

УДК 623.4

Методика распределения полей зрения средств наблюдения в зоне ответственности

Горбулин В.И.*, Ходор М.А.**

*Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,
ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198, Россия*

**e-mail: v_gorbulin@mail.ru*

***e-mail: khodorvvv@mail.ru*

Аннотация

В статье обосновано предложение использования для наблюдения за воздушной обстановкой многоканальных панорамных оптико-электронных средств. Поставлена задача по распределению полей зрения средства наблюдения в зоне ответственности. Описаны особенности алгоритмов построения поля наблюдения панорамного оптико-электронного средства в зависимости от формы фундаментального параллелограмма решетки размещения центров полей зрения элементов средства наблюдения. Приведены результаты и обоснование целесообразности использования программной реализации разработанных алгоритмов.

Ключевые слова: зона ответственности, поле зрения, фундаментальный параллелограмм, область Дирихле, коэффициент покрытия.

Введение

Актуальность статьи определяется неуклонно возрастающим числом малоразмерных воздушных объектов, обнаружение которых базовым средством наблюдения – радиолокационной станцией – осуществляется с низкой вероятностью. Данный факт связан с малой эффективной площадью рассеивания таких воздушных объектов.

В мирной обстановке к малоразмерным воздушным объектам относятся легкие самолеты и вертолеты, а также беспилотные летательные аппараты (БЛА), применяемые в различных отраслях промышленности, сельского и лесного хозяйств [1]. При этом для успешной организации воздушного движения необходимо контролировать местоположение всех его участников.

В обстановке вооруженного конфликта малоразмерными воздушными объектами являются крылатые ракеты и БЛА, успешно заменяющие тактическую авиацию при решении большого круга задач [2].

Следует учитывать и вариант использования БЛА как средства для совершения террористического акта.

В условиях вооруженного конфликта описанную проблему обостряет применение противостоящими группировками средств радиоэлектронного подавления, снижающее эффективность использования радиолокационной станции для обнаружения малоразмерных воздушных объектов.

Немаловажным фактором затруднения обнаружения таких летательных аппаратов является использование композиционных материалов, применяемых при

создании их корпуса и обладающих низкими отражательными свойствами в радиодиапазоне.

Поэтому для решения проблемы обнаружения малоразмерных летательных аппаратов представляется целесообразным комплексно применять оптико-электронные и радиолокационные средства наблюдения.

Применение оптико-электронных средств наблюдения требует распределения их зон ответственности для обеспечения непрерывности поля наблюдения.

Многоканальные оптико-электронные средства

Оптико-электронное средство может быть оснащено ультрафиолетовым, видимым и инфракрасным каналами [3, 15]. Такое устройство принято называть многоканальным оптико-электронным средством (МОЭС).

Использование оптико-электронных средств в условиях земной атмосферы ограничивается влиянием тракта распространения. Длина волны нижнего диапазона оптического излучения соизмерима с размерами молекул и различных взвешенных частиц, содержащихся в атмосфере. Это вызывает ослабление потока за счет молекулярного поглощения, рассеяние на молекулах и взвешенных частицах. Взаимодействие оптического излучения с турбулентной атмосферой приводит к изменению траектории потока и его расширению, ухудшению пространственной когерентности и поляризационным флуктуациям [16, 17]. Следовательно, эффективность применения коротковолнового спектрального канала наиболее зависима от состояния атмосферы.

Предел углового разрешения $\Delta\alpha$ оптико-электронного средства находится в прямой зависимости от длины волны λ электромагнитного излучения [4]:

$$\Delta\alpha = 2,44 \cdot \lambda / D, \quad (1)$$

где D – диаметр входного зрачка аппаратуры.

Следовательно, точность наведения на визируемый объект при одних и тех же размерах D зависит от спектрального диапазона и ухудшается с увеличением длины волны.

Необходимость многоканальности оптико-электронного средства определена различными условиями ведения разведки: запыленностью и влажностью воздуха, задымленностью атмосферы, уровнем освещенности и т. д. Каналы МОЭС используют излучения в выделенных спектральных диапазонах и, соответственно, различаются в информативности и требовательности к условиям применения [18]. Комплексное использование спектральных оптических диапазонов (синтез изображений, полученных в различных диапазонах) качественно повышает информативность получаемых данных о воздушной обстановке и позволяет осуществлять контроль непрерывно.

Совместное применение каналов дает возможность поэтапного достижения цели. Задачу обнаружения объекта целесообразно решать, используя менее требовательный к состоянию атмосферы длинноволновый спектральный канал, а задачу определения параметров объекта – высокоразрешающий коротковолновый спектральный канал.

Панорамные оптико-электронные средства

Средства наблюдения, привлекаемые к решению задачи контроля воздушного пространства, должны обладать достаточным быстродействием и чувствительностью, а также позволять вести обработку и передачу данных о

воздушной обстановке в реальном масштабе времени при приемлемых эксплуатационных характеристиках.

ОЭС принято делить по способу обзора на три вида: средства на основе сверхширокоугольных объективов, сканирующие средства и средства смотрящего типа. Принципиальный недостаток сверхширокоугольных объективов – сложность обеспечения однородного пространственного разрешения по всему полю обзора [5]. Их особенностью является малое фокусное расстояние, обуславливающее небольшие дальность обнаружения и угловое разрешение, что приводит к увеличению геометрических искажений и ошибкам определения угловых координат. Сканирующие ОЭС реализуют последовательный обзор пространства, быстродействие которого не всегда достигает требуемого уровня. Повышение скорости сканирования ведет к ухудшению чувствительности ОЭС, препятствуя тем самым их использованию в условиях низкой освещенности [6].

Одним из путей радикального повышения быстродействия является отказ от сканирования пространства и переход к так называемым панорамным ОЭС (ПОЭС) «смотрящего» типа с многоэлементными (матричными) приемниками излучения (МПИ) [7]. Отдельный фоточувствительный элемент (ФЧЭ) МПИ непрерывно контролирует назначенный фрагмент пространства, а совокупность ФЧЭ осуществляет наблюдение в выделенной приемнику зоне ответственности.

ПОЭС имеют преимущество перед радиолокационными средствами в обнаружении малоразмерных летательных аппаратов, благодаря более высоким разрешающей способности и точности определения угловых координат объектов,

обладают значительно меньшими массогабаритными и стоимостными характеристиками [35].

Применение в ОЭС технологии ПЗС (приборов с зарядовой связью) повлекло за собой изменение способа обработки измерительной информации. Отличительная особенность ПОЭС состоит в том, что воздушный объект обнаруживается в небольшом поле обзора пространства [8]. Углы зрения ОЭС обычно не превышают нескольких угловых градусов и при использовании ФЧЭ высокого разрешения эта особенность приводит к достижению высокой точности измерения координат объекта. Однако применение МПИ сопряжено с необходимостью разработки алгоритмов автоматического распределения зон ответственности ФЧЭ для обеспечения непрерывности поля наблюдения.

Постановка задачи

Зона ответственности ПОЭС характеризуется параметрами:

H_{min} – высота нижней границы,

H_{max} – высота верхней границы,

L – протяженность по фронту.

Формально зона ответственности ПОЭС может быть задана прямоугольником Q , имеющим высоту $H = H_{max} - H_{min}$ и длину L .

Зона наблюдения ПОЭС формально задана областью G и определяется совокупностью из m полей зрения g ФЧЭ, которые при равенстве горизонтального и вертикального углов зрения представляют собой круги, описываемые радиусом R :

$$G = \bigcup_{i=1}^m g_i(R). \quad (2)$$

Пространственное покрытие зоной наблюдения ПОЭС зоны ее ответственности выполняется в том случае, если каждая точка $q \in \overline{Q}$ принадлежит области G , т.е. $Q \subseteq G$ [14, 19].

Все возможные варианты расположения полей зрения ФЧЭ определяются допустимым размещением их центров t_i , $i = 1, \dots, m$, в пределах зоны ответственности и описываются множеством точек пространства $t \in T_{\text{доп}}$, $T_{\text{доп}} \equiv G$. Качество распределения полей g в пределах зоны Q описывается величиной ρ удаления объекта наблюдения, обнаруженного в произвольной точке c зоны ответственности [20, 22] и определяется минимальным расстоянием между точкой c и центрами t_i :

$$\rho(c) = \min_{t_i \in T_{\text{доп}}} D(c, t_i). \quad (3)$$

Оптимальное распределение m полей g в пределах зоны Q предполагает решение задачи о покрытии плоскости равновеликими кругами, которую можно сформулировать следующим образом: необходимо расположить в заданной области большое число точек так, чтобы каждая точка области лежала возможно ближе к одной из заданных точек, т. е. чтобы наибольшее расстояние от точки области до самой близкой к ней из заданных точек было как можно меньшим [9, 21]. Взаимное размещение совокупности таких кластеров определяет структуру зоны наблюдения ПОЭС, организованную полями зрения ФЧЭ. Совокупность m полей зрения ФЧЭ представляет собой k слоев, содержащих по n кластеров в каждом, причем $m = k \cdot n$. Пространственное положение каждого поля зрения ФЧЭ, а значит и структура зоны наблюдения ПОЭС, задается координатами его центра $(x; y)$ и радиусом R ,

определяющим его границы. Значение радиуса поля зрения ФЧЭ определяется таким наибольшим удалением точки c от его центра, при котором этот центр остается ближайшим для точки c . Пространственная реализация данного условия обеспечивается правилом распределения центров полей зрения ФЧЭ, поэтому:

$$R = \max_{c \in Q} \rho(c, T). \quad (4)$$

Для определения структуры размещения полей зрения ФЧЭ целесообразно использовать аппарат областей Дирихле, представляющих собой совокупность точек исходного множества таких, что расстояние от них до центра этой области меньше расстояния до центра любой другой области [10, 23, 24, 25].

Семейства параллельных прямых, размещенных на плоскости, содержащей зону Q , разбивают плоскость на равные фигуры [26, 27, 28, 29]. Множество T всех точек пересечения этих прямых называется точечной решеткой или просто решеткой, а сами точки $t \in T$ – узлами решетки. Фигуры, вершинами которых являются точки t , называются фундаментальными параллелограммами или параллелограммами, порождающими решетку [10, 30, 31, 32]. Центры областей g_i описываются векторами $t_i = [x_i; y_i]^T$ и располагаются в узлах решетки, описываемой матрицей $T = [t_1, \dots, t_m]^T$, причем $t_i \in Q, i = 1, \dots, m$, а $T \in T_{\text{доп}}$.

Предпочтительный вариант T^* размещения полей зрения ФЧЭ определяются выражением:

$$T^* = \arg \max_{T \in Q} \rho(T). \quad (5)$$

В зависимости от количества и взаимной ориентации семейств параллельных прямых фундаментальный параллелограмм может принимать различные формы, тем

самым определяя вариант решетки T . Наиболее перспективными из них представляются треугольник, квадрат и гексагон, для которых областями Дирихле являются соответственно: гексагон, квадрат и треугольник [33, 34].

Целевая функция задана выражением

$$R^* = \arg \max_{T \in Q} \rho \left(\bigcup_{i=1}^m g_i(t_i(x_i; y_i), R(H, L, k, n)) \right). \quad (6)$$

Поэтому, для математического описания области G необходимо определить предпочтительный вариант решетки T^* , обеспечивающий оптимальный размер поля зрения ФЧЭ при их заданном количестве, задав тем самым положение центров областей Дирихле g_i на области Q .

Алгоритм распределения полей зрения фоточувствительных элементов

Рассмотрим вариант решетки, фундаментальным параллелограммом которой является квадрат (рис. 1).

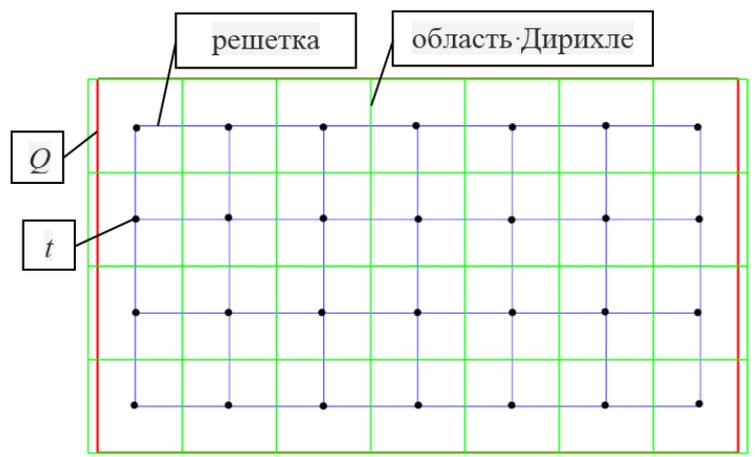


Рис. 1. Структура решетки (фундаментальный параллелограмм – квадрат)

Из рисунка 1 видно, что совокупность m областей Дирихле представляет собой k слоев, содержащих по n квадратов в каждом, причем $m = k \cdot n$. Для

определения радиуса окружностей, описанных вокруг каждого из квадратов, необходимо найти сторону квадрата a . Используя параметры зоны ответственности и количество полей зрения находим:

$$a = \max (H / k; L / n). \quad (7)$$

Радиус описанной вокруг квадрата окружности высчитывается по известной формуле:

$$R = a / \sqrt{2}. \quad (8)$$

Структура полученной решетки определяется как:

$$T^*_{\text{доп кв}} = \{T \in Q | x = x_1 + a \cdot (n - 1), y = y_1 + a \cdot (k - 1)\}. \quad (9)$$

Аппроксимируя области Дирихле описанными вокруг каждого из квадратов окружностями g с радиусом R , получаем искомую область G , содержащую в себе все точки области Q (рис. 2).

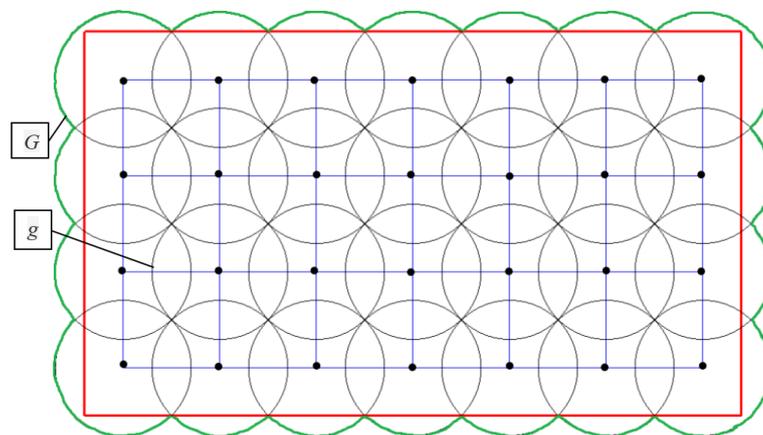


Рис. 2. Покрывение зоны ответственности ПОЭС полями зрения ФЧЭ при фундаментальном параллелограмме решетки – квадрате

Рассмотрим вариант решетки, фундаментальным параллелограммом которой является треугольник. Для определения радиуса окружностей, описанных вокруг каждого из гексагона, необходимо найти сторону гексагона l (рис. 3).

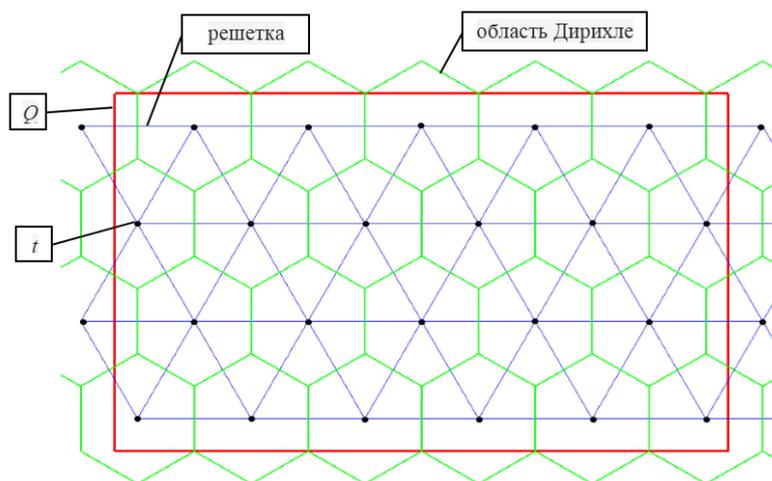


Рис. 3. Структура решетки (фундаментальный параллелограмм – треугольник)

Горизонтальный размер гексагона описывается его меньшей диагональю, а вертикальный – большей диагональю, и поэтому размер стороны гексагона может определяться вертикальным (l_H) и горизонтальным (l_L) размерами зоны ответственности ПОЭС по формулам:

$$l_H = 2 \cdot H / (3 \cdot k - 1) \text{ и } l_L = L \cdot \sqrt{3} / 3 \cdot (n - 1). \quad (10)$$

Сторона гексагона для обеспечения полного покрытия принимается равной максимальной из полученных величин:

$$a = \max(l_H; l_L). \quad (11)$$

Радиус описанной вокруг гексагона окружности равен его стороне $R = l$.

Структура полученной решетки определяется выражением:

$$\mathbf{T}_{\text{доп тр}}^* = \left\{ T \in Q \left\{ \begin{array}{l} x = x_1 + a \cdot (n - 1), y = y_1 + a \cdot \sqrt{3} \cdot (k - 1) / 2 \text{ если } k - \text{нечетный,} \\ x = x_1 + \frac{a}{2} + a \cdot (n - 1), y = y_1 + \sqrt{3} \cdot (k - 1) / 2 \text{ если } k - \text{четный,} \end{array} \right. \right\}. \quad (12)$$

Аппроксимируя области Дирихле описанными вокруг каждого из гексагонов окружностями g с радиусом R , получаем искомую область G , содержащую в себе все точки области Q (рис. 4).

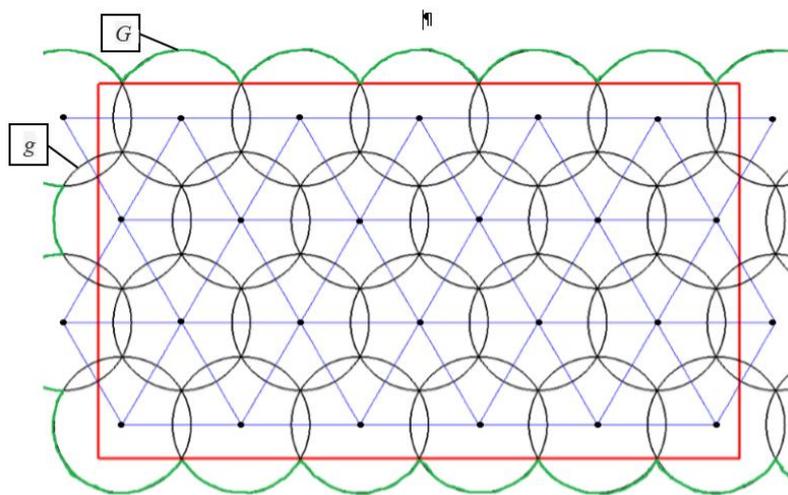


Рис. 4. Покрывтие зоны ответственности ПОЭС полями зрения ФЧЭ при фундаментальном параллелограмме решетки – треугольнике

Рассмотрим вариант решетки, фундаментальным параллелограммом которой является гексагон (рис. 5).

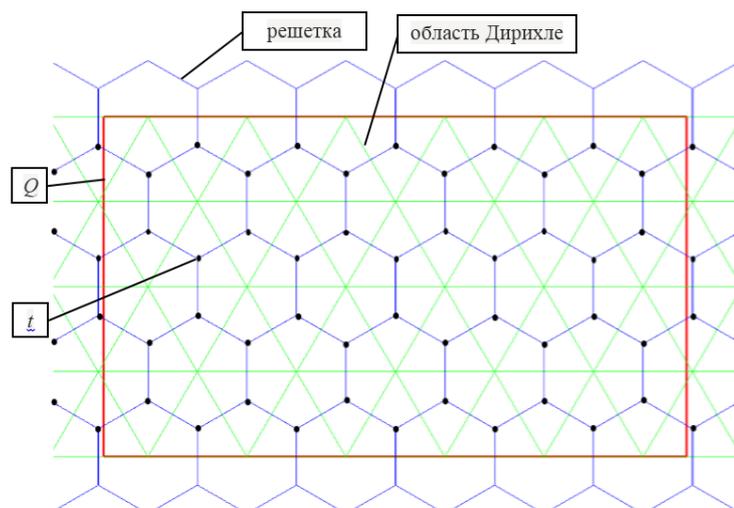


Рис. 5. Структура решетки (фундаментальный параллелограмм – гексагон)

Для определения радиуса окружностей, описанных вокруг каждого из треугольника, необходимо найти сторону a треугольника. Вертикальный и горизонтальный размер данной области Дирихле не равны, а значит, сторону треугольника следует искать по формуле:

$$a = \max (2 \cdot H / k \cdot \sqrt{3}; L / n). \quad (13)$$

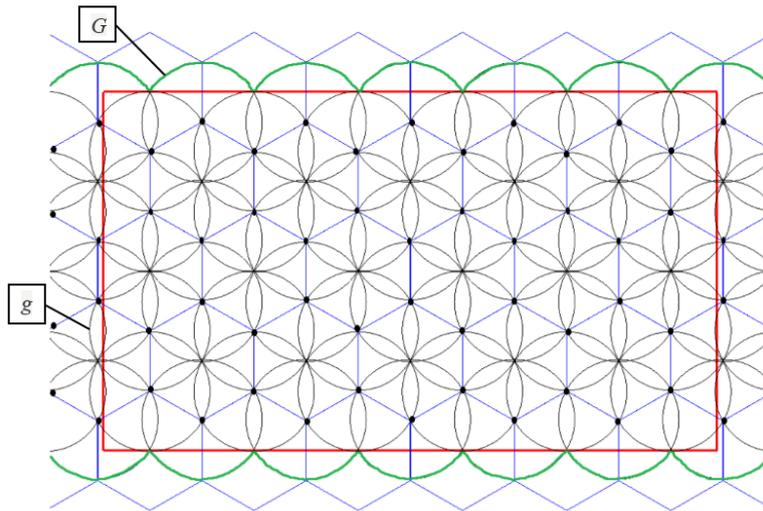
Радиус описанной вокруг правильного треугольника окружности определяется следующим выражением:

$$R = a / \sqrt{3}. \quad (14)$$

Структура рассматриваемой решетки определяется как:

$$\mathbf{T}_{\text{доп гек}} = \left\{ T \in Q \left\{ \begin{array}{l} x = x_1 + a \cdot (n - 1), y = y_1 + 2 \cdot a \cdot \sqrt{3} \cdot (k - 1) / 3 \text{ если } k - \text{нечетный,} \\ x = x_1 + \frac{a}{2} + a \cdot (n - 1), y = y_1 + a \cdot \sqrt{3} / 6 + 2 \cdot a \cdot \sqrt{3} \cdot (k - 1) / 3 \text{ если } k - \text{четный} \end{array} \right. \right\}. \quad (15)$$

Аппроксимируя области Дирихле описанными вокруг них окружностями g с радиусом R , получаем искомую область G , содержащую в себе все точки области Q



(рис. 6).

Рис. 6. Покрытие зоны ответственности ПОЭС полями зрения ФЧЭ при фундаментальном параллелограмме решетки – гексагоне

Оценка качества покрытия представленных вариантов решетки производится путем сравнения коэффициентов покрытия η , рассчитываемых по формуле:

$$\eta = S_Q / S_G, \quad (16)$$

где S_Q – площадь области ответственности ПОЭС, $S_Q = H \cdot L$;

S_G – площадь зоны наблюдения ПОЭС, $S_G = \pi \cdot R^2 \cdot m$.

Коэффициенты покрытия вариантов решетки составили: при фундаментальном параллелограмме решетки в форме квадрата – 0.6476, при фундаментальном параллелограмме решетки в форме треугольника – 0.7286, при фундаментальном параллелограмме решетки в форме шестиугольника – 0.6122. Можно сделать вывод о предпочтительности при указанных исходных данных варианта решетки, фундаментальным параллелограммом которой является треугольник.

Описанная методика позволяет при заданных количестве ФЧЭ и размерах зоны ответственности ПОЭС определить лучшую из рассматриваемых структуру размещения полей зрения ФЧЭ и требующиеся для этого их размеры. Анализ результатов расчетов, проведенных для различных соотношений размеров зоны ответственности ПОЭС и разного количества ФЧЭ, выявил отсутствие общего лучшего варианта решетки. Значит существует потребность в автоматизации выбора лучшего варианта решетки и расчета параметров области Дирихле. Сделанный вывод указывает на востребованность представленного алгоритма.

Визуальный анализ графического представления вариантов покрытия зоны ответственности ПОЭС говорит о наличии определенной избыточности размера зоны зрения ПОЭС, приводящей к отвлечению ресурсов на контроль пространства за пределами назначенной области и, следовательно, также и к снижению

оперативности. При учете потенциальной дальности обнаружения рассматриваемых воздушных объектов и диапазона их скоростей оперативность является одним из критически важных параметров и в условиях военных действий требует устранения или максимального снижения всех негативных факторов.

Алгоритм покрытия с деформацией фундаментального параллелограмма

Для устранения обозначенного недостатка предлагается оптимизация покрытия путем деформации фундаментального параллелограмма. Сутью данной деформации является изменение вертикального или горизонтального размера фундаментального параллелограмма в той мере, которая позволит реализовать поле зрения ПОЭС, равное по размеру зоне его ответственности. Для этого необходимо рассчитать параметры области Дирихле таким образом, чтобы точки пересечения внешних окружностей, аппроксимирующих эти выпуклые многоугольники, являющиеся одновременно вершинами соседних областей, были расположены на границе зоны ответственности ПОЭС.

Для решетки, фундаментальным параллелограммом которой является четырехугольник, данный подход реализуется следующим образом. Исходя из прямоугольной формы зоны ответственности Q , фундаментальный параллелограмм и область Дирихле также будут прямоугольниками. Такой четырехугольник имеет (в отличие от квадрата) уже две размерности и описывается высотой h и длиной l :

$$h = H / k \text{ и } l = L / n. \quad (17)$$

Радиус окружности, описываемой вокруг такого четырехугольника, рассчитывается по формуле:

$$R = \sqrt{h^2 + l^2} / 2. \quad (18)$$

Структура полученной решетки определяется выражением:

$$T_{\text{доп кв}}^* = \{T \in Q | x = x_1 + l \cdot (n-1), y = y_1 + h \cdot (k-1)\}. \quad (19)$$

Получено поле зрения ПОЭС, совпадающее геометрически (в границах областей Дирихле) с зоной ответственности ПОЭС (рис. 7).

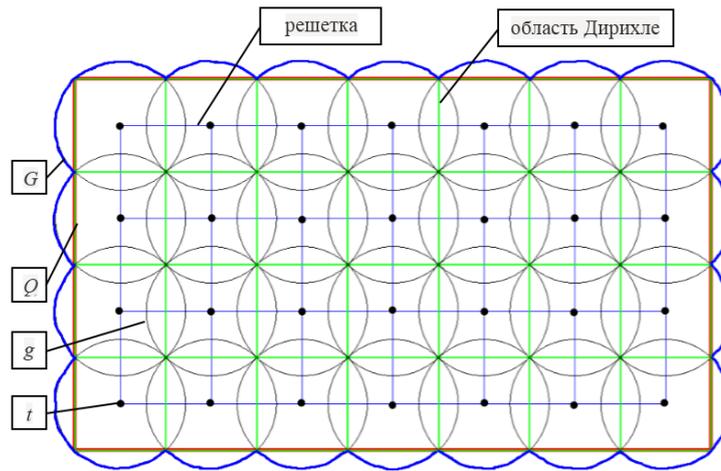


Рис. 7. Покрывение зоны ответственности ПОЭС полями зрения ФЧЭ при фундаментальном параллелограмме решетки – прямоугольнике

В деформированной решетке, фундаментальным параллелограммом которой является треугольник, область Дирихле имеет форму неправильного шестиугольника. Для описания такого многоугольника необходимо рассчитать его диагонали. Меньшую диагональ следует искать по формуле:

$$l = L / (n - 0.5). \quad (20)$$

Для расчета большей диагонали требуется решить квадратное уравнение, и ее значение определяется следующим выражением:

$$h = H \cdot (k+1) \pm \sqrt{H^2 \cdot (k+1)^2 - 4 \cdot K \cdot (H^2 - l^2 \cdot (k-1)^2 / 4)}. \quad (21)$$

Радиус окружностей, описываемых вокруг такого неправильного шестиугольника, рассчитывается по формуле:

$$R = 0.5 \cdot \sqrt{h^2 + l^2}. \quad (22)$$

Структура полученной решетки определяется как:

$$T^*_{\text{доп тр}} = \left\{ T \in Q \left\{ \begin{array}{l} x = x_1 + l \cdot (n-1), y = y_1 + h \cdot (k-1) \text{ если } k - \text{нечетный,} \\ x = x_1 + \frac{l}{2} + l \cdot (n-1), y = y_1 + h \cdot (k-1) \text{ если } k - \text{четный,} \end{array} \right. \right\}. \quad (23)$$

При таких параметрах происходит наложение меньшей диагонали и внешней вертикальной стороны внешних неправильных шестиугольников на границы зоны ответственности ПОЭС (рис. 8).

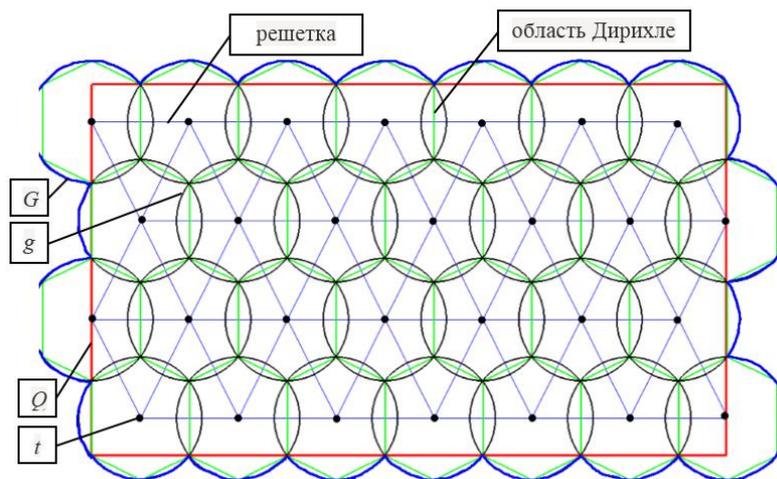


Рис. 8. Покрывание зоны ответственности ПОЭС полями зрения ФЧЭ при фундаментальном параллелограмме решетки – треугольнике

В деформированной решетке, фундаментальным параллелограммом которой является шестиугольник, область Дирихле имеет форму равнобедренного треугольника. Основание треугольника определяется следующим выражением:

$$l = L/n. \quad (24)$$

Боковая сторона треугольника находится по формуле

$$a = \sqrt{H^2 / k^2 + l^2 / 4}. \quad (25)$$

Радиус окружностей, описываемых вокруг такого равнобедренного треугольника, рассчитывается по формуле:

$$R = a^2 / \sqrt{4 \cdot a^2 - l^2}. \quad (26)$$

Структура полученной решетки определяется выражением:

$$\mathbf{T}_{\text{доп гек}}^* = \left\{ T \in Q \left\{ \begin{array}{l} x = x_1 + l \cdot (n-1), y = y_1 + 2 \cdot a \cdot \sqrt{3} \cdot (k-1) / 3 \text{ если } k - \text{нечетный}, \\ x = x_1 + \frac{l}{2} + l \cdot (n-1), y = y_1 + a \cdot \sqrt{3} / 6 + 2 \cdot a \cdot \sqrt{3} \cdot (k-1) / 3 \text{ если } k - \text{четный} \end{array} \right. \right\}. \quad (27)$$

При таких параметрах происходит наложение оснований и медиан внешних треугольников на границы зоны ответственности ПОЭС (рис. 9).

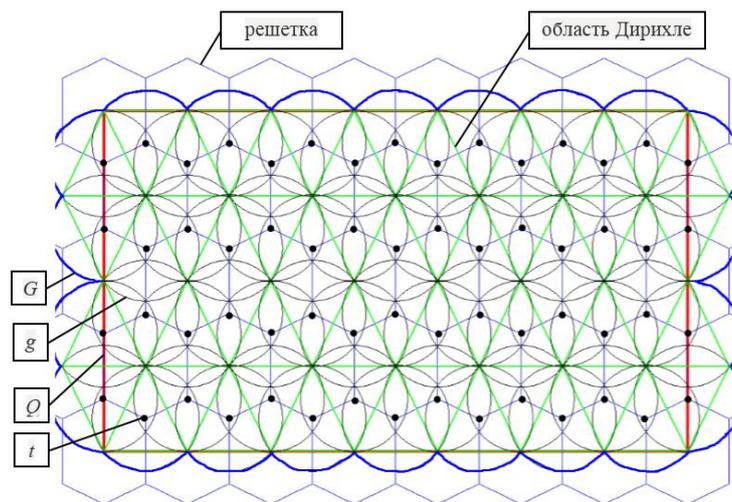


Рис. 9. Покрытие зоны ответственности ПОЭС полями зрения ФЧЭ, при фундаментальном параллелограмме решетки – шестиугольнике

Оценка качества покрытия представленных вариантов решетки производится также путем сравнения коэффициентов покрытия η . Коэффициенты покрытия вариантов решетки составили: при фундаментальном параллелограмме решетки в форме квадрата – 0.6664, при фундаментальном параллелограмме решетки в форме треугольника – 0.8479, при фундаментальном параллелограмме решетки в форме

шестиугольника – 0.7418. Можно сделать вывод о предпочтительности, при указанных исходных данных, варианта решетки, фундаментальным параллелограммом которой является треугольник.

Сравнение значений коэффициентов покрытия, полученных по двум методикам, показывает выигрыш методики с применением деформации среди преимущественных вариантов решетки в 12%.

Анализ результатов расчетов, полученных по этой методике, проведенных для различных соотношений размеров зоны ответственности ПОЭС и разного количества ФЧЭ также не выявил общего лучшего варианта решетки. Сделанный вывод указывает на востребованность такого алгоритма.

Заключение

Динамичность и сложность современной воздушной обстановки требует принятия адекватных и своевременных мер для обеспечения ее контроля. Предложенные методики и алгоритмы, реализованные в программном комплексе, позволяют не только качественно решать задачу покрытия зоны ответственности ПОЭС полями зрения ФЧЭ, но и способны обеспечить оперативность принятия решения на выбор варианта распределения и необходимого размера полей зрения ФЧЭ. Новизна заключается в способе повышения качества покрытия поверхности равновеликими фигурами за счет деформации фундаментального многоугольника решетки, определяющей структурную организацию центров областей Дирихле.

Библиографический список

1. Теодорович Н.Н., Строганова С.М., Абрамов П.С. Способы обнаружения и борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами // Наукоедение. 2017. Т. 9. № 1. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/13TVN117.pdf>
2. Годунов А.И., Шишков С.В., Юрков Н.К. Комплекс обнаружения и борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами // Надежность и качество сложных систем. 2014. № 2(6). С. 62 – 70.
3. Пархоменко А.В., Устинов Е.М., Смогунов В.В., Фандеев В.П., Шишков С.В., Илясов Ю.В., Ивасенко Д.В. Устройство разведки объектов методом анаглифов. Патент на полезную модель № 86295, 27.08.09. Федеральный институт промышленной собственности.
4. Умбиталиев А.А., Цыцулин А.К., Смирнов В.Д., Егельский И.Д. Компоновка многоканальной аппаратуры инфракрасного и миллиметрового диапазонов // Известия вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51. № 10. С. 76 – 78.
5. Бодров В.Н., Мартынов В.Н., Якушенкова Т.И., Прудников Н.В., Сигейкин Г.И. Панорамное оптико-электронное устройство кругового обзора // VII Научно-практическая конференция «Совершенствование гражданской обороны в Российской Федерации». Сборник трудов. Москва, Изд-во «Центр стратегических исследований гражданской защиты Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», 2010, С. 131–134.

6. Бодров В.Н., Прудников Н.В. Анализ и перспективы построения нового поколения круглосуточных телевизионных оптико-электронных устройств // Оборонная техника. 2004. № 7/8. С. 70 - 76.
7. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа – М.: Логос, 2004. - 444 с.
8. Булычев Ю.Г., Манин А.П. Математические аспекты определения движения летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 2000. - 256 с.
9. Тот Л.Ф. Расположения на плоскости, на сфере и в пространстве. - М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1958. - 364 с.
10. Вавилов В.В., Устинов А.В. Многоугольники на решетках. - М.: МЦНМО, 2006. - 72 с.
11. Волф У., Цисис Г. Справочник по инфракрасной технике в 4-х т. Физика ИК-излучения. - М.: Мир, 1999. Т. 1. - 606 с.
12. Ллойд Дж. Системы тепловидения. - М.: Мир. 1978. - 416 с.
13. Джемисон Дж. Э. Физика и техника инфракрасного излучения - М.: Советское радио, 1965. - 642 с.
14. McAulay A., Kadar I. Neural networks for adaptive shape tracking // Proceedings of SPIE, 1991, vol. 1408, pp. 119 - 134.
15. Chan L.A., Colberg A., Der S. et al. MIX and match for better vision // SPIE's OE Magazine, April 2002, pp. 18 - 20.
16. Weech G.N.E., Gilbert J.A., Matthys D.R. A stereoscopic system for radial metrology // Proc. of the 2001 SEM Annual Conference and Exposition, Portland, Oregon, June 4-6, 2001, pp. 199 - 202.

17. Baccheschi N.L. Generation of a combined dataset of simulated radar and EO/IR imagery // Proceedings of SPIE, 2005, vol. 5806, pp. 88 - 99.
18. Lach S.R., Brown S.D., Kerekes J.P. Semi-automated DIRSIG scene modeling from 3D LIDAR and passive imaging sources // Proceedings of SPIE, 2006, vol. 6214, available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.1024.4139&rep=rep1&type>
19. Конвей Дж., Слоэн Н. Упаковки шаров, решетки и группы. - М.: Мир, 1990. - Т. 1. - 415 с.
20. Кофман А., Анри-Лабордер А. Методы и модели исследования операций. - М: Мир, 1977. - 432 с.
21. Холл М. Комбинаторика. - М.: Мир, 1970. - 424 с.
22. Alexandrov D., Kochetov Yu. Behavior of the ant colony algorithm for the set covering problem // Operations Research Proceedings, Magdeburg, September 1-3, 1999, (Berlin, Springer, 2000), pp. 255 - 260.
23. Back Th., Schiiltz M., Khuri S. A comparative study of a penalty function, a repair heuristic, and stochastic operators with the set-covering problem // Artificial Evolution, Springer, New York, NY, USA, 1996, pp. 320 - 322.
24. Balas E., Carrera M.C. A dynamic subgradient-based branch and bound procedure for set covering // Operations Research, 1996, vol. 44, no.6, pp. 875 - 890.
25. Beasley J.E. A Lagrangian heuristic for set-covering problems // Naval Research Logistics, 1990, vol. 37, no. 1, pp. 151 - 164.
26. Bomze I.M., Budinich M., Pardalos P.M., Pelillo. M. The maximum clique problem. Handbook of Combinatorial Optimization, Supplement, 1999, Kluwer Academic Publishers, pp. 1 - 74.

27. Borndorfer R. Aspects of set packing, partitioning, and covering, Aachen, Shaker Verlag, 1998, 219 p.
28. Brauner N. Decomposition into parallel work phases with application to the sheet metal industry // In: Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Production Management (IEPM'99), Glasgow, 1999, vol. 1, pp. 389 - 396.
29. Caprara A., Toth P., Vigo D., Fischetti M. Modeling and solving the crew rostering problem // Operations research, 1998, vol. 46, no. 6, pp. 820 - 830.
30. Crescenzi P., Kann V. How to find the best approximation results — a follow-up to Garey and Johnson // ACM SIGACT News, 1998, vol. 29, no. 4, pp. 90 - 97.
31. Erdos P. On a combinatorial problem // Nordisk Matematisk Tidskrift, 1963, vol. 11, pp. 5 - 10.
32. Johnson D.S. Approximation algorithms for combinatorial problems // Journal of Computer and System Sciences, 1974, vol. 9, no. 3, pp. 256 - 278.
33. Nemhauser G.L., Trotter L.E. Vertex packings: structural properties and algorithms // Mathematical Programming, 1975, vol. 8, no. 2, pp. 232 - 248.
34. Krarup J., Pruzan P.M. The simple plant location problem: survey and synthesis // European Journal of Operational Research, 1983, vol. 12, no. 1, pp. 36 - 81.
35. Разумный Ю.Н. Введение в теорию оптимального проектирования спутниковых систем периодического обзора // Труды МАИ. 2009. № 34. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=8249>