

ПЕРСПЕКТИВЫ РЕАЛИЗАЦИИ КРУГЛОГОДИЧНОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ЛЕДОВОЙ ОБСТАНОВКИ ПО ТРАССАМ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ

Савиных В.П., Троицкий В.И., Скальский Г.М.,

*Московский государственный университет геодезии и картографии
(МИИГАиК), Москва, Россия*

vp@miigaik.ru, v.troja@yandex.ru, glebski93@mail.ru

Козлов А.И., Затучный Д.А.

*Московский государственный технический университет гражданской авиации (МГТУ ГА),
Москва, Россия*

zatuch@mail.ru, vilandes@yandex.ru

Аннотация. В работе обсуждается возможность совместного использования результатов измерений характеристик ледового покрова с помощью РЛС с синтезированной апертурой, размещенной на космическом аппарате и радиометрической аппаратурой микроволнового диапазона, размещаемой на БПЛА, с целью повышения информативности результатов дистанционного зондирования ледового покрова по трассам Северного морского пути.

Ключевые слова: мониторинг ледовой обстановки, дистанционное зондирование, характеристики ледовых покровов, РЛС с синтезированной апертурой, радиометры микроволнового диапазона.

Введение

Северный морской путь (СМП) России имеет огромный потенциал для освоения богатств Арктического региона страны, а также для развития международной торговли, так как является кратчайшим путем, связывающим страны Северного полушария и даже западной Африки, выходящими в Атлантический океан, со странами, имеющими доступ в Тихий океан.

В связи с этим его мониторинг становится важнейшей составляющей перспектив его развития, а также безопасности этого морского пути. Этой цели и служат рассматриваемые предложения по реализации всесезонного мониторинга СМП, направленного на получение достоверных данных в реальном масштабе времени о состоянии постоянно меняющихся погодных условий, ледовой обстановки, и других факторов, влияющих на безопасность и эффективность прохождения кораблей по СМП.

В целом для решения проблемы круглогодичного судоходства по СМП, то у нашей страны есть достаточно эффективные средства – это мощный атомный ледокольный флот, а также существующие и разрабатываемые средства дистанционного зондирования Земли, серьезный научный задел в этой области. Другое дело - как этим всем воспользоваться на практике.

Реализация этих перспектив всесезонной навигации по Северному морскому пути предполагает рассмотрение целого комплекса вопросов, например таких как обоснование выбора средств дистанционного зондирования, их взаимодействия, характеристик и условий их работы, привязки к местности результатов измерений, их анализ, выработка соответствующих рекомендаций.

Отдельным и важным вопросом является поиск новых перспективных участков трасс СМП с учетом возможности прогнозирования ледовой обстановки, возможностей ледокольного флота, характеристик рельефа морского дна вдоль существующих и возможных трасс, а также возможности углубления и расширения фарватера трасс. Дело в том на существующих трассах есть мелководные участки, которые исключают прохождение по ним кораблей с большой осадкой. Это, к примеру, известные части трасс, проходящие в районе архипелага Новосибирские острова и пролива Санникова. В этих местах корабли с осадкой более 6 метров рискуют сесть на мель, в связи с чем изучаются возможности прокладки более высокоширотных маршрутов, которые, правда, характеризуются многолетними льдами, доходящими толщиной до 5 и более метров, сложностью их конфигурации, существенно осложняющими решение проблемы круглогодичной навигации.

Также при исследовании перспективы круглогодичной навигации по СМП и, соответственно непрерывного его мониторинга, нужно учитывать и просчитывать вероятность изменения климата Арктики (динамика уровня СЛО и прибрежных территорий в связи с прогнозируемым потеплением, экологические проблемы).

Мониторинг ледовой обстановки по трассам Северного морского пути в интересах всесезонного судоходства осуществляется главным образом средствами дистанционного зондирования,

работающими в различных диапазонах (оптический, ИК диапазон, радиолокационные средства и др.), размещаемых на самолетах, космических аппаратах, кораблях, стационарных береговых станциях и др. При этом наибольшие перспективы имеются у радиолокационного и прежде всего спутникового мониторинга ледовой обстановки в Арктике. Здесь, однако, необходимо оговориться, что радиолокационные методы дистанционного зондирования разделяются на два крупных и принципиально разных направления - активная радиолокация, когда анализируется отраженный от подстилающей поверхности сигнал радиолокатора, характеризуемый рядом оптимальных для решаемой задачи параметров, выявленных по результатам многочисленных теоретических и экспериментальных исследований ученых разных стран, и микроволновая радиометрия, когда принимается, обрабатывается и анализируется собственное микроволновое излучение элементов подстилающей поверхности, выделяемые, обрабатываемые и анализируемые характеристики которого также служат решению поставленной задачи. При этом, как показали результаты многочисленных исследований, активные и пассивные методы радиолокации при совместном использовании дают синергетический эффект, то есть совместная обработка результатов дает новые и очень важные для решаемой задачи результаты. Это, с одной стороны. Но, с другой стороны, важнейшим параметром при радиолокационном зондировании земной поверхности является разрешающая способность радиолокатора. И, если при активной радиолокации она достигается при использовании радиолокационных систем (РЛС) с синтезированной апертурой и при измерениях из космоса достигает одного метра, то радиометрическая аппаратура дает разрешение на несколько порядков меньшее.

1. История развития средств радиолокационного мониторинга ледовой обстановки

Общие преимущества космического мониторинга Северного морского пути давно уже убедительно продемонстрированы как отечественными, так и зарубежными учеными. Эти преимущества не зависят от видов используемой на космических аппаратах аппаратуры, заключаются в следующем:

- Получение информации (в том числе и оперативное), о любых, пусть даже самых удаленных и труднодоступных территориях;
- Возможность повторения и сравнения результатов как в различные временные, так и сезонные периоды времени, в том числе и при различных сезонных и погодных условиях;
- Возможность анализа результатов измерений при разном разрешении используемой аппаратуры;
- При изучении ледовой обстановки непрерывное космическое наблюдение позволяет изучать характер и динамику ледовой обстановки одновременно скажем по всему Северному морскому пути, по устьям прилегающих рек, по характеру берегового покрова и многим другим моментам.

Если же говорить об использовании радиолокационных средств для дистанционного зондирования Земли, в том числе Арктического региона, льдов Северного Ледовитого океана, маршрутов проходящих по нему кораблей, то основное преимущество радиолокационных средств в возможности получения информации о подстилающей поверхности и атмосферы при любых сезонных и погодных условиях, что делает достоинства радиолокационного космического мониторинга особенно актуальными.

Как уже было сказано, средства радиолокационного мониторинга делятся на активные, когда изучается отраженный от поверхности сигнал, излученный радиолокатором, и пассивную радиометрию в коротковолновом диапазоне (микроволновая радиометрия), когда радиометром принимается в том или ином диапазоне сигнал излучаемый земной поверхностью.

Активная радиолокация земной поверхности в интересах дистанционного зондирования Земли за несколько последних десятилетий достигла очень больших успехов в повышении разрешающей способности локаторов, соизмеримой ныне с разрешающей способностью оптической аппаратуры, за счет реализации принципа синтезированной апертуры. Именно РЛС с синтезированной апертурой используются практически на всех космических аппаратах дистанционного зондирования. Микроволновая радиометрия, к сожалению, пока не смогла реализовать нечто подобное, и тем самым существенно повысить ее разрешающую способность, хотя в последнее время появились работы (Плюшев В.А. и др.), исследующие это направление. Возникает вопрос, а зачем использовать микроволновую радиометрическую аппаратуру, если РЛС СА, дает разрешающую способность на два или три порядка большую. Ответ заключается в следующем: радиолокатор имеет дело с отраженным сигналом, а микроволновой радиометр с сигналом, формируемым собственным излучением земной поверхности. Те и другие обусловлены разными факторами, но в совокупности при приеме как отраженного, так и излученного сигнала информативность измерений существенно увеличивается. Есть еще одна важная характеристика, используемая в активной и пассивной локационной аппаратуре

— это поляризация сигнала. В этой области ученые нашей страны добились наибольших успехов. Если в разработке отечественной микроволновой аппаратуры безусловный приоритет принадлежит проф. Егорову С.Т. и ученикам его школы, то достижениям в области поляризационной локации и радиометрии в нашей стране мы обязаны работам таких ученых как Богородский В.В., Козлов А.И., Кутуза Б.Г., Шутко А.М. и другим, а также их ученикам. Как уже выше было сказано совместное использование результатов активной и пассивной радиолокации дает мультипликативный эффект, даже при том, что в случае космических измерений разрешающая способность радиометров по сравнению с разрешающей способностью РЛС СА существенно ниже.

Что касается космического мониторинга Северного морского пути (СМП), то его преимущества заключаются в следующем:

- Его результаты позволяют регулярно и стабильно получать данные о Северном морском пути в удаленных и труднодоступных районах. Высокоорбитальные спутники обеспечивают широкий охват территории, что позволяет получать информацию о нескольких участках маршрута одновременно. Такая доступность данных является важным фактором при планировании плавания, принятии решений и управлении потенциальными рисками.
- Космический мониторинг обеспечивает непрерывное наблюдение за СМП на протяжении всего сезона плавания. Это позволяет получать информацию о динамике изменения ледовых условий, погодных аномалий, течений и других факторов, которые могут влиять на безопасность и эффективность судоходства. Мониторинг способствует своевременному обнаружению изменений и принятию соответствующих мер.

С учетом особенностей СМП, таких как наличие льда по трассам прохода кораблей в самых непредсказуемых формах и переменные метеоусловия, точная навигация является критическим фактором для безопасности судоходства. Данные, полученные с космических аппаратов (КА), позволяют получать информацию о состоянии льда, прогнозную информацию о погоде, течениях, а также о динамике изменения географической среды. Это помогает судам предотвращать столкновения со льдом, выбирать оптимальные маршруты и принимать решения в режиме реального времени.

При мониторинге ледовых покровов как при активной радиолокации, так и при радиометрических измерениях важнейшее значение для существенного повышения информативности измерений достигается за счет использования комбинаций вертикальной и горизонтальной поляризаций в случае радиометрии, а в случае РЛС различных комбинаций этих поляризаций как при передаче, так и при приеме [1].

Радиолокационные методы дистанционного зондирования, использующие РЛС с синтезированной апертурой (РЛС СА), в том числе и пригодные для анализа ледовой обстановки в Арктике используют такие диапазоны длин волн

- от 2,4 см до 3,75 см – Х диапазон;
- от 3,75 см до 7,5 см – С диапазон;
- от 7,5 до 15 см – S диапазон;
- от 15 см до 30 см – L диапазон;
- от 30 см до 1 метра – Р диапазон.

Дистанционные исследования Земли с помощью спутников начались более 50 лет назад. В нашей стране первые в мире эксперименты по микроволновому зондированию Земли из космоса начались на спутнике «Космос -243» и в 2018 году этому эксперименту исполнилось 50 лет. В настоящее время космические исследования в нашей стране осуществляются с использованием космической системы, получившей название «Кондор-ФКА», выведенной на орбиту в мае 2023 года. Она предназначена для получения радиолокационной информации в целях обеспечения круглосуточного всепогодного зондирования континентальных районов Земли и акватории Мирового океана. Полная группировка спутников «Кондор-ФКА» должна состоять из двух космических аппаратов. Рабочие орбиты выбраны околополярные солнечно-синхронные, смещенные друг от друга на $8,88^\circ$, благодаря чему съёмка земной поверхности обеспечивается в диапазоне от -85° до $+85^\circ$.

Во многих других странах также активно ведутся исследования земной поверхности из космоса. Так Европейское космическое агентство начало широко применять в космических экспериментах радиолокаторы с 1991 года, при этом разрешающая способность РЛС СА составляла порядка 20 метров. Спутник Sentinel-1 (разрешающая способность порядка 5 метров и полоса обзора около 400 километров). В Канаде это спутники серии RADARSAT, серии RCM, в Японии, в США, Китае, Индии, Финляндии на спутниках используют РЛС СА для дистанционного зондирования земной поверхности.

2. Предложения по модернизации радиолокационного мониторинга

При всех своих достоинствах спутниковый мониторинг не позволяет эффективно использовать возможности микроволновой радиометрии, исследования в области которой проводились в нашей стране многие годы, в том числе при исследовании ледовой обстановки из-за низкого разрешения спутниковой радиометрической аппаратуры [2-6].

Нашим предложением в развитие этого направления является установка на беспилотных летательных аппаратах (БПЛА) радиометрической аппаратуры тех диапазонов и поляризации, которые оказались оптимальными для исследования ледовой обстановки с борта космических аппаратов.

Дело в том, что разрешение радиометров существенно ниже, чем у РЛС с синтезированной апертурой, поэтому при установке ее на спутниках она не дает приемлемого разрешения, а при установке на БПЛА, исследующих трассы на небольшой высоте, это разрешение может быть увеличено в сотни раз. Характеристики радиометрической аппаратуры, предназначенной для исследования ледовой обстановки, а также земной поверхности под слоем льда и снега для различных длин волн и поляризаций исследованы и описаны в том числе и в работах [2-6]. О том, что это вполне решаемая задача, говорит следующее. Как известно, до настоящего времени для оперативного наблюдения за ледовой обстановкой используются корабли. Эти специализированные корабли, в том числе и ледоколы, активно осуществляют мониторинг по трассам Северного морского пути. Они позволяют оперативно оценивать обстановку, сообщать сведения в реальном масштабе времени о ледовой обстановке по трассам кораблей, даже подсказывать оптимальные решения по ходу движения.

В последнее время появилась информация об использовании при корабельном наблюдении БПЛА. Такого рода исследования проводятся в научно-исследовательском центре мониторинга окружающей среды и экологии МФТИ [7].

Так в 2023 г. были проведены испытания беспилотника с палубы атомного ледокола «Таймыр». БПЛА выполнил полет по заданной траектории и провел визуальную и радиолокационную съемку арктической акватории.

Конечно, предлагаемое нами совместное использование для мониторинга ледовой обстановки спутниковых измерений РЛС СА и БПЛА с радиометрической аппаратурой микроволнового диапазона требует решения целого ряда иных вопросов, среди которых согласование трасс прохода кораблей и способов привязки к ним маршрутов полета БПЛА. На этот счет нами разрабатываются методы навигации таких летательных аппаратов по линейным, векторным и точечным ориентирам, в качестве которых, в частности, могли бы выступать геодезические знаки, синхронизация спутниковых измерений и измерений с борта БПЛА, возможность использования группы летательных аппаратов для покрытия трассы СМП, имея в виду ограничения по длине маршрута БПЛА, и др.

Предлагаемый материал посвящен проблеме реализации всесезонного мониторинга по трассам СМП, однако хотелось бы обратить внимание на то, сколько очень важных проблем требует решения при освоении Арктики и которые хотелось бы решить совместными усилиями ученых нашей страны.

Арктика, в целом, это не только Северный ледовитый океан, который покрыт многолетними льдами, но и огромные реки, пронизывающие как артерии всю Сибирь и Дальний Восток, и которые могли бы нести жизнь на любые участки ее территории, но забиты льдом и торосами, особенно в устьях рек. Это колоссальные территории полные несметных природных богатств, доступ к которым крайне затруднен. Эти территории, однако, в значительной степени находятся в зоне вечной мерзлоты, перспективы которой к тому же неоднозначны. Поэтому помимо научных и технических проблем всесезонной навигации по Северному морскому пути, возможности расчистки ото льдов устьев сибирских рек и возможности включения этих рек в транспортные потоки, возникают колоссальные научные, организационные и просто жизненные проблемы применительно к этому региону, а так же логистические проблемы совместной реализации водного, железнодорожного, автомобильного и воздушного сообщения в зоне вечной мерзлоты Сибири и Дальнего Востока в интересах развития этого удивительного региона.

3. Заключение

В данной работе получены следующие результаты:

- Проведён анализ истории развития средств радиолокационного мониторинга ледовой обстановки.
- Выявлены недостатки имеющихся средств радиолокационного мониторинга в современных условиях.

- Сформулирована рекомендация, заключающаяся в сочетании космических измерений с помощью РЛС с синтезированной апертурой и параллельных согласованных измерений с использованием радиометрической аппаратуры, устанавливаемой на беспилотных летательных аппаратах (БПЛА).

Литература

1. *Богородский В.В., Козлов А.И., Канарейкин Д.Б.* Поляризация рассеянного и собственного радиоизлучения земных покровов. // Гидрометеоиздат, г. Ленинград 1981. -280 с.
2. *Богородский В.В., Козлов А.И.* Микроволновая радиометрия земных покровов. // Гидрометеоиздат, г. Ленинград, 1985, 272 с.
3. *Вагапов Р.Х., Гаврило В.П., Козлов А.И., Лебедев Г.А., Логвин А.И.* Под ред. Козлова А.И. Дистанционные методы исследования морских льдов. // Гидрометеоиздат, г. Ленинград, 1993.-342 с.
4. *Козлов А.И., Савиных В.П., Троицкий В.И.* Параметрические модели микроволнового излучения земных покровов в навигации летательных аппаратов. // Исследование Земли из космоса, 2021, №3, с. 87-93.
5. *Козлов А.И., Затучный Д.А.* Анализ физических свойств льдов и их сезонной изменчивости для строительства ледовых аэродромов // Труды Международного симпозиума «Надёжность и качество», г. Пенза, 2023, Том 1, стр. 122-125.
6. *Заболотских Е.В. и др.* Спутниковое микроволновое зондирование морского льда Арктики. Обзор. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.2023, том 20, №1, с. 9-34.
7. *Дорохова И.* Беспилотник для ледовой разведки испытали в Арктике [Электронный ресурс] // Страна РОСАТОМ URL: <https://strana-rosatom.ru/2023/07/23/bespilotnik-dlya-ledovoj-razvedki-isp/>