

РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА ПРИ СОЗДАНИИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Введение

Во многих странах существуют и успешно работают метеорологические радиолокационные сети [1 – 3]. Побудительным мотивом к их созданию послужили человеческие жертвы и значительные материальные убытки при возникновении опасных метеорологических явлений и процессов. Именно они, опасные явления и процессы, в силу быстрого, а иногда и взрывного процесса их протекания, заставили ученых применить радиолокационные станции для получения оперативной метеорологической информации в реальном или близком к нему масштабе времени. Иными методами измерений попросту невозможно обеспечить прогностические органы Гидрометслужбы первичной информацией о развитии быстропротекающих и взрывных метеорологических процессов. Поэтому исторически сложилось такое целеполагание в развитии радиолокационных метеорологических сетей, когда во главу угла ставилась одна, главная, цель (или несколько), достижение которой обеспечивало повышение безопасности людей и уменьшение материальных убытков, часто только в отдельно взятом регионе [4]. На современном этапе развития метеорологических радиолокационных сетей цель, сформулированная выше, каждый раз достигается за счет успешного решения одной задачи – задачи штормооповещения. То есть налицо процессный, а не системный подход к созданию сети. За последние семьдесят лет радиолокационные станции значительно усовершенствовались, обрели новые возможности. Однако все созданные в мире метеорологические радиолокационные сети имеют главную задачу или несколько главных задач, в том числе по регионам. И это притом, что современные средства радиолокации, обработки данных и системы связи позволяют не выделять главную задачу, а решать все возможные задачи, в том числе не по регионам, а по всей охваченной наблюдениями территории. При этом круг задач будет ограничен только потенциальными возможностями радиолокационных станций, поскольку вся возможная радиолокационная информация заключена в эхо-сигналах на выходе антенной системы радиолокационной станции, а вся последующая обработка может, в идеальном случае, сохранить, но не увеличить количество радиолокационной информации. Данная статья посвящена рассмотрению системного подхода к созданию радиолокационной системы метеорологического мониторинга, позволяющего наилучшим образом получить в максимально полном объеме и сохранить при наименьших расходах всю возможную радиолокационную информацию, определяемую возможностями именно радиолокационных станций.

Актуальность

Наличие радиолокационной сети метеорологического мониторинга и правильное практическое использование информации этой сети значительно повышают качество прогнозирования состояния атмосферы оперативными подразделениями службы погоды. Например, Украина, к сожалению, в настоящее время такой сетью не обладает. Таким образом, решение задачи создания метеорологической радиолокационной сети актуально и в научном отношении отличается новизной. Тем более, что решение задачи создания подобной сети на основании системного подхода превратит метеорологическую радиолокационную сеть в систему метеорологического радиолокационного мониторинга со всеми системными преимуществами.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования является процесс радиолокационного метеорологического мониторинга. Предметом исследования являются радиолокационная система метеорологического мониторинга и результаты реализации системного подхода при ее создании.

Цель исследования

Обоснование необходимости системного подхода при создании радиолокационной системы метеорологического мониторинга.

Методы исследования

Обобщение принципов создания существующих метеорологических радиолокационных сетей, системный анализ полученных данных для построения радиолокационной системы метеорологического мониторинга.

Описание исследования и анализ его результатов

Анализ принципов создания, работы и характеристик существующих метеорологических радиолокационных станций позволил выявить ограничения, присущие радиолокационному методу получения метеорологической информации. Во-первых, невозможно получение данных о метеорологических объектах, процессах и явлениях, расположенных ниже линии радиогоризонта. Во-вторых, рельеф местности и искусственные сооружения могут создавать препятствия распространению радиоволн, образуя углы закрытия. Это повышает минимальную высоту возможного обнаружения метеорологических объектов и явлений. В-третьих, при заданном энергетическом потенциале метеорологической радиолокационной станции с увеличением расстояния до метеорологического объекта или явления уменьшается минимальное значение отражаемости. В-четвертых, зоны интенсивных осадков существенно ослабляют радиоволны и экранируют собой находящиеся за ними облака. Осадки при попадании на радиопрозрачное укрытие метеорологического радара имеют следствием уменьшение значения отражаемости облаков. В-пятых, с увеличением расстояния от метеорологической радиолокационной станции происходит расширение главного лепестка диаграммы направленности ее антенны. Это приводит к ухудшению разрешающей способности по дальности в направлении поперечном линии визирования и, следовательно, по пространству. В-шестых, метеорологическая радиолокационная станция является опасным, излучающим радиоволны объектом со всеми вытекающими из этого нежелательными последствиями.

Созданные и функционирующие метеорологические радиолокационные сети являются одним из важных научно-технических достижений. Однако следует отметить не менее важное обстоятельство. Эти сети во всех странах создавались в районах наибольшей повторяемости опасных явлений. Это хорошо видно на примере созданных в США системы NEXRAD [3] и в России системы MAPC [2]. Вне всякого сомнения, что экономические аспекты при создании этих систем были на первом месте. Поэтому при обосновании размещения радиолокационных станций в системе MAPC учитывалось, что наиболее опасные явления возникают летом, когда для надежного обнаружения летних кучевых облаков требуется невысокая плотность радиолокационных станций. Это привело создателей к решению об оптимальном расстоянии между станциями равном 300 км. Кроме того, было принято решение о сплошном перекрытии зон наблюдения метеорологических радаров основных промышленных и сельскохозяйственных районов и авиационных трасс с интенсивной грозовой деятельностью, остальная же территория прикрывалась дискретно. Эти тезисы хорошо иллюстрирует рис. 1. Создатели системы NEXRAD исходили из того, что высота нижней границы сплошного радиолокационного поля должна составлять 10 тысяч футов или около 3 км. Т.е. построенная ими сеть оптимизирована для целей получения данных о ведущем потоке при составлении прогнозов погоды синоптиками, что отражает рис. 2. Рассмотрение целевого предназначения этих систем оставляем за рамками данной статьи.

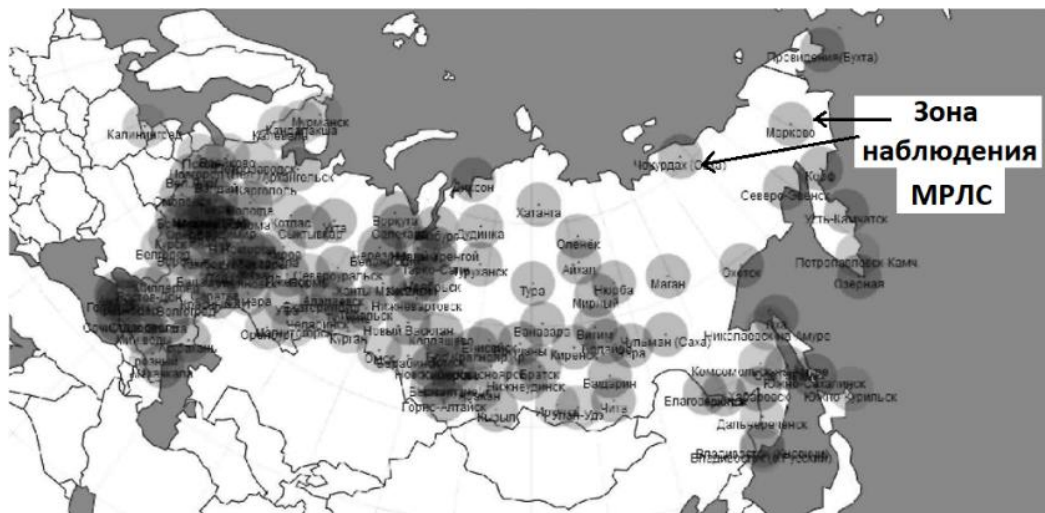


Рис. 1

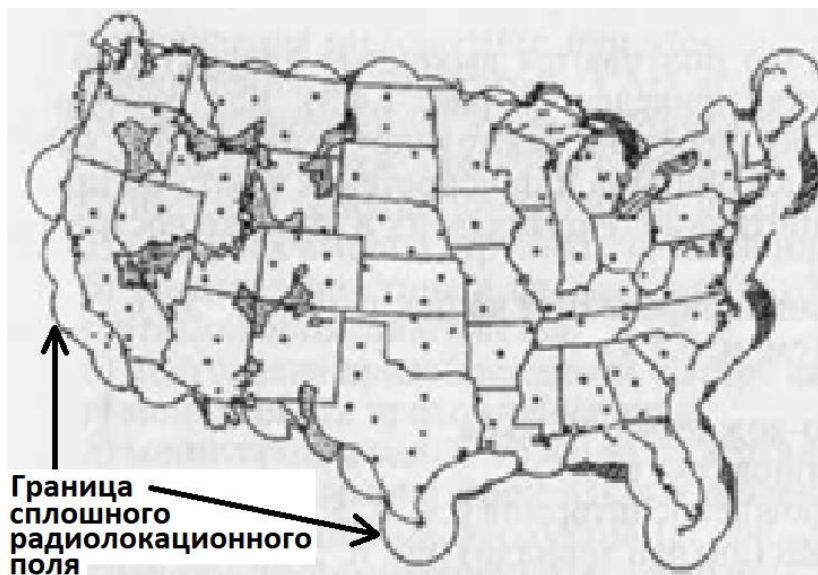


Рис. 2

Создатели описанных сетей сознательно выбрали процессный подход при их построении. Они не ставили перед собой задачу построения метеорологической радиолокационной сети как большой системы для всеобъемлющего мониторинга. В атмосфере происходят процессы, выбраны некоторые из них, пусть и важные, и построена сеть, позволяющая обеспечить информацией об этих выбранных процессах. Радиолокационные станции в этих сетях работают фактически в автономном режиме и связаны друг с другом только информационно, по конечной информации. Для сохранения полноты информации им приходится осуществлять обзор всей полусферы зоны обзора или зоны наблюдения. И даже при таких условиях не обеспечивается полнота в смысле обзора всего требуемого пространства наблюдений. При этом управление мощностью зондирующего сигнала не производится из-за технических сложностей этого процесса и нарушения калибровки радиолокатора. В итоге получается расточительное расходование энергии излучения в верхней части зоны наблюдения (на примере северо-западного и степного Причерноморья – рис. 3). И чем больше дальность действия радиолокатора, тем больше эта расточительность. А мощные радиолокаторы дорого стоят. При существующих подходах к созданию метеорологических радиолокационных сетей в каждом из радиолокаторов необходимо осуществлять как первичную, связанную с обнаружением сигналов на фоне шумов и помех, так и вторичную, связанную с распознаванием объектов и

явлений, обработку радиолокационной информации. Процессоры, осуществляющие такую обработку, также дорогостоящие, что еще больше удорожает метеорологическую радиолокационную станцию. А от ограничений, присущих радиолокационному методу получения метеорологической информации, избавиться не удастся.

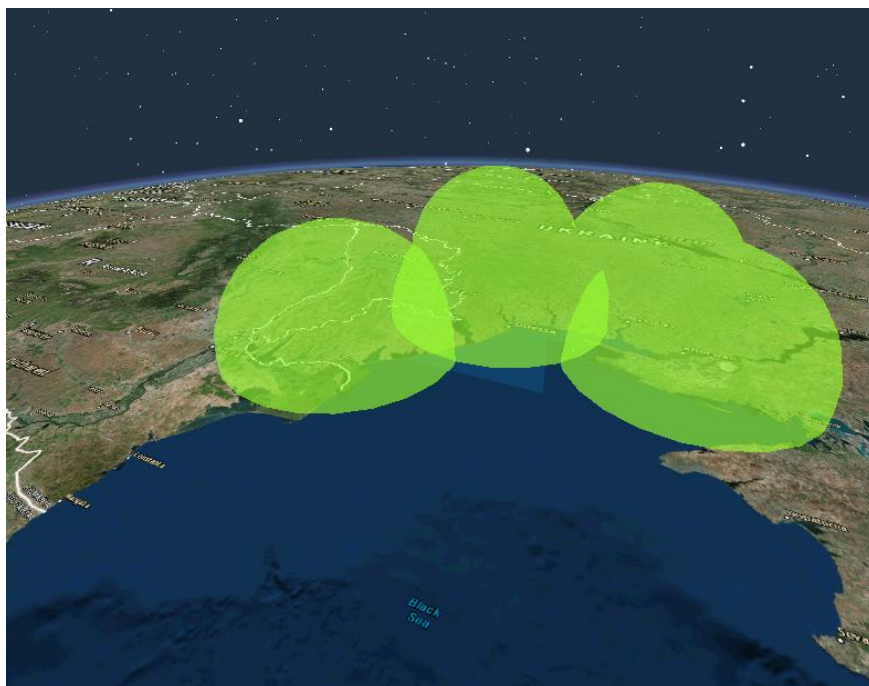


Рис. 3

Системный подход к построению радиолокационной системы метеорологического мониторинга подразумевает взаимодействие радиолокаторов друг с другом и со средой [5]. Из всей окружающей среды выделяется пространство наблюдений (на рис. 4 оно выделено более темным фоном по высоте от 0,5 до 25 км на примере Украины), т.е. только та часть атмосферы, в которой находятся объекты и происходят процессы и явления, подлежащие радиолокационному мониторингу. Образованное метеорологическими радиолокационными станциями радиолокационное поле должно полностью охватывать пространство наблюдений, не делая никаких исключений, что обеспечит полноту информации. Но и далеко за пределы пространства наблюдений, в целях экономии энергии, радиолокационному полю выходить не следует. Достичь охвата радиолокационным полем всего пространства наблюдений можно разными способами, но с экономической точки зрения приоритет должен быть отдан тому способу, который обеспечит минимальные финансовые, энергетические и иные затраты при сохранении полноты и качества потребной информации.

Следующий шаг позволит, задавшись требованиями потребителей к получаемой от радиолокационной системы метеорологического мониторинга информации, на основе общесистемных требований сформулировать требования к метеорологическим радиолокационным станциям. При этом, стараясь их сделать как можно проще с технической точки зрения, по возможности превращая в радиолокационный датчик, исключив из функций все сложные виды обработки и перенеся сложные виды обработки на верхние слои иерархии системы мониторинга. В результате, вполне могут получиться разные требования к радиолокаторам, располагаемым в разных регионах, поскольку условия радиолокационных измерений разные из-за различий в климатических особенностях регионов. Может также отпасть надобность в мощных радиолокаторах. Т.е. применение системных принципов в значительной мере способно снять ограничения, присущие радиолокационному методу получения метеорологической информации и уменьшить стоимость радиолокаторов.



Рис. 4

Проведенный анализ позволил сформулировать методологию применения системного подхода при создании радиолокационных систем метеорологического мониторинга. Она следующая.

1. Изучение характеристик протекающих над территорией гидрометеорологических объектов, явлений и процессов, подлежащих радиолокационному мониторингу.
2. Определение пространственных характеристик области атмосферы, из которой необходимо получать данные о гидрометеорологических объектах, явлениях и процессах, подлежащих радиолокационному мониторингу (определение пространства наблюдений).
3. Определение временных характеристик для данных, получаемых о гидрометеорологических объектах, явлениях и процессах, подлежащих радиолокационному мониторингу.
4. Выявление требований будущих потребителей к радиолокационной информации о гидрометеорологических объектах, явлениях и процессах, подлежащих радиолокационному мониторингу.
5. Проведение районирования территории пространства наблюдений с радиометеорологической точки зрения для определения наиболее эффективных длин волн метеорологических радаров для мониторинга гидрометеорологических объектов, явлений и процессов в различных регионах.
6. Определение потребной конфигурации радиолокационного поля, накрывающего пространство наблюдений.
7. Моделирование расстановки метеорологических радиолокационных станций на местности, позволяющей реализовать радиолокационное поле потребной конфигурации, накрывающей пространство наблюдений, и с заданными пространственными и временными характеристиками.
8. На основании исследований по предыдущим пунктам предъявление общих требований к метеорологическим радиолокационным станциям, формирующим потребное радиолокационное поле.
9. Разработка тактико-технических требований к метеорологическим радиолокационным станциям, формирующим потребное радиолокационное поле.
10. Совместно с заказчиком подготовка исходных данных для технического проекта создания радиолокационной системы метеорологического мониторинга.
11. Разработка технического проекта создания радиолокационной системы метеорологического мониторинга.
12. Реализация технического проекта создания радиолокационной системы метеорологического мониторинга.

Представленная выше *методология применения принципов системного подхода при создании радиолокационных систем метеорологического мониторинга реализуется в настоящее время* в рамках выполняемой научно-исследовательской работы с госбюджетным финансированием.

В соответствии с системным подходом с первого по четвертый разделы оценено вертикальное распределение метеорологических объектов, явлений и процессов, подлежащих радиолокационному контролю, и рассмотрены условия фазовых переходов воды в атмосфере, распределение тропосферы на части с положительными и отрицательными температурами, уровней естественной и интенсивной кристаллизации, пространственного распределения высот температурных уровней и их динамики. Рассмотрены требования к наземным дистанционным методам измерений: классификационные, системные. Обобщены требования к составу, точности и пространственно-временной разрешающей способности гидрометеорологической информации, используемой для производственной деятельности различных отраслей хозяйства: задачи и цели мониторинга, методы измерений, требования к измерениям разных видов [6]. Изучена динамика некоторых опасных процессов, протекающих в атмосфере, которая может быть настолько высока, что существующие принципы механического радиолокационного сканирования окружающего пространства не позволяют обнаружить эти опасные процессы и распознать их из-за большой длительности процедуры сканирования. Поэтому в метеорологических радиолокационных станциях могут применяться в качестве антенн многолучевые антенны или фазированные антенные решетки. В зависимости от места установки метеорологической радиолокационной станции фазированные антенные решетки могут быть с электронным сканированием по углу места и механическим вращением по азимуту, а в районах с высокой вероятностью процессов вертикального развития, порождающих опасные явления погоды, следует использовать фазированные антенные решетки с электронным сканированием как по углу места, так и по азимуту. Эти меры позволят оперативно обеспечить потребителя информацией о быстроразвивающихся опасных метеорологических процессах [7, 8]. В широком составе участников на базе УкрГМЦ проведены межведомственные совещания с целью рассмотреть вопросы создания метеорологической радиолокационной системы мониторинга на основе проведения экспертных опросов. Результатом исследований явились требования к качеству получаемой информации, которые подробно изложены в [9, 10], а кратко для формирования радиолокационного поля далее: верхняя граница получения информации – 22...25 км, нижняя граница получения информации – 0,3...0,5 км, при мониторинге туманов нижняя граница – 0,05 км; пространственная разрешающая способность в горизонтальной плоскости – 1...2 км, а в вертикальной плоскости – 0,5...1 км.

Проведенное с точки зрения радиометеорологии районирование территории (в качестве одного из примеров на рис. 5 приведены районы с наиболее вероятными грозами – 1 и градобитиями – 2) в соответствии с пятым разделом позволяет выработать требования к частотным характеристикам радиолокационного поля.

Из подобного анализа становится понятно, что для полноценного исследования атмосферного пространства в рамках климатического (основа мониторинга климата) и синоптического (основа оперативного гидрометеорологического обеспечения) мониторинга с удовлетворением заданных показателей качества информации желательно использование двух длин волн [11]: $\lambda=5...6$ см и $\lambda=10,0$ или 3,0 см. Первая длина волны ($\lambda=5...6$ см) отвечает рекомендациям Всемирной метеорологической организации и обеспечивает однородность получаемой радиолокационной информации по всей территории страны при присоединении к глобальной сети наблюдений. Это позволит проводить сравнительный анализ с результатами радиолокационных наблюдений других стран. Вторая длина волны ($\lambda=10,0$ или 3,0 см) дает возможность обрабатывать быстротекущие и локальные процессы вертикальной конвекции, имеющие катастрофические последствия в районах, где эти процессы протекают и представляют наибольшую опасность (район Карпат, северо-западное побережье Черного моря, Приазовье). Таким образом, в этих районах желательно иметь двухканальную метеорологическую радиолокационную станцию, работающую на длинах волн 5...6 см и 10 или

3 см. В районах аэропортов, морских портов желательно использование многофункциональных многодиапазонных радиолокационных станций с обязательной дополнительной длиной волны $\lambda=0,8$ см или 3 см для мониторинга всей толщи тропосферы на предмет обнаружения кристаллических облачных образований, туманов. Кроме того, такой радар может обнаруживать неустойчивый сдвиг ветра при локальных конвективных процессах, являющийся опасным для авиации. Таким образом, в этих районах желательно иметь или трехканальную метеорологическую радиолокационную станцию, работающую на длинах волн 0,8; 5...6 и 10 или 3 см или двухканальную метеорологическую радиолокационную станцию, работающую на длинах волн 0,8 или 3 см и 5...6 см. Остальную территорию страны достаточно оснастить одноканальными метеорологическими радиолокационными станциями, работающими в автоматическом режиме с рабочей длиной волны 5...6 см.

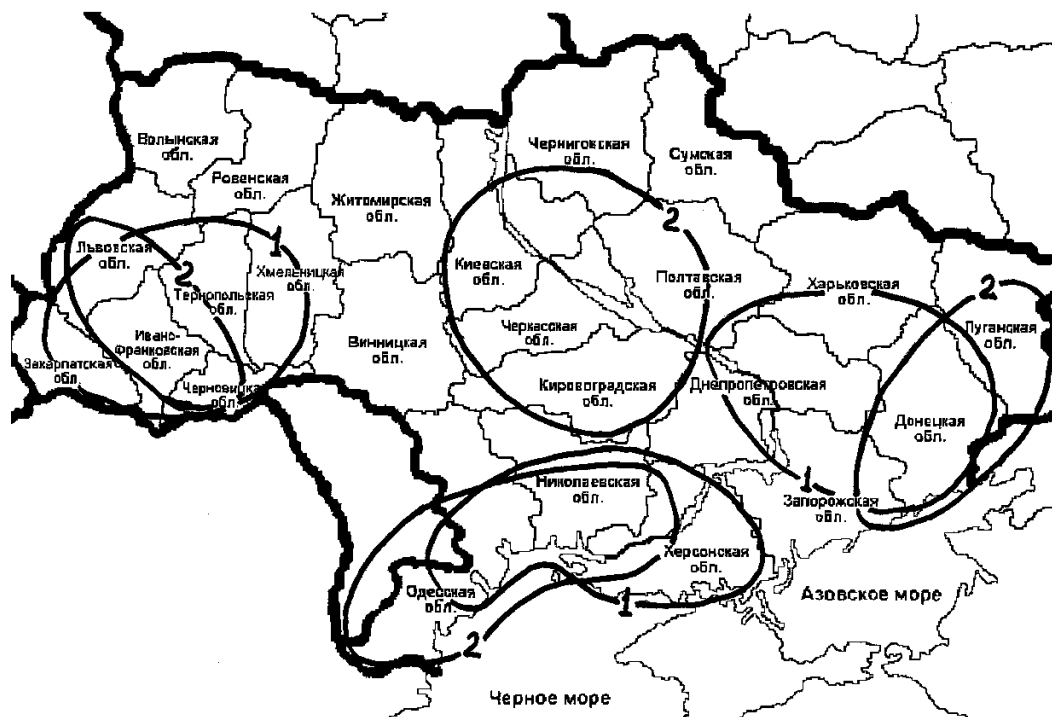
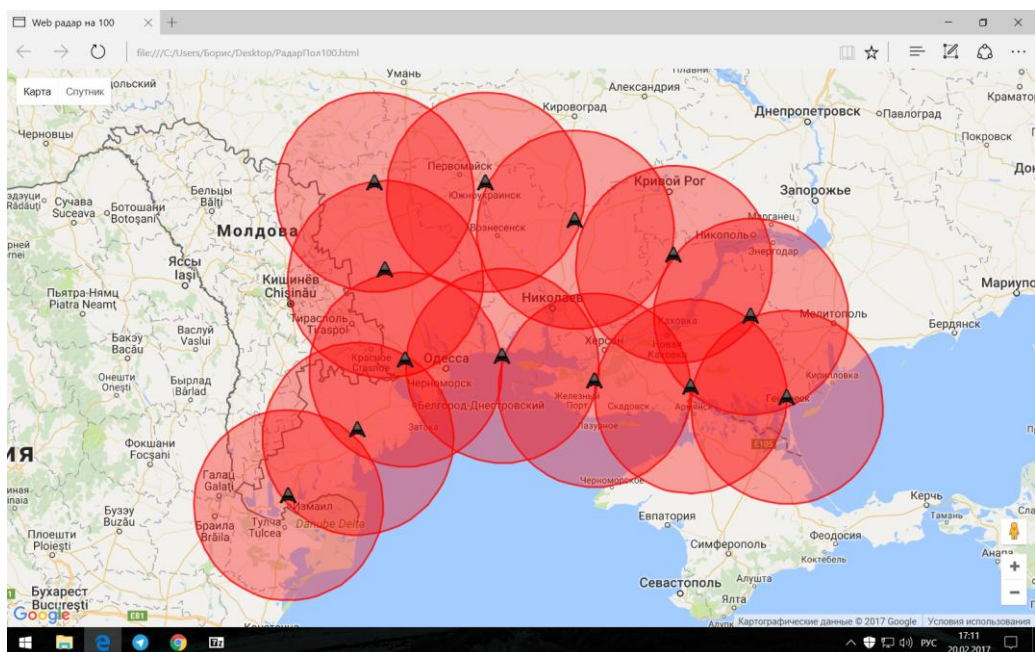


Рис. 5

На основании шестого раздела конфигурация радиолокационного поля, как было отмечено выше, должна полностью покрывать пространство наблюдений, незначительно выходя за пределы последнего с целью экономии энергии при мониторинге. Порядок реализации требований к создаваемому полю определяет седьмой раздел. Проведенный анализ вариантов построения радиолокационного поля показал, что наиболее рациональным является вариант расстановки радиолокаторов в вершинах шестиугольников с заведомым 50 %-ным наложением зон наблюдения двух соседних радиолокаторов и с ограничением подъема луча диаграммы направленности радиолокатора на угол не более 27 градусов. Это обеспечит беспровальную верхнюю границу радиолокационного поля на высоте около 25 км. Расстояние между радиолокаторами для обеспечения нижней беспровальной границы поля на высоте 500 м должно быть не больше 100 км. Подобная конфигурация поля как раз полностью покрывает пространство наблюдений с минимальной энергетической избыточностью, местами до высоты примерно 50 км. На рис. 6 показан результат моделирования приведенного выше варианта построения для северо-западного и степного Причерноморского региона (*a* – двумерное отображение наложенных друг на друга зон обзора радаров, образующих единую зону наблюдения, *b* – трехмерное отображение тех же зон, покрывающих пространство наблюдений).



а



б

Рис. 6

На основании предложенного варианта построения радиолокационного поля возможно предъявить требования к облику и тактико-техническим характеристикам метеорологических радиолокационных станций. Все метеорологические радиолокационные станции должны быть доплеровскими для проведения ветровых измерений по обнаруженным объектам и явлениям, являющимися индикаторами ветра. Для распознавания и измерения осадков во всех метеорологических радиолокационных станциях должны использоваться поляризационные измерения и применяться многоканальность. Ввиду высокой плотности населения в районах опасных метеорологических явлений необходимо уменьшать мощность излучаемых зондирующих сигналов, не уменьшая при этом количество излученной в пространство энергии с целью сохранить потенциал метеорологической радиолокационной станции и показатели качества получаемой радиолокационной информации. Поэтому в метеорологических радиолокационных станциях должны применяться сложные широкополосные сигналы, позволяющие сохранить потенциал станции при снижении излучаемой мощности. Метрическая дальность действия метеорологического радара должна быть в пределах 100 км.

Оставшиеся четыре раздела системного подхода при создании метеорологических радиолокационных систем мониторинга предполагается реализовать в процессе дальнейшей работы.

Выводы

Таким образом, исследования показали, что применение системного подхода к созданию метеорологической радиолокационной системы мониторинга позволяет получить системный эффект в виде экономного расходования энергии зондирующего излучения, оптимального покрытия радиолокационным полем пространства наблюдений без ухудшения при этом показателей качества информации. При системном построении мониторинга исчезает понятие радиогоризонта, уменьшается влияние крупномасштабного рельефа местности, снижается воздействие осадков на возможности мониторинга. Уменьшение потребной дальности действия метеорологической радиолокационной станции улучшает пространственную разрешающую способность внутри системы и позволяет резко понизить импульсную мощность зондирующего излучения, что уменьшит опасность системы для человека, т.е. системный подход в значительной мере позволяет ослабить ограничения, присущие радиолокационному методу получения метеорологической информации.

Список литературы: 1. *European Commission*, EUR 18567, „COST 75 – Advanced weather radar systems – International seminar”, ed. C.G. Collier, Luxemburg, Office for official publications of the European Communities, 1999. 858 p. 2. *Технический проект „Общесистемные решения по сбору, анализу, контролю и предоставлению радиолокационной информации от ДМРЛ-С”*. – Режим доступа: <http://www.aviamettelecom.ru/TP-DMRL-2014.pdf>. 3. *Golden, J.H.* The prospects and promise of NEXRAD: 1990's and beyond // J.H. Golden // COST 73. – 1989. – P. 17–36. 4. *Метеорологические автоматизированные радиолокационные сети*; под ред. Г.Б. Брылева. – С.-Пб.: Гидрометеиздат, 2002. – 330 с. 5. *Конторов, Д.С., Голубев-Новожилов, Ю.С.* Введение в радиолокационную системотехнику. – М.: Сов. радио, 1971. – 367 с. 6. *Удосконалення методів побудови систем одержання і обробки вимірювальної інформації з метою моніторингу навколишнього середовища: наук.-техн. звіт (номер держ. реєстрації 0113U000164)* / Одес. держ. еколог. ун-т; кер. Б.В. Перелигін. – Одеса, 2013–2015. 7. *Протокол Міжвідомчої наради в Українському гідрометеорологічному центрі „Про перспективи створення єдиного радіолокаційного поля над територією України з метою моніторингу навколишнього середовища”*. – Київ: УГМЦ. – 25.12.2015. 8. *Протокол Міжвідомчої наради в Українському гідрометеорологічному центрі „Про розробку системи метеорологічного радіолокаційного моніторингу причорноморського регіону України”*. – Київ: УГМЦ. – 04.04.2016. 9. *Перельгін, Б.В., Боровская, Г.А., Лужбин, А.М.* Анализ требований потребителей к характеристикам информации, получаемой от метеорологической радиолокационной системы мониторинга // Радиотехника. – 2016. – № 187. – С. 58–65. 10. *Perelygin, B.V.* Reasonable deployment of radar field for environmental monitoring system // Telecommunications and radio engineering. – 2016. – Vol. 75. № 9. – P. 823–833. Doi: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i9.70 11. *Danova, T.E. & Perelygin, B.V.* Substantiation of requirements to the wavelength of radar monitoring for hydrometeorological purposes // Radioelectron. Commun. Syst. (2016) V.59. 7: PP.309-318. Doi: 10.3103/S0735272716070049

Одесский государственный
экологический университет

Поступила в редколлегию 20.08.2017