

ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ПОЛЯ ПРИ ПОСТРОЕНИИ СИСТЕМЫ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Введение

Создание радиолокационной системы гидрометеорологического мониторинга предусматривает построение радиолокационного поля необходимой конфигурации или потребного радиолокационного поля [1, 2]. Построенное радиолокационное поле должно обладать некоторыми важными свойствами. К ним относятся свойство беспровальности, т.е. поле должно быть сплошным для получения возможности извлечения информации из всего пространства наблюдений. Другим важным свойством сформированного радиолокационного поля должна быть многочастотность, необходимая для обеспечения возможности реализации двухчастотного метода индикации дождя и града [3]. Не менее важным является свойство устойчивости радиолокационного поля. Под устойчивостью в радиолокационных системах понимают сохранение показателей качества системы при нарушении работоспособности ее элементов, а именно – радиолокаторов [4]. Система радиолокаторов порождает радиолокационное поле, а значит конфигурация этого поля должна незначительно изменяться при нарушении работоспособности части элементов системы. Нарушение работоспособности радиолокаторов возможно по нескольким причинам. Одна из причин связана с электромагнитной совместимостью и, из-за этого, с невозможностью производства радиолокационных измерений из-за повышения уровня шума, вызванного помехами. Другая связана с нарушением работоспособности радиолокатора по техническим причинам, т.е. с выходом его из строя. В обоих случаях конечный эффект нарушения работоспособности приводит к нарушению работы радиолокационной системы в целом и нарушению целостности радиолокационного поля. Электромагнитная совместимость радиолокаторов обеспечивается организационными (выполнение норм и рекомендаций, регламентирующих разнос частот, ширину полосы излучения, стабильность частоты передатчиков, уровень побочных излучений, взаимное размещение близко расположенных радиолокаторов) и техническими (правильный выбор промежуточной частоты, повышение избирательности тракта приема, использование различных устройств защиты от помех, фильтрацию неосновных излучений передающих устройств экранирование элементов радиолокатора) мерами. Уменьшение количества выходов из строя радиолокаторов связано с повышением надежности функционирования элементов радиолокатора [5].

Однако обеспечить системную устойчивость радиолокационного поля и сделать эту устойчивость менее зависимой от указанных выше причин можно на этапе проектирования радиолокационной системы гидрометеорологического мониторинга, соответствующим образом размещая радиолокаторы на местности. В предлагаемой статье рассматривается вопрос обеспечения устойчивости радиолокационного поля при построении радиолокационной системы гидрометеорологического мониторинга вне зависимости от причин нарушения работоспособности радиолокаторов. Объектом исследования в этом случае является процесс радиолокационного гидрометеорологического мониторинга, а предметом исследования – устойчивость радиолокационного поля, образуемого системой радиолокационного гидрометеорологического мониторинга. Постановка и решение этой задачи являются актуальными, поскольку радиолокационная система гидрометеорологического мониторинга должна быть правильно построена с точки зрения системологии, что обеспечит ее длительную успешную эксплуатацию.

Цель и метод исследования

Цель исследования – обеспечение устойчивости радиолокационного поля при построении системы гидрометеорологического мониторинга – достигается на основе применения метода сравнительного анализа и количественной оценки параметров моделей различных вариантов построения радиолокационного поля.

Описание исследования и анализ его результатов

Одна радиолокационная станция образует зону обзора или зону наблюдения (рис. 1,*а* – трехмерное изображение зоны обзора, рис. 1,*б* – вертикальная проекция горизонтального сечения зоны обзора на определенной высоте). А множество радиолокационных станций образуют радиолокационное поле (рис. 2,*а* – трехмерное изображение радиолокационного поля, рис. 2,*б* – вертикальная проекция горизонтального сечения радиолокационного поля на определенной высоте).

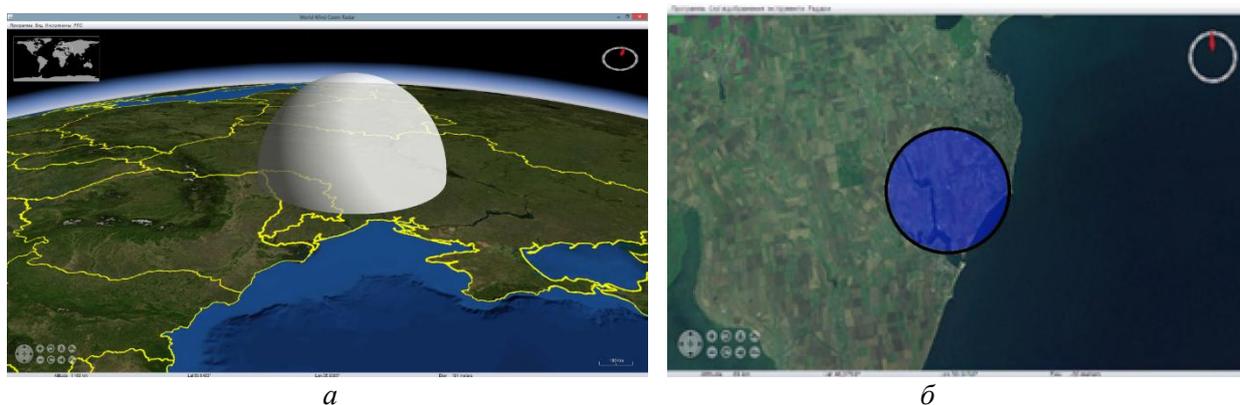


Рис. 1

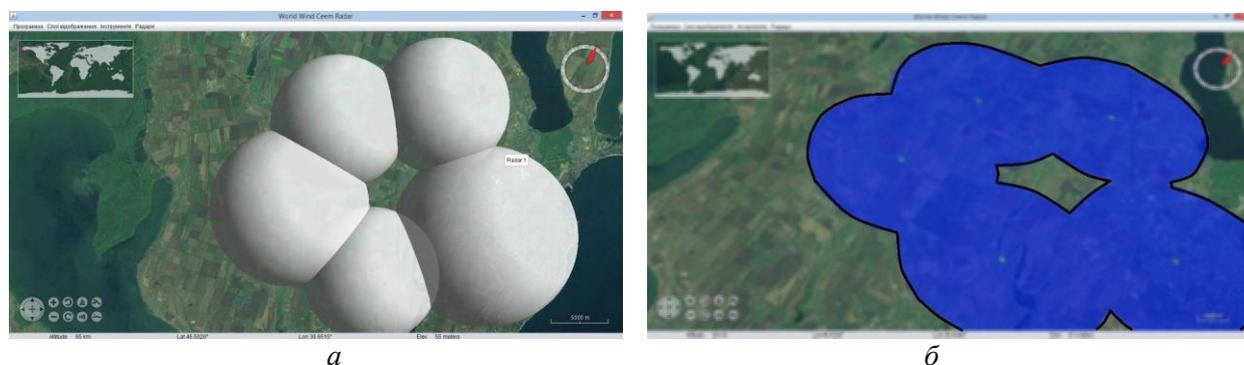


Рис. 2

Устойчивость радиолокационного поля оценим следующим образом. Расположим некоторое количество радиолокаторов (для примера – 16) в вершинах стыкованной системы трех геометрических фигур: равносторонних треугольников, квадратов и шестиугольников (рис. 3). Рассчитаем размеры обслуживаемой площади, т.е. площади, занимаемой вертикальной проекцией горизонтального сечения радиолокационного поля на определенной высоте для системы из 16 радиолокаторов. Результаты этих расчетов дадут возможность оценить площадь, приходящуюся на один радиолокатор, количество радиолокаторов, приходящихся на единицу обслуживаемой площади и относительное изменение размеров обслуживаемых площадей при различном расположении радиолокаторов. Затем сымитируем выход из строя в произвольном порядке некоторой части (двух, четырех, шести, восьми, десяти) имеющихся в системе радиолокаторов. После чего оценим размеры обслуживаемых площадей при получившемся прореживании радиолокационного поля. Полученные данные

позволят оценить относительное уменьшение обслуживаемой площади при выходе из строя некоторой части радиолокаторов в зависимости от их размещения. В целом результаты исследования дадут возможность оценить степень устойчивости радиолокационного поля системы гидрометеорологического мониторинга при различных вариантах размещения радиолокаторов и сделать вывод о предпочтительном способе обеспечения устойчивости радиолокационного поля.

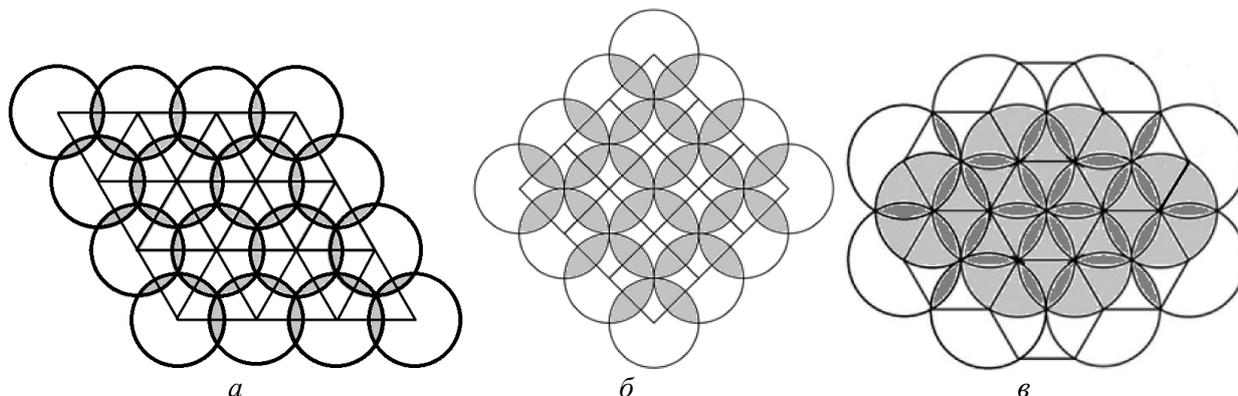


Рис. 3

При вычислении обслуживаемой площади для пары радиолокаторов $S_{\text{обсл } 2}$ (рис. 4,а) нужно учесть то обстоятельство, что зоны наблюдения отдельных радиолокаторов накладываются и обслуживаемая ими площадь будет состоять из суммы площадей зон наблюдения отдельных радиолокаторов $S_{\text{обсл } 1}$ без площади получившихся в результате наложения двух сегментов с площадью $S_{\text{сегм}}$ каждый (светло-серый сегмент принадлежит зоне наблюдения правого радиолокатора, а темно-серый сегмент принадлежит зоне наблюдения левого радиолокатора), как показано на рис. 4,б.

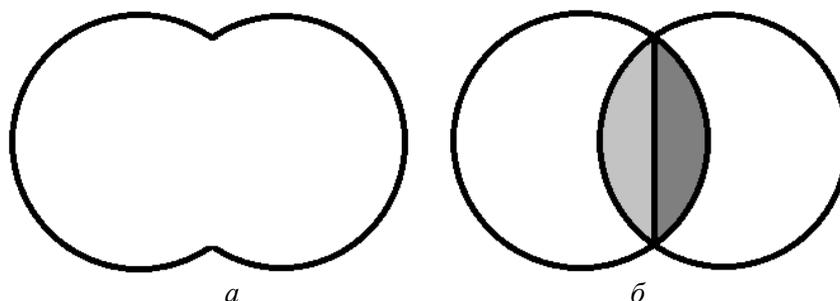


Рис. 4

Эти рассуждения можно распространить и на произвольное число радиолокаторов с пересекающимися зонами наблюдения. В результате получим:

$$S_{\text{обсл } k} = \sum_{i=1}^k S_{\text{обсл } i} - \sum_{j=1}^l S_{\text{сегм } j}, \quad (1)$$

где $S_{\text{обсл } k}$ – площадь, обслуживаемая k радиолокаторами, $S_{\text{обсл } i}$ – площадь, обслуживаемая отдельным i -м радиолокатором из k , $S_{\text{сегм } j}$ – площадь j -го сегмента пересечения из l .

Следует отметить, что второй член в правой части выражения существует только при наличии сегментов пересечений зон наблюдения и количество сегментов пересечений не равно количеству радиолокаторов. Кроме того, площадь сегмента пересечения зависит от количества вершин многоугольника (его порядка – n) в которых размещаются радиолокаторы, поскольку перекрытие в этих случаях будет разным.

При расположении радиолокаторов в вершинах равносторонних треугольников (рис. 3, а) обслуживаемая площадь, как было отмечено выше, будет состоять из суммы площадей зон наблюдения шестнадцати радиолокаторов без 33 элементов пересечения или

66 сегментов пересечения. Поскольку зоны наблюдения всех радиолокаторов одинаковы с радиусом R , то сегменты пересечения тоже будут одинаковыми. Площадь круга и сегмента находится несложно. Из [6] они соответственно равны: $S_{кр} = \pi R^2$ и $S_{сегм} = \frac{R^2}{2} \left(\pi \frac{\alpha^\circ}{180^\circ} - \sin \alpha^\circ \right)$. Здесь R – дальность действия радиолокатора, α – центральный угол, который опирается на сегмент, образующийся при пересечении двух зон наблюдения радиолокаторов. Расчеты для α были проведены в [7] и дали результаты, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Расположение радиолокаторов в вершинах		
равностороннего треугольника	квадрата	правильного шестиугольника
$\alpha = 60^\circ$	$\alpha = 90^\circ$	$\alpha = 120^\circ$

При расчете получаем сумму всех шестнадцати площадей зон наблюдения равной $50,27 \cdot R^2$, и сумму всех 66 сегментов пересечения равной $5,97 \cdot R^2$. В результате при размещении радиолокаторов в вершинах треугольников получим значение обслуживаемой площади $S_{обсл\ 16тр} = 44,3 \cdot R^2$.

Аналогично проводим расчеты при размещении радиолокаторов в вершинах квадратов (рис. 3,б). Отличием от предыдущего варианта расположения является то, что количество сегментов пересечения равно 48 и угол $\alpha = 90^\circ$ (из табл. 1). При расчете получаем сумму всех шестнадцати площадей зон наблюдения, равную $50,27 \cdot R^2$, и сумму всех 48 сегментов пересечения, равную $13,68 \cdot R^2$. В результате при размещении радиолокаторов в вершинах квадратов получим значение обслуживаемой площади $S_{обсл\ 16кв} = 36,6 \cdot R^2$.

Похожим образом проводим расчеты при размещении радиолокаторов в вершинах шестиугольников (рис. 3,в). Отличие от предыдущих вариантов расположения заключается в том, что количество сегментов пересечения зон наблюдения радиолокаторов, находящихся в вершинах одного и того же ребра шестиугольника, равно 32 (на рис. 3,в – светло-серый тон) и угол $\alpha = 120^\circ$. Это большие сегменты. Но в этом варианте расположения присутствуют сегменты пересечения зон наблюдения радиолокаторов, которые не находятся на одном ребре шестиугольника. Это малые сегменты. Таких сегментов 56 (выделены на рис. 3,в более темным тоном) и для них угол $\alpha = 60^\circ$, т.к. они оказываются в вершинах вписанных в шестиугольник равносторонних треугольников. Причем, часть из них попадает внутрь 32 больших сегментов (таких малых сегментов 48 – на рис. 3,в это более темные сегменты, находящиеся на фоне больших более светлых сегментов) и их площадь не нужно вычитать из общей площади, поскольку она будет вычтена за счет большого сегмента. А часть малых сегментов не накладывается на большие сегменты (таких малых сегментов 8), поэтому их площадь нужно вычитать из общей площади. С учетом приведенных рассуждений при расчете получаем сумму всех шестнадцати площадей зон наблюдения, равную $50,27 \cdot R^2$, сумму площадей всех 32 больших сегментов пересечения, равную $19,65 \cdot R^2$, сумму площадей 8 малых сегментов пересечения, равную $0,72 \cdot R^2$. В результате при размещении радиолокаторов в вершинах шестиугольников получим значение обслуживаемой площади $S_{обсл\ 16шш} = 29,9 \cdot R^2$.

Полученные результаты и дополнительно рассчитанные параметры сведем в табл. 2.

Таблица 2

Параметры	Расположение радиолокаторов в вершинах		
	равностороннего треугольника	квадрата	правильного шестиугольника
Обслуживаемая площадь	$44,3 \cdot R^2$	$36,6 \cdot R^2$	$29,9 \cdot R^2$
Площадь, приходящаяся на один радиолокатор	$2,77 \cdot R^2$	$2,29 \cdot R^2$	$1,87 \cdot R^2$
Количество радиолокаторов, приходящихся на единицу площади	$0,36 \cdot R^{-2}$	$0,44 \cdot R^{-2}$	$0,54 \cdot R^{-2}$

Задав значение дальности действия радиолокатора, легко получить значения параметров, приведенных в табл. 2, и использовать их для дальнейших расчетов. Например, задавшись дальностью действия радиолокатора в 100 км, получим количество радиолокаторов на единицу площади. Оно будет равно $0,36 \cdot 10^{-4} \text{ км}^{-2}$ при расположении радиолокаторов в вершинах треугольников и $0,54 \cdot 10^{-4} \text{ км}^{-2}$ – при расположении радиолокаторов в вершинах шестиугольников. Для обслуживания территории размером примерно 580 тыс. км² в первом случае понадобится 21 радиолокатор, а во втором – 32 радиолокатора. Эти показатели оценочные, поскольку при подобных расчетах нужно учитывать следующие обстоятельства. При построении реальных систем радиолокационного мониторинга местоположение радиолокатора определяется местностью и не удастся расположить их геометрически правильно. Кроме того, форма контролируемой территории, как правило, является неправильной, с выступами и впадинами, которые дополнительно и еще более существенно нарушают геометрическую правильность построения системы. Поэтому, на основе проведенного полунатурного моделирования [8] можно сказать, что полученные значения для количества радиолокаторов нужно умножать на коэффициент 1,4 – 1,43 в зависимости от степени нарушения правильности геометрии расположения радиолокаторов.

Представляет интерес, с экономической точки зрения, знание относительного изменения обслуживаемой площади при различных вариантах расположения радиолокаторов, определяемых порядком многоугольника n . При вычислении относительных изменений площадей в качестве опорной примем площадь, обслуживаемую системой с радиолокаторами, расположенными в вершинах треугольников ($n=3$). Результат представлен на рис. 5.

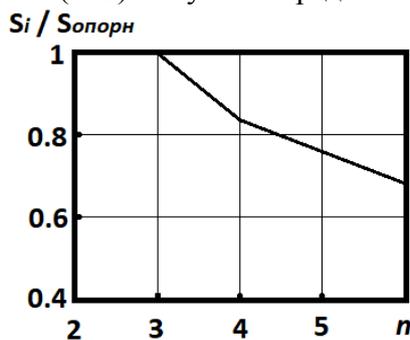


Рис. 5

Видно, что при увеличении порядка многоугольника, в вершинах которого расположены радиолокаторы, происходит уменьшение размера обслуживаемой площади. Так, при $n=4$ обслуживаемая площадь составляет 83 % от площади, обслуживаемой при $n=3$, а при $n=6$ обслуживаемая площадь составляет уже 68 % от опорной.

Оценим относительное уменьшение обслуживаемой площади при выходе из строя по любым причинам части радиолокаторов. Для этого выполним расчеты для всех вариантов расположения радиолокаторов, рассчитав значения обслуживаемых площадей, получающихся в системе из 16 радиолокаторов при уменьшении в произвольном порядке их количества на два, четыре, шесть, восемь, десять (рис. 6, 7, 8). При расчетах будем учитывать все соображения, приведенные выше, а результаты расчетов сведем в табл. 3.

Таблица 3

Расположение радиолокаторов в вершинах	Обслуживаемая площадь при указанном количестве радиолокаторов /Доля обслуживаемой площади при указанном количестве радиолокаторов в сравнении с площадью, обслуживаемой всеми радиолокаторами					
	16	14	12	10	8	6
равностороннего треугольника	$44,3 \cdot R^2$ /1	$39,8 \cdot R^2$ /0,9	$35,0 \cdot R^2$ /0,79	$29,6 \cdot R^2$ /0,67	$24,2 \cdot R^2$ /0,55	$18,9 \cdot R^2$ /0,43
квадрата	$36,6 \cdot R^2$ /1	$33,2 \cdot R^2$ /0,91	$30,3 \cdot R^2$ /0,83	$27,4 \cdot R^2$ /0,75	$24,6 \cdot R^2$ /0,67	$18,9 \cdot R^2$ /0,52
правильного шестиугольника	$29,9 \cdot R^2$ /1	$28,2 \cdot R^2$ /0,94	$24,7 \cdot R^2$ /0,83	$23,8 \cdot R^2$ /0,8	$22,5 \cdot R^2$ /0,75	$18,3 \cdot R^2$ /0,61

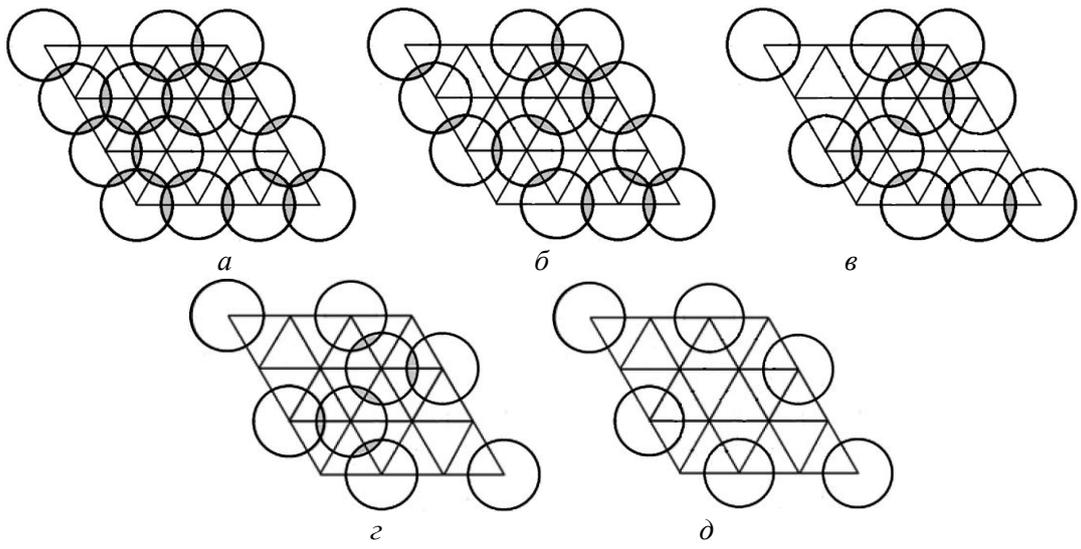


Рис. 6

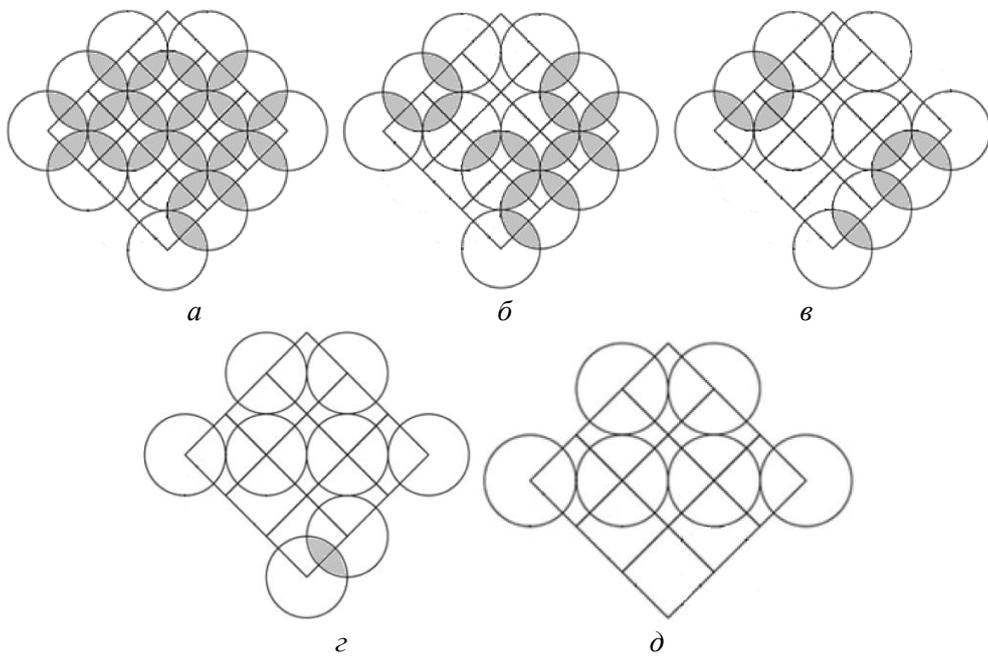


Рис. 7

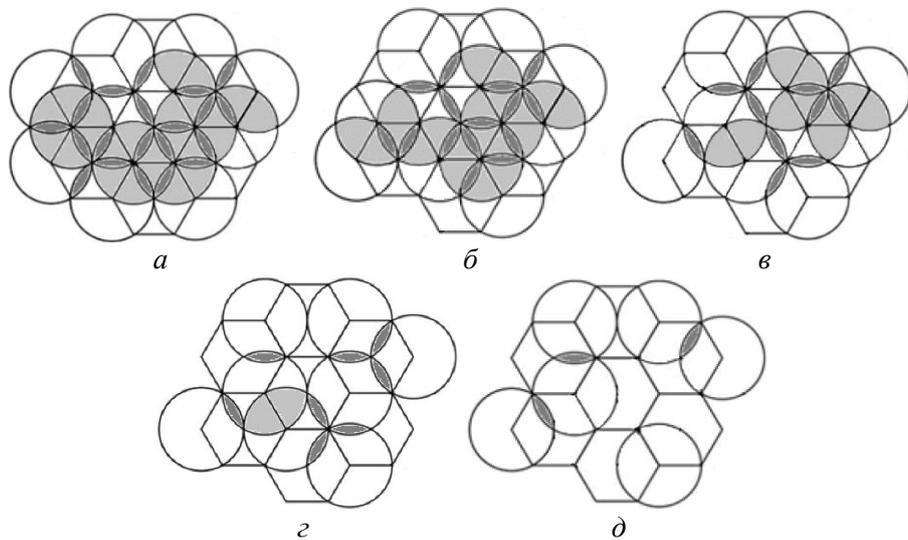


Рис. 8

На основании данных из табл. 3 графически отобразим относительное уменьшение обслуживаемой площади при выходе из строя некоторой части радиолокаторов в зависимости от их размещения. Результат представлен на рис. 9.

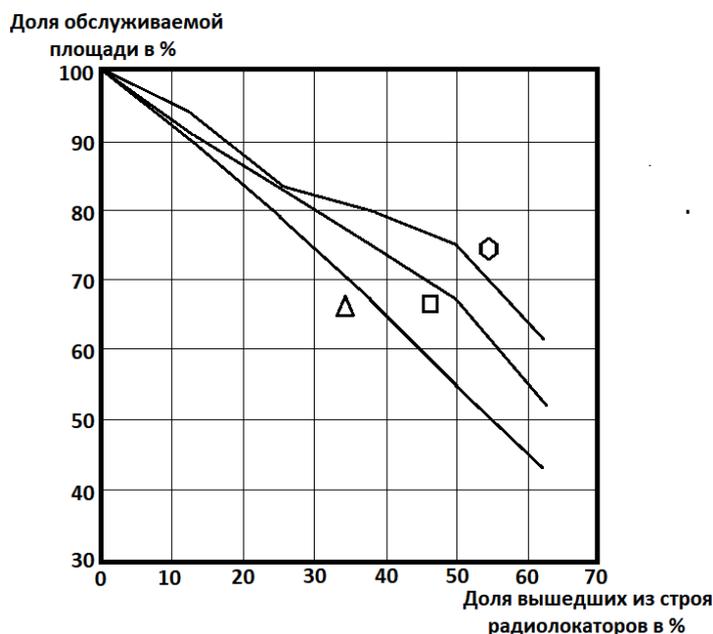


Рис. 9

Некоторая неровность хода графиков определяется случайностью выбора вышедших из строя радиолокаторов. Анализ графика показывает, что при потере 50 % радиолокаторов доля обслуживаемой площади при расположении радиолокаторов в вершинах шестиугольников будет на 20 % больше по сравнению с расположением в вершинах треугольников.

Выводы

Таким образом, результаты проведенных исследований дали возможность оценить степень устойчивости радиолокационного поля системы гидрометеорологического мониторинга при различных вариантах размещения радиолокаторов. Наибольшая системная устойчивость достигается при построении системы мониторинга с размещением радиолокаторов в вершинах шестиугольников. Поэтому при наличии требования высокой устойчивости такой способ построения системы является предпочтительным.

Список литературы:

1. Perehygin 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.
2. Перельгин Б.В. Реализация системного подхода при создании радиолокационной системы метеорологического мониторинга // Радиотехника. 2017. № 190. С. 13–21.
3. Абшаев М.Т., Бурцев И.И., Ваксенбург С.И., Шевела Г.Ф. Руководство по применению радиолокаторов МРЛ-4, МРЛ-5 и МРЛ-6 в системе градозащиты. Ленинград : Гидрометеониздат, 1980. 231 с.
4. Ермак С.Н. Тактика радиотехнических войск. Минск : БГУИР, 2010. 281 с.
5. Основы построения РЛС РТВ ; под ред. Б.Ф. Бондаренко. К. : Изд. КВИРТУ ПВО, 1987. 368 с.
6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Москва : Наука, 1984. 832 с.
7. Перельгин Б.В., Лужбин А.М. Построение сплошного радиолокационного поля системы гидрометеорологического мониторинга на основе геометрического подхода // Радиотехника. 2017. № 191. С. 173–180.
8. Удосконалення методів побудови систем одержання і обробки вимірювальної інформації з метою моніторингу навколишнього середовища: наук.-техн. звіт (номер держ. реєстрації 0113U000164) / Одеський державний екологічний університет ; кер. Б.В. Перельгін. Одеса, 2013–2015.