают движущихся препятствий не сталкиваясь друг с другом. В этом эксперименте БВС совершили взлет и удерживали свои первоначальные позиции X, Y, обладая априорной информацией о расположении препятствий. После этого препятствия притягивались к БВС, нарушая их расположение. БВС в это время отклонялись от движущихся препятствий и друг от друга, когда им дали команду лететь вплотную, см. рисунок 33.

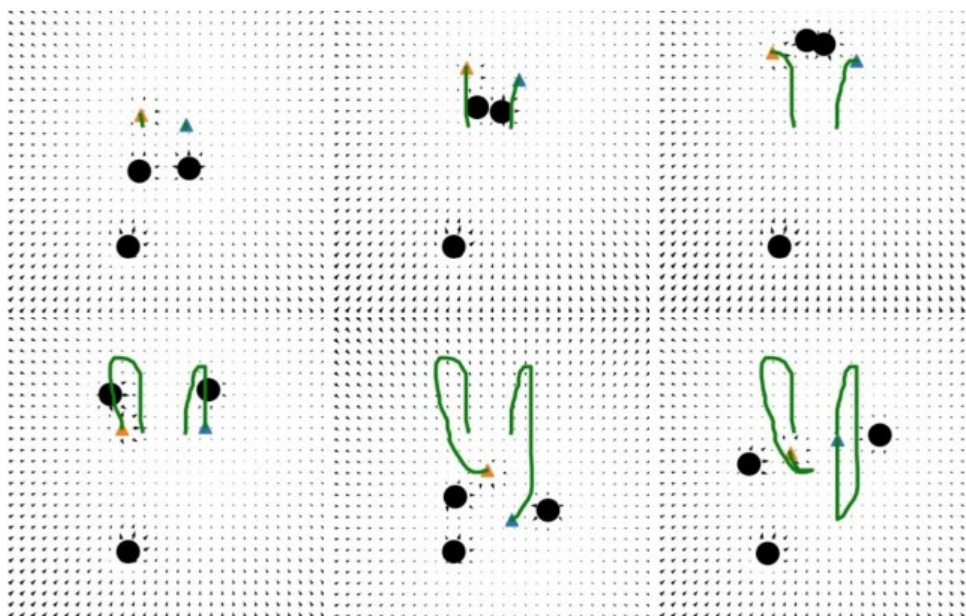


Рисунок 33 – Два БВС с движущимся препятствием

В реальном приложении группа БВС должна иметь возможность изменять свой путь или формацию в соответствии с динамическими препятствиями, возникающими на пути. Рисунок 33, демонстрирует возможность применения локального планировщика на основе искусственных потенциальных полей для навигации группы из 4 БВС на карте с движущимися динамическими препятствиями.

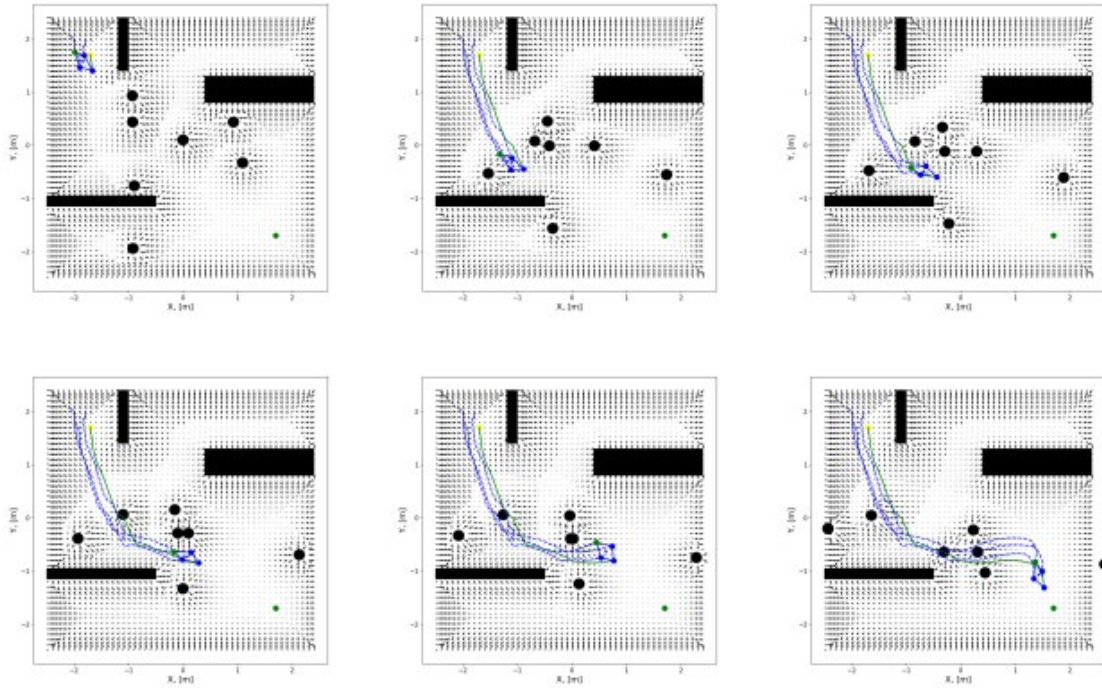


Рисунок 34 – Последовательность движения формации из 4 БВС с алгоритмом планирования пути на основе искусственных потенциальных полей, смоделированная на карте движущихся препятствий

Для расчета локальной траектории для обхода статического препятствия достаточно простого алгоритма построения траекторий, основанного на вероятностном методе. Наиболее известный алгоритм – это RRT и его модификации [Zammit C., Van Kampen E. J. Comparison Between A* and RRT Algorithms for 3D UAV Path Planning //Unmanned Systems. – 2022. – Т. 10. – №. 02. – С. 129-146.]. Данный алгоритм прост в реализации, быстро находит локальную траекторию в обход препятствия. Кроме того, одно из важных преимуществ, алгоритм RRT всегда находит траекторию, даже в сложных средах с высоким содержанием препятствий. Кроме того, RRT показывает отличные результаты при генерировании траектории для БВС в трёхмерной среде [Zammit C., Van Kampen E. J. Comparison Between A* and RRT Algorithms for 3D UAV Path Planning //Unmanned Systems. – 2022. – Т. 10. – №. 02. – С. 129-146.].

Рассмотрим процесс построения траектории лидера группы на основе алгоритма RRT. Сначала RRT-алгоритм приступает к построению дерева, генерируя случайные состояния выборки в пространстве поиска. Дерево начинается с начального состояния $x_{init} \in X_{free}$, которое является первой вершиной дерева, и расширяется, чтобы найти путь к состоянию цели $x_{goal} \in X_{free}$. Далее функция $Nearest_Neighbor(x_{rand}, Q_{near}, T)$ используется для нахождения состояния $x_{nearest}$ к x_{rand} среди всех существующих состояний Q_{near} в текущем дереве T . Функция $Select_Input(x_{rand}, x_{nearest})$ обеспечивает выбор входа u , который

позволяет системе перейти от $x_{nearest}$ к x_{rand} . Если x_{rand} может быть достигнуто от $x_{nearest}$ в пределах заранее определенного размера шага ρ , то дерево расширяется, соединяя оба состояния. В противном случае возвращается новое промежуточное состояние x_{new} с помощью функции управления $New_State(x_{nearest}, u, \Delta t)$. Таким образом, происходит расширение дерева за счет соединения x_{new} и $x_{nearest}$. После вычисления x_{new} алгоритм проверяет, пересекает ли отрезок $[x_{nearest} x_{new}]$ какие-либо препятствия или нет, чтобы обеспечить прямую связь между двумя состояниями. Затем состояние x_{new} , ребро от $x_{nearest}$ до x_{new} и вход u сохраняются в дереве T , здесь $x_{nearest}$ рассматривается как родительский элемент x_{new} , а последний – как дочерний элемент $x_{nearest}$. Алгоритм будет выполняться в цикле для M шагов, пока состояние x_{goal} не будет добавлено к T и цель не будет достигнута непрерывной траекторией. Для заданного начального состояния x_{init} строится быстро исследуемое случайное дерево T с M вершинами.

RRT-алгоритм

$T = (V, E) \leftarrow RRT(x_{init})$

```

1   $T: Initialize\_Tree();$ 
2   $T: Insert\_Initial\_Node(T, x_{init});$ 
3  for  $j: 0$  to  $M$  do
4     $X_{rand} = Random\_State();$ 
5     $X_{nearest} = Nearest\_Neighbor(x_{rand}, Q_{near}, T);$ 
6     $U = Select\_Input(x_{nearest}, x_{rand});$ 
7    If  $Obstacle\_Free(x_{new}: x_{nearest} x_{rand})$  then
8       $X_{new} = New\_State(x_{nearest}, U, dt);$ 
9       $T: Add\_Vertex(x_{new});$ 
10      $T: Add\_Edge(x_{nearest}, x_{new}, U);$ 
11   end
12   return  $T;$ 
13 end

```

Пример построенной RRT-траектории в среде с высоким содержанием препятствий представлен на рисунке 35.

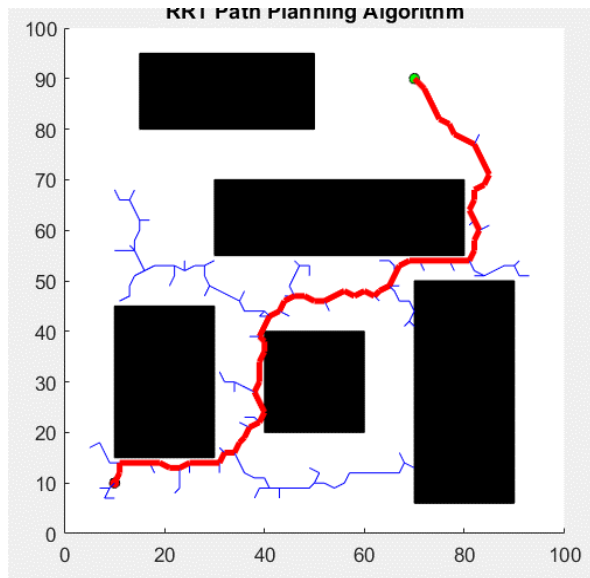


Рисунок 35 – Пример построения RRT-траектории в среде с высоким содержанием препятствий

7.2 Порядок действий при потере радиосвязи с наземной станцией

Потеря радиосвязи достаточно часто встречающаяся проблема, особенно при функционировании группы БВС на больших расстояниях. Потеря радиосвязи может быть вызвана поломкой приёмника-передатчика, ослабления сигнала из-за помех, специальной наводки. В зависимости от характера внештатной ситуации по потере связи с наземной станцией БВС принимает решение о зависании в текущей координате и ожидании появления связи, экстренной посадке или возврате на точку старта. Соответствующий алгоритм реагирования БВС приведен на рисунке 36.

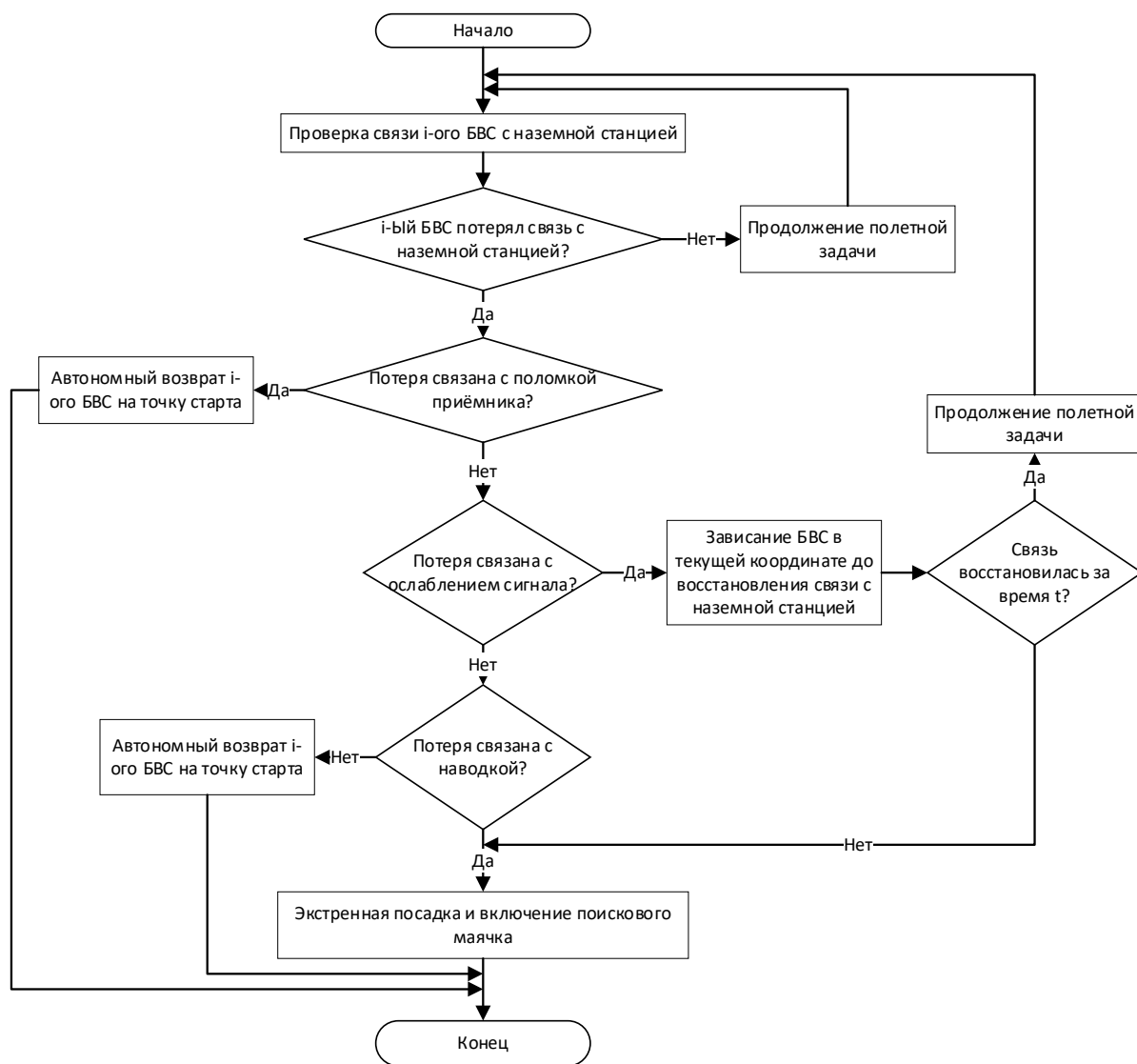


Рисунок 36 – Порядок действий при потере радиосвязи с наземной станцией

Алгоритм предназначен для решения внештатной ситуации по потере радиосвязи i -ого БВС с наземной станцией. В начале алгоритма проверяется соединение между БВС и наземной станцией. Если связь не была потеряна, то полетная задача продолжается в штатном режиме с дальнейшей периодической проверкой связи между БВС и наземной станцией. Если связь БВС с наземной станцией была потеряна по причине поломки приёмника, то БВС переходит в режим автономного возврата на точку старта. Если связь БВС с наземной станцией была потеряна по причине ослабления сигнала, то начинается отсчет времени, который продолжается до критического значения t . Данное значение задается в параметрах полетной задачи в начале работы с системой. Пока происходит отсчет времени, БВС удерживает свою текущую позицию в ожидании восстановления связи. Если лимит времени t превышен, то БВС переходит в режим автономной посадки. Если потеря связи произошла по причине специальной наводки или внешней атаки на БВС, то БВС переходит в режим экстренной посадки.

7.3 Порядок действий при исчерпании энергетического ресурса

На рисунке 37 представлен алгоритм разрешения внештатной ситуации по управлению группой БВС на основе информации о запасах энергетических ресурсов.

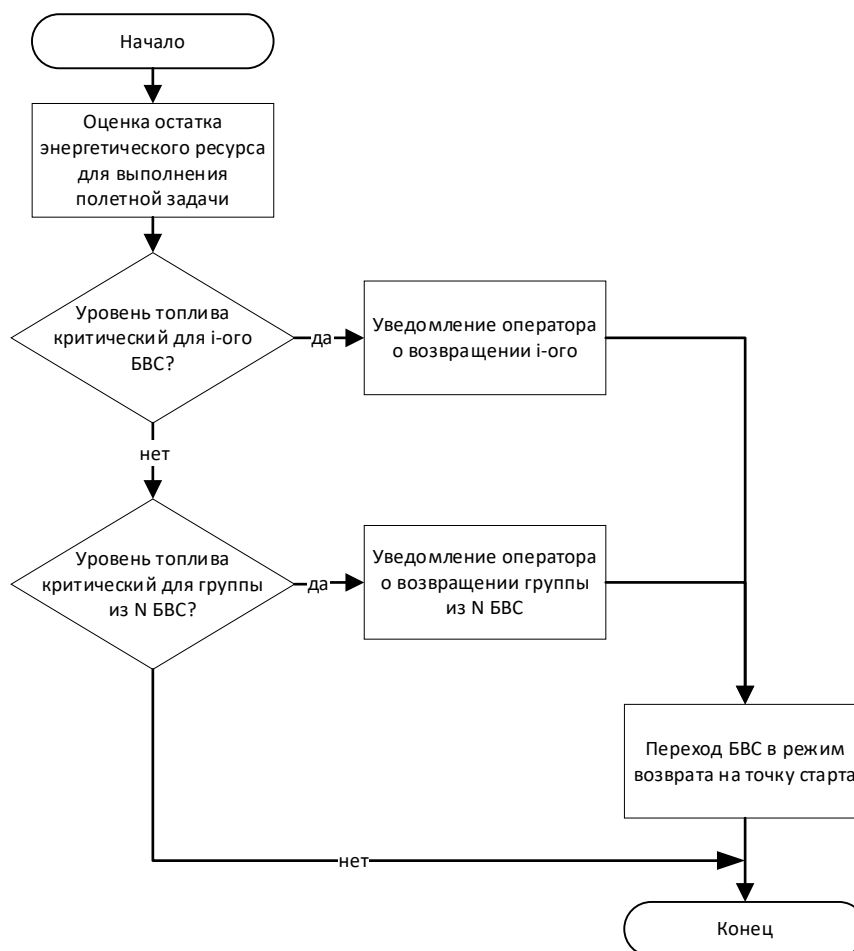


Рисунок 37 – Алгоритм разрешения внештатной ситуации по управлению группой БВС на основе информации о запасах энергетических ресурсов

В начале работы алгоритма на основании оставшегося энергетического ресурса БВС и его траектории прогнозируется остаток заряда аккумулятора, который останется после возвращения БВС на точку посадки. Если остаток заряда аккумулятора у i -ого БВС или у группы из N БВС ниже того уровня, который определен оператором в параметрах миссии, то оператор уведомляется о том, что i -ый БВС или группа из N БВС переходят в режим возврата на точку старта. Если ни одно из условий выше не выполнилось, то считается, что внештатной ситуации по энергетическим ресурсам не наступило.

7.4 Порядок действий при обнаружении технической неисправности на борту БВС

Проблемы, связанные с поломкой подсистем БВС, нередки, особенно в задачах, где БВС функционирует на расстояния более 10 км от наземной станции. Для того, чтобы избежать внештатные ситуации, связанные с техническими неисправностями необходимо перед каждым полетом проверять все подсистемы БВС и производить корректную калибровку акселерометров и магнитометра, датчиков тока. Однако, бывают проблемы, связанные с электромоторами, регуляторами скорости и некорректной калибровкой датчиков. В данном случае БВС должен немедленно совершить посадку, потому как зависание в точке или возврат на точку старта может привести к крушению БВС. В данном случае оператору по радиоканалу отправляется id БВС, код ошибки и последняя GPS-координата, где находился БВС (рисунок 38).



Рисунок 38 – Алгоритм при обнаружении технической неисправности на борту БВС

Данный алгоритм не может гарантировать успешную посадку и сохранность БВС. Однако, данный алгоритм позволяет избежать

столкновений неисправного БВС с другими агентами и объектами, что исключит возможность масштабных разрушений.

7.5 Порядок действий при смене погодных условий

При работе группы БВС на обширной территории возможна ситуация, когда погодные условия меняются: изменение температуры, увеличение скорости ветра, изменение направления ветра, повышение влажности или наличие осадков. К сожалению, изменение погодных условий невозможно предсказать заранее. Однако определив действия, которые необходимо предпринять, оператор может сохранить группу БВС.

В момент смены погодных условий группа БВС переходит в режим комбинированного управления, когда оператор может отправить группе БВС команды, которые имеют высокий приоритет, достаточный для прерывания всех текущих полетных задач. Модели комбинированного управления обеспечивают функционирование группы БВС при возникновении внештатных ситуаций в полуавтономном режиме. Это позволяет оператору брать под контроль БВС, с которыми произошла кризисная ситуация и отслеживать дальнейшие действия оставшейся группы. Оператор может взять БВС под контроль двумя способами: перевести БВС в ручной режим или отправлять команды по радиосвязи. Зачастую переход в ручной режим управления БВС, т.е. перехват управления БВС с пультом управления, невозможен по ряду причин: если в зоне риска находится более 2-ух БВС, то одному оператору физически невозможно одновременно взять управление ими на себя. Кроме того, БВС могут отлетать на 2 и более километров, когда визуальное управление устройством в ручном режиме не может быть успешно организовано. В данных условиях двусторонняя радиосвязь, соединяющая наземную станцию и управляемые БВС, позволяет оператору принимать решения об экстренной остановке текущей полетной задачи и отправлять на БВС команды экстренной посадки или возврата на точку старта. При получении данных команд БВС совершает посадку и возвращается на точку старта в автономном режиме. Решение об отправке данных команд напрямую зависит от оператора, его квалификации и предписанных условий эксплуатации БВС. К условиям, требующим немедленного вмешательства оператора можно отнести наличие сильного дождя, снега, грозных явлений, либо резких порывов ветра с горизонтальной скоростью более 12-15 м/с и вертикальными порывами более 3 м/с. Повышение влажности, резкое уменьшение или повышение температуры воздуха не является причиной отправки на БВС команд экстренной посадки или возврата на точку старта.

8 Разработка системы планирования траекторий движения для группы БВС при выполнении полетных задач.

Планирование маршрутов облета территориально распределенных целей – важная задача в процессе доставки геосенсоров посредством БВС. Для решения данной задачи предлагается использовать комбинацию известных алгоритмов, позволяющий на основе информации о целях и используемых БВС распределить выбранные цели между участниками группы, построить оптимальные маршруты облета целей для каждого БВС. Оптимальность маршрута выражается в малом времени, затрачиваемом на планирование данного маршрута и на полёт БВС до цели или группы целей. Кроме того, сгенерированный маршрут для каждого БВС из группы должен быть безопасным и удовлетворять ограничениям, накладываемым на его построение требуемой динамикой объекта, включая минимально возможную длину пути, отсутствие резких поворотов и петель, избегание непреодолимых препятствий и столкновений с другими БВС в группе [Wagner G., Choset H. Subdimensional expansion for multirobot path planning // *Artificial Intelligence*. 2015. vol. 219. pp. 1–24.]. Алгоритм расчета траектории для БВС должен всегда находить маршрут, если таковой существует; если маршрут найти невозможно – алгоритм должен информировать об этом оператора [Vokhmintcev A., Yakovlev K. A Real-Time Algorithm for Mobile Robot Map-ping Based on Rotation-Invariant Descriptors and Iterative Close Point Algorithm // *International Conference on Analysis of Images, Social Networks and Texts*. 2016. pp. 357–369.].

Задача планирования облета группой БВС множества целей может быть поставлена следующим образом: при известном количестве БВС и их значимых характеристиках (координаты начального местоположения, диапазон скоростей, дальность полета, угол обзора, минимальный радиус разворота), а также известном количестве целей и их характеристиках (географические координаты целей, время нахождения в целевой точке и вид работ, осуществляемых БВС) необходимо с использованием алгоритма распределения целей составить матрицу соответствия между группой БВС и множеством целей, а также выполнить планирование траекторий для каждого БВС в группе, чтобы обеспечить покрытие всех целей.

В общем виде способ поиска маршрутов состоит из трёх этапов: этап формирования матрицы соответствий между целевыми объектами, которые могут быть выражены в географических координатах, и БВС в группе; этап планирования траекторий до назначенных целей; этап устранения возможных столкновений между БВС. Матрицей соответствия в рассматриваемом решении считается матрица распределения всех целей или набора целей группе БВС. Затем производится поиск маршрута для каждого БВС одним из известных алгоритмов (вероятностные алгоритмы, эвристические алгоритмы,

алгоритм потенциальных полей). В заключение, на основе сгенерированных траекторий для каждого БВС алгоритм предотвращения столкновений решает задачу устранения коллизий между БВС путем переназначения целевых объектов, перестроения траекторий у БВС, назначением временной задержки или изменением скорости движения БВС. На каждом этапе упоминается некоторая задача, которая решается известными алгоритмами. На первом этапе – алгоритм распределения целей, на втором – алгоритм планирования траекторий, на третьем – алгоритм устранения столкновений. Комбинация всех алгоритмов решает глобальную задачу по разработке системы планирования траекторий для группы БВС, выполняющих полетное задание по доставке сейсмодатчиков.

8.1 Алгоритм распределения целей

Одним из первых алгоритмов, разработанных для решения проблемы распределения целей (задач, функций) между группой агентов, является Венгерский алгоритм [Kuhn H. The Hungarian Method for the Assignment Problem // Naval Research Logistics. 1955. Vol. 52. P. 7 – 21.], который позволяет распределить агентов по целевым функциям таким образом, чтобы минимизировать затраты на их выполнение.

Другим возможным решением задачи распределения целей является использование потенциальных полей для притяжения РС (робототехнических средств) к свободным целевым позициям [Zavlanos M., Pappas G. Dynamic assignment in distributed motion planning with limited information // Proc. of the American Control Conference. USA, New-York City, 2007. P. 1173 – 1178.]. Достоинствами данного подхода являются его децентрализованность и способность одновременно решать задачи целераспределения и синтеза структуры строя. Недостаток этого подхода проявляется в тех случаях, когда сенсорная и коммуникационная подсистемы РС не позволяют идентифицировать уже занятую целевую позицию на достаточном удалении, что приводит к их избыточным перемещениям.

Для решения задачи целераспределения также нередко используются подходы с применением метода релаксаций Лагранжа [Ni M., Yu Z., Ma F., Wu X. A Lagrange Relaxation Method for Solving Weapon-Target Assignment Problem // Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering. 2011. Vol. 1. P. 1 – 10.], линейного целочисленного программирования и нелинейных сетевых потоков [Rockafellar R. Network Flows on Monotropic Optimization // USA, New-York: Wiley, 1984. 616 p.], динамического программирования [Sikanen T. Solving Weapon Target Assignment Problem with Dynamic Programming // Independent research projects in applied mathematics. 2008. 32 p.], нечетких моделей [Mukhedkar R., Naik S. Weapon Target Allocation Problem Using Fuzzy Model // Intern. J. of Application or Innovation in Engineering &

Management. 2013. Vol. 2. № 6. P. 279 – 289], нейронных сетей [Wachholder E. A Neural Network-Based Optimization Algorithm for the Static Weapon-Target Assignment Problem // ORSA J. on Computing 4. 1989. P. 232–246.], генетических алгоритмов [Lu Y., Miao W., Li M. The Air Defense Missile Optimum Target Assignment Based on the Improved Genetic Algorithm // J. of Theoretical and Applied Information Technology. 2013. Vol. 48. № 2. P. 809 – 816.], муравьиных алгоритмов [A Hybrid Heuristic Ant Colony System for Coordinated Multi-Target Assignment / B. Liu, Z. Qin, R. Wang, Y-B. Gao, L-P. Shao // Information Technology Journal. 2009. Vol. 8. № 2. P. 156 – 164]. Большая часть представленных в литературе алгоритмов предназначена для решения задачи назначения БВС из \mathbf{R} целевых точек в структуре строя группы Γ_W или распределения среди них некоторого набора целевых задач (функций). Их использование ограничивается случаем, когда количество целевых точек (задач, функций) совпадает с числом БВС ($M = N$), то есть такие алгоритмы не позволяют назначить цели более одного БВС либо, как в [Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М.: Физматлит, 2009. 278 с.], они предполагают наличие дополнительной априорной информации. Это значительно ограничивает эффективность организации БВС кластеров и групп, и не гарантирует максимального приращения общего целевого функционала.

Алгоритм целераспределения должен обладать свойствами универсальности, гибкости и масштабируемости. Универсальность алгоритма даст возможность настройки моделей распределения целей между БВС в соответствии с заданной системой приоритетов, что в том числе позволит одновременно решать задачи целераспределения и синтеза структуры строя. Масштабируемость алгоритма должна позволить эффективно решать задачу целераспределения при произвольном количестве целей и БВС с различным набором функциональных возможностей.

Предположим, что все цели из множества \mathbf{G} и БВС из совокупности \mathbf{R} пронумерованы произвольным образом. Одни и те же задачи разные БВС из совокупности \mathbf{R} , выполняют с различной эффективностью. Это может быть обусловлено местоположением БВС, их энергозапасом, состоянием их различных подсистем. В системе управления БВС R_i оценивается эффективность достижения данным агентом каждой цели, и полученная оценка передается остальным БВС из \mathbf{R} .

Распределение целей представляет собой итерационный процесс, на каждом шаге которого происходит выбор одним или несколькими БВС из совокупности \mathbf{R} одной или нескольких целей из множества \mathbf{G} . На каждой итерации величина оценки эффективности целераспределения определяется следующим выражением:

$$Y_g = \sum_{t=t_0}^{t^*} \Delta Y_g(t), \quad (1)$$

где ΔY_g – вариации оценки, зависящие от произошедшего на данной итерации выбора БВС из совокупности \mathbf{R} целей из множества \mathbf{G} .

Общая оценка эффективности достижения i -м роботом j -й цели определяется соотношением

$$F_{i,j} = \sum_{l=1}^n K^{Cl} \cdot f_{i,j}^{Cl}, \quad (2)$$

где K^C – весовой коэффициент, определяющий степень важности некоторого критерия из множества $C = \{c_1, c_2, \dots, c_l, \dots, c_n\}$, а $f_{i,j}^{Cl}$ – частная оценка эффективности достижения цели относительно этого критерия. При этом:

$$f_{i,j}^{Cl} = \frac{\overline{Cl_{max}} - \overline{Cl}}{\overline{Cl_{max}}}, \quad (3)$$

где \overline{Cl} , $\overline{Cl_{max}}$ – оценки текущего и максимального значений критерия Cl .

Задача распределения целей состоит в том, чтобы в каждый момент времени t^* цели из множества \mathbf{G} были распределены по БВС из совокупности \mathbf{R} с точки зрения обеспечения максимума функционала:

$$Y_g = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M F_{i,j} \rightarrow \max, \quad (4)$$

при условии, что БВС из совокупности \mathbf{R} не всегда обладают полной информацией об обеспеченности целей.

Итак, под обеспеченностью цели понимается количество БВС, выбравших одну из целей на основе оценки эффективности достижения i -м БВС j -й цели. Поставленная задача сводится к выполнению двух последовательных операций:

1) распределение целей из \mathbf{G} по БВС из \mathbf{R} на основании текущей информации о параметрах каждого БВС и расстояний до каждой цели $g_j \in \mathbf{G}$. Данная информация может быть отражена в виде оценок эффективности (2) набором вида $\mathbf{F} = \{F_{i,j}\}$;

2) оценка необходимости перераспределения целей между БВС с учетом информации о текущей обеспеченности целей, содержащейся в наборе $\mathbf{P} = \{P_{1,j}\}$, а также прогноза обеспеченности целей и изменения коммуникационных связей между БВС в результате перераспределения. В случае необходимости происходит перераспределение целей g_j между БВС R_i .

Рассмотрим алгоритм распределения целей. На первом этапе БВС из совокупности \mathbf{R} по очереди выбираются цели из множества \mathbf{G} на основе максимальных оценок эффективности \mathbf{F} , вычисленных без учета критерия обеспеченности целей. Результаты выбора каждого БВС передаются

остальным агентам. При этом максимальные оценки $F_{i,j}$ для выбранной каждым из N роботов цели g_j и номер выбранной цели g_j сохраняются в массиве $\mathbf{D}_{2 \times M}$. Таким образом, для каждой из целей формируется набор БВС, выбравших эту цель.

На втором этапе в (2) учитывается и критерий обеспеченности целей в виде слагаемого $K^P \cdot f_{i,j}^P$. В соответствии с (3), чем больше алгоритм назначает БВС цель g_j , тем меньше для нее оценка $f_{i,j}^P$, и, следовательно, меньше интерес к этой цели со стороны других БВС из \mathbf{R} . Результаты вычисления $K^P \cdot f_{i,j}^P$ может быть представлен набором \mathbf{F}^P . Общие оценки эффективности \mathbf{F} обновляются, при этом у БВС R_i приращение $\Delta F_{j,i}$ для j -й цели будет тем больше, чем меньше она обеспечена. Для уменьшения количества вычислительных операций набор \mathbf{D} переопределяется с учетом приращения $\Delta F_{j,i}$ для целей из \mathbf{G} , выбранных на предыдущем этапе БВС из \mathbf{R} .

На третьем этапе из совокупности \mathbf{R} выбираются БВС, для которых оценка эффективности для текущей цели g_j , пересчитанная на втором этапе с учетом обеспеченности целей, стала меньше, чем оценка эффективности для другой цели g_j' . По результатам обмена информацией между РС составляется дополнительная двумерная матрица $\mathbf{V}_{N \times 2}$, которая состоит из нулей или номера цели g_j' и нового значения $F_{i,j}'$ оценки эффективности каждого БВС R_i , у которого это значение выше, чем значение $F_{i,j}$, для цели g_j .

На четвертом этапе выполняется проверка матрицы \mathbf{V} . Если она содержит только нулевые элементы, то в этом случае считается, что достигнуто наиболее эффективное распределение целей между роботами и процесс решения задачи завершается. В ином случае БВС из \mathbf{R} , для которых возможно увеличение функционала (4) путем замены текущей цели g_j на новую цель g_j' , определяют БВС R_i , для которого выгоднее всего осуществить указанную замену. Другими словами, из матрицы \mathbf{V} выбирается наибольшее значение оценки эффективности $F_{i,j}'$.

На пятом этапе выполняется прогноз вариации $\Delta \mathbf{Yg}$ для принятия решения о выборе БВС R_i новой цели g_j' . Если, согласно прогнозу, вариация $\Delta \mathbf{Yg}$ положительна, то текущая цель g_j заменяется БВС R_i на новую цель g_j' . Для этого необходимо вычислить:

– сумму оценок эффективности $F_{i,j}$ всех БВС, входящих в кластер, в котором находится выбранный БВС R_i :

$$Y_{g_j} = \sum_i F_{i,j}; \quad (5)$$

– сумму оценок эффективности $F_{i,j}'$ всех БВС, входящих в кластер, в котором будет находиться БВС R_i , если выберет новую цель g_j' :

$$Y_{g_j'} = \sum_i F_{i,j}'; \quad (6)$$

– сумму вида:

$$Y_{g_j+g_j'}^{(prev)} = Y_{g_j} + Y_{g_j'}. \quad (7)$$

Далее анализируются возможные изменения (5) – (7) в результате выбора БВС R_i новой цели g_j' . Для этого формируются новые матрицы оценок эффективности F_a и обеспеченности целей P_a и аналогично определяются значения выражений (5) – (7), после чего проверяется условие:

$$Y_{g_j+g_j'}^{(new)} > Y_{g_j+g_j'}^{(prev)}. \quad (8)$$

Выполнение условия (8) означает, что выбор БВС R_i новой цели g_j' , приведет к увеличению функционала (4). Если условие выполняется, то БВС R_i переходит в новый кластер, и происходит переход ко второму этапу алгоритма. Если условие (8) не выполняется, то матрица \mathbf{B} содержит нули для данных БВС R_i и цели g_j' и происходит переход к четвертому этапу алгоритма.

8.2 Алгоритм планирования траектории

После назначения целей, которые необходимо обслужить одним или несколькими БВС, следует построить маршруты следования для БВС. Задача построения маршрутов аналогична задаче планирования траекторий для БВС в трёхмерном пространстве.

Методы планирования траектории можно разделить на глобальные и локальные [Sullivan J. C. W., Pipe A. G. Path planning for redundant robot manipulators: a global optimization approach using evolutionary search //SMC'98 Conference Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (Cat. No. 98CH36218). – IEEE, 1998. – Т. 3. – С. 2396-2400.]. В первом случае БВС доступна полная карта препятствий окружающей среды, во втором – БВС строит карту и планирует свой путь по мере своего продвижения к цели, используя бортовые датчики. К классическим глобальным (статическим) алгоритмам планирования пути относятся все алгоритмы поиска на графе, построенному на основе карты окружающей среды, включая алгоритмы DFS, BFS, алгоритм A* [Hart P. E., Nilsson N. J., Raphael B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths //IEEE transactions on Systems Science and Cybernetics. – 1968. – Т. 4. – №. 2. – С. 100-107.], алгоритм на основе вероятностного метода: RRT [LaValle S.M. Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning // Iowa State University Ames. – 1998. – С. 4], Theta* и другие. Основной недостаток

статических алгоритмов — это отсутствие адаптации РС к изменяющимся параметрам окружающей среды. В связи с этим, используя только алгоритмы статического планирования в групповом управлении, невозможно исключить коллизии с другими агентами группы и динамическими препятствиями. Для усовершенствования алгоритмов статического планирования можно воспользоваться различными методами, в частности, дополнить базовый алгоритм графом Вороного [Nagatani K., Iwai Y., Tanaka Y. Sensor Based Navigation for car-like mobile robots using Generalized Voronoi Graph //Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Expanding the Societal Role of Robotics in the the Next Millennium (Cat. No. 01CH37180). – IEEE, 2001. – Т. 2. – С. 1017-1022.]. Граф Вороного используется для построения первоначального пути, который служит отправной точкой для итерационного поиска. В отличие от алгоритмов поиска по графу видимости и алгоритмов семейства RRT, которые находят кратчайший путь, граф Вороного позволяет находить наиболее безопасные для агента маршруты относительно расстояний до препятствий окружающей среды в каждой точке маршрута, что обусловлено принципом построения графа. Однако, граф Вороного все равно не исключает проблему возникновения столкновений между агентами в группе.

Примерами классических алгоритмов динамического или локального планирования пути являются алгоритм D* [Stentz A. Optimal and efficient path planning for partially known environments //Intelligent unmanned ground vehicles. – Springer, Boston, MA, 1997. – С. 203-220.] и его более распространенная версия D* Lite [Le A. T. et al. D* lite with reset: Improved version of D* lite for complex environment //2017 First IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC). – IEEE, 2017. – С. 160-163.] и модификации алгоритмов на основе RRT, включая RRT* [Karaman S., Frazzoli E. Sampling-based algorithms for optimal motion planning //The international journal of robotics research. – 2011. – Т. 30. – №. 7. – С. 846-894.] и RRTX [Otte M., Frazzoli E., RRT X. Real-time motion planning/replanning for environments with unpredictable obstacles //Algorithmic Foundations of Robotics XI. – С. 461-478.].

Выбор эффективного метода планирования пути зависит от наличия или отсутствия входных данных об окружающей среде, вычислительных характеристик БВС и его технических возможностей. Методы, предложенные выше, часто используются в задачах поиска пути на карте рабочей области группы от заданных целевых координат до известных конечных координат. При этом рабочая область, где находится группа, может быть с высокой плотностью застройки.

Из работы [Lebedev I., Lebedeva V. Analysis of «Leader–Followers» Algorithms in Problem of Trajectory Planning for a Group of Multi-rotor UAVs

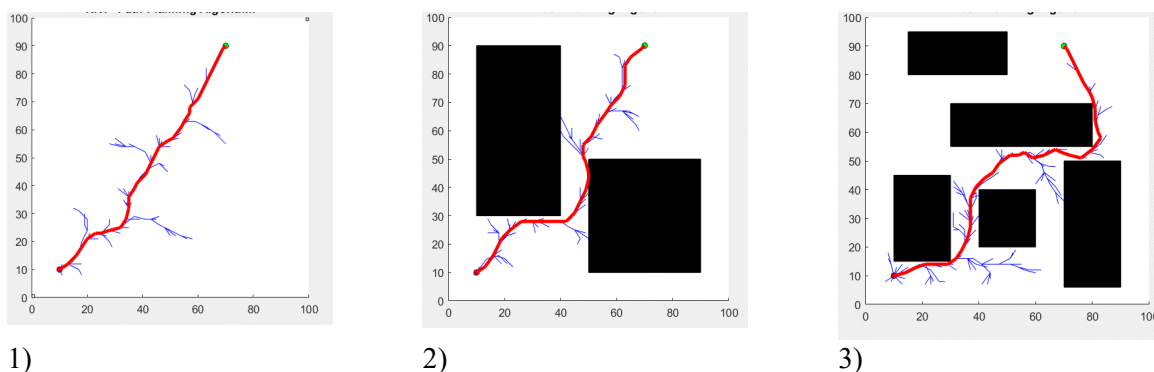
[//Proceedings of the Computational Methods in Systems and Software. – Springer, Cham, 2021. – С. 870-884.] следует, что алгоритмы RRT и RRT* в наибольшей степени подходят для решения задачи перемещения группы БВС на местности. RRT* является модификацией классического RRT [LaValle S.M. Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning // Iowa State University Ames. – 1998. – С. 4]. Сравнивая RRT и RRT* можно заметить, что RRT быстрее находит путь, чем RRT*. Однако, найденный путь RRT невозможно использовать на практике и его необходимо обрабатывать дополнительными средствами, например методом кривых Безье, что может негативно влиять на время работы планировщика. Построенная траектория RRT* как бы плавно обходит препятствия, тем самым сокращая длину пути. Также путь, найденный RRT* не нуждается в дополнительной обработке. Данная траектория подходит для движения реального БВС. Таким образом, в рамках проекта для решения задачи перемещения группы БВС на местности предлагается использовать алгоритм RRT*.

Основной принцип RRT* такой же, как у RRT, но два дополнения к базовому алгоритму приводят к лучшим результатам в случае применения данного решения. Во-первых, RRT* записывает расстояние, пройденное БВС, в каждой вершине относительно своей родительской вершины. Это называют стоимостью $cost()$ вершины. После того, как ближайший узел найден в графе, исследуется окрестность вершин фиксированного радиуса от нового узла. Если найден узел с более низкой стоимостью $cost()$, чем предыдущий узел, тогда узел с наименьшей стоимостью заменяет предыдущий узел. Эффект от этой особенности можно увидеть за счет веерообразной структуры построенного дерева.

Второе отличие, которое есть в RRT* – это дополнительная проверка дерева. После того, как вершина была соединена с вершиной меньшей стоимости, эти соседние вершины снова проверяются. Проверяются соседние вершины, если их присоединение к вновь добавленной вершине снизит их стоимость. Если стоимость действительно уменьшается, соседняя вершина соединяется с вновь добавленной вершиной. Это отличие делает спланированный путь более плавным, чем в стандартной версии RRT. Для поиска пути, особенно в плотном поле препятствий, траектория, построенная с помощью RRT*, более гладкая и не требует дополнительного сглаживания. Построенная траектория как бы плавно обходит препятствия, тем самым сокращая длину пути.

Результат тестирования RRT*-алгоритма представлен на рисунке 39. Для проведения экспериментов была выбрана рабочая область 100 на 100 метров (рисунок 39). Задача планирования решалась на трёх картах: карта №1 без препятствий, карта №2 с двумя препятствиями, карта №3 с пятью

препятствиями. Препятствия на карте обозначены черными областями. Стартовая и целевая позиции зафиксированы во всех экспериментах. Стартовая позиция с координатами [10,10] выделена красным маркером, целевая с координатами [70,90] – зелёным. БВС мультиторного типа в экспериментах был представлен как окружность с радиусом 1 метр. Найденные траектории, полученные в соответствии с описанным алгоритмом планирования RRT*, – обозначены красной линией. Синими линиями обозначены вспомогательные элементы построения траектории.



1) 2) 3)
 Рисунок 39 – Результаты тестирования алгоритма RRT*, представленные в виде найденного пути на карте рабочей области

8.3 Решение конфликтных ситуаций

Для решения конфликтных ситуаций предлагается использовать принцип оптимального взаимного предотвращения столкновений ORCA (Optimal Reciprocal Collision Avoidance). Алгоритм реализующий принцип ORCA представляет собой децентрализованный алгоритм предотвращения столкновений в комплексной среде. Основная идея алгоритма заключается в итеративном подборе новой скорости участника группы БВС, близкой к заданной скорости. Выбор новой скорости основан на принципе ORCA. Оптимальное взаимное предотвращение столкновений (ORCA) — принцип, обеспечивающий достаточное условие для того, чтобы несколько БВС избегали столкновений друг с другом, и, таким образом, может гарантировать навигацию и перемещение БВС без столкновений. В основе принципа лежит понятие скоростных препятствий, которые используются для поиска новой скорости агента, чтобы за время t не произошло столкновений с другими агентами.

В процессе поиска новой скорости алгоритм создает набор из $(n-1)$ линейных ограничений (где n — количество агентов). Новая скорость (V_{new}), которая удовлетворяет этим ограничениям и близка к предпочтительной скорости. Новую скорость можно найти с помощью линейного программирования. Предпочтительная скорость выбирается таким образом, чтобы агент совершал движение в целевую точку [ORCA URL: <https://gamma.cs.unc.edu/ORCA/> (дата обращения ноябрь 2022)]. При этом

агент представляет собой шар радиуса r с центром в точке p с начальной и глобальной целевыми позициями. Для каждого соседнего агента (находящегося на расстоянии R или меньше) известны их положение и текущая скорость. В начале выполнения задачи каждый агент пытается найти путь к своей назначенной цели, используя алгоритм RRT*. Получив глобальный путь (представляющий собой последовательность точек в пространстве, где первая точка является назначенной целью, агент начинает движение. Первая целевая точка является последним элементом в последовательности пути. На каждом шаге моделирования для каждого агента происходит поиск новой скорости V_{new} с использованием алгоритма на принципе ORCA. После этого глобальное время моделирования изменяется на dt , положение всех агентов изменяется на $dt * V_{new}$ (свое для каждого агента). Если агент достиг последней точки последовательности, то следующая точка последовательности становится целью, а предыдущая удаляется. В противном случае выполняется проверка видимости между позицией агента и последней точкой. Если видимость подтверждена, то целевой точкой становится последняя, иначе происходит поиск пути от позиции РС до последней точки. Структурная блок-схема в отношении данного алгоритма представлена на рисунке 40.

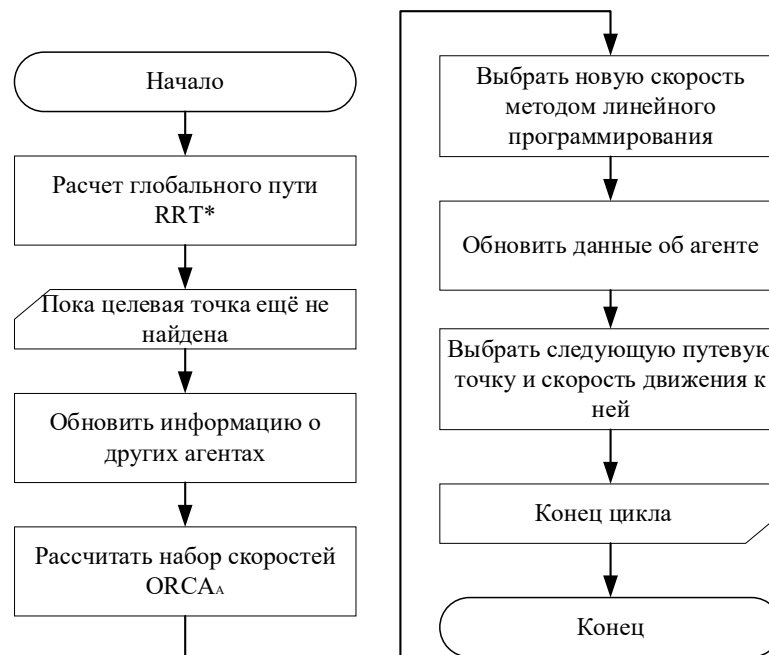


Рисунок 40 – Блок-схема алгоритма разрешения конфликтных ситуаций

В результате, для реализации системы планирования траекторий движения для группы БВС при выполнении полетных задач необходимо использовать комбинацию из трёх алгоритмов: алгоритм распределения БВС между целевыми объектами, алгоритм планирования глобального пути RRT* для каждого БВС из группы и алгоритм разрешения возможных столкновений,

основанный на принципе ORCA. Комбинация приведенных алгоритмов, а также их совместная работа позволит реализовать систему планирования траекторий движения для участников группы и исключит возможные столкновения, генерирование траекторий не будет вычислительно сложным, сгенерированные траектории будут проходимыми для БВС и учитывать препятствия, а используемый алгоритм распределения целей гарантирует обслуживание всех целевых объектов.

Для подтверждения работоспособности предлагаемого метода было проведено компьютерное моделирование планирования траекторий для группы БВС на территории размером 10 на 10 км. На заданной территории случайным образом были определены целевые точки, которые должны были посетить БВС. Стартовое положение БВС также было задано случайным образом для каждого эксперимента. Состав группы, а именно, количество БВС в группе менялось в каждом эксперименте. Количество целевых точек определялось следующим образом: для первой серии экспериментов количество целевых точек равнялось количеству БВС в группе, а во второй серии экспериментов количество целевых точек равнялось $N+(N*0.25)$, где N – количество БВС в группе с округлением в большую сторону. С каждым количеством БВС в группе было проведено не менее 100 тестов. Все результаты представлены в таблице 8.

Таблица 8. Результаты компьютерного моделирования

№	Количество БВС в группе	Количество целевых точек	Среднее время, затраченное на распределение и назначение целевых точек, с	Среднее время, затраченное на генерирование всех траекторий, с	Среднее количество конфликтных ситуаций
1	2	2	0,0119	0,0044	0
2		3	0,0352	0,0125	0
3	3	3	0,0905	0,0165	1
4		4	0,0751	0,0491	1
5	4	4	0,073	0,0364	1
6		5	0,0759	0,0468	2
7	5	5	0,0945	0,0298	2
8		7	0,0273	0,0381	2
9	6	6	0,0559	0,0285	2
10		8	0,0476	0,0798	2
11	7	7	0,0416	0,0849	3
12		9	0,098	0,0627	4
13	8	8	0,0384	0,0196	4
14		10	0,0581	0,0619	4
15	9	9	0,0211	0,0281	5
16		12	0,0894	0,0811	5
17	10	10	0,0166	0,0458	6
18		13	0,0908	0,0931	6

В результате компьютерного моделирования удалось установить, что суммарное среднее время, затраченное на распределение целей между БВС и построение траекторий до этих целей, не превышает 1 с, т.е. процедура планирования происходит в режиме, приближенному к реальному времени. Количество конфликтных ситуаций указывает на то, что время выполнения полетной задачи может увеличиться из-за решения конфликтных ситуаций. Соответственно, чем больше БВС в группе, тем больше конфликтных ситуаций и тем больше времени необходимо именно на выполнение полетного задания. Результаты, приведенные в таблице 8, доказывают применимость предлагаемой системы планирования траекторий движения для группы БВС при выполнении полетных задач, отличающейся от множества других систем наличием блока целераспределения и целеназначения, блоком генерирования траекторий для каждого БВС на основе RRT* алгоритма и блоком решения конфликтных ситуаций на основе метода ORCA. Кроме того, предлагаемая система планирования решает задачу генерирования траекторий для БВС в режиме приближенному к реальному времени.