

Глава 2

Методы расчета характеристик рассеяния объектов сложной формы

Получение радиолокационной информации о радиолокационных объектах посредством проведения натуральных и физических экспериментов связано со значительными материальными, организационными и временными затратами. Поэтому в качестве наиболее доступного способа получения информации о характеристиках рассеяния можно рассматривать метод математического моделирования. Классические асимптотические методы высокочастотной дифракции не позволяют без должных обобщений и усовершенствований рассчитывать характеристики рассеяния с учетом таких факторов, как сложность поверхности объекта, наличие различных радиопоглощающих материалов на поверхности объекта, в том числе, на изломах поверхности, наличие подстилающей поверхности, возможность разнесенного приема. В связи с этим получение характеристик рассеяния реальных воздушных и наземных объектов требует развития теории электромагнитного рассеяния и создания обобщенных методов расчета радиолокационных характеристик для объектов сложной формы с неидеально отражающей поверхностью.

В главе излагается разработанный авторами метод расчета характеристик рассеяния воздушных объектов сложной формы с неидеально отражающей поверхностью [32, 33]. Метод основан на раздельном оценивании вкладов гладкой и кромочной частей

поверхности объекта в общем рассеянное поле. При этом полное поле на гладких участках поверхности объекта вычисляется с помощью метода Кирхгофа либо его обобщения на случай наличия радиопоглощающих покрытий. Поле, рассеянное кромочными участками поверхности, рассчитывается с использованием решения модельной задачи о дифракции наклонно падающей плоской монохроматической волны на идеально проводящий клин с радиопоглощающим цилиндром на ребре. Предлагаемый метод позволяет рассчитывать ЭПР воздушного идеально проводящего объекта, полностью либо частично покрытого РПМ (рис.2.1). При этом объект может иметь нерегулярности поверхности в виде изломов, также снабженных РПП. ЭПР может быть получена как при совмещенном, так и при разнесенном приеме.

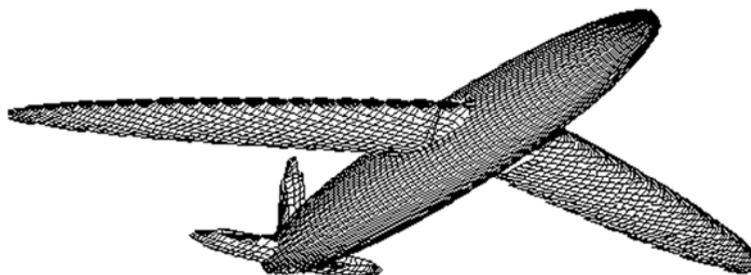


Рис.2.1. Модель воздушного объекта

Необходимо также отметить, что предлагаемый метод позволяет рассчитывать ЭПР объекта, полностью выполненного из диэлектрических либо композитных материалов.

Для наземных объектов (рис. 2.2) предлагается метод расчета, позволяющий учитывать наличие подстилающей поверхности с заданными электромагнитными характеристиками [34 – 38]. Из-за наличия границы раздела "воздух-земля" на поверхности объекта возникают две взаимно-пересекающиеся освещенные

области, первая из которых вызвана прямой волной падающей из точки облучения, а вторая – волной, отраженной от земной поверхности.

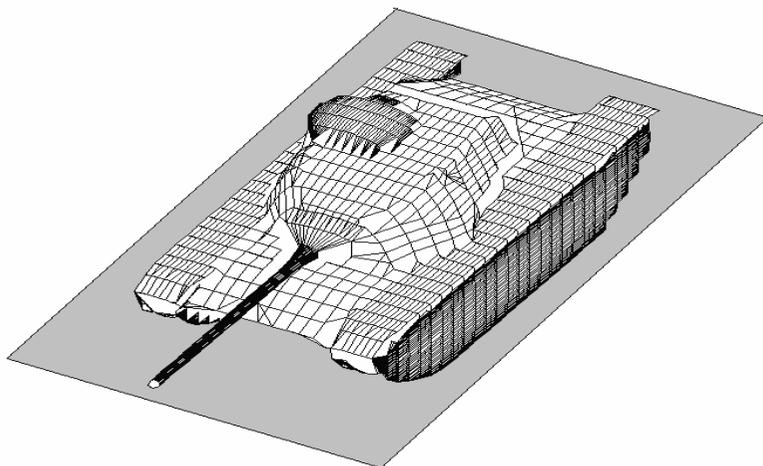


Рис. 2.2. Модель наземного объекта

Полученные интегральные представления позволяют указать на четыре главных пути распространения электромагнитных волн в описываемой системе: "передатчик-объект-приемник", "передатчик-объект-земля-приемник", "передатчик-земля-объект-приемник", "передатчик-земля-объект-земля-приемник". Для наземных объектов метод также позволяет рассчитывать характеристики рассеяния при наличии радиопоглощающих покрытий на поверхности объекта.

2.1. Моделирование геометрии поверхности объектов сложной формы

Расчет характеристик рассеяния объекта сложной формы требует математического описания его поверхности [39]. Кроме того, необходимо иметь информацию об электромагнитных характеристиках материалов, из которых изготовлен объект.

В процессе разработки и совершенствования методов расчета характеристик рассеяния, а также по мере развития вычислительных средств использовались различные методы моделирования поверхности объекта. Однако и сейчас описание поверхности объекта сложной формы требует ручного труда в больших объемах.

Основными методами моделирования поверхности объектов в настоящее время являются [40 – 44]:

1. Метод тел вращения. Применим, например, для фюзеляжей самолетов или ракет, так как их форма часто может аппроксимироваться телом вращения.

2. Метод аналитического описания поверхности. Также может применяться для тел простой формы – например тел, поверхность которых описывается уравнениями второго порядка (шар, цилиндр, эллипсоид).

3. Метод простейших компонентов. Он применим к объектам больших электрических размеров, для которых выполняется неравенство $L \gg \lambda$, где L – характерный размер объекта, λ – длина зондирующей волны. Объект разбивается на отдельные части, каждая из них представляется наиболее подходящим телом простой формы (диск, цилиндр, конус и т.д.), значения ЭПР которых хорошо известны. То есть поверхность исследуемого объекта может быть представлена совокупностью участков поверхностей тел простой формы. К недостаткам метода можно отнести высокую трудоемкость и недостаточную точность описания поверхности (в большей степени в местах стыка тел простой формы).

4. Проволочные модели. Метод, основанный на представлении поверхности в виде набора тонких проводников. Метод имеет широкое распространение при расчете характеристик рассеяния объектов в резонансной и рэлеевской областях.

5. Метод, основанный на аппроксимации поверхности объекта элементарными участками (например, треугольными или квадратными пластинами), так называемая фацетная модель.

Основными достоинствами метода являются: отсутствие ограничений на геометрию объекта; возможность детального учета фазовых соотношений при расчете радиолокационных характеристик. В настоящее время именно фацетный метод представления геометрии объекта находит наибольшее применение. К числу основных недостатков относят необходимость наличия оцифрованной поверхности исследуемого объекта, сложность и затратность алгоритмов определения освещенных и затененных участков поверхности объекта, большое количество фацет, необходимых для моделирования поверхности. Например, для модели идеально проводящего эллипсоида с размерами полуосей 1 м, 2 м, 3 м необходимое число фацет находится в диапазоне 60000-80000 для получения рассеянного поля с помощью Кирхгофского интеграла (по заданному распределению тока на поверхности) с точностью 2...4% при зондировании в сантиметровом диапазоне волн. В моделях реальных летательных аппаратов количество фацет доходит до нескольких сотен тысяч. И такой расчет требует больших затрат машинного времени.

В настоящей главе предлагается метод моделирования, учитывающий наличие изломов поверхности объекта. Изначально рассеивающие поверхности и элементы объекта разбиваются на несколько групп: гладкая часть поверхности, кромочные локальные участки рассеяния, антенная система переднего обзора под носовым диэлектрическим обтекателем (при ее наличии на исследуемом объекте). Рассмотрим моделирование указанных рассеивающих частей поверхности объектов.

Гладкая часть поверхности аппроксимируется участками трехосных эллипсоидов. Количество используемых эллипсоидов для каждого исследуемого объекта выбирается индивидуально, в зависимости от сложности поверхности объекта, требуемой степени детализации, которая определяется длиной волны зондирующего сигнала при математическом моделировании характеристик вторичного излучения объекта.

Каждый эллипсоид задается следующими параметрами (рис. 2.3):

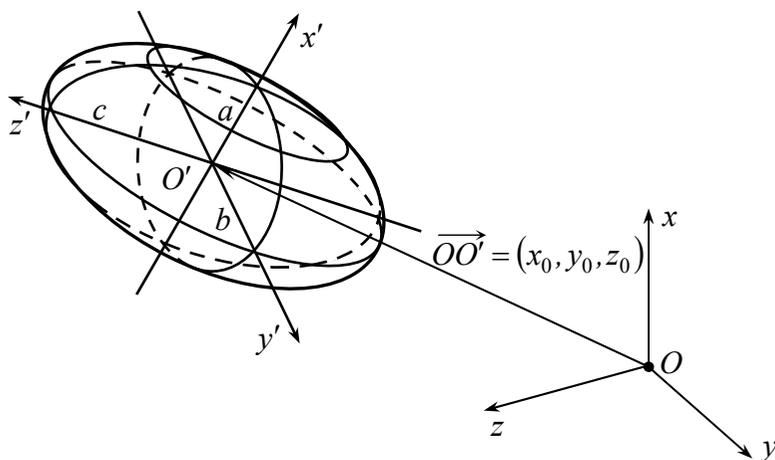


Рис. 2.3. Геометрические параметры эллипсоида

1. размеры полуосей эллипсоида a, b, c ;
2. углы поворота системы координат эллипсоида $O'x'y'z'$ относительно системы координат $Oxyz$, связанной с объектом, $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$;
3. координаты центра эллипсоида O' в системе координат $Oxyz$ x_0, y_0, z_0 ;
4. электромагнитные параметры покрытия элемента поверхности объекта, а именно: толщина покрытия δ , относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости радиопоглощающего покрытия ϵ', μ' . Если участок поверхности объекта является идеально проводящим, то толщина покрытия принимается равной нулю. В случае, если элемент объекта полностью выполнен из композитного материала, параметром эллипсоида, указывающим на данное обстоятельство, является отрицательное значение δ ;
5. участок эллипсоида, используемый при моделировании поверхности объекта, выделяется с помощью отсекающих

плоскостей. Каждая отсекающая плоскость задается координатами x_n, y_n, z_n вектора, нормального к ее поверхности, а также параметром η (рис.2.4). Значение η определяет выбор части эллипсоида при проведении отсекающей плоскости. Отсекающая плоскость делит пространство на две части. Если $\eta = 1$, то выбирается то полупространство, которому принадлежит начало координат. Если необходимо выбрать другое полупространство, то $\eta = -1$. Вместе с полупространством выбирается необходимая часть эллипсоида. Пересечение выбранных полупространств ограничивает область, в которой находится участок эллипсоида, используемый при моделировании гладкой части поверхности исследуемого объекта. Количество отсекающих плоскостей для каждого эллипсоида не ограничено.

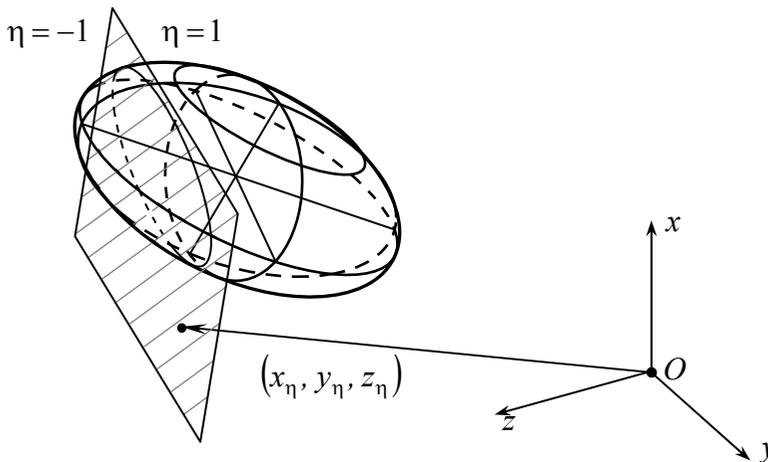


Рис. 2.4. К определению отсекающей плоскости

Использование в качестве аппроксимирующего элемента участка трехосного эллипсоида позволяет с высокой точностью моделировать широкий спектр поверхностей объекта.

Кромочные локальные участки исследуемых объектов моделируются с помощью описания линии излома поверхности. Предполагается, что линия излома поверхности – участок плоской

кривой. При этом ребро криволинейного излома аппроксимируется участком эллипса, а ребро прямолинейного излома – отрезком прямой.

Каждый прямолинейный излом поверхности задается следующими параметрами (рис. 2.5):

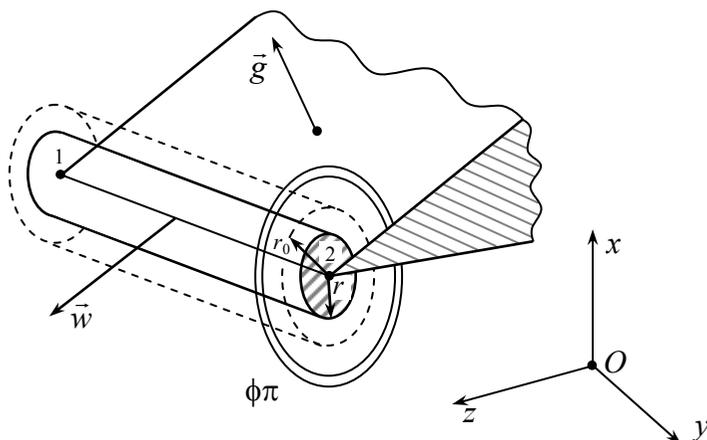


Рис. 2.5. Моделирование прямолинейного излома

1. координаты первого конца излома x_1, y_1, z_1 в системе координат $Oxyz$, связанной с объектом;
2. координаты второго конца излома x_2, y_2, z_2 ;
3. координаты единичного вектора \vec{g} , ортогонального к одной из граней излома;
4. угол $\phi\pi$ – внешний угол раствора клина, подстроенного касательным образом к излому;
5. единичный вектор \vec{w} , ортогональный вектору \vec{g} и ребру излома, и направленного в свободное пространство в сторону от излома;
6. параметры покрытия ребра излома, а именно, радиус тороидального покрытия r , относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости материала радиопоглощающего покрытия ϵ', μ' ;

7. радиус поверхности интегрирования r_0 , охватывающей ребро излома. Величина r_0 определяются так, чтобы выполнялось условие $r \leq r_0 < \lambda$ (λ – длина падающей монохроматической волны).

Каждый криволинейный излом поверхности задается следующими параметрами (рис. 2.6.):

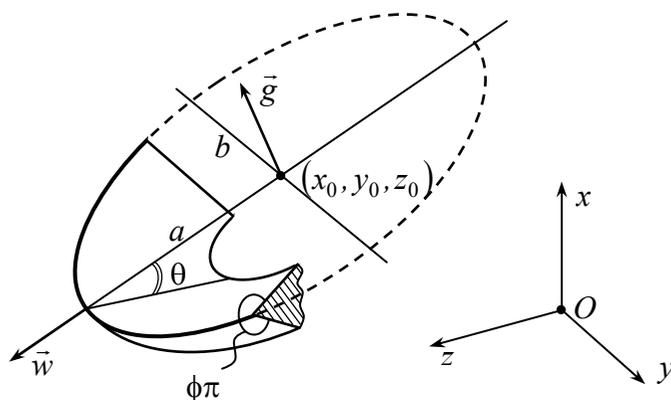


Рис. 2.6. Моделирование криволинейного излома

1. координаты центра эллипса, описывающего линию излома кромки, x_0, y_0, z_0 в системе координат $Oxyz$, связанной с объектом;
2. координаты единичного вектора \vec{g} , ортогонального к плоскости кромки;
3. полуоси аппроксимирующего эллипса a, b ;
4. единичный вектор \vec{w} , ортогональный к линии кромки и параллельный одной из полуосей эллипса (рис. 2.6);
5. угол θ между плоскостью кромки (эллипса) и внутренней гранью излома в плоскости, проходящей через векторы \vec{g} и \vec{w} ;
6. угол $\phi\pi$ – внешний угол раствора клина, подстроенного касательным образом к кромке;

7. радиус тороидального покрытия r , относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости радиопоглощающего покрытия ϵ' , μ' , а также радиус поверхности интегрирования r_0 , охватывающей ребро излома, определяемый аналогично случаю с прямолинейным изломом (рис. 2.5);

8. участок эллипса, используемый при моделировании криволинейного излома поверхности объекта, выделяется с помощью отсекающих плоскостей аналогично использованию отсекающих плоскостей при моделировании гладкой части поверхности объекта (рис. 2.4). Количество отсекающих плоскостей ограничено, однако обычно для выделения необходимого участка эллипса необходимы 1–2 плоскости.

Необходимо отметить, что наиболее важными параметрами кромочных участков являются угловые параметры и вектор \vec{g} , которые определяют ориентацию кромки по отношению к направлению прихода падающей волны. Исследование характера полей, рассеянных изломами поверхности проведено в [7]. В [28, 45] получены зависимости уровня поля, рассеянного изломом поверхности, от ракурса облучения, внешнего угла клина, радиуса и проницаемостей торообразного покрытия кромки излома.

Антенная система переднего обзора с носовым диэлектрическим обтекателем задается следующими параметрами (рис. 2.7):

1. координаты центра основания конуса обтекателя x_0 , y_0 , z_0 в системе координат $Oxuz$, связанной с объектом;
2. вектор \vec{s} , определяющий положение оси обтекателя в системе координат $Oxuz$, связанной с объектом;
3. угол полураскрыва конуса обтекателя θ ;
4. высота конуса обтекателя h и расстояние от вершины конуса до вершины зеркала антенны d ;
5. толщина стенки обтекателя δ и относительная диэлектрическая проницаемость материала обтекателя ϵ' ;

6. радиус апертуры зеркала антенны r и фокальный параметр p антенны, имеющей вид конечного (вдоль оси) параболоида вращения;

7. единичный вектор \vec{g} , направленный вдоль оси антенны и определяющий ориентацию антенны.

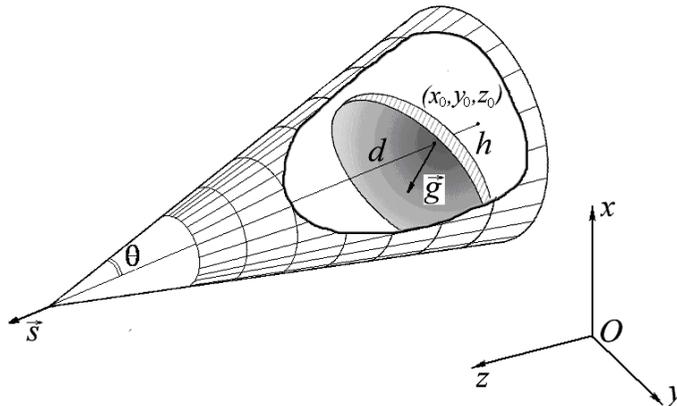


Рис. 2.7. Модель антенной системы с коническим диэлектрическим обтекателем

Описанное моделирование рассеивающих элементов поверхности объекта проводится вручную, так как автоматизация этого процесса осложнена многообразием и сложностью конфигураций объектов.

При получении характеристик рассеяния гладкая часть поверхности разбивается на треугольные facets для использования предложенного в главе метода расчета. Для определения "освещенной" части поверхности объекта использован модифицированный метод определения "освещенности", основанный на методе трассировки лучей [46]. При этом определение "освещенности" j -го facets проводится в два этапа.

1. Проводится проверка попадания j -го facets на ту часть l -го эллипсоида, которая используется при аппроксимации поверхности объекта исследования, то есть определяется находится ли данная точка на "рабочей" части эллипсоида. Также проверяет-

ся, находится ли j -й фацет на "освещенной" части l -го эллипсоида при условии, что другие эллипсоиды отсутствуют.

2. Проводится проверка на затенение j -го фацета любыми другими фрагментами объекта. Через центр j -го фацета проводится прямая M с направляющим ортом \vec{R}^0 , соединяющая фацет с точкой облучения (приема). Каждый из эллипсоидов, использованных при аппроксимации поверхности объекта, проверяется на пересечение с указанной прямой (рис. 2.8). В отличие от метода трассировки лучей [46], проверка на видимость j -го фацета проводится не с каждым фацетом на поверхности k -го "затеняющего" эллипсоида, а со всем k -м эллипсоидом. Для этого с помощью линейного преобразования k -й эллипсоид переводится в шар единичного радиуса с центром в начале координат. Если расстояние между прямой M в новом преобразованном пространстве и центром преобразованной системы координат меньше единицы, то k -й эллипсоид может затенять j -й фацет. В этом случае вычисляются координаты точек пересечения прямой M с k -м эллипсоидом. При этом полученные точки проверяются на попадание в "рабочую" часть k -го эллипсоида. Если точки пересечения находятся на "рабочей" части проверяемого эллипсоида, то принимается решение, что j -й фацет затенен и далее не учитывается при расчетах рассеянного поля. Данные действия производятся для всех эллипсоидов, с помощью которых аппроксимируется поверхность объекта. Такой подход к определению видимости участков поверхности объекта позволяет существенно сократить машинные затраты при нахождении "освещенной" части поверхности объекта по сравнению с классическим методом трассировки лучей.

Аналогичным образом проводится проверка на "освещенность" кромочных локальных участков рассеяния. При этом в качестве затеняющих элементов также рассматриваются гладкие участки поверхности объекта.

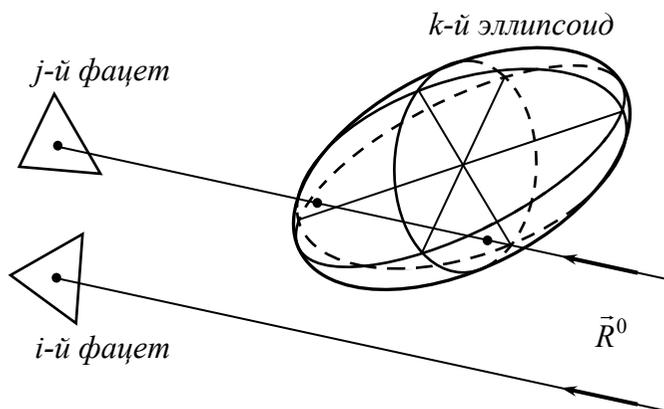


Рис. 2.8. Проверка фацет на затенение другими фрагментами поверхности объекта

При составлении математической модели изломов поверхности важно учитывать предполагаемый диапазон длины волны зондирующего сигнала. Так, для длины зондирующей волны 3 см кромка, геометрические размеры которой 0,01...0,03 м и менее, будет давать достаточно малый вклад в суммарное вторичное излучение (для танка Т-90 менее 0,1% от величины суммарного вторичного излучения). Однако, именно такие кромочные участки, геометрические размеры которых соизмеримы с длиной волны зондирующего сигнала в миллиметровом и сантиметровом диапазоне, преобладают в конструкции наземных объектов (крепления, болты, технологические люки и т.д.). Учет этих элементов в модели поверхности значительно замедляет процесс вычисления, однако существенно не увеличивает точность расчета величины рассеянного поля. Поэтому изломы поверхности и внешние элементы объекта малых геометрических размеров не учитывались при моделировании поверхности исследуемых объектов. Если же при разработке образцов вооружения и военной техники, необходимо вычислять их характеристики рассеяния с максимальной точностью, то необходимо учитывать все элементы поверхности, вносящие в общее рассеянное поле вклад, сравнимый с требуемой точностью конечных результатов.

Ошибки моделирования поверхности объектов могут вызывать существенное искажение расчетных значений вторичного излучения, проявляющиеся как в смещении максимумов диаграммы вторичного излучения, так и в изменениях амплитуд рассеянного поля. В связи с этим, проведение моделирования поверхности радиолокационного объекта требует особой тщательности.

Для проверки работоспособности используемого метода моделирования поверхности объектов сложной формы было проведено моделирование поверхностей некоторых образцов вооружения и военной техники. На рис. 2.9 приведена модель поверхности самолета МиГ-29, состоящая из 25 фрагментов поверхностей трехосных эллипсоидов, 42 кромочных участков и антенной системы под носовым диэлектрическим обтекателем. На рис. 2.10 приведена модель поверхности танка Т-90, состоящая из 96 фрагментов поверхностей трехосных эллипсоидов и 54 кромочных участков.

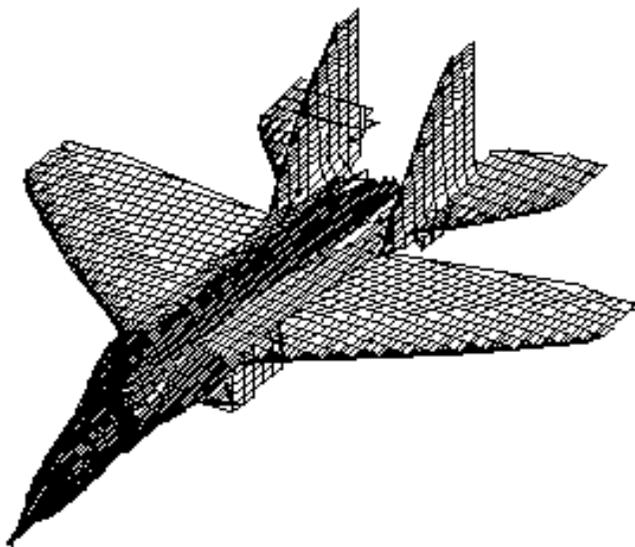


Рис. 2.9. Модель поверхности самолета МиГ-29

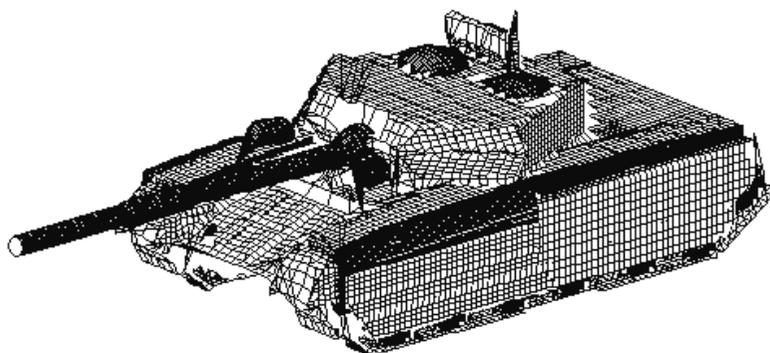


Рис. 2.10. Модель поверхности танка Т-90

Описанный в разделе метод позволяет моделировать поверхность различных радиолокационных объектов. Точность описания поверхности объекта может быть повышена за счет увеличения количества используемых при моделировании эллипсоидов и кромок. Предложенный метод сочетает преимущества метода простейших компонент при определении "освещенной" части поверхности объекта и метода фаяет при описании поверхности и дальнейшем расчете характеристик рассеяния.

2.2. Метод расчета характеристик рассеяния воздушных объектов сложной формы с неидеально отражающей поверхностью

Предлагаемый метод расчета позволяет рассчитывать характеристики рассеяния уединенного объекта с неидеально отражающей поверхностью. Поверхность объекта может либо быть гладкой, либо иметь изломы в виде острых кромок, снабженных РПМ. В частности, поверхность такого вида (совокупность гладких и кромочных областей с использованием РПП) имеют объекты, выполненные по технологии "Stealth" [47]. Таким образом, у воздушных объектов с неидеально отражающими поверхностями рассеивающими областями являются именно гладкие и кромочные участки поверхности (рис. 2.11).