

УДК 004.852

# УПРАВЛЕНИЕ БЕСПРОВОДНОЙ НОДАЛЬНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГРУППЫ БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СРЕДСТВ

**А.Л. Ронжин**

*Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук*  
Россия, 119178, Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., 39  
E-mail: ronzhin@ias.spb.su

**М.А. Астапова**

*Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук*  
Россия, 119178, Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., 39  
E-mail: ronzhin@ias.spb.su

**Г.Н. Ерохин**

*Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта*  
Россия, 236041, Калининград, ул. А. Невского, 14  
E-mail: gerokhin@kantiana.ru

**В.М. Агафонов**

*ООО «Р-Сенсор»*  
Россия, 141701, Московская область, Долгопрудный, Лихачевский проезд, д. 4  
E-mail: agvadim@yandex.ru

**Ключевые слова:** групповое управление, аэромониторинг, беспилотные воздушные системы, нодальные сейсмические системы, векторная сейсморазведка.

**Аннотация:** Описаны принципы функционирования беспроводной нодальной сейсмической системы, в которой взаимодействие нодов и передача данных обеспечивается за счет использования группы беспилотных воздушных систем (БВС) в районе проведения операции. Разработанная система отличается способностью к автономному развертыванию, функционированию и ориентирована на применение в труднодоступных территориях. Планирование маршрутов движения группы БВС при выполнении полетных задач основано на комбинированном использовании алгоритма планирования глобального пути для каждого БВС из группы и алгоритма разрешения возможных столкновений. Комбинация алгоритмов позволила реализовать систему планирования маршрутов движения для участников группы и исключить возможность столкновения между ними. Собираемые данные используются в ходе решения задач двумерной и трехмерной векторной сейсморазведки на основе подходов к миграции в обратном времени и угловой декомпозиции волн, отличающиеся повышенной устойчивостью к рельефу исследуемой местности и динамическим изменениям внешней среды.

Формирование и поддержание функционирования технологической инфраструктуры наземных сейсмических систем (СС) с применением кабельных решений сопряжена со значительными временными и ресурсными затратами, поэтому современная тенденция состоит в переходе к автономно функционирующим цифровым нодам, в едином устройстве, объединяющем первичный сейсмический датчик с

системой регистрации, а также использовании группы беспилотных воздушных систем (БВС) для их транспортировки [1]. Преимущество нодальных систем состоит в более простом развертывании и «робастности», выраженной в устойчивости узлов к нарушению каналов передачи данных между ними и центральным узлом СС. Недостатком существующих решений является отсутствие оперативной информации о качестве получаемых экспериментальных данных, а также недостаток возможностей по управлению сейсмическим экспериментом в режиме реального времени [2]. Таким образом, на сегодняшний день практически отсутствуют СС, способные к быстрому развертыванию на местности и при этом позволяющие в полной мере осуществлять контроль и управление экспериментом в реальном времени.

Рассмотрим технические характеристики некоторых современных бескабельных телеметрических сейсморегистрирующих систем зарубежного и отечественного производства. Сравнение отдельных наиболее известных на рынке нодальных высококомобильных сейсмических систем приведено в таблице 1.

**Таблица 1.** Сравнение основных нодальных высококомобильных сейсмических систем.

Производитель	Тип датчика	Автономность	Вес	Возможность самотестирования нода	Объем памяти	Разрядность АЦП	Размеры	Полоса
Sercell WiNG DFU [3]	MEMS акселерометр	1200ч	830г	есть	Нет данных	24бит	112x 137x 118	от 3 Гц
GTI NuSeis NRU 1C [4]	геофон	600ч	690г	есть	8-64 Гб	24бит	54x 209	от 5 Гц
Geospace GCR [5]	геофон	1440ч	1260г	есть	32/64 Гб	24бит	140x 110x 178	от 10 Гц
Inova Quantum [6]	геофон	1200ч	650г	нет	8/16 Гб	24бит	109x 98x 107	от 5 Гц
DTCC SmartSolo IGU-16(HR) [7]	геофон	600ч	1100г	нет	8-32 Гб	24бит	95x 103x 1118	от 5 Гц
Stryde/BP Nimble node [8]	Пьезо акселерометр	672ч	150г	нет	нет данных	нет данных	130x 40	от 10 Гц
Wireless Seismic RT3 [9]	геофон	648ч	1000г	нет	8 Гб	24/32 бит	Нет данных	от 10 Гц

Созданная система позволяет реализовать автоматизированное размещение и сбор сейсмических модулей (СМ), оснащенных специализированным креплением с маркером для точного наведения БВС при захвате после проведения эксперимента. Разработанные модели механической конструкции высококомобильного малогабаритного цифрового сейсмического модуля обеспечивают возможность беспроводной передачи данных в условиях динамически изменяющегося внешнего окружения [10]. В ходе работ было разработано два принципиально разных варианта конструкции модуля, отличающихся форм-фактором корпуса и используемой электронной элементной базой. Конструкция сейсмического модуля в корпусе диаметром 102 мм, учитывая габаритное соотношение высота/диаметр, является более устойчивой на неровных поверхностях, чем альтернативная конструкция в корпусе диаметром 63 мм. Модуль содержит цифровой блок, который имеет 24 битный АЦП, что обеспечивает большее разрешение по отношению сигнал/шум, по сравнению с 14 битным АЦП в случае модуля в корпусе 63 мм. Ключевое преимущество последней конструкции связано с тем, что в данном исполнении модуль будет иметь вес до 3,5 кг по сравнению с

исполнением в корпусе с диаметром 102 мм, вес которого в данном исполнении предположительно будет составлять порядка 6,5 кг, что значительным образом влияет на возможности роботизированных средств по размещению сейсмических модулей. Разработанная функциональная схема цифрового сейсмического модуля обеспечивает беспроводную передачу данных в условиях динамически изменяющегося внешнего окружения с учетом различных режимов функционирования.

При проведении аэромониторинга местности группой БВС формируется актуальная карта местности для последующей разметки зон установки сейсмических модулей. Существуют различные методики разбиения рабочей области на сектора для построения маршрута покрытия территории. В частности, в работе [11] авторы провели исследование в поисках эффективного алгоритма разбиения рабочего пространства на сектора и сравнили точные и приближенные методы 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 [12]. 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 маршруты на каждой полученной области, используя известные паттерны движения, такие как возвратно-поступательное движение и спираль [13, 14]. Данный вид декомпозиции местности часто используется в многоагентных системах, где каждому агенту назначается его собственная область функционирования [15, 16]. При отсутствии возможности декомпозиции исследуемая область не делится на подобласти, а сам маршрут строится по принципу поступательного или возвратно-поступательного движения [17, 18], обеспечивая покрытие площади всей рабочей области. Ключевым преимуществом таких подходов является их низкая вычислительная сложность, позволяющая осуществлять расчет маршрутов для группы БВС в режиме реального времени. Основным недостатком при этом является неспособность подобных методов к превентивному учету статических препятствий в процессе построения маршрутов, которые могут быть нивелированы применением методов динамического распознавания препятствий и методов корректировки локальной траектории БВС на основе данных бортового сенсорного оборудования [19].

Предложенный подход основан на синхронизации работы БВС друг с другом и позволяет получать дополнительную информацию для корректировки функционирования автопилота на полетном контроллере. При планировании маршрутов покрытия исследуемой территории используются шаблоны возвратно-поступательного движения в сочетании с алгоритмами локального уклонения от препятствий.

Разработанная онтологическая модель обеспечивает систематизацию и формализацию визуальных признаков участков местности, пригодных к установке сейсмических модулей, в качестве основы которой был использован набор яркостных и спектральных индексов, базирующихся на интенсивности отражения от поверхности электромагнитного излучения. Дополнительно была предложена специализированная методика, направленная на выявление статистически значимых признаков для выделенных классов поверхностей и определения интервалов значений яркостных и спектральных индексов, соответствующих каждому заданному классу поверхностей.

Разработанные методы решения задач двумерной и трехмерной векторной сейсморазведки основаны на подходах к миграции в обратном времени и угловой декомпозиции волн, отличающиеся повышенной устойчивостью к рельефу исследуемой местности и динамическим изменениям внешней среды. Проведенный анализ современного состояния исследований в области использования результатов полной векторной декомпозиции (векторной сейсморазведки) в задачах разведки и контроля разработки месторождений нефти и газа подтверждает перспективность использования угловой информации в новых методах обработки сейсмической информации [20]. Новые требования к системе сбора полевой информации по размещению приемников и источников на поверхности необходимы для планирования и проведения расстановки сенсорных модулей с помощью беспилотных летательных аппаратов.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-69-00231, <https://rscf.ru/project/22-69-00231/>.

## Список литературы

1. Зайцев Д.Л., Брыксин В.М., Белотелов К.С., Компаниец Ю.И., Яковлев Р.Н. Алгоритмы и измерительный комплекс классификации источников сейсмических сигналов, определения расстояния и азимута до пункта возбуждения поверхностных волн // Информатика и автоматизация. 2022. № 6 (21). С. 1211-1239.
2. Yan R., Guan H., Xie X.-B., Wu R.-S. Acquisition aperture correction in the angle domain toward true-reflection reverse time migration // Geophysics. 2014. Vol. 79, no. 6, pp. 241-250, <http://dx.doi.org/10.1190/geo2013-0324.1>.
3. [www.sercel.com/](http://www.sercel.com/) (дата обращения 15.10.2023).
4. <https://geophysicaltechnology.com/> (дата обращения 15.10.2023).
5. <https://www.geospace.com/> (дата обращения 15.10.2023).
6. <https://www.inovageo.com/> (дата обращения 15.10.2023).
7. <https://smartsolo.com.ru/> (дата обращения 15.10.2023).
8. Brooks N., Ourabah A., Crosby A., Manning O., Naranjo J., Aulyazina D., Zhuzhel V., Holst A. Husom V. 3D field trial using a new nimble node // West Siberia, Russia. SEG Technical Program. Expanded Abstracts, 2018. P. 6-10.
9. <https://wirelessseismic.com> (дата обращения 15.10.2023).
10. Agafonov V., Egorov I., Akinina A. Frequency response of a six-electrode met sensor at extremely low temperatures // Sensors. 2023. Vol. 23, No. 9. P. 4311.
11. Cabreira T.M., Brisolaro L.B., Paulo R.F.J. Survey on coverage path planning with unmanned aerial vehicles // Drones. 2019. Vol. 3, No. 1. P. 4.
12. 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. Vol. 14. P. 115-132.
13. Torres M., Pelto D.A., Verdegay J.L., Torres J.C. Coverage path planning with unmanned aerial vehicles for 3D terrain reconstruction // Expert Systems with Applications. 2016. Vol. 55. P. 441-451.
14. Pham T.H., Bestaoui Y., Mammari S. Aerial robot coverage path planning approach with concave obstacles in precision agriculture // Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (REDUAS). IEEE, 2017. P. 43-48.
15. Munoz Mendi J. et al. Multi UAV coverage path planning in urban environments. 2021.
16. 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. :P. 4319-4325.
17. Avellar G.S.C., Pereira G.A.S., Pimenta L.C.A., Iscold P. Multi-UAV routing for area coverage and remote sensing with minimum time // Sensors. 2015. Vol. 15, No. 1. P. 27783-27803.
18. 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. Vol. 1. P. 27-32.
19. Jianfeng Gao, Yu Zheng, Kai Ni, Qiliang Mei, Bin Hao, Long Zheng. Fast Path Planning for Firefighting UAV Based on A-Star algorithm // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2029, No. 1. P. 012103.

20. Агафонов В.М., Бугаев А.С., Ерохин Г.Н., Ронжин А.Л. Векторная декомпозиция сейсмических данных методами волнового обращения во времени // J. Earth. Sci. 2023. Vol. 23. ES3010, <https://doi.org/10.2205/2023es000837>.