

РАЦИОНАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ ЗОНДИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПРОСТРАНСТВЕ НАБЛЮДЕНИЯ СИСТЕМЫ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Введение

Главным ресурсом обзорного метеорологического радиолокатора является энергия зондирующего излучения. Главный он потому, что вся доступная радиолокационная информация заключена в принятой антенной отраженной от атмосферы части энергии зондирующего излучения. Вся дальнейшая обработка в идеальном случае может сохранить количество полученной радиолокационной информации, а в неидеальном – уменьшить ее количество. Однако получение информации необходимо обеспечить не во всей зоне наблюдения метеорологического радиолокатора, а в зоне, называемой пространством наблюдения, которое должно покрываться радиолокационным полем системы гидрометеорологического мониторинга [1].

Цель исследования, представленного в данной статье, - выяснение вопроса о наиболее рациональном распределении энергии зондирующего излучения с помощью передающих антенн метеорологических радиолокаторов в пространстве наблюдения, т.е. о наиболее рациональном построении радиолокационного поля. Достигается указанная цель за счет количественной оценки параметров геометрических моделей построения радиолокационного поля и логического анализа полученных результатов. Понятие „наибольшей рациональности” распределения энергии зондирующего излучения примыкает к понятию оптимизации, но при проведении оптимизации какой-либо системы требуется выбрать критерий оптимизации или несколько их (для рассматриваемого случая), оценить их количественно и сделать определенные выводы. Оценка наибольшей рациональности предоставляет большую свободу в подходах, методах выяснения вопроса о распределении энергии зондирующего излучения. Объектом исследования является система радиолокационного гидрометеорологического мониторинга, а предметом исследования - энергетика радиолокационного поля, образуемого системой радиолокационного гидрометеорологического мониторинга. Постановка и решение этой задачи являются актуальными, поскольку радиолокационная система гидрометеорологического мониторинга должна быть построена рационально, что обеспечит ее длительную успешную и экономную эксплуатацию.

Описание исследования и анализ его результатов

Пространство наблюдения является той частью воздушного пространства, в которой существуют атмосферные объекты, явления и процессы, подлежащие радиолокационному мониторингу [2]. Геометрически пространство наблюдения можно представить в виде цилиндрического объема, образующая которого проходит по границам обслуживаемой территории, а сверху и снизу этот объем ограничен плоскими основаниями, построенными на минимальной и максимальной потребной высоте (рис. 1). Минимальная потребная высота для радиолокационного поля системы гидрометеорологического мониторинга должна составлять около 0,5 км, а максимальная – до 20 – 25 км [3]. Рациональное распределение энергии зондирующего излучения предполагает полное и наиболее точное покрытие им пространства наблюдения. Осуществляется это покрытие при помощи распределения зондирующего излучения в пространстве наблюдения и приеме из него сигналов, отраженных от метеорологических объектов и явлений. Зондирующее излучение в пространстве распределяется с помощью антенной системы (рис. 2). На указанном рисунке дальность действия радиолокатора обозначена как R .

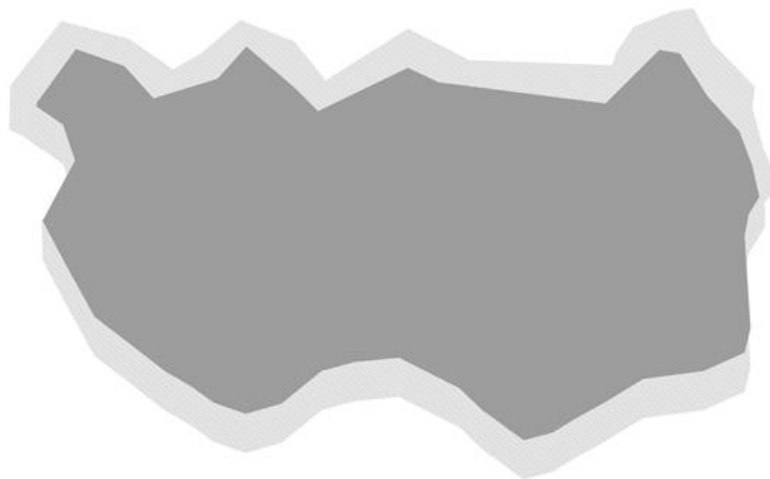


Рис. 1

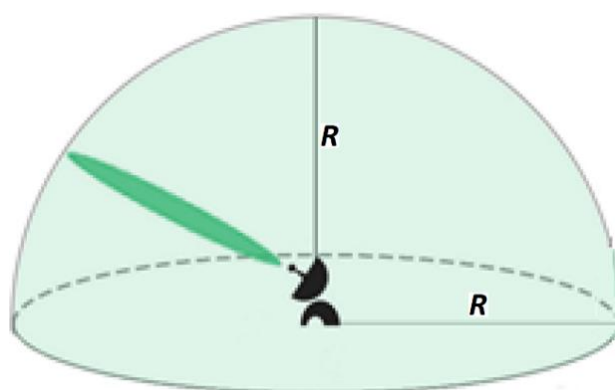


Рис. 2

При рассмотрении рационального распределения энергии зондирующего излучения в пределах всего пространства наблюдения важно представлять себе распределение энергии в зоне наблюдения единичного радиолокатора. Будем исходить из того предположения, что область полусферы зоны наблюдения, изображенная на рис. 2, в течение времени обзора последовательно заполняется энергией зондирующего излучения с плотностью потока мощности, позволяющей получить отраженный сигнал с заданным отношением сигнал/шум при определенных видах гидрометеорологических объектов. При таком предположении понятие объема полусферы или ее части можно отождествлять с энергией, распределенной в этом объеме полусферы или в ее части, находящихся в зоне наблюдения единичного радиолокатора. Из [4] известны формулы объема сферы

$$V_{\text{сф}} = \frac{4}{3} \pi R^3 \quad (1)$$

и объема сферического сегмента (см. рис. 3)

$$V_{\text{сфст}} = \pi h_{\text{ст}}^2 \left(R - \frac{1}{3} h_{\text{ст}} \right), \quad (2)$$

где $h_{\text{ст}}$ – высота сегмента.

Выясним, как будет зависеть полнота использования энергии зондирующего излучения от соотношения дальности действия радиолокатора и высоты верхней границы радиолокационного поля. Степень полноты использования энергии обозначим как коэффициент использования энергии $K_{\text{иэ}}$.

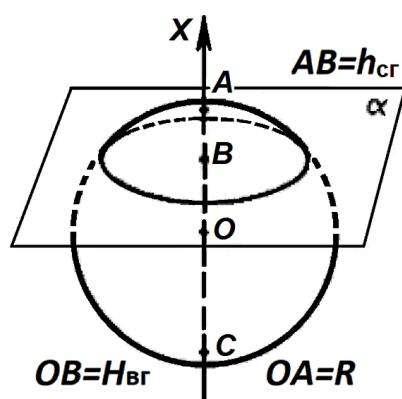


Рис. 3

Установим на основании предложенного выше отождествления

$$K_{из} = V_{пн1} / V_{зн1}, \quad (3)$$

где $V_{пн1}$ – объем пространства наблюдения, покрываемого одним радиолокатором, $V_{зн1}$ – объем зоны наблюдения одного радиолокатора.

Объем пространства наблюдения, покрываемого одним радиолокатором $V_{пн1} = \frac{1}{2} V_{сф} - V_{сфсг}$, а объем зоны наблюдения одного радиолокатора $V_{зн1} = \frac{1}{2} V_{сф}$.

Подставив правые части этих равенств в (3), получим

$$K_{из} = 1 - 2V_{сфсг} / V_{сф}, \quad (4)$$

Подставим в последнее выражение значения $V_{сф}$ и $V_{сфсг}$ из (1) и (2), причем в (2) при этом произведем замену $h_{сг}$ на $R - H_{вг}$ (см. рис. 3). В результате получим

$$K_{из} = \frac{3}{2} \frac{H_{вг}}{R} - \frac{1}{2} \frac{H_{вг}^3}{R^3}. \quad (5)$$

Использование (5) для построения отдельных зависимостей $K_{из}$ от R и $H_{вг}$ породит целое семейство графиков, что затруднит процесс анализа. Целесообразнее построить один график $K_{из}$ в зависимости от отношения $H_{вг}/R$, поскольку R и $H_{вг}$ не связаны и могут задаваться произвольно. Обозначим отношение высоты верхней границы зоны наблюдения $H_{вг}$ к дальности действия R радиолокатора, т.е. $H_{вг}/R$, как X . Тогда выражение (5) окончательно преобразуется в

$$K_{из} = \frac{3}{2} X - \frac{1}{2} X^3. \quad (6)$$

На рис. 4 представлено графическое отображение выражения (6). Для примера, при высоте верхней границы зоны наблюдения $H_{вг}=25$ км и дальности действия радиолокатора $R=100$ км отношение их составит величину $X=0,25$, при котором $K_{из} \approx 0,36$. Это говорит о том, что только 36 % энергии зондирующего излучения при таком соотношении $H_{вг}$ и R будет использоваться эффективно, остальные 64 % будут растрacены впустую, фактически на нагрев стратосферы. Анализ этого графика также показывает, что при фиксированной потребной высоте верхней границы $H_{вг}=25$ км увеличение дальности действия радиолокатора R будет приводить к ухудшению полноты использования энергии зондирующего излучения и $K_{из}$ будет уменьшаться.

Поэтому перед разработчиком системы мониторинга возникает противоречие между потребной дальностью действия радиолокатора и энергетической эффективностью радиолокационной системы гидрометеорологического мониторинга, которое требует разрешения при проектировании системы мониторинга.

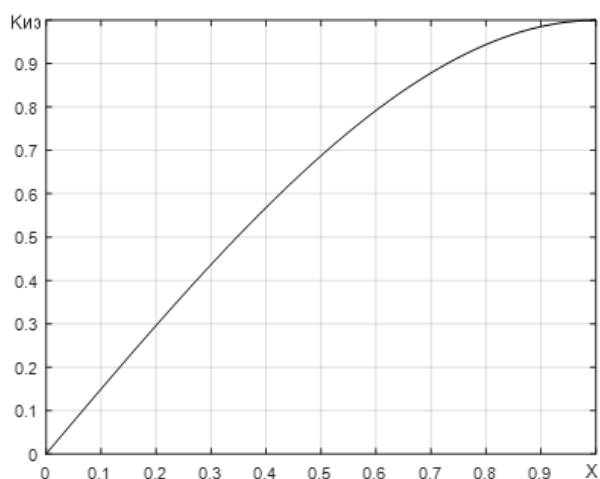


Рис. 4

Решим задачу распределения энергии зондирующего излучения в пространстве наблюдения всей системой гидрометеорологического мониторинга. Первый, и наиболее очевидный, способ решения этой задачи заключается в расстановке радиолокаторов таким образом, чтобы их зоны наблюдения пересекались на потребной высоте верхней границы поля $H_{ВГ}$ (см. рис. 5).

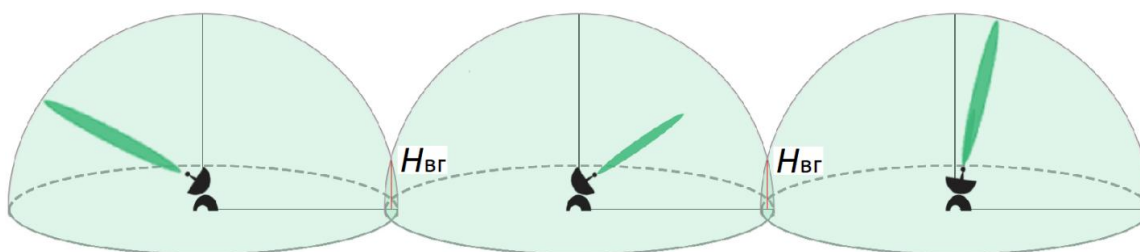


Рис. 5

При подобной расстановке радиолокаторов на местности с применением геометрического подхода, а именно - в вершинах равносторонних треугольников [2], распределение энергии зондирующего излучения в пространстве наблюдения системы гидрометеорологического мониторинга, т.е. конфигурация радиолокационного поля, примет вид, показанный на рис. 6.

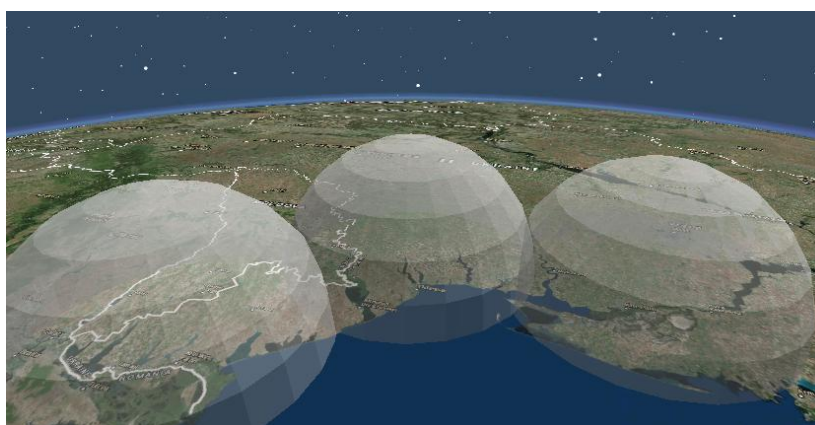


Рис. 6

Такое построение обеспечит беспровальность радиолокационного поля, т.е. распределение энергии зондирующего излучения произойдет по всему пространству наблюдения. При этом каждый из радиолокаторов будет осуществлять полный цикл

сканирования пространства наблюдения в диапазоне углов места ϵ от 0 до 90 градусов. При существующих радиолокаторах длительность полного цикла беспровального сканирования может длиться десятки минут, что может привести к пропуску быстроразвивающихся опасных явлений погоды со всеми вытекающими из пропуска тяжелыми последствиями. И, кроме того, при указанном распределении энергии зондирующего излучения будет использоваться эффективно только небольшая часть всей энергии зондирующего излучения, а именно, только та, которая будет распределена в пространстве наблюдения.

В приведенном способе распределения энергии зондирующего излучения в целях экономии энергии можно ограничить подъем луча диаграммы направленности антенных систем радиолокаторов до определенного угла места. Однако в этом случае значительный район над радиолокаторами и в прилегающем к ним пространстве не будет обслужен. Тем не менее, из возможности ограничения подъема луча диаграммы направленности антенных систем радиолокаторов до определенного угла места проистекает второй способ распределения энергии зондирующего излучения в пространстве наблюдения всей системы гидрометеорологического мониторинга, позволяющий более экономно расходовать энергию, концентрируя ее в пространстве наблюдения. Радиолокаторы в этом случае должны располагаться в вершинах шестиугольников [2], с обеспечением половинного перекрытия зон наблюдения соседних радиолокаторов, как показано на рис. 7.

Подобное построение системы позволяет не делать полный цикл сканирования антенны от 0 до 90 градусов по углу места ϵ для распределения энергии (рис. 8). Это обусловлено тем, что соседние радиолокаторы будут „просматривать” пространство друг над другом. При горизонтальном ($\epsilon=0^\circ$) положении диаграмм направленности расстояние между радиолокаторами должно быть таким, чтобы высота луча диаграммы направленности антенны одного радиолокатора над соседним радиолокатором была равна потребной высоте нижней границы $H_{нг}$ радиолокационного поля и пространства наблюдения (рис. 9). Это значение вычисляется с помощью известного выражения радиогоризонта [5]:

$$D = 4,11(\sqrt{H_c} + \sqrt{h_a}), \quad (7)$$

где D – горизонтальная дальность, км; H_c – поправка высоты на кривизну Земли, м; h_a – высота электрического центра антенны, м.

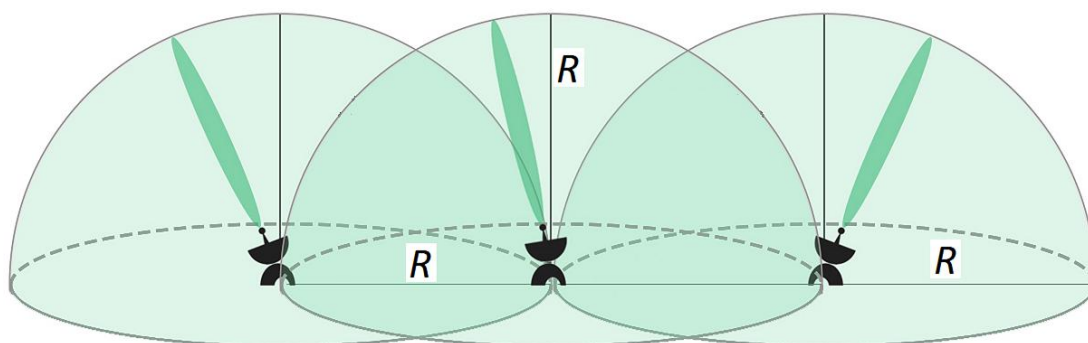


Рис. 7

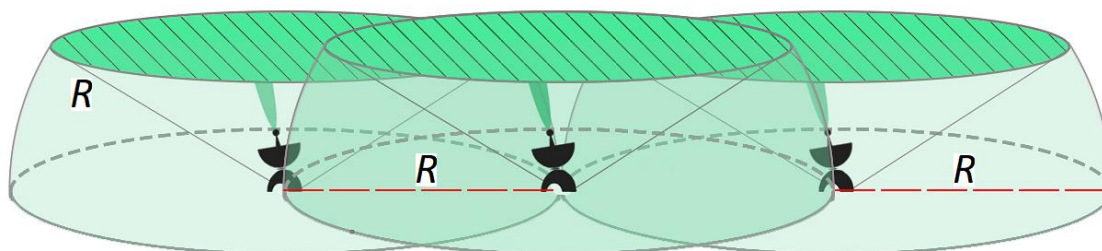


Рис. 8

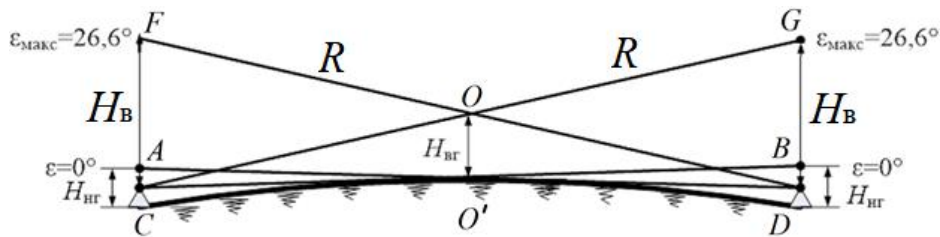


Рис. 9

Из (7) получим, что при нормальной рефракции атмосферы, при высоте электрического центра антенны равной 5 м и при потребной высоте нижней границы $H_{нт}=H_c=500$ м это расстояние CD (рис. 9) составит 101,23 км, т.е. расстояние между радиолокаторами при втором способе распределения энергии зондирующего излучения в пространстве наблюдения не должно превышать 100 км. За счет этого будет обеспечена потребная высота нижней границы радиолокационного поля 500 м и менее во всем пространстве наблюдения. Дальнейший подъем диаграммы направленности по углу места ϵ необходимо проводить до того момента, когда точка пересечения диаграмм направленности соседних радиолокаторов достигнет потребной высоты верхней границы $H_{вг}$ пространства наблюдения (точка O на рис. 9). За счет этого будет обеспечена потребная высота верхней границы радиолокационного поля 25 км и более во всем пространстве наблюдения. При этом значение максимального угла подъема диаграмм направленности $\epsilon_{макс}=26,6^\circ$, которое легко получается из решения треугольника $O'OD$, указанного на рис. 9. При втором способе распределения энергии зондирующего излучения методику оценки полноты использования энергии применим ту же, что и для первого способа, но с учетом того, что радиолокатор не проводит полного сканирования в угломестной плоскости. В этом случае в уравнении (3) по-прежнему будут рассчитываться $V_{пн1}$ – объем пространства наблюдения, покрываемого одним радиолокатором, и $V_{зн1}$ – объем зоны наблюдения одного радиолокатора. Из объема пространства наблюдения, покрываемого одним радиолокатором, дополнительно нужно вычесть объем образующегося конуса, в котором не распределяется энергия зондирующего излучения данного радиолокатора (т.н. „мертвая воронка” на рис. 10, а), а перекрывается она за счет энергии соседнего радиолокатора. А из объема зоны наблюдения одного радиолокатора нужно вычесть объем сферического сектора первого рода, в котором не распределяется энергия зондирующего излучения данного радиолокатора (затемненная часть на рис. 10, б). С учетом отмеченных особенностей получим: $V_{пн1} = \frac{1}{2} V_{сф} - V_{сфсг} - V_{мв}$ и $V_{зн1} = \frac{1}{2} V_{сф} - V_{сфск}$. Подставив правые части этих равенств в (3), получим

$$K_{из} = (\frac{1}{2} V_{сф} - V_{сфсг} - V_{мв}) / (\frac{1}{2} V_{сф} - V_{сфск}), \quad (8)$$

Для $V_{сф}$ и $V_{сфсг}$ выражения известны, а для $V_{сфск}$ и $V_{мв}$ из [4] используем соответственно выражения для расчета объемов сферического сектора первого рода и конуса (рис. 9 и 10):

$$V_{сфск} = \frac{2}{3} \pi R^2 h_{ск}, \quad (9)$$

$$V_{мв} = \frac{1}{3} \pi r^2 H_{вг}, \quad (10)$$

где r – радиус основания мертвой воронки (конуса) на высоте $H_{вг}$.

Подставим в (8) значения $V_{сф}$ и $V_{сфсг}$ из (1) и (2), $V_{сфск}$ и $V_{мв}$ из (9) и (10), причем при подстановке произведем замену переменных $h_{сг}$ на $R-H_{вг}$, $h_{ск}$ на $R-H_B$ и примем во внимание, что $H_B = 2H_{вг}$, (см. рис. 9, 10). В результате получим

$$K_{из} = 0,6875. \quad (11)$$

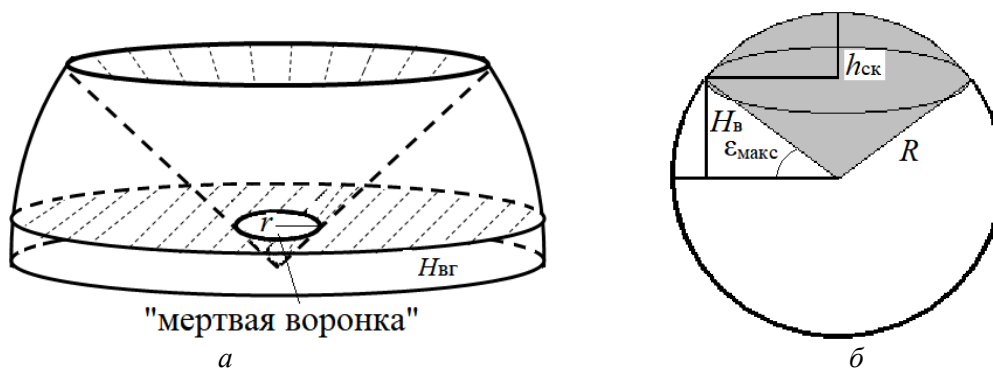


Рис. 10

Подобный результат говорит о том, что коэффициент использования энергии зондирующего излучения одним радиолокатором при втором способе распределения энергии не зависит ни от дальности действия радиолокатора, ни от высоты верхней границы пространства наблюдения, т.е. от высоты верхней границы радиолокационного поля. Он постоянен и равен примерно 0,7. Объясняется это тем, что при заданной дальности действия радиолокатора увеличение $H_{вг}$ приводит к необходимости увеличения угла $\epsilon_{макс}$, что ведет к излучению большего количества энергии зондирования вне пространства наблюдения, поэтому коэффициент использования энергии должен уменьшаться. Но при этом действует и обратная тенденция, а именно, при подъеме диаграммы направленности антенны все большая часть энергии излучения покрывает „мертвую воронку”, что приводит к прямо пропорциональному увеличению коэффициента использования энергии, компенсирующего его убывание. Проведенные рассуждения и расчеты относятся как к одиночному радиолокатору, так и к группе радиолокаторов, которые распределяют энергию зондирующего излучения внутри пространства наблюдения, образуя радиолокационное поле.

Выводы

Результаты исследований, основанных на количественной оценке параметров геометрических моделей построения радиолокационного поля, позволили выявить наиболее рациональный способ распределения энергии зондирующего излучения в пространстве наблюдения. Этот способ заключается в том, что радиолокаторы, образующие поле, расставляются в вершинах связанных правильных шестиугольников так, чтобы зоны наблюдения смежных радиолокаторов накладывались друг на друга до полной дальности действия радиолокаторов. В этом случае энергетическая неэффективность полученного радиолокационного поля за счет наложения зон наблюдения радиолокаторов всего лишь кажущаяся. На самом деле отсутствие необходимости распределять энергию под большими углами места создает существенную экономию энергии зондирующего излучения и доводит степень полноты использования энергии излучения до 70 %.

Список литературы:

1. Перельгин Б.В. Реализация системного подхода при создании радиолокационной системы метеорологического мониторинга // Радиотехника. – 2017. – № 190. – С. 13–21.
2. Перельгин Б.В., Лужбин А.М. Построение сплошного радиолокационного поля системы гидрометеорологического мониторинга на основе геометрического подхода // Радиотехника. – 2017. – № 191. – С. 173–180.
3. Перельгин 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.
4. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – Москва : Наука, 1984. – 832 с.
5. Мищенко Ю.А. Зоны обнаружения. – Москва : Воениздат, 1963. – 96 с.