

КОМПЛЕКСНОЕ ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ОТЛАДКИ И ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ АДАПТАЦИИ ЗАГОРИЗОНТНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ ДЕКАМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА К ГЕОФИЗИЧЕСКИМ УСЛОВИЯМ

А.О. Щирый (Москва)

Введение

Работа радиолокационных станций (РЛС) загоризонтного обнаружения (ЗГО) основана на способности декаметровых (ДКМ) радиоволн многократно отражаться от ионосферы и земной поверхности. Важнейшей задачей для обеспечения корректного функционирования РЛС ЗГО является адаптация к ионосферным условиям. Особенно непредсказуема ионосфера в арктических широтах, для которых пока не удается создать адекватные предиктивные модели, да и существующие модели среднеширотной ионосферы не способны обеспечить приемлемую точность в интересах РЛС ЗГО. Поэтому для адаптации к ионосферным условиям проводят оперативную диагностику ионосферы [1-5], состояние которой зависит от времени суток и сезона года, солнечной и геомагнитной активности, и других факторов, в большинстве своем носящих случайный характер.

Вообще, методы исследования ионосферы делятся на дистанционные и контактные, при этом оперативную диагностику способны обеспечить только дистанционные. Из методов дистанционного зондирования в свете поставленных целей наибольший интерес представляют методы наземного радиозондирования. А из методов наземного радиозондирования, в свою очередь, наибольший интерес представляют вертикальное, наклонное и возвратно-наклонное зондирование ионосферы (соответственно ВЗИ, НЗИ, ВНЗИ) [4,5].

В задаче адаптации РЛС ЗГО крайне перспективным представляется использование достижений теории обучения машин (машинного обучения): на первом этапе для обработки данных НЗИ, затем обработки данных ВНЗ, и как итог и конечная цель – построение предиктивной модели состояния ионосферы [6]. Другим важнейшим приложением теории обучения машин может быть построение предиктивной модели ионосферы. Наиболее сложной задачей при автоматизации обработки ионограмм является выделение треков мод сигнала: треки требуется выделить не только на фоне помех, но и отделить друг от друга, что является очень нетривиальной задачей. Далее, может быть, необходимо классифицировать треки по типам мод распространения (что, вообще говоря, может быть и не обязательной для адаптации РЛС ЗГО, но это зависит от алгоритмов адаптации: если алгоритм адаптации будет полагаться на какую-то существующую модель ионосферы, а идентифицированные треки будет использовать для калибровки модели, то этап нужен). Очевидно, что указанным процессам соответствуют классические задачи из теории обучения машин: задача кластеризации и задача классификации. Однако попытка применения имеющихся алгоритмов теории обучения машин «в лоб» выявляет некоторую особенность обработки ионограмм человеком (экспертом): человек одновременно решает обе задачи, различные гипотезы классификации трека могут привести и к различиям в процессе кластеризации. Таким образом, встает задача разработки методики (метода, алгоритма) применения классических алгоритмов кластеризации и классификации. Возможно, это должен быть

итерационный подход. Возможно, некий новый комплексный алгоритм. Особняком стоят алгоритмы т.н. глубокого обучения, способные выделять признаки обучения самостоятельно. Применение глубокого обучения представляется наиболее перспективным направлением.

При этом отработку и отладку новых моделей ионосферы и алгоритмов адаптации необходимо производить с учетом условий и режимов функционирования РЛС ЗГО. Сложность самой развиваемой системы РЛС ЗГО, большая вариативность и неопределенность фоно-целевой обстановки приводят к невозможности произвести аналитическое сравнение всех возможных вариантов архитектуры системы в целом по всем ее параметрам и сделать ее однозначный рациональный выбор. Традиционным выходом в такой ситуации было проведение множества натурных испытаний. Однако дороговизна подобных испытаний в случае с образцами вооружения и военной техники, и тем более невозможность проведения натурных испытаний в ряде случаев (например, массированный удар межконтинентальных баллистических ракет) заставляет искать другие решения. Наиболее приспособленными для оценки эффективности сложных систем без проведения натурных испытаний являются модели имитационного типа. Имитационное моделирование используется как универсальный метод для обоснования решений в условиях неопределенности и для учета трудно формализуемых факторов [1,7]. Поэтому имитационное моделирование используется нами как для отработки новых методов и алгоритмов, так и для проверки достигнутых тактико-технических характеристик (ТТХ), то есть во втором случае выступает как этап предварительных испытаний. И делается это посредством имитации различных вариантов оперативной, фоно-целевой и геофизической обстановки, в различных режимах работы РЛС, при наличии или отсутствии помехового противодействия, с учетом сценариев действий сил и средств в периоды мирного времени, в периоды оперативного развертывания, в периоды ведения боевых действий [1, 7, 8].

1. Общие принципы построения моделирующей системы

С алгоритмической и программно-архитектурной точки зрения система имитационного моделирования состоит из диспетчера моделирования (и других «системных» частей, таких как визуализатор и редактор боевых сценариев), и имитационных моделей агентного типа, представляющих сущности моделируемой области, среди которых особое место занимает имитатор фоно-целевой обстановки. Функции диспетчера моделирования: чтение сценария, созданного пользователем и содержащего архитектуру исследуемой конфигурации сил и средств; загрузка и инициализация имитационных моделей (в том числе имитатора фоноцелевой обстановки); запуск сценария на счет, управление имитационными моделями в процессе моделирования и мониторинг хода его исполнения.

Описанная мультиагентная система работает по дискретно-событийной схеме, для реализации которой программно ведется динамическая очередь задач ("календарь" – в других терминах), управляемая диспетчером имитационного моделирования, который определяет порядок передачи управления между вычислительными блоками (агентами, частными моделями). Это делается для синхронизации "модельного времени", причем в условиях, когда модельные агенты "шагают" по времени исходя из своей внутренней логики, временными интервалами произвольного размера. В очереди задач могут регистрироваться события разных типов (каждому типу событий

соответствует свой обработчик). Каждое событие, помещаемое в очередь задач, регистрируется на определённое модельное время (аналогичный подход использовался автором в системе [9, 10]). Общей проблематике построения систем имитационного моделирования, и, в частности, синхронизации модельного времени (т.н. консервативный и оптимистический подходы) посвящены работы [11, 12], здесь же используется подход, в данных работах называемый консервативным.

В процессе моделирования происходит логирование (сохранение в файлы) состояний системы в целом и атрибутов отдельных агентов. Полученные лог-файлы являются предметом дальнейшего рассмотрения и анализа. Визуализация модельного эксперимента возможна как в реальном времени (этот вариант накладывает некоторые ограничения на моделируемую систему, но позволяет оперативно вмешиваться в процесс моделирования), так и после завершения симуляции. По результатам моделирования оцениваются боевые возможности, боевая эффективность, делается вывод о достигнутых ТТХ.

2. Основные агенты («частные модели»)

С точки зрения моделирования физических процессов можно выделить следующие важнейшие составляющие: модели траекторного движения целей, модели рассеяния радиосигнала на целях, модель рассеяния радиосигнала на подстилающей поверхности, модель распространения радиосигнала в ионосфере. Вопросы противодействия активным помехам и их имитационного моделирования в данной работе не затрагиваются.

При имитации фоно-целевой обстановки происходит формирование траекторий целей различных типов. В работе рассматриваются воздушные и надводные цели. Воздушные цели делятся на два основных класса – баллистические и аэродинамические. При моделировании надводных целей необходимо также иметь модель волнений водной поверхности.

Для воздушных целей аэродинамического типа (самолеты, вертолеты, крылатые ракеты, малоразмерные беспилотные летательные аппараты) при моделировании движения необходимо, чтобы все кинематические параметры движения изменялись плавно, то есть, чтобы первая производная по времени от функции координат (в том числе угловых) была непрерывной. Также должны учитываться лётно-технические характеристики цели, которые включают в себя предельные перегрузки, предельные скорости, угловые ориентации и так далее, а и при наличии соответствующей информации должны учитываться аэродинамические характеристики цели.

Из всего возможного многообразия баллистических целей наибольший интерес представляют баллистические ракеты (БР) – межконтинентальные БР (МБР), БР подводных лодок (БРПЛ), БР средней дальности (БРСД), БР малой дальности (БРМД). Поэтому здесь далее речь пойдет о моделировании полета именно таких баллистических целей.

Форма участков баллистической траектории, проходящих в плотных слоях атмосферы, зависит от многих факторов: начальной скорости ракеты, ее формы и массы, текущего состояния атмосферы на траектории (температура, давление, плотность) и от характера движения ракеты вокруг ее центра масс. Учёт всех факторов и проведение точных баллистических расчётов трудоёмко и занимает существенное время, в связи с этим в целях моделирования удара БР в данной работе требования к

точности баллистических расчетов были снижены. Основным фактором, определяющим форму траектории, является программа угла тангажа. Программой угла тангажа принято называть закон изменения угла наклона продольной оси БР к плоскости стартового горизонта. Этот закон может выражать зависимость требуемого значения угла тангажа от времени или от какого-либо другого удобного аргумента. При движении БР в плотных слоях атмосферы со скоростью близкой к скорости звука программа тангажа должна обеспечивать полет с практически нулевым углом атаки. При полете на сверхзвуковых и гиперзвуковых скоростях необходимо продолжать движение с программой тангажа, обеспечивающей близкие к нулю углы атаки. Диапазон допустимых (с точки зрения выполнения конструктивных ограничений) углов атаки на всем протяжении активного участка траектории можно считать заданным в исходных данных. Ограничения угловой скорости разворота БР по углу тангажа, обусловленные особенностями работы системы стабилизации и возможностями исполнительных органов системы управления, задаются обычно в явном виде. Здесь речь идет, разумеется, о начальном участке траектории БР, поскольку РЛС класса ЗГО – не «стрельбовые» (предназначенные для наведения противоракет), а раннего предупреждения. На среднем и конечном участках траектории БР должны сопровождаться уже надгоризонтными РЛС систем предупреждения о ракетном нападении (СПРН) и противоракетной обороны (ПРО). Поэтому для РЛС ЗГО «неинтересны», например, модели формирования сложной баллистической цели из боевых блоков и элементов прорыва ПРО на дальнейших участках траектории БР.

При моделировании эффективной площади рассеяния (ЭПР) целей требуется учет следующих факторов: длина волны, ракурс облучения, поляризация сигнала, электродинамические характеристики материала, из которого выполнена цель. При моделировании ЭПР подстилающей поверхности, аналогично как для ЭПР цели, требуется учет длины волны, угла падения, поляризации сигнала. Причем при расчетах углов падения во внимание должен приниматься и рельеф местности, должен учитываться тип поверхности (грунт, песок, кустарник, лес и т.д.), а кроме диэлектрических, также и другие физические свойства (влажность, например). Поэтому необходимы не только матрицы высот местности («цифровые 3D карты»), но и физических свойств местности (диэлектрической проницаемости, влажности, и др.). В случае моделирования целей с реактивными двигателями, дополнительно требуются модели ЭПР ионизированного следа, и возможно модели ЭПР "факела" (особенно актуально для МБР).

Моделирование работы самой РЛС [10] происходит путем моделирования управления режимами работы РЛС, преобразований сигналов в выходных трактах и передающих антеннах, преобразований сигналов в приемных антеннах и входных трактах, первичной, вторичной и, возможно (в случае работы в составе группировок), третичной обработки радиолокационной информации.

3. Перспективы использования стандарта НЛА

Для обеспечения масштабируемости, открытости и многократного повторного использования разработанных имитационных моделей целесообразно рассмотреть вопрос перестроения системы имитационного моделирования на основе существующего хорошо проработанного и апробированного стандарта, устанавливающего правила взаимодействия моделей и разработки программных

интерфейсов (тем более, что у автора уже был подобный опыт в другом проекте [13]). Речь идет о стандарте IEEE Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA) – стандарт архитектуры высокого уровня для моделирования и имитации, сокращенно – HLA [14]. Заметим, что поддержка HLA является обязательным требованием для работ, выполняемых по заказу Министерства Обороны США, в том числе, в области тренажеростроения. HLA объявлен предпочитаемым стандартом для НАТО. Актуальной на настоящий момент является версия стандарта IEEE 1516-2010. Приведем некоторые факторы, мотивирующие к переходу на HLA.

Стандарт HLA широко распространен во всем мире, в первую очередь в оборонном секторе. Ведущие производители программных продуктов продали до 100 тыс. лицензий. Над разработкой стандарта трудятся десятки высококвалифицированных специалистов из оборонной промышленности (Raytheon, Lockheed Martin, Boeing) и ведущих ИТ-университетов. Воспользоваться услугами подобного «коллективного разума» позволяет экономить огромные ресурсы. Более того, если бы на рынке появились какие-либо революционные решения (даже еще на уровне алгоритмов, а не программных продуктов), то они немедленно бы попали в поле зрения соответствующих рабочих групп SISO (Simulation Interoperability Standards Organization), которые занимаются разработкой инновационных стандартов в этой области (по мандату IEEE). Тот факт, что SISO продолжает улучшать HLA, явно говорит в пользу последней.

Функциональность данной архитектуры с конца 90-х годов была апробирована в тысячах проектов и прошла два круга существенных обновлений на базе анализа ее использования. Действительно, в каждом конкретном проекте, как правило, не используются все сервисы HLA, но неиспользуемые сервисы легко отключаются, оптимизируя производительность. Более того, в крупных проектах часто возникает необходимость в какой-то момент подключать ранее неиспользованные сервисы.

Когда требуется интегрировать в единый комплекс десятки моделей от разных разработчиков, то часто оказывается, что у большей части разработчиков есть собственные решения «лучше чем HLA», которые они успешно используют в своих проектах. Но для объединения продуктов необходима единственная платформа. Выбрать среди множества проприетарных продуктов участвующих в проекте предприятий-разработчиков обычно бывает трудно и затратно по различным причинам (анализ продуктов, обучение специалистов, возможно эксперименты и доработка выбранного продукта). Более того, как правило, каждый разработчик настаивает на применении своего собственного решения. Международный стандарт в этом случае играет роль эффективного «общего знаменателя». Тем более что при создании больших технических систем всегда является риском опора на проприетарные решения от конкретного разработчика, т.к. при этом происходит «привязка» своего проекта к стороннему разработчику. В случае же опоры на стандарт всегда можно перейти на альтернативный продукт, ибо при наличии стандарта практически всегда возникает конкуренция поставщиков. В нашем случае можно использовать альтернативные версии RTI и других продуктов линейки HLA. А еще HLA – это не только несколько конкурирующих между собой реализаций программного обеспечения, но и инфраструктура поддержки его использования. В дополнение к стандарту существуют документы, описывающие оптимальные способы применения HLA, учебные материалы

и обучающие курсы для подготовки специалистов, налаженная техническая поддержка пользователей, инструментальные средства, облегчающие работу с продуктом.

Однако нужно отметить и сложности такого перехода на HLA, понимание которых возникло в ходе работ над некоторыми другими проектами [9, 10, 15].

Технология HLA не проста в изучении, а также «заточена» на максимальную автономность моделирующих агентов (федератов – в терминах HLA); первое обстоятельство ведет к значительным увеличениям трудозатрат на начальной стадии проекта (которые потенциально окупаются в будущем), второе – к некоторым принципиальным архитектурным ограничениям.

Заключение

Отработка новых перспективных методов (включая методы машинного обучения) адаптации РЛС ЗГО к ионосферным условиям будет проводиться с использованием комплексного имитационного моделирования, представленного в данной работе. Здесь не затрагивались вопросы построения самих предиктивных моделей ионосферы, обработки данных диагностики ионосферы (этим вопросам посвящены работы [16-24]), алгоритмов адаптации РЛС ЗГО [1, 2]. Также не были детально рассмотрены вопросы построения других «частных моделей» (фоно-целевой обстановки, РЛС, и т.п.), однако были показаны основные требования к этим моделям, их роль и место в комплексной моделирующей системе. При совместном использовании комплексного имитационного моделирования и машинного обучения планируется, что в качестве первичных «датасетов» (исходных данных для машинного обучения) будут использованы примерно 50000 ионограмм. Они были получены в различные годы при непосредственном участии автора [3, 19, 23] на различных радиотрассах в различных сезонных, временных, гелио- и геофизических условиях.

Литература

1. **Акимов В.Ф., Калинин Ю.К.** Введение в проектирование ионосферных загоризонтных радиолокаторов / под ред. С.Ф. Боева. М.: Техносфера, 2017. 492 с.
2. **Акимов В.Ф., Калинин Ю.К., Слукин Г.П.** Проблемы загоризонтного радиолокационного обнаружения и пути их преодоления // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение, 2012, № 8. С.5-17.
3. **Колчев А.А., Щирый .О., Недопекин А.Е.** Математические модели и методики измерения АЧХ многолучевых ионосферных коротковолновых радиолиний: монография / Мар. гос. ун-т. Йошкар-Ола, 2013. 147 с. ISBN 978-5-94808-762-7.
4. **Филипп Н.Д., Блаунштейн Н.Ш., Ерухимов Л.М., Иванов В.А., Урядов В.П.** Современные методы исследования динамических процессов в ионосфере. – Кишинев: Штиинца, 1991. – 286 с.
5. **Чернов Ю.А.** Возвратно-наклонное зондирование ионосферы. М.: Связь, 1971, 204с.
6. **Щирый А.О.** О перспективах использования некоторых современных достижений ионосферного радиозондирования при воссоздании ЗГ РЛС эшелона СПРН // Радиолокация, навигация, связь (RLNC2019): сборник трудов XXV Международной научно-технической конференции (Воронеж, 16-18 апреля 2019 г.): в 6 т. / Воронежский государственный университет; АО «Концерн «Созвездие». – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2019. ISBN 978-5-9273-2774-4. Т.3. С.226-234.

7. Имитационное моделирование боевых действий: теория и практика / Под ред. д-ра техн. наук, проф. Созинова П.А., д-ра техн. наук, проф. Глушкова И.Н., Тверь, 2013. 528 с.
8. **Сорокин С.А., Свердлов С.С., Кучеров Ю.С., Собчук В.А.** Аппаратно-программный комплекс для испытаний загоризонтных радиолокационных станций с использованием метода автоматического пассивного обзора воздушного пространства // Вопросы радиоэлектроники. 2018. №5. С. 17-23.
9. **Коновальчик А.П., Плаксенко О.А., Щирый А.О.** Функции имитации боевых действий в разрабатываемой отечественной САПР РЛС полного сквозного цикла // Вопросы радиоэлектроники. 2018. №3. С.30-34.
10. **Коновальчик А.П., Конопелькин М.Ю., Щирый А.О., Арутюнян А.А.** Этапы проектирования перспективных радиолокационных станций в специализированной САПР // Вестник воздушно-космической обороны. 2020. № 4 (28). С. 111-118.
11. **David R. Jefferson, Peter D. Barnes Jr.** Virtual time III: Unification of conservative and optimistic synchronization in parallel discrete event simulation // In Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference. – pp.786-797.
12. **Richard M. Fujimoto Rajive L. Bagrodia Randal E. Bryant, K. Mani Chandy, David R. Jefferson, Jayadev Misra, David M. Nicol, Brian W. Unger.** Parallel discrete event simulation: The making of a field // In Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference. pp.262-291.
13. **Коновальчик А.П., Щирый А.О.** Универсальная программная платформа для имитационного моделирования боевых действий // Вопросы радиоэлектроники. 2019, №3. С.22-26.
14. IEEE Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA): 1516-2010 (Framework and Rules); 1516.1-2010 (Federate Interface Specification); 1516.2-2010 (Object Model Template Specification) [Electronic resource]. URL:<https://standards.ieee.org/standard/1516-2010.html>.
15. **Плаксенко О.А., Щирый А.О.** Имитационная модель командного пункта системы предупреждения о ракетном нападении в составе системы моделирования боевых действий // Труды восьмой всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2017), Санкт-Петербург, 18-20 октября 2017 г. ISBN 978-5-905526-03-9. СПб, 2017. С. 507-512.
16. **Shiriy A.O.** HF channel transmit function module measurement // В сборнике: 5th International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2002. 5. 2002. С. 365-369.
17. **Колчев А.А., Щирый А.О.** Восстановление частотной зависимости комплексного коэффициента отражения по данным наклонного ЛЧМ-ионозонда // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20. № 7. С. 627-630.
18. **Щирый А.О.** Разработка алгоритмов для повышения точности измерения и расширения возможностей традиционного применения наклонного ионозонда // Системы управления и информационные технологии. 2007, № 1.1(27). С. 202-204.
19. **Щирый А.О.** Разработка и моделирование алгоритмов автоматического измерения характеристик ионосферных коротковолновых радиолоний: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: Спец. 05.12.04; Санкт-Петербургский гос. ун-т телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. СПб., 2007. 19 с.

20. **Колчев А.А., Шумаев В.В., Щирий А.О.** Измерительный комплекс для исследования эффектов многолучевого ионосферного распространения коротких волн // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2008. Т. 51. № 12. С. 73-79.
21. **Щирий А.О.** Гибкая перестройка ионограмм наклонного радиозондирования ионосферы в процессе вторичной обработки // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2011, № 14. С.138-140.
22. **Щирий А.О.** Развитие программного обеспечения вторичной обработки данных дистанционного наземного радиозондирования ионосферы // Вестник Национального технич. университета «ХАИ». Сер.: Радиофизика и Ионосфера. – Харьков: НТУ «ХПИ». ISSN 2078-9998. 2016. № 34 (1206). С.78-83.
23. **Щирий А.О.** База знаний для систематизации и экстраполяции данных радиозондирования ионосферы // Вторая научная конференция «Базы данных, инструменты и информационные основы полярных геофизических исследований» (ПОЛАР-2012), 22-26 мая 2012 г., Троицк, ИЗМИРАН. М.: ИЗМИРАН, 2012. С. 27.
24. **Недопёкин А.Е., Щирий А.О.** Автоматическая обработка данных ЛЧМ-зондирования ионосферы для оценки геофизических параметров // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2014. № 17. С. 301-306.