**Методика моделирования**

 **тепловизионных изображений.**

 В теории и практике проектирования тепловизионных оптико-электронных систем немаловажную роль играет моделирование тепловизионных изображений. Яркость тепловизионных изображений зависит как от распределения температуры по поверхности наблюдаемого объекта, так и от коэффициента излучения и ориентации визируемых элементов его поверхности - его формы. Кроме того, качество тепловизионного изображения зависит от передаточных характеристик оптической системы и всех звеньев тепловизора.

 В основу теории моделирования тепловизионных изображений заложен процесс формирования видеосигналов, пропорционально потоку теплового излучения объекта для всего тепловизионного кадра, в котором содержится L строк и N элементов в строке. Величина видеосигнала U( N, L ) элемента разложения кадра описывается выражением:

 

U ( N, L ) = ( 1/ cosN,L)dS(N,L)SW(,T,y,z)a(d**( 1 );**



 где - передний апертурный угол оптической системы тепловизора;

 - угол между нормалью к элементу dS( N,L ) поверхности объекта и направлением наблюдения;

 W(,T,y,z) - спектральная светимость элемента dS(N,L) поверхности объекта, имеющего абсолютную температуру T;

 - индикатриса спектрального коэффициента излучения поверхности объекта;

 S - абсолютная спектральная чувствительность приёмника излучения тепловизора;

 ,- границы спектральной чувствительности приемника излучения;

 ,a- спектральный коэффициент пропускания оптической системы и слоя атмосферы;

 y,z - координаты элемента dS(N,L) поверхности объекта в пространстве предметов [ 2 ] .

 Для анализа влияния на качество изображения передаточных характеристик оптической системы тепловизора, приёмника излучения, электронного блока обработки информации и видеоконтрольного устройства (ВКУ) используется распределение освещённости E(y’, z’), которое определяется по формуле:

****jy’+z’

E(y’, z’)=’L(,h0(,hп,hэ,hв,e dd**2**

 **-00**

 где ’ - задний апертурный угол оптической системы тепловизора с интегральным коэффициентом пропускания ;

 h0(,,hп,,hэ,,hв,- модуль передаточной характеристики соответственно оптической системы, приёмника излучения, электронного блока обработки информации и ВКУ тепловизора;

 y’, z’ - координаты элемента dS поверхности объекта в пространстве изображений;

 L(, - пространственно-частотный спектр яркости поверхности объекта;

 (, - пространственные частоты, приведённые к плоскости изображений.

 Тепловизионные методы в настоящее время широко используются в задачах распознавания и идентификации объектов. Но следует отметить, что пользуясь только обычными тепловизионными изображениями, величина видеосигналов в которых определяется выражением ( 1 ), распознать объекты внутри их контура практически невозможно. В чём причина потери информации о форме объекта внутри контура в обычных тепловизионных изображениях? Чтобы это выяснить рассмотрим рис.1. Согласно этому рисунку, справедливо равенство:

 dS1  cos 1 = dS 2  cos 2 = dS3  cos 3 **( 3 )**

 Анализируя рис.1 и эту связь, можно сделать вывод, что именно здесь и происходит потеря информации о форме объекта внутри контура. Сопряжённость всех элементов dS’ и dS, соответственно, приводит к тому, что площадки, расположенные под меньшими углами(0, cos1), должны иметь меньшие размеры dS, чтобы равняться тем площадкам, которые расположены под большими углами(900, cos0).

 В связи с этим становится ясной необходимость использования таких информационных оптических характеристик теплового излучения объектов, которые исключали бы пропорциональную связь параметров dS и cos. К таким величинам относятся поляризационные свойства теплового излучения поверхности объектов. По этой причине и представляют интерес задачи моделирования и обработки поляризационных тепловизионных изображений.

 2.**Теория и методы моделирования поляризационных**

 **тепловизионных изображений объектов.**

 2.1.Теория моделирования поляризационных тепловизионных

 изображений на основе вектор-параметра Стокса теплового

 излучения.

Для подробного описания теории моделирования поляризационных тепловизионных изображений рассмотрим объект произвольной формы, который в декартовой системе координат описывается уравнением:

 f(x,y,z) = 0.

 Допустим, что этот объект ( рис.2 ) наблюдается из точки Н, где расположен чувствительный элемент тепловизионной системы. Выбираем на поверхности этого объекта элемент dS, который соответствует одному элементу разложения кадра. Наклон площадки dS по отношению к элементу приёмника определяется

углом  между нормалью и направлением наблюдения rн. Тогда векторы **n** и **r**н  определяют плоскость наблюдения. Коэффициент излучения рассматриваемого объекта имеет две составляющие: параллельную , которая лежит в плоскости наблюдения ( **n\*rн** ), и перпендикулярную  , которая перпендикулярна плоскости наблюдения. Положение элемента dS определяется в декартовой системе координат радиус-вектором **R** , а в сферической системе координат углами  и .

 Один из методов анализа поляризации пучка света - это метод вектор-параметра Стокса [ 3 ], характеризующий все виды и формы поляризации излучения поверхности объекта, который для нашего случая собственного излучения элементов dS(N, L) имеет вид:

  U0 ( N, L) + U90 ( N, L) 

 Ui( N, L ) =   U0 ( N, L) - U90 ( N, L) , ( **4 )**

  U45 ( N, L) - U135 ( N, L) 

  0  

 где i = 1, 2, 3, 4;

 U0, U45, U90, U135  - величины сигналов, поляризованные, соответственно, под углами 00, 450, 900, 1350 относительно плоскости референции ( плоскости отсчёта ).

 Степень поляризации теплового изображения зависит от величины видеосигналов поляризационных составляющих тепловизионных изображений элементов поверхности объекта с азимута поляризации соответственно равны 00, 450, 900, 1350. Величины видеосигналов U0, U90 в соответствии с тем, что коэффициент излучения можно представить в виде параллельной и перпендикулярной составляющих, запишем в виде:

 U0 (N, L) = A (N, L)  (**n \* j**)2 + **j**)2 ],  **( 5 )**

 U90 (N, L) = A (N, L)  (**n \* k**)2 + **k**)2 ]. **( 6 )**

где 2

A ( N, L ) = ( 1/ cosN,L)dS(N,L)SW(,T,y,z)a(d

1

 Тогда, например, зависимость степени поляризации теплового изображения, с азимутом tn=0, от величины видеосигналов двух поляризационных тепловизионных изображений элементов поверхности объекта, с азимутами поляризации 00, 900, можно представить в виде:

 P’ (N, L) = [ U0 (N, L) - U90(N, L)] / [U0 (N, L)+U90(N, L)], **( 7 )**

 где

 P’ (N, L) - степень поляризации изображений с азимутом tn=0.

 Если пронумеровать вектор-параметр Стокса, то формула (4) примет вид:

  1 

 U1(N, L) = U(N, L)  P(N, L) cos2t(N, L)  **( 8 )**

   P(N, L) sin2t(N, L) 

  0 

 где P(N, L) - степень поляризации излучения элемента dS(N, L) объекта;

 t(N, L) - азимут поляризации излучения элемента dS(N, L).

 На основе выражений (7) и (8) получим:

 P’(N, L) = P(N, L) cos2 t(N, L). **( 9 )**

 Подставив формулы (5) и (6) в выражение (7), получим следующее выражение для степени поляризации P’(N, L):

 [(**n\*j**)2 - (**n\*k**)2] +[(******\*j**)2 - (******\*k**)2]

P’(N, L) = **------------------------------------------------------------------ , ( 10 )**

[(**n\*j**)2 + (**n\*k**)2] +[(******\*j**)2 + (******\*k**)2]

 где **j , k**  - единичные орты координатных осей OY и OZ;

****,**-** единичные векторы, соответственно, параллельной и перпендикулярной компонент коэффициента излучения элемента dS.

 Преобразуем выражение (10) в виде:

][(**n\*j**)2 - (**n\*k**)2] +[(******\*j**)2 - (******\*k**)2]

P’(N, L) = **------------------------------------------------------------------ , ( 11 )**

][(**n\*j**)2 + (**n\*k**)2] +[(******\*j**)2 + (******\*k**)2]

 Принимая во внимание выражение:

 P() =[] / [] ,

получим связь величин и  со степенью поляризации P():

 = [1+ P()] / [1- P()]. **( 12 )**

 Анализируя данные исследований степени поляризации различных материалов, индикатрису P() можно представить в виде зависимости:

 P() = a (1- cos

где а - параметр, зависящий от типа и шероховатости материала.

 Принимая во внимание, что косинус угла  между нормалью к элементу dS и единичным вектором наблюдения **rн**  определяется как скалярное произведение этих векторов, получим:

 P() = [ 1-(**n\*rн**) ]  a .  **( 13 )**

 Подставив это выражение в формулу (12) получим:

 1+ [ 1 (**n\*rн**)] a

 **--------- = ------------------------- . ( 14 )**

1 - [ 1 (**n\*rн**)] a

 Тогда, с учётом соотношения (12), из формулы (11) получим основное уравнение, выражающее зависимость между степенью поляризации P’(N, L) и формой объекта через функцию распределения нормали **n** для каждого элемента поверхности объекта:

 1+ [ 1 (**n\*rн**)] a

 **------------------------** [(**n\*j**)2 - (**n\*k**)2] +[(******\*j**)2 - (******\*k**)2]

 1 [ 1 (**n\*rн**)] a

 P’(N, L) = **---------------------------------------------------------------------- . ( 15 )**

 1+ [ 1 (**n\*rн**)] a

 **-------------------------** [(**n\*j**)2 - (**n\*k**)2] +[(******\*j**)2 + (******\*k**)2]

 1 [1 (**n\*rн**)] a

С помощью этой формулы можно определить степень поляризации всех элементов наблюдаемой тепловизором части поверхности объекта любой формы. Для этого нужно знать направление нормали **n** для каждого элемента поверхности в зависимости от его положения в декартовой системе координат. Оно определяется как оператор Гамильтона ( набла-оператор ) от функции f(x,y,z) = 0, описывающий форму объекта:

 [( df/dx )  **i** + ( df/dy )  **j** + ( df/dz ) **k** ]

 **n** = **----------------------------------------------------** . **( 16 )**

 [( df/dx )2+ ( df/dy )2 + ( df/dz )2] 1/2

 Единичный вектор наблюдения **rн** определяется как разница векторов **l** и **R** по формуле:

 **rн** = ( **l** - **R ) / |** ( **l** - **R** ) **|**,********

где **l** - вектор, определяющий положение декартовой системы координат по отношению к точке наблюдения H;

 **R** - радиус-вектор элемента dS поверхности объекта, определяющий его положение в декартовой системе координат x, y, z с единичными ортами **i, j, k.**

 Радиус-вектор задаётся **R** формулой :

 **R =** x  **i** + y  **j +** z  **k . ( 18 )**

 Если направление наблюдения центра декартовой системы координат выбрано вдоль оси х, то есть направление вектора **l** и оси х совпадают, то вектор **l** выразится в виде:

 **l** = l **i , ( 19 )**

где l - расстояние от центра декартовой системы координат О до точки наблюдения Н;

 **i** - единичный орт оси ОХ .

 В этом случае выражение (17) примет вид:

**rн =** [( l-x)**i** + y **j +**z **k** ] / [( l-x)2+ y2 **+** z2]1/2 **. ( 20 )**

 Вектор перпендикулярной составляющей коэффициента излучения **** перпендикулярен плоскости, определяемой векторами **n** и **rн** ( плоскости наблюдения ), и находится как векторное произведение этих векторов по формуле:

 ******= [ n\* rн ] / | [ n\* rн ] |**. **( 21 )**

 Таким образом, определив степень поляризации P’ от всех элементов видимой части объекта, можно построить оптико-математическую модель поляризационных тепловизионных изображений объектов любой формы.

 2.1. Теория моделирования поляризационных тепловизионных

 изображений на основе степени и азимута поляризации

 теплового изображения.

 Для описания этого метода воспользуемся рис. 3.

 Допустим, что азимут поляризации излучения элемента dS поверхности объекта составляет угол t с поверхностью референции.

 Для определения степени поляризации P’ необходимо найти величины видеосигналов U0 и U90 поляризационных тепловизионных изображений элементов dS поверхности объекта при азимутах поляризатора t=00 и t=900. Выразим U0 и U90 через параллельную и перпендикулярную составляющие коэффициента излучения элемента dS и азимут t поляризации этого элемента, который представляет собой угол между плоскостью поляризации ( ось ОА ) и плоскостью референции ( ось OY ). В общем случае, когда азимут t поляризации излучения элемента dS не совпадает с азимутом поляризатора, обе компоненты коэффициента излучения дают вклады в величины видеосигналов U0 и U90 следующим образом:

U0(N, L) = Umax  cos2 t + Umin  sin2 t = A(N, L)(  cos2 t + sin2 t) ; **( 22 )**

U90(N, L) = Umax  sin2 t + Umin  cos2 t = A(N, L)(  sin2 t + cos2t) ; **( 23 )**

где Umax= A(N, L)  , Umin= A(N, L) .

 Согласно формуле (6) найдем степень поляризации P’(N, L) излучения элемента dS объекта в виде:

 P’(N, L) = [] / [] cos(2 t) = P  cos(2 t) , **( 24 )**

где P = [] / [] - распределение степени поляризации излучения элементов dS объекта.

 Так как cos **( n\* rн ),** то с учётом формулы (12) имеем:

 P’(N, L) = [ 1- **( n\* rн )** ]а cos(2 t); **( 25 )**

 В связи с тем, что вдоль оси ОА расположен вектор **n**yz , являющийся проекцией вектора **n** на плоскость xyz, то справедливо выражение:

 cos t = ( **n**yz\***j** ) ,  **( 26 )**

тогда, приняв во внимание тождество

 cos(2 t) = 2 cos2t - 1,

выражение (25) для расчёта степени поляризации всех элементов поверхности объекта примет вид:

 P’(N, L) = а[ 1- **( n\* rн )** ][ 2 ( **n**yz\***j** )2 -1 ]. **( 27 )**

 Таким образом, формулы (15) и (27) с учётом формул (16) - (21) являются оптико-математической моделью поляризационных тепловизионных изображений излучающих объектов [5,6]. В тех случаях, когда необходимо моделировать поляризационные тепловизионные изображения по распределению степени поляризации, можно воспользоваться выражением:

 P(N, L) = а[ 1- **( n\* rн )** ]. **( 28 )**

2.3. Формулы для моделирования изображения

 диска, сферы и эллипсоида.

 Для подтверждения теории моделирования поляризационных тепловизионных изображений рассмотрим объекты в виде сферы, эллипсоида и диска. Как уже отмечалось раньше, традиционный тепловизионный метод при наблюдении этих объектов сверху даёт одинаковое изображение как по контуру, так и внутри контура, несмотря на явное различие формы этих объектов внутри контура изображения видимой части их поверхности. Для подробного вывода остановимся на сфере, как наиболее наглядном и симметричном объекта ( рис. 4).

 Уравнение сферы в декартовых координатах имеет вид:

 f(x,y,z) =x2+ y2+ z2- R2= 0. **( 29 )**

Тогда **n** = (x  **i** + y  **j** + z  **k** ) /R - вектор нормали сферы,

где R = (x2+ y2+ z2)1/2 - радиус сферы.

 Вектор наблюдения **r**н можно определить из формулы (17):

 **r**н = [( l-x) **i** - y **j -** z **k** ] / [R2+ l2 **+** 2 l  x]1/2 **. ( 30 )**

Тогда по правилам векторного умножения:

**** = [ **n\* rн** ] = ( ny  rнz - nz  rнy) **i +**( nz  rнx - nx  rнz) **j +**( nx  rнy - ny  rнx) **k ;**

в нормированном виде:

 **\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**

**** = ( lz  **i** - ly  **j** ) / (R R2+ l2 - 2  l  x ),  **( 32 )**

 Теперь определим все остальные недостающие выражения для формулы (15):

 **\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**

 **( n\* rн  ) = (**x  l -R2)/ (R R2+ l2 - 2  l  x ), **( 33 )**

 **( n\* j)2 =** y2 / R2 ; **( 34 )**

 **( n\* k)2 =** z2 / R2 ; **( 35 )**

 **( ****\* j)2 =** l2  z2/ (R2 R2+ l2 - 2  l  x ); **( 36 )**

 **( ****\* k)2 =** l2  z2/ (R2 R2+ l2 - 2  l  x ); **( 37 )**

 После подстановки формул (30) - (37) в выражение (15), получим:

 l  x - R2

2 - **---------------------------------**

 R2 R2+ l2 - 2  l  x )1/2  y2- z2   l2  z2 - l2  y2  

 **-----------------------------------------**  **---------  +**  **---------------------------** 

 l  x - R2 R2 R2 R2+ l2 - 2  l  x )

 **---------------------------------**

 R2 R2+ l2 - 2  l  x )1/2

P’ (N, L) = **----------------------------------------------------------------------------------------------** .

 l  x - R2

2 - **---------------------------------**

 R2 R2+ l2 - 2  l  x )1/2   y2+ z2   l2  z2 + l2  y2  

 **-----------------------------------------**  **---------  -**  **---------------------------**

 l  x - R2 R2 R2 R2+ l2 - 2  l  x)

 **---------------------------------**

 R2 R2+ l2 - 2  l  x )1/2

 После упрощения это выражение принимает вид:

 P’(N, L) = [( y2 - z2 ) / ( y2 + z2 )] ( 1 - x/R ).  **( 38 )**

 Это есть степень поляризации теплового изображения сферы в декартовых координатах.

 Перейдем к сферическим координатам:

 X = R sin cos ;

 Y = R sin cos ;

 Z = R  cos .

 Тогда выражение (38) принимает вид:

 sin2 sin2 - cos2

P’(N, L) = **---------------------------** ( 1 - sin  cos) .  **( 39 )**

 sin2  sin2 cos2

 Это и есть степень поляризации теплового изображения сферы в сферических координатах.

 Аналогично можно получить формулы для эллипсоида. Для этого необходимо начать вывод с функции:

 f(x,y,z) =x2 / b2+ y2 / a2+ z2 / c2- 1= 0. **( 40 )**

 С учётом обозначения K = b/a - коэффициента сжатия эллипсоида ( b - большая полуось эллипсоида, a - малая ), получим формулу для степени поляризации в декартовых координатах:

 **\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**

 P’(N, L) = [( y2 - z2) / ( y2 + z2)] [ 1 - ( x /  x2 + k2 y2 + k2 z2)] . **( 41 )**

 C учётом сферических координат для эллипсоида:

 X = b sin cos ;

 Y = a sin cos ;

 Z = a  cos .

степень поляризации принимает вид:

 sin2 sin2 - cos2  sin  cos

P’(N, L) = **--------------------------** 1- **------------------------------------------------------** **(42)**

 sin2  sin2 cos2sin2  cos 2 k2 sin2  sin2 cos 2

 Что касается диска, то для него используется формула ( 42 ), с учётом, что коэффициент сжатия k := 0.1, т.е. эллипсоид сжатый до состояния диска, когда большая полуось составляет всего лишь 10-ю часть от малой полуоси; для сферы формула ( 42 ) справедлива при k = 1. Таким образом, для получения модели поляризационного тепловизионного изображения диска, сферы и эллипсоида можно пользоваться формулой ( 42 ) с использованием различных значений k. При этом необходима связь углов  и  с номерами строк L и номерами элементов в строках N тепловизионного кадра. На основе геометрии наблюдения и логических рассуждений были получены следующие связи:

 = L L0 ;  **( 43 )**

 = ( N  / N02 ; **( 44 )**

где L0 - число всех строк в кадре;

 N0 - число элементов в каждой строке.

 2.4. Формула моделирования изображений конуса.

 Вывод формулы моделирования изображений конуса аналогичен выводу формулы для тел типа эллипсоида, но для разнообразия расположим конус по другой оси координат - вдоль оси OZ ( рис. 5).

 В декартовой системе координат уравнение конуса имеет вид:

 f(x,y,z) = x2 / a2+ y2 / a2 - z2 / c2 = 0. **( 45 )**

где а - радиус основания конуса;

 с - высота конуса.

 Вектор нормали **n** в соответствии с формулой (16), имеет вид:

 [(-2z/c2)**k**+ (2x/a2)**i**+ (2y/a2)**j** ]

 **n = -------------------------------------------------** . **( 46 )**

2 x / a2 )2+2 y / a2 )2+2 z / c2 )2

 В свою очередь вектор наблюдения для конуса данного расположения в декартовой системе координат имеет вид:

 .

**r**н = - xн  **i** - yн  **j** - ( l - zн ) **k /** x2н + y2н + ( 1 - z2н) ,  **( 47 )**

Если конус наблюдается из бесконечности, то упрощение в формулах можно произвести в процессе вывода, а не в окончательном виде, как в случае эллипсоида. Так, при l стремящемся в бесконечность, **r**н = - **k.**

 Тогда произведение **( n\* rн)** принимает вид:

 .

**( n\* rн )** = (2z/c2) / 2 x / a2 )2+2 y / a2 )2+2 z / c2 )2  **( 48 )**

принимая во внимание то, что коэффициент сжатия конуса k = c / a, тогда

  .

**( n\* rн )** = z /  x2  + y2 ) k4+z2 . **( 49 )**

 Если применить способ формирования изображения на основе степени и азимута поляризации, то необходимо для конечной формулы пользоваться формулой ( 27 ), которая для случая наблюдения объекта вдоль оси OZ примет вид:

 P(N, L) = [ 1 - **( n** **rн )**] [ 2 ( **n**xy **i** )2 - 1 ]. **( 50 )**

в этом случае

 .

 **n**xy = (x **i** + y **j**) /  x2 + y2 ; **( 51 )**

 .

 ( **n**xy **i** ) = x /  x2 + y2 ;  **( 52 )**

Соединив формулы ( 49 ) - ( 51 )**,** получим степень поляризации в виде:

  .

 P’(N, L) = [ 1 - z /  x2  + y2 ) k4+z2  ] [ 2  x2 / (x2 + y2) - 1 ] .  **( 53 )**

Для удобства вывода выражения для P’(N, L) в сферической системе координат, воспользуемся переводом компонент в другую систему координат:

 X = sin cos ;

 Y = sin cos ;  **( 54 )**

 Z = cos .

 .

 **( n\* rн )** = 1 /  1 + k4 tg2

 Поскольку угол для конуса является постоянным и равным отношению радиуса основания к высоте, то справедливо выражение:

 tg = a / c.  **( 55 )**

Подставив формулу ( 55 ) в выражения ( 54 ), получим :

 .

 **( n\* rн )** =1 /  1 + k2,  **( 56 )**

 ( **n**xy **i** ) = cos.  **( 57 )**

 Тогда

 .

 P’(N, L) = [ 1 - 1 /  1 + k2 ] cos.  **( 58 )**

 Таким образом, формула ( 58 ) является оптико-математической моделью поляризационного тепловизионного изображения конуса. При этом угол  связан с номером строки L и с номером элемента строки N кадра зависимостью:

 = arctg[( L - L0 ) / ( N - N0 )]. **( 59 )**

 Эта формула получена на основе геометрии перевода объёмного изображения на плоский кадр и логических рассуждений.

 2.5. Анализ результатов исследования поляризационных

 тепловизионных изображений объектов простой формой.

 Практической целью моделирования поляризационных тепловизионных изображений объектов является распознование их формы внутри контура. Если проанализировать полученные модели изображений эллипсоидов с различными значениями коэффициента сжатия k, то можно заметить по поверхности сферы равномерное распределение степени поляризации Р’ от 0 до 1 вдоль горизонтальной линии от центра к краю и от 0 до -1 вдоль вертикальной линии от центра к краю.

 По мере вытягивания эллипсоида ( к >1 ) область небольших по модулю значений степени поляризации | P’ | < 0.09 снижается , при этом область значений 1< | P’ | < 0.09 расширяется. При сжатии эллипсоида наблюдается обратная картина. Так для диска почти по всей поверхности значения P’ близки к нулю и только область, близкая к краю, занята значениями | P’ |, близкими к 1.

 Поляризационные тепловизионные изображения конуса также дают возможность интерпретации его формы внутри конуса. Распределение степени поляризации в модели диска, полученное по формулам для сильно сжатого конуса аналогично распределению в модели, полученной по формулам для сильно сжатого эллипсоида. Однако модель самого конуса имеет очевидное отличие от объектов в виде эллипсоида по распределению степени поляризации. Здесь наблюдаются одинаковые значения степени поляризации вдоль выбранного диаметра. Причём, чем более вытянут конус, тем больше в модели изображения области с | P’| близкими к 1 и наоборот.

 Таким образом, приведённый анализ поляризации тепловизионных изображений объектов показал, что имеется существенная зависимость формы объектов внутри их контура от значений степени поляризации P’ по наблюдаемым участкам поверхности объектов.

 2.6. Модифицированный метод моделирования

 поляризационных тепловизионных изображений.

 В приведённых выше математических выкладках для вывода основных формул моделирования поляризационных тепловизионных изображений использовались поляризационные свойства собственного излучения объекта. Эти свойства обычной тепловизионной обработкой выделить невозможно, поэтому необходимы дополнительные технические средства в качестве анализатора поляризационного излучения. Таким анализатором может служить поляризационный фильтр, азимут поляризации которого будет изменяться от 00 до 3600 . Формировать оптико-математическую модель изображения тепловизионной системы с поляризационным фильтром можно модифицированным методом моделирования не основе вектор-параметра Стокса и влияния на излучение от объекта поляризационного фильтра. Причём исходным выражением для видеосигнала будем считать:

 

 ( N, L ) = ( 1/ cosN,L)dS(N,L)SW(,T,y,z)a(d**( 60 );**



 Вектор-параметр Стокса, описанный в разделе 2.1 формулой ( 4 ), в нормированном виде выглядит следующим образом:

   1  

Uj (N, L) = U0 | P cos 2 t  | **( 61 );**

  | P sin 2 t|

   0 

где U0 - суммарный видеосигнал при азимутах поляризации излучения t=00 и t=900. U0 = U0 + U90;

 P - степень поляризации излучения;

 t - азимут поляризации излучения.

 Вектор-параметр Стокса для яркости излучения объекта в таком случае будет следующим:

 1 

Uj (N, L) = [ W(,T,y,z) / ]  | P cos 2 t| , **( 62 )**

  | P sin 2 t  |

  0 

 В свою очередь, влияние поляризационного фильтра на излучение от объекта описывается матрицей Мюллера:

1 cos 2sin20 

 ij = п  | cos 2 cos2 2 sin2 cos20  | , **( 63 )**

 | sin 2 cos 2 sin 2 sin220 |

   00 0 0

где п - энергетический коэффициент пропускания фильтра;

  - азимут поляризации фильтра, отсчитываемой относительно плоскости референции.

 Тогда при положении поляризационного фильтра с азимутами

  = 00 и  = 450, матрицы ij будут иметь вид:

1 1 0 0 

 ij(0) = п | 1 1 0 0  | ; **( 64 )**

 | 0 0 00  |

  00 0 0

1 0 1 0 

 ij(45) =п | 0 0 0 0  | ; **( 65 )**

 | 1 0 10  |

  00 0 0

 Вектор-параметр Стокса для энергетической яркости излучения, прошедшего произвольный поляризационный фильтр, можно записать:

 4

 Li(,T,P) = ij  Lj(,T,P).  **( 66 )**

 j =1

 Сигнал на выходе приёмника излучения запишется в виде:

2

 U1 = c( Li(,T,P)  d,  **( 67 )**

1

где c( =  cos  dS  S 0 a

 Тогда, вектор-параметры Стокса для яркости излучения, прошедшего поляризационный фильтр при азимутах поляризации =00 и =450, будут следующие:

   1 + P cos 2 t

 Li(0)  = п  W(,T,y,z) / ]  | 1 + P cos 2 t  | , **( 68 )**

 **|** 0 |

0

   1 + P sin 2 t

 Li(45)  = п  W(,T,y,z) / ] | 0| , **( 69 )**

 **|** 1 + P sin 2 t|

0

 Как известно, первая строка вектор-параметра Стокса характеризует энергетические характеристики излучения, поэтому выражение для сигналов приёмника при двух положениях поляризационного фильтра можно записать в виде:



 U1 =п(1+Pcos2t)[(1/ cosdS ]Sa(W(,T,y,z)d



 **( 70 ).**



 U2 =п(1+Psin2t)[(1/ cosdS ]Sa(W(,T,y,z)d



 Если обозначить одинаковые множители U1 и U2 в виде:



 B( T )=п[(1/ cosdS ]Sa(W(,T,y,z)d



то формулы ( 70 ) примут вид:

 U1 =B( T )( 1 + P cos2t )

 **( 71 )**

 U2 =B( T )( 1 + P sin2t ).

 Упростим формулы ( 71 ), пронормировав их B( T ):

 U1н = 1 + P cos2t ;

  **( 72 )**

 U2н = 1 + P sin2t .

 Если эти выражения записать соответственно обозначениям, принятым в разделах 2.1 и 2.2 для каждого элемента разложения кадра, то получим:

 U1н(N, L) = 1 + P(N, L) cos2t ;

  **( 73 )**

 U2н(N, L) = 1 + P(N, L) sin2t .

 Как уже отмечалось, для формирования модели изображения очень важной является задача преобразования объёмного объекта в плоский кадр. В разделах 2.3 и 2.4 это преобразование проведено через координаты и  сферической системы координат, связанные с элементами разложения кадра по строкам L и элементами в строках N на основе геометрических и логических связей.

 Для модифицированной модели можно использовать в качестве системы преобразования объёмного объекта в плоский кадр декартову систему координат.

 Пусть тепловизионная система с поляризационной насадкой строит кадр с изображением объекта, которому соответствует в плоскости объекта поле зрения с размерами по вертикали - ( zk -zн), а по горизонтали - ( yk - yн ), где zk, zн, yk, yн - конечные и начальные координаты поля зрения в системе координат объекта

( рис.6 ). Причём, расположение по вертикали вдоль оси OZ и по горизонтали вдоль оси OX, что соответствует геометрии наблюдения объекта по рисунку 6. Здесь показан общий принцип системы построения кадра. Более конкретное преобразование объекта в кадр будет представлено для каждого объекта конкретно.

 2.7. Оптико-математическая модель поляризационных

 изображений с учётом эллиптичности поляризации

 теплового излучения.

 Все выводы, приведённые выше, представлены для частично линейно-поляризованного излучения. В случае эллиптично-поляризованного излучения окончательные формулы будут иметь иной вид.

 Если обозначить эллиптичность через, то для линейно-поляризованного излучения =0, а для эллиптично-поляризованного имеет значения, которые отличны от нуля. Поэтому вектор-параметр Стокса для эллиптично-поляризованного излучения в нормированном виде представляются как:

  1 

 U(N, L) = U0 | P(N, L) cos2tcos2 | .  **( 74 )**

   | P(N, L) sin2tcos2 |

   P(N, L) sin2

 После вывода, аналогичного случаю линейно-поляризованного излучения можно получить выражения для нормированных видеосигналов U1н и U2н для эллиптично-поляризованного излучения:

 U1н = 1 + P cos2cos2t ;

 U2н = 1 + P cos2sin2t .  **( 75 )**

 Таким образом, на основании формул ( 75 ) и ( 16 ) - ( 19 ) можно формировать оптико-математические модели поляризационных тепловизионных изображений объектов с учётом эллиптичности поляризации излучения.

 2.8. Модифицированная формула моделирования

 изображения диска, сферы и эллипсоида.

 Модифицированная модель изображения предполагает иное, чем в разделе 2.3 преобразование объёмного тела, наблюдаемого тепловизионной системой, в плоский кадр с изображением этого объекта, поэтому для пояснения процесса преобразования воспользуемся рис.6. Из данного рисунка видно, что ( z0, y0 ) - это координаты центра объекта и кадра, R - радиус самой сферы, а rt - радиус-вектор плоского кадра, связывающий координаты вертикали Z и координаты горизонтали Y с центром элемента разложения кадра. Из геометрических связей можно определить rt  :

 .

 rt = ( y-y0)2 + ( z-z0)2 .  **( 76 )**

 Элементу разложения кадра dS’ с координатами ( y, z ) будет соответствовать элементарная площадка поверхности сферы с координатой Х. Поскольку уравнение сферы в декартовой системе координат, с геометрией наблюдения, аналогичной рис. 7, имеет вид:

 x2  ( y-y0)2 ( z-z0)2

f( x, y, z ) = **----** + **---------** + **---------** = 1,  **( 77 )**

  R2 R2 R2

то координата Х элементарной площадки dS определяется по формуле:

 .

 x = R2-( y-y0)2 + ( z-z0)2 . **( 78 )**

 Подстановкой формулы ( 76 ) в выражение ( 78 ) преобразуем выражение для Х:

  .

 x = R2  - rt2 . **( 79 )**

Далее для определения степени и степени поляризации воспользуемся формулами ( 16 ) - ( 19 ) применительно к конкретному объекту:

 df df df 2  x 2 (y-y0) 2 (z-z0)

**n** = **-----** **i** + **-----**  **j** + **------**  **k** = **-------**  **i** + **-----------**  **j** + **-----------** **k** **; ( 80 )**

dx dy dz R2 R2 R2

 2 (y-y0) 2 (z-z0)

**n**yz = **-----------**  **j** + **-----------** **k** **; ( 81 )**

R2 R2

(y-y0)   y-y0

t = arccos | **-------------------**| = arccos **------------ ; ( 82 )**

   (y-y0) + (z-z0) rt

 **( n\* rн )**  .

cos= **--------------**  = x /  x2 + rt2 .  **( 83 )**

 | **( n\* rн ) |**

По формуле ( 12 ) можно найти Р:

   x

 Р = a ( 1- cos) = a **|** 1 - **----------****| . ( 84 )**

  x2 + rt2 

 Для получения оптико-математической модели достаточно подставить формулы ( 80 ) - ( 84 ) в формулы для видеосигналов ( 73 ) ( или ( 74 ) для случая эллиптично-поляризованного излучения ).

 Вернёмся теперь к формуле ( 82 ) для азимута поляризации излучения. Как видно из этой формулы, t зависит только от y и z, а от координаты х зависимости нет. Поскольку в данной работе рассматриваются объекты, различающиеся по форме именно вдоль оси Х, а в плоскости осей Y и Z ( т.е. в кадре ) имеющие одинаковый контур, то можно сделать вывод, что значение азимута поляризации t для всех рассматриваемых здесь объектов ( конус, эллипсоид, сфера ) будет одинаковым.

 Для полной ясности необходимо установить распределение азимута поляризации по поверхности этих фигур. По формуле ( 82 ) рассмотрим некоторые конкретные случаи. Например, при z=z0 и y>y0 , t=0 при z=z0 и y< y0 , t = ;при y=y0 и z> z0, t= - /2; при y=y0 , z<z0 , t=  /2.

 Если попробовать свести эти результаты к схематичному распределению азимута поляризации излучения внутри контура с учётом того, что в случаях, не указанных в примере, азимут поляризации принимает промежуточные положения, то получается рисунок 7.

 Чтобы сформировать оптико-математическую модель для эллипсоида, воспользуемся рисунком 8 и уравнением эллипсоида в декартовой системе координат:

 x2  ( y-y0)2 ( z-z0)2

 f( x, y, z ) = **----** + **---------** + **---------** = 1,  **( 85 )**

  a2 b2 c2

 При моделировании для упрощения примем:

 b = c = R ; **( 86 )**

 a = k R, **( 87 )**

 где k - коэффициент сжатия.

 Тогда уравнение ( 85 ) примет вид:

 x2  ( y-y0)2 ( z-z0)2

 f( x, y, z ) = **--------** + **---------** + **---------** = 1,  **( 88 )**

 k2  R2 R2 R2

 Уравнение для координаты х, исходя из выражения ( 88 ), будет следующим:

 .

 x = k  R2 + rt2 .  **( 89 )**

Выражение для азимута поляризации в случае объекта типа эллипсоида, будет таким же, как для случая со сферой ( 88 ), так как азимут поляризации не зависит от координаты х:

 t = arccos [(y - y0) / rt ]. **( 90 )**

 Степень поляризации для каждого элемента разложения кадра с координатами ( у, z ) можно определить аналогично сфере из формул ( 16 ) - ( 19 ) и ( 25 ) - ( 27 ):

 .

cos= x /  x2 + k4 ( y-y0 )2+ k4 ( z-z0 )2= x /  x2 + k4 rt2 . **( 91 )**

 Степень поляризации, соответственно, равняется

 .

 P = a ( 1 - x /  x2 + k4 rt2 ) .  **( 92 )**

 Далее, по выражения ( 73 ) ( или ( 75 ), в случае эллиптичной поляризации ) можно получить модели изображений эллипсоида при азимутах фильтра = 00 и  = 450 соответственно. Причём, при к = 1 формулы для эллипсоида становятся аналогичными для сферы. Если в формулы ( 73 ) или ( 75 ) подставить к = 0.1, то это будет модель изображения диска. Во всех остальных случаях можно получить модели изображений эллипсоида с различными коэффициентами сжатия.

 2.9. Модифицированная формула моделирования

 изображения конуса.

 Рассмотрим, согласно рис. 9, уравнение конуса в декартовых координатах:

 f(x, y, z) = - ( h- x )2 / h2 + ( y - y0 )2 / R2 + ( z - z0)2 / R2 = 1, **( 93 )**

где R - радиус основания конуса;

 h - высота конуса.

 Уравнение для координаты х в случае конуса будет иметь вид:

 x = h ( 1 - rt / R) .  **( 94 )**

 Значение степени поляризации определим аналогичным образом. Для этого найдём вектора **n** и **r**t :

 **n** = - 2 ( h - x ) **i** / h2 + 2 ( y - y0) **j** / R2 + 2 ( z - z0)  **k** / R2, **rн = i. ( 95 )**

Тогда

 .

 cos = ( h - x) / [ h2  ( h-x)2 / h4+ r**н2** / R4 ] .  **( 96 )**

Так как ( h - x) / h = rt / R, то

 .

 cos = 1 /  1+ ( h/R)2  .   **( 97 )**

 Если обозначить через k = h / 2 / R, то выражение ( 97 ) примет вид:

 .

 cos = 1 /  1+ 4 k2  .   **( 98 )**

Далее, по выражениям ( 73 ) ( или ( 75 ) для эллиптично-поляризованного изучения ) с учётом ( 16 ) - ( 19 ) и ( 25 ) - ( 27 ), можно смоделировать изображения конуса при азимутах поляризационного фильтра 00 и 450, соответственно.

 2.10. Оптико-математическая модель изображения объектов

 наблюдаемых на конечном расстоянии.

 До сих пор все выводы производились при условии бесконечно удалённого объекта. Если принять, что объект наблюдается тепловизионной системой на конечном расстоянии l, то геометрия наблюдения объектов изменится, а, следовательно, изменятся и сформированные модели изображений. Для того, чтобы определить оптико-математическую модель изображения объекта типа сферы, наблюдаемого на расстоянии l, рассмотрим рис.10. В соответствии с данным рисунком видим, что угол наблюдения ’в данном случае состоит из угла  - угла наблюдения при наблюдения объекта из бесконечности и  - поправки на приближение объекта к системе:

’= +  . **( 99 )**

 Угол  для сферы определяется по формуле ( 82 ), а угол  можно определить из геометрии рис.11:

 = arctg [ rt / ( l - x)]. **( 100 )**

 Теперь весь угол наблюдения для сферы определяется по формуле:

 .

’= arccos [ x / ( x2+ rt2 )] + arctg [ rt / ( l - x)]. **( 101 )**

 Если необходимо сформировать модель поляризационного тепловизионного изображения сферы, наблюдаемой на конечном расстоянии l, то в формуле ( 84 ) для вычисления степени поляризации нужно использовать ’ по формуле ( 101 ). Геометрия наблюдения эллипсоида из ближней зоны показана на рис. 11. Если объект типа эллипсоида наблюдается тепловизионной системой на конечном расстоянии l, то угол наблюдения  в этом случае определяется аналогично формуле ( 99 ) для сферы:

’= +  .

 Для эллипсоида, угол  вычисляется по формуле ( 91 ), а поправку легко определить из геометрии рис.11:

 = arctg [ rt / ( l - x)]. **( 102 )**

Это выражение совпадает с выражением для сферы.

 Как видно из рис.12, геометрия определения угла наблюдения  для конуса также аналогична эллипсоиду и сфере, причём как всего угла, так и поправки . Таким образом, для сферы, эллипсоида и конуса, в случае наблюдения объекта на конечном расстоянии l, для вычисления степени поляризации Р нужно использовать угол наблюдения не , а ’ по формуле ( 101 ) с учётом угла  по формуле ( 100 ).

 2.11. Воспроизведение формы объекта внутри его контура.

 Как было отмечено в разделах 1 и 2, моделирование тепловизионных изображений необходимо прежде всего для распознования формы объекта внутри его контура. В связи с этим после формирования изображения должна быть решена задача воспроизведения формы объекта внутри контура его изображения. Рассмотрим один из способов решения проблемы воспроизведения формы внутри контура вдоль одной, заранее определённой линии сканирования. Необходимо и достаточно знать положение нормали **n** каждой элементарной площадки объекта, которая определяется значением угла наблюдения данной площадки объекта относительно точки наблюдения. Учитывая связь угла наблюдения  со степенью поляризации Р для каждой площадки dS, по формулам ( 72 ) можно воспроизвести форму объекта внутри его контура, используя два тепловизионных поляризационных изображения этого объекта с поляризационным фильтром при двух азимутах поляризации = 00 и  = 450 соответственно.

 Нормированные сигналы в изображении для каждой элементарной площадки объекта по формулам ( 72 ) выглядят следующим образом:

 U1н = 1 + P cos2t ;

 U2н = 1 + P sin2t .

 Решая эти два уравнения как систему, можно выразить через U1н и U2н степень и азимут поляризации:

 2  t= arctg [(U2н - 1) / ( U1н - 1 )] ; **( 103 )**

 P = ( U1н - 1 ) / cos [ arctg (U2н - 1) /(U1н - 1)] .  **( 104 )**

 Тогда угол наблюдения  можно записать в виде:

= arccos [ 1 - ( U1н - 1 ) / cos [ arctg (U2н - 1) /(U1н - 1)] ; **( 105 )**

 Поскольку конечной целью воспроизведения формы объекта внутри контура его изображения вдоль линии сканирования является определение координаты х для каждого элемента разложения кадра вдоль линии сканирования, то процесс воспроизведения формы сводится к процессу воспроизведения координаты х. Для этого обратимся к рис.13.

 Пусть АВ = drt - это приращение координаты вдоль линии сканирования;

 - угол наблюдения, определяемый через U1 и U2 по формуле ( 105 );

 **n** - нормаль к поверхности объекта в точке С объекта или для ( i+1) элемента кадра ( точке А объекта соответствует i-ый элемент кадра ). Из рис.13 видно, что при drt << 1 будет верно выражение

 dx = drt tg ,  **( 106 )**

где  = САВ. Но, что так как САВ =  - углу наблюдения при бесконечно удалённом объекте, то:

 dx = drt tg.  **( 107 )**

 В этом случае координату х в точке ( i + 1) элемента для произвольной линии сканирования можно определить по формуле:

 xi+1 = xi + dx = xi + drt tg.  **( 108 )**

Значит по формуле ( 108 ) можно воспроизвести форму объекта, причём, чем меньше будет взят шаг вдоль линии, тем точнее будет воспроизведена форма.

 2.12. Воспроизведение формы объекта,

 наблюдаемого на конечном расстояния.

 На рис.13 показаны два случая наблюдения: для бесконечно удалённого объекта и для объекта, находящего на конечном расстоянии l. Как уже отмечалось в разделе 2.9, расстояние l влияет на оптико-математическую модель изображений объектов, а значит и на воспроизведение формы объекта.

 Как видно из рис.13, в случае конечного расстояния l, угол наблюдения соответствует формуле ( 99 ):

’= +  .

 Тогда, при определении координаты х должно быть использовано выражение:

   U1н - 1  

’ = arccos | 1 - **----------------------------------------** | + arctg [( rt / ( l -x)] . **( 109 )**

  cos [ arctg (U2н - 1) /(U1н - 1)]

 В остальном вывод формулы для х идентичен выводу при бесконечно удалённом объекте.

 2.13. Воспроизведение формы объекта

 с учётом эллиптичности поляризации его излучения.

 Воспроизведение формы в этом случае должно начинаться с формул ( 75 ) для U1н и U2н вида:

 U1н = 1 + P cos2cos2t ;

 U2 н = 1 + P cos2sin2t .

 Выразим степень, азимут и эллиптичность поляризации излучения через видеосигналы:

= arctg[( 1 - P ) / ( 1 + P )];  **( 110 )**

 2  t = arctg (U2н - 1) /(U1н - 1) ;  **( 111 )**

 U1н - 1

 P  cos 2  = **-----------------------------------------** . **( 112 )**

 cos [ arctg (U2н - 1) /(U1н - 1)]

 Если обозначить

 U1н - 1

 **--------------------------------------** = А ,

 cos [ arctg (U2н - 1) /(U1н - 1)]

то Pcos 2=А ;

 1 - tg2 1 - [( 1 - P ) / ( 1 + P )]2 4 P

 cos 2= **----------------** = **------------------------------------** = **--------------**  ;

 1 + tg21 + [( 1 - P ) / ( 1 + P )]2 2(1+ P2)

 P 4 P /2(1+ P2)] = A ;

  .

 **/** A **/** U1н - 1

P = **/** **--------**  = **/** **----------------------------------------------------- . ( 113 )**

  2 - A  2 cos [ arctg (U2н - 1) /(U1н - 1)] - (U1н - 1)

 Тогда выражение ( 113 ) должно быть использовано в качестве формулы для степени поляризации эллиптично-поляризованного излучения.

 Далее процесс воспроизведения координаты х для получения формы объекта полностью совпадает с выводом для частично линейно-поляризованного излучения.

 2.14. Среднее значение степени поляризации

 по поверхности объектов.

 Среднее значение степени поляризации также можно использовать для распознавания формы объектов как один из признаков подтверждения ” относится ли распознаваемый объект по форме к той или иной группе объектов“, т.е. для качественного определения формы.

 Докажем это. Для этого обратимся к формуле:

 P = a ( 1 - cos) ,

где  - угол наблюдения или угол наклона элементарной площадки по отношению к наблюдателю. Отсюда очевидно, что элементарные площадки таких объектов, как конус и эллипсоид ( со всеми частными случаями ) имеют разные закономерности углового расположения элементарных площадок по всей поверхности, а значит и средние значения степени поляризации по всей поверхности у таких объектов будут различаться.

 Среднее значение степени поляризации легко определить по формуле:

P  dz  dy

Pcр = ( z, y) . = a ( 1 - cos)  dz  dy/   R2 **( 114 )**

   R2 (z, y)

 В связи с вышеизложенным, среднее значение степени поляризации можно использовать в качестве дополнительного критерия распознования объектов.

 2.15. Результаты моделирования изображения объектов

 по модифицированной методике.

 Модели поляризационных изображений объектов по видеосигналам U1 соответствуют поляризационной термограмме, которая формируется при азимуте поляризатора = 00, а модель изображения по видеосигналам U2 соответствует термограмме при  = 450.

 Анализ моделей поляризационных термограмм при = 00 для эллипсоидов с различным коэффициентом сжатия к показал, что изменение к сильно сказывается на распределении значения видеосигналов внутри контура объекта. Кроме того, как и следовало ожидать, вдоль горизонтальной линии сканирования значения U1 изменяются плавно. Для сравнения можно отметить, что в модели поляризационных термограмм конуса при = 00, вдоль горизонтальной линии сканирования значения U1 не изменяются. Это объясняется тем, что вдоль линии сканирования у конуса имеется только один угол между нормалью к элементам поверхности объекта и направлением наблюдения.

 Анализ модели поляризационных термограмм, полученных по видеосигналам U2 для всех объектов показал, что эти термограммы фактически получаются поворотом термограмм по видеосигналам U1 на 450 против часовой стрелки. Физически это легко объясняется тем, что видеосигналы U1 моделируют термограммы при азимуте поляризации= 00, а видеосигналы U2 моделируют поляризационные изображения объектов при азимуте поляризации  = 450.

 2.16. Моделирование Фурье-спектров

 поляризационных тепловизионных изображений объектов.

 Согласно теории Фурье-спектров излучателей простой формы [ 2, 9 ]. Их амплитудная и фазовая характеристики зависят как от формы контура объекта-излучателя, так и от распределения яркости по его поверхности. Так как распределение степени поляризации теплового излучения объектов зависит от их формы внутри контура, то представляет интерес задача моделирования Фурье-спектров поляризационного тепловизионных изображений ( ПТИ ). В данной работе Фурье-спектры ПТИ получились по следующей формуле:

 **** - 2  j ( x +  y)

P(, ) = P( x, y) e  dx dy.  **( 115 )**



Здесь

 P( x, y) - распределение степени поляризации теплового излучения по поверхности объекта;

 ,  - пространственные частоты, соответственно, по координате х и y.

 Анализ амплитуд всех гармоник Фурье-спектров ПТИ показал, что их абсолютные значения существенно зависят от коэффициента сжатия к всех объектов. При этом наблюдается следующая закономерность - чем больше коэффициент сжатия к, тем больше амплитуды гармоник.